



Version 2022.1

For Power Electronics & Motor control

User's Manual

© Altair Engineering, Inc.

Mywayプラス株式会社

Altair® PSIM™ User's Guide

Version 2022.1

Release1

August 2022

Copyright © 2001-2022 Powersim, LLC, Myway Plus Corporation

Copyright © 2022 Altair Engineering Inc., Myway Plus Corporation

All rights reserved. No part of this manual or of this manual may be photocopied or reproduced in any form or by any means without the written permission of Altair Engineering Inc. and Myway Plus Corporation.

Disclaimer

Altair Engineering Inc. ("Altair") and Myway Plus Corporation (Myway) make no representation or warranty with respect to the adequacy or accuracy of this documentation or the software which it describes. In no event will Altair and Myway or their direct or indirect suppliers be liable for any damages whatsoever including, but not limited to, direct, indirect, incidental, or consequential damages of any character including, without limitation, loss of business profits, data, business information, or any and all other commercial damages or losses, or for any damages in excess of the list price for the license to the software and documentation.

お問い合わせ先

Myway プラス株式会社

〒222-0033 神奈川県横浜市港北区新横浜 1-28-8 Myway テクノタワー

Email: sales@myway.co.jp

URL: <https://www.myway.co.jp/>

目次

第 1 章	10
1.1 はじめに	10
1.2 回路構成	13
1.3 動作環境	13
1.4 PSIM のインストール	13
1.5 シミュレーション例	14
1.6 シミュレーション制御	14
1.6.1 [PSIM]タブ	14
1.6.2 [SPICE]タブ	15
1.6.3 [SimCoder]タブ	17
1.7 素子のパラメータの仕様および形式	18
第 2 章 PSIM による回路図入力	21
2.1 PSIM 環境	21
2.2 回路図モデルの作成	24
2.3 ファイルメニュー	25
2.4 編集メニュー	26
2.5 表示メニュー	28
2.6 デザインスイートメニュー	29
2.7 サブ回路メニュー	29
2.7.1 サブ回路作成 –メイン回路上での作業	31
2.7.2 サブ回路作成 –サブ回路内での作業	31
2.7.3 メイン回路でのサブ回路の接続	32
2.7.4 サブ回路のその他の機能	33
2.8 素子メニュー	35
2.9 シミュレートメニュー	35
2.10 スクリプトメニュー	39
2.11 解析メニュー	39
2.12 オプションメニュー	39
2.12.1 設定オプション	40
2.12.2 パス設定オプション	43
2.12.3 ツールバーとキーボードのカスタマイズ	44
2.13 ユーティリティメニュー	46
2.14 ウィンドウメニュー	47
2.15 ヘルプメニュー	47
2.16 PSIM ライブラリの管理	47
2.16.1 二次イメージの作成	49
2.16.2 ライブラリへ新しいサブ回路要素の追加	49
2.16.3 ライブラリへ DLL 素子の追加	51
2.17 シンボルライブラリの作成	53
第 3 章 SIMVIEW による波形処理	56
3.1 ファイルメニュー	56
3.2 編集メニュー	57

3.3	表示メニュー	57
3.4	軸メニュー	58
3.4.1	X 軸の設定	58
3.4.2	Y 軸の設定	58
3.4.3	X 軸変数	59
3.5	スクリーンメニュー	59
3.5.1	スクリーン機能ダイアログ・ボックス	60
3.5.2	ベクトル図の描画	61
3.5.3	オンスクリーン操作	64
3.6	測定メニュー	64
3.7	SimView の解析メニュー	65
3.8	ラベルメニュー	66
3.9	オプションメニュー	66
3.10	データの書き出し	68
第 4 章	電気回路素子	69
4.1	抵抗-インダクタ-キャパシタ(Resistor-Inductor-Capacitor Branches)	69
4.1.1	抵抗 (Individual Resistor)	69
4.1.2	インダクタ (Individual Inductor)	70
4.1.3	キャパシタ(Capacitors)	71
4.1.4	複合 RLC ブランチ(Combined R-L-C Branch)	71
4.1.5	レオスタット(Rheostat).....	72
4.1.6	可飽和リアクトル(Saturable Inductor)	72
4.1.7	可飽和リアクトル(2)(Saturable Inductor(2))	73
4.1.8	三相抵抗、インダクタ、キャパシタ、複合ブランチ(Three-Phase R-L-C and Combination Branches)	74
4.1.9	相互結合インダクタ(Coupled Inductors).....	74
4.1.10	コモンモードチョーク (Common-Mode Choke)	76
4.1.11	バスバー (Bus Bar)	76
4.1.12	DC 負荷 (定電源) (DC Load (constant-power))	77
4.1.13	三相 P/Q 制御負荷 (3-Phase P/Q Controlled Load)	77
4.1.14	三相 AC ケーブル(3-Phase AC Cable).....	78
4.1.15	同軸ケーブル(Coax Cable)	79
4.1.16	非線形素子(Nonlinear Elements)	80
4.2	スイッチ素子(Switching Devices).....	81
4.2.1	プレビルトスイッチモジュール(Pre-Built Switch Modules).....	82
4.2.2	ダイオード(Diode)と LED	88
4.2.3	MOSFET 及び MOSFET(Rds(on))	89
4.2.4	IGBT	93
4.2.5	逆阻止 IGBT(IGBT-RB)	94
4.2.6	nnp 及び pnp トランジスタ (nnp and pnp Transistors)	95
4.2.7	ツェナーダイオード、ダイアック(Zener Diode and DIAC)	98
4.2.8	サイリスタ・トライアック(Thyristor and TRIAC).....	99
4.2.9	ゲートターンオフサイリスタ(GTO)	100
4.2.10	双方向スイッチ(Bi-Directional Switches).....	100
4.2.11	スイッチ・ゲート信号ブロック(Gating Blocks)	101

4.3	変圧器(Transformers)	102
4.3.1	理想変圧器(Ideal Transformer)	102
4.3.2	単相変圧器(Single-Phase Transformers)	102
4.3.3	三相変圧器 (3-Phase Transformers)	104
4.3.4	三相変圧器(可飽和)(Three-Phase Transformer with Saturation)	107
4.4	磁気要素(Magnetic Elements)	108
4.4.1	巻き線(Winding)	108
4.4.2	漏れ磁束経路(Leakage Flux Path)	109
4.4.3	エアギャップ(Air Gap)	109
4.4.4	線形コア(Linear Core)	110
4.4.5	可飽和コア(Saturable Core)	111
4.5	その他素子 (Other Elements)	112
4.5.1	オペアンプ(Operational Amplifier)	112
4.5.2	オプトカプラ(Opto-Coupler)	114
4.5.3	TL431 シャントレギュレータ(TL431 Shunt Regulator)	115
4.5.4	dv/dt ブロック(dv/dt Block)	115
4.5.5	リレー(Relays)	116
4.6	モータ駆動モジュール(Motor Drive Module)	116
4.6.1	機械システムでの「基準方向」 (Reference Direction of Mechanical Systems)	117
4.6.2	誘導機(Induction Machines)	119
4.6.3	直流機 (DC Machine)	123
4.6.4	ブラシレス直流機(Brushless DC Machine)	125
4.6.5	他励式同期機(Synchronous Machine with External Excitation)	129
4.6.6	永久磁石同期機 (Permanent Magnet Synchronous Machine (PMSM))	132
4.6.7	スイッチトリラクタンスモータ (Switched Reluctance Machine (SRM))	139
4.6.8	モータ制御ブロック (Motor Control Blocks)	143
4.7	MagCoupler モジュール (MagCoupler Module)	146
4.7.1	MagCoupler-DL ブロック (MagCoupler-DL Block)	147
4.7.2	MagCoupler ブロック (MagCoupler Block)	148
4.8	MagCoupler-RT モジュール (MagCoupler-RT Module)	152
4.8.1	汎用 RT ブロック	152
4.8.2	その他の RT ブロック	153
4.9	機械素子及びセンサ (Mechanical Elements and Sensors)	157
4.9.1	機械負荷 (Mechanical Loads)	157
4.9.2	機械系－電気系インターフェースブロック (Mechanical-Electrical Interface Block)	159
4.9.3	メカニカルカップリングブロック(Mechanical Coupling Block)	160
4.9.4	ギアボックス (Gear Box)	160
4.9.5	速度・トルクセンサ (Speed/Torque Sensors)	161
4.9.6	位置センサ (Position Sensors)	162
4.10	サーマルモジュール (Thermal Module)	165
4.10.1	ダイオードサーマルモデル (Diode Thermal Model)	165
4.10.2	MOSFET サーマルモデル (MOSFET Thermal Model)	169
4.10.3	IGBT サーマルモデル(IGBT Thermal Model)	177
4.10.4	RB-IGBT サーマルモデル(RB-IGBT Thermal Model)	181

4.10.5	インダクタサーマルモジュール (Inductor Thermal Module).....	184
4.10.6	デバイスデータベースエディタ (Device Database Editor).....	186
4.10.7	データベースにデバイスを追加 (Adding a Switching Device to Database)....	187
4.11	再生可能エネルギーモジュール (Renewable Energy Models).....	193
4.11.1	太陽電池モジュール (Solar Modules).....	194
4.11.2	風車 (Wind Turbine).....	199
4.11.3	バッテリーモデル (Battery Models).....	201
4.11.4	ウルトラキャパシタモデル (Ultracapacitor Model).....	209
4.12	EMI デザインスイート (EMI Design Suite).....	209
4.12.1	EMI フィルタ (EMI Filter).....	209
4.12.2	ラインインピーダンス安定化ネットワーク (CISPR22/FCC).....	210
4.12.3	信号アナライザ (Signal Analyzer).....	211
4.12.4	コモンモード容量ブロック (Common-Mode Capacitor Block).....	211
4.12.5	グランドプレーン.....	212
第 5 章	制御回路素子	213
5.1	よく使われる機能ブロック (Often-Used Control Function Blocks).....	213
5.1.1	PID 制御器 (PID Controllers).....	213
5.1.2	加算器 (Summer).....	218
5.1.3	比較器 (Comparator).....	219
5.1.4	リミッタ (Limiters).....	220
5.2	フィルター (Filters).....	220
5.3	数値演算関数ブロック (Computational Function Blocks).....	221
5.3.1	乗算器と除算器 (Multiplier and Divider).....	221
5.3.2	三角関数ブロック (Trigonometric Functions).....	221
5.3.3	指数/累乗/対数ブロック (Exponential/ Power/ Logarithmic Function).....	222
5.3.4	平方根ブロック (Square-Root).....	222
5.3.5	二乗平均平方根ブロック (Root-Mean-Square).....	223
5.3.6	絶対値ブロック、符号関数ブロック (Absolute and Sign Function).....	223
5.3.7	最大/最小機能ブロック (Maximum/Minimum Function).....	223
5.3.8	MOD 機能ブロック (MOD Function Block).....	224
5.4	その他の関数ブロック (Other Function Blocks).....	224
5.4.1	サンプル・ホールド・ブロック (Sample/Hold Block).....	224
5.4.2	ルックアップテーブルブロック (Lookup Table ((Trapezoidal and Square) Blocks).....	225
5.4.3	高速フーリエ変換 (Fast Fourier Transform).....	225
5.4.4	高調波歪みブロック (THD Block).....	226
5.4.5	S-Domain Transfer Function.....	227
5.4.6	時間遅れブロック (Time Delay blocks).....	228
5.4.7	丸め関数ブロック (Round-Off Block).....	229
5.4.8	変化率リミッタ ((dv/dt) Limiter).....	229
5.4.9	マルチプレクサ (Multiplexer).....	230
5.4.10	空間ベクトル PWM ブロック (Space Vector PWM).....	231
5.4.11	不連続 PWM (Discontinuous PWM).....	232
5.4.12	組み込みソフトウェアブロック (Embedded Software Block).....	232
5.5	デジタル素子 (Logic Components).....	233

5.5.1	論理ゲート (Logic Gates)	233
5.5.2	セット・リセット・フリップフロップ (Set-Reset Flip-Flop)	233
5.5.3	J-K フリップフロップ (J-K Flip-Flop)	234
5.5.4	D フリップフロップ (D Flip-Flops)	234
5.5.5	単安定マルチバイブレータ (Monostable Multivibrator)	235
5.5.6	論理信号用時間遅れブロック (Time Delay (Logic))	235
5.5.7	ビットシフト (Bit Shift)	235
5.5.8	パルス幅カウンタ (Pulse Width Counter)	236
5.5.9	Up/Down カウンタ (Up/Down Counter)	236
5.5.10	A/D および D/A 変換器 (A/D and D/A Converters)	237
5.6	デジタル制御モジュール (Digital Control Module)	237
5.6.1	モータ制御ブロック (Motor Control Blocks)	237
5.6.2	PLL 素子 (PLL Blocks)	240
5.6.3	ゼロ次ホールド (Zero-Order Hold)	242
5.6.4	単位遅れブロック (Unit Delay)	243
5.6.5	z 領域伝達関数ブロック (z-Domain Transfer Function Block)	244
5.6.6	離散化ブロック (Quantization Blocks)	250
5.6.7	循環バッファ (Circular Buffers)	252
5.6.8	畳み込みブロック (Convolution Block)	253
5.6.9	メモリ読み出しブロック (Memory Read Block)	253
5.6.10	データ配列 (Data Array)	254
5.6.11	スタック (Stack)	254
5.6.12	多重サンプリングシステム (Multi-Rate Sampling System)	254
5.7	SimCoupler と FMI モジュール (SimCoupler Module and FMI Module)	255
5.7.1	PSIM と Simulink での設定 (Set-up in PSIM and Simulink)	256
5.7.2	Simulink における Solver Type とタイムステップの設定 (Solver Type and Time Step Selection in Simulink)	258
5.7.3	PSIM から Simulink へのパラメータの受け渡し (Passing Parameters from Simulink to PSIM)	260
5.8	PIL モジュール	261
5.8.1	PIL ブロック (PIL Block)	261
5.8.2	PIL ブロック (InstaSPIM F2806x) (PIL Block (InstaSPIN F2806x))	261
5.8.3	InstaSPIN 設定素子 (F2806x)	262
5.9	モータ制御/HEV Design Suite ブロック (Motor Control/HEV Design Suite Blocks)	263
5.9.1	速度制御 (IPM)	263
5.9.2	速度制御 (SPM)	264
5.9.3	速度制御 (非線形 IPM)	265
5.9.4	トルク制御 (IPM)	266
5.9.5	トルク制御 (SPM)	267
5.9.6	トルク制御 (非線形 IPM) Torque Control (nonlinear IPM)	268
5.9.7	電圧制御 (PMSM) (Voltage Control (PMSM))	269
5.9.8	DC-DC 充電制御 (DC-DC Charging Control)	270
5.9.9	DC-DC 放電制御 (DC-DC Discharging Control)	271
5.9.10	DC-DC 回生制御 (DC-DC Regeneration Control)	271
5.10	PLL ブロック (PLL Blocks)	272
5.10.1	一相 PLL (1-ph PLL)	272

5.10.2	三相 PLL (3-ph PLL)	273
第 6 章	その他の素子	275
6.1	スイッチ制御器 (Switch Controllers)	275
6.1.1	オンオフ制御器 (On-Off Switch Controller)	275
6.1.2	オンオフ制御器(マルチレベル) (On-Off Switch Controller(Multi-Level))	275
6.1.3	点弧角制御器(Alpha Controller)	276
6.1.4	PWM ルックアップテーブル制御器 (PWM Lookup Table Controller)	277
6.2	PWM ブロック(PWM Blocks)	278
6.2.1	キャリア PWM コントローラ (Carrier PWM Controller)	278
6.2.2	方形波制御 (可変周波数) Square Wave Controller (Variable Frequency)	280
6.2.3	キャリア PWM コントローラ (z ドメイン) (Carrier PWM Controller (z-domain))	280
6.2.4	方形波制御 (z ドメイン) Square Wave Controller (z-domain)	281
6.2.5	位相シフト制御 (z ドメイン) Square Wave Controller (z-domain)	282
6.2.6	空間ベクトル PWM(2-レベル)(z-ドメイン)(Space Vector PWM(2-level)(z-domain))	283
6.2.7	空間ベクトル PWM(3-レベル)(z-ドメイン)(Space Vector PWM(3-level)(z-domain))	284
6.3	電圧・電流センサ (Sensors)	284
6.4	プローブとメータ、スコープ (Probes, Meters, and Scopes)	285
6.4.1	プローブとメータ (Probes and Meters)	285
6.4.2	電圧/電流スコープ (Voltage/Current Scopes)	287
6.5	ファンクションブロック (Function Blocks)	289
6.5.1	制御・パワー変換ブロック (Control-Power Interface Block)	289
6.5.2	変換ブロック (Transformation Blocks)	290
6.5.3	ルックアップテーブル (Lookup Tables)	294
6.5.4	数式関数ブロック (Math Function Blocks)	297
6.5.5	DLL ブロック (DLL Blocks)	298
6.5.6	C ブロック (C Block)	300
6.5.7	シンプル C ブロック (Simplified C Block)	302
6.6	IC モデル (IC Models)	303
6.6.1	PWM IC	304
6.6.2	ドライバ IC (Driver IC)	305
6.6.3	555 タイマ (555 Timer)	305
6.7	初期値 (Initial Values)	306
6.8	パラメータファイル (Parameter File)	306
6.9	周波数特性解析(AC Analysis)	309
6.9.1	AC スイーププローブ (AC Sweep Probes)	311
6.9.2	AC スイープ(AC Sweep)	312
6.9.3	AC スイープ(1) (AC Sweep (1))	312
6.9.4	AC スイープ(2) (AC Sweep (2))	313
6.9.5	AC スイープ複数正弦波 (AC Sweep Multisine)	314
6.10	パラメータスイープ (Parameter Sweep)	315
第 7 章	電圧源・電流源	316

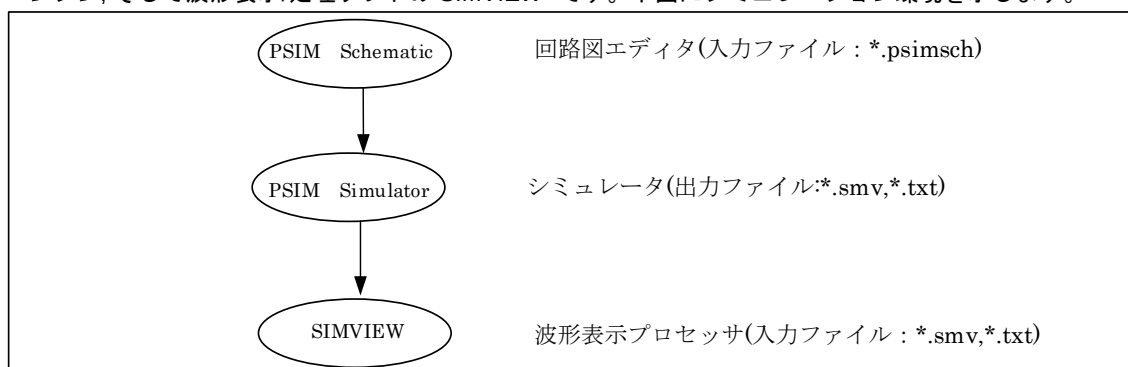
7.1	定数 (Constant)	316
7.2	時間 (Time)	316
7.3	グラウンド (Ground)	316
7.4	電圧源と電流源	316
7.4.1	直流電源 (DC Source)	316
7.4.2	正弦波電源 (Sinusoidal Source)	317
7.4.3	方形波電源 (Square-Wave Source)	318
7.4.4	三角波電源/のこぎり波電源 (Triangular/Sawtooth Sources)	319
7.4.5	ステップ電源 (Step Sources)	319
7.4.6	区分線形電源 (Piecewise Linear Source)	320
7.4.7	ランダム電源 (Random Source)	321
7.4.8	数式関数電源 (Math Function Source)	322
7.4.9	Grounded Source Multiple	322
7.4.10	制御付き電圧源・電流源 (Voltage/Current-Controlled Sources)	322
7.4.11	非線形電圧制御電源 (Nonlinear Voltage-Controlled Sources)	323
第 8 章	エラー及び全般に関する注意	325
8.1	全般に関する注意	325
8.1.1	タイムステップ	325
8.1.2	論理回路の伝搬遅れ	325
8.1.3	パワー回路と制御回路のインターフェース	325
8.1.4	FFT による高調波解析	326
8.2	デバッグ	326
8.3	エラーおよび警告メッセージ	327

第 1 章

1.1 はじめに

PSIM¹ はパワーエレクトロニクスおよびモータ制御のために開発されたシミュレーション・パッケージです。PSIM は高速シミュレーション、使いやすいユーザインターフェース、波形解析機能などにより、パワーエレクトロニクスの解析、制御系設計、モータドライブの研究などに優れたシミュレーション環境を提供します。

PSIM パッケージは 4 つのソフトウェアから構成されています。PSIM 回路図エディタ、シミュレーションエンジン、そして波形表示/処理ソフトの SIMVIEW² です。下図にシミュレーション環境を示します。



PSIM のライブラリは、要素を以下のタイプに分類しています。

Power:	パワー回路用の素子。
Control:	制御回路用の素子。
Other:	スイッチコントローラやセンサーのようなパワーもしくは制御回路へ接続する素子。
Sources:	電圧もしくは電流源。
SPICE:	SPICE シミュレーション用の素子。
Evenet Control:	ある状態から別の状態への遷移を定義する要素。
SimCoder:	各種ハードウェアターゲット PIE などの BIOS を自動コード化するための要素を生成します。

PSIM には本体(Professional)の他に、以下のアドオン・オプションが用意されています。

Motor Drive:	モータドライブシステムの解析のためにモータモデルと機械負荷モデルが用意されています。
Digital Control:	ゼロ次ホールドなどの離散要素、z-領域伝達関数、離散化ブロックを提供し、デジタル制御系を解析できます。
Thermal:	半導体デバイスの損失を計算する機能を提供します。
EMI Design Suite:	EMI フィルタ設計用のテンプレートを提供します。
HEV Design Suite:	

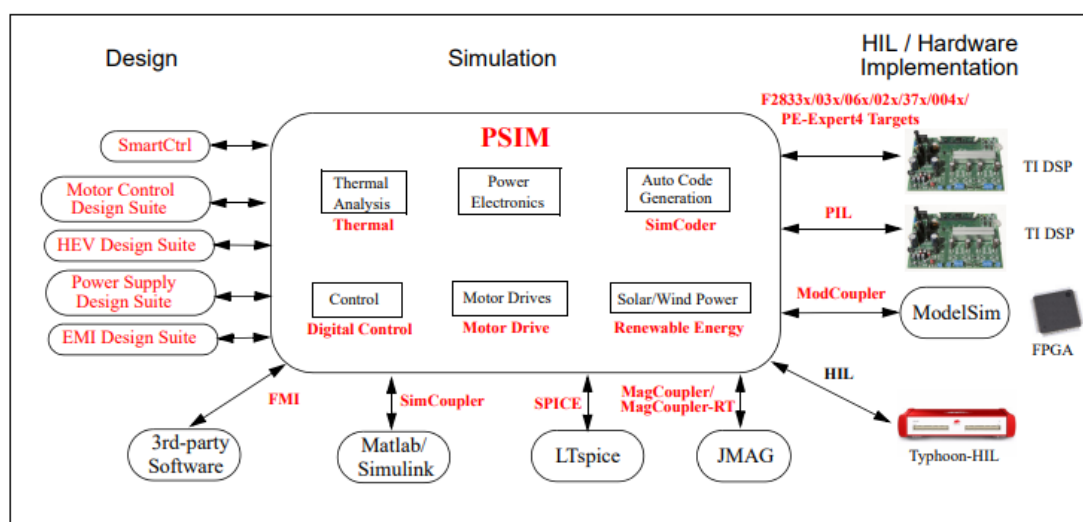
Renewable Energy:	ハイブリッド電気自動車のパワートレインシステムデザインのためのテンプレートを提供します。 再生可能エネルギーデバイスのシミュレーション用の太陽電池、風車、バッテリーモデルを提供します。
Motor Control Design Suite:	誘導電動機および線形/非線形 PMSM のためのテンプレートを提供し、共振型 LLC コンバータの設計用のテンプレートを提供します。
Power Supply Design Suite:	ます。
SimCoupler:	SimCoupler モジュールは PSIM と Matlab/Simulink ³ を同時に使ったシミュレーションを行うためのインターフェースを提供します。
SPICE:	LTspice ⁴ へのリンク機能を提供します。
MagCoupler:	PSIM と電磁気分野の解析ソフトウェアである JMAG ⁵ と連成シミュレーションするためのインターフェースを提供します。
MagCoupler-RT:	PSIM と JMAG-RT ⁵ のデータファイル間を結合します。
ModCoupler⁶:	PSIM と ModelSim ⁷ 間の連成シミュレーションのためのインターフェースを提供します。インターフェースには、二つのバージョンがあります。一つは、VHDL コードをサポートする ModCoupler-VHDL です。もう一つは、Verilog コードをサポートする ModCoupler-Verilog です。
SimCoder² :	自動コード生成機能を提供します。
F2833x Target:	TI F2833x シリーズ DSP 用の自動コード生成機能を提供します。
F2803x Target:	TI F2803x シリーズ DSP 用の自動コード生成機能を提供します。
F2802x Target:	TI F2802x シリーズ DSP 用の自動コード生成機能を提供します。
F2806x Target:	TI F2806x シリーズ DSP 用の自動コード生成機能を提供します。
F2837x Target:	TI F2837x シリーズ DSP 用の自動コード生成機能を提供します。
F28004x Target:	TI F28004x シリーズ DSP 用の自動コード生成機能を提供します。
PE-Expert4 Target:	PE-Expert4 (Myway 社製) ハードウェアプラットフォーム用の自動コード生成機能を提供します。
PIL:	PIL シミュレーションのための PSIM と TI の DSP ハードウェアボードとの間のインターフェースです。TI の InstaSPIN モータ制御アルゴリズムをサポートするための機能ブロックを含みます。

また、PSIM は制御ループ設計用のソフトウェア SmartCtrl⁸ ともリンクすることができます。SmartCtrl は、特に電力コンバータアプリケーション用にデザインされています。SmartCtrl に関する詳細な情報は、SmartCtrl のユーザズガイドを参照してください。

PSIM には、電力段を Typhoon HIL の Hardware-In-the-Loop HIL シミュレーション用のリアルタイムシミュレータにエクスポートする機能もあります。詳細については、関連ドキュメントを参照してください。

豊富な製品ラインアップにより、Altair はデザインからシミュレーション、ハードウェアの実装に至るまでの完全なプラットフォームを提供します。

全体の環境を次図に示します。



本マニュアルは、PSIM とアドオン・モジュールについて解説していますが、以下のアドオン・モジュールについては対象外であり、それぞれ個別のマニュアルを参照してください。

- EMI Design Suite については、「Tutorial-EMI Desitn Suite」で解説しています。
- HEV Design Suite については、「Tutorial-HEV Design Suite」で解説しています。
- Motor Control Design Suite については、「Tutorial-Motor Control Design Suite」、「Tutorial-PMSM drive with sensorless control」で解説しています。
- Power Supply Design Suite については、「Tutorial-ResonantLLC Conveter Design Using Power Design Suite」で解説しています。
- Motor identification、InstaSPIN、sensorless motor drives については、「Tutorial-Motor parameter identification with PSIM」「Tutorial-Simulation and code generation of TI InstaSPIN using DRV8305 EVM」で解説しています。
- SPICE モジュールについては、「SPICE User Manual」で解説しています。
- SimCoder モジュールと関連するハードウェアの使用については、「SimCoder User Manual」で解説しています。
- PIL モジュールについては、「Tutorial-Processor-In-the-Loop Simulation」で解説しています。

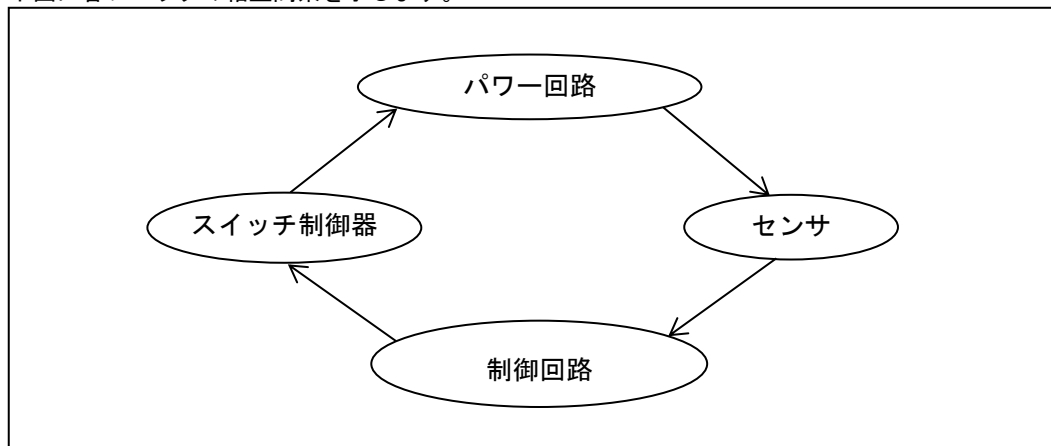
本マニュアルの構成を以下に示します。

第 1 章	回路の構成法、必要な動作環境、および素子のパラメータの仕様について解説します。
第 2 章	PSIM 環境および回路の作成方法について解説します。
第 3 章	SIMVIEW によるシミュレーション結果の表示および解析方法について解説します。
第 4 章～第 7 章	PSIM ライブラリの素子について解説します。
第 8 章	エラー・警告メッセージについてまとめてあります。

1. PSIM は、Altair Engineering Inc.の登録商標です。
2. SIMVIEW と SimCoder は Altair Engineering Inc.の商標であり著作権で保護されています。(2022)
3. Matlab および Simulink は、MathWorks 社の登録商標です。
4. LTspice は Analog Devices 社の製品であり著作権で保護されています。(1998-2022)
5. JMAG および JMAG-RT は、JSOL 社の製品であり著作権で保護されています。(1997-2022)
6. ModCoupler は、マドリード・カルロス 3 世大学で開発されたものであり、著作権で保護されています。(2011-2022)
7. ModelSim は、Mentor Graphics 社の登録商標です。
8. SmartCtrl は Power Smart Control 社の製品であり著作権で保護されています。(2015-2022)

1.2 回路構成

PSIM の回路はパワー回路、制御回路、センサ、スイッチ制御の 4 つのブロックで構成されます。下図に各ブロックの相互間系を示します。



パワー回路はスイッチング素子、RLC 回路、変圧器、および相互結合インダクタなどから構成されます。制御回路は s 領域あるいは z 領域の伝達関数のブロック線図で表現されます。また、制御回路では、アナログ素子(乗算器や除算器など、非線形素子を含む)およびデジタル素子(論理ゲートおよびフリップフロップ)を使用することができます。センサはパワー回路の電圧・電流値を計測します。これらの計測値を制御回路ブロックに渡すこともできます。制御回路で生成されたゲート制御信号はスイッチ制御ブロックを経て、パワー回路のスイッチング素子に送られます。

1.3 動作環境

PSIM は Microsoft Windows10 以上の OS で動作し 1GB 以上のメインメモリ空き容量が必要です。

1.4 PSIM のインストール

PSIM のインストール手順は別冊 PSIM Install Manual を参照ください。
PSIM フォルダには、以下ファイルが格納されます。

PSIM.exe	PSIM 回路図エディタ
SIMVIEW.exe	PSIM 波形処理プログラム
PcdEditor.exe	デバイスデータベースエディタ
SetSimPath.exe	SimCoupler モジュールのパス設定プログラム

PSIM で使用するファイルフォーマットは以下の通りです。

*.psimsch	回路図ファイル
*.psimpjt	プロジェクトファイル
*.schpack	パッケージファイル
*.lib	ライブラリファイル
*.fra	AC スイープ解析出力ファイル(テキスト)
*.dev	デバイスデータベースファイル
*.txt	テキスト形式のシミュレーション結果出力ファイル
*.smv	バイナリ形式のシミュレーション結果出力ファイル

*.net; *.cir

SPICE ネットリストファイル

1.5 シミュレーション例

シミュレーションの実行例として、サンプル回路"buck.psimsch"を実行する場合の手順を説明します。
"buck.psimsch"ファイルは、フォルダ"examples/dc-dc"に保存されています。

- PSIM を起動します。
 - **ファイル** » **範例を開く** » **dc-dc** フォルダから、ファイル"buck.psimsch"を開きます。
 - **シミュレート** » **PSIM シミュレーション実行**を選択し、シミュレーションを実行します。シミュレーション結果は"buck.smv"に保存されます。
 - **オプションメニュー**で **SIMVIEW 自動実行** がチェックされている場合は、SIMVIEW が自動的に起動します。SIMVIEW で表示する波形を選択してください。
- SIMVIEW 自動実行** のオプションがチェックされていない場合は、**シミュレート** » **SIMVIEW 実行**を選択し、SIMVIEW を起動してください。

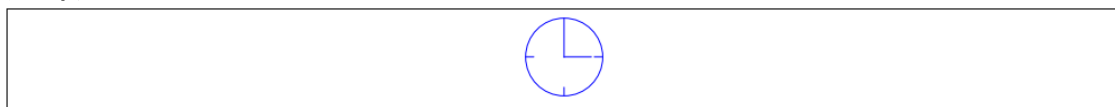
新しいユーザーが PSIM の環境と機能をすぐに理解できるように、ビデオチュートリアルを利用できます。これらのビデオチュートリアルは、PSIM で参照およびアクセスできます。ヘルプメニューから、**ビデオチュートリアル**>>**概要とスタートガイド**を選択します。

1.6 シミュレーション制御

シミュレート制御の素子では、シミュレーションパラメータ(タイムステップ、合計時間、プリントタイム等)を設定します。

シミュレート » **シミュレーション制御**を選択すると、シミュレート制御の素子を配置することができます。シミュレーション制御素子は、下図のような時計のイメージです。

シンボル



シミュレーション制御の機能は、以下のタブに分類されています。

[PSIM]	PSIM シミュレーションのための基本的なパラメータを設定します。
[SPICE]	SPICE シミュレーションのための解析タイプとパラメータを設定します。 詳細は、“SPICE ユーザーマニュアル”を参照してください。
[SimCoder]	SimCoder 機能のためのハードウェアターゲットを設定します。 詳細は、“SimCoder ユーザーマニュアル”を参照してください。
[カラー]	シミュレーション制御の素子イメージの色を変更します。

1.6.1 [PSIM]タブ

ソルバータイプ	固定ステップ：シミュレーション全体を通して固定ステップサイズが使用されます。 可変ステップ（デュアル）：2つのステップサイズが使用されます。ほとんどの場合、大きなステップサイズが使用されますが、スイッチが位置を変更するとき、または狭いパルスがある場合は、小さなステップサイズが使用されます。
タイムステップ	シミュレーションのタイムステップです。単位は「秒」です。

タイムステップ比	タイムステップ（大きいステップサイズ）と小さいステップサイズの比率。
総時間	シミュレーションを終了する時間を設定します。単位は「秒」です。
フリーラン	フリーランチェックボックスがチェックされていない場合、総時間で設定した時間まで計算が進んだところで、シミュレーションが終了します。 チェックされている場合、フリーランモードでシミュレーションが実行され、停止操作をするまでシミュレーションを継続します。 フリーランモードでは、電圧/電流スコープを使用し、シミュレーション中に電圧や電流の値を観測することができます。
表示タイム	シミュレーション結果の出力ファイルへの保存を始める時刻です。この時刻より前のシミュレーション結果は保存されません。
表示ステップ	結果保存の周期です。Print Step = 1 のとき、すべてのデータが出力ファイルに保存されます。Print Step = 10 とすると、10 回に 1 度だけ結果が保存されます。この設定により、出力ファイルの大きさを制限することができます。
ロードフラグ	LOAD 機能のフラグです。Load Flag = 1 のとき、前回のシミュレーション結果をファイル(拡張子.ssf)から初期状態として読み込みます。
保存グラフ	SAVE 機能のフラグです。Save Flag = 1 のとき、現在のシミュレーションが終了した時点の数値をファイル(拡張子.ssf)に保存します。
R_switch_on	スイッチのオン抵抗のデフォルト値。単位は「オーム」です。
R_switch_off	スイッチのオフ抵抗のデフォルト値。単位は「オーム」です。

PSIM では、シミュレーションの実行中にタイムステップを変更することはできません。正確な結果を得るために、タイムステップを適切に選ぶ必要があります。適切なタイムステップは、スイッチの動作時間、パルス・波形の幅、過渡現象の時定数、などにより決定されます。タイムステップは少なくともこれらの現象のうち最も短いものよりも一桁小さく設定することを推奨します。

補間機能により、スイッチングのタイミングをより正確に計算することができます。この機能を使用することで、スイッチ時刻とシミュレーションのタイムステップが同期していないことによる誤差を低減することができます。大きいタイムステップでシミュレーションを実行した場合でも精度よい結果を得ることができます。

タイムステップの最大値は、回路構成から PSIM が自動的に計算します。シミュレーションではこれとユーザが設定したタイムステップとを比較し、小さい方の値を採用します。

SAVE および LOAD 機能を使うことにより、回路の電圧・電流その他の値をひとつのシミュレーションが終了した時点で保存し、次のシミュレーションを実行するときに初期状態として読み込むことができます。この機能により、長時間のシミュレーションをいくつかの短いシミュレーションに分け、タイムステップとパラメータを変えて実行できます。素子の変数およびパラメータはシミュレーションごとに設定を変えることができますが、回路構成は同じでなければなりません。

1.6.2 [SPICE]タブ

SPICE 解析には過渡、AC、DC の 3 種類があります。各々のシミュレーションパラメータは次の通りです。詳細につきましては SPICE ユーザーマニュアルを参照してください。

過渡解析の場合

パラメータ	以下のパラメータが定義されています。	
	初期条件(UIC)を使用する	これをチェックすると“初期条件使用”オプションが,tran コマンドに追加されます。注)ここの設定は AC と DC 解析へも反映されます。
	時間ステップ	計算とプリント又はプロットの時間ステップで単位は秒です。空白(未定義)でも問題ありません。
	最大ステップ	SPICE で使用する最大のステップサイズで単位は秒です。 デフォルトとしてはプログラムでは Tstep(時間ステップ)か(Tend-Tstart)/50((開始時間－終了時間)/50)のうち小さい方の値が選択されます。 Tstep よりも小さい計算間隔を保証したい場合に Tmax は役に立ちます。
	始まる時間	単位は秒です。過渡解析は時間 0 から始まります。安定状態に到達したら回路は解析されますが設定した始まる時間 Tstart までは出力値は保存されません。
統合法	終了時間	終了時間 Tend で単位は秒です。
	SPICE シミュレーションで使用できる三つの統合法があります。	
	台形	台形法
	変形台形	変形台形法
	ギア	ギア法
	次数	数値積分法の次数です。台形法の場合は 1 か 2、ギア法の場合は 2 から 6 を設定できます。
注) ここの設定は AC と DC 解析にも反映されます。		

AC 解析の場合

スイープ タイプ	スイープタイプは Octave,Decade,Linear,List があります。	
	Octave、Decade の場合	
	開始周波数	開始周波数で単位は Hz です。
	終了周波数	終了周波数で単位は Hz です。
	ポイントの数	Octave、Decade 単位の解析ポイント数です。
	Linear の場合	
	開始周波数	開始周波数で単位は Hz です。
	終了周波数	終了周波数で単位は Hz です。
	ポイントの数	解析ポイント数です。
	List の場合	
	周波数のリスト	解析周波数の単位は Hz です。スペース区切りで設定します。

DC 解析の場合

名前 スイープ タイプ	DC スイープするソースの名前。ソース 1 がデフォルトで X 軸となります。ソース 2 は使用可能です。DC スイープソースは電圧、電流、温度を設定できます。	
	スイープタイプは Octave,Decade,Linear,List があります。	
	Octave、Decade の場合	
	開始周波数	開始周波数で単位は Hz です。
	終了周波数	終了周波数で単位は Hz です。
	ポイントの数	Octave、Decade 単位の解析ポイント数です。
	Linear の場合	
	開始	開始値です。
	終了	終了値です。
	インクリメント	ステップサイズです。
	List の場合	
	値のリスト	解析する値のリストです。スペース区切りで設定します。

ステップ実行オプションをチェックして有効にすると SPICE はパラメータスイープを実行します。パラメータの定義は次のようになります。

ステップ実行オプションの場合

パラメータ	ステップ実行オプションを実行するパラメータの名前。もし実行するパラメータが電圧もしくは電流源、または時間でない場合は“PARAM”のチェックボックスをチェックして有効にします。														
スイープタイプ	スイープタイプは Octave, Decade, Linear, List があります。 Octave、Decade の場合 <table border="1"> <tr> <td>開始周波数</td><td>開始周波数で単位は Hz です。</td></tr> <tr> <td>終了周波数</td><td>終了周波数で単位は Hz です。</td></tr> <tr> <td>ポイントの数</td><td>Octave、Decade 単位の解析ポイント数です。</td></tr> </table> Linear の場合 <table border="1"> <tr> <td>開始</td><td>開始値です。</td></tr> <tr> <td>終了</td><td>終了値です。</td></tr> <tr> <td>インクリメント</td><td>ステップサイズです。</td></tr> </table> List の場合 <table border="1"> <tr> <td>値のリスト</td><td>解析する値のリストです。スペース区切りで設定します。</td></tr> </table>	開始周波数	開始周波数で単位は Hz です。	終了周波数	終了周波数で単位は Hz です。	ポイントの数	Octave、Decade 単位の解析ポイント数です。	開始	開始値です。	終了	終了値です。	インクリメント	ステップサイズです。	値のリスト	解析する値のリストです。スペース区切りで設定します。
開始周波数	開始周波数で単位は Hz です。														
終了周波数	終了周波数で単位は Hz です。														
ポイントの数	Octave、Decade 単位の解析ポイント数です。														
開始	開始値です。														
終了	終了値です。														
インクリメント	ステップサイズです。														
値のリスト	解析する値のリストです。スペース区切りで設定します。														

SPICE シミュレーション用の残りのパラメータは以下になります。

動作点	チェックボックスをチェックして有効にした場合、SPICE シミュレーションはインダクタショート、キャパシタオープン回路の DC 動作点を定めることが可能です。										
許容誤差オプション	有効のチェックボックスをチェックして有効にした場合 SPICE シミュレーションの許容誤差を変更できます。チェックしない場合はデフォルト値が使用されます。許容誤差は次のようになります。 <table border="1"> <tr> <td>REL TOL</td><td>相対許容誤差</td></tr> <tr> <td>TR TOL</td><td>過渡解析時の許容誤差</td></tr> <tr> <td>VNTOL</td><td>絶対電圧許容誤差</td></tr> <tr> <td>ABSTOL</td><td>絶対電流許容誤差</td></tr> <tr> <td>CHGTOL</td><td>絶対電荷許容誤差</td></tr> </table>	REL TOL	相対許容誤差	TR TOL	過渡解析時の許容誤差	VNTOL	絶対電圧許容誤差	ABSTOL	絶対電流許容誤差	CHGTOL	絶対電荷許容誤差
REL TOL	相対許容誤差										
TR TOL	過渡解析時の許容誤差										
VNTOL	絶対電圧許容誤差										
ABSTOL	絶対電流許容誤差										
CHGTOL	絶対電荷許容誤差										

1.6.3 [SimCoder]タブ

ターゲット	SimCoder のハードウェアターゲットは以下より選択できます。 None
-------	---

	Flash Release Flash RAM Release (詳細は「SimCoder ユーザーズガイド」を参照してください)
	PE-Expert4 の場合は、以下となります。 PE-ViewX
CPU バージョン	CPU バージョンを選択してください。各ハードウェアターゲットがドロップダウンリストから選択できます。
InstaSPIN が有効	DSP で InstaSPIN チェックボックスが有効となっている場合(例えば F28069M の場合)このボックスをチェックして InstaSPIN を有効にする必要があります。
デフォルトのデータ型	F2803x のように、ハードウェアターゲットが固定少数点 DSP に設定されている場合にデフォルトのデータ型を設定します。 F2803x ターゲットの場合には、整数、IQ1、IQ2、...、IQ30 から選択することができます。 ハードウェアターゲットが None 場合には、浮動小数、整数、IQ1、IQ2、...、IQ30 から選べます。 固定小数点範囲検査にチェックが入っている場合、計算結果が設定した範囲内に入っているか SimCoder がチェックします。
DMC ライブラリバージョン	SimCoder で使用する TI のデジタルモーター制御(DMC)ライブラリのバージョンを設定します。サポートされているバージョンは V4.0、V4.1、および V4.2 です。
注釈	入力フィールドに入力したすべてのテキストは SimCoder によって生成された C コードの先頭にコメントとして追加されます。

1.7 素子のパラメータの仕様および形式

下図に示すように、素子のパラメータを設定するためのダイアログは、[パラメータ]、[その他]、[カラー]の3つのタブに分類される機能を提供します。



[パラメータ]タブで指定した素子のパラメータはシミュレーションに反映されます。

[その他]タブに入力された情報はシミュレーションに反映されませんが、**表示 » 素子リスト**で表示されるリストに表示されます。[その他]タブは、主に報告書作成用の情報として、素子の定格、製造元、パーツ番号など保存してご使用ください。

素子の色は[カラー]タブで変更できます。

Display の下にあるボックスにチェックを入れると、このパラメータが回路図画面に表示されます。Display のボックスの中には、横に矢印が表示されているものがあります。この矢印は、プルダウンリストを表示します。

デフォルト値として設定	今後のすべてのこのタイプの要素のデフォルト値を設定します。
デフォルトで表示	今後のすべてのこのタイプの要素に対してこのパラメーターを表示します。

[パラメータ]タブでは、数値または数式で値を指定することができます。たとえば抵抗は次のいずれかの方法で指定できます。

12.5
 12.5k
 12.5Ohm
 12.5kOhm
 25./2.Ohm
 R1 + R2
 R1*0.5+(Vo+0.7)/Io

ここで、R1、R2、Vo、Io はパラメータファイル(6.8 参照)か、もしくはこの抵抗がサブ回路にある場合(2.7 参照)はメイン回路にて定義します。

また、PSIM では 10 の累乗も指定できます。以下の単位をサポートしています。

G	10^9
M	10^6
k または K	10^3
m	10^{-3}
u	10^{-6}
n	10^{-9}
p	10^{-12}

PSIM で使用できる演算子は以下の通りです。数式にはカッコを使うこともできます。また、大文字と小文字の区別はありません。

+	加算
-	減算
*	乗算
/	除算
^ または **	べき乗 例: $2^3 = 2*2*2$
sin(X)	正弦(サイン)
cos(X)	余弦(コサイン)
tan(X)	正接(タンジェント)
asin(X)又は arcsin(X)	逆正弦(アークサイン)
acos(X)又は arccos(X)	逆余弦(アークコサイン)
atan(X)又は arctan(X)	逆正接(アークタンジェント)

atan2(y,x)	逆正接(アークタンジェント) $-\pi \leq \text{ATAN2} \leq \pi$
sinh(X)	双曲線正弦関数 (ハイパボリックサイン)
cosh(X)	双曲線余弦関数 (ハイパボリックコサイン)
tanh(X)	双曲線余弦関数 (ハイパボリックタンジェント)
pow(x,y)	累乗 x の y 乗
pwr(x,y)	累乗(x の絶対値の y 乗) x の絶対値の y 乗 例: $\text{abs}(x)^y$
sqr(x)	2 乗 x^2
sqrt(x)	平方根
hypot(x1,x2,x3...)	2 乗和の平方根 $\text{sqrt}(x1^2+x2^2+x3^2+....)$
hypot(x_array)	入力 array の 2 乗和の平方根 $\text{sqrt}(x_array[0]^2+x_array[1]^2+x_array[2]^2+....)$
exp(x)	指数 例: $\text{EXP}(x) = e^x$
ln(x)(or log(x))	自然対数 $\ln(x) = \log(x)$ (基底 e)
log10(x)	常用対数 (基底 10)
abs(x)	絶対値
sign(x)	符号 例: $\text{SIGN}(1.2) = 1$ $\text{SIGN}(-1.2) = -1$ $\text{SIGN}(0) = 0$
ceil(x)	CEIL 関数 数値を最も近い整数に切り上げる
floor(x)	FLOOR 関数 数値を最も近い整数に切り下げる
min(x1,x2,x3...)	最小値 $x1, x2, x3, \dots$ の最小値
min(x_array)	最小値(入力が array) 入力が array で array セルの最小を返します
max(x1,x2,x3...)	最大値 $x1, x2, x3, \dots$ の最大値
max(x_array)	最大値(入力が array) 入力が array で array セルの最大を返します

PSIM で使える数学定数として pi(円周率)があります。

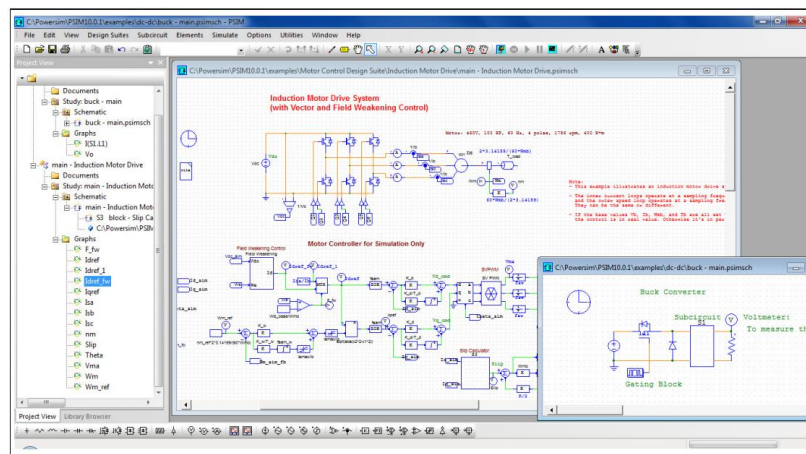
pi	円周率 3.14159265359
-----------	-------------------

第2章 PSIM による回路図入力

PSIM では、直感的で使い易い対話型インターフェースにより、シミュレーションモデルの回路図を作成することができます。PSIM Ver.10 以降では、回路図の作成からシミュレーション結果までをプロジェクトとして管理します。ユーザインターフェースは、必要な機能を統合した構成になっており、回路図の作成、シミュレーションの実行、回路図の修正などを1つのウィンドウ内で実行することができます。

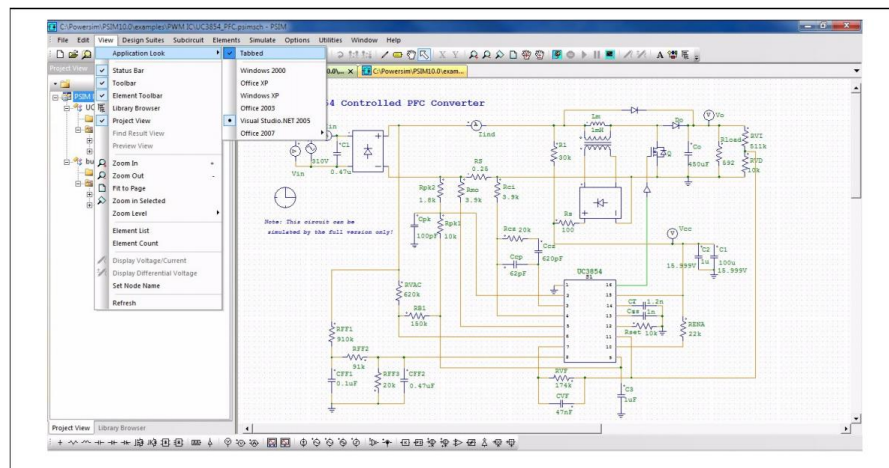
2.1 PSIM 環境

代表的な PSIM 環境の画面を下图に示します。この図では、誘導モータドライブ回路と降圧型 DC-DC コンバータの2種類の回路モデルが開かれています。



初期設定では、『メニューバー』と『ツールバー』はウィンドウの上部に表示されます。一般的によく使用される回路素子は、『素子ツールバー』としてウィンドウ下部に表示されます。プロジェクトの構成は、ウィンドウの左側に『プロジェクトビュー』として表示されます。

上図内右下のウィンドウは、回路図の作成、編集を行うための『デザインウィンドウ』です。ウィンドウの表示スタイルは、タイル表示(上図)とタブ表示(下図)の2種類から選択することができます。表示スタイルをタブ形式に切り替える場合は、表示 ≫ アプリケーション表示スタイルで「タブ」の項目にチェックをいれてください。



『プロジェクトビュー』では、回路図やシミュレーション結果のグラフなどの関連するファイルがツリー構成で表示されます。『プロジェクトビュー』では、以下の項目がツリー構造で表示されます。

プロジェクト名： 通常は、トップレベルの回路図の名称がプロジェクト名として使用されます。

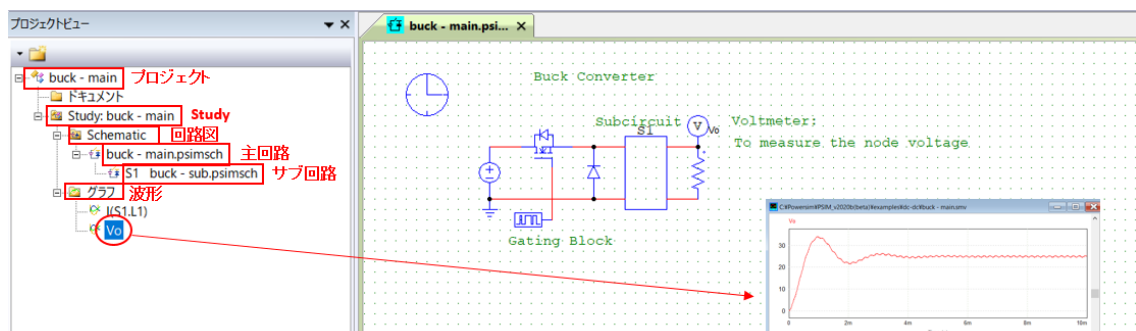
ドキュメント： 回路図の説明、パラメータ、ルックアップテーブルなどの関連するファイルが保存されます。

Study： スタディ名です。

Schematic： 回路図です。トップレベルの回路図およびサブ回路が含まれます。

グラフ： 回路図内に配置した全てのプローブのリストが表示されます。

以下は、プロジェクトビューでの降圧コンバータの一例を示しています。



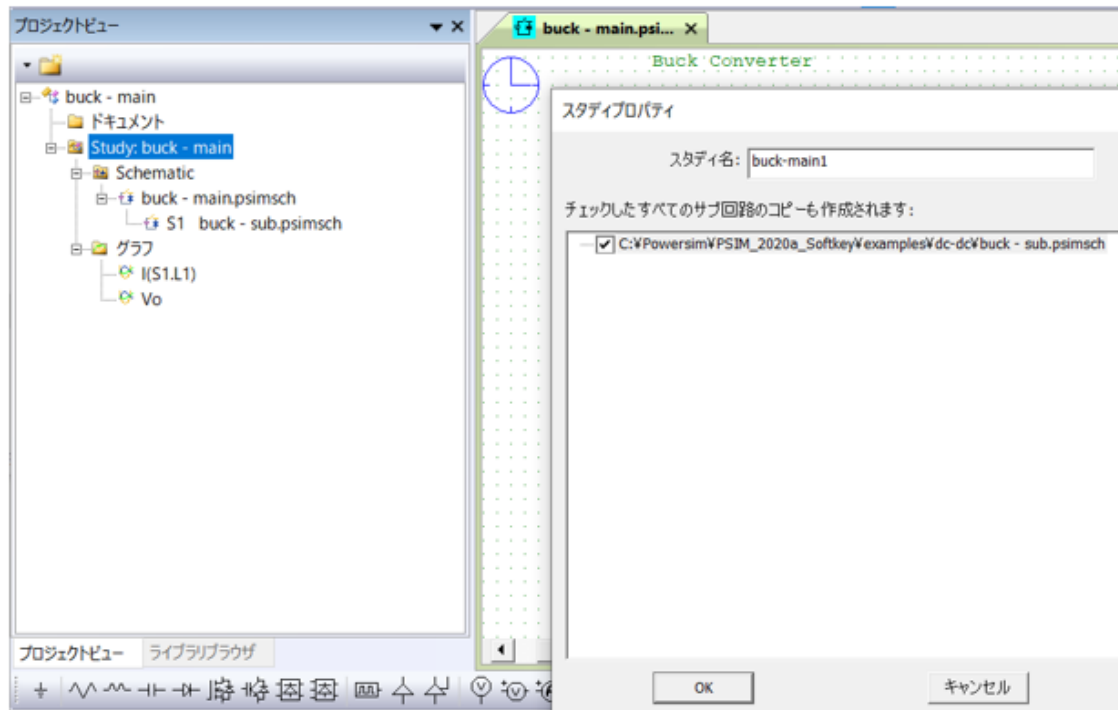
これは降圧コンバータのプロジェクトの例です。

Study が 1 つ含まれていて、主回路は「buck - main.psimsch」、サブ回路は「sub.psimsch」です。シミュレーションの波形は I(S1.L1) と Vo の 2 つです。

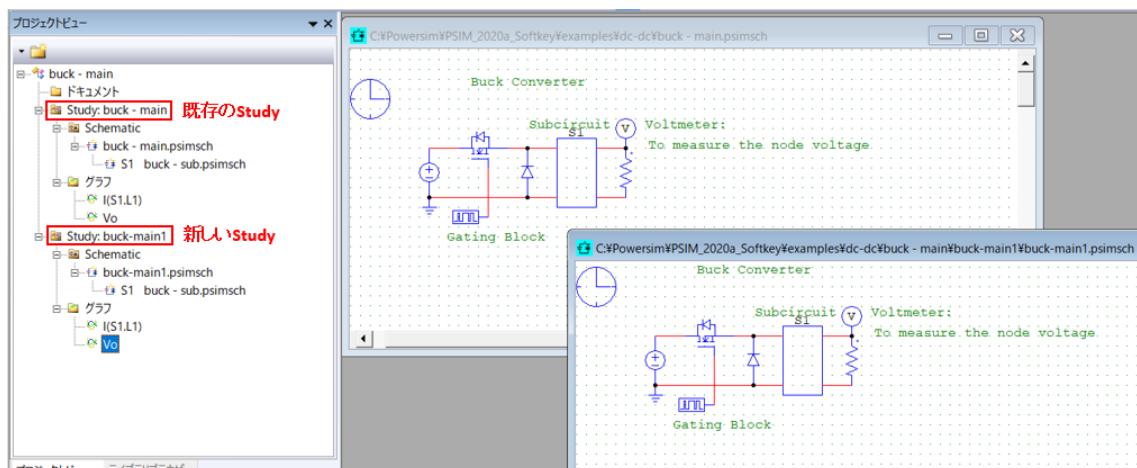
シミュレーション実行後、プロジェクトビューで波形名をダブルクリックすると SIMVIEW に読み込ませることができます。波形を回路図にドラッグして埋め込むことができます。例えば、上図では Vo の波形を示しています。

プロジェクトには複数の Study を含むことができます。例えば 1 つは降圧コンバータ回路、もう 1 つは負荷フィルタやスイッチング周波数が異なる降圧コンバータ回路を含むことができます。

既存の Study を元に新しい Study を作成する場合は「buck - main」の Study を右クリックし、「スタディのコピーを作成」をクリックしてください。
以下に示すダイアログウィンドウが表示され、新しい Study の名前と、サブ回路のコピーを作成するかどうかを選択します。



この例では、「buck - main1」と呼ばれる新しい Study の作成とサブ回路のコピーを作成します。
確認後、新しい Study は、以下のように作成されます。
コピーして作られたファイル「buck - main1.psimsch」と「buck - sub.psimsch」は新しく作られた Study の「buck - main1」フォルダの中に作られます。



同じプロジェクトの中の別の Study に既存の回路図ファイルを追加するには、「buck - main」のプロジェクトを右クリックして「スタディの追加」を選択します。プロジェクトを保存するにはプロジェクトを右クリックして「プロジェクトを保存」を選択します。

2.2 回路図モデルの作成

PSIM は、回路図の作成のために以下の機能を提供します。

回路素子の選択

素子の選択にはいくつかの方法があります。

- ・プルダウンメニューから選択

素子メニューから、サブメニューを選択し、使用する素子を選択してください。

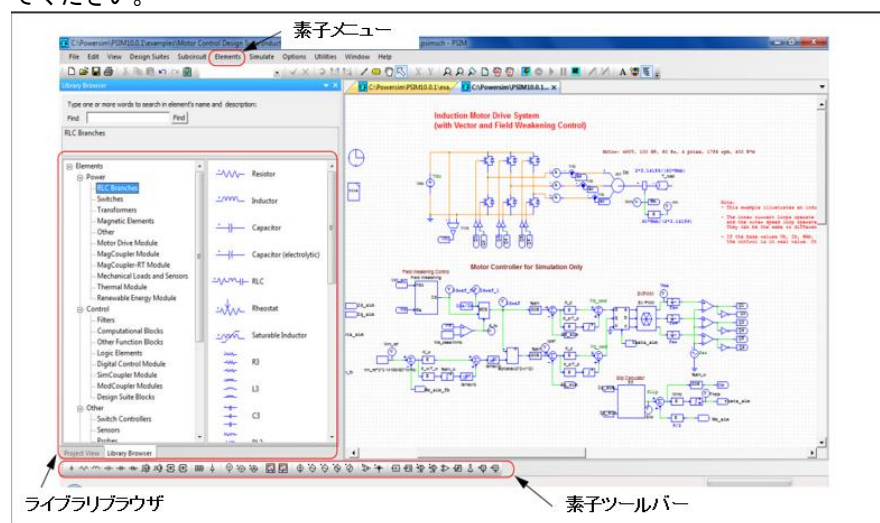
- ・素子ツールバーから選択

R や C など一般的な素子で使用頻度の高いものは、素子ツールバーから選択することができます。素子ツールバーは初期設定ではウィンドウ下部に表示されます。

- ・「ライブラリブラウザ」で検索

「ライブラリブラウザ」では、名称から回路素子を検索することができます。

「ライブラリブラウザ」を起動するには、表示 ≫ ライブラリブラウザを選択してください。



配置

メニューから素子を選択すると、素子のシンボルが画面上に現れ、マウスとともに移動します。素子の位置を決めるにはマウスを左クリックしてください。

素子の選択

回路図上に配置した素子を選択するためには、素子をクリックしてください。回路の一部を選択する場合は、マウスの左ボタンを押したまま、選択する領域を長方形で囲むようにマウスをドラッグしてください。選択された素子または回路ブロックの周囲には長方形が表示されます。

回転

素子を回路図モデル内に配置する前は、素子を選択後にマウスの右ボタンをクリックすることで素子の向きを回転させることができます。回路図上に配置された素子を回転させる場合は、素子を選択して編集 ≫ 回転を選択するか、ツールバー上の  をクリックしてください。

配線

2つのノードを接続するためには、編集 ≫ ワイヤを追加を選択するか、ツールバー上の  をクリックしてください。ペンのシンボルが表示されます。ワイヤを描くには、マウスの左ボタンを押しながらドラッグしてください。視認性の観点から接続されていないノードは○で表され、接続されたノードは●で表示されます。

ラベル

複数のノードが同一のラベルに接続している場合、それらのノードはワイヤにより接続した場合と同様に扱われます。ラベルを使うことにより、クロスワイヤリング(混線)が減少し、回路図のレイアウトが改善されます。

ラベルのテキスト表示は移動可能です。テキストを選択するには、ラベルを左クリックして、<Tab>キーを押してください。

ラベルを追加するためには、**編集 » ラベルを追加**を選択してください。

パラメータ設定	素子のパラメータを設定するためには、素子をダブルクリックするか、右クリックで表示されるメニューの「属性」を選択して設定画面を表示してください。パラメータに値を入力し、閉じてください。
移動	素子や回路ブロックを移動する場合は、素子、回路ブロックを選択して、マウスの左ボタンを押しながらドラッグしてください。
表示のスクロール	マウスの右ボタンを押しながらドラッグすると、画面をスクロールすることができます。

2.3 ファイルメニュー

ファイルメニューの機能について説明します。

新しい回路	新しい回路図を作成します。
新しいワークシート	事前に定義されたワークシートのサイズで新しい回路図を作成します。
回路を開く	すでに作成した回路図ファイルを開きます。
範例を開く	PSIM に入っているサンプル回路を開きます。
範例検索	サンプル回路を検索する。
ワークシートのサイズを変更	ワークシートのサイズを変更します。
新しい SPICE ネットリスト	新しい SPICE ネットリストファイルを作成します。
SPICE ネットリストを開く	すでに作成したネットリストファイルを開きます。
新しいプロジェクト	新しい PSIM プロジェクトを作成します。
プロジェクトを開く	すでに作成した PSIM プロジェクトを開きます。
プロジェクトを保存	現在の PSIM プロジェクトを保存します。
回路を閉じる	回路図ファイルを閉じます。
すべてを閉じる	すべての回路図ファイルを閉じます。
回路を保存	現在の回路図ファイルを保存します。
名前を付けて保存	現在の回路図ファイルを別の名前で保存します。
すべてを保存	すべての回路図ファイルを保存します。

パスワードを付けて保存	パスワードで回路図ファイルを保存します。パスワードで保護されたファイルを利用してシミュレーションは可能ですが、回路図の内容を見るために正しいパスワードを入力する必要があります。 回路図の詳細を公開せずに、シミュレーションの内容を共有する場合に、パスワード保護機能をご使用ください。
パッケージファイルに保存	回路図とすべての関連ファイルを 1 個のパッケージに保存するには、この機能を選択してください。複数のサブ回路含む回路図を第三者に送信する必要がある場合などにご使用ください。
古いバージョンで保存	過去のバージョン(9.3 – 12.0)に対応した形式で保存します。 過去のバージョンに存在しない素子を使用すると、これらの素子は省略されます。ご注意ください。
印刷	回路図を印刷します。印刷はスクリーンに表示されている通りに印刷されます。回路図をズームインもしくはズームアウトしている場合、それに応じて印刷されますのでご注意ください。
印刷プレビュー	プリントアウトをプレビューします。
選択エリア印刷	回路図の選択した部分だけ印刷します。
選択エリア印刷プレビュー	回路図の選択した部分だけプレビューします。
印刷ページ設定	印刷ページの位置を調整と印刷ページの説明を設定します。
プリンター設定	プリンタを設定します。
終了	PSIM 回路図プログラムを終了します。

2.4 編集メニュー

編集メニューの機能について説明します。

取り消し	以前の変更を取消することができます。
やり直し	以前の変更をやり直すことができます。
カット	選択した素子または回路ブロックを切り取ります。切り取った素子または回路ブロックは、回路図内に貼り付けることができます。 素子または回路ブロックを削除するには、該当部分を選択し、<Delete>キーを押してください。
コピー	選択した素子や回路のブロックをコピーします。
貼り付け	コピーもしくはカットした素子や回路ブロックを貼りつけます。
マッチした素子を選択	仕様に合致した素子を選択します。
すべてを選択	回路全体を選択できます。 回路の一部をマウスの左ボタンクリックにより選択して、ドラッグしてください。
クリップボードにコピー	回路図イメージを別のソフトウェアへ貼り付けることができます。メタファイルフォーマット、カラービットマップ、白黒ビットマップの 3 種類のフォーマットを選ぶことができます。メタファイルフォーマットはベクターベースであり、特に画像のサイズが変更されたときに、より良い画質を

描画	提供します。白黒オプションを使用すると、カラービットマップと比較して画像ファイルのサイズが小さくなります。 表示を分かり易くする為に回路図にイメージを追加する場合はこれを選択してください。線、楕円、長方形、半円、ビットマップイメージおよび波形のイメージを使用することができます。 ビットマップイメージを描くときには、表示したい部分をマウスで左クリックしながらドラッグし定義します。その後、ファイル選択画面が表示されますので、描きたいビットマップイメージのファイルを選択してください。波形を描くときには、表示したい部分をマウスで左クリックしながらドラッグし定義します。ダブルクリックすると波形選択画面が表示され、表示される波形を選べます。
すべてのテキストフォントを変更	開いている PSIM ファイル内の全てのテキストのフォントを変更します。
すべての素子文字フォントを変更	開いている PSIM ファイル内の全ての素子に関連付けられたテキストのフォントを変更します。
テキストを追加	任意の文字列を回路図上に配置することができます。ダイアログ・ボックスに文字列を入力し、マウスを左クリックして位置を決めてください。
ワイヤを追加	2つのノードを接続するためのワイヤを追加します。ワイヤを追加する際には、カーソルがペンの形状に変化します。
ラベルを追加	ラベルを回路図に配置します。複数のノードが同一のラベルに接続している場合、それらは結合されてワイヤによる接続と同等のものになります。ラベルを使うことにより、クロスワイヤリング(混線)が減少し、回路図のレイアウトが改善されます。
ノード名設定	ノード名を設定します。この名前は SPICE シミュレーションやネットリスト生成に反映されます。
属性を編集	素子を選択し属性を編集を選択すると属性のウィンドウが開きます。
電流スコープを追加/削除	電流フラグ付き素子に電流スコープを追加もしくは削除します。 本機能が選ばれた後、電流スコープを表示するために要素の上にクリックしてブランチ電流名を選んでください。 すでに表示されている電流スコープを削除するために、チェックマークがついたブランチ電流名を選択してください。
実行時変数の表示/非表示	シミュレーション中に素子のパラメータを変更する方法の一つです。これを選択後、素子をクリックするとその素子の可変パラメータの値が現われます。この値をダブルクリックして現れる入力フィールドに書き込むことで素子パラメータの変更ができます。
無効	素子または回路の一部を「無効状態」にします。無効状態の素子または回路はグレー表示になり、シミュレーションの際に考慮されません。素子または回路の一部を一時的に除外してシミュレーションすることができます。
有効	無効になっている素子または回路を「有効」にします。
回転	要素または回路の一部を時計回りに 90°回転します。
左右反転	素子を左右反転します。

上下反転	素子を上下反転します。
検索	素子を検索することができます。
次を検索	直前の検索操作を繰り返し、条件が合致する次の素子が選択されます。
ファイルから検索	指定した複数のファイルに対し、検索を行うことができます。
ライブラリ編集	PSIM イメージライブラリを編集します。詳細は 2.16 を参照してください。
イメージエディタ	イメージエディタを起動します。詳細は 2.17 を参照してください。
中止	編集モードを選択モードに切替えます。

2.5 表示メニュー

表示メニューの機能について説明します。

素子の使用レベルを確認	マルチレベル素子をチェックするか、PSIM シミュレーションのみ、または SPICE シミュレーションのみでサポートされている素子をチェックします。
素子リスト	回路図の部品リストを作成します。
素子カウント	回路図の素子をカウントします。電圧・電流プローブ及び計測器は素子カウントに含まれていません。
SPICE モデルリスト	SPICE モデルパスにある.model 文で定義されたすべての SPICE モデルの一覧を表示します。
SPICE サブ回路リスト	SPICE モデルパスにある.subckt 文で定義されたすべての SPICE モデルの一覧を表示します。
アプリケーション表示スタイル	PSIM ウィンドウの表示スタイルを選択します。 タイル表示とタブ表示の切り替えも「アプリケーション表示スタイル」から行うことができます。
ステータスバー	ステータスバーの表示/非表示を切替えます。
ツールバー	ツールバーの表示/非表示を切替えます。
素子ツールバー	素子ツールバーの表示/非表示を切替えます。
ライブラリブラウザ	ライブラリブラウザを起動します。PSIM 素子ライブラリへアクセスできます。
プロジェクト表示	プロジェクトビューの表示/非表示を切り替えます。また、関連ファイルを整理および管理します。プロジェクトビューのツリー構造については 2.1 を参照してください。
シミュレーションメッセージ	シミュレーションメッセージウインドウの表示/非表示を切り替えます。
拡大	回路図を拡大します。
縮小	回路図を縮小します。

ページに合わせる	回路全体をスクリーンに合うようにズームを調節します。
選択エリアを拡大	選択した領域を拡大表示します。
拡大率	回路図表示の拡大率を指定します。
電圧/電流表示	オプション中の「シミュレーション中のすべての電圧と電流を保存」([オプション]→[設定]→[一般的情報])が有効に設定されている場合に、任意のノードの電圧とブランチの電流を表示することができます。 電圧/電流を表示するためには、シミュレーションの実行が必要です。
差動電圧表示	オプション中の「シミュレーション中のすべての電圧と電流を保存」([オプション]→[設定]→[一般的情報])が有効に設定されている場合に、任意の2つのノード間の電圧を表示することができます。 差動電圧を表示するためには、シミュレーションの実行が必要です。
リフレッシュ	画面表示をリフレッシュします。

2.6 デザインスイートメニュー

デザインスイートメニューの機能について説明します。
このメニューを使うと、デザインスイートのテンプレートにアクセスします。これらのテンプレートは入力パラメータを取り込み、シミュレーション可能な回路モデルを自動で生成することができます。

パラメータファイルを更新	デザインスイート機能で生成された回路図のパラメータを更新します。
デザインファイルを表示	デザインテンプレートを表示します。
Power Supply Design Suite	Power Supply Design Suite でデザインテンプレートを実行します。 詳細は、「Tutorial - Resonant LLC Converter Design Using Power Supply Design Suite.pdf」を参照してください。
Motor Control Design Suite	Motor Control Design Suite でデザインテンプレートを実行します。 詳細は、「Tutorial - Motor Control Design Suite.pdf」を参照してください。
HEV Design Suite	HEV Design Suite でデザインテンプレートを実行します。 詳細は「Tutorial - HEV Design Suite.pdf」を参照してください。
EMI Filter Design Suite	EMIDesign Suite でデザインテンプレートを実行します。 詳細は「Tutorial - EMI Design Suite.pdf」を参照してください。

2.7 サブ回路メニュー

サブ回路メニューの機能について説明します。

新サブ回路	新しいサブ回路を作成します。
サブ回路を開く	既存のサブ回路をロードします。サブ回路は画面上にブロックとして現れます。
サブ回路を編集	サブ回路のサイズとファイル名を編集します。
サブ回路を開く	新しいウィンドウで選択したサブ回路を開きます。
サブ回路名表示	サブ回路の名前を表示します。
サブ回路ポート名表示	メイン回路でサブ回路の端子を表示します。

サブ回路ポート名非表示 メイン回路でサブ回路の端子を隠します。

以下の機能はサブ回路内に適用されます。

双方向ポートを追加 サブ回路に双方向接続ポートを配置します。

入力信号ポートを追加 サブ回路に入力信号ポートを配置します。

出力信号ポートを追加 サブ回路に出力信号ポートを配置します。

ポートを表示 サブ回路のポートを表示します。

デフォルト変数一覧を編集 サブ回路用のデフォルト変数を編集します。

サイズ設定 サブ回路のサイズを設定します。

イメージ編集 サブ回路のイメージを作成・編集します。

1 ページアップ メイン回路(参照元)に戻ります。サブ回路は自動的に保存されます。

トップページ 低レベルのサブ回路から最上位のメイン回路にジャンプするために使います。これはサブ回路が多層になっている場合にご使用ください。

サイズ設定、ポートを表示、デフォルト変数一覧を編集、イメージ編集の設定をサブ回路で行った場合、メイン回路側でも適用されます。メイン回路とサブ回路を接続するために、次の3種類のポートを使用することができます。

- ・ パワー回路および機械システムと接続するための双方向ポート
- ・ 制御回路と接続するための入力ポート
- ・ 制御回路と接続するための出力ポート

双方向ポートは制御回路で使用できますが、信号の方向を明確にするために、制御回路では入力信号ポートおよび出力信号ポートの使用を推奨します。また、コード生成にサブ回路を利用する場合には入力信号ポートもしくは出力信号ポートのみ使用可能です。

サブ回路ブロックの上をマウスで右クリックして**属性**を選択するとサブ回路のプロパティダイアログが表示されます。[サブ回路ファイルを変更]、[サブ回路変数]、[カラー]の3つタブがあります。

[サブ回路ファイルを変更]タブ

このタブでは、サブ回路の名前を編集することができます。 ボタンをクリックして他のサブ回路を選択することができます。

[サブ回路変数]タブ

このタブでは、サブ回路の変数の編集が可能です。例えば、抵抗値1mΩ、「Rparasitic」という名前の抵抗に対し、「Parasitic Resistance」という説明文を追加する場合、以下のように記入します。

変数説明 Parasitic Resistance

変数名 Rparasitic

変数値 1m

変数説明のチェックボックスをチェックすると、回路図上で以下のように表示されます。

Parasitic Resistance = 1m

サブ回路の変数のリストは編集することができます。現在の変数のリストをデフォルト値に設定するためには、 ボタンをクリックしてください。

リストの値を変更した後に、 ボタンをクリックし、デフォルト値を呼び出すことも可能です。

SimCoderを利用してサブ回路の自動コードを生成することができます。サブ回路のコードを生成するた

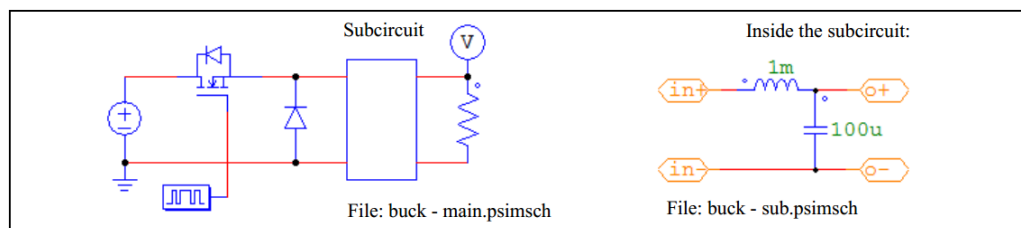
めには、**コード生成** ボタンをクリックしてください。シミュレーション時に生成されたコードで**サブ回路を置き換え**のチェックボックスをチェックすると、サブ回路の回路図が生成されたコードで置き換わります。

[カラー]タブ

サブ回路の色を変えることができます。

例：サブ回路の使用例

次の図は、LC フィルタをサブ回路として含んだチョップパ回路の例です。図中の右側にサブ回路の構成を示します。この例では、左側に 2 つの双方向ポート("in+", "in-"), 右側に 2 つの双方向ポート("out+", "out-") が配置されています。



2.7.1 サブ回路作成 –メイン回路上での作業

メイン回路“chop.sch”に、サブ回路“chop_sub.sch”を作成するステップは以下の通りです。

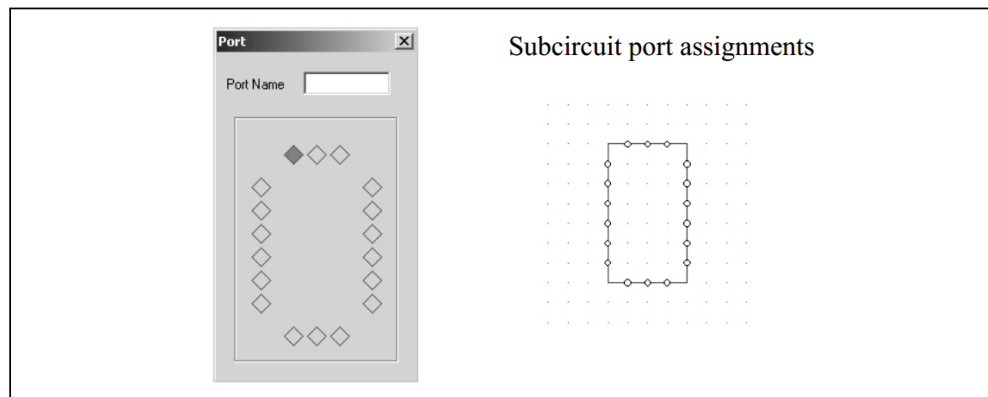
- メイン回路を開く、もしくは作成してください。
- サブ回路が未作成の場合は、**サブ回路 >> 新サブ回路**を選択してください。
既にサブ回路が存在する場合は、**サブ回路 >> サブ回路を開く**を選択してください。
- サブ回路ブロック(長方形)が画面上に表示されます。位置を調整してサブ回路を配置してください。

メイン回路上で作成した回路をサブ回路に変換する場合は、該当回路を選択した状態で右クリックし、**サブ回路を作成**を選択してください。必要に応じてポート位置の調整とワイヤの追加を行ってください。

2.7.2 サブ回路作成 –サブ回路内での作業

サブ回路をダブルクリックして、サブ回路を開いてください。

- メイン回路と同様に、回路の作成および編集が可能です。
- サブ回路のサイズを決定するためには、**サブ回路 >> サイズ設定**を選択してください。サブ回路のサイズは、メイン回路内での表示やワイヤ接続を考慮のうえ、適切なサイズを設定してください。
- サブ回路作成後に、サブ回路のノードを対応するメイン回路のノードに接続する必要があります。**サブ回路 >> ポートの追加**を選択すると、ポートのイメージが表示されます。回路上にポートを配置すると、ポップアップウィンドウ(下図、左側)が表示されます。

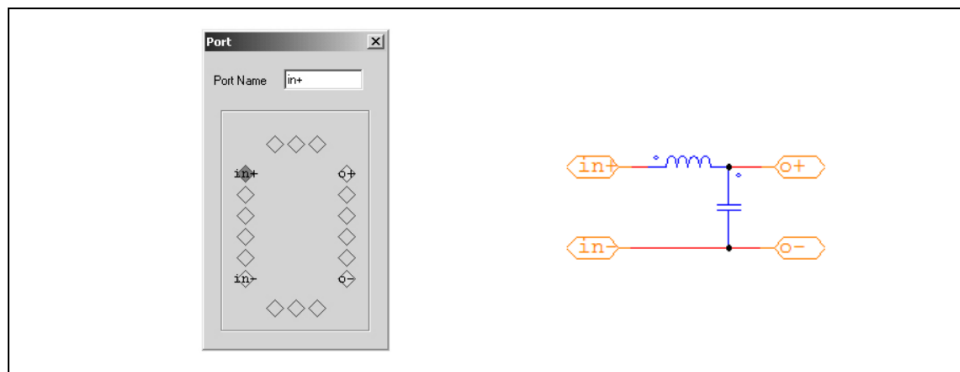


4 辺にある菱形はサブ回路シンボル上でのポートの位置を表します。角への接続はできないので、4 つの角には菱形はありません。菱形を選択すると、色が赤に変わります。デフォルトでは左上の菱形が選択され、赤色になります。希望の菱形をクリックして、ポート名を指定してください。

この例では、メイン回路"chop.sch"の中で、サブ回路の左側に 2 つ、右側に 2 つのポートがあります。端子の相対的位置は上部 2 つのポートは上端より 1 目盛下で、下部 2 つのポートは下端より 1 目盛上です。

左上部のポートを指定するためには、左辺一番上の菱形をクリックして"i_n+"と入力してください。テキスト"i_n+"が菱形の内部に入り、ポートに"i_n+"とラベルが付きます。ポートを左上部のポートに接続してください。ポート"i_n-"、"o_{ut}+"、"o_{ut}-"を接続するには同様の手順を繰り返してください。

- 4 つのポートを配置した後、ポートの割り当てとサブ回路が以下のように表示されます。



サブ回路の作成はこれで完了です。サブ回路を保存し、メイン回路に戻ります。

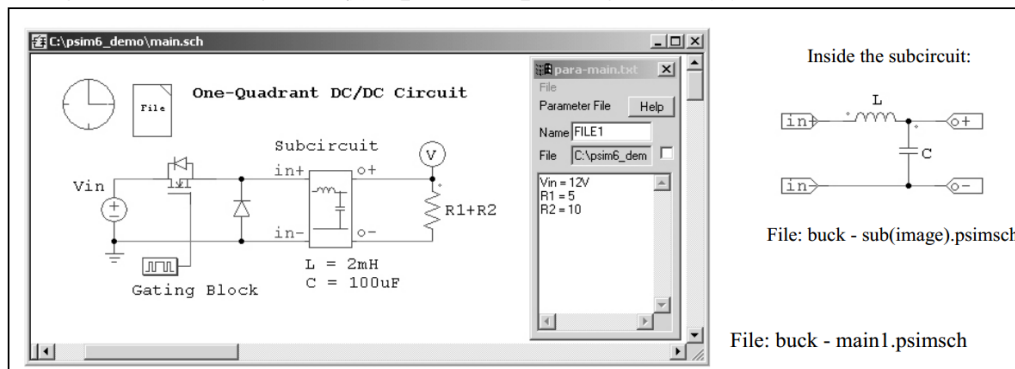
2.7.3 メイン回路でのサブ回路の接続

サブ回路を作成し、ポートを設定したら、サブ回路ブロックをメイン回路に接続します。

- メイン回路上でサブ回路ブロックのポートが境界上で白抜きの丸として現れます。
- サブ回路ブロックを指定し、**サブ回路 » ポートを表示** を選択すると、サブ回路内で設定ポート名が表示されます。
- 接続端子にメイン回路を接続してください。

2.7.4 サブ回路のその他の機能

この節ではサブ回路のその他の機能を以下の例を用いて説明します。



メイン回路からサブ回路への変数値の受け渡し

上記の例では、メイン回路 (main.sch) がサブ回路 (sub.sch) を含みます。サブ回路内では、インダクタンスは L 、キャパシタンスは C と定義されています。 L と C のデフォルト値は、**サブ回路 » デフォルト変数一覧** を選択することで設定できます。この例では、 L は 5mH に、 C は 100uF に設定しています。

サブ回路が最初にメイン回路に組み込まれた際に、メイン回路(main.sch)から、**サブ回路 » サブ回路を編集** を選べると、[サブ回路変数]のタブにデフォルト値のリストが表示されます。ここで新しい変数を追加したり、値を変更したりすることができます。この例では、 L は 2mH に変更し、 C はデフォルトのままにしています。

変数とその値はネットリストファイルに保存され、シミュレーションに使用されます。サブ回路内のデフォルト値はネットリストファイルには保存されず、シミュレーションに反映されませんのでご注意ください。

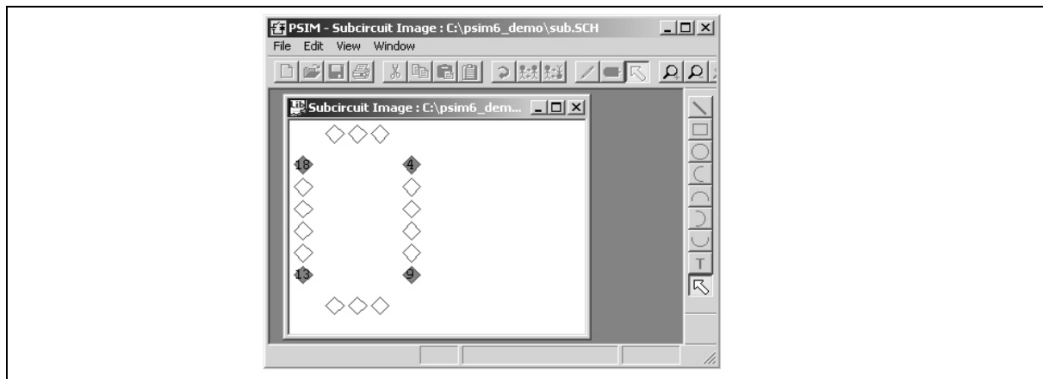
この機能を使うことで、サブ回路のパラメータをメイン回路から設定することができます。同じサブ回路をひとつのメイン回路で複数回使用する場合に、同じ変数に違う値を設定することができます。たとえば、サブ回路 sub.sch を 2 回使用する場合、 L の値として 1 回目は 3mH、次は 1mH を設定することができます。

また、この例ではパラメータは変数(たとえば直流電圧源の V_{in})あるいは数式(負荷抵抗の $R1+R2$)として定義されています。変数 V_{in} 、 $R1$ 、 $R2$ はパラメータファイル para-main.txt にて設定しています。パラメータファイルの詳細は 6.8 を参照してください。

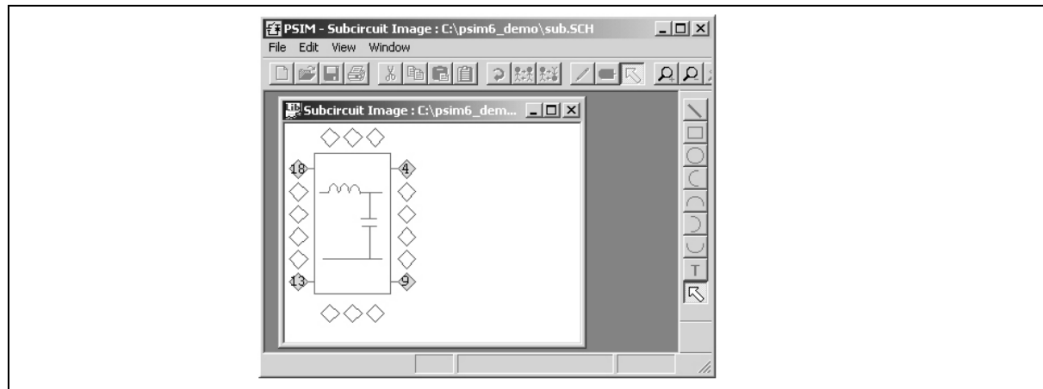
サブ回路シンボルの編集

サブ回路のシンボルを編集する手順について説明します。

- サブ回路編集画面において、**サブ回路 » イメージ編集** を選択すると下図のようなウィンドウがポップアップで表示されます。赤色で表示されているダイヤモンドはサブ回路のポートで、位置はメイン回路に表示されるものと同じです。



- 描画ツールを使ってサブ回路のシンボルを作成・編集することができます。描画ツールが表示されていない場合は、**View » Drawing Tools** にチェックをいれてください。拡大 または縮小のアイコンをクリックすることで、シンボル作成領域の大きさを調整することができます。シンボルを作成すると、以下のようなウィンドウが開きます。



- サブ回路のウィンドウ(sub.sch)に戻ってサブ回路を保存します。作成されたサブ回路のシンボルがメイン回路に表示されます。

サブ回路を PSIM の素子リストに追加する

PSIM のインストールフォルダ内に、User Defined という名前でフォルダを作成し、このフォルダにサブ回路ファイルを保存すると、サブ回路が他の PSIM の素子と同じように**素子メニュー**から User Defined フォルダ内の素子を選択することができます。さらに、User Defined フォルダの中にサブフォルダを作成して、その中にサブ回路ファイルを入れることができます。たとえば、**素子メニュー**は以下のように整理することができます。

- パワー
- 制御ライブラリ
- その他
- 電源
- 記号
- (User Defined フォルダ内の素子が表示されます。)
- Subcircuit 1
- Project A
- Subcircuit 2

- Subcircuit 3
- Project B
- Subcircuit 4

このように、共通に使うサブ回路はグループに分けて保存しておくとう便利です。

2.8 素子メニュー

サブ回路メニューの機能について説明します。

パワー	パワー回路用の回路素子です。R、L、C、スイッチングデバイス、変圧器、モータドライブモジュールなどが含まれます。
制御ライブラリ	制御回路用の回路素子です。計算ブロック、論理素子、デジタル制御モジュールなどが含まれます。
その他	スイッチコントローラ、センサ、プローブ、パワー回路と制御回路のインターフェース素子など、パワー回路と制御回路の双方で使用される素子です。
電源	電圧源素子および電流源素子です。
SPICE イベント制御	SPICE シミュレーション用の素子。 イベント制御素子は、SimCoder 機能の一部です。
SimCoder コード 自動生成	F2833x や F2803x などのターゲットハードウェア用のコードを自動で生成します。
記号	描画用の記号です。記号はシミュレーションには影響を与えません。
Typhoon-HIL	Typhoon-HIL のエクスポートに使用される素子。
User Defined	PSIM のインストールフォルダ内に作成した User Defined フォルダに保存された回路をサブ回路として配置することができます。
ページ	タイトルブロックを配置します。

2.9 シミュレートメニュー

PSIM では、シミュレーションを実行する方法が 2 通り用意されています。

- ・シミュレートメニュー
- ・コマンドライン

シミュレートメニューについて説明します。

シミュレーション制御	シミュレーションパラメータ(タイムステップ、総時間、プリントタイム等)を設定します。 本機能を選択するとカーソルが時計イメージに変化します。時計イメージを回路図上に配置してください。回路図上で時計イメージをダブルクリックすると、シミュレーション制御パラメータを設定することができます。
PSIM シミュレーション実行	PSIM シミュレーションを実行します。
LTspice シミュレーション実行	LTspice シミュレーションを実行します。
シミュレーション中止	実行中のシミュレーションを中止します。

シミュレーション一時停止	実行中のシミュレーションを一時停止(ポーズ)します。
シミュレーション再開	一時停止したシミュレーションを再開します。
次のタイムステップへシミュレート	次のタイムステップまでシミュレーション実行して停止します。
SIMVIEW 実行	波形表示プログラム SIMVIEW を実行します。
ネットリストファイルを生成	回路図のネットリストファイルを生成します。
ネットリストファイル(XML)を生成	回路図のネットリストファイルを XML 形式で生成します。
ネットリストファイルを表示	生成されたネットリストファイルを表示します。
SPICE ネットリストを生成 (.cir)	LTSpice シミュレーションへの SPICE ネットリストの生成。自動的に cir ファイルでフォルダに保存されます。
警告を表示	シミュレーションから警告メッセージがあれば表示します。
固定小数点範囲チェック結果を表示	固定小数点範囲チェック結果を表示します。固定小数点演算が Simcoder タブの下 シミュレーション制御 ダイアログで指定されている場合に使用します。
SLINK ノードを配置	SLINK ノードを再配列します。SimCoupler モジュールを利用して PSIM と MATLAB/Simulink との共同シミュレーションを行う際この機能を利用します。その他の詳細については 5.7 を参考にしてください。
コード生成	回路図のコードを生成します。この機能は SimCoder モジュールを利用して自動コード生成のためです。その他の詳細について SimCoder のユーザーズマニュアルを参考にしてください。
コード生成フォルダを開く	コードフォルダを開きます。 この機能は SimCoder ライセンスを有する場合にのみ有効です。
ランタイムグラフ	シミュレーション結果を実行中に確認することができます。

ランタイムグラフ機能のダイアログウィンドウには Standard と Vector の二つのタブがあります。Standard のタブでは時間軸で波形表示する項目の一覧を表示します。Vector タブはベクトルプロットのための設定をします。ベクトルの実部、虚部の設定は Standard タブにある変数リストから選択できるようになっています。

シミュレーション途中の出力変数の波形表示はシミュレート>>ランタイムグラフで変数を選ぶか電圧/電流プローブの上部を右クリックして Show probe's value during simulation を選択するかどちらでも実行することができます。

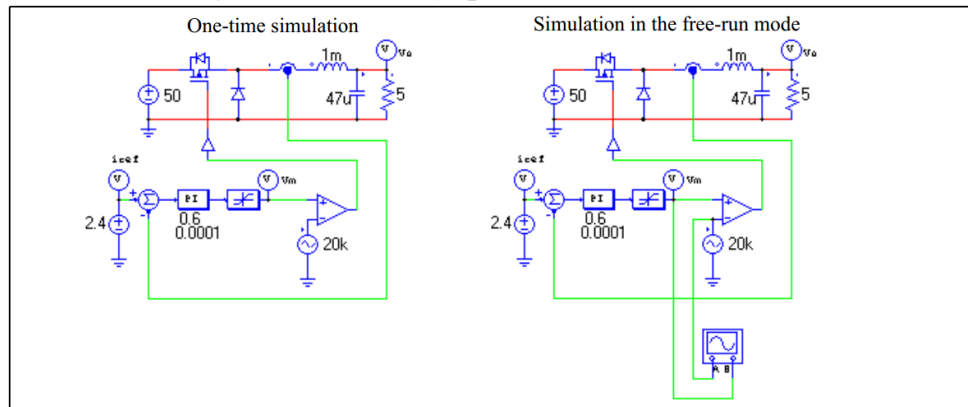
ランタイムグラフはワンタイムモードにおいて使用できます。ランタイムグラフで表示できる変数は、SIMVIEW で表示するために接続した電圧プローブ、電流プローブ等で定義した変数です。更に、ランタイムグラフでは、シミュレーションの開始から終了まで全ての時間について結果を表示することができます。

フリーランモードで、ランタイムの間、シミュレーションの途中で素子のパラメータ値を変更することができます。この機能を用いて、電圧/電流スコープで波形を観測しながら、所望の性能が得られるように調整することができます。

フリーランモードでのシミュレーション例

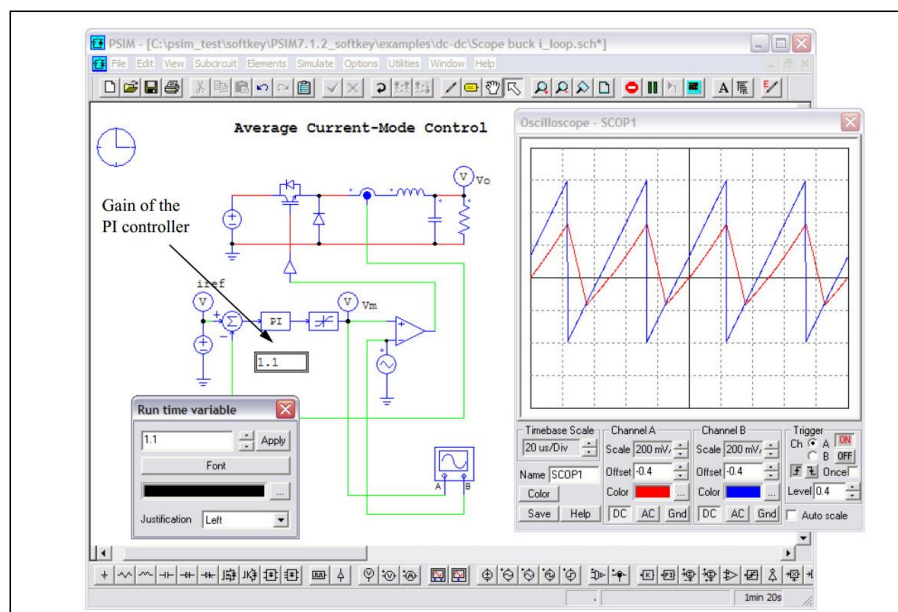
降圧型コンバータの回路を例に、フリーランモードについて説明します。

下図では、左側がワンタイムモードでシミュレーションを実行するためのオリジナルの回路モデルです。右側がフリーランモードで実行するため回路で、電圧スコープが追加されています。

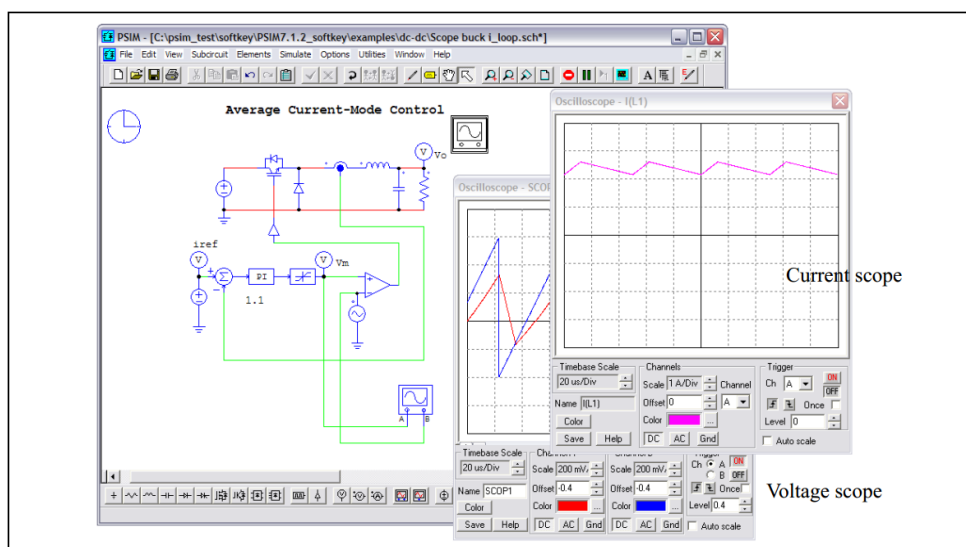


フリーランモードでシミュレーションするための手順を説明します。

- シミュレーション制御から"フリーラン"のチェックボックスをチェックしてください。
- **素子** » **その他** » **プローブ**から、2チャンネルの電圧スコープを選択し、上図右側のように回路と接続してください。
- スコープをダブルクリックすると、スコープウィンドウが表示されます。シミュレーションを実行すると、スコープにシミュレーション結果としての波形が表示され、連続的に更新されます。
- シミュレーションを実行しながら、素子のパラメータを調整することができます。PI制御器のゲインを調整する場合は、PI制御器を右クリックすることで表示されるメニューから、**ランタイム変数** » **ゲイン**を選択してください。ゲインの値がテキスト表示されます。
- ゲイン値のテキストをクリックすると、下図のようにパラメータ調整用のダイアログが表示されます。



- このダイアログウィンドウに直接キーボードから数字を入力するか、またはアップ/ダウン矢印キー押すことにより数字を変更することができます。Apply をクリックすることにより、シミュレーションに設定されたゲインが反映されます。ゲインの変更後の波形の変化を電圧スコープで確認することができます。同様に、他のパラメータ、例えば、電流指令、直流入力電圧、インダクタンス、キャパシタンスおよび負荷抵抗などの値を変更することができます。
- フリーランモードでは、ブランチの電流を表示することができます。例えば、インダクタの電流を表示する場合には、インダクタを右クリックすることで表示されるメニューから、**ランタイム変数** > **電流スコープ**を選択し、電流を表示するブランチを選択してください。
- 電流スコープのブロックが表示されます。ブロックのイメージは電圧スコープブロックと同様ですが、接続端子がありません。インダクタ電流波形を見るためには、スコープをダブルクリックしてウィンドウを開いてください。下図は、電流スコープと電圧スコープのウィンドウを開いた例です。同様に、他のブランチの電流波形を観測することができます。



コマンドラインオプションでシミュレーションの実行

プログラム PsimCmd.exe の実行によりコマンドラインオプションでシミュレーションも起動することができます。例えば、フォルダ「c:\psim\examples\dc-dc」に格納される「buck.psim.sch」回路のシミュレーションを実行するためには、PSIM フォルダに移動し、下記コマンドを実行します。

```
PsimCmd.exe -i "c:\psim\examples\dc-dc\buck.psim.sch" -o "c:\psim\examples\dc-dc\buck.smv"
```

コマンドラインのフォーマットは以下の通りです。

```
PsimCmd.exe -i "[input file]" -o "[output file]" -v "VarName1=VarValue1"
-v "VarName2=VarValue2" -t "TotalTime" -s "TimeStep" -g
```

パラメータの値は、ダブルコーテーション(" ")で囲む必要があります。

コマンドラインパラメータは以下の通りです。

- i 入力回路図のファイル名を指定してください。
- o 出力ファイル名を、テキスト形式(.txt)または、SIMVIEW 形式(.smv)で指定してください。

- v** 変数名および値を指定してください。
変数は複数指定することができます。
例えば、抵抗 R1 を 1.5、インダクタ L1 を 0.001 として指定するためには以下のように記述してください。

```
-v "R1=1.5" -v "L1=0.001"
```

変数の上限は 30 です。

- t** シミュレーション総時間を指定してください。
- s** シミュレーションタイムステップを指定してください。
- g** シミュレーションの完了後に SIMVIEW を実行します。

コマンドラインオプションでは、バッチランを使用すると自動で複数の回路モデルのシミュレーションを実行することができます。

2.10 スクリプトメニュー

スクリプトメニューについて説明します。

パラメータツール

回路図なしでパラメータファイルを開きます。
パラメータファイルの読み込みや、計算をするための式を入力するダイアログを起動します。

スクリプトツール

スクリプトツールではスクリプトを実行できます。
スクリプトファイルはテキストファイルです。
スクリプト関数の使い方や例題の詳細については
チュートリアル Tutorial - How to use script functions.pdf を参照してください。

2.11 解析メニュー

解析ツールとして次のものがあります。

- ・ MonteCarlo 解析 モンテカルロ解析ツール
- ・ 感度解析 感度解析ツール
- ・ 故障解析 故障解析ツール

2.12 オプションメニュー

オプションメニューについて説明します。

設定

編集、印刷、色、シミュレーション、バックアップ、ソフトウェアのライセンスや更新などのためのオプションを設定します。
詳細は、2.12.1 を参照してください。

Languages

言語を設定します。
設定を有効にするためには、PSIM の再起動が必要です。

SIMVIEW 自動実行

シミュレーション完了後に SIMVIEW を自動的に起動します

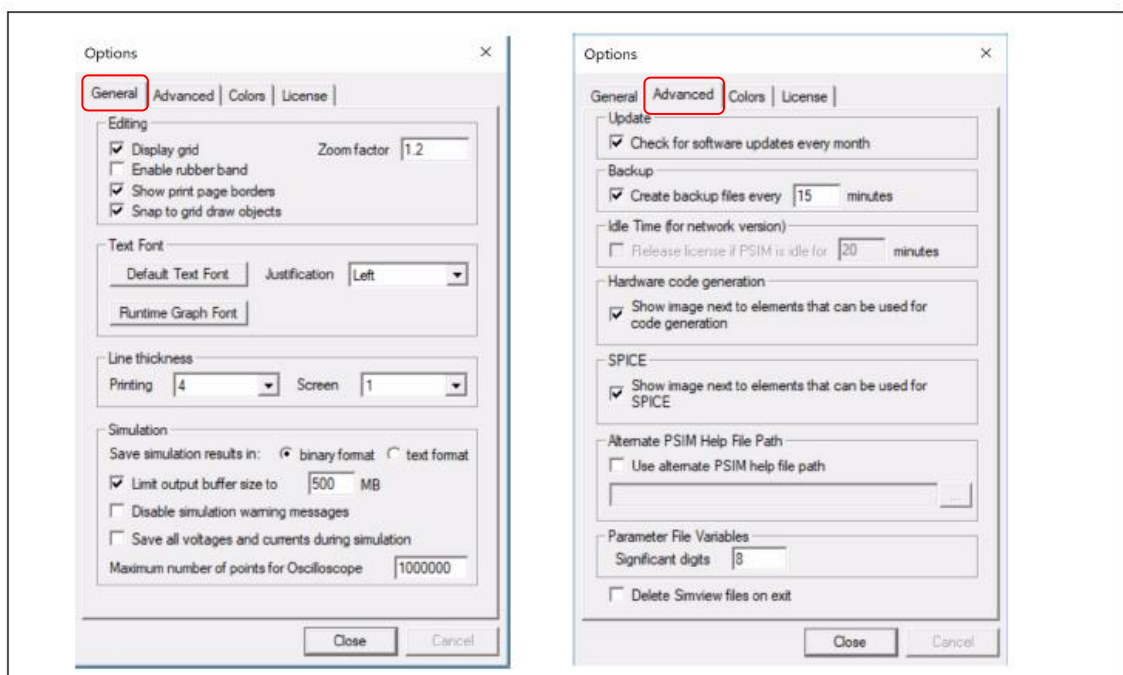
パス設定

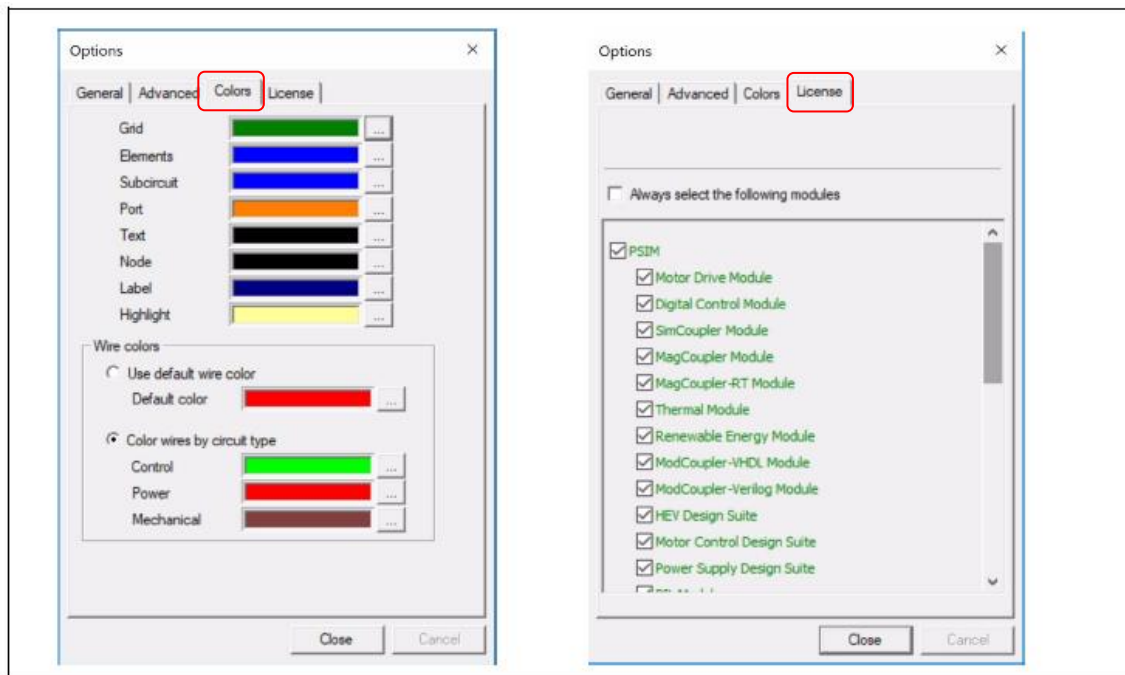
PSIM 検索パス, デバイスファイルパス, および C ブロックインクルードパスを設定します。

パスワード指定	パスワードで保護された回路図を表示するためにパスワードを入力します。
パスワード無効	パスワードで保護された回路図の保護を無効にします。
ユーザ定義キーボード/ ツールバー	ツールバー、キーボード、アプリケーションメニューのカスタマイズを行います。
ユーザ定義設定を保存	カスタマ設定を保存します。 各素子のデフォルト値、カスタムツールバー設定、カスタムキーボード設定を保存することができます。保存する項目を選択してください。
ユーザ定義設定の読み込み	カスタム設定を読み込みます。
レガシーツールバーを読み込み	以前のバージョンのツールバーをロードします。
ディアクティベート	PSIM ライセンスを無効にします。この機能はソフトキー(Softkey)バージョンのみに有効です。
アップデート確認	開発元のサーバへアップデート可能なソフトウェアがあるかどうかチェックします。新しいアップデートがあれば、このアップデート情報をダウンロードしてインストールができます。(サポート契約に加入している方のみ) 日本国内では開発元とは別にアップデートされたソフトウェアをリリースいたします。この機能は使用せずに Myway プラスのホームページからアップデートしてください。

2.12.1 設定オプション

オプションメニューの設定は[一般的情報]、[Advance]、[カラー]、[ページサイズ]、[ライセンス]の機能に分類されています。各機能はタブで切り替えることができます。





[一般的情報タブ]は、編集、テキストフォント、印刷、シミュレーションに分類されます。

「編集」セクション

グリッド表示

PSIM 回路図にグリッドを表示します。

ズーム倍率

回路図の拡大と縮小の倍率を定義します。

ラバーバンドを有効

ラバーバンド機能を有効にします。
ラバーバンド機能が有効の場合、素子もしくは回路ブロックを移動した際に、回路の他の部分との接続が保持されます。

印刷ページ領域表示

チェックすると、プリントアウト領域の境界線が表示されます。

Snap to grid draw objects

有効にすると、回路図内のオブジェクトがグリッドにスナップされます。

「テキストフォント」セクション

デフォルトフォント

回路図のデフォルトテキストフォントを設定します。

位置揃え

テキストの整列位置を設定します。

ランタイムグラフフォント

ランタイムグラフのテキストフォントを設定します。

「線の太さ」セクション

印刷

プリントアウトで表示される線の太さを定義します。
線の太さは 1(最小)から 6(最大)まで設定することができます。

Screen

画面上で表示される線の太さを定義します。
線の太さは 1(最小)から 6(最大)まで設定することができます。

「シミュレーション」セクション

シミュレーション

結果の保存

シミュレーション結果の保存形式をバイナリフォーマット(デフォルト)とテキストフォーマットが選択できます。バイナリフォーマットの場合、ファイルサイズが小さく、ロード時間が速くなります。

出力バッファサイズの制限

このオプションをチェックすると、シミュレーションデータはセグメントで結果ファイルに書かれます。例えば、バッファサイズを20MBに設定する場合、シミュレーションデータは最初にバッファに保存され、そして、20MBに達すると、全体の20MBのデータは結果ファイルに書かれます。

ランタイムグラフはバッファのデータを利用してグラフをプロットします。したがって、古いデータがファイルに保存されて、新しいデータがバッファに記録されます。更に、ランタイムグラフは新しいデータの波形だけを示します。

ランタイムグラフですべての波形を保有するためには、バッファサイズを増加させるか、またはこのオプションのチェックを外します。

しかしながら、このオプションを選択しないと、PSIMは最初に必要なメモリバッファを割り当てます。シミュレーション刻みが小さく、総時間が長く、多くの出力データがある場合、非常に大きいメモリが必要になります。この場合、十分なメモリ容量がないと、シミュレーションが中断されます。

**シミュレーション
警告メッセージ非表示**

警告メッセージを非表示にします。

**シミュレーション中の
すべての電圧と電流を保存**

このオプションがチェックされていると、回路のすべての電圧と電流が、表示のために保存されます。

電圧や電流を表示させるためには、シミュレーションが完了し、結果がSIMVIEWにロードされた後に**表示 > 電圧/電流表示**を選択してください(または対応するシンボルをクリックしてください)。カーソルがノードまたはブランチの上にあるとき、電圧プローブまたは電流クランププローブのイメージに変化します。マウスの左ボタンをクリックすると、対応する電圧または電流がSIMVIEWで表示されます。差動電圧を表示するには、**表示 > 差動電圧表示**を選択し、差動電圧を求めるノードを順にクリックします。差動電圧の波形がSIMVIEWで表示されます。

**オシロスコープ表示の
最大ポイント数**

オシロスコープの最大ポイント数を設定します。10,000 から100,000,000まで設定できます。

[Advance]タブは、*Update*、*Backup*、*Idle time*、*Hardware code generation*、*SPICE*、*Alternate PSIM Help File Path*、*Parameter File Variables*に分類されます。

**「Update」セクション
ソフトウェアの更新を確認**

ソフトウェアのサポート契約に加入した場合、Powersim社のサーバから最新のアップデートファイルをダウンロードすることが可能になります。ここをチェックすると、毎月アップデート情報を自動的に確認します。

**「Backup」セクション
自動バックアップ**

指定された時間間隔で、編集中の回路のバックアップを作成します。バックアップファイルはPSIMが正常に終了したときに自動的に削除されます。

**「Idle Time」セクション
タイムアウト**

このオプションは、PSIMネットワークバージョンのみに有効です。指定された時間、PSIMが操作されなかった場合に、PSIMがタイムアウトされます。PSIMがタイムアウトされると、そのライセンスが解放され他のユーザが使用することができます。ユーザがライセンスを無意識に保持し続けることを防止できます。

「Hardware Code Generation」セクション**素子の横にイメージを表示**

このオプションは SimCoder モジュールがある場合にのみ有効です。素子選択の際に、コード生成に使用することができる素子の横にアイコンを表示します。回路図作成の際に、コード生成に使用できる素子確認しながら素子を選択することができます。

「SPICE」セクション**素子の横にイメージを表示**

このオプションは SPICE モジュールがある場合にのみ有効です。素子選択の際に、素子の横に **Sp**(SPICE 用)**c/p** (コード生成と SPICE 用) アイコンを表示します。回路図作成の際に、SPICE に使用できる素子確認しながら素子を選択することができます。

「Parameter File Variables」セクション**有効数字**

パラメータファイル及び C ブロックの変数の有効数字を指定することができます。例えば $k1=10/3$ で有効数字 8 とした場合は $k1=3.3333333$ となります。

「Delete SIMVIEW file on exit」セクション**SIMVIEW ファイルを削除**

このオプションがチェックされている場合、SIMVIEW の出力ファイルをユーザが保存しない状態で PSIM を終了した場合、出力ファイルを自動的に削除します。

[カラー]タブでは、以下の設定を行うことができます。

カラー設定

グリッド、素子、サブ回路、ポート、ワイヤ、テキスト、ノード、ラベル、ハイライトの色を設定することができます。

[ライセンス]タブでは、ライセンス下で利用可能な PSIM 製品とアドオンモジュールが表示されます。

2.12.2 パス設定オプション

オプションメニューの**パス設定**では、PSIM 検索パスとして次の4つを定義しています。

- PSIM 検索パス：DLL ファイルの検索パス
- デバイスファイルパス：サーマルモジュール・デバイスファイルの検索パス
- C ブロックインクルードパス：ファイルを含む C ブロックの検索パス
- SPICE モデルパス：SPICE モデルライブラリの検索パス
- LTspice 実行ファイルパス：LTspice 実行ファイルの場所

PSIM 検索パスでは、外部 DLL ファイルを読み込む際の検索パスを設定することができます。例えば、回路に DLL ブロックが含まれていて、そこで使用する DLL ファイルが、回路図ファイルの存在するフォルダおよび PSIM フォルダ以外のフォルダに保存されている場合に、DLL ファイルが存在するフォルダを**パス設定機能**で設定しておくことで正しくシミュレーションすることができますようになります。

PSIM は以下の順序で外部 DLL ファイルを検索し、DLL ファイルが最初に検出された時点で、ロードされます。

- PSIM をインストールしたフォルダ(PSIM.exe が存在するフォルダ)
- 回路図ファイル(.sch ファイル)が存在するフォルダ
- **パス設定機能**で設定したフォルダ

例えば、PSIM をインストールしたフォルダが C:\PSIM で、シミュレーションする回路図ファイルが C:\TEMP にあり、パス設定機能で C:\TEMPDLL フォルダが設定されているとき、DLL ファイルは以下の3つのフォルダのいずれかに置くことができます。また、DLL ファイルは以下の順序で検索されます。

- C:\PSIM
- C:\TEMP
- C:\TEMPDLL

デバイスファイルパスは、サーマルモジュールデバイスファイルのために追加の検索パスを定義します。PSIM は以下の順序でサーマルモジュールのデバイスファイルを検索します。

- PSIM ディレクトリの"device"サブフォルダ
- デバイスファイルパスで設定されたフォルダ

PSIM のデバイスサブフォルダおよびデバイスファイルパス内のすべてのデバイスファイルが読み込まれます。

PSIM は以下の順序で SPICE モデルとサブサーキットファイルを検索します。

- PSIM ディレクトリの"SPICElib"サブフォルダ
- SPICE モデルパス設定で設定されたフォルダ内の他のファイル。

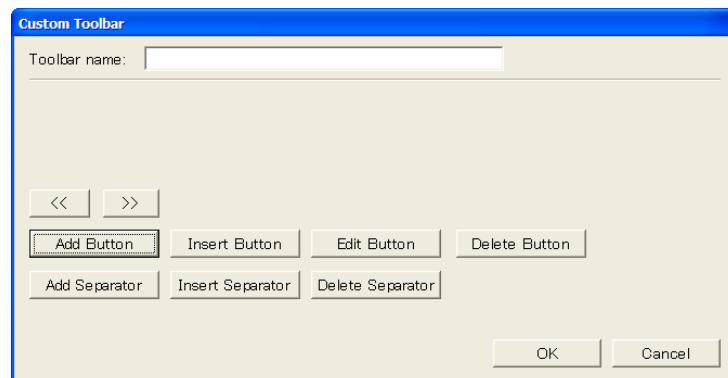
2.12.3 ツールバーとキーボードのカスタマイズ

ツールバーおよびキーボードのカスタマイズについて説明します。

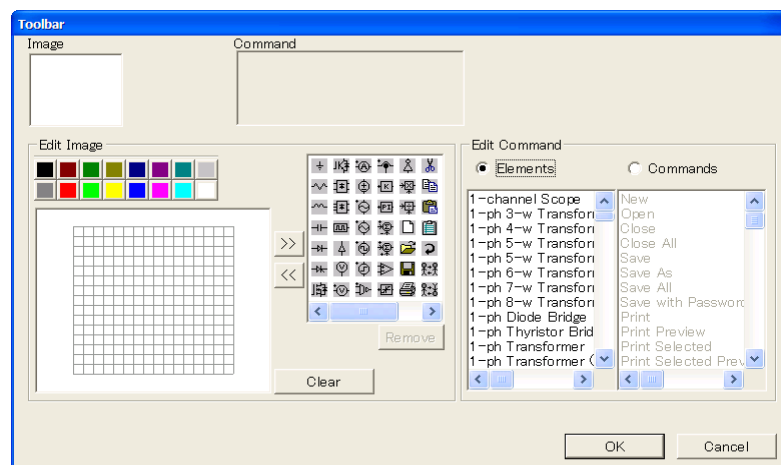
ツールバーのカスタマイズ

AND ゲートを例に挙げ、カスタマイズツールバー機能で新規にボタンを作成する方法を説明します。

- オプション » ユーザ定義キーボード/ツールバーを選択します。[ユーザ定義ツールバー]タブの開き、**新ツールバー** ボタンを選択するとカスタムツールバーダイアログが開きます。

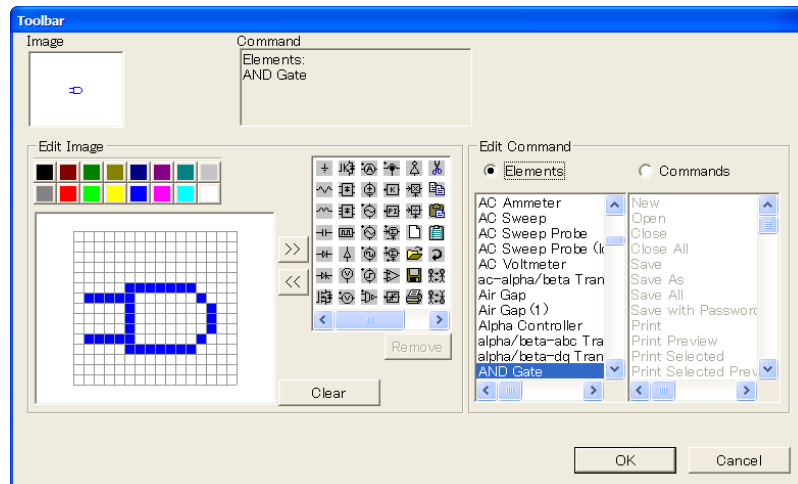


- **ボタン追加** ボタンをクリックすると以下の画面が表示されます。



- アイコン編集エリアに「AND ゲート」のアイコンを描くか、**素子**から選択します。

- 素子から選択する場合、"コマンド編集"の素子オプションを選択して「AND Gate」をハイライトします。次に **OK** ボタンを押してカスタムツールバーウィンドウに戻ります。「AND ゲート」のアイコンがカスタムツールバーダイアログウィンドウに表示されます。

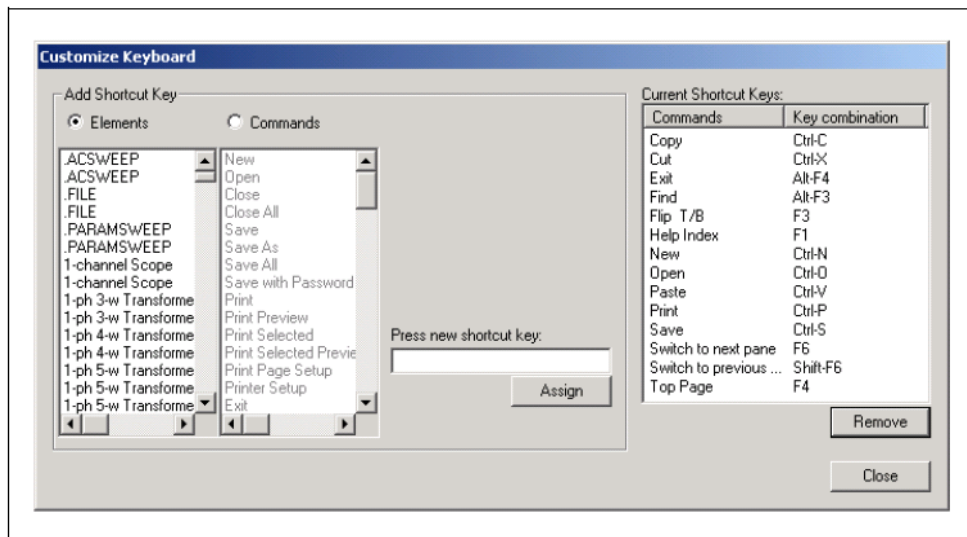


[ユーザー定義ツールバー]タブのボックスにチェックを入れるとツールバーが表示され、チェックを外すと表示されなくなります。

キーボードのカスタマイズ

抵抗要素をキーボード「r」キーで選択する例を説明します。

- オプション » ユーザー定義キーボード/ツールバーを選択します。カスタムキーボードダイアログウィンドウを表示します。



- "ショートカットキーを追加"の項目で、素子オプションを選択します。次に、「抵抗」素子をハイライトします。
- "新しいショートカットキーを押す"の入力フィールドにカーソルを移動してキーボードの<r>キーを押します。次に **割り当て** をクリックします。
- <r>キーが「抵抗」素子に割り当てられます。"現在のショートカットキー"に定義されているショートカットキーのリストが表示されます。

ツールバーのオプションタブでは、ツールバーにボタン名を表示したり大きいアイコンとしたりするチェックボックスがあります。

ツールバーのオプションをカスタマイズするには、「キーボード/ツールバーのカスタマイズ」ダイアログで、「オプション」タブをクリックし、次のようにします。ツールバーのヒントを表示する、またはツールバーのアイコンサイズを大きいものに変更する場合は、チェックボックスをオンにします。

2.13 ユーティリティメニュー

ユーティリティメニューについて説明します。

s2z コンバータ	このプログラムは s 領域の関数を z 領域の関数に変換します。デジタル制御モジュールのライセンスがある場合だけ、このプログラムは有効になります。
InstaSPIN パラメータエディタ	このツールは InstaSPIN に必要なパラメータを計算し、InstaSPIN シミュレーションおよびコード生成用のパラメータファイルを生成します。
SimCoupler 設定	PSIM と MATLAB/Simulink との連成シミュレーションのセットアップを行うためにプログラム SetSimPath.exe を起動します。
デフォルト PSIM プログラム設定	.sch、.psimsch、および.smv ファイルを Windows エクスプローラーでダブルクリックしたときに、このバージョンの PSIM で開くように設定します。
DSP オシロスコープ	DSP オシロスコープを起動します。この機能は、SimCoder Hardware Target の一部として利用可能です。リアルタイムで DSP の波形を表示するには、SCI 機能と一緒に使用されます。 DSP オシロスコープを使用する方法の詳細については、"Tutorial -Using SCI for Waveform Monitoring.pdf"を参照してください。
デバイスデータベースエディタ	サーマルモジュールの PcdEditor.exe というデバイスデータベースエディタを起動します。
曲線キャプチャツール	このツールは、メーカーのデータシートからカーブを取り込みます。取り込まれたデータは、SIMVIEW を用いて表示したり、ルックアップテーブルとして使用することができます。このツールは、曲線からの x/y の値を読み取るために使用します。 取り込み手順を開始するには、ダイアログウィンドウの左上隅にある右矢印をクリックします。
B-H 曲線	このプログラムは可飽和コア素子の B-H カーブプロットを起動します。
太陽電池（物理モデル）	このプログラムは太陽電池ブロックの i-v カーブをプロットします。この機能は再生可能エネルギーモジュールに含まれています。
ウルトラキャパシタモデルツール	ウルトラキャパシタのパラメータ抽出ツールです。詳細につきましては "Tutorial -Ultra-capacitor Model.pdf"を参照してください。
FMU エクスポート	この機能は、FMI 標準をサポートする他のソフトウェアの FMU モデルを生成します。
SmartCtrl を起動/エクスポート	SmartCtrl ソフトウェアを起動します。また、ac スイープのシミュレーション結果が存在する場合には、その結果を SmartCtrl に出力します。SmartCtrl は、PSIM とは独立したソフトウェアで、制御ループ設計のためのソフトウェアです。詳細については、SmartCtrl のマニュアルを参照してください。
単位換算	長さ、面積、重さ、および温度における単位を変換することができます。

電卓

SIMVIEW の電卓機能を使用します。

2.14 ウィンドウメニュー

ウィンドウメニューには次の機能があります。

- －新しいウィンドウ
- －カスケード
- －タイル
- －アイコンを配置
- －ウィンドウマネージャ

2.15 ヘルプメニュー

ヘルプメニューではユーザーが PSIM の機能を利用する際に役立つ資料やガイドがあります。

スタートページ	範例、最近使用したファイル、ニュース、イベントに簡単にアクセスできるウェルカムページです。
索引	PSIM の回路や機能についての索引
ドキュメント	PSIM とアドオンオプションのユーザーマニュアル
チュートリアル	PSIM とアドオンオプションのチュートリアル
ビデオチュートリアル	ビデオチュートリアルへのリンク
今日のヒント	ちょっとした情報
PSIM について	お使いの PSIM のバージョンやライセンス、アクティブモジュールの情報が確認できます。

2.16 PSIM ライブラリの管理

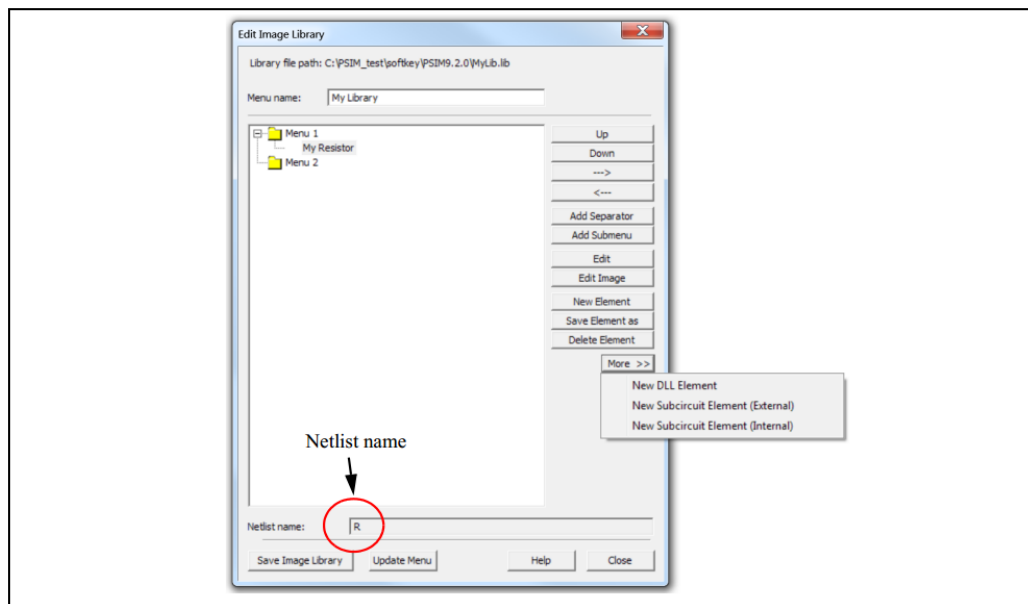
PSIM ライブラリは、ネットリストライブラリとイメージライブラリの 2 種類のライブラリから構成されます。ネットリストライブラリを編集することはできません。

イメージライブラリは編集または新規追加ができ、PSIM フォルダ内に格納されているイメージライブラリは、PSIM により自動的に取り込まれます。標準のイメージライブラリは、psimimage.lib に格納されています。ユーザは psimimage.lib を編集することはできませんが、**編集** ≫ **ライブラリ編集** ≫ **ライブラリファイル編集**で画像を表示してコピーすることができます。

ユーザは、**編集** ≫ **ライブラリ編集** ≫ **ライブラリファイル編集**で 新しいライブラリを作成 を選択することにより新しい画像ライブラリを作ることができます。その後ライブラリ名を決定するとその名称が PSIM の素子メニューに表示されます。このライブラリファイルは PSIM フォルダ内に作成されます。

イメージライブラリを編集するためには、**編集** ≫ **ライブラリ編集** ≫ **ライブラリファイル編集**から、選択したライブラリを編集を選択してください。下図に示すライブラリ編集ダイアログが表示されます。ダイアログには、メニューツリーおよび編集機能が表示されます。

ライブラリエディタでは以下のような機能が提供されます。



上へ	メニュー内で素子を 1 つ上に移動します。
下へ	メニュー内で素子を 1 つ下に移動します。
-->	素子を 1 段下のレベルに移動します。
<--	素子を 1 段上のレベルに移動します。
セパレータを追加	素子間にセパレータを追加します。
サブメニューを追加	ライブラリにサブメニューを追加します。
編集	素子名を変更します。
イメージ編集	素子のイメージを編集します。
新素子作成	ライブラリ内に新しい素子を追加します。 新しい素子は、ネットリストライブラリのネットリスト素子と関連付けられます。
名前を付けて素子を保存	既存素子を新しい素子として別名で保存します。初期イメージとして既存素子のイメージが使用されます。
素子を削除	ライブラリから素子を削除します。
新しい素子(DLL)	DLL ファイルから素子を新規に作成します。
新サブ回路素子(外部)	サブ回路から素子を新規に作成します。サブ回路ファイルはライブラリ外に保存されます。
新サブ回路素子(内部)	サブ回路から素子を新規に作成します。サブ回路ファイルはライブラリ内に保存されます。

2.16.1 二次イメージの作成

PSIM では、標準のイメージに加えて、ユーザ独自のイメージ(二次イメージ)をライブラリに追加することができます。

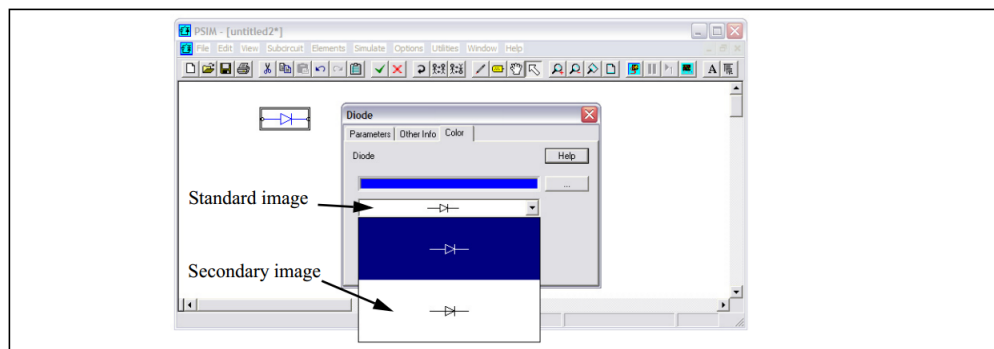
追加の素子イメージは標準イメージライブラリあるいはユーザのカスタムイメージライブラリで作成することができます。新しいイメージは第 2 イメージライブラリとして、.lib2 形式で保存されます。

標準イメージライブラリ内の「Diode」に対する第 2 イメージをライブラリ「mylib.lib2」内に作成する方法を以下に説明します。

- **編集** » **ライブラリ編集** » **二次イメージライブラリファイル編集**から **新しいライブラリを作成**を選択してください。ダイアログ内で、ライブラリ名を"mylib.lib2"と設定してください。
- "mylib.lib2"を選択し、**選択したライブラリを編集**をクリックしてください。二次イメージ編集用のダイアログが表示されます。
- **追加** ボタンをクリックして、PSIM ライブラリリストの **パワー** » **スイッチ** からダイオードを選択してください。二次イメージリストにダイオードが表示されます。表示「ダイオード」の前に表示される「PSIMIMAGE」は標準イメージライブラリ psimimage.lib のダイオード素子であることを示します。
- ダイオードをハイライトして **編集** ボタンをクリックしてイメージを作成してください。
- 作成したイメージを素子のデフォルトイメージとして使用する場合は **デフォルトに設定** をクリックしてください。

作成した二次イメージは、回路図作成時に選択し利用することができます。例えば、ダイオードを回路図に追加してダブルクリックすると、プロパティダイアログが表示されます。このダイアログの[Color]タブを選択してプルダウンを選択すると2つイメージが表示されます。標準イメージライブラリとカスタムイメージライブラリです。

二次イメージを選択すると、同じ素子のすべてのイメージが自動的に二次イメージに変更されます。次に回路図を作成もしくは開く際に、選択されたイメージがデフォルトイメージとして設定されます。



二次イメージのライブラリファイルを共有することで、複数のユーザ間で新規に作成したイメージライブラリを拡張子.lib2の二次イメージライブラリファイルとして共有することができます。

2.16.2 ライブラリへ新しいサブ回路要素の追加

カスタムモデルを PSIM ライブラリリストに追加するには、2つの方法があります。1つはモデルをサブ回路の形式にし、PSIM ディレクトリで **User Defined** フォルダ、または **User Defined** フォルダのサブフォルダのいずれかに回路図ファイルを配置することです。**User Defined** フォルダの下にある回路図ファイルとサブフォルダは、PSIM ライブラリリストに表示されます。

もう一つの方法は、カスタムモデルをイメージライブラリに直接追加することです。この方法の利点は、カスタム素子が標準の PSIM 素子と同じ見た目と使い方ができ、より良いインターフェースを提供することです。ヘルプファイルをカスタムモデルに関連付けることもできます。

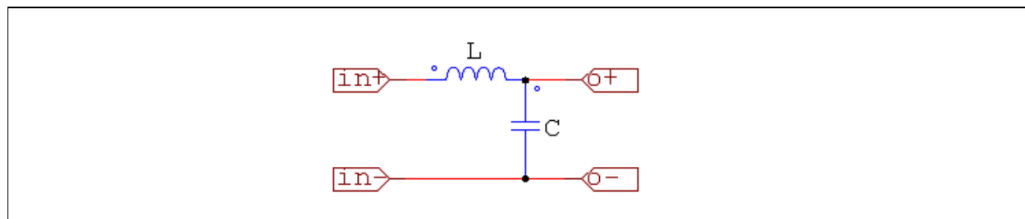
サブ回路でモデル化された新しい素子を PSIM ライブラリに追加するための手順には、以下の 3 つのステップがあります。

- 新しい素子をサブ回路モデルとして作成
- PSIM ライブラリへ素子を追加
- この新しい素子用のオンラインヘルプファイルを作成

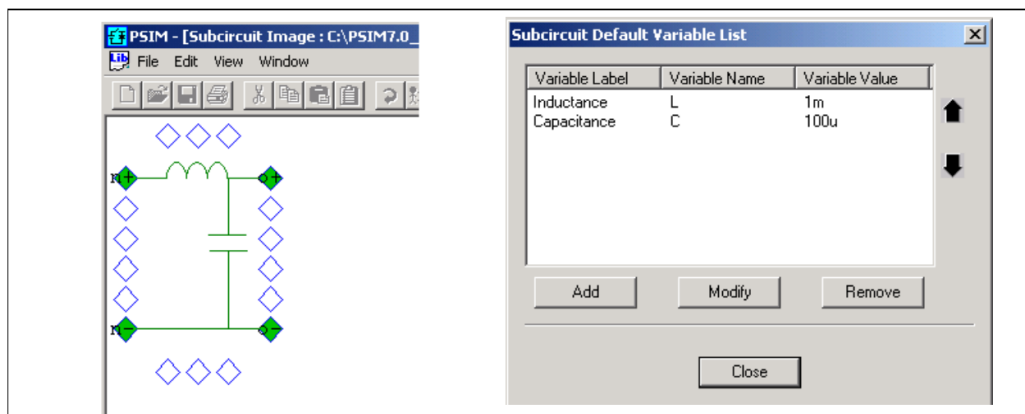
LC フィルタを例に、これらのステップについて説明します。

Step1: サブ回路の作成

最初のステップは、サブ回路を作成することです。メイン回路からサブ回路を呼び出す場合と同様にサブ回路を作成してください。例として、二次の LC フィルタ(ファイル名: "LC_filter.sch")のイメージを下図に示します。



ライブラリに追加するためには、モデルのパラメータ(インダクタンス L およびキャパシタンス C)は、回路図に配置した後に、プロパティウィンドウを通じて設定する必要があります。そのため、パラメータ L および C は変数として定義する必要があります。



次に、サブ回路 » デフォルト変数リスト編集 から、デフォルト変数に変数 L および C を追加してください。デフォルト変数リストからパラメータ情報を取得する素子として登録するために必要です。デフォルト変数リストウィンドウが上図右側の通りに見えるはずです。

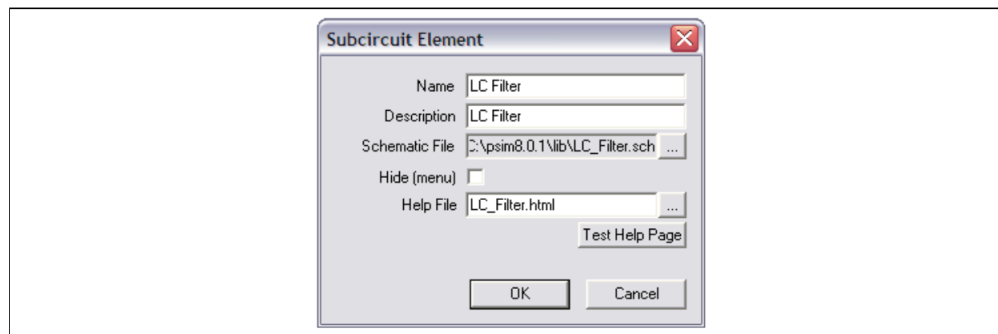
デフォルト変数リストウィンドウにおいて、"変数説明"にはパラメータの説明、"変数名"にはサブ回路中でパラメータ名、"変数値"にはデフォルト値が表示されます。この例では、インダクタンス "L" については、"変数説明"は Inductance、"変数名"は "L"、"変数値"は "1m" です。また、キャパシタンス "C" については、"Capacitance"、"C"、"100u" です。

作成したファイルを、PSIM フォルダ中の "lib" フォルダに保存してください。

Step2: PSIM ライブラリへ素子を追加

PSIM ライブラリへサブ回路素子を追加するためには、次の手順に従ってください。

- **編集 » ライブラリ編集 » ライブラリファイル編集**から、新しい素子のためのカスタムイメージライブラリを選択してください。
新規のイメージライブラリを作る場合は、**新しいライブラリを作成**をクリックしてください。
既存のライブラリを使用する場合は、ライブラリを選択し、**選択したライブラリを編集**をクリックしてください。
- ライブラリエディタでは、**新サブ回路素子** ボタンをクリックしてください。下図のダイアログが表示されますので、必要な情報を入力してください。



名前	PSIM ライブラリに示される素子名。
説明	素子の説明。
回路ファイル	サブ回路の回路図のファイル「LC_filter.sch」の位置。 サブ回路ファイルは PSIM フォルダの"lib"フォルダに保存される必要があります。
入力ノード	入力ノードの数。
出力ノード	出力ノードの数。
非表示(メニュー)	チェックを入れないでください。 この機能がチェックされていると、素子がライブラリに表示されません。
ヘルプファイル	素子と関連付けされたオンラインヘルプファイル。 PSIM フォルダ内の"help"フォルダに保存してください。プロパティダイアログの HELP ボタンがクリックされた際に、このファイルが表示されます。ファイルはテキスト形式か HTML 形式が使用できます。

- イメージライブラリ保存およびメニュー変更ボタンをクリックしてください。新しい素子がライブラリに表示され使用することができます。

2.16.3 ライブラリへ DLL 素子の追加

DLL で作成した素子を PSIM ライブラリに追加するための手順には、サブ回路の場合と同様に以下の 3 つのステップがあります。

- 素子モデルの DLL ファイルを作成

- 素子をPSIMライブラリに追加
- 新規素子のオンラインヘルプを作成

インダクタを例に、DLL 素子の作成手順を説明します。

Step1 : DLL の作成

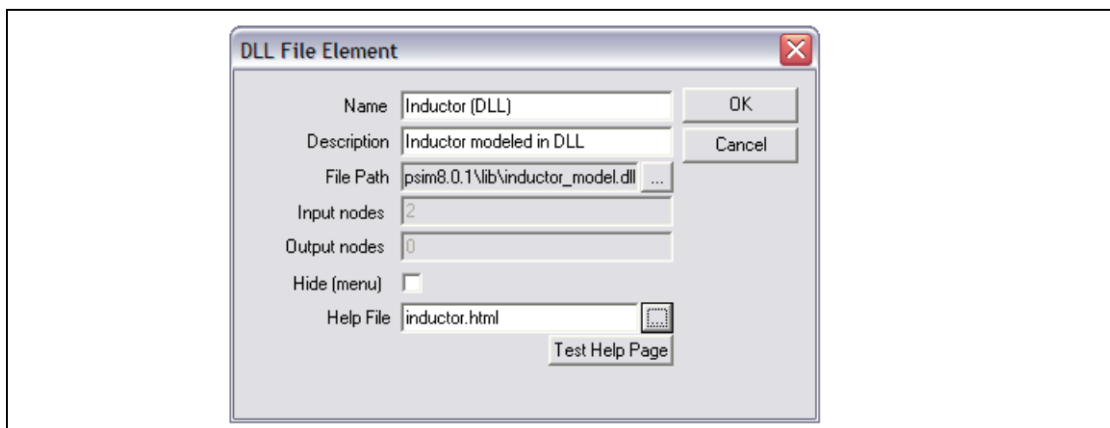
まず、インダクタの DLL モデルを作成します。カスタム DLL の作成方法は関連する章を参照してください。

ここで、パラメータ "インダクタンス"および 2つの接続ノードを持つ DLL モデル"inductor_model.dll"は既に作成されており、ファイルは PSIM フォルダ中の"lib"フォルダに保存されているものとします。

Step2 : PSIM ライブラリへ素子を追加

PSIMライブラリへサブ回路素子を追加するためには、次の手順に従ってください。

- **編集 > ライブラリ編集 > ライブラリファイル編集**から、新しい素子を選択してください。新規のイメージライブラリを作る場合は、**新しいライブラリを作成**をクリックしてください。既存のライブラリを使用する場合は、ライブラリを選択し、**選択したライブラリを編集**をクリックしてください。
- ライブラリエディタでは、**新しい素子(DLL)** ボタンをクリックしてください。下図のダイアログが表示されますので、必要な情報を入力してください。



名前	PSIM ライブラリに示される素子名。
説明	素子の説明。
ファイルパス	DLL ファイル「inductor_model.dll」の置き場所。 DLL ファイルは PSIM フォルダの"lib"フォルダに保存される必要があります。
入力ノード	入力ノード数。
出力ノード	出力ノード数。
非表示(メニュー)	チェックを入れないでください。 この機能がチェックされていると、素子がライブラリに表示されません。
ヘルプファイル	素子と関連付けされたオンラインヘルプファイル。 PSIM フォルダ内の"help"フォルダに保存してください。プロパティダイアログの HELP ボタンがクリックされた際に、このファイルが表示されます。ファイルはテキスト形式か HTML 形式が使用できます。

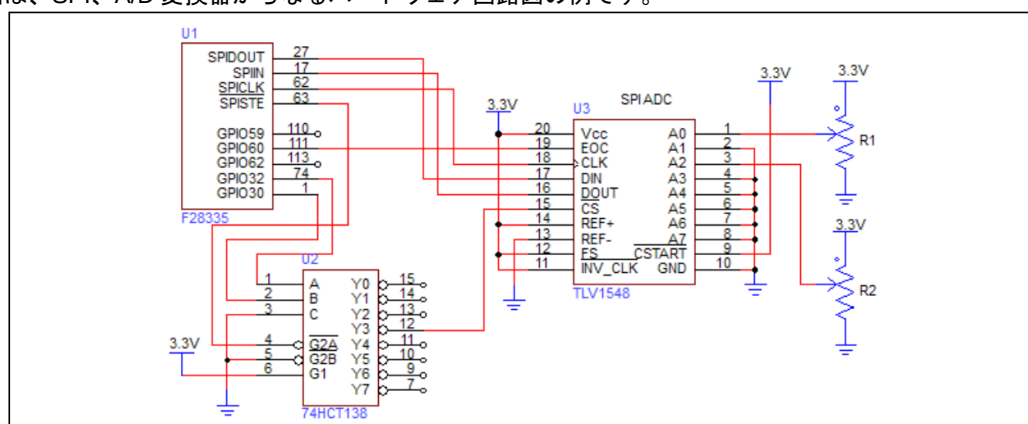
- 次のダイアログウィンドウで、素子のサイズを設定してください(例: Width=5、Height = 2)。
次いで、素子のイメージを新規作成もしくはデフォルトイメージを採用してください。
- イメージライブラリ保存およびメニュー変更ボタンをクリックしてください。新しい素子がライブラリに表示され使用することができます。

新しいインダクタ素子のパラメータ数とパラメータの説明に関する情報は、DLL ファイルから自動的に取得されます。この場合、新しい素子には「インダクタンス」が1つのパラメータとしてあります。

2.17 シンボルライブラリの作成

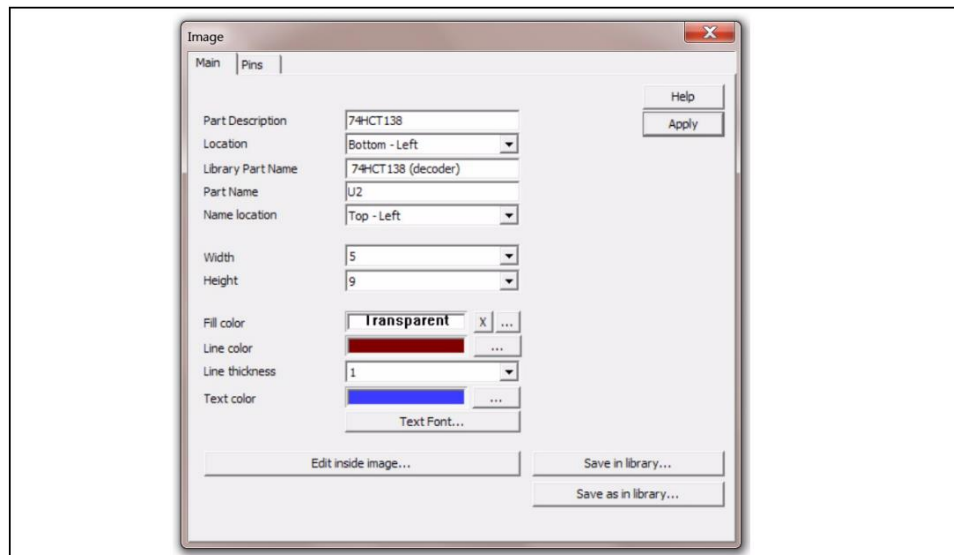
編集メニューの中の、イメージエディタ機能を使用することで、素子イメージを作成することができます。作成した素子イメージは、PSIM ライブラリの二次イメージやサブ回路のイメージとして使用することができます。また、イメージライブラリに保存し、回路上に図形描画する際に使用することもできます。図形描画として使用した場合、シミュレーションには反映されません。

下図は、SPI、A/D 変換器からなるハードウェア回路図の例です。

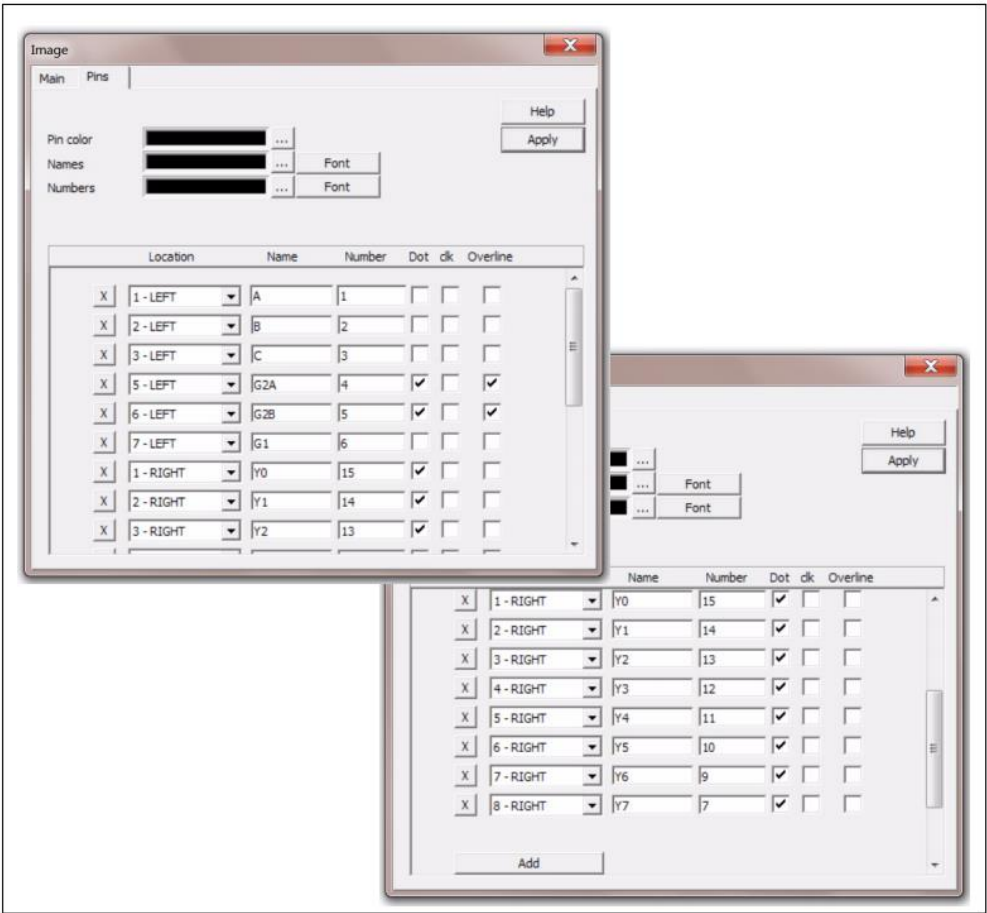


F28335、74HCT138、および TLV1548 はすべてイメージエディタによって作成されています。イメージエディタの使用方法を、デコーダ 74HCT138 用イメージの作成を例に説明します。

- PSIMで新しい回路図を作成し、**編集** > **イメージエディタ**を選択します。表示される長方形を回路図内の任意の位置に配置してください。長方形の表示を解除するためには<ESC>キーを押してください。
- 長方形の領域をダブルクリックするとダイアログウィンドウが表示されます。
[メイン]タブでは、下図に示すパラメータを入力してください。
"ライブラリ部品名"は、ライブラリ内で表示される素子名です。"幅""高さ"でブロックのサイズを指定します。端子を除いたサイズを指定します。この例では、"幅"=5、"高さ"=9としています。

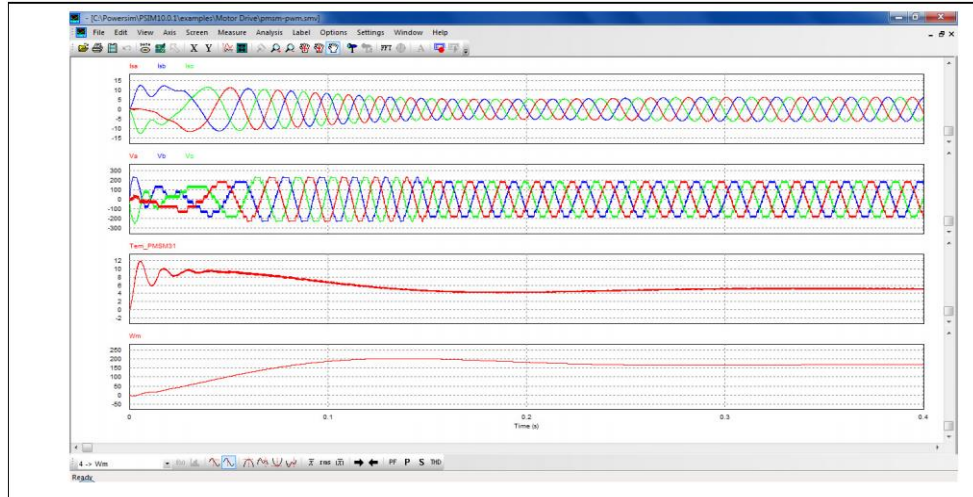


- [ピン]タブでは、ピンの追加や設定を行います。**追加**ボタンを押すとピンを追加することができます。ピンの場所、名前、ピンの番号を指定してください。点、クロック、負論理は以下の設定に対応します。この例では、チェックは入れないでください。
 点 信号論理が負論理であることを示す○印がブロックとピンの間に表示されます。
 クロック クロック入力を示す>マークが表示されます。
 負論理 信号論理が負論理であることを示すオーバーラインがピン名の上に表示されます。
- 同様に**追加**ボタンを押して必要なピンを全て設定してください。
- ピンの設定が完了したら、[メイン]タブから **ライブラリ名前付けて保存** を押して"新ライブラリ"を選択してください。ライブラリ名およびライブラリファイル名を指定してください。新しい素子がライブラリに表示され使用することができます。



第3章 SIMVIEW による波形処理

SIMVIEW は波形の表示とシミュレーション実行後のデータ処理をおこなうプログラムです。下の図は SIMVIEW により、波形を表示した例です。



SIMVIEW はデータを 専用フォーマットの他に ASCII テキストフォーマットで読み込むことができます。以下はデータファイルの例です。

```

Time      Isa      Isc      Isb      Tem_IM
5.000000000E-006  0.000000000E+000  0.000000000E+000  0.000000000E+000  7.14588260E-048
1.000000000E-005  0.000000000E+000  0.000000000E+000  0.000000000E+000  1.082981714E-046
1.500000000E-005  0.000000000E+000  0.000000000E+000  0.000000000E+000  5.408644357E-046
2.000000000E-005  1.139566166E-001  -2.279132474E-001  1.139566166E-001  1.613605209E-017
2.500000000E-005  5.072914178E-001  -1.014582858E+000  5.072914178E-001  3.598226665E-015
... ..

```

3.1 ファイルメニュー

ファイルメニューの機能について説明します。

回路を開く	ASCII テキスト形式か、SIMVIEW 形式(.smv)のデータをファイルから読み込みます。
マージ	現在表示しているファイルに他のファイルを結合させます。
データを再ロード	現在表示しているファイルの元のデータを再度読み込みます。
名前を付けて保存	波形を保存します。ファイル形式は、SIMVIEW 形式、テキスト形式(Tab 区切り、カンマ区切り)から選択することができます。 SIMVIEW 形式での保存を選択すると、現在の設定も保存されます。 FFT 表示中は、FFT の結果をテキスト形式でユーザが指定した名前のファイルに保存します。
名前を指定して表示を保存	表示された波形をテキスト形式で保存します。
印刷	波形を印刷します。
プリンタ設定	プリンタの設定を行います。
印刷ページ設定	ページ設定を行います。
印刷プレビュー	印刷プレビューを表示します。
終了	SIMVIEW を終了します。

ファイルから読み込んだデータを波形として表示中に、(新しいシミュレーションにより)同じファイル名で内容が更新されたデータが得られた場合は、**データを再ロード**を選択することで新しいデータに基づいて波形表示が更新されます。

「マージ」機能を使うことにより、複数のファイルから読み込んだデータを1つのファイルから読み込んだように表示することができます。例えば、あるファイルが I1 と I2 の波形データを含み、別のファイルが V1 と V2 のデータを含んでいる場合、4つの波形を合成してひとつの画面に表示することができます。後から読み込むファイルに同じ I1 という波形データがあった場合は、I1_({file_name})というように自動的に名称が変更されます。({file_name})にはファイル名が入ります)

3.2 編集メニュー

編集メニューの機能について説明します。

取り消し	X 軸、Y 軸の設定を戻します。
クリップボードにコピー	表示波形をクリップボードにコピーします。 フォーマットはメタファイルフォーマット、ビットマップフォーマットから選択することができます。
データポイント表示	別ウィンドウが開き、表示範囲のデータをテキスト形式で表示します。 領域を選択し、右クリックでコピーする内容を選択することで、データをクリップボードへコピーすることができます。

クリップボードにコピー機能は、表示している波形をクリップボードにコピーします。白黒表示でコピーする場合は、先に**オプション** » **カラー**のチェックを外してください。

3.3 表示メニュー

表示メニューの機能について説明します。

アプリケーション表示スタイル	PSIM ウィンドウの表示スタイルを選択します。
ズーム	選択された範囲を拡大表示します
再描画	波形を再表示します。倍率は自動で調整されます。
脱出	ズームまたは測定モードから復帰します。
標準ツールバー	標準ツールバーの表示を有効・無効にします。
測定ツールバー	測定ツールバーの表示を有効・無効にします。
ステータスバー	ステータスバーの表示を有効・無効にします。
電卓	SIMVIEW の電卓を起動します。

電卓のインターフェース画面は以下の通りです。



電卓インターフェースは、9 個のメモリスペースを備えています。

測定ウィンドウ中で、計測値をダブルクリックすることで、値を電卓のメモリにコピーすることができます。

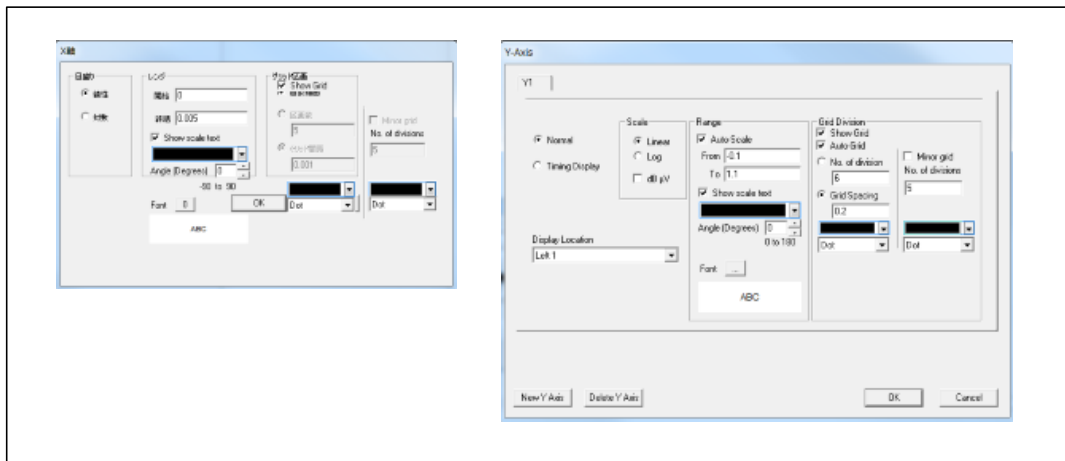
3.4 軸メニュー

軸メニューの機能について説明します。

- X 軸** X 軸の設定を変更します。
- Y 軸** Y 軸の設定を変更します。
- X 軸変数を選択** X 軸として任意のデータ列を選定することができます。
デフォルトではデータの最初の列、時間(time)が X 軸として選定されます。

設定のいずれかがデフォルト値から変更された場合、ユーザーは「設定>>保存設定」を使用して変更を維持する必要があります。これにより、次回同じ PSIM 回路図シミュレーションが実行されたときに、同じ設定が SIMVIEW に表示されます。

X/Y 軸の設定ウィンドウは下図のように表示されます。



3.4.1 X 軸の設定

X 軸の設定は 3 つの部分に分かれています。

- 目盛** X 軸の表示設定：線形もしくは対数を選択できます。
- レンジ** X 軸のレンジ、スケールの文字の色、フォント、角度を設定できます。
- グリッド区画** X 軸のグリッドの、色が設定できます。自動描画にチェックをいれると軸の区画数は自動で設定されます。

3.4.2 Y 軸の設定

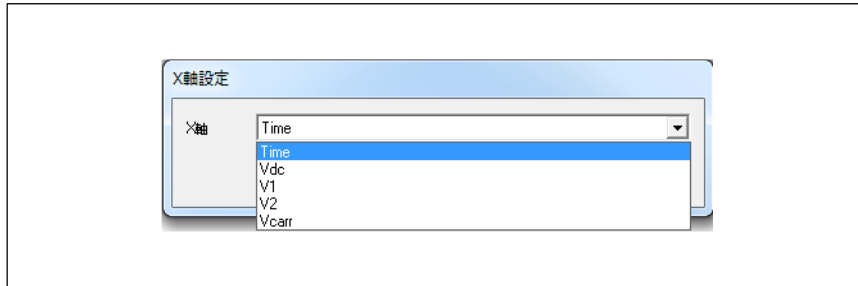
X 軸の設定と同様に 3 つの部分に分かれています。

- 表示スタイル (Display Style)** Normal : デフォルトの波形表示となります。
レンジ : 各波形を設定した Y 軸へ自動表示します。
Timing Display : 変数間のタイミング関係を表示します。
- Scale** スケールのオプション : 線形、Log、dB μ V を選択できます。
- Grid Division** Grid の表示型式、色を設定できます。
- New Y Axis** 同じグラフへ違う変数の Y 軸を追加します。左右の設定ができます。
- Delete Y Axis** 必要のない Y 軸を削除します。

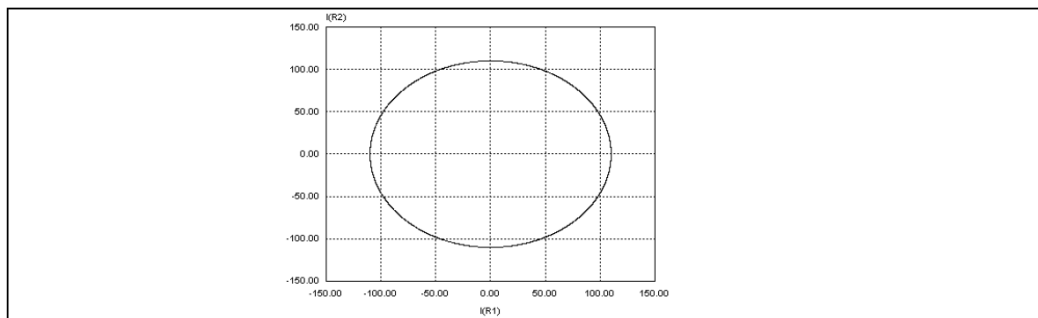
3.4.3 X 軸変数

デフォルトではデータファイルの最初のカラムが X 軸に設定されるようになっており、大部分は時間軸となっています。AC スイープシミュレーションの場合、X 軸は周波数となります。

このオプションでは X 軸の設定をメニューバーの **軸>>X 軸変数を選択** で表示されるウィンドウのプルダウンリストから選択することができます。



下図は、機能で正弦波を X 軸に設定し、Y 軸には余弦波を選択した場合の表示波形です。



3.5 スクリーンメニュー

スクリーンメニューの機能について説明します。

新しいウィンドウ

アクティブ・ウィンドウを新たに追加できます。この機能は、新しいウィンドウで追加の波形を見るのに便利です。

曲線を追加/削除

選択された画面から波形を追加または削除します。

Split Window

画面を選択した複数の画面に分割します。

Overview Zoom box

Overview zoom box を開きます。

スクリーンを追加

新しい画面を追加します。

スクリーンを削除

選択された画面を削除します。

ベクトル図の描画

ベクトル図をプロットします。ベクトルは時間軸プロットの変数リストと同じ実部、虚部の値で定義されます。このオプションではユーザーがベクトル変数から実数、虚数部を設定できるようになっています。変数は時間軸プロットと同じ変数リストです。

フルスクリーンで表示

SIMVIEW ウィンドウをフルスクリーンにします。

上へ移動

選択したスクリーンを上へ移動します。

下へ移動

選択したスクリーンを下へ移動します。

スクリーンを選択するには、選択したいスクリーン上で左クリックしてください。

3.5.1 スクリーン機能ダイアログ・ボックス

新しいスクリーンが追加、もしくは曲線を追加/選択機能が選択された場合はスクリーン機能として3つのタブが表示されます。

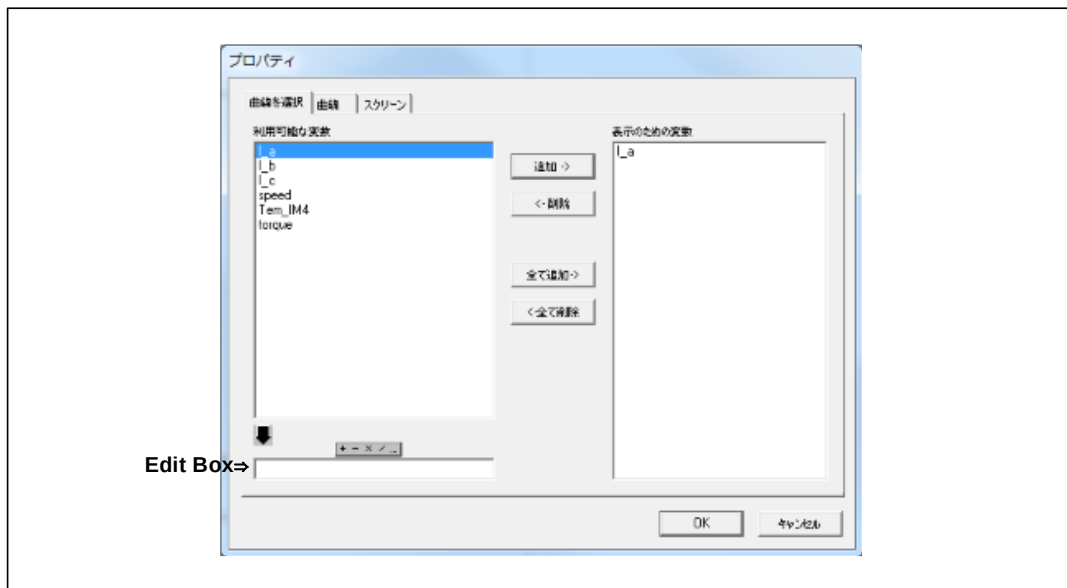
[曲線選択]タブ 表示する波形を選択します。

[曲線]タブ 波形の色、線の太さ、マーカーのシンボルなどを設定します。

[スクリーン]タブ スクリーンの色とフォントを設定します。

設定をデフォルトから変更した場合、次回同じ.smv ファイルが起動されたときに有効になるようにするために「オプション>>設定を保存」を使用して表示設定を保存する必要があります。

[曲線を選択]のタブは次図のようになります。



すべての曲線表示可能な変数は、左側の「利用可能な変数」のボックスに一覧表示されます。現在表示中の変数は右側の「表示のための変数」のボックスにリストされています。「利用可能な変数」のボックスで変数をハイライトしてから、**追加->**のボタンを押すと「表示のための変数」のボックスにこの変数が追加されます。同様に、「表示のための変数」ボックスで変数をハイライトして**<-削除**のボタンを押すと、その変数を削除できます。

「Edit Box」では、「利用可能な変数」のボックスにリストされている変数をパラメータとして演算処理を行うことができます。次の演算子および括弧を使うことができます。

+	加算	
-	減算	
*	乗算	
/	除算	
^	べき乗	例: $2^3 = 2*2*2$
SQRT	平方根	
SIN	正弦(サイン)	
COS	余弦(コサイン)	
TAN	正接(タンジェント)	
ATAN	逆正接(アークタンジェント)	
EXP	指数	例: $EXP(x) = e^x$
LOG	自然対数	$LOG(x) = \ln(x)$
LOG10	常用対数	(基底 10)
ABS	絶対値	
SIGN	符号	例: $SIGN(1.2) = 1$; $SIGN(-1.2) = -1$

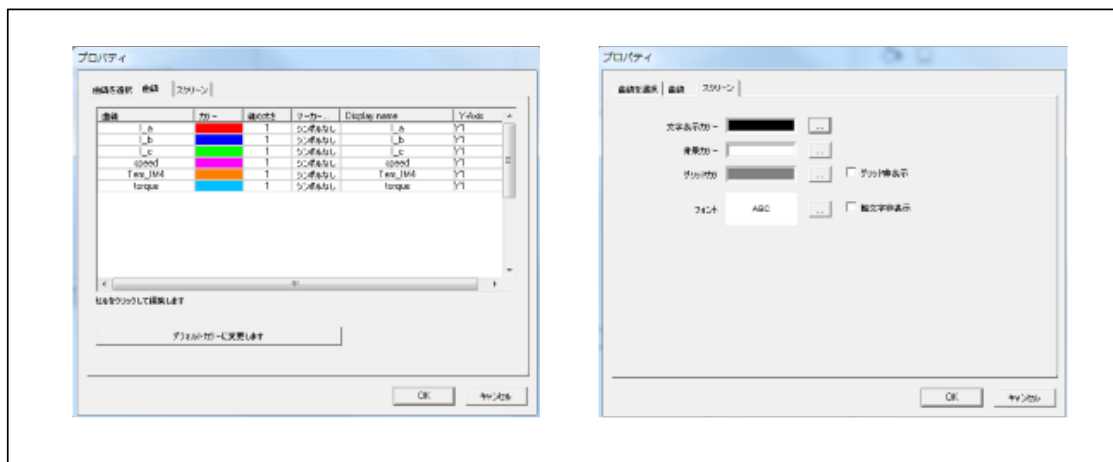
AVG 移動平均
 AVGX 周期平均

AVGX(y, Tp)は、曲線 y を区間 Tp ごとに平均値を算出します。
 例えば AVGX(V1,0.016667)は、曲線 V1 を 60Hz 間隔で平均を計算します。

INT 積分

数式を「Edit Box」に入力し、**追加->**のボタンを押します。また、数式をハイライトし、**<- 削除**のボタンを押すと数式が「Edit Box」に表示されるので、数式を変更することができます。

プロパティで開く[曲線]と[スクリーン]のタブは次のようになっています。



[曲線]タブ

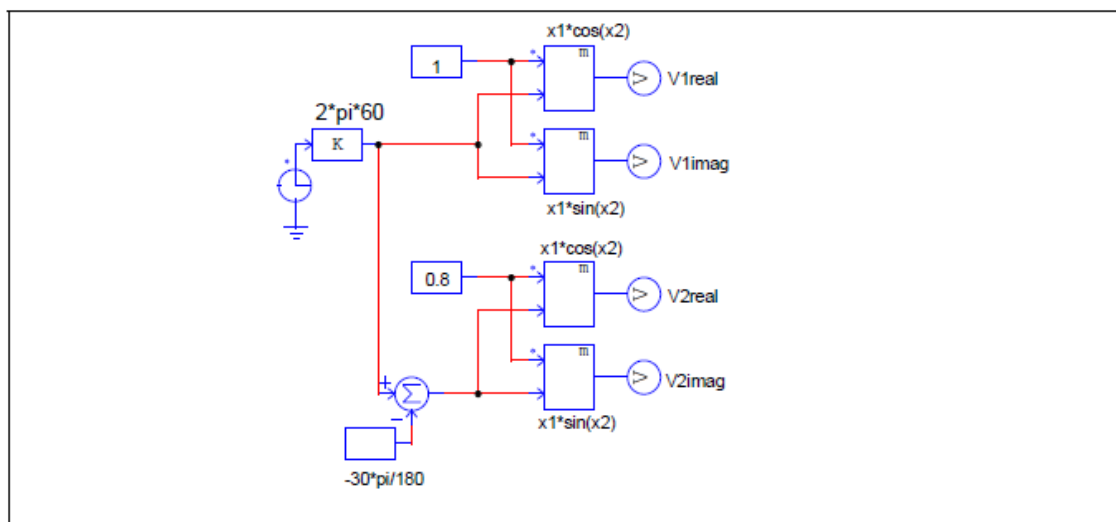
線の色、太さ、マーカーシンボル及びラベルなどの曲線特性を設定することができます。デフォルトの設定は SIMVIEW のオプション>>設定で定義されています。

[スクリーン]タブ

文字表示色、背景色、グリッドカラーおよびフォントサイズ/タイプなどなスクリーン特性を設定することができます。

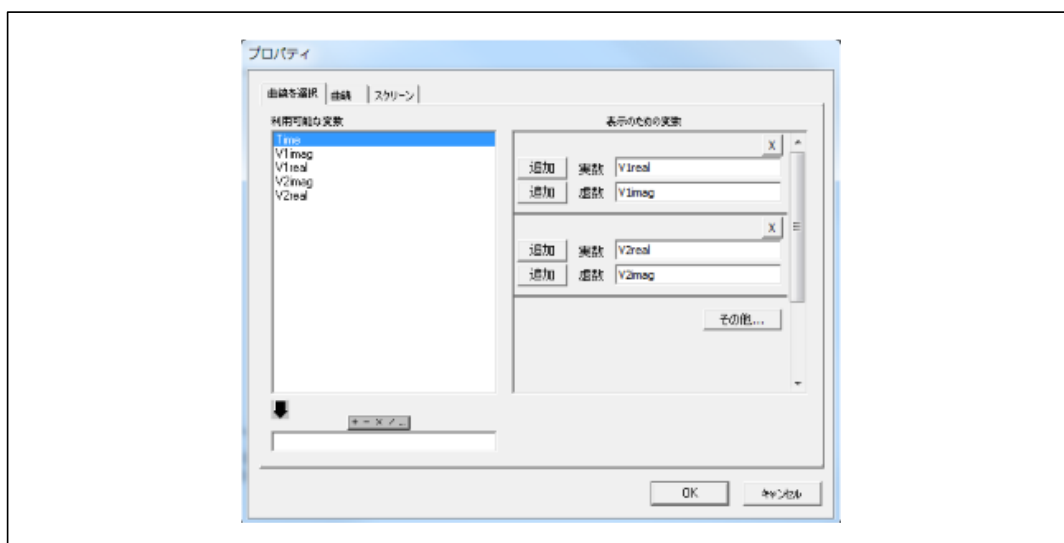
3.5.2 ベクトル図の描画

ベクトル図を描画する場合は最初にシミュレーションを実行します。それから SIMVIEW の**スクリーン>>ベクトル図を描画**を選んでベクトルを定義します。次に範例の Script>>Filesにある“2 vectors changing.psimsch”を使い説明します。

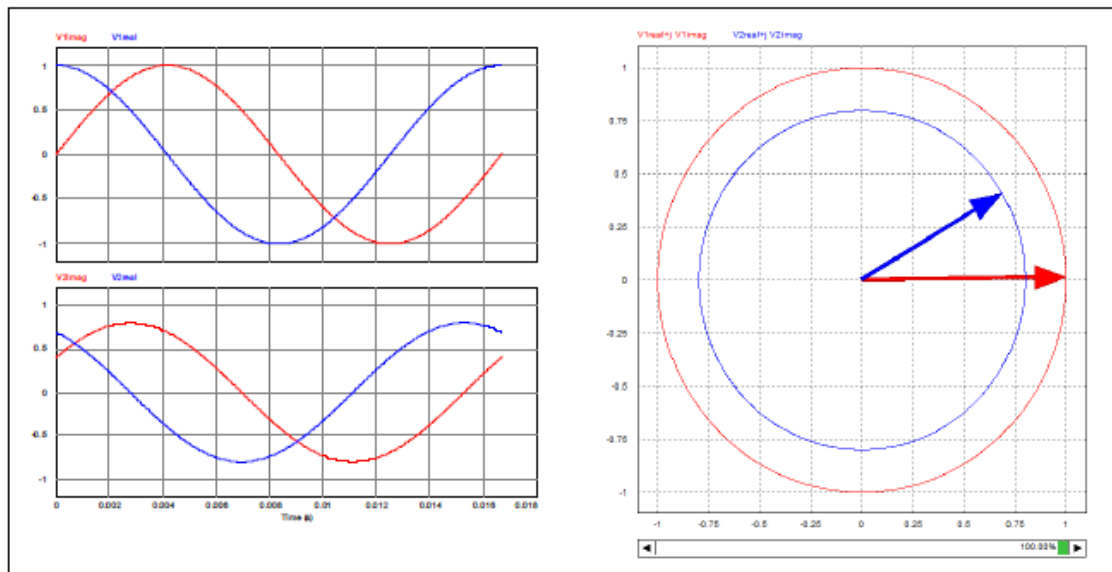


この回路の場合 V1 と V2 が実部と虚部としてあります。V1 の Amplitude は 1、V2 は 0.8 でベクトル V2 は V1 に対して 30° ずれています。

シミュレーション後に SIMVIEW で **スクリーン>>ベクトル図描画** を選択します。ダイアログウィンドウで V1、V2 に対して実部、虚部として設定します。ダイアログウィンドウは次のようになります。



OK をクリックするとベクトルプロットが次の図の右側のように表示されます。時間軸に対する V1 と V2 の実部虚部の波形は左側のグラフとなります。



スライディングバーがベクトルプロットの下の方にあります。マウス左ボタンでスライドさせるとベクトルプロットの描画が再現できます。パーセントは描画の最終位置に対するパーセントを表しています。例えばこの例の場合、時間は0から0.0167秒までです。0%のスライドバーは0秒の時、100%では0.0167秒となります。

3.5.3 オンスクリーン操作

各波形表示画面上で、マウスを右クリックすると、次の操作を実行できます。

元に戻す	最後に行った変更を元に戻します。
クリップボードにコピー	ビットマップまたはメタファイル形式で波形をクリップボードにコピーします。
データポイントをマーク	表示された範囲内の波形のデータポイントを別のウィンドウに表示します。このウィンドウでは、左マウスで行または列のデータポイントをハイライトし、右クリックで次の操作を選択できます。 電卓に送る (Send to Calculator) セルをコピー (Copy Cell) 列をコピー (Copy Row) 選択箇所をコピー (Copy Selected) 全てコピー (Copy all) 全て選択 (Select All) 名前をつけて保存 (Save As) その後、コピーしたデータを別のプログラムに貼り付けることができます。
曲線の追加／削除	上述のとおり、グラフのプロパティウィンドウを開きます。
X 軸	X 軸の設定を変更します。
Y 軸	Y 軸の設定を変更します。
概要ボックス	選択した画面の概要ボックスを開きます。
分割ビュー	SIMVIEW ウィンドウを複数のビューフレームに分割します。ビューフレームオプションは、 $n * m$ として定義されます。ここで、 n は縦に並べられたビューの数、 m は横に並べられたビューの数です。
フルスクリーンで表示	選択した画面 (マウスがある場所) を拡大して、フル SIMVIEW ウィンドウを入れます。
上に移動	選択した画面を上に移動します。
下に移動	選択した画面を下に移動します。
測定：垂直と水平のライン	カーソルで垂直値と水平値の両方を測定します。
測定：垂直ライン	カーソルで垂直値を測定します。

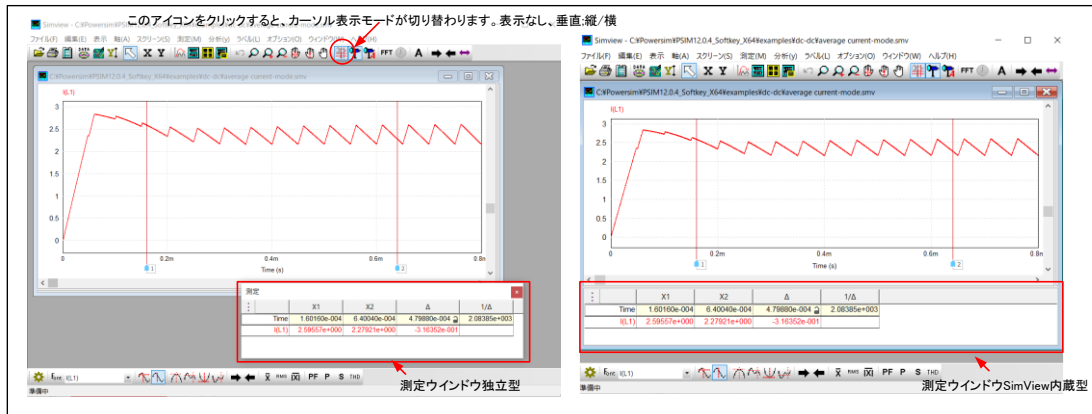
3.6 測定メニュー

測定メニューの機能について説明します。

測定	波形の値を表示する測定モードになります。
データポイントをマーク	選択された点の x 軸、y 軸の値を表示します。
極大値	選択された波形の全領域での最大値を求めます。
極小値	選択された波形の全領域での最小値を求めます。
次の極大値	選択された波形の近傍で次の最大値を求めます。
次の極小値	選択された波形の近傍で次の最小値を求めます。

「測定」機能を使用することで、表示波形上の値を計測することができます。

「測定」モードでは、[測定]ダイアログウィンドウが表示されます。以下に示すように、測定ダイアログウィンドウは、2つの方法で表示できます。独立して表示するか、グラフウィンドウ内に埋め込むことができます。デフォルトでは、独立型の測定ダイアログウィンドウが選択されています。[オプション] >> [デフォルト表示設定] でデフォルト設定を変更できます。



測定ダイアログウインドウで右クリックすると次の機能が表示され選択できます。

Hide	測定ダイアログの表示/ 非表示
フォントの変更	測定ダイアログのフォントの変更
Vertical and Horizontal Lines	垂直カーソル線、水平カーソル線の表示/ 非表示
Vertical line	垂直カーソル線の表示/ 非表示
Global maximum value	選択した曲線のグローバルな最大値を見つけます。
Next maximum value	選択した曲線の次の最大値を見つけます。
Global minimum value	選択した曲線のグローバルな最小値を見つけます。
Next minimum value	選択した曲線の次の最小値を見つけます。
1/Δ	2つの垂直カーソル線間の差の逆数を計算します。
平均値	2つの垂直カーソル線間の波形の平均値
RMS 値	2つの垂直カーソル線間の波形の RMS 値
X 値の平均	2つの垂直カーソル線間の波形の絶対値の平均値
PF (力率)	2つの垂直カーソル線間の2つの波形の力率を計算します。力率は $\cos(\theta)$ で定義されます。ここで θ はカーブ間の角度差です。実行時には2つの曲線を表示する必要があります。
P (有効電力)	2つの垂直カーソル線間の2つの波形の有効電力を計算します。実行時には2つの曲線を表示する必要があります。
S (皮相電力)	2つの垂直カーソル線間の2つの波形の皮相電力を計算します。実行時には2つの曲線を表示する必要があります。
THD	指定された基本周波数の波形の THD (全高調波歪み) を計算します。2番目のカーソル行の前のデータの1つの基本サイクルが計算に使用されます。
電卓にコピー	値を電卓に送ります。
すべてをコピー	すべてのデータをクリップボードへコピーします。
名前をつけて保存	データを名前をつけて保存します。

3.7 SimView の解析 メニュー

解析メニューの機能について説明します。

FFT を実行	2つの垂直カーソル線間のデータではなく、表示されているデータ全体の時間領域で表示中の波形の FFT 結果を表示します。
時間領域の中で表示 (T)	周波数領域で表示中の波形を時間領域の波形で表示します。
平均 (A)	選択された波形の平均を計算します。定義は前のセクションと同じです。
絶対値平均 (X)	選択された波形の絶対値の平均を計算します。定義は前のセクションと同じです。

RMS	選択された波形の実効値を計算します。定義は前のセクションと同じです。
PF (力率)	グラフ内に表示された 2 つの波形の力率を計算します。定義は前のセクションと同じです。
P (有効電力)	グラフ内に表示された 2 つの波形の有効電力を計算します。定義は前のセクションと同じです。
S (皮相電力)	グラフ内に表示された 2 つの波形の皮相電力を計算します。定義は前のセクションと同じです。
THD (高調波歪み)	全高調波歪み(THD)を計算します。定義は前のセクションと同じです。

注) FFT を除くこれらすべての関数は 2 つの垂直カーソル線の間のデータを使用します。FFT の場合は画面上のデータ全体を使用します。

「FFT を実行」機能により、時間領域の波形に含まれる高調波の振幅と位相を計算することができます。FFT 結果の位相を表示するには、グラフ上の任意の場所をダブルクリックするか「曲線を追加/削除」アイコン



をクリックして下さい。[曲線を選択]タブで[角度]タブをクリックし、位相を選択します。位相の名称は、単位が度(deg)の場合は Angle(D)_{name}、ラジアンの場合は Angle(R)_{name}となります(ここで {name}には時間領域の波形の名称が入ります)。

正確な FFT 結果を得るには、シミュレーションが定常状態に収束した後、データが基本周期の整数倍に収まるように X 軸の設定を調整してから FFT を実行してください(X 軸 の機能を使ってレンジを調整してください)。例えば基本波の周波数が 60Hz の場合は、表示するデータの長さを 1/60 秒の整数倍にする必要があります。

3.8 ラベルメニュー

ラベルメニューの機能について説明します。

テキスト	文字を画像に追加します。
線	線を引きます。
点線	点線を引きます。
矢印線	矢印のついた線を引きます。

線を引くには、**ラベル** » **線**を選択してください。線の始点でマウスの左ボタンを押し、そのままマウスをドラッグします。点線や矢印線も同様に描くことができます。

現在のモードが**ズーム**または**測定**モードの場合は、表示メニューの脱出を選択し、これらのモードから復帰してから文字またはラベルを編集してください。

3.9 オプションメニュー

オプションメニューの機能について説明します。

デフォルトの表示設定	SIMVIEW ディスプレイのデフォルト設定の“オプション”ダイアログを起動します。
グリッド	グリッドを表示・消去します。
カラー	波形の色を多色(Color ; デフォルト)、黒(Black)、または白(White)に切り替えます。
設定再ロード	.smv.setting.xml ファイルから設定を再ロードして現在の描画に反映させます。
設定を保存	ファイル名と同じ名前で拡張子.setting.xml で設定を保存します。
一時的な設定を保存	一時的な設定の保存場合はファイルに保存されません。閉じると破棄されます。
一時的な設定をロード	一時的な設定を読み込み現在の表示に適用します。

お気に入り追加

現在の設定をお気に入りとして保存します。お気に入りに保存する場合は線の色と太さ、テキストフォント、Log/db/FFT 表示の設定、X 軸、Y 軸の範囲を保存できます。

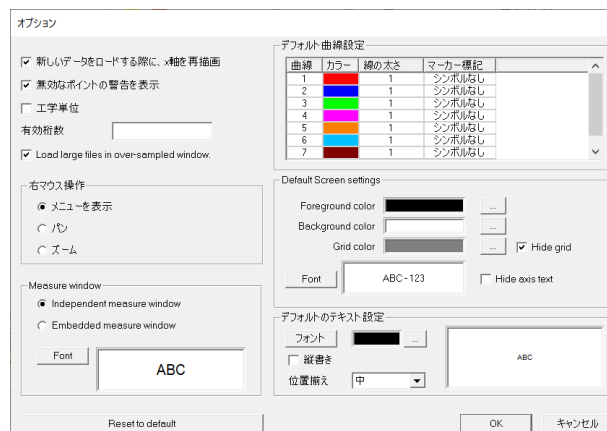
お気に入りを管理

お気に入りに保存した設定の管理ができます。

[オプション]ダイアログのデフォルト設定は、新しい SIMVIEW ファイルを開くたびに変わらない設定です。このダイアログでの変更は、すでに開いている SIMVIEW ウィンドウの画面表示に対してすぐには有効になりません。SIMVIEW ウィンドウを次に開いたときに有効になります。

[画面のプロパティ]ダイアログの設定は、SIMVIEW の表示ですぐに有効になります。ただし、SIMVIEW を閉じると、これらの設定は保持されません。これらの設定を保存するには、「オプション>>設定の保存」を使用すると、同じ SIMVIEW データファイルの表示設定を保持できます。ただし、これらの表示は他の SIMVIEW データファイルには適用されません。

[オプション]ダイアログウィンドウを次に示します。



[新しいデータをロードする際に、x 軸を再描画]にチェックを入れると新しいデータを読み込んだ際に X 軸を再描画します。この設定にチェックが入っていない場合、X 軸の範囲は再描画されません。

[工学単位]にチェックが入っている場合、[測定]ダイアログウィンドウで数値が u,m,k,M などを使用して表示されます。(例えば 12.3456u)チェックされていない場合は、科学的な単位で表示されます(例えば、1.23456e-5)。[有効桁数]の値は小数点以下の桁数を定義します。

[右マウス操作]はメニューを表示、パン、ズームを選択できます。

[測定ウィンドウ]では測定ウィンドウの表示方法を選択できます。

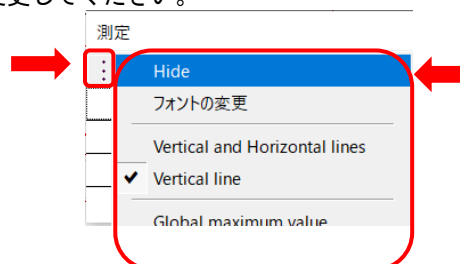
[独立した測定ウィンドウ]を選択すると SIMVIEW 画面から独立したウィンドウで表示されます。

[埋め込み測定ウィンドウ]を選択すると SIMVIEW 内の一部となり波形ウィンドウの下に配置されます。

注) 設定を変更した際には、一旦 SIMVIEW ウィンドウを閉じてから開きなおしてください。

測定ウィンドウを表示させたくない場合は下記測定ウィンドウの左上の部分をクリックして開くウィンドウの[Hide]をクリックすると表示されなくなります。

測定ウィンドウのフォントは、下記測定ウィンドウの左上の部分をクリックして開くウィンドウの[フォントの変更]をクリックして変更してください。



[デフォルト曲線設定]は曲線の色、線の太さ、およびマークのシンボルなどを指定します。

[デフォルトの画面設定]は画面の色、フォント、サイズを指定します。

[デフォルトのテキスト設定]はテキストのフォント、サイズ、色を指定します。

SIMVIEW ファイル (.txt または .smv ファイル) を開く時に、対応する .smv.setting.xml ファイルが存在する場合は、ファイルの設定で開きます。

「一時的な設定を保存」と「一時的な設定をロード」機能は SIMVIEW の設定を一時的に保存しすぐにロードして使用する場合に使用します。

例えばある波形を別の波形と比較する場合、最初の波形を表示して一時的な設定を保存し、2 番目の波形を表示した際に一時的な設定をロードすると両方の波形が同じ設定となります。

「お気に入りを追加」「お気に入りを管理」は時間をおいて使用する特定のグラフ設定を保存する便利なものです。

例えば 2 つの波形画面で波形の色や Y 軸の設定が違う設定を「お気に入りを追加」にしておくと後日設定を使用できます。お気に入りの設定を適用する場合には最初に設定した時と波形画面数は同じにしてください。

3.10 データの書き出し

「FFT」の結果はテキストファイルに保存できます。シミュレーション結果(*.txt)と「FFT」の結果(*.fft)が両方ともテキスト形式で保存できるので、テキストエディタ(Microsoft NotePad など)もしくは他のソフトウェア(Microsoft Excel など)で読み込むことができます。

例えば、Microsoft Excel で読み込む場合

- ・ファイル→開くで

テキストファイルウィザード-1/3 元のデータ形式は

「カンマやタブなどの区切り文字によってフィールドごとに区切られたデータ(D)」を選択してください。次へをクリックします。

テキストファイルウィザード-2/3 区切り文字

「スペース」を選択してください。次へをクリックします。

テキストファイルウィザード-3/3 列のデータ形式

「G/標準(G)」

第4章 電気回路素子

本章では、PSIM ライブラリエLEMENTの電気回路素子について詳細を説明します。

- ・ RLC ブランチ
- ・ スイッチ
- ・ 変圧器
- ・ 磁気素子
- ・ その他
- ・ モーター駆動モジュール
- ・ MagCoupler モジュール
- ・ MagCoupler-RT モジュール
- ・ 機械的負荷と速度/トルクセンサー
- ・ サーマルモジュール
- ・ 再生可能エネルギーモジュール

4.1 抵抗-インダクタ-キャパシタ (Resistor-Inductor-Capacitor Branches)

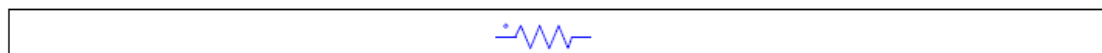
PSIM エレメントライブラリでは、抵抗(Resistor)、インダクタ(Inductor)、キャパシタ(Capacitor)それぞれ単体の素子、及びこれらを組み合わせた素子が用意されています。

- ・ 単体の抵抗、インダクタ、キャパシタ。これらはマルチレベルモデルが用意されています。Level-1 は基本素子、Level-2 では寄生容量、漏れ電流などが含まれます。
- ・ 抵抗、インダクタ、キャパシタの直列接続によるブランチ
- ・ 抵抗、インダクタ、キャパシタおよびこれらの組み合わせによる対称三相ブランチ
- ・ 相互結合インダクタ
- ・ 三相 AC ケーブル
- ・ 非線形素子

インダクタの初期電流およびキャパシタの初期電圧を設定することができます。ただし、三相ブランチ素子については、初期値はいずれも 0 に設定されています。

4.1.1 抵抗 (Individual Resistor)

イメージ



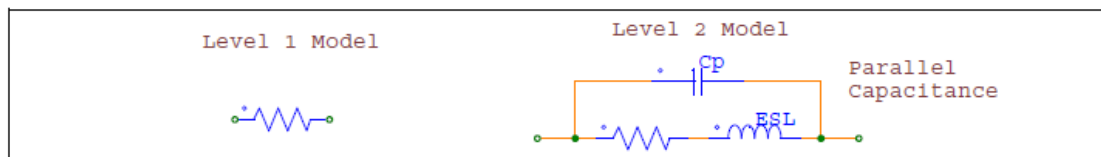
Level-1 モデルの仕様

パラメータ	機 能
抵抗	抵抗(Ω)
電流フラグ	抵抗の電流出力フラグ (1: 出力あり、0: 出力なし) ドットにて指定された端子が入力となる方向の電流値が正の値となります。
電圧フラグ	抵抗の電圧出力フラグ (1: 出力あり、0: 出力なし) ドットにて指定された端子が入力となる方向の電圧値が正の値となります。

Level-2 モデルの仕様

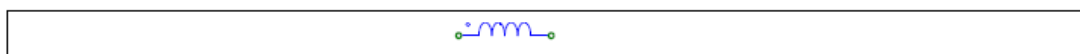
パラメータ	機 能
抵抗	抵抗(Ω)
定格電圧	定格電圧値(V)
電力定格	定格電力(W)
インダクタンス ESL	等価直列インダクタンス(Equivalent Series L : ESL) (H)
並列容量	等価寄生容量(F)
電流フラグ	抵抗の電流出力フラグ (1 : 出力あり、0 : 出力なし)
電圧フラグ	抵抗の電圧出力フラグ (1 : 出力あり、0 : 出力なし)

等価回路



4.1.2 インダクタ (Individual Inductor)

シンボル



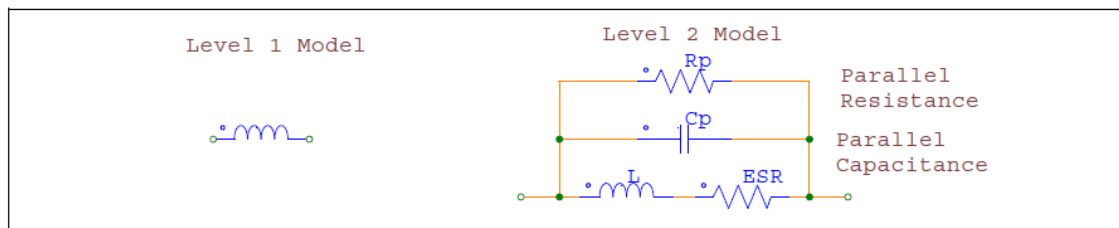
Level-1 モデルの仕様

パラメータ	機 能
インダクタンス	インダクタンス(H)
初期インダクタンス電流	初期電流値(A)
電流フラグ	インダクタの電流出力フラグ (1 : 出力あり、0 : 出力なし) ドットにて指定された端子が入力となる方向の電流値が正の値となります。
電圧フラグ	インダクタの電圧出力フラグ (1 : 出力あり、0 : 出力なし) ドットにて指定された端子が入力となる方向の電圧値が正の値となります。

レベル 2 モデルの仕様

パラメータ	機 能
インダクタンス	インダクタンス(H)
ピーク定格電流	最大定格電流(A)
直列抵抗	等価直列抵抗値(Equivalent Series Resistance : ESR)(Ω)
並列抵抗	並列漏れ抵抗値(Ω)
並列容量	等価寄生容量(F)
初期インダクタンス電流	初期電流値(A)
電流フラグ	インダクタの電流出力フラグ (1 : 出力あり、0 : 出力なし)
電圧フラグ	インダクタの電圧出力フラグ (1 : 出力あり、0 : 出力なし)

等価回路



4.1.3 キャパシタ (Capacitors)

シンボル



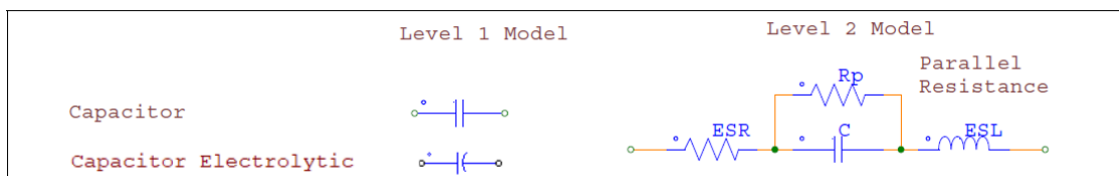
Level-1 モデルの仕様

パラメータ	機 能
キャパシタンス	キャパシタンス(F)
初期コンデンサ電圧	初期電圧値(V)
電流フラグ	キャパシタの電流出力フラグ (1 : 出力あり、0 : 出力なし) ドットにて指定された端子が入力となる方向の電流値が正の値となります。
電圧フラグ	キャパシタの電圧出力フラグ (1 : 出力あり、0 : 出力なし) ドットにて指定された端子が入力となる方向の電圧値が正の値となります。

Level-2 モデルの仕様

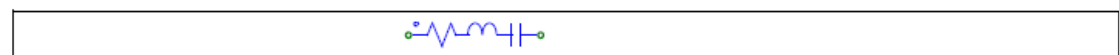
パラメータ	機 能
キャパシタンス	キャパシタンス(F)
定格電圧	定格電圧値(V)
実効定格電流	定格電流実効値(A)
抵抗 ESR	等価直列抵抗値(Equivalent Series Resistance : ESR) (Ω)
インダクタンス ESL	等価直列インダクタンス(Equivalent Series L : ESL) (H)
漏れ抵抗	漏れ電流抵抗値(Ω)
初期コンデンサ電圧	初期電圧(V)
電流フラグ	キャパシタの電流出力フラグ (1 : 出力あり、0 : 出力なし)
電圧フラグ	キャパシタの電圧出力フラグ (1 : 出力あり、0 : 出力なし)

等価回路



4.1.4 複合 RLC ブランチ (Combined R-L-C Branch)

シンボル



仕様

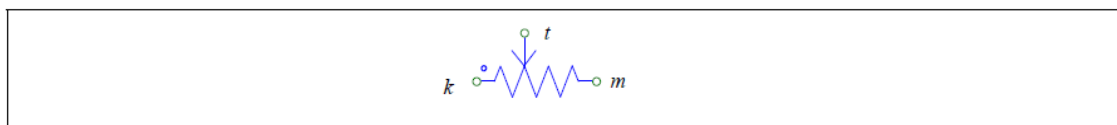
パラメータ	機 能
抵抗	抵抗(Ω)
インダクタンス	インダクタンス(H)
キャパシタンス	キャパシタンス(F)
初期インダクタンス電流	初期電流値(A)
初期キャパシタンス電圧	キャパシタ初期電圧値(V)
電流フラグ	複合 RLC ブランチの電流出力フラグ (1: 出力あり、0: 出力なし) ドットにて指定された端子が入力となる方向の電流値が正の値となります。
電圧フラグ	複合 RLC ブランチの電圧出力フラグ (1: 出力あり、0: 出力なし) ドットにて指定された端子が入力となる方向の電圧値が正の値となります。

注意：複合 RLC ブランチの R, L, C の少なくとも一つは 0 以外のパラメータを持つ必要があります。

4.1.5 レオスタット(Rheostat)

レオスタット(Rheostat)はタップ付きの抵抗器です。

シンボル



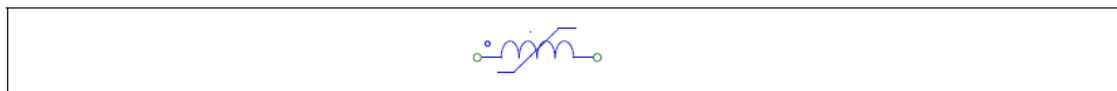
仕様

パラメータ	機 能
全抵抗	全抵抗(Ω)端子 k から端子 m までの抵抗(Ω)
タップ位置	タップ位置(0~1)端子 k から t までの抵抗は $R \cdot \text{Tap}$
電流フラグ	レオスタットの電流出力フラグ (1: 出力あり、0: 出力なし)

4.1.6 可飽和リアクトル(Saturable Inductor)

可飽和リアクトル(Saturable Inductor)はインダクタの鉄心の飽和を反映できます。

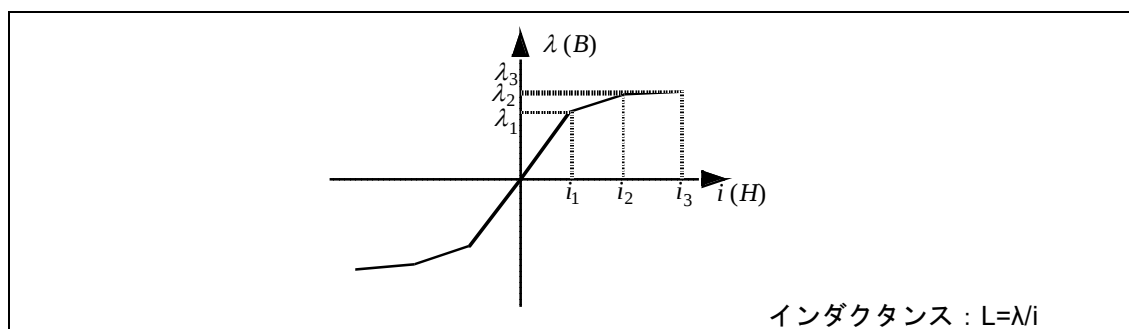
シンボル



仕様

パラメータ	機 能
電流対インダクタンス	電流対インダクタンス特性 $(i_1, L_1), (i_2, L_2), \dots$ のように指定
電流フラグ	可飽和リアクトルの電流出力フラグ (1: 出力あり、0: 出力なし)
電圧フラグ	可飽和リアクトルの電圧出力フラグ (1: 出力あり、0: 出力なし)

非線形の B-H 曲線は区分線形特性で近似します。磁束密度 B は鎖交磁束 λ に比例し、磁化力 H は電流に比例するので、B-H 曲線は以下に示すように λ - i 曲線で等価に表すことができます。



インダクタンスは $L = \lambda / i$ で求められ、これは $\lambda - i$ 曲線の傾斜に相当します。したがって、飽和特性は異なる点のデータの対を (i_1, L_1) , (i_2, L_2) , (i_3, L_3) , などのように指定することにより表現できます。

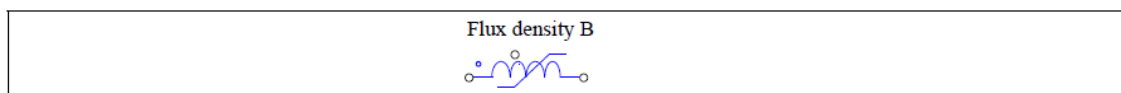
λ は i の増加に伴って、 $L_1 \cdot i_1 < L_2 \cdot i_2 < L_3 \cdot i_3$ のように単調に増加する必要があります。同様に、実際の飽和特性では $\lambda - i$ 特性の各区間の傾きは電流の増加に伴って単調に減少するべきです。

条件によっては可飽和リアクトルを含むシミュレーションは収束しない場合があります。そのような場合、可飽和リアクトルと並列に微小なコンデンサを接続してみてください。

4.1.7 可飽和リアクトル(2)(Saturable Inductor(2))

2 番目は可飽和インダクタのモデル化するためのものです。磁気コアの飽和及びヒステリシス効果を考慮している所が前のモデルと違います。

シンボル

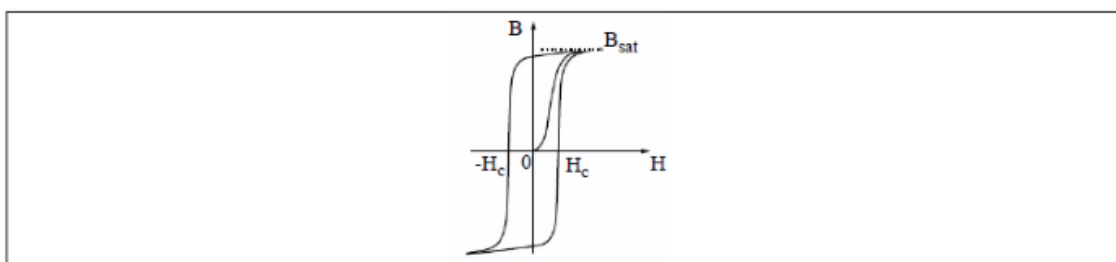


仕様

パラメータ	機能
巻数	インダクタに巻数
インダクタ巻線抵抗	インダクタの巻線抵抗(Ω)
コアの断面積	コアの断面積(m ²)
コア長	コアの実効長(m)
比透磁率	コア材の比透磁率
飽和時の磁束密度	磁束密度 B_{sat} (T)
初期磁束密度	初期磁束密度(T)
保磁力	磁束密度 0 の時の保磁力(A/m)
電流フラグ	可飽和リアクトル(2)の電流出力フラグ (1 : 出力あり、0 : 出力なし)

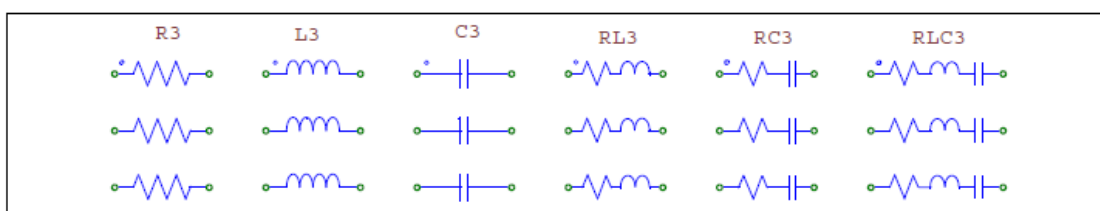
インダクタイメージの外部のノードはコアの磁束密度(T)となります。ノードは制御ノードです。

飽和リアクトルの B-H 曲線は次のようになります。



4.1.8 三相抵抗、インダクタ、キャパシタ、複合ブランチ(Three-Phase R-L-C and Combination Branches)

シンボル



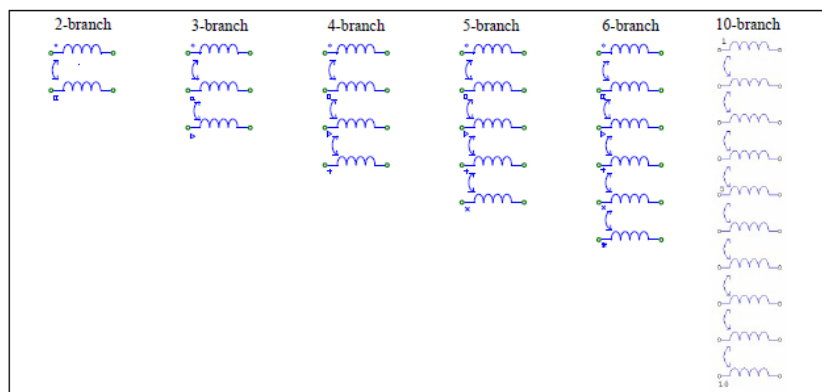
仕様

パラメータ	機能
抵抗	抵抗(Ω)
インダクタンス	インダクタンス(H)
キャパシタンス	キャパシタンス(F)
電流フラグ_A	A相、B相、C相の電流出力フラグ（1：出力あり、0：出力なし） ドットのついた相がA相となります。また、ランタイムグラフ（「Simulate >> Runtime Graphs」）でも表示できます。 ドットにて指定された端子が入力となる方向の電流値が正の値となります。
電流フラグ_B	
電流フラグ_C	

4.1.9 相互結合インダクタ(Coupled Inductors)

PSIM では、2、3、4、5、6、10 と、6 種類の相互結合インダクタが提供されています。

シンボル

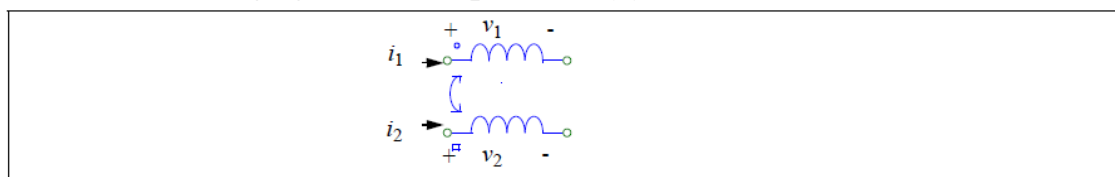


前図シンボルでは、○がインダクタ 1、□が 2、△が 3、+が 4、×が 5、*が 6、¹⁰が 10 の入力端子を示します。

仕様

パラメータ	機 能
L_{kk} (自己)	インダクタ k の自己インダクタンス(H)
L_{kj} (相互)	インダクタ k と j の間の相互インダクタンス(H)
初期電流 i_k	インダクタ k の初期電流(A)
電流フラグ_k	相互結合インダクタ k の電流出力フラグ (1: 出力あり、0: 出力なし)

下図には 2 ブランチの相互結合インダクタを示しています。



L_{11} と L_{22} をそれぞれブランチ 1 と 2 の自己インダクタンス、また L_{12} と L_{21} をそれぞれ相互インダクタンスとします。するとブランチ電圧と電流には以下のような関係になります。2 巻線間の相互インダクタンスは常に等しい($L_{12}=L_{21}$)と仮定しています。

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} \\ L_{21} & L_{22} \end{bmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix}$$

SPICE では、相互結合インダクタは、自己インダクタンスと相互結合係数により定義されています。2 つのブランチのある相互結合インダクタでは、相互結合係数 K は、以下のように定義されています。

$$K = \frac{L_{12}}{\sqrt{L_{11} \cdot L_{22}}}$$

この場合、相互インダクタンスは、以下のように計算されます。

$$L_{12} = K \cdot \sqrt{L_{11} \cdot L_{22}}$$

相互結合係数は、0 から 1 の間の値となります。相互結合係数が 1 の時、完全に相互結合されていることを意味します。ただし、PSIM においては、完全な相互結合は許容されていません。よって、相互結合が 1 になることはあり得ません。

また、漏れインダクタンスが無視された場合、すなわち相互結合係数が 1 に近い場合は、自己インダクタンスは巻数比の二乗に比例します。よって、ブランチ 1 が N_1 の巻き数を持ち、ブランチ 2 が N_2 の巻き数を持っている場合、以下ようになります。

$$\frac{L_1}{L_2} = \frac{N_1^2}{N_2^2}$$

例

相互結合インダクタが $L_{11}=1\text{mH}$ 、 $L_{22}=1.1\text{mH}$ 、 $L_{12}=L_{21}=0.9\text{mH}$ のような自己インダクタンスと相互インダクタンスを持っているとします。結合係数は $K=0.86$ です。この素子の仕様は以下のようになります。

L_{11} (自己)	1m
L_{12} (相互)	0.9m
L_{22} (自己)	1.1m

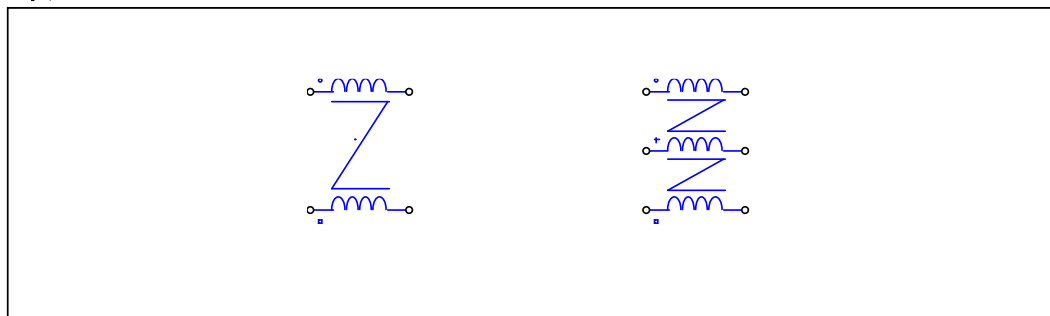
この素子は AC システムへの三相 P-Q 制御負荷です。三相の各相のインピーダンスは同じ（平衡）です。

4.1.10 コモンモードチョーク (Common-Mode Choke)

単相コモンモードチョークは、同一コア上の 2 つの結合インダクタで構成されています。

三相コモンモードチョークは、同一コア上に 3 つの結合インダクタで構成されています。

シンボル



仕様

パラメータ	機 能
コモンモード インダクタンス	コモンモードインダクタンス L_{cm} (H)
漏れインダクタンス	漏れインダクタンス L_{lk} (H)
巻線抵抗	巻線抵抗 (Ω)

コモンモードチョークは自己インダクタンスと同じ、すなわち、

$$L_{self} = L_{cm}$$

また、自己インダクタンスは、相互インダクタンスと漏れインダクタンスの和に等しい、つまり

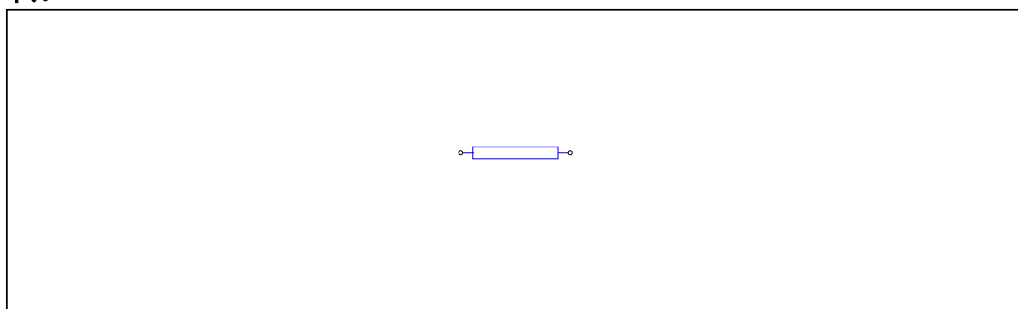
$$L_{self} = L_{mutual} + L_{lk}$$

となります。

4.1.11 バスバー (Bus Bar)

3 相コモンモードチョークは、同一コア上に 3 つの結合インダクタを配置したものです。

シンボル



仕様

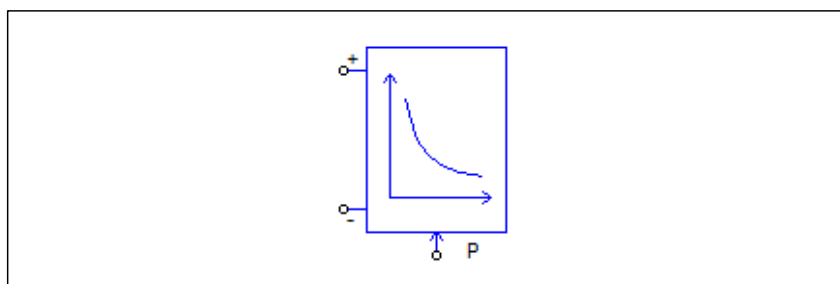
パラメータ	機 能
抵抗	バスバーの抵抗 (Ω)
インダクタンス	バスバーのインダクタンス (H)

コモンモードチョークは自己インダクタンスと同じ、すなわち、

4.1.12 DC 負荷（定電源）（DC Load (constant-power)）

このブロックは DC 電源に一定の電力負荷を提供します。

シンボル



仕様

パラメータ	機 能
最小電圧	定電力特性に必要な最低負荷電圧 V_{min} (V)
出力フラグ	1 に設定すると、負荷の電圧、電流、電力を保存し SimView に表示します。

ブロックの下部にある入力で電力を定義します。

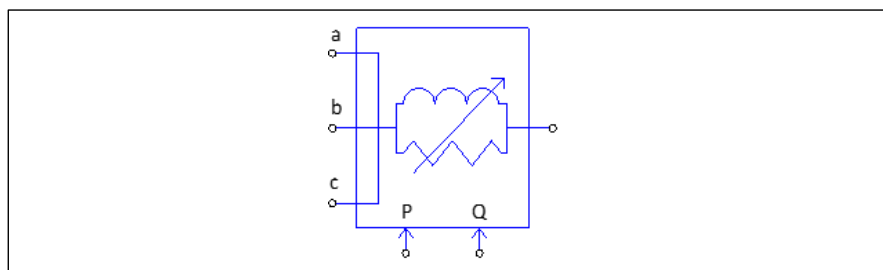
電圧が V_{in} 以下になると、負荷電流は以下のようになります。

$$I_o = P_o * \sin(2.03 * V_o / V_{in}) / (V_{in} * \sin(2.03))$$

4.1.13 三相 P/Q 制御負荷（3-Phase P/Q Controlled Load）

この素子は AC システムへの三相 P-Q 制御負荷です。三相の各相のインピーダンスは同じ（平衡）です。

シンボル



仕様

パラメータ	機 能
ライン間電圧	負荷に印加されるライン間電圧(V)
動作周波数	動作周波数(Hz)
電圧許容値	電圧許容値(%)

ブロックの下部にある P（有効電力:W）及び Q（無効電力:Var）入力は、制御信号を受け入れません。

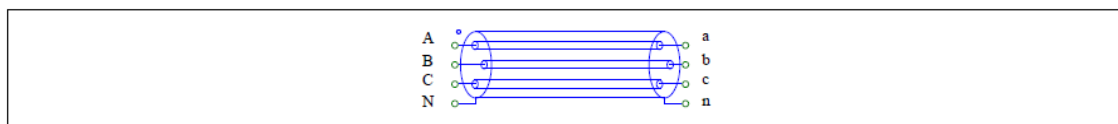
4.1.14 三相 AC ケーブル(3-Phase AC Cable)

三相 AC ケーブルのモデルは、2 つあります。

3-Ph AC Cable：誘導結合と相の間の容量が考慮されます。

3-Ph AC Cable(1)：断面パラメータで定義されます。

シンボル



仕様：3-Ph AC Cable

パラメータ	機 能
ケーブル長さ	ケーブルの長さ(m)
動作周波数	ケーブルの動作周波数(Hz)
正相抵抗 R_d	ケーブル正相抵抗(Ω)
正相リアクタンス X_d	ケーブル正相リアクタンス(Ω/km)
正相キャパシタンス C_d	ケーブル正相キャパシタンス(F/km)
零相抵抗 R_0	ケーブル零相抵抗(Ω)
零相リアクタンス X_0	ケーブル零相リアクタンス(Ω/km)
零相キャパシタンス C_0	ケーブル零相キャパシタンス(F/km)

画像では、ケーブルの両側の下部のノード N または n はケーブルの皮膜です。一般的にケーブルのグラウンドに接続されています。

ケーブルパラメータは、メーカーのデータシートから入手できるはずですが、それらが利用できない場合、ケーブルの各相は、R の抵抗、L の自己インダクタンス、および M の相互インダクタンスを持ち、正相および零相のパラメータは次のように計算できると仮定します。

$$R_d = R$$

$$X_d = \omega \cdot (L - M)$$

$$R_0 = R$$

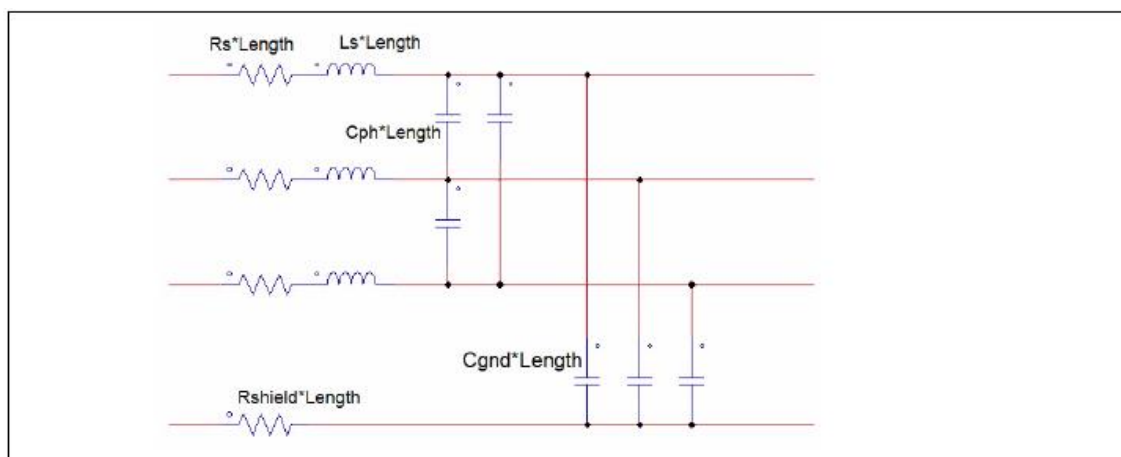
$$X_0 = \omega \cdot (L + 2M)$$

ここで、 $\omega = 2\pi f$ で、 f は動作周波数(Hz)になります。

仕様 : 3-Ph AC Cable(1)

パラメータ	機 能
区間数	区間の数。以下のパラメータは各区間での値です。
ケーブル長さ	ケーブルの長さ(m)
直流抵抗	ケーブルの動作周波数(Hz)
インダクタンス	ケーブル正相抵抗(Ω)
相間容量	ケーブル正相リアクタンス(Ω/km)
接地容量	ケーブル正相キャパシタンス(F/km)
シールド直流抵抗	ケーブル零相抵抗(Ω)

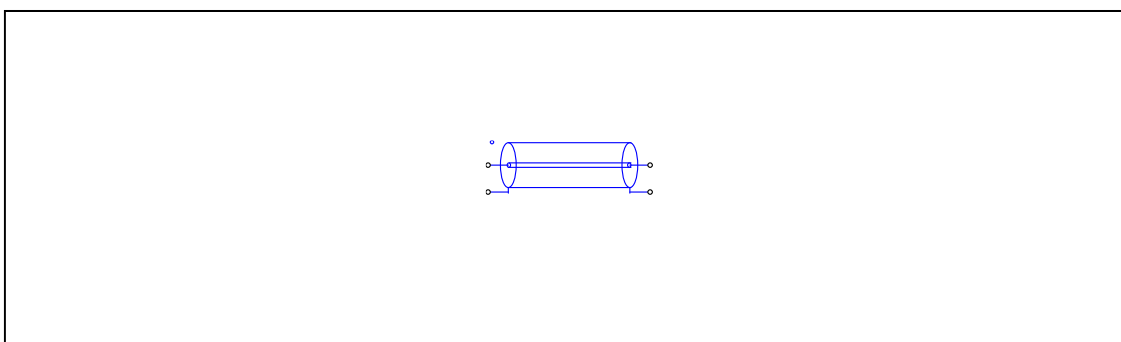
以下の回路図は、各部分のモデル原理と上記表のパラメーターの定義を示しています。



4.1.15 同軸ケーブル(Coax Cable)

回路図上の同軸ケーブルをモデル化しています。

シンボル



仕様

パラメータ	機 能
セクション数	ケーブルのセクションの数
ケーブル長さ	ケーブルの長さ(m)
直流抵抗	ケーブルの単位 m あたりの DC 抵抗(Ω)
インダクタンス	ケーブルの単位 m あたりのインダクタンス(H)
容量	ケーブルの単位 m あたりの容量(F)
シールド直流抵抗	ケーブルの単位 m あたりの DC 抵抗(Ω)

4.1.16 非線形素子(Nonlinear Elements)

電圧 - 電流の非線形特性を表現する素子(Nonlinear Elements)は以下の 4 つが用意されています。

抵抗型(NONV)[$v = f(i)$]

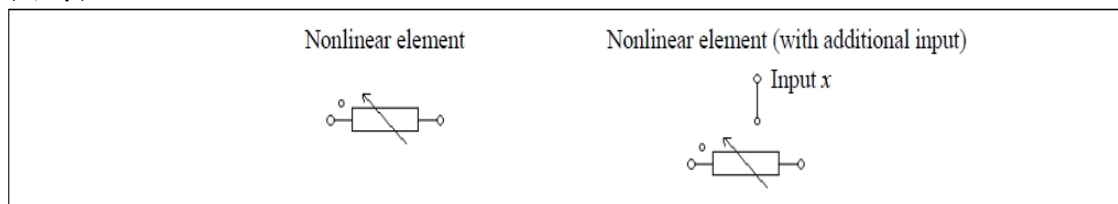
追加入力 x 付き抵抗型(NONV_1)[$v = f(i, x)$]

コンダクタンス型(NONI)[$i = f(v)$]

追加入力 x 付きコンダクタンス型(NONI_1)[$i = f(v, x)$]

追加入力は電圧信号に限ります。

シンボル



仕様

抵抗型素子の場合

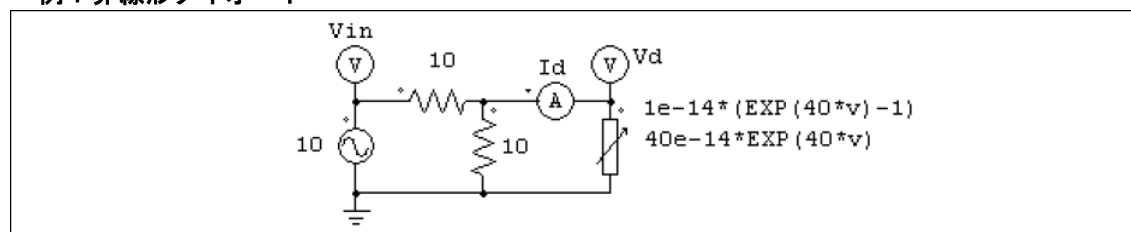
パラメータ	機 能
$f(i)$ or $f(i, x)$	電流 i (と任意パラメータ x) から求められる電圧値関数
微分関数 df/di	電流に関する電圧の微分式
初期値 i_0	電流 i の初期値
下限値 i	電流 i の下限値
上限値 i	電流 i の上限値

コンダクタンス型素子の場合

パラメータ	機 能
関数 $f(v)$ or $f(v, x)$	電圧 v (と任意パラメータ x) から求められる電流値関数
微分関数 df/dv	電圧に関する電流の微分式
初期値 v_0	電圧 v の初期値
下限値 v	電圧 v の下限値
上限値 v	電圧 v の上限値

電圧/電流の初期値および上下限値を適切に設定することで、解の収束を得やすくなります。

例：非線形ダイオード



上の回路で、非線形素子(NONI)が非線形ダイオードを模擬しています。ダイオードの電流は電圧の関数で $i = 10^{-14} * (e^{40v} - 1)$ と与えています。

PSIM ではこの非線形素子の特性は以下のように指定します。

関数 $f(v)$	$1e-14 * (EXP(40 * v) - 1)$
微分関数 df/dv	$40e-14 * EXP(40 * v)$
初期値 v_0	0
下限値 v	-1000
上限値 v	1

4.2 スイッチ素子(Switching Devices)

PSIM のスイッチ素子にはいくつかのモデルレベルがあります。

モデルレベルが理想の場合には、カットオフ領域(オフ状態)または飽和領域(オン状態)のいずれかの状態で動作します。ターンオン、ターンオフ時の過渡動作は無視されます。

理想スイッチには、 R_{switch_on} のオン状態抵抗と R_{switch_off} のオフ状態抵抗があります。オン抵抗が定義されていない場合、デフォルトのオフ抵抗値が使用されます。スイッチと並列に接続された R-L-C 分岐がない場合、オフ状態の抵抗値が使用されます。デフォルトでは、オン状態の抵抗 R_{switch_on} は $10 \mu \Omega$ に設定され、オフ状態の抵抗 R_{switch_off} は $100 M\Omega$ に設定されています。デフォルト値は、Simulation Control の PSIM タブで変更できます。

他のモデルレベルではスイッチ素子の特性をより詳細に設定できます。

PSIM のライブラリにはあらかじめ準備されたスイッチモジュールがあります。

4.2.1 プレビルトスイッチモジュール(Pre-Built Switch Modules)

ユーザーの利便性のために、PSIM ライブラリには、一般的に使用されるコンバータの構成に組み込まれたいくつかのスイッチモジュールが含まれています。

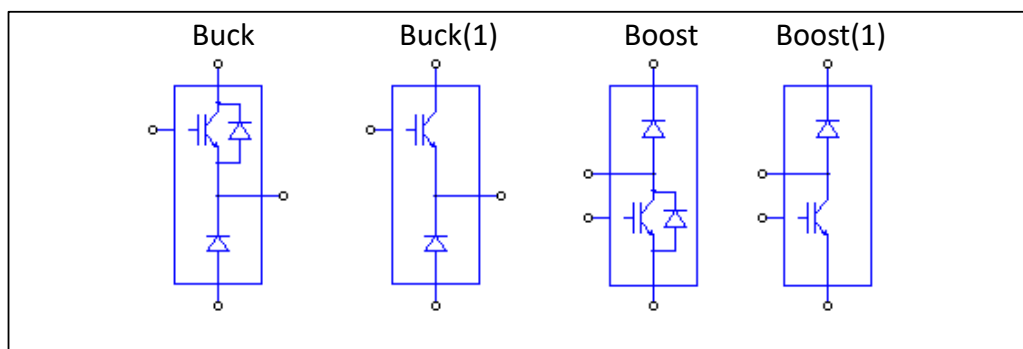
マルチスイッチングデバイスを含むが、単一のゲーティングノードを持つスイッチモジュールの場合、モジュール内の最初のスイッチへのゲーティングのみを指定する必要があります。他のすべてのスイッチのゲーティングは自動的に導出されます。モジュールの左上のスイッチが最初のスイッチとして定義されています。

4.2.1.1 降圧・昇圧コンバータ (Buck and Boost Converters)

次の降圧・昇圧コンバータがあります。

これらのモジュールのスイッチングデバイスは理想素子です。カットオフ領域（オフ状態）または飽和領域（オン状態）のいずれかで動作します。ターンオンとターンオフの両方の過渡現象は無視されます。

シンボル



仕様

パラメータ	機 能
スイッチ抵抗	トランジスタとダイオードのオン抵抗 (Ω)
電流フラグ 1...2	トランジスタとダイオードを流れる電流表示のためのフラグ (1: 出力あり、0: 出力なし)
電圧フラグ 1...2	トランジスタとダイオードを流れる電圧表示のためのフラグ (1: 出力あり、0: 出力なし)

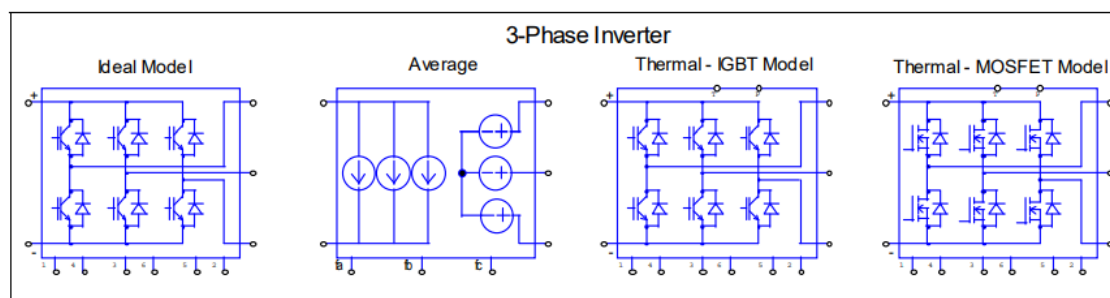
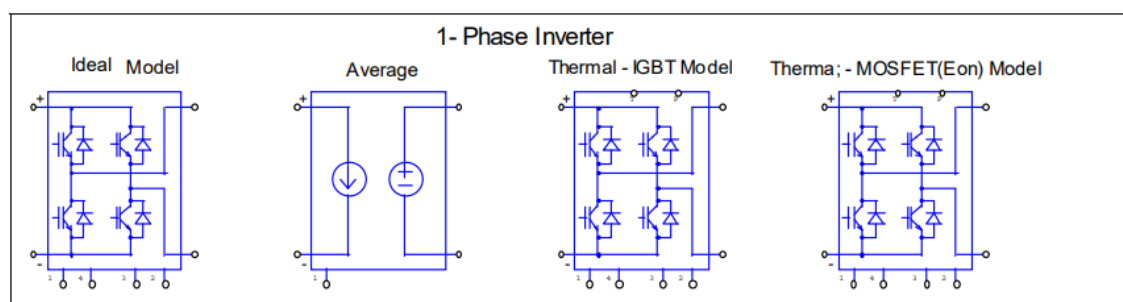
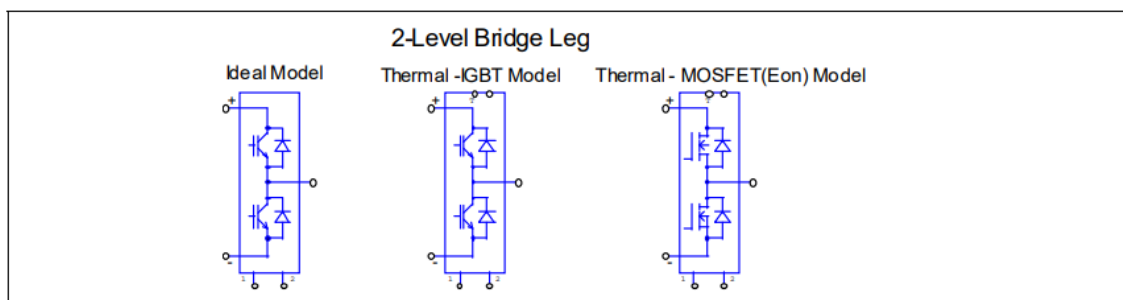
4.2.1.2 インバータモジュール(Inverter Modules)

インバータブリッジレグ、単相インバータ、三相インバータのモジュールが用意されています。

単相、三相インバータではモデルレベルを理想または Average モデルに設定できます。理想モデルの場合、インバータの個々のスイッチは理想 MOSFET や理想 IGBT を使ってモデル化されます。平均モデルの場合、スイッチング効果は無視されます。低周波の動作のみが含まれます。

平均モデルでは、より大きな時間ステップが可能となるためシミュレーションを大幅に高速化することができます。

シンボル



モデルレベル

モデルレベル	機能
理想	理想的な MOSFET/IGBT デバイスと逆方向ダイオードを組み合わせた理想的な制御スイッチです。
平均	インバータはスイッチング効果のない平均モードでモデルかされています。低周波数動作のみが含まれています。平均モデルでは、より大きな時間ステップが可能となるためシミュレーションを大幅に高速化することができます
Thermal-IGBT	サーマルモデルのデータベースの IGBT
Thermal-MOSFET(Eon)	サーマルモデルのデータベースの MOSFET(Eon)

仕様

パラメータ	機 能
スイッチ抵抗	トランジスタとダイオードのオン抵抗 (Ω)
電流フラグ 1...2	トランジスタとダイオードを流れる電流表示ためのフラグ (1: 出力あり、0: 出力なし)
電圧フラグ 1...2	トランジスタとダイオードを流れる電圧表示ためのフラグ (1: 出力あり、0: 出力なし)
入力 $S\ i_top$	TyphoonHIL 用インターフェースのためのものです。
入力 $S\ i_bot$	TyphoonHIL 用インターフェースのためのものです。

サーマルモデルの仕様

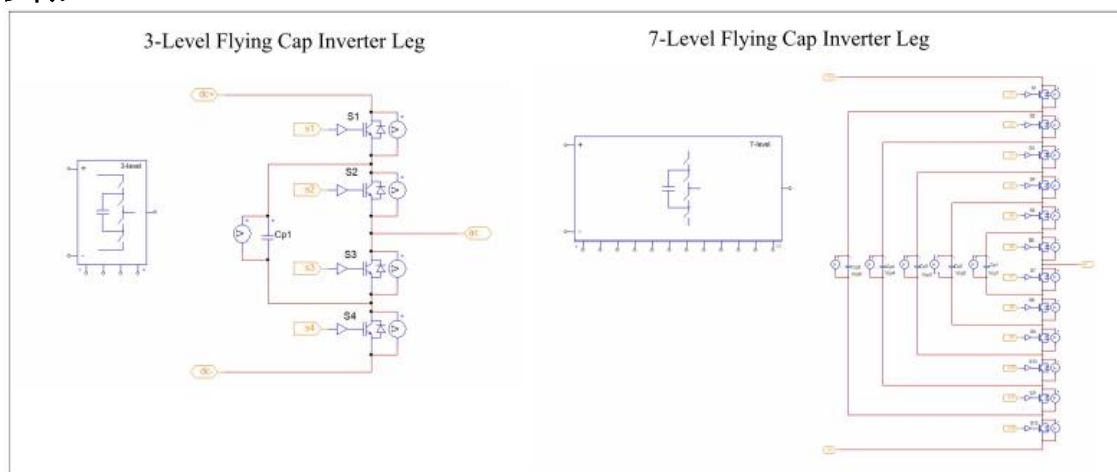
サーマルモデルのパラメータの定義や詳細な情報は「4.10.3IGBT サーマルモデル」と「4.10.2 の MOSFET サーマルモデル」を参照してください。

4.2.1.3 フライングキャップブリッジレグモジュール

3-レベルと 7-レベルのフライングキャップブリッジレグモジュールの素子イメージと内部回路は次のようになります。

イメージ下部のノードはゲート信号用のノードです。これらのノードはロジック信号のみでパワー回路へは接続できません。

シンボル



仕様

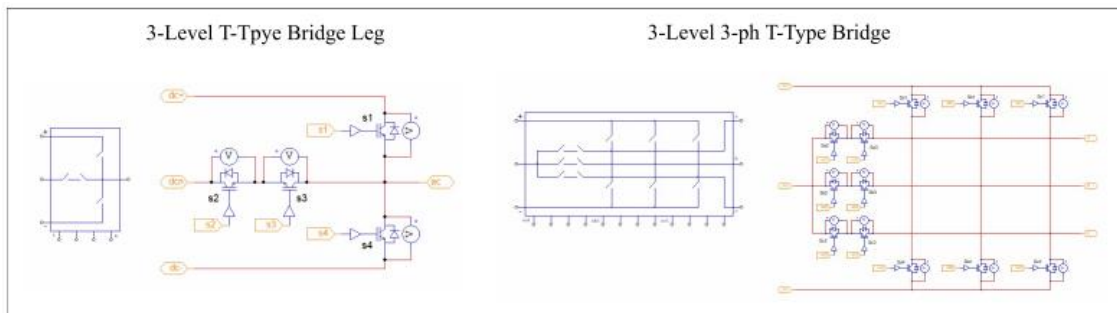
パラメータ	機 能
スイッチ抵抗	すべてのトランジスタとダイオードのオン抵抗 (Ω)
容量 C_{pi}	各フライングキャパシタの容量 (F)
C_{pi} 初期値	各フライングキャパシタの初期電圧 (V)
電圧フラグ C_{pi}	各フライングキャパシタにかかる電圧フラグ
電流フラグ i	スイッチ i の電流出力フラグ (1: 出力あり、0: 出力なし)
電圧フラグ i	スイッチ i の電圧出力フラグ (1: 出力あり、0: 出力なし)

4.2.1.4 T-タイプ ブリッジモジュール

T-タイプブリッジモジュールの素子イメージと内部回路は次のようになります。

素子下部のノードはゲート信号用です。これらのノードはロジック信号へ接続できますが、パワー回路素子へは接続できません。

シンボル



仕様

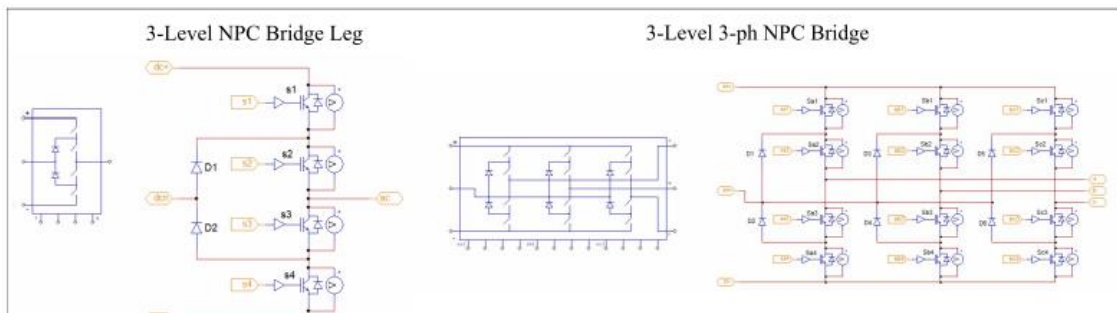
パラメータ	機 能
スイッチ抵抗	すべてのトランジスタとダイオードのオン抵抗 (Ω)
電流フラグ Sx_i	位相 x でのスイッチ i の電流出力フラグ (1 : 出力あり、0 : 出力なし)
電圧フラグ Sx_i	位相 x でのスイッチ i の電圧出力フラグ (1 : 出力あり、0 : 出力なし)
入力 Sx_i	TyphoonHIL 用の値です。1 から 64 までの整数です。

4.2.1.5 NPC ブリッジモジュール

NPC(neutral point clamped) ブリッジモジュールの素子イメージと内部回路は次のようになります。

素子下部のノードはゲート信号用です。これらのノードはロジック信号へ接続できますが、パワー回路素子へは接続できません。

シンボル



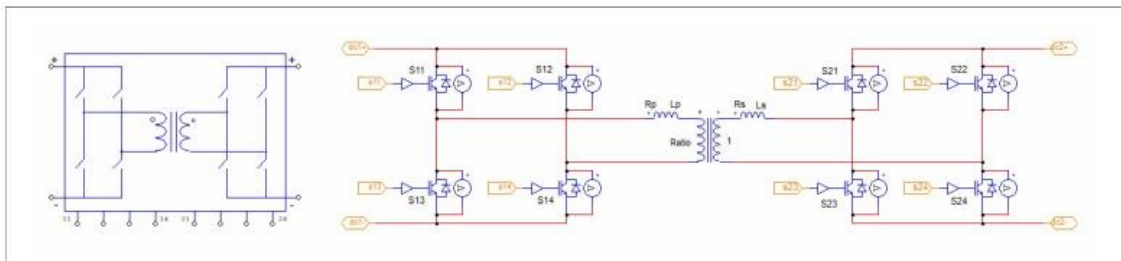
仕様

パラメータ	機 能
スイッチ抵抗	すべてのトランジスタとダイオードのオン抵抗 (Ω)
電流フラグ Sx_i	位相 x でのスイッチ i の電流出力フラグ (1 : 出力あり、0 : 出力なし)
電圧フラグ Sx_i	位相 x でのスイッチ i の電圧出力フラグ (1 : 出力あり、0 : 出力なし)
入力 Sx_i	TyphoonHIL 用の値です。1 から 64 までの整数です。

4.2.1.6 デュアルアクティブブリッジモジュール

DAB(デュアルアクティブブリッジ)モジュールの素子イメージと内部回路は次のようになります。
素子下部のノードはゲート信号用です。これらのノードはロジック信号へ接続できますが、パワー回路素子へは接続できません。

シンボル



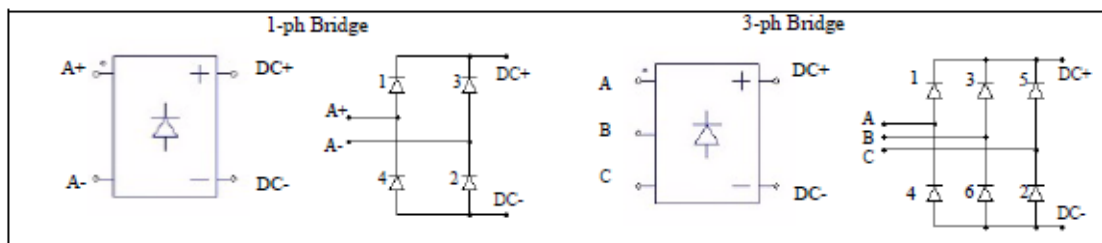
仕様

パラメータ	機 能
Rp (primary)	一次側巻線抵抗 (Ω)
Rs (secondary)	一次側を基準とした二次巻線抵抗 (Ω)
Lp (pri.leakage)	一次側漏れインダクタンス (H)
Ls (sec.leakage)	一次側を基準とした二次巻線の漏れインダクタンス (H)
Np/Ns 比	変圧器巻数比
スイッチ抵抗 Rsw1	リアエンド DC-AD コンバータのすべてのトランジスタとダイオードのオン抵抗 (Ω)
スイッチ抵抗 Rsw2	リアエンド AD-DC コンバータのすべてのトランジスタとダイオードのオン抵抗 (Ω)
電流フラグ Sij	コンバータ <i>i</i> のスイッチ <i>j</i> の電流出力フラグ (1 : 出力あり, 0 : 出力なし)
電圧フラグ Sij	コンバータ <i>i</i> のスイッチ <i>j</i> の電圧出力フラグ (1 : 出力あり, 0 : 出力なし)

4.2.1.7 ダイオードブリッジモジュール(Diode Bridge Modules)

一相及び三相ダイオードブリッジモジュールのシンボルとモジュールの内部接続を次に示します。

シンボル



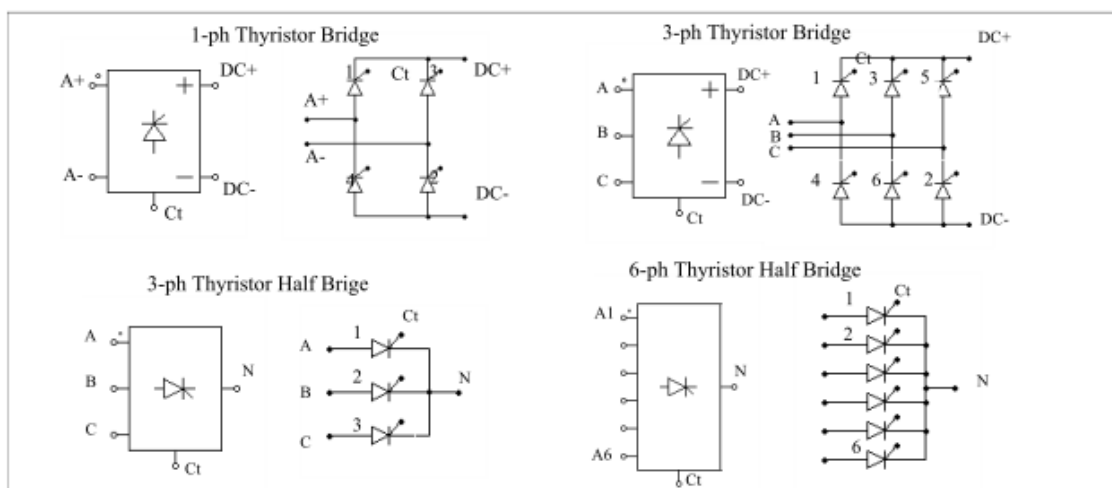
仕様

パラメータ	機 能
ダイオード閾値電圧	ダイオード閾値電圧(V)
ダイオード抵抗	ダイオードのオン抵抗(Ω)
初期状態 1...4 (または 1...6)	単相ブリッジの場合は 1~4、三相ブリッジの場合は 1~6 用スイッチ初期状態 (1: 閉、0: 開)
電流フラグ 1...4 (または 1...6)	アノード - カソード間の電流出力フラグ表示 (1: 出力あり、0: 出力なし)
電圧フラグ 1...4 (または 1...6)	アノード - カソード間の電圧出力フラグ表示 (1: 出力あり、0: 出力なし)

4.2.1.8 サイリスタブリッジモジュール(Thyristor Bridge Modules)

プレビルドサイリスタブリッジモジュールイメージと内部回路は次のようになります。

シンボル



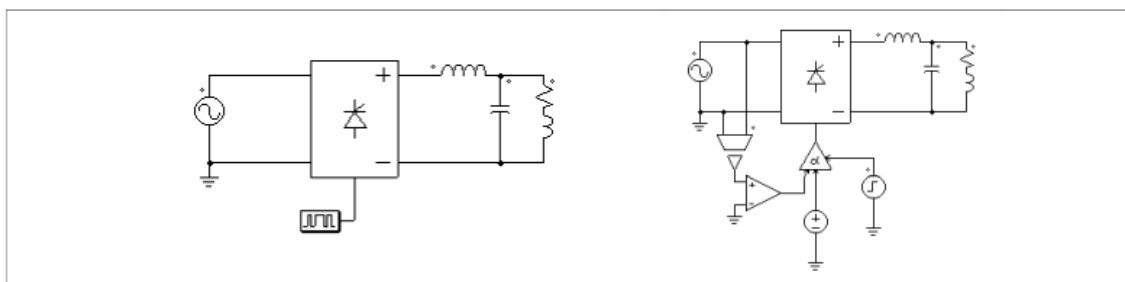
仕様

パラメータ	機 能
電圧降下	サイリスタの導通電圧降下 (V)
初期状態 1...4 (または 1...6)	スイッチ初期状態: 単相ブリッジの場合は 1~4、三相または六相ブリッジの場合は 1~6 用
電流フラグ 1...4 (または 1...6)	アノード - カソード間の電流出力フラグ表示 (1: 出力あり、0: 出力なし)
電圧フラグ 1...4 (または 1...6)	アノード - カソード間の電圧出力フラグ表示 (1: 出力あり、0: 出力なし)

サイリスタモジュールの下部のノード Ct はスイッチ 1 のためのゲート制御ノードです。サイリスタモジュールではスイッチ 1 のみのゲーティング指定必要があります。他のスイッチのゲーティングは自動的に導出されます。

単相サイリスタスイッチと同様にサイリスタブリッジも次の例のようにゲーティングブロックや α コントローラ (点弧角制御器) により制御されます。

例: サイリスタブリッジの制御



左の回路のゲート信号はゲーティングブロックで設定されます。右の回路のゲート信号は α コントローラで設定されます。 α コントローラの良い所はサイリスタブリッジの遅延角 α (°) を直接制御できることです。

4.2.2 ダイオード(Diode)と LED

ダイオードや LED の導通は回路操作条件によって決定されます。PSIM のダイオードは 2 つのモデルレベルが用意されています。

- 理想モデル：ダイオードは閾値電圧を超えて正方向にバイアスされるとオンし、電流が 0 になるとオフします。
- Level-2 モデル：リード線の寄生インダクタンスおよび逆回復時間も考慮されます。
- SPICE モデル：SPICE ネットリストのダイオードモデル
- SPICE サブ回路：SPICE サブ回路ネットリストのダイオードモデル

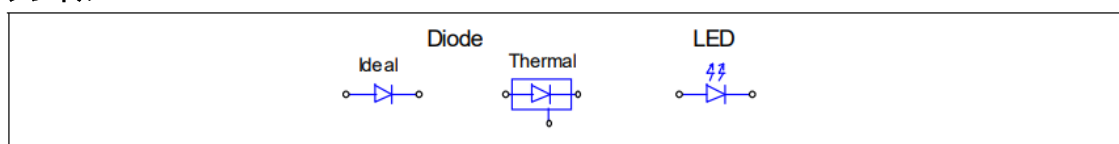
LED の特性は理想ダイオードと同じです。

SPICE モデルを使用するには、ライセンスに SPICE モジュールが必要です。

SPICE モデルおよび SPICE サブ回路モデルの詳細については、「SPICE User Manual.pdf」というドキュメントを参照してください。

理想モデルとレベル 2 モデルにつきましては次に説明します。

シンボル



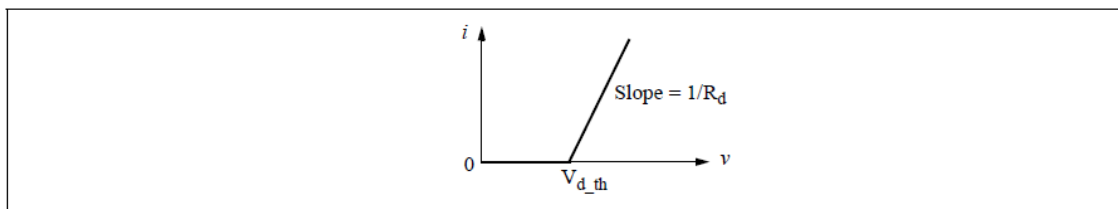
理想モデルと LED の仕様

パラメータ	機 能
順方向電圧	ダイオードの順電圧閾値(V_{d_th})(V)。正のバイアス電圧が V_{d_th} 以上になると、ダイオードが導通します。
抵抗	導通時のダイオード抵抗値 $R_d(\Omega)$
初期状態	デバイスの初期状態フラグ (0 : オフ ; 1 : オン)
電流フラグ	アノード - カソード間の電流出力フラグ (1 : 出力あり、0 : 出力なし)
電圧フラグ	アノード - カソード間の電圧出力フラグ (1 : 出力あり、0 : 出力なし)

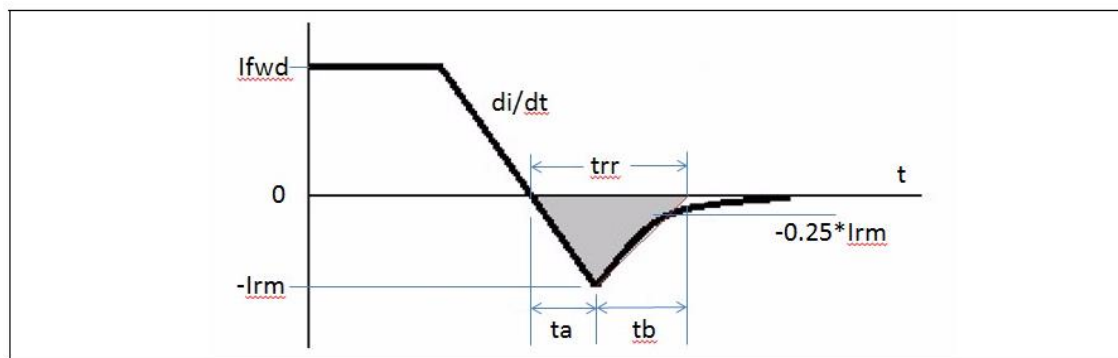
レベル 2 モデルの仕様

パラメータ	機 能
順方向電圧	ダイオードの順電圧閾値(V_{d_th})(V)。正のバイアス電圧が V_{d_th} 以上になると、ダイオードが導通します。
抵抗	導通時のダイオード抵抗値 $R_d(\Omega)$
直列インダクタンス	ダイオードの寄生インダクタンス(H)
並列電気容量	ダイオードのアノードとカソード間の並列電気容量(F)。容量値が 0 の場合は、コンデンサは無視され、シミュレーションから除去されます。
順方向電流	逆回復特性を測定するための試験条件下における順方向電流 $I_{fwd}(A)$
逆方向ピーク電流	試験条件下での逆ピーク電流(A)
電流スロープ	逆回復特性を測定するための試験条件下における電流勾配 di/dt (A/sec)
逆回復時間定数	逆回復時間定数 t_{rr} (sec) (ダイオード i-v 特性参照)
初期状態	ダイオード初期状態フラグ(1:オン; 0:オフ)
電流フラグ	アノード - カソード間の電流出力フラグ (1: 出力あり、0: 出力なし)
電圧フラグ	アノード - カソード間の電圧出力フラグ (1: 出力あり、0: 出力なし)

理想ダイオード i-v 特性



ダイオード Level-2 モデル逆回復パラメータ定義



逆回復時間 t_{rr} は t_a および t_b に分かれます。 t_a の期間では電流値は 0 から $-I_{rm}$ まで直線的に変化します。 t_b は JEDEC (Joint Electron Device Engineering Council) によると、上図のように $-I_{rm}$ から $-0.25 \cdot I_{rm}$ までの直線が時間軸と交差するまでの期間と定義されています。

ダイオードの Level-2 モデルに関する詳細は、"Tutorial - Diode model with reverse recovery.pdf" を参照してください。

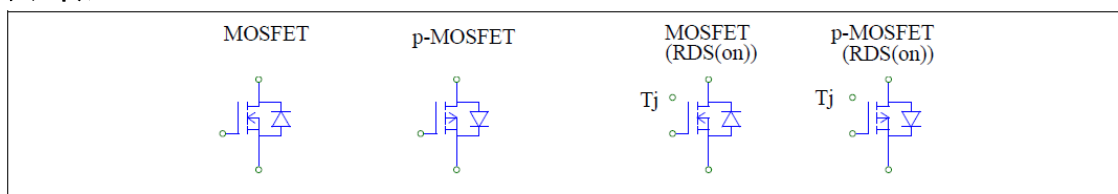
4.2.3 MOSFET 及び MOSFET($R_{ds(on)}$)

MOSFET モデルは 6 つのレベルがあります。

- ・理想モデル
- ・ Level 1、
- ・ Level 2、
- ・ Thermal-MOSFET (Eon)
- ・ Thermal-MOSFET
- ・ SPICE モデル、
- ・ SPICE Subcircuit、SPICE Subcircuit (4-pin)、SPICE Subcircuit (5-pin)、
- ・ MOSFET RDS(on)

です。MOSFET(Rds(on))モデルはジャンクション温度の関数として On 抵抗 Rds(on)を持っています。
 サーマルモデルに関する詳細は「4.10.2 MOSFET Thermal model」をご参照ください。
 SPICE モデルやサブ回路に関する詳細情報は「SPICE モジュールユーザーマニュアル」をご参照ください。

シンボル



4.2.3.1 理想モデル (Ideal MOSFET)

MOSFET スイッチは逆方向に接続されたダイオードとスイッチから構成されます。ゲート信号が論理的に正状態(ゲート電圧が 1V またはそれ以上の場合)、かつスイッチが正にバイアス(ドレイン・ソース間電圧が正)された場合に、MOSFET はオン状態となります。ゲート信号が負の状態、または電流が 0 になるとオフ状態となります。

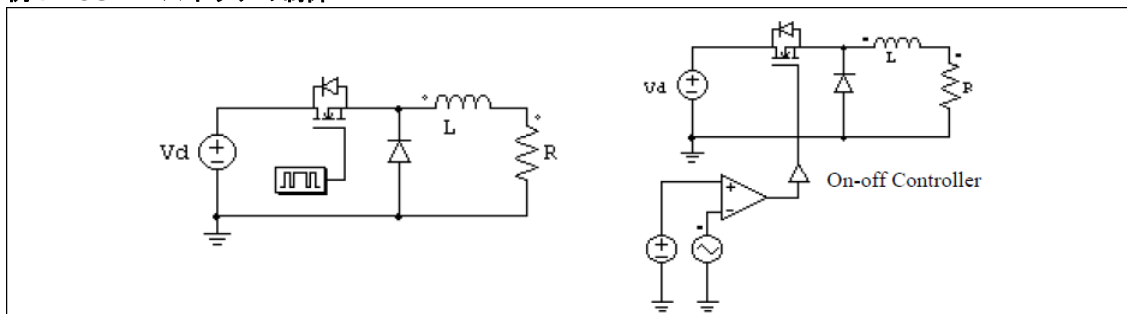
P チャンネル MOSFET は、ゲート信号が論理的に負状態、かつスイッチが負にバイアス(ドレイン・ソース間電圧が負)された場合にオン状態となります。

仕様(MOSFET および p-MOSFET)

パラメータ	機 能
オン抵抗	MOSFET のオン抵抗 $R_{ds_on}(\Omega)$
閾値電圧	逆並列ダイオード閾値電圧(V)
ダイオード抵抗	逆並列ダイオードのオン抵抗(Ω)
初期状態	スイッチ初期状態フラグ(0:オフ、1:オン)
電流フラグ	ドレイン・ソースの電流出力フラグ (1 : 出力あり、0 : 出力なし)
電圧フラグ	ドレイン・ソースの電圧出力フラグ (1 : 出力あり、0 : 出力なし)

理想スイッチのゲートノードはゲートブロックまたはスイッチコントローラーのいずれかに接続されていなければいけません。

例：MOSFET スイッチの制御

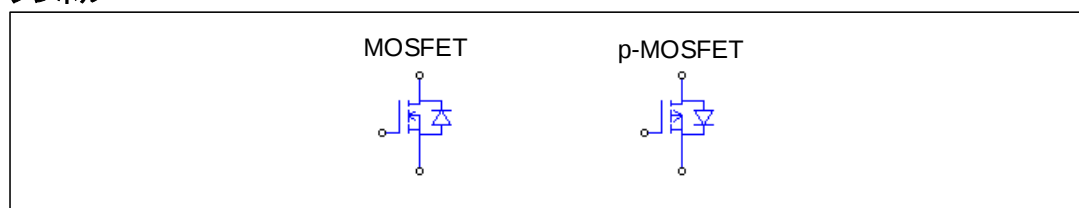


左側の回路はゲートブロックを使用し、右側の回路はオンオフ制御器を使用します。ゲート信号は比較器の出力で決定されます。

4.2.3.2 Level-1 及び Level-2 MOSFET

Level-1 および Level-2 の MOSFET モデルの場合、ゲートノードはパワーノードです。抵抗や電源のようなパワー回路素子へ接続しなければなりません。ゲーティングブロックまたはスイッチコントローラに接続することはできません。

シンボル



・仕様 (Level-1 MOSFET)

パラメータ	機能
オン抵抗	MOSFET のオン抵抗 $R_{ds_on}(\Omega)$
閾値電圧 $V_{gs(th)}$	ゲート・ソースの閾値電圧(V)
相互コンダクタンス	MOSFET の相互コンダクタンス g_m
ダイオード順方向電圧	スイッチ初期状態フラグ(0:オフ、1:オン)
ダイオード抵抗	スイッチ電流出力フラグ(0:非表示、1:表示)

Level-1 の MOSFET はリニアスイッチで遮断、リニア、飽和の 3 つの状態のモデルがあります。

リニア MOSFET はゲート・ソース間の電圧 V_{gs} によって制御されています。遮断（オフ状態）、アクティブ、及びオーミック領域（オン状態）の 3 つの領域のどれかで動作します。

nMOSFET の各領域での特性は次のようになります。

- 弱反転領域: $V_{gs} < V_{gs(th)}$; $I_d = 0$
- 飽和領域: $V_{gs} > V_{gs(th)}$ and $V_{gs} - V_{gs(th)} < V_{ds}$; $I_d = g_m \cdot (V_{gs} - V_{gs(th)})$
- 線形領域: $V_{gs} > V_{gs(th)}$ and $V_{gs} - V_{gs(th)} > V_{ds}$; $I_d = V_{ds} / R_{DS(on)}$

V_{gs} はゲート・ソース電圧、 V_{ds} はドレイン・ソース電圧、 I_d はドレイン電流です。

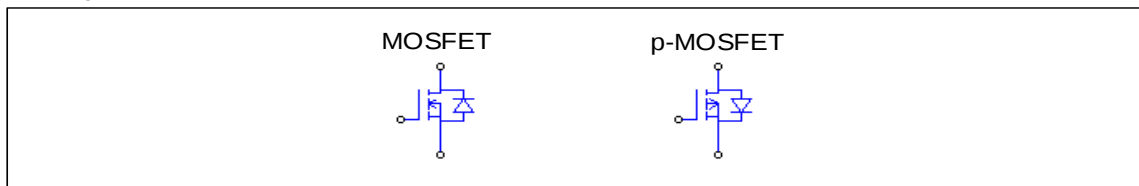
pMOSFET の場合は次のようになります。

- 弱反転領域: $V_{gs} > V_{gs(th)}$; $I_d = 0$

- 飽和領域: $V_{gs} < V_{gs(th)}$ and $V_{gs} - V_{gs(th)} > V_{ds}$; $I_d = g_m \cdot (V_{gs} - V_{gs(th)})$
- 線形領域: $V_{gs} < V_{gs(th)}$ and $V_{gs} - V_{gs(th)} < V_{ds}$; $I_d = V_{ds} / R_{DS(on)}$

Level-2 の MOSFET は真性、寄生成分が考慮されます。

・ シンボル



・ 仕様

パラメータ	機 能
ブレークダウン電圧(ドレイン・ソース間)	アバランシェブレークダウンを起こさない最大ドレイン・ソース電圧(V)
オン抵抗	MOSFET のオン抵抗(Ω)
ゲート閾値電圧	ゲート・ソース間の閾値電圧(V)
内部ゲート抵抗	内部ゲート抵抗(Ω)
相互コンダクタンス g_m	MOSFET の相互コンダクタンス g_m
容量 C_{gs}	ゲート・ソース間の容量 (F)
容量 C_{gd}	ゲート・ドレイン間の容量 (F)
容量 C_{ds}	ドレイン・ソース間の容量 (F)
ダイオード順方向電圧	逆並列ダイオードの順方向電圧(V)
ダイオード抵抗	逆並列ダイオードの抵抗(Ω)

Level-2 モデルは Level-1 モデルと同じですが、真性及び寄生成分が考慮されます。キャパシタンス C_{gs} 、 C_{gd} 、および C_{ds} が含まれています。

Level-2 MOSFET モデルでは、容量 C_{gs} 、 C_{gd} 、および C_{ds} は、次のようにデータシートの入力容量 C_{iss} 、 C_{oss} 、および C_{rss} から大まかに計算できます。

$$C_{gs} = C_{iss} - C_{rss}$$

$$C_{gd} = C_{rss}$$

$$C_{ds} = C_{oss} - C_{rss}$$

容量値は、希望の過渡応答を得るために調整する必要があるかもしれません。

ゲートノードはパワーノードです。抵抗や電源のようなパワー素子に接続しなければなりません。ゲーティングブロックまたはスイッチコントローラに接続することはできません。

4.2.3.3 MOSFET $R_{DS(on)}$

MOSFET ($R_{DS(on)}$) モデルおよび p-MOSFET ($R_{DS(on)}$) モデルは、ジャンクション温度の関数としてオン抵抗を計算します。

仕様(MOSFET(RDS(on))および p-MOSFET(RDS(on)))

パラメータ	機 能
試験時温度 Tj	試験時のジャンクション温度 $T_{j_b}(^{\circ}\text{C})$
試験時抵抗	試験時のオン抵抗 $R_{DS(on)_b}(\Omega)$
温度係数	オン抵抗の温度係数($1/^{\circ}\text{C}$)
閾値電圧	逆並列ダイオード閾値電圧(V)
ダイオード抵抗	逆並列ダイオードのオン抵抗(Ω)
初期状態	スイッチ初期状態フラグ(0:オフ、1:オン)
電流フラグ	ドレイン・ソースの電流出力フラグ (1: 出力あり、0: 出力なし)
電圧フラグ	ドレイン・ソースの電圧出力フラグ (1: 出力あり、0: 出力なし)

MOSFET スイッチの MOSFET(RDS(on))と p-MOSFET(RDS(on))はジャンクション温度の関数としてオン抵抗を持っています。シンボルにおけるゲート端子の上部に位置する端子により、ジャンクション温度が定義されます。その端子に入力される電圧値により、ジャンクション温度 $T_j(^{\circ}\text{C})$ が定義されます。例えば、25V が与えられると、 25°C と定義されます。オン抵抗は下記の式により定義されます。

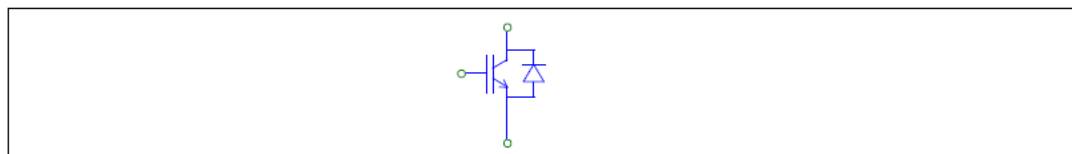
$$R_{DS(ON)} = R_{DS(ON)_b} \cdot (1 + K_T \cdot (T_j - T_{j_b}))$$

自己転流スイッチはゲート・ブロック(GATING)かスイッチコントローラのいずれかで制御されます。これらはスイッチのゲート(ベース)ノードに接続されていなければなりません。

4.2.4 IGBT

IGBT モデルには理想、Level-2 と SPICE Subcircuit の 3 つのレベルがあります。理想と Level-2 について説明します。SPICE モデルの使用はオプションの SPICE モジュールのライセンスが必要です。

シンボル



4.2.4.1 理想 IGBT

IGBT スイッチは逆接続されたダイオードとスイッチから構成されます。ゲート信号が論理的に正状態(ゲート電圧が 1V またはそれ以上の場合)、かつスイッチが正にバイアス(コレクタ・エミッタ間電圧が正)された場合にオン状態となります。ゲート信号が負の状態、または電流が 0 になるとオフ状態となります。

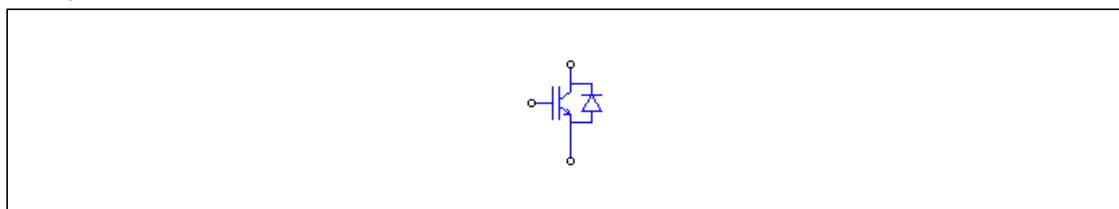
仕様

パラメータ	機 能
飽和電圧	IGBT の飽和電圧 $V_{ce_sat}(V)$
トランジスタ抵抗	トランジスタのオン抵抗(Ω)
閾値電圧	逆並列ダイオード順方向閾値電圧(V)
ダイオード抵抗	逆並列ダイオードのオン抵抗(Ω)
初期状態	スイッチ初期状態フラグ(0:オフ、1:オン)
電流フラグ	コレクタ・エミッタの電流出力フラグ (1 : 出力あり、0 : 出力なし)
電圧フラグ	コレクタ・エミッタの電圧出力フラグ (1 : 出力あり、0 : 出力なし)

4.2.4.2 Level-2 IGBT

Level-2 IGBT のモデルはターンオンとターンオフを考慮しています。このモデルの使い方について詳しくは、チュートリアル「Tutorial - IGBT Level-2 model.pdf」をご覧ください。

シンボル



仕様

パラメータ	機 能
最大 Vce	コレクタ・エミッタ間の最大電圧 Vce(V)
最大 Vec	エミッタ・コレクタ間の最大電圧 Vec(V) もし IGBT に逆並列ダイオードがある場合はこの電圧はダイオードの順方向閾値電圧となります。
閾値電圧	ゲート閾値電圧 Vge_th(V)
相互コンダクタンス	IGBT の相互コンダクタンス (S)
立下り時間	IGBT がオフした時の立下り時間(sec)
容量 Cies	入力容量 Cies(F)
容量 Coes	出力容量 Coes(F)
容量 Cres	逆伝達容量 Cres(F)
Rce_on	コレクタ・エミッタ間のオン抵抗(Ω)
Vce 閾値	コレクタ・エミッタ間の閾値電圧 (V)
ゲート内部抵抗	内部ゲート抵抗 Rgate(Ω)
電流フラグ	コレクタ・エミッタの電流出力フラグ (1 : 出力あり、0 : 出力なし)
電圧フラグ	コレクタ・エミッタの電圧出力フラグ (1 : 出力あり、0 : 出力なし)

このモデルの詳細につきましては“Tutorial-IGBT Level-2 model.pdf”を参照してください。

4.2.5 逆阻止 IGBT(IGBT-RB)

IGBT-RB スイッチは、逆阻止能力を持ち、逆並列ダイオードなしのアクティブなスイッチで構成されています。スイッチが正に(コレクタ・エミッタ間電圧が正)にバイアスされている場合、ゲート信号が High のとき(1V の電圧以上のゲートノードに印加された場合)オンします。ゲート信号が Low であるか、電流がゼロに低下するとスイッチはオフになります。

IGBT-RB は単一のスイッチおよびデュアルパッケージの 2 つが用意されています。

シンボル



仕様

パラメータ	機 能
飽和電圧	IGBT の飽和電圧 V_{ce_sat} (V)
トランジスタ抵抗	トランジスタのオン抵抗(Ω)
初期状態	スイッチの初期状態フラグ(0:オフ、1:オン)
初期状態 1 または 2	デュアルパッケージの場合はスイッチ 1、2 を別に設定
電流フラグ	コレクタ・エミッタの電流出力フラグ (1 : 出力あり、0 : 出力なし)
電圧フラグ	コレクタ・エミッタの電圧出力フラグ (1 : 出力あり、0 : 出力なし)

デュアルパッケージの場合、素子を直立に配置した場合、左側にあるスイッチが 1、右側にあるスイッチが 2 です。

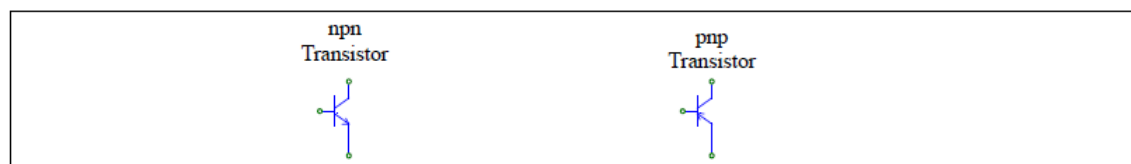
4.2.6 npn 及び pnp トランジスタ (npn and pnp Transistors)

バイポーラ・ジャンクション・トランジスタ (BJT) モデルは 5 つのレベルを持っています。

Ideal,
 Level-1,
 Level-2,
 SPICE モデル
 SPICE サブサーキット

です。理想 BJT モデルと、Level-1 および Level-2 モデルについては次に説明します。SPICE を使用する場合には SPICE モジュールが必要となります。詳しくは、「SPICE Module マニュアル」をご確認ください。

シンボル



4.2.6.1 理想の BJT

SPICE モジュールを理想スイッチングデバイスとして動作するため、実際のデバイスの動作とは若干異なります。バイポーラ・ジャンクション・トランジスタスイッチは逆電圧を遮断します(GTO と同様の動作)。この際、ゲートノードの電流ではなく、電圧により制御されます。

ゲート信号が論理的に正状態(ゲート電圧が 1V またはそれ以上の場合)、かつスイッチが正にバイアス(コレクタ・エミッタ間電圧が正)された場合に、nnp トランジスタはオン状態となります。ゲート信号が論理

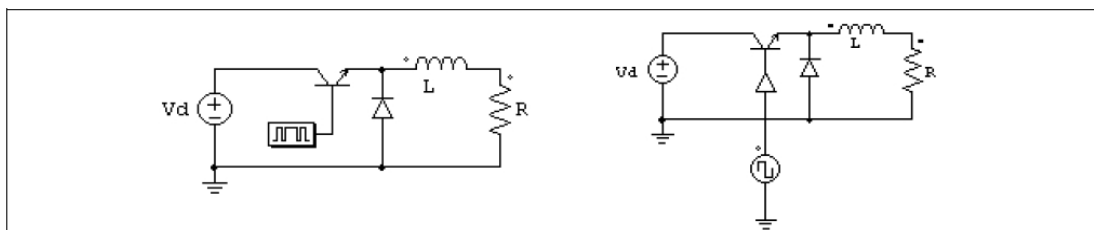
的に負状態、かつスイッチが負にバイアス(コレクタ・エミッタ間電圧が負)された場合に、pnp トランジスタはオン状態となります。

仕様(npn および pnp BJT)

パラメータ	機 能
飽和電圧	飽和電圧 V_{ce_sat} (npn の場合)または V_{ec_sat} (pnp の場合)(V)
初期状態	スイッチ初期状態フラグ(0:オフ、1:オン)
電流フラグ	コレクタ・エミッタの電流出力フラグ (1 : 出力あり、0 : 出力なし)
電圧フラグ	コレクタ・エミッタの電圧出力フラグ (1 : 出力あり、0 : 出力なし)

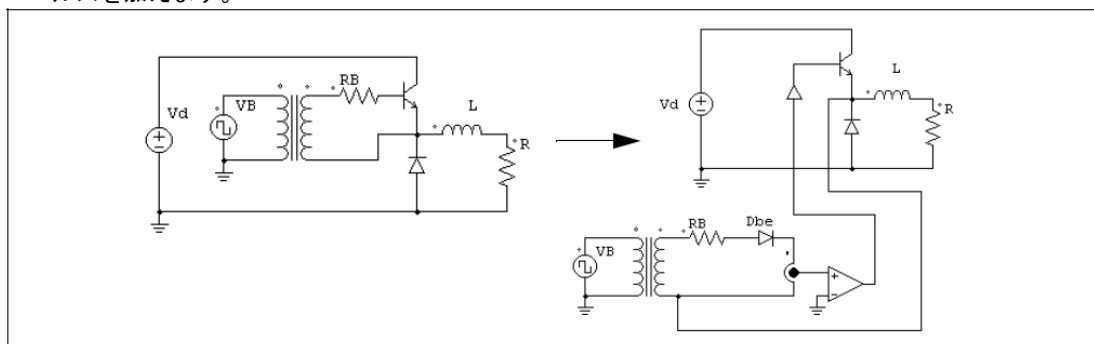
例：npn バイポーラ・ジャンクション・トランジスタ(BJT)の制御

左側の回路はスイッチ・ゲート信号ブロックを、右側の回路はオンオフ・スイッチ・コントローラを使用しています。右側の回路のように、制御回路からの信号によりスイッチングする場合は、オンオフ・スイッチ・コントローラをゲートノードに配置する必要があります。



以下の例は npn スwitch を制御するもうひとつの例です。左の回路は実際の回路での npn スwitch を制御する接続を示します。この場合、ゲート電圧 V_B を、変圧器を介してトランジスタのベース駆動回路に加えると、ベース電流がトランジスタの導通状態を決めます。

PSIM ではこれを右のように構成します。ダイオード D_{be} を使ってベース・エミッタ間 0.7V の電圧降下を表現しています。ベース電流が 0(もしくは一定の閾値；この場合、ベース電流は直流電源と比べます)を越えると、比較器の出力が 1 になり、オンオフ・スイッチ・コントローラを介してトランジスタにターンオン・パルスを加えます。



4.2.6.2 Level-1 及び Level-2 (3-state) の BJT

3-state の BJT モデルは線形スイッチとなります。遮断(オフ状態)、線形、飽和(オン状態)領域からなります。

Level-2 モデルはより詳細なデバイス特性でシミュレーションを行います。そのためにはデバイスデータシート等からの詳細な情報の入力が必要となります。

仕様 Level-1

パラメータ	機 能
電流増幅率 β	トランジスタの電流増幅率 β です。 $\beta = I_c/I_b$ で定義されます。
ベース-エミッタ間飽和電圧 $V_{BE(sat)}$	ベース-エミッタ間飽和電圧 (V)。npn では+、pnp では-の値になります。
コレクタ・エミッタ間飽和電圧 $V_{CE(sat)}$	コレクタ・エミッタ間飽和電圧 (V)。npn では+、pnp では-の値になります。

仕様 Level-2

パラメータ	機 能
V_{CEO} (降伏電圧)	コレクター-エミッタ間降伏電圧 (V)
V_{CBO} (降伏電圧)	コレクター-ベース間降伏電圧 (V)
V_{EBO} (降伏電圧)	エミッター-ベース間降伏電圧 (V)
コレクタ・エミッタ電圧 $V_{CE(sat)}$	コレクタ・エミッタ飽和電圧 (V)
ベースエミッタ電圧 $V_{BE(sat)}$	ベースエミッタ順方向バイアス電圧 (V)
DC 電流ゲイン(hFE)	トランジスタ電流増幅率
コレクタ電流 $I_{CE(sat)}$	コレクタ・エミッタ飽和電流 (A)
コレクタ抵抗 R_C	コレクタ・エミッタ抵抗 (ohm)
ベース抵抗 R_B	ベースエミッタ抵抗 (ohm)
出力容量 C_{obo}	出力容量 (F)
入力容量 C_{ibo}	入力容量 (F)
立ち上がり時間 t_r	立ち上がり時間 (秒)
t_r のベース電流 I_{B1}	t_r 測定のためにテスト回路で使用するベース電流 (A)。
立下り時間 t_f	立下り時間 (秒)
保存時間 t_s	保存時間 (秒)
強制電流ゲイン	強制電流ゲイン H_{feF}

各領域電圧・電流特性を示します。

npn の場合

- 遮断領域 : $V_{be} < V_r$; $I_b = 0$; $I_c = 0$
- 線形領域 : $V_{be} = V_r$; $I_c = \beta * I_b$; $V_{ce} > V_{ce,sat}$
- 飽和領域 : $V_{be} = V_r$; $I_c < \beta * I_b$; $V_{ce} = V_{ce,sat}$

V_{be} はベースとエミッタ間の電圧、 V_{ce} はコレクターとエミッタ間の電圧、 I_c はコレクタ電流です。

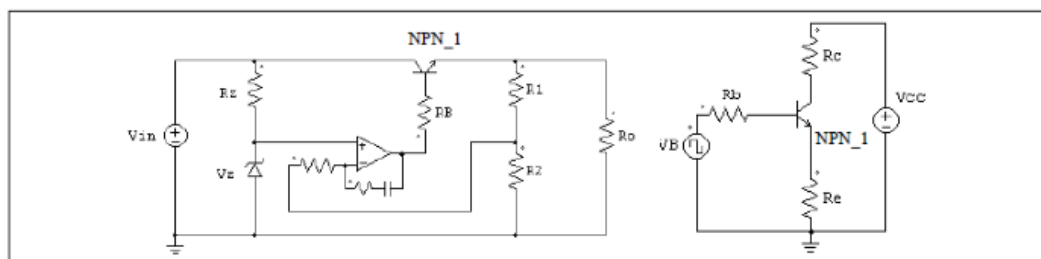
pnp の場合

- 遮断領域 : $V_{eb} < V_r$; $I_b = 0$; $I_c = 0$
- 線形領域 : $V_{eb} = V_r$; $I_c = \beta * I_b$; $V_{ec} > V_{ec,sat}$
- 飽和領域 : $V_{eb} = V_r$; $I_c < \beta * I_b$; $V_{ec} = V_{ec,sat}$

V_{eb} はエミッタとベース間の電圧、 V_{ec} はエミッタとコレクター間の電圧、 I_c はコレクタ電流です。

3-stateBJT の場合、ベースノード（ゲートノード）はパワーノードのため、抵抗や電源などのパワー素子に接続しなければなりません。ゲーティングブロックやスイッチコントローラには接続できません。

次の図は線形 BJT 使用回路の例です。左側は線形電圧レギュレータ回路でトランジスタは線形モードで動作しています。右側の回路図は簡単なテスト回路です。



4.2.7 ツェナーダイオード、ダイアック(Zener Diode and DIAC)

4.2.7.1 ツェナーダイオード(Zener)

PSIM のツェナーダイオードは以下に示すような回路によりモデル化されています。

シンボル



仕様

パラメータ	機能
ブレイク電圧	ツェナーダイオードのブレイク電圧(V_B)(V)
順方向閾値電圧	順方向の閾値電圧(アノードからカソード間)(V)
順方向抵抗	順方向のオン抵抗(Ω)
電流フラグ	アノード - カソード間の電流出力フラグ (1: 出力あり, 0: 出力なし)
電圧フラグ	アノード - カソード間の電圧出力フラグ (1: 出力あり, 0: 出力なし)

ツェナーダイオードが順方向にバイアスされた場合は、通常のダイオードとして動作します。逆方向にバイアスされた場合は、カソード電圧 V_{KA} がブレイク電圧 V_B 以下である限り、導通を阻止します。電圧 V_{KA} が V_B より高い場合には、電圧 V_{KA} が V_B にクランプされます。

ツェナーダイオードがクランプすると、ダイオードのオン抵抗が $10\mu\Omega$ なので、カソードーアノード間の電圧は実際には $V_{KA} = V_B + 10\mu\Omega \cdot I_{KA}$ となり、 I_{KA} の値によって V_{KA} は V_B よりも少し高くなります。電流 I_{KA} が非常に大きい場合は、電圧 V_{KA} は V_B よりもかなり高くなる可能性があります。

4.2.7.2 ダイアック(DIAC)

ダイアック(DIAC)は双方向性のダイオードです。ダイアックはブレイクオーバー(breakover)電圧がかかるまで導通しません。DIAC が導通するようになったあとの電圧はブレイクバック(breakback)電圧と呼ばれます。

シンボル



仕様

パラメータ	機 能
ブレイクオーバー電圧	DIAC が導通を始める電圧(V)
ブレイクバック電圧	導通時電圧降下(V)
ブレイクオーバー電流	デバイスが導通を停止しない最小電流(A)
電流フラグ	アノード・カソードの電流出力フラグ（1：出力あり、0：出力なし）
電圧フラグ	アノード・カソードの電圧出力フラグ（1：出力あり、0：出力なし）

4.2.8 サイリスタ・トライアック(Thyristor and TRIAC)

サイリスタはターンオンが制御できます。ターンオフは回路条件で決定されます。

トライアックは両方向に電流を流すことができるサイリスタです。トライアックは逆向きの 2 つのサイリスタが並列接続された構造をしています。

シンボル



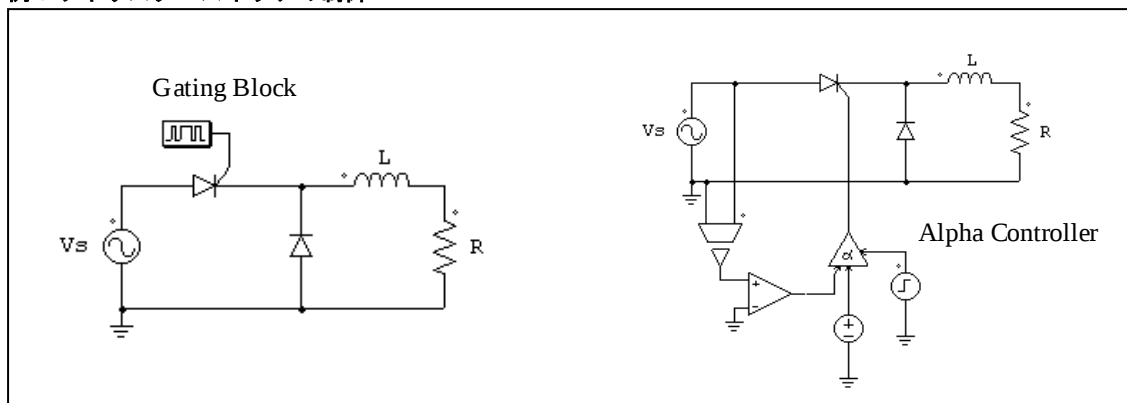
仕様

パラメータ	機 能
電圧降下	サイリスタ導通時電圧降下(V)
最小導通電流	サイリスタの最小導通電流(A)；電流がこの値以下になるとサイリスタの状態は OFF になります(サイリスタのみに適用)。
最小電流	サイリスタを ON 状態に保つ最小電流(サイリスタのみに適用)(A)。
初期状態	スイッチ初期状態フラグ(サイリスタのみに適用)
電流フラグ	アノード - カソード間の電流出力フラグ（1：出力あり、0：出力なし）
電圧フラグ	アノード - カソード間の電圧出力フラグ（1：出力あり、0：出力なし）

TRIAC の最小導通電流と最小電流はいずれもゼロです。

サイリスタおよび TRIAC を制御するには 2 つの方法があります。一つはゲート・ブロック(GATING)を使用するか、スイッチコントローラを使用します。サイリスタまたは TRIAC のゲートノードにはこれらのいずれかに接続されていなければなりません。

例：サイリスタ・スイッチの制御

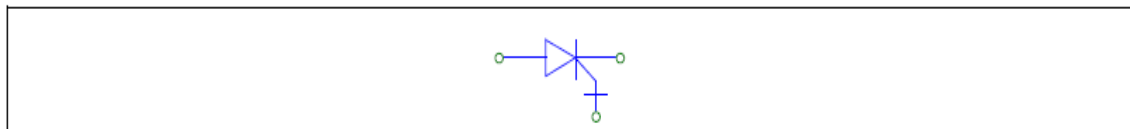


左側の回路はスイッチ・ゲート信号ブロックを使っています。スイッチング・ゲートパターンと周波数はシミュレーション開始前に設定し、シミュレーション中に変化することはありません。右側の回路は点弧角制御器を使っています。遅れ角 α (度)は回路の直流電圧源により指定されます。

4.2.9 ゲートターンオフサイリスタ(GTO)

GTO スイッチは正方向と逆方向の両方の阻止能力を持った対称素子です。

シンボル



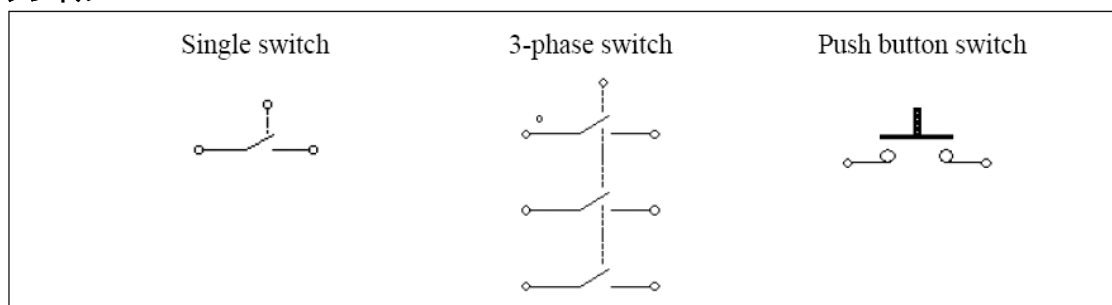
仕様

パラメータ	機 能
電圧降下	GTO 導通電圧降下(V)
初期状態	スイッチ初期状態フラグ(0:オフ、1:オン)
電流フラグ	アノード - カソード間の電流出力フラグ (1 : 出力あり、0 : 出力なし)
電圧フラグ	アノード - カソード間の電圧出力フラグ (1 : 出力あり、0 : 出力なし)

4.2.10 双方向スイッチ(Bi-Directional Switches)

双方向スイッチは両方向に電流を流すことができます。PSIM ではシングルスイッチ、三相スイッチ及びプッシュボタンスイッチの3タイプの双方向スイッチを用意しています。

シンボル



仕様

パラメータ	機 能
初期状態	スイッチ初期状態フラグ(0:オフ、1:オン)
電流フラグ	スイッチの電流出力フラグ (1 : 出力あり、0 : 出力なし) (シングルと三相)
電圧フラグ	スイッチの電圧出力フラグ (1 : 出力あり、0 : 出力なし) (シングルとプッシュボタン)

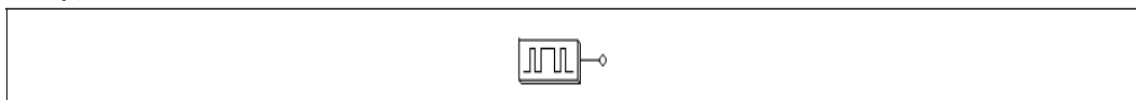
三相スイッチのイメージで、ドット付スイッチがA相です。

シングルスイッチ及び三相双方向のスイッチに関しては、電圧バイアス状態にかかわらず、ゲート信号が High の時オンであり、ゲート信号が Low の時オフです。プッシュボタンスイッチにおいて、スイッチ状態はパラメータ入力で設定されます。

4.2.11 スイッチ・ゲート信号ブロック(Gating Blocks)

スイッチ・ゲート信号ブロックはスイッチやスイッチモジュールのゲート信号パターンを定義します。ゲート信号パターンを、直接定義する *Gating Block* と、テキストファイルで定義する *Gating Block (file)* の 2 種類の素子があります。また、スイッチ素子のゲート端子にのみ接続できます。その他の素子には接続できません。

シンボル



仕様

パラメータ	機 能
周波数	ゲート信号ブロックに接続されたスイッチやスイッチモジュールの動作周波数(Hz)
ポイント数	スイッチングポイント数(<i>Gating Block</i> のみ)
スイッチングポイント	スイッチングポイント(度数)。周波数が 0 の場合は、スイッチングポイントは秒を意味します。(<i>Gating Block</i> のみ)
ゲーティングテーブルファイル	ファイル名指定による参照テーブル(<i>Gating Block (file)</i> のみ)

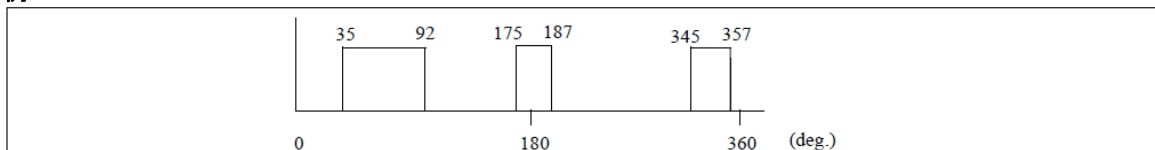
スイッチングポイント数は 1 周期内のスイッチング動作の総数を意味します。例えば、スイッチが 1 周期内に 1 度オンオフされた場合は、スイッチングポイント数は 2 になります。

Gating Table File は sch ファイルと同じフォルダに置いてください。Gating Table File のフォーマットは次のようになります。

```
n
G1
G2
...
Gn
```

G₁、G₂、G_n はスイッチングポイントです。

例



スイッチが 2000Hz で動作し、1 周期内で以下のようなゲート・パターンを持つと仮定します。

PSIM では、このスイッチのゲート・ブロックの仕様は以下となります。

周波数	2000
ポイント数	6
スイッチングポイント	35, 92, 175, 187, 345, 357

ゲート・パターンには 6 個所のスイッチングポイント(3 パルス)があります。対応するスイッチング角はそれぞれ 35°, 92°, 175°, 187°, 345°, 357°となります。

Gating Block (file) を使う場合は次のようになります。

周波数	2000
スイッチングポイントファイル	test.tbl

test.tbl は次のようになります。

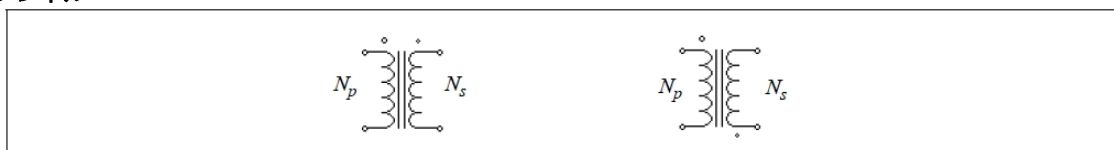
6
35.
92.
175.
187.
345.
357.

4.3 変圧器(Transformers)

4.3.1 理想変圧器(Ideal Transformer)

理想変圧器(Ideal Transformer)には損失、漏れ磁束がありません。

シンボル



大きなドットの付いた巻線が一次側を表し、もう一方の巻線が二次側を表します。

仕様

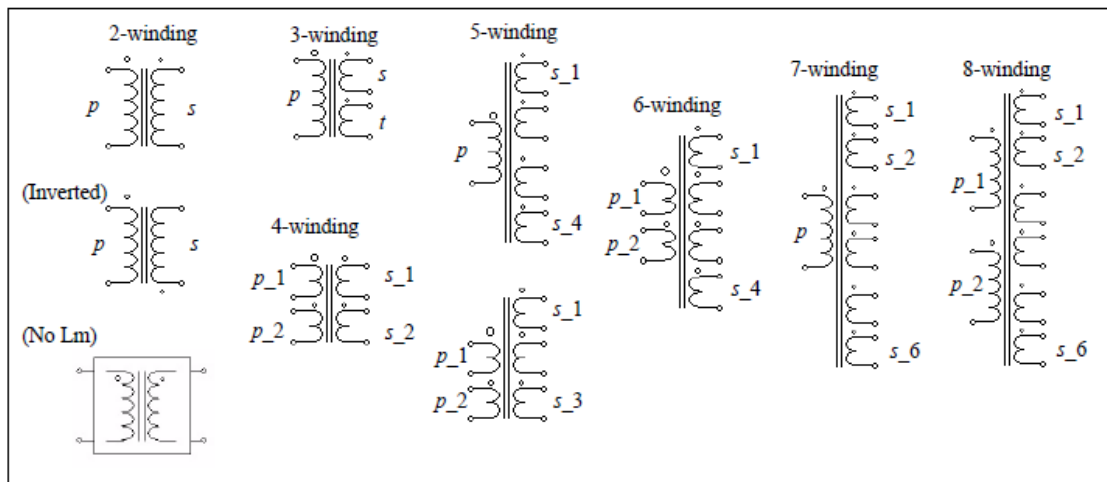
パラメータ	機能
Np(一次)	一次巻線巻数
Ns(二次)	二次巻線巻数

巻線比は定格電圧比に等しいので、巻数は各側の定格電圧で置き換えることができます。

4.3.2 単相変圧器(Single-Phase Transformers)

単相変圧器には、1 つまたは 2 つの一次巻き線、1 つから 6 つまでの二次巻き線の組み合わせがあります。

シンボル



シンボルでは、p は一次側を、s は二次側を、t は三次側を表します。大きなドットの付いた巻線が一次巻線を表します。多巻線変圧器については、巻線の順番は上から下に数えます。2 または 3 巻線変圧器についての仕様は以下のようになります。

仕様(2 または 3 巻線変圧器の場合)

パラメータ	機 能
R _p (一次) R _s (二次) R _t (三次)	一次巻線、二次巻線、三次巻線の抵抗(Ω)。一次側に換算
L _p (一次漏れ) L _s (二次漏れ) L _t (三次漏れ)	一次巻線、二次巻線、三次巻線の漏れインダクタンス(H)。一次側に換算
L _m (磁化)	磁化インダクタンス(H)。一次側に換算
N _p (一次) N _s (二次) N _t (三次)	一次巻線、二次巻線、三次巻線の巻数

すべての抵抗およびインダクタンスは一次巻線側を参照します。一次巻線が複数存在する場合には、最上位の巻き線が参照されます。

2 つ以上の一次巻線、または 3 つ以上の二次巻線を持つ変圧器についての仕様は以下のようになります。

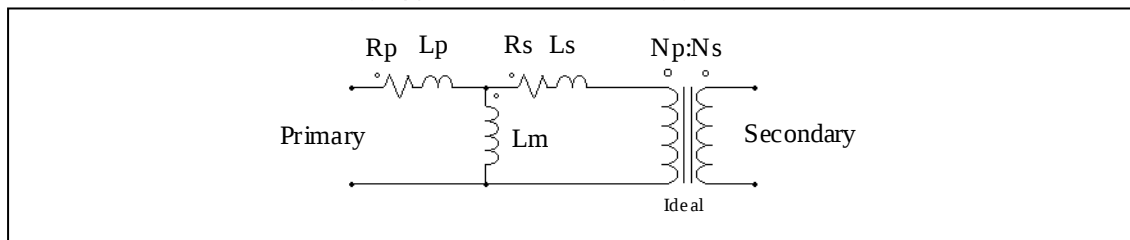
仕様(2 つ以上の一次巻線、または 3 つ以上の二次巻線を持つ変圧器の場合)

パラメータ	機 能
R _{p_i} (一次 i) R _{s_i} (二次 i)	i 番目の一次巻線、二次巻線、三次巻線の抵抗(Ω)。一次側に換算
L _{p_i} (一次 i 漏れ) L _{s_i} (二次 i 漏れ)	i 番目の一次巻線、二次巻線、三次巻線の漏れインダクタンス(H)。一次側に換算
L _m (磁化)	磁化インダクタンス(H)。一次側に換算
N _{p_i} (一次 i) N _{s_i} (二次 i)	i 番目の一次巻線、二次巻線、三次巻線の巻数

すべての抵抗およびインダクタンスが一次巻線側に参照されます。

変圧器モデル

変圧器は結合されたインダクタとしてモデル化されます。例えば、単相 2 巻線変圧器 2 つの結合されたインダクタとしてモデル化されます。等価回路は以下となります。



ここで R_p と R_s は一次/二次巻線抵抗、 L_p と L_s は一次/二次巻線漏れインダクタンス、 L_m は磁化インダクタンスです。全ての値は一次側から参照した値で表現されています。

例

単相 2 巻線変圧器が巻線抵抗 0.002Ω 、一次側二次側両方の漏れインダクタンス 1mH (全て一次側に換算)、磁化インダクタンス 100mH 、巻線比 $N_p:N_s=220:440$ とします。変圧器の仕様は以下のとおりです。

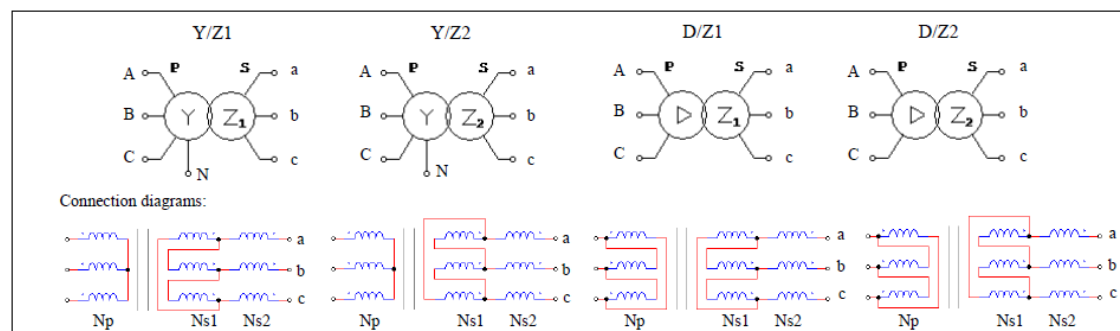
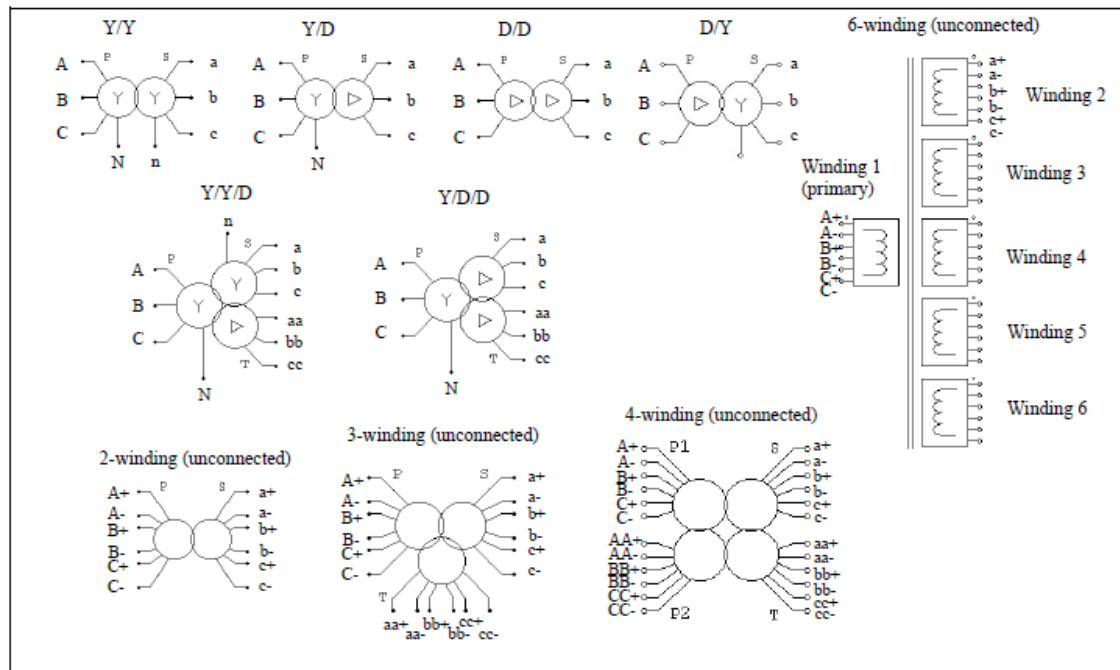
R_p (一次)	2m
R_s (二次)	2m
L_p (一次)	1m
L_s (二次)	1m
L_m (磁化)	100m
N_p (一次)	220
N_s (二次)	440

4.3.3 三相変圧器 (3-Phase Transformers)

PSIM には、以下に示すような 2 巻線と 3 巻線の変圧器モジュールが提供されており、全て三脚鉄心です。

- 三相変圧器(巻線接続無し)
- 三相 Y/Y、Y/ Δ 接続変圧器
- 三相三巻線変圧器(巻線接続無し)
- 三相三巻線 Y/Y/ Δ 、Y/ Δ / Δ 接続変圧器
- 三相三巻線 Y/Z1、Y/Z2、 Δ /Z1、 Δ /Z2 移相変圧器 (phase-shifting transformers)
- 三相四巻線変圧器(巻線接続無し)
- 三相六巻線変圧器(巻線接続無し)

シンボル



仕様 (移相変圧器を除いた全ての変圧器の場合)

パラメータ	機 能
R _p (一次) R _s (二次) R _t (三次)	一次巻線、二次巻線、三次巻線の抵抗(Ω)。一次側に換算
L _p (一次 漏れ) L _s (二次 漏れ) L _t (三次 漏れ)	一次巻線、二次巻線、三次巻線の漏れインダクタンス(H)。一次側に換算
L _m (磁化)	磁化インダクタンス(H)。一次側に換算
N _p (一次) N _s (二次) N _t (三次)	一次巻線、二次巻線、三次巻線の巻数

仕様 (移相変圧器の場合)

パラメータ	機 能
R _p (一次) R _{s1} (二次 1) R _{s2} (二次 2)	一次巻線、二次巻線、二次巻線(2nd)の抵抗(Ω)。一次側に換算
L _p (一次 漏れ) L _{s1} (二次 1 漏れ) L _{s2} (二次 2 漏れ)	一次巻線、二次巻線、二次巻線(2nd)の漏れインダクタンス(H)。一次側に換算
L _m (磁化)	磁化インダクタンス(H)。一次側に換算
N _p (一次) N _{s1} (二次 1) N _{s2} (二次 2)	一次巻線、二次巻線、二次巻線(2nd)の巻数

シンボルで、p は一次側を、s は二次側を、t は三次側を表します。全ての抵抗とインダクタンスは、一次側もしくは第 1 巻線側を参照しています。三相変圧器は単相変圧器と同様にモデル化されています。全てのパラメータは一次側に換算した値で表されています。
三相移相変圧器では、角度 δ は、二次線間電圧 V_{ab} と一次線間電圧 V_{AB} の位相の差を意味します。角度と巻線数の関係は、以下の通りです。

Y/Z1 変圧器の場合

$$\frac{N_{s2}}{N_{s1} + N_{s2}} = \frac{\sin(30^\circ - \delta)}{\sin(30^\circ + \delta)} \quad 0^\circ \leq \delta \leq 30^\circ$$

$$\frac{N_p}{N_{s1} + N_{s2}} = \frac{1}{2 \sin(30^\circ + \delta)} \cdot \frac{V_{AB}}{V_{ab}}$$

Y/Z2 変圧器の場合

$$\frac{N_{s2}}{N_{s1} + N_{s2}} = \frac{\sin(30^\circ - |\delta|)}{\sin(30^\circ + |\delta|)} \quad 0^\circ \leq \delta \leq 30^\circ$$

$$\frac{N_p}{N_{s1} + N_{s2}} = \frac{1}{2 \sin(30^\circ + |\delta|)} \cdot \frac{V_{AB}}{V_{ab}}$$

Delta/Z1 変圧器の場合

$$\frac{N_{s2}}{N_{s1} + N_{s2}} = \frac{\sin(|\delta|)}{\sin(60^\circ - |\delta|)} \quad -30^\circ \leq \delta \leq 0^\circ$$

$$\frac{N_p}{N_{s1} + N_{s2}} = \frac{\sqrt{3}}{2 \sin(60^\circ - |\delta|)} \cdot \frac{V_{AB}}{V_{ab}}$$

Delta/Z2 変圧器の場合

$$\frac{N_{s2}}{N_{s1} + N_{s2}} = \frac{\sin(60^\circ - |\delta|)}{\sin(|\delta|)} \quad -60^\circ \leq \delta \leq -30^\circ$$

$$\frac{N_p}{N_{s1} + N_{s2}} = \frac{\sqrt{3}}{2 \sin(|\delta|)} \cdot \frac{V_{AB}}{V_{ab}}$$

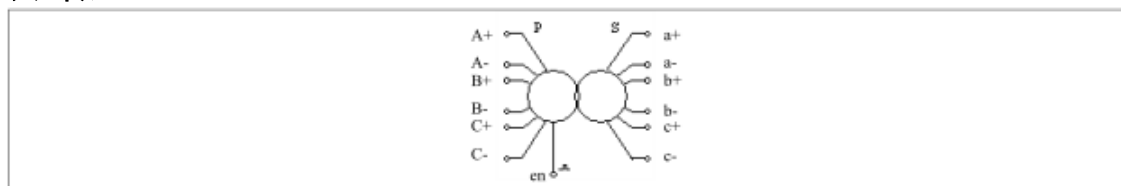
下表は一般的な変圧器の巻線比と位相遅れを示しています。

δ (deg.)	$N_{s2}/(N_{s1}+N_{s2})$				$N_p/(N_{s1}+N_{s2}) \cdot V_{ab}/V_{AB}$			
	Y/Z1	Y/Z2	Δ /Z1	Δ /Z2	Y/Z1	Y/Z2	Δ /Z1	Δ /Z2
30	0				0.577			
20	0.227				0.653			
15	0.366				0.707			
0	1	1	0		1	1	1	
-15		0.366	0.366			0.707	1.225	
--20		0.227	0.532			0.653	1.347	
-30		0	1	1		0.577	1.732	1.732
-40				0.532				1.347
-45				0.366				1.225
-60				0				1

4.3.4 三相変圧器(可飽和)(Three-Phase Transformer with Saturation)

飽和と残留磁束を考慮可能な三相 3 巻線の変圧器モジュールが提供されています。

シンボル



仕様

パラメータ	機 能
動作電圧(相電圧)	変圧器一次側の一相あたりの電圧実効値(V)
動作周波数	変圧器の動作周波数(Hz)
R_p (一次)	一次巻線抵抗(Ω)
L_p (一次 漏れ)	一次巻線の漏れインダクタンス(H)
R_s (二次)	二次巻線抵抗(Ω)、一次側に換算。
L_s (二次 漏れ)	二次巻線の漏れインダクタンス(H)、一次側に換算。
R_m (コア損失)	変圧器のコア損失を表す抵抗(Ω)
I_m vs. L_m	磁化電流 I_m (A)に対する一次巻線から見た磁化特性を定義する磁化インダクタンス L_m (H)の値
A 相残留磁束 B 相残留磁束 C 相残留磁束	A 相の単位当たりの残留磁束 B 相の単位当たりの残留磁束 C 相の単位当たりの残留磁束
N_p (一次) N_s (二次)	一次巻線、二次巻線の巻数

すべての抵抗およびインダクタンスが一次巻線側に換算されます。

画像では、p は一次側を指し、s は二次側を指します。ノード en は、制御ロジック信号に接続する、制御ノードです。0 から 1 へ信号が変わる瞬間が、変圧器が通電されている瞬間を示します。

動作電圧は実際の動作条件における相あたりの電圧を指していて、定格電圧とは限らないことに注意してください。例えば、変圧器の定格は 63kV(一次側線間電圧実効値)で、一次巻線が Y に接続されている場合、相あたりの動作電圧は、 $63000/\sqrt{3}$ V となります。一次巻線がデルタに接続されている場合は、相あたりの動作電圧は 63000V になります。同じ変圧器をデルタに接続して、例えば実際の動作電圧が 60,000V である場合、相あたりの動作電圧は 60,000V になります。

4.4 磁気要素(Magnetic Elements)

磁気要素のモデルとして、巻線、漏れ磁束経路、エアギャップ、線形コア、および可飽和コアが提供されます。これらの要素を組み合わせるにより、各種磁気デバイスの等価なモデル作成が可能となります。

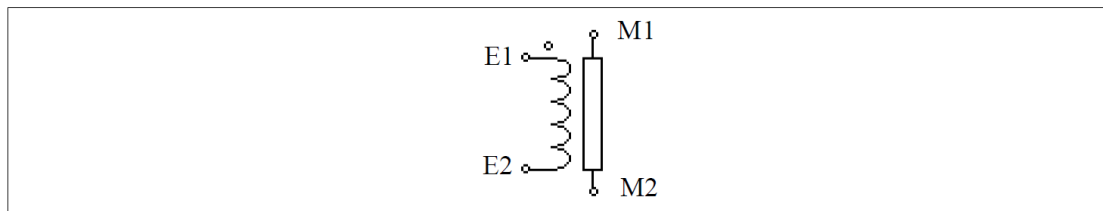
異なる単位系が磁気回路解析で用いられています。下の表は SI 系(System International)と混成 CGS 系(Centimeter Gram Second)単位系の磁気量と二つの単位系の変換を示しています。

量	SI Unit	CGS Unit	CGS-SI 変換
磁束 Φ	Weber	Maxwell	1 Weber= 10^8 Maxwell
磁束密度 B	Tesla	Gauss	1Tesla= 10^4 Gauss
磁場強度 H	A*Turns/m	Oersted	$1 \text{ A*Turns/m} = \frac{4\pi}{1000} \text{ Oersted}$
起磁力 (mmf) F	A*Turns	Gilbert	$1 \text{ A*Turns} = \frac{4\pi}{10} \text{ Gilbert}$
透磁率 (真空) μ_0	$4\pi * 10^{-7}$	1	$4\pi * 10^{-7}$

4.4.1 巻き線(Winding)

巻き線要素は電気回路と磁気等価回路とのインターフェースです。

シンボル



仕様

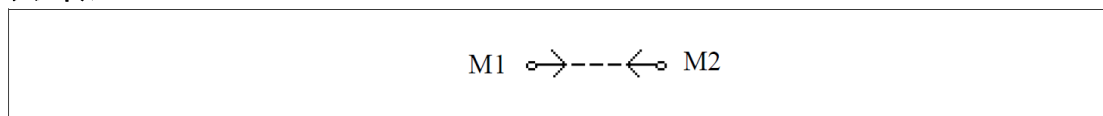
パラメータ	機能
巻線巻数	巻き線の巻数
巻き線抵抗	巻き線抵抗

この要素は磁気コアの巻き線を示す。2つの磁気ノード(E₁とE₂)は、電気回路に接続されます。2つの磁気ノード(M₁とM₂)は、他の磁気要素(例えば漏れ磁束の通路、エアギャップと磁気コア)に接続されます。

4.4.2 漏れ磁束経路(Leakage Flux Path)

この要素は漏れ磁束の経路をモデル化したものです。

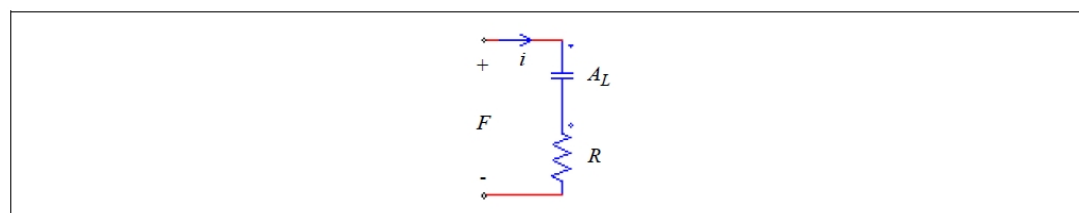
シンボル



仕様

パラメータ	機能
インダクタンスファクタ	コアのインダクタンスファクタ A_L (単位 H)
抵抗損失	抵抗 $R(\Omega)$ は漏れ磁束による損失
電流フラグ	抵抗に流れる電流出力フラグ (1: 出力あり、0: 出力なし)

抵抗 R は漏れ磁束による損失を表します。漏れ磁束経路に印加された起磁力が F であると仮定すると、漏れ磁束経路の電気等価回路は以下のように表せます。



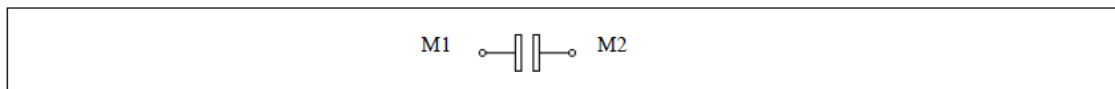
起磁力は、電圧源の形でコンデンサ(静電容量は A_L)と抵抗 R の間に印加されます。このブランチを通じて流れる電流を i とし、そのrms値を I_{rms} とすると、漏れ磁束の損失と抵抗 R の関係は次のようになります。

$$P_{loss} = I_{rms}^2 \cdot R$$

4.4.3 エアギャップ(Air Gap)

エアギャップ要素のシンボルと仕様は以下の通りです。

シンボル



エアギャップの入力パラメータは、2つの方法で定義できます。1つはエアギャップ長と断面積を定義することであり、もう1つはインダクタンス係数 A_L を定義することです。それらは次のとおりです。

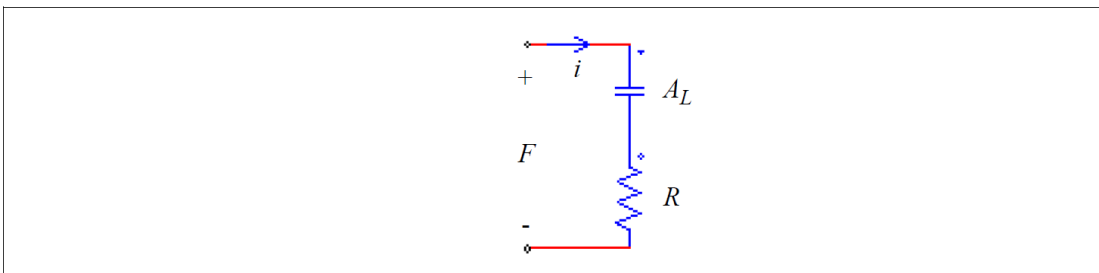
仕様 (Air Gap)

パラメータ	機能
エアギャップ長	エアギャップの長さ、 l_g (m)
断面積	エアギャップの断面積、 A_c (m^2)
抵抗損失	抵抗 $R(\Omega)$ はエアギャップフリンジ効果による損失を表します
電流フラグ	抵抗に流れる電流出力フラグ (1: 出力あり、0: 出力なし)

仕様 (Air Gap(A_L))

パラメータ	機能
インダクタンスファクタ A_L	コアのインダクタンスファクタ A_L (単位H)
抵抗損失	抵抗 $R(\Omega)$ はエアギャップフリンジ効果による損失を表します
電流フラグ	抵抗に流れる電流出力フラグ (1: 出力あり、0: 出力なし)

抵抗 R はエアギャップフリンジ効果による損失を表します。漏れ磁束経路に加えられた起磁力が F であると仮定すると、エアギャップの電気等価回路は以下の通りです。



起磁力は、電圧源の形でコンデンサ(静電容量は A_L)と抵抗 R の間に加えられます。インダクタンスファクタは次のように定義されます。

$$A_L = \frac{\mu_0 \cdot A_c}{l_g}$$

ここで、 $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ とします。

低抗における損失はフリンジ効果による損失を表す。この損失は次の通りです。

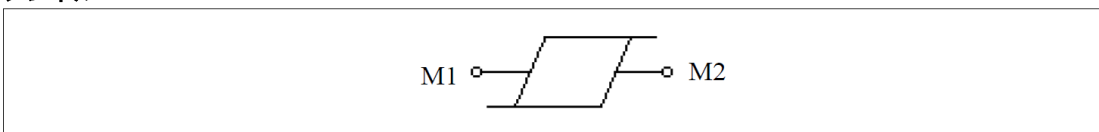
$$P_{loss} = I_{rms}^2 \cdot R$$

ここで、 I_{rms} は抵抗 R を通じて流れる電流 i の実効値を表します。

4.4.4 線形コア(Linear Core)

この要素は線形無損失コアを表します。

シンボル



仕様

パラメータ	機能
インダクタンス ファクタ A_L	コアのインダクタンスファクタ A_L (単位 H)

コアの長を L 、断面積を A_c とするならばインダクタンス要因 A_L は次のように表現します。

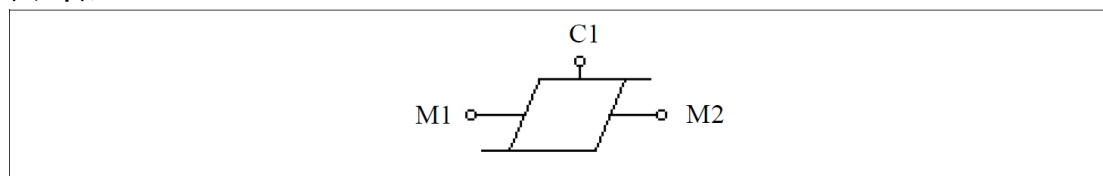
$$A_L = \frac{\mu_o \cdot \mu_r \cdot A_c}{L}$$

ここで、 μ_r はコア材料の比透磁率を示します。

4.4.5 可飽和コア (Saturable Core)

この要素は飽和およびヒステリシスを用いる磁気コアをモデル化したものです。

シンボル



仕様

パラメータ	機能
インダクタンス ファクタ A_L	コアのインダクタンスファクタ (A_L)
抵抗損失	コアによる損失を表す抵抗 $R(\Omega)$
係数 Φ_{sat}	コア B-H カーブの係数 Φ_{sat} (Weber)
係数 K_1	コア B-H カーブの係数 K_1
係数 K_{exp1}	コア B-H カーブの係数 K_{exp1}
係数 K_2	コア B-H カーブの係数 K_2
係数 K_{exp2}	コア B-H カーブの係数 K_{exp2}
初期磁束 Φ_0	コアの初期磁束 Φ_0 (Weber)
電流フラグ	抵抗 R に流れる電流出力フラグ (1: 出力あり, 0: 出力なし) SIMVIEW での表示や演算に使用可能。

シンボル中のノード M_1 と M_2 は他の磁気要素(巻線、漏れ磁束経路、エアギャップ等)に接続するノードです。またノード C_1 はコアの磁束を示す出力ノードです。このノードに電圧プローブを接続することによって、コアの磁束を表示することが出来ます。ノード C_1 は制御回路ノードを示します。

係数の K_1 、 K_{exp1} 、 K_2 、および K_{exp2} は、実際の磁性材料の B-H カーブに合わせるために使用されます。係数 K_1 は、コア材料によって値が異なりますが通常 0.7~1 の値をとります。

係数 K_{exp1} は主にコアの飽和率に影響を与え、10 ~ 200 の範囲(低透過性フェライトの場合 10、metglas の場合 200)になります。

係数 K_2 と K_{exp2} は非常にまれな時(例えば、鉄共振の調節装置)に使用されます。 K_2 、 K_{exp2} は B-H カーブに影響を与えないように以下の通りに設定されます。

$$K_2 > 2$$

$$K_{exp2} > 20$$

コア係数を決定するためのチュートリアルが PSIM インストールフォルダの"tutorials"フォルダにあります。また、コアの B-H カーブをプロットするためのプログラム(Utilities->B-H Curve)が用意されています。

4.5 その他素子 (Other Elements)

4.5.1 オペアンプ(Operational Amplifier)

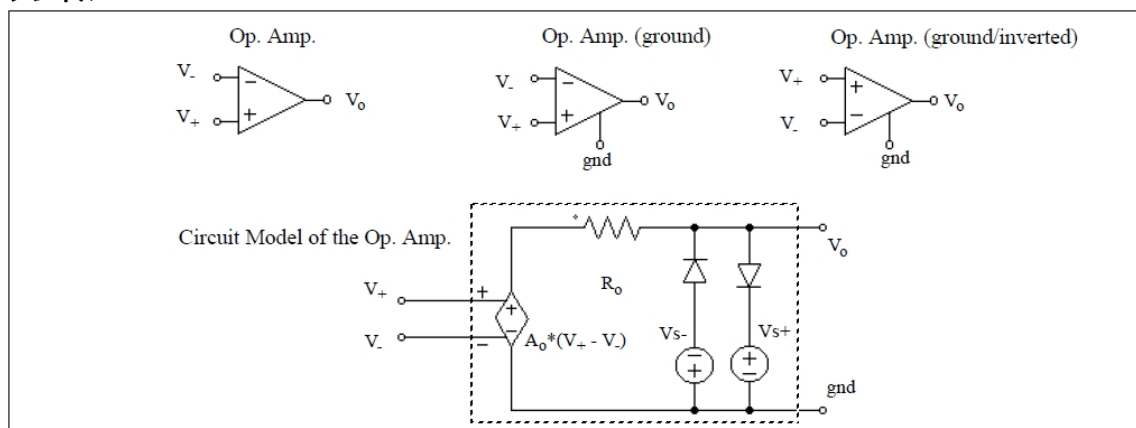
2 種類のオペアンプモデル(理想オペアンプ、非線形オペアンプ)が提供されています。

理想オペアンプは負帰還での動作のみ対応しており、正帰還は対応していません。非線形オペアンプにはこの制限はありません。

4.5.1.1 理想オペアンプ(Ideal Operational Amplifier)

PSIM では *Op.Amp*、*Op.Amp(ground)*、*Op.Amp(ground/inverted)* の 3 種類の理想演算増幅器(オペアンプ)があります。理想オペアンプは以下の図に示すパワー回路素子を使ってモデリングされています。

シンボル



ここで、

- V_+ ; V_- 非反転および反転入力電圧
- V_o 出力電圧
- A オペアンプのゲイン(プログラム上は $A=100,000$)
- R_o 出力抵抗値(プログラム上は $R_o=80\Omega$)

仕様

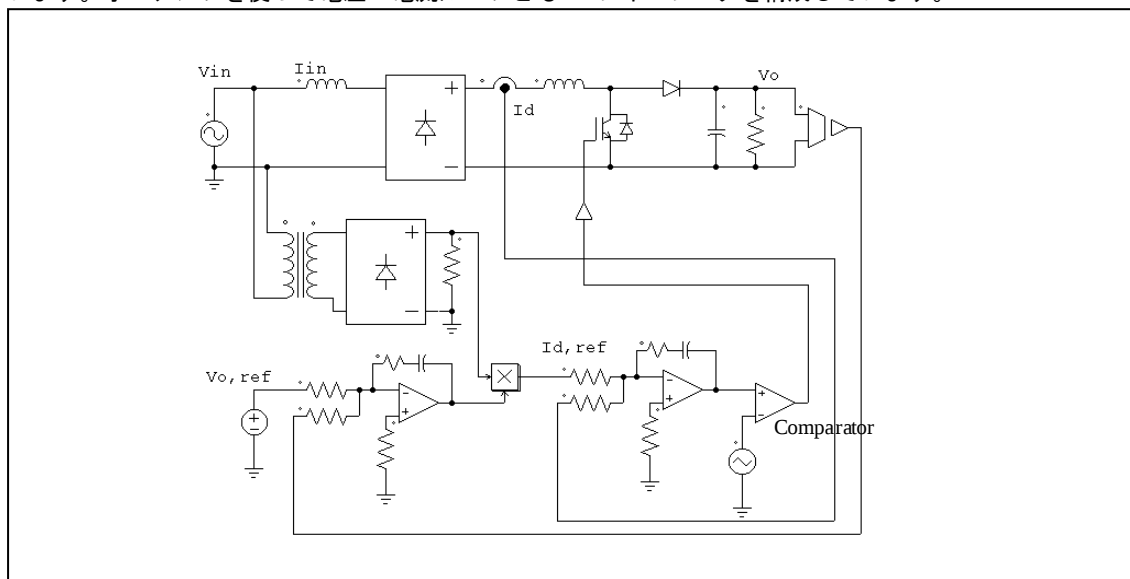
パラメータ	機 能
電圧 V_{s+}	オペアンプの上限値電源電圧
電圧 V_{s-}	オペアンプの下限値電源電圧

Op.Amp、*Op.Amp(ground)*、*Op.Amp(ground/inverted)*の違いは GND です。*Op.Amp* では基準接地ノードがパワー回路の GND に接続されているのに対して、*Op.Amp(ground)*と *Op.Amp(ground/inverted)* の GND 端子は独立に接続可能で、浮かしておくことも可能です。

注) : オペアンプのシンボルは比較器に似ているので注意してください。オペアンプでは、反転入力が入上にあり、非反転入力は左下です。比較器ではこれが逆になります。

例：力率改善ブースト回路

以下の回路は力率改善ブースト回路の例です。電流ループが内ループ、電圧ループが外ループを形成しています。オペアンプを使って電圧・電流ループとも PI レギュレータを構成しています。

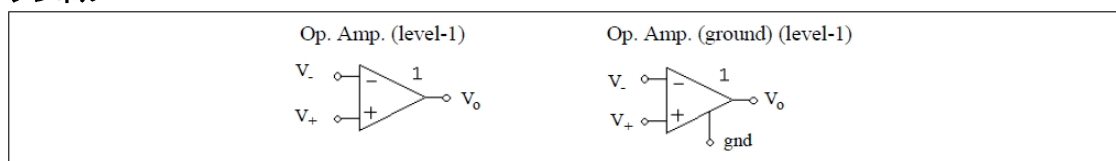


4.5.1.2 非線形オペアンプ(Non-Ideal Operational Amplifier)

理想オペアンプモデルに対し、このオペアンプモデルはバンド幅制限と出力電流制限を定義することができます。

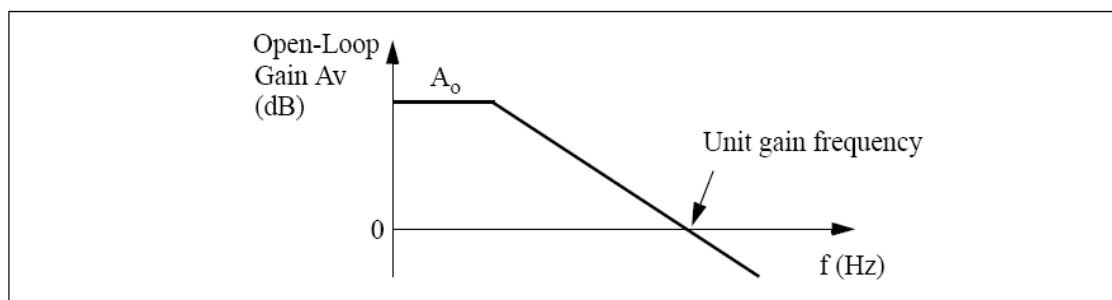
PSIM は *Op.Amp.(level-1)* と *Op.Amp.(ground)(level-1)* の 2 つオペアンプモデルを提供しています。*Op.Amp.(level-1)* と *Op.Amp.(ground)(level-1)* の違いは GND です。*Op.Amp.(level-1)* では基準接地ノードがパワー回路の GND に接続されているのに対して、*Op.Amp.(ground)(level-1)* の GND 端子は独立に接続可能で、浮かしておくことも可能です。

非線形オペアンプのシンボルには、右上部に 1 の表記があります。

シンボル**仕様**

パラメータ	機 能
入力抵抗 R_{in}	オペアンプの入力抵抗 (Ω)
直流ゲイン A_o	オペアンプの直流ゲイン
単位ゲイン周波数	オペアンプのゲインが 1 である周波数(Hz)
出力抵抗 R_o	オペアンプの出力抵抗 (Ω)
最大出力電流	オペアンプの最大出力電流(A)
電圧 V_{S+}	オペアンプの上限値電源電圧
電圧 V_{S-}	オペアンプの下限値電源電圧

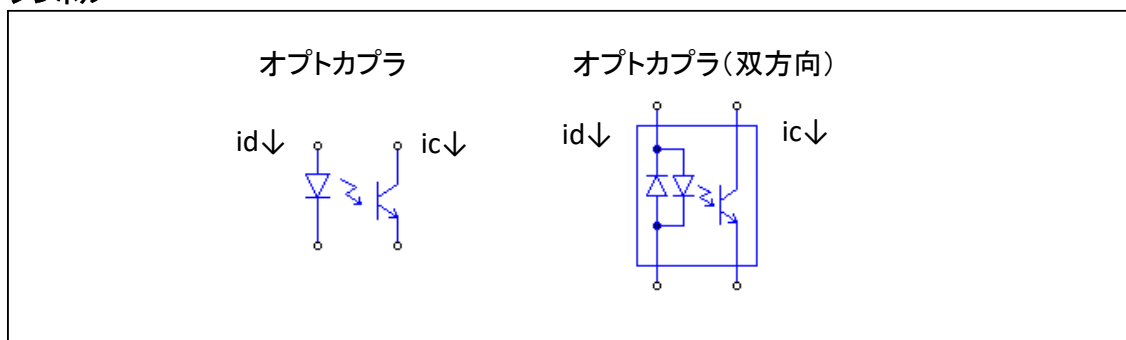
オペアンプのオープンループゲイン特性を次に示します。



4.5.2 オプトカプラ(Opto-Coupler)

オプトカプラには、2 つのモデルがあります。オプトカプラとオプトカプラ(双方向)です。オプトカプラ (Optocoupler)のシンボルおよびパラメータは次の通りです。

シンボル



仕様

パラメータ	機 能
電流伝達率(Current Transfer Ratio)	トランジスタ電流 i_c とダイオード電流 i_d 間の電流伝達率。 $CTR=i_c/i_d$
ダイオード抵抗	ダイオード抵抗 $R_d(\Omega)$ ※必ず 0 より大きい値に設定して下さい。
ダイオード閾値電圧	ダイオード順方向閾値電圧 $V_{d_th}(V)$
飽和電圧 Vce_sat	トランジスタ飽和電圧 $V_{ce_sat}(V)$
キャパシタンス Cp	トランジスタのコレクタ・エミッタ間のキャパシタンス $C_p(F)$

これらのパラメータは各メーカーのデータシートから直接得たり、データシートの情報から計算したりすることで得られます。Motorola 社のフォトカプラ 4N25 を例に挙げます。データシートより、電流伝達率およびトランジスタ飽和電圧は

$$CTR = 70\% = 0.7; V_{ce_sat} = 0.15 \text{ V}$$

データシートの"LED 順方向電圧 vs 順方向電流"の特性から、ユーザはダイオード抵抗 R_d と閾値電圧 V_{d_th} を計算することが可能です。ダイオード順方向電圧は、以下の比例直線に近似することが可能です。

$$v_d = V_{d_th} + R_d * i_d$$

$T_A=25^\circ\text{C}$ の時、この曲線から $i_d=10\text{mA}$ 、 $v_d=1.15\text{V}$; $i_d=40\text{mA}$ 、 $v_d=1.3\text{V}$ の 2 つが読み取れます。これらの 2 つの点に基づき、 R_d と V_{d_th} の値は次のように計算されます。

$$R_d = 5\Omega, V_{d_th} = 1.1\text{V}$$

このフォトカプラモデルは遅れを考慮していませんが、キャパシタ C_p を通ってトランジスタのコレクタ・エミッタ間のターンオン/ターンオフ過渡電流をモデリングしています。このキャパシタンスは立下り時間 t_{fall} とスイッチング時間試験条件より、以下のように求められます。

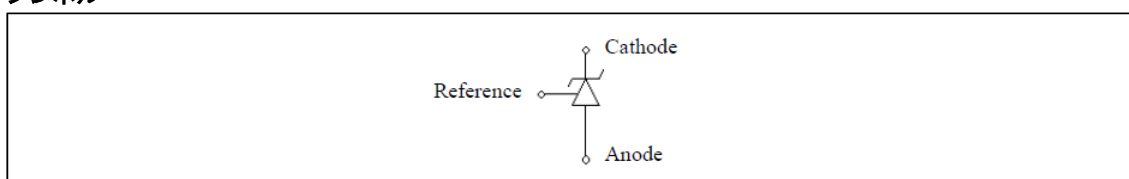
$$C_p = \frac{t_{fall}}{2.2 \cdot R_L}$$

ここで R_L はスイッチング時間試験回路中の抵抗負荷です。4N25 では、データシートより $t_{fall}=1.3\mu\text{s}$ 、 $R_L=100\Omega$ となり、これよりキャパシタンスは $C_p=6\text{nF}$ と求められます。

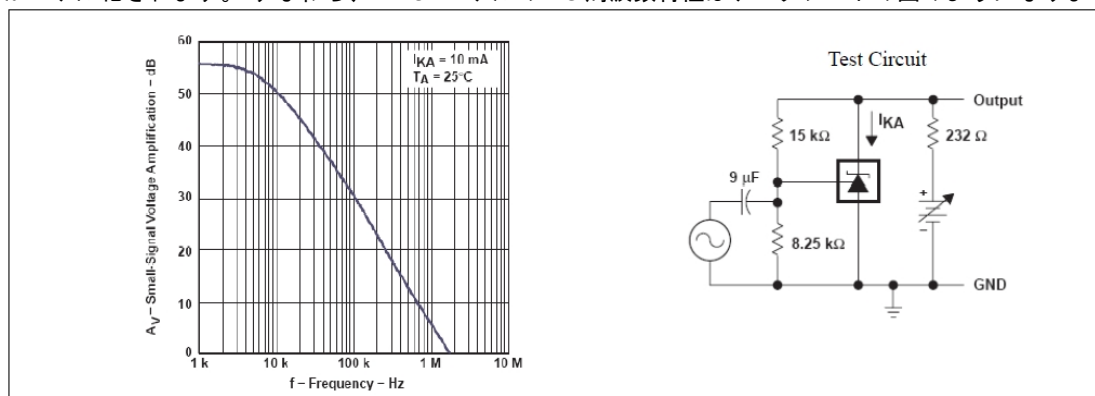
4.5.3 TL431 シャントレギュレータ (TL431 Shunt Regulator)

TL431 シャントレギュレータ (TL431 shunt regulator) のシンボルは、以下の通りです。

シンボル



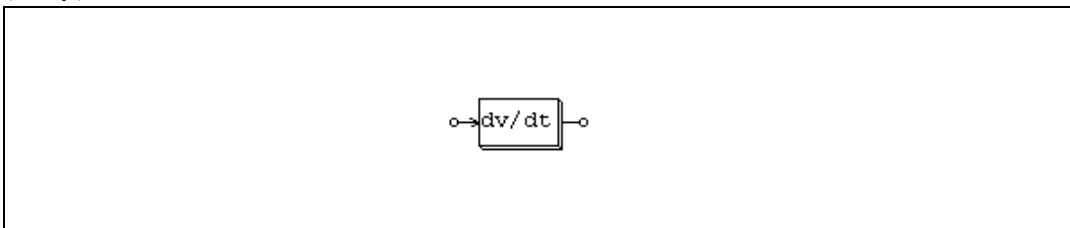
TL431 レギュレータは基準ノードの電圧を約 2.495V に保ちます。このモデルでは、TL431 の有限帯域幅がモデル化されます。すなわち、TL431 モデルの AC 周波数特性はデータシートの図のようになります。



4.5.4 dv/dt ブロック (dv/dt Block)

dv/dt ブロックは制御回路の微分器と同等の機能を提供しますが、パワー回路用です。

シンボル



dv/dt ブロックの出力は入力電圧の時間に関する微分と同じです。

次のように計算しています。

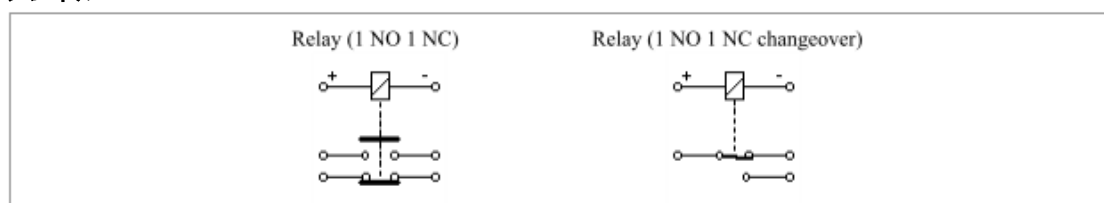
$$v_o(t) = \frac{v_{in}(t) - v_{in}(t - \Delta t)}{\Delta t}$$

ここで、 Δt はシミュレーションタイムステップ、 $v_{in}(t)$ と $v_{in}(t - \Delta t)$ はそれぞれ現在時刻の入力と 1 ステップ前の入力です。

4.5.5 リレー(Relays)

ノーマルオープン(NO)スイッチとノーマルクローズ(NC)スイッチと 2 つのリレーブロックが用意されています。

シンボル



仕様

パラメータ	機能
コイル定格電圧	リレーコイルの定格電圧(V)
コイル抵抗	コイルの抵抗(Ω)
動作電圧	いずれかのリレーが動作する電圧(V)
リリース電圧	いずれかのリレーが初期位置に戻る電圧(V)
動作時間	動作電圧に到達してからスイッチが動作するまでの時間(s)
リリース時間	解除電圧に到達してからスイッチが解除されて初期位置に戻るまでの時間(s)

リレーは 1 つのノーマルオープンスイッチおよび 1 つのノーマルクローズスイッチを備えています。画像に示すような極性で直流電圧がリレーコイルに印加された時、電圧が[動作電圧]に達すると、[動作時間]によって定義された時間遅延後に、NO スwitch は閉じ、NC スwitch は開きます。

コイル電圧が[リリース電圧]に下がると、[リリース時間]で定義された時間遅延後に、2 つのスイッチは初期位置に戻ります。

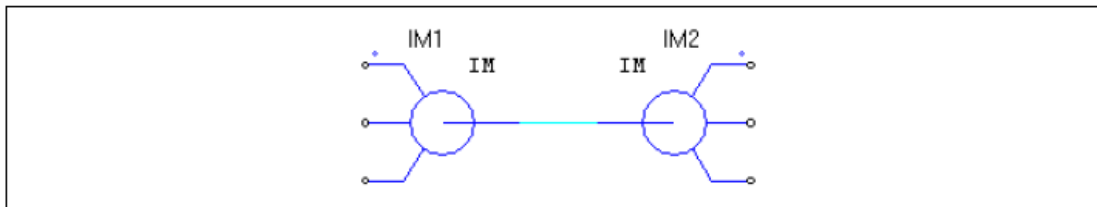
4.6 モータ駆動モジュール(Motor Drive Module)

モータ駆動モジュール(Motor Drive Module)は PSIM のアドオン・オプションで、モータモデルと機械負荷のモデルを提供します。

本章では、モータ駆動モジュールは電気機器として説明します。機械要素および速度・トルク・位置センサは 4.9 章にて説明します。

4.6.1 機械システムでの「基準方向」(Reference Direction of Mechanical Systems)

モータ駆動システムでは、機械系の方程式の作成のために位置に関する基準表記が必要となります。下記に例を示します。



上記システムは2つの誘導機、すなわち結合された IM1 と IM2 から構成されます。一方がモータもう一方が発電機として動作します。IM1 から見た機械方程式は下記の通り記述されます。

$$(J_1 + J_2) \cdot \frac{d\omega_m}{dt} = T_{em1} - T_{em2}$$

上記の J_1 と J_2 はイナーシャのモーメント、 T_{em1} と T_{em2} はそれぞれ IM1 と IM2 で生成されるトルクを表します。

IM2 から見ると、機械方程式は下記の通り記述されます。

$$(J_1 + J_2) \cdot \frac{d\omega_m}{dt} = T_{em2} - T_{em1}$$

これらの二つの方程式は双方とも有効であるが、それぞれ相反する機械スピードが生成されます。

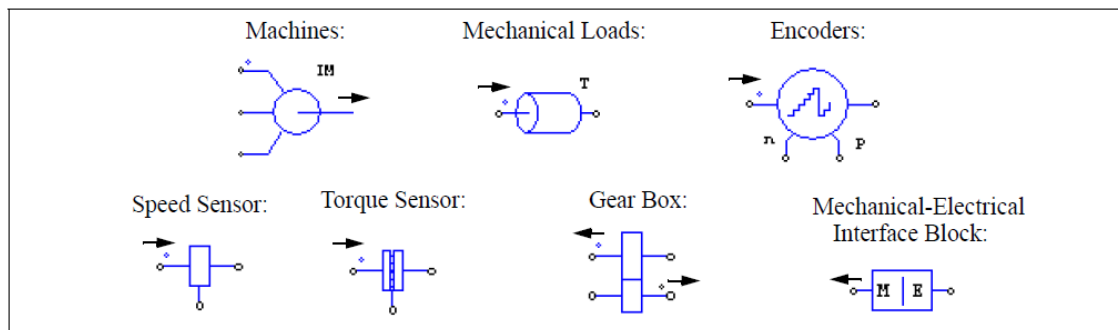
この不確実性を排除するために、PSIM では基準方向(reference direction)というコンセプトにより、機械系において機械方程式が一意に定義されます。

機械系では、一つの素子がマスタユニット(この要素はマスタモード動作となります)として定義され、他の素子はスレーブモードとなります。マスタとして使用できる素子は電気機器、機械・電気インターフェースブロック、ギアボックスです。

マスタユニットが機械系の基準方向を定義します。マスタユニットのシャフトノードから、他の機械系素子への方向が基準方向となります。

機械系の基準方向が定義されると、その機械系の速度とトルクが決定されます。例えば、右手の親指方向を機械系の方向とすると、丸めた他の指の方向がスピードとトルクの正方向となります。

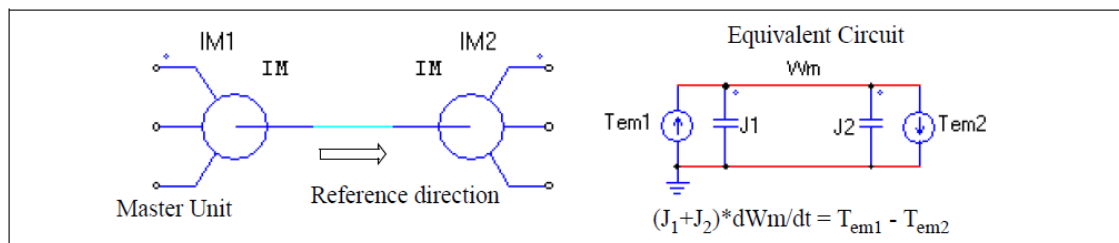
さらに、各機械素子はそれぞれの基準方向が定義されています。下図にて、各機械素子の基準方向を例示します。



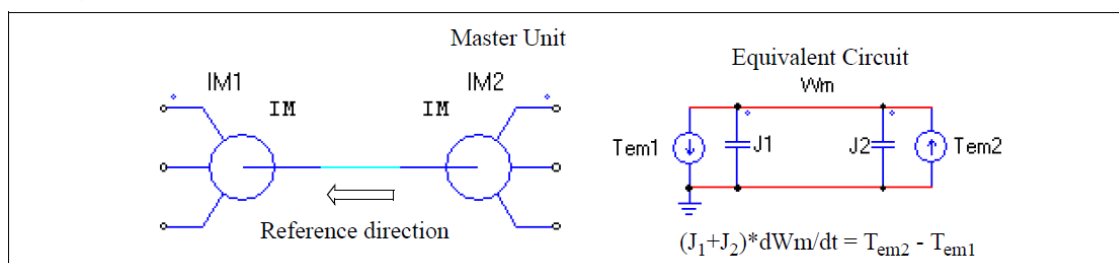
各素子および機械系全体の基準方向(reference direction)に基づいて、各素子の機械系への影響が定まります。

例えば、ある素子の基準方向が、系の基準方向と一致する場合には、生成されるトルクは正方向のシャフト回転に寄与することになります。一方、素子の基準方向が系の基準方向と相反する場合には、負方向への回転に寄与することとなります。

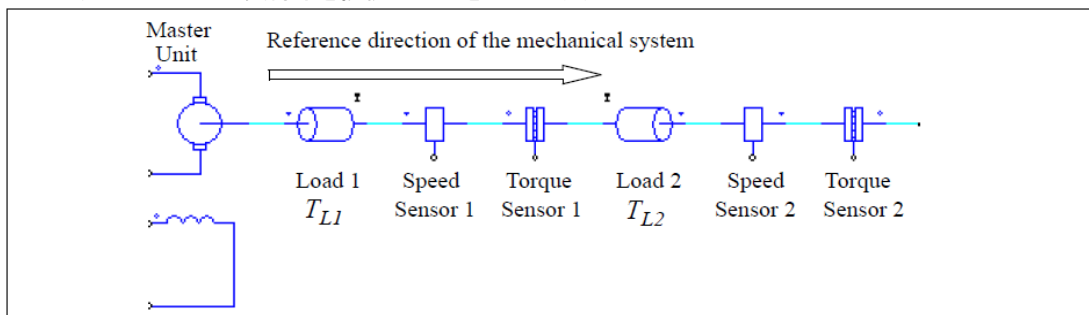
前述の 2 つの機械による例では、IM1 をマスタと定義するならば下図の例の通り、左から右へ基準方向を規定できます。この基準方向に基づくと、IM1 は基準方向と順方向、一方 IM2 は逆方向の接続となります。この関係は、下図右側に示す等価回路にて表現できます。



同様に、下図のように IM2 をマスタと定義し、基準方向を右から左とすることもできます。この場合には IM1 が基準方向と逆方向の接続となり、IM2 が順方向の接続となります。下図右側に同様に等価回路を示します。



以下に、センサおよび負荷等を接続した例を示します。



この機械系では、左側のモータがマスタで右側がスレーブです。そのため、機械系の基準方向は機械シャフトに沿って左側から右側に定義されます。さらに、基準方向が素子のドットで表した側に入ると、その素子は基準方向に沿っていると言えます。そうでなければ、基準方向に対して逆ということになります。例えば、負荷 1、スピードセンサ 1、トルクセンサ 1 は基準方向に沿っています。そして負荷 2、スピードセンサ 2、トルクセンサ 2 は基準方向に対して逆となっています。

したがって、スピードセンサが機械系の基準方向に沿っていれば、マスタモータにより発生した正の速度は、正のスピードセンサ出力を与えます。そうでなければ、スピードセンサの出力は負になります。例えば、上の例のマスタモータのスピードが正の場合、スピードセンサ 1 の読値は正で、スピードセンサ 2 の読値は負です。

基準方向は機械負荷がモータとどのように反応するかも決定します。この系統では、2 つの定トルク機械負荷、大きさがそれぞれ T_{L1} 、 T_{L2} があります。負荷 1 は基準方向に沿っており、負荷 2 は基準方向と逆です。そのため、マスタモータに対する負荷 1 の負荷トルクは T_{L1} で、マスタモータに対する負荷 2 の負荷トルクは $-T_{L2}$ です。

4.6.2 誘導機(Induction Machines)

かご型誘導機と巻線型誘導機のそれぞれに線形および非線形の 2 つのモデルが備わっています。線形モデルはさらに汎用タイプと対称タイプに分かれます。

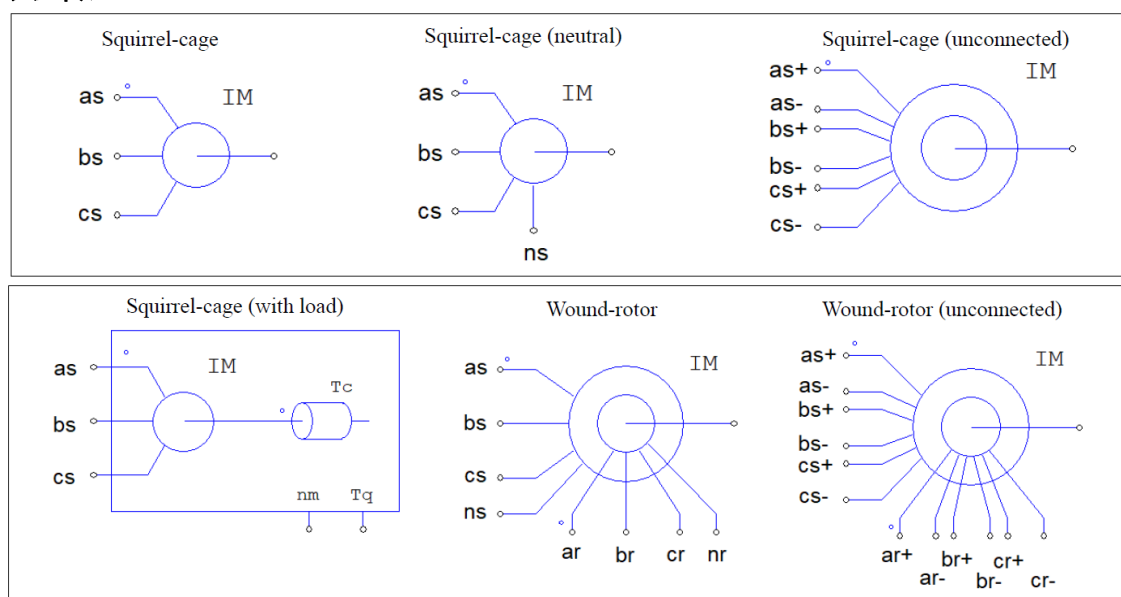
4.6.2.1 線形誘導機 (Linear Induction Machines)

この節では線形モデルのみ説明します。

線形モデルには以下のものがあります。

- 三相かご型誘導機 (Y 接続、ニュートラルなし)
- 三相かご型誘導機 (Y 接続、ニュートラルあり)
- 三相かご型誘導機 (巻線接続なし)
- 三相かご型誘導機 (高周波)
- 三相かご型誘導機 (機械負荷付き)
- 三相巻線型誘導機 (Y 接続)
- 三相巻線型誘導機 (巻線接続なし)

シンボル



かご形誘導機 (負荷付き) のブロックには、さまざまな種類の機械的負荷が含まれています。ノード *nm* は、機械的速度 (rpm) を提供する制御ノードです。ノード *Tq* は、トルクセンサ出力 (N*m) を提供する制御ノードです。トルクセンサは機械と負荷の間に配置されます。負荷パラメータの定義については、各機械負荷を参照してください。

仕様

パラメータ	機 能
R_s (固定子抵抗)	固定子巻線抵抗(Ω)
L_s (固定子 漏れインダクタンス)	固定子巻線漏れインダクタンス(H)
R_r (回転子抵抗)	回転子巻線抵抗(Ω)
L_r (回転子 漏れインダクタンス)	回転子巻線漏れインダクタンス(H)
L_m (磁化)	磁化インダクタンス(H)
N_s/N_r 巻線比	固定子と回転子の巻線比(巻線型のみ)
極数 P	モータの極数(偶数)
慣性モーメント	モータの慣性モーメント J(kg*m ²)
トルクフラグ	内部トルク T_{em} の出力フラグ。 フラグが 1 に設定されると、内部トルクの出力が要求される。
マスタ/スレーブフラグ	マスタ/スレーブモードのフラグ(1 : マスタ ; 0 : スレーブ)

追加仕様（高周波）

パラメータ	機 能
C_g (巻線—グランド間)	巻線—グランド間の分布容量を表す容量 (F)
R_g (巻線—グランド間)	モーターフレームの散逸効果を表す抵抗 (Ω)
R_e (渦電流)	磁気コアとモーターフレームの渦電流効果を表す抵抗 (Ω)
R_t (表皮効果)	高周波応答の表皮効果を表す抵抗 (Ω)
L_t (表皮効果)	高周波応答の表皮効果を表すインダクタンス (Ω)
C_t (表皮効果)	高周波応答の表皮効果を表す静電容量 (F)

すべてのパラメータは固定子側に換算した値を使用します。

マスタ/スレーブフラグは機械系の基準方向を定義するために使用します。詳細は「4.6.1 機械システムでの「基準方向」(Reference Direction of Mechanical Systems)」を参照してください。

対称三相中性点付かご型誘導機は、対称三相かご型誘導機に固定子中性点端子を追加したものです。

PSIM の三相誘導機は以下の式で表されています。

$$\begin{bmatrix} v_{abc,s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{abc,s} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s \end{bmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{abc,s} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_{sr} \end{bmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{abc,r} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} v_{abc,r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{abc,r} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_r \end{bmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{abc,r} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_{sr} \end{bmatrix}^T \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{abc,s} \end{bmatrix}$$

ここで、

$$\begin{bmatrix} v_{abc,s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{a,s} \\ v_{b,s} \\ v_{c,s} \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} v_{abc,r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{a,r} \\ v_{b,r} \\ v_{c,r} \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} i_{abc,s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{a,s} \\ i_{b,s} \\ i_{c,s} \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} i_{abc,r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{a,r} \\ i_{b,r} \\ i_{c,r} \end{bmatrix}$$

かご型機では、 $v_{a,r} = v_{b,r} = v_{c,r} = 0$ です。

ここで、パラメータ行列は次のように定義されています。

$$\begin{aligned}
 [R_s] &= \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} & [R_r] &= \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \\
 [L_s] &= \begin{bmatrix} L_s + M_{sr} & -\frac{M_{sr}}{2} & \frac{M_{sr}}{2} \\ -\frac{M_{sr}}{2} & L_s + M_{sr} & -\frac{M_{sr}}{2} \\ \frac{M_{sr}}{2} & -\frac{M_{sr}}{2} & L_s + M_{sr} \end{bmatrix} & [L_r] &= \begin{bmatrix} L_r + M_{sr} & -\frac{M_{sr}}{2} & \frac{M_{sr}}{2} \\ -\frac{M_{sr}}{2} & L_r + M_{sr} & -\frac{M_{sr}}{2} \\ \frac{M_{sr}}{2} & -\frac{M_{sr}}{2} & L_r + M_{sr} \end{bmatrix} \\
 [M_{sr}] &= M_{sr} \cdot \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos\theta & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos\theta \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

ここで、 M_{sr} は固定子と回転子巻線間の相互インダクタンスで、 θ は機械角です。相互インダクタンスは磁化インダクタンスと以下の関係があります。

$$L_m = \frac{3}{2} M_{sr}$$

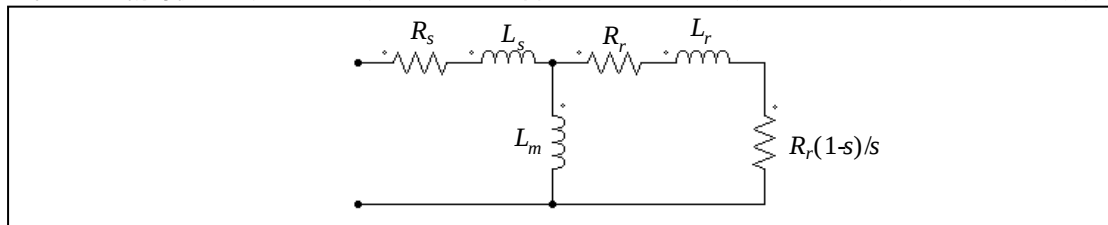
機械系方程式は以下のように表されます。

$$J \cdot \frac{d\omega_m}{dt} = T_{em} - T_L$$

ここで発生トルク T_{em} は以下のように定義されます。

$$T_{em} = P \cdot [i_{abc,s}]^T \cdot \frac{d}{d\theta} [M_{sr}] \cdot [i_{abc,r}]$$

対称かご型誘導機では、モータの定常状態での等価回路は以下のように示されます。s はすべりです。

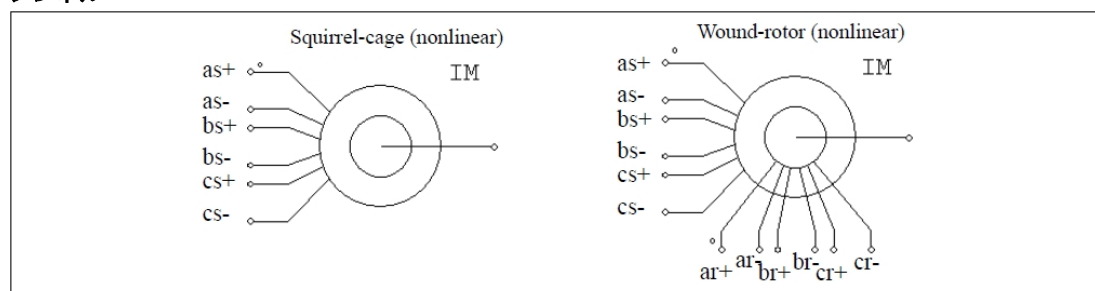


4.6.2.2 飽和付かご型誘導機 (Induction Machine with Saturation)

飽和特性付誘導機には以下の 2 種類があります。

- 非線形三相かご型誘導機 (Squirrel-cage Ind. Machine (nonlinear))
- 非線形三相巻線型誘導機 (Wound-rotor Ind. Machine (nonlinear))

シンボル



仕様

パラメータ	機能
R_s (固定子抵抗)	固定子巻線抵抗(Ω)
L_s (固定子漏れインダクタンス)	固定子巻線漏れインダクタンス(H)
R_r (回転子抵抗)	回転子巻線抵抗(Ω)
L_r (回転子漏れインダクタンス)	回転子巻線漏れインダクタンス(H)
N_s/N_r 巻線比	固定子と回転子の巻線比(巻線型のみ)
極数 P	モータの極数(偶数)
慣性モーメント	モータの慣性モーメント J(kg*m ²)
トルクフラグ	内部トルク T_{em} の出力フラグ。フラグが 1 に設定されると、内部トルクの出力が要求される。
マスタ/スレーブフラグ	マスタ/スレーブモードのフラグ(1 : マスタ ; 0 : スレーブ)
I_m VS. L_m (I_{m1}, L_{m1})...	励磁電流と励磁インダクタンスの関係を区分線形の点の組で与えます [(I_{m1}, L_{m1}), (I_{m2}, L_{m2}), ...]

全てのパラメータは固定子側に換算した値で表されています。

飽和付き三相誘導機の動特性は以下の方程式で記述されています。

$$\begin{bmatrix} v_{abc,s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{abc,s} \end{bmatrix} + L_s \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{abc,s} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \lambda_{abc,s} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} v_{abc,r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{abc,r} \end{bmatrix} + L_r \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{abc,r} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \lambda_{abc,r} \end{bmatrix}$$

ここで、

$$\begin{bmatrix} \lambda_{abc,s} \end{bmatrix} = M_{sr} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & 1 & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{abc,s} \end{bmatrix} + M_{sr} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \theta & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{abc,r} \end{bmatrix}$$

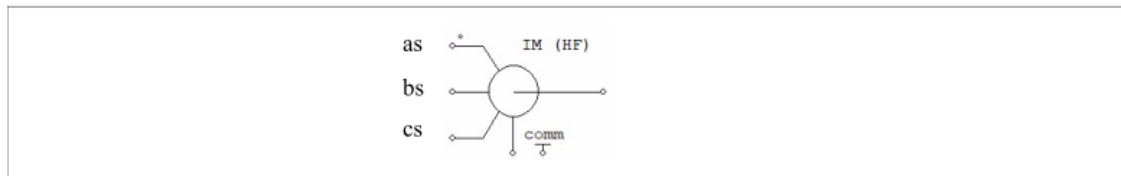
$$\begin{bmatrix} \lambda_{abc,s} \end{bmatrix} = M_{sr} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{abc,s} \end{bmatrix} + M_{sr} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & 1 & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{abc,r} \end{bmatrix}$$

この場合、インダクタンス M_{sr} は定数ではなく、励磁電流 I_m の関数になります。励磁電流 I_m とインダクタンス L_m は、一連のデータポイント、例えば、(0, 0.041) (5, 0.035) (20, 0.03)、より算出されます。複数のデータポイントの間では、インダクタンス L_m 値は線形補間されます。励磁電流が最小値より小さい、または最大値より大きい場合には、インダクタンス値は始点または終点の値に固定されます。

4.6.2.3 高周波効果を考慮した誘導機 (Induction Machine Include High Frequency Effects)

高周波効果を考慮した誘導機は次のようにモデル化されています。

シンボル



仕様

パラメータ	機 能
R_s (固定子抵抗)	固定子巻線抵抗(Ω)
L_s (固定子漏れインダクタンス)	固定子巻線漏れインダクタンス(H)
R_r (回転子抵抗)	固定子側を参照した回転子巻線抵抗(Ω)
L_r (回転子漏れインダクタンス)	固定子側を参照した回転子巻線漏れインダクタンス(H)
極数 P	モータの極数(偶数)
慣性モーメント	モータの慣性モーメント $J(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$
C_g (巻線—グランド間)	巻線—グランド間の分布容量を表す容量 (F)
R_g (巻線—グランド間)	モーターフレームの散逸効果を表す抵抗 (Ω)
R_e (渦電流)	磁気コアとモーターフレーム内の渦電流を表す抵抗(Ω)
R_t (表皮効果)	高周波応答の表皮効果を表す抵抗(Ω)
L_t (表皮効果)	高周波応答の表皮効果を表すインダクタンス(H)
C_t (表皮効果)	高周波応答の表皮効果を表す容量(F)
マスタ/スレーブフラグ	マスタ/スレーブモードのフラグ(1 : マスタ ; 0 : スレーブ)

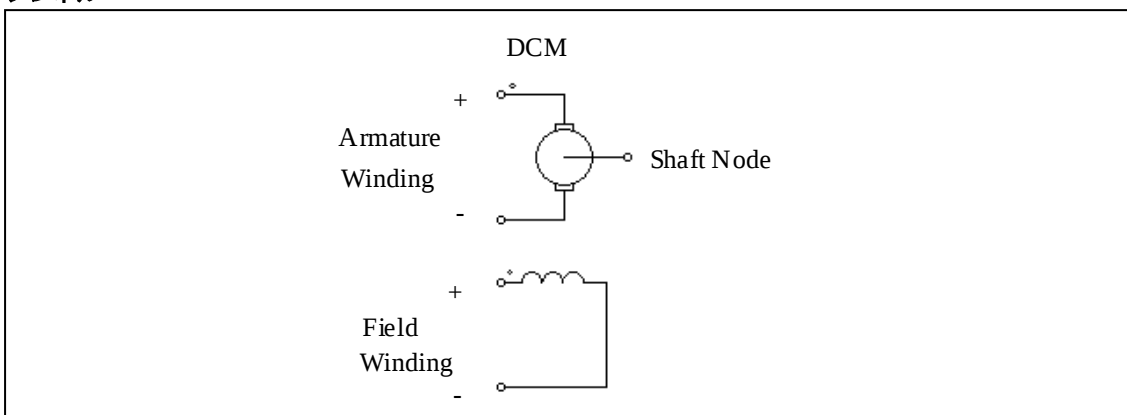
すべてのパラメータは固定子側を参照しています。

機械モデルは対照的であり、固定子巻線は Y で接続されています。低周波領域での機械動作を表す式は、線形誘導機と同じです。

4.6.3 直流機 (DC Machine)

直流機のシンボルとパラメータは以下のようになります。

シンボル



仕様

パラメータ	機 能
抵抗 R_a (電機子)	電機子巻線抵抗(Ω)
インダクタンス L_a (電機子)	電機子巻線インダクタンス(H)
抵抗 R_f (界磁)	界磁巻線抵抗(Ω)
インダクタンス L_f (界磁)	界磁巻線インダクタンス(H)
慣性モーメント	モータの慣性モーメント($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)
電圧 V_t (定格)	定格電機子電圧(V)
電流 I_a (定格)	定格電機子電流(A)
回転数 n (定格)	定格回転数(rpm)
電流 I_f (定格)	定格界磁電流(A)
トルクフラグ	内部トルク T_{em} の出力フラグ
マスタ/スレーブフラグ	マスタ/スレーブモードのフラグ(1 : マスタ, 0 : スレーブ)

トルクフラグを 1 に設定すると、モータによって発生される内部トルクが表示用のデータファイルに保存されます。

直流機の動特性は以下の方程式で記述されています。

$$v_t = E_a + i_a \cdot R_a + L_a \frac{di_a}{dt}$$

$$v_f = i_f \cdot R_f + L_f \frac{di_f}{dt}$$

$$E_a = k \cdot \phi \cdot \omega_m$$

$$T_{em} = k \cdot \phi \cdot i_a$$

$$J \cdot \frac{d\omega_m}{dt} = T_{em} - T_L$$

v_t , v_f , i_a , i_f はそれぞれ電機子電圧、界磁電圧、電機子電流、界磁電流です。 E_a は内部誘起電圧、 ω_m は機械系の回転速度(rad/sec)です。 T_{em} は内部発生トルクで T_L は負荷トルクです。内部誘起電圧と内部トルクは以下のようにも記述できます。

$$E_a = L_{af} \cdot i_f \cdot \omega_m$$

$$T_{em} = L_{af} \cdot i_f \cdot i_a$$

ここで L_{af} は電機子と界磁巻線間の相互インダクタンスです。これは定格運転条件より以下のように算出されます。

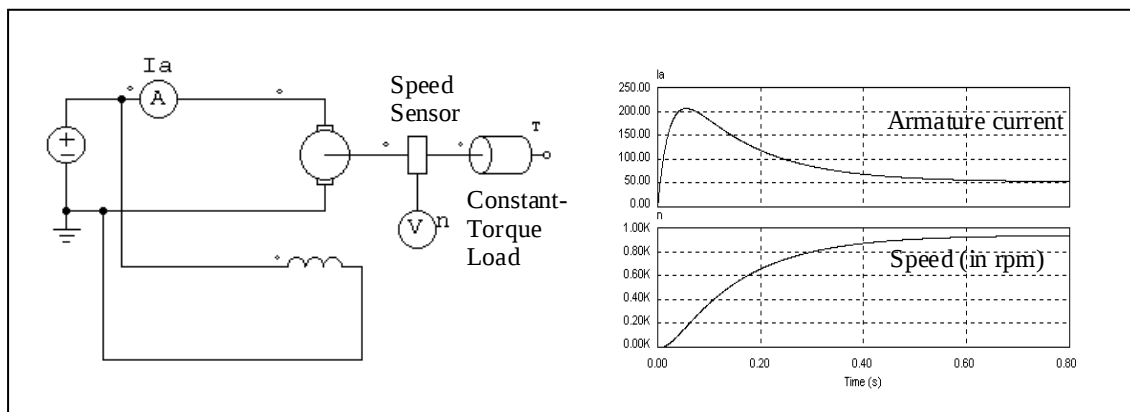
$$L_{af} = \frac{(V_t - I_a \cdot R_a)}{I_f \cdot \omega_m}$$

直流機モデルは線形磁化特性を仮定しています。磁気飽和は考慮されていません。

例：定トルク負荷と直流機

以下に定トルク負荷 T_L とシャント励磁直流機の回路を示します。負荷は機械系統の基準方向に沿っているので、負荷トルクは T_L です。またスピードセンサも基準方向に沿っています。これは正の速度に対して正の出力を与えます。

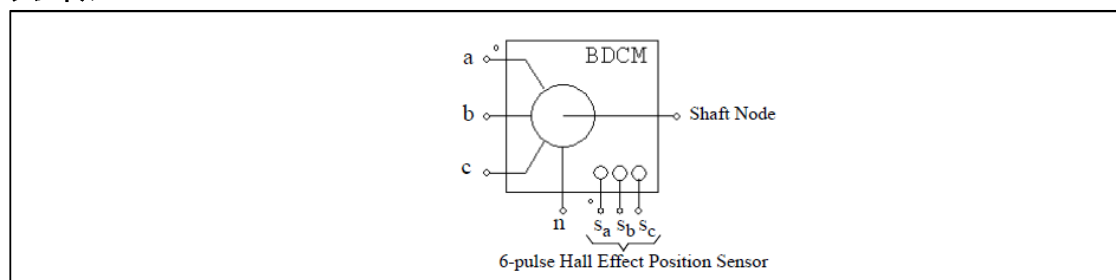
電機子電流と速度のシミュレーション波形は以下の右側に示されています。



4.6.4 ブラシレス直流機(Brushless DC Machine)

三相ブラシレス直流機は永久磁石を使った同期機的一种と考えることができます。固定子には三相巻線を、回転子には永久磁石を使っています。PSIM のブラシレス直流機のモデルでは誘導起電力が台形状の波形となります。三相ブラシレス直流機のシンボルとパラメータを以下に示します。

シンボル



仕様(モデルパラメータ関連)

パラメータ	機能
R(固定子抵抗)	固定子の相抵抗(Ω)
L(固定子自己インダクタンス)	固定子の自己インダクタンス(H)
M(固定子相互インダクタンス)	固定子の相互インダクタンス(H) 相互インダクタンス M は負の値です。巻線の構成により、相互インダクタンス M と自己インダクタンス L の比は通常 $-1/3$ から $-1/2$ の間になります。もし M が不明の場合は、 $M = -0.4 \cdot L$ としたものが無難なデフォルト値として使えます。
Vpk / krpm	線間のピーク誘起電圧定数、単位は V/krpm (機械系の回転速度)です。
Vrms / krpm	線間の実効誘起電圧定数、単位は V/krpm (機械系の回転速度)です。 Vpk/krpm と Vrms/krpm の値はモータのデータシートから得られるはずで す。これらの値が不明の場合は、ブラシレス機を 1000rpm で発電機として 運転し、線間電圧のピーク値と実効値を測ることでわかります。
極数 P	極数 P
慣性モーメント	モータの慣性モーメント J ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)
軸の時定数	軸の時定数(T_{shaft})
回転角の初期値	回転角の初期値 θ_r (電気角・度) 回転角の初期値とは時刻 $t=0$ の時の回転角です。回転角 0° の位置は、回転数 が正の値のとき、A 相の誘起電圧が(負から正へ)零点を横切るときの位置と して定義できます。
位置センサの進み角	位置センサの進み角 θ_{advance} (電気角・度) 進み角とは A 相の上側のスイッチが 120° 導通モードのとき、ターンオン角 と 30° の角度の差として定義できます。たとえば、A 相が 25° でオンになっ た場合は、進み角は 5° です($30-25=5$)。
導通パルス幅	位置センサの導通パルス幅(電気角・度) 導通パルスが正のとき、全波ブリッジ・インバータの下側スイッチがオンに なります。 120° 導通モードのときは導通パルス幅が 120° となります。
トルクフラグ	内部発生トルク T_{em} の出力フラグ(1 : 出力あり ; 0 : なし)
マスタ/スレーブフラグ	マスタ/スレーブモードのフラグ (1 : マスタ, 0 : スレーブ)

仕様(メーカのデータシート情報)

パラメータ	機能
Resistance (phase-phase)	相間(Phase-to-phase)、または線間(line-to-line) 抵抗(Ω)
Inductance (phase-phase)	相間(Phase-to-phase)、または線間(line-to-line) インダクタンス(H)
Speed Constant	スピード定数 K_v 、供給電圧とスピードの比(rpm/V)
Torque Constant	トルク定数 K_t 、供給電流とトルクの比($\text{N} \cdot \text{m/A}$)
No. of Poles P	極数 P
Moment of Inertia	モータの慣性モーメント J ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)
No Load Speed	無負荷定格電圧時スピード(rpm)
No Load Current	無負荷時電流(A)
Torque Flag	内部発生トルク T_{em} の出力フラグ(1 : 出力あり ; 0 : なし)
Master/Slave Flag	マスタ/スレーブモードのフラグ (1 : マスタ, 0 : スレーブ)

シンボルの端子は以下のとおりです。a, b, c はそれぞれ a, b, c 相の固定子巻線端子、固定子巻線は Y 結線され、n は中性点端子です。軸端子は機械軸を接続するためのもの。これらはすべてパワー端子なので、パワー回路に接続しなければなりません。

Sa, Sb, Sc はそれぞれ a, b, c 相のホール効果 6 パルス位置センサの端子、センサ出力は 3 値の転流パルス(1, 0, -1)です。センサ出力の端子はすべて制御端子なので制御回路に接続して下さい。

マスタ/スレーブフラグ(Master/Slave Flag)については、「4.6.1 機械システムでの「基準方向」(Reference Direction of Mechanical Systems)」を参照してください。

三相ブラシレス直流機の方程式は以下の通りです。

$$\begin{aligned}v_a &= R \cdot i_a + (L - M) \frac{di_a}{dt} + E_a \\v_b &= R \cdot i_b + (L - M) \frac{di_b}{dt} + E_b \\v_c &= R \cdot i_c + (L - M) \frac{di_c}{dt} + E_c\end{aligned}$$

ここで、 v_a, v_b, v_c は相電圧、 i_a, i_b, i_c は相電流、 R, L, M はそれぞれ固定子の各相抵抗、自己インダクタンス、相互インダクタンスです。また、 E_a, E_b, E_c はそれぞれ a, b, c 相の誘起電圧です。

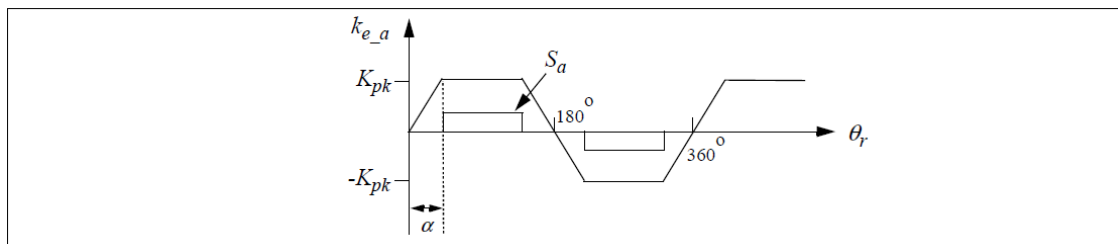
誘起電圧は回転子の機械回転速度 ω_m と回転角 θ_r の関数で次のようになります。

$$E_a = k_{e_a} \cdot \omega_m$$

$$E_b = k_{e_b} \cdot \omega_m$$

$$E_c = k_{e_c} \cdot \omega_m$$

係数 $k_{e_a}, k_{e_b}, k_{e_c}$ は回転角 θ_r によって決まります。このモデルでは下図に示す理想的な台形波形プロファイル(ideal trapezoidal waveform profile)を想定しています。同図に、A 相のホール効果センサ信号 Sa を示します。



この図で、 K_{pk} は台形のピーク値(V/(rad./sec.))で、

$$k_{pk} = \frac{v_{pk}/krpm}{2} \cdot \frac{1}{1000 \cdot 2\pi/60}$$

により定義されます。 $v_{pk}/krpm$ と $v_{rms}/krpm$ の値を与えると、角度 θ は PSIM により自動的に決まります。

モータの発生トルクは、

$$T_{em} = (E_a \cdot i_a + E_b \cdot i_b + E_c \cdot i_c) / \omega_m$$

機械系の方程式は、

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_{em} - B \cdot \omega_m - T_{load}$$

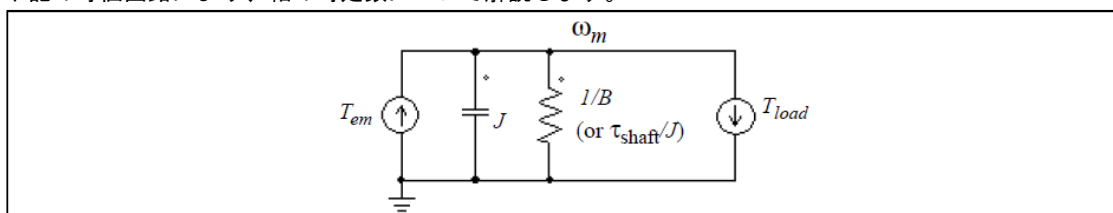
$$\frac{d\theta_r}{dt} = \frac{P}{2} \cdot \omega_m$$

ここで、Bは係数、 T_{load} は負荷トルク、およびPは極数です。この係数Bは慣性モーメントJと機械系の時定数 T_{shaft} から以下のように計算されます。

$$B = \frac{J}{T_{shaft}}$$

したがって、軸の時定数 T_{shaft} は、摩擦や機械の風損の影響をうけます。軸の時定数は0に設定されている場合、摩擦項は $B \cdot \omega_m$ は無視されます。

下記の等価回路により、軸の時定数について解説します。



この回路は、軸の時定数 T_{shaft} が抵抗 $1/B$ とキャパシタ J によるRC時定数と等しいことを示します。したがって、軸の時定数は以下の試験によって測定することが可能です。

- モータを外部の機械的動力源に接続します。固定子側をオープン回路にし、モータを一定の速度で駆動します。
- 機械的動力源を削除します。軸の時定数は、モータの初期速度を36.8%遅らせた時間と等しくなります。

ホール効果センサについての追加説明

ホール効果位置検出センサはホール・スイッチとトリガ磁石から構成されています。

ホール・スイッチは半導体スイッチ(たとえば MOSFET やBJT)で、磁界がある閾値よりも高いか低い場合に開閉します。これはホール効果の応用で、スイッチに外部から電流を流すと磁束密度に比例した電圧が誘起されます。ホール・スイッチと一体になった(もしくは近接した)信号条件回路により誘起電圧を検出するのが一般的です。この回路により、立ち上がりが鋭くノイズ耐性が高い TTL レベルのパルスが発生し、シールドケーブルにより制御回路に接続することができます。三相ブラシレス直流モータの場合、3つのホール素子を電気角で 120° ずつずらして固定子に配置します。

トリガ磁石は別の磁石でも、あるいは回転子の永久磁石も使うことができます。別置のトリガ磁石を使う場合、回転子の極から十分に離して配置する必要があります。そして、ホール素子に充分近くなるように軸に取り付けます。回転子の磁石を兼用する場合は、ホール素子を回転子の磁石に充分近く取り付けます。これは適正な回転子の位置で漏れ磁束により励起されるようにするためです。

例：メーカーのデータシートからのブラシレス DC モータパラメータ設定

モータメーカーの提供するデータシートから、ブラシレス DC モータのパラメータ設定を行う例を示します。下記に、Maxon Motor 社のブラシレス DC モータ、Maxon EC-22-16730(32V, 50W)のデータシートの値を示します。

Values at nominal voltage

Nominal voltage (V)	32
No load speed (rpm)	38700
No load current (mA)	327

Characteristics

Terminal resistance phase to phase (Ohm)	0.363
Terminal inductance phase to phase (mH)	0.049
Torque constant (mNm/A)	7.85
Speed constant (rpm/V)	1220
Rotor inertia (gcm ²)	4.2
Other specifications	
Number of pole pairs	1
Number of phases	3

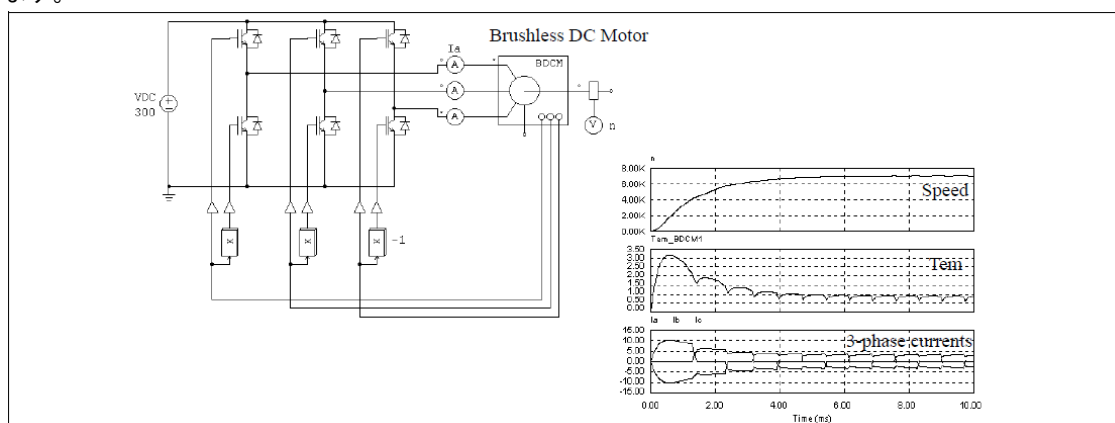
上記の数値を SI 単位系にし、PSIM のパラメータに変換すると下記のようになります。

パラメータ	値
Resistance (phase-phase)	0.363
Inductance (phase-phase)	0.049m
Speed Constant	1220
Torque Constant	7.85m
No. of Poles P	2
Moment of Inertia	4.2e-7
No Load Speed	38700
No Load Current	327m
Torque Flag	1
Master/Slave Flag	1

例：開ループ・ブラシレス直流モータの始動

以下の図に開ループのブラシレス直流モータの駆動回路を示します。モータには三相電圧型インバータにより電源を供給しています。ホール素子位置センサの出力を使って、インバータのゲート信号を調整し、結果として 6 パルス運転を実現しています。

シミュレーション波形はモータ始動時の機械系回転速度(rpm)、発生トルク T_{em} および三相入力電流を示します。



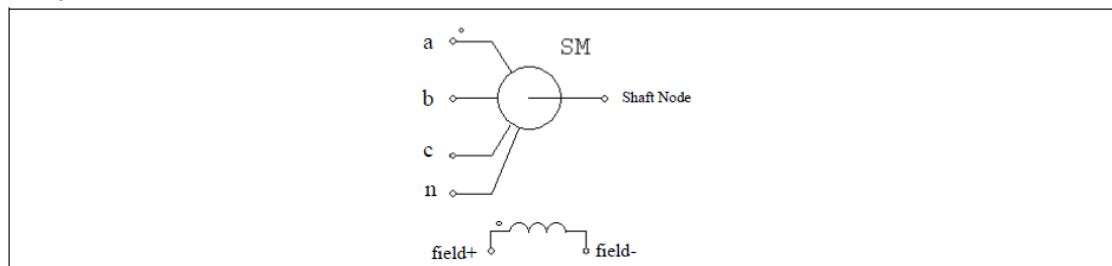
4.6.5 他励式同期機(Synchronous Machine with External Excitation)

従来型の同期機の構造は三相固定子巻線と突極または円筒型の回転子の界磁巻線、それに機種により制動巻線からなります。

同期機モデルは、固定子回路の内部モデルによって、電圧型と電流型の 2 通りのモデルが存在します。電圧型インターフェースのモデルは、固定子側に置かれた制御付き電圧源からなり、このモデルは同期機が発電機として動作している場合、および固定子外部回路が誘導性ブランチに直列接続されているときに適します。一方、電流型インターフェースは固定子側に置かれた制御付電流源により、このモデルは同期機が電動機として動作している場合、および固定子回路が容量性のブランチと並列接続されているときに効果的です。

このモデルのシンボルと仕様を以下に示します。

シンボル



仕様

パラメータ	機 能
R_s (固定子抵抗)	固定子巻線抵抗(Ω)
L_s (固定子 漏れインダクタンス)	固定子巻線漏れインダクタンス(H)
L_{dm} (d 軸磁化インダクタンス)	d 軸磁化インダクタンス(H)
L_{qm} (q 軸磁化インダクタンス)	q 軸磁化インダクタンス(H)
R_f (界磁)	界磁巻線抵抗(Ω)
L_{fl} (界磁)	界磁巻線漏れインダクタンス(H)
R_{dr} (制動巻線)	制動巻線 d 軸抵抗(Ω)
L_{drl} (制動巻線)	制動巻線 d 軸漏れインダクタンス(H)
R_{qr} (制動巻線)	制動巻線 q 軸抵抗(Ω)
L_{qrl} (制動巻線)	制動巻線 q 軸漏れインダクタンス(H)
N_s/N_f (実効巻線比)	固定子と界磁回路の実効巻線比
極数 P	モータの極数(偶数)
慣性モーメント	モータの慣性モーメント J(kg*m ²)
トルクフラグ	内部トルク T_{em} の出力フラグ。フラグが 1 に設定されると、内部トルクの出力が要求される。
マスタ/スレーブフラグ	マスタ/スレーブモードのフラグ(1 : マスタ ; 0 : スレーブ)

全てのパラメータは固定子側に参照した値で表されています。

マスター/スレーブフラグの定義と使用方法の詳細については、4.6.1 を参照してください。

三相同期機の動特性は以下の方程式で記述されています。

$$[V] = [R] \cdot [I] + \frac{d}{dt} [\lambda]$$

ここで、

$$[V] = \begin{bmatrix} v_a & v_b & v_c & v_f & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \quad [I] = \begin{bmatrix} i_a & i_b & i_c & i_f & i_{dr} & i_{qr} \end{bmatrix}^T$$

$$[R] = \text{diag} \begin{bmatrix} R_s & R_s & R_s & R_f^r & R_{dr}^r & R_{qr}^r \end{bmatrix} \quad [\lambda] = \begin{bmatrix} \lambda_a & \lambda_b & \lambda_c & \lambda_f & \lambda_{dr} & \lambda_{qr} \end{bmatrix}^T$$

式中、 $R_f^r, R_{dr}^r, R_{qr}^r$ は界磁巻線と減衰巻線の抵抗値を実数で表したものです。

ここで $[\lambda] = [L] * [I]$ です。

インダクタンス行列は以下のように定義しています。

$$[L] = \begin{bmatrix} [L_{11}] & [L_{12}] \\ [L_{12}]^T & [L_{22}] \end{bmatrix}$$

$$[L_{11}] = \begin{bmatrix} L_s + L_o + L_2 \cos(2\theta_r) & -\frac{L_o}{2} + L_2 \cos\left(2\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & -\frac{L_o}{2} + L_2 \cos\left(2\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\frac{L_o}{2} + L_2 \cos\left(2\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & L_s + L_o + L_2 \cos\left(2\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & -\frac{L_o}{2} + L_2 \cos(2\theta_r) \\ -\frac{L_o}{2} + L_2 \cos\left(2\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & -\frac{L_o}{2} + L_2 \cos(2\theta_r) & L_s + L_o + L_2 \cos\left(2\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix}$$

$$[L_{12}] = \begin{bmatrix} L_{sf} \cos(\theta_r) & L_{sd} \cos(\theta_r) & -L_{sq} \sin(\theta_r) \\ L_{sf} \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & L_{sd} \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & -L_{sq} \sin\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \\ L_{sf} \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & L_{sd} \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & -L_{sq} \sin\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix}$$

$$[L_{22}] = \begin{bmatrix} L_f & L_{fd} & 0 \\ L_{fd} & L_d & 0 \\ 0 & 0 & L_{qr} \end{bmatrix}$$

ここで、 θ_r は回転子角度、 L_{fd} は界磁巻線と d 軸制動巻線間のインダクタンスです。

また、発生トルクは以下の通りです。

$$T = \frac{P}{2} \cdot [I] \cdot \frac{d}{d\theta_r} [L] \cdot [I]$$

機械系の方程式は以下のように表されます。

$$J \cdot \frac{d\omega_m}{dt} = T_{em} - T_{load}$$

$$\frac{d\theta_r}{dt} = \frac{P}{2} \cdot \omega_m$$

入力パラメータと方程式のパラメータの関係は、以下のように示されます。

$$L_{dm} = 1.5 \cdot (L_o + L_2)$$

$$L_{qm} = 1.5 \cdot (L_o - L_2)$$

$$L_{fl} = L_f - L_{dm}$$

$$L_{qrl} = L_{qr} - L_{qm}$$

$$L_{drl} = L_{dr} - L_{dm}$$

4.6.6 永久磁石同期機 (Permanent Magnet Synchronous Machine (PMSM))

ブラシレス直流機と違い、永久磁石同期機は誘起電圧が正弦波です。

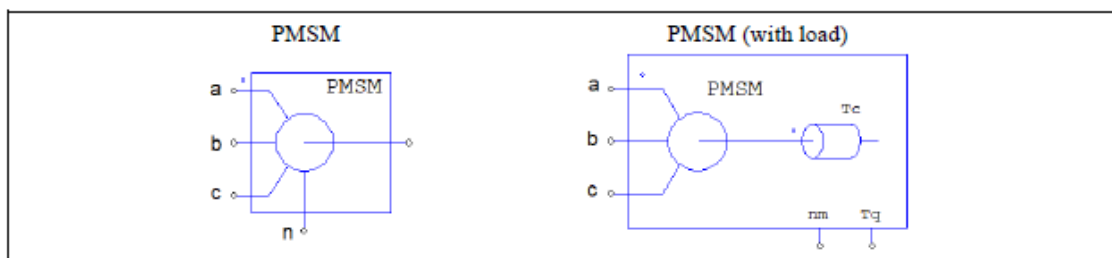
永久磁石同期機のシンボルとパラメータを以下に示します。

- ・ PMSM : 永久磁石同期機 (電流型インターフェース)
- ・ PMSM(V) : 永久磁石同期機 (電圧型インターフェース)
- ・ PMSM(with load) : 定トルク負荷の永久磁石同期機
- ・ PMSM(high frequency) : 高周波の永久磁石同期機
- ・ PMSM(high frequency)(V) : 高周波の永久磁石同期機(電圧タイプのインターフェース)
- ・ PMSM(nonlinear) : 可飽和永久磁石同期機
- ・ PMSM(special harmonics) : 空間高調波による永久磁石同期機
- ・ 6-phase PMSM : 六相永久磁石同期機

4.6.6.1 永久磁石同期機 (線形) (PMSM Linear)

負荷ありと負荷なしの三相永久磁石同期機モデルを以下に示します。

シンボル



PMSM (負荷あり) には、さまざまなタイプの負荷を選択することができます。ノード **nm** は、機械的速度 (rpm) を提供する制御ノードです。ノード **Tq** は、トルクセンサ出力 (N*m) を提供する制御ノードです。トルクセンサは機械と負荷の間に配置されています。負荷パラメータの定義については、各負荷の help を参照してください。

仕様

パラメータ	機能
R_s (固定子抵抗)	固定子の巻線抵抗(Ω)
L_d (d 軸インダクタンス)	固定子の d 軸インダクタンス(H)
L_q (q 軸インダクタンス)	固定子の q 軸インダクタンス(H) d 軸は磁石の中心を通り、q 軸はふたつの磁石の間を通ります。q 軸は d 軸に比べて進んでいます。
V_{pk} / krpm	線間のピーク誘起電圧定数、単位は V/krpm (機械系の回転速度)です。 V_{pk}/krpm の値はモータのデータシートから得られるはずですが、これらの値が不明の場合は、同期機を 1000rpm で発電機として運転し、線間電圧のピーク値を測ることでわかります。
極数 P	極数 P
慣性モーメント	モータの慣性モーメント J ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)
軸の時定数	軸の時定数(T_{shaft})
ローター角の初期値	初期ローター角 ($^\circ$)
トルクフラグ	内部発生トルク T_{em} の出力フラグ
マスタ/スレーブフラグ	マスタ/スレーブモードのフラグ (1 : マスタ, 0 : スレーブ)。マスタ/スレーブのフラグの設定により、モータの動作モードが変わります。詳しくは 4.6.1 を参照ください。

三相 PMSM では、シンボルの端子は以下のとおりです。a, b, c はそれぞれ a, b, c 相の固定子巻線端子、固定子巻線は Y 結線され、n は中性点端子です。軸端子は機械軸を接続するためのもの。これらはすべてパワー端子なので、パワー回路に接続しなければなりません。

マスタ/スレーブフラグの定義と使用についての詳細は、「4.6.1 機械システムでの「基準方向」(Reference Direction of Mechanical Systems)」を参照してください。

永久磁石同期機の方程式は以下で表されます。

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \lambda_a \\ \lambda_b \\ \lambda_c \end{bmatrix}$$

ここで、 v_a , v_b , v_c は相電圧、 i_a , i_b , i_c は相電流、 R_s は固定子の各相抵抗です。また、 λ_a , λ_b , λ_c はそれぞれ a, b, c 相の交鎖磁束です。交鎖磁束は以下の式で表せます。

$$\begin{bmatrix} \lambda_a \\ \lambda_b \\ \lambda_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \lambda_{pm} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) \\ \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix}$$

ここで、 θ_r は回転子の電気角、 λ_{pm} は以下の式で決まる係数です。

$$\lambda_{pm} = \frac{60 \cdot V_{pk} / \text{krpm}}{\pi \cdot P \cdot 1000 \cdot \sqrt{3}}$$

P は極数です。

固定子の自己および相互インダクタンスは回転子の位置により変化し、以下の式で決まります。

$$\begin{aligned}
L_{aa} &= L_{sl} + L_o + L_2 \cdot \cos(2\theta_r) \\
L_{bb} &= L_{sl} + L_o + L_2 \cdot \cos\left(2\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\
L_{cc} &= L_{sl} + L_o + L_2 \cdot \cos\left(2\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \\
L_{ab} &= L_{ba} = -\frac{1}{2}L_o + L_2 \cdot \cos\left(2\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \\
L_{ac} &= L_{ca} = -\frac{1}{2}L_o + L_2 \cdot \cos\left(2\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\
L_{bc} &= L_{cb} = -\frac{1}{2}L_o + L_2 \cdot \cos(2\theta_r)
\end{aligned}$$

ここで、 L_s は固定子の漏れインダクタンスです。

abc フレームの変数は、以下の式により dq0 フレームに変換することができます。

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta_r) & -\sin\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix}$$

また、逆変換は以下の式で表せます。

$$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & -\sin(\theta_r) & 1 \\ \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_0 \end{bmatrix}$$

また、d 軸および q 軸インダクタンスは以下のように書けます。

$$\begin{aligned}
L_d &= L_s + \frac{3}{2}L_o + \frac{3}{2}L_2 \\
L_q &= L_s + \frac{3}{2}L_o - \frac{3}{2}L_2
\end{aligned}$$

発生トルクは次の式で計算されます。

$$T_{em} = -\frac{P}{2} \cdot L_2 \cdot \begin{bmatrix} i_a & i_b & i_c \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sin(2\theta_r) & \sin\left(2\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(2\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin\left(2\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(2\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \sin(2\theta_r) \\ \sin\left(2\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \sin(2\theta_r) & \sin\left(2\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} - \frac{P}{2} \cdot \lambda_{pm} \cdot \begin{bmatrix} i_a & i_b & i_c \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sin(\theta_r) \\ \sin\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix}$$

dq0 フレームでは、発生トルクは以下の式で表されます。

$$T_{em} = \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{2} \cdot (\lambda_{pm} i_q + (L_d - L_q) i_d i_q)$$

一方、機械系の方程式は

$$\begin{aligned}
J \cdot \frac{d\omega_m}{dt} &= T_{em} - B \cdot \omega_m - T_{load} \\
\frac{d\theta_r}{dt} &= \frac{P}{2} \cdot \omega_m
\end{aligned}$$

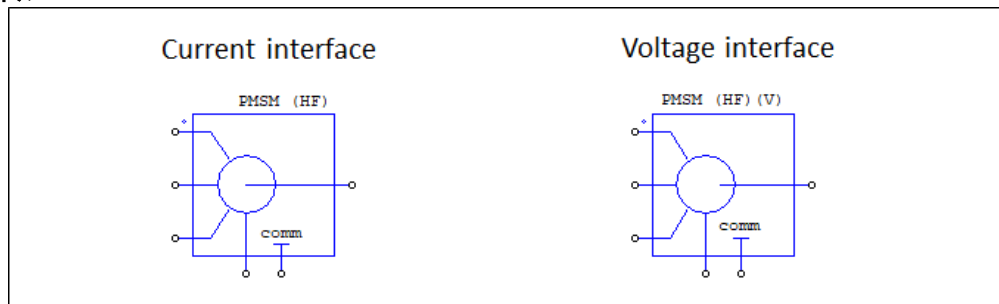
ここで、 B は係数、 T_{load} は負荷トルク、および P は極数です。この係数 B は慣性モーメント J と機械系の時定数 T_{shaft} から以下のように計算されます。

$$B = \frac{J}{\tau_{shaft}}$$

4.6.6.2 永久磁石同期機（高周波）（PMSM (High Frequency)）

高周波 PMSM モデルは、PMSM ドライブの差動モードと共通モードの高周波効果を研究するために使用できます。

シンボル



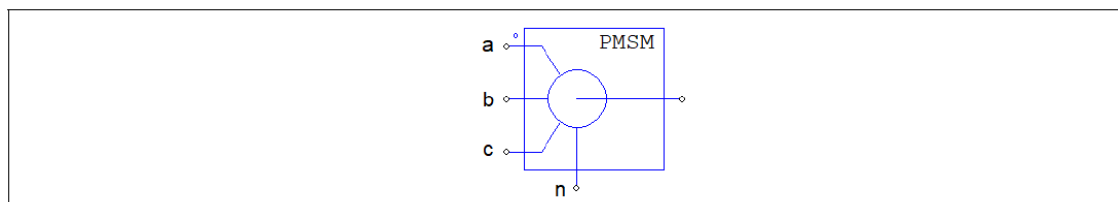
パラメータ	機能
R_s	固定子の巻線抵抗(Ω)
L_d	固定子の d 軸インダクタンス(H)
L_q	固定子 q 軸インダクタンス (H)。d-q 座標は、d 軸が磁石の中心を通過し、q 軸が 2 つの磁石の間にあるように定義されます。q 軸は d 軸よりも進んでいます。
V_{pk} / krpm	線間のピーク誘起電圧定数、単位は V/krpm (機械系の回転速度)です。 V_{pk}/krpm の値はモータのデータシートから得られるはずです。これらの値が不明の場合は、同期機を 1000rpm で発電機として運転し、線間電圧のピーク値を測ることでわかります。
極数 P	極数 P
慣性モーメント	モータの慣性モーメント J ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)
軸の時定数	軸の時定数 T_{shaft}
ローター角の初期値	初期のローター角($^\circ$)
C_{sd}	固定子の d 軸差動キャパシタンス (f)
C_{sq}	固定子の q 軸差動キャパシタンス(f)
C_s	位相巻線の浮遊キャパシタンス(F)
R_{comm}	共通モードの抵抗(Ω)
L_{comm}	共通モードのインダクタンス(H)
C_{comm}	共通モードのキャパシタンス(F)
R_b	ベアリング抵抗(Ω)
C_b	ベアリングキャパシタンス(F)
Z_b	ベアリングインピーダンス(Ω)
マスタ/スレーブフラグ	マスタ/スレーブモードのフラグ (1 : マスタ, 0 : スレーブ)。マスタ/スレーブのフラグの設定により、モータの動作モードが変わります。詳しくは 4.6.1 を参照ください。

低周波数領域のモデルの方程式は、前のセクションの PMSM の方程式と同じです。このモデルの詳細については、オンラインヘルプページを参照してください。

4.6.6.3 飽和付永久磁石同期機（非線形）(PMSM (Nonlinear))

PMSM（非線形）は、飽和付き三相 PMSM マシンをモデル化します。その特性は、線形三相 PMSM 機械の特性とは異なります。d 軸および q 軸の磁化インダクタンス L_{dm} および L_{qm} は、ルックアップテーブル形式の d 軸および q 軸電流の非線形関数として表すことができます。

シンボル



仕様

パラメータ	機能
R_s (固定子抵抗)	固定子の巻線抵抗(Ω)
L_s (固定子漏れインダクタンス)	固定子の漏れインダクタンス(H)
V_{pk} / krpm	線間のピーク誘起電圧定数、単位は V/krpm (機械系の回転速度)です。 V_{pk}/krpm の値はモータのデータシートから得られるはずですが、これらの値が不明の場合は、同期機を 1000rpm で発電機として運転し、線間電圧のピーク値を測ることで行われます。
極数 P	極数 P
慣性モーメント	モータの慣性モーメント J ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)
軸の時定数	軸の時定数 T_{shaft} (S)。 摩擦係数 B と関係する。ただし、 $B=J / T_{\text{shaft}}$
ローター角の初期値	初期のローター角($^\circ$)
L_d ルックアップテーブルファイル	L_{dm} 用ルックアップテーブルのファイル名
L_q ルックアップテーブルファイル	L_{qm} 用ルックアップテーブルのファイル名
dq フラグ	ルックアップテーブル用のフラグ (0: L_{dm} , L_{qm} は I_d , I_q の関数 ; 1: L_{dm} , L_{qm} は電流ベクトル I_m と角度の関数)
変換フラグ	変換係数フラグ(詳細は以下を参考のこと)
トルクフラグ	内部発生トルク T_{em} の出力フラグ (1 : 出力あり ; 0 : なし)
マスタ/スレーブフラグ	マスタ/スレーブモードのフラグ (1 : マスタ, 0 : スレーブ)。マスタ/スレーブのフラグの設定により、モータの動作モードが変わります。詳しくは 4.6.1 を参照ください。

d 軸, q 軸のインダクタンス L_d , L_q と磁化インダクタンス L_{dm} , L_{qm} との関係は以下の通りになります。

$$L_d = L_s + L_{dm}$$

$$L_q = L_s + L_{qm}$$

ただし、 L_s は固定子の漏れインダクタンスです。通常は L_s が非常に小さいので、 L_d を L_{dm} 、 L_q を L_{qm} と見なすことができます。

変換フラグはabcの三相静止座標からdqの回転座標への座標変換の変換係数を決定します。
変換フラグが0の時

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta_r) & -\sin\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

$$I_m = \sqrt{I_d^2 + I_q^2}$$

$$\theta_m = \text{atan2}(I_q, I_d)$$

電流ベクトルの位相角の単位は"度"で、範囲は-180°から 180°になっています。

また、変換フラグが 1 の時

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta_r) & -\sin\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

$$I_m = \frac{\sqrt{2}}{3} \cdot \sqrt{I_d^2 + I_q^2}$$

$$\theta_m = \text{atan2}(-I_d, I_q)$$

電流ベクトルの位相角の単位は"度"で、範囲は 0°から 360°になっています。

L_{dm} と L_{qm} のルックアップテーブルは以下のフォーマットを持っています。

```
m, n
Vr,1, Vr,2, ..., Vr,m
Vc,1, Vc,2, ..., Vc,n
L1,1, L1,2, ..., L1,n
L2,1, L2,2, ..., L2,n
... ..
Lm,1, Lm,2, ..., Lm,n
```

ただし、m は行の数、n は列の数、V_r は行のベクトル、V_c は列のベクトル、L_{ij} は i 行目と j 列目における L_{dm} 或いは L_{qm} の値[H]です。ベクトル V_r と V_c は単調増加である必要があります。

dq フラグが 0 の場合、ベクトル V_r には I_q のデータを、ベクトル V_c には I_d のデータを設定し、L_{ij} には該当する I_d, I_q の場合のインダクタンス値を設定します。

dq フラグが 1 の場合、ベクトル V_r には θ_m のデータを、ベクトル V_c には I_m のデータを設定し、L_{ij} には該当する I_m, θ_m の場合のインダクタンス値を設定します。

入力がルックアップテーブルで定義された二つのポイントの間にあるとき、補間された値が計算に使用されます。また、入力が最小値より小さいまたは最大値より大きいとき、入力に最小値または最大値が代入されます。ルックアップテーブルの L_{dm} と L_{qm} を I_d と I_q の線形関数として定義すれば、この飽和付永久磁石同期機モデルは線形永久磁石同期機モデルとして使うことが可能です。

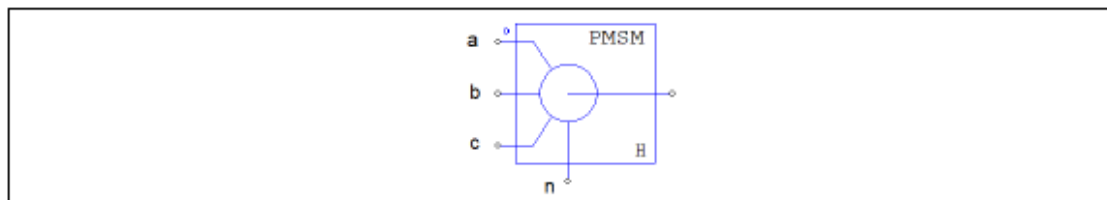
以下にルックアップテーブルの例を示します

```
4.15
-5.7155 -4.8990 -4.0825 -3.2660
-5.7155 -4.8990 -4.0825 -3.2660 -2.4495 -1.6330 -0.8165 0 0.8165 1.6330 2.4495 3.2660 4.0825 4.8990 5.7155
0.0109 0.0109 0.0107 0.0104 0.0102 0.0100 0.0098 0.0098 0.0098 0.0100 0.0102 0.0104 0.0107 0.0109 0.0109
0.0109 0.0109 0.0109 0.0106 0.0109 0.0106 0.0105 0.0105 0.0105 0.0106 0.0109 0.0106 0.0109 0.0109 0.0109
0.0109 0.0109 0.0109 0.0109 0.0111 0.0108 0.0106 0.0106 0.0106 0.0108 0.0111 0.0109 0.0109 0.0109 0.0109
0.0110 0.0110 0.0111 0.0110 0.0110 0.0109 0.0108 0.0107 0.0108 0.0109 0.0110 0.0110 0.0111 0.0110 0.0110
```

4.6.6.4 永久磁石同期機（空間高調波）（PMSM (Spatial Harmonics)）

PMSM のこのモデルでは、空隙内の磁場は空間成分の合計として表されます。

シンボル



仕様

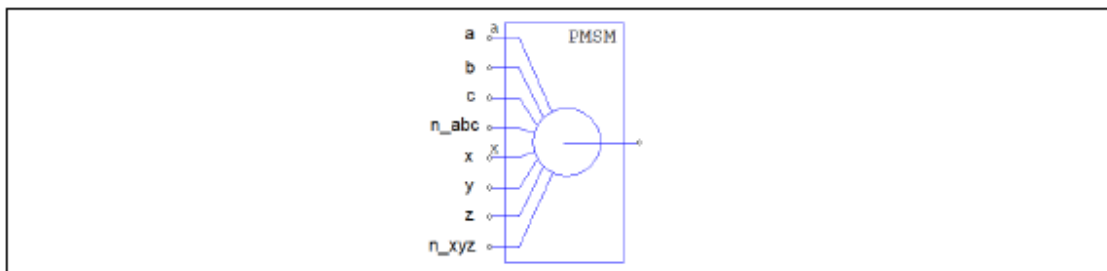
パラメータ	機能
R_s (固定子抵抗)	固定子の巻線抵抗(Ω)
L_d (d 軸インダクタンス)	PMSM の d 軸インダクタンス(H)
L_q (q 軸インダクタンス)	PMSM の q 軸インダクタンス(H)
V_{pk} / krpm	線間のピーク誘起電圧定数、単位は V/krpm (機械系の回転速度)です。 V_{pk}/krpm の値はモータのデータシートから得られるはずですが、これらの値が不明の場合は、同期機を 1000rpm で発電機として運転し、線間電圧のピーク値を測ることでわかります。
極数 P	極数 P
慣性モーメント	モータの慣性モーメント J ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)
軸の時定数	軸の時定数 T_{shaft} (s)。 摩擦係数 B と関係する。ただし、 $B=J / T_{\text{shaft}}$
ローター角の初期値	初期のローター角($^\circ$)
nm (開回路)	開回路回転スピード (rpm)
V_{an} の i 次高調波成分	ラインー中性点間の電圧 V_{an} の第 i 次高調波成分 (V)
マスタ/スレーブフラグ	マスタ/スレーブモードのフラグ (1 : マスタ, 0 : スレーブ)。

このモデルの詳細については、「examples \ Motor Drive」フォルダーにある PMSM 空間高調波の例を参照してください。

4.6.6.5 六相永久磁石同期機（空間高調波）（6-Phase PMSM）

六相 PMSM モデルは以下のとおりです。2 つのモデルがあります。30 度位相シフト型と 0 度位相シフト型です。

シンボル

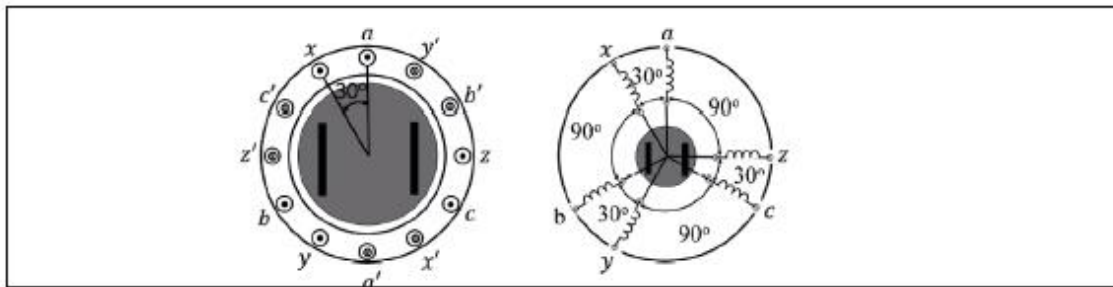


六相 PMS の固定子巻線は 2 組の三相巻線から構成されています。

位相シフトが 0 度の六相 PMSM では、2 組の巻線は空間的に 0 度ずつシフトしています。

30 度位相差のある六相 PMS の場合、2 組の巻線は 30 度ずつ空間的にずれています。

3 相の固定子巻線はそれぞれ次のように Y 結線されています。



d-q 座標は以下のように定義されます。

- d 軸は磁石の中心を通過し、
- q 軸は 2 つの磁石の真ん中にあります。

q 軸は d 軸よりも進んでいます。

シャフト時定数 τ_{shaft} は、摩擦と風損の影響を反映しています。これは次のように摩擦係数 B に関連付けられています。

$$B = J / \tau_{shaft}$$

摩擦係数 B は、次のような機械方程式で使用されます。

$$J * dW_m/dt = T_{em} - B * W_m - T_{load}$$

ここで、 W_m はラジアン/秒の機械的速度、 T_{em} は発生トルク、 T_{load} は負荷トルクです。

摩擦係数が利用できないか不明な場合、摩擦を無視するには、機械の時定数を大きな値に設定して、摩擦係数 B を小さくし、 $B * W_m$ の項を無視できるようにします。

ピーク固定子相磁束鎖交は次のように計算されます。

$$\Lambda_{pm} = V_{pk_krpm} * 60 / (\sqrt{3}) * 3.14169 * P * 1000$$

機械の開発トルクは次のとおりです。

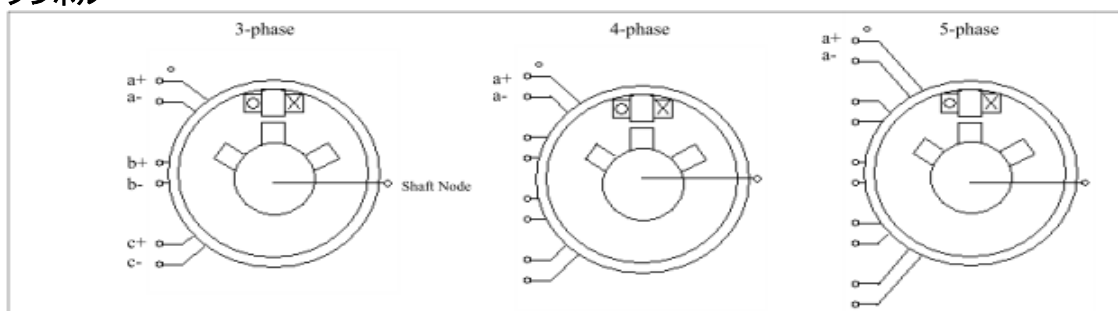
$$T_{em} = (3/2) * (P/2) * (\Lambda_{pm} * i_q + (L_d - L_q) * i_d * i_q)$$

ここで、 i_d と i_q は dq フレームの固定子電流です。

4.6.7 スイッチトリラクタンスモータ (Switched Reluctance Machine (SRM))

三相、四相、五相の 3 つのタイプのスイッチトリラクタンスモータモデルが用意されています。

シンボル



4.6.7.1 スイッチリラクタンスモータ（線形）(SRM (Linear))

仕様

パラメータ	機能
抵抗	固定子各相抵抗(Ω)
インダクタンス L_{min}	各相インダクタンスの最小値(H)
インダクタンス L_{max}	各相インダクタンスの最大値(H)
$\theta_{min}(^{\circ})$	インダクタンスが最低にある期間(度)
$\theta_{max}(^{\circ})$	インダクタンスが最大にある期間(度)
固定子極数	固定子極数
回転子極数	回転子極数
慣性モーメント	モータの慣性モーメント J ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)
トルクフラグ	内部トルク T_{em} の出力フラグ。
マスタ/スレーブフラグ	マスタ/スレーブモードのフラグ (1 : マスタ, 0 : スレーブ)

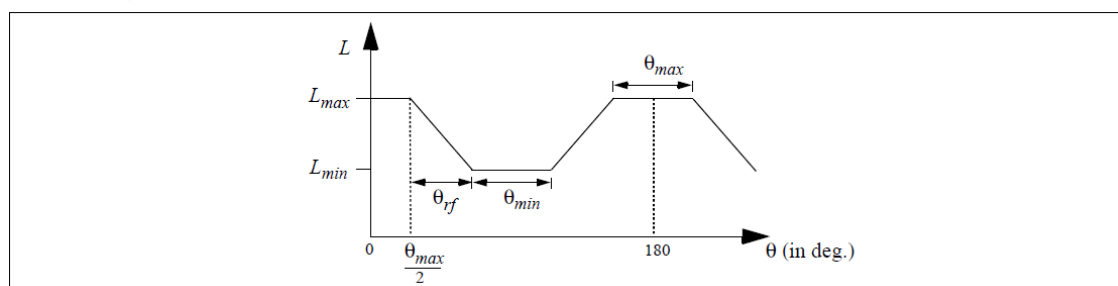
マスタ/スレーブフラグの設定により、モータの動作モードが変わります(「4.6.1 機械システムでの「基準方向」(Reference Direction of Mechanical Systems)」参照)。

ノードの役割は以下のとおりです。a+, a-, b+, b-, c+, c- はそれぞれ a, b, c 相の固定子巻線端子。軸ノード(shaft node)は機械軸の接続端子。これらの端子はパワー端子なのでパワー回路に接続しなければなりません。

スイッチトリラクタンスモータの方程式は、各相あたり次のようになります。

$$v = i \cdot R + \frac{d(L \cdot i)}{dt}$$

ここで、 v は相電圧、 i は相電流、 R は相回路抵抗、 L は相回路インダクタンスです。相回路インダクタンス L は以下の図に示すように回転の関数です。インダクタンスの変化は半波対称で 180 度の後は繰り返します。



回転角は、固定子と回転子の歯が完全にかみ合っている場合を $\theta = 0$ とします。インダクタンスの値は、上昇(rising)、頂上(flat-top)、降下(falling)、底(flat-bottom)の 4 段階のいずれかになります。

ここで定数 k を $k = \frac{L_{max} - L_{min}}{\theta}$ と定義すると、インダクタンス L を以下のように回転角の関数として表現できます。

$$\begin{aligned}
L &= L_{max} & \text{for } 0 \leq \theta \leq \frac{\theta_{max}}{2} \\
L &= L_{max} - k \cdot \left(\theta - \frac{\theta_{max}}{2} \right) & \text{for } \frac{\theta_{max}}{2} \leq \theta \leq \frac{\theta_{max}}{2} + \theta_{rf} \\
L &= L_{min} & \text{for } \frac{\theta_{max}}{2} + \theta_{rf} \leq \theta \leq \frac{\theta_{max}}{2} + \theta_{rf} + \theta_{min} \\
L &= L_{min} + k \cdot \left(\theta - \frac{\theta_{max}}{2} - \theta_{rf} - \theta_{min} \right) & \text{for } \frac{\theta_{max}}{2} + \theta_{rf} + \theta_{min} \leq \theta \leq \frac{\theta_{max}}{2} + 2\theta_{rf} + \theta_{min} \\
L &= L_{max} & \text{for } \frac{\theta_{max}}{2} + 2\theta_{rf} + \theta_{min} \leq \theta \leq 180^\circ
\end{aligned}$$

各相の発生トルクは以下により求めています。

$$T_{em} = \frac{1}{2} \cdot i^2 \cdot \frac{dL}{d\theta}$$

上記のようなインダクタンスの表現により、各段階での発生トルクは、

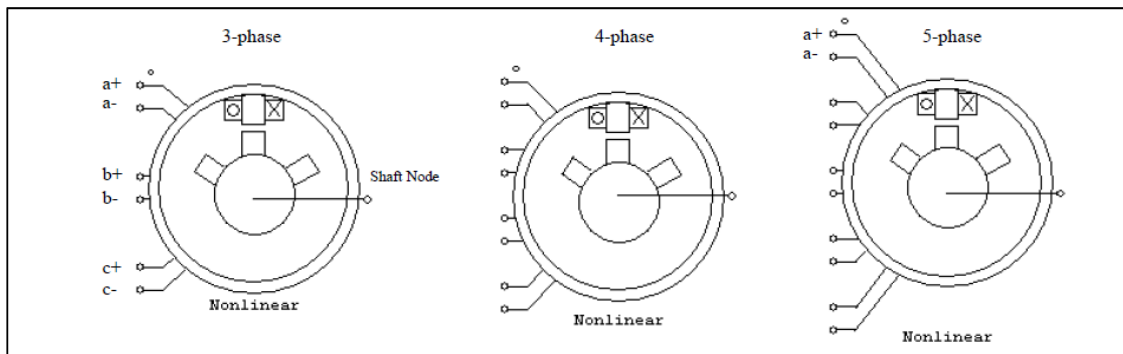
$$\begin{aligned}
T_{em} &= i^2 \cdot \frac{k}{2} & \text{[上昇]} \\
T_{em} &= 0 & \text{[頂上]} \\
T_{em} &= -i^2 \cdot \frac{k}{2} & \text{[降下]} \\
T_{em} &= 0 & \text{[底]}
\end{aligned}$$

なお、このモデルでは飽和を考慮していません。

4.6.7.2 非線形スイッチトリラクタンスモータ (SRM (Nonlinear))

非線形スイッチトリラクタンスモータモデルでは、磁束とトルクはローター角と相電流の関数となります。

シンボル



仕様

パラメータ	機能
抵抗	固定子各相抵抗(Ω)
固定子極数	固定子極数
回転子極数	回転子極数
ターン数	固定子巻数の巻数
慣性モーメント	モータの慣性モーメント J ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)
初期ロータ角度	ロータの初期機械角 θ ($^\circ$)
トルクフラグ	内部トルク T_{em} の出力フラグ。フラグを 1 に設定すると内部トルクの出力を要求できます。
マスタ/スレーブフラグ	マスタ/スレーブモードのフラグ (1 : マスタ, 0 : スレーブ)

非線形特性データはフラックステーブル、トルクテーブルのタブにデータを入力する必要があります。

パラメータ	機能
ファイル	データの外部ファイルの名前
表示	チェックボックスにチェックを入れるとファイル名が回路図上に表示されます。
行	データテーブルの行数
列	データテーブルの列数
ファイルを開く	外部ファイルを開いてデータをロードします。
データ再ロード	元のファイルを再ロードします。
名前をつけて保存	データテーブルのデータを外部ファイルに保存します。

これらのデータは行と列の下图が設定された直後にデータテーブルに入力できます。もしくは外部ファイルで定義できます。ファイル名がない場合は内部表データが使用されます。外部テキストファイルが定義されて名前が設定されると、外部ファイルが優先され、内部データに上書きされます。

磁束テーブルのファイルのフォーマットは以下の通りです。

```

m, n
 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m$ 
 $I_1, I_2, \dots, I_n$ 
 $\phi_{1,1}, \phi_{1,2}, \dots, \phi_{1,n}$ 
 $\phi_{2,1}, \phi_{2,2}, \dots, \phi_{2,n}$ 
... ..
 $\phi_{m,1}, \phi_{m,2}, \dots, \phi_{m,n}$ 

```

トルクテーブルのファイルのフォーマットは以下の通りです。

```

m, n
 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m$ 
 $I_1, I_2, \dots, I_n$ 
 $Tem_{1,1}, Tem_{1,2}, \dots, Tem_{1,n}$ 
 $Tem_{2,1}, Tem_{2,2}, \dots, Tem_{2,n}$ 
... ..
 $Tem_{m,1}, Tem_{m,2}, \dots, Tem_{m,n}$ 

```

ここで、m は行の数、n は列の数、 $\theta_1 \sim \theta_m$ は回転子位置(単位 : degree)の行のベクトル、 $I_1 \sim I_n$ は相電流(単位:A)の列のベクトルです。 $\phi_{i,j}$ はフラックス値(単位 : Wb)、 $Tem_{i,j}$ は行 i 、列 j のトルク(N/m)です。例えば回転子位置が θ_2 で位相電流が I_1 、磁束は $\phi_{2,1}$ トルクは $Tem_{2,1}$ です。

半波対称のために、0~180度の磁束とトルク値だけが必要です。また、行ベクトルと列ベクトルは単調増加である必要があります。

単相の非線形スイッチトリアクタンスモータの方程式は。

$$v = i \cdot R + \frac{d(L \cdot i)}{dt}$$

ここで、 v は相電圧、 i は相電流、 R は相抵抗であり、 L は相インダクタンスです。これはルックアップテーブルによって定義された回転子角度と電流の両方の値に依存します。

発生したトルクは、ルックアップテーブルから計算されます。

4.6.8 モータ制御ブロック (Motor Control Blocks)

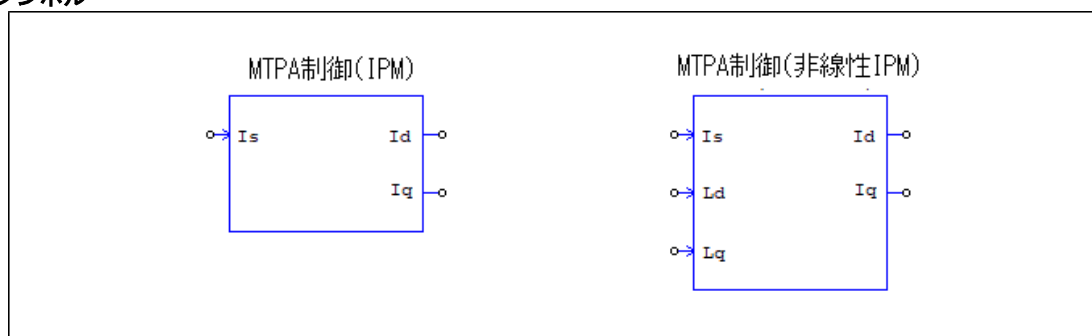
以下の制御ブロックが提供されています。

- 最大トルク制御 (Maximum-Torque-Per-Ampere Control)
- 弱め磁束制御 (Field Weakening Control)

4.6.8.1 最大トルク制御 (Maximum-Torque-Per-Ampere Control)

PSIM モータドライブモジュールには、2 種類の最大トルク制御(Maximum-Torque-Per-Ampere control: MTPA control)が用意されています。下図の左が線形 IPM(内部永久磁石同期機)の MTPA、右が非線形 IPM の MTPA です。

シンボル



仕様(線形及び非線形 IPM 用 MTPA)

パラメータ	機能
Ld (d 軸インダクタンス)	PMSM の d 軸インダクタンス(H)
Lq (q 軸インダクタンス)	PMSM の q 軸インダクタンス(H)
Vpk / krpm	線間のピーク誘起電圧定数、単位は V/krpm (機械系の回転速度)です。
極数	極数
最大インバータ電流	インバータ最大出力電流の振幅(ピーク)(A)

IPM 用の最大トルク制御ブロックには、以下の入出力があります。

入力信号：

- I_s インバータ電流の振幅指令(入力)
- L_d 動作条件における d 軸インダクタンス L_d (H)
- L_q 動作条件における q 軸インダクタンス L_q (H)

出力信号：

- I_d d 軸電流指令
- I_q q 軸電流指令

電流振幅基準が与えられると、このブロックは、最大トルクが生成されるように、d 軸と q 軸の電流基準 I_d と I_q を計算します。

4.6.8.2 弱め磁束制御 (Field Weakening Control)

下図に弱め磁束制御ブロックのシンボルを示します。

シンボル



仕様(弱め磁束制御、IPM)(Field Weakening (IPM))

パラメータ	機能
R_s (固定子抵抗)	固定子の巻線抵抗(Ω)
L_d (d 軸インダクタンス)	PMSM の d 軸インダクタンス(H)
L_q (q 軸インダクタンス)	PMSM の q 軸インダクタンス(H)
V_{pk} / krpm	線間のピーク誘起電圧定数、単位は V/krpm (機械系の回転速度)です。
極数	極数
最大インバータ電流	インバータ最大出力電流の振幅(ピーク)(A)

IPM 用の弱め磁束制御ブロックには、以下の入出力信号があります。

入力信号

- I_s インバータ電流の振幅指令
- V_{dc} DC バスの電圧フィードバック
- W_m モータの機械系の回転速度 (rad/sec)

出力信号

- I_d d 軸電流指令
- I_q q 軸電流指令

このブロックは線形永久磁石同期電動機(PMSM)のみに適用されます。機械速度が一定の値より高くなると、モータは最大トルクを出力できなくなります。代わりに、モータの定格電力により制限されます。DC バス電圧とモータ速度、電流振幅指令が決まれば、最大出力を得る為に、弱め磁束ブロックが d 軸と q 軸の電流指令である I_d と I_q を計算します。

このブロックには、制御される PMSM のパラメーターと、インバーターの電圧および電流定格が必要です。

仕様(弱め磁束制御、非線形 IPM)(Field Weakening (Nonlinear IPM))

パラメータ	機能
極数	極数
最大インバータ電流	インバータ最大出力電流の振幅(ピーク)(A)

このブロックには次の入力と出力があります。

入力信号

lcmd	インバータ電流の振幅指令
Vdc	DC バスの電圧(V)
Wm	モータの機械系の回転速度(rad/sec)
Ld	定格動作条件での d 軸インダクタンス (H)
Lq	定格動作条件での q 軸インダクタンス (H)

出力信号

Id	d 軸電流指令
Iq	q 軸電流指令

このブロックは非線形埋込構造永久磁石同期電動機(Nonlinear PMSM IPM)のみに適用されます。SPM 型には適用されません。

機械速度が一定の値より高くなると、モータは最大トルクを出力できなくなります。代わりに、モータの定格出力により制限されます。DC バス電圧とモータ速度、電流振幅指令、インバータの定格が決まれば、最大出力を得る為に、弱め磁束ブロックが d 軸と q 軸の電流指令である I_d と I_q を計算します。

仕様(弱め磁界制御、SPM)(Field Weakening SPM)

パラメータ	機能
L_d (d 軸インダクタンス)	d 軸インダクタンス(H)
Vpk / krpm	線間のピーク誘起電圧定数、単位は V/krpm (機械系の回転速度)です。
極数	極数
最大インバータ電流	インバータ最大出力電流の振幅(ピーク)(A)

本ブロックには、以下の入出力があります。Ld、Lq、Lambda を除く全てはユニット毎の値です。基底値 V_b 、 I_b 、 W_{mb} が全て 1 に設定されている場合、全ての入出力量は実数になります。

入力信号

Is	インバータ電流の振幅指令
Vdc	DC バスの電圧フィードバック
Wm	モータの機械系の回転速度(rad/sec)

出力信号

Id	d 軸電流指令
Iq	q 軸電流指令

このブロックは線形表面実装構造永久磁石同期電動機(Linear SPM PMSM)のみに適用されます。IPM 型には適用されません。SPM では、d 軸と q 軸のインダクタンスは同じになります。

機械速度が一定の値より高くなると、モータは最大トルクを出力できなくなります。代わりに、モータの定格出力により制限されます。DC バス電圧とモータ速度、電流振幅指令、インバータの定格が決まれば、最大出力を得る為に、弱め磁束ブロックが d 軸と q 軸の電流指令である I_d と I_q を計算します。

仕様(弱め磁界制御、誘導機)(Field Weakening Control(Induction Machine))

パラメータ	機能
R_s (固定子抵抗)	固定子巻線の抵抗(Ohm)
L_{ls} (固定子漏れインダクタンス)	固定子漏れインダクタンス(H)
R_r (回転子抵抗)	回転子巻線の抵抗(Ohm)
L_{lr} (回転子漏れインダクタンス)	回転子漏れインダクタンス(H)
L_m (磁化)	磁化インダクタンス(H)
極数	極数
定格速度	定格速度(rpm)
AC 電源周波数	AC 電源周波数(Hz)
AC 電圧(線間実効値)	AC 電源の線間電圧(V)

ブロックの入出力信号は次のようになります。

入力信号：

Vdc DC バスの電圧

We 固定子の電氣的な速度 (rad/sec)

出力信号：

Id d 軸電流指令

本ブロックは線形誘導機のみに適用されます。

機械速度が一定の値より高くなると、モータは最大トルクを出力できなくなります。代わりに、モータの定格出力により制限されます。DC バス電圧とモータ速度、電流振幅指令が決まれば、最大出力を得る為に、弱め磁束ブロックが d 軸電流指令である I_d を計算します。

4.7 MagCoupler モジュール (MagCoupler Module)

MagCouplerモジュールはPSIM と JMAG の連成シミュレーションを行なうためのインターフェースを提供します。JMAG は電気機器、アクチュエータやその他電気・電子機器または部品の電磁界解析ソフトウェアです。MagCoupler モジュールを使えば、PSIMによるパワーエレクトロニクスとその制御、そして JMAGの電磁界解析を同時に実行することができます。

MagCouplerモジュールはMagCouplerブロックとMagCoupler-DLブロックの二つがあり、これらはそれぞれ4.9章で紹介する機械素子と速度/トルク/位置のセンサにあたります。

MagCouplerブロックとMagCoupler-DLブロックの違いは以下の通りです。

- 「全体のシミュレーション時間短縮可能」

MagCoupler ブロックでは、PSIM と JMAG は同じ時間ステップで実行します。MagCoupler-DL ブロックは違う時間ステップで実行させることもできます。これにより、比較的時間のかかる JMAG 側の時間ステップだけを長くして、全体のシミュレーション時間を短くすることも可能です。

- 「電流入力可能」

MagCoupler ブロックのインタフェースポートは信号ポートであり、電流を入出力することが出来ません。よって電流入力をブロックに接続するためには、まずこれを電圧信号に変換しなければなりません。一方、MagCoupler-DL ブロックの入出力は電力の入出力ポートで

あり、通常の電力回路のノードと同様の働きを持ちます。(つまり、電圧が加わり、電流がノードに流入、流出する現象が表現されるということです。) この違いから、MagCoupler-DL ブロックの PSIM と JMAG 間のインタフェースはさらに現実に則したものになっているといえます。

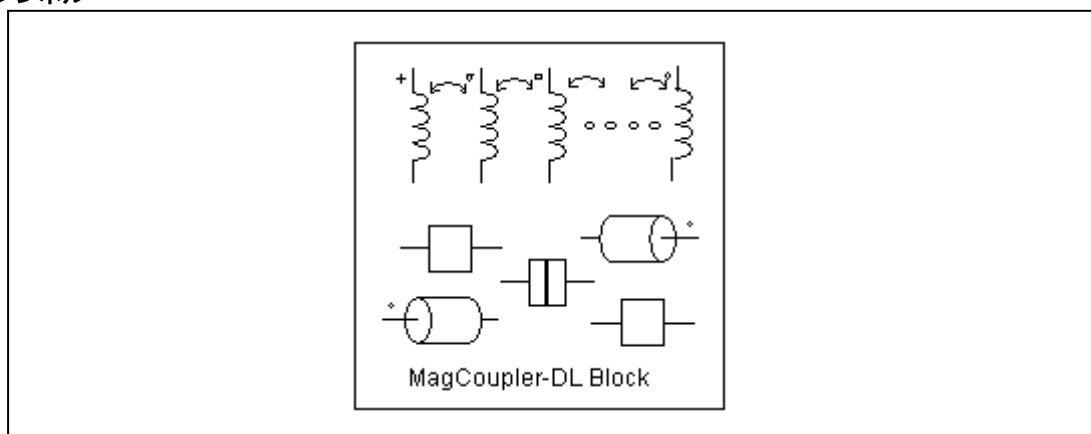
MagCoupler を使用する場合、PSIM 上で JMAG がインストールされているディレクトリか、JMAG の DLL ファイル(「jbdll.dll」と「RT_DLL.dll」)のあるディレクトリを設定する必要があります。PSIM に JMAG のディレクトリを設定するには、Option→Set Path を選択し、Add Folder ボタンを押して、PSIM 検索パスに JMAG のディレクトリを追加してください。

また、MagCoupler を使用するためには、Internet Explorer Ver.6.0 以降が必要なことにご注意ください。Ver.5.x 以前の Internet Explorer がインストールされているコンピュータでは MagCoupler は正常に動作しません。

4.7.1 MagCoupler-DL ブロック (MagCoupler-DL Block)

PMSM デバイスの MagCoupler-DL ブロックは、PMSM デバイスのインターフェースを分かり易く表しています。

シンボル



仕様

パラメータ	機能
ネットリスト XML ファイル	XML ファイルは PSIM と JMAG のインターフェースを定義しており、.xml の拡張子を持っています。
JMAG 入力ファイル	JMAG の入力ファイルです。拡張子.jcf を持っています。.xml と.jcf ファイルは同じディレクトリに入っていないとなりません。
JMAG ケーステキスト	JMAG 回路へのコメントです。
端子名	ブロックのノード名

このブロックシンボル図内では、電源ノード(A、B、そして C)はブロックの一番上に置かれており、左から右へ配置されています。機械の軸ノードはブロックの左と右に置かれており、右が最初の軸ノード(上図のノード M+)左が二番目の軸ノード(上図のノード M-)です。

電力回路と機械軸ノードは PSIM と JMAG のデータファイル間のインターフェースと同様にネットリスト XML ファイル内に定義されています。このファイルは XML 形式であり、JMAG から生成されます。このファイルを指定するためには、編集部分の右のブラウザボタンをクリックしてください。

JMAG 入力ファイルはデバイスをモデル化した JMAG のデータファイルです。このファイルは.jcf 拡張子を持っており、ネットリスト XML ファイル内に定義されています。 .jcf ファイルと.xml ファイルは同じディレクトリに入っていないとなりません。

JMAG ケーステキストはユーザが JMAG 回路を識別するための「名前」として利用するテキストであり、自由に設定することができます。

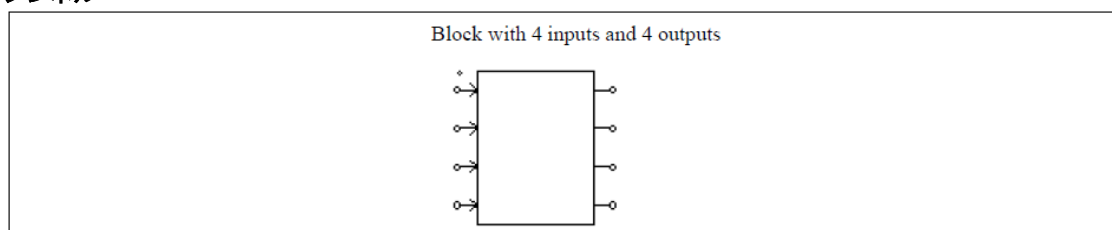
特定の XML ファイルを選び、.jcf データファイルが読み込まれると、以下のパラメータがプロパティウィンドウ内に表示されます。

パラメータ	機能
dt of JMAG	JMAG 内の時間ステップ
Ir	定格電流です。JMAG 内で使われています。
dl_threshold	電流基準値です。JMAG 内で使われています。
dr_threshold	移動の基準点です。JMAG 内で使われています。
MomentofInertia	装置の慣性モーメント
MechTimeConstant	装置の機械的時定数(sec)
Beck emf Flag	全ての FEM コイル電流の表示フラグ(1: 表示、0: 非表示)
Rotor Angle Flag	全軸角の表示フラグ
Speed Flag	全軸速度の表示フラグ
Torque Flag	全軸トルクの表示フラグ

JMAG 側シミュレーションのセットアップ方法は JMAG のマニュアルとドキュメントを参照してください。

4.7.2 MagCoupler ブロック (MagCoupler Block)

シンボル



仕様

パラメータ	機能
リンクテーブルファイル	PSIM と JMAG との接続を定義する XML ファイル(.xml の拡張子)です。
JMAG 入力ファイル	JMAG 用の JCF 入力ファイル(.jcf 拡張子)です。 .xml ファイルと.jcf ファイルは同じディレクトリ上にある必要があります。
JMAG ケーステキスト	JMAG 回路用のコメント
入力ノード	PSIM から JMAG に値を渡すノード
出力ノード	JMAG から PSIM に値を渡すノード

使う回路の入出力ノード数によってシンボルの入出力ノード数も変化します。

MagCoupler ブロックは、電圧、電流と位置を入力とし、電圧、電流、位置、トルクと力を出します。PSIM では、MagCoupler ブロックはパワー回路素子として扱われます。

MagCoupler と他の回路との連結はいずれの入力と出力においても電圧信号です(入力ノードに流れ込む電流は存在しません)。このとき、回路中からの電流を電圧信号へ変換(あるいはその逆の変換)をするには、「電流制御電圧源」あるいは「電圧制御電流源」を使うことで実現できます。

リンクテーブルファイルは入出力のインターフェースとJMAG に関連する関数を定義します。このファイルはJMAG によって自動的に生成されます。編集フィールドの右側にあるブラウザボタンをクリックしてこのファイルを設置してください。

JMAG入力ファイルはJMAG のソルバに読み込まれるJCF 入力データファイルです。ファイル名はリンクテーブルファイルで定義されます。

JMAG入力ファイルは必ずリンクテーブルファイルと同じディレクトリにあることにご注意ください。何らかの素子データベースをJMAG で使用している場合、それらのファイルも.xml ファイルと同じディレクトリに置く必要があります。一方、.xml ファイルは必ずしも回路図ファイルと同じディレクトリに入れる必要はありません。ただし、同じファイル名の.xml ファイルが回路図ディレクトリに存在する場合、PSIM は優先的に回路図ディレクトリにあるファイルを読み込みます。

JMAGケーステキストはユーザがJMAG 回路を識別するための「名前」として利用するテキストであり、自由に設定することができます。

入力ノードはPSIM からJMAG に値を渡すノードです。MagCoupler ブロックの図では、入力端子の順番は入力ノードの設定と同じ順序で左上から左下に並びます。この順番はノードをハイライト化し、上あるいは下矢印をクリックすることで変えることができます。

出力ノードはJMAG がPSIM に値を返すためのノードです。MagCoupler ブロック図において、出力端子の順番は出力ノードの設定と同じ順序で右上から右下に並びます。この順番はノードをハイライト化し、上あるいは下矢印をクリックすることで変えることができます。

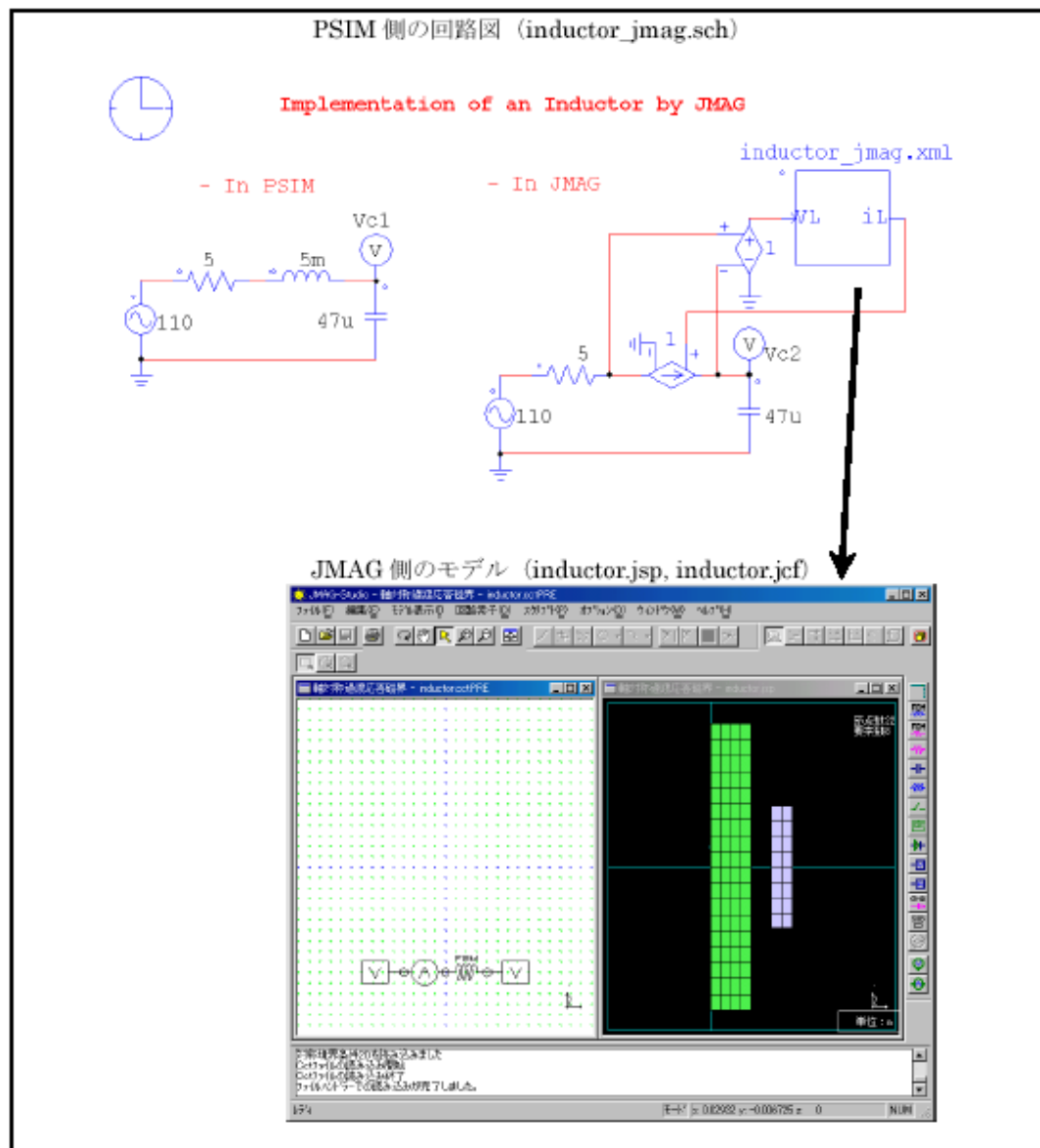
[Edit Image] ボタンをクリックしますと、MagCoupler ブロック図を編集したり、カスタマイズしたりすることができます。[Display File] ボタンを押すと、Microsoft Internet Explorer環境にあるリンクテーブルファイルが表示され、[Read File] ボタンを押すとリンクテーブルファイルが読み込まれます。

JMAG、PSIM のセットアップ

MagCoupler ブロックを使った連成シミュレーションに向けたJMAG とPSIM間のリンクのセットアップには、大きく二つのステップがあります。まずJMAG 上で回路をセットアップしてリンクテーブルファイルを生成し、そのリンクテーブルファイルをPSIM に読み込む設定をします。インダクタを例にこの手順について説明します。

この例のPSIM 回路において、左側の回路はPSIM素子 ライブラリに備えつきのインダクタを使います。そして、右側の回路はJMAG で計算されるインダクタを使います。この例では、インダクタはPSIM における制御電流源としてモデル化されます。インダクタの端子電圧はまず電圧制御電圧源を通じてGND を基準とした電圧に変換され、その値はMagCoupler ブロックの入力ノードVL に渡されます。PSIMのシミュレーションタイムステップごとに、入力電圧に基づいてインダクタ電流を計算するJMAG の関数が呼び出されます。JMAG で計算された電流値はPSIM に電圧の形で返され、電圧制御電流源によってインダクタの出力電流になります。

この例のJMAG 側の回路は、Voltage Function(左側)がPSIM から渡された電圧を受け取り、FEM コイルと直列に繋がっている電流プローブを通過します。電流プローブは解析された電流値を観測し、観測した値がPSIM に返されます。JMAG 環境におけるインダクタの構造は右下に示されています。



PSIM でMagCoupler ブロックを通じて、JMAG を呼び出す手順は以下の通りです。

【JMAG 側の操作手順】

- JMAG 回路で、FEM Coil(FEM コイル)の右側にVoltage Function(電源電圧)を接続してください。プロパティウィンドウのElectrical Potential(電位)に属するConstantValue(一定値)を選択し、Constant Value[V](一定値[V])を0にセットしてください。
- FEMコイルの左側にCurrent Probe(電流プローブ)を接続します。
- Current Probe(電流プローブ)の左側にもう一つのVoltage Function(電源電圧)を接続します(回路は上図に示す形になります)。Voltage Function(電源電圧)のプロパティウィンドウでCooperates with an external circuit simulator(外部シミュレータと連成する)を選択します。
- インダクタの構造ウィンドウをハイライト化し、Conditions → Create Conditions(条件→条件作成)に移動します。表示されるリストからCoupled External Circuit Simulator(外部回路シミュレータ連成)を選択してOK を押してください。
- Coupled External Circuit Simulator(外部回路シミュレータ連成)ダイアログウィンドウ上に二つのリストが存在します。右側にあるJMAG というリストにPSIM と連動するために使用できるすべてのファンクションが含まれています。一方、左側にあるExternal Circuit Simulator(外部回路シミュレータ)というリストにPSIM と連動するために選択されているファンクションが含まれています。このケースでは、JMAG リストに二つのアイテムがあり、Voltage Function と電流プローブです。
- Voltage Function をハイライト化し、「←」ボタンをクリックし、右側にあるリストから左側にあるリストにアイテムを以降します。電流プローブに対しても同じ手順で行います。すると、これらの二つのアイテムは左側のリストに現れます。
- Voltage Function をハイライト化し、端末名をVL に変更します。また、電流プローブの端子名をiL に変更します。ダイアログウィンドウを閉じます。
- File → Export(ファイル->書き出し)に移動し、JCF...を選択します。JCF ファイル名を"inductor" と設定すると、JCF ファイル"inductor.jcf"とリンクテーブルファイル"inductor_csl.xml"が生成されます。
- 最後にファイル管理の簡略化のために以下の手順を行うことをお勧めします。PSIM 回路図ファイル"inductor_jmag.sch"が含まれるフォルダに、JCF ファイル "inductor.jcf"とリンクテーブルファイル"inductor_csl.xml"をコピーし、リンクテーブルファイルを"inductor_jmag.xml"にファイル名を変更します。

【PSIM 側の操作手順】

- すべての電力回路を作った後、Element → Power→ MagCoupler Module に移動し、MagCoupler Block を選択してください。そのブロックを回路図に置いてください。
- MagCoupler ブロックをダブルクリックして、プロパティウィンドウを呼び出します。リンクテーブルファイルエディットフィールドの次にあるブラウザボタンをクリックしファイルを選びます。ここでは"inductor_jmag.xml"を選択します。このファイルが読み込まれた後、プロパティウィンドウはIN ノードVL とOUT ノードiL を表示します。
- MagCoupler ブロックを回路図内の残りの回路に接続します。

これでセットアップは完了です。

4.8 MagCoupler-RT モジュール (MagCoupler-RT Module)

MagCoupler-RT モジュールは PSIM と JMAG-RT データファイルとのインターフェースを提供します。JMAG-RT は電磁デバイスをモデル化するためのシミュレータです。JMAG-RT データファイルはあらかじめ JMAG 単体でシミュレーションを実行して作成します。データファイルはルックアップテーブル形式で保存されています。PSIM は JMAG-RT から出力されたデータを使用するため、PSIM でシミュレーションする際に、JMAG を起動させる必要はありません。

JMAG-RT の最大の利点は、PSIM シミュレーションの実行時に JMAG を実行しないため、PSIM シミュレーションの速度が影響を受けることなく高速シミュレーションが可能になる点です。しかも、JMAG-RT データファイルが JMAG の動的シミュレーションから得られるので、モデルの正確さも MagCoupler を使用した場合と近いレベルになります。

MagCoupler-RT モジュールは、上記の機能のほか、4.9 章に記述されるような機械部と速度/トルク/ポジションセンサを含んでいます。

以下の 5 つの MagCoupler-RT ブロックが用意されています。

- 汎用 RT ブロック
- 三相永久磁石型同期モータ (PMSM)
- 二相ステッピングモータ
- リニア同期モータ
- リニアソレノイド

お使いになる場合は、一般的な RT ブロックの使用を推奨します。

他の 4 つのブロックはレガシーブロックで、近い将来に廃止される予定です。

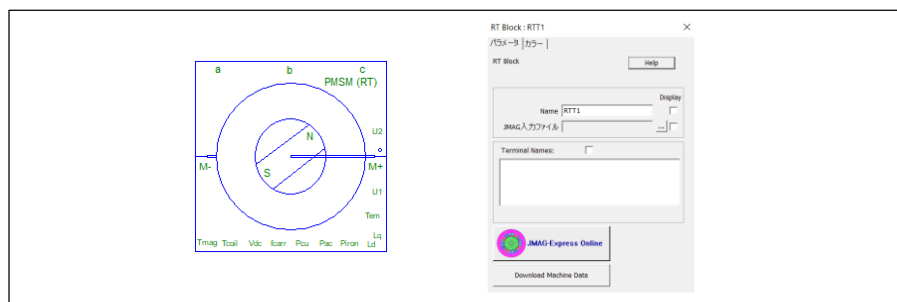
4.8.1 汎用 RT ブロック

汎用 RT ブロックは、次の JMAG-RT モデルに対応しています。

- PMSM (LdLq, spatial harmonics、flux integral モデルを含む)
- ソレノイド
- ステップモータ
- リニア同期モータ
- SRM (三相、四相、五相)
- 巻線型同期モータ
- 誘導電動機
- 一般的なモデル

汎用 RT ブロックのシンボルと仕様は次のようになります。

シンボル



仕様

パラメータ	機能
JMAG 入力ファイル	JMAG-RT データファイルです。拡張子.rtt です。

JMAG-RT のファイルが選択されると、PSIM はデバイスの種類を検出し、それに対応する画像とパラメータへ変更します。

ダイアログには、JMAG Express Online ボタンが用意されています。

このボタンをクリックするとログイン画面になります。JMAG-Express Online サイトのログイン画面になります。JMAG-Express Online は、JSOL が提供する迅速なモータ設計のための無償評価ツールです。

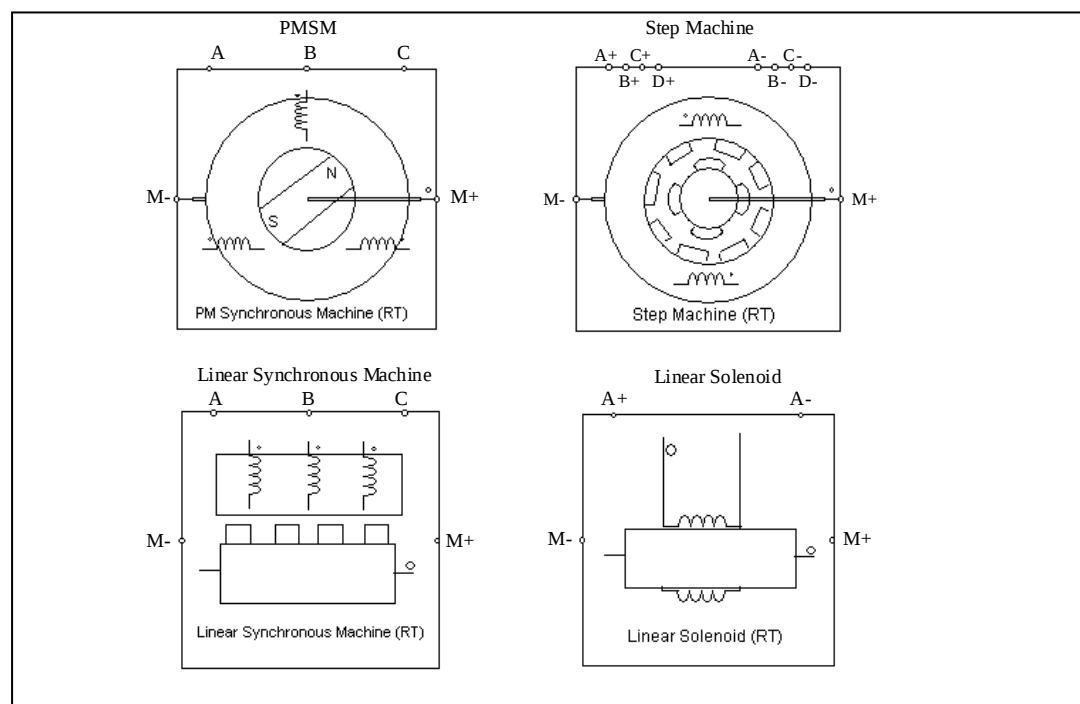
モータを設計した後、JMAG-RT の rtt ファイルを生成し、“Download Machine Data”ボタンでモータのパラメータをダウンロードすることができます。

4.8.2 その他の RT ブロック

PMSM については鉄損も考慮されます。PMSM RT ファイルが鉄損データを含んでいる場合、渦電流損失 P_{loss_eddy} 、ヒステリシス損失 P_{loss_hys} を表示します。鉄損をどうモデリングするかなどより詳細な情報は JSOL の関連ドキュメントを参照してください。

各ブロックのシンボルは以下の通りです。

シンボル



仕様

パラメータ	機能
ネットリストXMLファイル	PSIM と JMAG-RT とのインターフェースを定義する XML ファイル(.xml 拡張子)
JMAG-RT入力ファイル	JMAG-RT データファイル(.rtt 拡張子) .xml ファイルと .rtt ファイルは同じディレクトリ内におく必要があります
JMAGケーステキスト	ユーザが自由にコメントを記述できます
端子名	ブロックのノード名称

MagCoupler-RT モジュールでは、電気ノード(A、B、C、A+、A-、B+、B-、C+、C-、D+、D-)はブロックの上部に配置されます。ローターシャフトノード(M+, M-)はブロックの左右に配置されます。

電気ノード、ローターシャフトノード、および PSIM と JMAG-RT データファイルとのインターフェースはネットリスト XML ファイルで定義されています。このファイルは XML 形式で、JMAG-RT マネージャによって生成されます。このファイルを指定するにはモジュールを右クリックし、パラメータ設定ウィンドウにて".xml"ファイルを参照してください。

このファイル内の"NetlistElement"には、使用する MagCoupler-RT ブロックのタイプごとに決められた名称を設定して下さい。それぞれのブロックの名称は以下の通りです。

- 三相 PMSM "PM Synchronous Machine"
- 二相ステッピングモータ "Step Machine"
- リニア同期モータ "Linear Synchronous Machine"
- リニアソレノイド "Linear Solenoid"

例として、PMSM のネットリスト XML ファイルの最初の数行は、以下のように記述します。

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8" ?>
<CircuitElement file="imp.rtt" name="MagCoupler-RT">
<NetlistElement type="JMAGRT" element="PM Synchronous Machine" pole_number="4">
```

JMAG-RT 入力ファイルは JMAG 上でシミュレーションし作成した JMAG-RT データファイルです。このファイルは、".rtt"拡張子を持ちます。".rtt"ファイルおよび".xml"ファイルは同じディレクトリにおく必要があります。

JMAG ケーステキストはユーザが自由にコメントを記述することが可能です。

端子名はインタフェースノードの名前となります。ブロック上部の電気ノード(A、B、C)は主回路と接続され、ブロックの左右のローターシャフトノード(M+, M-)は機械系と接続されます。

三相 PMSM のパラメータは以下の通りです。

パラメータ	機能
shaft1_MomentofInertia	モータの慣性モーメント(kg* m ²)
shaft1_MechTimeConstant	機械的時定数(sec)
RU_resistance	U 相の抵抗値(Ω)
RV_resistance	V 相の抵抗値(Ω)
RW_resistance	W 相の抵抗値(Ω)
OffsetAngle	初期回転角(°)
coef_inductance	インダクタンス係数(JMAG-RT で使用)
coef_flux	磁束係数(JMAG-RT で使用)

coef_torque	トルク係数(JMAG-RT で使用)
coef_magnet	磁気係数(JMAG-RT で使用)
coef_material	物質係数(JMAG-RT で使用)
turns_coil1	コイル 1 の巻き数(JMAG-RT で使用)
turns_coil2	コイル 2 の巻き数(JMAG-RT で使用)
Current Flag	三相 FEM コイル電流の表示フラグ(1 : 表示、0 : 非表示) 注) 鉄損がある場合、この電流は FEM コイルを流れる電流だけです。全相電流はこの電流と鉄損抵抗 Rloss を流れる電流の合計となります。全相電流をみるためには電流計を外部につけてください。
Back emf Flag	三相 FEM コイルの逆起電力の表示フラグ
Rotor Angle Flag	回転角(°)の表示フラグ
Speed Flag	シャフトの機械的速度(rad/sec)の表示フラグ
Torque Flag	発生したトルク(N*m)の表示フラグ
Power Loss Flag	鉄損がある場合のパワーロスの表示フラグ フラグが設定されると渦電流損失 Ploss_eddy とヒステリシス損失 Ploss_hysterisis が表示されます。
shaft1 Master Flag	モータのマスタ/スレーブフラグ(1 : マスタ、0 : スレーブ)

二相ステッピングモータのパラメータは以下の通りです。

パラメータ	機能
RA+	A+相の抵抗値(Ω)
RA-	A-相の抵抗値(Ω)
RB+	B+相の抵抗値(Ω)
RB-	B-相の抵抗値(Ω)
MomentofInertia	モータの慣性モーメント($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)
MechTimeConstant	機械的時定数(sec)
OffsetAngle	初期回転角(°)
turns_coil2	コイル 2 の巻き数(JMAG-RT で使用)
coef_Inertia1	慣性モーメント 1 の係数
coef_Inertia2	慣性モーメント 2 の係数
Current Flag	三相 FEM コイル電流の表示フラグ(1 : 表示、0 : 非表示)
Back emf Flag	三相 FEM コイルの逆起電力の表示フラグ
Rotor Angle Flag	回転角(°)の表示フラグ
Speed Flag	シャフトの機械的速度(rad/sec)の表示フラグ
Torque Flag	発生したトルク(N*m)の表示フラグ
shaft1 Master Flag	モータのマスタ/スレーブフラグ(1 : マスタ、0 : スレーブ)

リニアソレノイドのパラメータは以下の通りです。

パラメータ	機能
RA	ソレノイドの抵抗値(Ω)
Mass	ソレノイドの質量(kg)
MechTimeConstant	ソレノイドの機械的時定数(sec)
SpringConstant	ソレノイドのバネ定数(JMAG-RT で使用)
DispLimitMax	ソレノイドの変位の上限值(m)
DispLimitMin	ソレノイドの変位の下限値(m)
OffsetDisp	初期値の変位(m)
turns_coil2	コイル 2 の巻き数(JMAG-RT で使用)
coef_mass1	質量 1 係数(JMAG-RT で使用)
coef_mass2	質量 2 係数(JMAG-RT で使用)
Current Flag	三相 FEM コイル電流の表示フラグ(1 : 表示、0 : 非表示)
Back emf Flag	三相 FEM コイルの逆起電力の表示フラグ
Position Flag	ソレノイドの位置(m)の表示フラグ
Velocity Flag	ソレノイドの速度(m/sec)の表示フラグ
Force Flag	発生する力の表示フラグ(N)
mass1 Master Flag	ソレノイドのマスタ/スレーブフラグ(1 : マスタ、0 : スレーブ)

リニア同期モータのパラメータは以下の通りです。

パラメータ	機能
RU	U 相の抵抗値(Ω)
RV	V 相の抵抗値(Ω)
RW	W 相の抵抗値(Ω)
Mass	モータの質量(kg)
ShaftTimeConstant	機械的時定数(sec)
OffsetDisp	初期値の変位(m)
coef_inductance	インダクタンス係数(JMAG-RT で使用)
coef_flux	磁束係数(JMAG-RT で使用)
coef_force	トルク係数(JMAG-RT で使用)
coef_magnet	磁気係数(JMAG-RT で使用)
coef_material	物質係数(JMAG-RT で使用)
turns_coil1	コイル 1 の巻き数(JMAG-RT で使用)
turns_coil2	コイル 2 の巻き数(JMAG-RT で使用)
coef_mass1	質量 1 係数(JMAG-RT で使用)
coef_mass2	質量 2 係数(JMAG-RT で使用)
Current Flag	三相 FEM コイル電流の表示フラグ(1 : 表示、0 : 非表示)
Back emf Flag	三相 FEM コイルの逆起電力の表示フラグ
Position Flag	位置(m)の表示フラグ
Velocity Flag	速度(m/sec)の表示フラグ
Force Flag	発生する力の表示フラグ(N)
mass1 Master Flag	モータのマスタ/スレーブフラグ(1 : マスタ、0 : スレーブ)

前記のうち、フラグ(current flag, back emf flag, rotor angle/position flag, speed/velocity flag, torque/force flag, and master flag)を除くすべてのパラメータは XML ファイルで定義された.rtt ファイ

ルから読み取ることができます。表中のすべてのパラメータは PSIM 側で変更することができます。また、"JMAG-RT で使用"と書かれたパラメータを PSIM 側で変更した場合、変更後の値は JMAG-RT に送られません。

MagCoupler-RT のサンプル回路が"examples/MagCoupler-RT"フォルダ内に用意されています。

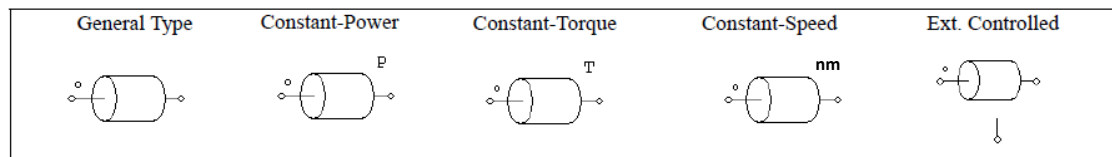
4.9 機械素子及びセンサ (Mechanical Elements and Sensors)

この章では Motor Drive Module、MagCoupler Module、MagCoupler-RT Module に共通する素子について説明します。これらの素子には、機械負荷、ギアボックス、メカニカル・カップリング・ブロック、機械系－電気系インターフェースブロック、および様々な速度/トルク/ポジションセンサが含まれます。

4.9.1 機械負荷 (Mechanical Loads)

PSIM には機械負荷モデルが標準で備わっています。一般負荷、定トルク負荷、定電力負荷、定速度負荷、及び外部コントロール負荷です。

シンボル



仕様 一般的負荷 (General Type)

パラメータ	機 能
定トルク項 T_c	トルク定数 $T_{const}(N*m)$
K1(係数)	一次項の係数
K2(係数)	二次項の係数
K3(係数)	三次項の係数
慣性モーメント	負荷の慣性モーメント $(kg*m^2)$

一般的負荷は次のように表されます。

$$T_L = \text{sign}(\omega_m) \cdot (T_c + k_1 \cdot |\omega_m| + k_2 \cdot \omega_m^2 + k_3 \cdot |\omega_m|^3)$$

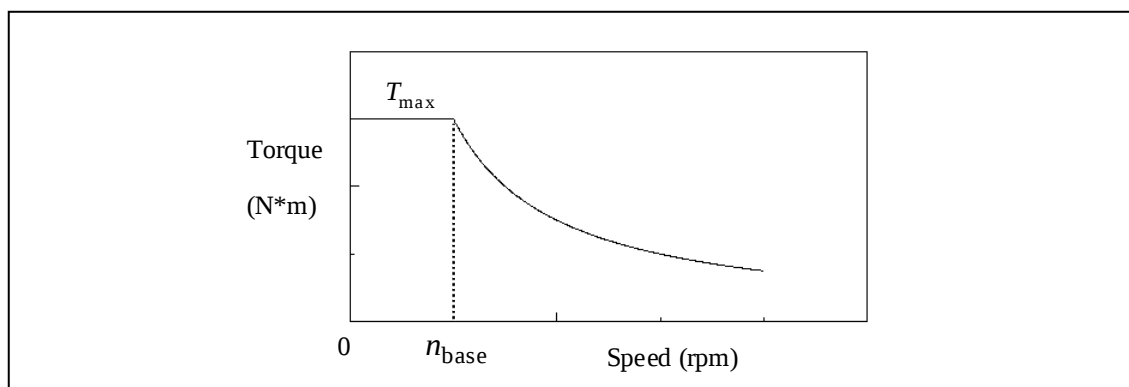
ここで ω_m は機械速度 (rad/sec) です。

一般的負荷のトルクは回転方向に依存することにご注意ください。

仕様 定電力負荷 (Constant-Power Load)

パラメータ	機 能
最大トルク	負荷の最大トルク $T_{max}(N*m)$
基準速度	負荷の基本速度 (n_{base}) (rpm)
慣性モーメント	負荷の慣性モーメント $(kg*m^2)$

定電力負荷のトルク-速度曲線は以下のようになります。



機械速度が基準速度 n_{base} 以下のとき、負荷トルクは

$$T_L = T_{\max}$$

機械速度が基準速度 n_{base} 以上のとき、負荷トルクは

$$T_L = \frac{P}{|\omega_m|}$$

ここで、 $P = T_{\max} * \omega_{\text{base}}$ および $\omega_{\text{base}} = 2\pi * n_{\text{base}} / 60$ です。

機械系の回転速度 ω_m は rad/sec で表されています。

仕様 定トルク負荷 (Constant-Torque Load)

パラメータ	機能
トルク定数(rpm)	トルク定数 T_{const} (N*m)
慣性モーメント	負荷の慣性モーメント(kg*m ²)

機械系の基準方向が、ドットのついた端子に入る場合は、負荷は基準方向に沿っており、マスタモータに対する負荷トルクは T_{const} です。そうでない場合、負荷トルクは $-T_{\text{const}}$ です。詳細な説明は 4.6.1 を参照してください。

定トルク負荷は次のように表されます。

$$T_L = T_{\text{const}}$$

この場合、負荷トルクは回転方向に依存しません。

仕様 定速度負荷 (Constant-Speed Load)

パラメータ	機能
速度定数(rpm)	速度定数(rpm)
慣性モーメント	負荷の慣性モーメント(kg*m ²)

定速度負荷では機械系の回転速度を指定します。速度は速度定数に指定したとおりの一定速度になります。

仕様 外部制御負荷(Externally-Controlled Load)

パラメータ	機能
速度フラグ	速度依存性のフラグ Flag =0 のとき、負荷は摩擦方向(回転を妨げる方向)に働きます。 Flag =1 のとき、負荷は回転方向に依存しません。
慣性モーメント	負荷の慣性モーメント、kg*m ²

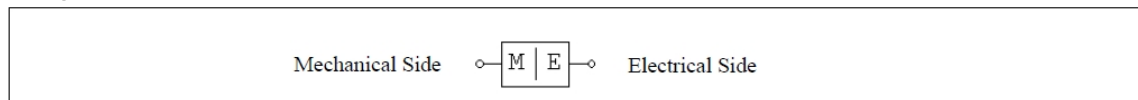
外部制御負荷は、負荷量を制御ノードから任意に設定するために使用します。

機械負荷の大きさは制御ノードの電圧値(1V は 1 N*m に対応する)によって定義されます。このノードは制御回路として取扱います。

4.9.2 機械系－電気系インターフェースブロック (Mechanical-Electrical Interface Block)

このブロックを使うことにより機械系の内部等価回路にアクセスできます。

シンボル



仕様

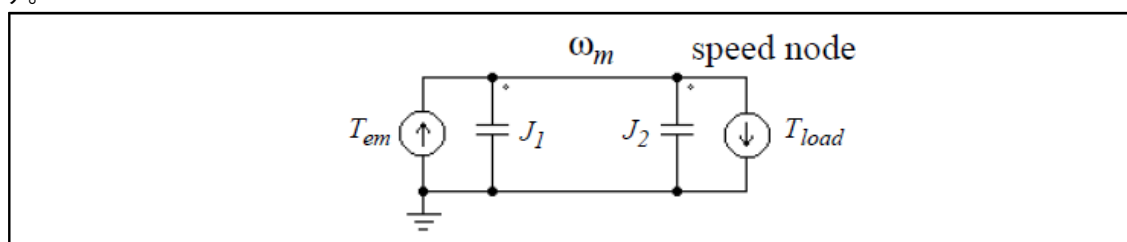
パラメータ	機能
マスタ/スレーブフラグ	マスタ/スレーブモードのフラグ(1: マスタ, 0: スレーブ)

モータと同じように機械系－電気系インターフェースブロックはマスタ/スレーブモードのフラグにより基準方向を指定することができます。インターフェースブロックをマスタに設定すると、基準方向は機械軸に沿って機械系の端子から残りの機械系の素子に向かっての方向になります。ひとつの機械系の中ではインターフェースブロックはひとつだけマスタに設定できます。マスタ/スレーブフラグの詳細については「4.6.1 機械システムでの「基準方向」(Reference Direction of Mechanical Systems)」を参照してください。

駆動系は 1 台のモータ(発生トルク T_{em} および慣性モーメント J_1)と機械負荷(負荷トルク T_{load} と慣性モーメント J_2)からなると仮定すると機械系の運動方程式は次のようになります。

$$(J_1 + J_2) \cdot \frac{d\omega_m}{dt} = T_{em} - T_{load}$$

ここで、 ω_m は機械軸の回転速度です。PSIM では、この方程式は以下に示す等価回路でモデル化されています。

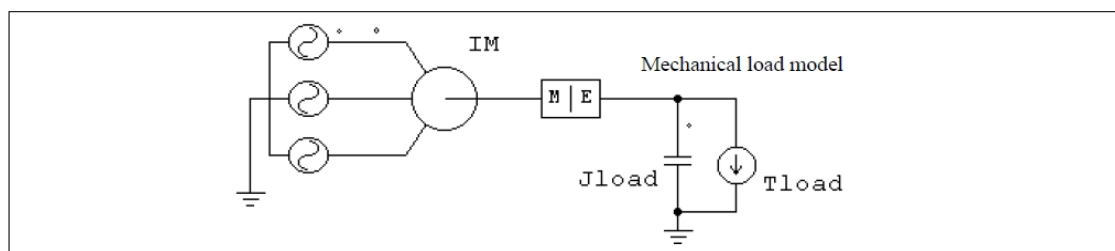


この回路では、2つの電流源を T_{em} と T_{load} の値に設定し、キャパシタで J_1 と J_2 を表現しています。また、ノード対地電圧(速度ノード電圧)は機械系の回転速度 ω_m に対応します。これは $C = J_1 + J_2, V = \omega_m, i = T_{em} - T_{load}$ とすればキャパシタの方程式 $C \cdot dV/dt = i$ に等価です。

PSIM では、モータと機械負荷を表す等価回路はキャパシタに基づく回路モデルを使っています。機械系－電気系インターフェースブロックを使えば、この機械系の等価回路の内部にアクセスすることができます。機械系－電気系インターフェースブロックの機械系側(MECH の表示)が機械軸に接続されると、電気系側(ELEC の表示)は機械系等価回路の速度ノードに対応します。そこでどのような電気回路もこの端子に接続することができます。このブロックを使えば、PSIM 内蔵モータや機械負荷をユーザが作成した負荷やモータにつながることができます。

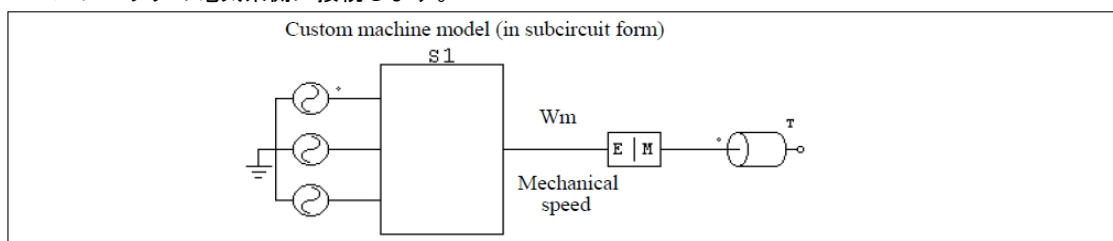
例：カスタム負荷モデルと誘導機

以下の図にユーザが定義した機械負荷を機械系－電気系インターフェースブロックで誘導機モデルに接続した例を示します。すでに示したように、電気系側の端子電圧は機械軸の回転速度を示します。また、この端子に接続したキャパシタは慣性モーメントを示します。



例：カスタムモータモデルと定トルク機械負荷

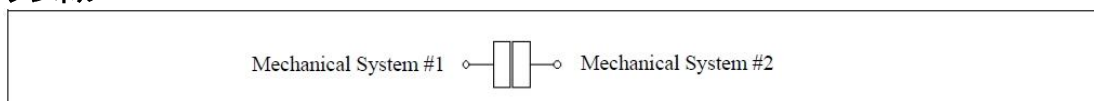
上の例とは逆に、ユーザが作成したカスタムモータモデルを PSIM ライブラリの機械負荷につなげることができます。下の図にその例を示します。カスタムモータは上記キャパシタの等価回路の考え方を使って、機械系の運動方程式をモデル化しています。機械系の回転速度を表すノードは機械系－電気系インターフェースブロックの電気系側に接続します。



4.9.3 メカニカルカップリングブロック (Mechanical Coupling Block)

2つの機械システムをつなぐためにメカニカルカップリングブロックが使用されます。

シンボル

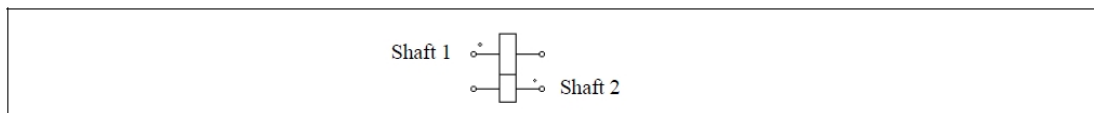


このブロックは両方の機械システムがマスタモードのデバイスを持っている状況で使用されます。機械システムを形成するためにはそれらを一緒に接続する必要がありますが、PSIM の機械システムでは 1 台のマスタモードのデバイスしか持つことができません。この場合中間にメカニカルカップリングブロックを追加することで解決できます。

4.9.4 ギアボックス (Gear Box)

ギアボックスのシンボルを以下に示します。

シンボル



仕様

パラメータ	機能
ギア比	ギア比 a
シャフト 1 マスタ/スレーブフラグ	シャフト 1 のマスタ/スレーブフラグ
シャフト 2 マスタ/スレーブフラグ	シャフト 2 のマスタ/スレーブフラグ

より大きいドット付きシャフトがシャフト 1 です。

1 段目と 2 段目のギアの歯数をそれぞれ n_1 および n_2 とすると、ギア比は $a = n_1 / n_2$ となります。

ここで、2つのギアの半径、トルク、回転速度をそれぞれ $r_1, r_2, T_1, T_2, \omega_1, \omega_2$ とすると、次の関係が成り立ちます。

$$T_1 / T_2 = r_1 / r_2 = \omega_2 / \omega_1 = a$$

二つのシャフトのうちいずれかをマスタモード、他方をスレーブモードとして設定できます。Master/Slave Flag 設定の詳細については、「4.6.1 機械システムでの「基準方向」(Reference Direction of Mechanical Systems)」を参照下さい。

4.9.5 速度・トルクセンサ (Speed/Torque Sensors)

機械系の速度とトルクを測定するために、速度センサとトルクセンサが用意されています。

シンボル

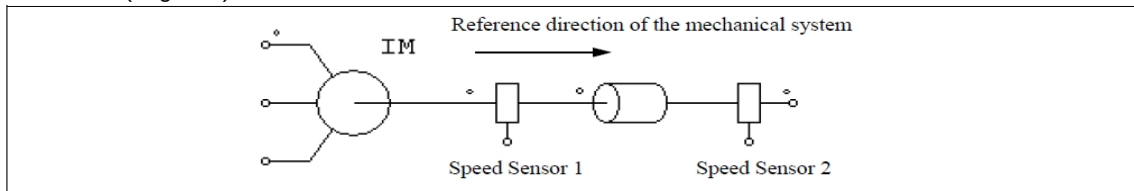


仕様

パラメータ	機 能
ゲイン	センサのゲイン

機械系の基準方向がドットの側からセンサに入っていく方向であるとする、センサは基準方向に沿っていると言えます。基準方向の詳細は「4.6.1 機械システムでの「基準方向」(Reference Direction of Mechanical Systems)」を参照してください。なお、速度センサの出力は rpm です。

以下の図で速度センサ 1 は基準方向に沿っており、速度センサ 2 は基準方向の逆向きに付いています。モータが正方向に回転している場合、速度センサ 1 の出力は正の値(positive)を読み出し、速度センサ 2 の出力は負の値(negative)を読み出します。

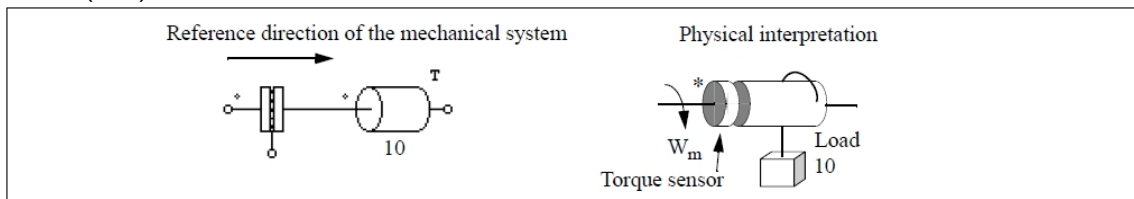


トルクセンサはセンサのドットが付いた端子とドットが付いていない端子との間のトルク差を計測します。この機能を、下図を使って説明します。

左側の図は 10(N*m)の負荷が付いたトルクセンサで、機械系の基準方向は左から右へ向かう方向です。右図は実際のシステムに置き換えた場合を示しています。

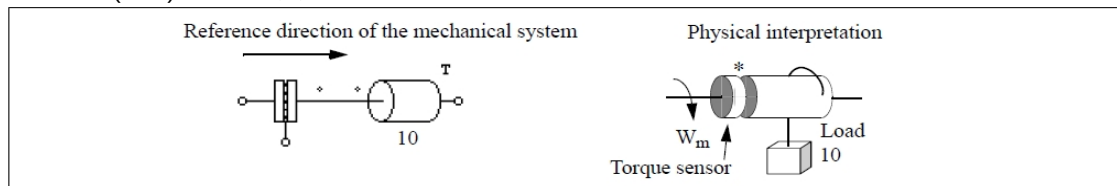
このケースでは、正方向の回転とトルクは時計回りの方向になります。センサのドットの付いた方向は左側にあり、負荷はシャフトを減速させる働きをします(負荷トルクは反時計回りの方向になります)。

トルクセンサは、センサのドット側が接続されていない場合ドットの付いていない側のトルクテンションを計測し、センサ出力が正の値であればトルクが速度の基準方向と反対であることを意味します。したがって、下図の例では、正方向の回転は時計回りであり、負荷トルクは反時計回りになります。またトルク値は 10(N*m)となります。

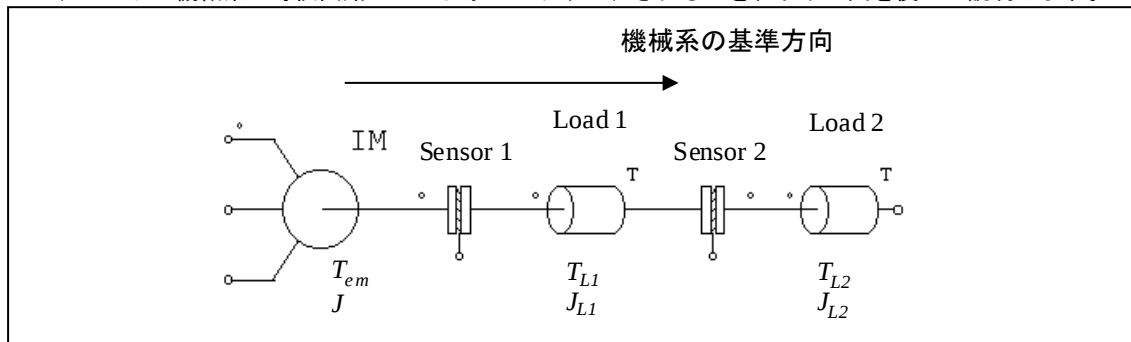


同様に、ドット側が接続されているとき、センサはドット側のトルク強度を計測し、回転速度方向は正方向となります。例として、以下の図のように左右が反転しているトルクセンサを考えます。ドット側が接

続されているとき、負荷トルクはセンサのドット側に回転速度方向と逆向きにかかります。トルクセンサ出力は-10(N*m)になります。



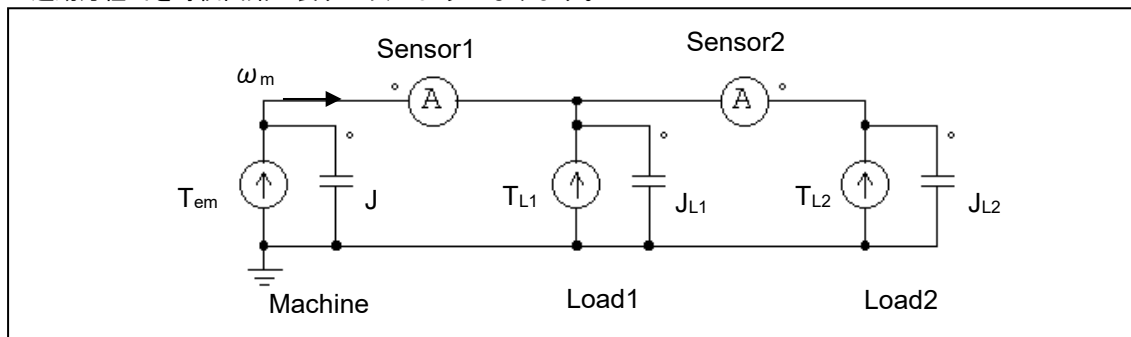
トルクセンサが機械系の等価回路でどのようにモデリングされるかを、以下の図を使って説明します。



この機械系は 1 つのモータ、2 つのトルクセンサ、2 つの負荷からなります。モータと負荷のトルク(T)と慣性モーメント(J)は図に示すとおりです。基準方向はこの場合、左から右です。この系の運動方程式は次のようになります。

$$(J + J_{L1} + J_{L2}) \cdot \frac{d\omega_m}{dt} = T_{em} - T_{L1} - T_{L2}$$

この運動方程式を等価回路で表すと次のようになります。



等価回路のノード電圧が機械系の速度 ω_m に対応します。左側の電流プローブがトルクセンサ 1(Sensor 1)の出力に相当します。同様に、右側の電流プローブはトルクセンサ 2(Sensor 2)の計測値を示します。右側の電流プローブは極性が反転していることに注意してください(右から左)。これはトルクセンサ 2 が機械系の基準方向と反対の方向を計測しているからです。

等価回路により機械出力が伝わる様子もわかります。電圧と電流の積を取ることで、トルクと回転速度の積をとったことと同等になり、これは機械出力に相当します。出力が正ならば、回転速度と同じ方向に伝われます。

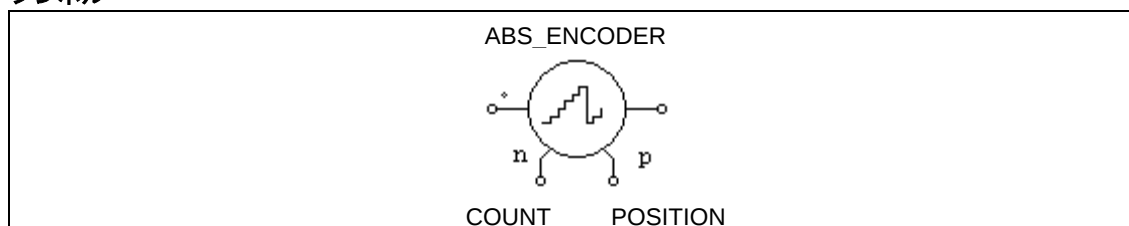
4.9.6 位置センサ (Position Sensors)

位置センサとして、アブソリュートエンコーダ、インクリメンタルエンコーダ、レゾルバとホールセンサの 4 種類が提供されています。これらのセンサは速度センサ、トルクセンサと同様に、機械的なシャフトに接続されていて、その出力は電圧信号(電圧プローブを接続すると波形表示できます)であり、また制御信号になります。

4.9.6.1 アブソリュートエンコーダ (Absolute Encoder)

アブソリュートエンコーダは 360°(機械角)の範囲におけるシャフトの位置を出力する位置センサです。

シンボル



仕様

パラメータ	機 能
初期値(°)	シャフト位置の初期値 (deg.)
ビット数	分解能のビット数 N

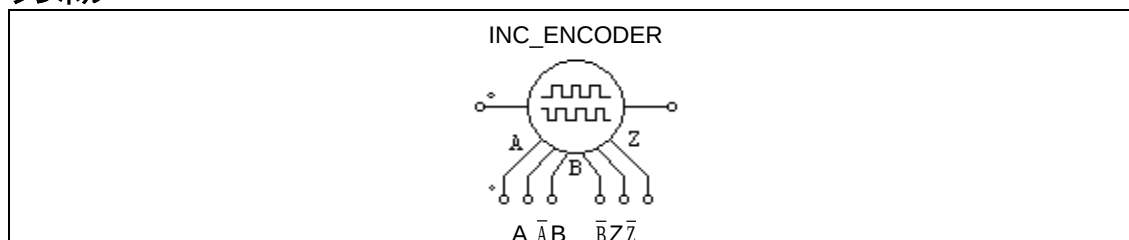
エンコーダの出力の分解能はビット数 N によって決定されます。エンコーダからはカウント数(範囲は 0 から 2^N-1)と、位置としての機械角(範囲は 0 から 360°)が出力されます。

アブソリュートエンコーダを使った例として永久磁石同期機ドライブシステムのサンプルファイル "Absolute Encoder PMSM Drive.sch" に示しています。

4.9.6.2 インクリメンタルエンコーダ (Incremental Encoder)

インクリメンタルエンコーダは速度、位相角とシャフトの方向を示すパルス信号を出力します。

シンボル



仕様

パラメータ	機 能
初期値(°)	シャフト位置の初期値 (deg.)
ライン数	1 回転あたりのパルス数

出力信号 A, B はパルス出力であり、A が B に対して 90°位相が進んでいます。また、Z は基準位置信号であり、通常は 0 が出力され、シャフト角度が 0 になったときに 1 が出力されます。 $\bar{A}$, $\bar{B}$, $\bar{Z}$ はそれぞれ A, B, Z を反転した信号です。

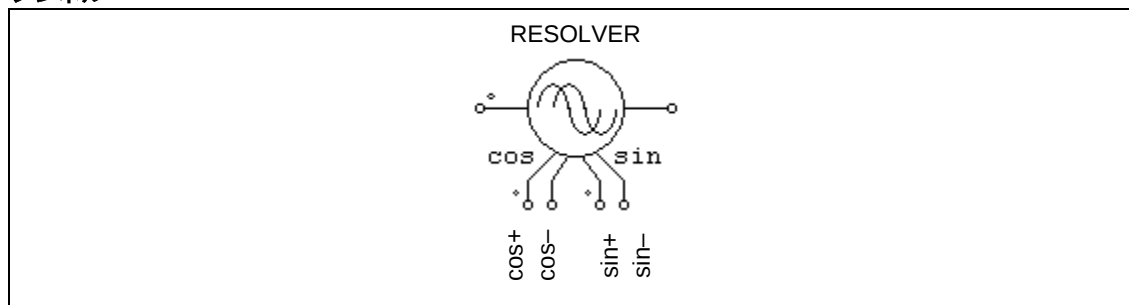
インクリメンタルエンコーダを使った例として誘導機ドライブシステムのサンプルファイルを "Incremental Encoder INDM Drive.sch" に示しています。

4.9.6.3 レゾルバ (Resolver)

レゾルバは主に一つの回転子巻線と二つの固定子巻線を持つ回転式変圧器です。二つの固定子巻線は COS 巻線と SIN 巻線と呼ばれ、互いに 90°離れています。

シャフトが回転すると、COS 巻線と SIN 巻線の出力電圧はシャフトの角度に対して $\cos$ と $\sin$ の関数として変化します。

シンボル



仕様

パラメータ	機 能
初期値(°)	シャフト位置の初期値 (deg.)
極数	レゾルバの極数

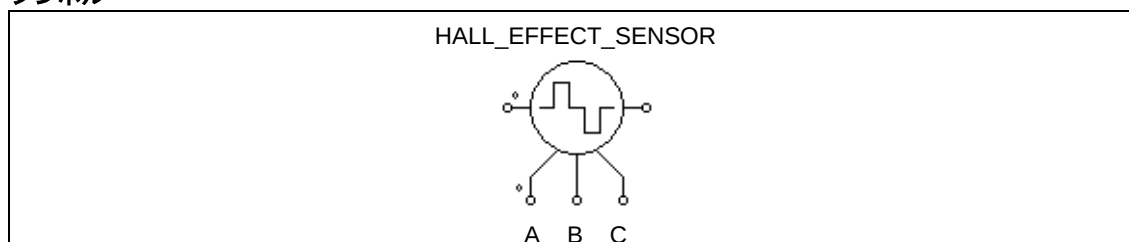
レゾルバは 4 つの出力、それぞれが $\cos+$ 、 $\cos-$ ($\cos+$ の反転)、 $\sin+$ 、 $\sin-$ ($\sin+$ の反転)を持っています。すべての出力のピーク値は 1 です。

レゾルバを使った PMSM ドライブシステムの例を、サンプルファイル"Resolver PMSM Drive.sch"に示しています。

4.9.6.4 ホールセンサ (Hall Effect Sensor)

ホールセンサはシャフトの位置に依存する三つのパルス信号を出力する位置センサです。このセンサは一セットの半導体スイッチとトリガ磁石によって構成されています。磁場の強さが閾値より高い時、或いは低い時に半導体スイッチは開放或いは導通の状態に変わります。

シンボル



仕様

パラメータ	機 能
初期値(°)	シャフト位置の初期値 (deg.)
極数	センサの極数

ホールセンサは三つのロジック信号 A,B と C を出力します。それぞれの信号は電気角的に 120°離れています。

ホールセンサはブラシレス直流機に内蔵されているホールセンサと同等です(一般的なホールセンサ IC の出力と異なり、出力を直接ブラシレス直流機の駆動に使用できるようになっています)。

ホールセンサを使ったブラシレス直流機ドライブシステムの例として、サンプルファイル"Hall-Effect Sensor BDCM_Drive.sch" を提供しています。

4.10 サーマルモジュール (Thermal Module)

サーマルモジュールはPSIMソフトウェアのアドオン・モジュールです。半導体デバイス(ダイオード、IGBTおよびMOSFET(SiCを含む)とGaN)の損失をインダクタのコア及び巻き線損失と同様に計算することができます。

損失は電流として出力されます。温度上昇値を知るためには熱抵抗($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)の値を抵抗素子で模擬します。抵抗の電圧降下が温度上昇値になります。

サーマルモジュールのコアはデバイスデータベースです。PcdEditor.exeというデバイスデータベースエディタを利用して、データベースへ新しいデバイスを加えることができます。データベースを容易に管理することも可能です。デバイスのデータベースは損失計算のためにシミュレーションで使用されます。

データベースのデバイスをシミュレーションで使用する方法和、損失を計算する方法を以下に示します。

- ー デバイスのビヘイビアモデルをシミュレーションで使用します。ビヘイビアモデルは、動特性(ターンオンおよびターンオフの過渡現象)ではなく、デバイスの静特性(順方向電圧降下またはオン抵抗など)を考慮に入れます。インダクタのビヘイビアモデルは理想インダクタです。
- ー 計算された電圧、電流及び温度に基づいて、PSIMはデバイスデータベースにアクセスし、導通損失あるいはスイッチング損失を計算します。デバイスの静特性は次のシミュレーションのために更新されます。インダクタの場合もPSIMはデバイスデータベースにアクセスし、コアと巻き線の損失を計算します。
- ー スwitchング損失計算ではスイッチング前後の瞬時の電圧電流値が使用されています。ハードスイッチングでのデバイス動作に対してはスナバ回路があると電圧電流波形が変わり測定値が変わるため計算結果にも影響し正しくない結果となります。Thermal Moduleの損失計算を使用する場合はスナバ回路を一旦無効にすることをお勧めします。回路上の素子(スナバ回路など)を一時的に無効化したい場合は、素子上にカーソルを合わせて、右クリックで表示されるメニューから無効を選択すると、無効状態(接続されていない)になります(有効に設定し直す事で元に戻ります)。

インダクタの損失計算は材質の特性を考慮しています(例えばコアの材質、形状、巻線タイプ、サイズ、エアギャップ等)

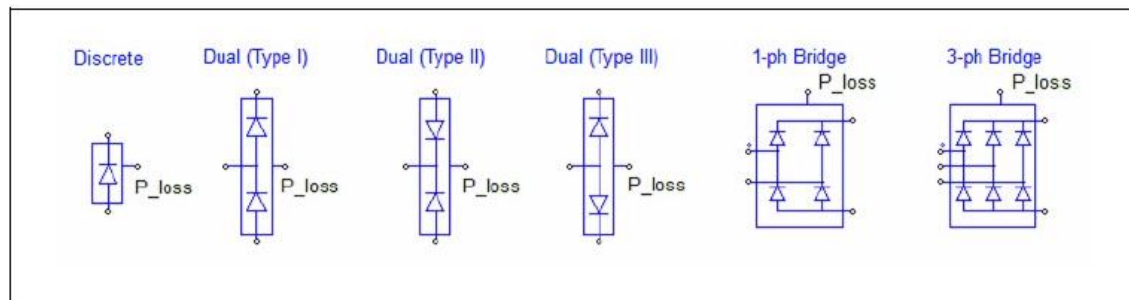
注) 損失計算は近似値であり、結果の精度は、デバイスデータの精度、ならびに実際の回路動作条件にデバイスのテスト条件からの結果の適切なスケールに依存することに留意してください。シミュレーションによる損失計算結果とハードウェアから測定した結果を常に検証する必要があります。

4.10.1 ダイオードサーマルモデル (Diode Thermal Model)

4.10.1.1 ダイオード損失計算 (Diode Loss Calculation)

損失計算はシミュレーションでデータベースのダイオードデバイスを選択して使用することができます。サーマルモジュールのライブラリのダイオードデバイスには次のパラメータがあります。

シンボル



ダイオードモジュールの横や上についている追加のノード P_{loss} は総損失用のノードです。

仕様

パラメータ	機能
Device	デバイスデータベースから選択された特定デバイス
並列デバイス数	並列に接続された同一のダイオードの個数
周波数	損失が計算される周波数(Hz)
Pcond校正係数	導通損失 P_{cond} の補正係数 K_{cond}
Psw 校正係数	スイッチング損失 P_{sw} の補正係数 K_{sw}
Operation Mode	このフラグは3つのDualTypeのパッケージにだけ使用されます。 0 : 対称の場合 2つのデバイスで電力損失は等しいとされ ジャンクション温度は同じとみなされます。 1 : 個別の場合 各デバイスの電力損失とジャンクション温度は 個別にシミュレーションされます。 その他のパッケージではこのOperation Modeは0のみです。
Initial Tj	初期ジャンクション温度(°C)
Initial Ploss	初期総電力損失 (W)
Tj Flag	ダイオードのジャンクション温度Tjモニタ用フラグ
Ploss Flag	ダイオードの全損失 (Ploss) モニタ用フラグ(1:表示/0:非表示)
Current Flag	ダイオードの電流モニタ用フラグ(1:表示/0:非表示)
Voltage Flag	ダイオードの電圧モニタ用フラグ(1:表示/0:非表示)

パラメータ 周波数は損失が計算される周波数です。

例えば、デバイスが 10kHz のスイッチング周波数で作動して、パラメータ 周波数が 10kHz に設定されると、損失はスイッチング周期の値になります。

しかしながら、パラメータ 周波数が 60Hz に設定されると、損失は 60Hz 周期の値になります。

パラメータ Pcond校正係数はトランジスタ導通損失のための修正率です。修正の前に計算された導通損失は P_{cond_cal} より、

$$P_{cond} = K_{cond} * P_{cond_cal}$$

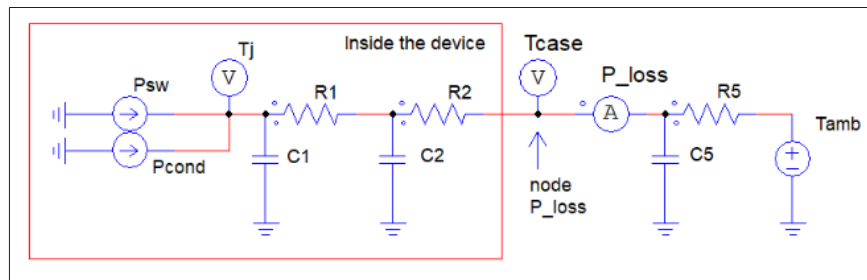
同様に、パラメータ Psw校正係数はトランジスタ・スイッチング損失のための修正率です。修正の前に計算されたスイッチング損失が P_{sw_cal} なら、

$$P_{sw} = K_{sw} * P_{sw_cal}$$

複数の同一な動作をするダイオードが並列に接続される場合、回路図上にダイオードブロックを 1 つだけ設置し、パラメータにデバイスの個数を設定してください。同一のデバイスブロックが回路内で複数個並列接続されている場合、シミュレーション中で僅かな差が発生し、それが原因となりデバイスの電流が正確に一致しない可能性があります。

並列デバイス数が 1 より大きい値に設定されている場合、並列接続されているデバイスを流れる電流は、各デバイスに均等に分割されて流れるようになります。よって合計損失は各デバイスの損失を並列デバイス数の値で乗算して算出されます。出力端子 P_loss から流れる電流は、並列接続されている全てのデバイスの合計損失になります。

次図はダイオードの熱等価回路です。赤枠内がサーマルモジュールのデバイスに含まれている部分となります。R1,C1,R2,C2 は熱等価回路の素子で、値はデバイスデータベースエディタ (PcdEditor) の「熱特性」で定義されます。



前図の導通損失端子 P_cond またはスイッチング損失端子 P_sw の電圧は、算出されたダイオードのジャンクション温度 T_j を表し、データベースの曲線から損失を算出する際に使用されます。ノード P_loss の電圧 Tcase はデバイスのケース温度を表しています。デバイスが内部熱回路を持たない場合は T_j は T_{case} となるので、外部に熱等価回路を構築する必要があります。

算出された T_j が二つの曲線のジャンクション温度の間にある場合、値の補間をします。算出された T_j が曲線の最低より低い場合、最高より高い場合は外挿値を使用します。曲線が一つだけの場合は、その曲線は算出された T_j に関係なく使用されます。

導通損失

ダイオード導通損失は次のように計算されます。

$$P_{cond} = V_d * I_F$$

ここで、 V_d はダイオード電圧降下、及び I_F はダイオード順電流です。ダイオードがデューティサイクル D で周期的に導通する場合には、同損失は以下の通り計算されます。

$$P_{cond} = V_d * I_F * D$$

スイッチング損失

スイッチング損失を計算する際に、ダイオードのターンオン損失は無視され、考慮されません。逆回復によるダイオードターンオフ損失は次のように計算されます。

$$P_{sw_off} = E_{rr} * f * V_R / V_{R_datasheet}$$

または

$$P_{sw_off} = 1 / 4 * Q_{rr} * V_R * f$$

ここで、 E_{rr} は逆方向回復エネルギー損失、 Q_{rr} は逆方向回復電荷量、 V_R は逆阻止電圧、そして f は入力パラメータ 周波数 で定義された周波数です。 V_R は実際の逆素子電圧、 $V_{R_datasheet}$ はデータシートの E_{rr} 特性の逆阻止電圧で、テスト条件で逆素子電圧として定義されています。

Q_{rr} が 1 ポイントで定数として与えられている場合は損失計算は次のように電流 I_F に基づいてスケールされます。

$$P_{sw_off} = 1 / 4 * Q_{rr} * V_R * f * I_F / I_{F_datasheet}$$

ここで $I_{F_datasheet}$ は Q_{rr} 、 t_{rr} が含まれているテスト条件電流です。

逆方向回復電荷量 Q_{rr} は以下のように定義されます。

$$Q_{rr} = 1/2 * t_{rr} * I_{rr}$$

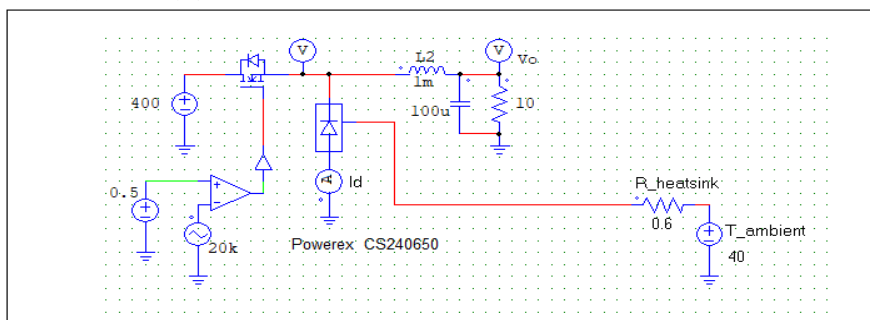
E_{rr} がデバイスデータベースに与えられているならば、それを基に損失の計算をします。もし E_{rr} が与えられていないが、 Q_{rr} がデバイスデータベースで与えられる場合、損失は Q_{rr} に基づいて計算されます。しかし Q_{rr} も与えられないとき、損失は t_{rr} と I_{rr} に基づいて計算されます。それら両方とも与えられなければ、損失は 0 とみなされます。

導通損失 P_{cond} とスイッチング損失 P_{sw} の合計損失 P_{loss} の単位はワットで、損失ノード P_{loss} から流れる電流の形で表されます。ノードが外部回路に接続されていない場合はフローティングにできないため GND へ接続してください。

例：ダイオード損失計算

次の回路は、Powerex のディスクリットダイオード CS240650(600V、50A)を使用するサンプル回路です。

損失の情報が得られたら、熱等価回路を構築することにより、デバイスのジャンクション温度を計算することができます。このジャンクション温度はフィードバックされ、損失の計算に使用されます。熱の過渡現象を考慮しない熱回路です。



4.10.1.2 データベースのダイオードデバイス (Diode Device in Database)

データベースには以下のダイオードデバイスの情報が定義されています。

一般情報

Manufacturer	デバイスメーカー
Part Number	メーカーの部品番号
Package	ディスクリットパッケージ、デュアルパッケージ、三相ブリッジパッケージ
TO-220やTO-247等のパッケージスタイルはデバイスデータベースのパッケージにある“スタイル”で設定できます。	

絶対最大定格

$V_{rrm,max}$ (V)	ピーク逆方向阻止電圧
$I_{F,max}$ (A)	最大直流電流
$T_{j,max}$ (°C)	最大ジャンクション温度

電气的特性

V_d vs. I_F	順方向導通電圧降下 V_d vs. 順方向電流 I_F
t_{rr} vs. I_F	逆方向回復時間 t_{rr} vs. 電流 I_F

I_{rr} vs. I_F	ピーク逆方向回復電流 I_{rr} vs. 電流 I_F
Q_{rr} vs. I_F	逆方向回復電荷量 Q_{rr} vs. 電流 I_F
E_{rr} vs. I_F	逆方向回復電力損失 E_{rr} vs. 電流 I_F

熱特性

Type:	内部熱等価回路網のモデルタイプ、CauerかFosterを選択できます。
No. of Stages	内部熱等価回路のR-Cの段数
Ri	i番目の抵抗値 (Ω)
Ci	i番目の容量値 (F)

寸法と質量

Length (mm)	デバイスの長さ、mm
Height (mm)	デバイスの高さ、mm
Weight (g)	デバイスの質量、g

Err対vs. I_F 特性の「Reverse blocking voltage VR (V)」定数が損失の計算に利用されるので、正しい値を入れてください。

絶対最大定格、熱的特性、寸法と質量の情報は損失計算には使用されません。
また、ダイオードの順方向導通電圧降下 V_d は順方向電流 I_F により変化します。次のシミュレーションのために電圧降下値は更新されます。

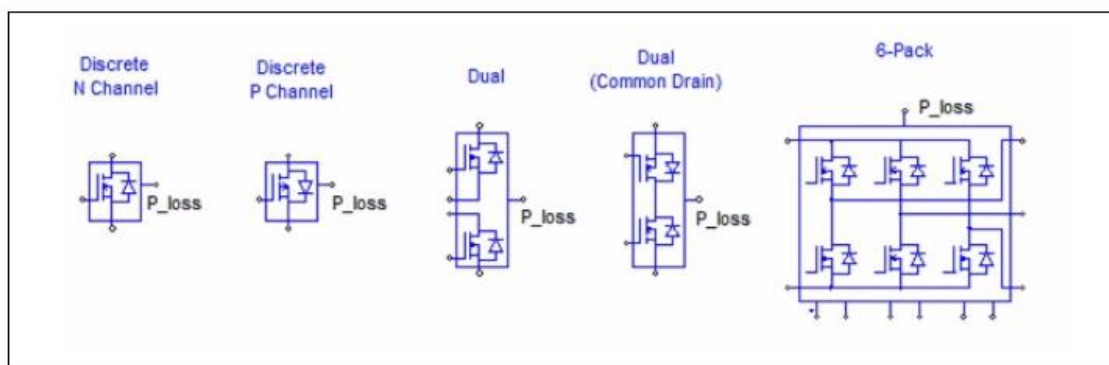
4.10.2 MOSFET サーマルモデル (MOSFET Thermal Model)

MOSFET の損失計算には 2 つのタイプのデバイスが用意されています。

- ・ MOSFET(database) メーカーデータシートでスイッチングのターンオン/ターンオフエネルギー損失の E_{on}, E_{off} が提供されていない場合。
- ・ MOSFET(E_{on})(database) メーカーデータシートでスイッチングのターンオン/ターンオフエネルギー損失の E_{on}, E_{off} が提供されている場合。
SiCMOSFET や GaN デバイスの損失計算にも使用できます。

4.10.2.1 MOSFET 損失計算 (MOSFET Loss Calculation)

損失計算にシミュレーションでデータベースの MOSFET デバイスを選択して、使用することができます。
シンボル



デバイス MOSFET(database)の仕様

パラメータ	機能
Device	デバイスデータベースから選択された特定デバイス
並列デバイス数	並列に接続された同一デバイスの個数
周波数	損失が計算される周波数(Hz)
V_{GG+} (上位)	ゲート・ソース間電圧の上位レベル、V
V_{GG-} (下位)	ゲート・ソース間電圧の下位レベル、V
R_{g_on} (turn-on)	ターンオンの時ゲート抵抗
R_{g_off} (turn-off)	ターンオフの時ゲート抵抗。ほとんどの場合、ターンオンゲート抵抗 R_{g_on} とターンオフゲート抵抗 R_{g_off} は同一です。しかし、これらの2つの抵抗は異なる場合もあります。
$R_{DS(on)}$ 校正係数	オン抵抗 $R_{DS(on)}$ の校正係数
g_{fs} 校正係数	順伝達コンダクタンス g_{fs} の校正係数
P_{cond_Q} 校正係数	トランジスタ導通損失 P_{cond_Q} の校正係数 K_{cond_Q}
P_{sw_Q} 校正係数	トランジスタ・スイッチング損失 P_{sw_Q} の校正係数 K_{sw_Q}
P_{cond_D} 校正係数	ダイオード導通損失 P_{cond_D} の校正係数 K_{cond_D}
P_{sw_D} 校正係数	ダイオードスイッチング損失 P_{sw_D} の校正係数 K_{sw_D}
Initial Tj	初期ジャンクション温度 (°C)
Initial Ploss	デバイスの初期損失(W)
Tj_Flag	デバイスのジャンクション温度モニタ用フラグ(1:表示/0:非表示)
Ploss_Flag	デバイスの損失モニタ用フラグ(1:表示/0:非表示)
Current_Flag	デバイスの電流モニタ用フラグ(1:表示/0:非表示)
Voltage_Flag	デバイスの電圧モニタ用フラグ(1:表示/0:非表示)

“デバイス MOSFET(Eon) (database)の仕様

パラメータ	機能
Device	デバイスデータベースから選択された特定デバイス
並列デバイス数	並列に接続された同一デバイスの個数
周波数	損失が計算される周波数(Hz)
R_{g_on} (turn-on)	ターンオンの時ゲート抵抗
R_{g_off} (turn-off)	ターンオフの時ゲート抵抗。ほとんどの場合、ターンオンゲート抵抗 R_{g_on} とターンオフゲート抵抗 R_{g_off} は同一です。しかし、これらの2つの抵抗は異なる場合もあります。
P_{cond_Q} 校正係数	トランジスタ導通損失 P_{cond_Q} の校正係数 K_{cond_Q}
P_{sw_Q} 校正係数	トランジスタ・スイッチング損失 P_{sw_Q} の校正係数 K_{sw_Q}
P_{cond_D} 校正係数	ダイオード導通損失 P_{cond_D} の校正係数 K_{cond_D}
P_{sw_D} 校正係数	ダイオードスイッチング損失 P_{sw_D} の校正係数 K_{sw_D}
Initial Tj_Q	トランジスタ初期ジャンクション温度 (°C)
Initial Tj_D	逆並列ダイオード初期ジャンクション温度 (°C)
Initial Ploss_Q	トランジスタ初期損失 (W)
Initial Ploss_D	逆並列ダイオード初期損失 (W)
Tj Flag	デバイスジャンクション温度モニタ用フラグ(1:表示/0:非表示)
Ploss Flag	デバイス損失モニタ用フラグ
Current Flag	デバイス電流モニタ用フラグ(1:表示/0:非表示)
Voltage Flag	デバイス電圧モニタ用フラグ(1:表示/0:非表示)

パラメータ 周波数は損失が計算される周波数です。例えば、デバイスが 10kHz のスイッチング周波数で動作して、パラメータ 周波数が 10kHz に設定されると、損失はスイッチング周期の値になります。しかしながら、パラメータ 周波数を 60Hz に設定すると、損失は 60Hz 周期の値になります。

パラメータ P_{cond_Q} 校正係数はトランジスタの導通損失の修正係数です。例えば、修正前の算出された導通損失を $P_{cond_Q_cal}$ とすると、以下の式の様になります。

$$P_{cond_Q} = K_{cond_Q} * P_{cond_Q_cal}$$

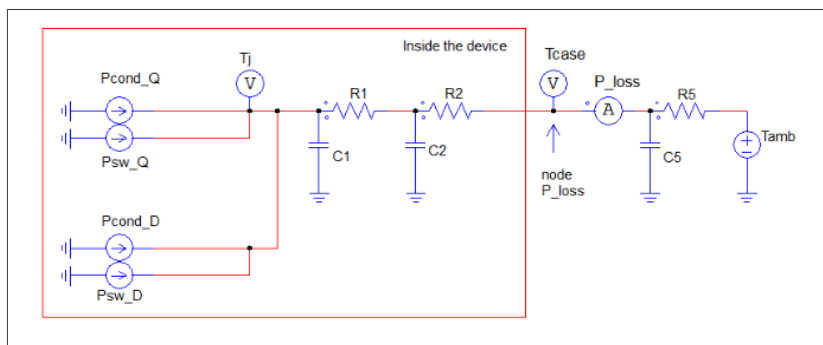
同様に、パラメータ P_{sw_Q} 校正係数はトランジスタのスイッチング損失の修正係数です。例えば、修正前の算出されたスイッチング損失を $P_{sw_Q_cal}$ とすると、以下の式の様になります。

$$P_{sw_Q} = K_{sw_Q} * P_{sw_Q_cal}$$

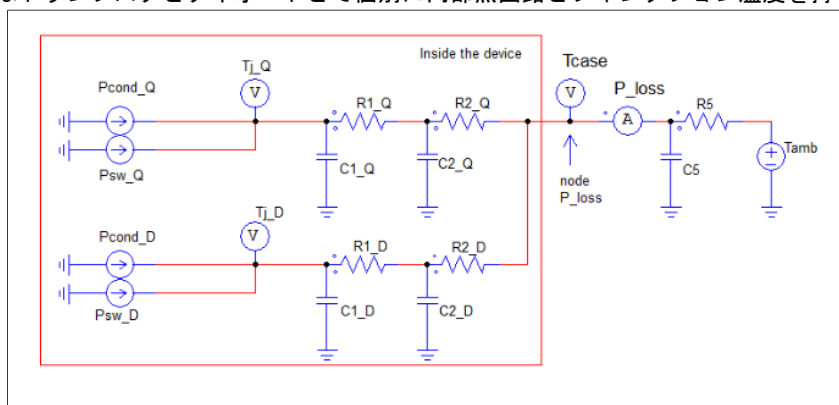
パラメータ P_{cond_D} 校正係数と P_{sw_D} 校正係数はダイオードの損失に対して、同様の働きをします。

複数の同一な動作をする MOSFET デバイスが並列に接続される場合、回路図上に MOSFET ブロックを 1 つだけ設置し、パラメータにデバイスの個数を設定してください。同一なデバイスブロックが回路内で複数個並列接続されている場合、シミュレーション中で僅かな差が発生し、それが原因となりデバイスの電流が正確に一致しない可能性が有るからです。並列デバイス数が 1 より大きい値に設定されている場合、並列接続されているデバイスを流れる電流は、各デバイスに均等に分割されて流れるようになります。よって合計損失は各デバイスの損失を並列デバイス数の値で乗算して算出されます。出力端子 P_{loss} から流れる電流は、並列接続されている全てのデバイスの合計損失になります。

次図は MOSFET で “Separate Rth_diode” のチェックボックスをチェックしない場合の熱回路になります。赤枠内がサーマルモジュールのデバイスに含まれている部分となります。R1,C1,R2,C2 はトランジスタとダイオードで共有している熱等価回路の素子で、値はデバイスデータベースエディタ (PcdEditor) の「熱特性」で定義されます。



次図は MOSFET で “Separate Rth_diode” のチェックボックスをチェックした場合の熱回路になります。この場合はトランジスタとダイオードとで個別に内部熱回路とジャンクション温度を持ちます。



前図の回路中の損失ノード P_{cond_Q} と P_{cond_D} の電圧は算出されたトランジスタとダイオードのジャンクション温度 T_{j_Q} と T_{j_D} を表示します。これらのジャンクション温度はデータベースの曲線が損失計算に使用される時に使用されます。ノード P_loss の電圧 T_{case} はデバイスのケース温度を表しています。デバイスが内部熱回路を持たない場合は T_{j_Q} と T_{j_D} は T_{case} となるので、外部に熱等価回路を構築する必要があります。

算出された T_j が二つの曲線のジャンクション温度の間にある場合、値の補間をします。算出された T_j が曲線の最低より低いか、最高より高い場合は外挿値を使用します。曲線が一つだけの場合は、その曲線は算出された T_j に関係なく使用されます。

導通損失

トランジスタ導通損失は次のように計算されます。

$$\text{トランジスタ導通損失 } P_{cond_Q} = I_D^2 * R_{DS(on)}$$

ここで、 I_D はドレイン電流、及び $R_{DS(on)}$ はオン抵抗です。トランジスタが D の duty cycle で周期的に導通する場合導通損失は次のように上記できます。

$$\text{トランジスタ導通損失 } P_{cond_Q} = I_D^2 * R_{DS(on)} * D$$

スイッチング損失

トランジスタターンオン損失は次のように計算されます。

$$\text{トランジスタターンオン損失 } P_{\text{sw_Q_on}} = E_{\text{on}} * f$$

ここで、 E_{on} はトランジスタターンオンエネルギー損失、 f は入力パラメータ 周波数 で定義された周波数です。

トランジスタターンオフ損失は次のように計算されます。

$$\text{トランジスタターンオフ損失 } P_{\text{sw_Q_off}} = E_{\text{off}} * f$$

ここで、 E_{off} はトランジスタターンオフエネルギー損失です。

エネルギー損失 E_{on} と E_{off} は MOSFET デバイスのゲート電流、入力/出力/帰還容量、およびゲート電荷量の情報に基づく電流波形と電圧波形の立ち上がり時間、立ち下がり時間を用いて計算されます。

MOSFET(E_{on})(database)のデバイスではターンオンエネルギー損失 E_{on} を計算するために E_{on} vs. I_{DS} の波形から E_{on} を含むためにコレクター電流 I_{D} とジャンクション温度 T_{J} が使用されます。この値は E_{on} vs. R_{g} 波形と実際のゲート抵抗 $R_{\text{g_on}}$ に基づいてスケールされます。もし E_{on} vs. V_{DS} 波形があるのであれば、値はこれらの波形と実際の電圧 V_{DS} に基づいてスケールされます。もしこれらの波形がない場合は E_{on} は $V_{\text{DS}}/V_{\text{DS_datasheet}}$ に基づいてスケールされます。（ここで $V_{\text{DS_datasheet}}$ は E_{on} vs. I_{DS} の試験条件からのドレイン・ソース間電圧です。

ターンオフエネルギー損失についても同様に計算されます。

ゲート電荷による損失は上記のスイッチング損失に含まれていない事に注意してください。ゲート電荷による損失は通常ターンオン・ターンオフスイッチング損失に比べて非常に微量で、全負荷状態では無視することが出来ます。しかし、軽負荷状態では十分な量になります。ゲート電荷損失 $P_{\text{loss_Qg}}$ の計算は、以下のとおりです。

$$P_{\text{loss_Qg}} = Q_{\text{g}} * V_{\text{GG}} * f_{\text{sw}}$$

ここで、 Q_{g} は総ゲート電荷量、 V_{GG} はゲート電源電圧、 f_{sw} はスイッチング周波数です。

さらに、MOSFET デバイスは十分な定格導通電流を保証するように確実に選択されなければなりません。MOSFET の定格電流がとても低い場合、PSIM はスイッチングの立ち上がり、立下り時間の計算が出来ず、エラーメッセージを表示します。シミュレーション中は、MOSFET デバイスを導通できる最大ドレイン・ソース間電流は、以下のとおりです。

$$I_{\text{o,max}} = g_{\text{fs}} * (V_{\text{GG}} - V_{\text{GS(th)}})$$

電流が $I_{\text{o,max}}$ を超えている場合、ゲート電源電圧を上げるか、より大きな順伝達コンダクタンスを持つ他の MOSFET デバイスを選択してください。

逆並列ダイオードまたはフリーホイールダイオードの損失の計算方法は 4.10.1 に述べた方法と同じです。

$P_{\text{cond_Q}}$ 、 $P_{\text{sw_Q}}$ 、 $P_{\text{cond_D}}$ 、 $P_{\text{cond_Q}}$ の合計損失 P_{loss} の単位はワットで、パワー損失ノード P_{loss} から流れる電流の形で表されます。

ノードが外部回路に接続されていない場合はフローティングにできないため GND へ接続してください。

計算された損失、特にスイッチング損失の結果は近似値で求められます。結果の正確さはデバイスデータベースのデータの正確さと実際の回路の動作条件に依存します。ハードウェアによる測定結果で、設計値と実際の損失を確認することが必要です。計算は瞬時値が用いられます。

4.10.2.2 データベースの“MOSFET(database)”デバイス

データベースには MOSFET (database) デバイスの以下の情報が定義されています。

一般情報

Manufacturer	デバイスメーカー
Part Number	メーカーの部品番号
Package	ディスクリットパッケージ、デュアルパッケージ、6-パッドパッケージ
パッケージスタイル(例、TO-220、TO-262、TO-247、等)	はStyleフィールドにより定義されます。

絶対最大定格 (Absolute Maximum Ratings)

$V_{DS,max}$ (V)	最大ドレイン・ソース間電圧
$I_{D,max}$ (A)	最大ドレイン電流
$T_{j,max}$ (°C)	最大ジャンクション温度

電気的特性 – トランジスタ (Electrical Characteristics – Transistor)

RDS(on) (ohm)	試験時のドレイン・ソース間オン抵抗 $R_{DS(on)_b}$ [試験条件:ジャンクション温度 $T_{j,b}$ (°C、通常は25°C) ゲート・ソース間電圧 V_{GS} (V)、ドレイン電流 I_D (A)]
Temperature Coefficient	オン抵抗の温度係数 K_T (1/°C)
VGS(th) (V)	ゲート閾値電圧 $V_{GS(th)}$ [測定条件:ドレイン電流 I_D (A)]
g_{fs} (S)	順伝達コンダクタンス g_{fs} デバイスの線形領域で $g_{fs} = \frac{I_D}{V_{GS} - V_{GS(th)}}$
t_r (ns) and t_f (ns)	[測定条件:ドレイン・ソース間電圧 V_{DS} (V)、ドレイン電流 I_D (A)] 立ち上がり時間 t_r 及び 立下り時間 t_f [測定条件:ドレイン・ソース間電圧 V_{DS} (V)、ドレイン電流 I_D (A)、ゲート抵抗 R_g (Ω)]
Q_g , Q_{gs} , and Q_{gd}	総ゲート電荷量 Q_g , ゲート・ソース間電荷量 Q_{gs} , ゲート・ドレイン間電荷量(ミラー容量) Q_{gd} (単位はすべてnC) [測定条件:ドレイン・ソース間電圧 V_{DS} (V)、ゲート・ソース間電圧 V_{GS} (V)、ドレイン電流 I_D (A)]
Ciss, Coss, and Crss	入力容量 C_{iss} , 出力容量 C_{oss} , 逆伝達容量 C_{rss} (単位はすべてpF) [測定条件:ドレイン・ソース間電圧 V_{DS} (V)、ゲート・ソース間電圧 V_{GS} (V) テスト周波数(MHz)]

電気的特性 – ダイオード (Electrical Characteristics – Diode)

V_d vs. I_F	順方向導通電圧降下 V_d vs. 順電流 I_F
t_{rr} and Q_{rr}	逆回復時間 t_{rr} , ns 及び 逆回復電荷量 Q_{rr} , μC [測定条件:順電流 I_F (A)、電流の変化率 di/dt (A/μs)、 ジャンクション温度 T_j (°C)]

熱特性 (Thermal Characteristics)

Separate Rth_diode	チェックボックスをチェックすると、トランジスタとダイオードで別々の内部熱回路とジャンクション温度を持ちます。 チェックボックスのチェックをはずすと、トランジスタとダイオードで共有の
--------------------	---

Type:	内部熱回路とジャンクション温度を持ちます。
No. of Stages	内部熱等価回路網のモデルタイプ、CauerかFosterを選択できます。
Ri	i番目の抵抗値 (Ω)
Ci	i番目の容量値 (F)

寸法と質量 (Dimensions and Weight)

Length (mm)	デバイスの長、mm
Width (mm)	デバイスの幅、mm
Height (mm)	デバイスの高さ、mm
Weight (g)	デバイスの質量、g

絶対最大定格、熱的特性、寸法と質量、立ち上がり時間 t_r 、立下り時間 t_f は損失計算には使用されないため、入力はオプションとなります。

MOSFET のオン抵抗は、トランジスタのジャンクション温度の関数となります。端子シンボル P_{cond_Q} または、 P_{sw_Q} の電圧が、トランジスタのジャンクション温度 T_j を単位°Cにて表示します。例えば、電圧値 25V が表示された場合には、25°Cを表します。MOSFET のオン抵抗は下記の通り表現されます。

$$R_{(DS)on} = R_{(DS)on_b} \cdot (1 + K_T \cdot (T_j - T_{j_b}))$$

温度係数は下記の通り計算されます。

$$K_T = \frac{\frac{R_{(DS)on}}{R_{(DS)on_b}} - 1}{T_j - T_{j_b}}$$

通常、25°Cでのテスト状態を基準とします。基準値に基づいて $R_{DS(on)}$ を標準化することで下の式を得ます。

$$K_T = \frac{R_{(DS)on_normalized} - 1}{T_j - 25}$$

オン抵抗 $R_{DS(on)}$ を、タイムステップ毎にて算出してシミュレーションに使用します。

また、ダイオードの順方向電圧降下 V_d は、電流値に依存して変動します。新たな順方向電圧値がシミュレーションに使用されます。

4.10.2.3 データベースの “MOSFET(Eon) (database)” デバイス

データベースには MOSFET デバイスの以下の情報が定義されています。

一般情報

Manufacturer	デバイスメーカー
Part Number	メーカーの部品番号
Package	ディスクリットパッケージ、デュアルパッケージ、6-パックパッケージ
パッケージスタイル(例、TO-220、TO-262、TO-247、等)はStyleフィールドにより定義されます。	

絶対最大定格 (Absolute Maximum Ratings)

$V_{DS,max}$ (V)	最大ドレイン・ソース間電圧
$I_{DS,max}$ (A)	最大ドレイン電流

$T_{j,max}$ (°C)

最大ジャンクション温度

電気的特性 – トランジスタ (Electrical Characteristics – Transistor)

V_{DS} vs. I_{DS}	ドレイン/ソース電圧 V_{DS} vs. ドレイン電流 I_{DS} (第1象限)
V_{DS} vs. $I_{DS}(3^{rd})$	ドレイン/ソース電圧 V_{DS} vs. ドレイン電流 (第3象限) I_{DS}
E_{on} vs. I_{DS}	ターンオンエネルギー損失 E_{on} vs. ドレイン電流 I_{DS}
E_{off} vs. I_{DS}	ターンオフエネルギー損失 E_{off} vs. ドレイン電流 I_{DS}
E_{on} vs. R_G	ターンオンエネルギー損失 E_{on} vs. ゲート抵抗 R_G
E_{off} vs. R_G	ターンオフエネルギー損失 E_{off} vs. ゲート抵抗 R_G
E_{on} vs. $V_{DS}(@I_{DS1})$	ターンオンエネルギー損失 E_{on} vs. ドレイン電圧 V_{DS} (電流値 I_{DS1} の時)
E_{off} vs. $V_{DS}(@I_{DS1})$	ターンオフエネルギー損失 E_{off} vs. ドレイン電圧 V_{DS} (電流値 I_{DS1} の時)
E_{on} vs. $V_{DS}(@I_{DS2})$	ターンオンエネルギー損失 E_{on} vs. ドレイン電圧 V_{DS} (電流値 I_{DS2} の時)
E_{off} vs. $V_{DS}(@I_{DS2})$	ターンオフエネルギー損失 E_{off} vs. ドレイン電圧 V_{DS} (電流値 I_{DS2} の時)

電気的特性 – ダイオード (Electrical Characteristics – Diode)

V_d vs. I_F	順方向電圧降下 V_d vs. 順方向電流 I_F
t_{rr} vs. I_F	逆回復時間 t_{rr} vs. 電流 I_F
I_{rr} vs. I_F	逆回復ピーク電流 I_{rr} vs. 電流 I_F
Q_{rr} vs. I_F	逆回復チャージ Q_{rr} vs. 電流 I_F
E_{rr} vs. I_F	逆回復エネルギー損失 E_{rr} vs. 電流 I_F
E_{rr} vs. R_G	逆回復エネルギー損失 E_{rr} vs. ゲート抵抗 R_G

熱特性 (Thermal Characteristics)

Separate Rth_diode	チェックボックスをチェックすると、トランジスタとダイオードで別々の内部熱回路とジャンクション温度を持ちます。 チェックボックスのチェックをはずすと、トランジスタとダイオードで共有の内部熱回路とジャンクション温度を持ちます。
Type:	内部熱等価回路網のモデルタイプ、CauerかFosterを選択できます。
No. of Stages	内部熱等価回路のR-Cの段数
R_i	i番目の抵抗値 (Ω)
C_i	i番目の容量値 (F)

寸法と質量 (Dimensions and Weight)

Length (mm)	デバイスの長さ、mm
Width (mm)	デバイスの幅、mm
Height (mm)	デバイスの高さ、mm
Weight (g)	デバイスの質量、g

損失計算に使用する、次の特性カーブから得られるパラメータについては正しく入力しなければなりません。

電圧 V_{DS}	E_{on} vs. I_{DS}
ゲート抵抗	E_{on} vs. I_{DS} 及び E_{on} vs. V_{DS}
電流 I_{DS}	E_{on} vs. R_G 及び E_{on} vs. V_{DS}
逆回復防止電圧 VR	$t_{rr}/I_{rr}/Q_{rr}$ vs. I_F における VR

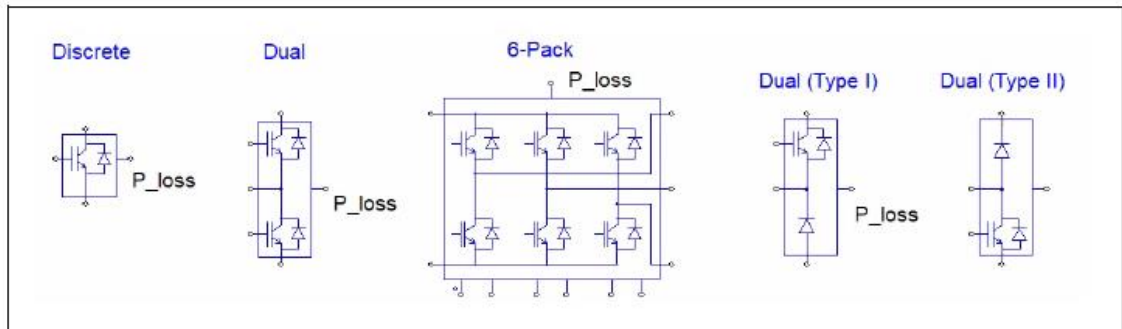
絶対最大定格、熱特性、寸法と質量のパラメータは損失計算には使用されないため、入力はオプションとなります。

4.10.3 IGBT サーマルモデル(IGBT Thermal Model)

4.10.3.1 IGBT 損失計算 (IGBT Loss Calculation)

損失計算のシミュレーションにおいてデータベースの IGBT デバイスを選択して使用することができます。サーマルモジュールのライブラリの IGBT デバイスには次のパラメータがあります。

シンボル



仕様

パラメータ	機能
Device	デバイスデータベースから選択された特定デバイス
並列デバイス数	並列に接続され同一な動作をするIGBTデバイスの個数
周波数	損失が計算される周波数(Hz)
R_{g_on} (turn-on)	ターンオン時のゲート抵抗
R_{g_off} (turn-off)	ターンオフ時のゲート抵抗 ほとんどのケースで R_{g_on} と R_{g_off} は同じです。
P_{cond_Q} 校正係数	トランジスタ導通損失 P_{cond_Q} の補正係数 K_{cond_Q}
P_{sw_Q} 校正係数	トランジスタ・スイッチング損失 P_{sw_Q} の補正係数 K_{sw_Q}
P_{cond_D} 校正係数	ダイオード導通損失 P_{cond_D} の補正係数 K_{cond_D}
P_{sw_D} 校正係数	ダイオードスイッチング損失 P_{sw_D} の補正係数 K_{sw_D} T
Operation Mode	このフラグはDualTypeのパッケージの時にだけ使用されます。 0 : 対称の場合 2つのデバイスで電力損失は等しいとされ ジャンクション温度は同じとみなされます。 1 : 個別の場合 各デバイスの電力損失とジャンクション温度は 個別にシミュレーションされます。 その他のパッケージではこのOperation Modeは0のみです。
Initial Tj_Q	トランジスタの初期ジャンクション温度 (°C)
Initial Tj_D	逆並列ダイオードの初期ジャンクション温度 (°C)
Initial Ploss_Q	トランジスタの初期電力損失 (W)
Initial Ploss_D	逆並列ダイオードの初期電力損失 (W)
Tj Flag	ジャンクション温度モニタ用フラグ
Ploss Flag	デバイスの損失モニタ用フラグ
Current Flag	デバイスの電流モニタ用フラグ
Voltage Flag	デバイスの電圧モニタ用フラグ

パラメータ 周波数は損失が計算される周波数です。例えば、デバイスが 10kHz のスイッチング周波数で動作して、パラメータ 周波数が 10kHz に設定されると、損失はスイッチング周期の値になります。しかしながら、パラメータ 周波数を 60Hz に設定すると、損失は 60Hz 周期の値になります。

パラメータ P_{cond_Q} 校正係数はトランジスタ導通損失のための修正率です。例に関して、修正の前に計算された導通損失は $P_{cond_Q_cal}$ より、

$$P_{cond_Q} = K_{cond_Q} * P_{cond_Q_cal}$$

同様に、パラメータ P_{sw_Q} 校正係数はトランジスタ・スイッチング損失のための修正率です。例に関して、修正の前に計算されたスイッチング損失は $P_{sw_Q_cal}$ より、

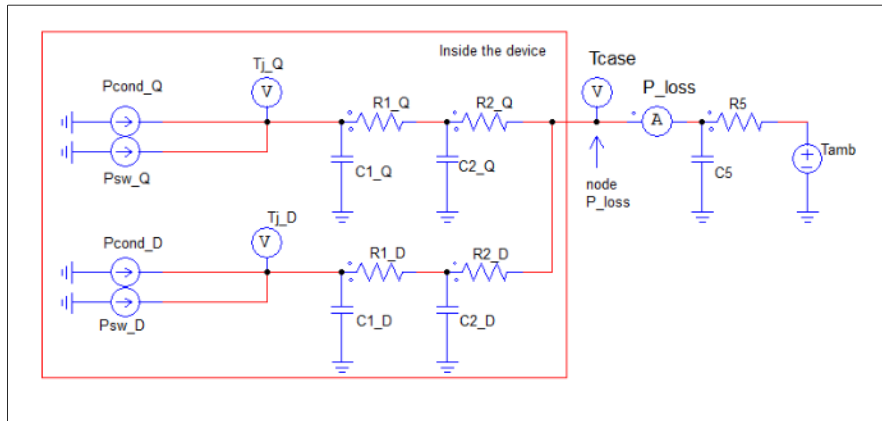
$$P_{sw_Q} = K_{sw_Q} * P_{sw_Q_cal}$$

パラメータ P_{cond_D} 校正係数と P_{sw_D} 校正係数はトランジスタ損失の端子と同様で、これらはダイオードの損失に関係します。

複数の同一な動作をするIGBTデバイスが並列に接続される場合、回路図上にIGBTブロックを1つだけ設置し、パラメータにデバイスの個数を設定してください。同一のデバイスブロックが回路内で複数個並列接続されている場合、シミュレーション中で僅かな差が発生し、それが原因となりデバイスの電流が正確に一致しない可能性があるからです。並列デバイス数が1より大きい値に設定されている場合、並列接続されているデバイスを流れる電流は、各デバイスに均等に分割されて流れるようになります。よって合計損失は各デバイスの損失を並列デバイス数の値で乗算して算出されます。出力端子 P_{cond_D} 、 P_{sw_D} 、

P_{cond_Q} 、 P_{sw_Q} から流れる電流は、並列接続されている全てのデバイスの合計損失になります。

次図は MOSFET で “Separate Rth_diode” のチェックボックスをチェックしない場合の熱回路になります。赤枠内がサーマルモジュールのデバイスに含まれている部分となります。R1, C1, R2, C2 はトランジスタとダイオードで共有している熱等価回路の素子で、値はデバイスデータベースエディタ (PcdEditor) の「熱特性」で定義されます。



前図の回路中の損失ノード P_{cond_Q} と P_{cond_D} の電圧は算出されたトランジスタとダイオードのジャンクション温度 T_{j_Q} と T_{j_D} を表示します。これらのジャンクション温度はデータベースの曲線が損失計算に使用される時に使用されます。ノード P_{loss} の電圧 T_{case} はデバイスのケース温度を表しています。デバイスが内部熱回路を持たない場合は T_{j_Q} と T_{j_D} は T_{case} となるので、外部に熱等価回路を構築する必要があります。

データベースの曲線から損失を算出する際に、算出されたジャンクション温度 T_{j_Q} および T_{j_D} は使用されます。算出された T_j が二つの曲線のジャンクション温度の間にある場合、値の補間をします。算出された T_j が曲線の最低より低い、最高より高い場合は外挿値を使用します。曲線が一つだけの場合は、その曲線は算出された T_j に関係なく使用されます。

導通損失

トランジスタ導通損失は次のように計算されます。

$$\text{トランジスタ導通損失 } P_{cond_Q} = V_{ce(sat)} * I_c$$

ここで、 $V_{ce(sat)}$ はトランジスタのコレクタ・エミッタ間飽和電圧、及び I_c はコレクタ電流です。トランジスタがデューティサイクル D で周期的に導通する場合には、同損失は以下の通り計算されます。

$$\text{トランジスタ導通損失 } P_{cond_Q} = V_{ce(sat)} * I_c * D$$

スイッチング損失

トランジスタターンオン損失は次のように計算されます。

$$\text{トランジスタターンオン損失 } P_{sw_Q_on} = E_{on} * f * V_{cc} / V_{cc_datasheet}$$

ここで、 E_{on} はトランジスタターンオンエネルギー損失、 f は入力パラメータ/周波数で定義された周波数、 V_{cc} は実際の DC バス電圧です。 $V_{cc_datasheet}$ はデバイスデータシート内の E_{on} および E_{off} の特性の Test Conditions にて「DC バス電圧(V)」として定義されているものです。

トランジスタターンオフ損失は次のように計算されます。

$$\text{トランジスタターンオフ損失 } P_{sw_Q_off} = E_{off} * f * V_{cc} / V_{cc_datasheet}$$

ここで、 E_{off} はトランジスタターンオフエネルギー損失です。

E_{on} を計算するために、 E_{on} vs. I_c のカーブから E_{on} を得るためにコレクタ電流 I_c とジャンクション温度が使用されます。 E_{off} と E_{rr} も同様です。逆並列ダイオードまたはフリーホイールダイオードの損失の計算方法は、ダイオードの解説で述べたものと同じ方法です。

P_{cond_Q} , P_{sw_Q} , P_{cond_D} , P_{cond_Q} の合計損失 P_{loss} の単位はワットで、パワー損失ノード P_{loss} から流れる電流の形で表されます。ノードが外部回路に接続されていない場合はフローティングにできないため GND へ接続してください。

4.10.3.2 データベースの IGBT デバイス (IGBT Device in Database)

IGBT デバイスには、ディスクリート(discrete)、デュアル(dual)そして 6 パック(6-pack)の 3 種類のパッケージがあります。

デュアルパッケージでは、ハイサイド側およびローサイド側のスイッチの両方が IGBT(フルブリッジ)である場合、スイッチのうちの 1 つは IGBT であり、他はフリーホイールリングダイオード(ハーフ・ブリッジ)である場合があります。ハーフブリッジのデュアル IGBT デバイスでは、フリーホイールリングダイオードのパラメータが逆並列ダイオードのパラメータと異なる場合がありますので、この種のデバイスは IGBT ダイオードデバイスと呼ばれ、シミュレーションで異なったタイプとして扱われます。しかし、ここでは説明をわかりやすくするため、両方のデバイスを IGBT デバイスとして扱います。

データベースに IGBT デバイスの以下の情報が定義されています。

一般情報

Manufacturer	デバイスメーカー
Part Number	メーカーの部品番号
Package	ディスクリートパッケージ、デュアルパッケージ、6-パックパッケージ
パッケージのスタイル(例、TO-247とTO-268、等)は、Styleフィールドによって指定します。	

絶対最大定格 (Absolute Maximum Ratings) ※損失計算には使われません。

$V_{ce,max}$ (V)	最大コレクタ・エミッタ電圧
$I_{c,max}$ (A)	最大コレクタ電流
$T_{j,max}$ (°C)	最大ジャンクション温度

電気的特性 – トランジスタ (Electrical Characteristics – Transistor)

$V_{ce(sat)}$ vs. I_c	コレクタ・エミッタ飽和電圧 $V_{ce(sat)}$ vs. コレクタ電流 I_c
E_{on} vs. I_c	ターンオンエネルギー損失 E_{on} vs. コレクタ電流 I_c
E_{off} vs. I_c	ターンオフエネルギー損失 E_{off} vs. コレクタ電流 I_c
E_{on} vs. R_G	ターンオンエネルギー損失 E_{on} vs. ゲート抵抗 R_G
E_{off} vs. R_G	ターンオフエネルギー損失 E_{on} vs. ゲート抵抗 R_G

電気的特性 – ダイオード(または逆並列ダイオード) (Electrical Characteristics – Diode, or Anti-Parallel Diode)

V_d vs. I_F	順方向導通電圧降下 vs. 順電流 I_F
t_{rr} vs. I_F	逆方向回復時間 t_{rr} vs. 電流 I_F
I_{rr} vs. I_F	ピーク逆方向回復電流 I_{rr} vs. 電流 I_F

Q_{rr} vs. I_F	逆方向回復電荷 Q_{rr} vs. 電流 I_F
E_{rr} vs. I_F	逆方向回復電力損失 E_{rr} vs. 電流 I_F
E_{rr} vs. R_G	逆方向回復電力損失 E_{rr} vs. 電流 R_G

電気的特性-IGBT-Diodeデバイス用フリーホイールダイオード(Electrical Characteristics – Free-Wheeling Diode for IGBT-Diode device only)

V_d vs. I_F	順方向導通電圧降下 vs. 順電流 I_F
t_{rr} vs. I_F	逆方向回復時間 t_{rr} vs. 電流 I_F
I_{rr} vs. I_F	ピーク逆方向回復電流 I_{rr} vs. 電流 I_F
Q_{rr} vs. I_F	逆方向回復電荷 Q_{rr} vs. 電流 I_F
E_{rr} vs. I_F	逆方向回復電力損失 E_{rr} vs. 電流 I_F

熱特性 (Thermal Characteristics)

Type	内部熱等価回路網のモデルタイプ、CauerかFosterを選択できます。
No. of Stages	内部熱等価回路のR-Cの段数
R_i	i 番目の抵抗値 (Ω)
C_i	i 番目の容量値 (F)

寸法と質量 (Dimensions and Weight)※損失計算には使われません。

Length (mm)	デバイスの長さ、mm
Width (mm)	デバイスの幅、mm
Height (mm)	デバイスの高さ、mm
Weight (g)	デバイスの質量、g

E_{on} vs. I_c カーブの“その他の試験条件”にある $V_{CE}(V)$ と $R_G(Ohm)$ の値は E_{on} 、 E_{off} 、 E_{rr} の損失計算のスケールに使用されるので正しい値を入力しなければなりません。 E_{on} vs. I_c の試験条件は E_{off} vs. I_c 、 E_{rr} vs. I_c の試験条件と同じと仮定され E_{on} vs. I_c の値のみが使われます。

絶対最大定格、熱的特性、寸法と質量は損失計算には使用されないため、入力はおプションとなります。

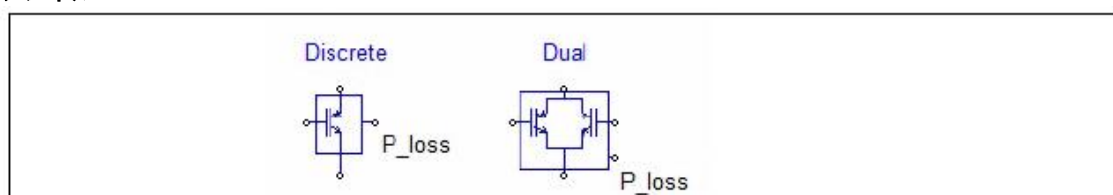
また、トランジスタのコレクタ・エミッタ飽和電圧 $V_{ce(sat)}$ 、およびダイオードの順方向導通電圧降下 V_d は、電流依存して変動します。新たな値は後続するシミュレーションにて使用されます。

4.10.4 RB-IGBT サーマルモデル(RB-IGBT Thermal Model)

4.10.4.1 RB-IGBT 損失計算 (RB-IGBT Loss Calculation)

損失計算にシミュレーションでデータベースの RB-IGBT デバイスを選択して、使用することができます。サーマルモジュールのライブラリの RB-IGBT には次のパラメータがあります。

シンボル



パラメータでは、IGBT ターミナルノードの横に余分なノードがあります。トランジスタ導通損失ノード P_{cond_Q} (丸付きのノード)、およびトランジスタスイッチング損失ノード P_{sw_Q} です。

仕様

パラメータ	機能
Device	デバイスデータベースから選択された特定デバイス
並列デバイス数	並列に接続された同一RB-IGBT p デバイスの個数
周波数	損失が計算される周波数(Hz)
R _{g_on} (turn-on)	ターンオン時のゲート抵抗
R _{g_off} (turn-off)	ターンオフ時のゲート抵抗 ほとんどのケースでR _{g_on} とR _{g_off} は同じです。
P _{cond_Q} 校正係数	トランジスタ導通損失P _{cond_Q} の校正係数K _{cond_Q}
P _{sw_Q} 校正係数	トランジスタ・スイッチング損失P _{sw_Q} の校正係数K _{sw_Q}
Initial Tj	初期ジャンクション温度 (°C)
Initial Ploss	総電力損失の初期値(W)
Tj_Flag	デバイスのジャンクション温度モニタ用フラグ
Ploss Flag	総電力損失モニタ用フラグ
Current Flag	デバイスに流れる電流表モニタ用フラグ
Voltage Flag	デバイス両端の電圧モニタ用フラグ

パラメータ 周波数は損失が計算される周波数です。例えば、デバイスが 10kHz のスイッチング周波数で動作して、パラメータ 周波数が 10kHz に設定されると、損失はスイッチング周期の値になります。しかしながら、パラメータ 周波数を 60Hz に設定すると、損失は 60Hz 周期の値になります。

パラメータ P_{cond_Q} 校正係数はトランジスタの導通損失の修正係数です。例えば、修正前の算出された導通損失を P_{cond_Q_cal} とすると、以下の式の様になります。

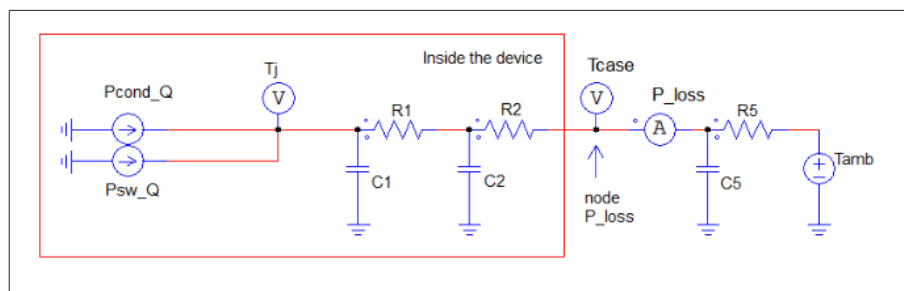
$$P_{cond_Q} = K_{cond_Q} * P_{cond_Q_cal}$$

同様に、パラメータ P_{sw_Q} 校正係数はトランジスタのスイッチング損失の修正係数です。例えば、修正前の算出されたスイッチング損失を P_{sw_Q_cal} とすると、以下の式の様になります。

$$P_{sw_Q} = K_{sw_Q} * P_{sw_Q_cal}$$

複数の同一な動作をする RB-IGBT デバイスが並列に接続される場合、回路図上に RB-IGBT ブロックを 1 つだけ設置し、パラメータにデバイスの個数を設定してください。同一なデバイスブロックが回路内で複数個並列接続されている場合、シミュレーション中で僅かな差が発生し、それが原因となりデバイスの電流が正確に一致しない可能性が有るからです。並列デバイス数が 1 より大きい値に設定されている場合、並列接続されているデバイスを流れる電流は、各デバイスに均等に分割されて流れるようになります。よって合計損失は各デバイスの損失を並列デバイス数の値で乗算して算出されます。出力端子 P_{cond_Q}、P_{sw_Q} から流れる電流は、並列接続されている全てのデバイスの合計損失になります。

次図は RG-IGBT の熱等価回路です。赤枠内がサーマルモジュールのデバイスに含まれている部分となります。R1,C1,R2,C2 はトランジスタとダイオードで共有している熱等価回路の素子で、値はデバイスデータベースエディタ (PcdEditor) の「熱特性」で定義されます。



前図の回路中の損失ノード P_{cond_Q} の電圧は算出されたトランジスタのジャンクション温度 T_j を表示します。このジャンクション温度はデータベースの曲線が損失計算に使用される時に使用されます。ノード P_{loss} の電圧 T_{case} はデバイスのケース温度を表しています。デバイスが内部熱回路を持たない場合は T_j は T_{case} と同じになるので、外部に熱等価回路を構築する必要があります。

算出された T_j が二つの曲線のジャンクション温度の間にある場合、値の補間をします。算出された T_j が曲線の最低より低い場合、最高より高い場合は外挿値を使用します。曲線が一つだけの場合は、その曲線は算出された T_j に関係なく使用されます。

導通損失

トランジスタ導通損失は次のように計算されます。

$$P_{cond_Q} = V_{ce(sat)} * I_c$$

ここで、 $V_{ce(sat)}$ はトランジスタのコレクタ・エミッタ間飽和電圧、 I_c はコレクタ電流です。

デューティサイクル D で定期的に計算している場合は次のように計算されます。

$$P_{cond_Q} = V_{ce(sat)} * I_c * D$$

スイッチング損失

トランジスタターンオン損失は次のように計算されます。

$$P_{sw_Q_on} = E_{on} * f * V_{cc} / V_{cc_datasheet}$$

ここで、 E_{on} はトランジスタターンオンエネルギー損失、 f は入力パラメータ 周波数 で定義された周波数、 V_{cc} は実際の DC バス電圧です。 $V_{cc_datasheet}$ はデバイスデータシート内の E_{on} および E_{off} の特性の Test Conditions にて「DC バス電圧(V)」として定義されている物です。

トランジスタターンオフ損失は次のように計算されます。

$$P_{sw_Q_off} = (E_{off} + E_{rr}) * f * V_{cc} / V_{cc_datasheet}$$

ここで、 E_{off} はトランジスタターンオフエネルギー損失、 E_{rr} は逆回復エネルギー損失です。

E_{on} を計算するために、 E_{on} vs. I_c のカーブから E_{on} を得るためにコレクタ電流 I_c とジャンクション温度が使用されます。 E_{off} と E_{rr} も同様です。

P_{cond_Q} 、 P_{sw_Q} の合計損失 P_{loss} の単位はワットで、パワー損失ノード P_{loss} から流れる電流の形で表されます。ノードが外部回路に接続されていない場合はフローティングにできないため GND へ接続してください。

4.10.4.2 データベースの RB-IGBT デバイス (RB-IGBT Device in Database)

逆阻止 IGBT (RB-IGBT) デバイスは 2 つのパッケージタイプがあります。(ディスクリットかデュアル)

データベースには MOSFET デバイスの以下の情報が定義されています。

一般情報

Manufacturer	デバイスメーカー
Part Number	メーカーの部品番号
Package	ディスクリートパッケージ、デュアルパッケージ
パッケージスタイルはスタイルフィールドにより定義されます。	

絶対最大定格 (Absolute Maximum Ratings) ※損失計算には使われません。

$V_{ce,max}$ (V)	最大コレクタ・エミッタ間電圧
$I_{c,max}$ (A)	最大コレクタ電流
$T_{j,max}$ (°C)	最大ジャンクション温度

電気的特性 – トランジスタ (Electrical Characteristics – Transistor)

$V_{ce(sat)}$ VS. I_c	コレクタ・エミッタ飽和電圧 $V_{ce(sat)}$ VS. コレクタ電流 I_c
E_{on} VS. I_c	ターンオンエネルギー損失 E_{on} VS. コレクタ電流 I_c
E_{off} VS. I_c	ターンオフエネルギー損失 E_{off} VS. コレクタ電流 I_c
E_{rr} VS. I_c	逆回復エネルギー損失 E_{rr} VS. コレクタ電流 I_c

熱特性 (Thermal Characteristics)

Type	内部熱等価回路網のモデルタイプ、CauerかFosterを選択できます。
No. of Stages	内部熱等価回路のR-Cの段数
R_i	i番目の抵抗値 (Ω)
C_i	i番目の容量値 (F)

寸法と質量 (Dimensions and Weight) ※損失計算には使われません。

Length (mm)	デバイスの長、mm
Width (mm)	デバイスの幅、mm
Height (mm)	デバイスの高さ、mm
Weight (g)	デバイスの質量、g

なお、トランジスタの E_{on} vs. I_c と E_{off} vs. I_c で用いる DC バス電圧(V)、 E_{rr} vs. I_c で用いる逆阻止電圧 VR(V)は損失計算のスケールに用いられるため、適切な値を入力する必要があります。

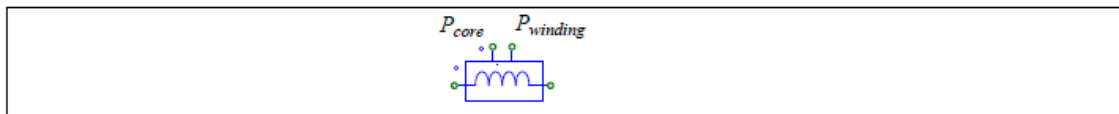
また、絶対最大定格、熱特性、寸法と質量のパラメータは損失計算には使用されていません。
コレクタ・エミッタ間飽和電圧 $V_{ce(sat)}$ はトランジスタの電流に依存して変動します。新たな値は後続するシミュレーションにて使用されます。

4.10.5 インダクタサーマルモジュール (Inductor Thermal Module)

4.10.5.1 インダクタ損失計算 (Inductor Loss Calculation)

インダクタデータベースを選択して損失計算シミュレーションに使用することができます。

シンボル



サーマルモジュールライブラリ(Thermal Module Library)のインダクタは以下のパラメータにより構成されます。

仕様

パラメータ	機能
Device	デバイスデータベースから選択されたインダクタ
周波数	損失が計算される基本となる周波数(Hz)
温度フラグ	コア温度の定義手法を示すフラグ。 <i>Calculated</i> または <i>Fixed</i> のいずれかが選択できます。 <i>Calculated</i> の場合、コア温度は回路の動作条件から算出され、その温度は損失計算に使用されます。一方、 <i>Fixed</i> ではコア温度はユーザにより指定される。これにより、特定温度での損失が明確に扱われる。
周囲温度	インダクタの周辺温度(°C)
対流	冷却方法を指定する。 <i>Forced</i> は強制冷却、 <i>Natural</i> は自然冷却を指定する。
空気速度	風量をm/secにて指定する、強制冷却時のみ指定される。
推定コア温度	Temperature Flagが <i>Fixed</i> の場合のみ使用される。コア温度値(°C)。
推定巻線温度	Temperature Flagが <i>Fixed</i> の場合のみ使用される。巻き線温度値(°C)。
損失計算フラグ	このフラグを0に設定すると、損失計算はシミュレーション開始時から実行される。一方、1に設定すると、最後の基本周期(fundamental cycle)期間のみ、損失計算が実行されます。損失計算はシミュレーションスピードを大幅に悪化させる場合に、本機能は有効です。
電流フラグ	インダクタ電流モニタフラグ (1: 出力あり、0: 出力なし)

損失 P_{core} と $P_{winding}$ (Watts)は、端子の電流出力値として表示されます。損失を算出して表示するためには、電流計を端子とグランド間に接続します。使用しない端子は必ずグランドに接続して下さい。

パラメータ *周波数*はインダクタが励磁される時の基本周波数と定義されます。例えば、20kHzのスイッチング共振素子を持つ回路の中で、60Hzの電流が流されるインダクタでは、このパラメータ *周波数*は60Hzに設定します。別の例として、もし20kHzのスイッチング共振素子をもつ直流回路で、直流電流が流されるインダクタの場合には、パラメータ *周波数*は20kHzと設定します。

サーマルモジュールインダクタのより詳細な情報は、"Tutorial- Inductor loss calculation in Thermal Module.pdf"を参照下さい。

4.10.5.2 データベースのインダクタ (Inductor in Database)

データベースにはインダクタの以下の情報が定義されています。

一般情報

Manufacturer	インダクタメーカー
Part Number	メーカーの部品番号
Package	基本パッケージのみ

電気的特性(Electrical Characteristics)

L(uH)

インダクタンス (uH)

最大定格 (Maximum Ratings)

I_{max}, rms (A)

最大実効定格電流値(A)

コア特性 (Core Information)

Core Type and Size

コア形状とサイズの定義

Core Material

コア材質の定義

巻線仕様 (Winding Information)

Winding Type and Size

導体の形状、サイズ、絶縁タイプの定義

Winding Distribution

巻き数、層数、層間の距離、ワイヤ間およびコアとワイヤ間の距離の定義

Distribution of Parallel Wires

放射方向および高さ方向の並列ワイヤの配置構成の定義

ギャップ仕様 (Gap Information)

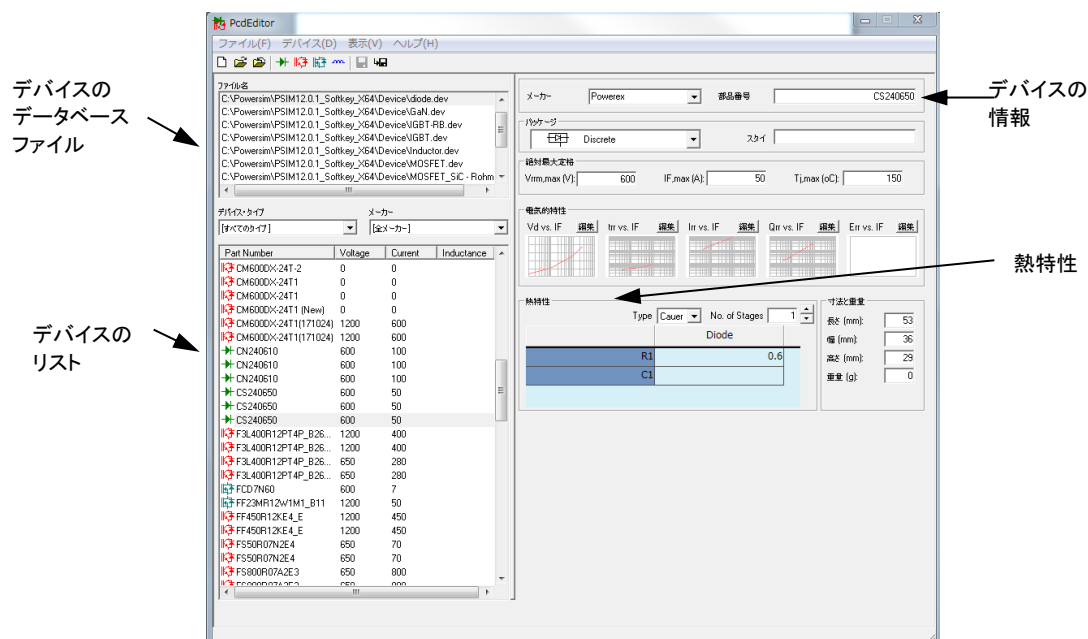
Gap Data

ギャップの数および各ギャップの長さの定義

新しいインダクタの情報は、**Device>>New Inductor**を選択して追加することができます。コア材質、コアおよび巻き線のデータベースは、**Device>>Edit Inductor Core Database, Edit Winding Database, そしてEdit Core Material Database**により、追加および更新が可能です。

4.10.6 デバイスデータベースエディタ (Device Database Editor)

デバイスデータベースエディタ(PcdEditor.exe)は、デバイスを追加、編集、及び管理するためのものです。PSIMプルダウンメニューの **Utilities**メニューからデータベースエディタを起動します。データベースエディタの図を以下に示します。



左側には、データベースタヘロードされるデバイスデータベースファイルおよびデバイスのリストがあります。デバイスはデバイスのタイプかメーカーのいずれかに基づいて表示することができます。さらに、リストのタイトルバーをクリックすることにより、部品番号、定格電圧あるいは定格電流によってデバイスリストをソートすることができます。

新しいデバイスファイルを作成するためには、**File > New Device File**を選んでください。デバイスファイルをエディタにロードするためには、**File > Open Device File**を選んでください。デバイスファイルを閉じるには、**File > Close Device File**を選んでください。

右側に各デバイスの情報が示され主に次の情報が各デバイスに定義されます。

- メーカーと部品番号 (Manufacturer and Part Number)
- パッケージ型式 (Package type and style)
- 絶対最大定格 (Absolute maximum ratings)
- 電気的特性 (Electrical characteristics)
- 熱的特性 (Thermal characteristics)
- 寸法と質量 (Dimension and weight)

以下はインダクタのサーマルシミュレーションに必要な情報です。

- メーカーと部品番号 (Manufacturer and Part Number)
- パッケージ型式 (Package type and style)
- 最大定格 (Maximum ratings)
- 電気的特性 (Electrical characteristics)
- コア、巻線、ギャップ仕様 (Core, winding and gap information)

デバイスファイルには、インダクタ、ダイオード、IGBT、デュアルIGBT-ダイオードモジュール、MOSFETの計5種類のデバイスを加えることができます。

新しいデバイスを作成する場合は、**Device**(デバイス)メニューに移動して、**New Diode**(新しいダイオード)、**New IGBT**(新しいIGBT)、**New IGBT-Diode**(新しいIGBTダイオード)、**New MOSFET**(新しいMOSFET)、**New Inductor**(新しいインダクタ)のいずれかを選んでください。

同じデータベースファイルに既存のデバイスのコピーを作る場合は、リストのデバイスをハイライトして**Device > Save Device As**を選んでください。既存のデバイスのコピーを作って別のデータベースファイルに保存する場合は、最初にリスト中のデバイスをハイライトして、次に、File Nameリスト中のファイル名をハイライトしてください。それから、**Device > Save Device As**を選んでください。

4.10.7 データベースにデバイスを追加 (Adding a Switching Device to Database)

デバイスデータベースファイルにデバイスを加える方法を明らかにするために、デバイスデータベースファイル「diode.dev」へPowerexのディスクリットダイオードCS240650(600V、50A)を追加する手順を以下に示します。

- PcdEditor.exeを起動してください。**File**メニューの**New Device File**を選択し、「diode.dev」ファイルを作成してください。このファイルはデフォルトでPSIMプログラム・フォルダの下のデバイスサブ・フォルダに置かれます。
- 「File Name」リストでファイル名「Diode」をハイライトしたまま、**Device -> New Diode**を選んでください。メーカーが「New」と部品番号が「New」状態でダイオードはデータベースファイルに追加されます。

- スクリーンでPowerex CS240650データシートのPDFファイルを表示してください。
- PcdEditorで、データシートからこのデバイスについて次の情報を入力してください。

デバイス情報

メーカー	Powerex
部品型式	CS240650
パッケージ	Discrete

絶対最大定格(Absolute Maximum Ratings)

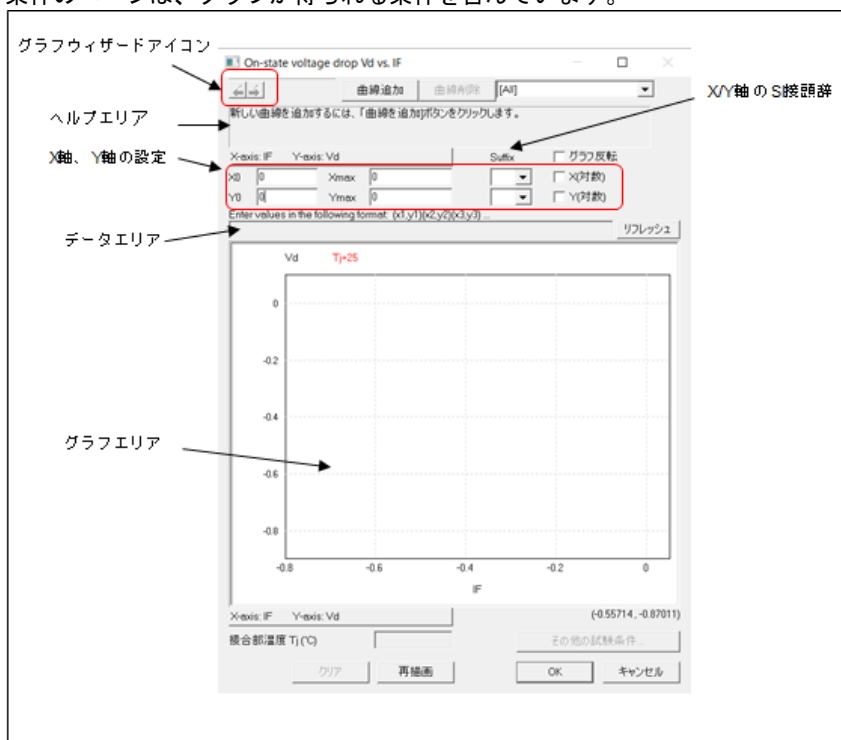
$V_{rm,max}$ (V)	600
$I_{F,max}$ (A)	50
$T_{j,max}$ (°C)	150

- V_d vs. I_F グラフ領域の上にある**Edit**ボタンをクリックして電気的特性、順電圧特性 V_d vs. I_F を定義してください。

以下のダイアログウィンドウが表示されます。ダイアログウィンドウはグラフ(Graph)と条件(Conditions)の2つのページがあります。

グラフのページはx軸とy軸セッティング、データポイントおよびグラフを含んでいます。この場合、y軸は順方向電圧降下 V_d でx軸は順方向電流 I_F です。軸は倍率(10^{-3} はm、 10^{-6} はuを使用可能)を持つことができます。

条件のページは、グラフが得られる条件を含んでいます。



グラフを定義するには2つの方法があります。一つの方法は手動でグラフデータ・ポイントを入力することです。もう一つの方法はグラフウィザードを使用し、データシートからグラフを直接得ることです。データポイントが少ない場合は、手動でグラフを定義した方が簡単です。グラフがあるならばグラフウィザードを使用するとより簡単にできます。

手動でグラフを定義

- データシートの「Maximum On-State Characteristics」グラフを参照して、x/y軸セッティングに対する値を以下のように入力してください。

X0 1
 Xmax 1000
 Y0 0.6
 Ymax 2.6
 X in log checked

—目視によりグラフを観察して、数データポイントを選択してください。それから、データ域に次のデータポイントを入力してください。

(1,0.7) (10,1.05) (100,1.8) (200,2.2) (300,2.4)

それからグラフを表示するために、Refreshボタンをクリックしてください。

データがExcelファイルの場合は、データエリアに直接コピーすることができます。データをコピーするには、二つのデータ列を選択し、Ctrl+Cを押してコピーします。その後、データエリアにカーソルを移動し、Ctrl+Vを押して貼り付けてください。

	A	B	C	D
1				
2		IF	Vd	
3		1	0.7	
4		10	1.05	
5		100	1.8	
6		200	2.2	
7		300	2.4	
8				

—Conditions タブをクリックして、25°CのJunction Temperatureを入力してください。または、グラフウィザードを利用してグラフを定義することができます。

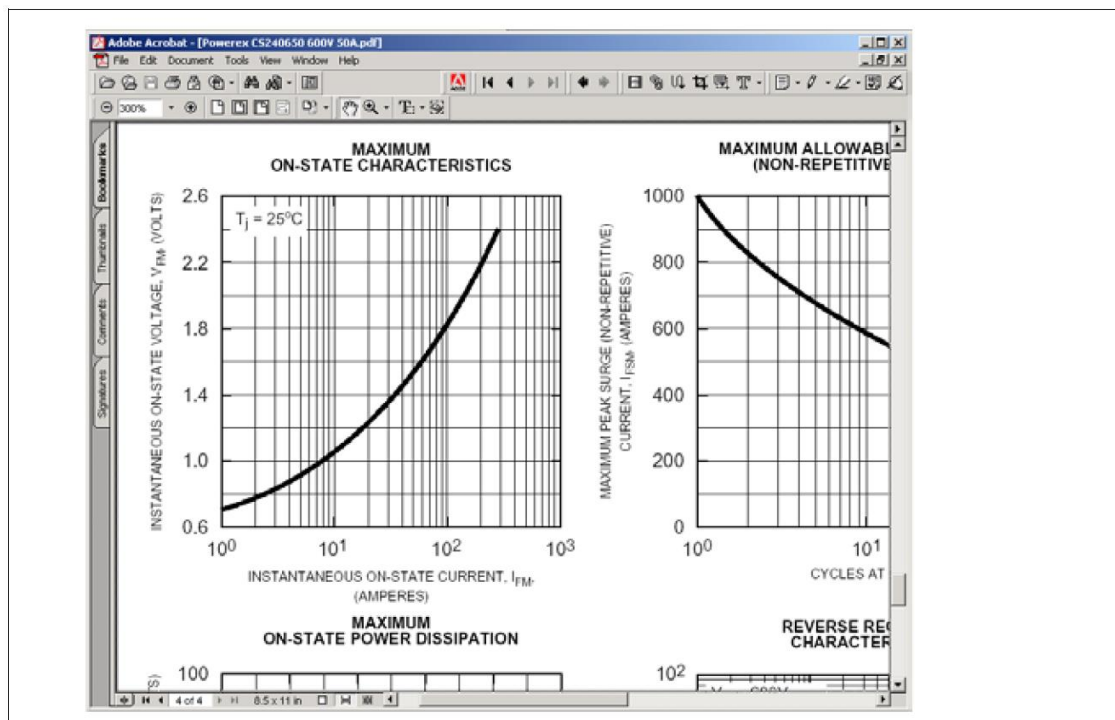
グラフウィザードを利用してグラフを定義

—グラフウィザードを始めるために、曲線追加をクリックして下さい。フォワードウィザード

アイコン  をクリックしてください。

—以下の通りにデータシートのグラフをスクリーンに表示してください。

そして、プリントスクリーンキー(キーボード上の表記「Prt Sc」)を押して、クリップボードにスクリーン図をコピーしてください。

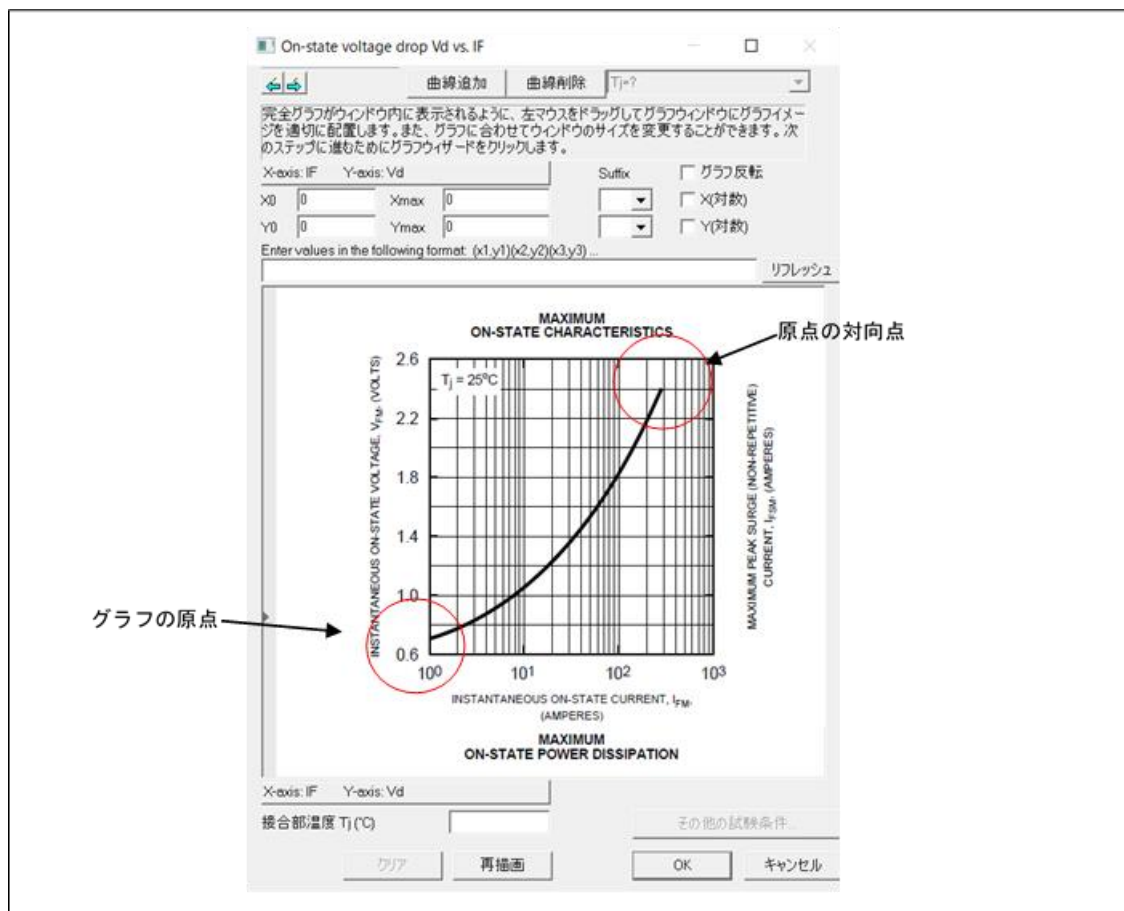


ースクリーン図をPcdEditorのグラフウィンドウに貼り付けるために、フォワードウィザード

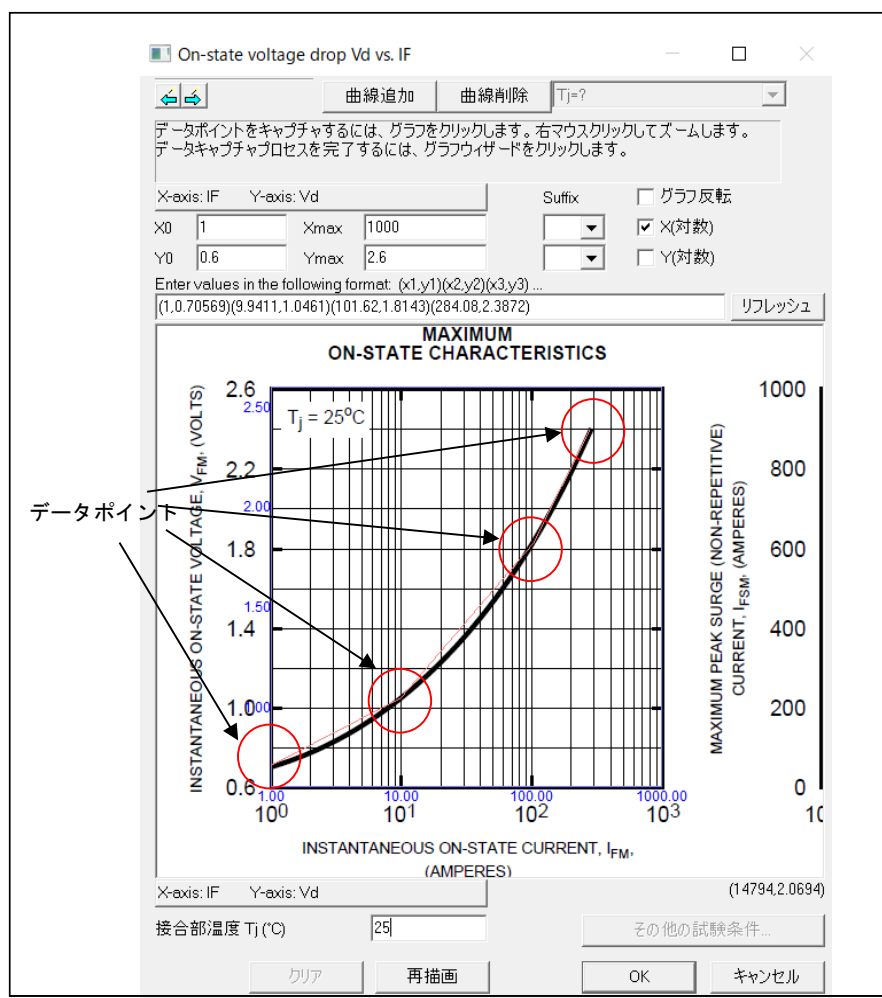
アイコン  をクリックしてください。ウィンドウの中で完全なグラフが表示されるように、マウスの左ボタンを押し続けてドラッグしてきちんとグラフをグラフウィンドウに置いてください。グラフが大き過ぎるか、または小さすぎるなら、バックワードウィザードアイコン

 をクリックして、以前のステップに戻ってください。次に、Adobe acrobatでグラフの図をリサイズして、もう一度クリップボードにスクリーン図をコピーしてください。グラフダイアログウィンドウは次のように表示されます。

フォワードウィザードアイコン  をクリックして次のステップに進んでください。



- このステップでは、グラフ領域の境界を定義します。グラフの原点(通常左下隅)でマウスの左ボタンをクリックし、原点の反対の角(通常右上隅)でマウスの左ボタンをクリックします。グラフの原点が左下隅でなく各コーナーのうちのいずれか1つである場合もあります。
 - グラフ原点の位置をより正確に見つけるために、マウスの右ボタンをクリックして拡大してください。ズームを解除するためには、Esc(Escape)キーを押してください。
- この後に、青い長方形がグラフの境界の近くに現われます。また、ダイアログ・ウィンドウが次のように表示されます。

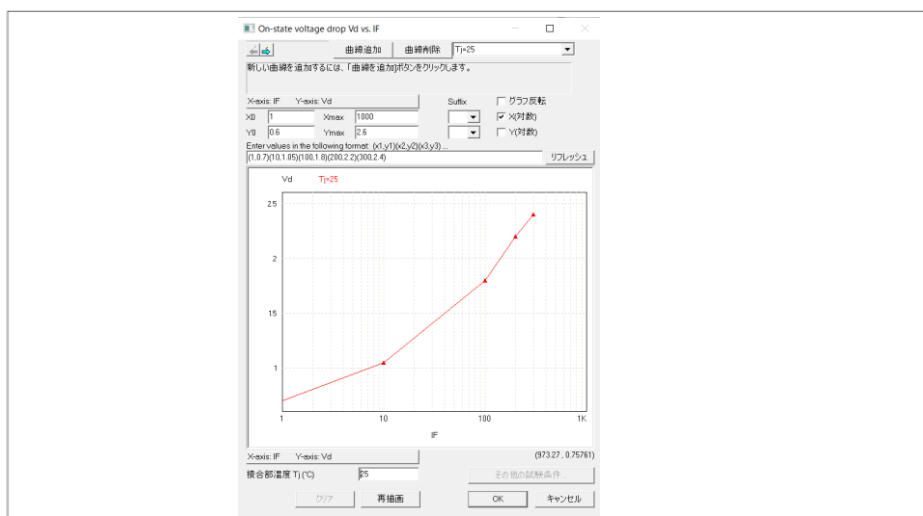


次のステップへ移動するためにフォワードウィザードアイコン  をクリックしてください。
 —このステップでは、x 軸とy軸の設定を定義します。以下の通りに設定を入力してください。

X0	1
Xmax	1000
Y0	0.6
Ymax	2.6
X in log	checked

—必要の場合はキャプチャしたグラフの通りにグラフ反転でX,Y軸をあわせてください。
 —ジャンクション温度25°Cを入力しめあす。

—次のステップに移るためにフォワードウィザードアイコン  をクリックしてください。
 —波形の上でマウスの左ボタンをクリックして、データポイントを得てください。この場合、1A、10A、100A、および300A周辺で4つデータポイントを得ています。もう一度、画像を拡大するためにマウスの右クリックをしてください。必要なデータポイントをキャプチャできます。
 —データポイントを収集しているときにデータポイントを接続する赤い線が現れます。データポイント収集プロセスを完了するために、フォワードウィザードアイコン  をクリックしてください。最終的なグラフダイアログウィンドウは、次の通りに表示されます。

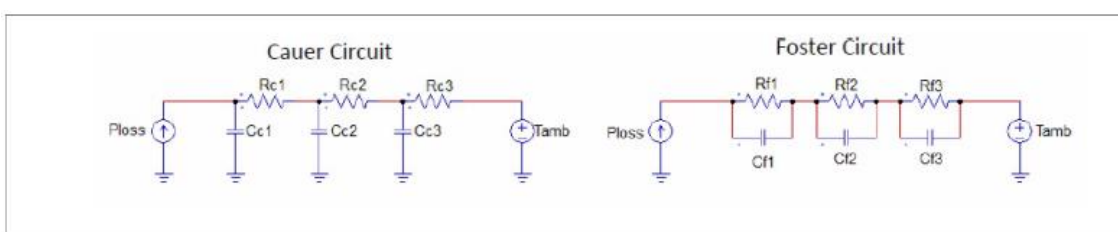


- ・ グラフ上のデータポイントのx軸とy軸の値を見るためには、グラフエリアの内部にカーソルを置いてください。カーソル・図は反対に変わります。カーソルのx軸とy軸はダイアログウィンドウの右上に表示されます。x軸とy軸の値を読み込むために、カーソルを波形の最上部に置いてください。
- ・ 異なる接合部温度に対して複数の曲線がある場合は同じプロセスを繰り返して入力します。右上のドロップダウンメニューを使用して各温度やすべての波形を確認できます。
- ・ 同じプロセスで、逆回復特性 t_{rr} vs. I_F , I_{rr} vs. I_F , 及び Q_{rr} vs. I_F を定義してください。
- ・ 熱的特性を入力してください。

Rth(j-c) 0.6

Rth(c-s) 0.4

熱モデルタイプを選択します。Cauer か Foster を選択し、サーマル回路のステージ数を入力します。サーマル回路の2つの等価回路は次のようになります。この例ではステージ数は3となります。



一寸法と質量を入力してください。

Length (mm) 53

Width (mm) 36

Height (mm) 29

デバイス情報を保存するために Device -> Save Device を選んでください。これで、データベースヘダイオードを追加するプロセスの完了になります。

4.11 再生可能エネルギーモジュール (Renewable Energy Models)

再生可能エネルギーモジュールライブラリは下記の素子があります。

太陽電池モジュール(Solar modules) : 物理モデル(physical model)、機能モデル(functional model)、

cSi モデル(cSi model)、薄膜モデル(thin-film model)

風力発電(Wind turbine)

リチウム-イオンバッテリー (Lithium-Ion battery)

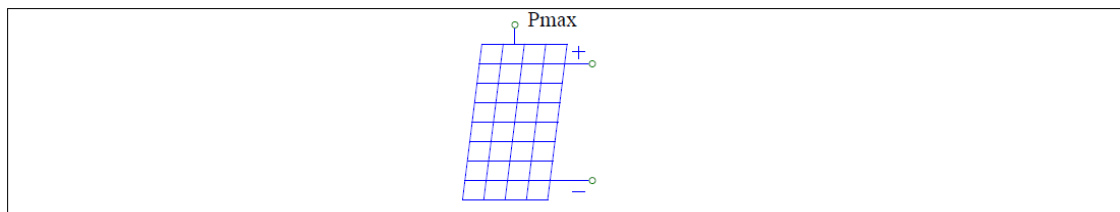
ウルトラキャパシタ (Ultracapacitor)

4.11.1 太陽電池モジュール (Solar Modules)

4.11.1.1 太陽電池モジュール 機能モデル (Solar Module – Functional Model)

機能モデルは、i-v 特性に基づいて太陽電池モジュールを表現します。メーカーのデータシートから入手できる、4 種類のパラメータ入力のみでシミュレーションを開始できます。

シンボル



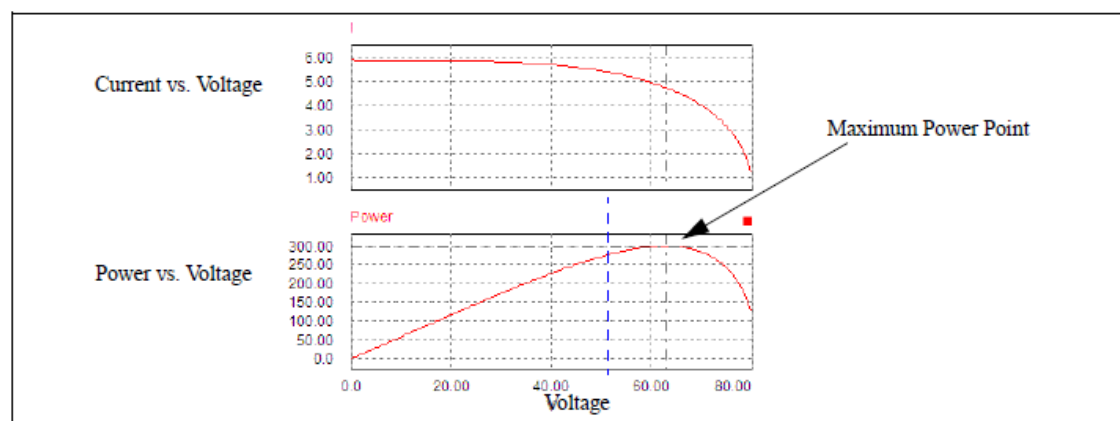
シンボルの"+"と"-"のノードはそれぞれ正と負の端子を表します。上部の端子はこの動作条件での、理論上の最大電力(W)になります。

正負端子はパワー回路端子で、その他の端子は制御回路の端子として扱われます。

仕様

パラメータ	機能
開放電圧 Voc	太陽電池の端子を開放したときの測定電圧(V)
短絡電流 Isc	太陽電池の端子を短絡したときの測定電流(A)
最大電力時電圧 Vm	最大出力電力時の太陽電池モジュールの端子電圧(V)
最大電力時電流 Im	最大出力電力時の太陽電池モジュールの端子電流(A)

4 つのパラメータ(開放電圧、短絡電流、最大電力時の電圧・電流)を用いて、i-v カーブを生成します。下図に通常の太陽電池における、i-v、p-v カーブを示します。

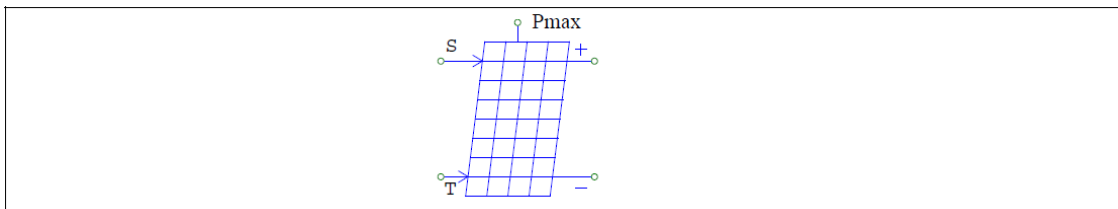


図から、電圧が増加するのに従って太陽電池モジュールの出力電力が増加し、あるポイントで出力電力が最大になることがわかります。様々な運転条件の下で最大出力点(Maximum PowerPoint Tracking : MPPT)を見つけるために、各種制御方式が提案されています。

4.11.1.2 太陽電池モジュール - 物理モデル (Solar Module – Physical Model)

太陽電池モジュール物理モデルは、光強度と温度ばらつきまで考慮するため、より正確にシミュレーションできます。

シンボル

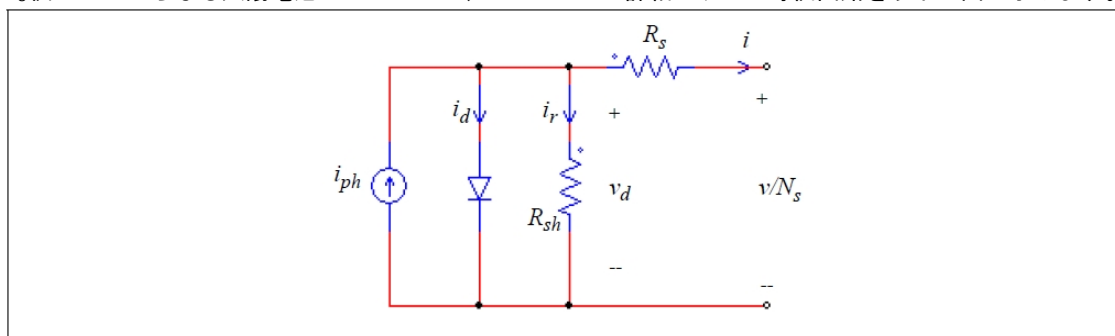


シンボルの"+"と"-"のノードはそれぞれ正と負の端子を表しています。"S"で示したノードは光強度入力 (W/m^2)を、"T"で示したノードは周囲温度入力($^{\circ}\text{C}$)を表します。上部のノードは、この動作条件で与えられる理論上の最大電力(W)になります。正負端子のノードがパワー回路用なのに対し、その他のノードはすべて制御回路用になります。

仕様

パラメータ	機 能
セル数 N_s	太陽電池のセル数 N_s 。太陽電池モジュールは N_s 個の連続した太陽電池から構成されます。
光強度 S_0	試験環境下での光強度 $S_0(\text{W/m}^2)$ 。この値は通常 1000 W/m^2 です。(データシートによる)
基準温度 T_{ref}	試験環境下の温度 $T_{ref}(^{\circ}\text{C})$
直列抵抗 R_s	各太陽電池の直列抵抗 $R_s(\Omega)$
シャント抵抗 R_{sh}	各太陽電池の並列抵抗 $R_{sh}(\Omega)$
短絡回路電流 I_{sc0}	試験温度 T_{ref} 時の各太陽電池の短絡回路電流 $I_{sc0}(\text{A})$
飽和電流 I_{s0}	試験温度 T_{ref} 時の各太陽電池のダイオード飽和電流 $I_{s0}(\text{A})$
バンドエネルギー E_g	各太陽電池のバンドエネルギー(eV)。結晶シリコンでは約 1.12、アモルファスシリコンでは約 1.75 です。
理想係数 A	各太陽電池の理想係数 A 。放射係数ともよばれ、結晶シリコンでは約 2、アモルファスシリコンでは 2 より小さい値になります。
温度係数 C_t	温度係数 $C_t(\text{A}/^{\circ}\text{C}$ または $\text{A/K})$
係数 k_s	光強度が太陽電池の温度に影響を及ぼす係数 k_s

N_s 個のセルからなる太陽電池モジュールの、1つのセルの詳細モデルの等価回路を以下の図に示します。



太陽電池(セル)の方程式は以下の通りです。

$$i = i_{ph} - i_d - i_r$$

$$i_{ph} = I_{sc0} \cdot \frac{S}{S_0} + C_t \cdot (T - T_{ref})$$

$$i_d = I_0 \cdot \left(e^{\frac{qV_d}{AkT}} - 1 \right)$$

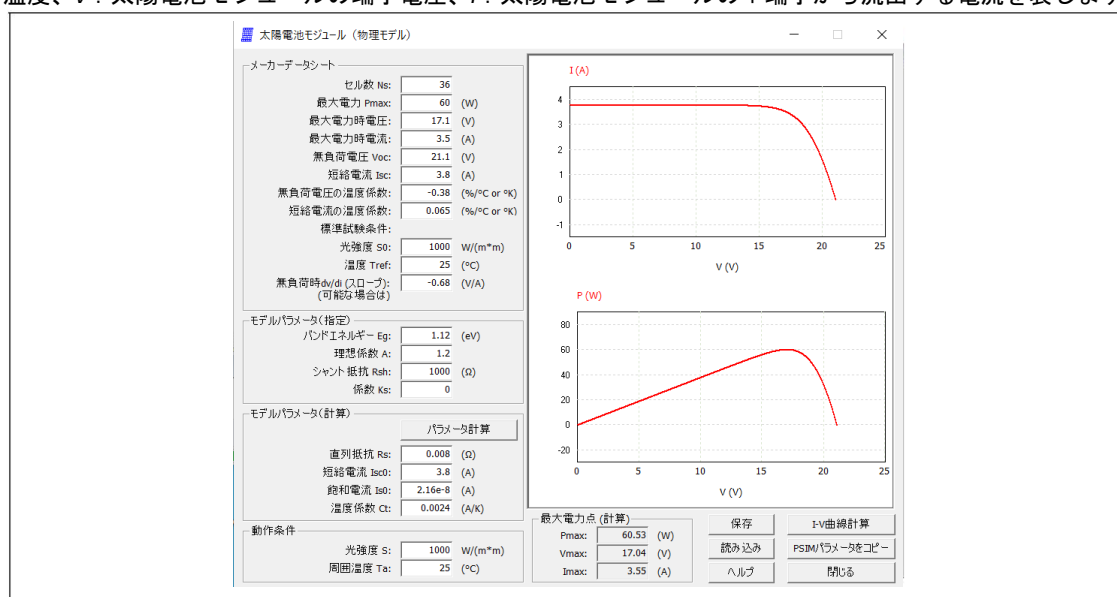
$$I_0 = I_{s0} \cdot \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^3 \cdot e^{\frac{qE_g}{Ak} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right)}$$

$$i_r = \frac{V_d}{R_{sh}}$$

$$V_d = \frac{V}{N_s} + i \cdot R_s$$

$$T = T_a + k_s \cdot S$$

ここで q : 電子の電荷($q=1.6 \times 10^{-19} \text{C}$)、 k : ボルツマン定数($k=1.3806505 \times 10^{-23}$)、 S : 光強度、 T_A : 周囲の温度、 v : 太陽電池モジュールの端子電圧、 i : 太陽電池モジュールの+端子から流出する電流を表します。



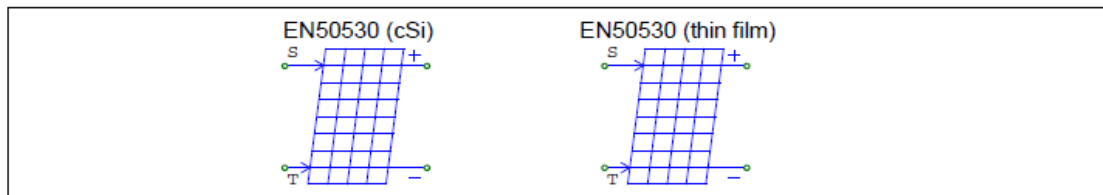
詳細モデルのパラメータの一部はデータシートから得ることができますが、残りは実験データから決定します。詳細モデルのパラメータをデータシートから得るためのツールとして、**Utilities** メニュー内に *Solar Cell (Physical Model)* が用意されています。

このツールでパラメータを決定する方法については、PSIM インストールフォルダの doc フォルダ内にある *Tutorial- Solar Module (Physical model).pdf*(英文)をご参照ください。

4.11.1.3 太陽電池モジュール - 結晶シリコン型/薄膜型(Solar Module - cSi and Thin-Film Models)

結晶シリコン型太陽電池モジュール、および薄膜型モデルは、EN50530 基準を参照して提供されます。予め、関連するデータは i - v 特性方程式に含まれているため、3 種類のパラメータのみで定義することができます。

シンボル



シンボルの"+"と"- "のノードはそれぞれ正と負の端子を表しています。"S"で示したノードは光強度入力 (W/m²)を、"T"で示したノードは周囲温度入力(°C)を表します。上部のノードは、この動作条件で与えられる理論上の最大電力(W)になります。

正負端子のノードがパワー回路用なのに対し、その他のノードはすべて制御回路用になります。

仕様

パラメータ	機 能
最大電力	最大出力(W)
最大電力電圧	最大出力時の端子電圧(V)
試験条件温度	試験環境下の温度(°C)

cSi および薄膜モデルの電流-電圧特性方程式は以下の通りです。

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \left(e^{(V_{pv} + I_{pv} R_s) / (m V_T)} - 1 \right) - (V_{pv} + I_{pv} R_s) / R_p$$

ここで

$$I_0 = C_0 T_{mod}^3 e^{-\frac{V_{pv}}{V_T}}$$

および

$$V_T = \frac{k T_{mod}}{e_0}$$

モジュール温度の線形温度モデルは以下の通りです。

$$T_{mod} = T + \frac{c}{1000} \frac{W}{m^2} G$$

上記の式において、

I_{pv}	モジュール電流 (Module current)
I_0	ダイオード飽和電流 (Diode saturation current)
I_{ph}	光電流 - 電流源 (Photo current, source current)
V_{pv}	モジュール電圧 (Module voltage)
V_t	温度電圧 (Temperature voltage)
V_{gap}	バンドギャップ (bandgap)
R_s	直列抵抗 (serial resistance)
R_p	並列抵抗 (parallel resistance)
T	絶対周囲温度 (Absolute ambient temperature) (K)
T_{mod}	モジュール温度 (Module temperature) (K)
G	照度 (Irradiance) (W/m ²)
c	線形温度モデルの定数 (Constant for the linear temperature model)
C_0	ダイオード飽和電流の係数 (Coefficient of diode saturation current)

M	ダイオード係数 (diode factor)
e_0	電気素量 (Elementary charge)
k	ボルツマン定数 (Boltzmann constant)

モデルの i-v カーブの定義に用いられる、テクノロジー依存のパラメータを以下に示します。

	cSi	Thin Film	Tolerance
$\frac{V_{mpp} _{G=200(W/m^2)}}{V_{mpp} _{G=1000(W/m^2)}}$	0.95	0.98	+/- 1%
$\frac{V_{mppSTC}}{V_{ocSTC}}$	0.8	0.72	< 1%
$\frac{I_{mppSTC}}{I_{scSTC}}$	0.9	0.8	< 1%

MPPT テストに使用する太陽電池モデル (PV generator model for MPPT performance tests)

MPP、開放電圧比

$$FF_V = \frac{V_{mppSTC}}{V_{ocSTC}}$$

MPP、短絡電流比

$$FF_I = \frac{I_{mppSTC}}{I_{scSTC}}$$

PV 電流の PV 電圧関数表記

$$I_{pv} = I_{sc} \left(e^{\frac{V_{pv}}{V_{oc} C_{AG}}} - 1 \right)$$

照度 G、温度 T に依存する短絡電流

$$I_{sc} = I_{scSTC} \frac{G}{G_{STC}} \cdot [1 + \alpha \cdot (T_{pv} - T_{STC})]$$

照度、温度に依存する解放電圧

$$V_{OC} = V_{ocSTC} \cdot (1 + \beta \cdot (T_{pv} - T_{STC})) \left(\ln \left(\frac{G}{C_G} + 1 \right) \cdot C_v - (C_R \cdot G) \right)$$

PV 温度は以下の環境温度条件に従います

$$T_{PV} = T_{amb} + T_0 + \frac{k}{1 + \tau \cdot s} \cdot G$$

ここで以下の通り定義されます。

T_{PV}	太陽電池温度計算値 (Computed PV generator temperature)
T_{amb}	環境温度 (Ambient temperature)
T_0	補正温度 (Correction temperature) ($T_0 = -30^\circ\text{C}$)
k	照度ゲイン (Irradiance gain) ($k=0.03 \text{ km}^2/\text{W}$)
τ	時定数 (Time constant) ($\tau = 5 \text{ minutes}$)
α	電流の温度係数 (Temperature coefficient of the current)

β 電圧の温度係数 (Temperature coefficient of the voltage)

C_R, C_V, C_G テクノロジ依存の補正係数 (Technology depending correction factor)

照度依存電流 I_0 は以下の通り定義されます。

$$I_0 = I_{scSTC} \left((1 - FF_I)^{[1/(1 - FF_V)]} \cdot \frac{G}{G_{STC}} \right)$$

定数 C_{AQ} は以下の通り定義されます。

$$C_{AQ} = \frac{FF_V - 1}{\ln(1 - FF_I)}$$

照度 200W/m^2 における V_{MPP} と照度 1000W/m^2 における V_{MPP} の比は以下の通り定義されます。

$$V_{L2H} = \frac{V_{MPP}|_{G=200(\text{W/m}^2)}}{V_{MPP}|_{G=1000(\text{W/m}^2)}}$$

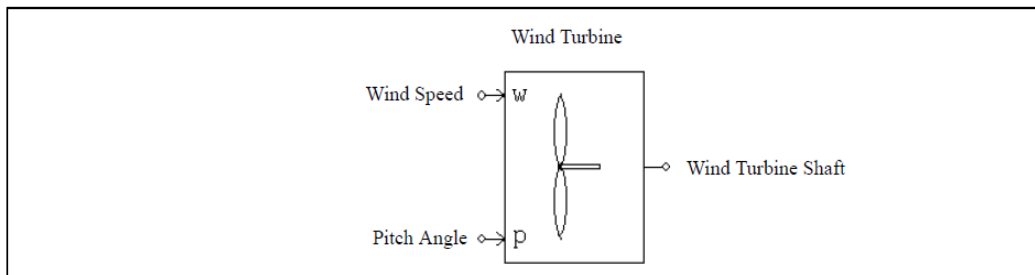
モデルのパラメータ以下の通り定義されます。

	cSi	Thin-Film	Tolerance
FF_V	0.8	0.72	< 1%
FF_I	0.9	0.8	< 1%
$C_G [\text{W/m}^2]$	2.514E-03	1.252E-03	-
C_V	8.593E-02	8.419E-02	-
$C_R [\text{m}^2/\text{W}]$	1.088E-04	1.476E-04	-
V_{L2H}	0.95	0.98	$\pm 1 \%$
α	0.04	0.02	
β	-0.4	-0.2	

4.11.2 風車 (Wind Turbine)

風車のシンボルとパラメータは以下の通りです。

シンボル



仕様

パラメータ	機 能
公称出力電力	ピッチ角が 0°時の風車の最大出力電力(W) このモデルはピッチ角が 0°の時に最も高い電力を出力できるよう設計されています。この値は発電機の定格出力を超えない値に設定して下さい。
基本風速	風車の最大出力電力を発生させる基本風速(m/s)
基本回転数	風車の最大出力電力を発生させる基本回転数(rpm)
初期回転数	風車の初期回転数(rpm)
慣性モーメント	風車羽根の慣性モーメント(kg・m ²)
トルクフラグ	風車の内部トルクを表示させるフラグ(0:非表示、1:表示)
マスタ/スレーブフラグ	接続された機械系のマスタ/スレーブフラグ(0:スレーブ、1:マスタ)

このシンボル中で"w"のノードは風速(m/s)を表し、"p"のノードは羽根のピッチ角(deg.)を表します。これらのノードはいずれも制御回路用です。

風車によって生成される電力は、以下の方程式で表されます。

$$P = \frac{1}{2} \cdot A \cdot v_{wind}^3 \cdot \rho \cdot C_p$$

ここで A は回転羽根の面積、 v_{wind} は風速、 ρ は空気密度、 C_p は出力係数です。出力係数 C_p は周速比 λ と羽根のピッチ角 β の関数で、以下のように表されます。

$$C_p = c_1 \cdot (c_2 - c_3\beta - c_4\beta^x - c_5) \cdot e^{-c_6} + c_7$$

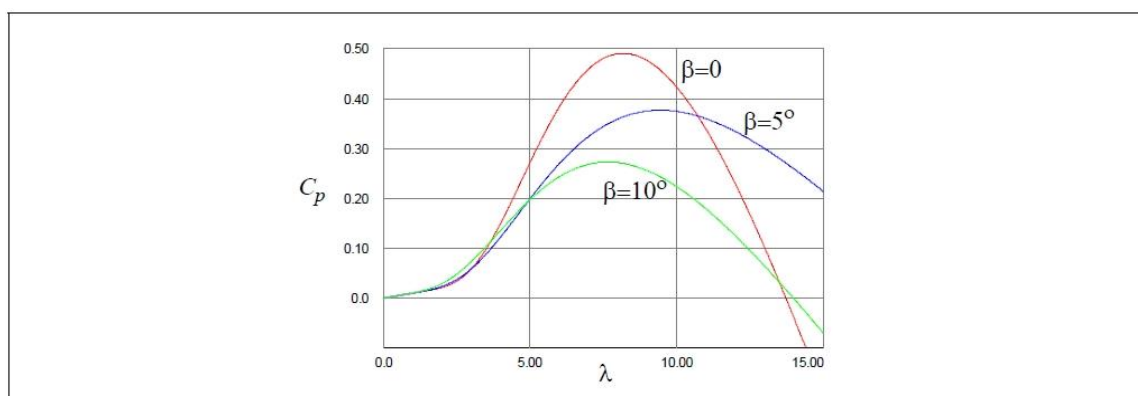
ここで $c_1=0.5$ 、 $c_2=116 \cdot \lambda'$ 、 $c_3=0.4$ 、 $c_4=0$ 、 $c_5=5$ 、 $c_6=21 \cdot \lambda'$ 、 $c_7=0.01 \cdot \lambda$ 、また

$$\lambda = \frac{\omega_m \cdot R_{blade}}{v_{wind}}$$

$$\lambda' = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}$$

となります。ここで、 ω_m はロータの回転速度(rad/sec)、 R_{blade} は回転羽根の半径(m)を表します。

この出力係数 C_p と周速比 λ 、羽根のピッチ角 β との関係は以下のグラフに表されます。



この図は周速比 λ が 8.18 の時に出力係数 C_p が最大値 0.49 をとることを示しています。 C_p が最大値のときの C_p と λ の値を公称値とするため、この図より $C_{p_nom}=0.49$ 、 $\lambda_{nom}=8.18$ と決定されます。風車を制御する一つの方法は、公称値で(または公称値付近で)周速比を維持することであり、このとき風車が生成する電力は最大値となります。

4.11.3 バッテリモデル (Battery Models)

PSIM はさまざまなバッテリーモデルを提供します。ユーザーは、検査測定メーカーからの情報に従ってモデルを選択できます。

4.11.3.1 リチウムイオンバッテリーモデル (Lithium-Ion Battery Model)

リチウムイオンバッテリーモデルが提供されています。二つのシンボルから構成されています。一つは、バッテリー、もう一つは、バッテリーセルです。

シンボル



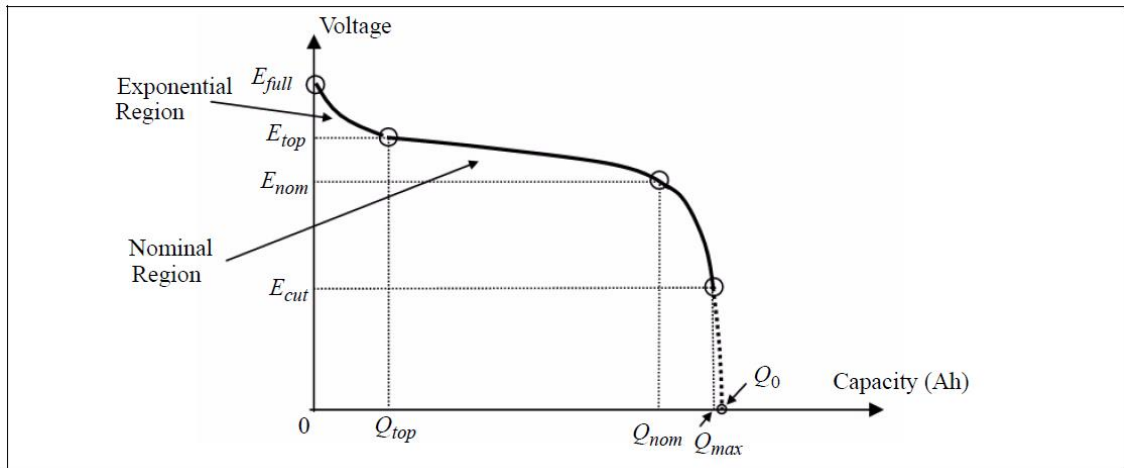
仕様

パラメータ	機 能
直列セル个数	バッテリーパック内の直列のセルの個数 N_s
並列セル个数	バッテリーパック内の並列のセルの個数 N_p
電圧ディレーティング係数	電圧の定格ディレーティング係数 K_s 0(100%の定格低減)から 1(定格低減なし)まで設定できます。
容量ディレーティング係数	容量の定格ディレーティング係数 K_p 0(100%の定格低減)から 1(定格低減なし)まで設定できます。
定格電圧	バッテリーセルの定格電圧(E_{rated}) (V)
対応電圧	最大容量に対応したバッテリー電圧(E_{cut}) (V)
定格容量	バッテリーセルの定格容量(Q_{rated}) (Ah)
内部抵抗	バッテリーセルの内部抵抗(R_{ohm})
放電電流	放電曲線における放電電流(A)
容量係数	Q_0 (0V での放電容量)の Q_{max} に対する比。 1 または 1 より少し大きくなります。
最大電圧	バッテリーセルのフル(または最大)電圧(E_{full}) (V)
指数バッテリー電圧	放電曲線における指数領域の終端のバッテリー電圧(E_{top})(V)
公称バッテリー電圧	放電曲線における公称領域の終端のバッテリー電圧(E_{nom})(V)
最大容量	バッテリーセルの最大容量(Q_{max}) (Ah)
指数バッテリー容量	放電曲線における指数領域の終端のバッテリー容量(Q_{top}) (Ah)
公称バッテリー容量	放電曲線における公称領域の終端のバッテリー容量(Q_{nom})(Ah)
初期充電状態	充電状態(SOC) (0 から 1 まで)

バッテリーイメージの上側や、バッテリーセルシンボルイメージの横に描かれているノードは SOC 出力用のものです。これは、制御回路ノードです。

パラメータ E_{rated} , E_{cut} , Q_{rated} はメーカーのデータシートから直接読み取ることができ他のいくつかのパラメータはバッテリーの放電曲線から求めることができます。

典型的な放電曲線は次のようになります。



CapacityFactor はほぼ Q_0 (0V の時の容量) と Q_{max} のときの比になります。その値は 1 に近い値でありバッテリー電圧は SOC=0 の時に E_{cut} に等しくなるように設定する必要があります。

バッテリーパラメータは、一つのバッテリーセルに対して使用します。一方、モデルは、直列または並列のセルが一つでない場合のバッテリーパックを定義するために使用します。バッテリーパックでは、全ての電圧は、 $N_s \cdot K_s$ 倍で乗算する必要があります。同様に、全ての容量は、 $N_p \cdot K_p$ で、また抵抗は N_s/N_p で乗算する必要があります。例えば、バッテリーパック全体では以下の通りとなります。

$$E_{rated_total} = N_s \cdot K_s \cdot E_{rated}$$

$$E_{cut_total} = N_s \cdot K_s \cdot E_{cut}$$

$$E_{full_total} = N_s \cdot K_s \cdot E_{full}$$

$$E_{top_total} = N_s \cdot K_s \cdot E_{top}$$

$$E_{nom_total} = N_s \cdot K_s \cdot E_{nom}$$

$$Q_{rated_total} = N_p \cdot K_p \cdot Q_{rated}$$

$$Q_{max_total} = N_p \cdot K_p \cdot Q_{max}$$

$$Q_{top_total} = N_p \cdot K_p \cdot Q_{top}$$

$$Q_{nom_total} = N_p \cdot K_p \cdot Q_{nom}$$

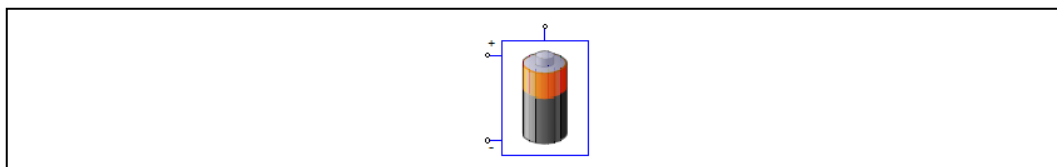
$$R_{battery_total} = \frac{N_s}{N_p} \cdot R_{battery}$$

リチウムイオンバッテリーモデルの定義及び使用方法についての詳細な説明は、"Tutorial – how to use lithium-ion battery mode.pdf"を参照してください。

4.11.3.2 ルックアップテーブルを用いたバッテリーモデル(Battery (Lookup Table) Model)

ルックアップテーブルを用いたバッテリーモデルが提供されています。

シンボル



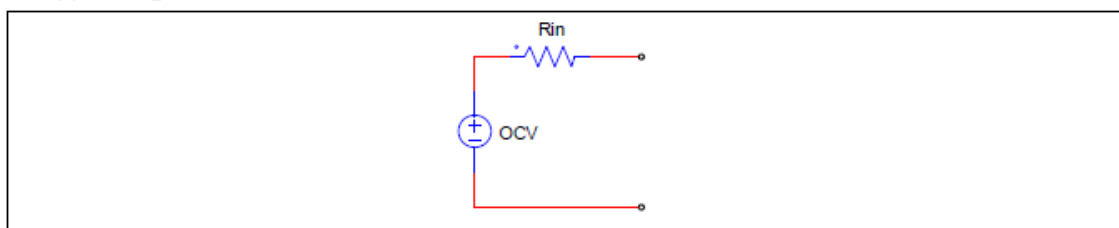
仕様

パラメータ	機 能
直列セル个数	バッテリーパック内の直列のセルの個数 N_s
並列セル个数	バッテリーパック内の並列のセルの個数 N_p
電圧ディレーティング係数	電圧の定格ディレーティング係数 K_s 0(100%の定格低減)から 1(定格低減なし)まで設定できます。
容量ディレーティング係数	容量の定格ディレーティング係数 K_p 0(100%の定格低減)から 1(定格低減なし)まで設定できます。
最大容量	バッテリーセルの最大容量(Q_{max}) (Ah)
初期充電状態	充電状態(SOC) (0 から 1 まで)
OCV-SOC テーブル	各開放電圧(OCV)に対する充電状態(SOC)の組を定義したファイル名。
Rin-SOC テーブル (放電)	放電時における各内部抵抗(R_{in})に対する充電状態(SOC)の組を定義したファイル名。
Rin-SOC テーブル (充電)	充電時における各内部抵抗(R_{in})に対する充電状態(SOC)の組を定義したファイル名。

バッテリーイメージの上部にある余分なノードは SOC 出力用で、制御回路ノードです。

モデルは、直列または並列のセル数が 1 でない場合、バッテリーパックを定義するために使用することができますが、電池パラメータは単一のバッテリーセルに適用されることに留意してください。バッテリーパックの場合、すべての電圧は、 $N_s \cdot K_s$ 、すべての容量は、 $N_p \cdot K_p$ 、抵抗は、 N_s / N_p となります。

電池の等価回路を次に示します。



内部抵抗 R_{in} は、充電と放電の二つのテーブルを定義することができます。

メーカーのデータシートからのルックアップテーブルを得るための手順は次のとおりです。

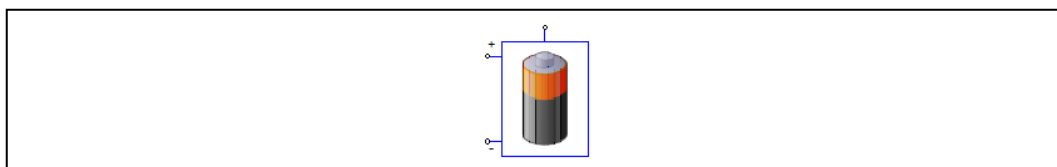
- ・ユーティリティメニューから"Curve Capture Tool"を選択し、データシートから異なる放電電流での放電容量に対するバッテリー電圧の 2 つの放電曲線をキャプチャし、テキストデータとして保存します。

- ・回路ファイル"Extracting OCV and Rin_discharge.psimsch"を開きます。("examples\Batteries\Lookup table"にあります。) パラメータファイルの中の I1,I2 および Qmax を設定します。(I1,I2 は前のステップで取得した2つの曲線の放電電流です。) 2つのルックアップテーブルを前のステップで取得したテキストデータに置き換えます。Simulation Control の総時間は Qmax より大きい値にします。シミュレーションを実行し、SIMVIEW で x 軸を SOC として OCV を表示します。"ファイル" >> "表示方式を名前付けて保存"により表示されたグラフをテキストファイルに保存します。Rin_discharge についても同様に表示させてテキストファイルに保存します。それぞれのテキストファイルはテキストエディタでファイルを開き、最初の行を削除します。これで OCV と Rin_discharge のテーブルが取得できました。
- ・ユーティリティメニューから"Curve Capture Tool"を選択し、時間(分)に対するバッテリー電圧、充電電流と充電容量の充電曲線をキャプチャし、テキストデータとして保存します。
- ・回路ファイル"Extracting Rin_charge.psimsch"を開きます。("examples\Batteries\Lookup table"にあります。) 4つのルックアップテーブルを前のステップで取得したテキストデータに置き換えます。比例制御器のゲインを $1/Q_{max}$ に設定します。Simulation Control の総時間(秒)はキャプチャした時間(分)を秒換算した値より大きい値にします。シミュレーションを実行し、SIMVIEW で x 軸を SOC として Rin_charge を表示します。ファイル" >> "表示方式を名前付けて保存"により表示されたグラフをテキストファイルに保存します。テキストエディタでファイルを開き、最初の行を削除します。これで Rin_charge テーブルが取得できました。

4.11.3.3 SOC のルックアップテーブルを用いたバッテリーモデル(Battery (Lookup Table SOC) Model)

ルックアップテーブルを用いたバッテリーモデルが提供されています。本モデルと、前出のモデル(0)との違いは、SOC=0(完全放電)と SOC=1(満充電)に対応する放電容量を定義することができる点です。

シンボル



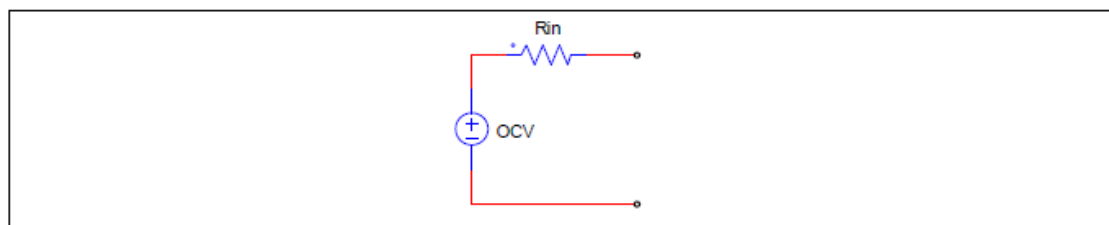
仕様

パラメータ	機 能
直列セル个数	バッテリーパック内の直列のセルの個数 N_s
並列セル个数	バッテリーパック内の並列のセルの個数 N_p
電圧ディレーティング係数	電圧の定格ディレーティング係数 K_s 0(100%の定格低減)から1(定格低減なし)まで設定できます。
容量ディレーティング係数	容量の定格ディレーティング係数 K_p 0(100%の定格低減)から1(定格低減なし)まで設定できます。
最大容量	バッテリーセルの最大容量(Q_{max}) (Ah)
SOC=1 時放電容量	SOC=1 に対応した Q_{ext1} におけるバッテリーセルの放電容量。
SOC=0 時放電容量	SOC=0 に対応した Q_{ext0} におけるバッテリーセルの放電容量。
初期充電状態	充電状態(SOC) (0 から 1 まで)
OCV-SOC テーブル	各開放電圧(OCV)に対する充電状態(SOC)の組を定義したファイル名。
Rin-SOC テーブル (放電)	放電時における各内部抵抗(R_{in})に対する充電状態(SOC)の組を定義したファイル名。
Rin-SOC テーブル (充電)	充電時における各内部抵抗(R_{in})に対する充電状態(SOC)の組を定義したファイル名。

バッテリーイメージの上部にある余分なノードは SOC 出力用で、制御回路ノードです。

モデルは、直列または並列のセル数が 1 でない場合、バッテリーパックを定義するために使用することができますが、電池パラメータは単一のバッテリーセルに適用されることに留意してください。バッテリーパックの場合、すべての電圧は、 $N_s \cdot K_s$ 、すべての容量は、 $N_p \cdot K_p$ 、抵抗は、 N_s/N_p となります。

電池の等価回路を次に示します。

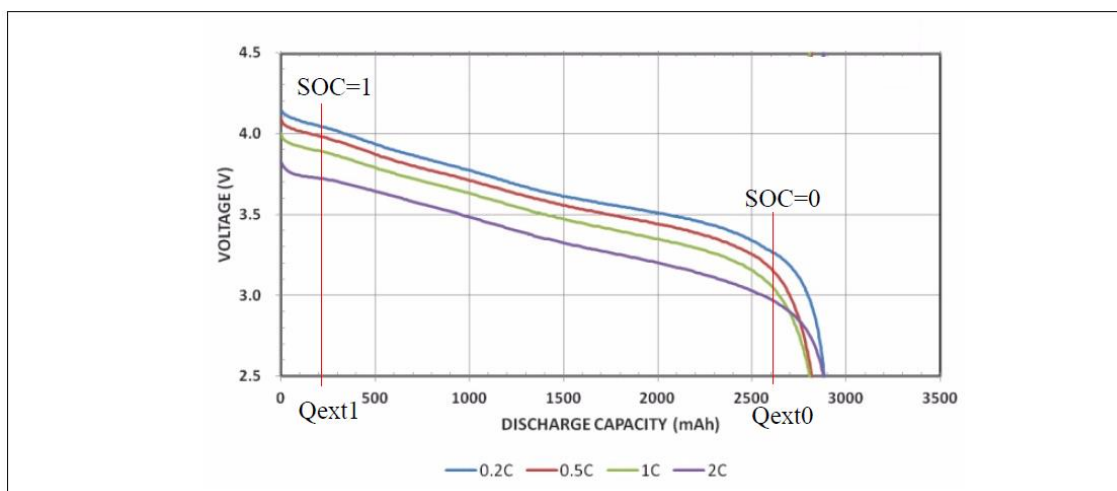


内部抵抗 R_{in} は、充電と放電の二つのテーブルを定義することができます。

放電曲線に関して、一般的には、定義される放電容量(放電の開始時に)が 0 である場合には SOC=1、放電容量が Q_{max} の場合には SOC=0 です。しかし、このモデルでは、以下の図に示すように、SOC=0 と SOC=1 の点を定義するオプションがあります。

このモデルでは、SOC は 0 未満、1 以上とすることができます。

3 のルックアップテーブル OCV、 R_{in} (放電)、および R_{in} (充電)は、すべての伝統的な SOC の定義を用いて得られることに注意してください。これは放電容量が 0 のとき SOC=1、放電容量が Q_{max} のとき SOC=0 であることを示しています。



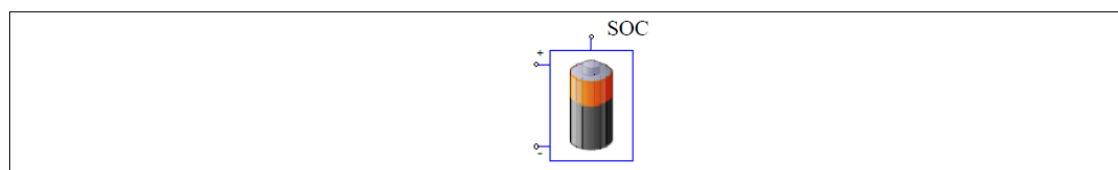
メーカーのデータシートからのルックアップテーブルを得るための手順は次のとおりです。

- ・ユーティリティメニューから"Curve Capture Tool"を選択し、データシートから異なる放電電流での放電容量に対するバッテリー電圧の2つの放電曲線をキャプチャし、テキストデータとして保存します。
- ・回路ファイル"Extracting OCV and Rin_discharge.psimsch"を開きます。("examples\Batteries\Lookup table (SOC)"にあります。) パラメータファイルの中の I1,I2 および Qmax を設定します。(I1,I2 は前のステップで取得した2つの曲線の放電電流です。) 2つのルックアップテーブルを前のステップで取得したテキストデータに置き換えます。Simulation Control の総時間は Qmax より大きい値にします。シミュレーションを実行し、SIMVIEW で x 軸を SOC として OCV を表示します。"ファイル" >> "表示方式を名前付けて保存"により表示されたグラフをテキストファイルに保存します。Rin_discharge についても同様に表示させてテキストファイルに保存します。それぞれのテキストファイルはテキストエディタでファイルを開き、最初の行を削除します。これで OCV と Rin_discharge のテーブルが取得できました。
- ・ユーティリティメニューから"Curve Capture Tool"を選択し、時間(分)に対するバッテリー電圧、充電電流と充電容量の充電曲線をキャプチャし、テキストデータとして保存します。
- ・回路ファイル"Extracting Rin_charge.psimsch"を開きます。("examples\Batteries\Lookup table (SOC)"にあります。) 4つのルックアップテーブルを前のステップで取得したテキストデータに置き換えます。比例制御器のゲインを $1/Q_{max}$ に設定します。Simulation Control の総時間(秒)はキャプチャした時間(分)を秒換算した値より大きい値にします。シミュレーションを実行し、SIMVIEW で x 軸を SOC として Rin_charge を表示します。ファイル" >> "表示方式を名前付けて保存"により表示されたグラフをテキストファイルに保存します。テキストエディタでファイルを開き、最初の行を削除します。これで Rin_charge テーブルが取得できました。

4.11.3.4 Q のルックアップテーブルを用いたバッテリーモデル(Battery (Lookup Table Q) Model)

ルックアップテーブルを用いたバッテリーモデルが提供されています。本モデルは、SOC を充放電容量で置き換えてある点を除いて前出の[モデル](#)と同じです。同様に、本モデルでは、SOC=0 と SOC=1 に対応する放電容量が定義されます。

シンボル



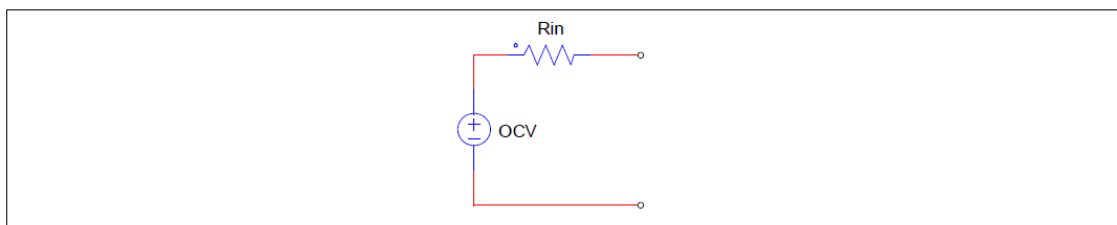
仕様

パラメータ	機 能
直列セル个数	バッテリーパック内の直列のセルの個数 N_s
並列セル个数	バッテリーパック内の並列のセルの個数 N_p
電圧ディレーティング係数	電圧の定格ディレーティング係数 K_s 0(100%の定格低減)から1(定格低減なし)まで設定できます。
容量ディレーティング係数	容量の定格ディレーティング係数 K_p 0(100%の定格低減)から1(定格低減なし)まで設定できます。
最大容量	バッテリーセルの最大容量(Q_{max}) (Ah)
SOC=1 時放電容量	SOC=1 に対応した Q_{ext1} におけるバッテリーセルの放電容量。
SOC=0 時放電容量	SOC=0 に対応した Q_{ext0} におけるバッテリーセルの放電容量。
初期充電状態	充電状態(SOC) (0 から 1 まで)
OCV-Q 放電テーブル	各開放電圧(OCV)に対する放電状態(Q)の組を定義したファイル名。
Rin-SOC テーブル (放電)	放電時における各内部抵抗(R_{in})に対する充電状態(SOC)の組を定義したファイル名。
Rin-SOC テーブル (充電)	充電時における各内部抵抗(R_{in})に対する充電状態(SOC)の組を定義したファイル名。

バッテリーイメージの上部にある余分なノードは SOC 出力用で、制御回路ノードです。

モデルは、直列または並列のセル数が 1 でない場合、バッテリーパックを定義するために使用することができますが、電池パラメータは単一のバッテリーセルに適用されることに留意してください。バッテリーパックの場合、すべての電圧は、 $N_s \cdot K_s$ 、すべての容量は、 $N_p \cdot K_p$ 、抵抗は、 N_s / N_p となります。

電池の等価回路を次に示します。



内部抵抗 R_{in} は、充電と放電の二つのテーブルを定義することができます。

放電曲線に関して、一般的には、定義される放電容量(放電の開始時に)が 0 である場合には SOC=1、放電容量が Q_{max} の場合には SOC=0 です。しかし、このモデルでは、以下の図に示すように、SOC=0 と SOC=1 の点を定義するオプションがあります。

このモデルでは、SOC は 0 未満、1 以上とすることができます。

3 のルックアップテーブル OCV、 R_{in} (放電)、および R_{in} (充電)は、すべての伝統的な SOC の定義を用いて得られることに注意してください。これは放電容量が 0 のとき SOC=1、放電容量が Q_{max} のとき SOC=0 であることを示しています。

メーカーのデータシートからのルックアップテーブルを得るための手順は次のとおりです。

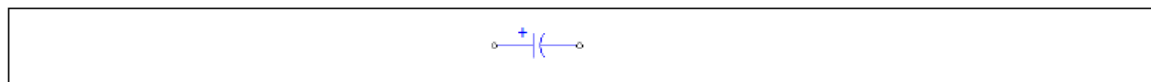
・ユーティリティメニューから“Curve Capture Tool”を選択し、データシートから異なる放電電流での放電容量に対するバッテリー電圧の 2 つの放電曲線をキャプチャし、テキストデータとして保存します。

- ・回路ファイル"Extracting OCV and Rin_discharge.psimsch"を開きます。("examples\ Batteries\Lookup table (Q)"にあります。) パラメータファイルの中の I1,I2 および Qmax を設定します。(I1,I2 は前のステップで取得した2つの曲線の放電電流です。) 2つのルックアップテーブルを前のステップで取得したテキストデータに置き換えます。Simulation Control の総時間は Qmax より大きい値にします。シミュレーションを実行し、SIMVIEW で x 軸を Qdischg として OCV を表示します。"ファイル" >> "表示方式を名前付けて保存"により表示されたグラフをテキストファイルに保存します。Rin_discharge についても同様に表示させてテキストファイルに保存します。それぞれのテキストファイルはテキストエディタでファイルを開き、最初の行を削除します。これで OCV と Rin_discharge のテーブルが取得できました。
- ・ユーティリティメニューから"Curve Capture Tool"を選択し、時間(分)に対するバッテリー電圧、充電電流と充電容量の充電曲線をキャプチャし、テキストデータとして保存します。
- ・回路ファイル"Extracting Rin_charge.psimsch"を開きます。("examples\ Batteries\Lookup table (Q)"にあります。) 4つのルックアップテーブルを前のステップで取得したテキストデータに置き換えます。比例制御器のゲインを $1/Q_{max}$ に設定します。Simulation Control の総時間(秒)はキャプチャした時間(分)を秒換算した値より大きい値にします。シミュレーションを実行し、SIMVIEW で x 軸を Qext として Rin_charge を表示します。ファイル" >> "表示方式を名前付けて保存"により表示されたグラフをテキストファイルに保存します。テキストエディタでファイルを開き、最初の行を削除します。これで Rin_charge テーブルが取得できました。

4.11.4 ウルトラキャパシタモデル (Ultracapacitor Model)

ウルトラキャパシタ(スーパーキャパシタ)は、高パワー密度で充放電回数に優れた電気エネルギー貯蔵デバイスです。

シンボル



仕様

パラメータ	機 能
直列セル个数	直列接続セル数
並列セル个数	並列接続セル数
セルあたりの容量	セル当たりの標準容量 (F)
係数 Kv	電圧係数
抵抗 R1	抵抗係数 R1 (Ω)
キャパシタンス C1	容量係数 C1 (F)
抵抗 R2	抵抗係数 R2 (Ω)
キャパシタンス C2	容量係数 C2 (F)
抵抗 R3	抵抗係数 R3 (Ω)
キャパシタンス C3	容量係数 C3 (F)
抵抗 R4	抵抗係数 R4 (Ω)
最大電圧	セル当たりの最大定格電圧 (V)
初期電圧	セル当たりの初期キャパシタ電圧 (V)

パラメータ Kv、R1、C1 は短時間のキャパシタ応答(秒単位)に対応し、パラメータ R2、C2 は中程度の時間での応答(分単位)に対応します。R3、C3 は長時間の応答(数 100 分)に対応します。R4 は自己放電による容量の損失に対応します。

より詳細な情報は、"Tutorial – Ultracapacitor model.pdf"を参照下さい。

4.12 EMI デザインスイート (EMI Design Suite)

EMI Design Suite は、EMI 解析に必要な要素を提供します。さらに、特定の EMI 規格に対応した 特定の EMI 規格に対応した EMI フィルターを設計するための便利な方法を提供します。

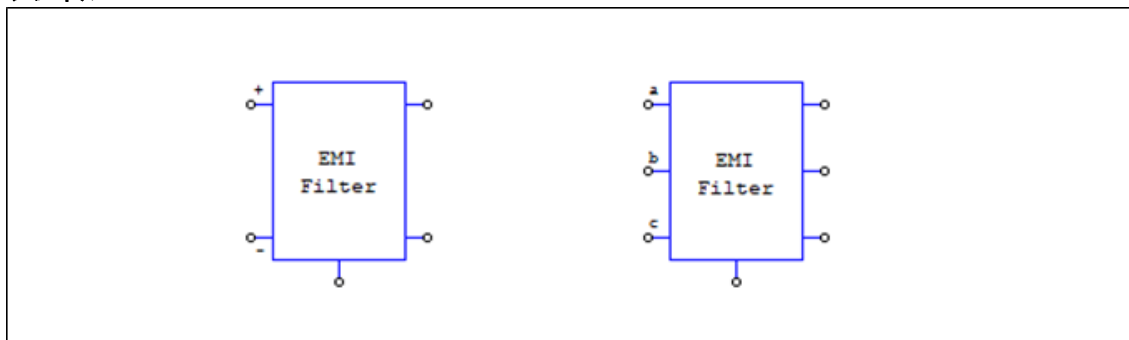
Design Suites >> EMI Design Suite メニューでは、多数の設計テンプレートが提供されています。詳細はこれらのデザイン・テンプレートの使用方法の詳細については、"Tutorial" フォルダ内の "Tutorial - EMI Design Suite.pdf" を参照してください。チュートリアルフォルダ内のドキュメント「Tutorial - EMI Design Suite.pdf」を参照してください。

EMI Design Suite の要素を以下に示します。

4.12.1 EMI フィルタ (EMI Filter)

単相と三相の EMI フィルタは次のようになります。

シンボル



仕様

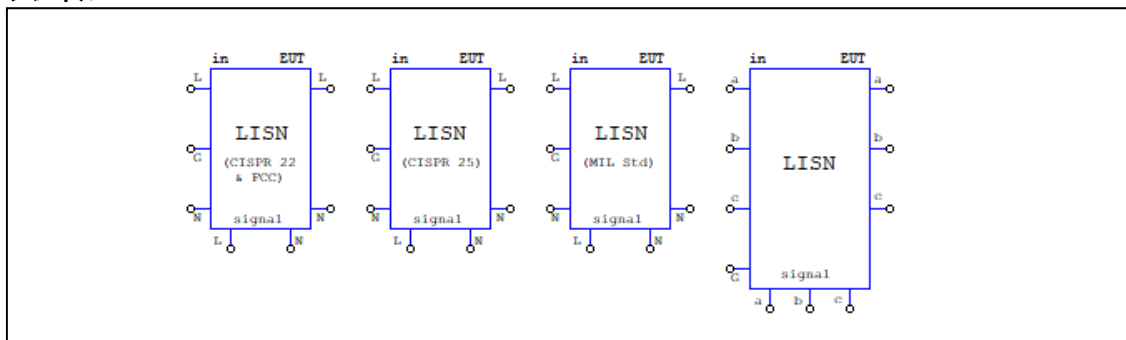
パラメータ	機 能
段数	フィルター段数。1（1段）もしくは2（2段）のどちらかです。
DM インダクタンス	差動モードインダクタンス L_{dm} (H)
DM 抵抗	差動モード抵抗 R_{dm} (Ω)
CM インダクタンス	コモンモードチョークインダクタンス L_{cm} (H)
CM 漏れインダクタンス	コモンモードチョーク漏れインダクタンス L_{cm_lk} (H)
CM 巻線抵抗	コモンモードチョーク巻線抵抗 R_{cm} (Ω)
CM 巻線容量	コモンモードチョーク巻線容量 C_{cm} (F)
X 容量	入力端子間の容量 C_x (F)
X 容量抵抗	R_{C_x} , C_x の ESR（等価直列抵抗）(Ω)
X 容量インダクタンス	L_{C_x} は C_x の ESL（等価直列インダクタンス）(H)
Y 容量	出力端子と接地点間との容量 C_y (F)
Y 容量抵抗	R_{C_y} , C_y の ESR（等価直列抵抗）(Ω)
Y 容量インダクタンス	L_{C_y} , C_y の ESL（等価直列インダクタンス）(H)
減衰容量	ダンピングコンデンサ C_d の静電容量 (F)
減衰抵抗	R_{C_d} , ダンピングコンデンサ C_d の抵抗値(Ω)

4.12.2 ラインインピーダンス安定化ネットワーク(CISPR22/FCC) (LISN(CISPR22/FCC))

異なる EMI 規格に対応するため、複数の LISN（Line Impedance Stabilization Network）ブロックが用意されています。

- ・ LISNs（CISPR 22/FCC）
- ・ LISN(CISPR 25)
- ・ LISN（MIL Std）
- ・ 3-phLISN

シンボル



LISN ブロックは、左側が入力端子電源のライン (L) とニュートラル (N)、右が被試験機器のライン (L) とニュートラル (N) に接続されています。コモンモード・グラウンドはノード G に接続されています。ブロックの下部には、シグナルアナライザに送る測定信号のライン側 (L) とニュートラル側 (N) があります。

ラインと被試験機(EUT)の間に 3 相の LISN ブロックを挿入します。

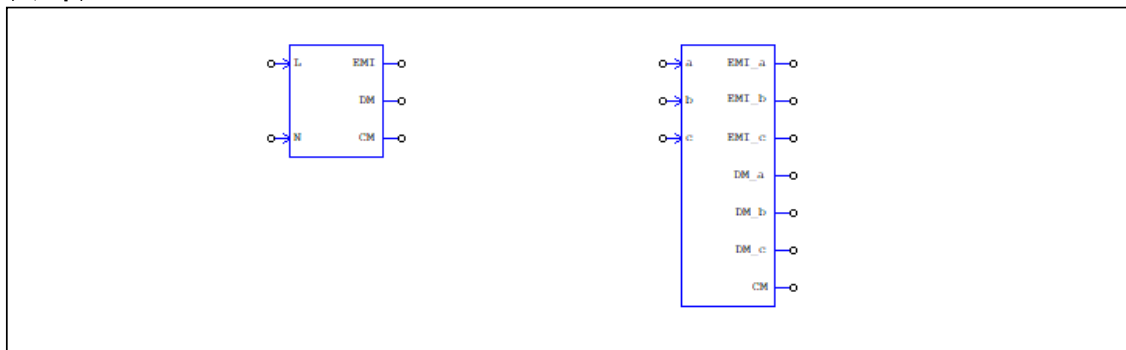
ボトムノードは信号アナライザに接続します。

4.12.3 信号アナライザ (Signal Analyzer)

シグナル・アナライザ・ブロックは、EMI ラインとニュートラル信号のうち、コモンモードと差動モードの信号を取得します。

単相と三相の 2 種類があります。

シンボル

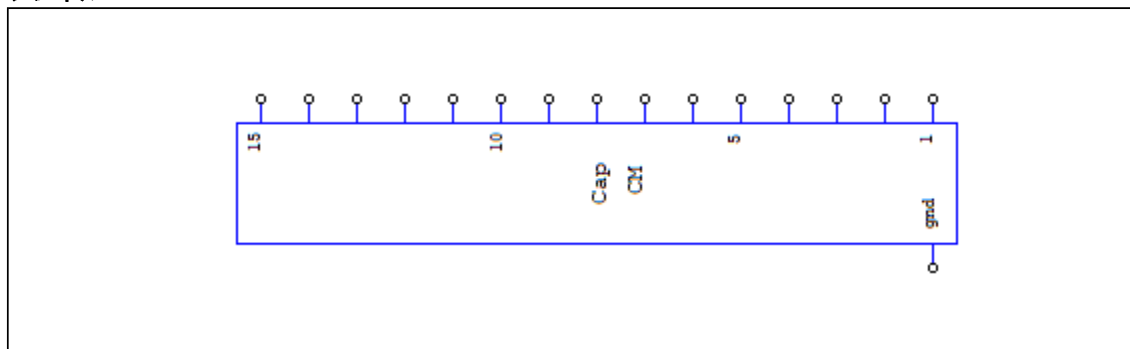


信号アナライザは、コモンモードと差動モードの EMI を別々に解析し、軽減する方法を提供します。

4.12.4 コモンモード容量ブロック (Common-Mode Capacitor Block)

コモンモード容量ブロックは、ピックアップポイントとコモンモードグラウンド間のコモンモード容量を定義する便利なブロックです。

シンボル



仕様

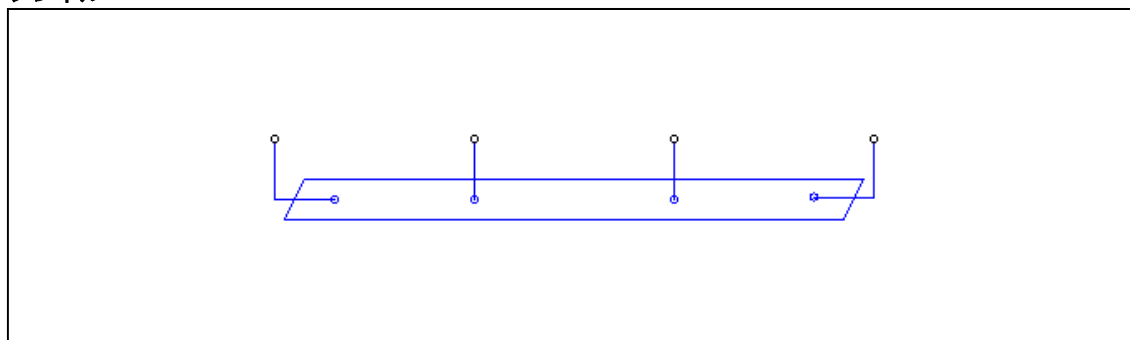
パラメータ	機 能
容量 i	端子番号 i の容量です。 i は 1 から 15 までです。未使用の端子は接地してください。

4.12.5 グランドプレーン

EMI フィルタ回路のグランドプレーンとして機能する素子です。

4 つの端子を持ち、接地面を分割しています。を 3 分割しています。

シンボル



仕様

パラメータ	機 能
インダクタンス L_{gi}	セクション i のインダクタンス (H)
抵抗 RL_{gi}	セクション i の抵抗 (Ω)

第5章 制御回路素子

この章では、PSIM のライブラリに含まれている素子について説明します。
よく使用される制御機能ブロックは、制御カテゴリのすぐ下に一覧表示されます。
その他の要素は、次のサブフォルダーに分類されます。

- ・ フィルタ
- ・ 計算ブロック
- ・ その他の機能ブロック
- ・ 論理素子
- ・ デジタル制御モジュール
- ・ SimCoupler モジュール
- ・ ModCoupler モジュール
- ・ PIL モジュール
- ・ デザインスイートブロック
- ・ PLL 素子

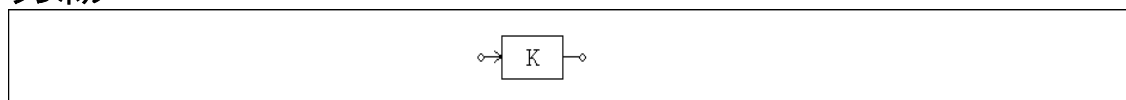
5.1 よく使われる機能ブロック (Often-Used Control Function Blocks)

5.1.1 PID 制御器 (PID Controllers)

比例制御器 (Proportional Controller)

比例(P)制御器の出力は入力にゲインを掛けた値になります。

シンボル



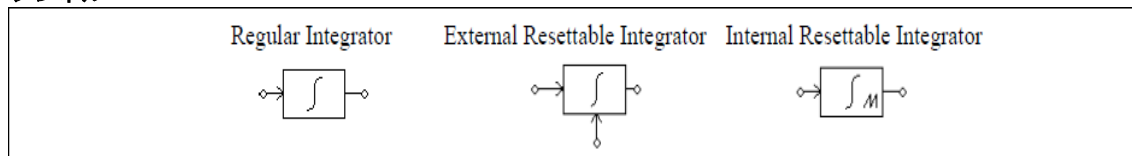
仕様

パラメータ	機 能
ゲイン	伝達関数のゲイン K

積分器 (Integrator)

積分器には 3 種類あります。通常の積分器、外部リセット機能付き積分器、もうひとつは内部リセット機能付き積分器です。

シンボル



仕様

積分器の場合

パラメータ	機 能
時定数	積分器の時定数 T(sec)
出力の初期値	出力の初期値

外部リセット機能付き積分器の場合

パラメータ	機 能
時定数	積分器の時定数 T(sec)
出力の初期値	出力の初期値
リセットフラグ	リセットフラグ(0 : エッジリセット ; 1 : レベルリセット)

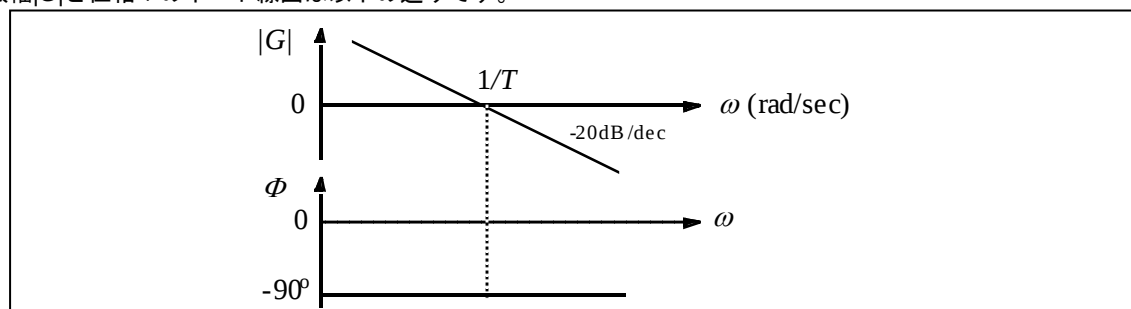
内部リセット機能付き積分器の場合

パラメータ	機 能
時定数	積分器の時定数 T(sec)
出力の初期値	出力の初期値
出力下限値	出力の下限值
出力上限値	出力の上限値

積分器の伝達関数は、以下の通りです。

$$G(s) = \frac{1}{sT}$$

振幅|G|と位相φのボード線図は以下の通りです。



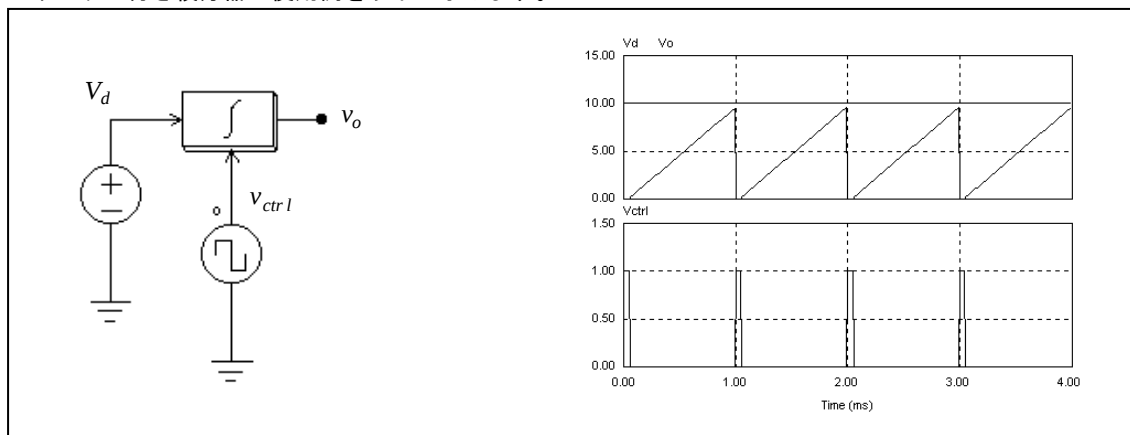
外部リセット付き積分器の出力は制御信号によりリセットすることができます。エッジリセット(リセットフラグ=0)の場合、制御信号の立ち上がりエッジで、積分器の出力は0にリセットされます。レベルリセット(リセットフラグ=1)の場合、制御信号を High(1)にすると、積分器の出力は0にリセットされます。

内部リセット付き積分器は出力が下限値か上限値のどちらかに達するとき、出力が0にリセットされます。これは、エッジリセット付き外部積分器と同じ動作をしますがこの場合外部のリセット回路を設定する必要はありません。

積分結果が過大にならないように、積分器の出力にはリミッタを接続する必要があります。また、PSIMの仕様として、積分器とリミッタを接続したとき、リミッタの出力だけでなく、積分器の出力自体もリミットされます。ご注意ください。(下図参照)PI制御器も同様の仕様になっています。

例

リセット付き積分器の使用例を以下に示します。



上の図で、積分器の入力は直流です。積分器の制御信号にパルス波形を入力し、積分器の出力を各サイクルの終わりにリセットしています。

微分器 (Differentiator)

微分器の伝達関数は以下になります。

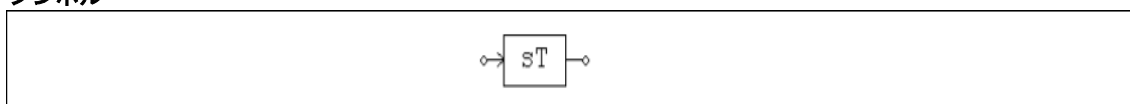
$$G(s) = sT$$

微分は以下のように計算しています。

$$v_o(t) = T \cdot \frac{v_{in}(t) - v_{in}(t - \Delta t)}{\Delta t}$$

ここで、 Δt はシミュレーションタイムステップ、 $v_{in}(t)$ と $v_{in}(t - \Delta t)$ はそれぞれ現在時刻の入力と 1 ステップ前の入力です。

シンボル



仕様

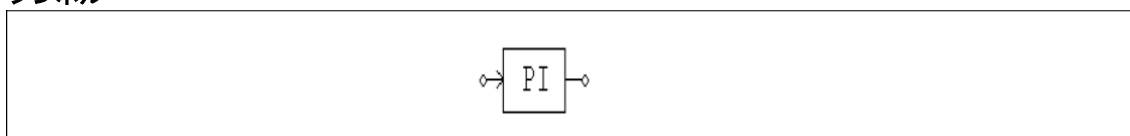
パラメータ	機能
時定数	微分器の時定数 T(sec)

入力が急変すると出力がスパイク状になるので、微分器の前にローパスフィルタを置くことをお勧めします。

比例積分(PI)制御器 (Proportional-Integral Controller)

比例積分(PI)制御器は以下のように定義されます。

シンボル



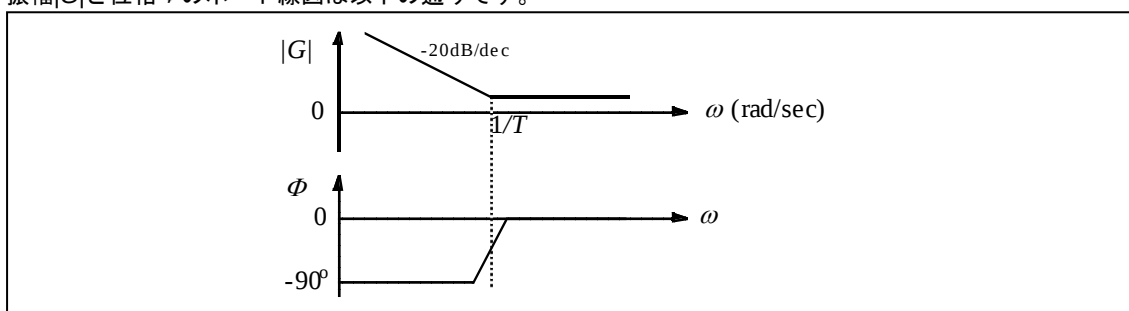
仕様

パラメータ	機能
ゲイン	伝達関数のゲイン K
時定数	PI 制御器の時定数 T(sec)
下限出力リミット	出力の下限
上限出力リミット	出力の上限

比例積分(PI)制御器の伝達関数は以下の通りです。

$$G(s) = k \cdot \frac{1+sT}{sT}$$

振幅|G|と位相 ϕ のボード線図は以下の通りです。

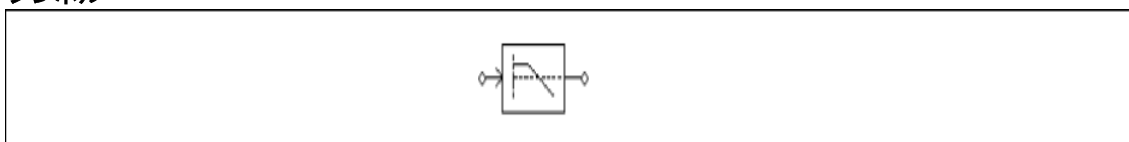


積分器ブロックの出力は、上限と下限に制限されます。アンチwindアップは自動的に実装されます。積分器の出力が制限に達すると積分器は積分を停止して積分windアップを防ぎます。制限が無限 (-inf または inf) に設定されている場合、アンチwindアップは除かれます。

単極制御器 (Single-Pole Controller)

単極制御器は一つの極を持つ比例制御器です。

シンボル



仕様

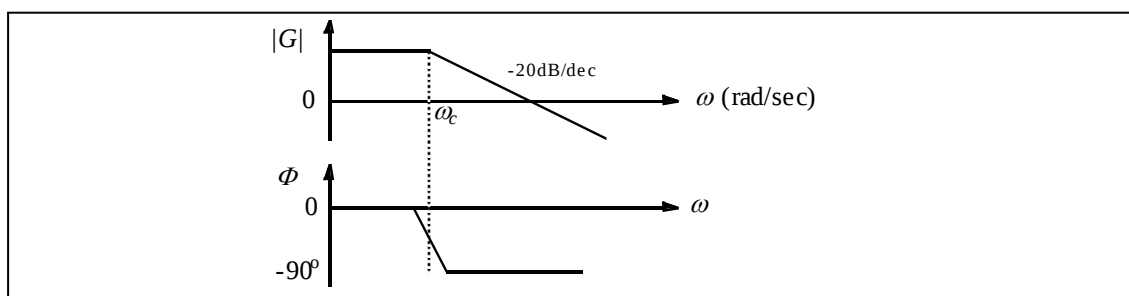
パラメータ	機能
ゲイン	伝達関数のゲイン K
極周波数	極の周波数 f_c (Hz)

単極の伝達関数は以下の通り定義されます。

$$G(s) = k \cdot \frac{\omega_c}{s + \omega_c}$$

ここで $\omega_c = 2\pi f_c$ です。

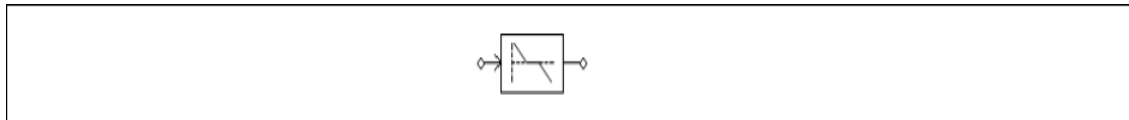
振幅|G|と位相 ϕ のボード線図は以下の図の通りです。



Type-2 PI 制御器 (Modified PI controller)

Type-2 PI 制御器(modified PI controller)は極を持った PI で構成されています。

シンボル



仕様

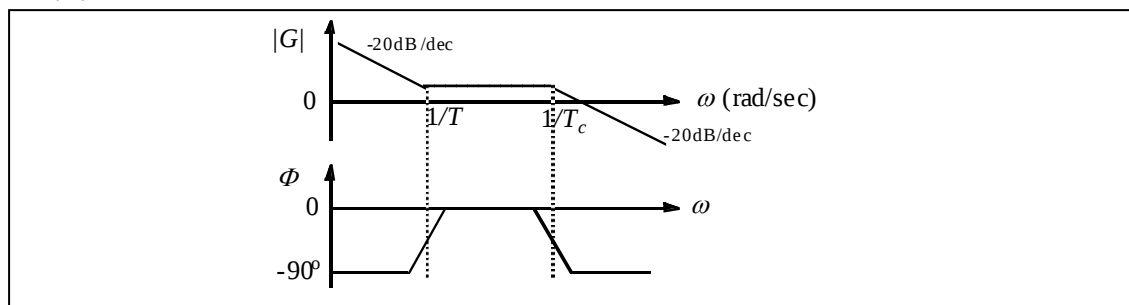
パラメータ	機 能
ゲイン	伝達関数のゲイン K
時定数	PI 制御器の時定数 T(sec)
極周波数	極の周波数 f_c (Hz)

この伝達関数は以下の通り定義されます。

$$G(s) = k \cdot \frac{1+sT}{sT} \cdot \frac{1}{1+sT_c}$$

ここで $T_c=1/\omega_c$, $\omega_c=2\pi f_c$ です。

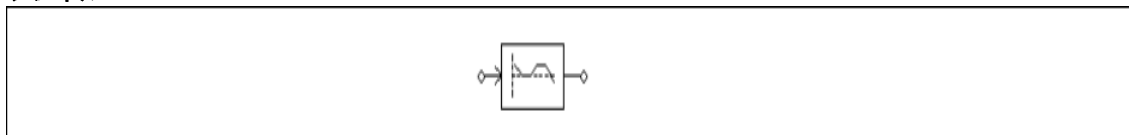
振幅|G|と位相 Φ のボード線図は以下の図の通りです。



Type-3 制御器(Type-3 Controller)

Type-3 制御器は 2 つの零点と 2 つの極で構成されています。

シンボル



仕様

パラメータ	機 能
ゲイン	PI 制御器のゲイン K
周波数 fz1	1 つ目の零点の周波数 f_{z1} (Hz)
周波数 fz2	2 つ目の零点の周波数 f_{z2} (Hz)
周波数 fp1	1 つ目の極の周波数 f_{p1} (Hz)
周波数 fp2	2 つ目の極の周波数 f_{p2} (Hz)

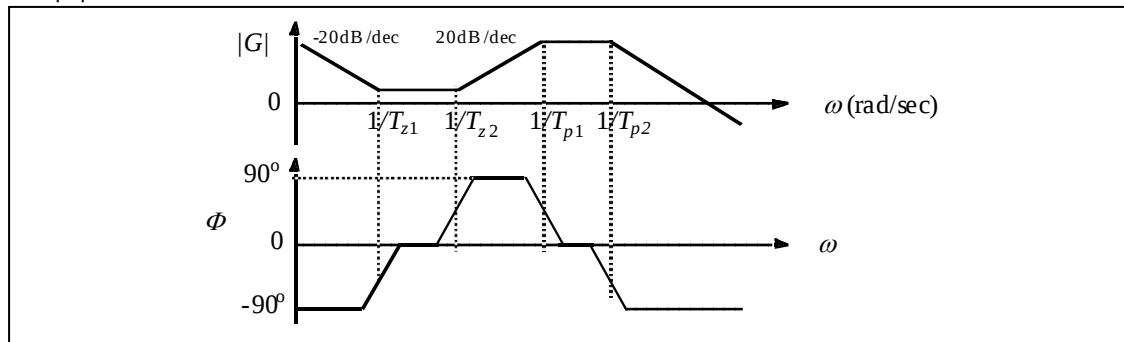
この伝達関数は以下の通り定義されます。

$$G(s) = k \cdot \frac{1 + sT_{z1}}{sT_{z1}} \cdot \frac{1 + sT_{z2}}{(1 + sT_{p1}) \cdot (1 + sT_{p2})}$$

ここで

$$T_{z1} = \frac{1}{2\pi f_{z1}}, \quad T_{z2} = \frac{1}{2\pi f_{z2}}, \quad T_{p1} = \frac{1}{2\pi f_{p1}}, \quad T_{p2} = \frac{1}{2\pi f_{p2}} \text{ です。}$$

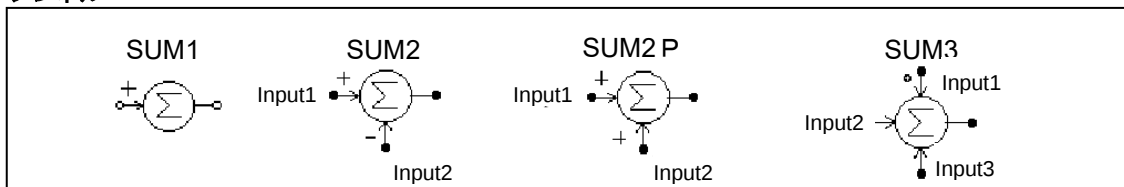
振幅|G|と位相φのボード線図は以下の図の通りです。



5.1.2 加算器(Summer)

1 入力加算器(SUM1)または 2 入力加算器(SUM2 および SUM2P)の入力はスカラーでもベクトルでも可能です。3 入力の加算器はスカラー入力のみです。

シンボル



仕様

パラメータ	機能
ゲイン_i	i 番目の入力のゲイン k_i

3 入力加算器(SUM3)では、ドット印の付いた入力が最初の入力となります。

入力がスカラーの場合は、n 入力加算器の出力は次のようになります。

$$V_o = k_1 V_1 + k_2 V_2 + \dots + k_n V_n$$

入力をベクトルにする場合は 2 入力加算器の出力も同じくベクトルになります。

以下に定義式を示します。

$$V_1 = [a_1 \quad a_2 \quad \dots \quad a_n]$$

$$V_2 = [b_1 \quad b_2 \quad \dots \quad b_n]$$

$$V_o = V_1 + V_2 = [a_1 + b_1 \quad a_2 + b_2 \quad \dots \quad a_n + b_n]$$

1 入力の加算器では入力がベクトルでも出力はスカラーになります。この場合、スカラー出力は入力のベクトル要素をすべて足したものです。すなわち、以下のようになります。

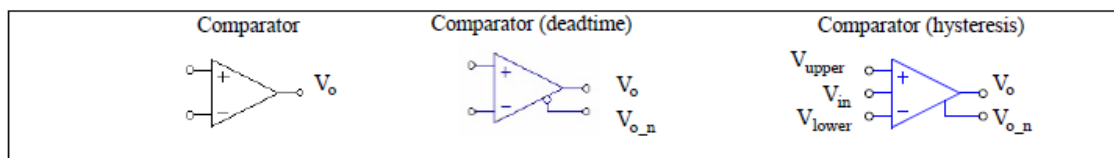
$$V_o = a_1 + a_2 + \dots + a_n$$

5.1.3 比較器(Comparator)

PSIM ライブラリで以下の比較器が使用できます。

- ・ 比較器
- ・ デッドタイム付き比較器
- ・ ヒステリシス付き比較器

シンボル



比較器のシンボルはオペアンプのシンボルと似ているので注意してください。比較器では非反転入力(+)は左上で、反転入力(-)が左下になります。オペアンプではこれが逆になります。

比較器(Comparator)

正の入力が負の入力よりも大きくなると比較器は High の信号を出力します。正の信号が小さい場合、出力は 0 になります。2 つの入力が等しい場合には、出力は不定となり、直前の値を保持します。

デッドタイム付き比較器(Comparator with Deadtime)

仕様

パラメータ	機 能
上位出力レベル	出力レベル高 (V)
下位出力レベル	出力レベル低 (V)
デッドタイム	Vo と Vo_n の間のデッドタイム。(秒、ゼロに設定)

コンパレーターの出力 Vo は、正の入力 (+) が負の入力 (-) よりも高い場合に高くなります (上位出力レベル)。正の入力が低い場合、出力 Vo は低くなります (低出力レベル)。2 つの入力が等しい場合、出力は未定義であり、前の値を保持します。

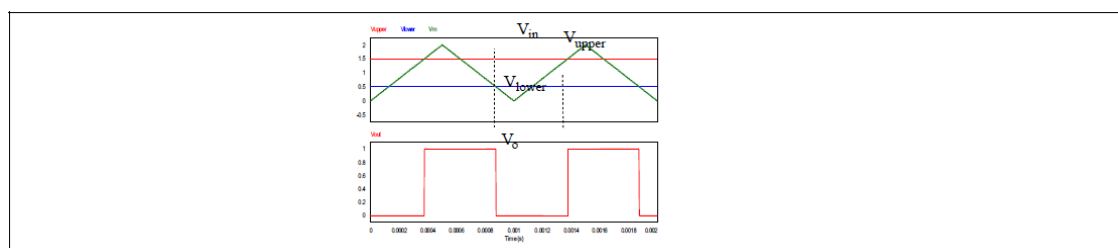
出力 Vo_n は、パラメーター "Deadtime" で定義されたデッドタイムを持つ Vo の補完です。

ヒステリシス付き比較器(Comparator with Hysteresis)

ヒステリシス比較器は入力値を比較する時にヒステリシス幅を提供します。

ノードの定義は上図のようになります。出力 Von は出力 Vo と相補性があります。

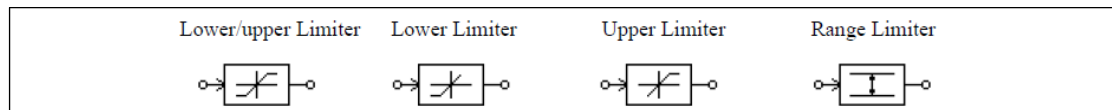
入力 Vin が下限値 Vlower より低い場合は Vo は 1 になります。Vin が上限値 Vhigh よりも高い場合は Vo は 0 になります。波形は次図のようになります。



5.1.4 リミッタ (Limiters)

Lower/Upper リミッタ、Lower リミッタ、Upper リミッタ、Range リミッタの4種類のリミッタがあります。

シンボル



仕様

パラメータ	機 能
下限	リミッタの下限
上限	リミッタの上限

Range リミッタ以外では、入力指定範囲を越えるとリミッタ出力※は上下限に固定されます。入力が上下限の範囲内であれば、出力は入力と同じ値になります。Range リミッタの出力は、上限と下限を超えない範囲に制限されます。入力が上下限の範囲内であれば、出力は入力と同じ値になります。

出力が上限より高い場合、出力は範囲に収まるまで $V_{range} (=V_{upper}-V_{lower})$ の値が引かれます。

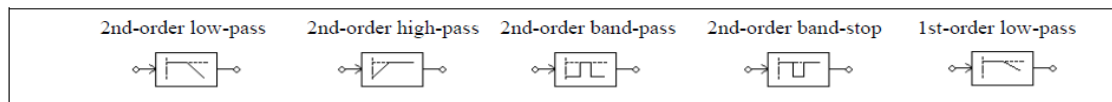
出力が下限より低い場合、範囲に収まるまで V_{range} の値が加算されます。

※注意：PI 素子、積分素子、フィルタ素子の出力にリミッタ素子を接続した場合、リミッタ素子の入力指定範囲を超えるとリミッタ出力は上下限に固定されるだけでなく、リミッタ素子の入力、すなわち素子等の出力も上下限に固定されます。

5.2 フィルター (Filters)

PSIMには次の4つの二次フィルタと1つの一次フィルタがあります。

シンボル



仕様(二次フィルタ)

パラメータ	機 能
ゲイン	伝達関数のゲイン K
減衰比	減衰係数 ξ (減衰比)
遮断周波数	ローパスおよびハイパス・フィルタの遮断周波数($f_c = \omega_c/2\pi$, Hz)
中心周波数	バンドパスおよびバンドストップ・フィルタの中心周波数($f_0 = \omega_0/2\pi$, Hz)
バンド幅	バンドパスおよびバンドストップ・フィルタの周波数バンド幅($f_b = B/2\pi$, Hz)

仕様(一次フィルタ)

パラメータ	機 能
ゲイン	伝達関数のゲイン K
遮断周波数	ローパスフィルタの遮断周波数($f_c = \omega_c/2\pi$, Hz)

これらの伝達関数は以下の通りです。

二次ローパスフィルタ

$$G(s) = k \cdot \frac{\omega_c^2}{s^2 + 2\xi\omega_c s + \omega_c^2}$$

二次ハイパス・フィルタ

$$G(s) = k \cdot \frac{s^2}{s^2 + 2\xi\omega_c s + \omega_c^2}$$

二次バンドパス・フィルタ

$$G(s) = k \cdot \frac{B \cdot s}{s^2 + B \cdot s + \omega_c^2}$$

二次バンドストップ・フィルタ

$$G(s) = k \cdot \frac{s^2 + \omega_o^2}{s^2 + B \cdot s + \omega_o^2}$$

一次ローパスフィルタ

$$G(s) = k \cdot \frac{\omega_c}{s + \omega_c}$$

5.3 数値演算関数ブロック (Computational Function Blocks)

5.3.1 乗算器と除算器 (Multiplier and Divider)

乗算器(Multiplier) と除算器(Divider)の出力はそれぞれ 2 つの入力の積および商です。

シンボル



除算器ではドット印のついた入力が被除数となります。

乗算器の入力はベクトルでもスカラーでも可能です。2 入力ともベクトルの場合、ベクトルの次元は同じでなければなりません。

たとえば、入力を以下のようにした場合、

$$\begin{aligned} V_1 &= [a_1 \quad a_2 \quad \dots \quad a_n] \\ V_2 &= [b_1 \quad b_2 \quad \dots \quad b_n] \end{aligned}$$

スカラーの出力は、以下ようになります。

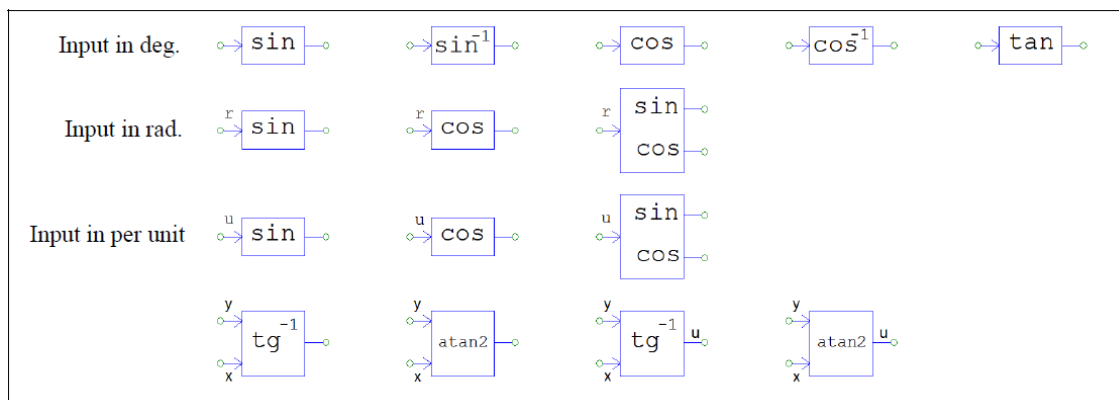
$$V_0 = V_1 * V_2^T = a_1 * b_1 + a_2 * b_2 + \dots + a_n * b_n$$

5.3.2 三角関数ブロック (Trigonometric Functions)

正弦(sin)、余弦(cos)、逆正弦($\sin^{-1}$)、逆余弦($\cos^{-1}$)、正接(tan)、逆正接($\tan^{-1}$)、および逆正接 2 (atan2) といった三角関数が提供されます。

出力は入力にそれぞれ対応する三角関数値となります。sin, cos, tan の各ブロックの入力として度数法(deg)、弧度法(rad)もしくは比率($360^\circ=1$)を用いることができ、arcsin, arccos, arctangent の各ブロックに出力として度数法、弧度法もしくは比率を用いることができます。

シンボル



ブロックに入力端子に"r"を持つものは、弧度法入力と解釈されます。同様に"u"を持つ場合、比率入力と解釈されます。表記が無いものは度数法入力となります。

tg⁻¹と atan2 では x が付与された端子を実数値入力、y が付与された端子を虚数値入力として解釈されます。出力端子に"u"が付与されている場合、比率として出力されます。tg⁻¹と atan2 の出力は、虚数値 y と実数値 x の比の逆正接となります。

$$\theta = \text{tg}^{-1}\left(\frac{y}{x}\right)$$

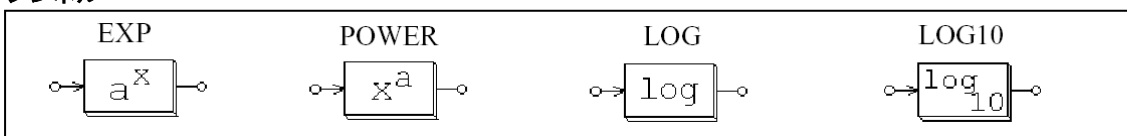
tg⁻¹の出力は、0° から 360° までの度数法が用いられます。一方、atan2 の出力は-π から+π までの弧度法が用いられます。

atan2 は C 言語の標準算術関数の atan2(y,x)と同じ挙動をとります。

5.3.3 指数 / 累乗 / 対数 ブロック (Exponential/ Power/ Logarithmic Function)

指数(EXP)、累乗(POWER)、および対数(LOG)の計算をおこないます。

シンボル



仕様(指数/累乗)

パラメータ	機能
係数 k_1	係数 k_1
係数 k_2	係数 k_2

指数関数ブロック(EXP)は、出力を次のように計算します。

$$V_o = k_1 \cdot k_2^{V_{in}}$$

たとえば、 $k_1 = 1$ 、 $k_2 = 2.718281828$ 、および $V_{in} = 2.5$ とすると、出力は $V_o = e^{2.5}$ となります(e は自然対数の基数)。

累乗ブロック(POWER)は出力を以下で計算します。

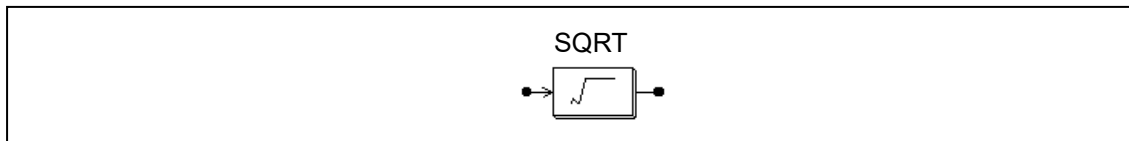
$$V_o = k_1 \cdot V_{in}^{k_2}$$

LOG ブロックは入力の自然対数を、LOG10 ブロックは常用対数を出力します。

5.3.4 平方根ブロック(Square-Root)

入力の平方根を計算します。

シンボル



5.3.5 二乗平均平方根ブロック (Root-Mean-Square)

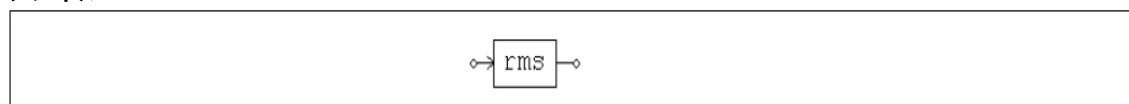
二乗平均平方根ブロックは、指定された基本周波数(f_b)により入力の二乗平均平方根を計算します。出力は次のようになります。

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v_{in}^2(t) dt}$$

ここで、 $T = 1/f_b$ 。

出力は各周期の始めにのみ更新されます。

シンボル



仕様

パラメータ	機能
基本周波数	基本周波数 f_b (Hz)

5.3.6 絶対値ブロック、符号関数ブロック (Absolute and Sign Function)

絶対値ブロック (ABS) は入力の絶対値を出力します。符号関数ブロック (SIGN) は入力の符号を出力します。たとえば、入力が正のときに出力は 1、入力が負のときに出力は -1 です。

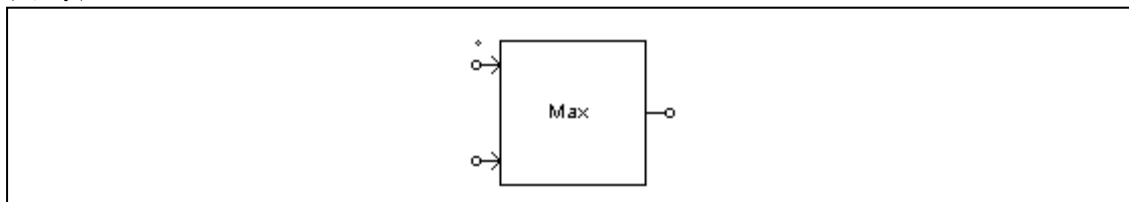
シンボル



5.3.7 最大/最小機能ブロック (Maximum/Minimum Function)

最大/最小機能ブロック (maximum/minimum function) はそれぞれの入力で最も大きな値を持つもの、または小さな値をもつものの値を出力します。

シンボル



仕様

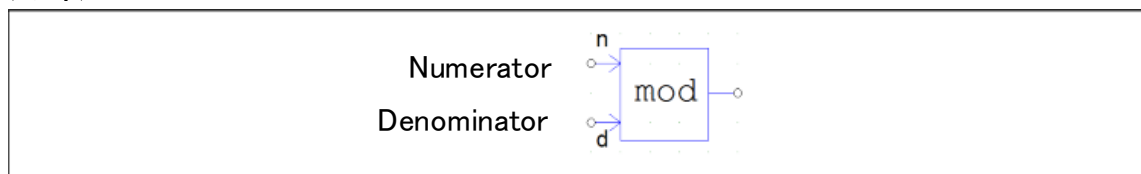
パラメータ	機能
入力数	入力数 N
関数タイプ	ブロックの関数型で、 <i>Maximum</i> または <i>Minimum</i> を選択。

入力数 N はドロップダウンメニューで選択可能です。

5.3.8 MOD 機能ブロック (MOD Function Block)

MOD 機能ブロックはモジュロ演算を実行します。

シンボル



このブロックには 2 つの入力があります。左上の文字 "n" が分子入力 V_{in_n} 、左下の文字 "d" が分母入力 V_{in_d} となります。

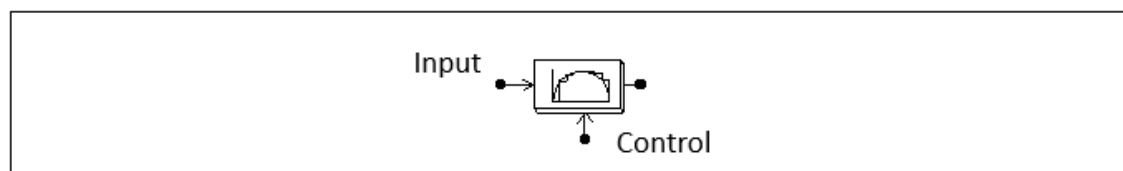
ブロックは徐算 V_{in_n}/V_{in_d} の剰余結果を出力します。例えばもし $V_{in_n}=10.1$ で $V_{in_d}=2$ の場合、出力は 0.1 となります。

5.4 その他の関数ブロック (Other Function Blocks)

5.4.1 サンプル・ホールド・ブロック (Sample/Hold Block)

サンプル・ホールド・ブロックは、制御信号が Low から High に (0 から 1 に) 変わったときに、入力をサンプルし、次のサンプリングまで値を保持します。

シンボル

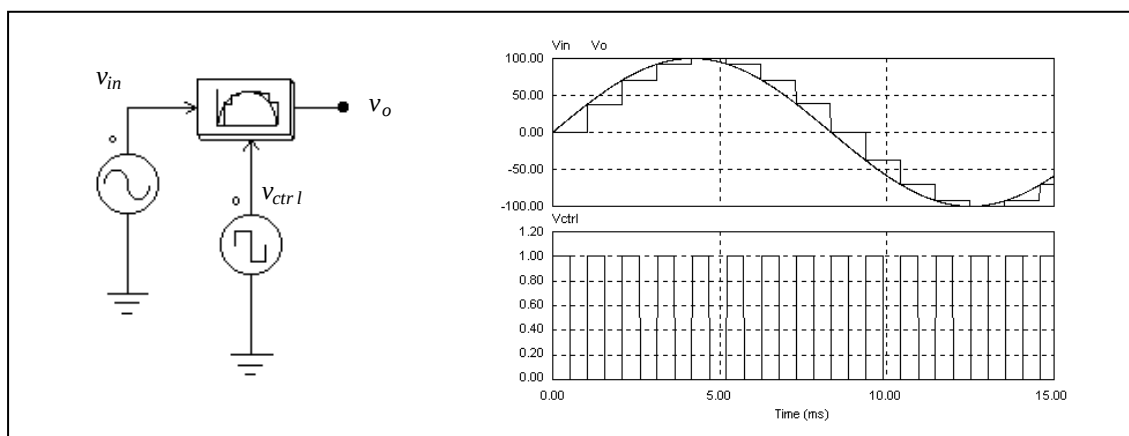


シンボルの下のノードが制御信号です。

ゼロ次ホールド・ブロック (ZOH) と違って、このブロックは連続要素として扱われ、サンプリングを外部信号で制御することができます。一方、ゼロ次ホールドブロックでは離散要素で、サンプリングは固定かつ等間隔となります。離散系にはゼロ次ホールドブロックを使って下さい。

例

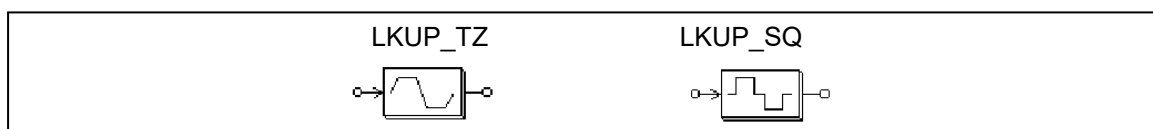
以下の例では、正弦波をサンプリングします。制御信号には振幅 1 の方形波を使っています。



5.4.2 ルックアップテーブルブロック (Lookup Table ((Trapezoidal and Square) Blocks))

台形波形ブロック(LKUP_TZ)および方形波ブロック(LKUP_SQ)はルックアップテーブルの特殊なものです。入力と出力の関係は台形もしくは方形の波形となります。

シンボル



台形波ブロックの仕様は以下のとおりです。

仕様

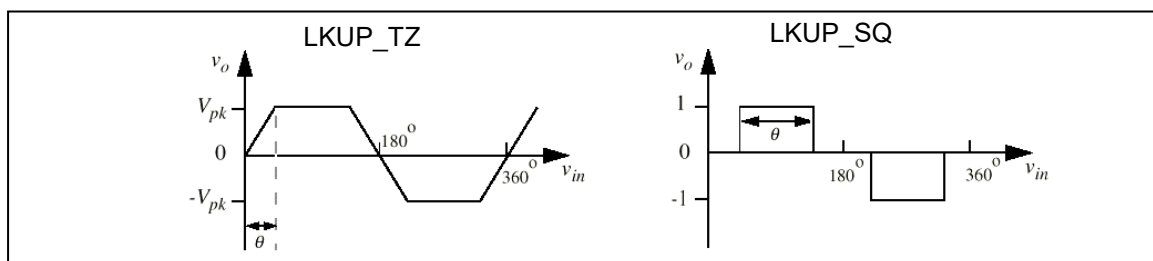
パラメータ	機能
立ち上がり角度 θ	立ち上がり角度 θ (度)
ピーク値	波形のピーク値 V_{pk}

方形波ブロックの仕様は以下のとおりです。

仕様

パラメータ	機能
パルス幅(°)	半周期内における出力パルス幅(度)

これらのブロックの波形を以下に示します。ここで、入力 v_{in} は角度(°)で、 -360° から 360° の間でとることができます。いずれの波形も半波および $1/4$ 波で対称です。



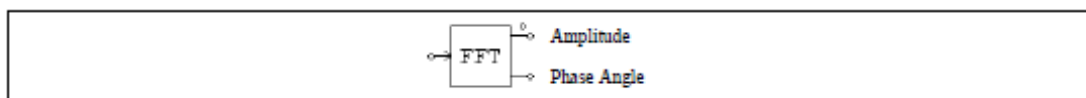
5.4.3 高速フーリエ変換 (Fast Fourier Transform)

高速フーリエ変換(FFT)ブロックにより、入力信号の基本波成分を計算できます。FFT の演算アルゴリズムは、radix-2/decimation-in-Frequency 方法によります。基本周期の 1 周期間のサンプリング数は 2^N (N は自然数) となるようにします。サンプリング数の上限は 1024 です。

FFT ブロックの出力は入力の基本波の振幅(最大値)と位相角です。出力は以下の式で計算しています。

$$v_o = \frac{2}{N} \cdot \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} \left[v_{in}(n) - v_{in}\left(n + \frac{N}{2}\right) \right] \cdot e^{-j\frac{2\pi m}{N}}$$

シンボル



仕様

パラメータ	機能
サンプリング数	サンプリング数 N
基本波周波数	基本波周波数 f_b (Hz)

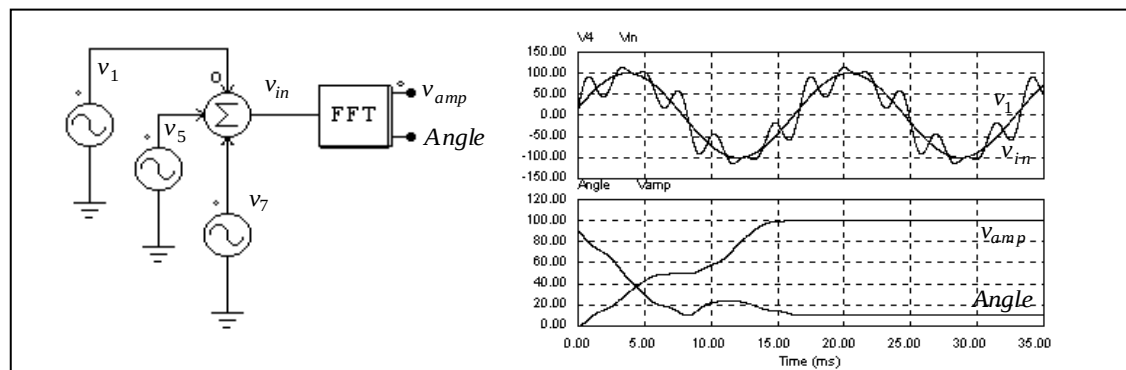
2つの出力のうち、ドットのついたものが振幅の値です。位相は内部で、 $V_m \sin \omega t$ が位相 0 になるように調整しています。

FFT ブロックは入力信号が DC、基本波、基本波の高調波(基本波周波数の整数倍の信号)を持つ場合のみ正しく動作します。入力信号が基本波の整数倍ではない成分を持っている場合、FFT ブロックは正しい結果を計算できません。

また、FFT ブロックは基本波成分を計算しますので、例えば入力信号が 60Hz(基本波)と 180Hz の成分を持っている場合、パラメータ基本波周波数を 180 にすると正しい結果を計算できません。

例

以下の回路で、入力電圧 V_{in} は基本波 V_1 (100V, 60Hz)、5 次高調波 V_5 、(25V, 300Hz)、7 次高調波 V_7 (25V, 420Hz)を含みます。1 サイクル後、FFT の出力は、振幅 100V の定常値となります。



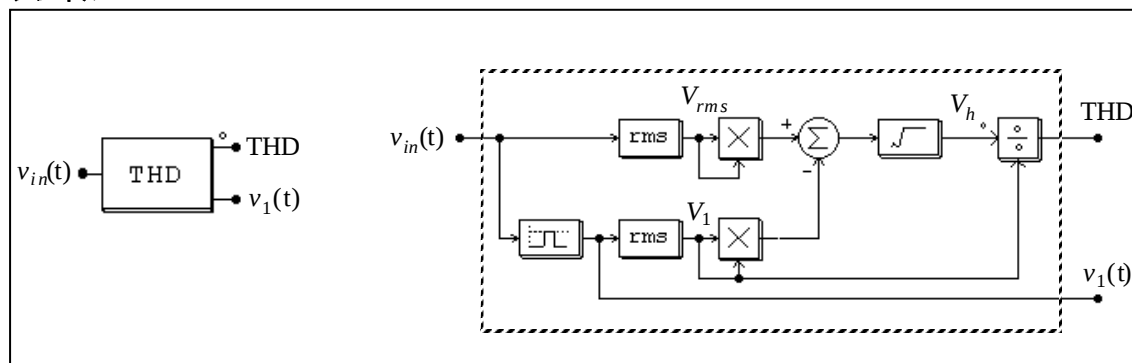
5.4.4 高調波歪みブロック (THD Block)

基本波成分と高調波成分を含む交流波形で、高調波ひずみは以下の式で計算できます。

$$THD = \frac{V_h}{V_1} = \frac{\sqrt{V_{rms}^2 - V_1^2}}{V_1}$$

ここで、 V_1 は基本波成分(rms)、 V_h は高調波成分(rms)、また V_{rms} は交流波形の全体の実効値です。PSIM では高調波ブロックは以下のようにモデル化されています。

シンボル



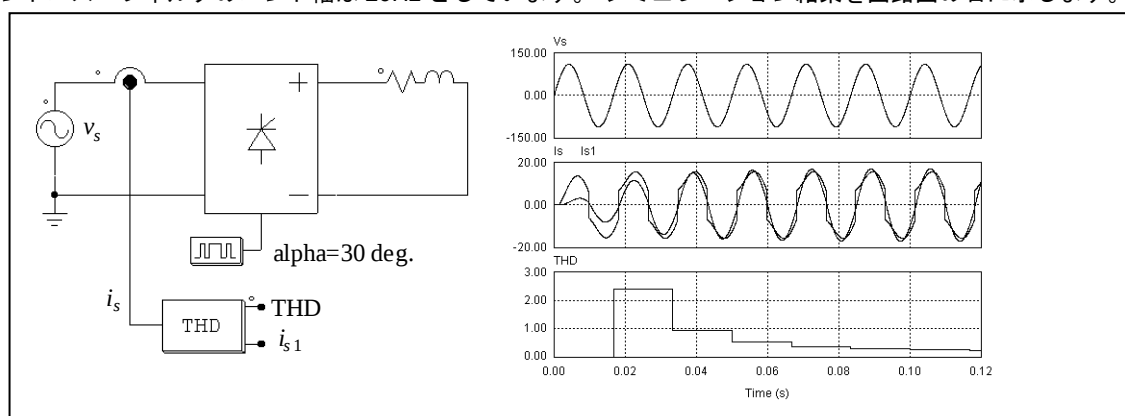
THD は基本波を取り出すのに二次のバンドパス・フィルタを使っているため、中心周波数とバンド幅を指定する必要があります。

仕様

パラメータ	機能
基本波周波数	入力の基本波周波数(Hz)
バンド幅	バンドパス・フィルタのバンド幅(Hz)

例

以下に示す単相のサイリスタ回路では、高調波歪み(THD)ブロックを使って入力の高調波歪みを測定しています。サイリスタブリッジの位相遅れは 30°とします。また、THD ブロックの基本周波数は 60Hz、バンドパス・フィルタのバンド幅は 20Hz としています。シミュレーション結果を回路図の右に示します。



THD ブロックの出力の一方は入力電流の基本波成分 i_{s1} です。入力電圧 v_s と電流 i_{s1} の位相を比べることにより、入力の等価力率を計算することができます。この値を高調波の値(THD)と組み合わせることにより、入力の力率を求めることができます。

5.4.5 S-Domain Transfer Function

伝達関数ブロックは以下のように多項式で表現します。

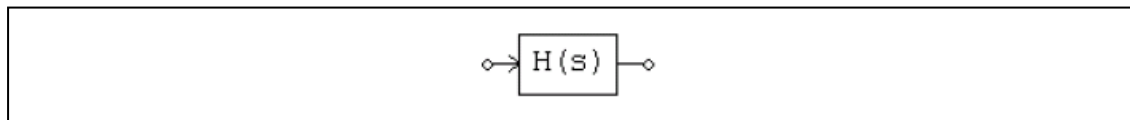
$$G(s) = k \cdot \frac{B_n \cdot s^n + \dots + B_2 \cdot s^2 + B_1 \cdot s + B_0}{A_n \cdot s^n + \dots + A_2 \cdot s^2 + A_1 \cdot s + A_0}$$

伝達関数ブロックには次の 2 種類があります。

* 初期値が 0 のもの(PSIM ライブラリでは、"s-domain Transfer Function"と呼びます)

* 入力パラメータを初期値とするもの(PSIM ライブラリでは、"s-domain Transfer Function (initial value)"と呼びます)

シンボル



仕様

パラメータ	機能
次数	伝達関数の次数
ゲイン	伝達関数のゲイン k
分子係数 B _n ... B ₀	伝達関数の分子の係数
分母係数 A _n ... A ₀	伝達関数の分母の係数
初期値 x _n ... x ₁	状態変数 x _n ... x ₁ の初期値

入力 $U(s)$ と出力 $Y(s)$ の関係を $Y(s) = U(s) \cdot H(s)$ のように表すと、周波数領域の表現を以下のような微分方程式に変換することができます。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & -A_0/A_n \\ 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & -A_1/A_n \\ 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & -A_2/A_n \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & -A_{n-1}/A_n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} + \frac{k}{A_n} \cdot \begin{bmatrix} B_0 - A_0 \cdot B_n/A_n \\ B_1 - A_1 \cdot B_n/A_n \\ B_2 - A_2 \cdot B_n/A_n \\ \vdots \\ B_{n-1} - A_{n-1} \cdot B_n/A_n \end{bmatrix} \cdot u$$

出力は以下となります。

$$y = x_n + k \cdot \frac{B_n}{A_n} \cdot u$$

状態変数の初期値 $x_n \dots x_1$ は s-domain Transger Function (initial value) の設定時に入力します。

例

ここでは、次の二次の伝達関数を考えます。

$$G(s) = 1.5 \cdot \frac{400 \cdot e^3}{s^2 + 1200 \cdot s + 400 \cdot e^3}$$

PSIM では、パラメータを以下のように指定します。

次数 n	2
ゲイン k	1.5
係数 B _n ... B ₀	0, 0, 400k
係数 A _n ... A ₀	1, 1200, 400k

5.4.6 時間遅れブロック (Time Delay blocks)

指定時間を遅らせる時間遅れブロック (Time delay block) と、1 タイムステップだけ遅らせる単位時間遅れブロック (Unit time delay block) の計 2 種類の時間遅れブロックがあります。

シンボル



仕様

パラメータ	機 能
時間遅れ	時間遅れ(sec)※Time Delay ブロックのみ

時間遅れブロックは指定の時間間隔分入力信号を遅らせます。入力信号はアナログとロジックが使えます。例えば、論理素子の伝搬遅れをモデリングすることができます。

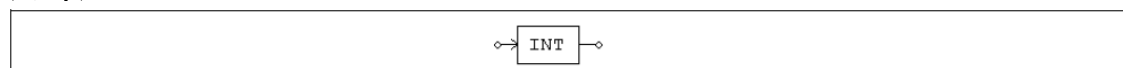
単位時間遅れブロックは 1 タイムステップ分入力信号を遅らせます。シミュレーションのタイムステップが変更された場合、遅れ時間もこれに従って変更されます。

単位時間遅れブロック (Unit time delay block) と Digital Control Module の単位遅れブロック (Unit delay block) の違いは、こちらが連続要素で遅れ時間が 1 タイムステップなのに対し、単位遅れブロックは離散的な要素であり遅れ時間はサンプリング周期と同じになる点です。

5.4.7 丸め関数ブロック (Round-Off Block)

丸め関数ブロックのシンボルを以下に示します。

シンボル



仕様

パラメータ	機 能
桁数	小数点以下の桁数 N
切り捨てフラグ	切り捨てフラグ (1: 切り捨て; 0: 四捨五入)

丸め関数ブロックの入力を V_{in} とすると、入力はず、以下の式で変換されます。

$$V_{in,new} = V_{in} \cdot 10^N$$

切り捨てフラグが 1 のとき、まず $V_{in,new}$ を切り捨て、これを 10^N で割ったものを出力とします。そうでない場合は、 $V_{in,new}$ に最も近い整数に等しいとおき、これを 10^N で割ったものを出力とします。

例

$V_{in} = 34.5678$; $N = 0$, 切り捨てフラグ = 0 のとき、出力は $V_{out} = 35$.

$V_{in} = 34.5678$; $N = 0$, 切り捨てフラグ = 1 のとき、出力は $V_{out} = 34$.

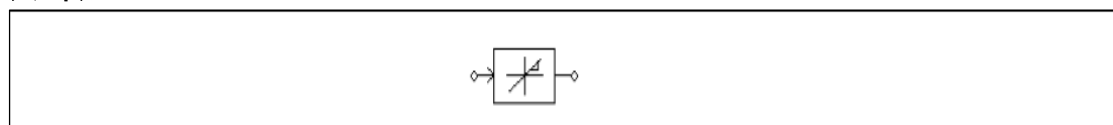
$V_{in} = 34.5678$; $N = 1$, 切り捨てフラグ = 1 のとき、出力は $V_{out} = 34.5$.

$V_{in} = 34.5678$; $N = -1$, 切り捨てフラグ = 1 のとき、出力は $V_{out} = 30$.

5.4.8 変化率リミッタ ((dv/dt) Limiter)

変化率リミッタは入力の変化率(dv/dt)を制限します。変化率が上下限の範囲内の場合、出力は入力と同じです。

シンボル



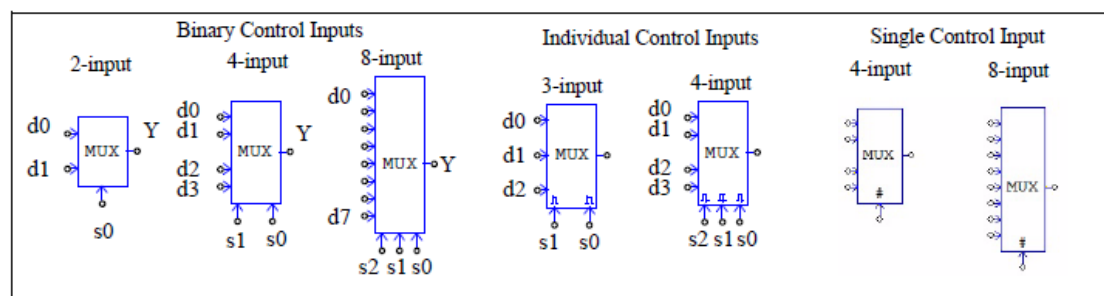
仕様

パラメータ	機 能
入力変化率の上限(dv/dt)	入力変化率の上限(dv/dt)

5.4.9 マルチプレクサ (Multiplexer)

マルチプレクサの出力は制御信号により選択された入力の値となります。3 つのタイプのマルチプレクサが提供されています。バイナリ制御入力、個別制御入力、単一制御入力です。

シンボル



シンボル図で、d0...d7 はデータ入力であり、s0...s2 は制御入力です。マルチプレクサの真理値表は以下のとおりです。

バイナリ制御の入力値

2 入力	
s0	Y
0	d0
1	d1

4 入力		
s1	s0	Y
0	0	d0
0	1	d1
1	0	d2
1	1	d3

8 入力			
s2	s1	s0	Y
0	0	0	d0
0	0	1	d1
0	1	0	d2
0	1	1	d3
1	0	0	d4
1	0	1	d5
1	1	0	d6
1	1	1	d7

個別の制御入力値

3 入力		
s1	s0	Y
x	1	d0
1	0	d1
その他		d2

4 入力			
s2	s1	s0	Y
x	x	1	d0
x	1	0	d1
1	0	0	d2
その他			d3

X: Do not care

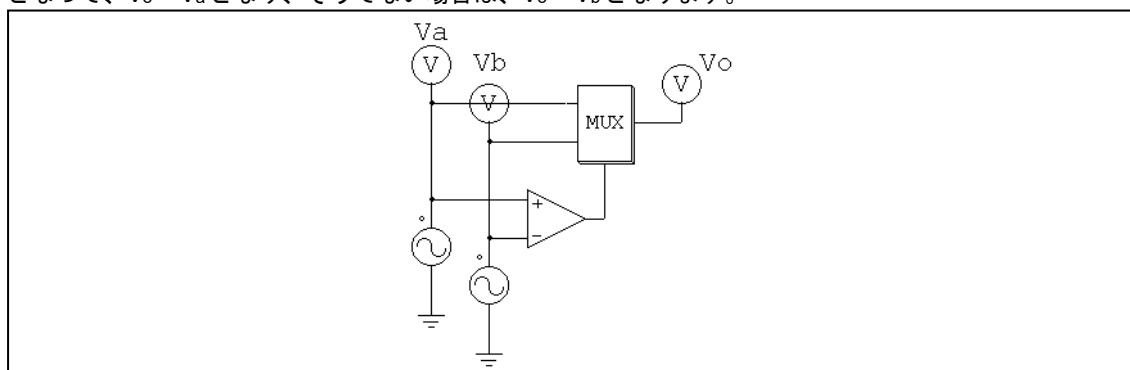
単一制御入力値 入力 s の値は最も近い整数に四捨五入されます。

4 入力		8 入力	
s	Y	s	Y
0	d0	0	d0
1	d1	1	d1
	d2	2	d2
	d3	3	d3
		4	d4
		5	d5
		6	d6
		7	d7

データ入力は、アナログでもデジタルでも、どちらでも構いません。

例

以下の回路は 2 入力のうち最大の値を選択します。入力 V_a が V_b よりも大きいときは比較器の出力が 1 となって、 $V_o = V_a$ となり、そうでない場合は、 $V_o = V_b$ となります。

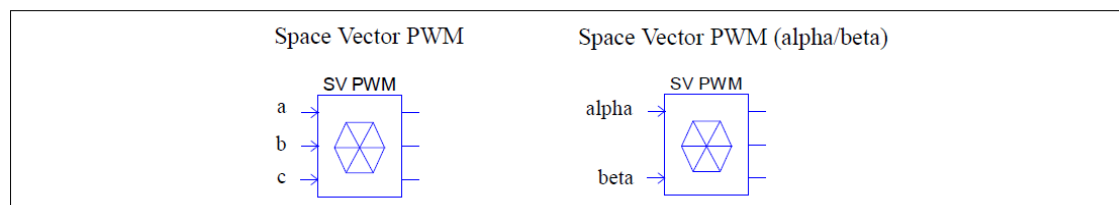


5.4.10 空間ベクトル PWM ブロック (Space Vector PWM)

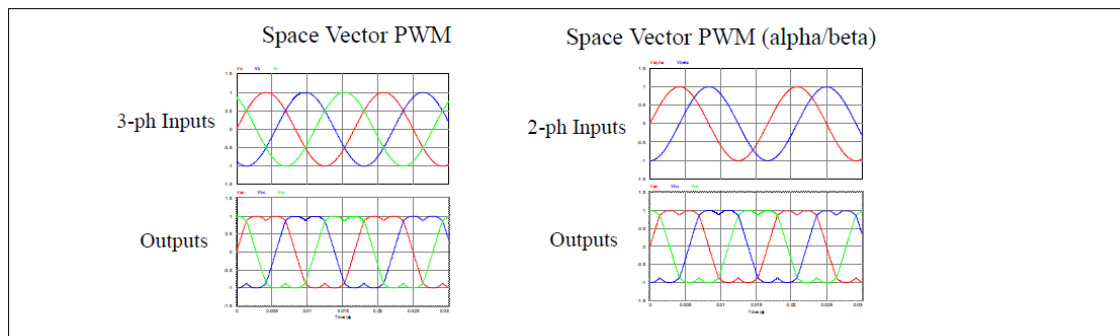
空間ベクトル PWM ブロックは、キャリア波形を基にした PWM 生成方式で 사용됩니다。これは、三相入力信号を変換し空間ベクトル PWM の指令値を生成します。

以下のとおり、PSIM ライブラリでは 2 つのブロックが使用可能です。

シンボル



入出力波形は以下のようになります。

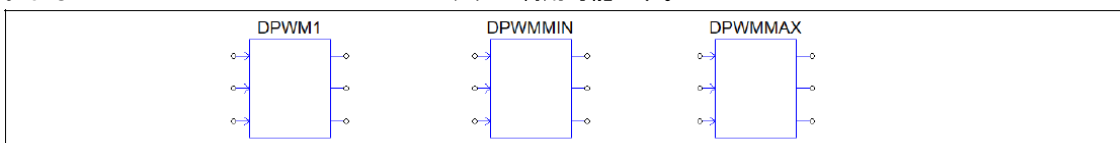


空間ベクトル PWM ブロックは、三相正弦波信号を受け入れます。このブロックの出力は、基本的に入力
の 1.155 倍した値になります。

空間ベクトル PWM(alpha/beta)ブロックは、二相直交 alpha/beta 入力信号を受け入れます。ベータ入力
は、90 度 alpha 入力に遅れます。このブロックの出力は、基本的に入力
の 1.155 倍した値になります。

5.4.11 不連続 PWM (Discontinuous PWM)

不連続空間ベクトル PWM コントローラは、スイッチング損失を低減します。DPWM1、DPWMMIN、
および DPWMMAX の 3 つの DPWM ブロックが利用可能です。



三相入力信号は、これらの 3 つのブロック内で $2/\sqrt{3}$ の係数でスケージングされます。変調指数 $e_i(t)$
は次のように計算されます。

DPWM1:

$$|v_{max}^*| \geq |v_{min}^*| \rightarrow e_i(t) = 1 - v_{max}^*$$

$$|v_{max}^*| < |v_{min}^*| \rightarrow e_i(t) = -1 - v_{min}^*$$

DPWMMIN:

$$e_i(t) = -1 - v_{min}^*$$

DPWMMAX:

$$e_i(t) = 1 - v_{max}^*$$

5.4.12 組み込みソフトウェアブロック (Embedded Software Block)

組み込みソフトウェアブロックは、特別な外部 DLL ブロックです。これは、マイクロコントローラや DSP
といった組み込みソフトウェアデバイスをモデリングすることを、念頭に置いています。

仕様

パラメータ	機能
ファイル名	機能とブロックのインターフェースを定義した DLL ファイル名
入出力ノード数	入出力端子の合計数

組み込みソフトウェアブロックは、通常の外部 DLL ブロックと似ています。しかし、接続ノードが入力または出力として予め定義されている通常の外部 DLL ブロックと異なり、組み込みソフトウェアブロックは、ノードのタイプを必要に応じてプログラミングすることができます。また、変数の状態の変化の瞬間といった追加の情報も、PSIM とやり取りすることが可能です。

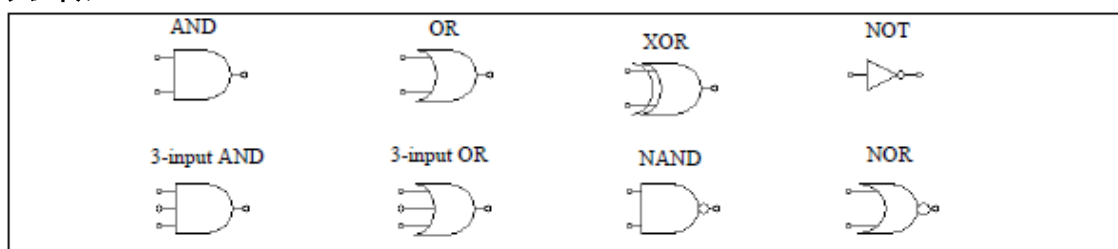
組み込みソフトウェアブロックは制御回路であり、制御回路に対してのみ使用することができます。

組み込みソフトウェアブロックについての詳しい説明は PSIM インストールフォルダの Doc フォルダにあります「Help Embedded Software Block.pdf(英文)」を参照して下さい。

5.5 デジタル素子 (Logic Components)

5.5.1 論理ゲート (Logic Gates)

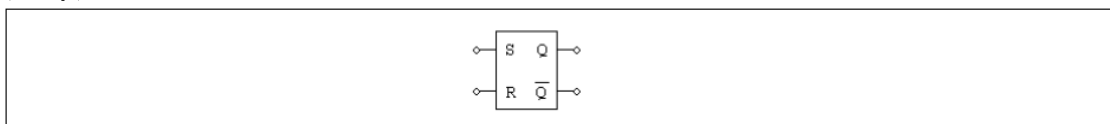
基本論理ゲートには AND、OR、XOR(exclusive OR)、NOT、NAND および NOR があります。
シンボル



5.5.2 セット・リセット・フリップフロップ (Set-Reset Flip-Flop)

セット・リセット・フリップフロップにはエッジ・トリガとレベル・トリガの 2 種類があります。

シンボル



仕様

パラメータ	機能
トリガフラグ	トリガフラグ(0 : エッジトリガ ; 1 : レベルトリガ)

エッジトリガフリップフロップは立ち上がり時のみ状態が変わります。エッジトリガフリップフロップの真理値表を以下に示します。

S	R	Q	$\bar{Q}$
0	0	不変	
0	↑	0	1
↑	0	1	0
↑	↑	不使用	

一方、レベルトリガフリップフロップは入力レベルにより状態が変わります。レベルトリガフリップフロップの真理値表を以下に示します。

セットリセットフリップフロップの真理値表を以下に示します。

S	R	Q	$\overline{Q}$
0	0	不変	
0	1	0	1
1	0	1	0
1	1	不使用	

5.5.3 J-K フリップフロップ (J-K Flip-Flop)

セット/リセット入力が無いタイプと有るタイプの2種類のJ-Kフリップフロップが用意されています。前者の場合、セット/リセット入力ともに high(1)が入力されていると仮定します。

シンボル



J-K フリップフロップはクロック入力の立ち上がりでトリガされます。

J-K フリップフロップの真理値表を次に示します。

$\overline{S}$	$\overline{R}$	J	K	Clock	Q	$\overline{Q}$
0	1	x	x	x	1	0
1	0	x	x	x	0	1
0	0	x	x	x	0	0
1	1	0	0	↑	不変	
1	1	0	1	↑	0	1
1	1	1	0	↑	1	0
1	1	1	1	↑	トグル	

x : Do not care

5.5.4 D フリップフロップ (D Flip-Flops)

セット/リセット入力が無いタイプと有るタイプの2種類のDフリップフロップが用意されています。前者の場合、セット/リセット入力ともに high(1)が入力されていると仮定します。

シンボル



D フリップフロップはクロック入力の立ち上がりでトリガされます。

D フリップフロップの真理値表を以下に示します。

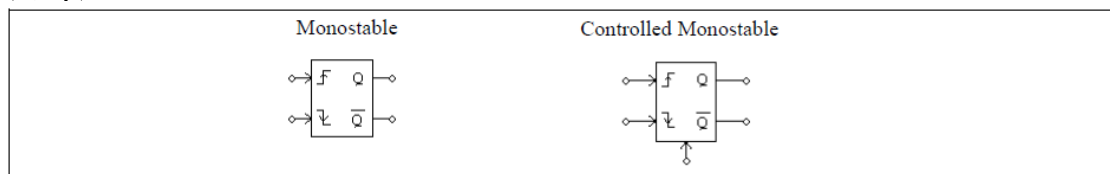
$\overline{S}$	$\overline{R}$	D	クロック	Q	$\overline{Q}$
0	1	x	x	1	0
1	0	x	x	0	1
0	0	x	x	0	0
1	1	0	↑	0	1
1	1	1	↑	1	0

5.5.5 単安定マルチバイブレータ (Monostable Multivibrator)

単安定マルチバイブレータは入力信号の立ち上がり(または立ち下がり)でトリガされます。マルチバイブレータにより、指定された幅のパルスを生成できます。

出力パルス幅は固定、または外部入力により可変です。可変出力マルチバイブレータは制御付きマルチバイブレータ(MONOC)と呼び、固定出力型と区別します。パルス幅(sec)は 制御入力により決まります。

シンボル



仕様

パラメータ	機 能
パルス幅	オン時間パルス幅(sec)

制御付きマルチバイブレータではシンボルの下側からの入力が制御信号になります。

5.5.6 論理信号用時間遅れブロック (Time Delay (Logic))

論理信号遅延用素子は 2 つあります。

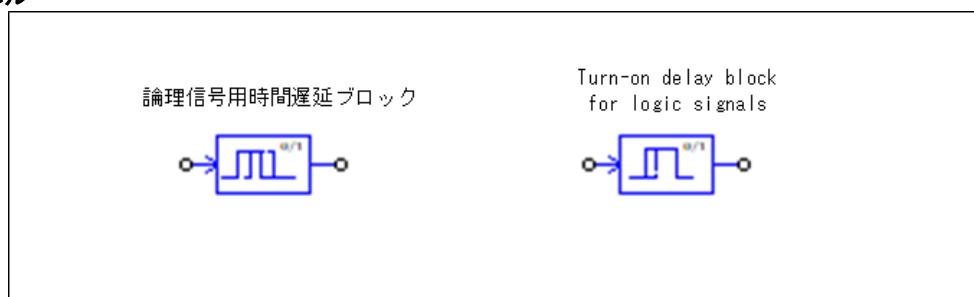
- ・ Time Delay (Logic) : 入力信号を指定された時間間隔で遅延させるものです。

論理素子の所望の時限遅延または伝搬遅延をモデル化するなどの用途に使用されます。

Turn-on Time Delay (Logic)。

入力されたロジック信号の立ち上がりエッジを遅延させます。

シンボル



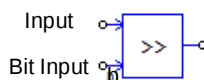
仕様

パラメータ	機 能
時間遅れ	時間遅れ(sec)

5.5.7 ビットシフト (Bit Shift)

ビットシフトブロックはビット入力で指定されたビット数を左シフト又は右シフトします。

シンボル



左下の b のついたノードはビット入力用です。ビット入力が整数でない場合は数字は丸められます。

ビット入力が正の場合はブロックは左シフトします。例えばビット入力が 3 の場合、出力は $V_{out} = V_{in} * 2^3$ となります。

ビット入力が負の場合はブロックは右シフトします。例えばビット入力が -3 の場合、出力は $V_{out} = V_{in} * 2^{-3}$ となります。

5.5.8 パルス幅カウンタ (Pulse Width Counter)

パルス幅カウンタはパルスの幅を測ります。カウンタは入力の立ち上がり信号により起動します。入力の立ち下がりを検出して、パルスの幅(sec)を測ります。次の立ち下がりを検出するまで、カウンタは前回の値を保持します。

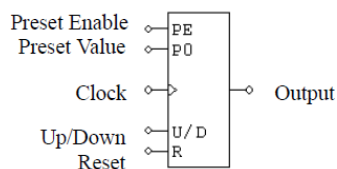
シンボル



5.5.9 Up/Down カウンタ (Up/Down Counter)

Up/down カウンタはクロックの立ち上がりエッジのたびに 1 を増加するか減少します。

シンボル



仕様

パラメータ	機 能
ビット数	内部カウンタのビット数 N

Up/Down の入力が 0 のとき、カウンタは減少します。Up/Down の入力が 1 の時、カウンタは増大します。Reset 入力は High(1)のときカウンタを 0 にリセットします。Preset Enable 入力は High のときカウンタを予め設定された値にセットします。

以下はカウンタの真理表です。

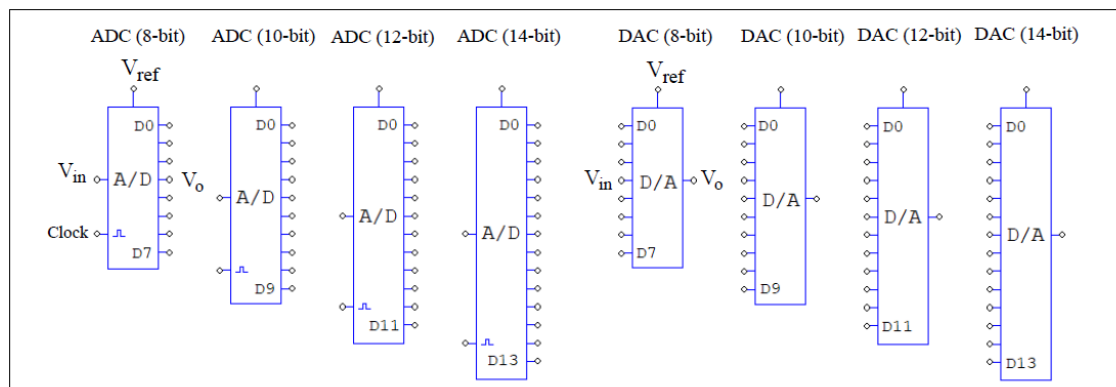
Up/Down	Preset Enable	Reset	Clock	動作
x	0	0	x	カウントしない
1	0	0	↑	カウントアップ
0	0	0	↑	カウントダウン
x	1	0	x	プリセット
x	x	1	x	リセット

x: Do not care

5.5.10 A/D および D/A 変換器(A/D and D/A Converters)

A/D 変換器はアナログ入力信号をデジタルへ、また D/A 変換器はデジタル信号をアナログへ変換します。8 ビットと 10 ビット、12 ビット、14 ビットの変換器があります。

シンボル



ビット数を N とすると A/D 変換器の出力は次の式で計算されます。

$$V_o = \frac{2^N}{V_{ref}} \cdot V_{in}$$

(V_{in} が V_{ref} を超えた場合は $2^N - 1$ にクランプされます。)

たとえば、 $V_{ref} = 5V$ 、 $V_{in} = 3.2V$ 、 $N = 8\text{bits}$ とすると、 $V_o = 256/5 \cdot 3.2 = 163.84 = 10100011$ (バイナリ)となります。

また、D/A 変換器の出力は以下の式で計算されます。

$$V_o = \frac{V_{ref}}{2^N} \cdot V_{in}$$

たとえば、 $V_{ref} = 5V$ 、 $V_{in} = 10100011$ (バイナリ)、 $N = 8\text{bits}$ とすると、 $V_o = 163/256 \cdot 5 = 3.1836 V$ となります。

5.6 デジタル制御モジュール (Digital Control Module)

デジタル制御モジュールを標準の PSIM プログラムにアドオンとして追加することで、ゼロ次ホールド、 z 領域伝達関数、デジタルフィルタなどといったデジタル制御機能が利用可能になります。連続時間の s 領域回路に比べて z 領域の回路は離散型です。したがって、計算は離散サンプル点でのみ行われ、サンプルリングの間は計算が実行されません。

よく使用される離散素子に加えて、特別な目的の素子の 3 つのサブフォルダがあります。

- ・ モータ制御ブロック：デジタル制御モータ駆動システムの素子
- ・ PWM 制御器：パルス幅変調制御の素子
- ・ PLL ブロック：位相ロックループ制御の素子

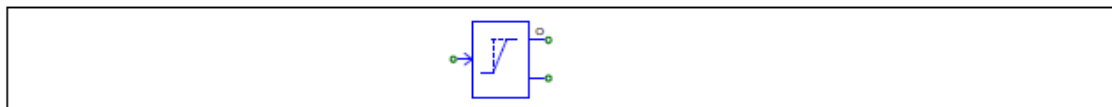
5.6.1 モータ制御ブロック (Motor Control Blocks)

ここで挙げる素子は、デジタル制御モータ駆動システム用のものです。これらのブロックは、TI デジタルモーターコントロール (DMC) ライブラリの対応した機能ブロックとして同様の機能を持っています。詳細は *SimCoderUserManual* の 11 章を参照してください。

ランプ波制御(Ramp Control)

本ブロックはステップ入力に対するランプ波出力を提供します。

シンボル



仕様

パラメータ	機能
上限	単位あたりの出力最大値。
下限	単位あたりの出力最小値。
ステップ持続数	各ステップにおけるサンプル数 N。1 以上の整数である必要があります。
ステップサイズ	単位あたりの出力におけるランプステップの最大変化量。Vstep
サンプリング周波数	サンプリング周波数(Hz)

画像において、小ドットを伴った出力ノードはランプ波出力であり、他方の出力ノードは出力が入力に等しいことを示すフラグです。

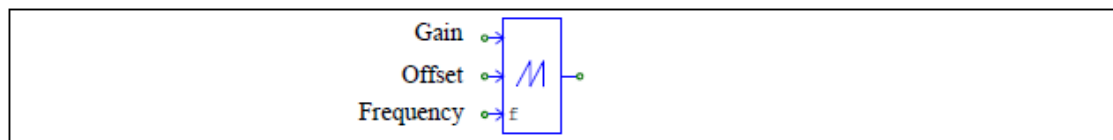
入力が出力よりも大きい場合、出力は、N 個のサンプリング期間の持続時間の後、Vstep ごとに増加します。

入力が出力よりも小さい場合、出力は、N 個のサンプリング期間の持続時間の後、Vstep ごとに減少します。入力が出力に等しい場合、フラグは 1 に設定されます。それ以外の場合は 0 になります。

ランプ波発生器(Ramp Generator)

本ブロックは入力に従ってランプ波出力を生成します。

シンボル

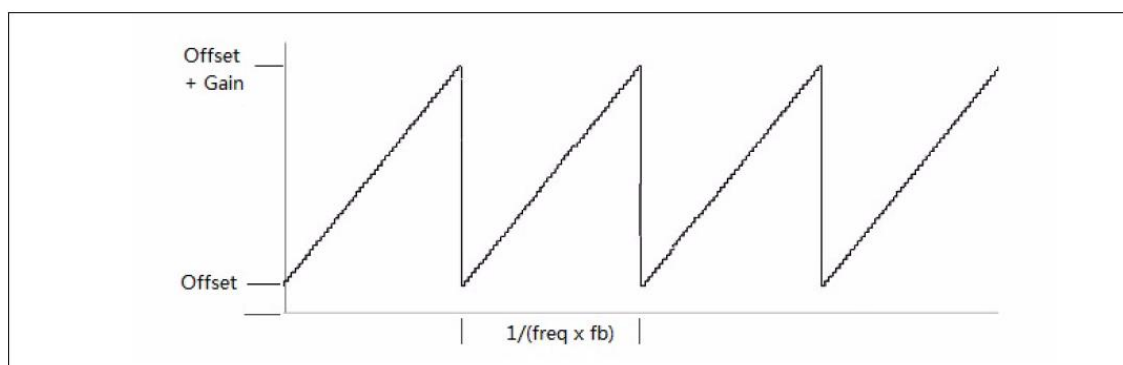


仕様

パラメータ	機能
基本周波数	基本周波数 fb(Hz)。
サンプリング周波数	サンプリング周波数(Hz)

画像内の第一入力はゲインです。第二入力はオフセットです。第三入力は出力ランプのための所望の周波数 freq です。

ランプ波出力波形を以下に示します。

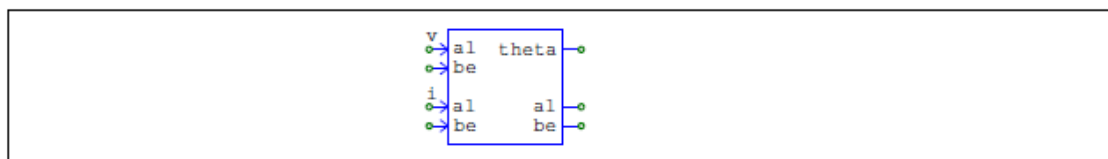


出力ランプ周波数は、入力値と基本周波数 fb の倍数です。出力範囲は-1 から 1 に制限されています。したがって、オフセットとゲインの範囲は"オフセット + ゲイン $\leq$ 1"に制限されます。

スライディングモード制御(PMSM)(Sliding Mode Observer (PMSM))

本スライディングモード制御ブロックの機能は、永久磁石同期モータ(PMSM)の回転子位置を推定することです。本ブロックは、TI DMC ライブラリの SMOPOS ブロックと同じように動作します。

シンボル



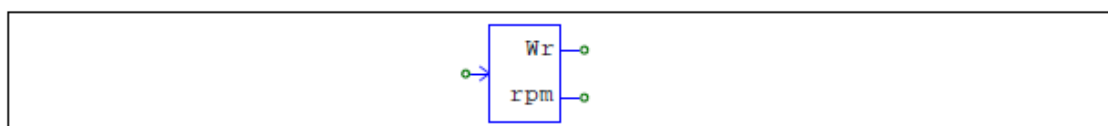
仕様

パラメータ	機能
基準電圧	モータ基準相電圧(V)
基準電流	モータ基準相電流(A)
固定子抵抗	モータ固定子抵抗(Ohm)
固定子インダクタンス	モータ固定子インダクタンス(H)
ゲイン Kslide	スライディングモード制御ゲイン
ゲイン Kslf	スライディングモード制御フィルタゲイン
係数 E0	係数は誤差積分飽和量を制限します。デフォルト値は 0.5 です。
サンプリング周波数	サンプリング周波数(Hz)

速度計算(Speed Calculator)

本ブロックは回転子角を元にモータの速度を演算します。

シンボル



仕様

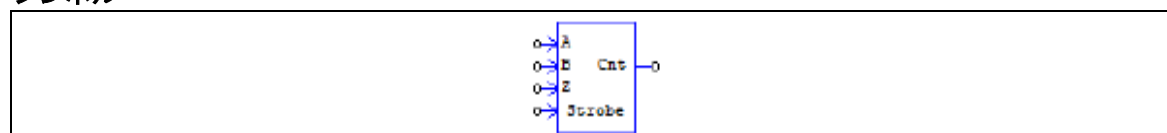
パラメータ	機能
基本周波数 fb	基本周波数(Hz)
遮断周波数	一次ローパスフィルタの遮断周波数(Hz)
極数	モータ極数
サンプリング周波数	サンプリング周波数(Hz)

入力 theta は単位あたりのモータ回転子の電気角です。出力 Wr は単位あたりの推定モータ速度です。出力 rpm は rpm あたりの推定モータ速度です。一次ローパスフィルタは、出力値に適用されます。

エンコーダ（アブソリュートエンコーダ）

このブロックは ABZ 信号をもつエンコーダ機能です。

シンボル



仕様

パラメータ	機能
カウントの方向	カウントの方向（0：カウントアップ；1：カウントダウン）
Z 信号の極性	Z 信号のトリガの極性（0：アクティブ High；1：アクティブ Low）
エンコーダの分解能	エンコーダの分解能。 0 の場合はエンコーダカウンタは継続しリセットされません。 例えば分解能が 4096 の場合カウンタが 4095 になった後に 0 へリセットされます。
サンプリング周波数	サンプリング周波数(Hz)

エンコーダの出力値はカウンタ値です。

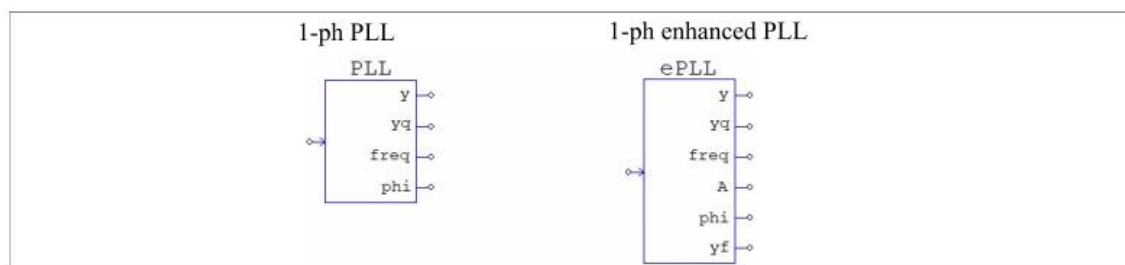
5.6.2 PLL 素子（PLL Blocks）

PLL 素子は、離散系の位相ロックループ制御用です。

単相 PLL（1-ph PLL）

単相の位相ロックループのシンボルと仕様は次のようになります。

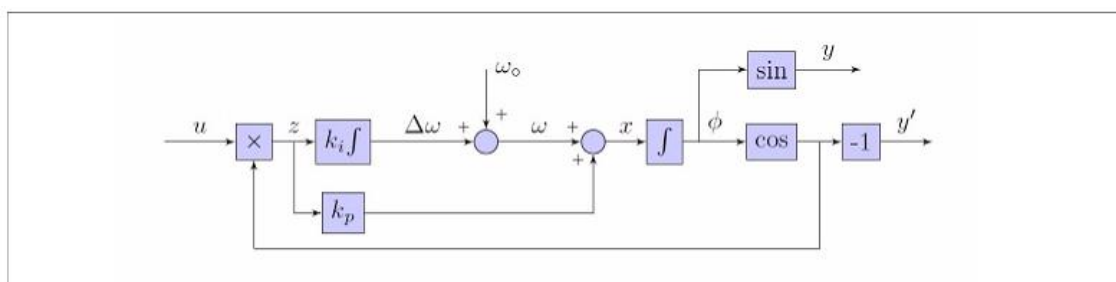
シンボル



仕様

パラメータ	機能
比例ゲイン Kp	比例ゲイン Kp です。単相 PLL のブロックダイアグラムを参照しています。
積分ゲイン Ki	積分ゲイン Ki です。単相 PLL のブロックダイアグラムを参照しています。
定格入力周波数	入力信号の定格周波数です。(Hz)
係数 lamda	周波数スイングを減らす正の定数。拡張 PLL (ePLL) でのみ使用されます。
サンプリング周波数	入力信号はこの周波数でサンプリングされます。(Hz)

動作原理



このブロックの出力は

- y : 入力と同期する単一信号
- yq : y(t)の単一出力信号 90° 遅延バージョン
- freq : 推定周波数 (Hz)
- phi : 推定角度 (°)
- A : 推定振幅 (1-ph ePLL の場合)
- yf : 推定基本成分 (又は周波数での周波数成分) (1-ph ePLL の場合)

Enhanced PLL (ePLL) の独創性は、PLL のオリジナルの広く受け入れられている構造を変更することなく、二重周波数リップルといった主な欠点を除去する簡単ないくつかのブロックを追加しています。

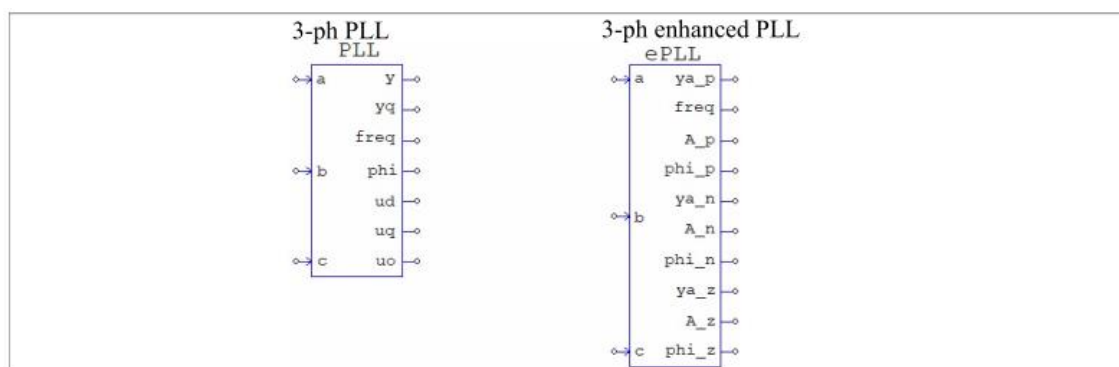
電力システムの使用では、係数 lamda を $0 < \text{係数 lamda} < 20$ の値で設定することをお勧めします。

係数 lamda の値が大きいほど、周波数スイングの抑制が強くなります。

三相 PLL (3-ph PLL)

三相の位相ロックループの素子シンボルと仕様は次のようになります。

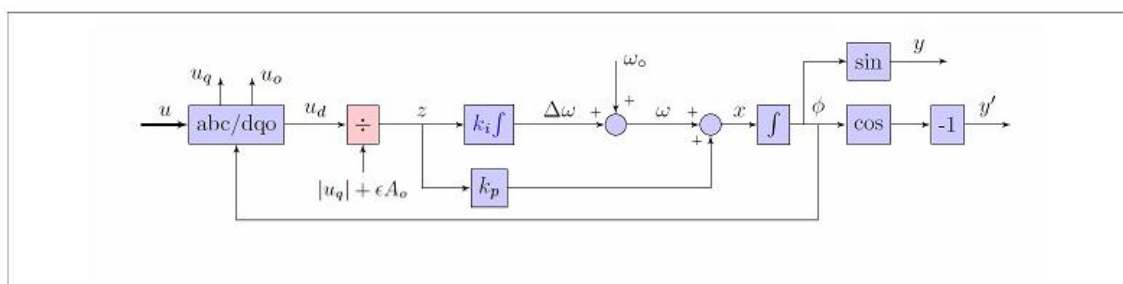
シンボル



仕様

パラメータ	機能
比例ゲイン Kp	比例ゲイン Kp です。三相 PLL のブロックダイアグラムを参照しています。
積分ゲイン Ki	積分ゲイン Ki です。三相 PLL のブロックダイアグラムを参照しています。
定格入力周波数	入力信号の定格周波数です。(Hz)
定格入力振幅 (ピーク)	入力信号の定格振幅です。
係数 lamda	周波数スイングを減らす正の定数。拡張 PLL (ePLL) でのみ使用されます。
サンプリング周波数	入力信号はこの周波数でサンプリングされます。(Hz)

動作原理



3ph-PLL ブロックは三相平衡もしくはほぼ平衡入力を受け入れます。3ph-ePLL は平衡または非平衡にかかわらず一般的な三相信号を処理します。信号を正シーケンス、負シーケンス、ゼロシーケンスの成分として分解することができます。さらに、振幅、位相、角度を含むこれらの成分のすべての信号属性を提供します。負のシーケンス、またはゼロシーケンス成分によって引き起こされるエラーを排除します。

電力システムの使用では、係数 lamda を $0 < \text{係数 lamda} < 20$ の値で設定することをお勧めします。

係数 lamda の値が大きいほど、周波数スイングの抑制が強くなります。

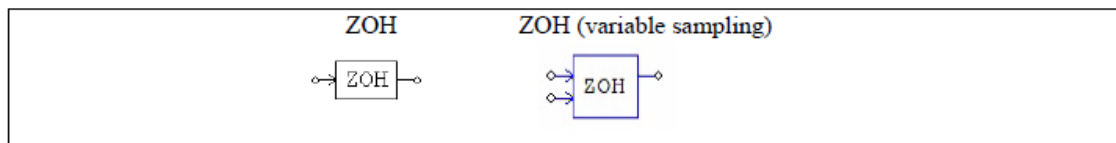
このブロックの出力は

- y : 入力と同期する単一信号
- yq : y(t)の単一出力信号 90° 遅延バージョン
- freq : 推定周波数 (Hz)
- phi : 推定角度 (°)
- ud : 入力の d-axis 成分
- uq : 入力の q-axis 成分
- uo : 入力の o-axis 成分

5.6.3 ゼロ次ホールド (Zero-Order Hold)

ゼロ次ホールドは入力を指定された周期でサンプルを行い、次のサンプリング時刻まで出力の値を保持します。

シンボル



仕様

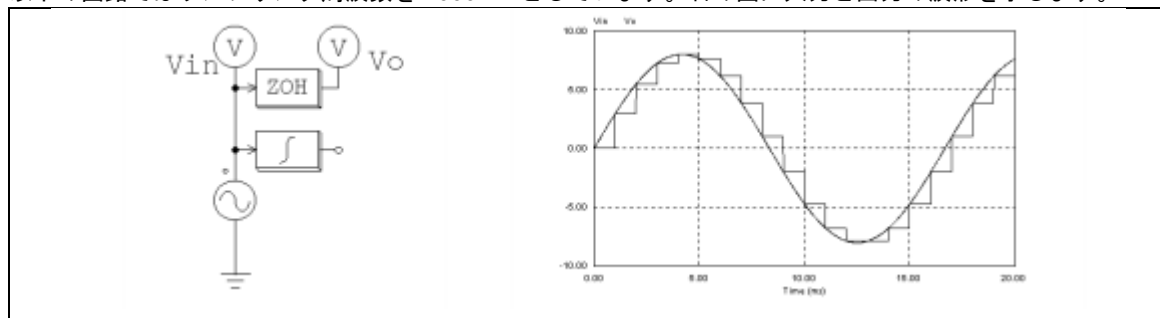
パラメータ	機能
サンプリング周波数	サンプリング周波数(Hz)

他のデジタル素子同様、ゼロ次ホールドは内部のタイマでサンプル時刻を決めます。したがって、サンプル時刻はシミュレーションの開始時刻と同期しています。たとえば、サンプリング周波数を 1000 Hz と指定すると、サンプリングは 0, 1 msec, 2 msec, ... という具合に実行されます。

ブロック ZOH（可変サンプリング）には、サンプリング位置の追加入力があります。一番上の入力、サンプリングされる入力信号です。一番下の入力はサンプリング位置です。この位置により、デューティサイクルのどこでサンプリングが行われるかが決まります。

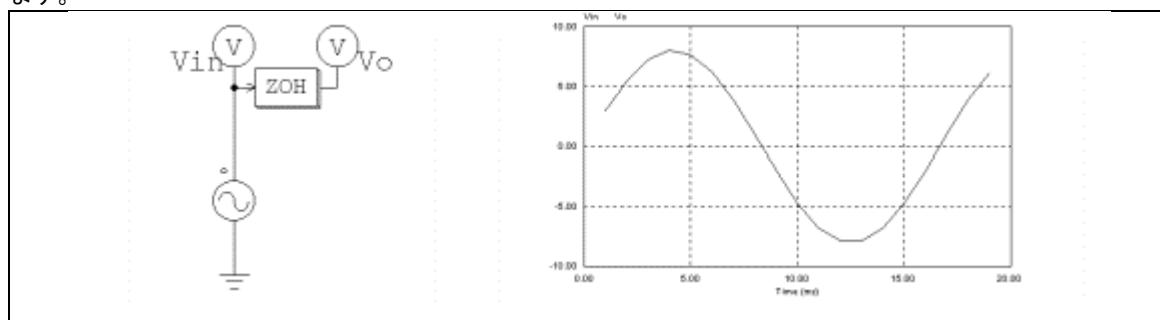
例

以下の回路ではサンプリング周波数を 1000 Hz としています。右の図に入力と出力の波形を示します。



上の回路では入力の正弦波に連続型の積分器が接続されています。このため、この回路は連続・離散混合回路となり、連続系のシミュレーションタイムステップにより計算が行われます。こうしたシミュレーションタイムステップにより、ゼロ次ホールド素子の出力は上に示すように階段状となります。

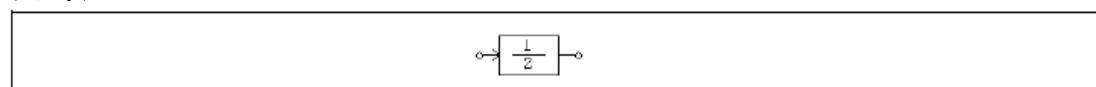
一方、この積分器がないと回路は離散型となります。計算はサンプル時刻でのみ実行されるので、シミュレーションタイムステップはサンプル周期と同じになり、計算結果はサンプル時刻でのみ得られます。下の波形は一見、連続波形のように見えますが実は離散値で、サンプル点を結んだ線のみで構成されています。



5.6.4 単位遅れブロック(Unit Delay)

単位遅れブロック(Unit delay)は入力信号を 1 サンプリング周期だけ遅らせます。

シンボル



仕様

パラメータ	機能
出力の初期値	ブロックの出力の初期値
サンプリング周波数	サンプリング周波数(Hz)

離散素子の単位遅れブロックが標本化信号を 1 サンプル時刻だけ遅らせるのに対して、連続素子の時間遅れブロック(TDELAY)は波形全体を指定時間だけ遅らせます。

5.6.5 z 領域伝達関数ブロック (z-Domain Transfer Function Block)

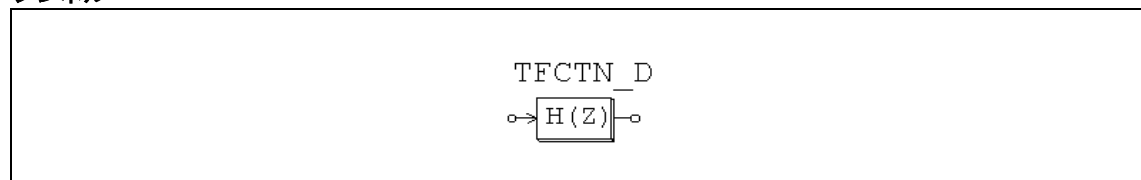
z 領域伝達関数ブロックは以下の多項式で示されます。

$$H(z) = \frac{b_0 \cdot z^N + b_1 \cdot z^{N-1} + \dots + b_{N-1} \cdot z + b_N}{a_0 \cdot z^N + a_1 \cdot z^{N-1} + \dots + a_{N-1} \cdot z + a_N}$$

ここで、 $a_0 = 1$ のとき、 $Y(z) = H(z) \cdot U(z)$ は、以下のように別の式で表現できます。

$$y(n) = b_0 \cdot u(n) + b_1 \cdot u(n-1) + \dots + b_N \cdot u(n-N) - [a_1 \cdot y(n-1) + a_2 \cdot y(n-2) + \dots + a_N \cdot y(n-N)]$$

シンボル



仕様

パラメータ	機能
次数 N	伝達関数の次元 N
係数 $b_0, \dots, b_N$	分子の多項式の係数
係数 $a_0, \dots, a_N$	分母の多項式の係数
サンプリング周波数	サンプリング周波数(Hz)

例

以下は二次の伝達関数です。

$$H(z) = \frac{400 \cdot e^3}{z^2 + 1200 \cdot z + 400 \cdot e^3}$$

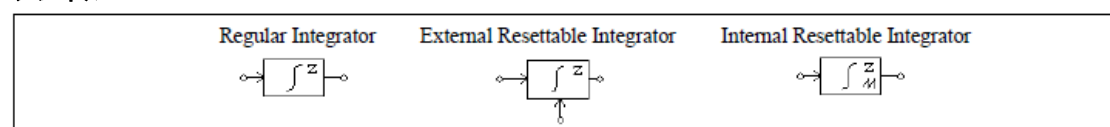
サンプリング周波数は 3kHz とします。PSIM では、以下のように指定します。

次数 N	2
係数 $b_0, \dots, b_N$	0, 0, 400k
係数 $a_0, \dots, a_N$	1, 1200, 400k
サンプリング周波数	3000

積分器(離散型)(Integrator)

積分器(Integrator)には 3 種類あります。通常の積分器、外部リセット機能付き積分器、内部リセット機能付き積分器です。

シンボル



仕様

パラメータ	機能
アルゴリズムフラグ	積分アルゴリズムの切替フラグ 0: 台形法 1: 後退オイラー法 2: 前進オイラー法
出力の初期値	出力の初期値
リセットフラグ	リセットフラグ(0:エッジリセット; 1:レベルリセット) (リセット付き外部積分器のみ)
出力の下限值	出力の下限值(内部リセット付き積分器のみ)
出力の上限値	出力の上限値(内部リセット付き積分器のみ)
サンプリング周波数	サンプリング周波数(Hz)

外部リセット付き積分器の出力は制御信号によりリセットすることができます。エッジリセット(リセットフラグ=0)の場合、制御信号の立ち上がりエッジで、積分器の出力は0にリセットされます。レベルリセット(リセットフラグ=1)の場合、制御信号を High(1)にすると、積分器の出力は0にリセットされます。

内部リセット付き積分器の出力は出力の値によりリセットされます。出力値が下限値か上限値のどちらかに達した場合に、出力を0にリセットされます。リセット動作は、外部エッジリセット付き積分器と同様ですが、内部リセット付き積分器では外部のリセット回路を設定する必要はありません。

入力を $u(t)$ 、出力を $y(t)$ 、サンプリング周期を T 、離散型伝達関数を $H(z)$ とすると、積分器の入出力関係は次のように表現できます。

台形法

$$H(z) = \frac{T}{2} \cdot \frac{z+1}{z-1}$$

$$y(n) = y(n-1) + \frac{T}{2} \cdot (u(n) - u(n-1))$$

後退オイラー法

$$H(z) = T \cdot \frac{z}{z-1}$$

$$y(n) = y(n-1) + T \cdot u(n)$$

前進オイラー法

$$H(z) = T \cdot \frac{1}{z-1}$$

$$y(n) = y(n-1) + T \cdot u(n-1)$$

微分器(離散型)(Differentiator)

離散型微分器(Differentiator)の伝達関数を以下に示します。

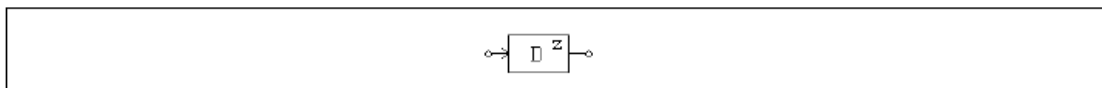
$$H(z) = \frac{1}{T_s} \cdot \frac{z-1}{z}$$

ここで、 T はサンプリング周期です。

入出力関係は差分方程式を使って、次のように表すこともできます。

$$y(n) = \frac{1}{T_s} \cdot (u(n) - u(n-1))$$

シンボル



仕様

パラメータ	機能
サンプリング周波数	サンプリング周波数(Hz)

デジタル PI コントローラ(Digital PI Controller)

デジタル PI コントローラは、以下のように定義されています。

シンボル



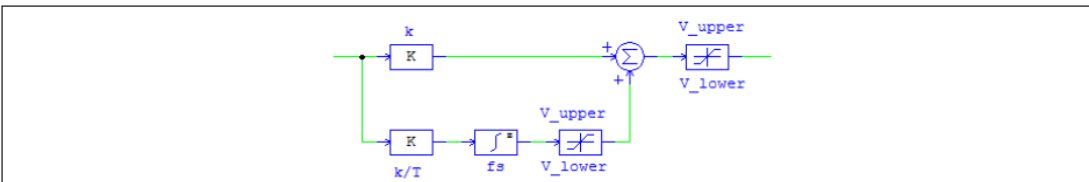
仕様

パラメータ	機能
ゲイン	PI コントローラのゲイン k
時定数	PI コントローラの時間定数 T
出力の下限值	出力の下限 V_lower
出力の上限値	出力の上限 V_upper
サンプリング周波数	サンプリング周波数 fs (Hz)

s 領域におけるアナログ PI コントローラの伝達関数は、以下のように定義されています。

$$G(s) = k \cdot \frac{1 + sT}{sT}$$

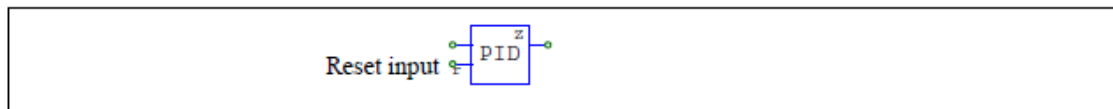
デジタル PI コントローラは、後退オイラー法を用いてアナログ PI コントローラを離散化することにより得られます。コントローラの実装例を、以下に示します。



リセット付きデジタル PID 制御器(Digital PID Controller with Reset)

リセット付きデジタル PID 制御器は以下のように定義されます。ゲイン設定により、本ブロックは PI もしくは PD 制御器として使用できます。

シンボル



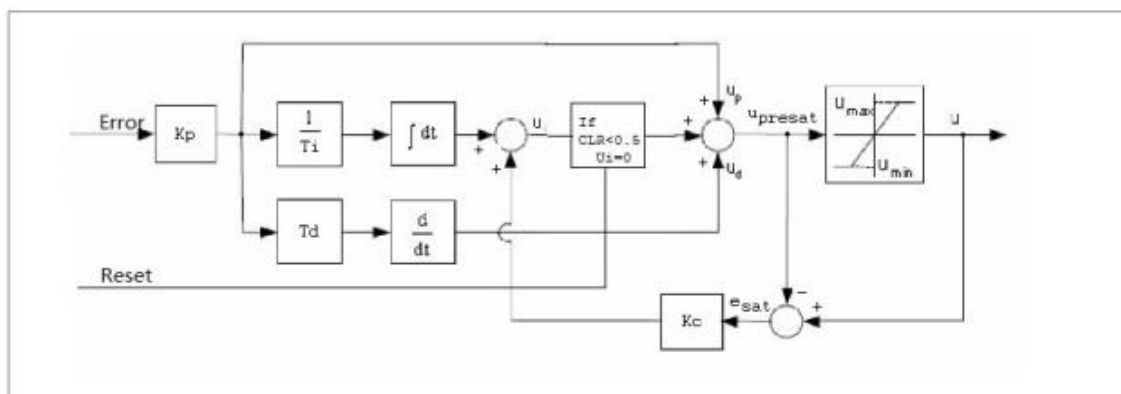
仕様

パラメータ	機能
サンプリング周波数	サンプリング周波数(Hz)
比例ゲイン	比例ループゲイン K_p
積分ゲイン	積分ゲイン K_i
微分ゲイン	微分ゲイン K_d
積分補正ゲイン	積分補正ゲイン K_c
飽和上限	出力上限値
飽和下限	出力下限値

画像中、入力"r"は、リセット信号のためのものです。他の入力、指令値とフィードバック値の誤差です。注意してください。入力リセット値が 0.5 より大きい場合、積分出力は 0 にクランプされます。この機能は、フィードバック信号が使用可能になる前に積分器が飽和状態に入るのを防止するのに有用です。

PID 制御では、微分方程式は後退オイラー近似により差分方程式に変換されます。

従来のアンチwindアップ修正付き PID コントローラのブロック図を以下に示します。



サンプリング周期を T_s とすると、積分ゲインと微分ゲインは次のように定義されます。

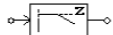
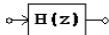
$$K_i = \frac{T_s}{T_i}$$

$$K_d = \frac{T_d}{T_s}$$

デジタルフィルタ (Digital Filters)

一次のローパスフィルタ、二次のローパスフィルタ、一般型のデジタルフィルタ、一般型の FIR フィルタの 4 種類のデジタルフィルタブロックが提供されています。一般型のフィルタについては、フィルタ係数をそれぞれの素子のプロパティウィンドウを介して直接入力するか、あるいはテキストファイルを通して指定する必要があります。

シンボル

1st-order Low-Pass	2nd-order Low-Pass	General Digital Filter	FIR Filter
			

仕様

一次ローパスフィルタおよび二次ローパスフィルタの場合

パラメータ	機能
ゲイン	フィルタのゲイン k
遮断周波数	カットオフ周波数 f_c ($f_c = \omega_c / 2\pi$) (Hz)
減衰比	フィルタの減衰比(二次ローパス・フィルタのみ)
サンプリング周波数	サンプリング周波数(Hz)

伝達関数の係数を直接指定する一般型デジタルフィルタおよび FIR フィルタの場合

パラメータ	機能
次数 N	伝達関数の次元 N
係数 $b_0, \dots, b_N$	分子の多項式の係数
係数 $a_0, \dots, a_N$	分母の多項式の係数
サンプリング周波数	サンプリング周波数(Hz)

伝達関数の係数をを外部ファイルから読み込む、一般型デジタルフィルタおよび FIR フィルタの場合

パラメータ	機能
係数テーブルファイル	フィルタ係数が記載されているファイル名
サンプリング周波数	サンプリング周波数(Hz)

ローパスフィルタの伝達関数は以下の通りです。

s 領域における一次ローパスフィルタの場合

$$G(s) = k \frac{\omega_c}{s + \omega_c}$$

s 領域における二次ローパスフィルタの場合

$$G(s) = k \frac{\omega_c^2}{s^2 + 2\zeta \omega_c s + \omega_c^2}$$

一次と二次のデジタルフィルタは、後退オイラー法によってアナログフィルタを離散化することで得ることが出来ます。

一般型デジタルフィルタの伝達関数を以下の多項式で示します。

$$H(z) = \frac{b_0 + b_1 \cdot z^{-1} + \dots + b_{N-1} \cdot z^{-(N-1)} + b_N \cdot z^{-N}}{a_0 + a_1 \cdot z^{-1} + \dots + a_{N-1} \cdot z^{-(N-1)} + a_N \cdot z^{-N}}$$

 $a_0 = 1$ のときは、出力 y と入力 u は以下の差分形式を使って表わすこともできます。

$$y(n) = b_0 \cdot u(n) + b_1 \cdot u(n-1) + \dots + b_N \cdot u(n-N) - [a_1 \cdot y(n-1) + a_2 \cdot y(n-2) + \dots + a_N \cdot y(n-N)]$$

伝達関数の分母の係数が 0 でない場合、このタイプのフィルタは無限インパルス応答(Infinite Impulse Response = IIR)フィルタと呼ばれます。

一方、FIR フィルタの伝達関数は以下の多項式で表わすことができます。

$$H(z) = b_0 + b_1 \cdot z^{-1} + \dots + b_{N-1} \cdot z^{-(N-1)} + b_N \cdot z^{-N}$$

 $a_0 = 1$ のときは、出力 y と入力 u は以下の差分形式を使って次のように表わせます。

$$y(n) = b_0 \cdot u(n) + b_1 \cdot u(n-1) + \dots + b_N \cdot u(n-N)$$

係数格納ファイルの仕様は以下のとおりです。

FIR フィルタ(外部ファイル)の場合

N
 b_0
 b_1

 b_N

デジタルフィルタ(外部ファイル) の場合

N
 b_0
 b_1

 b_N
 a_0
 a_1

 a_N

または

N
 b_0, a_0
 b_1, a_1

 b_N, a_N

例

ここでは例として二次の Butterworth 型ローパスデジタル・フィルタを設計します。遮断周波数 $f_c = 1\text{kHz}$ 、サンプリング周波数 $f_s = 10\text{kHz}$ として、MATLAB^{*} で計算すると

ナイキスト 周波数は $f_n = f_s/2 = 5\text{ kHz}$

正規化遮断周波数は $f_c^* = f_c/f_n = 0.2$

$[B,A] = \text{butter}(2, f_c^*)$

となり、

$B = [0.0201 \ 0.0402 \ 0.0201] = [b_0 \ b_1 \ b_2]$

$A = [1 \ -1.561 \ 0.6414] = [a_0 \ a_1 \ a_2]$

を得ます。

したがって、伝達関数は、

$$H(z) = \frac{0.0201 + 0.0402 \cdot z^{-1} + 0.0201 \cdot z^{-2}}{1 - 1.561 \cdot z^{-1} + 0.6414 \cdot z^{-2}}$$

入出力差分式は、

$$y(n) = 0.0201 \cdot u(n) + 0.0402 \cdot u(n-1) + 1.561 \cdot y(n-1) - 0.6414 \cdot y(n-2)$$

PSIM では、パラメータを以下のように指定します。

次数 N	2
係数 $b_0, \dots, b_N$	0.0201 0.0402 0.0201
係数 $a_0, \dots, a_N$	1. -1.561 0.6414
サンプリング周波数	10000.

係数をファイルに保存する場合、そのファイルの書式は以下のようになります。

2
 0.0201
 0.0402
 0.0201
 1.
 -1.561
 0.6414

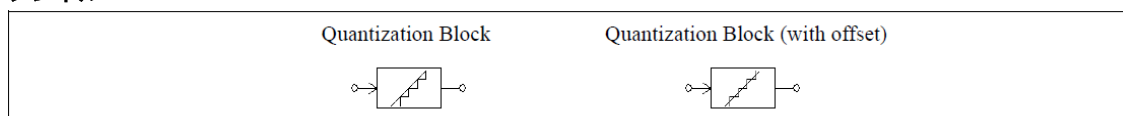
また、以下のような記述も可能です。

2
0.0201, 1
0.0402, -1.561
0.0201, 0.6414

5.6.6 離散化ブロック (Quantization Blocks)

離散化ブロック (Quantization block) は A/D 変換プロセスの離散化誤差を模擬するのに使います。1LSB (least significant bit、最下位ビット) の離散化誤差をもったものと、0.5LSB の入力オフセットをもったものと、計 2 種類の離散化ブロックがあります。

シンボル



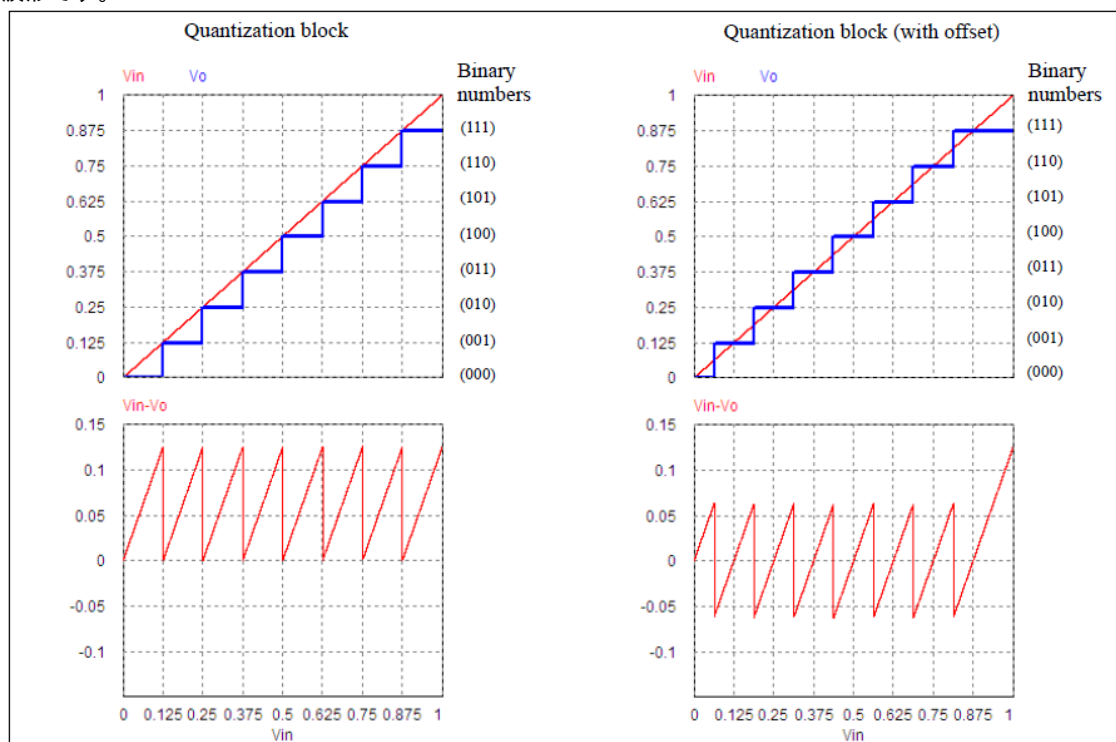
仕様

パラメータ	機能
ビット数	ビット数 N
入力下限 $V_{in,min}$	入力値の下限 $V_{in,min}$
入力上限 $V_{in,max}$	入力値の上限 $V_{in,max}$
出力下限 $V_{o,min}$	出力値の下限 $V_{o,min}$
出力上限 $V_{o,max}$	出力値の上限 $V_{o,max}$
サンプリング周波数	サンプリング周波数(Hz)

離散化ブロックの動作を理解するために、次のような例 ($N=3$ 、 $V_{in,min}=0$ 、 $V_{in,max}=1$) を考えます。この入力値は 2^3 (または 8 つ) のステージに分割されます。入力レベルに応じて、出力は 3-bit の離散値 000, 001, 010, 011, 100, 101, 110, 111 のいずれかを取ります。出力は 2^3 (または 8) のレベルと 2^3-1 (または 7) のステップをもちます。2 進数の 000 が 10 進数の 0 に、2 進数の 111 が 10 進数の 0.875 に一致し、 $V_{in,min}=0$ 、 $V_{in,max}=1$ のとき、入力と出力の波形をプロットすることができます。

また、2つの離散化ブロックの離散化誤差 $V_{in}-V_o$ は以下ようになります。

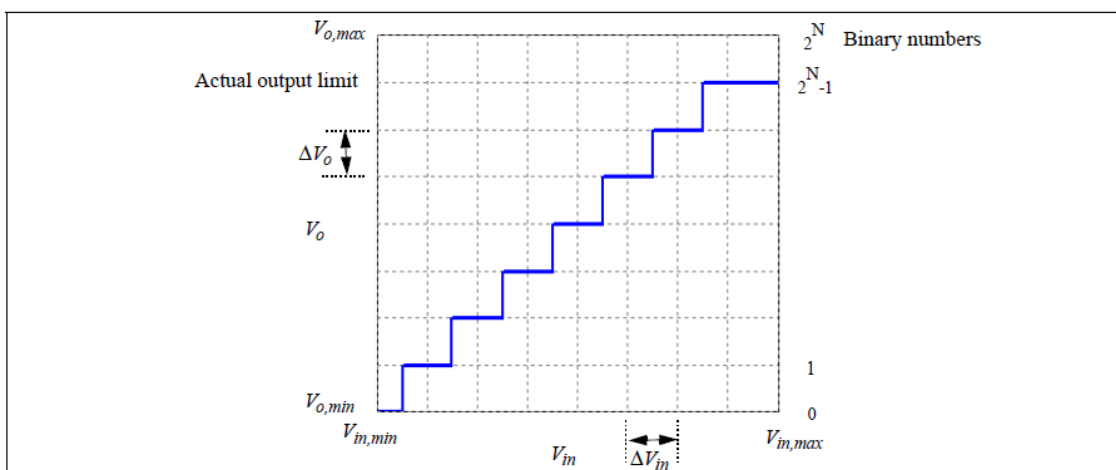
左の波形はオフセットなしの離散化ブロックのもので、右の波形はオフセット付きの離散化ブロックの波形です。



左の波形に示すように、離散化ブロックの離散化誤差は $0 \sim 1\text{LSB}$ 、または $1/2^3$ (または 0.125) となります。

オフセット付きの離散化ブロックでは、離散化される前に $0.5 \times \text{LSB}$ の値が入力に加算されます。これは右の波形に見られるように、離散化誤差を -0.5LSB から $+0.5\text{LSB}$ まで減らします (入力が最大値に近い場合を除く)。

以下の図は一般のオフセット付き離散化ブロックの入出力関係を示しています。



ビット数は出力の分解能を決定します。入力幅 $V_{in,max}-V_{in,min}$ は 2^N ステージに分割されます。各ステージの幅は以下のように表されます。

$$\Delta V_{in} = \frac{V_{in,max} - V_{in,min}}{2^N}$$

ただし、1つ目のステージの幅は $0.5 \times \Delta V_{in}$ となり、最後のステージは $1.5 \times \Delta V_{in}$ となります。オフセットなしの離散化ブロックでは、1つ目のステージと最後のステージでその幅が ΔV_{in} となることにご注意ください。

入力が k 番目のステージで減少した場合、出力は次のように計算されます。

$$V_o = V_{o,\min} + (k-1) \cdot \Delta V_o$$

ここで k は 1 から 2^N の値をとり、出力ステップは以下の通り計算されます。

$$\Delta V_o = \frac{V_{o,\max} - V_{o,\min}}{2^N}$$

この値 $V_{o,\max}$ は入力が $V_{in,\max}$ の時に出力される値と一致します。しかし離散化によって、出力は N レベルで 0 から 2^N-1 の間の値で表されます。結果として、出力の実際の上限は上図で表される通り $V_{o,\max}$ ではなく $V_{o,\max} - \Delta V_o$ となります。

例

オフセット付きの離散化ブロックで $N=3$, $V_{in,\min}=0$, $V_{in,\max}=1$, $V_{o,\min}=0$, $V_{o,\max}=1$ とすると、 $\Delta V_{in}=\Delta V_o=1/8$ となります。

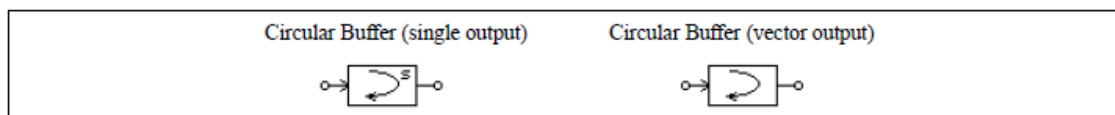
よって $V_{in}=0.25$ のとき、3 番目のステージ($k=3$)で、 $V_o=0+(3-1)*1/8=0.25$ となります。

また、 $V_{in}=0.6$ のとき、6 番目のステージ($k=6$)で、 $V_o=0+(6-1)*1/8=0.625$ となります。

5.6.7 循環バッファ (Circular Buffers)

循環バッファ (Circular Buffer) はデータ配列を保存するメモリです。

シンボル



仕様

パラメータ	機能
バッファ長	バッファの長さ
サンプリング周波数	サンプリング周波数(Hz)

循環バッファは3種類あります。循環バッファ(ベクトル出力)はデータをバッファに格納し、ポインタがバッファの最後まで達したときには始めのメモリ位置に戻り、値を上書きします。出力はバッファの長さと同じ長さのベクトル配列となります。循環バッファ(ベクトル出力-FIFO)は First In -First Out となるベクトル出力のバッファで内部のデータ位置が順番にシフトしていきます。循環バッファ(単出力)はスカラー出力で押し出される値と等しい値を取ります。個別のメモリの内容を参照するには、メモリ読み出しブロック MEMREAD を使って下さい。

例

長さ 4 とサンプリング周波数 10Hz の循環バッファでは、サンプリング時刻によって、バッファの内容は以下のように変化します。

・循環バッファ(ベクトル出力)および循環バッファ(単出力)の場合

時刻	入力	メモリ位置による値				出力(単出力 バッファ)
		1	2	3	4	
0	0.11	0.11	0	0	0	0
0.1	0.22	0.11	0.22	0	0	0
0.2	0.33	0.11	0.22	0.33	0	0
0.3	0.44	0.11	0.22	0.33	0.44	0
0.4	0.55	0.55	0.22	0.33	0.44	0.11
0.5	0.66	0.55	0.66	0.33	0.44	0.22

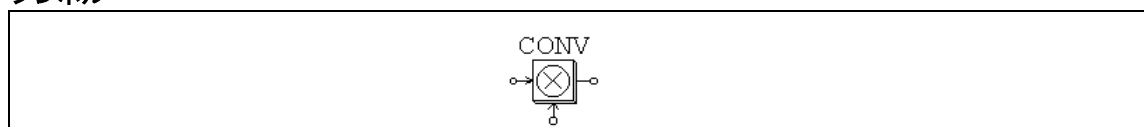
・循環バッファ(ベクトル出力-FIFO)の場合

時刻	入力	メモリ位置による値			
		1	2	3	4
0	0.11	0.11	0	0	0
0.1	0.22	0.22	0.11	0	0
0.2	0.33	0.33	0.22	0.11	0
0.3	0.44	0.44	0.33	0.22	0.11
0.4	0.55	0.55	0.44	0.33	0.22
0.5	0.66	0.66	0.55	0.44	0.33

5.6.8 畳み込みブロック (Convolution Block)

畳み込みブロックは2つの入力ベクトルの畳み込み積分を実行します。出力もベクトル値です。

シンボル



2つの入力ベクトルを

$$A = [a_m \ a_{m-1} \ a_{m-2} \ \dots \ a_1]$$

$$B = [b_n \ b_{n-1} \ b_{n-2} \ \dots \ b_1]$$

とすると A と B の畳み込み積分は

$$C = A \otimes B = [c_{m+n-1} \ c_{m+n-2} \ \dots \ c_1]$$

ここで、

$$c_i = \sum [a_{k+1} * b_{j-k}], \ k = 0, \dots, m+n-1; \ j = 0, \dots, m+n-1; \ i = 1, \dots, m+n-1$$

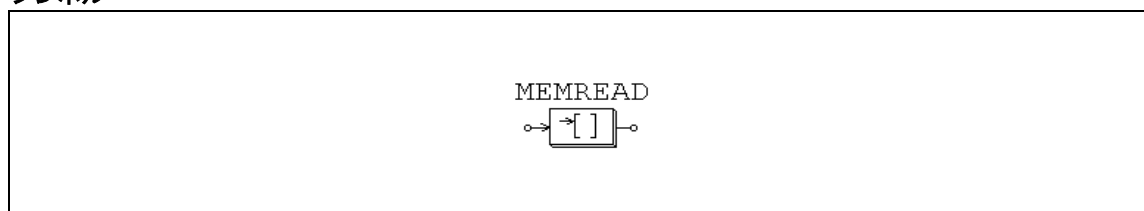
例

入力を $A = [1 \ 2 \ 3]$ および $B = [4 \ 5]$ とすると、 $m=3, n=2$ で、出力は $C = [4 \ 13 \ 22 \ 15]$ となります。

5.6.9 メモリ読み出しブロック (Memory Read Block)

メモリ読み出しブロックは、データ配列の指定された位置のメモリの内容を読みだします。

シンボル



仕様

パラメータ	機能
オフセット	メモリの先頭位置からのオフセット距離

このブロックにより、ユーザは畳み込みブロック、ベクトル配列、循環バッファなどに対して、メモリ位置を指定してアクセスできます。オフセットはメモリの先頭位置からの距離を示します。

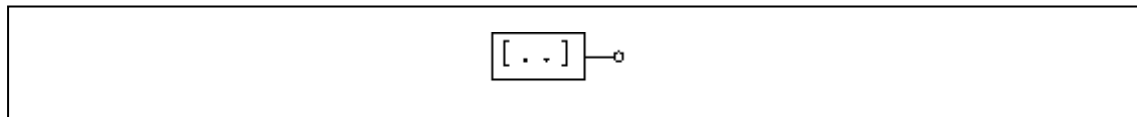
例

ベクトル $A = [2 \ 4 \ 6 \ 8]$ を考えると、オフセットが0のとき、メモリ読み出しブロックの出力は2。オフセットが2のとき、出力は6になります。

5.6.10 データ配列 (Data Array)

これは一次元配列です。出力はベクトルとなります。データ入力は直接入力するもの(Array)とファイルにより指定するもの(Array(file))があります。

シンボル



仕様

パラメータ	機能
配列長	データ配列 N の長さ (Array のみ)
配列要素の値	配列要素の値 (Array のみ)
配列テーブルファイル	データ配列を格納しているファイル名 (Array (file) のみ)

あるファイルから配列が読み込まれる場合、そのファイルは以下のような形式です。

$$\begin{array}{c} N \\ A_1 \\ \dots \dots \dots \\ A_N \end{array}$$

ここで、 N は配列の長さで、 $A_1 \dots A_N$ は配列要素の値です。

例

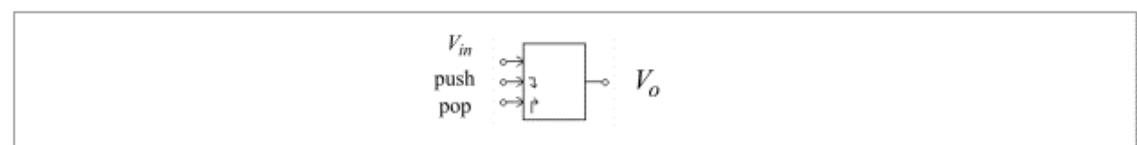
配列 $A = [2 \ 4 \ 6 \ 8]$ を定義するには、Array Length = 4; Values = 2 4 6 8 と指定します。あるファイルから配列が読み込まれる場合、そのファイルは以下のような形式です。

$$\begin{array}{c} 4 \\ 2. \\ 4. \\ 6. \\ 8. \end{array}$$

5.6.11 スタック (Stack)

スタックは first-in-last-out のレジスタです。

シンボル



仕様

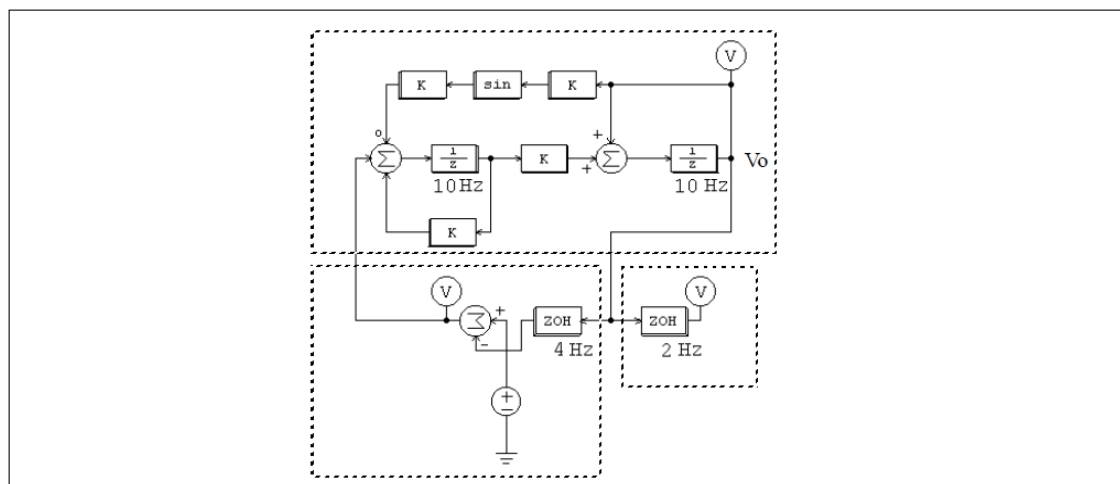
パラメータ	機能
深さ	スタックの深さ

push または pop の操作を行うには立ち上がり信号を与えます。スタックが空のときに pop 操作をおこなった場合は、出力は不変です。スタックが一杯のときに push 操作をおこなうと、スタックの一番下にあるデータはレジスタから押し出されてなくなります。

5.6.12 多重サンプリングシステム (Multi-Rate Sampling System)

PSIM の離散系はサンプリング周期を複数持つことができます。以下に例を示します。

次のシステムは 3 つの部分に別れています。最初の部分システムはサンプリング周波数が 10Hz です。その出力 V_o はシステムのフィードバック信号として使っています。次の部分システムはサンプリング周波数が 4Hz です。3 番目の部分システムは同じ信号を周波数 2Hz でサンプリングして表示しています。



2 つのサンプリング周波数が異なる素子の間にはゼロ次ホールドを使わなければなりません。

5.7 SimCoupler と FMI モジュール (SimCoupler Module and FMI Module)

SimCoupler モジュールと FMI モジュールは PSIM のアドオンオプションです。

SimCoupler モジュールは、PSIM と Matlab/Simulink のコ・シミュレーションを可能にします。

SimCoupler モジュールは PSIM と MATLAB/Simulink との連成シミュレーションのインターフェースを提供します。SimCoupler を使うことで、シミュレーションの一部は PSIM で、残りは Simulink で実行することができます。PSIM のパワー回路のシミュレーション機能をフルに活用しながら、MATLAB/Simulink の制御シミュレーション機能を補助的に使うことが可能です。

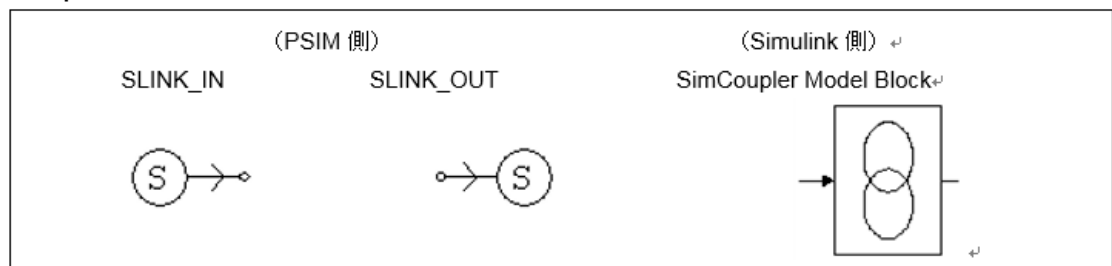
SimCoupler モジュールの使い方の詳細については "Tutorial - SimCoupler Module.pdf" をご参照ください。

FMI モジュールは、FMU (Functional Mock-up Unit) モデルを生成する機能を提供し、そのファイルは FMI 規格に準拠したモデルを含んでいます。FMU にはモデル交換 FMU と連成シミュレーション FMU の 2 つのタイプがあります。現時点では、PSIM の FMI モジュールはスレーブモードでの連成シミュレーション FMU をサポートしています。つまり PSIM が FMU のモデルをエクスポートし、他のソフトウェアが FMU のモデルをインポートします。

FMI モジュールは、PSIM と Embed® や Activate® といった他の Altair® 製品とのインターフェースも提供します。

SimCoupler は PSIM の Link ノードと Simulink の SimCoupler ブロックからなります。次にシンボルを示します。

シンボル



PSIM 内では、SLINK_IN のノードが Simulink からの信号を受け取ります。また SLINK_OUT のノードから Simulink へ信号を送ります。これらはいずれも制御素子なので、PSIM の制御回路内でのみ使用可能です。Simulink 内では、SimCoupler ブロックの入出力端子を経由して他の Simulink 内のシステムと接続することができます。

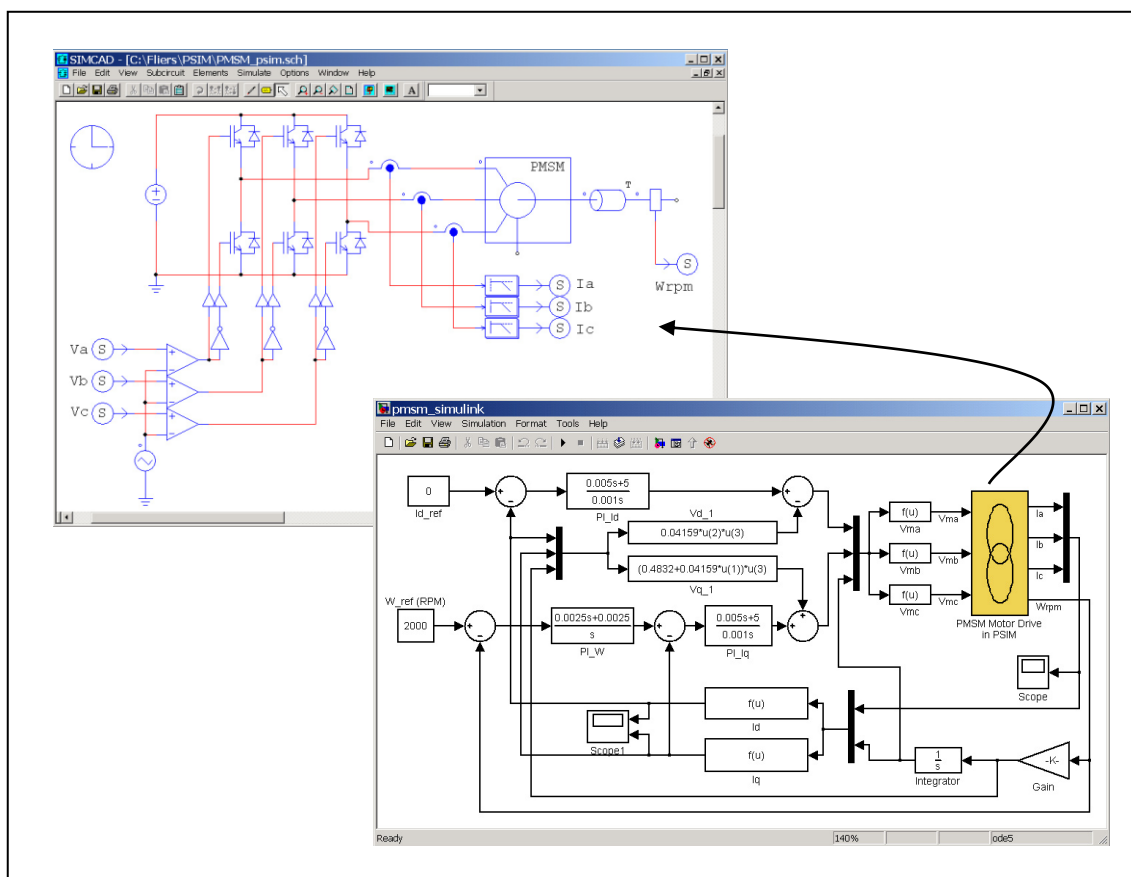
FMI モジュールは、SimCoupler モジュールと同じ In Link ノードと Out Link ノードを使用して、他のソフトウェアとデータを交換します。

PSIM 回路での設定も同様です。

FMI モジュールの使い方の詳細については“Tutorial - How to Use the FMI Module.pdf”をご参照ください。

5.7.1 PSIM と Simulink での設定 (Set-up in PSIM and Simulink)

SimCoupler の使用法は簡単かつ明瞭です。以下の例は、永久磁石同期機(PMSM)の駆動システムで、パワー回路には PSIM を使い、制御回路は Simulink で構成しています。



以下にこの例題にもとづいて SimCoupler を使って PSIM と MATLAB/Simulink の連成シミュレーションを構成する手順を説明します。

SimulinkライブラリへSimCouplerブロックを追加

[SetSimPath.exe]を起動し、Simcoupler ブロックを Simulink ライブラリへ追加します。

そして、PSIM と Matlab/Simulink の連成シミュレーションを行うために、Simcoupler モジュールを設定します。[SetSimPath.exe]の実行後、Simulink ライブラリブラウザに、"S-function SimCoupler"として SimCoupler ブロックが追加されます。

このステップは必須であり、これを実行しないと Simulink は PSIM を認識できません。

これにより、MATLAB のパスに手で PSIM フォルダを加える必要はなくなります。

[SetSimPath.exe]は、一度だけ実行すれば十分です。

ただし、PSIM フォルダか MATLAB フォルダが変更された場合は、再度実行する必要があります。

PSIM 側の操作

- 1) パワー回路を構成したあと、ローパスフィルタを介した A,B,C 相の電流を 3 つの SLINK_OUT のノードに接続し、端子名を Ia, Ib, Ic と指定します。また速度センサの出力を同様に別の SLINK_OUT ノードに接続し、Wrpm と名前を付けます。
- 2) 3 つの SLINK_IN の入力ノードを比較器の正の入力に接続し、それぞれ端子名を Va, Vb, Vc と指定します。
- 3) **Simulate** メニューから **Arrange SLINK Nodes** を選びます。ダイアログウィンドウが表示されるので、SLINK_IN と SLINK_OUT の端子の並びが、Simulink の SimCoupler ブロックでの入出力の順番(上から

下)と同じになるように並び替えてください。この例では、SLINK_IN のノードは Va, Vb, Vc の順で、SLINK_OUT のノードは Ia, Ib, Ic, Wrpm の順になります。

- 4) 回路図ファイルを保存します。この例では、ファイルは「C:\PSIM\pmsm_psim.sch」に保存されます。

Simulink 側の操作

- 1) MATLAB を起動します。
- 2) Simulink を起動し、既存のファイルを開くか、新規ファイルを作成します。システムを作成した後、Simulink のライブラリブラウザのメニュー「S-function SimCoupler」に行き、SimCoupler のブロックを選択し回路図に置いてください。
- 3) PMSMファイルでは、SimCouplerブロックをダブルクリックしてから、**Browser**ボタンをクリックして「C:\PSIM\pmsm_psim.sch」というPSIMの回路図ファイルを選択してください。**Apply**をクリックすると、SimCouplerブロックの入出力の数はPSIMで作成したものと自動的に一致します。この例では3入力・4出力になります。
- 4) **Simulation** メニューから **Simulation Parameters** を選びます。**Solver Options** の項で、**Type** を Fixed Step に設定します。**Fixed step size** は PSIM のタイムステップと同じか、できる限り近い値に設定してください。この例ではタイムステップは 0.1ms です。Solver Option とタイムステップの設定についての詳細は次節で述べます。
- 5) 設定が完了しました。Simulink でシミュレーションを開始します。

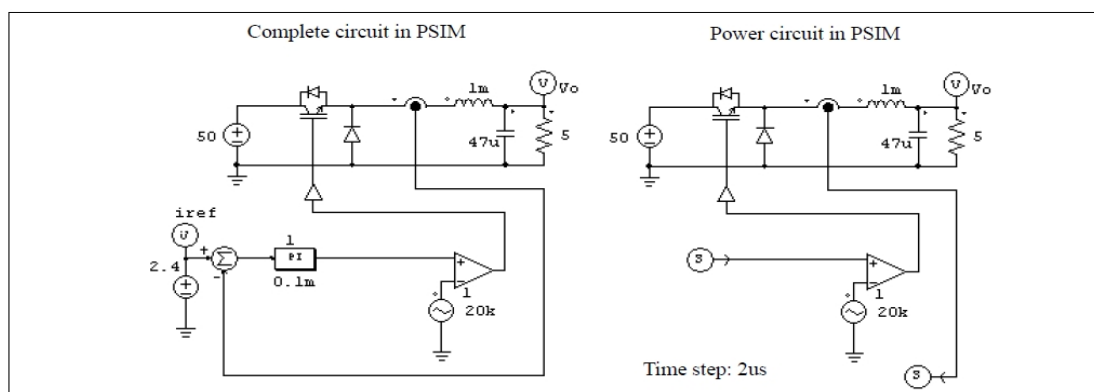
SimCoupler モジュールは、Matlab/Simulink Release 13 以降に対応しています。

また、SimCoupler ブロックがフィードバックループの一部になるようなシステムでは、SimCoupler ブロックが代数ループ(algebraic Loop)の一部になってしまうことがあります(代数ループについてのより詳細な情報は MATLAB のヘルプをご覧ください)。MATLAB/Simulink のバージョンによっては代数ループが存在するシステムのシミュレーションができないことがあり、シミュレーションができる場合にもシミュレーション速度が著しく低下することがあります。代数ループを「Break」するためには、SimCoupler ブロックの各出力端子に Memory ブロックを接続します。Memory ブロックは 1 積分ステップ分の時間遅れを挿入します。

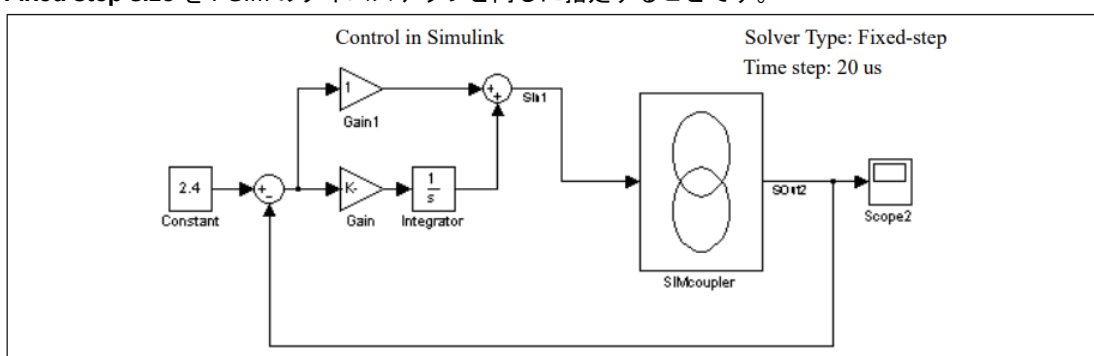
5.7.2 Simulink における Solver Type とタイムステップの設定(Solver Type and Time Step Selection in Simulink)

PSIM と MATLAB/Simulink で同時にシミュレーションをおこなう場合、Simulink では Solver Type とタイムステップについていくつかの制約があります。このことを以下に示すチョップパ回路を例題に説明します。

左側の回路はすべて PSIM で構成し、右側の回路はパワー回路を PSIM で、制御回路を Simulink で構成しています。いずれの回路も PSIM のシミュレーションタイムステップは 2 μ s です。

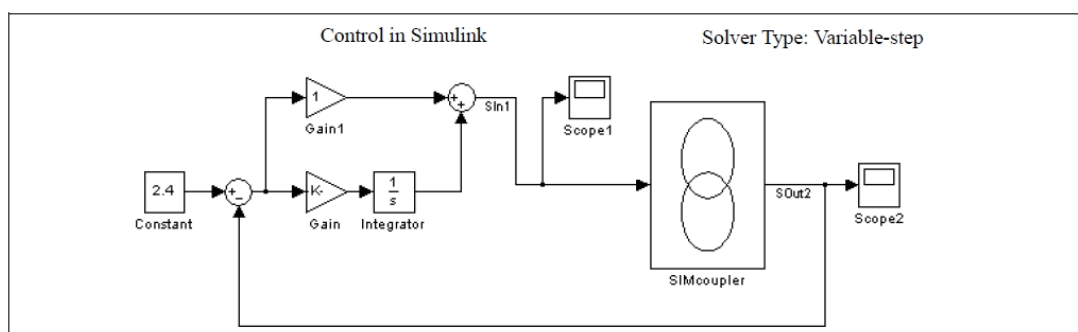


Simulink の設定はいくつか異なる方法があります。推奨の方法は Solver Type を **Fixed-step** に設定して、**Fixed step size** を PSIM のタイムステップと同じに指定することです。



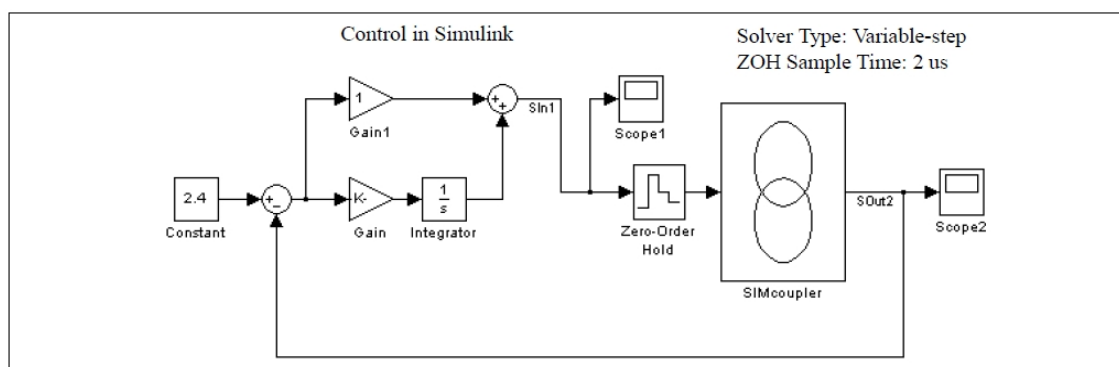
Simulink のタイムステップは PSIM と同一であることを推奨しますが、Simulink の側のタイムステップがわずかに PSIM のタイムステップよりも長い場合にも、十分な精度でシミュレーション結果が得られることがわかっています。上の例では、Simulink のタイムステップは PSIM よりも 10 倍も長い 20μs になっています。

しかし、Simulink の Solver Type を **Variable-step** に設定すると、シミュレーション結果は正しくなりません。次図はこのような場合を示します。



Simulink の Solver Type を **Variable-step** に設定した場合は、正しい結果を得るには SimCoupler の入力にゼロ次ホールドを使う必要があります。さらに、ゼロ次ホールドのサンプル時間は PSIM のタイムステップと同じに設定する必要があります。

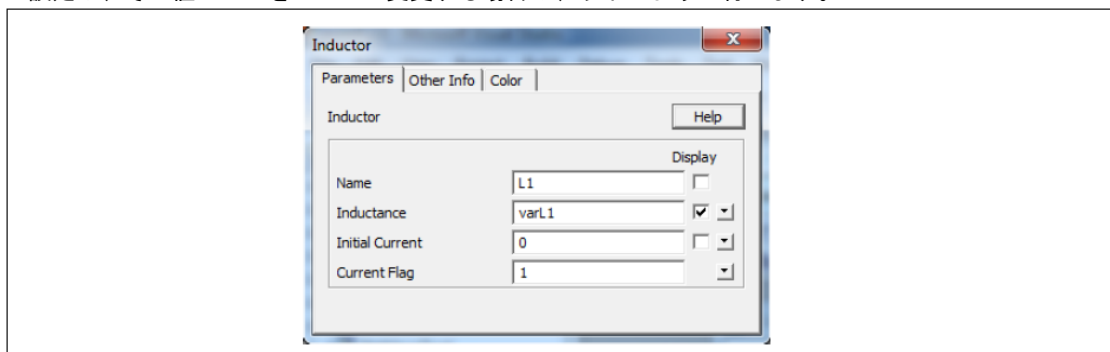
次図にこのような構成を示します。



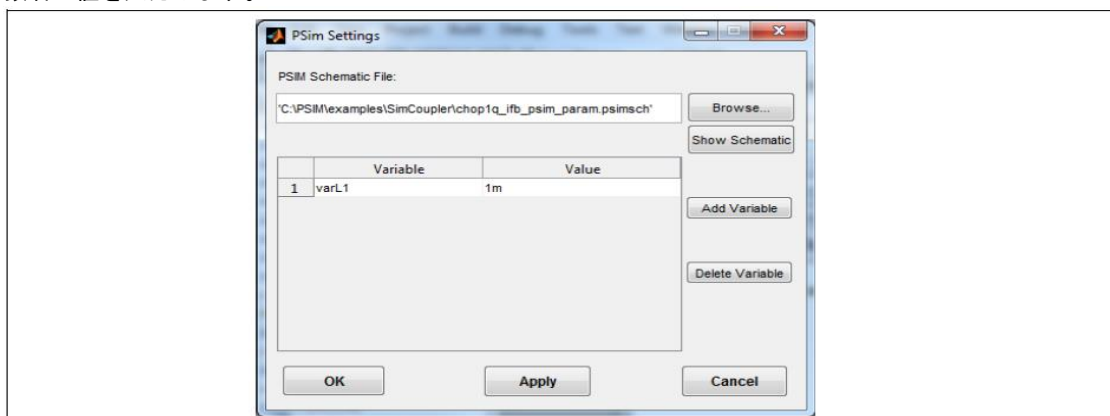
まとめとして、PSIM と MATLAB/Simulink で連成シミュレーションをおこなう場合は、Simulink の Solver Type は **Fixed-step** に設定して、タイムステップを PSIM と同じか、近い値に設定してください。また、Solver Type を **Variable-step** にした場合はゼロ次ホールドを使って、サンプル時間を PSIM のタイムステップと同じに設定するようにしてください。

5.7.3 PSIM から Simulink へのパラメータの受け渡し (Passing Parameters from Simulink to PSIM)

パラメータの値は Simulink で設定し、PSIM に渡すことができます。例えば、インダクタンス L1 を Simulink で設定し、その値 varL1 を PSIM で変更する場合は、以下のように行います。



まず Simulink 上で、SimCoupler ブロックをダブルクリックしてプロパティダイアログを開き、"Add Variable" ボタンをクリックします。そして下図のように、リストに新しく追加された行をクリックし、変数名と値を入力します。



変数 varL1 は PSIM からアクセスできるようになります。

5.8 PIL モジュール

PIL モジュールは PSIM ソフトウェアのアドオンオプションです。Processor-In-the-Loop (PIL) を提供します。PSIM シミュレーションの部分と、DSP ハードウェアボードで実行される C コードが実装されたシステムとから成り立っています。PIL モジュールを使うと、PSIM でシミュレーションしたパワー回路で実際の DSP ハードウェアで簡単にテストしたり、手書きもしくは PSIM によって自動的に生成された制御コードを検証できます。

詳細につきましては PIL モジュールの使い方の詳細説明が“Tutorial-Processor-In-the-Loop Simulation.pdf”にありますのでご参照ください。

5.8.1 PIL ブロック (PIL Block)

PIL ブロックを使うことで PIL シミュレーションのための PSIM と TI DSP ハードウェアとのインターフェースとなります。

仕様

パラメータ	機 能
Target Config	特定の DSP ハードウェアの Code Composer Studio(CCS)で使用するターゲット構成ファイル.ccxml
Target Program	ターゲットハードウェア実行可能.out ファイル
No. of Input Nodes	PIL ブロックへの入力数
No. of Output Nodes	PIL ブロックへの出力数
Breakpoint Func.	ブレークポイント関数の名前、 ブレークポイントは入力変数として設定される必要があります。関数が複数ある場合はスペース無しのカンマで区切ってください。(例: “Tsak1,Task2”)
Endianness	DSP 内のワードのバイトの順です。 ビッグエンディアン: 数字は左から右へ書込まれ最上位のバイトは左になります。 リトルエンディアン: 数字は右から左へ書込まれ最上位のバイトは右になります。 TI F2833x, F2803x, F2806x, 及び F2802x DSP はリトルエンディアンを使います。 TI C6657 はビッグエンディアンを使います。
Addressability	DSP がメモリ位置を識別する方法を設定します。8-bit、16-bit、32-bit、64-bit が使用できます。 TI F2833x, F2803x, F2806x, 及び F2803x DSP は 16-bit を使います。 TI C6657 は 8-bit を使います。
Word Size	DSP のワードサイズです。8-bit、16-bit、32-bit、64-bit が使用できます。 TI F2833x, F2803x, F2806x, 及び F2802x DSP は 16-bit を使います。 TI C6657 は 8-bit を使います。

5.8.2 PIL ブロック (InstaSPIM F2806x) (PIL Block (InstaSPIN F2806x))

このブロックは TI の InstaSPIN F2806x ハードウェアのインターフェース機能を実装します。

仕様

パラメータ	機 能
Target Config	特定の DSP ハードウェアの Code Composer Studio(CCS)で使われるターゲット構成ファイル.ccxml
Target Program	ターゲットハードウェア実行可能.out ファイル
No. of Input Nodes	PIL ブロックへの入力数 6 に固定します。
No. of Output Nodes	PIL ブロックへの出力数 3 に固定します。
Sampling Frequency	サンプリング周波数 (Hz)

すべての入力は IQ24 フォーマットで単位あたりです。すべての出力も IQ24 フォーマットで特に注記がない限り単位あたりになります。

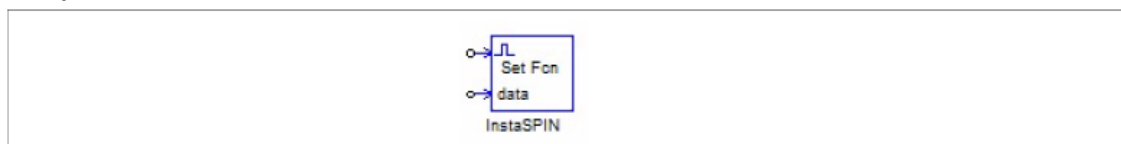
このブロックは TI の InstaSPIN モータ制御アルゴリズムの FASTestimator ブロックの機能を実装しています。FAST 機能は InstaSPIN 対応 DSP の ROM メモリでのみ使用できるため (F28069M のように) PIL ブロックは残りのシステムが PSIM に実装されていると FAST 関数を DSP で実行するのに必要となります。

入力、出力はドロップダウンリストを使って所望の信号を選択することができます。

5.8.3 InstaSPIN 設定素子 (F2806x)

このブロックは InstaSPIN のパラメータを設定します。

シンボル



仕様

パラメータ	機 能
タイプ設定	設定するパラメータを定義します。次のどれかを選択します。 -力角フラグを有効：力角フラグを有効に設定します。 -Rs&Rs_qFmt：抵抗 Rs を pu 単位にし Rs の IQ フォーマットにします。 -Ld&Ls_qFmt：インダクタンス Ld を pu 単位にし、Ld を IQ フォーマットにします。 -Lq&Ls_qFmt：インダクタンス Lq を pu 単位にし、Lq を IQ フォーマットにします。
モード設定	設定するパラメータ条件を定義します。次のどれかを選択します。 - Immediately：パラメータをすぐに設定します。 - At high level：トリガ入力が High の場合にパラメータを設定します。 - At rising edge：トリガ入力が立上りエッジがある場合にパラメータを設定します。 - At falling edge：トリガ入力が立下りエッジがある場合にパラメータを設定します。

ブロックの左上のノードはトリガ入力です。左下のノードはデータ入力ノードです。「モード設定」で定義された設定条件が満たされると、データ入力値は「タイプ設定」で定義したパラメータ値に設定されます。

5.9 モータ制御/HEV Design Suite ブロック (Motor Control/HEV Design Suite Blocks)

この章では、モータドライブデザインスイートと HEV デザインスイートの制御ブロックについて説明します。

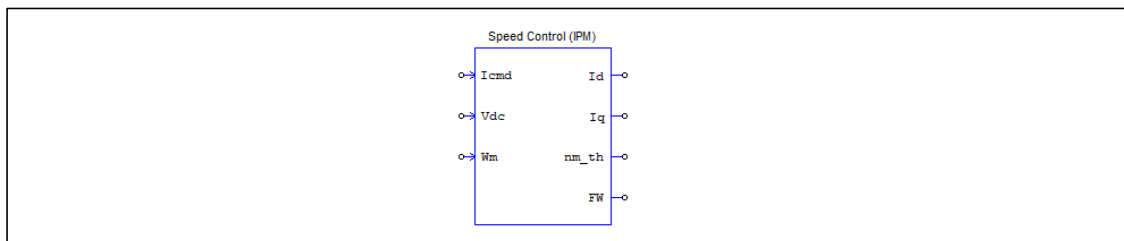
次のブロックが用意されています。

- 速度制御 (IPM)
- 速度制御 (SPM)
- 速度制御 (非線形 IPM)
- トルク制御 (IPM)
- トルク制御 (SPM)
- トルク制御 (非線形 IPM)
- 電圧制御(PMSM)
- DC-DC Charging Control
- DC-DC Discharging Control
- DC-DC Regeneration Control

5.9.1 速度制御 (IPM)

速度制御(IPM)ブロックは、リニア IPM モーターの速度制御用のブロックです。高度な MTPA、弱め磁界、MTPV 制御により、ドライブの性能を最大限に引き出します。進化した MTPA、弱め磁界、MTPV 制御を行うことで、ドライブの性能を最大限に引き出します。

シンボル



仕様

パラメータ	機能
Ld (d 軸インダクタンス)	モータの d 軸インダクタンス(H)
Lq (q 軸インダクタンス)	モータの q 軸インダクタンス(H)
Vpk/krpm	線間のピーク誘起電圧定数、単位は V/krpm (機械系の回転速度)
極数	モータの極数
最大インバータ電流	このモータを駆動するインバータからの最大電流 (A)
最大モータ速度	最大モータ速度(rpm)
サンプリング周波数	ブロックのサンプリング周波数(Hz)

ブロックには次の入力、出力端子があります。

入力信号

Icmd : 入力電流コマンド (A)

Vdc : DC バス電圧 (C)

Wm : モータの機械速度(rad/sec)

出力信号

Id : d 軸電流ループの基準電流

Iq : d 軸電流ループの基準電流

nm_th : ドライブが弱め磁界領域に入るまでの基本速度(rpm)

FW : フィールド弱化のフラグ (1 : フィールド弱化; 0 : フィールド弱化しない)

DC バス電圧と機械的な速度が与えられると、このブロックは基本速度 nm_th を計算します。基本速度 nm_th 以下では、モータは MTPA 制御による最大トルク領域で動作します。

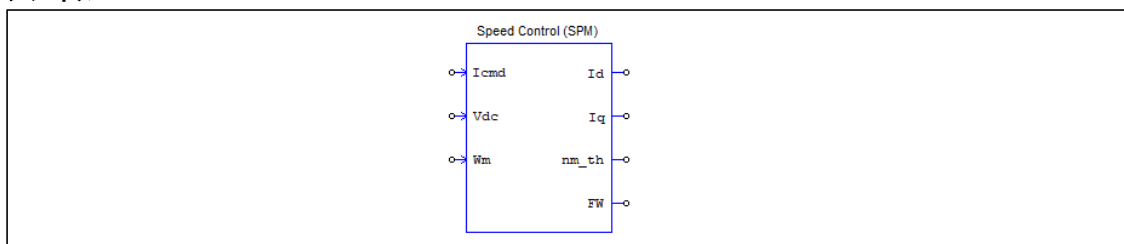
ベース速度 nm_th 以上では、モータは最大電力領域で動作し、界磁弱化管理が行われます。さらに、モータ速度がさらに上昇すると、モータパラメータと動作条件に応じて、モータは MTPV 制御で動作し、出力を最大化します。

このブロックは本 Motor Control Design Suite 及び HEV Design Suite で使用されます。

5.9.2 速度制御(SPM)

速度制御(SPM)ブロックはリニア SPM モータの速度制御のためのブロックです。高度な MTPA、弱め磁界、MTPV 制御を行うことで、ドライブの性能を最大限に引き出します。

シンボル



仕様

パラメータ	機能
Ld (d 軸インダクタンス)	モータの d 軸インダクタンス(H)
Vpk/krpm	線間のピーク誘起電圧定数、単位は V/krpm (機械系の回転速度)
極数	モータの極数
最大インバータ電流	このモータを駆動するインバータからの最大電流 (A)
最大モータ速度	最大モータ速度(rpm)
サンプリング周波数	ブロックのサンプリング周波数(Hz)

ブロックには次の入力、出力端子があります。

入力信号

Icmd : 入力電流コマンド (A)

Vdc : DC バス電圧 (C)

Wm : モータの機械速度(rad/sec)

出力信号

Id : d 軸電流ループの基準電流

I_q : d 軸電流ループの基準電流
 nm_th : ドライブが弱め磁界領域に入るまでの基本速度(rpm)
FW : フィールド弱化のフラグ (1 : フィールド弱化; 0 : フィールド弱化しない)

DC バス電圧と機械的な速度が与えられると、このブロックは基本速度 nm_th を計算します。基本速度 nm_th 以下では、モータは MTPA 制御による最大トルク領域で動作します。

このブロックは本 Motor Control Design Suite 及び HEV Design Suite で使用されます。

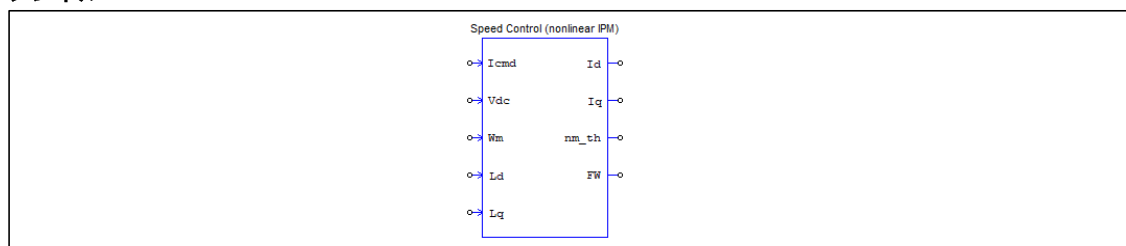
基本速度 nm_th 以上では、モータは弱め磁界制御による最大出力領域で動作します。さらにモータ速度が上がると、モータのパラメータや動作条件に応じてモータは出力を最大化するために MTPV 制御で動作します。

このブロックは本 Motor Control Design Suite 及び HEV Design Suite で使用されます。

5.9.3 速度制御(非線形 IPM)

速度制御(IPM)ブロックは非線形 IPM モータの速度制御のためのブロックです。高度な MTPA, 弱め磁界、MTPV 制御を行うことでドライブ性能を最大限に引き出します。

シンボル



仕様

パラメータ	機能
Ld (d 軸インダクタンス)	定格動作条件におけるモータの d 軸インダクタンス(H)
Lq (q 軸インダクタンス)	定格動作条件におけるモータの q 軸インダクタンス(H)
Vpk/krpm	線間のピーク誘起電圧定数、単位は V/krpm (機械系の回転速度)
極数	モータの極数
最大インバータ電流	このモータを駆動するインバータからの最大電流 (A)
最大モータ速度	最大モータ速度(rpm)
サンプリング周波数	ブロックのサンプリング周波数(Hz)

ブロックには次の入力、出力端子があります。

入力信号

I_{cmd} : 入力電流コマンド (A)
 V_{dc} : DC バス電圧 (C)
 W_m : モータの機械速度(rad/sec)
 L_d : モータの d 軸インダクタンス
 L_q : モータの q 軸インダクタンス

出力信号

I_d : d 軸電流ループの基準電流
 I_q : d 軸電流ループの基準電流
 nm_th : ドライブが弱め磁界領域に入るまでの基本速度(rpm)

FW：フィールド弱化のフラグ（1：フィールド弱化; 0：フィールド弱化しない）

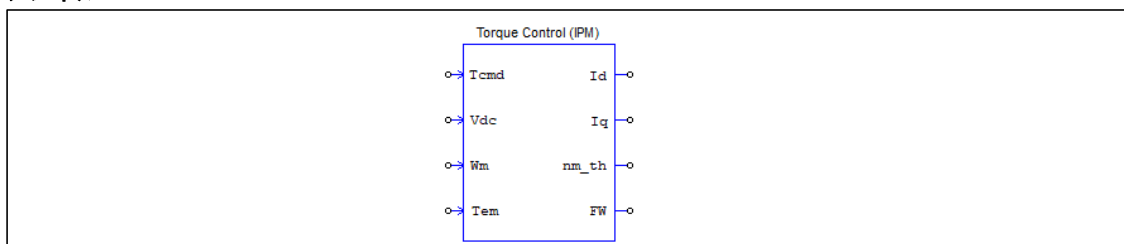
DC バス電圧と機械的な速度が与えられると、このブロックは基本速度 nm_th を計算します。基本速度 nm_th 以下では、モータは MTPA 制御による最大トルク領域で動作します。基本速度 nm_th 以上では、モータは弱め磁界制御による最大出力領域で動作します。さらにモータ速度が上がると、モータのパラメータや動作条件に応じてモータは出力を最大化するために MTPV 制御で動作します。入力 Ld と Lq は、入力が Id と Iq 、又は電流の振幅や角度の 2 次元テーブルから得られます。

このブロックは本 Motor Control Design Suite 及び HEV Design Suite で使用されます。

5.9.4 トルク制御(IPM)

トルク制御(IPM) ブロックはリニア IPM モータのトルク制御のためのブロックです。高度な MTPA、弱め磁界、MTPV 制御を行うことでドライブ性能を最大限に引き出します。

シンボル



仕様

パラメータ	機能
Ld (d 軸インダクタンス)	d 軸インダクタンス(H)
Lq (q 軸インダクタンス)	q 軸インダクタンス(H)
$Vpk/krpm$	線間のピーク誘起電圧定数、単位は V/krpm (機械系の回転速度)
極数	モータの極数
最大インバータ電流	このモータを駆動するインバータからの最大電流 (A)
最大モータ出力	最大モータ出力(W)
最大モータ速度	最大モータ速度(rpm)
トルクループ時定数	トルク制御ループの時定数 (秒)
サンプリング周波数	ブロックのサンプリング周波数(Hz)

ブロックには次の入力、出力端子があります。

入力信号

- Tcmd： 入力電流コマンド (A)
- Vdc： DC バス電圧 (C)
- Wm： モータの機械速度(rad/sec)
- Tem： モータ内部トルク(N*m)

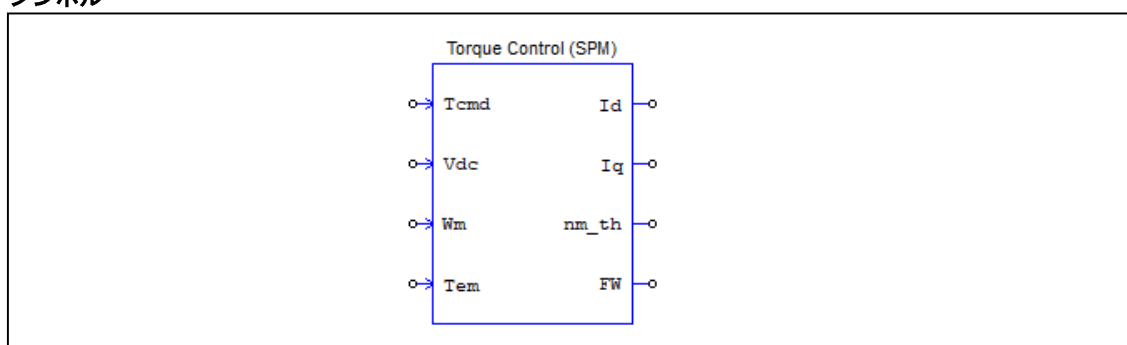
出力信号

Id : d 軸電流ループの基準電流
 Iq : d 軸電流ループの基準電流
 nm_th : ドライブが弱め磁界領域に入るまでの基本速度(rpm)
 FW : フィールド弱化のフラグ (1 : フィールド弱化; 0 : フィールド弱化しない)

5.9.5 トルク制御 (SPM)

Torque Control (SPM) ブロックは、リニア SPM モータのトルク制御用ブロックでドライブを最大化します。MTPA、フィールド弱体化、MTPV の制御を行うことで、高度な性能を発揮します

シンボル



仕様

パラメータ	機能
Ld (d 軸インダクタンス)	d 軸インダクタンス(H)
Vpk/krpm	線間のピーク誘起電圧定数、単位は V/krpm (機械系の回転速度)
極数	モータの極数
最大インバータ電流	このモータを駆動するインバータからの最大電流 (A)
最大モータ出力	最大モータ出力(W)
最大モータ速度	最大モータ速度(rpm)
トルクループ時定数	トルク制御ループの時定数 (秒)
サンプリング周波数	ブロックのサンプリング周波数(Hz)

ブロックには次の入力、出力端子があります。

入力信号

Tcmd : 入力電流コマンド (A)
 Vdc : DC バス電圧 (C)
 Wm : モータの機械速度(rad/sec)
 Tem : モータ内部トルク(N*m)

出力信号

Id : d 軸電流ループの基準電流
 Iq : d 軸電流ループの基準電流
 nm_th : ドライブが弱め磁界領域に入るまでの基本速度(rpm)

FW：フィールド弱化のフラグ（1：フィールド弱化; 0：フィールド弱化しない）

このブロックは、内部フィードバックループを使用して、発生したトルクのフィードバック制御を行います。

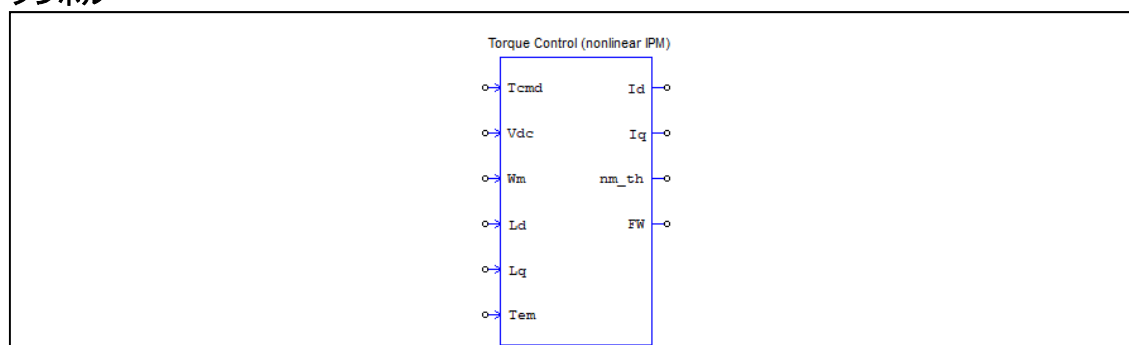
DC バス電圧と機械的な速度が与えられると、このブロックは基本速度 nm_th を計算します。基本速度 nm_th 以下では、モータは MTPA 制御による最大トルク領域で動作します。基本速度 nm_th 以上では、モータは弱め磁界制御による最大出力領域で動作します。さらにモータ速度が上がると、モータのパラメータや動作条件に応じてモータは出力を最大化するために MTPV 制御で動作します。入力 Ld と Lq は、入力が Id と Iq 、又は電流の振幅や角度の 2 次元テーブルから得られます。

このブロックは本 Motor Control Design Suite 及び HEV Design Suite で使用されます。

5.9.6 トルク制御(非線形 IPM) Torque Control(nonlinear IPM)

Torque Control (nonlinear IPM) ブロックは、Nonlinear IPM モータのトルク制御を行うためのブロックです。これは、ドライブを最大化する 高度な MTPA、フィールド弱化、MTPV 制御を提供し、パフォーマンスを向上させます。

シンボル



仕様

パラメータ	機能
Ld (d 軸インダクタンス)	定格動作条件におけるモータの d 軸インダクタンス(H)
Lq (q 軸インダクタンス)	定格動作条件におけるモータの q 軸インダクタンス(H)
$Vpk/krpm$	線間のピーク誘起電圧定数、単位は V/krpm (機械系の回転速度)
極数	モータの極数
最大インバータ電流	このモータを駆動するインバータからの最大電流 (A)
最大モータ出力	最大モータ出力(W)
最大モータ速度	最大モータ速度(rpm)
トルクループ時定数	トルク制御ループの時定数 (秒)
サンプリング周波数	ブロックのサンプリング周波数(Hz)

ブロックには次の入力、出力端子があります。

入力信号

- Tcmd： 入力電流コマンド (A)
- Vdc： DC バス電圧 (C)
- Wm： モータの機械速度(rad/sec)

Ld : モータの d 軸インダクタンス

Lq : モータの q 軸インダクタンス

Tem : モータ内部トルク(N*m)

出力信号

Id : d 軸電流ループの基準電流

Iq : d 軸電流ループの基準電流

nm_th : ドライブが弱め磁界領域に入るまでの基本速度(rpm)

FW : フィールド弱化のフラグ (1 : フィールド弱化; 0 : フィールド弱化しない)

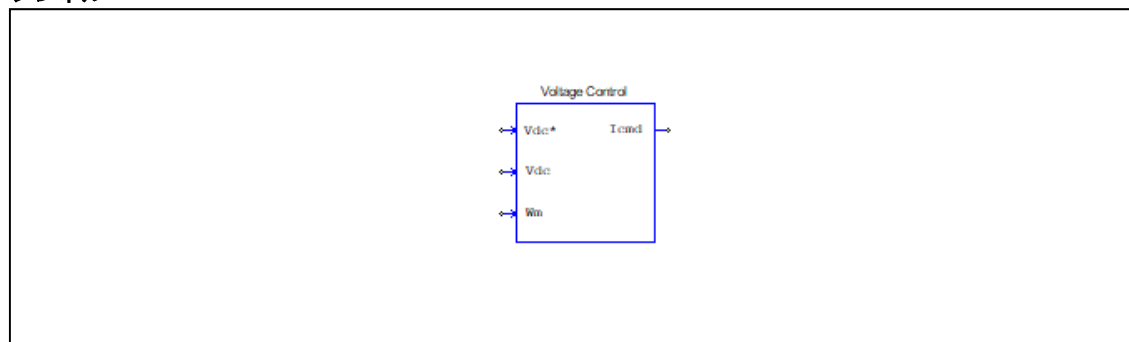
DC バス電圧と機械的な速度が与えられると、このブロックは基本速度 nm_th を計算します。基本速度 nm_th 以下では、モータは MTPA 制御による最大トルク領域で動作します。基本速度 nm_th 以上では、モータは弱め磁界制御による最大出力領域で動作します。さらにモータ速度が上がると、モータのパラメータや動作条件に応じてモータは出力を最大化するために MTPV 制御で動作します。入力 Ld と Lq は、入力が Id と Iq、又は電流の振幅や角度の 2 次元テーブルから得られます。

このブロックは本 Motor Control Design Suite 及び HEV Design Suite で使用されます。

5.9.7 電圧制御(PMSM) (Voltage Control(PMSM))

電圧制御ブロックは、線形 PMSM のみが対象となります。

シンボル



仕様

パラメータ	機能
PI ゲイン	電圧ループ PI コントローラのゲイン
PI 時定数	電圧ループ PI コントローラの時定数
最大インバータ電流	このモータを駆動するインバータからの最大電流 (A)
サンプリング周波数	電圧 PI コントローラのサンプリング周波数(Hz)

電圧制御ブロックには、以下の入出力があります。

入力信号

Vdc* DC バス電圧指令

Vdc DC バス電圧フィードバック

Wm モータ機械速度 (rad/sec)

出力信号

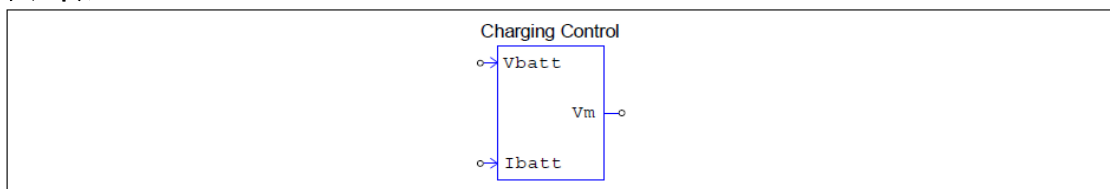
Icnd 電流振幅基準

デジタル PI コントローラで DC バス電圧を制御するブロックです。
機械電流のリファレンスを生成します。

5.9.8 DC-DC 充電制御 (DC-DC Charging Control)

DC-DC 充電制御ブロックは、以下のように定義されています。

シンボル



仕様

パラメータ	機能
バッテリー充電電力	DCDC コンバータの定格電力(W)
バッテリー側電圧	バッテリー側のコンバータ定格電圧(V)
直列セル个数	バッテリーパックの直列のセルの个数
並列セル个数	バッテリーパックの並列のセルの个数
電圧ディレーティング係数	電圧のディレーティング係数 K_s 0(100%のディレーティング)~1(ディレーティングなし)
フル電圧	バッテリーセルのフル(または最大)電圧(V)
バッテリーセル抵抗	バッテリーセルの内部抵抗(Ohm)
電流 PI ゲイン	電流ループ PI コントローラのゲイン
PI 電流時定数	電流ループ PI コントローラの時定数(sec)
電圧 PI ゲイン	電圧ループ PI コントローラのゲイン
PI 電圧時定数	電圧ループ PI コントローラの時定数(sec)
制御ブロック出力上限	制御ブロック出力値の上限(V_m) 下限は 0
サンプリング周波数	電圧と電流の PI コントローラのサンプリング周波数(Hz)

DC-DC 充電制御ブロックには、以下の入出力があります。

V_{batt} バッテリー側の電圧
 I_{batt} バッテリーに流れ込む電流
 V_m 変調信号出力

このブロックは、バッテリーに対する定電圧定電流における充電制御を実装します。バッテリー端子電圧がバッテリーフロート電圧より小さい場合は、一定の電流で充電します。その場合、電圧は無効となり、電流ループは一定の電流レートでバッテリーを充電します。なお、バッテリーフロート電圧は、内部バッテリーのフル電圧とバッテリー抵抗の電圧降下を加算した値です。充電電流の振幅は、バッテリー側のコンバータの定格電流に設定されます。

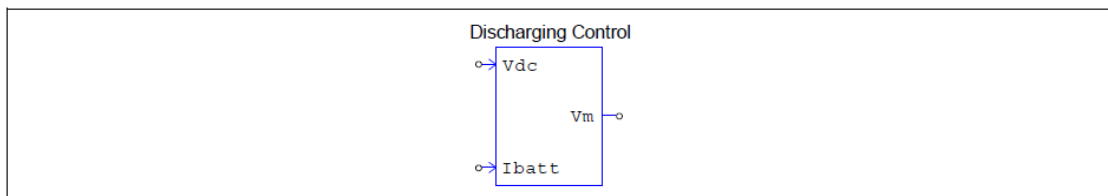
一方、バッテリーの端子電圧がフロート電圧に達したときは、定電圧で充電します。電圧ループは、電流ループ用の指令値を生成します。

デジタル PI コントローラは、電圧および電流ループに使用されます。

5.9.9 DC-DC 放電制御 (DC-DC Discharging Control)

DC-DC 放電制御ブロックは、以下のように定義されます。

シンボル



仕様

パラメータ	機能
電流/電圧モード	放電制御の運転モード (0:電流モード、1:電圧モード)
バッテリー放電電力	DCDC コンバータの定格電力(W)
バッテリー側電圧	バッテリー側のコンバータ定格電圧(W)
DC バス電圧指令	DC バス電圧指令値(V)
電流 PI ゲイン	電流ループ PI コントローラのゲイン
PI 電流時定数	電流ループ PI コントローラの時定数(sec)
電圧 PI ゲイン	電圧ループ PI コントローラのゲイン
PI 電圧時定数	電圧ループ PI コントローラの時定数(sec)
制御ブロック出力上限	制御ブロック出力値の上限(Vm) 下限は 0
サンプリング周波数	電圧と電流の PI コントローラのサンプリング周波数(Hz)

DC-DC 放電制御ブロックには、以下の入出力があります。

Vdc DC バス電圧フィードバック

Ibatt バッテリーに流れ込む電流

Vm 変調信号出力

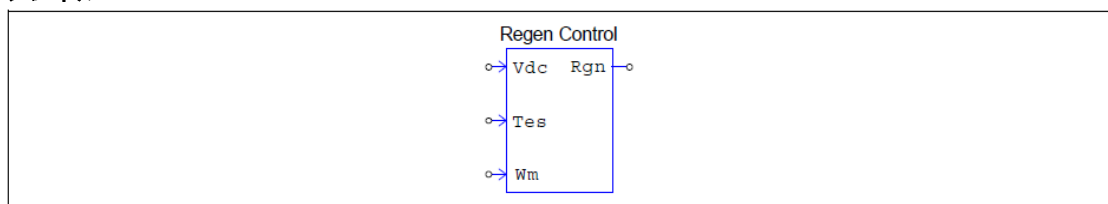
このブロックは、バッテリーに対する定電圧もしくは定電流の放電制御を実装します。運転モードが電圧モード(1)に設定されている場合は、コンバータは DC バス電圧を制御します。そして、電圧ループは電流ループ用の指令値を生成します。運転モードが電流モード(0)に設定されている場合は、コンバータは DC バスに流れ込む電流が最大になるように電流を制御します。

デジタル PI コントローラは、電圧および電流のループに使用されます。

5.9.10 DC-DC 回生制御 (DC-DC Regeneration Control)

DC-DC 回生制御ブロックは、以下のように定義されます。

シンボル



仕様

パラメータ	機能
回生電力閾値	モータ電力レベルの閾値。閾値を超えると、回生が有効になります。
回生有効化時間	回生が有効になる時間の指定。(s) この時間より前は回生が無効化されています。
サンプリング周波数	スピードフィードバック用ローパスフィルタのサンプリング周波数(Hz)

DC-DC 回生制御ブロックには、以下の入出力があります。

入力信号

Vdc DC バス電圧フィードバック
Tes トラクションモータの推定発生トルク
Wm トラクションモータの機械速度(rad/sec)

出力信号

Rgn 回生フラグ (0: 回生でない; 1: 回生)

このブロックは、DC バス電圧とトラクションモータ電力に基づいて、回生フラグを生成します。モータ電力が負の場合(発電モード)かつ、電力の振幅の大きさが閾値を超える場合は、回生フラグが 1 に設定され、回生が可能になります。

起動時の過渡状態で、誤ったトリガを検出しないようにするため、回生有効可能な時間を定義します。回生は、この時間が経過した後にのみ有効になります。

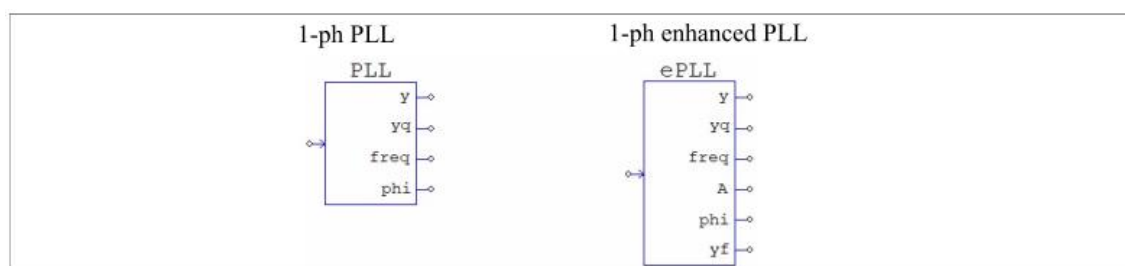
5.10 PLL ブロック (PLL Blocks)

PLL ブロックは、離散系の位相ロックループ制御用です。

5.10.1 一相 PLL (1-ph PLL)

単相の位相ロックループのシンボルと仕様は次のようになります。

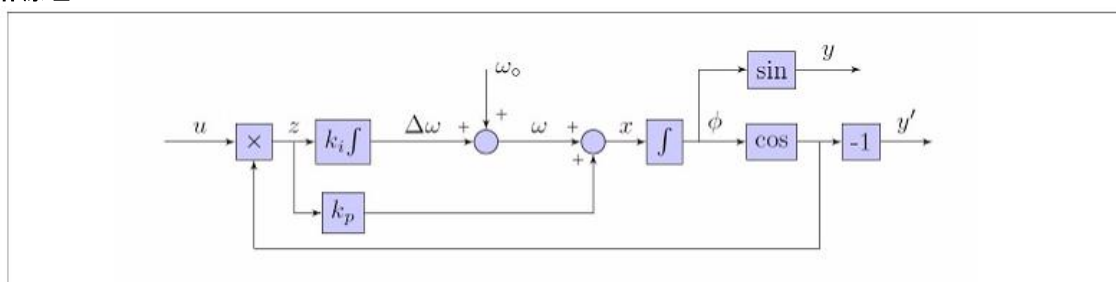
シンボル



仕様

パラメータ	機能
比例ゲイン Kp	比例ゲイン Kp です。単相 PLL のブロックダイアグラムを参照しています。
積分ゲイン Ki	積分ゲイン Ki です。単相 PLL のブロックダイアグラムを参照しています。
定格入力周波数	入力信号の定格周波数です。(Hz)
係数 lamda	周波数スイングを減らす正の定数。拡張 PLL (ePLL) でのみ使用されます。
サンプリング周波数	入力信号はこの周波数でサンプリングされます。(Hz)

動作原理



このブロックの出力は

- y : 入力と同期する単一信号
- yq : y(t)の単一出力信号 90° 遅延バージョン
- freq : 推定周波数 (Hz)
- phi : 推定角度 (°)
- A : 推定振幅 (1-ph ePLL の場合)
- yf : 推定基本成分 (又は周波数での周波数成分) (1-ph ePLL の場合)

Enhanced PLL (ePLL) の独創性は、PLL のオリジナルの広く受け入れられている構造を変更することなく、二重周波数リップルといった主な欠点を除去する簡単ないくつかのブロックを追加しています。

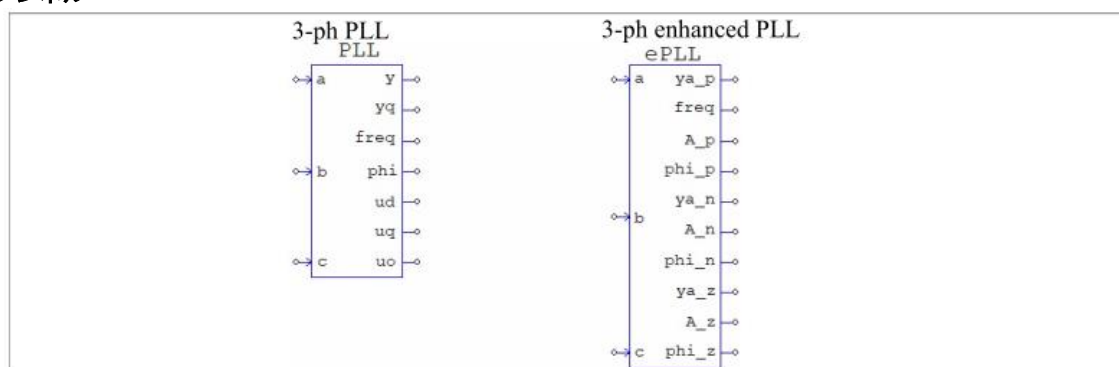
電力システムの用途では、係数 lamda を $0 < \text{係数 lamda} < 20$ の値で設定することをお勧めします。

係数 lamda の値が大きいほど、周波数スイングの抑制が強くなります。

5.10.2 三相 PLL (3-ph PLL)

三相の位相ロックループの素子シンボルと仕様は次のようになります。

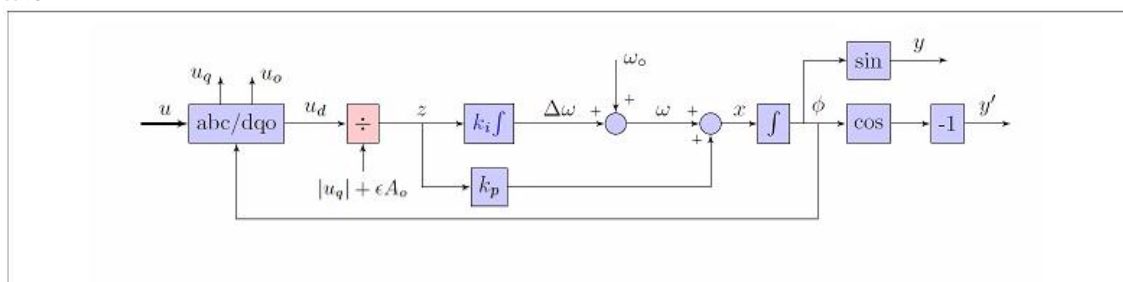
シンボル



仕様

パラメータ	機能
比例ゲイン Kp	比例ゲイン Kp です。三相 PLL のブロックダイアグラムを参照しています。
積分ゲイン Ki	積分ゲイン Ki です。三相 PLL のブロックダイアグラムを参照しています。
定格入力周波数	入力信号の定格周波数です。(Hz)
定格入力振幅 (ピーク)	入力信号の定格振幅です。
係数 lamda	周波数スイングを減らす正の定数。拡張 PLL (ePLL) でのみ使用されます。
サンプリング周波数	入力信号はこの周波数でサンプリングされます。(Hz)

動作原理



3ph-PLL ブロックは三相平衡もしくはほぼ平衡入力を受け入れます。3ph-ePLL は平衡または非平衡にかかわらず一般的な三相信号を処理します。

信号を正シーケンス、負シーケンス、ゼロシーケンスの成分として分解することができます。さらに、振幅、位相、角度を含むこれらの成分のすべての信号属性を提供します。

負のシーケンス、またはゼロシーケンス成分によって引き起こされるエラーを排除します。

電力システムの用途では、係数 lamda を $0 < \text{係数 lamda} < 20$ の値で設定することをお勧めします。

係数 lamda の値が大きいほど、周波数スイングの抑制が強くなります。

このブロックの出力は

- y : 入力と同期する単一信号
- yq : y(t)の単一出力信号 90° 遅延バージョン
- freq : 推定周波数 (Hz)
- phi : 推定角度 (°)
- ud : 入力の d-axis 成分
- uq : 入力の q-axis 成分
- uo : 入力の o-axis 成分

第6章 その他の素子

この章では PSIM のライブラリ項目「その他」について記述します。

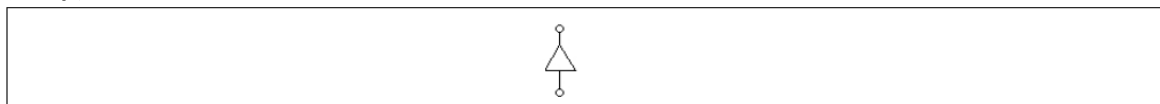
6.1 スイッチ制御器 (Switch Controllers)

スイッチ制御器は実際のゲートあるいはベース駆動回路と同じ機能を実現します。スイッチ制御器は制御回路から信号を受け取り、パワー回路のスイッチを制御します。ひとつのスイッチ制御器で、複数のスイッチを同時に制御できます。

6.1.1 オンオフ制御器 (On-Off Switch Controller)

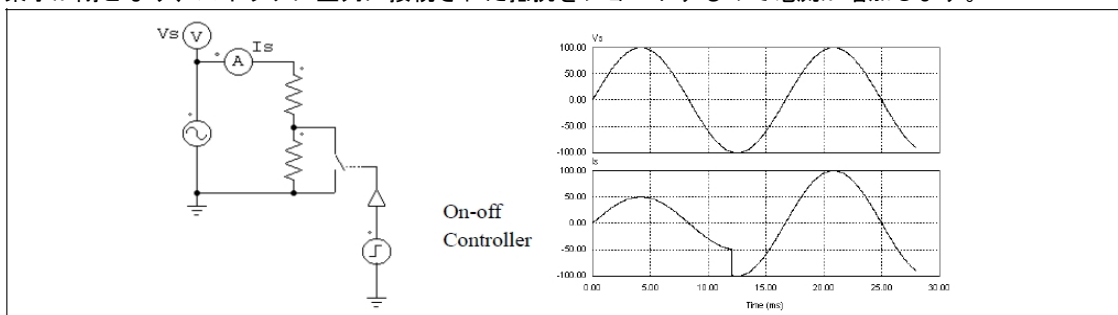
オンオフ制御器は制御回路のゲート信号とパワー回路のスイッチ動作とのインターフェースとして使います。制御回路からの入力は 0 か 1 の論理信号で、出力をパワー回路にゲート信号として加えることによりスイッチ素子の開閉を制御します。

シンボル



例

下に示すのは負荷のステップ変化を実現する回路です。オンオフ制御器が双方向スイッチを開閉するのに使われています。制御器の入力に加えたステップ電圧源が時刻 12ms で 0 から 1 に変化すると、スイッチ素子が閉となり、スイッチに並列に接続された抵抗をショートするので電流が増加します。



6.1.2 オンオフ制御器(マルチレベル) (On-Off Switch Controller(Multi-Level))

オンオフ制御器(マルチレベル)は MOSFET や IGBT など様々なモデルレベルのスイッチングデバイスに対応するゲーティング制御器です。入力/出力の信号タイプによってこの制御器は理想スイッチやスイッチモデル (Level-1 や Level-2 や SPICE モデル) に接続されます。同様にこの素子はパワー回路を理想スイッチやスイッチモデルへ接続できます。

シンボルは I/O 信号タイプにより違っており 4 つの I/O 信号タイプに対応しています。

理想スイッチへの制御：入力は PSIM の論理信号(0/1)で出力は理想スイッチのゲートノードとなります。

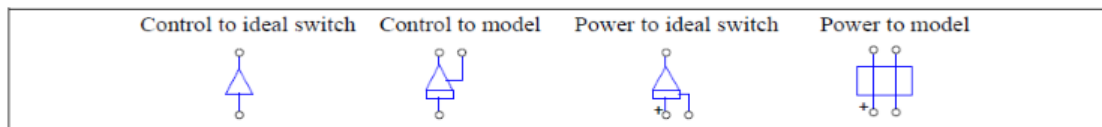
モデルへの制御：入力は PSIM の論理信号で出力は理想的でないトランジスタのゲートか電源ノードとなります。

理想スイッチへの電源：入力はパワー回路で出力は理想スイッチのゲートノードとなります。

モデルへの電源：入力はパワー回路で出力は理想的でないトランジスタのゲートノードと電源ノードとなります。

ードとなります。

シンボル



仕様 (Control to Model)

パラメータ	機 能
I/O 信号タイプ	制御モデル設定
High レベルゲート電圧	スイッチング素子のゲートへのハイレベル出力信号(V)
Low レベルゲート電圧	スイッチング素子のゲートへのローレベル出力信号(V)
ゲート抵抗	スイッチングデバイスのゲート出力抵抗(Ω)
ゲート電流フラグ	ゲート電流出力フラグ (1: 出力あり、0: 出力なし)

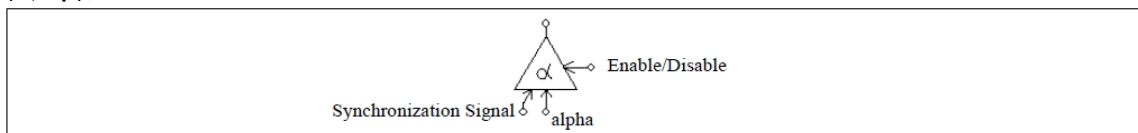
仕様 (理想スイッチの電源パラメータ)

パラメータ	機 能
I/O 信号タイプ	理想スイッチの電源への設定
ゲート閾値電圧	入力電圧がゲート閾値を越えると出力は 1 になり、その他の場合は出力は 0 となります。

6.1.3 点弧角制御器(Alpha Controller)

点弧角制御器(α -controller)はサイリスタ・スイッチまたはブリッジの点弧遅れ角を制御するのに使います。この制御器への入力は、点弧角(α)の値、同期信号、ゲート使用・不使用(enable/disable)信号の 3 種類です。同期信号が Low(0)から High(1)に変わるときに点弧角が零になるように同期をおこないます。点弧角制御器は α 度の遅れ角を調整して、サイリスタにゲート信号を送ります。点弧角 α の値は瞬時に更新されます。

シンボル



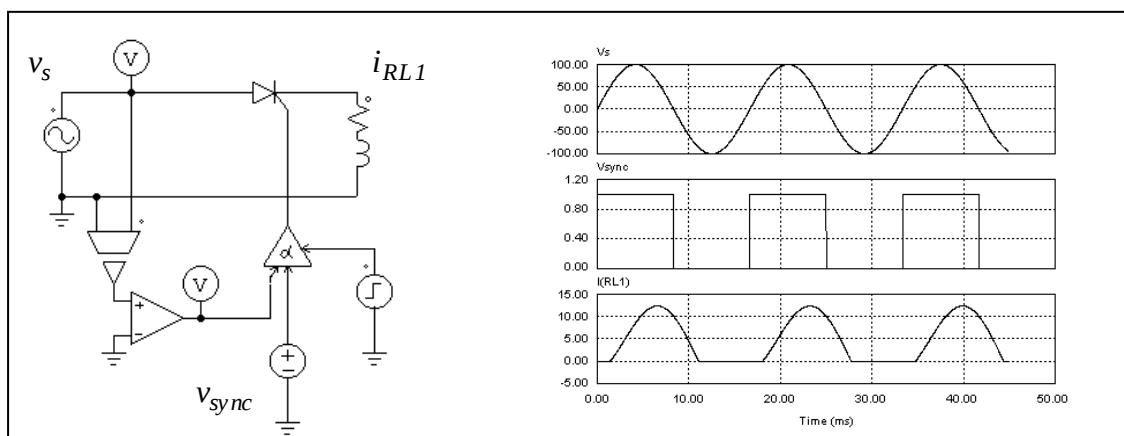
仕様

パラメータ	機 能
周波数	制御対象のスイッチの動作周波数(Hz)
パルス幅	スイッチのオン時間のパルス幅(度)

遅れ角の入力値は度で与えます。

例

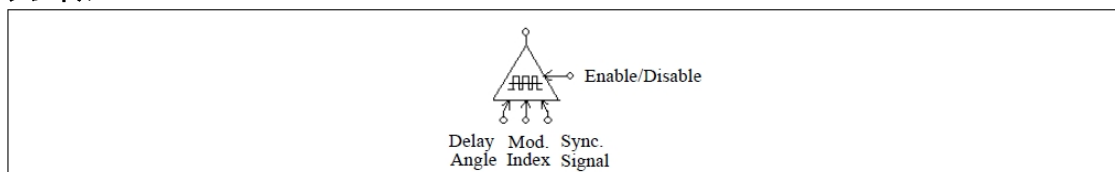
下の図に遅れ角制御を使ったサイリスタ回路を示します。 v_s のゼロクロス時点を同期に使っています。この時点でサイリスタは自然点弧するはずですが、ここでは遅れ角を 30° に設定しているので、ゲート信号は同期信号の立ち上がりから 30° 遅れます。



6.1.4 PWM ルックアップテーブル制御器 (PWM Lookup Table Controller)

PWM ルックアップテーブル制御器の入力は、変調指標、遅れ角、同期信号、およびゲート使用・不利用の4種類です。変調指標によりゲート・パターンが変わります。同期信号はゲート・パターンの同期に使います。同期信号が Low(0)から High(1)に変わるとき、ゲート・パターンが更新されます。遅れ角はゲート・パターンと同期信号の相対的な角度を与えます。たとえば、遅れ角が 10° のとき、ゲート・パターンは同期信号から 10° 進んでいることになります。

シンボル



仕様

パラメータ	機能
周波数	スイッチング周波数(Hz)
更新角度	ゲート信号を内部的に更新する角度(度)。この角度が 360° のとき、ゲート信号は毎サイクルごとに更新されます。また、 60° に設定すると、 60° ごとの更新になります。
ファイル名	PWM ゲート・パターンを格納するファイル名

ゲート・パターンを示すルックアップテーブルは外部ファイルに格納されます。フォーマットは以下のとおりです。

$$\begin{array}{l}
 n, m_1, m_2, \dots, m_n \\
 k_1 \\
 G_{1,1}, G_{1,2}, \dots, G_{1,k_1}, \\
 \dots \dots \dots \\
 k_n \\
 G_{n,1}, G_{n,2}, \dots, G_{n,k_n},
 \end{array}$$

ここで、 n はゲート・パターンの数、 m_i はパターン i に対応した変調指数、 k_i はパターン i のスイッチ点数です。変調指数の配列 $m_1 \dots m_n$ は単調に増加するように指定してください。入力が m_i 以下であると、出力は自動的に i 番目のパターンになります。入力が m_n を越えると、最後のパターンが選ばれます。

次の表に PWM パターン・ファイルの例を示します。変調指数は 4 で、スイッチング点数は 14 です。

4, 0.901, 0.910253, 0.920214, 1.199442

14

7.736627 72.10303 80.79825 99.20176 107.8970 172.2634 180.

187.7366 252.1030 260.7982 279.2018 287.8970 352.2634 360.

14

7.821098 72.27710 80.72750 99.27251 107.7229 172.1789 180.

187.8211 252.2771 260.7275 279.2725 287.7229 352.1789 360.

14

7.902047 72.44823 80.66083 99.33917 107.5518 172.0979 180.

187.9021 252.4482 260.6608 279.3392 287.5518 352.0980 360.

14

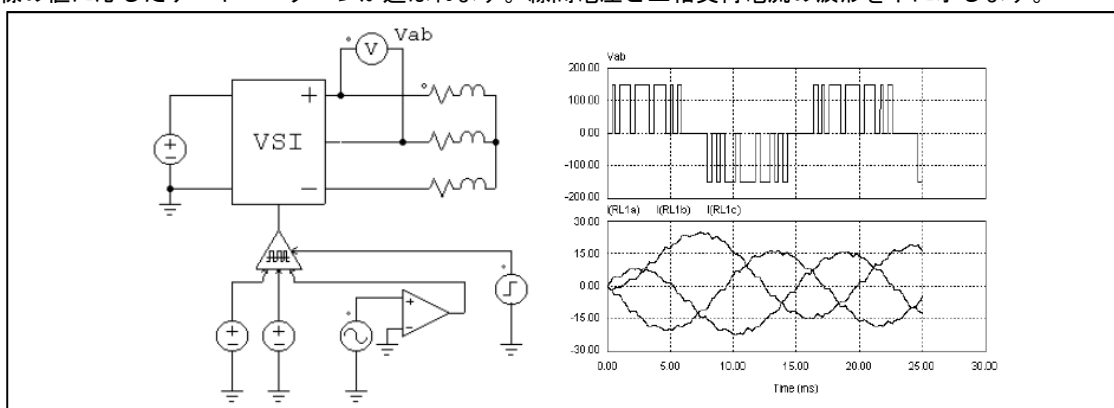
10.186691 87.24225 88.75861 91.24139 92.75775 169.8133 180.

190.1867 267.2422 268.7586 271.2414 272.7578 349.8133 360.

このルックアップテーブルの例で、変調指数の入力が 0.8 のとき、最初のゲート・パターンが選ばれます。変調指数が 0.915 であると、3 番目のパターンが選ばれます。

例

以下の回路図に三相電圧源インバータ(ファイル: vsi3pwm.sch に格納)を示します。コンバータ用の PWM は高調波消去をおこないます。上記のゲート・パターンが vsi3pwm.tbl にあらかじめ格納しており、変調指標の値に応じたゲート・パターンが選ばれます。線間電圧と三相負荷電流の波形を下に示します。



6.2 PWM ブロック(PWM Blocks)

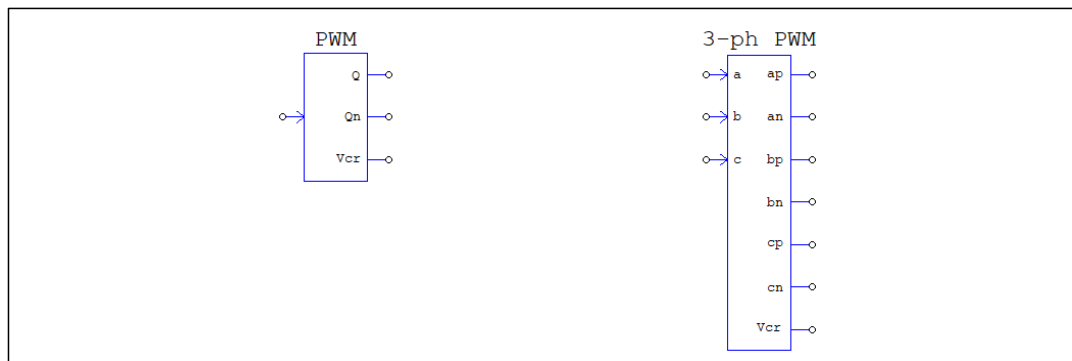
PWM コントローラブロックが準備されています。

これらのブロックの出力は制御信号です。スイッチングデバイスのゲートノードに直接接続することはできません。オンオフコントローラを挿入する必要があります。

6.2.1 キャリア PWM コントローラ (Carrier PWM Controller)

このブロックは入力信号を変調指数として受け取り、出力で PWM パルスパターンを生成します。

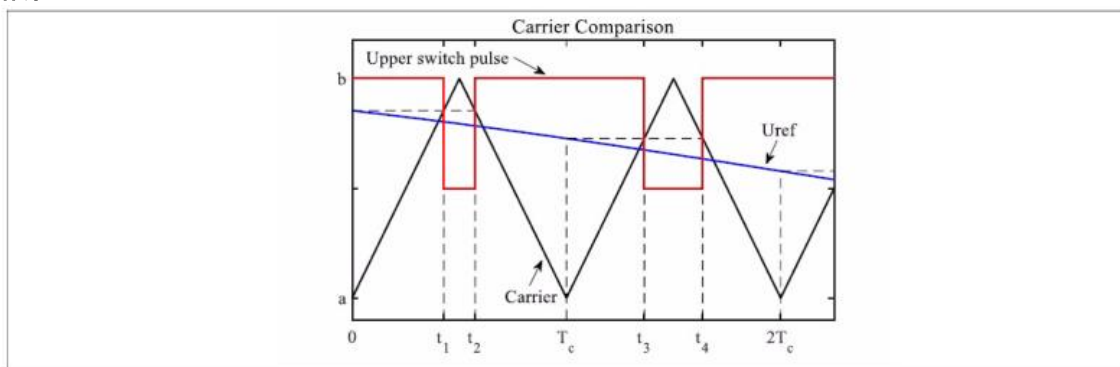
シンボル



仕様

パラメータ	機能
キャリア周波数	三角波搬送波の周波数(Hz)。0 よりも大きな値でなければなりません。
ピーク値	三角波のピーク値。次の図ではピーク値は b となります。
最低値	三角波の最低値。次の図では a となります。
デューティサイクル	上昇勾配間隔のデューティサイクル。0 から 1 の範囲でなければなりません。
位相遅延	三角波の位相遅延 (°)。下図に示すように、0 の場合波形は上昇スロープの底から始まります。
デッドタイム	出力 Q と Qn の間のデッドタイム (秒)

動作原理



入力信号は上図の Uref です。このコントローラは入力信号をサンプリングし、三角波と比較し、インターロックスイッチのペアのゲート信号を生成します。

一相キャリア PWM の出力は

Q: 上図に示す「上部スイッチパルス」。

Qn: Q に、パラメータに設定されたデッドタイムを補完します。

Vcr: キャリア波形

三相キャリア PWM の出力は

ap, bp, and cp: 上図に示す「上部スイッチパルス」。

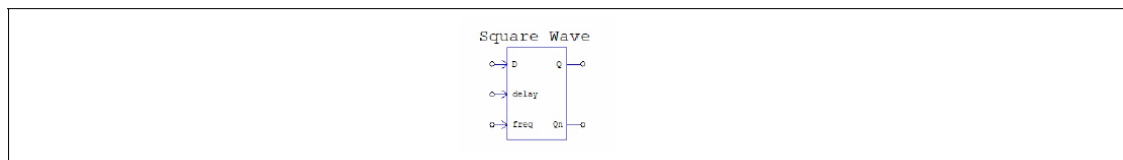
an, bn, and cn: パラメータで設定されたデッドタイムを持つ P の補数です。

Vcr: キャリア波形

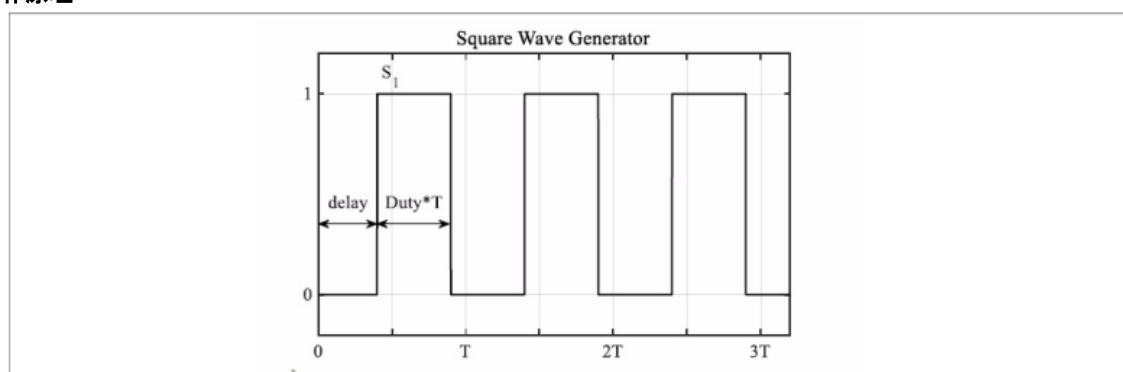
6.2.2 方形波制御（可変周波数） Square Wave Controller (Variable Frequency)

この素子は可変デューティサイクル、可変位相遅延、可変周波数の方形波を生成してスイッチを制御します。

シンボル



動作原理



スイッチング周波数はサンプリング周波数と同じです。

入力

- D : スwitchングサイクル毎の方形波のデューティサイクル
- delay : 前図で定義された方形波の遅延時間
- freq : 方形波の周波数

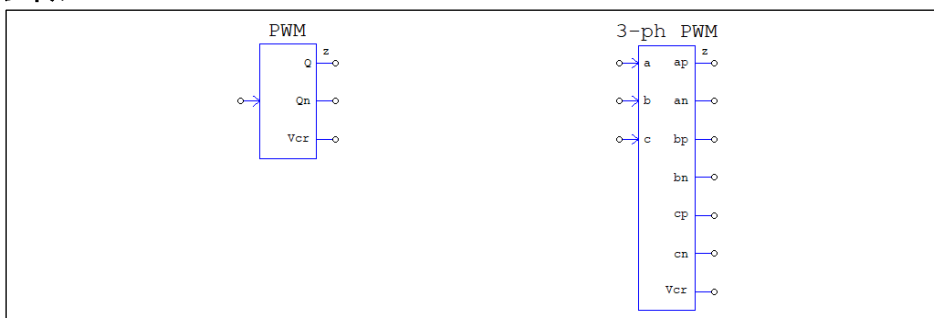
出力

- Q : 前図の方形波パルス
- Qn : パラメータで設定されたデットタイムの Q の補完

6.2.3 キャリア PWM コントローラ (z ドメイン) (Carrier PWM Controller (z-domain))

このブロックは入力信号を変調指数として受け取り、出力で PWM パルスパターンを生成します。

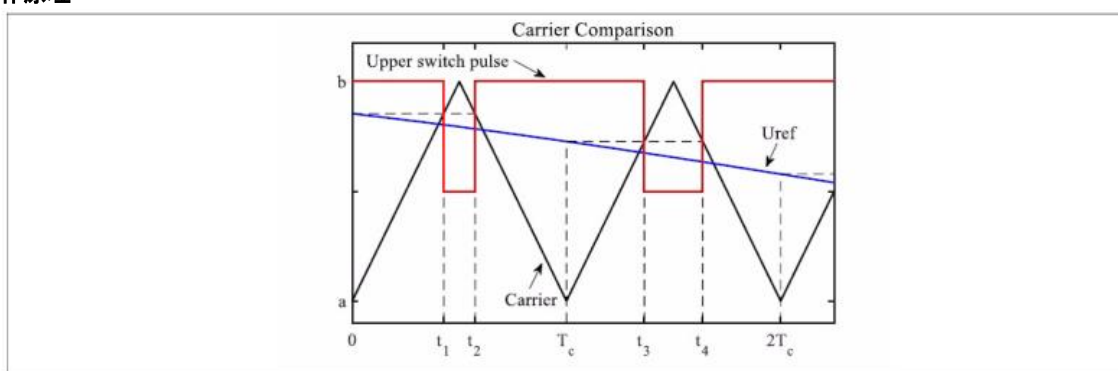
シンボル



仕様

パラメータ	機能
キャリア周波数	三角波搬送波の周波数(Hz) 0 よりも大きな値でなければなりません。
ピーク値	三角波のピーク値。次の図ではピーク値は b となります。
最低値	三角波の最低値。次の図では a となります。
デューティサイクル	上昇勾配間隔のデューティサイクル。0 から 1 の範囲でなければなりません。
位相遅延	三角波の位相遅延 (°)。下図に示すように、0 の場合波形は上昇スロープの底から始まります。
デッドタイム	出力 Q と Qn の間のデッドタイム (秒)
サンプル周波数	サンプル周波数 (Hz)

動作原理



入力信号は前図の U_{ref} です。このコントローラは入力信号をサンプリングして三角波と比較し、一対のインターロックスイッチのゲート信号を生成します。

サンプリング周波数はスイッチング周波数とは独立しています。

一相キャリア PWM の出力は

Q: 上図に示す「上部スイッチパルス」。

Qn: Q に、パラメータに設定されたデッドタイムを補完します。

Vcr: キャリア波形

三相キャリア PWM の出力は

ap, bp, and cp: 上図に示す「上部スイッチパルス」。

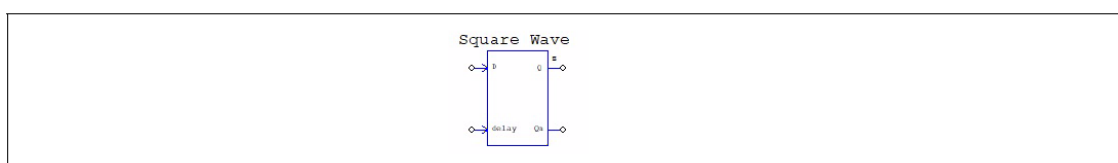
an, bn, and cn: パラメータで設定されたデッドタイムを持つ P の補数です。

Vcr: キャリア波形

6.2.4 方形波制御 (z ドメイン) Square Wave Controller (z-domain)

この素子は可変デューティサイクルと可変位相遅延の方形波を生成してスイッチを制御します。コントローラは、各スイッチングサイクルの開始時に 2 つの入力をサンプリングします。

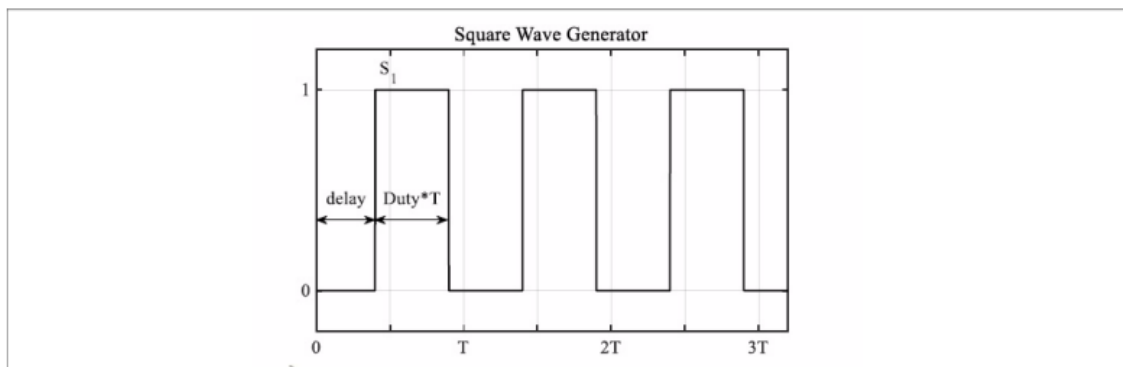
シンボル



仕様

パラメータ	機能
サンプル周波数	サンプル周波数 (Hz)

動作原理



スイッチング周波数はサンプリング周波数と同じです。

入力

- D : スwitchングサイクル毎の方形波のデューティサイクル
 delay : 前図で定義された方形波の遅延時間

出力

- Q : 前図の「Upper switch pulse」です。
 Qn : パラメータで設定されたデットタイムの Q の補完

6.2.5 位相シフト制御 (z ドメイン) Square Wave Controller (z-domain)

位相シフトコントローラブロックは DAB コンバータ内で 2 つのフルブリッジの 2 つのレグを駆動する相補的な矩形パルスを生じます。制御は、各スイッチングサイクルの開始時に 3 つの入力をサンプリングします。

位相シフトコントローラ (D に固定) は位相制御コントローラの特長なケースです。デューティサイクルは 0.5 に固定されています。

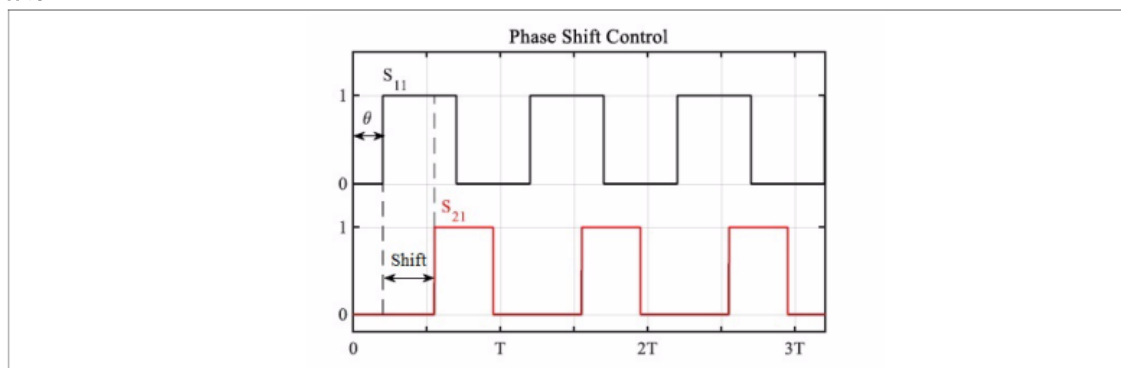
シンボル



仕様

パラメータ	機能
位相遅延	サンプリングポイントからのパルスの遅延。次の図で θ で定義されています。(°)
サンプリング周波数	サンプリング周波数(スイッチング周波数と同じです)(Hz) 0 よりも大きな値でなければなりません。

動作原理



入力は

D1 : S11,S12 の各スイッチングサイクルでの矩形波のデューティサイクル

D2 : S21,S22 の各スイッチングサイクルでの矩形波のデューティサイクル

delay : 前図の S11 と S21 の「Shift」です。0 から 1 の間の値となります。delay=0 のときは S11 と S21 には位相シフトはありません。delay=0.5 の場合は S11 と S21 間の位相シフトは 180° です。

出力は

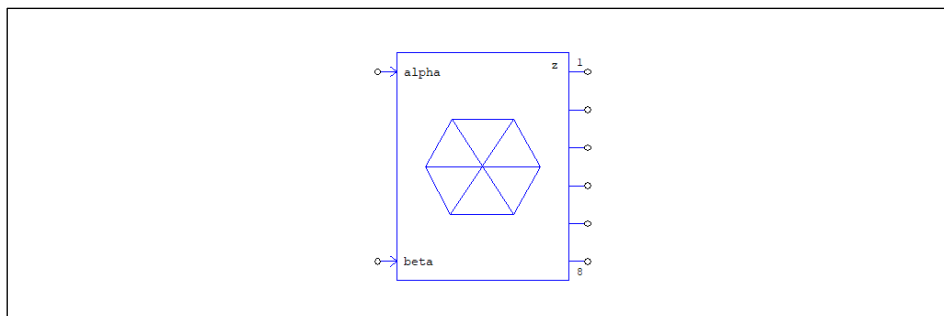
S11,S12 : 前図で定義された相補的パルス信号の最初のペア

S21,S22 : 前図で定義された S11 からの遅延と相補的パルス信号の 2 番目のペア

6.2.6 空間ベクトル PWM(2-レベル)(z-ドメイン)(Space Vector PWM(2-level)(z-domain))

2 レベル空間ベクトル PWM 方式による PWM 信号を生成する素子です。

シンボル



仕様

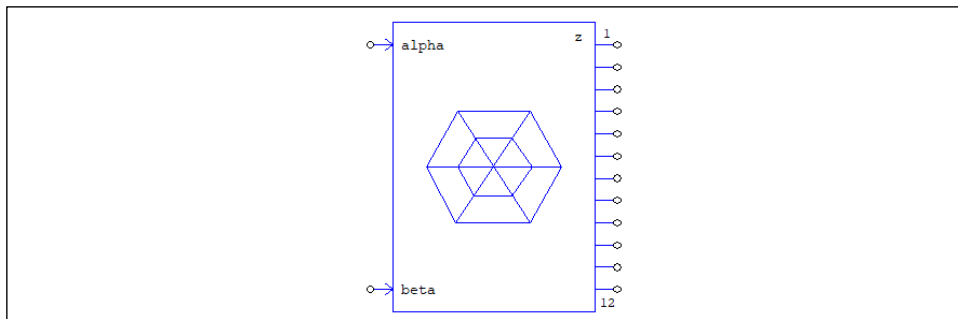
パラメータ	機能
変調モード	変調モードは次のいずれかになります。 0 : 7-セグメント変調 1 : 5-セグメント変調
サンプリング周波数	ブロックのサンプリング周波数(Hz)

詳細につきましては素子の help をご参照ください。

6.2.7 空間ベクトル PWM(3-レベル)(z-ドメイン)(Space Vector PWM(3-level)(z-domain))

3レベル空間ベクトル PWM 方式による PWM 信号を生成する素子です。

シンボル



仕様

パラメータ	機能
サンプリング周波数	ブロックのサンプリング周波数(Hz)

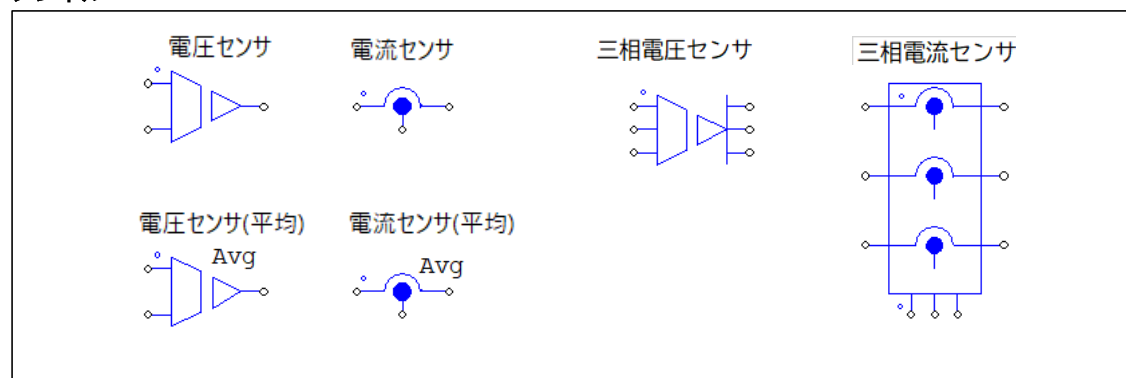
詳細につきましては素子の help をご参照ください。

6.3 電圧・電流センサ (Sensors)

瞬時値測定用の電圧センサと電流センサ、平均値測定用の電圧センサ（平均）と電流センサ（平均）の4つのセンサーが用意されています。

電圧・電流センサはパワー回路の電圧・電流を計測し、制御信号に計測値を送ります。電流センサの内部抵抗は、 $1\mu\Omega$ です。

シンボル

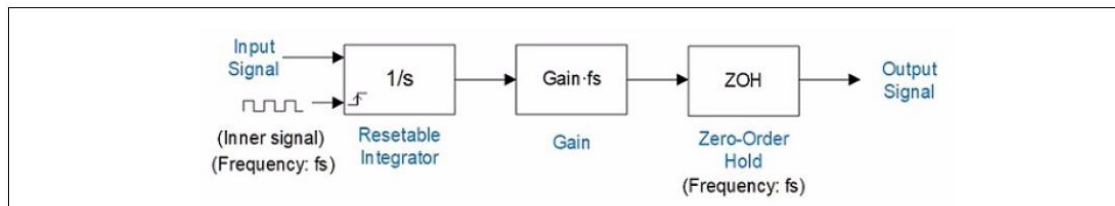


シンボルについているドットは+端子を示します。

仕様

パラメータ	機能
ゲイン	センサのゲイン
サンプル周波数	平均電圧・電流センサのサンプリング周波数 fs (Hz)
プローブ波形表示 有効/無効設定	三相電圧・電流センサのプローブの波形表示 0:無効、1:有効

以下に示すように、平均センサーはセンサーの入力を統合し、サンプリング中の平均値を提供します。



6.4 プローブとメータ、スコープ (Probes, Meters, and Scopes)

プローブとメータは電圧、電流、電力、またその他の数量を測定するために使います。一方でスコープは電圧波形、電流波形を表示します。

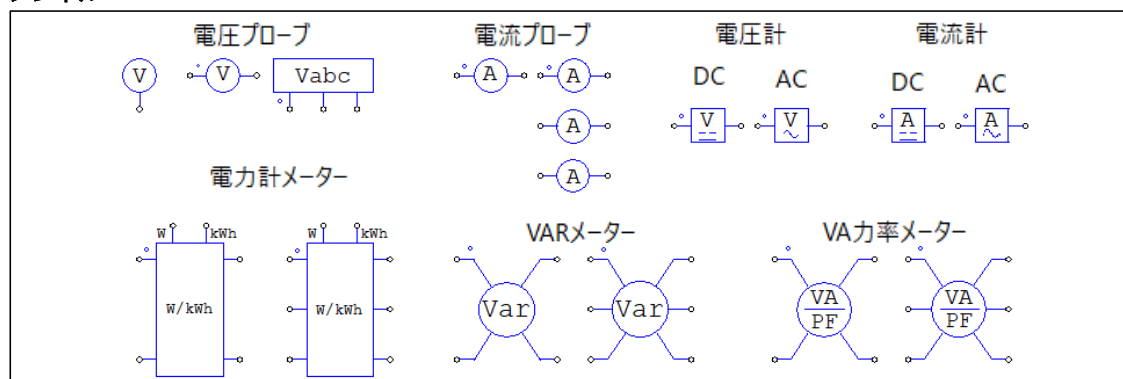
6.4.1 プローブとメータ (Probes and Meters)

以下の図に、電圧プローブ、電流プローブ、DC 電圧系、AC 電圧系、DC 電流計、AC 電流計、単相及び三相のワットメーター、kWh メータ、VAR メータ、VA 力率メータを示しています。電圧プローブは接続された端子と基準電位(GND)の間の電圧を測ります。2 端子間の電圧を測るには、2 端子用のプローブを使います。電流プローブ/メータは、ドットの付いた側から流入する電流を測定します。同様に、パワーメータはドットの付いた側から流入する電力を測定します。グラウンド接地型のプローブを除き、すべてのプローブとメータはパワー回路でのみ使うことができます。

プローブが電圧や電流を瞬時値で測定するのにに対し、メータは直流または交流の量を測定します。電流を測定する為の電流プローブの内部抵抗は、 $1\mu\Omega$ です。

注：AC スイーププローブと AC スイーププローブ（ループ）は AC 分析に使用されます。それらの使用法と機能については、AC 分析のセクションで説明します。

シンボル



電圧プローブの仕様

パラメータ	機能
フラグ	表示フラグ 0:表示しない 1: 表示する
三相電圧プローブの場合の設定フラグ	プローブの設定 0:ラインと中性点間プローブ(Van,Vbn,Vcn) 1:ライン間プローブ (Vab,Vbc,Vca)

仕様

パラメータ	機 能
動作周波数	交流メータの動作周波数または基本波周波数(Hz)
遮断周波数	ローパスフィルタまたはハイパス・フィルタの遮断周波数
開始時刻	kWh メータが測定を開始する時刻(sec)※ワット/kWh メータのみ
停止時刻	kWh メータが測定を停止する時刻(sec)※ワット/kWh メータのみ
皮相電力フラグ	皮相電力出力フラグ (1: 出力あり、0: 出力なし) ※VA 力率メータのみ
力率フラグ	力率の表示フラグ(0: 表示しない; 1: 表示する)※VA 力率メータのみ
等価力率フラグ	等価力率出力フラグ (1: 出力あり、0: 出力なし) ※VA 力率メータのみ

単相/三相ワットメータおよび kWh メータの図で、"W"と表示されたノードは有効電力の出力(W)で、"kWh"のノードは kWh 出力(kWh)になります。

電力計と直流メータには高周波成分を除くためローパスフィルタを使っています。一方、交流メータには直流分を除くためハイパス・フィルタを使います。遮断周波数により各フィルタの過渡応答が決まります。

電圧・電流プローブを除いて、メータの指示値は定常状態でのみ有効です。

単相及び、三相 VAR メータは、無効電力(VAR)を基本周波数で測定します。

VA 力率メータは、皮相電力(VA)・総合力率(PF)・基本波力率(DPF)を測定します。

kWh メータは、定義された開始から終了までの間の、有効電力の積分値を示します。

単相の回路では、有効電力 P 、無効電力 Q 、皮相電力 S 、総合力率 PF および基本波力率 DPF (displacement power factor)は以下のように定義されます。

電圧・電流が高調波を含むと仮定すると、

$$v(t) = \sqrt{2}V_1 \sin(\omega_1 t + \phi_1) + \sqrt{2}V_2 \sin(\omega_2 t + \phi_2) + \dots$$

$$i(t) = \sqrt{2}I_1 \sin(\omega_1 t + \theta_1) + \sqrt{2}I_2 \sin(\omega_2 t + \theta_2) + \dots$$

ここで、 ω_1 は基本波の周波数、その他の ω はすべて高調波の周波数です。電圧と電流の実効値は、

$$V_{rms} = \sqrt{V_1^2 + V_2^2 + \dots}$$

$$I_{rms} = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + \dots}$$

有効電力(または平均電力) P は次のように定義します。

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T (v(t) \cdot i(t)) dt$$

ここで T は基本波の周期です。

無効電力 Q は以下のように定義します。

$$Q = V_1 \cdot I_1 \cdot \sin(\phi_1 - \theta_1)$$

無効電力は基本波成分のみであることに注意して下さい。

皮相電力 S は以下で定義できます。

$$S = V_{rms} \cdot I_{rms}$$

すると、総合力率 PF および基本波力率 DPF は以下のようになります。

$$PF = \frac{P}{S}$$

$$DPF = \cos(\phi_1 - \theta_1)$$

三相回路についても同様の定義になります。

三相のワットメーター・kWh メータ・VAR メータ・VA 力率メータを含む全ての三相メータは、三相三線の回路専用です。三相四線の回路では使用できませんので、ご注意ください。

メータは、三相の電圧および電流の和は0であるという前提に基づいています。すなわち、

$$v_a + v_b + v_c = 0$$

$$i_a + i_b + i_c = 0$$

三相四線の回路には、単相メータをご使用ください。

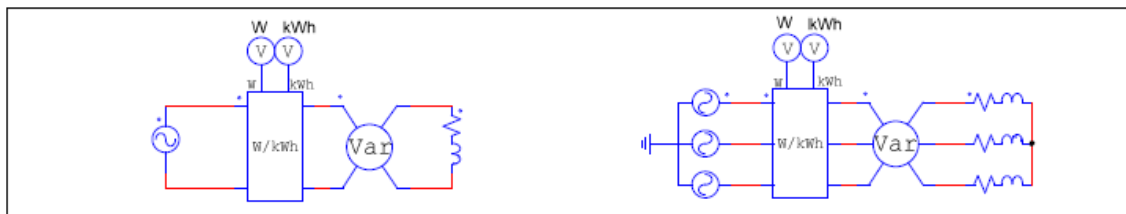
単相または三相のワットメーター・VAR メータをご使用の際には、メータを回路の中に挿入してください。

例

下图の回路は単相または三相のメータの使用方法を示しています。

左の回路は、単相のワットメーター・VAR メータの使用方法を示しています。

右の回路は三相のワットメーター・VAR メータの使用方法を示しています。

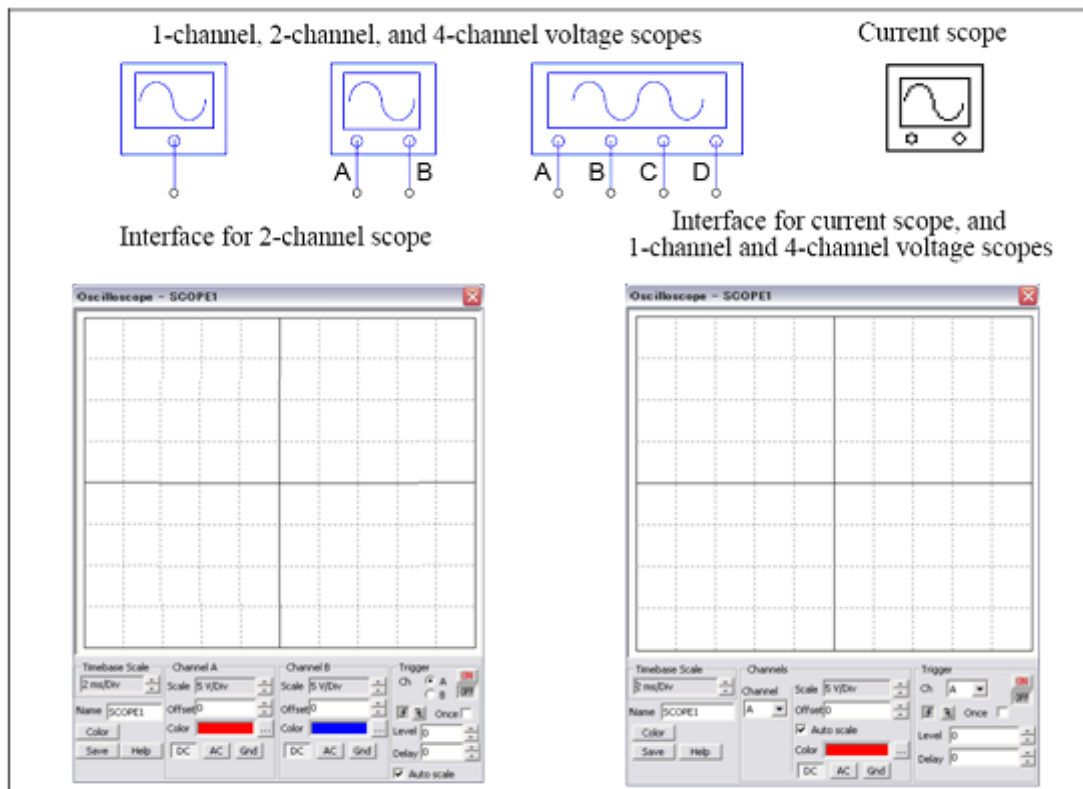


6.4.2 電圧/電流スコープ (Voltage/Current Scopes)

電圧/電流のプロブとメータはシミュレーション終了後の波形表示のために、シミュレーション結果を保存します。一方、電圧/電流のスコープを用いて、シミュレーション実行途中でシミュレーション波形を見ることができます。

PSIMには、1チャンネル電圧スコープ、2チャンネル電圧スコープ、4チャンネル電圧スコープおよび電流スコープの4つのスコープがあります。

下記にこれらの電圧、電流スコープの要素、および波形表示ウィンドウを示します。



1チャンネル電圧スコープ、4チャンネル電圧スコープと電流スコープの波形表示ウィンドウの下に表示される操作パネルは同一です。4チャンネルスコープでは、チャンネルはドロップダウンリストから選択することができ、設定は選択されたチャンネルに反映されます。

実際のオシロスコープと同じように操作できるようになっており、*Timebase*機能、*Channel*機能、及び*Trigger*機能の3つの主な機能があります。

*Timebase*機能は時間(x軸)のスケールを定義することができます。

*Channel*機能は、波形のY軸のスケール、オフセット、および色を定義することができます。チャンネル表示モードはDC、AC、またはGNDのいずれかに設定できます。表示モードがDCのとき、全体の波形が表示されます。表示モードをACにすると、波形の交流部分だけが表示されます。表示モードがGNDにある時、波形は0を示します。

*Trigger*機能は、トリガ状態を定義することができます。ONまたはOFFのどちらかにトリガを設定します。トリガがオフである場合、波形は自動的に更新されます。トリガがオンである場合、トリガ条件が満たされた時だけ波形の表示更新を行い安定した波形表示ができます。

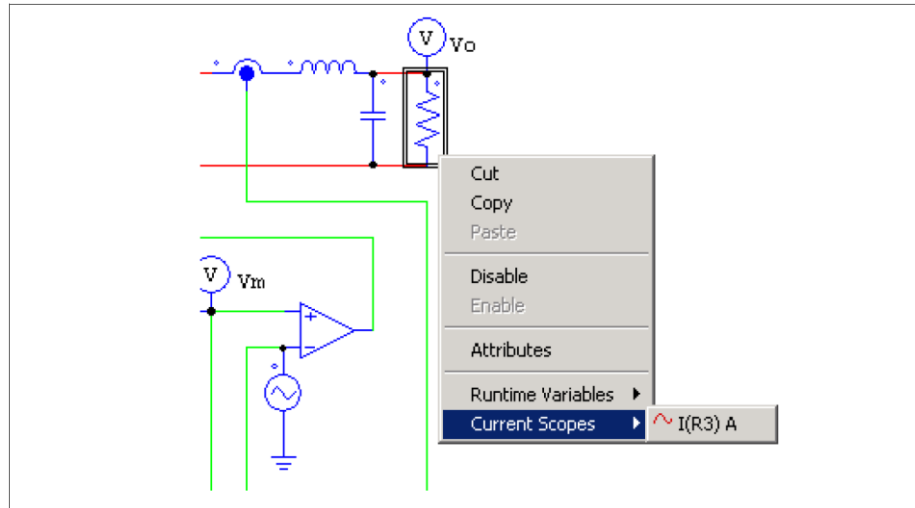
トリガモードは次の3つがあります。立ち上がりエッジトリガ、立ち下がりエッジトリガとワンショットトリガ。once チェックボックスをチェックするとワンショットトリガが選択されます。ワンショットトリガは一回だけ波形を取り込みます。過渡現象を捕らえる場合に有効です。トリガレベルはトリガ検出するレベルを設定します。例えば、チャンネル A は、立ち上がりエッジトリガで選択されており、トリガレベルを 0V とします。チャンネル A の入力、マイナスから 0 を超える時にトリガが発生します。そして波形表示はその瞬間から開始されます。

スコープ上では、チェックボックス[Auto scale]がチェックされている場合、全てのチャンネルのスケールは自動的に調整されます。その結果、波形はスコープ内に収まるように表示されます。

電力回路ノードまたは制御回路ノードのどちらでも電圧スコープをつなげることができます。スコープは

これらのノードにおけるGNDに対する電圧を表示します。

電流スコープは、電流フラグのパラメータを持っている要素の電流を表示することができます。電流スコープには接続端子がありません。電流を表示させたい要素の上にマウスポインタを置き、右ボタンをクリックしてください。そして *Current Scopes* のブランチ電流を選択することによって、以下に示されるように電流スコープが有効になります。ブランチ電流が選択された後に、チェックマークはブランチ電流名の正面に現れます。



要素が *Current Scopes* メニューの複数の電流フラグを持っていると、複数のブランチ電流が表示されます。それぞれのブランチはそれぞれの電流のフラグに対応するようになります。

例えば、三相抵抗R1では、*Current Scopes* メニューで3つのブランチ電流が表示されます。

I(R1) A
I(R1) B
I(R1) C

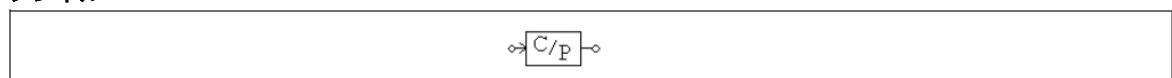
文字「A」、「B」、および「C」はそれぞれチャンネルA、B、およびCに対応しています。例えば「I(R1)A」、「I(R1)B」及び、「I(R1)C」のすべてが選択されている場合でも、スコープで、Channelプルダウンメニューから、一つのチャンネルを表示することができます。Channel Aが選択されると、スコープはA相のブランチ電流I(R1)を示します。

6.5 ファンクションブロック (Function Blocks)

6.5.1 制御・パワー変換ブロック (Control-Power Interface Block)

制御・パワー変換ブロックは制御回路の値をパワー回路に伝えます。このブロックは制御回路とパワー回路のバッファとして使います。PSIMがパワー回路を解析するとき、変換ブロックの出力は定電圧源として扱います。このブロックを使うことにより制御回路でのみ得られる機能をパワー回路で使うことができます。

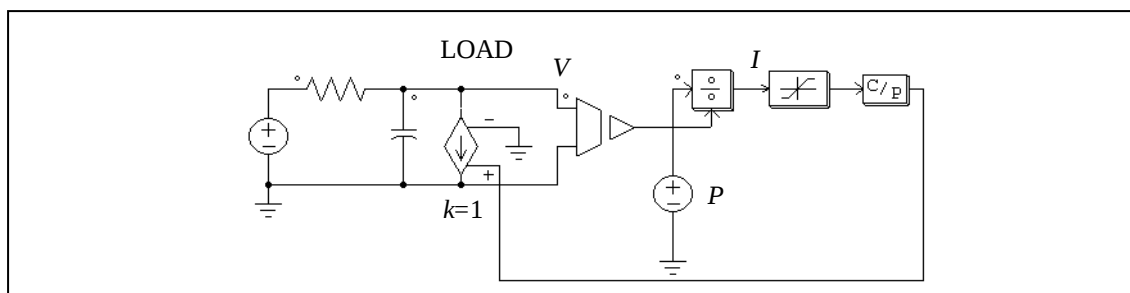
シンボル



例：定電力負荷モデル

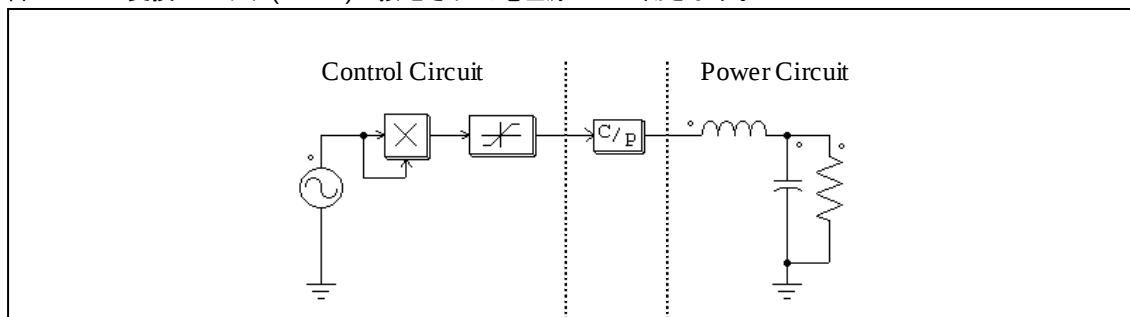
定電力の直流負荷では、電圧 V 、電流 I 、および電力 P のあいだに $P = V \cdot I$ の関係が成り立ちます。したがって、電力と電圧が決まれば、電流は $I = P/V$ から計算できます。この特性は次のような回路で実現できます。

負荷の両端の電圧を電圧センサで測り、除算器に入力すると、除算器の出力は電流 I を示します。初期状態では電圧が零または非常に低い値になる可能性があるため、電流の値をリミッタでおさえしています。この値を制御・パワー変換ブロックを使って、負荷の電流として電圧制御電流源を通じてパワー回路に戻しています。



例

以下に示す回路は制御回路の信号をパワー回路に伝える例です。パワー回路の構成からわかるように、制御・パワー変換ブロック (CTOP) は接地された電圧源として働きます。



6.5.2 変換ブロック (Transformation Blocks)

PSIM は以下の変換ブロックを提供します。

- abc-dqo 変換ブロック
- abc- $\alpha\beta$ 変換ブロック
- $\alpha\beta$ -dq 変換ブロック
- 直交座標系-極座標系変換ブロック

これらのブロックは制御回路だけでなく、パワー回路でも使用することができます。

abc-dqo 変換ブロック (abc-dqo Transformation)

abc-dqo 変換ブロックは、abc 座標と dqo 座標間の変換を行います。この変換は【パーク変換】と呼ばれます。

シンボル



仕様

パラメータ	機能
変換フラグ	変換フラグ (0: q 軸は d 軸より進んでいる、1: q 軸は d 軸より遅れる)

ブロックの下部にある端子から入力する角度(θ)はラジアンです。

パワー回路では、軸変換の前に電流値は電圧値(電流制御電圧源を使用)に変換しなければなりません。また、使用しない入力端子(例: dqo-to-abc 変換ブロックで位相 d, q, または o が使用されていない)は、グラウンドに接続して下さい。

変換フラグの値による、変換方程式は下記の通りです。

abc から dqo への変換で変換フラグを 0 に設定した場合

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_o \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin \theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}$$

abc から dqo への変換で変換フラグを 1 に設定した場合

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_o \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin \theta & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}$$

変換行列前の「2/3」の係数は、変換が振幅不変であることを指します。電力振幅は不変ではありません。dq ベクトルの振幅と三相正弦波のピーク振幅が同じであることを示します。同じ電力を得るには、dq フレームでの電力に 3/2 を乗算、すなわち $\text{Power} = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c = 3/2 \cdot (v_d i_d + v_q i_q)$ としなければなら

りません。電力不変な変換をするためには、2/3 を $\sqrt{2/3}$ に交換し、1/2 を $\sqrt{1/2}$ に置き換えます。

dqo から abc への変換で変換フラグを 0 に設定した場合

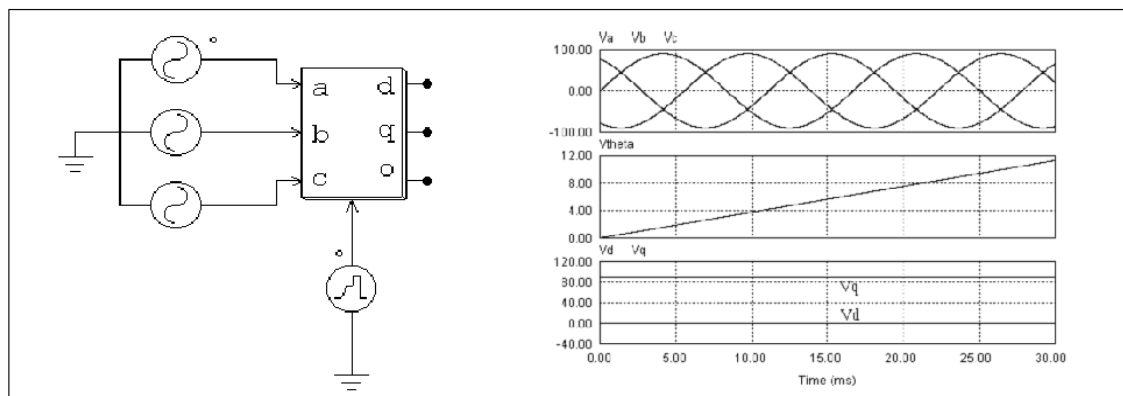
$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_o \end{bmatrix}$$

dqo から abc への変換で変換フラグを 1 に設定した場合

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_o \end{bmatrix}$$

例

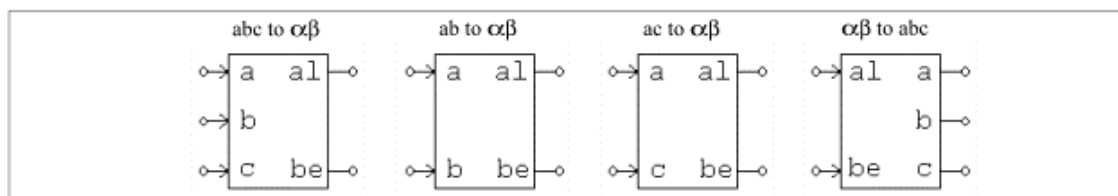
この例では、対称三相の電圧波形を dqo 系の値に変換しています。角度 θ は $\omega = 2\pi \cdot 60$ を使って $\theta = \omega t$ と定義しています。角度 θ は時間に対して線形に変化するので、 θ を表現するのに区分線形電源でランブ波(のこぎり波)を設定します。シミュレーション波形は、三相交流(上)、角度 θ (中)、dqo 出力(下)を示しています。この例では q 軸成分が定数で、d 軸と o 軸の成分はどちらも零になっています。



abc-αβ 変換ブロック (abc-αβ Transformation)

abc-αβ 変換ブロックは abc 座標系から αβ 座標系に軸変換及び逆変換します。

シンボル



イメージでは、文字「al」は α を、「be」は β を示します。

abc 座標系から αβ 座標系への変換公式は以下の通りです

$$\begin{bmatrix} v_{\alpha} \\ v_{\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}$$

ab 座標系から αβ 座標系への変換公式は以下の通りです

$$\begin{bmatrix} v_{\alpha} \\ v_{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{3}{2}} & 0 \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & \sqrt{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \end{bmatrix}$$

ac 座標系から αβ 座標系への変換公式は以下の通りです

$$\begin{bmatrix} v_{\alpha} \\ v_{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{3}{2}} & 0 \\ -\frac{\sqrt{2}}{2} & -\sqrt{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_a \\ v_c \end{bmatrix}$$

$\alpha\beta$ 座標系から abc 座標系への変換公式は以下の通りです

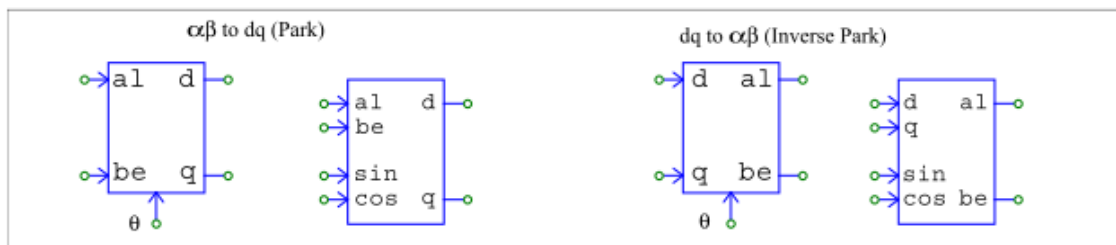
$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix}$$

ab- $\alpha\beta$ 及び ac- $\alpha\beta$ 座標変換の時、 $v_a+v_b+v_c=0$ が仮定されています。

$\alpha\beta$ -dq 変換ブロック ($\alpha\beta$ -dq Transformation)

$\alpha\beta$ -dq 機能ブロックには、多くの場合、パーク変換と呼ばれる座標 $\alpha\beta$ から dq への変換を行います。dq- $\alpha\beta$ 機能ブロックは、多くの場合、逆パーク変換と呼ばれる座標 dq から $\alpha\beta$ への変換を行います。

シンボル



イメージでは、文字「al」は α を、「be」は β を示します。位相角 θ の入力において、弧度法(rad)または $\sin(\theta)$ 、 $\cos(\theta)$ のいずれかをとることができます。

$\alpha\beta$ 座標系から dq 座標系への変換公式は以下の通りです

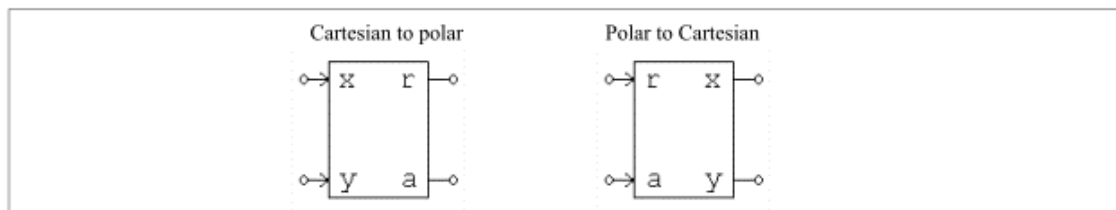
$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix}$$

dq 座標系から $\alpha\beta$ 座標系への変換公式は以下の通りです

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix}$$

直交座標-極座標変換ブロック (Cartesian-Polar Transformation)

直交座標-極座標変換ブロックは直交座標から極座標に軸変換及び逆変換します。



イメージでは、文字「r」は振幅を表します。また、文字「a」は位相角 θ (単位、rad)を表します。直交座標系から極座標系への変換公式は以下の通りです。

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}$$

$$\theta = \text{atan}\left(\frac{y}{x}\right)$$

極座標系から直交座標系への変換公式は以下の通りです。

$$x = r \cdot \cos \theta$$

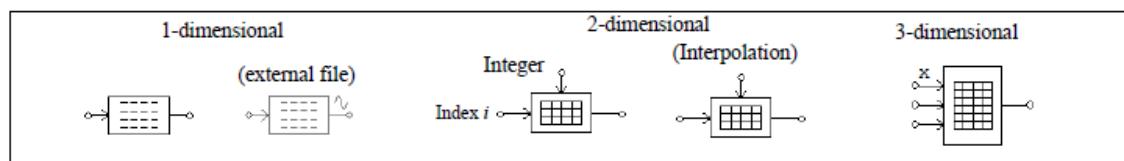
$$y = r \cdot \sin \theta$$

6.5.3 ルックアップテーブル (Lookup Tables)

四種類のルックアップテーブルが存在します。一次元ルックアップテーブル、SIMVIEW グラフからのデータを読み込める一次元ルックアップテーブル、整数入力及び浮動小数点入力の二次元ルックアップテーブル、そして三次元ルックアップテーブルです。

これらのルックアップテーブルは、電気回路でも制御回路でも使用できます。

シンボル



一次元のルックアップテーブルには、入力と出力が一つずつあります。入力と出力の配列に対応した二つのデータ配列が、ルックアップテーブルに保存されます。

データがSIMVIEW内で定義される一次元ルックアップテーブル(SIMVIEW グラフ)を除き、ルックアップテーブルのデータを定義する方法は二つあります。ひとつは、ルックアップテーブルタブ内のダイアログから直接に入力する方法、もうひとつは、テキストエディタを使用してルックアップテーブルを外部で用意し、ダイアログ内でファイルを定義する方法です。

ダイアログ内で直接データを入力するには、行の数を定義し(二次元ルックアップテーブルの場合は、列の数も定義します)、“Set”をクリックします。そして、データセルに値を入力します。浮動小数点入力の二次元ルックアップテーブルでは、最も左側の列にある行の入力配列と、最も上側の行にある列の入力配列に入力します。

テキストファイルによりデータを外部で用意する場合は、以下に示すフォーマットでデータを定義します。その後“Open File…”をクリックして、ファイルをロードします。ロード後にテキストファイルが修正された場合は、“Reload Data”をクリックします。データを外部ファイルにセーブする場合は、“Save As…”をクリックします。

外部テキストファイルは、オプションです。よって、外部テキストファイルが定義されていない場合は、内部データが使用されます。しかし、外部テキストファイルが定義されている場合は、テキストファイルが優先され、内部データは上書きされます。ダイアログウィンドウが閉じられるとき、外部ファイルは自動的に保存されますので注意してください(ダイアログは右上のX印をクリックすることにより閉じます)。

また、外部ファイルのコピーは、回路図のファイル内に保存されます。回路図のファイルが他のPCに移動され、外部ファイルが存在しない場合は、PSIMは前回からのテキストファイルを再作成します。

一次元のルックアップテーブルのデータフォーマットは、以下の通りです。

```
Vin(1), Vo(1)
Vin(2), Vo(2)
...
Vin(N), Vo(N)
```

データポイントは、次のようにカンマまたはスペースで区切ることができます。

```
Vin(1) Vo(1)
Vin(2) Vo(2)
...
```

$$V_{in}(N) \quad V_o(N)$$

左の列の V_{in} は単調に増加する必要があります。入力が2つのデータの間の値の場合、出力値は線形補完された値になります。また、入力が $V_{in}(1)$ より小さい場合および $V_{in}(n)$ より大きい場合は、出力は $V_o(1)$ または $V_o(N)$ にクランプされます。

整数入力の二次元ルックアップテーブルのデータフォーマット

$$\begin{matrix} M, N \\ A_{11}, A_{12}, \dots, A_{1N} \\ A_{21}, A_{22}, \dots, A_{2N} \\ \dots \dots \dots \\ A_{M1}, A_{M2}, \dots, A_{MN} \end{matrix}$$

ただし、M と N がそれぞれ行と列の番号です。行または列のインデックスは必然的に整数である必要がありますので、入力値は自動的に整数に変換されます。行または列のインデックスのいずれかが有効範囲から外れた(例えば行のインデックスが 1 より小さいまたは M より大きい)場合、出力はゼロになります。

浮動小数点入力の二次元ルックアップテーブルのデータフォーマット

$$\begin{matrix} M, N \\ V_{r1}, V_{r2} \dots V_{rM} \\ V_{c1}, V_{c2} \dots V_{cN} \\ A_{11}, A_{12}, \dots, A_{1N} \\ A_{21}, A_{22}, \dots, A_{2N} \\ \dots \dots \dots \\ A_{M1}, A_{M2}, \dots, A_{MN} \end{matrix}$$

ただし、M は行の番号、N は列の番号、 V_r は行のベクトル、 V_c は列のベクトル、 $A(i,j)$ は i 行目と j 列目における出力の値です。ベクトル V_r と V_c は単純増加になるように指定してください。

入力が二つのポイントの区間内にある場合、値の計算に補間が使われます。入力が最小値より小さいかまたは最大値より大きい場合、入力是最小値ないし最大値にセットされます。

例

以下では一次元ルックアップテーブルを示します。

$$\begin{matrix} 1., 10. \\ 2., 30. \\ 3., 20. \\ 4., 60. \\ 5., 50. \end{matrix}$$

入力が 0.99 であるとき、出力は 10 になります。また、入力が 1.5 である場合、出力は $10 + \frac{(1.5-1) \times (30-10)}{2-1} = 20$ になります。

仕様 (一次元ルックアップテーブル(外部ファイル)の場合)

パラメータ	機能
Graph File	ルックアップテーブルのデータとして使用される SIMVIEW ファイル名
Input Column	ルックアップテーブルの入力欄の指定 グラフファイルがロードされた後に、ドロップダウンメニューから選択されます。
Output Column	ルックアップテーブルの出力欄の指定 グラフファイルがロードされた後に、ドロップダウンメニューから選択されます。

二次元のルックアップテーブルブロックの左側の端子は行のインデックス入力用で、上部にある端子は列のインデックス入力用です。

整数入力の二次元ルックアップテーブルには二つの入力があります。一方、出力データは二次元の行列の

形で保存されています。二つの入力は、行列の行と列を指しています。例えば、行のインデックスが3で、列のインデックスが4の場合、出力はA(3,4)になります。ただし、Aは行列のデータを意味します。浮動小数入力用二次元ルックアップテーブルは、整数入力用二次元ルックアップテーブルに似た機能を持ちます。両者の違いとしては、入力が浮動小数であることと出力の計算に補間が使われることです。

以下に整数入力用二次元ルックアップテーブルを示します。

3, 4
1., -2., 4., 1.
2., 3., 5., 8.
3., 8., -2., 9.

行のインデックスが2で、列のインデックスが4の場合、出力は8になります。行のインデックスが5の場合、列のインデックスに関係なく出力が0になります。

以下では浮動小数入力用二次元ルックアップテーブルを示します。

3, 4
1.1 2.2 3.3
1.2 2.3 3.4 4.5
1., -2., 4., 1.
2., 3., 5., 8.
3., 8., -2., 9.

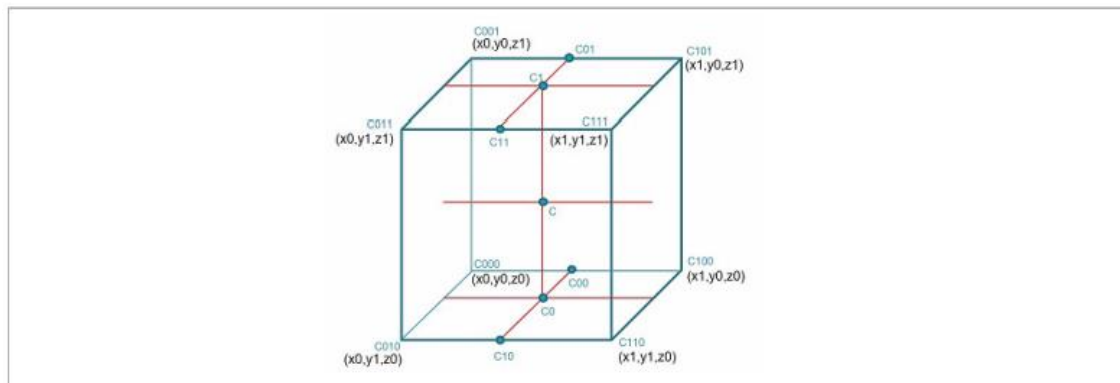
行の入力が2.0で、列の入力が3.0である場合、入力値を囲む4つのポイントのデータを利用して、以下のように補完計算が行われ、出力は3.826になります。

		Column		
		2.3	3.0	3.4
Row	1.1	-2		4
	2.0	2.091	3.826	4.818
	2.2	3		5

三次元ルックアップテーブル

内挿付きの3次元ルックアップテーブルには、3つの入力と1つの出力があります。左側の3つの入力はx、y、z軸に対応しているx軸には“X”のマークがついています。出力データの計算手順は次のようになっています。

Locate x0, x1, y0, y1, z0, z1 from the values of x, y, and z.
Read values of C000, C100, C010, C110, C001, C101, C011, C111
Calculate C00, C10, C01, C11
Calculate C00, C10, C01, C11
Calculate C0, C1
Calculate C



ルックアップテーブルは外部ファイルで準備しなければなりません。
ルックアップテーブルは次の形式でファイルに保存されています。

```
L, M, N
Vx1 Vx2 ... VxL
Vy1 Vy2 ... VyM
Vz1 Vz2 ... VzN
A111, A121, ..., A1M1
A211, A221, ..., A2M1
... ..
AL11, AL21, ..., ALM1
A112, A122, ..., A1M2
A212, A222, ..., A2M2
... ..
AL12, AL22, ..., ALM2
A11N, A12N, ..., A1MN
A21N, A22N, ..., A2MN
... ..
AL1N, AL2N, ..., ALMN
```

ここで L は x 軸の数、M は y 軸の数、N は z 軸の数；

Vx は x 軸ベクトル、Vy は y 軸ベクトル、Vz は z 軸のベクトル；

Aijk は $x=i, y=j, z=k$ のときの出力値です。ベクトル Vx, Vy, Vz は単調でなければならないことにご注意ください。

入力が 2 つのポイントの間にある場合値の計算には補間が使われます。また、入力が最小値以下の場合、もしくは最大値以上の場合、入力は最小値または最大値と同じ値になるよう設定されます。

例：

次の 3 次元ルックアップテーブルでは

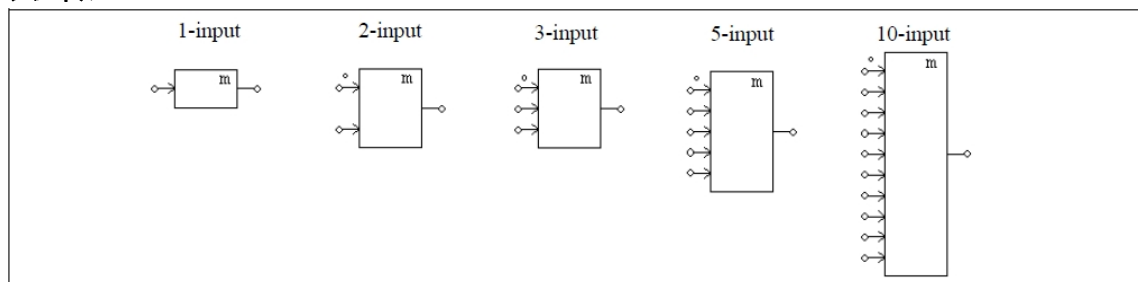
```
3, 3, 3
1 2 3
4 5 6
7 8 9
1.1 1.2 1.3
2.1 2.2 2.3
3.1 3.2 3.3
1.4 1.5 1.6
2.4 2.5 2.6
3.4 3.5 3.6
1.7 1.8 1.9
2.7 2.8 2.9
3.7 3.8 3.9
```

入力 $x=1.5, y=4.5, z=7.5$ の場合補間の結果出力 $V=1.8$ となります。

6.5.4 数式関数ブロック (Math Function Blocks)

数式関数ブロックの出力は入力変数の関数として表現されます。このブロックを使うことにより、複雑かつ非線形の入出力関係を簡単に実現できます。入力数が 1, 2, 3, 5, 10 のブロックが用意されています。

シンボル



仕様

パラメータ	機能
関数 $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$	入出力関係を与える数式表現。n は入力の数です。
微分関数 df/dx_i	関数 f の i 番目の入力 x_i に関する微分の数式表現

微分はゼロに設定してもかまいません。

関数のなかで使える変数は、時刻 T または t および入力変数 x_i (i は 1 から n まで) です。ここで変数 x_i は i 番目の入力を示します。たとえば、3 入力の数式関数ブロックを使用した場合、変数は T, t, x_1, x_2, x_3 となります。1 入力の数式関数ブロックでは、入力 x も変数とみなされます。

6.5.5 DLL ブロック (DLL Blocks)

DLL (Dynamic Link Library) ブロックを使うことでユーザ自作の C/C++ のプログラムを追加することができます。それには Microsoft C/C++ を使い、プログラムを DLL としてコンパイルし、PSIM にリンクして使います。これらのブロックはパワー回路または制御回路として使うことができます。

DLL ブロックは PSIM から入力値を受け取り、計算処理後、出力を PSIM に返します。PSIM は DLL をシミュレーションタイムステップごとに呼び出します。ただし、DLL ブロックの入力端子が離散素子(ゼロ次ホールド、単位時間遅れ、離散積分器、離散微分器、 z -領域伝達関数およびデジタルフィルタのいずれか)に接続されているときは、DLL は離散的なサンプル時刻にのみ呼び出されます。

DLL ブロックでは Simple DLL ブロックと General DLL ブロックの二つタイプが提供されます。

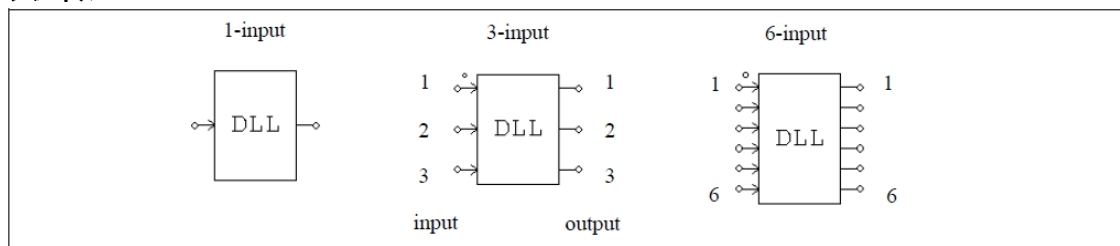
Simple DLL ブロックは入出力端子の本数が固定されていて、ブロックで設定する必要があるのは DLL ファイル名のみです。

これに対し、General DLL ではユーザが入出力端子の本数を自由に設定することが可能で、またユーザが設定した任意の追加パラメータを使用することが可能です。また General DLL ブロックはシンボルをカスタマイズすることも可能です。

一般的には Simple DLL ブロックが簡単なプログラミングで利用できて便利です。

1/3/6 本の入出力をもつ Simple DLL ブロックのモデルと仕様は下のようになります。

シンボル



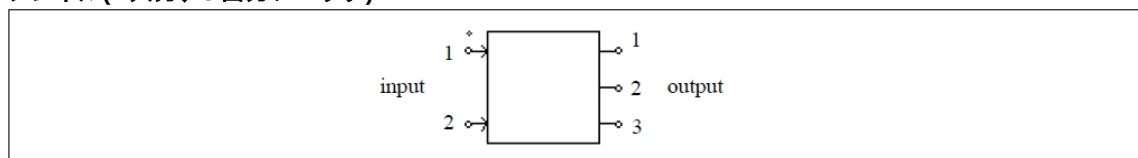
仕様

パラメータ	機能
ファイル名	DLL ファイルのファイル名

ドットの付いた端子には最初の入力(in[0])を加えます。入出力端子の順番は上から下です。

General DLL ブロックのモデルと仕様は下のようになります。

シンボル(2 入力、3 出力ブロック)



仕様

パラメータ	機能
ファイル名	DLL ファイル名
Input Data File	DLL が読む入力データファイル名(オプション)
入力ノード数	入力端子の数(オプション)
出力ノード数	出力端子の数(オプション)
入力ノード	入力端子のリスト(オプション)
出力ノード	出力端子のリスト(オプション)
パラメータ i	PSIM から DLL に渡すパラメータ i (オプション)
イメージ編集 (button)	DLL ブロックモデルを編集、作成します。
ファイル表示 (button)	入力データファイルの内容を示します。(オプション)
ファイル読み込み (button)	入力データファイルが修正されたとき、このボタンを押すとデータファイルを再読み込みします。(オプション)

ドットの付いた端子には最初の入力(in[0])を加えます。入出力端子の順番は上から下です。

デフォルトの設定ダイアログでは、ユーザは入出力の数を定義します。入出力の数と端子名、パラメータの数とパラメータ名は、全て DLL の中で定義できます。General DLL ブロックは強力なカスタマイズが可能な反面、C 言語および Windows プログラミングに関する高度な知識を要求されます。必要性に合わせて通常の DLL ブロックと使い分けることをお勧めします。本機能に関する詳細な解説は、PSIM をインストールしたフォルダの doc フォルダにある「Help General DLL Block.pdf (英文)」およびサンプルファイルをご覧ください。

DLL ファイルの名前は任意です。DLL ファイルは優先度の高い順に、二つの場所のいずれかに配置することができます。PSIM ディレクトリもしくは、DLL ファイルを使用した回路図ファイルと同じディレクトリです。

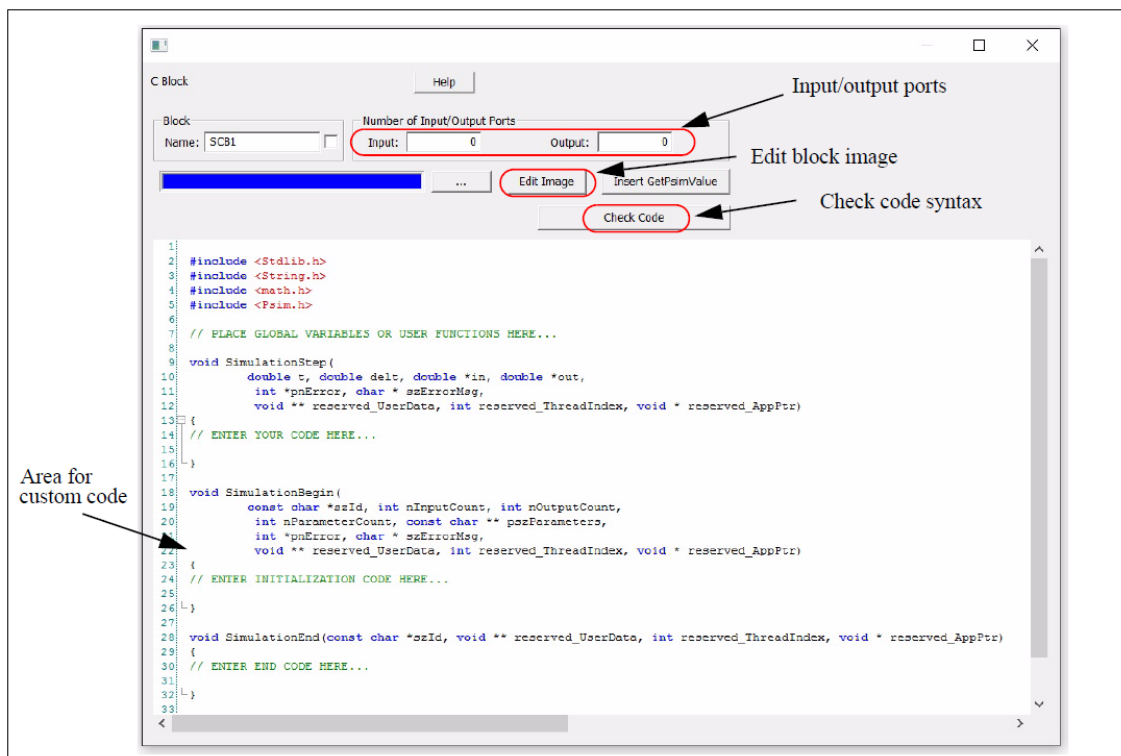
注意：DLL ファイルが複数の DLL ブロックで使用される場合において、グローバルもしくは静的変数が宣言され DLL コード内で使用された際には、これらグローバル・静的変数は同じ値になり、全ての DLL ブロックで共用されます。この動作が意図したものでない場合、DLL の計算が不正確になりかねません。このような場合には、コード内でグローバル及び静的変数を使用しないでください。

簡易な DLL ブロックと一般的な DLL ブロックの使用例は PSIM ディレクトリ内の examples\custom DLL サブフォルダに配置されています。

6.5.6 C ブロック (C Block)

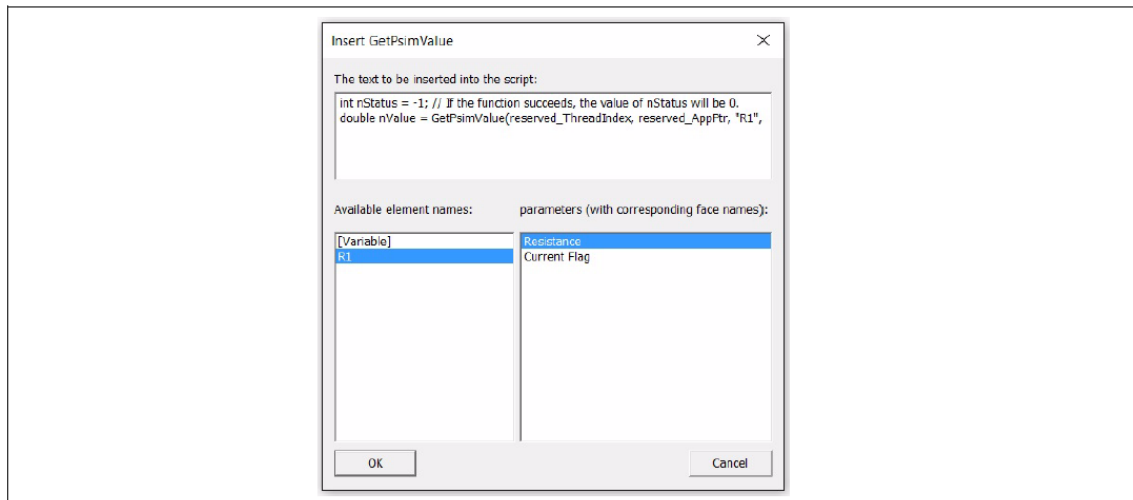
Cブロックは、コードをコンパイルすることなく直接Cコードを入れることができます。この点で、外部のコンパイラにより、コンパイル済みのコードをDLLにする必要のある外部DLLブロックとは異なります。CブロックのCコードは、シミュレーション実行時にPSIM内蔵のCインタプリタによって解釈され実行されます。

Cブロックダイアログウィンドウのインターフェースを以下に示します。



Number of Input/Output Portsセクションでは、入力ポート及び出力ポートの数を定義します。ポートの数を変えた後、回路図でのブロック・図はそれに従って変化します。

[Insert GetPsimValue]機能は、パラメータファイルで定義されたパラメータにCブロックからアクセスすることを可能にします。ある回路がR1と言う抵抗を持つと仮定すると、そのR1にアクセスするためには[Insert GetPsimValue]をクリックします。すると、以下のウィンドウが表示されます。



OKをクリックすると、以下のコードが挿入されます。

```
int nStatus = -1; // If the function succeeds, the value of nStatus will be 0.
double nValue = GetPsimValue(reserved_ThreadIndex, reserved_AppPtr, "R1", "Resistance", &nStatus);
```

抵抗R1の抵抗値を取得し、変数nValueに設定されます。

たとえば、パラメータ・ファイルで"alpha"として定義された変数にアクセスするには、次のコードを使用します。

```
int nStatus = -1;
double nValue = GetPsimValue(reserved_ThreadIndex, reserved_AppPtr, "", "alpha", &nStatus);
if(nStatus != 0)
{ //optional error handling code
    printf("Error: alpha = %f, nStatus = %i \n", value, nStatus);
}
```

変数alphaの値を取得し、変数nValueに設定されます。

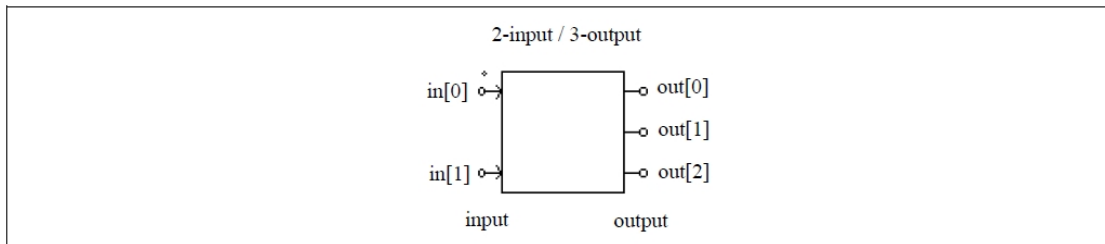
高速シミュレーションでは、関数GetPsimValueはSimulationBeginで使用する必要があり、それはSimulationStep関数内でアクセスできるように変数nValueは、グローバル変数として定義する必要があります。

Function Typeでは、下記4つの選択肢があります。

Variable/Function Definitions	インクルードファイルとグローバル変数の定義を行います。
Simulation Step Function	各シミュレーションステップに呼ばれる関数を記述します。
SimulationBegin Function	初期化のためのシミュレーションの初めに一度だけ呼ばれる関数を記述します。
SimulationEnd Function	終了のためのシミュレーションの終わりに一度だけ呼ばれる関数を記述します。

記述したCコードにコンパイラエラーがあるかどうかチェックするために**Check Code**ボタンをクリックしてください。Cブロックの図をカスタマイズするために**Edit Image**ボタンをクリックしてください。

例として、2入力、3出力のCブロックを考えます。入出力のポート数が決まったらCブロックの素子画像は以下になります。



ノードは上から下へ番号が振られます。

Cコードでは、PSIMからCブロックへ値を受け渡すため`in`配列が使われ、Cブロックから値を返すため`out`配列が使われます。この例では、最初の入力[0]が左上に位置し、最初の出力[0]が右上に位置します。Cブロックと外部DLLブロックの違いは、Cブロックは簡単に使えるものの、カスタムコードをデバッグすることができないという点にあります。外部DLLブロックでは、デバッグするためにVisual Studio上でブレイクポイントをセットすることやトレース/ステップを行うことが可能です。

zドメイン回路のCブロック：

zドメイン回路でCブロックが使われている場合、PSIMはCブロックの入力でZOHブロックが接続されていないかをすぐにチェックします。もしある場合は、最初の入力からブロック全体に対してこのサンプリングレートが使用されます。例えば、2入力で入力1は10kHzのZOHに、入力2は20kHzの入力に接続されていると10kHzが使用され、20kHzは無視されます。

現時点ではCブロックは複数のサンプリングレートの入力はサポートしていません。すなわち、Cブロックのコードは1つのレートのみで実行します。

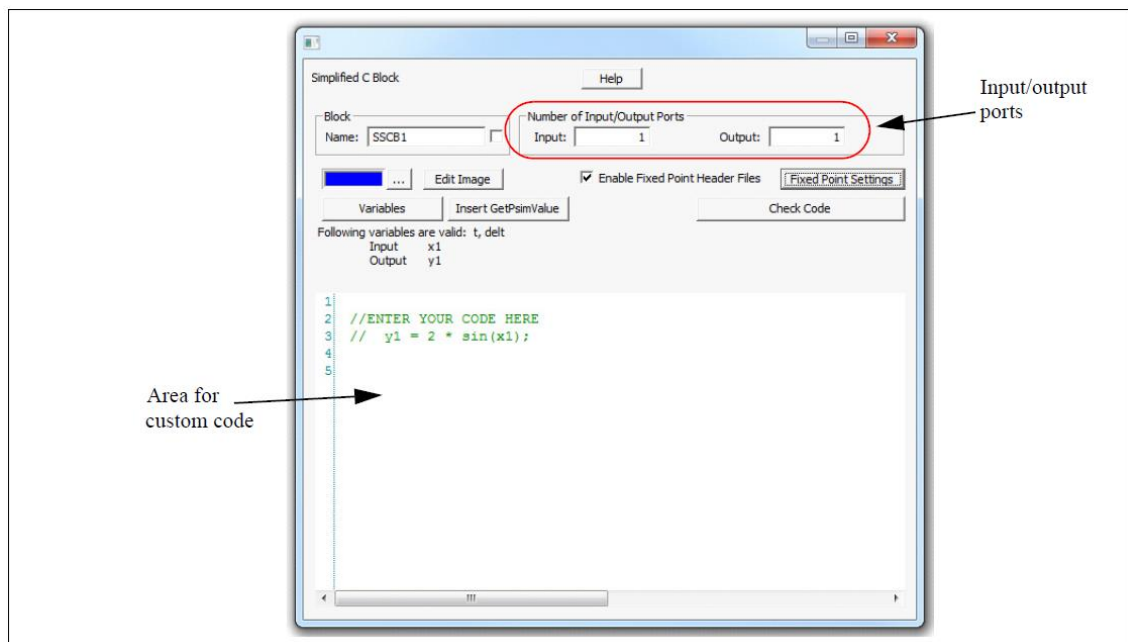
ZOHがCブロックの入力にすぐに接続されていない場合、Cブロックは小さなタイムステップごとに呼び出されます。

同じ動作がシンプルCブロックと外部DLLブロックにも適用されました。

6.5.7 シンプルCブロック (Simplified C Block)

シンプルCブロックはCブロックの簡易版です。Cブロックが変数定義領域などを持っているのに対し、シンプルCブロックはCコードだけを含んでおり、Cコードはタイムステップごとに呼んで実行されます。

シンプルCブロックダイアログウィンドウのインターフェースは以下の通りです



Number of Input/Output Ports セクションでは、入出力ポートの数を定義します。ポートの数を変えると、シンプル C ブロックのイメージはそれに従って変わります。

以下の変数をコードで使うことが可能です

t	PSIM から渡される時間
delt	PSIM から渡される刻み
x1, x2,	入力 1, 2,
y1, y2, ...	出力 1, 2,

[Enable Fixed Point Header Files]が選択されている場合、[Fixed Point Settings]のクリックにより、C ブロックの入力と出力の固定小数点データタイプを定義することができます。

[Variables]ボタンのクリックにより、主回路から C ブロックに渡すことができる変数を定義することができます。変数には定数や数式を用いることができます。

例

k1 = 15.2

k1 = Freq/sqrt(2)

ここで Freq はパラメータファイルで定義されているものとする。

[Insert GetPsimValue]ボタンのクリックにより、他の場所で定義された変数を取得し、C コードでそれを使用することができます。この関数の使用法は、C ブロックと同じです。

C ブロックとは異なり、シンプル C ブロックは自動コード生成に使用することができます。

6.6 IC モデル (IC Models)

PSIM ではいくつかの PWM IC とドライバ IC モデルがあります。

6.6.1 PWM IC

PWM IC モデルは次のようなモデルがあります。

PWM IC 一覧

UC3823A/B, UC3825A/B	高周波スイッチモード電源を制御する高速 PWM コントローラ。PWM コントローラの UC3823A と UC3823B、また UC3825A と UC3825B ファミリは標準的な UC3823 と UC3825 ファミリの改良版となります。
UC3842/3843, UC3844/3845	オフラインまたは DC-DC コンバータ用の固定周波数電流モード PWM コントローラ。制御デバイスの UC3842/3/4/5 ファミリは、オフラインまたは DC-DC コンバータ用の固定周波数電流モード制御方式に必要な機能を提供します。
UC3846	オフラインまたは DC-DC コンバータ用の固定周波数電流モード PWM コントローラ。制御 IC の UC3846 ファミリは、固定周波数電流モード制御方式に必要な機能を提供します。
UC3854, UC3854A/B	能動型力率補正された高効率プリレギュレータ。UC3854A/B は UC3854 の強化バージョンとピン互換性があります。UC3854 は能動型力率補正プリレギュレータを実現する必要な機能を提供します。
UC3872	共振ランプ安定コントローラ。UC3872 は、冷陰極蛍光灯、ネオン、及び他のガス放電ランプを駆動するために最適化された共振ランプ安定コントローラです。
UCC3806	低消費電力、デュアル出力、電流モード PWM コントローラ。人気の UC3846 シリーズと同じブロック図及びピンアウトで、装置内に使用されるバイアス電流を大幅に低減しつつ、UCC3806 ライン機能は、スイッチング周波数能力を増加させました。
UCC3817/3818	BiCMOS の平均電流制御モードによる力率プリレギュレータ。UCC3817/18 ファミリは、能動型力率補正プリレギュレータに必要なすべての機能を提供します。このコントローラは、AC 入力電圧の形に一致するように AC 電流波形を整形して、力率を 1 に近くにします。
UCC3895	フルブリッジ電力段のための BiCMOS 高度な移相 PWM コントローラ。UCC3895 は、一方のハーフブリッジのスイッチングを他方に 対して位相をシフトすることで制御を実現する、フルブリッジ型の移相 PWM コントローラです。ゼロ電圧スイッチングと組み合わせて一定周波数の PWM を行い、高周波数で高効率を得ることができます。
UCC38C40/ UCC38C41/ UCC38C42/ UCC38C43/ UCC38C44/UCC38C45	BiCMOS 低消費電力電流モードの PWM コントローラです。固定周波数ピーク電流モード制御電源へ必要な機能を提供します。開始閾値電圧と最小動作電圧は違います。
UC3901	絶縁型フィードバック発生器、UC3901 はオプティカルカブラーに代わるものです。それは、電圧絶縁隔離境界を横切るフィードバック制御ループを閉じることに関連した問題の多くを解決するようになっています。ループエラー信号が小さい高周波変成器またはコンデンサーと結合することを可能にする振幅変調システムとなっています。

仕様

パラメータ	機能
モデルレベル	UC3901 以外のすべての IC モデルには、2 つのレベルがあります。 Level-1: PWM ゲーティング出力は制御信号で、論理 H(1)と L(0)です。 Level-2: PWM ゲーティング出力は、3 ステートで直接駆動することができる電力信号です。

UC3901 モデルは Level-2 のみです。

6.6.2 ドライバ IC (Driver IC)

ドライバ IC モデルは次のようなモデルがあります。

ドライバ IC 一覧

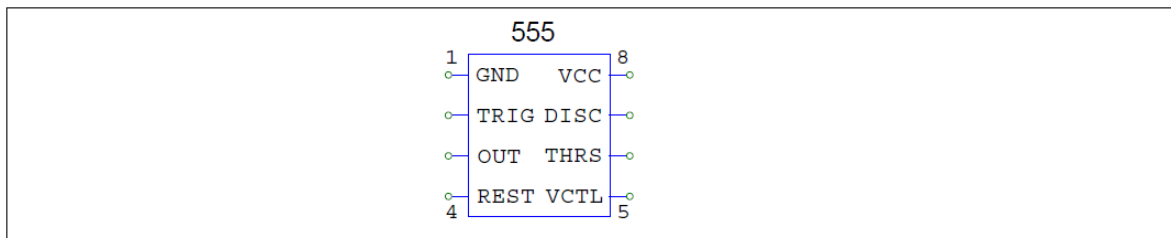
IR21834	ハイサイド/ローサイド基準電圧出力チャンネルに依存した、高電圧、高速パワー-MOSFET や IGBT 用のハーフブリッジドライバ。
IRS21867	ハイサイド/ローサイド基準電圧出力チャンネルに依存しない、高電圧、高速パワー-MOSFET や IGBT 用のハイサイド/ローサイドドライバ。
TC4423A, TC4424A, TC4425A	3A のデュアル出力の高速パワー-MOSFET ドライバ。 TC4423A: 両側反転出力 TC4424A: 両側非反転出力 TC4425A: 片側反転出力、片側非反転出力
TC4426A, TC4427A, TC4428A	1.5A のデュアル出力の高速パワー-MOSFET ドライバ TC4426A: 両側反転出力 TC4427A: 両側非反転出力 TC4428A: 片側反転出力、片側非反転出力

6.6.3 555 タイマ (555 Timer)

555 タイマは、正確な時間遅延や振動を発生させるための非常に安定したデバイスです。加えて、必要に応じてトリガまたはリセットされるための端子が設けられています。時間遅延モードでは、時間は正確に外付けの抵抗とコンデンサにより制御されます。

PSIM モデルで、555 タイマの OUT 信号は制御信号ノードです。

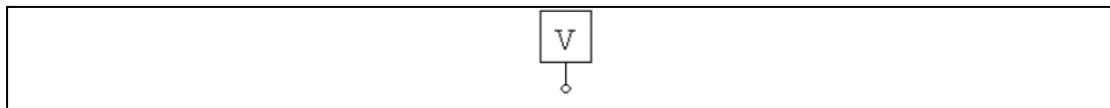
シンボル



6.7 初期値 (Initial Values)

この素子を利用してパワー系、制御系回路の初期ノード電圧の定義ができます。シミュレーションが開始するとすぐに、この値は保持されなくなります。

シンボル



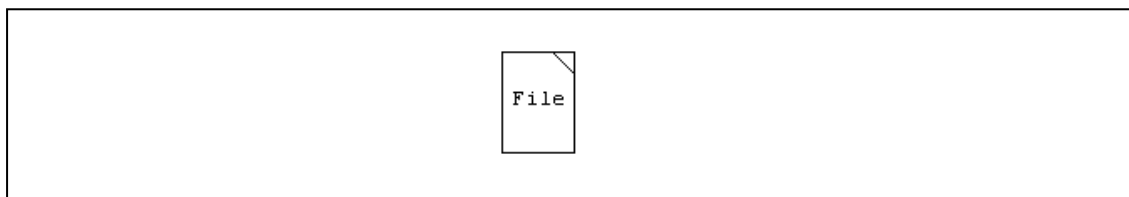
仕様

パラメータ	機 能
ノード電圧初期値	ノード電圧の初期値

6.8 パラメータファイル (Parameter File)

パラメータファイル素子(.FILE)は素子のパラメータやリミッタの設定を保存するファイルの名前を指定します。たとえば、抵抗の抵抗値を変数 R1 と指定して、パラメータファイルの中で実際の値を記述することができます。また、パラメータファイルはそれ自体を、計算ツールとして使用することもできます。

シンボル



パラメータファイルはユーザが作成するテキストファイルです。パラメータファイルのフォーマットは以下のとおりです。

```
//                //から行末までは、コメントとして扱われます。
k1=12.3           // 変数 k1 の値を定義。
k1=a+b*c          // 数式で k1 を定義。
(global)k1=12.3   // k1 をグローバル変数として定義(SimCoder で使用)。
L1=3m             // 10 の累乗をサポート。L1=3e-3 を表しています。
C1=100uF          // C1=100e-6 を表しています。"F"は、無視されます。
```

Version9.1 と比較して、以下のフォーマットはサポートされなくなりました。

```
LIMIT var1 Vlow Vupper // これは、"if...else if..." 文に置き換えてください。
%                      コメントとして%は、サポートされません。
                        コメントは ダブルスラッシュ(//)で始めてください。
                        %は、剰余演算として使用されます。
var1 value (例えば "R1 2.5") // 変数を定義するためには、等号を使用する必要があります。
```

"(global)"定義は SimCoder で自動コード生成を行う際にのみ使用します。この使い方に関しては SimCoder のマニュアルをご参照ください。PSIM でのシミュレーションの際には、この定義は無視されます。よって、パラメータを"(global)Kp=1.2"と定義した場合、シミュレーション時は"Kp=1.2"と同様に扱われます。

また、条件文とエラー/ワーニングメッセージ機能が以下のようにサポートされました。

```

if (k1 > 10)
{
    a = 10
    b = 1
}
else if (k1 <= 20)
{
    a = 20
    b = 2
}
else
{
    Error {"Error: The value of k1 is out of the range. k1 = %f", k1}
}
if (k1 == 20)
{
    Warning {"Warning: The value of k1 is equal to %.0f", k1}
}

```

条件文 "if...else if...else..." が記述されると、標準的な C の文法が適用されます。(ただし、各ステートメントの最後にセミコロン(;)は、付きません。)

さらに、ループがサポートされている間は、例として以下ようになります。

```

iflag = 1
a = 0
b = 0.1
while (iflag == 1)
{
    a = a + b
    if (a > 10)
        iflag = 0
}

```

パラメータファイルにおいて、サポートされる演算子と数学関数は、以下の通りです。

+	加算
-	減算
*	乗算
/	除算
%	除算後の剰余を返すモジュロ演算子 (例: 5%2 = 1)
^	べき乗
=	等式割当
==	条件付等式
!=	不等式
>	より大きい
>=	等しいかそれ以上
<	より少ない
<=	等しいかそれ以下
!	not
&&	and
	or
sin(x)	正弦 (サイン)
cos(x)	余弦 (コサイン)
tan(x)	正接 (タンジェント)
asin(x)	逆正弦 (アークサイン)
acos(x)	逆余弦 (アークコサイン)
atan(x)	逆正接 (アークタンジェント)
atan2(y,x)	Xおよびy定義済み逆正接 (アークタンジェント)

<code>sinh(x)</code>	双曲線正弦関数 (ハイパボリックサイン)
<code>cosh(x)</code>	双曲線余弦関数 (ハイパボリックコサイン)
<code>tanh(x)</code>	双曲線余弦関数 (ハイパボリックタンジェント)
<code>pow(x,y)</code>	xのy乗
<code>sqrt(x)</code>	平方根
<code>exp(x)</code>	xの基底eの指数 例: e^x
<code>ln(x)</code> (or <code>log(x)</code>)	xの自然対数 (基底e)
<code>log10(x)</code>	xの常用対数 (10進法)
<code>abs(x)</code>	絶対値
<code>sign(x)</code>	if $x > 0$, -1 if $x < 0$, and 0 if $x = 0$ の場合1を返す符号関数
<code>ceil(x)</code>	xより大きい整数を返す関数
<code>floor(x)</code>	xより小さい整数を返す関数
<code>if (...) { ... } else if (...) { ... }</code> <code>else { ... }</code>	条件付きif文
<code>iif (condition, value1, value2)</code>	インライン if 文 (「if」ではなく「iif」となります。)
<code>while(...) { ... }</code>	ループ時
<code>Error {"Error text %f, %f", var1, var2}</code>	エラー文。5個の変数までサポートされます。
<code>Warning {"Warning text %f, %f", var1, var2}</code>	警告文。5個の変数までサポートされます。

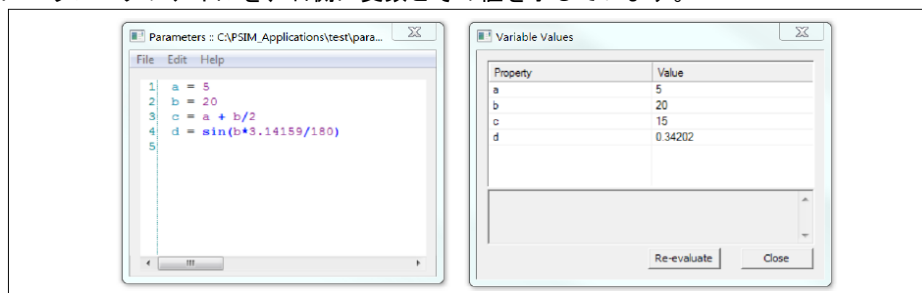
全ての三角関数の入出力は、ラジアンで扱われます。また、エラーやワーニングのレポート関数は、以下のとおり変数の数値表記をコントロールできます。

```
Error {"Error message"}
Error {"Error message %.nf", k1}           // k1の値を表示します。
                                           // nは小数点の後の数字の個数を指定します。
                                           // 例えば、k1=12.34の場合、%.1fと指定すると
                                           // 12.3と表示されます。

Warning {"Warning message"}
Warning {"Warning message %.nf", k1}       // k1の値を表示します。
                                           // nは小数点の後の数字の個数を指定します。
                                           // 例えば、k1=12.34の場合、%.1fと指定すると
                                           // 12.3と表示されます。
```

エラー機能はシミュレーションを中断させます。一方、ワーニング機能はシミュレーションを継続します。

パラメータファイルの変数の値を表示するためには、Edit >> Show Values を実行してください。下図では、左側にパラメータファイルを、右側に変数とその値を示しています。



"Show Values"機能は、計算のチェックするためにとっても便利な機能です。

回路図内のパラメータファイル

回路図内でパラメータファイルの要素が使用されている場合、パラメータファイルの階層は、回路図と同じ次元になります。高次元の回路図内のパラメータファイルで定義された変数は、低次元の回路図で使用できますが、その逆はできません。また、同じ次元の他の回路図内で使用することはできません。

例えば、メイン回路に"main_param.txt"というパラメータファイルがあるとします。そしてメイン回路には S1 と S2 というサブ回路があり、それぞれパラメータファイル "sub1_param.txt" と "sub2_param.txt" に対応しているとします。この場合、"main_param.txt" で定義されている変数は、"sub1_param.txt" と "sub2_param.txt" でも、S1 と S2 でも使用できます。しかし、"sub1_param.txt" もしくは "sub2_param.txt" で使用されている変数は、より高次元であるメイン回路や "main_param.txt" で使用することはできません。

同様に、サブ回路 S1 と S2 が同次元のため、"sub1_param.txt" で定義された変数は、S2 と "sub2_param.txt" で使用することはできません。その逆もまた、同様です。

PSIM がパラメータファイルを含んだ回路を保存する際、パラメータファイルの内容を保存すると同時に相対パスと絶対パスの両方の情報を保存します。PSIM がパラメータファイルを含んだ回路を読み込む際、以下の順序でパラメータファイルを検索します。

1. 相対パス(回路が保存されているフォルダとの相対位置)
2. 絶対パス
3. ローカルパス(回路が保存されているフォルダ)

1~3 内にパラメータファイルが存在しない場合は、回路が保存されているフォルダに自動的に作成されます。

パラメータツール

変数の値を表示し、条件文を処理するための機能を使用すると、パラメータファイルの素子は、それ自体で非常に便利な計算ツールになります。使いやすくするため、回路図なしでパラメータファイルを開けるように、この機能は提供されています。この機能を使うには Script >> Parameter Tool を実行してください。

6.9 周波数特性解析(AC Analysis)

周波数特性解析により主回路もしくは制御ループの周波数応答を求めることができます。PSIM を使った周波数特性解析の特徴は、回路がスイッチ素子を含む場合も、平均値による解析に頼ることなく、実際のスイッチ動作を忠実に模擬できることです。

通常のモデルでは、周波数特性を短時間で実行することができます。

周波数特性解析の原理は交流励起信号を回路に抽入して、出力の観測点で同じ周波数の信号を取り出すことにあります。周波数特性解析の結果を正確にするには、励起電源の振幅を適切に設定する必要があります。応答が線形領域にとどまるように振幅は小さく設定することが必要です。一方、出力の精度が数値誤差の影響を受けないように、振幅は充分大きくする必要があります。

一般に、物理系は周波数の低い領域では減衰が低く、周波数の高い領域では高い傾向があります。したがって、励起電源は開始周波数では振幅が小さく、終了周波数では大きな設定とするのが良いでしょう。

PSIM で周波数特性解析を行う際の手順を以下に示します。

- 交流スイープの励起電源に使う正弦波電源を設定します。

- 出力を観測したい位置に AC スweepプローブを置きます。閉ループの制御応答を観測するには、AC スweepプローブ(ループ)を使います。
- AC スweep素子を回路上に置き、パラメータを設定します。
- PSIM のシミュレーションを実行します。

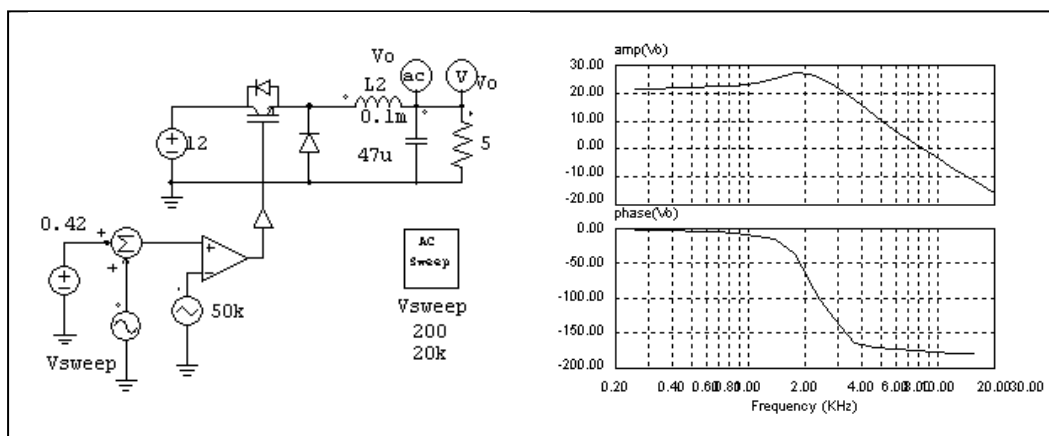
場合によって、周波数特性解析の終了後に次の警告メッセージが表示されることがあります。

Warning: The program did not reach the steady state after 60 cycles. See File "message.doc" for more details.

この警告メッセージは、交流スweepを開始して 60 サイクル後になっても定常状態を検出できなかったときに表示されます。この問題を解決するには、回路の制動を増す(たとえば抵抗を追加する)か、励起電源の振幅を調整する、あるいはシミュレーションのタイムステップを短くする、などの対策が考えられます。"message.txt"というファイルには、この現象が起こった周波数、また相対誤差などといった情報が書き込まれています。相対誤差はデータ点が定常状態からどれだけ離れているかを示しています。

例：コンバータの開ループ応答

以下に示す回路は直流チョップ回路で、変調率信号に周波数特性解析のための正弦波電圧を加算し、出力電圧を測定しています。右に示すのは周波数特性解析の結果で、変調率入力に対する出力電圧の周波数応答を示しています。



例：閉ループ回路の一巡伝達関数

周波数特性解析はまた、閉ループ回路の応答を調べるのに使うことができます。以下に示す回路は平均電流制御付きのコンバータ回路です。電流フィードバック回路に励起電源を抽入し、AC スweepプローブ(ループ)により観測することにより、このループの一巡伝達関数を直接得ることができます。こうして得られた一巡伝達関数から、ユーザはさらにバンド幅と位相余裕を求めることができます。

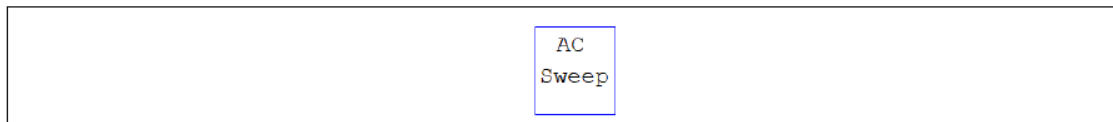
交流スweep用のプローブはドットの付いた側が励起電源の抽入点よりも後に接続されているところにご注意ください。

AC スイーププローブは、励起電源に対するノードと接地間の電圧の応答を測定するために使用されます。
AC スイーププローブ（ループ）は、閉ループの応答を測定するために使用されます。

6.9.2 AC スイープ(AC Sweep)

AC スイープブロックは、AC スイープのパラメータを定義します。励起電源が回路に注入されます。PSIM は、定常状態に達するまで、回路を過渡シミュレーションで実行します。定常状態を検出する基準は、PSIM の内部で設定されます。

シンボル



仕様

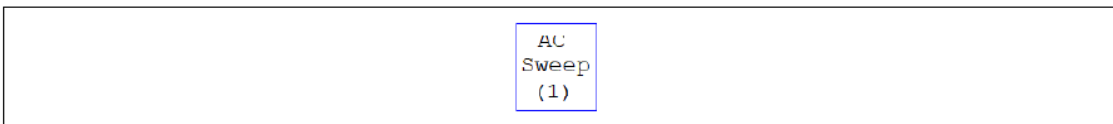
パラメータ	機 能
開始周波数	交流スイープの開始周波数(Hz)
終了周波数	交流スイープの終了周波数(Hz)
データ点数	データ数
データ点フラグ	データ点のフラグ Flag =0 のとき、周波数は LOG10 のスケールで等間隔に変化します。 Flag =1 のとき、周波数は線形のスケールで等間隔に変化します。
励起電源	スイープ対象の励起電源の名称
開始振幅	開始周波数における励起電源の振幅
終了振幅	終了周波数における励起電源の振幅
追加ポイントの周波数	追加データポイントの周波数。周波数領域特性が特定の周波数範囲で急速に変化する場合は、この領域に追加のポイントを追加して、より良いデータ解像度を得ることができます。

6.9.3 AC スイープ(1) (AC Sweep (1))

AC Sweep(1)ブロックは、AC Sweep ブロックと同じように機能します。このブロックと AC Sweep ブロックの違いは、励起ポイントを任意に定義できることです。

パラメータスイープ用素子のシンボルと仕様を以下に示します。

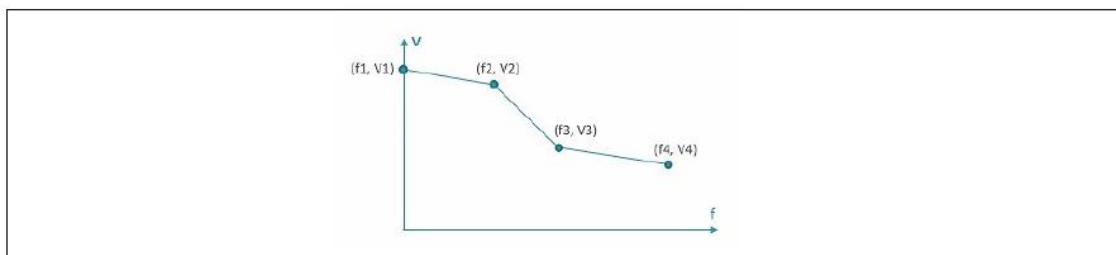
シンボル



仕様

パラメータ	機 能
開始周波数	交流スイープの開始周波数(Hz)
終了周波数	交流スイープの終了周波数(Hz)
データ点数	データ数
データ点フラグ	データ点のフラグ Flag =0 のとき、周波数は LOG10 のスケールで等間隔に変化します。 Flag =1 のとき、周波数は線形のスケールで等間隔に変化します。
励起電源	スイープ対象の励起電源の名称
(f1,V1) (f2,V2) ... (fn,Vn)	各点での励起源の周波数と振幅を指定します。f1 は開始周波数と同じに、fn は終了周波数と同じである必要があります。

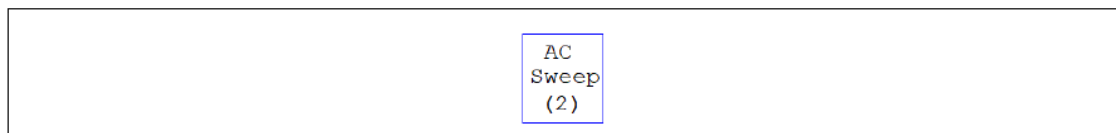
励起電源は以下のとおり定義されます。



6.9.4 AC スイープ(2) (AC Sweep (2))

AC Sweep(2)ブロックは、AC Sweep および AC Sweep(1)ブロックとは異なる方法で機能します。このブロックを使用すると、PSIM はユーザーが指定した定常状態時間 Tsteady までの過渡シミュレーションを実行します。その後、PSIM はさらに N サイクル（ユーザー指定）をシミュレートして、AC スイープ結果を計算します。

シンボル



仕様

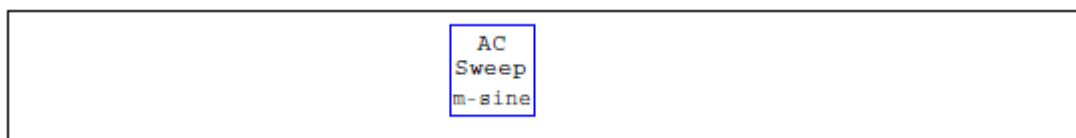
パラメータ	機 能
開始周波数	交流スイープの開始周波数(Hz)
終了周波数	交流スイープの終了周波数(Hz)
データ点数	データ数
データ点フラグ	データ点のフラグ Flag =0 のとき、周波数は LOG10 のスケールで等間隔に変化します。 Flag =1 のとき、周波数は線形のスケールで等間隔に変化します。
励起電源	スイープ対象の励起電源の名称
サイクル数	AC スイープ結果を取得するためにシミュレーションが実行するサイクル数 N。
定常状態時間	定常状態時間 Tsteady で、定常状態に到達するまでの時間（秒）
波形フラグ	各 AC スイープ周波数で時間領域シミュレーション波形を保存するためのフラグ。フラグを 1 に設定すると、時間領域の波形がサブフォルダー内のファイルに保存されます。ファイル名は注入頻度を示します
(f1,V1) (f2,V2) ... (fn,Vn)	各点での励起源の周波数と振幅を指定します。f1 は開始周波数と同じに、fn は終了周波数と同じである必要があります。

励起電源プロファイルは、AC Sweep(1)ブロックの場合と同じです。
このブロックを AC スイープに使用するには、最初に信号を注入せずに回路を実行し、回路がいつ定常状態に到達するかを調べます。次に、この定常状態時間を AC スイープ定義で使用します。

6.9.5 AC スイープ複数正弦波 (AC Sweep Multisine)

AC スイープ複数正弦波ブロックは AC スイープブロックと同じ機能です。従来の AC スイープに比べ、このブロックの優位な点は、低周波 1 サイクル内において複数の周波数をシミュレーションできることです。

シンボル



仕様

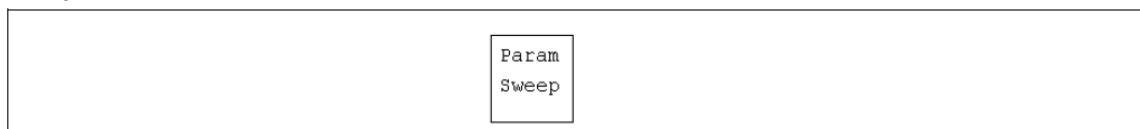
パラメータ	機 能
開始周波数	交流スイープの開始周波数(Hz)
終了周波数	交流スイープの終了周波数(Hz)
データ点数	データ数
データ点フラグ	データ点のフラグ Flag =0 のとき、周波数は LOG10 のスケールで等間隔に変化します。 Flag =1 のとき、周波数は線形のスケールで等間隔に変化します。
励起電源	スイープ対象の励起電源の名称
ピーク振幅	開始周波数における励起電源の振幅ピーク値
サイクル数	AC スイープ計算に使用する開始周波数サイクル数。
安定状態時間	安定状態になる推定時間。ユーザは安定状態になるまでの近い時間を推定するか、単一の時間シミュレーションを実行し、値を決めます。

6.10 パラメータスイープ (Parameter Sweep)

パラメータスイープは任意のパラメータで解析を行うことができます。

パラメータスイープ用素子のシンボルと仕様を以下に示します。

シンボル



仕様

パラメータ	機 能
名前	スイープするパラメータの名称
スタート	パラメータスイープの開始値
エンド	パラメータスイープの終了値
増量	パラメータの刻み幅
有効	チェックを入れると、そのパラメータのスイープが有効になります

たとえば、抵抗器の抵抗を R_0 とします。この抵抗器を 2 Ohm から 10 Ohm まで 2 Ohm ごとにスイープさせ、**有効**のチェックボックスにチェックすると以下のような設定となります。

名前	R_0
スタート	2
エンド	10
増量	2

パラメータスイープは2つのグラフをプロットします。1つは出力 対 時間、もう一方はシミュレーションの出力最後の値 対 スイープさせたパラメータです。

例えば、V1 と V2 という 2 つの出力をだす回路で、抵抗値 R_0 をスイープするとします。総シミュレーション時間は 0.1 秒です。シミュレーション後、Simview で 2 つのグラフがプロットされます。1 つは V1 と V2 対 時間です。もう一方は V1 と V2 対 R_0 です。2 つめのグラフの V1 と V2 はシミュレーション時間最後 0.1 秒のときの値です。

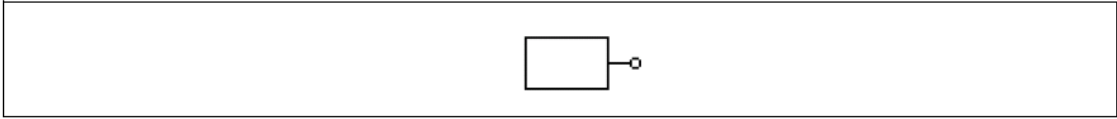
第7章 電圧源・電流源

PSIM では、いくつかの電圧源・電流源が用意されています。電流源の方向は次のように定義します。電流は高電位のノードから出て、外部回路を流れ、低電位のノードに戻ります。電流源はタイプにかかわらずパワー回路でのみ使用できます。

7.1 定数 (Constant)

定数素子で、ユーザは定数を定義できます。これは、接地した電圧源として作用します。

シンボル



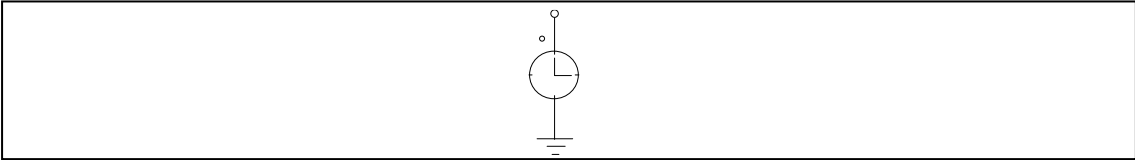
仕様

パラメータ	機 能
値	定数の値

7.2 時間 (Time)

時間要素は区分線形電圧源の特殊な場合です。これは接地された電圧源として扱われ、シミュレーション時刻(sec)と同じ値を出力します。

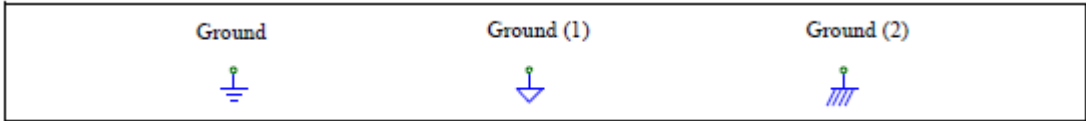
シンボル



7.3 グ라운드 (Ground)

PSIM ライブラリには 3 種類のグラウンドがあります。それぞれ異なる形状ですが、電気的には接続されています。これら形状の異なるグラウンドによって、ユーザは回路図上の機能ごとにグラウンドを分けて編集できます。

シンボル



7.4 電圧源と電流源

7.4.1 直流電源 (DC Source)

直流源は出力一定です。また、Grounded DC の一方の端子は接地されています。

シンボル

DC	DC (battery)	Grounded DC (circle)	Grounded DC (T)	Current
				

仕様

パラメータ	機 能
出力値	電源の出力値
直列抵抗	直列抵抗 (Ω)(DC および DC(battery)のみ)
直列インダクタンス	直列インダクタンス (H)(DC および DC(battery)のみ)

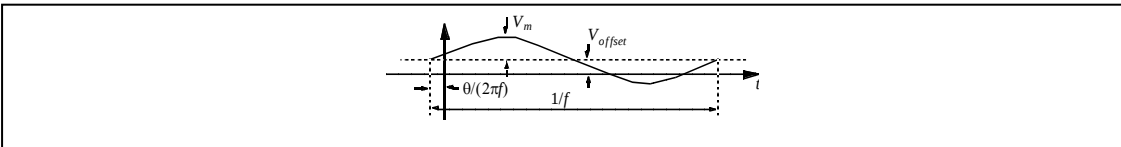
直列抵抗と直列インダクタンスは電源の出カインピーダンスを表しています。

7.4.2 正弦波電源(Sinusoidal Source)

正弦波電源は以下のように定義されています。

$$v_o = V_m \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t + \theta) + V_{offset}$$

下の図に正弦波電源の仕様を示します。



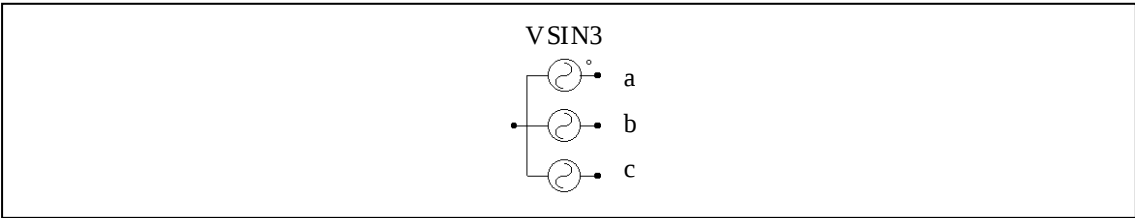
シンボル

Voltage	Current
	

仕様

パラメータ	機 能
最大値	正弦波の最大値 V_m
周波数	周波数 f (Hz)
初期位相角	初期位相角 θ (度)
直流オフセット	直流オフセット V_{offset}
直列抵抗	直列抵抗 (Ω)(Voltage のみ)
直列インダクタンス	直列インダクタンス (H) (Voltage のみ)
開始時刻	開始時刻。この時刻以前の電源は 0 になります。

三相回路の構成に便利ように対称三相 Y 結線正弦波電圧源が用意されています。ドットのついた相が a 相です。

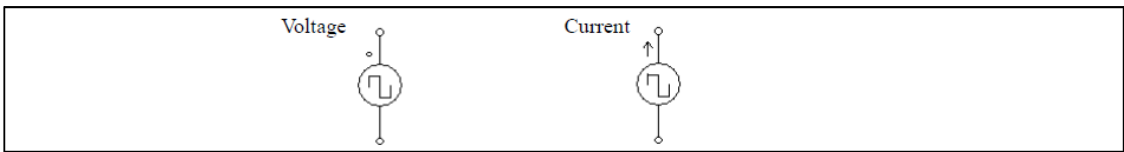


仕様

パラメータ	機 能
V(線間実効値)	線間の実効値 (V)
周波数	周波数 f (Hz)
相初期位相角	a 相の初期位相角 θ (度)
直列抵抗	直列抵抗 (Ω)
直列インダクタンス	直列インダクタンス (H)

7.4.3 方形波電源(Square-Wave Source)

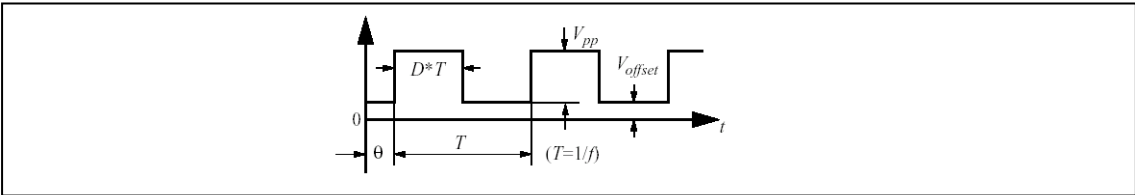
方形波電圧源および電流源は peak-to-peak の振幅、周波数、デューティ比および DC オフセットにより指定できます。通電周期は 1 周期に対する高電位が出力される時間の比で定義されます。



仕様

パラメータ	機 能
最大振幅	ピーク間の振幅 V_{pp}
周波数	周波数 f (Hz)
デューティ比	デューティ比 D
直流オフセット	直流オフセット V_{offset}
開始時刻	開始時刻。この時刻以前の電源は 0 になります。
位相遅れ	波形の位相遅れ θ (度)
立ち上がり時間(SPICE)	信号が Low から High に立ち上がる秒数(SPICE モードでのみ使用します)
立ち下がり時間(SPICE)	信号が High から Low に立ち下がる秒数(SPICE モードでのみ使用します)

下の図に方形波電源の仕様を示します。



位相遅れ θ が正数のときは、波形が時間軸に沿って右側にシフトされます。

7.4.4 三角波電源/のこぎり波電源 (Triangular/Sawtooth Sources)

三角波電圧源および電流源はピーク間振幅、周波数、デューティ比および DC オフセットにより指定できます。デューティ比は 1 周期に対する立ち上がり時間の比で定義されます。

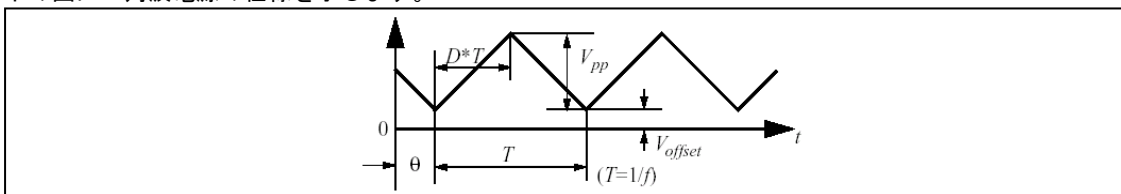
シンボル(三角波電源)



仕様(三角波電源)

パラメータ	機 能
最大振幅	ピーク間の振幅 V_{pp}
周波数	周波数 f (Hz)
デューティ比	デューティ比 D
直流オフセット	直流オフセット V_{offset}
開始時刻	開始時刻。この時刻以前の電源は 0 になります。
位相遅れ	波形の位相遅れ θ (度)

下の図に三角波電源の仕様を示します。

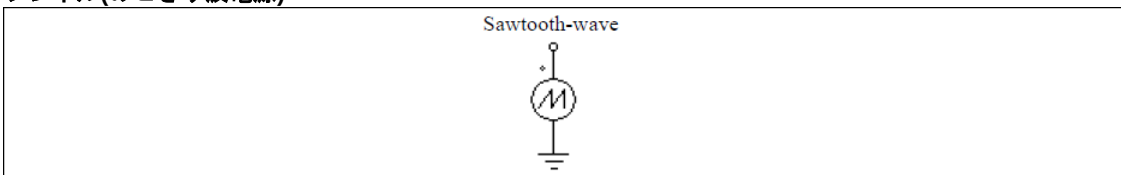


位相遅れ θ が正数のときは、波形が時間軸に沿って右側にシフトされます。

のこぎり波電源は、デューティサイクル 1 で、dc offset と位相遅れが 0 の三角波電源の特別なケースであり、一つのグランドノードを持っています。

下の図にのこぎり波電源の仕様を示します。

シンボル(のこぎり波電源)



仕様(のこぎり波電源)

パラメータ	機 能
最大振幅	ピークの振幅
周波数	周波数 (Hz)
立ち下がり時間(SPICE)	信号が High から Low に立ち下がる秒数(SPICE モードでのみ使用します)

7.4.5 ステップ電源 (Step Sources)

ステップ電圧源および電流源は指定された時間に出力がある設定値から別の設定値に変化します。2 種類のステップ電源があります。1 つは 0 からある値まで変化するタイプ(Step)で、もう 1 つはある値から別の値へ変化するタイプ(Step(2-level))です。

シンボル



仕様

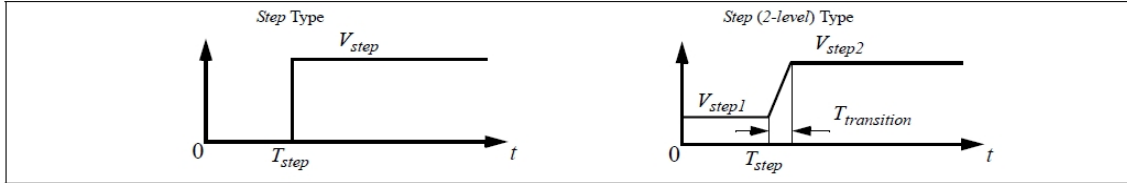
Step type の場合

パラメータ	機 能
変化後の値	ステップ変化の後の出力値 V_{step}
変化時間	ステップ変化を発生させる時刻 T_{step}
遷移時間(SPICE)	信号が High から Low に立ち下がる秒数(SPICE モードでのみ使用します)

Step (2-level) type の場合

パラメータ	機 能
変化前の値	ステップ変化の前の値 V_{step1}
変化後の値	ステップ変化の後の値 V_{step2}
変化時間	ステップ変化を発生させる時刻 T_{step}
遷移時間	V_{step1} から V_{step2} までの遷移時間 $T_{transition}$

下の図にステップ電圧源の仕様を示します。

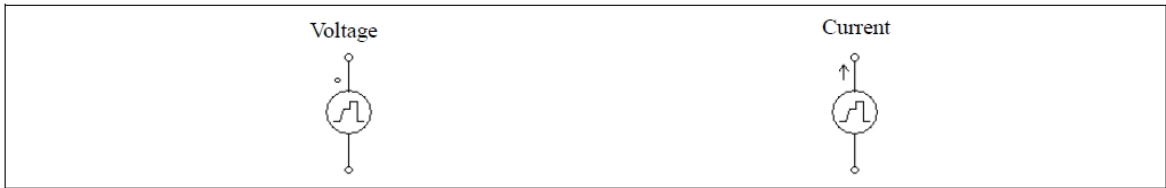


SPICE モードでは遷移時間を 0 秒に設定することは出来ません。必ず 0 秒以外の値を入れる必要があります。

7.4.6 区分線形電源(Piecewise Linear Source)

区分線形電源は多くの線分で波形を構成します。線分は接点の数、電圧・電流値、およびそのときの時刻(sec)で指定できます。値や時刻は独立して、またはペアで入力することができます。

シンボル



仕様

値と時刻を独立で定義するモデル(Piecewise linear)の場合

パラメータ	機 能
周波数	周波数 f (Hz)
接点の数	接点の数
値 $V_1, \dots, V_n$ 値 $I_1, \dots, I_n$	各接点における電圧または電流値
時刻 $T_1, \dots, T_n$	各接点の時刻(sec)

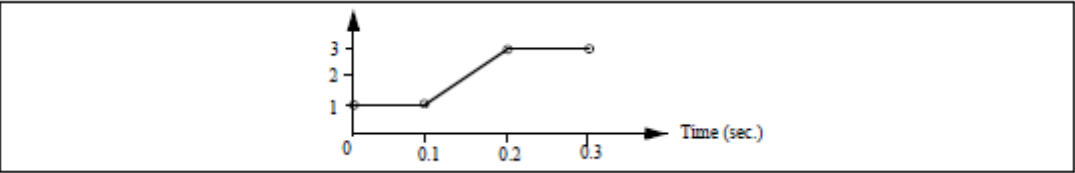
値と時刻をペアで定義するモデル(Piecewise linear (in pair))の場合

パラメータ	機 能
周波数	周波数 f (Hz)
時刻, 値 $(t_1, V_1) \dots$ 時刻, 値 $(t_1, I_1) \dots$	各接点の時刻と値

時刻と値のペアは必ずカッコで囲んでください。カッコ内の時刻と値はカンマで区切るか(例: 1.2m,5.5)、スペースで区切るか(例: 1.2m 5.5)、あるいはその両方を同時に使用できます(例: 1.2m, 5.5)。

例：区分線形電源の設定

以下に非周期的の区分線形電源の例を示します。区分数は3で、図に示すとおり4つの接点により定義することができます。



Piecewise linear の場合は、以下のように指定します。

周波数	0.
接点数 n	4
値 $V_1, \dots, V_n$	1. 1. 3. 3.
時刻 $T_1, \dots, T_n$	0. 0.1 0.2 0.3,

Piecewise linear (in pair)の場合は、以下のように指定します。

周波数	0.
時刻, 値 (t_1, V_1)	(0., 1) (0.1, 1) (0.2, 3) (0.3, 3)

7.4.7 ランダム電源 (Random Source)

ランダム電圧源(VRAND)と電流源(IRAND)の出力はシミュレーションの各時刻においてランダムに決まります。ランダム電圧源は以下のように定義されています。

$$V_o = V_m \cdot n + V_{offset}$$

ここで V_m は電源のピーク間振幅、 n は0と1のあいだのランダムな数、 V_{offset} はdcオフセットです。

シンボル



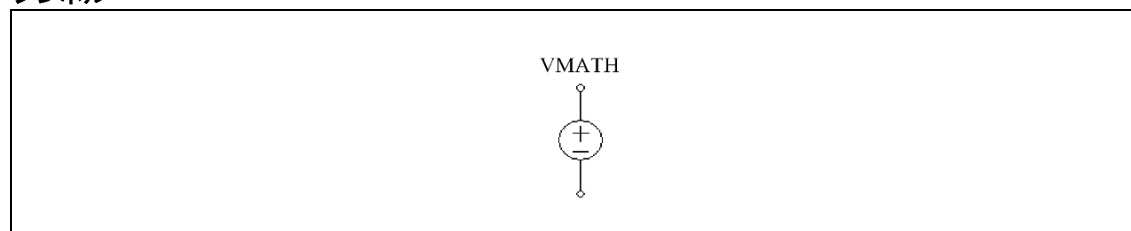
仕様

パラメータ	機 能
最大振幅	ピーク間の振幅
直流オフセット	直流オフセット
継続時間(SPICE)	一定の電圧・電流を継続する秒数(SPICE モードでのみ使用します)

7.4.8 数式関数電源 (Math Function Source)

数式関数電源はユーザが任意の関数を数式で指定できる電源です。

シンボル



仕様

パラメータ	機 能
数式	関数の数式表現
開始時刻	電源の動作開始時刻

数式のなかで T または t は時刻を示します。たとえば、正弦波関数の電源を指定するには、数式表現は $\sin(2*3.14159*60*t+2.09)$ などとなります。

7.4.9 Grounded Source Multiple

この電圧源の一端は接地されています。次のオプションがあります。各オプションは、指定された電圧源タイプと同じ機能を提供します。パラメーターと定義はすべて同じです。

- 定数 (Constant)
- 正弦波 (Sine)
- 三角波 (Triangular)
- のこぎり波 (Sawtooth)
- 方形波 (Square)
- ステップ波 (Step)
- ステップ波 (2 レベル) (Step (2-level))

7.4.10 制御付き電圧源・電流源 (Voltage/Current-Controlled Sources)

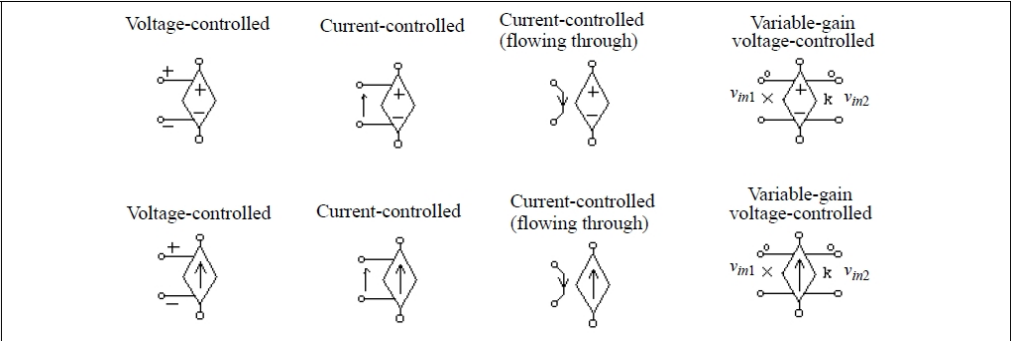
PSIM では次の 6 種類の制御付き電源が使用可能です。

- 電圧制御電圧源 (Voltage controlled voltage source)
- 電流制御電圧源 (Current controlled voltage source)
- 電圧制御電流源 (Voltage controlled current source)
- 電流制御電流源 (Current controlled current source)
- 可変ゲイン電圧制御電圧源 (Variable-gain voltage controlled voltage source)
- 可変ゲイン電圧制御電流源 (Variable-gain voltage controlled current source)

電流制御の場合、RLC ブランチの電流を制御電流とする必要があります。また、電流源の場合は、制御電圧または電流は独立の電源から取ることはできません。

制御付き電圧・電流源はパワー回路でのみ使用可能です。

シンボル



仕様

パラメータ	機能
ゲイン	電源のゲイン

電圧制御の電源において電圧は正(+)のノードから負(-)のノードに向かいます。一方、電流制御の電源では制御端子を RLC ブランチに直列に接続し、電流の方向はシンボル図の矢印に示すようにします。もう一組の電流制御の電源においては、制御電流は一方の端子から入り、他方の端子から出ます。制御電流を検出するために 10μΩ の抵抗を使っています。

ゲインが連続で制御可能な電圧・電流源は Input1 を乗算記号の側に、また、Input2 は k の文字がある側に加えます。制御付き電圧・電流源では、出力は制御入力の電圧・電流をゲイン倍したのになります。一方、可変ゲイン電圧・電流源では出力は以下の式で決まります。

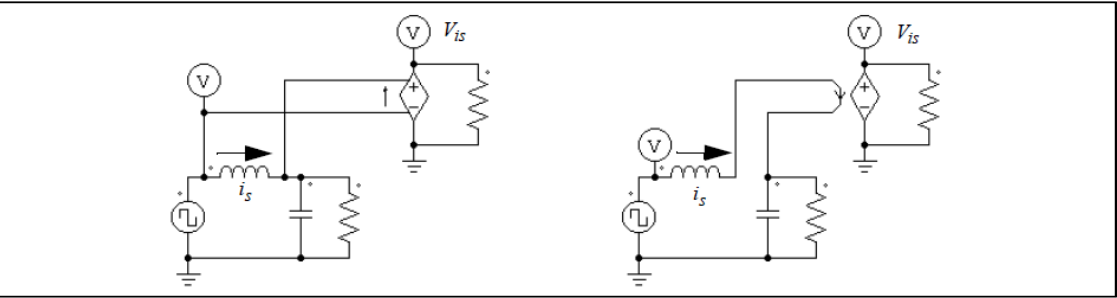
$$V_o = (k \cdot V_{in2}) \cdot V_{in1}$$

$$I_o = (k \cdot V_{in2}) \cdot V_{in1}$$

次節に述べる非線形電源と可変ゲイン電源の違いは、非線形電源の出力は現在時刻の V_{in1} および V_{in2} を使って計算し、各反復で更新されるという点です。一方、可変ゲイン電源では隣り合った時刻での V_{in2} の変化は小さいと見積もって、前の時刻での V_{in2} を現在時刻の計算に使います。この仮定は V_{in2} が V_{in1} に比べてかなりゆっくりと変化し、 V_{in2} の変化に比べてタイムステップが充分小さい場合に成り立ちます。可変ゲイン電源は非線形電源では収束の問題があるような場合に使えます。

例

下の図に電流制御電圧源の回路を示します。
左の回路では、電流制御電圧源をインダクタ電流 i_s によって制御しています。このように電流制御電圧源を使うことにより、電流値を電圧値に変換することができます。
右の回路では、左の回路と異なる電流制御型電圧源を使っています。この二つの回路は等価です。



7.4.11 非線形電圧制御電源 (Nonlinear Voltage-Controlled Sources)

非線形の電圧制御電源(Nonlinear Voltage-Controlled Source)は、入力乗算・除算・平方根のいずれかを出力します。次に出力の式による定義を示します。

非線形(乗算)出力 $v_o = k \cdot v_{in1} \cdot v_{in2}$ または $i_o = k \cdot v_{in1} \cdot v_{in2}$

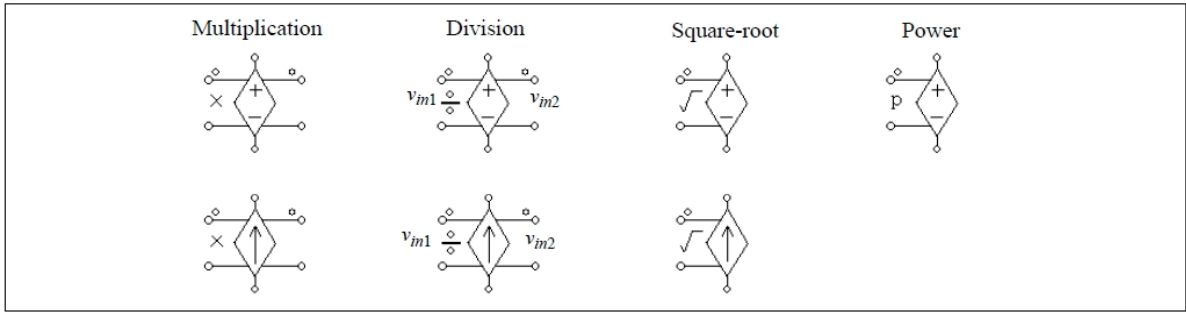
非線形(除算)出力 $v_o = k \cdot \frac{v_{in1}}{v_{in2}}$ または $i_o = k \cdot \frac{v_{in1}}{v_{in2}}$

非線形(平方根)出力 $v_o = k \cdot \sqrt{v_{in1}}$ または $i_o = k \cdot \sqrt{v_{in1}}$

非線形(電力)出力 $v_o = \text{sign}(v_{in}) \cdot k \cdot (k_1 \cdot v_{in})^{k_2}$

非線形電源(以下の図で Power)では、 $\text{sign}(v_{in})$ は、 v_{in} が正のときは1、負のときは-1となります。
非線形電圧制御電源はパワー回路でのみ使用できます。

シンボル



仕様

パラメータ	機 能
ゲイン	電源のゲイン k
係数 k_1	係数 k_1
係数 k_2	係数 k_2

ここで、ゲインはすべての電源のパラメータですが、 k_1 および k_2 は非線形電源のパラメータです。
非線形(除算)電源では、Input1 は除算記号の側に加えます。

第8章 エラー及び全般に関する注意

8.1 全般に関する注意

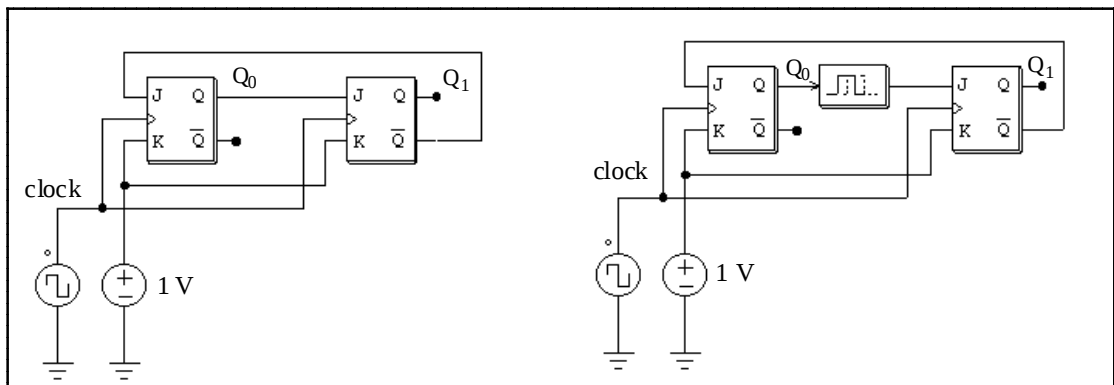
8.1.1 タイムステップ

PSIM ではシミュレーションのタイムステップは固定です。正確な結果を得るためには、タイムステップを適切に選ぶ必要があります。適切なタイムステップは、たとえば、スイッチ切り換え期間、パルスや方形波の幅、変化の速い過渡現象の継続時間などにより決まります。タイムステップはこれらの現象のうち最も応答時間が短いものに較べてさらに1桁以上小さくなるように設定してください。

8.1.2 論理回路の伝搬遅れ

PSIM 内部の論理回路は理想回路で伝搬遅れがありません。伝搬遅れを動作に含む論理回路をシミュレーションするには、PSIM では時間遅れ(TDELAY)ブロックと呼ばれる関数ブロックを使うことで伝搬遅れを実現できます。

この例として、2ビット・カウンタ回路を以下に示します。



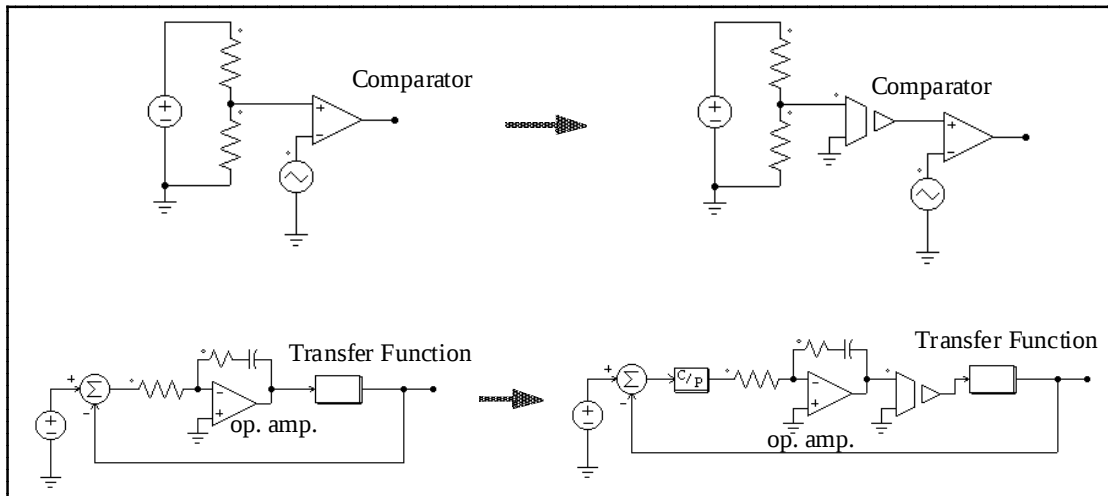
上の回路では、初期値 Q0 と Q1 はいずれも零と仮定しています。クロックの立ち上がりにおいて、Q0 は0から1に状態変化します。伝搬遅れなしとすると、Q1 は Q0 と同時に1に切り替わってしまいます。これを防ぐために、右の回路では1タイムステップの時間遅れを持つ時間遅れ要素を Q0 と次のフリップフロップの入力(J)の間に追加しています。

8.1.3 パワー回路と制御回路のインターフェース

PSIM ではパワー回路は個別の回路素子で表現され、制御回路は伝達関数ブロック線図で表現されています。パワー回路の要素、たとえば、RLC ブランチ、スイッチ、変圧器、相互結合インダクタ、電流源、接地されていない電圧源、そしてすべての制御付き電源は、制御回路では使うことができません。同様に、制御回路の要素、たとえば、論理ゲート、PI 制御器などの関数ブロックはパワー回路では使えません。

パワー回路と制御回路の入力を直接つなげた場合は、PSIM は電圧センサを自動的に挿入します。同様に、制御回路の出力を直接、パワー回路につなげた場合、制御・パワー変換ブロック(CTOP)が自動的に挿入されます。これらの様子を下の図に示します。

PSIM では、パワー回路と制御回路は別々に解かれることにご注意ください。パワー回路と制御回路の間には、1タイムステップ分の時間遅れがあります。



8.1.4 FFT による高調波解析

FFT を使って高調波解析をする場合、次の条件が満たされることを確認してください。

- 波形が定常状態に達したこと；
- FFT 解析に指定したデータの範囲が基本波の周期の整数倍であること。

たとえば、60Hz の波形では、データの長さは 16.67msec か、その倍数に設定する必要があります。これを守らないと FFT の結果が正しくありません。データ範囲の設定は、SIMVIEW で「X Axis」をクリックし、「Auto-scale」のチェックボックスをクリアした上で、From と To に適切な値を設定することで行うことができます。FFT 解析は画面に表示されている範囲に対してのみ実行されます。

FFT 解析結果は離散的であることに注意してください。FFT 解析結果は、データの時間間隔 Δt と解析するデータの長さ T_{length} に依存します (Δt はシミュレーションタイムステップの print step 倍です)。FFT 解析の基本波周波数は $1/T_{\text{length}}$ となり、 $\Delta f = 1/T_{\text{length}}$ 毎に解析結果が得られます。また、最大周波数は $f_{\text{max}} = 1/(2 \cdot \Delta t)$ となります。

例えば、1kHz の方形波を 10 μ s 刻みで 1ms 表示させて FFT 解析した場合、 $T_{\text{length}} = 1\text{ms}$ 、 $\Delta t = 10\mu\text{s}$ となります。従って、 $\Delta f = 1/T_{\text{length}} = 1\text{kHz}$ となり、解析結果の最高周波数は $f_{\text{max}} = 1/(2 \cdot \Delta t) = 50\text{kHz}$ となります。

8.2 デバッグ

シミュレーションで問題が発生する例について、対策方法を説明します。

問題

インダクタ電流とキャパシタ電圧のシミュレーション結果が急に变化する(不連続がある)。

対策

この障害はインダクタの電流経路を開いたか、キャパシタを含むループ回路を短絡したことが原因です。スイッチのゲート信号を調べてください。必要ならば、パルスを重ねたり、間隔を開いたりして開路や短絡を防いでください。

インダクタの初期電流が指定されているとき、スイッチの初期状態はそのような電流が流れるように閉状態としてください。そうでなければ、電流は零から始まることになります。

問題

波形が正しくない、または正確でない。あるいは、分解能が悪い。

対策

この原因は2つあります。ひとつは刻み時間の設定です。PSIM はシミュレーション全体で一定のタイムステップを使うので、タイムステップは充分に小さく設定するようにしてください。およその目安として、タイムステップはスイッチ周期の数十分の1にしてください。

もうひとつの原因は波形の表示のしかたです。表示刻み `lprint` が大きすぎないように設定してください。すべてのデータ点を表示するには `lprint = 1` とします。

8.3 エラーおよび警告メッセージ

次にエラーおよび警告メッセージについて解説します。

E-1 Input format errors occurred in the simulation.

(入力データの形式が正しくありません)

このエラーは次のいずれかの原因によります。

- データ設定が正しくないかまたは不足している
- 整数および文字列の入力が正しくない。

PSIM ライブラリが変更されていないか、またはお使いの PSIM が最新バージョンであることを確かめてください。

回路接続情報ファイルでは、文字列はアポストロフィで囲みます(例: 'test')。また、整数の変数に整数を指定していることを確認してください。整数のパラメータに実数を入れると(たとえば、3の代わりに3.)このエラーメッセージが出ます。

E-2 Error message: The node of an element is floating.

(端子が接続されていません)

このメッセージは PSIM で作成した回路の接続が悪いときに表示されます。2つの端子を結線するとき、端子が素子に接続されているか確かめてください。

E-3 Error message: No. of an element exceeds the limit.

(要素の数が多すぎます)

このメッセージはある要素の全体数がプログラムの上限を越えた時に出力されます。この問題を解決するには、PSIM プログラムの配列を大きくして再コンパイルする必要があります。弊社にご相談ください。

W-1 "Warning!!! The program failed to converge after 10 iterations when determining switch position. The computation continues with the following switch positions: ..."

(10回の収束計算でもスイッチの状態が決まりませんでしたが、スイッチの状態は以下のように決めてシミュレーションを続行します)

このメッセージはプログラムがスイッチ状態を決める過程で収束しなかったときに表示されます。シミュレーションは10回目の計算を終えた時点のスイッチ状態を使って続行します。シミュレーション結果は正確ではないかもしれません。結果を解析するときには充分ご注意ください。

この問題はいろいろな場合に生じる可能性があります。次の対策により、原因を特定し修正することができます。

- 回路の接続が正しいか確認してください。
- スwitchのゲート信号を調べてください。
- スwitchと電圧源に直列に小さな抵抗またはインダクタを接続してください。

W-2 "Warning!!! The program did not reach the steady state after 60cycles when performing the ac sweep."

(周波数解析を行いました、60回反復しても計算が収束しませんでした。)

このメッセージは周波数解析を行った際に、計算が 60 回反復しても収束しない問題が起きた場合に現れます。この問題の原因として、システムが、特定の周波数で著しく減衰を引き起こすものであるか、もしくは信号振幅が小さすぎるか、が考えられます。

以下の方法で問題を解決して下さい。

- 問題が起きた周波数の信号源で時間領域のシミュレーションを走らせ、時間領域の波形が発振していないかどうかを観て下さい。
- 信号レベルを上げるために入力の電圧源の振幅を大きくして下さい。
- または適切な時間区切りになるように時間ステップを減らして下さい。

PSIM Version 2022.1 User's Guide

発行：Myway プラス株式会社

〒220-0033

横浜市港北区新横浜 1-28-8

Myway テクノタワー

TEL：045-548-8836

ホームページ：<https://www.myway.co.jp>

Eメール：sales@myway.co.jp
