

PSIM アプリケーションノート AN001-01

100kW PMSM (永久磁石同期モーター) の制御設計

Mywayプラス株式会社

1. 概要

PMSM ドライブの制御ループ設計は簡単な作業ではありません。制御ループとして、内部電流ループと外部速度ループの設計が含まれます。また、モーター(PMSM)の非直線性およびスイッチングなどの他の要因やサンプリング周波数とモーターおよびドライブの効率を考慮する必要があります。このように、最適なパフォーマンスを引き出すためには、高度な制御アルゴリズムを開発して実装する必要があります。

PSIM のモーター・コントロール・デザイン・スイートを使用することで設計を容易にすることが出来ます。

モーター・コントロール・デザイン・スイートには、センサー付きまたはセンサーレス制御を備えた線形および非線形 PMSM および誘導機 (IM) 用の設計に指定された遮断周波数と安定余裕を備え、最大トルク/A (MTPA) 制御、弱め界磁制御などの高度な制御アルゴリズムを使用して、速度と電流ループのすべてを自動的に設計します。最大トルク/V (MTPV) 制御も設計できます。動作可能で、数分でシミュレートする準備ができるシステムを提案することができます。

このアプリケーション・ノートでは、PMSM (IPM) ドライブ (JMAG-RT) テンプレートを使用して、100 kW PMSM 用に最適化されたモーター・ドライブを設計する手順について説明します。

このテンプレートでは、IPM モーターは JMAG-RT モデルでモデル化されています。JMAG-RT モデルは JMAG の有限要素解析から導出されています。実際のモーターと比較して非常に高いレベルの忠実度と精度を提供し、すべての非線形効果（飽和、空間高調波など）が含まれていません。

線形 PMSM 駆動システムのモーターとは異なり、このシステムの JMAG-RT モーターは非線形動作であり、d 軸と q 軸のインダクタンスはモーター電流 I_d と I_q の関数です。非線形インダクタンス L_d と L_q は、JMAG-RT モデルからリアルタイムで取得され、さまざまな制御ブロックにフィードバックされて、最適な制御性能を実現します。

2. システム仕様

100 kW PMSM は、<https://www.jmaginternational.com/modellibrary/034/> から入手可能な JMAG-RT モーターモデル PMSMRTML-034 に基づいています。

上記の PMSMRTML-034 は、次のパラメータとなっています。

Model:	100k_D_C_IV	Height:	89 mm
Model Name:	PMSM	Magnet:	Neodymium sintered
Max. Power:	100 kW	Mass:	83.55 kg
Voltage/Current:	500 Vdc/200 A	Max. Motor Current:	283 A
Number of Poles:	12	Average Torque:	178 N*m
Number of Slots:	18	Ld:	0.24 mH
Number of Phases:	3	Lq:	0.36 mH
Rotor:	IPM	Inductance:	0.19 mH
Stator (outside dia.):	400 mm	Torque Constant:	0.627 N*m/A
Stator (inside dia.):	260 mm	Max. Speed:	9000 rpm
Stator:	Distributed winding	Inertia:	0.198 Kg*m ²

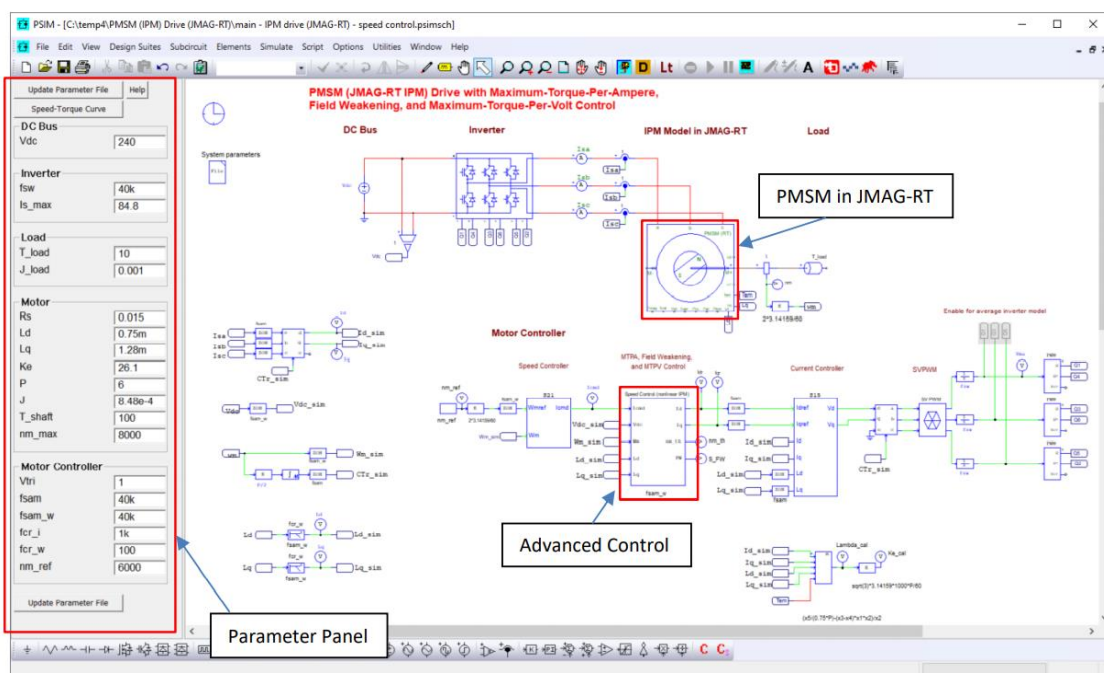
PSMS モーターの駆動には、直流バス 500V、電流 283A の三相インバーターを使用します。

3. 設計のステップ

以下の手順に従って、設計を実行します。

ステップ 1 : モーター・コントロール・デザイン・スイート・テンプレートを起動します。

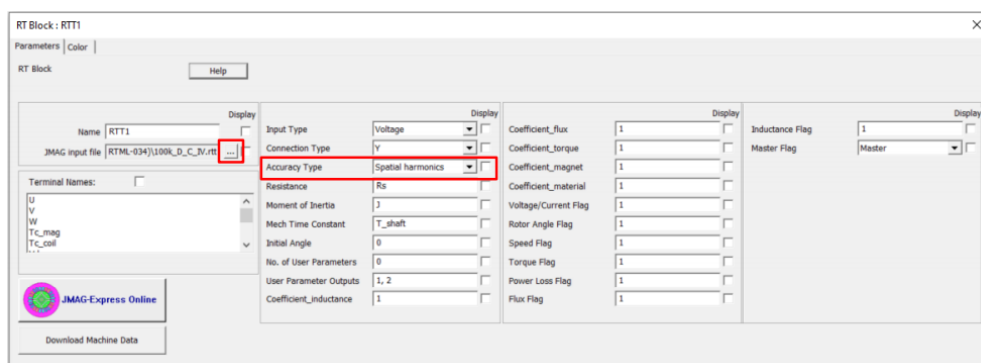
PSIM で、デザインスイート >> モーター・コントロール・デザインスイートに移動し、PMSM (IPM) ドライブ (JMAG-RT) を選択します。ファイルが解凍されているフォルダーを選択します。テンプレートは、以下に示すように PSIM にロードされます。



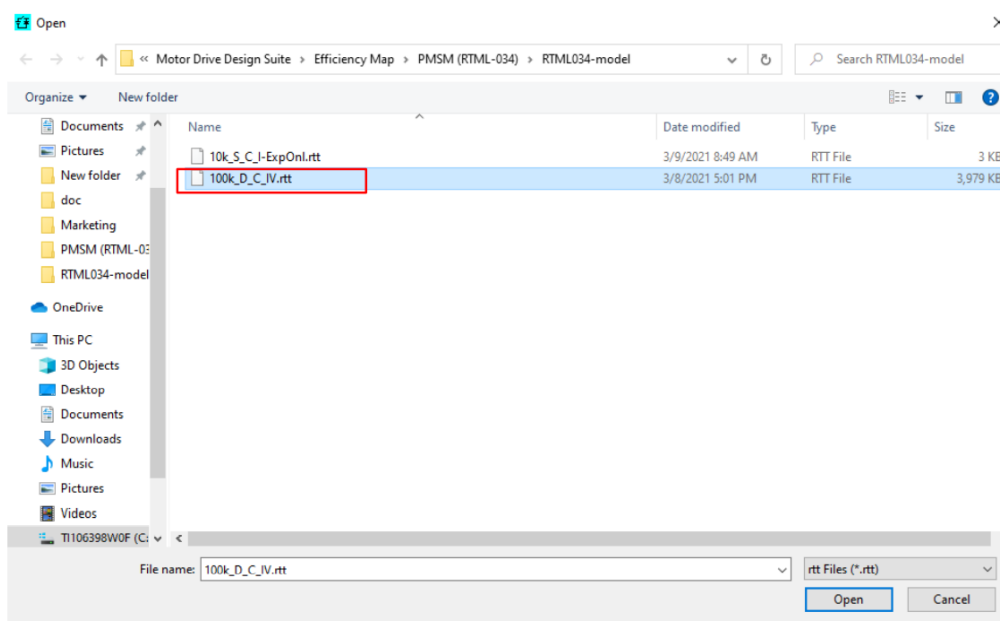
テンプレートの入力パラメータパネルと JMAG-RT モデルの PMSM ブロックが赤で強調表示されます。アドバンスド速度制御ブロック（これも赤で強調表示されています）には、MTPA、弱め界磁、MTPV 制御がすべて含まれています。

ステップ 2 : JMAG-RT モデル・ファイルをロードします。

PMSM ブロックをダブルクリックすると、次のダイアログ・メニューが表示されます。



上記の赤で強調表示をクリックします。以下に示すように、100 kW PMSM 用の JAG-RT ファイルを選択してロードします。



この JAG-RT モデルでは、空間高調波モデルを利用することができます。空間高調波効果を考慮に入れるには、精度タイプを空間高調波に設定します。

ステップ 3 : システム・パラメータの設定

以下に示すように、設計要件、動作条件、およびモーター・パラメーターに基づいて、パラメーター・パネルに直流バス、インバーター、負荷、モーター、およびモーター・コントローラーのパラメーターを入力します。

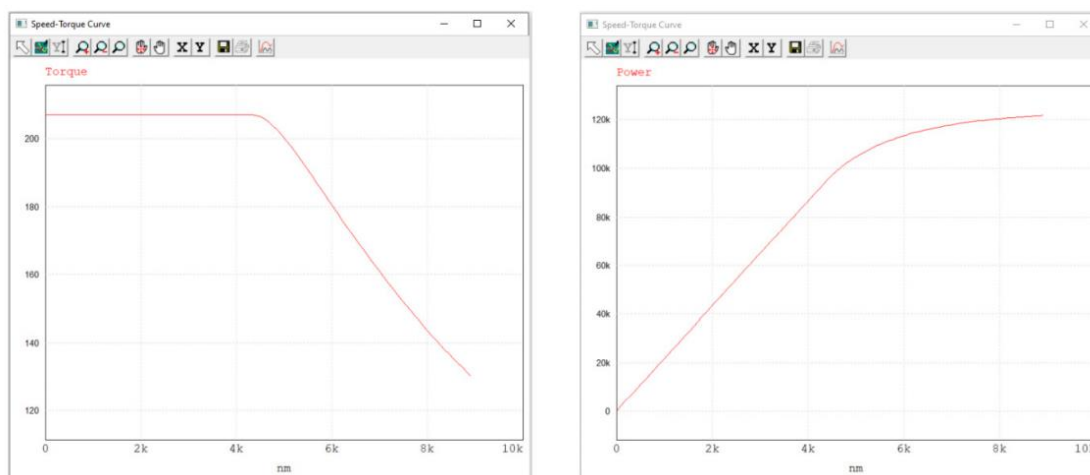
直流バス	
Vdc (動作直流バス電圧)	500
インバータ	
fsw (スイッチング周波数)	20k
Is max (最大インバータ電流)	283
負荷	
T load (トルク 負荷時)	25
J load (負荷慣性モーメント)	0.001
モーター	
Rs (ステータ 抵抗)	0.002
Ld (d-軸 インダクタンス)	0.22m
Lq (q-軸 インダクタンス)	0.35m
Ke (逆起電力)	80.3
P (極数)	12
J (慣性モーメント)	0.198
T shaft (シャフトの回転数)	100
mn max (最大速度)	9000
モーター制御	
Vtri (PWM キャリア振幅)	1
fsam (電流ループ・サンプリング周波数)	20k
fsam w (速度ループ・サンプリング周波数)	20k
fcr i (電流ループ遮断周波数)	1k
fcr w (速度ループ遮断周波数)	100
nm ref (速度基準 rpm)	6000

JMAG-RT モデルから 0.002 オームのステータ抵抗 Rs を求めることができます。

スイッチング周波数 fsw、電流ループのサンプリング周波数 fsam、および速度ループのサンプリング周波数 fsam_w の適切な値を決定する必要があります。また、電流ループと速度ループの遮断周波数 fcr_i と fcr_w を決定する必要があります。一般的に、fcr_i はおおよそ fsam / 10 以下に設定し、fcr_w はおおよそ fcr_i / 10 以下に設定する必要があります。

このモーターでは、100 kW の電力レベルを考慮して、fsw、fsam、および fsam_w を 20 kHz、fcr_i を 1 kHz、fcr_w を 100Hz に選択しています。

すべての入力パラメータを入力したら、[Speed - Torque Curve] ボタンをクリックして、以下に示すように、指定したパラメータに基づいたドライブの速度-トルク曲線と速度出力曲線を表示します。



これらの曲線は、シミュレーションを実行する前に、ドライブの動作境界をすばやく確認することができます。たとえば、この例の場合、最大トルクは約 $210 \text{ N} \cdot \text{m}$ であり、基本周波数（弱め界磁が始まる周波数）は約 4.4 kHz です。直流バス電圧とインバーター電流を変更して、その変更がドライブのトルクと電力にどのように影響するかを確認することもできます。

[Update Parameter File] ボタンをクリックして、シミュレーション用のシステム・パラメータを更新します。

パラメータ・ファイルには、以下に示すように、ユーザーが入力したパラメータとデザイン・スイートによって計算されたパラメータが含まれています。

```

62
63 //----- Inverter -----
64
65 Vs_max = 288.6751345948129 // maximum inverter ac voltage (phase peak)
66
67 //----- Motor -----
68
69 Te_max = 206.8099246708683 // calculated maximum torque based on current limit Ismax
70 K_TA = 0.7307771189783333 // torque constant, in N*m/A
71
72 //----- Motor Controller -----
73
74 // d-axis control loop
75 K_d = 25.13272 // PI gain
76 T_d = 499.9999999999999 // PI time constant
77
78 // q-axis control loop
79 K_q = 25.13272 // PI gain
80 T_q = 500.2531847133758 // PI time constant
81
82 PM_i = 72.55940461622478 // current loop phase margin, in deg.
83
84 // Speed control loop
85 K_w = 171.0990653002467 // PI gain
86 T_w = 0.01591550775244382 // PI time constant
87
88 PM_w = 78.57888009774129 // speed loop phase margin, in deg.
89

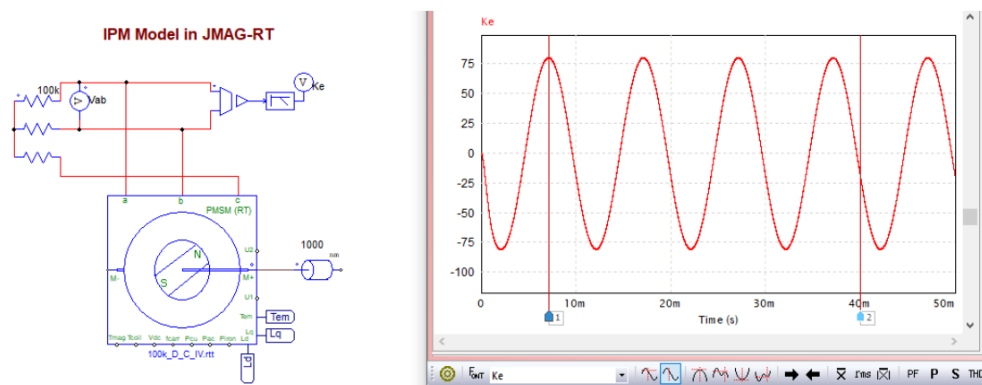
```

デザイン・スイートの重要な機能の1つは、電流ループと速度ループ・コントローラーのパラメーターが自動的に計算されるため、ユーザーがコントローラー自体を設計する際の時間と労力を大幅に節約できることです。

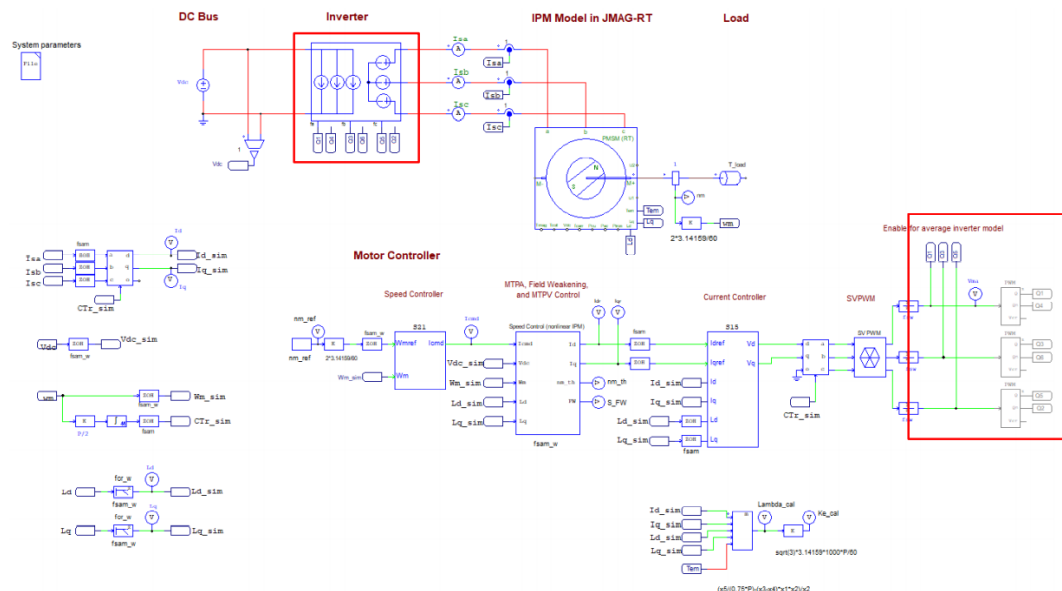
パラメータ・パネルのパラメータのいずれかが変更された場合は、パラメータ・ファイルの更新

をもう一度クリックしてパラメータ・ファイルを更新する必要があります。それ以外の場合、パラメーターは更新されません。

逆起電力定数 K_e が利用できない場合、または値を再確認したい場合は、以下に示すように、簡単なオープン・テスト・ファイル IPM ドライブ (JMAG-RT) -back-emf.test.psimsch を提供します。この回路はモーターを 1000rpm で動かします。ピーク線間電圧は K_e の値を示します。このモーターの場合、 $K_e = 80.3 \text{ Vpk} / \text{krpm}$ です。



ステップ 4 : インバーター平均モデルを使用してシミュレーションを実行します。パラメータ・ファイルが更新されると、シミュレーションを実行する準備が整います。以下に示すように、最初にインバーター平均モデルを使用してシミュレーションを実行することをお勧めします。回路への変更は赤で強調表示されます。



fsw、fsam、fsam_w、fcr_i、および fcr_w の初期値は最初のシミュレーションでは機能しない可能性があるため、平均モデルを使用すると、切り替えの影響が除かれ、制御ループを最初に機能させることに重点が置かれます。また、平均モデルを使用するとシミュレーションははるかに高

速です。

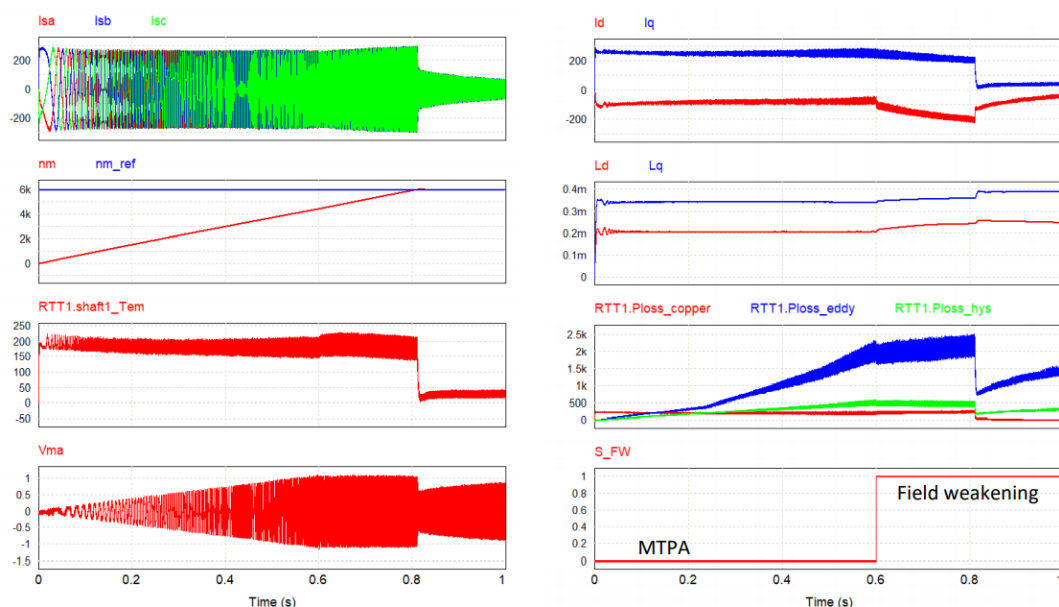
目的のパフォーマンスを実現するには、fsam、fsam_w、fcr_i、fcr_w、およびシミュレーションの時間ステップを調整する必要がある場合があります。

ステップ5: インバーター・スイッチング・モデルを使用してシミュレーションを実行します。システムがインバーター平均モデルで動作したら、インバーター・モデルをスイッチ・モデルに戻して、設計を検証します。

この場合も、目的のパフォーマンスを実現するために、fsw、fsam、fsam_w、fcr_i、fcr_w、およびシミュレーションのタイム・ステップを調整する必要がある場合があります。

注意しなければならない重要なシミュレーション波形の1つは、PWMブロックの入力での変調信号 Vma です。PWMインバータがPWM線形範囲で動作することを保証するために、Vmaが搬送波の範囲内にあることを確認してください。

この設計のシミュレーション結果を以下に示します。



この設計のシミュレーション結果を以下に示します。

左側の最初のウィンドウのトレースはモーター電流です。

左側の2番目のウィンドウのトレースは、速度基準と実際の速度です。約0.8秒で6000rpmに達します。

左側の3番目のウィンドウのトレースはモーター・トルクです。速度が基準値に達すると、200 N * mから25N * m (負荷トルク)に低下します。空間高調波によるトルク・リップルがはっきりと見えます。

左側の4番目のウィンドウのトレースは、線形範囲内にとどまる変調信号 Vma です。

右側の最初のウィンドウのトレースは、I_d および I_q 電流です。

右側の2番目のウィンドウのトレースは、L_d および L_q のインダクタンスです。

右側の3番目のウィンドウのトレースは、モーターの銅損 Ploss_copper、渦電流損失 Ploss_eddy、およびヒステリシス損失 Ploss_hys です。

右側の4番目のウィンドウのトレースは操作モードです。0.6秒前は、ドライブはMTPA制御で動作します。0.6秒後、ドライブは弱め界磁制御で動作します。

モーターのインダクタンス L_d と L_q は、電流 I_d と I_q によって異なります。 L_d と L_q の動的な性質が次のようになるように L_d と L_q (両方とも I_d と I_q によって変化する) がこれらのコントローラーにフィードバックされるdq電流制御ループとPMSMコントローラーに非線形制御を実装する必要があることは重要な点です。パフォーマンスを向上させるために、制御ループで考慮されます。

インバーターをサーマル・モジュールのインバーター・モジュールと交換することにより、デバイスのスイッチング損失と接合部温度も取得できます。JMAG-RT モーターモデルから得られたモーターの電力損失とともに、モーター駆動システム全体の電力損失と効率を評価することができます。

ご注意

1. 本資料に記載された製品の仕様は、予告なく変更することがあります。
2. 本資料の内容については、万全を期しておりますが、万一ご不明な点などがありましたら、弊社までお申しつけください。
3. 本資料に記載された情報に起因する損害または特許権その他権利の侵害に関しては、弊社は一切の責任を負いません。
4. 本資料によって第三者または弊社の特許権その他権利の実施権を許諾するものではありません。
5. 弊社の書面許諾なく、本資料の一部または全部を無断で複製することを固くお断りします。
6. 本資料に記載されている会社名、商品名は、各社の商標または登録商標です。

Copyright 2021 by Myway Corporation
All rights reserved. No part of this manual may be photocopied or reproduced in any form or by any means without the written permission of Myway Corporation.

発行: Myway プラス株式会社

〒220-0022

横浜市西区花咲町 6-145 横浜花咲ビル

TEL: 045-548-8836

FAX: 045-548-8832

ホームページ: <https://www.myway.co.jp>

Eメール: sales@myway.co.jp
