Renesas RA/RX ファミリ
高電圧インバータの PM センサレスベクトル制御

要旨

本サンプルプログラムは、RA ファミリ/RX26T CPU ボードとルネサスエレクトロニクス製 AC200V 高電圧インバータ MCI-HV-1 向けの PM センサレスベクトル制御機能と家電向けに使用される PFC 機能を主とする、以下の制御アルゴリズムを提供しています。

- 停止・低速運転時 オープンループ始動（電流引き込み制御）
- 中高速域運転時 誘起電圧オブザーバによる PM センサレスベクトル制御（1 シャント及び 3 シャント）
- 弱め磁束制御および最大トルク・電流制御（MTPA[1]）
- トルク振動抑制機能、脱調検出、フライングスタート（拾い込み制御）
- シングルフェーズ及びインターリーブ PFC 制御（力率改善および昇圧機能）

本アプリケーションノートでは、サンプルプログラムとインバータを組み合わせた使用方法と、設定方法、内部のプログラム仕様を解説し、インバータ開発における弊社 MCU や半導体デバイスの評価にご利用いただけます。図 1-1 に、本サンプルプログラムで使用するハードウェア構成図を示します。

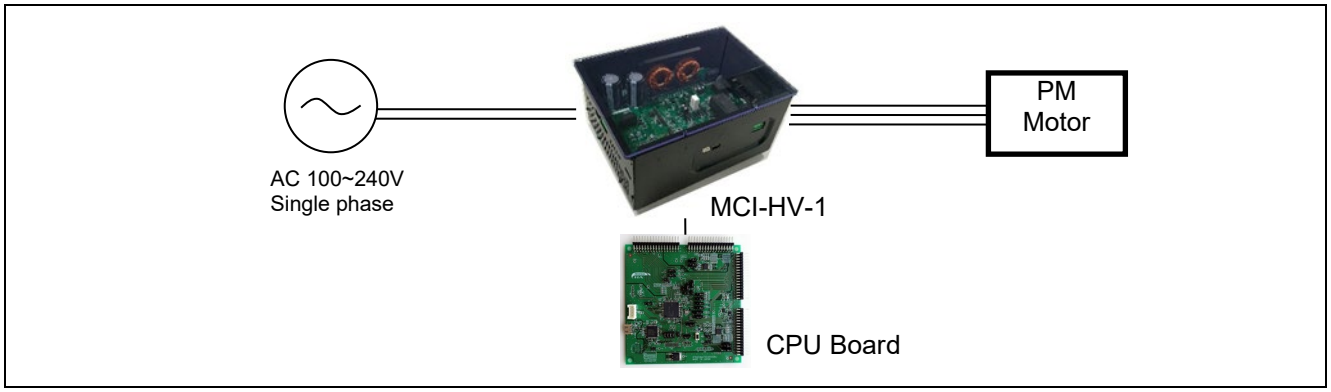


図 1-1　ハードウェア構成図

本アプリケーションノートで提供するサンプルプログラムは評価用途であり、弊社が所望の性能や動作を保証するものではありません。本サンプルプログラムを使用する場合、適切な環境で十分な評価をした上でご使用ください。

動作確認デバイス

本アプリケーションノート対象ソフトウェアの動作確認は下記のデバイスで行っています。

- RA6T2 (R7FA6T2BD3CFP)
- RA6T3 (R7FA6T3BB3CFM)
- RA4T1 (R7FA4T1BB3CFM)
- RX26T RAM64KBバージョン (R5F526TFCDFP)
- RX26T RAM48KBバージョン (R5F526TACDFM)

[1] MTPA 機能は IPMSM(埋込型永久磁石同期電動機)のみに使用可能です。SPMSM には使用できません。

目次

1. はじめに 6

2. 用語集 9

3. 使用機材・使用ソフトウェア 10
3.1 使用ハードウェアの一覧 10
3.2 使用ソフトウェアの一覧 11

4. ハードウェア環境構築方法 12
4.1 ハードウェア環境の概要 12
4.2 電源の準備 12
4.3 モータの準備 12
4.4 負荷機の準備 13
4.5 インバータの準備 13
4.6 CPU ボードのセットアップ 14
4.7 配線方法 17
4.8 測定器の利用 17

5. ソフトウェア環境構築方法 18
5.1 e2 studio を使用する場合 18

6. 運転方法 19
6.1 運転前の注意点 19
6.2 運転までの手順 19
6.3 接続方法 20
6.4 サンプルプログラムの書き込み 21
6.5 RMW の導入方法 21
6.6 Map ファイルの登録更新 22
6.7 RMW の通信設定 22
6.8 RMW の操作に使用する変数 23
6.9 操作方法 26
6.10 モータ停止・遮断方法 29

7. モータ制御アルゴリズム 30
7.1 概要 30
7.2 制御ブロック図 30
7.3 速度制御機能 31
7.4 最大トルク/電流制御(MTPA) 31
7.5 弱め磁束制御 32
7.6 電流制御機能 33
7.7 1 シャント電流検出 33
7.7.1 概要 33
7.7.2 原理 33
7.7.3 パルスシフト制御 35
7.7.4 1 シャント電流検出方式の実行フロー 36

7.7.5 周辺機能設定 40
7.8 非干渉制御 41
7.9 脱調検出 41
7.10 トルク振動抑制 42
7.10.1 概要 42
7.10.2 原理 42
7.10.3 繰り返し制御器のマイコンへの実装 43
(a) テーブル参照方式（LUT） 44
(b) 多項式近似方式（PAT） 44
7.10.4 進み補償 45
7.10.5 学習機能 45
7.11 フライングスタート 48
7.12 センサレス機能 51
7.12.1 概要 51
7.12.2 電流引き込み制御（OpenLoop） 51
7.12.3 中高速域センサレスアルゴリズム 52
7.13 サンプルディレイ補償 52
7.14 電圧誤差補償 52
7.15 PWM 変調方式 53

8. PFC 制御アルゴリズム 54
8.1 概要 54
8.2 制御ブロック図 54
8.3 電圧制御機能 55
8.4 パワー制限 55
8.5 電圧 Anti-windup 制御 56
8.6 電圧 FF 補償 56
8.7 電流制御機能 57
8.8 電流 Anti-windup 制御 57
8.9 デューティ FF 補償 57

9. ソフトウェア仕様・構成 58
9.1 ソフトウェア仕様 58
9.2 ソフトウェア全体構造 60
9.3 タスクの説明 61
9.4 ファイル・フォルダ構成 63
9.5 アプリケーション層 68
9.5.1 機能 68
9.5.2 構造体・変数情報 68
9.5.3 マクロ定義 70
9.5.4 パラメータ調整・設定 70
9.6 システムマネージャ 71
9.6.1 機能 71
9.6.2 モジュール構成図 71
9.7 モータマネージャ 72
9.7.1 機能 72
9.7.2 モジュール構成図 73

9.7.3 モード管理 74
9.7.4 シーケンスの説明 75
9.7.5 始動シーケンス 76
9.7.6 保護機能 77
9.7.7 API 78
9.7.8 構造体・変数情報 81
9.7.9 マクロ定義 89
9.8 PFC マネージャ 90
9.8.1 機能 90
9.8.2 モジュール構成図 90
9.8.3 シーケンス 90
9.8.4 保護機能 91
9.8.5 API 91
9.8.6 構造体・変数情報 92
9.8.7 マクロ定義 93
9.9 ドライバモジュール 94
9.9.1 機能 94
9.9.2 モジュール構成図 94
9.9.3 API 95
9.9.4 コンフィグレーション情報 95
9.9.5 構造体・変数情報 97
9.9.6 パラメータ調整・設定 99

10. パラメータの設定 100
10.1 概要 100
10.2 MCU 関連パラメータ 100
10.3 制御機能の設定パラメータの一覧 101
10.4 保護関連パラメータ 102
10.5 モータ制御用 PWM キャリア周波数の変更 102
10.6 パルス変調方法の設定 103
10.7 インバータパラメータ 104
10.7.1 概要 104
10.7.2 電流検出ゲイン 105
10.7.3 電圧検出ゲイン 106
10.7.4 電圧誤差補償パラメータ 106
10.8 モータパラメータ 109
10.9 電流制御パラメータ 111
10.10 最大トルク/電流制御 112
10.11 速度制御パラメータ 112
10.12 サンプルディレイ補償パラメータ 113
10.13 センサレス制御パラメータ 114
10.14 弱め磁束制御パラメータ 116
10.15 フライングスタートパラメータ 116
10.16 トルク振動抑制パラメータ 118
10.17 脱調検出パラメータ 120
10.18 PFC 制御パラメータ 122

11. FSP 設定(RA ファミリ MCU 用) 131
11.1 FSP の概要 131
11.2 FSP スタック設定 131
11.3 コールバック・割り込み 134
11.4 端子設定 136
11.5 PFC 用 GPT 設定 137
11.6 3 相 PWM GPT 設定 140
11.7 AGT0 設定(速度制御周期設定) 143
11.8 AGT1 設定(システムマネージャ制御周期設定) 143
11.9 ADC 設定 145
11.10 PFC 過電流用 IRQ 設定 152
11.11 POEG 設定 152
11.12 ELC 設定 153
11.13 IWDT 設定 154
11.14 DMAC 設定 0 154
11.15 DMAC 設定 1 156

12. Smart Configurator 設定(RX26T 用) 157
12.1 SC の概要 157
12.2 クロック設定 157
12.3 コンポーネント設定 157
12.4 AD 設定 159
12.5 CMT 設定 159
12.6 GPT 設定 159
12.7 POEG 設定 162
12.8 ICU 設定 162
12.9 ELC 設定 162
12.10 IWDT 設定 162
12.11 割り込み設定 163
12.12 端子設定 163

13. 評価結果 167
13.1 PFC 制御評価 167
13.1.1 入力電圧及び入力電流波形 167
13.1.2 インターリーブ PFC におけるリアクトル電流波形 167
13.1.3 PFC の効率及び力率 167
13.2 モータ制御評価 168
13.2.1 始動から閉ループ速度制御への移行 168
13.2.2 負荷運転 168
13.2.3 フライングスタート 169
13.2.4 トルク振動抑制制御 170
13.3 CPU 使用率 170
13.4 プログラムサイズ・RAM 使用量 171

14. FAQ 174

1. はじめに

本アプリケーションノートはルネサス製マイクロコントローラ(MCU)である RA ファミリまたは RX26T を使用し、永久磁石同期モータをセンサレスベクトル制御で駆動するサンプルプログラムの使用方法及びソフトウェアの構造・仕様・制御方法について説明することを目的としています。

ルネサス製インバータ MCI-HV-1 のセットアップ・使用方法、動作確認については、MCI-HV-1 ハードウェアユーザーズマニュアル (R12UZ0138)を参照ください。

サンプルプログラムは、ルネサス製 RA ファミリ CPU ボードまたは RX26T CPU ボードと、ルネサス製インバータ MCI-HV-1 を用いて、3 相 AC200V 系の PM モータである三菱電機(株)製 EM-AMF 0.75kW を、センサレスでモータ制御することができます。また、モータ制御開発支援ツール「Renesas Motor Workbench」に対応しており MCU の内部データ確認や、モータ制御のユーザインタフェース(UI)として使用可能です。サンプルプログラムの MCU 機能割り当てや、制御の割り込み負荷状況などを参照頂くことで、使用する MCU の選定やソフトウェア開発の参考としてご活用ください。

本アプリケーションノートは、本書内で記載している PM モータ・インバータ環境で開発・評価を行ったものであり、ユーザの使用する PM モータやインバータ環境で動作することを保証するものではありません。電流センサ自体や、信号経路の基板パターン設計、サンプリング・分解能・フィルタの仕様やモータの磁気飽和特性・個体差により、センサレス制御性能に制約が生じる場合があります。ユーザの責任の下で、アルゴリズムの改良や、パラメータのチューニングが必要となります。

本アプリケーションノートで記載している機材・機器については、各機器メーカーによる廃盤や改訂等により入手できない場合があります。予めご了承ください。

評価に使用した主な装置・機器

インバータ：ルネサス製　インバータ MCI-HV-1
モータ：三菱電機（株）製 PM モータ　EM-AMF 0.75kW

対象ソフトウェア

本アプリケーションノート対象ソフトウェアを下記に示します。

・RA6T2_MCB2_MCIHV1_PM_LESS_FOC_SPFC_E2S_V100（IDE：e2 studio版）
・RA6T2_MCB2_MCIHV1_PM_LESS_FOC_IPFC_E2S_V100（IDE：e2 studio版）
・RA6T2_MCB2_MCIHV1_PM_LESS_FOC_1SHUNT_SPFC_E2S_V100（IDE：e2 studio版）
・RA6T2_MCB2_MCIHV1_PM_LESS_FOC_1SHUNT_IPFC_E2S_V100（IDE：e2 studio版）
・RA6T3_MCB2_MCIHV1_PM_LESS_FOC_IPFC_E2S_V100（IDE：e^2 studio版）
・RA6T3_MCB2_MCIHV1_PM_LESS_FOC_1SHUNT_IPFC_E2S_V100（IDE：e^2 studio版）
・RA4T1_MCB2_MCIHV1_PM_LESS_FOC_IPFC_E2S_V100（IDE：e^2 studio版）
・RX26T_MCBA2_MCIHV1_PM_LESS_FOC_SPFC_E2S_V100（IDE：e^2 studio版）
・RX26T_MCBA2_MCIHV1_PM_LESS_FOC_IPFC_E2S_V100（IDE：e^2 studio版）
・RX26T_MCBA2_MCIHV1_PM_LESS_FOC_1SHUNT_SPFC_E2S_V100（IDE：e^2 studio版）
・RX26T_MCBA2_MCIHV1_PM_LESS_FOC_1SHUNT_IPFC_E2S_V100（IDE：e^2 studio版）
・RX26T_MCBC2_MCIHV1_PM_LESS_FOC_IPFC_E2S_V100（IDE：e^2 studio版）
・RX26T_MCBC2_MCIHV1_PM_LESS_FOC_1SHUNT_IPFC_E2S_V100（IDE：e^2 studio版）

参考資料

・RA6T2 グループ ユーザーズマニュアル ハードウェア編（R01UH0951）
・RA6T3 グループ ユーザーズマニュアル ハードウェア編（R01UH0998）
・RA4T1 グループ ユーザーズマニュアル ハードウェア編（R01UH0999）
・RX26T グループ ユーザーズマニュアル ハードウェア編（R01UH0979）
・Renesas Motor Workbench ユーザーズマニュアル（R21UZ0004）

・MCB-RA6T2 ユーザーズマニュアル（R12UZ0099）
・MCB-RA6T3 ユーザーズマニュアル（R12UZ0116）
・MCB-RA4T1 ユーザーズマニュアル（R12UZ0117）
・MCB-RX26T Type A ユーザーズマニュアル（R12UZ0112）
・MCB-RX26T Type C ユーザーズマニュアル（R12UZ0127）
・MCI-HV-1 ハードウェアユーザーズマニュアル（R12UZ0138）

本アプリケーションノートを使用いただく際に、よく確認される内容について、対応する章を以下にまとめています。

表 1-1 確認したい内容と対応章の一覧

確認したい内容	対応する章
必要な機材を確認・選定する	3
電源を選定する	4.2
モータを選定する	4.3
インバータを選定する	4.4
配線を確認する	4.7
サンプルプログラムの開発環境を準備する	5
マイコンにサンプルプログラムを書き込む	6.3, 6.4
PC にモータを運転するソフトウェアを導入する	6.5
サンプルプログラムを変更した後、RMW に変更点を反映する	6.6
サンプルプログラムの内部情報を PC 上で確認する	6.7
モータを運転する	6.9
運転中のモータを停止する	6.10
モータ制御アルゴリズムを調べる	7
PFC 制御アルゴリズムを調べる	8
サンプルプログラムの構造を調べる	9
インバータパラメータを確認、変更する	10.7,10.4, 11.8, 11.11, 11.4
モータパラメータを確認、変更する	10.8, 10.4
モータ制御の PWM キャリア周波数の変更	10.5
センサレスの設定を変更したい	10.13
マイコンの設定を変更したい	10.2,11
よくある質問を確認する トラブルが起きた場合の対応を確認したい	14

2. 用語集

本書で、使用されている主な用語と、その説明を、以下に示します。

表 2-1　用語集

用語	説明
IDE	統合開発環境のこと。e^2 studio 等を指します。
IPM モータ	IPMSM とも呼ばれ、回転子に磁石が埋め込まれており、効率や小型、コスト面で優位とされています。突極性があり、Ld と Lq が異なります。
MC-COM	波形表示用の接続治具・ツールのことを示します。詳細は、以下の URL を参照ください。 https://www.renesas.com/jp/ja/products/microcontrollers-microprocessors/rx-32-bit-performance-efficiency-mcus/rtk0emxc90s00000bj-mc-com-renesas-flexible-motor-control-communication-board#overview
PFC	Power Factor Control の略で、力率改善機能を示します。本書では、力率改善だけでなく、昇圧機能についても PFC の一機能として含めています。
RMW	Renesas Motor Workbench と呼ばれる、モータ制御に特化した操作ソフトウェアのこと。
SPM モータ	SPMSM とも呼ばれる。低速でも滑らかな動きが要求される、サーボモータに使用されます。
salient PMSM	PM モータのこと。
インバータ母線電圧	インバータ回路に入力される直流電圧のこと。直流中間電圧とも呼ばれる。
エミュレータ	MCU に書き込むための装置のこと。ICE とも呼ばれます。
オープンループ	位置のフィードバック信号なしで、電圧制御を行います。モータ制御方式の一種のこと。
スタック	FSP で生成された、MCU 周辺機能を使用しやすくするドライバモジュールのこと。
センサレス	「磁極位置センサや速度センサがないこと」を示します。
フィードバック制御	電流検出や、速度検出で得られるフィードバック信号を用いて制御する方式のこと。
埋込磁石型同期モータ	IPMSM または IPM モータのこと
表面磁石型同期モータ	SPMSM または SPM モータのこと
電気角	モータに流れる出力電流の位相角度のこと。モータの極対数で割ると、機械角に換算できる。
機械角	モータ軸の回転角度のこと。軸が 1 分に 1 回転で 1r/min となります。
SC	Smart Configurator の略で、マイコンの初期設定プログラムを自動で生成することができるツールです。

3.　使用機材・使用ソフトウェア

3.1　使用ハードウェアの一覧

本サンプルプログラムの評価に使用した機器の一覧を以下に示します。

表 3-1　使用機器一覧

機器	メーカー	型式
RA6T2 CPU ボード MCB-RA6T2 Version 2 	Renesas	RTK0EMA270C00002BJ *1 MCU 型式 RA6T2, R7FA6T2BD3CFP
RA6T3 CPU ボード MCB-RA6T3 Version 2 	Renesas	RTK0EMA330C00001BJ *2 MCU 型式 RA6T3, R7FA6T3BB3CFM
RA4T1 CPU ボード MCB-RA4T1 Version 2 	Renesas	RTK0EMA430C00001BJ *3 MCU 型式 RA4T1, R7FA4T1BB3CFM
RX26T CPU ボード MCB-RX26T Type A Version 2 	Renesas	RTK0EMXE70C00001BJ *4 MCU 型式 RX26T RAM64KB 版, R5F526TFCDFP
RX26T CPU ボード MCB-RX26T Type C Version 2 	Renesas	RTK0EMXE30C00001BJ *5 MCU 型式 RX26T RAM48KB 版, R5F526TACDFM
インバータボード 	Renesas	MCI-HV-1 RTK0EM0000B14030BJ
絶縁型通信ボード MC-COM 	Renesas	Renesas Flexible Motor Control Communication Board RTK0EMXC90S00000BJ
PM モータ	三菱電機（株）	EM-AMF 0.75kW
AC 電源装置	菊水電子工業	PCR2000MS
パワーメータ	横河計測	WT500

トルクメータ・負荷機	菅原研究所	TB-5N

【注】 1. RTK0EMA270C00000BJ は非対応ですのでご注意ください。
2. RTK0EMA330C00000BJ は非対応ですのでご注意ください。
3. RTK0EMA430C00000BJ は非対応ですのでご注意ください。
4. RTK0EMXE70C00000BJ は非対応ですのでご注意ください。
5. RTK0EMXE30C00000BJ は非対応ですのでご注意ください。

3.2　使用ソフトウェアの一覧

本サンプルプログラムの評価で使用したソフトウェアと、そのバージョンを以下に示します。本サンプルプログラムは、弊社開発環境である e² studio で、ご利用いただけます。

表 3-2　使用ソフトウェア一覧(RA6T2 を使用する場合)

メーカー	ソフトウェア	バージョン	備考
Renesas	e² studio	2024-07	無償版
Renesas	FSP	5.4	
Renesas	Renesas Motor Workbench	3.1.2	

表 3-3　使用ソフトウェア一覧(RA6T3、RA4T1 を使用する場合)

メーカー	ソフトウェア	バージョン	備考
Renesas	e² studio	2026-07	無償版
Renesas	FSP	6.5.1	
Renesas	Renesas Motor Workbench	3.3.1	

表 3-4　使用ソフトウェア一覧(RX26T RAM64KB 版を使用する場合)

メーカー	ソフトウェア	バージョン	備考
Renesas	e² studio	2024-07	無償版
Renesas	RX スマート・コンフィグレータ	V2.22.0	
Renesas	CC-RX	V3.06.00	無償評価版
Renesas	Renesas Motor Workbench	3.1.2	

表 3-5　使用ソフトウェア一覧(RX26T RAM48KB 版を使用する場合)

メーカー	ソフトウェア	バージョン	備考
Renesas	e² studio	2026-07	無償版
Renesas	RX スマート・コンフィグレータ	V2.30.0	
Renesas	CC-RX	V3.08.00	無償評価版
Renesas	Renesas Motor Workbench	3.3.1	

4.　ハードウェア環境構築方法

4.1　ハードウェア環境の概要

本サンプルプログラムを使用し、PM モータを動かすためのハードウェア環境について説明します。図 4-1 に、ハードウェア構成例を示します。

電源(4.2)と、モータ及び負荷機(4.3)、インバータ(4.4), CPU ボード及びモニタリング・書き込み装置(4.6)について、詳細を次の項から説明します。

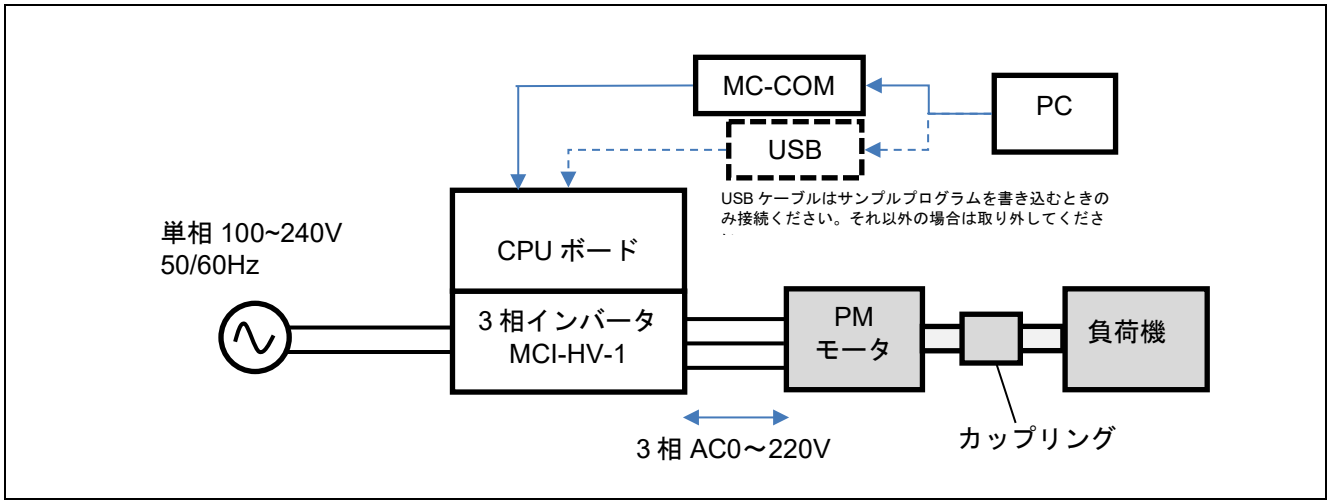


図 4-1　ハードウェア構成例

4.2　電源の準備

本サンプルプログラムで使用する MCI-HV-1 インバータは、単相 AC100~240V 50/60Hz を入力電源として使用できます。インバータに供給する電圧は、使用するモータの誘起電圧や定格条件、最大負荷条件によって変わります。AC200V 系の PM モータを駆動するために、十分な容量の電源を用意する必要があります。ユーザの実験環境や、使用する電源の制約や条件に応じて、電源の種類を適切に選定してください。

本サンプルプログラムでは、0.75kW の PM モータを駆動するため、1.0kVA 以上の電源供給が可能な設備を用意する必要があります。また、サンプルプログラムのデフォルト設定では 50Hz 対応となっているため、60Hz を使用する場合は 10.18(2)を参照してマクロ値を変更してください。

4.3　モータの準備

インバータとモータの配線を行います。事前に、センサレスベクトル制御で動かすために必要となる、PM モータのパラメータ・定数を LCR メータ等の測定器などを用いて取得してください。また必要に応じて、PM モータのメーカーにパラメータの情報を得るために問い合わせをしてください。

モータパラメータを変更した場合、電流調節器や速度調節器、センサレス制御のパラメータを、モータに合わせて変更を行います。

- 定格値（電流、電圧、速度、極対数）
- Ld、Lq、抵抗値
- 誘起電圧、鎖交磁束
- モータ及びモータの軸に繋がっている負荷装置のイナーシャ（慣性モーメント）

弊社で調査を行った、三菱電機（株）製 EM-AMF 0.75KW のモータパラメータを表 4-1 に示します。弊社で独自に測定したものであり、得られるパラメータには測定条件によるばらつきや個体差があります。この

パラメータは、正確性や性能を保証するものではありません。また、負荷電流によって生じる磁気飽和現象により、運転中にモータパラメータの値が変化し、位置推定精度や運転性能に影響する場合があります。

表 4-1　EM-AMF 0.75kW のモータパラメータ（一部、弊社独自測定によるもの）

一次抵抗 R	2.28Ω
d 軸インダクタンス	11.7mH
q 軸インダクタンス	15.7mH
慣性モーメント	0.000543 kgm^2
磁束鎖交数Ψ	0.263Wb(rms)
誘起電圧 Emf	234Vpeak
極対数	2（極数 4）
定格速度	3000r/min
最高速度	4000r/min
定格周波数	100Hz(電気角) , 50Hz(機械角)
定格電流	3.3Arms
定格トルク・最大トルク	2.39Nm / 4.78Nm

4.4　負荷機の準備

インバータ・モータ制御の評価のためには、出力特性を取得する必要があるため、負荷機が必要です。負荷機はユーザ自身でご用意ください。評価対象のモータに接続するタイプの負荷機を選定し、カップリングを行ってください。この時、トルクと速度を測定可能なトルク・速度計を負荷機のモータとの間に設置し、正確なトルク・速度特性が得られるようにしてください。

本評価においては、1kW 以上の負荷をかけることが可能な設備を使用しています。また、連続試験を行う場合には、供試機インバータに帰還するように回生動作が可能な負荷試験装置を使用することを推奨します。パウダーブレーキやヒステリシスブレーキを用いた負荷試験装置を使用する場合には、連続運転の制約などを確認の上、使用ください。

4.5　インバータの準備

インバータを準備される際に、以下の情報を確認してください。本サンプルプログラムでは、インバータボード MCI-HV-1 に合わせた設定となっています。

センサレスベクトル制御の制御性能は、電流センサから入力される電流検出値を用いて、磁極位置を推定するため、センサ自体の性能や、センサから出力される信号の経路となる回路のばらつき・精度に、大きく影響されます。インバータの選定や設計には、十分に配慮を行ってください。

- 定格容量(kVA)
- デッドタイム値(us)
- 電流センサの種類、特性、信号仕様
- 電流センサのゲイン値及びオフセット値、電流と電圧の関係性や信号の直線性の特性データ等
- 電圧センサのゲイン値及びオフセット値、信号の直線性の特性データ等

4.6　CPU ボードのセットアップ

MCI-HV-1 に差し込むことができる、RA ファミリ CPU ボード / RX26T CPU ボードの装着方法について説明します。MCI-HV-1 の基板上面に、CPU ボードを差し込むことができます。また、サンプルプログラムを書き込むための端子、MC-COM 接続用端子、外部エンコーダ接続用 PG 端子が用意されています。

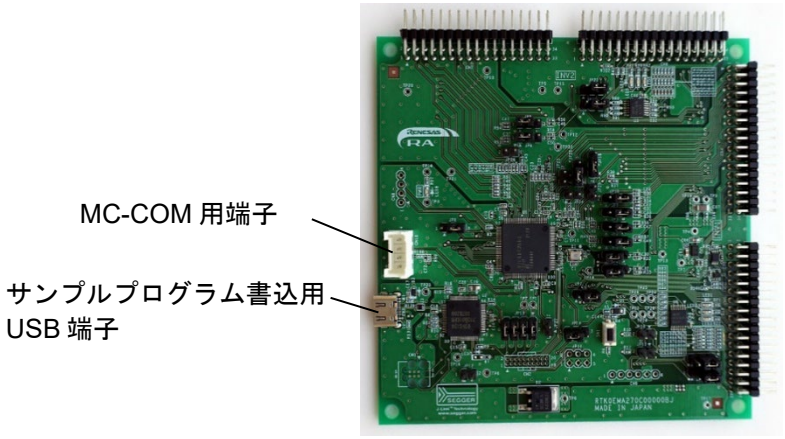


図 4-2　CPU ボードとインタフェース

表 4-2　CPU ボード上のジャンパ設定(RA6T2)

ジャンパ	ジャンパ設定	設定の意味
JP1-JP6	-	
JP7	1-2pin ショート	INV1 PFC 電流検出(インバータボード用)
JP8-JP9	-	
JP10	1-2pin ショート	INV1 AC 入力電圧検出(インバータボード用)
JP11	-	
JP12	1-2pin オープン	1-2pin ショート : J-Link OB 無効 1-2pin オープン : J-Link OB 有効
JP13	-	
JP14	1-2pin ショート	RA6T2 有効
JP15,JP16	-	
JP17	2-3pin ショート	INV1 エンコーダ A
JP18	2-3pin ショート	INV1 エンコーダ B
JP19	1-2pin ショート	INV1 W 相電圧検出
JP20	1-2pin ショート	INV1 V 相電圧検出

表 4-3　CPU ボード上のジャンパ設定(RA6T3、RA4T1)

ジャンパ	ジャンパ設定	設定の意味
JP1	1-2pin ショート	U 相電圧検出
JP2-JP6	-	

JP7	1-2pin ショート	1-2pin オープン : SW1 で制御 1-2pin ショート : JLOB と SW1 で制御 2-3pin ショート : リセット状態
JP8	1-2pin オープン	U 相電流検出
JP9-JP11	-	
JP12	1-2pin オープン	V 相電流検出
JP13	1-2pin オープン	W 相電流検出
JP14-JP16	-	
JP17	1-2pin オープン	1-2pin ショート : J-Link OB 無効 1-2pin オープン : J-Link OB 有効
JP18	2-3pin ショート	PFC 電流検出(インバータボード用)
JP19	2-3pin ショート	AC 入力電圧検出(インバータボード用)
JP20	2-3pin ショート	PFC PWM2 出力
JP21	2-3pin ショート	PFC PWM1 出力
JP22	1-2pin オープン	PFC PWM2 出力
JP23	2-3pin ショート	突入電流防止リレー制御

表 4-4　CPU ボード上のジャンパ設定(RX26T RAM64KB 版)

ジャンパ	ジャンパ設定	設定の意味
JP1	1-2pin ショート	INV1 U 相電圧検出
JP2	2-3pin ショート	INV1 PFC 電流検出(インバータボード用)
JP3	2-3pin ショート	INV1 AC 入力電圧検出(インバータボード用)
JP4	1-2pin ショート	INV2 U 相電圧検出
JP5	1-2pin ショート	INV2 V 相電圧検出
JP6	1-2pin ショート	INV2 W 相電圧検出
JP7	2-3pin ショート	INV1 エンコーダ A
JP8	2-3pin ショート	INV1 エンコーダ B
JP9	2-3pin ショート	INV2 エンコーダ A
JP10	2-3pin ショート	INV2 エンコーダ B
JP11	1-2pin ショート : PFC, モータ運転時 1-2pin オープン : サンプルプログラム書込み時	オンボードデバッガ
JP12	1-2pin ショート	MCU 電圧選択(5.0V)

表 4-5　CPU ボード上のジャンパ設定(RX26T RAM48KB 版)

ジャンパ	ジャンパ設定	設定の意味
JP1	1-2pin ショート	MCU 電圧選択(5.0V)

JP2	1-2pin ショート : PFC, モータ運転時 1-2pin オープン : サンプルプログラム書込み時	オンボードデバッガ
JP3	2-3pin ショート	PFC PWM2 出力
JP5	1-2pin オープン	PFC PWM2 出力
JP6	1-2pin オープン	PFC PWM1 出力
JP7	2-3pin ショート	AC 入力電圧検出(インバータボード用)
JP8	2-3pin ショート	PFC 電流検出(インバータボード用)
JP9	-	

4.7　配線方法

電源、インバータ、モータの配線方法について説明します。ご使用する装置によって、端子の名称は異なりますので、必ず装置の取扱説明書を参照して内容・仕様を確認の上、配線作業を行ってください。

図 4-3 に、電源～インバータ間の配線例を示します。ここでは、単相 AC200V/50Hz を出力可能な交流電源を用いて、CN2 の ACINL 端子・ACINN 端子に接続する例を示しています。図 4-4 に、インバータ～モータ間の配線例を示します。モータ配線は、CN5 の U,V,W 端子に接続します。安全のため、アースを電源入力コネクタ CN2 の FG 端子または CN5 の FG 端子に接続してください。

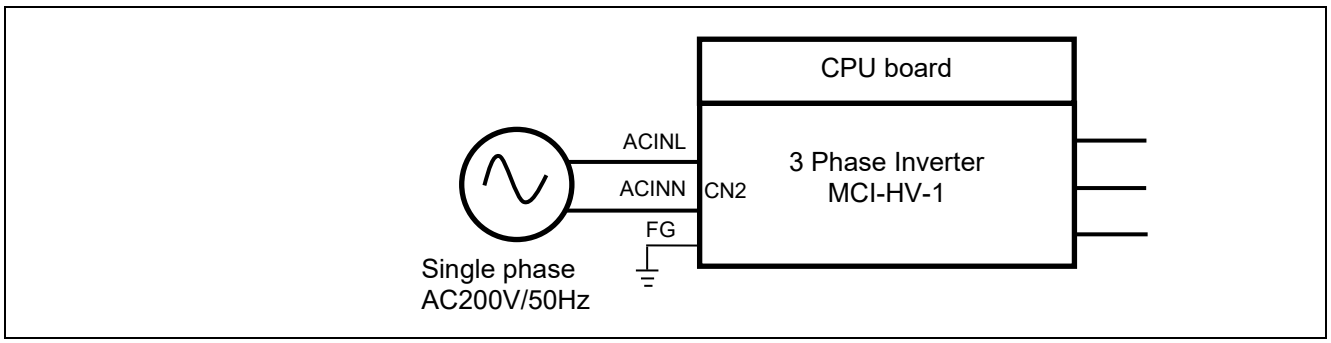


図 4-3　電源～インバータ間の配線

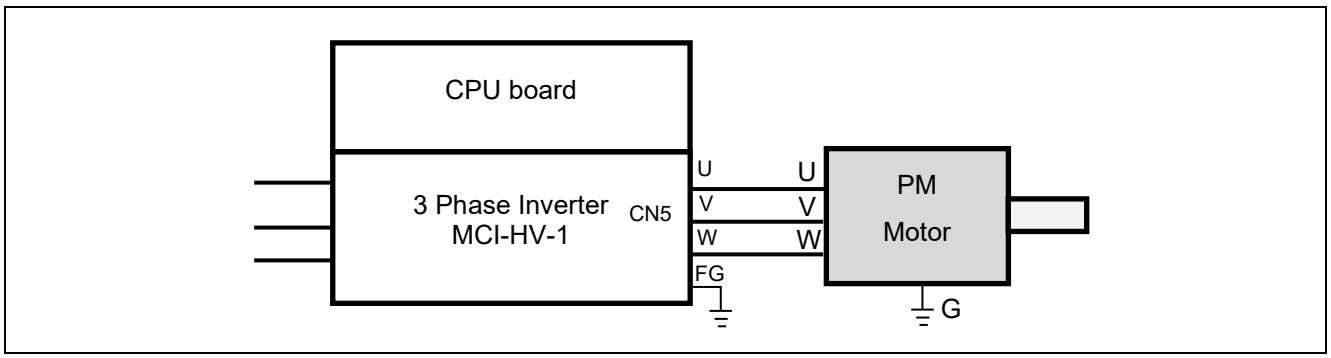


図 4-4　インバータ～モータ間の配線

MCI-HV-1は、2種類のモータ電流検出方式に対応しています。所望の電流検出方式に合うようにMCI-HV-1のジャンパを表4-6のように設定して下さい。また、ジャンパの変更は、安全のために必ずボードに電源を供給していない状態で行ってください。詳細については、MCI-HV-1 ハードウェアユーザーズマニュアル(R12UZ0138)を参考にしてください。また、駆動時にはマイコンへ書き込んだサンプルソフトウェアとMCI-HV-1の電流検出方式が一致していることを確認してください。

表 4-6　電流検出方式に応じたジャンパ設定（MCI-HV-1）

電流検出方式	ジャンパ	ジャンパ設定
3 シャント電流検出	JP1, JP2	1-2pin ショート
1 シャント電流検出		2-3pin ショート

4.8　測定器の利用

PM モータのセンサレス制御性能の評価を行う際には、パワーメータや、デジタルマルチメータ、トルクメータ、外付けエンコーダを用意することで、詳細なインバータ・モータ制御の分析が可能となります。ユーザ環境や、要求される測定精度、目標性能仕様に合わせて、必要な測定器を検討ください。

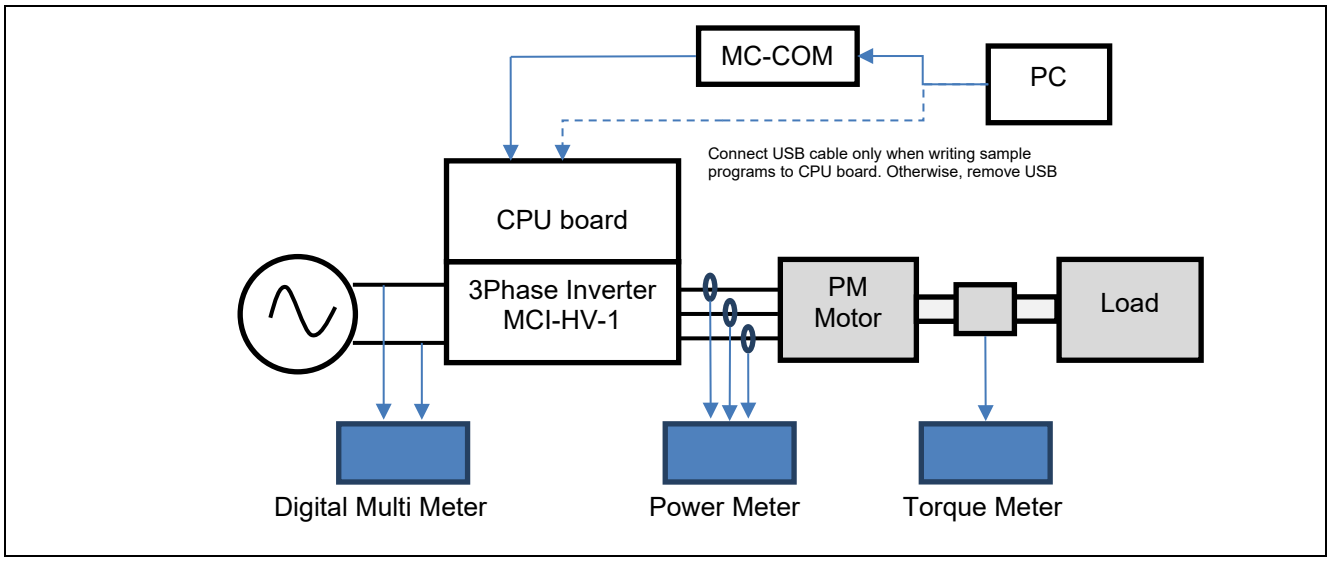


図 4-5　測定器の追加例

5.　ソフトウェア環境構築方法

5.1　e² studio を使用する場合

e² studio は RA ファミリおよび RX26T で使用可能です。以下の URL からダウンロードしてください。なお、e² studio と合わせて本サンプルプログラムで使用しているバージョンの FSP の導入も同時に必要となる場合もあります。

https://www.renesas.com/ja/software-tool/e-studio

RA6T2 に使用する場合には FSP5.4.0 と e² studio がセットになったインストールが容易なパッケージ版 FSP with e² studio でも利用が可能です。FSP のホームページ、または GitHub を参照してください。

https://www.renesas.com/ja/software-tool/flexible-software-package-fsp

https://github.com/renesas/fsp/releases

e² studio の詳細な使用方法は、上記 URL でダウンロードが可能な PDF マニュアルや、ビデオを参照してください。

6. 運転方法

6.1 運転前の注意点

モータを動かすにあたって、以下の点にご注意ください。誤った使い方により、感電や機器の故障等を引き起こす場合があります。

- MCI-HV-1 は、家電向けを想定したインバータです。主回路と CPU ボードの間は非絶縁です。CPU ボードの GND は主回路の N と同電位です。外部の機器や装置と信号を接続する場合、信号・電源の絶縁を考慮してください。
- サンプルプログラムを CPU ボードに書き込む際、インバータの主回路電源(AC100-200V)を印加しないでください。CPU ボードへサンプルプログラムを書き込む電源は USB ケーブルを通じて PC から供給するか、MCI-HV-1 の制御電源端子から電源を供給します。
- トレース実行・ブレークポイントを設定した条件でモータ制御しないでください。不意の停止により、インバータが異常な動作をする場合があります。RMW および MC-COM を使用して、安全機能が正常に動作する条件下で、デバッグを行ってください。
- モータを運転するときには、CPU ボードの USB コネクタから USB ケーブルを取り外してください。CPU ボードの USB コネクタは電気的に絶縁されていませんので、インバータ異常時に GND を通じて PC に悪影響や故障を発生させる場合があります。
- MC-COM は信号が絶縁されているため、AC100-200V の電圧が印加されてモータ運転中の場合であっても安全に使用できます。CPU ボード上の USB コネクタを使用する場合、PC とインバータ間が非絶縁のため、GND が共通となる場合があり、GND を介して感電事故の恐れや PC へのノイズの侵入、故障発生のリスクがあります。
- いかなる状況であっても、モータやインバータの緊急停止・動力遮断が可能なように、実験設備を構築してください。装置の非常停止ボタンを必ず、操作者のそばに配置してください。
- モータの軸は高速に回転しますので、必ずカップリング部にはガードとなるカバーを取り付けしてください。カップリング等の部品は、回転中に損傷した場合、回転軸の外に飛散する場合があります。
- インバータが停止しても、PM モータが回転している場合、PM モータは誘起電圧を発生させ、UVW 三相配線に電圧がかかります。露出した導電部に接触すると、感電の恐れがあります。高速回転時にインバータが停止し母線電圧が低下すると、モータのエネルギーがインバータの母線に流れ込み、インバータが過電圧となり故障する場合があります。評価環境では、インバータと PM モータの間には、電磁開閉器を設置し、緊急時にはインバータと PM モータの間を遮断するよう評価環境を構築してください。

6.2 運転までの手順

運転を行うための準備手順は、以下の通りです。

表 6-1　運転を行うまでの手順

手順	手順内容	関連する章
1	インバータボードにあらかじめ、CPU ボードを装着します。	4.6
2	サンプルプログラム、開発環境(e^2 studio)を使用する PC に導入します。	5
3	PC と、CPU ボードを USB ケーブルで接続し、CPU ボードに 5V の電源を供給する	6.3
4	サンプルプログラムを、開発環境でビルドする	6.4
5	ビルドしたサンプルプログラムを CPU ボードに書き込む	

6	PC と CPU ボードをつないだケーブルを取り外す	6.3
7	CPU ボードに MC-COM を接続する	6.3
8	インバータに AC200V/50Hz の電源を供給する	4.2
9	PC にインストールされた RMW を用いて、CPU ボードに MC-COM を経由して接続し、正しく接続できることを確認する	6.5
10	本サンプルプログラムの変数や、センサ情報などが正常に RMW で表示されていることを確認する	6.7
11	RMW を用いて、モータの運転操作を行います。	6.9
12	モータを停止・遮断する	6.10

6.3　接続方法

書込み時と、運転操作時で、CPU ボードと PC の間で使用する機器が異なるため、ご注意ください。以下に、①書込み時と、②運転操作時についての配線方法を説明します。なお、以下の手順では RA6T2 を想定して記述を行っています。RA6T2 以外の CPU を使用する場合には、本章と使用する CPU ボードのユーザーズマニュアルを参考にしてください。

① 書込み時

CPU ボードには、書き込み用の専用回路が実装されており、外付けの ICE(InCircuitEmulator)は必要ありません。なお、CPU ボードの USB ポートは電気的に絶縁されていませんので、運転操作時には安全のため USB ケーブルを CPU ボードから必ず取り外してください。

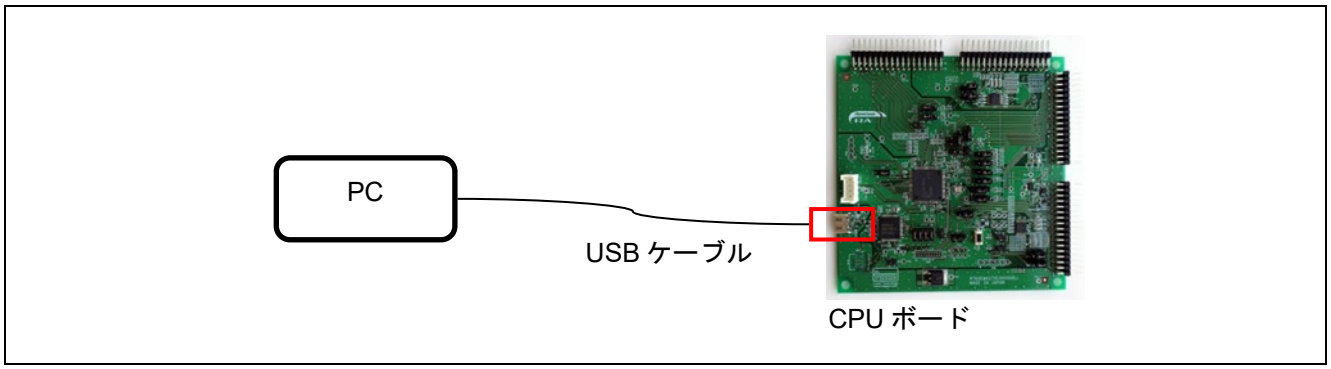


図 6-1　書込み時の配線例

② 運転操作時

MC-COM(RTK0EMXC90S00000BJ)を用いて、CPU ボードに接続します。また、通信 I/F の電源は MCI-HV-1 の CN12 端子に接続された USB ケーブルから供給されます。PC とは、UART 経由で接続された状態となり、PC からは COM ポートを用いて操作することができます。後述する RMW を用いて、運転操作を行います。MC-COM はインバータと PC の間を電気的に絶縁しますので、高電圧環境下でも、安全にご利用いただけます。

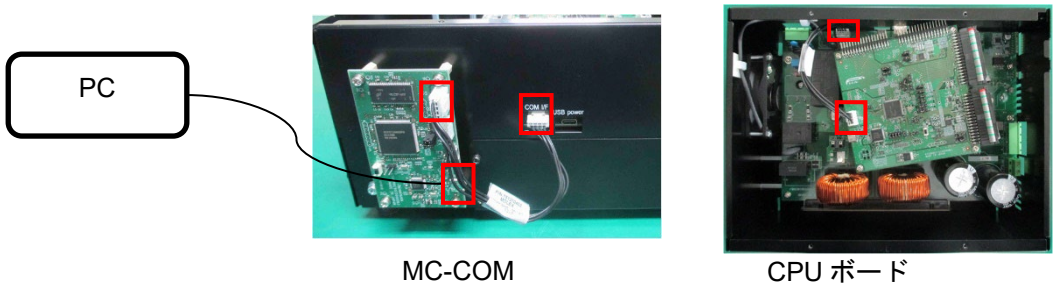


図 6-2　運転操作時の配線例

6.4　サンプルプログラムの書き込み

弊社 WEB サイトからダウンロードしたサンプルプログラムを、e² studio を使用して CPU ボードの MCU に書き込んでください。

プログラムの書き込み方法は e² studio の取扱説明書を参照してください。CPU ボード上にはエミュレータに相当する回路があらかじめ組み込まれています。プログラムを書き込むために別売の専用エミュレータを用意する必要はありません。USB ケーブルで CPU ボードと PC を接続することで、e² studio のデバッグ書き込み機能によって、CPU ボードにサンプルプログラムを書くことができます。

6.5　RMW の導入方法

モータ制御開発支援ツール「Renesas Motor Workbench（RMW）」をユーザインタフェース（回転／停止指令、回転速度指令等）として使用します。モータ制御開発支援ツール「Renesas Motor Workbench」は弊社 WEB サイトより入手してください。

Renesas Motor Workbench WEB サイト URL:
https://www.renesas.com/jp/ja/software-tool/renesas-motor-workbench

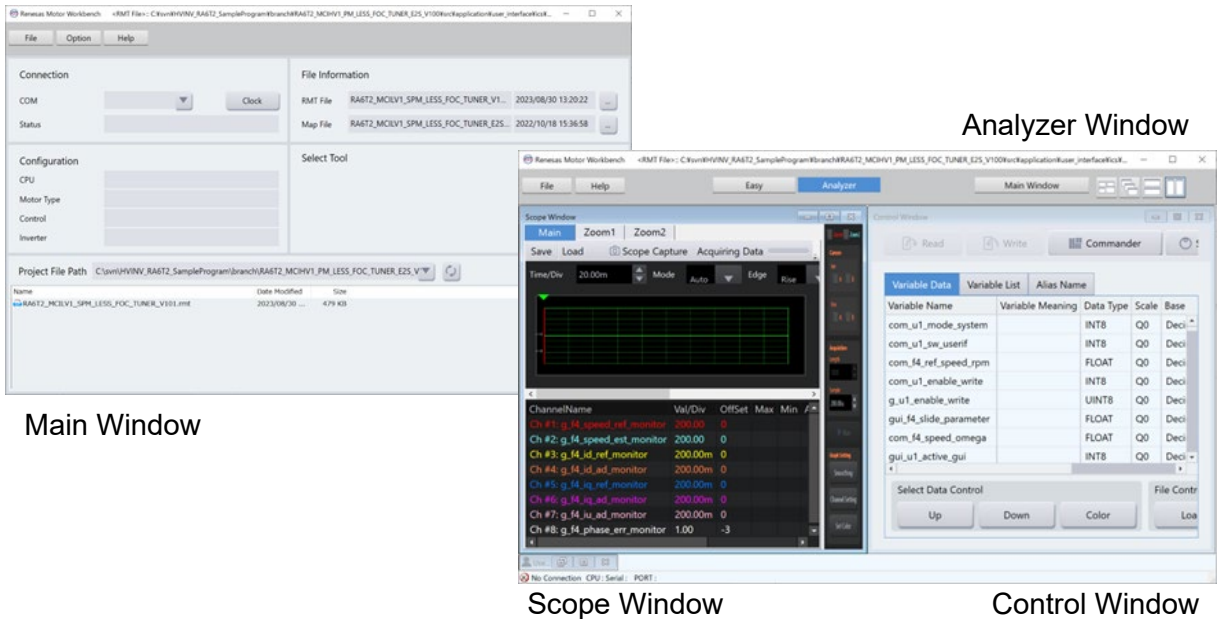


図 6-3　Renesas Motor Workbench 外観

6.6　Map ファイルの登録更新

ユーザがサンプルプログラムの一部を変更してビルドをし直した場合、変数などのアドレス情報が変更される場合があるため、記載された Map ファイルを RMW に登録更新する作業が必要になります。サンプルプログラムの変更を行っていない場合には、Map ファイルの登録更新作業は不要です。

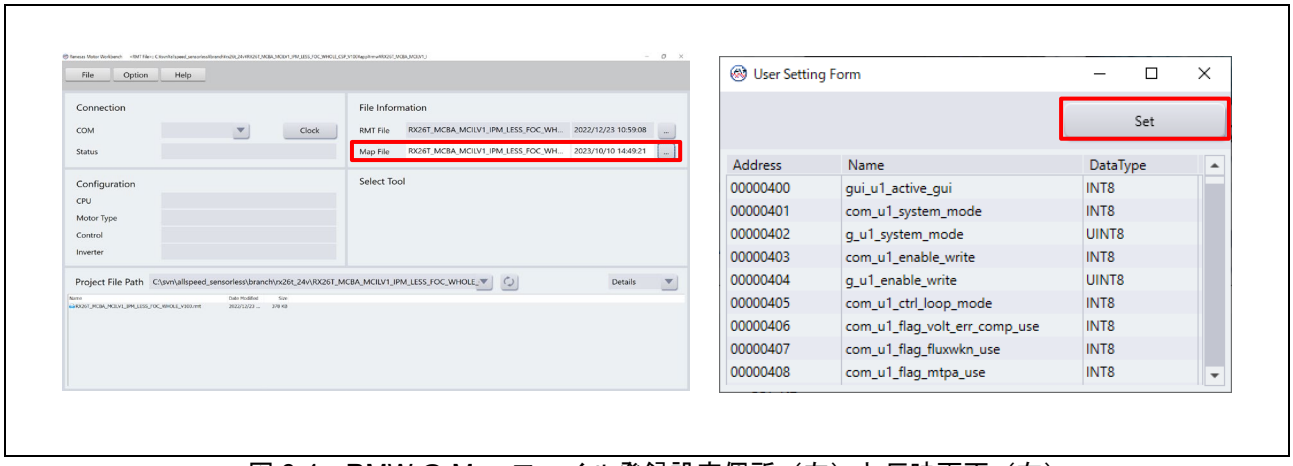


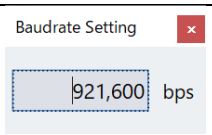
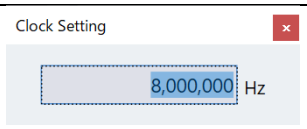
図 6-4　RMW の Map ファイル登録設定個所（左）と反映画面（右）

6.7　RMW の通信設定

本サンプルプログラムでは、RMW の通信設定を表 6-2 に示すように設定しています。

通信設定が正しい場合でも、CPU ボードの起動状況によっては、通信がうまくいかない場合があります。その際は、CPU ボードやインバータの制御電源を入れなおすことで改善する場合があります。

表 6-2　RMW の通信設定

設定項目	設定値	設定画面例
ボーレート	921,600[bps]	
Clock Setting	8,000,000[Hz]	

6.8　RMW の操作に使用する変数

本サンプルプログラムで、モータを動かす場合には、RMW を用いて制御します。RMW UI 使用時の入力用変数一覧を表 6-3 に示します。なお、これらの変数への入力値は com_u1_enable_write に 0/1 をトグルして書き込んだ場合にモータモジュール内の対応する変数へ反映され、モータ制御に適用されます。ただし、(*)が付けられた変数は com_u1_enable_write のトグルの有無に関係なく反映されます。

その他のモータ制御に用いるパラメータは、表 6-5 を参照してください。

なお、変数名の接頭辞(u1,f4 等)は変数型の省略形となっています。RMW は、変数名の接頭辞を自動認識して型を自動で選択し、Control Window で変数内部の数値の表示を行います。

表 6-3　Analyzer 機能主要入力用変数一覧

Analyzer 機能入力用変数名	型	内容
com_u1_system_mode (*)	uint8_t	ステート管理 0：モータ停止モード 1：モータ駆動モード 3：エラーリセット
com_f4_ref_speed_rpm (*)	float	速度指令値（機械角）[r/min]
com_u1_enable_write	uint8_t	ユーザ入力用変数書き換え許可 g_u1_enable_write と変数一致で入力データ反映
g_u1_update_param_flag	uint8_t	バッファ転送完了フラグ
g_u1_system_mode	uint8_t	システムモード 0：モータ停止 1：モータ駆動 2：エラー
g_u1_enable_write	uint8_t	変数書き換え許可

次に速度制御の駆動評価を行います。その際に観測することの多い主要な構造体変数の一覧を表 6-4 に示します。Analyzer 機能で波形表示します。変数の値を読み込む際に参考にしてください。

表 6-4　主要変数一覧

主要変数名	型	内容
g_st_sensorless_vector.u2_error_status	uint16_t	エラーステータス。詳細は 6.9 (f)“止まってしまった（エラー）場合の処理”を参照
g_st_cc.f4_vdc_ad	float	インバータ母線電圧値[V]
g_st_cc.f4_id_ref	float	d 軸電流指令値 [A]
g_st_cc.f4_id_ad	float	d 軸電流検出値 [A]
g_st_cc.f4_iq_ref	float	q 軸電流指令値 [A]
g_st_cc.f4_iq_ad	float	q 軸電流検出値 [A]
g_st_cc.f4_iu_ad	float	U 相電流検出値 [A]
g_st_cc.f4_iv_ad	float	V 相電流検出値 [A]
g_st_cc.f4_iw_ad	float	W 相電流検出値 [A]
g_st_cc.f4_vd_ref	float	d 軸電圧指令値 [V]
g_st_cc.f4_vq_ref	float	q 軸電圧指令値 [V]
g_st_cc.f4_refu	float	U 相電圧指令値 [V]
g_st_cc.f4_refv	float	V 相電圧指令値 [V]
g_st_cc.f4_refw	float	W 相電圧指令値 [V]
g_st_cc.st_rotor_angle.f4_rotor_angle_rad	float	推定磁極位置[rad]
g_st_sc.f4_ref_speed_rad_ctrl	float	速度指令値（機械角）[rad/s]
g_st_sc.f4_speed_rad	float	速度検出値（機械角）[rad/s]

以下に示す com 変数は、RMW からの操作で、モータの定数やゲイン・パラメータを動的に変更することができます。ただし、電源の入り切りやマイコンのリセットによって、書き込んだ値はクリアされますので、使用時はご注意ください。

表 6-5　com 変数一覧

変数	説明
com_u2_offset_calc_time	電流オフセット値計算時間設定
com_u2_charge_bootstrap_time	ブートストラップ回路への充電時間[cnt]
com_u2_mtr_pp	駆動するモータの極対数
com_f4_mtr_r	駆動するモータの抵抗* [Ω]
com_f4_mtr_ld	駆動するモータの d 軸インダクタンス* [H]
com_f4_mtr_lq	駆動するモータの q 軸インダクタンス* [H]
com_f4_mtr_m	駆動するモータの磁束* [Wb]
com_f4_mtr_j	駆動するモータのロータイナーシャ [kgm^2]
com_f4_nominal_current_rms	駆動するモータの定格電流 [Arms]
com_f4_max_speed_rpm	駆動するモータの速度最大値（機械角）[r/min]
com_f4_current_omega_hz	電流制御系固有周波数 [Hz]
com_f4_current_zeta	電流制御系減衰係数
com_f4_speed_omega_hz	速度制御系固有周波数 [Hz]
com_f4_speed_zeta	速度制御系減衰係数
com_f4_speed_lpf_hz	速度 LPF カットオフ周波数[Hz]
com_f4_speed_rate_limit_rpm	速度指令最大増減幅 [r/min/s] （速度制御時使用,機械角）
com_f4_overspeed_limit_rpm	速度制限値（機械角）[r/min]
com_u1_flag_volt_err_comp_use	電圧誤差補償の設定　0：無効，1：有効

変数	説明
com_u1_flag_mtpa_use	最大トルク/電流制御の設定　0：無効，1：有効
com_u1_flag_fluxwkn_use	弱め磁束制御の設定　0：無効，1：有効
com_u1_flag_flying_start_use	フライングスタートの設定　0：無効，1：有効
com_u1_flag_stall_detection_use	脱調検出の設定　0：無効，1：有効
com_u1_flag_trq_vibration_comp_use	トルク振動抑制の設定　0：無効，1：有効
com_u1_flag_less_switch_use	オープンループ制御時の切り替え機能設定　0：無効，1：有効
com_u1_flag_openloop_damping_use	オープンループ制御時のダンピング制御設定 0：無効，1：有効
com_f4_e_obs_omega_hz	誘起電圧推定系固有周波数 [Hz]
com_f4_e_obs_zeta	誘起電圧推定系減衰係数
com_f4_pll_est_omega_hz	位置推定系固有周波数 [Hz]
com_f4_pll_est_zeta	位置推定系減衰係数
com_f4_switch_phase_err_deg	センサレス切り替え判断の角度誤差の閾値 [degree]
com_f4_opl2less_sw_time	センサレス切り替え時間 [s]
com_f4_phase_err_lpf_cut_freq	角度誤差に対する LPF カットオフ周波数 [Hz]
com_f4_ed_hpf_omega	ダンピング制御・HPF 係数
com_f4_ol_ref_id	オープンループ制御・d 軸電流指令値[A]
com_f4_id_up_time	d 軸電流上昇時間 [cnt]
com_f4_id_down_time	d 軸電流下降時間 [cnt]
com_f4_id_down_speed_rpm	モータ制御方式切り替え速度（加速時）[r/min]
com_f4_id_up_speed_rpm	モータ制御方式切り替え速度（減速時）[r/min]
com_f4_ol_damping_zeta	ダンピング制御・減衰係数
com_f4_ol_damping_fb_limit_rate	ダンピング制御・フィードバック制限率
com_f4_id_hpf_time	脱調検知・d 軸電流 HPF 時定数[s]
com_f4_iq_hpf_time	脱調検知・q 軸電流 HPF 時定数[s]
com_f4_threshold_level	脱調検知・検知レベル[A]
com_f4_threshold_time	脱調検知・検知時間[s]
com_f4_timelead_1f/2f	トルク振動抑制・位相進み [rad]
com_f4_tf_lpf_omega	トルク振動抑制・TF 内部の LPF の固有周波数 [Hz]
com_f4_output_gain1f/2f	トルク振動抑制・繰り返し制御器への入力値に対するゲイン
com_u1_flag_trqvib_comp_learning	トルク振動抑制・学習機能 ON/OFF フラグ
com_f4_input_weight2	トルク振動抑制・入力重み 2
com_f4_input_weight1	トルク振動抑制・入力重み 1
com_f4_input_weight0	トルク振動抑制・入力重み 0
com_f4_suppression_th_1f/2f	トルク振動抑制・抑制目標
com_f4_abnormal_output_th_1f/2f	トルク振動抑制・TF 出力異常度の閾値
com_f4_restart_speed	フライングスタート・再起動判定速度[r/min]

変数	説明
com_f4_off_time	フライングスタート・短絡オフ時間[s]
com_f4_over_time	フライングスタート・超過判定時間[s]
com_f4_active_brake_time	フライングスタート・ブレーキ時間[s]
com_f4_on_current_th	フライングスタート・オン時間電流閾値[A]

*モータ停止時のみに反映可能

6.9　操作方法

RMW の Analyzer 機能を使用し、モータを操作する例を以下に示します。操作は、RMW 画面上の“Control Window”で行います。“Control Window”の詳細は、「Renesas Motor Workbench ユーザーズマニュアル」を参照してください。

(a)　サンプルプログラムの書き込み

CPU ボードには、あらかじめ、サンプルプログラムを書き込んだものとします。書き込み方法は、6.4 で解説しています。

(b)　電源投入

インバータには、あらかじめ、MC-COM を介してご利用の PC と USB 接続した状態とします。インバータに AC100V または AC200V 50Hz の電源を投入します。投入後、突入電流防止リレーが ON した後、自動的に母線電圧が 390V に昇圧されます。

(c)　RMW の起動

ご利用の PC にあらかじめインストールした RMW を起動してください。起動後、CPU ボードが該当する COM ポートを選択し、Analyzer を選択して接続を確立してください。

(d)　モータを回転させる

PFC が正常に動作していることを確認する必要があります。"g_st_pfc_manager.u2_run_mode"が 3 になっていることを確認します。

確認後、以下の操作を行います。

① “Read”ボタンを押して“g_st_sensorless_vector.f4_vdc_ad”に、約 390V が印加されているのを確認します。
② “g_st_sensorless_vector.u2_error_status”が 0 になっていることを確認します。0 以外の場合は後述の(f)に説明されている操作を行い、エラー状態をクリアしてください。
③ “com_u1_system_mode”、“com_f4_ref_speed_rpm”の[W?]欄に“チェック”が入っていることを確認します。
④ 指令回転速度を“com_f4_ref_speed_rpm”の[Write]欄に入力します。
⑤ “com_u1_system_mode”の[Write]欄に“1”を入力します。
⑥ “Write”ボタンを押す。
⑦ モータが回転したことを確認します。

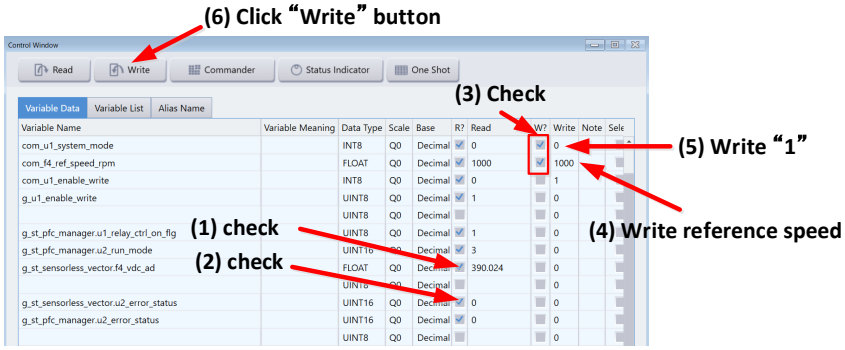


図 6-5　モータ回転の手順

(e)　モータを停止させる

以下の操作を行う事で、モータを停止させることができます。

① “com_u1_system_mode”の[Write]欄に“0”を入力します。
② “Write”ボタンを押す。
③ モータが停止したことを確認します。

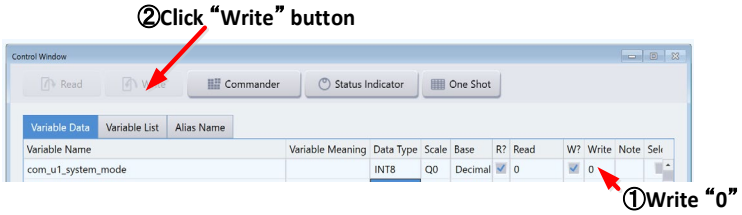


図 6-6　モータ停止の手順

(f)　止まってしまった（エラー）場合の処理

以下の操作を行う事で、エラー状態をクリアできます。エラー状態をクリアすると、運転を再開できます。以下の操作を行わないと、(d)の運転操作ができませんので、ご注意ください。

① モータ制御でのエラーについては、表 6-6 を参照し、“g_st_sensorless_vector.u2_error_status”の値を確認してください。エラー原因への対処を行います。
PFC 制御のエラーについては、表 6-7 を参照し、” g_st_pfc_manager.u2_error_status”の値を確認してください。
② “com_u1_system_mode”の[Write]欄に“3”を入力します。
③ “Write”ボタンを押す。

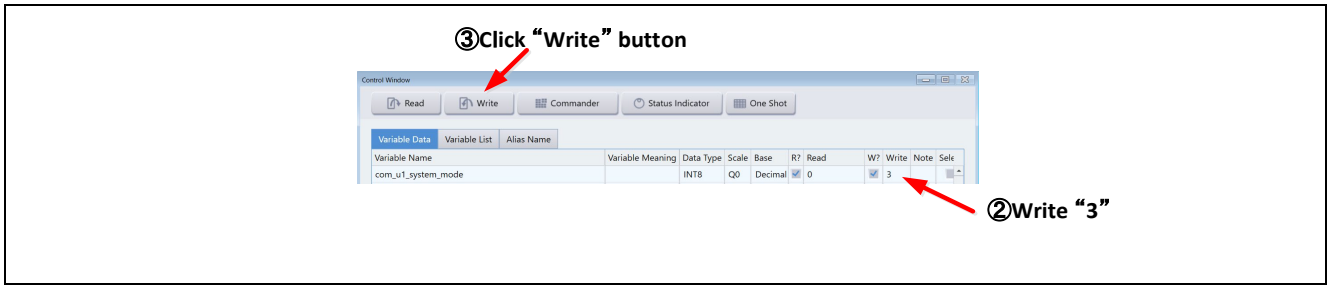


図 6-7　エラー解除の手順

表 6-6 モータ制御のエラーステータスの説明

値	エラー内容	割り当てられているマクロ名
0x0000	エラーなし	MOTOR_SENSORLESS_VECTOR_ERROR_NONE
0x0001	HW 過電流エラー	MOTOR_SENSORLESS_VECTOR_ERROR_OVER_CURRENT_HW
0x0002	過電圧エラー	MOTOR_SENSORLESS_VECTOR_ERROR_OVER_VOLTAGE
0x0004	過速度エラー	MOTOR_SENSORLESS_VECTOR_ERROR_OVER_SPEED
0x0008, 0x0010, 0x0020, 0x0040	予約	-
0x0080	低電圧エラー	MOTOR_SENSORLESS_VECTOR_ERROR_LOW_VOLTAGE
0x0100	SW 過電流エラー	MOTOR_SENSORLESS_VECTOR_ERROR_OVER_CURRENT_SW
0x0200	脱調エラー	MOTOR_SENSORLESS_VECTOR_ERROR_STALL_DETECTED
0x0400	PFC 過電流エラー	MOTOR_SENSORLESS_VECTOR_ERROR_PFC
0xffff	未定義エラー	MOTOR_SENSORLESS_VECTOR_ERROR_UNKNOWN

表 6-7 PFC 制御のエラーステータスの説明

値	エラー内容	割り当てられているマクロ名
0x0000	エラーなし	PFC_MANAGER_ERROR_NONE
0x0001	Vac 過電圧エラー	PFC_MANAGER_ERROR_AC_OVER_VOLTAGE

0x0002	Vdc 過電圧エラー	PFC_MANAGER_ERROR_BUS_OVER_VOLTAGE
0x0004	Vdc 低電圧エラー	PFC_MANAGER_ERROR_BUS_LOW_VOLTAGE
0x0008	SW 過電流エラー	PFC_MANAGER_ERROR_OVER_CURRENT_SW
0x0010	HW 過電流エラー	PFC_MANAGER_ERROR_OVER_CURRENT_HW
0x0020	過熱エラー	PFC_MANAGER_ERROR_OVER_HEATING
0xffff	未定義エラー	PFC_MANAGER_ERROR_UNKNOWN

6.10 モータ停止・遮断方法

運転状態からモータを停止する場合には、以下に示す手順で行ってください。なお、緊急時は、②の AC100~200V の供給を最優先に停止させてください。

① 6.9(e)のモータ停止手順を行います。

② モータが停止するのを確認したら、電源ブレーカーを操作し、電源の供給を停止します。

③ 停止後、感電事故防止の観点から、母線電圧が DC390V から、DC42V 未満に電圧が低下したことを確認するまで、配線作業やインバータの筐体を開けるなどの操作を行わないでください。

7.　モータ制御アルゴリズム

7.1　概要

本サンプルプログラムのモータ制御アルゴリズムについて説明します。表 7-1 に、モータ制御機能を示します。

表 7-1 本サンプルプログラムのモータ制御機能

機能項目	機能の内容
制御方式	センサレスベクトル制御
電流検出方式	1shunt または 3shunt
PWM 変調方法	空間ベクトル変調法（正弦波変調も選択可）
位置・速度推定方法	低速域：電流引き込み制御(OpenLoop) 中高速域：誘起電圧オブザーバ
制御モード	速度制御のみ
補償機能	・最大トルク/電流制御(MTPA)、弱め磁束制御 ・電圧誤差補償、サンプルディレイ補償 ・非干渉制御 ・トルク振動抑制 ・フライングスタート ・脱調検出

7.2　制御ブロック図

制御システム全体のブロック図の例を以下に示します。

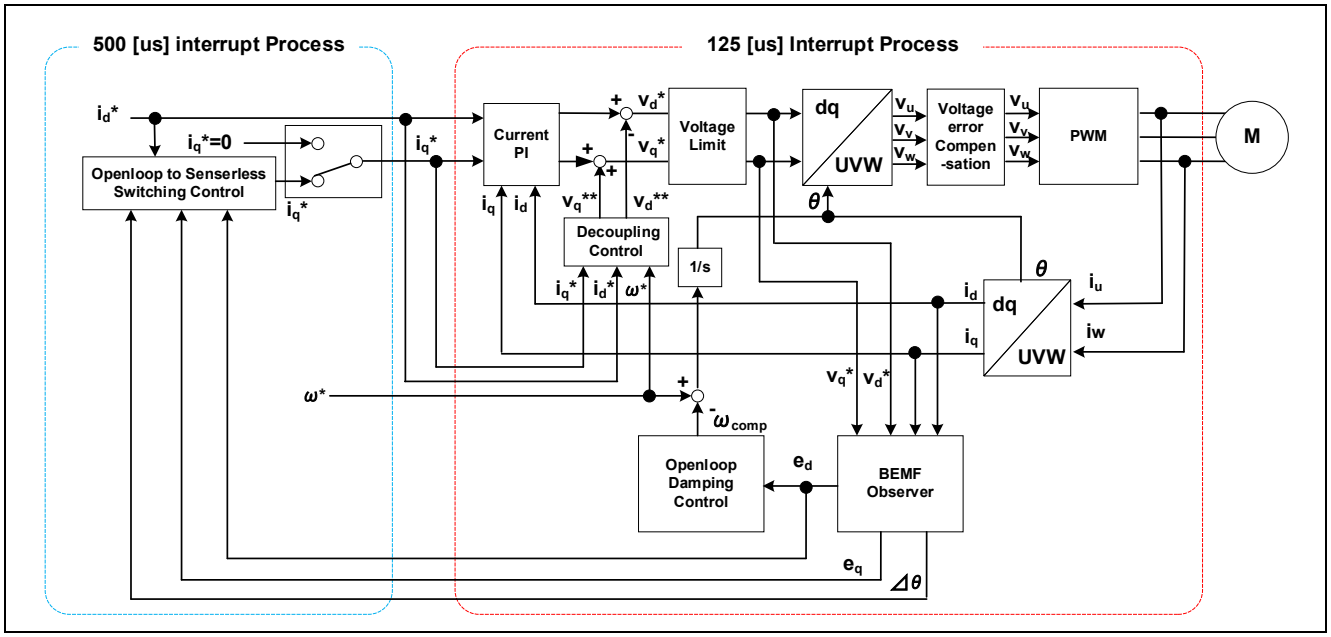


図 7-1　センサレスベクトル制御概略ブロック図(オープンループ制御時)

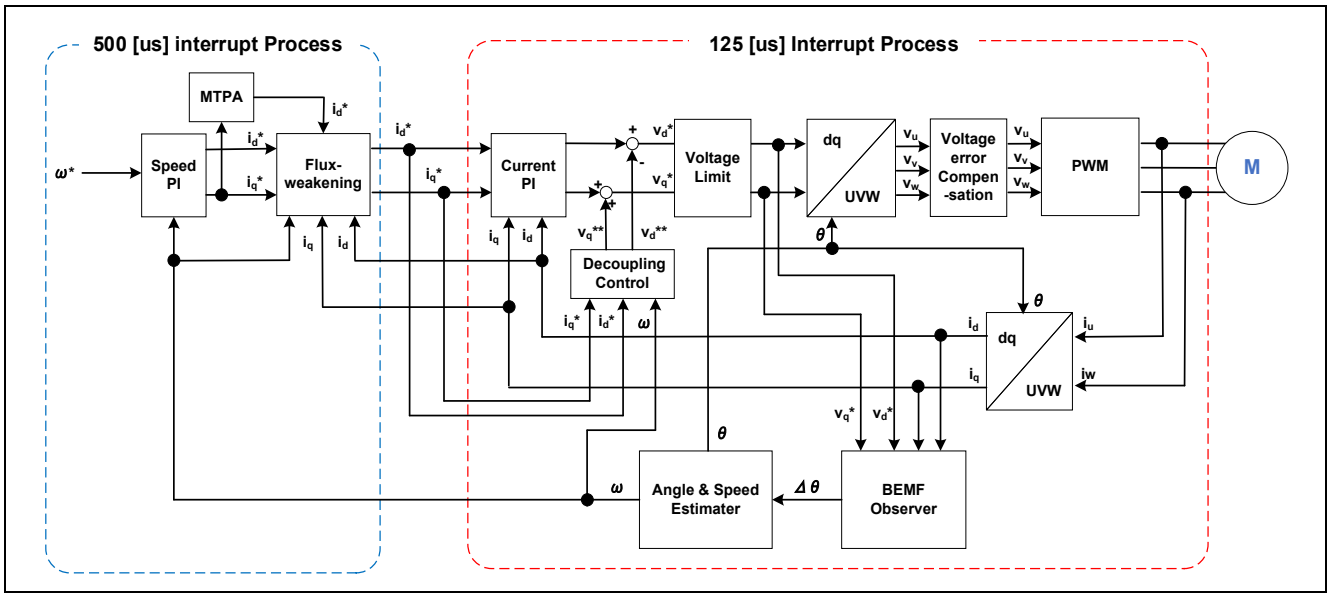


図 7-2　センサレスベクトル制御概略ブロック図(センサレス制御時)

7.3　速度制御機能

速度制御機能は、モータが速度指令に追従するよう、PI 制御を行います。速度指令値の入力を受けて、内部の速度調節器が速度推定値との偏差を基に q 軸電流指令値を出力します。また、サブモジュールの弱め磁束制御、最大トルク/電流制御(MTPA)を本モジュールから制御します。

速度推定値は、速度推定値に LPF を通した値を使用します。

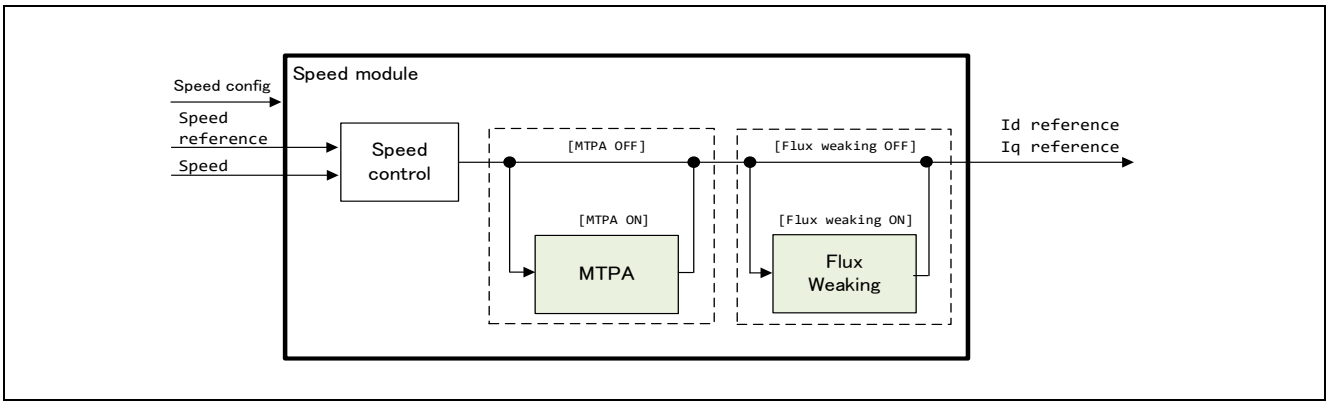


図 7-3　速度制御の機能ブロック図

7.4　最大トルク/電流制御(MTPA)

IPM モータのように突極性を有する PM モータは、最大トルク/電流制御(MTPA)を適用することができます。Id=0 制御では使用しないリラクタンストルクを有効利用することで、MTPA は単位電流あたりのトルクを最大に調整することができます。突極性を有さない SPM モータは構造的にリラクタンストルクが利用できないため、MTPA を使用できませんので、ご注意ください。Ld と Lq の値がほぼ等しい SPM モータ使用時は、必ず MTPA を無効としてください。無効としない場合、正常にサンプルプログラムが動作しません。本サンプルプログラムでは、Ld,Lq の値を監視して自動的な判断は行いません。

使用する式は、以下の式となります。速度調節器が出力する q 軸電流指令値 Iq*を入力として、d 軸電流指令値を求めることができます。

$$I^*_d = \frac{\Psi}{2(L_q - L_d)} - \sqrt{\left(\frac{\Psi}{2(L_q - L_d)}\right)^2 + I_q^{*2}}$$

Ψ: 磁束鎖交数[Wb], L_d, L_q: モータの d 軸インダクタンス及び q 軸インダクタンス[H]

7.5　弱め磁束制御

弱め磁束制御は、d 軸電流を負方向に制御することで、母線電圧で出力可能な電圧を PM モータの回転に比例して発生する誘起電圧(=ωΨ)が超えてしまう条件下であっても、d 軸電流指令を負の値で増大させ、打ち消す制御を行います(図 7-4)。電圧飽和分を打ち消すことにより、加速に必要な q 軸電流指令を増やすことが可能となり、高速回転化および高速回転域での出力向上を実現します。

弱め磁束制御は、現在の電圧に対して、モータの回転速度が高くなり、電圧の余裕が難しくなった状態を自動的に検知して、Id*の値を負に増大させ、PM モータの電圧方程式に従って誘起電圧をキャンセルする制御を行います。

このため、まず、誘起電圧制限値を以下の計算式から求めます。R はモータの抵抗値、Ia は Id,Iq 検出値の二乗和(√(Id*Id+Iq*Iq))です。Vamax は、電圧誤差補償や変調処理であらかじめ計算している電圧ベクトルの最大値を使用します。

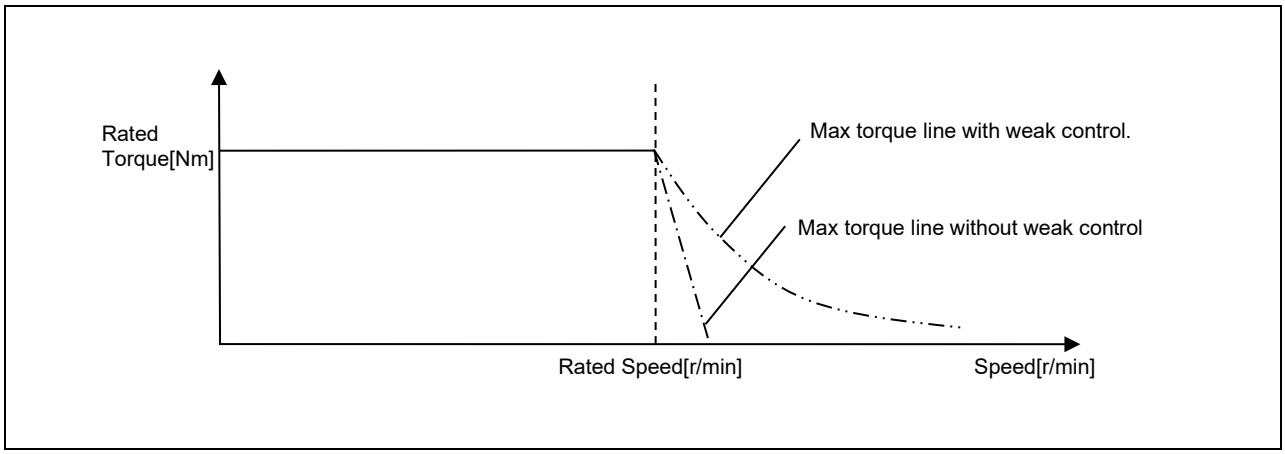


図 7-4　出力可能トルクと速度の関係例

$$V_{om} = V_{amax} - I_a R$$

V_{om}：誘起電圧制限値 [V]，V_{amax}：電圧ベクトルの最大値 [V]

I_a：電流ベクトルの大きさ [A]

図 7-5　誘起電圧制限値の計算式

$$I_d = \frac{-\psi_a + \sqrt{\left(\frac{V_{om}}{\omega}\right)^2 - \left(L_q I_q\right)^2}}{L_d}$$

$\because V_{om} = V_{amax} - I_a R$

V_{om}：誘起電圧制限値 [V]，V_{amax}：電圧ベクトルの最大値 [V]，I_a：電流ベクトルの大きさ [A]

図 7-6　弱め磁束制御における d 軸電流指令値の計算式

7.6　電流制御機能

電流制御機能は、入力された電流値からベクトル制御に必要な座標変換及びフィードバック制御を行い、PWM として出力する電圧を演算する機能です。また、サブモジュールの非干渉制御、サンプルディレイ補償、電圧誤差補償、BEMF オブザーバを本モジュールから制御します。モジュール構成図を図 7-7 に示します。

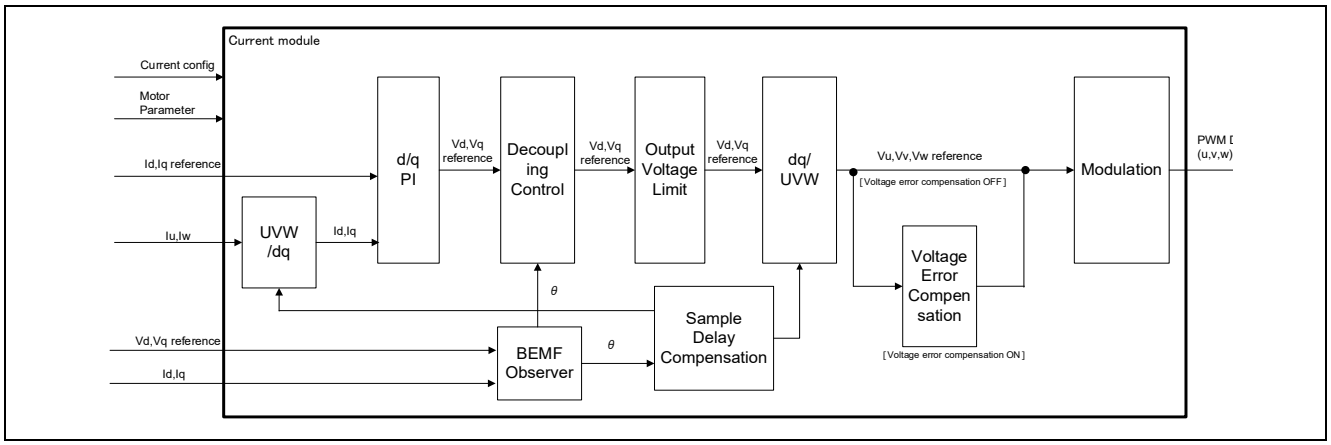


図 7-7　電流制御の機能ブロック図

7.7　1 シャント電流検出

7.7.1　概要

ベクトル制御の電流検出方式としては、出力三相をカレントトランス(CT)やΔΣ変調器等で検出するインライン方式と、インバータの下アーム側に電流検出用のシャント抵抗等を配置して電流検出を行うローサイド方式があります。家電などでは、回路の簡略化・低コスト化・小型化を狙い、シャント抵抗を用いた電流検出が主流です。さらに、1 つのシャント抵抗のみを用いて、インバータの PWM 信号パターンからインバータ母線側へ流れる電流相を求めて、検出したインバータ母線電流から出力 3 相の電流を復元する 1 シャント電流検出方式が用いられる場合があります。本項では、本サンプルプログラムに実装されている 1 シャント電流検出方式のアルゴリズムを解説します。

7.7.2　原理

マイコンを用いたモータ駆動システムでは、ベクトル制御の演算結果である相電圧指令値をモータに印可するために、キャリア比較法が一般的に採用されています。キャリア比較法では、マイコン周辺機能のタイマで生成されるキャリア波（主に三角波）と、相電圧指令値から演算されるコンペアマッチ値の大小関係から、インバータ各相上下アームのゲート信号を生成し、インバータパワー素子をスイッチングすることで PWM 波形をモータに印可します。図 7-8 に、キャリア比較法における各相のゲート信号および電流検出タイミング様子を示します。なお、図 7-8 中では、C_u, C_v, C_w は各相コンペアマッチ値、G_{up}, G_{vp}, G_{wp} は各相上アームのゲート信号、S は各素子のスイッチングパターン（電圧ベクトル）を示しています。また、各相下アームのゲート信号はデッドタイムを考慮した上で、G_{up}, G_{vp}, G_{wp} を反転したものが出力されます。表 7-2 はスイッチングパターンの一覧です。キャリア 1 周期における各スイッチパターンとその継続時間により、所望の電圧をモータに出力をします。図 7-10 では、S_0, S_1 S_2 S_7 とそれに対応する継続時間によって、相電圧指令値を出力しています。このスイッチパターンとその継続時間は、各相の電圧指令値の大小関係により常に変化します。3 シャント電流検出方式（ローサイド方式）での電流検出タイミングは、インバータ各相レグの下側にシャント抵抗が取り付けられているため、図 7-8 で示すように 3 相の下アームが導通（=G_{up}, G_{vp}, G_{wp} が非導通）している S_0 期間となります。一方で、1 シャント電流検出方式では 3 相の上アーム及び下アームが導通状態である S_0 及び S_7（以下、零電圧ベクトル）において、インバータ母線側に電流が流れないため電流検出をすることができません。そこで、1 シャント電流検出方式ではインバータ母線側に電流が流れる S_1 ~ S_6（以下、非零電圧ベクトル）で電流検出を行います。図 7-9 に S_1 におけるインバータ

母線電流の様子を示します。S_1 の期間中では、U 相上アームのみが導通している状態であるため、インバータ母線電流の検出を行うことで u 相電流を検出することができます。表 7-2 下段は、各スイッチングパターンにおけるインバータ母線電流で検出できる電流相を示しており、キャリア 1 周期間内に異なる 2 つの非零電圧ベクトル（S_1 ~ S_6）が存在していれば、適切なタイミングで電流検出を行うことで 2 相の電流を検出し、残り 1 相をキルヒホッフの電流則から求めることができます。

表 7-2　インバータスイッチングパターンおよびインバータ母線電流の検出相
（ON:1, OFF:0, 上アームのみ記載）

	S_0	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7
U+	0	1	1	0	0	0	1	1
V+	0	0	1	1	1	0	0	1
W+	0	0	0	0	1	1	1	1
i_{bus}	-	$-i_u$	i_w	$-i_v$	i_u	$-i_w$	i_v	-

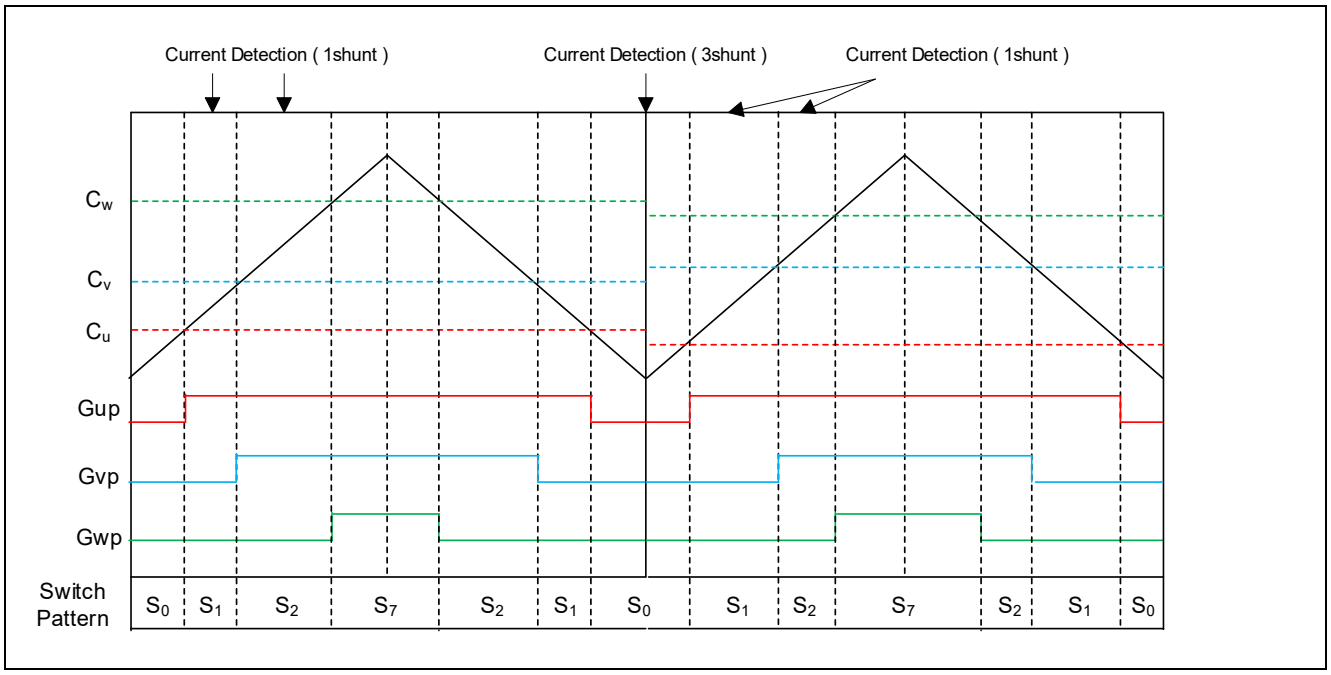


図 7-8　キャリア比較方式と電流検出タイミング（各方式）

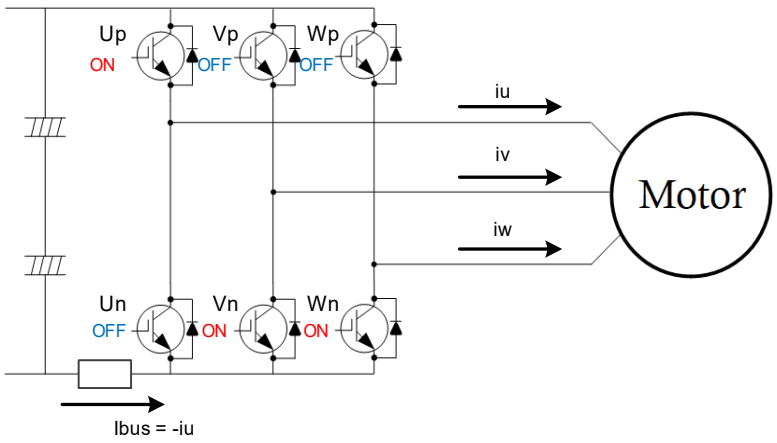


図 7-9　S1 におけるインバータ母線電流

7.7.3　パルスシフト制御

1 シャント電流検出方式ではキャリア周期内の異なる 2 つの非零電圧ベクトル（S_1 ~ S_6）期間において、電流検出を行います。そのため、電流の AD 変換が完了するのに十分な区間、非零電圧ベクトルが継続している必要があります。つまり、1 シャント電流検出方式は、非零電圧ベクトル区間が十分な長さを確保できない場合、正確な電流を検出することができなくなるという原理的な問題が存在します。このような非零電圧ベクトル区間が十分な長さを確保できない状態は、2 相の電圧指令値（コンペアマッチ値）が接近するときに生じます。この問題を回避する手法として、本サンプルプログラムでは 1 シャント電流検出方式で一般的に用いられるパルスシフト制御を採用しています。

本手法は、キャリア 1 周期の前半部分(アップカウント)で、電圧指令値から演算される 3 相のコンペアマッチ値の各差分を十分な AD 変換時間を確保できるように補正を加えることで、非零電圧ベクトル区間を拡大し、後半部分（ダウンカウント）でその補正を補うように補正を加えます。したがって、AD 変換時間を確保しつつ所望の電圧指令値（電圧ベクトル）を出力することが可能となります。なお、本書では AD 変換に十分な時間を確保するための各相コンペアマッチ値の間隔を最小パルス幅Δと呼称し、以下のように定義しています。

$$\Delta = (\text{電流立ち上がり} + \text{リンギング時間}) + (AD\text{変換遅れ} + \text{サンプリング時間}) + \text{デッドタイム}$$

図 7-10 にパルスシフト制御によるコンペアマッチ値の補正の様子を示します。パルスシフト制御の実施前の状態（G_{up}, G_{vp}, G_{wp}）では、UV 間が最小パルス幅Δより小さいため、非零電圧ベクトル区間（図では、S_1）も小さくなり正確な電流検出ができません。そこで、UV 間の間隔を最小パルス幅Δとなるように修正し、S_1 が拡大するようにキャリア前半のコンペアマッチ値に対して修正を行います（G_{up_shift}, G_{vp}, G_{wp}）。これにより、S_1 区間において最小パルス幅Δを満たし、電流検出が可能になります。一方で、平均電圧を所望の値に保つため、キャリア後半では補正量を補うように再度補正を行ったコンペアマッチ値によりゲート信号を生成します。

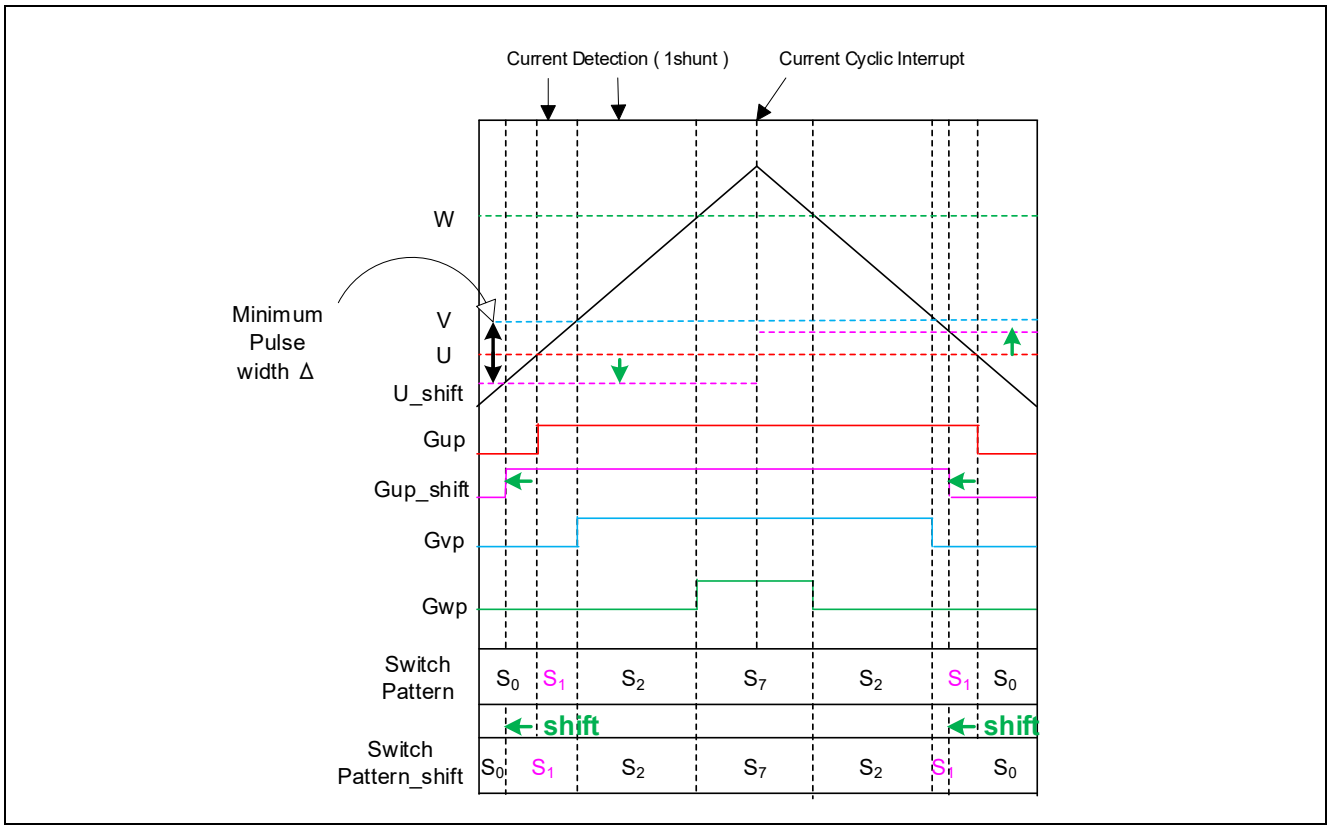


図 7-10　パルスシフト制御の例

7.7.4　1 シャント電流検出方式の実行フロー

本項では、本サンプルソフトウェアで実装した「パルスシフト制御による 1 シャント電流検出方式」の実行の流れについて、AD 変換トリガと補正したコンペアマッチを算出する「パルスシフト制御」とインバータ母線電流から相電流を再現する「相電流の電流再構築」に分けて、説明します。

7.7.4.1　実行：パルスシフト制御

本サンプルソフトウェアで実装したパルスシフト制御の実行フローを図 7-11 に示します。各相コンペアマッチ値の大小関係を比較し、最大となる相を「最大相」、中間となる相を「中間相」、最小となる相を「最小相」としています。

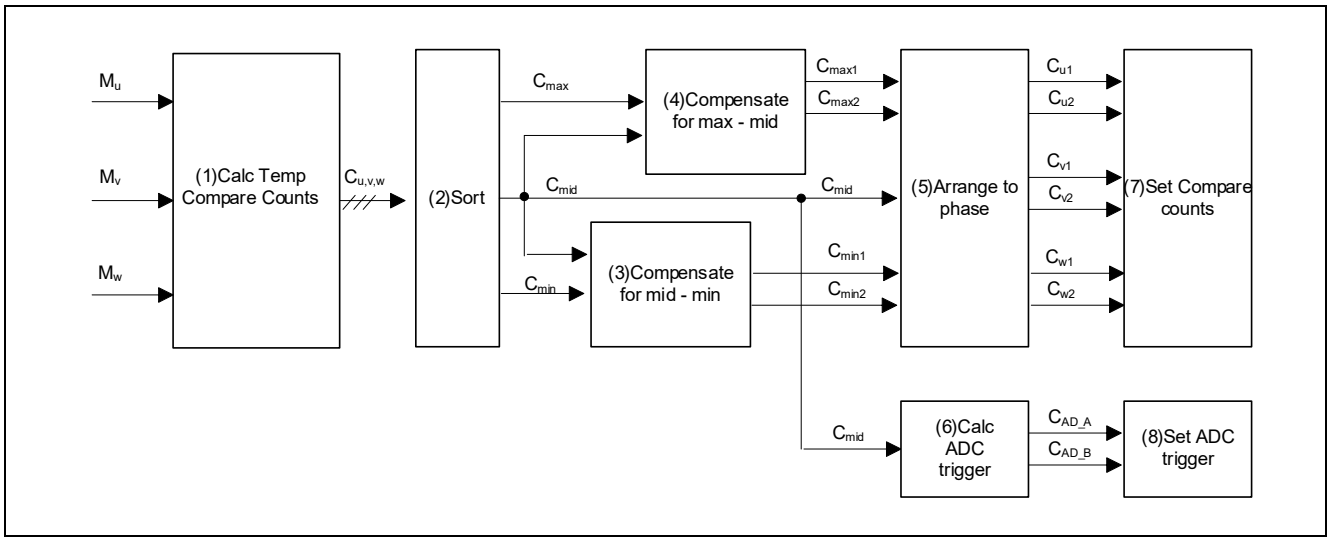


図 7-11　パルスシフト制御の実行フロー

(1)　各相コンペアマッチ値の仮値の算出

電流制御の演算結果である Duty 比（M_u, M_v, M_w）から、キャリア比較法で用いるコンペアマッチ値を算出します。算出式は下記の通りです。

$$C_{u,v,w} = C_{peak} \times \left(1.0 - M_{u,v,w}\right) + 0.5 \times (C_{dead})$$

$C_{u,v,w}$: 各相コンペアマッチ値, C_{peak}: 三角波ピークカウント値, C_{dead}:デッドタイムカウント値

(2)　最大-中間-最小相の選択

算出した各相コンペアマッチの大小を比較し、最大相、中間相、最小相を求めます。

(3)　最小-中間相に対する補正

最小相と中間相のパルス幅（＝コンペアマッチ値の差分）を求め、最小パルス幅より小さい場合に最小相に対して補正を行います。補正後のキャリア前半部分のコンペアマッチ値をC_{min1}、後半部分をC_{min2}としています。図 7-12 に、最小相に対する補正の様子を示します。パルス幅が最小パルス幅より大きい場合、すなわち、電流検出を行うのに十分な区間の電圧ベクトルが確保されている場合は、$C_{min1,2}$にC_{min}を代入します。

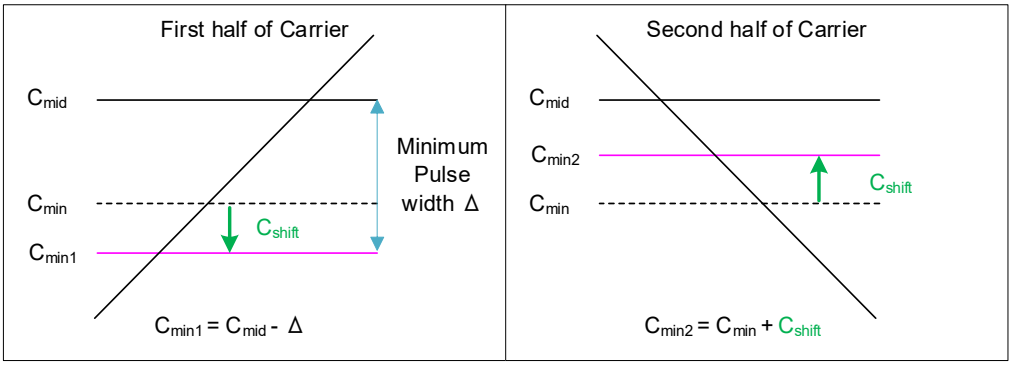


図 7-12　最小―中間相に対する補正

(4)　中間-最大相に対する補正

中間相と最大相のパルス幅（＝コンペアマッチ値の差分）を求め、最小パルス幅より小さい場合に最大相に対して補正を行います。補正後のキャリア前半部分のコンペアマッチ値をC_{max1}、後半部分をC_{max2}としています。図 7-13 に最大相に対する補正の様子を示します。パルス幅が最小パルス幅より大きい場合、すなわち、電流検出を行うのに十分な区間の電圧ベクトルが確保されている場合は、$C_{max1,2}$にC_{max}を代入します。

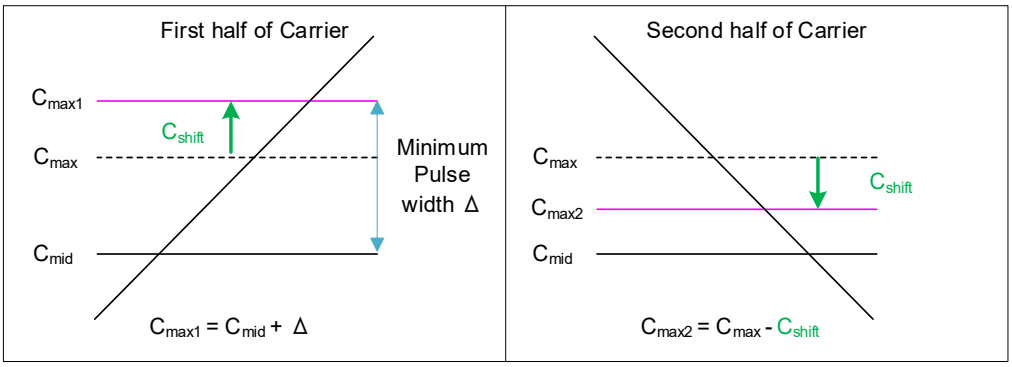


図 7-13　中間―最大相に対する補正

(5)　相の割り当て

マイコンでコンペアマッチ値を設定するためには相の情報が必要となります。そのため、補正した最大中間最小相のコンペアマッチ値に対して、ＵＶＷ各相の割り当てを行います。

(6)　AD 変換トリガの算出

1 シャント電流検出方式では、相電流が検出可能な異なる２つの非零電圧ベクトル区間で AD 変換を行います。AD 変換開始の要求は、三角波のカウント値と AD 変換トリガのコンペアマッチにより発生させることができます。したがって、AD 変換トリガを電流検出可能な適切なタイミングに設定する必要があります。なお、(3), (4)の操作によって、キャリア波前半において、２つの異なる非電圧ベクトル区間が最小パルス幅以上となっています。

電流検出可能な適切なタイミングとは、非零電圧ベクトル区間中かつ以下を満たし状態をいいます。

(a)　スイッチ切り替わり後の電流立ち上がりとリンギングが収束していること

(b)　AD 変換開始からサンプリング中は、電流が定常的であること
→AD 変換開始がデッドタイム開始から少なくともサンプリング時間以上前であること

(c)　デッドタイム区間でないこと

図 7-14 にキャリア比較法におけるゲート信号およびインバータ母線電流と AD 変換トリガの様子を示します。図 7-14 中の C_{max}, C_{mid}, C_{min},は最大中間最小相のコンペアマッチ値、G_{maxp}, G_{midp}, G_{minp} は最大中間最小相の上アームゲート信号、G_{midn} はデッドタイムを考慮して G_{midp} を反転させたゲート信号、i_{bus} はインバータ母線電流を示しています。また、C_{AD_A} はキャリア前半における最初の AD 変換トリガ、C_{AD_B} は次の AD 変換トリガです。すなわち、「$C_{AD_A} < C_{AD_B}$」となります。インバータ母線電流は、スイッチングパターンが切り替わると流れる電流が変化するため、上述したように(a)～(c)を考慮した AD 変換トリガを

設定します。このとき、2 つの電流検出タイミングはなるべく近いことが望ましいです。これは、検出できない 3 相目の電流を算出するキルヒホッフの電流則が同時間の電流を対象としているためです。したがって図 7-14 に示すように AD 変換トリガは中間相を基準に設定してあげることで、できる限り近いタイミングで電流検出を行います。下記にそれぞれの AD 変換タイミングの算出式を示します。なお、電流の立ち上がり時間やリンギング時間は回路等の影響により変化します。そのため、C_{adjust} の設定値は、電流の立ち上がり時間やリンギング時間を回避するのに十分な時間を設定してください。C_{adjust} は下記マクロ「DRIVER_CFG_AD_TRIGGER_DELAY_TIME」で定義する AD 変換開始遅れ調整時間[us]で調整ができます。

$$C_{AD_A} = C_{mid} - \left(C_{ADsample} + C_{dead}\right) = C_{mid} - \left(\Delta - C_{adjust}\right)$$
$$C_{AD_B} = C_{mid} + C_{adjust}$$

$C_{AD_A,B}$: AD 変換開始トリガ, C_{mid}: 中間相カウント値,
$C_{ADsample}$: AD 変換サンプリング時間と AD 変換開始遅れ時間に相当するカウント値
C_{adjust}: 電流立ち上がりとリンギング時間を回避するのに十分な時間に相当するカウント値
C_{dead}:デッドタイムカウント値

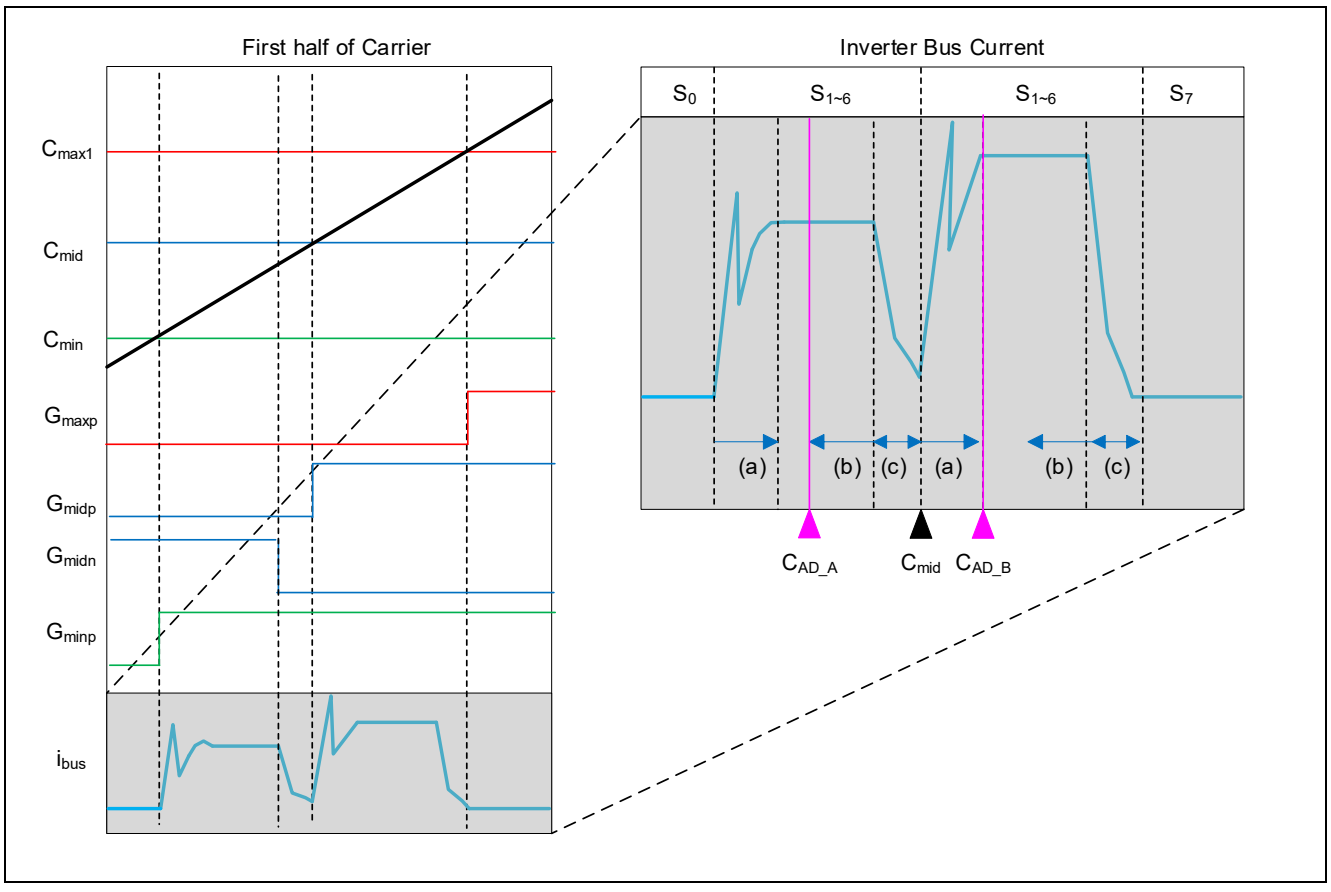


図 7-14　AD 変換タイミングの設定

(7)　コンペアマッチ値の設定

前後半で補正した各相のコンペアマッチ値をマイコンのレジスタに設定します。前後半でコンペアマッチを更新できる PWM タイマ周辺機能を使用してください。

(8)　AD 変換トリガの設定

AD 変換トリガをマイコンのレジスタに設定します。AD 変換トリガーを 2 つ設定でき、それぞれの AD 変換結果を個別に取得できる AD 変換および PWM タイマ周辺機能を使用してください。

7.7.4.2　実行：相電流の再構築

1 シャント電流検出方式では、取得したインバータ母線電流を相電流に復元する必要があります。本サンプルソフトウェアでは、三角波カウント値のアップカウント中に電流検出を行うため、三角波の山で電流制御割り込みを発生させています。これは、電流検出タイミングと電流制御をできる限り近いタイミングで実行するためです。したがって、電流制御周期割り込みで演算した AD 変換トリガは、三角波の谷で有効になります。よって、相電流は 1 周期前の電流制御周期割り込みで算出した各相コンペアマッチ値によるスイッチパターンとインバータ母線電流から算出が可能になります。また、表 7-2 から C_{AD_A} によって検出できる相電流は最小相、C_{AD_B} は最大相の電流を検出できることが読み取れます。そこで、本サンプルソフトウェアでは 1 周期前の電流制御周期割り込みで算出した最大相と最小相の相情報から、相電流を復元しています。

$$i[ph_{min}] = -i_{busA}$$
$$i[ph_{max}] = i_{busB}$$

i[phase]: 相電流（phase は U,V,W 相を示す）, ph_{min}: 最小相, ph_{max}: 最大相
i_{busA}:AD 変換トリガ A によって、検出したインバータ母線電流
i_{busB}:AD 変換トリガ B によって、検出したインバータ母線電流

7.7.5　周辺機能設定

- AD 変換トリガ

1 シャント電流検出方式では、A/D コンバータの変換タイミングを各相 Duty 比から算出されるコンペアマッチ値に応じて制御する必要が有ります。サンプルプログラムでは以下の機能で実現しています。

MCU	Peripheral	実現方法
RA6T2	GPT	GPT モジュールの GTADTRA、及び GTADTRB レジスタと GTCNT カウンタとのコンペアマッチによる A/D 変換開始要求機能によりこれを実現しています。
RX26T		
RA6T3		GPT モジュールの GTADTRA レジスタと GTCNT カウンタとのコンペアマッチによる A/D 変換開始要求機能と DMAC によりこれを実現しています。
RA4T1		

- AD 変換結果

1 シャント電流検出方式では、1 つの A/D コンバータを用いて 2 つのタイミングの AD 変換結果を取得します。サンプルプログラムでは以下の機能で実現しています。

MCU	Peripheral	実現方法
RA6T2	ADC	FIFO 機能を使用します。FIFO はリングバッファの役割を担い、複数の AD 変換結果を格納できます。
RX26T	S12ADHa	拡張ダブルトリガモードを使用します。拡張ダブルトリガモードは、選択した 1 つのチャネルの AD 変換結果を、ADDBLDRA, ADDBLDRB レジスタに格納します。

RA6T3 RA4T1	DMAC	DMAC を使用します。2 つのタイミングの AD 変換結果を DMAC により指定のメモリに格納します。

- キャリア前後半でのコンペアマッチ値の更新

1 シャント電流検出方式では、キャリアの前後半でコンペアマッチ値を更新します。サンプルプログラムでは以下の機能で実現しています。

MCU	Peripheral	実現方法
RA6T2 RX26T RA6T3 RA4T1	GPT	GPT モジュールの三角波 PWM モード 3 を使用しています。三角波 PWM モード 3 では、テンポラリレジスタを用いることで、三角波の山と谷で、GTCCRA および GTCCRB レジスタを更新できます。 ※GTCCRA および GTCCRB レジスタと GTCNT レジスタとのコンペアマッチにより端子出力は変化します。

7.8　非干渉制御

非干渉制御は、電流応答性の向上や PM モータにおいて d 軸・q 軸の間で電流が互いに干渉し合い、安定性を損なう事を抑制するために使用します。使用する式は、以下となります。一般的な PM モータの電圧方程式となります。

$$V_{d_dec}{}^{*} = RI_d{}^{*} - \omega L_q I_q{}^{*}$$
$$V_{q_dec}{}^{*} = RI_q{}^{*} + \omega L_d I_d{}^{*} + \omega\Psi$$

Id*,Iq*: 電流指令値[A], ω: 回転速度(電気角)[rad/s],R: モータの 1 次抵抗[Ω],

Ld,Lq: モータのインダクタンス[H], Ψ: モータの鎖交磁束数[Wb]

得られた電圧指令値 V_{d_dec}*と V_{q_dec}*は、PI 調節器から出力される電圧指令値 V_d*と V_q*に加算します。

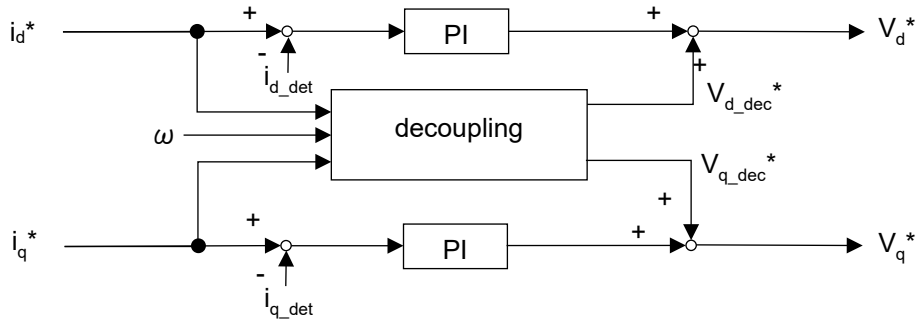


図 7-15　非干渉制御の機能ブロック図

7.9　脱調検出

脱調とは、モータの実際の磁極位置とモータ制御ソフトウェアが検知している磁極位置がずれてしまった状態で、速度の急激な低下や、過電流、不意の速度に回転するなどの大きな問題を引き起こします。

脱調検出機能は、脱調現象を特有の電流振動変化から検出し、保護停止させる機能を提供します。なお、本脱調検出機能は、全ての脱調現象を確実に検出できることを保証するものではありませんので、必要に応じて複数の保護手段を用いるようにしてください。

脱調検出では、Id 検出値または Iq 検出値の交流成分に着目し、ハイパスフィルタ(HPF)により抽出・積算して判定を行います。通常、dq 軸の電流検出値は、回転周波数と一致することにより直流量として現れますが、磁極位置が乖離した状態では、直流量ではなく交流量として現れることを利用しています。このため、失速した場合や内部で検知した速度よりも実速度が低い場合は、検出できない場合があります。本脱調検出機能がうまく働かない現象が発生した場合には、過電流保護機能などによって、カバーします。

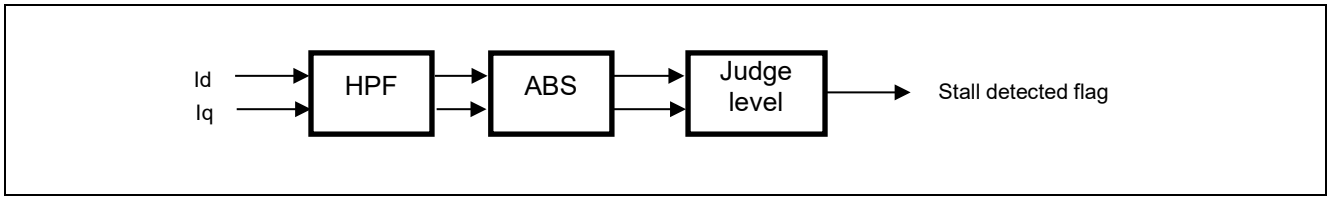


図 7-16　脱調検出の機能ブロック図

7.10 トルク振動抑制

7.10.1 概要

トルク振動抑制機能は、エアコン・冷蔵庫等のシングルロータリーやレシプロ型の圧縮機（コンプレッサ）で発生する、機械角 1 周期の周期トルク振動に対する抑制制御を目的としています。

圧縮機は、モータの回転により、冷媒ガスや空気等を圧縮するため、圧縮/排気/膨張/吸気の工程に応じた負荷変動を受けます。この負荷変動（＝トルク振動）により、モータ回転速度が変動してしまうことで、圧縮機出力の不安定化や、騒音や故障の原因となる機器の振動源を生じさせてしまいます。そこで、本機能を使用し、トルク振動によるモータ回転速度の変動を低減することで、「圧縮機出力の安定化」や「機器の振動低減」といった効果が期待できます。なお、本アルゴリズムでは、センサレスによる推定速度を用いてトルク振動を推定・打ち消す制御をフィードフォワード的に行います。そのため、パラメータの設定や圧縮機ならびに装置の構造等により、振動の低減効果が十分発揮できない場合があります。

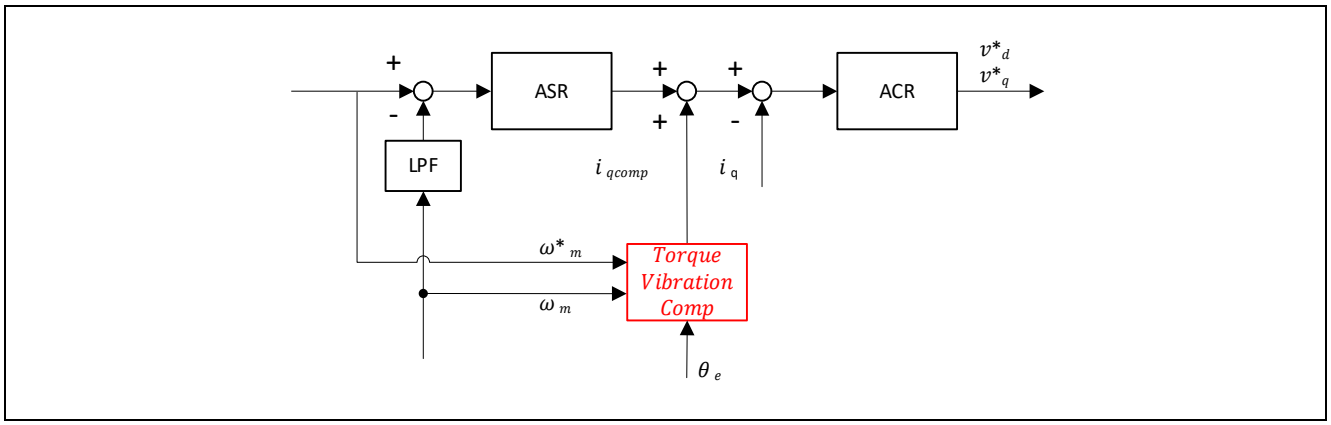


図 7-17　トルク振動抑制の機能ブロック図

7.10.2 原理

本サンプルソフトウェアで実装されているトルク振動抑制制御のアルゴリズムの概要について説明いたします。図 7-18 にトルク振動抑制制御の概要図を示します。シングルロータリーやレシプロ型の圧縮機のトルク振動は、その特性上、回転速度に比例し、機械角に依存していることから、回転周波数の周期性を有しています。（以下、機械角基準のモータ回転速度指令値を周波数換算したものを回転周波数と呼称します）

そこで、圧縮機のトルク振動の影響を低減させるために、圧縮機のトルク振動を打ち消す補償信号を機械角に応じてフィードフォワードで q 軸電流指令値（トルク電流）に出力を行います。本サンプルソフトウェアでは、この補償信号を生成するために「トラッキングフィルタ」と「繰り返し制御」を採用しています。繰り返し制御は、入力信号の振動成分に振動成分 1 周期前の補償信号を足して出力します。（以下、この制御器を繰り返し制御器と呼称します）そのため、抑制により振動成分が減衰するとともに、入力も減衰するため、定常的な補償信号を学習することができます。ここで、振動成分とは速度変動中に含まれる抑制したい振動成分を指します。圧縮機の負荷特性は、回転周波数の整数倍で発生するため、回転周波数の 1 次成分や 2 次成分などが振動成分に該当します。したがって、速度変動成分をトラッキングフィルタ(TF)により振動成分毎に分解し、それぞれ繰り返し制御を行い、補償信号を合成してあげることで、圧縮機の負荷変動を打ち消す補償信号を得ることができます。繰り返し制御やトラッキングフィルタの詳細については、専門書を参考にしてください。

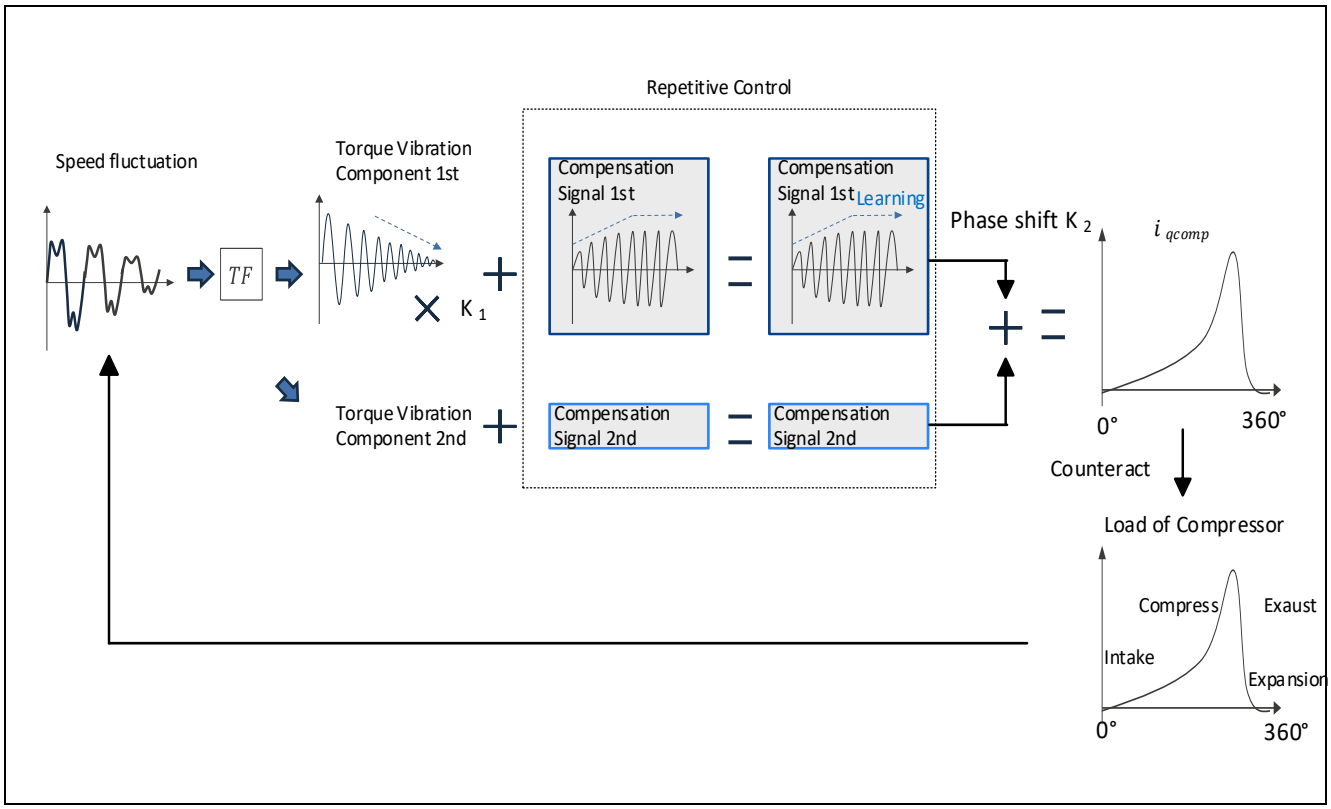


図 7-18　トラッキングフィルタと繰り返し制御を用いたトルク振動抑制の概要図

7.10.3 繰り返し制御器のマイコンへの実装

繰り返し制御器は、繰り返し制御器への入力に繰り返し制御器が持つ周期における 1 周期前の出力を足し合わせて出力する構造を有しています。そのため、1 周期前の補償信号を記憶しておく必要があります。マイコンではデータを離散的に扱うため、機械角 1 周期を N 個に分割した補償値テーブル（配列）を用意し、角度毎に補償値を格納することで、1 周期分の補償値を保持します。

表 7-3　補償値テーブル（N=256）

Index	Angle	補償値 (A)
0	0	0.01
1	1.41	0.02
2	2.81	0.02

・・・	・・・	・・・
254	357.18	-0.0005
255	358.59	0.0

本サンプルプログラムでは、表 7-3 に示したような補償値テーブルから補償信号を生成するために、2 つの実装方法を用意しています。１つ目は Look Up Table(LUT)方式と定義する、出力したい角度毎に補償値テーブルを読み出し、その値を補償信号として出力する方法です。2 つ目は、補償信号を磁極位置に関する関数と見立て、多項式近似を行い、多項式近似係数を取得することで補償信号を生成する Polynomial Approximation Techniques(PAT)方式です。PAT 方式は、LUT 方式と比較してメモリ数を節約して高分解能の補償信号を生成することができます。２つの方式の切り替えは、マクロにて切り替えが可能です。

(a) テーブル参照方式（LUT）

Look Up Table（LUT）方式は、出力したい角度に対する補償値テーブルを参照し、補償信号として出力します。そのため、テーブルの大きさ N は、補償信号の機械角に対する分解能に相当します。

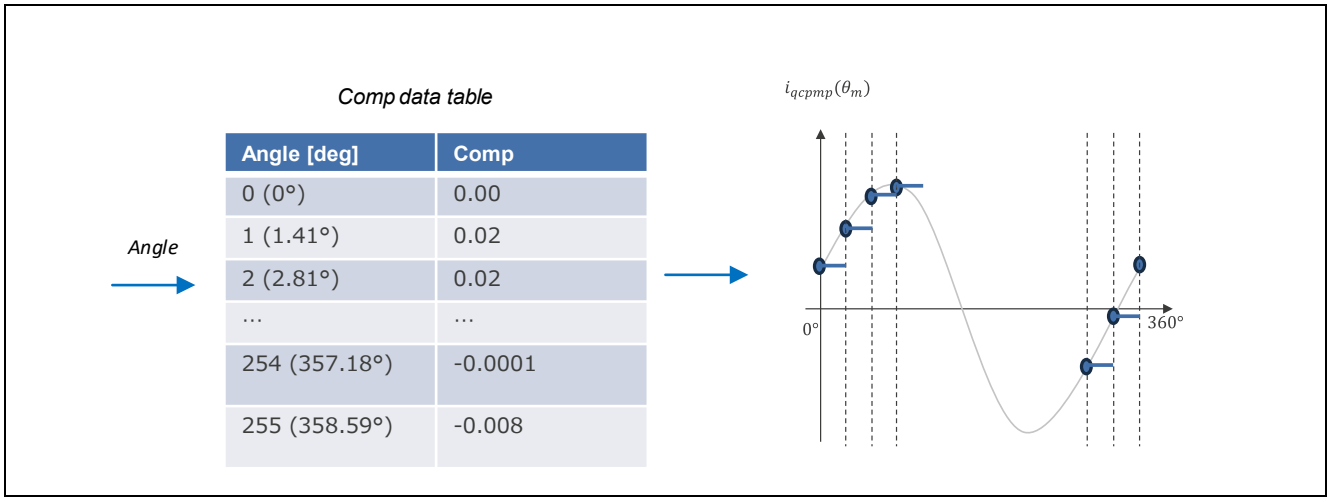


図 7-19　LUT 方式

(b) 多項式近似方式（PAT）

Polynomial Approximation Technics（PAT）方式とは、LUT 方式とは異なり補償値テーブルから補償信号を多項式近似により生成する方式です。本方式は、振動抑制効果を得ながら、RAM 量（配列数）を節約しつつ、さらに近似式による補完の働きにより高調波電流の影響を抑えることができます。

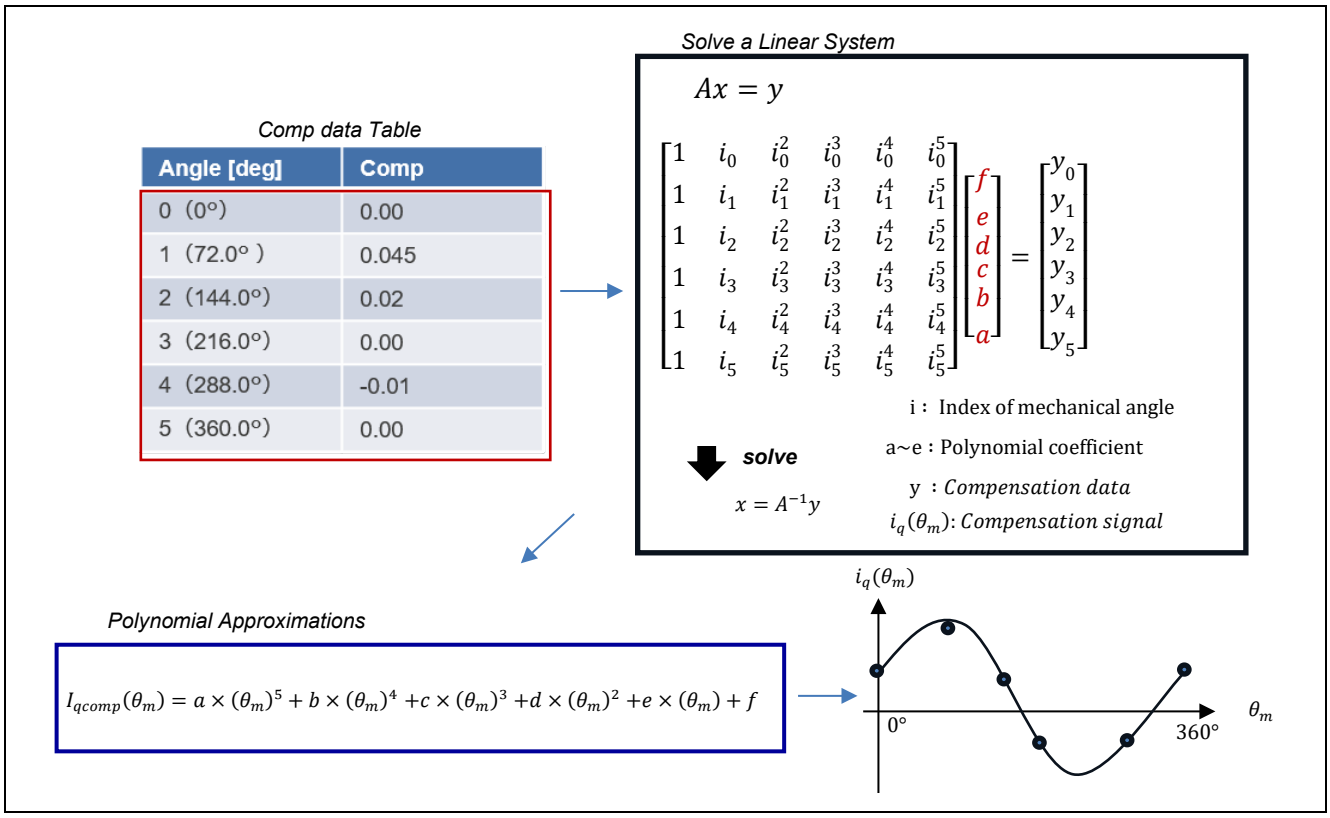


図 7-20　PAT 方式

7.10.4 進み補償

圧縮機のトルク振動は、回転周波数の整数倍で発生するため、複数の周波数成分を有しています。よって、速度変動に対する補償信号の位相特性が異なる場合があります。そこで、本サンプルソフトウェアでは、安定的なトルク振動抑制を行うため、位相進み補償を行った機械角（以下、参照機械角）で、補償信号の生成を行っています。具体的に LUT 方式では、現在の機械角から進み角度 K_2 だけオフセットを持たした参照機械角で補償値テーブルを参照して出力します。また、同様に PAT 方式では、現在の機械角から進み角度 K_2 だけオフセットを持たした参照機械角と多項式近似係数を用いて補償信号を生成しています。

7.10.5 学習機能

本サンプルソフトウェアで実装したトルク振動抑制制御は、モータ駆動中に補償信号の学習を行います。これは、低コスト性や耐環境性が求められる圧縮機では高価な位置センサの取り付けは避けたいため、絶対的な機械角が不明であり、駆動の都度に相対的な機械角を用いて補償信号の生成をする必要があるためです。図 7-21 に、本サンプルソフトウェアで実装したトルク振動抑制制御の制御ブロック図を示します。本サンプルソフトウェアでは、抑制対象の振動成分を、回転周波数の 1 次成分と 2 次成分に定めています。よって、補償信号生成のための繰り返し制御器を 2 つ並列に配置しております。また、システムを簡易にするため、速度変動から振動成分（TVC：Torque Vibration Component）の抽出器であるトラッキングフィルタは 1 つ用意しております。

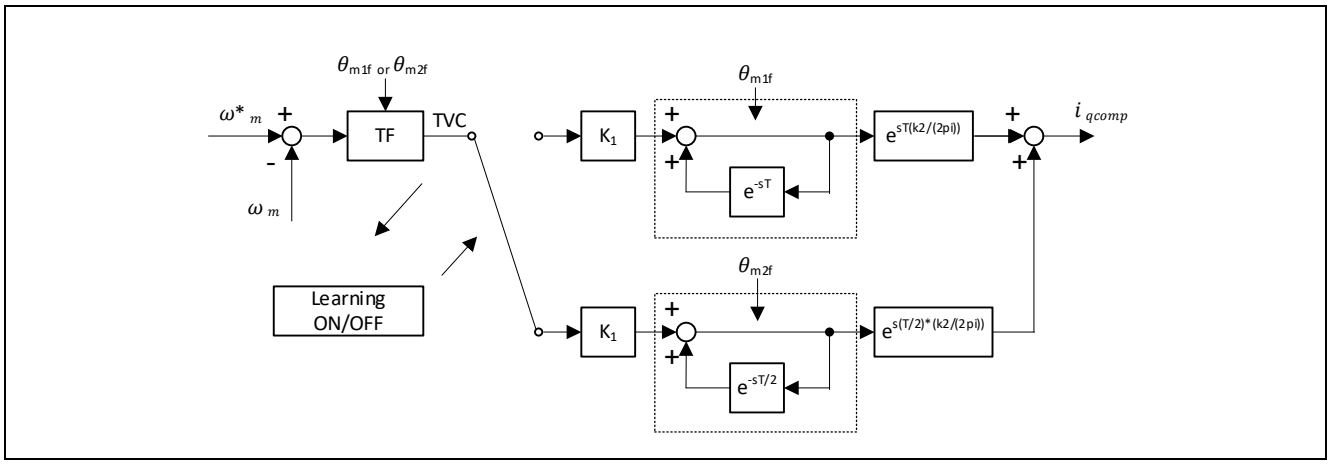


図 7-21　トルク振動抑制制御の制御ブロック図

モータ駆動中において補償信号の学習開始と学習終了および、補償対象の振動成分の切り替えの判断が必要になります。下記に学習開始条件と、学習終了条件を記載いたします。

- 学習開始条件：

  トラッキングフィルタ（TF）の出力である振動成分が定常的であること

- 学習終了条件：

次のいずれかの条件が満たされると学習は停止します。

(a)　振動成分の振幅を監視し、抑制目標に到達した場合

トラッキングフィルタ（TF）の出力の振動成分の振幅を監視し、事前に設定した抑制目標に達したら、学習を終了します。先述したように圧縮機では、低コスト性を重視するため、振動成分の減衰を評価するための速度センサや振動計、加速度計を取り付けることは避けたいです。したがって、本システムでは、抽出した振動成分の振幅から、抑制効果を判断しています。

(b)　トラッキングフィルタ（TF）の出力異常度が閾値を超えた場合

トラッキングフィルタ（TF）の出力異常度を監視し、事前に設定した閾値を超えたら、学習を終了します。TF は、簡易なシステムで所望の周波数成分を抽出することができますが、抽出したい周波数成分近傍に大きな成分を有すると、その周波数も抽出してしまう可能性があります。トルク振動抑制制御では振動成分を減衰させることから、その他の周波数成分に対する振動成分の相対的な大きさは、抑制と共に減少していきます。特に低速時の運転では、回転周波数の 1 次成分と 2 次成分の間隔が近くなるため、抑制により 1 次成分が減少すると 2 次成分の影響が TF 出力に出やすくなります。その結果、補償信号の誤学習が生じ、補償信号の位相によっては、補償値が積み上がることで過電流が生じる等の予期せぬ動作を引き起こす可能性があります。本サンプルソフトウェアでは、TF 出力における所望の振動成分に対する、その他の振動成分の影響を「TF 出力異常度」と定義しています。図 7-22 に、低速時の 1 次成分の補償信号学習中における TF 出力異常度と、TF 出力および補償信号の様子を示します。この TF 出力異常度は、振動成分の抑制と共に増加します。そして、TF 出力異常度が 1.0 を超えて学習を継続すると、TF 出力において学習対象でない 2 次成分が支配的になります。したがって、この TF 出力異常度が 1.0 を超える前に学習を終了させることで、補償信号の誤学習を防ぐことができます。

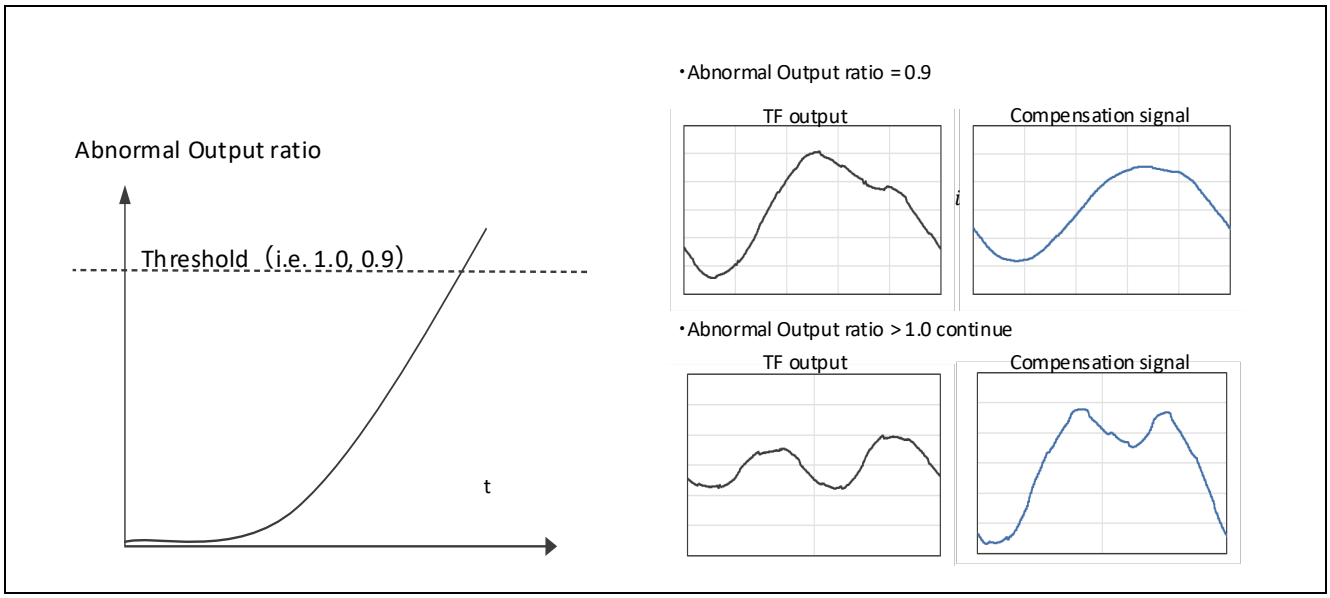


図 7-22　抑制中の TF 出力異常度および、TF 出力、補償信号

表 7-4 に、トルク振動抑制制御におけるステータス、表 7-5 にステータス変化を生じさせるアクションを示しています。また、図 7-23 にはトルク振動抑制制御のステータスによるモータ回転速度の変動抑制のイメージ図を示しています。

表 7-4　トルク振動抑制制御のステータス一覧

STATE	説明	補償信号の出力状態
IDLE	トルク振動抑制制御機能 OFF 状態	なし
1F STANDBY	回転周波数 1 次成分の抽出待ち	なし
1F LEARNING	回転周波数 1 次成分の補償信号の学習中	回転周波数の 1 次成分
2F STANDBY	回転周波数 1 次成分の補償信号の学習終了 回転周波数 2 次成分の抽出待ち	回転周波数の 1 次成分
2F LEARNING	回転周波数 1 次成分の補償信号の学習終了 回転周波数 2 次成分の補償信号の学習中	回転周波数の 1 次成分　+　2 次成分
COMPLETE	補償信号の学習終了	回転周波数の 1 次成分　+　2 次成分

表 7-5　トルク振動抑制制御のアクション一覧

ACTION	説明
RESET	トルク振動抑制制御機能 OFF 状態にする。 補償信号および、補償値テーブルをリセットする。
START	トルク振動抑制制御機能を ON
LEARNING_ON	補償信号の学習開始条件を満たしたことによる、学習開始
LEARNING_OFF	補償信号のいずれかの学習終了条件を満たしたことによる、学習終了

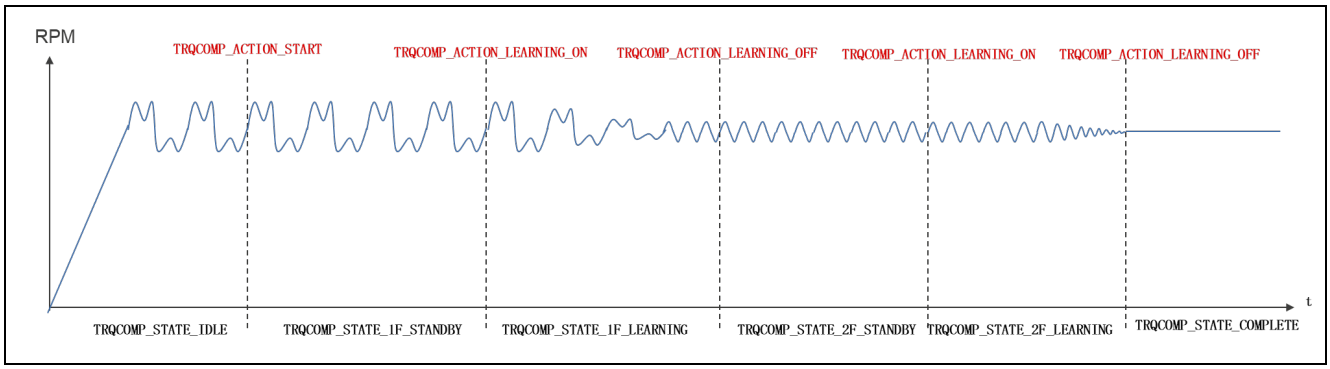


図 7-23　トルク振動抑制制御の状態遷移の様子

7.11 フライングスタート

フライングスタートは、モータが回転しているときにインバータが停止(全スイッチ OFF 状態)し、モータが回転している状態から、モータの回転速度及び回転磁極位置を推定しインバータを起動する機能です。

インバータを停止状態から再起動する際、三相下アームの短絡(図 7-25 を参照)を 2 回行い、回転子の誘起電圧によって流れる短絡電流ベクトルを用いて初期回転速度及び磁極位置の推定を行います。図 7-24 にフライングスタートの処理の内容を示します。t1~t2 期間及び t3~t4 期間に、インバータの 3 相下アーム素子を同時にオンし、t2 及び t4 のタイミングにおける回転電流ベクトルの位相から回転速度及び磁極位置を演算します。また t5 のタイミングで、演算した初期回転速度及び磁極位置を用いて位置・速度推定系及び速度 PI 制御系に初期値を設定しインバータの起動処理を行います。

本アルゴリズムでは、再起動可能な回転速度は、BEMF オブザーバ運転が可能な速度と定義しています。推定した回転速度が BEMF オブザーバの運転領域以外の場合、三相下アームを一定期間導通させることで、ブレーキトルクを発生させてモータの回転を停止させてから通常の起動処理を行います。

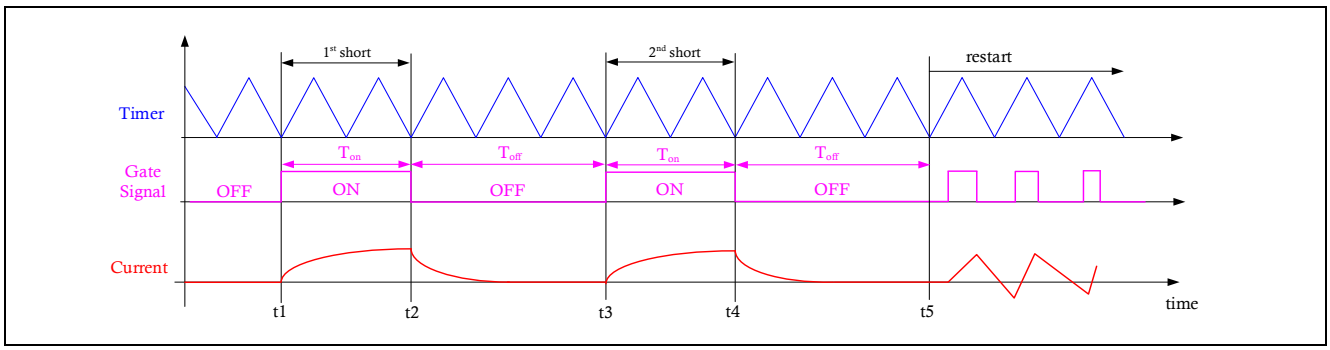


図 7-24　フライングスタートの動作波形例

(1) 回転速度検出

図 7-25 に 2 回短絡を行った時の回転電流ベクトルの位相関係を示します。検出した 3 相電流 iu, iv, iw から 2 相電流 iα, iβ を演算し、1 回目と 2 回目短絡時における電流ベクトルの位相角 θ1 及び θ2 を三角関数(atan2)から演算します。また電流ベクトル位相角 θ1 と θ2 及びパルスオン時間 Ton、オフ時間 Toff を用いて、式(7.11.1)を用いて回転電気角速度 ω を計算します。

$$\omega = \frac{\theta_2 - \theta_1}{T_{on} + T_{off}} \qquad \text{式(7.11.1)}$$

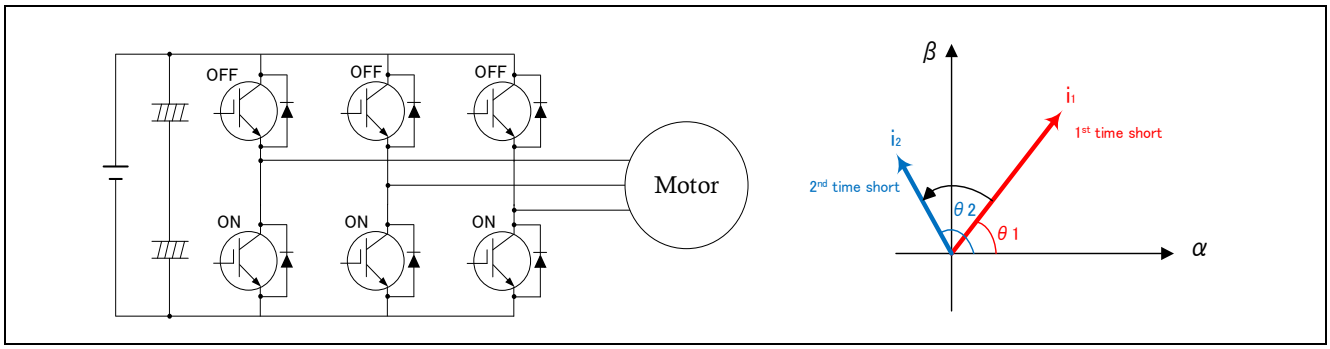


図 7-25　2 回短絡時の電流ベクトルの軌跡

2 回短絡した時の回転電流ベクトルがπ(180 度)以上回転した際、回転方向の区別ができないため(Ton+Toff)は以下の条件を満たす必要があります。下式において ω_{max} は最高回転電気角速度です。

$$Ton + Toff < \pi / \omega_{max} \qquad \text{式(7.11.2)}$$

(2) 磁極位置検出

dq 軸回転座標系における電圧方程式を式(7.11.3)に示します。

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + pL_d & -\omega L_q \\ \omega L_d & R + pL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \omega \psi \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \qquad \text{式(7.11.3)}$$

ここで v_d,v_q は dq 軸電圧、i_d,i_q は dq 軸電流、R は巻線抵抗、L_d,L_q は dq 軸インダクタンス、ψは回転子の誘起電圧係数、p は微分演算子です。上式において、三相短絡($v_d = 0$,$v_q = 0$)した時、式(7.11.4)となります。但し、電気時定数 L_q/R に対して短絡時間 Ton が十分短いとして R≒0.0 と近似します。

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} pL_d & -\omega L_q \\ \omega L_d & pL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \omega \psi \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \qquad \text{式(7.11.4)}$$

上式から、初期電流 i(0)=0 の条件でラプラス変換を用いて時刻 T における電流ベクトル i(T)を計算すると式(7.11.5)となります。

$$i(T) = \begin{bmatrix} i_d(T) \\ i_q(T) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{\psi}{L_d}(1 - \cos \omega T) \\ -\frac{\psi}{L_q} \sin \omega T \end{bmatrix} \qquad \text{式(7.11.5)}$$

回転角速度 ω 及び短絡時間 Ton を用いて、dq 軸回転座標系における電流ベクトル位相角θ_aを下式で演算します。

$$\theta_a = \mathrm{atan2}\left(\frac{i_q}{i_d}\right) = \mathrm{atan2}\left(\frac{-\frac{\psi}{L_q}\sin\omega T_{on}}{-\frac{\psi}{L_d}(1-\cos\omega T_{on})}\right) = \mathrm{atan2}\left(\frac{L_d \sin\omega T_{on}}{L_q(1-\cos\omega T_{on})}\right) \quad \text{式(7.11.6)}$$

ベクトル制御系における回転子の dq 座標系は、αβ 座標系の α 軸（U 相）を基準にする回転座標系であるため、d 軸の磁極位置θ_rを最終的には下式のように演算します。

$$\theta_r = \theta_i - \theta_a = \mathrm{atan2}\left(\frac{i_\beta}{i_\alpha}\right) - \mathrm{atan2}\left(\frac{i_q}{i_d}\right) \quad \text{式(7.11.7)}$$

図 7-26 に 2 回目短絡した時の回転電流ベクトルと磁極位置の位相関係を示します。θ_aは d 軸を基準にした電流ベクトル Ia の位相角、θ_iは α 軸を基準にした電流ベクトル Ia の位相角です。

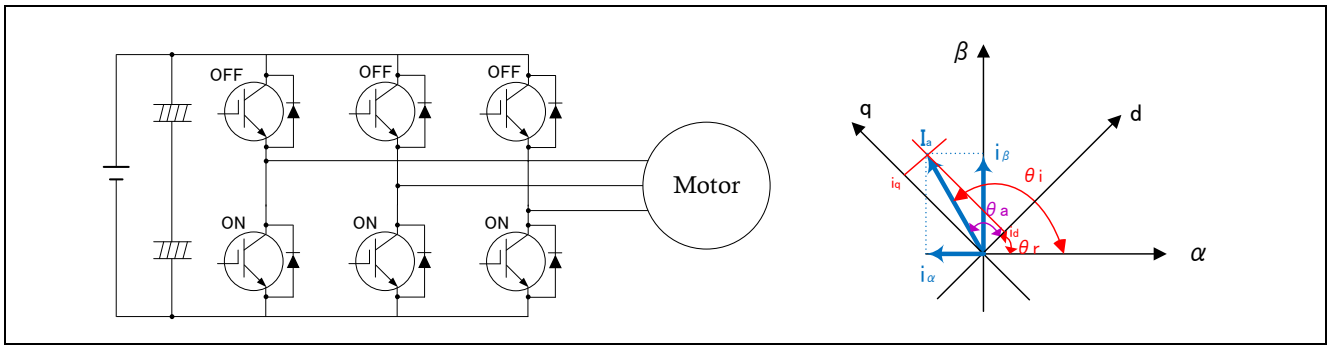


図 7-26　2 回目短絡時の電流ベクトルと磁極位置の関係

(3) 制御パラメータ設計

Ton,Toff 時間に関するパラメータは以下の方針に従って設計してください。

表 7-6　フライングスタートの制御パラメータ設計

[Ton+Toff 最大時間]	式(7.11.1)を用いて(Ton+Toff)max と回転速度との関係を説明します。最高回転速度 4000r/min における(Ton+Toff)max は、電気角 0.5 回転あたりにかかる時間と等しく、3.75ms となります。よって、全回転速度域において(Ton+Toff)は 3.75ms 以下をなるように設計します。このため、ターゲットモータ及び最高回転速度仕様に応じて本パラメータを決定してください。
[Ton 時間]	10.15 章の SENSORLESS_VECTOR_FLY_START_CURRENT_TH を参照ください。
[Toff 時間]	10.15 章の SENSORLESS_VECTOR_FLY_START_OFF_TIME_SEC を参照ください。

7.12 センサレス機能

7.12.1 概要

ゼロ速～低速域（600r/min 以下）では電流引き込み制御による OpenLoop 始動を行います。中高速領域(600r/min 以上)では誘起電圧オブザーバによる磁極位置推定方法を組み合わせることで、センサレスベクトル制御を実現しています。

オープンループ制御では脱調の恐れがあるため、定格の半分以下に負荷制限を行ってください。また、オープンループ制御時は、始動する際に電気角で最大 180°程度、モータが回転する場合があります。

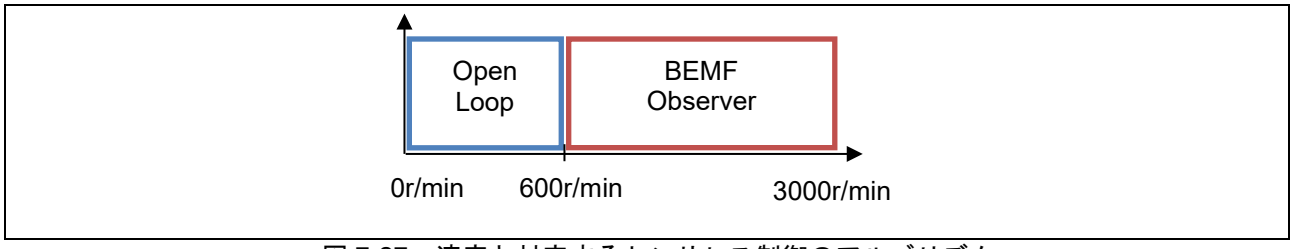


図 7-27　速度と対応するセンサレス制御のアルゴリズム

7.12.2 電流引き込み制御（OpenLoop）

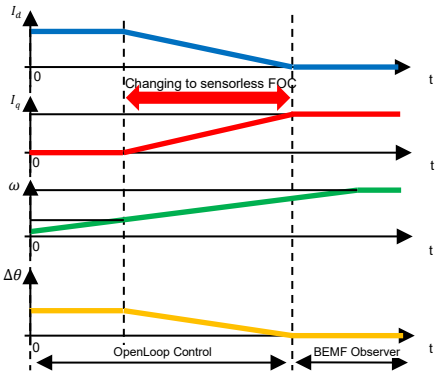
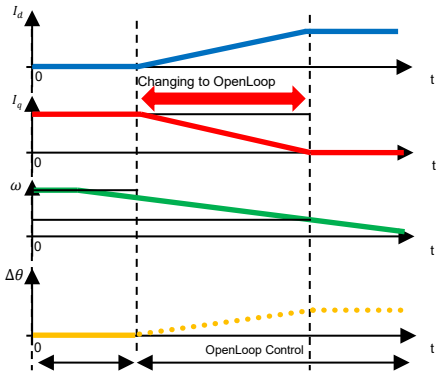
(a) 概要

低速域では、d 軸に＋方向の電流を流し、強制励磁して電流引き込み制御を行います。オープンループ制御となるため、定格負荷に対して数十パーセントの負荷しかかけることができません。定格負荷をかけるためには、後述する中高速域で使用する BEMF オブザーバを用いたセンサレスベクトル制御（電流フィードバック制御）のモードで使用ください。

(b) 中高速との切り替え処理

モータ始動後、誘起電圧が十分に推定可能な速度に到達したところで、センサレス制御(速度クローズドループ制御)に移行します。ただしオープンループ制御時は、位相誤差によりセンサレス制御移行時に電流及び速度のハンチングが起こる場合があります。そのため、位相誤差Δθから負荷トルクを推定し、表 7-7 のようなセンサレス制御への切り替え処理を行います。低速域から中高速域にセンサレスのアルゴリズムが切り替わる際、d 軸電流指令と q 軸電流指令を調整し、電流変動を抑えるように状態シーケンスを動作させます。逆に中高速域から低速域にセンサレスのアルゴリズムが切り替わる速度に達した場合は、オープンループでの動作に切り替わります。切り替え速度は、加速時と減速時で切り替えが頻繁に行われないよう、十分に離す必要があります。これらの速度は、後述のパラメータで調整することができます。これにより制御切り替え時の電流及び速度のハンチングを低減することができます。

表 7-7　センサレス切り替え処理時の各物理量の挙動イメージ（加速および減速時）

	
加速時	減速時

7.12.3 中高速域センサレスアルゴリズム

中高速域では、誘起電圧オブザーバを用いたセンサレスベクトル制御を用いて制御を行います。誘起電圧オブザーバのアルゴリズムは、本サンプルプログラムのベースとなっている、アプリケーションノート「永久磁石同期モータのセンサレスベクトル制御 Evaluation System for BLDC Motor 用 (R01AN6307)」の 5.6 誘起電圧オブザーバ（電流制御モジュール）にて詳細な説明が記載されています。

7.13 サンプルディレイ補償

UVW の三相電圧指令を生成する際に、推定した角度から任意の制御周期分、進めた角度で二相三相変換を行います。この処理により、制御結果反映までの位相進みを考慮することができ、制御の安定性を改善することができます。

指令演算中、モータの回転が進むことで、角度は常にずれが生じます。このずれを指令演算時間が一定であることを利用し、進む角度を前回の角度移動量から補間する機能となります。

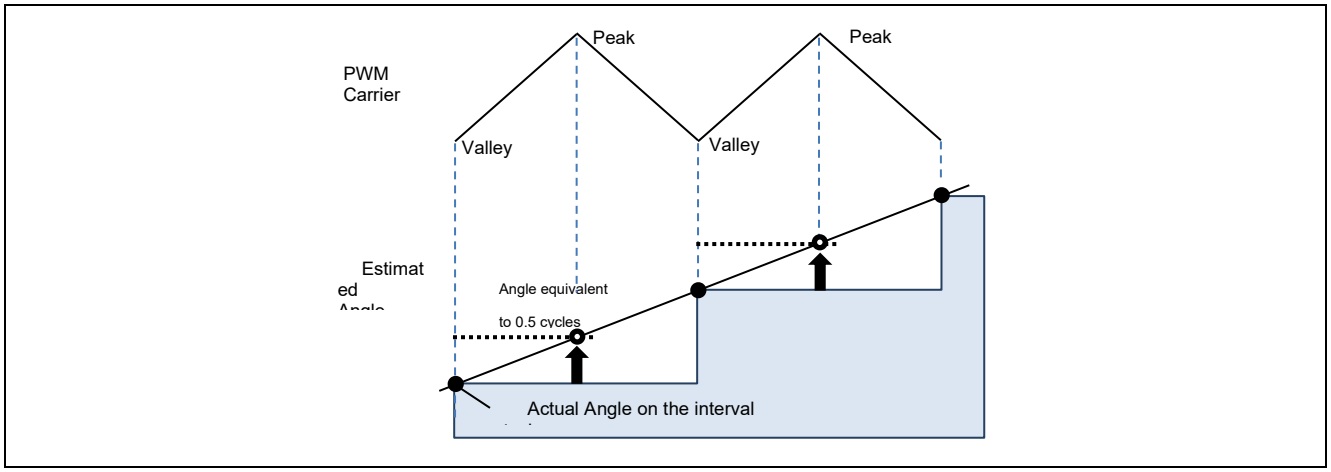


図 7-28　PWM キャリア周期で進む角度量の例

7.14 電圧誤差補償

電圧形 PWM インバータでは、上下アームのスイッチング素子間の短絡を防止するために、上下アーム 2 つの素子が同時にオフとなるデッドタイムを設けています。そのため電圧指令値と実際にモータに印加される電圧には誤差が生じ、制御精度が悪化します。そこでその誤差を低減するため、電圧誤差補償を実装します。

電圧誤差の電流依存性は、電流(向きと大きさ)とデッドタイム、使用するパワー素子のスイッチング特性に依存し、下記のような特性を持ちます。電圧誤差補償では、下記電圧誤差と逆の電圧パターンを電流に応じて電圧指令値に補償します。

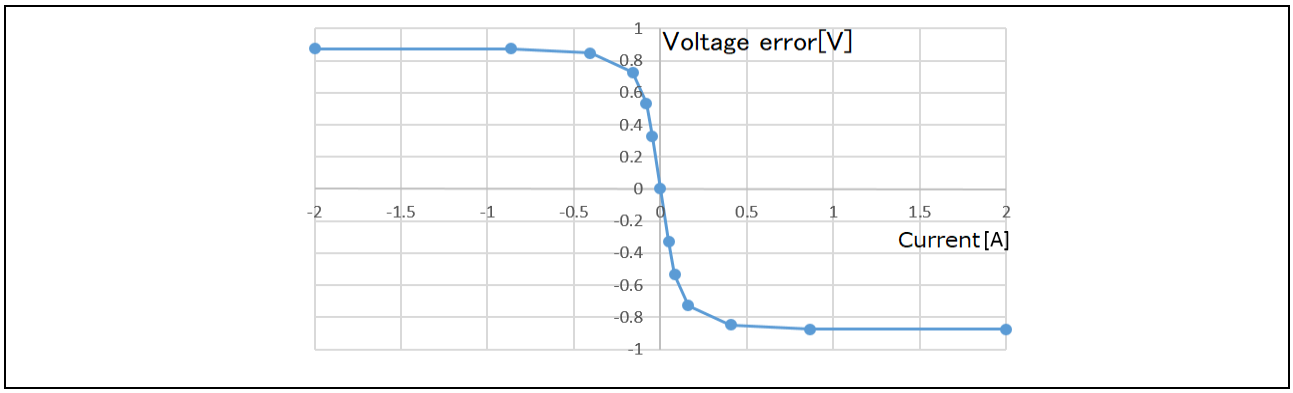


図 7-29　電圧誤差の電流依存性(一例)

7.15 PWM 変調方式

サンプルプログラムでは、モータへの入力電圧はパルス幅変調（PWM）によって生成します。本モジュールでは、PWM Duty 比の算出を行います。また、電圧利用率を上げるために、変調を行った電圧を出力できます。電流制御モジュールの API を通して変調の動作を設定します。本サンプルプログラムでは、2 種類のパルス幅変調駆動方式から選択できます。

(a)　正弦波変調(MOD_METHOD_SPWM)

永久磁石同期モータのベクトル制御において、一般的に所望の各相電圧指令値は正弦波状に生成します。実際にモータに印加される電圧のインバータ母線電圧に対する電圧利用率は、線間電圧換算で最大 86.7[%]となります。正弦波変調法を使用すると電圧利用率が 100%使用できないため、インバータの性能を最大限に活用できない場合があります。

本変調法では、変調率 m を以下のように定義しています。

$$m = \frac{V}{E}$$

m:変調率　　V:指令値電圧　　E:インバータ母線電圧

(b)　空間ベクトル変調相当(MOD_METHOD_SVPWM)

正弦波変調法では、そのまま PWM 生成のための変調波として使用すると、実際にモータに印加される電圧のインバータ母線電圧に対する電圧利用率は線間電圧換算で最大 86.7[%]となります。

そこで、下記式にあるように各相電圧指令値の最大値と最小値の平均値を算出し、それらを各相電圧指令値から減算したものを変調波として使用します。その結果、変調波の最大振幅は$\sqrt{3}/2$倍となり、線間電圧はそのままに電圧利用率は 100[%]となります。この方式は空間ベクトル変調と等価の結果が得られます。

$$\begin{pmatrix} V_u' \\ V_v' \\ V_w' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_u \\ V_v \\ V_w \end{pmatrix} + \Delta V \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$\because \Delta V = -\frac{V_{max}+V_{min}}{2},\ V_{max} = max\{V_u, V_v, V_w\},\ V_{min} = min\{V_u, V_v, V_w\}$$

V_u, V_v, V_w : U,V,W 相電圧指令値

V_u', V_v', V_w' : PWM 生成用 U,V,W 相電圧指令値(変調波)

変調率 m を以下のように定義します。

$$m = \frac{V'}{E}$$

m：変調率　V’：PWM生成用相電圧指令　E：インバータ母線電圧

8. PFC 制御アルゴリズム

8.1 概要

Power Factor Control(PFC)は、入力電流の力率改善と、母線電圧の昇圧機能を有する制御機能です。MCI-HV-1 では、インターリーブ PFC を想定した回路を具備しており、本サンプルプログラムではシングルフェーズ及びインターリーブ PFC 機能を実装しています。

本サンプルプログラムでは、交流電圧 Vac、PFC 制御電流 Ipfc、母線電圧 Vdc を入力とし、力率を制御しながら、母線電圧を設定電圧まで昇圧させる制御を行います。次項より、制御ブロック図および内部の各制御アルゴリズムを解説します。

8.2 制御ブロック図

図 8-1 に全体の PFC 制御ブロック図を示します。アウターループは電圧制御系であり、目標電圧指令値と PFC 出力電圧の偏差を制御器へ入力し、インナーループ電流制御系向けの電流指令値の演算を行います。

インナーループの電流制御系は、リアクトル(Lf)に流れる電流瞬時値を検出し、電圧制御系で生成される電流指令値に追従できるように電流 PI 制御を行い、また交流入力電圧と直流出力電圧に比例するフィードフォワードデューティ補償値を用いて PFC 回路におけるゲート駆動信号デューティを生成し、入力電圧と入力電流の位相(力率)調整を行います。

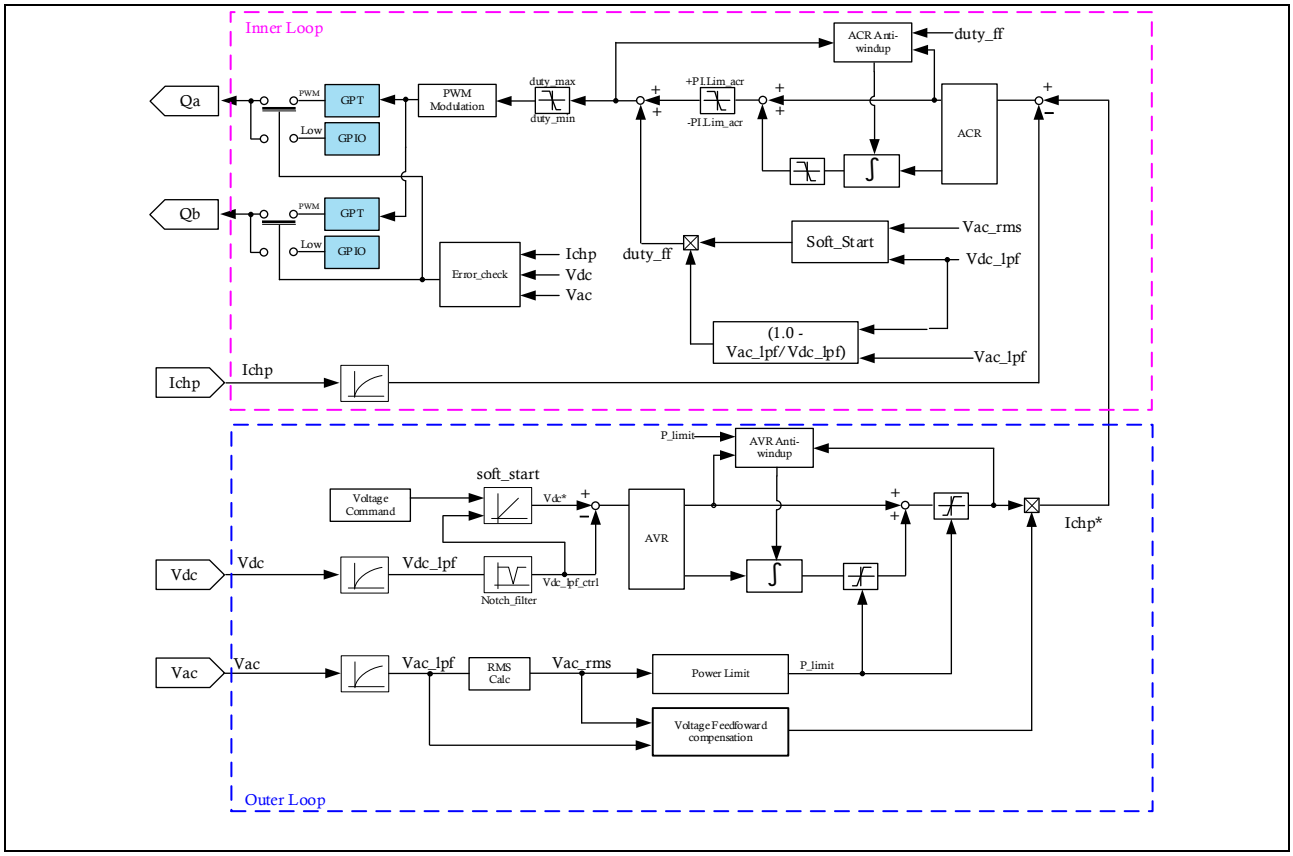


図 8-1　PFC 制御ブロック図

8.3　電圧制御機能

PFC 出力電圧指令値と出力電圧検出値の偏差を算出し、PI 制御処理関数に入力します。PI 制御処理関数内にて PI 制御器の積分項と出力が絶対値制限されるが、出力の下限値を 0 とするため、PI 制御処理関数外にてリミッタを設けます。

ゲイン算出のために、簡易的な電圧 PI 制御ブロック図を図 8-2 に示します。

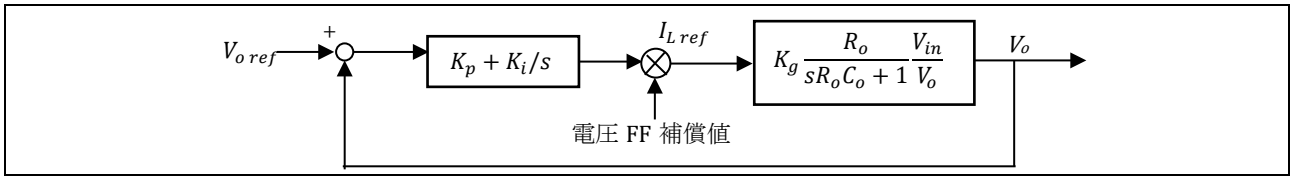


図 8-2　電圧 PI 制御ブロック図

PI 制御器の出力は PFC 出力電力であり、電圧 FF 補償値を乗算することで電流指令値としています。

ここで、制御対象は $K_g \frac{R_o}{sR_oC_o+1} \frac{V_{in}}{V_o}$ で表すことができます。

いま、Kp/Ki=RoCo とおくと、極零相殺できるので、以下の一次系伝達特性として表せます。

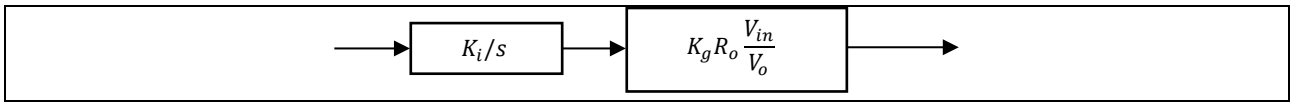


図 8-3　電圧 PI 制御 開ループ特性

開ループ特性 Go(s)を算出し、標準的な 1 次系伝達特性 Go(s)=ω/s と係数を比較すると、電圧制御の比例ゲイン Kp および積分ゲイン Ki はそれぞれ以下のように表されます。

$$K_p = \omega_v \frac{R_oC_o}{K_gR_o(V_{in}/V_o)}$$

$$K_i = \omega_v \frac{1}{K_gR_o(V_{in}/V_o)} T_s$$

ここでωv は電圧制御系固有周波数、Ro は出力抵抗、Co はキャパシタンス、Kg は定数、Vin は入力電圧、Vo は出力バス電圧、Ts は制御周期です。離散化のため後退矩形近似を考えると、積分項は Ts 倍されるので、上記 Ki に Ts が乗算されます。

8.4　パワー制限

入力電圧実行値に応じて傾斜係数を乗じて PFC 出力パワーのリミッタ値を演算し、電圧 PI 制御モジュールの積分項のリミッタ値、及び PI 出力のリミッタ値の更新を行います。

入力電圧が 200 [Vrms]以上の時は Pmax [W]に制限し、100～200 [Vrms]まではリニアに上昇させます。100 [Vrms]未満の時は Pmin [W]に制限します。また、PFC やインバータの回路損失を考慮し、マージン係数を設けて 1.0～1.4 倍調節可能とします。シングルフェーズ PFC の場合は Pmax 初期値=1000 [W], Pmin 初期値=500 [W]であり、インターリーブ PFC の場合は Pmax 初期値=2000 [W], Pmin 初期値=1000 [W]です。よって、電力最大値 Pmax、電力最小値 Pmin、傾斜係数は以下の式で表されます。

Pmax 中間値＝ Pmax 初期値 × マージン係数

Pmin 中間値＝ Pmin 初期値 × マージン係数

傾斜係数　＝ (Pmax 中間値 – Pmin 中間値) / (200 – 100)

Pmax＝ 200 × 傾斜係数

Pmin＝ 100 × 傾斜係数

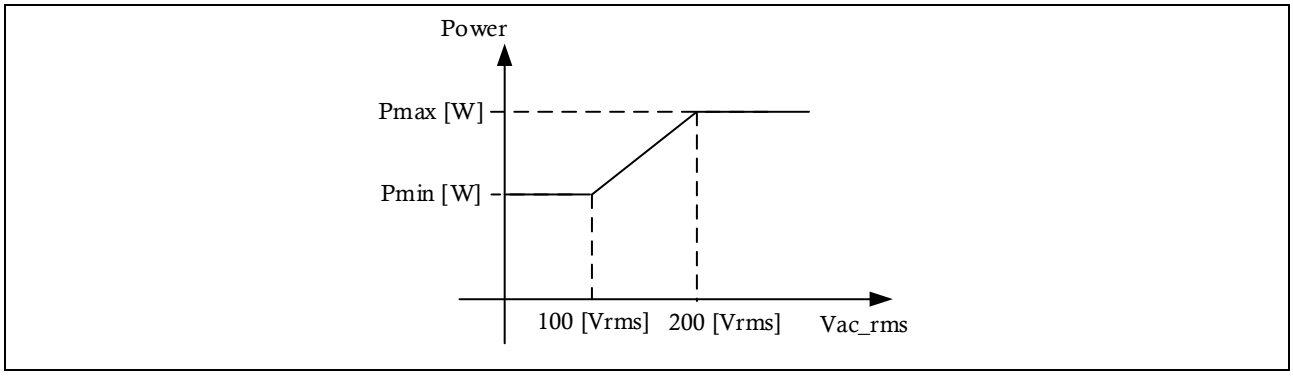


図 8-4　パワー制限

8.5　電圧 Anti-windup 制御

Anti-windup 制御は、電圧 PI 制御器の出力がリミッタにより制限され PFC 出力電圧が指令値に追従しなくなり、積分項が過剰に飽和することを回避する機能です。本機能は PI 制御器の比例項を優先に、PI 出力が飽和した際、PI 出力リミッタ値と比例項の差分電圧を積分項の積分バッファに強制的にセットし、積分項に PI 出力と見合う値を設定します。

8.6　電圧 FF 補償

電圧 PI 制御器の出力は PFC 出力パワーであるため、以下の電圧 FF 補償係数を演算し、パワー(W)から交流電流指令値(A)への変換を行います。

電圧 FF 補償係数　=　(入力電圧瞬時値)　/　(入力電圧実効値 × 入力電圧実効値)

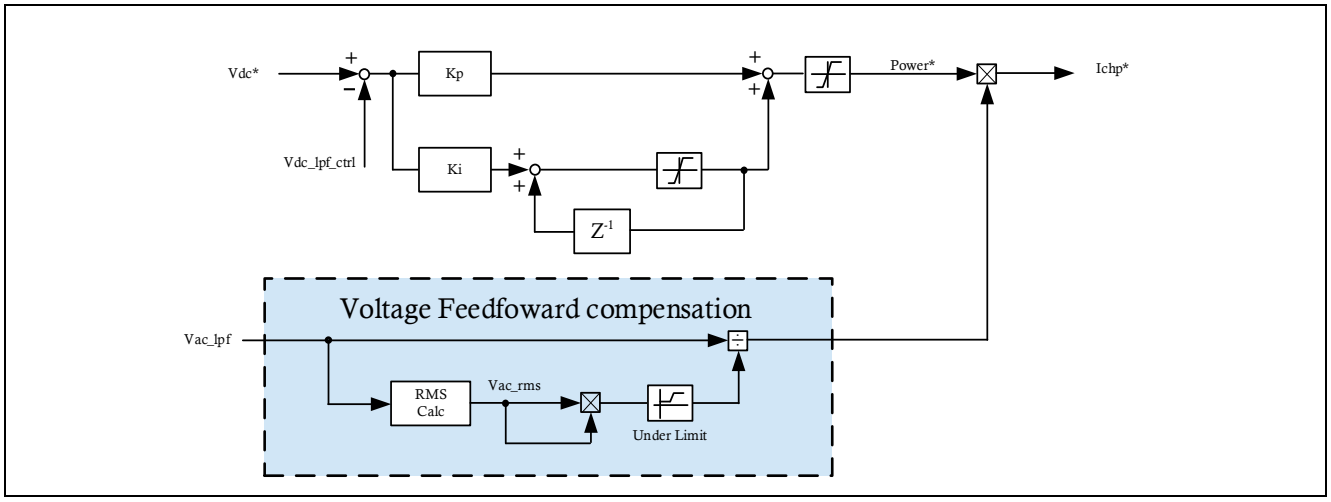


図 8-5　電圧 FF 補償ブロック図

8.7　電流制御機能

電流制御機能を構成する電流 PI 制御は、電圧 PI 制御系で生成された電流指令値通りに入力電流(リアクトル電流)を追従させることで、入力交流電圧と入力交流電流の力率制御を行います。以下の図 8-6 に電流制御系のブロック線図を示します。

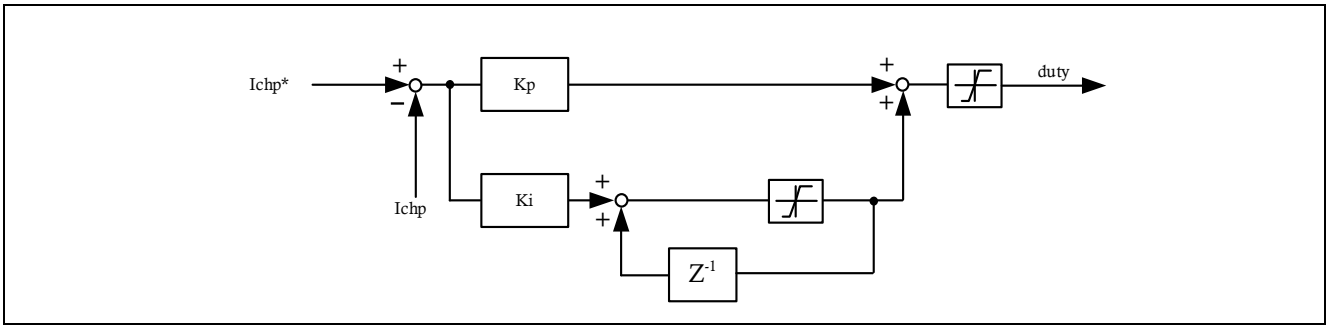


図 8-6　電流 PI 制御ブロック図

8.8　電流 Anti-windup 制御

電流制御系における Anti-windup 制御モジュールは、電流 PI 制御器の出力がリミッタにより制限され、入力電流(リアクトル電流)が指令値に追従されなくなり積分項が過剰に飽和することを回避するための機能です。本機能は PI 制御器の比例項を優先に、PI 出力が飽和した際、PI 出力リミッタ値と比例項の差分デューティを積分器に強制的にセットし、積分項に PI 出力と見合う値を設定します。

8.9　デューティ FF 補償

定常状態における入力電圧に対する出力電圧のデューティは、下式のような関係を満たします。

デューティ = 1.0 - 入力電圧/出力電圧

入力電圧や出力電圧変動時における過渡応答を向上させるために、上式を用いてフィードフォワード的にデューティ値を補償します。また、本デューティ FF 補償起動時における電流の過渡的な変動を抑制するためにソフトスタート機能を用いて、ソフトスタート時間通りに補償値を 0.0～1.0 に上昇させます。

9.　ソフトウェア仕様・構成

9.1　ソフトウェア仕様

本システムのソフトウェアの基本仕様を下記に示します。

表 9-1　本ソフトウェア基本仕様

項　目	内　容	
モータ制御方式	位置センサレスベクトル制御	
モータ制御開始／停止	RMW からの入力	
PFC 制御方式	Single Phase Current Continuous Mode / Interleaved Current Continuous Mode	
PFC 制御開始／停止	電源起動時に自動的に動作。該当の保護停止発生時に停止。	
回転子磁極位置検出	センサレス（電流引き込み制御 及び 誘起電圧オブザーバ）	
入力電圧	単相 AC100-240 [V] 50/60 [Hz]	
直流母線電圧	DC390 [V]	
PWM キャリア周波数	モータ制御	RA6T2 : 8 [kHz]、周期 125 [μs] 3shunt 電流検出方式：(谷割り込み) 1shunt 電流検出方式：(山割り込み)
		RA6T3 : 8 [kHz]、周期 125 [μs] 3shunt 電流検出方式：(谷割り込み) 1shunt 電流検出方式：(山割り込み)
		RA4T1 : 8 [kHz]、周期 125 [μs] 3shunt 電流検出方式：(谷割り込み) 1shunt 電流検出方式：(山割り込み)
		RX26T : 8 [kHz]、周期 125 [μs] 3shunt 電流検出方式：(谷割り込み) 1shunt 電流検出方式：(山割り込み)
	PFC 制御	RA6T2 : 32 [kHz]、周期 31.25 [μs]
		RA6T3 : 16 [kHz]、周期 62.5 [μs]
		RA4T1 : 12.5 [kHz]、周期 80.0 [μs]
		RX26T : 32 [kHz]、周期 31.25 [μs]
PWM 変調方式	正弦波変調または空間ベクトル変調	
デッドタイム	2.0 [us]	
制御周期	PFC	RA6T2 : 31.25 [us]
		RA6T3 : 62.5 [μs]
		RA4T1 : 80.0 [μs]
		RX26T : 31.25 [us]
	電流	RA6T2 : 125 [us]
		RA6T3 : 125 [us]
		RA4T1 : 125 [us]
		RX26T : 125 [us]
	速度	RA6T2 : 500 [us]
		RA6T3 : 500 [us]
		RA4T1 : 500 [us]
		RX26T : 500 [us]
	システムマネージャ	RA6T2 : 1.0 [ms]
		RA6T3 : 1.0 [ms]
		RA4T1 : 1.0 [ms]
		RX26T : 1.0 [ms]
速度指令値管理	CW：0 [r/min] to 4000 [r/min] CCW：0 [r/min] to -4000 [r/min]	

<table>
<tr><td rowspan="2">各制御系固有周波数</td><td>モータ制御系</td><td>電流制御系：300 [Hz]
速度制御系：3 [Hz]
誘起電圧オブザーバ：750 [Hz]
位置推定 PLL：10 [Hz]</td></tr>
<tr><td>PFC 制御系</td><td>電流制御系：1500 [Hz]
電圧制御系：12 [Hz]</td></tr>
<tr><td>保護停止処理</td><td colspan="2">以下のいずれかの条件の時、モータ制御信号出力（6 本）を非アクティブにします。
1. 各相の電流ピーク値が 9.33 [A]を超過（125 [µs]毎に監視）
2. インバータ母線電圧が 450 [V]を超過（125 [µs]毎に監視）
3. インバータ母線電圧が 100 [V]未満（125 [µs]毎に監視）
4. 回転速度が 4200 [r/min]を超過（125 [µs]毎に監視）
5. IPM または PFC 温度異常（PFC 制御周期で監視）
6. 過電流検出信号（POE/POEG）を検出時
7. 脱調検出機能有効時に脱調を検出したとき（125 [µs]毎に監視）
8. PFC 側のいずれかのエラーを検出時（1.0 [ms]毎に監視）

以下のいずれかの条件の時、PFC の出力 PWM 信号を非アクティブにします。
1. PFC 出力電圧が 450 [V]超過(PFC 制御周期で監視)
2. PFC 入力電圧が 388 [V]超過(PFC 制御周期で監視)
3. PFC 電流が 38 [A]超過(PFC 制御周期で監視)
4. PFC 出力が 80 [V]未満(PFC 制御周期で監視)
5. PFC 電流が 49.09 [A]を超過（外部割り込み）
6. IPM または PFC 温度異常(PFC 制御周期で監視)</td></tr>
</table>

9.2　ソフトウェア全体構造

ソフトウェアの全体構成を図 9-1 に示します。

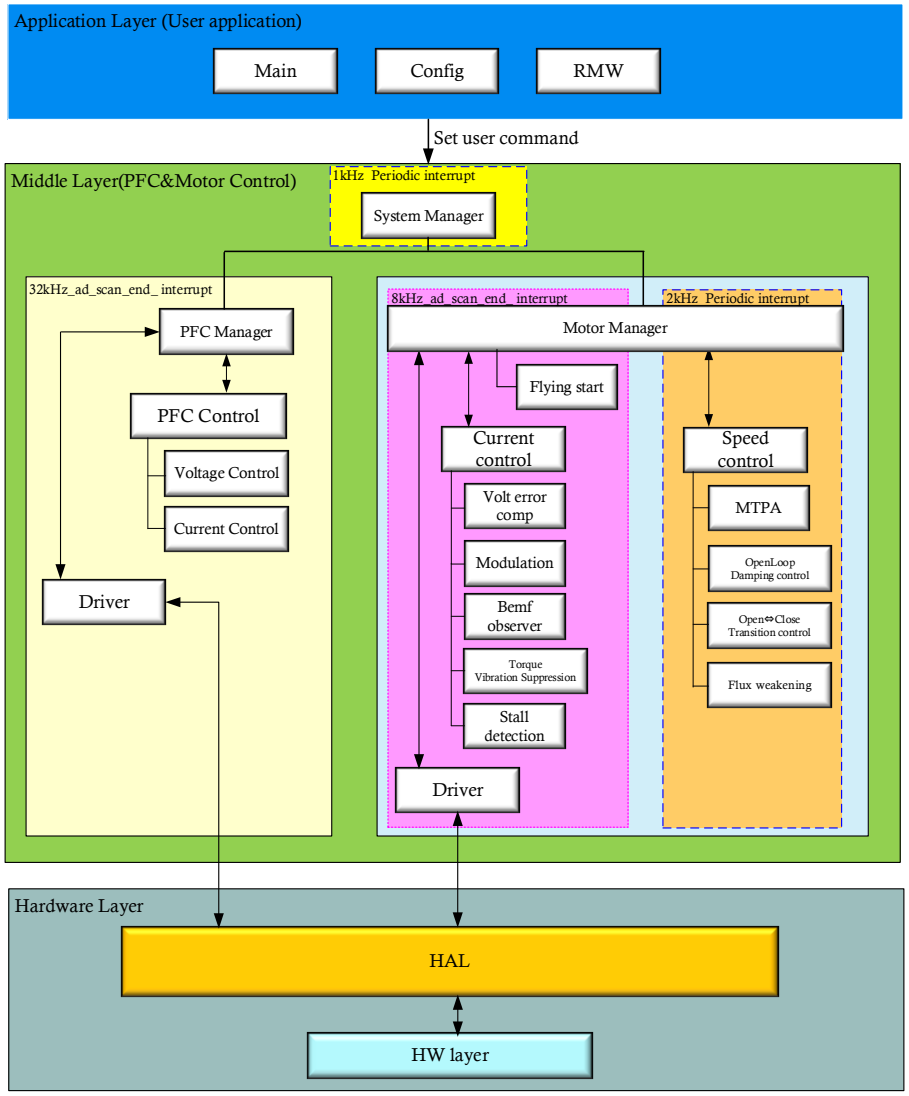


図 9-1　サンプルプログラムの全体構成

9.3　タスクの説明

モータ制御に関わるタスクは、0.5ms 周期の速度制御と電流制御(8kHz, 125us)です。PFC 制御に関わるタスクは、PFC 制御割り込み(32kHz,31.25us / 16kHz, 62.5us / 12.5kHz, 80.0us)です。

表 9-2　使用する割り込み・タスク（RA ファミリ MCU）

タスク	周辺機能	周期	割り込み関数	説明
モータ制御割り込み（速度制御）	agt0	500us	callback_agt_motor_speed_cyclic	
PFC 制御割り込み	adc0	RA6T2: 31.25 µs RA6T3: 62.5 µs RA4T1: 80.0 µs	callback_gpt_adc_cyclic	ADC 変換完了割り込みで動作します。2 つのタスクが割り込み関数を共有しており、FSP の ADC スタックから渡されるマスクを監視して判別します。
モータ制御割り込み（電流制御）（3 シャント電流検出時）	adc0	125us		
モータ制御割り込み（電流制御）（1 シャント電流検出時）	gpt4	125us	callback_gpt_motor_current_cyclic	
システムマネージャ周期割り込み	agt1	1ms	callback_agt_system_manager_cyclic	
リセット時	-		※エラー復帰時に状態遷移処理の中で実行されます	
PFC 過電流エラー割り込み	外部 IRQ		RA6T2: callback_irq2_pfc_error RA6T3, RA4T1: callback_irq0_pfc_error	
モータ出力過電流エラー割り込み	外部 IRQ		callback_poe_overcurrent	POEG のコールバック関数内では、必ず R_POEG_Reset()をコールしてフラグをリセットしてください。割り込み優先度によっては、その他の処理が停止する場合があります。
RMW 操作	-		r_app_rmw_ui_mainloop	

表 9-3　使用する割り込み・タスク（RX26T）

タスク	周辺機能	周期	割り込み関数	説明
モータ制御割り込み（速度制御）	CMT0	500 µs	r_Config_CMT0_cmi0_interrupt	
PFC 制御割り込み	RAM64KB 版: S12AD2 RAM48KB	31.25 µs	RAM64KB 版: r_Config_S12AD2_interrupt	

	版: S12AD0		RAM48KB 版: r_Config_S12AD0_groupb_interrupt	
モータ制御割り込み（電流制御）（3 シャント電流検出時）	S12AD0	125 µs	r_Config_S12AD0_interrupt	
モータ制御割り込み（電流制御）（1 シャント電流検出時）	GPT0	125 µs	r_Config_GPT0_gtciv0_interrupt	
システムマネージャ周期割り込み	CMT1	1 ms	r_Config_CMT1_cmi1_interrupt	
リセット時	—		※エラー復帰時に状態遷移処理の中で実行されます	
PFC 過電流エラー割り込み	RAM64KB 版: IRQ1 RAM48KB 版: IRQ5		RAM64KB 版: r_Config_ICU_irq1_interrupt RAM48KB 版: r_Config_ICU_irq5_interrupt	
モータ出力過電流エラー割り込み	POEGB		r_Config_POEG_poeggbi_interrupt	
RMW 操作	—		r_app_rmw_ui_mainloop	

9.4　ファイル・フォルダ構成

RA ファミリ MCU 用サンプルプログラムのフォルダとファイル構成を表 9-4 に示します。

表 9-4　ファイル・フォルダ構成（RA ファミリ MCU）

フォルダ	サブフォルダ	ファイル	備考
ra		FSP ライブラリ,ミドルウェア本体	フォルダ内編集禁止
ra_cfg		FSP ライブラリ用設定ヘッダ	
ra_gen		HAL 関連,自動生成ファイル群	
script		FSP 用リンカスクリプトファイル	
src/application		hal_entry.c hal_warmstart.c	起動ルーチンモジュール
src/application/main		mtr_interrupt.c/h	割り込み関数
		mtr_main.c/h	メインモジュール
src/application/mcu	ra6t2 / ra6t3 / ra4t1	r_app_mcu.c/h	mcu 固有モジュール
		r_app_mcu_callback.c	Callback 処理モジュール
		r_motor_driver_fsp.c	モータ関連 HAL ドライバ
		r_motor_driver_hal.h	モータ関連 HAL ドライバ定義
		r_pfc_driver_fsp.c	PFC 関連 HAL ドライバ
		r_pfc_driver_hal.h	PFC 関連 HAL ドライバ定義
src/application/motor_module	sensorless_vector	r_motor_sensorless_vector_action.c	アクション関数定義
		r_motor_sensorless_vector_api.c/h	モータマネージャモジュールの API 関数定義
		libr_motor_sensorless_vector_flyingstart.a r_motor_sensorless_vector_flyingstart.h	フライングスタートモジュール
		r_motor_sensorless_vector_manager.c/h	マネージャモジュールのローカル関数定義
		r_motor_sensorless_vector_protection.c/h	保護機能の関数定義
		r_motor_sensorless_vector_ statemachine.c/h	状態遷移関連の関数定義
	current	r_motor_current_api.c/h	電流制御モジュールの API 関数定義
		r_motor_current.c/h	電流制御モジュールのローカル関数定義
		r_motor_current_modulation.c/h	変調モジュールの関数定義
		libr_motor_current_volt_err_comp.a r_motor_current_volt_err_comp.h	電圧誤差補償モジュールの関数定義
		libr_motor_current_bemf_observer.a r_motor_current_bemf_observer.h	誘起電圧オブザーバの関数定義
		r_motor_current_pi_gain_calc.c	電流制御モジュールの制御ゲイン算出関数定義
		libr_motor_current_stall_detection.a r_motor_current_stall_detection.h	脱調検知モジュール
		libr_motor_current_trq_vib_comp.a r_motor_current_trq_vib_comp.h	トルク振動抑制モジュール
	speed	r_motor_speed_api.c/h	速度制御モジュールの API 関数定義
		r_motor_speed.c/h	速度制御モジュールのローカル関数定義
		libr_motor_speed_fluxwkn.a r_motor_speed_fluxwkn.h	弱め磁束制御モジュール
		r_motor_speed_mtpa.c/h	MTPA モジュール

フォルダ	サブフォルダ	ファイル	備考
		libr_motor_speed_opl_damp_ctrl.a r_motor_speed_opl_damp_ctrl.h	ダンピング制御モジュール
		libr_motor_speed_opl2less.a r_motor_speed_opl2less.h	センサレス制御切り替え処理関数定義
		r_motor_speed_pi_gain_calc.c	速度制御モジュールの制御ゲイン算出関数定義
	driver	r_motor_driver.c/h	ドライバモジュールの関数定義
	general	r_motor_filter.c/h	汎用フィルタ関数定義
		r_motor_pi_control.c/h	PI 制御関数定義
		r_motor_common.h	共通定義
	cfg	r_motor_inverter_cfg.h	インバータのコンフィグレーション定義
		r_motor_module_cfg.h	制御モジュールのコンフィグレーション定義
		r_motor_targetmotor_cfg.h	モータのコンフィグレーション定義
src/application/pfc_module	pfc_cfg	r_pfc_cfg.h	PFC 関連コンフィグレーション定義
	pfc_ctrl	r_pfc_ctrl.c/h r_pfc_ctrl_api.c/h	PFC 制御モジュール
	pfc_driver	r_pfc_driver.c/h	PFC 関連ドライバモジュール
	pfc_general	r_pfc_common.h r_pfc_filter.c/h r_pfc_pi_control.c/h	PFC 関連共通モジュール
	pfc_systask	r_pfc_manager.c/h r_pfc_manager_api.c/h r_pfc_manager_protection.c/h	PFC マネージャモジュール
src/application/system_module	system_manager	r_system_manager.c/h r_system_manager_api.c/h	システムマネージャモジュール
src/application/user_interface	ics	r_mtr_ics.c/h	RMW の I/F 関数定義
		ICS2_RAYYY[2].o/h	RMW の通信用ライブラリ
		convert.bat	MAP ファイル生成バッチ
		ElfMapConverter.exe	MAP ファイル生成ツール
		ICS2_RA YYY[2]_Built_in.o	RMW ビルトイン用オブジェクト
		XXX[1].rmt	RMT ファイル

FSP を使用することで、周辺機能ドライバを GUI 画面上から簡単に生成することができます。

FSP は、プロジェクトで使用するマイクロコントローラ、周辺機能、端子機能などの設定情報をプロジェクト・ファイル（configuration.xml）に保存しています。本サンプルプログラムの周辺機能設定を確認する場合、e[2] studio 上の FSP 設定画面を参照してください。FSP で生成したフォルダとファイル構成を下記に示します。

【注】 1. ‘XXX’は、プロジェクト毎に異なります。
2. ‘YYY’は、RA MCU 毎に異なります。例えば、RA6T2 用通信用ライブラリは ICS2_RA6T2.o/h となります。

表 9-5　FSP で生成されるフォルダの説明

フォルダ名	フォルダの説明
ra	様々な FSP に関連するモジュール・ライブラリファイルを含みます。自動生成されるため、フォルダ内のファイル・フォルダ構成は変更しないでください。

ra_cfg	FSP ライブラリの設定関連ヘッダファイルを含みます。自動生成されるため、フォルダ内のファイル・フォルダ構成は変更しないでください。
ra_gen	FSP のライブラリと、ユーザーアプリケーションを仲介する HAL(ハードウェア抽象化レイヤー)のファイルを含みます。ユーザが FSP で使用するために設定した値がモジュールとして生成されます。常時自動生成されるため、フォルダ内のファイル・フォルダ構成は変更しないでください。
script	FSP モジュールをリンカに登録するためのスクリプトファイルを含みます。

RAX26T 用サンプルプログラムのフォルダとファイル構成を表 9-6 に示します。

表 9-6　ファイル・フォルダ構成（RX26T）

フォルダ	サブフォルダ	ファイル	備考
smc_gen	Config_CMT0	Config_CMT0_user.c	制御周期用 CMT0 関連ユーザ関数定義
		Config_CMT0.c/h	制御周期用 CMT0 関連関数定義
	Config_CMT1	Config_CMT1_user.c	制御周期用 CMT1 関連ユーザ関数定義
		Config_CMT1.c/h	制御周期用 CMT1 関連関数定義
	Config_ELC (IPFC only)	Config_ELC_user.c	ELC 関連ユーザ関数定義
		Config_ELC.c/h	ELC 関連関数定義
	Config_GPT0	Config_GPT0_user.c	GPT0 関連ユーザ関数定義
		Config_GPT0.c/h	GPT0 関連関数定義
	Config_GPT1	Config_GPT1_user.c	GPT1 関連ユーザ関数定義
		Config_GPT1.c/h	GPT1 関連関数定義
	Config_GPT2	Config_GPT2_user.c	GPT2 関連ユーザ関数定義
		Config_GPT2.c/h	GPT2 関連関数定義
	Config_GPT3	Config_GPT3_user.c	GPT3 関連ユーザ関数定義
		Config_GPT3.c/h	GPT3 関連関数定義
	Config_GPT7 (IPFC only)	Config_GPT7_user.c	GPT7 関連ユーザ関数定義
		Config_GPT7.c/h	GPT7 関連関数定義
	Config_ICU	Config_ICU_user.c	ICU 関連ユーザ関数定義
		Config_ICU.c/h	ICU 関連関数定義
	Config_IWDT	Config_IWDT_user.c	IWDT 関連ユーザ関数定義
		Config_IWDT.c/h	IWDT 関連関数定義
	Config_POEG	Config_POEG_user.c	POEG 関連ユーザ関数定義
		Config_POEG.c/h	POEG 関連関数定義
	Config_PORT	Config_PORT_user.c	PORT 関連ユーザ関数定義
		Config_PORT.c/h	PORT 関連関数定義
	Config_S12AD0	Config_S12AD0_user.c	S12AD0 関連ユーザ関数定義
		Config_S12AD0.c/h	S12AD0 関連関数定義
	Config_S12AD2 (RAM48KB 版 only)	Config_S12AD2_user.c	S12AD2 関連ユーザ関数定義
		Config_S12AD2.c/h	S12AD2 関連関数定義
	general	共通	フォルダ内編集禁止
	r_bsp	ボードサポートパッケージ	
	r_config	コンフィグ	

フォルダ	サブフォルダ	ファイル	備考
	r_pincfg	ピン設定	
src/application		main.c	起動ルーチンモジュール
src/application/main		mtr_interrupt.c/h	割り込み関数
		mtr_main.c/h	メインモジュール
src/application/mcu	rx26t	r_app_mcu.c/h	HAL 依存処理メインモジュール
		r_motor_driver_smc.c	モータ関連 HAL ドライバ
		r_motor_driver_hal.h	モータ関連 HAL ドライバ定義
		r_pfc_driver_smc.c	PFC 関連 HAL ドライバ
		r_pfc_driver_hal.h	PFC 関連 HAL ドライバ定義
src/application/motor_module	sensorless_vector	r_motor_sensorless_vector_action.c	アクション関数定義
		r_motor_sensorless_vector_api.c/h	モータマネージャモジュールの API 関数定義
		r_motor_sensorless_vector_flyingstart.lib/h	フライングスタートモジュール
		r_motor_sensorless_vector_manager.c/h	マネージャモジュールのローカル関数定義
		r_motor_sensorless_vector_protection.c/h	保護機能の関数定義
		r_motor_sensorless_vector_statemachine.c/h	状態遷移関連の関数定義
	current	r_motor_current_api.c/h	電流制御モジュールの API 関数定義
		r_motor_current.c/h	電流制御モジュールのローカル関数定義
		r_motor_current_modulation.c/h	変調モジュールの関数定義
		r_motor_current_volt_err_comp.lib/h	電圧誤差補償モジュールの関数定義
		r_motor_current_bemf_observer.lib/h	誘起電圧オブザーバの関数定義
		r_motor_current_pi_gain_calc.c	電流制御モジュールの制御ゲイン算出関数定義
		r_motor_current_stall_detection.lib/h	脱調検知モジュール
		r_motor_current_trq_vib_comp.lib/h	トルク振動抑制モジュール
	speed	r_motor_speed_api.c/h	速度制御モジュールの API 関数定義
		r_motor_speed.c/h	速度制御モジュールのローカル関数定義
		r_motor_speed_fluxwkn.lib/h	弱め磁束制御モジュール
		r_motor_speed_mtpa.c/h	MTPA モジュール
		r_motor_speed_opl_damp_ctrl.lib/h	ダンピング制御モジュール
		r_motor_speed_opl2less.lib/h	センサレス制御切り替え処理関数定義
		r_motor_speed_pi_gain_calc.c	速度制御モジュールの制御ゲイン算出関数定義
	driver	r_motor_driver.c/h	ドライバモジュールの関数定義
	general	r_motor_filter.c/h	汎用フィルタ関数定義
		r_motor_pi_control.c/h	PI 制御関数定義
		r_motor_common.h	共通定義
	cfg	r_motor_inverter_cfg.h	インバータのコンフィグレーション定義
		r_motor_module_cfg.h	制御モジュールのコンフィグレーション定義
		r_motor_targetmotor_cfg.h	モータのコンフィグレーション定義

フォルダ	サブフォルダ	ファイル	備考
src/application/pfc_module	pfc_cfg	r_pfc_cfg.h	PFC 関連コンフィグレーション定義
	pfc_ctrl	r_pfc_ctrl.c/h r_pfc_ctrl_api.c/h	PFC 制御モジュール
	pfc_driver	r_pfc_driver.c/h	PFC 関連ドライバモジュール
	pfc_general	r_pfc_common.h r_pfc_filter.c/h r_pfc_pi_control.c/h	PFC 関連共通モジュール
	pfc_systask	r_pfc_manager.c/h r_pfc_manager_api.c/h r_pfc_manager_protection.c/h	PFC マネージャモジュール
src/application/system_module	system_manager	r_system_manager.c/h r_system_manager_api.c/h	システムマネージャモジュール
src/application/user_interface	ics	r_mtr_ics.c/h	RMW の I/F 関数定義
		ICS2_RX26T.h	RMW の通信用ライブラリ
		XXX.rmt	RMT ファイル
		ICS2_RX26T.lib	RMW の通信用ライブラリ

SC を使用することで、周辺機能ドライバを GUI 画面上から簡単に生成することができます。

SC は、プロジェクトで使用するマイクロコントローラ、周辺機能、端子機能などの設定情報をプロジェクト・ファイル（RX26T_XXX.scfg）に保存しています。本サンプルプログラムの周辺機能設定を確認する場合、e² studio 上の SC 設定画面を参照してください。なお、'XXX'は、プロジェクト毎に異なることにご注意ください。

9.5　アプリケーション層

アプリケーション層はシステムマネージャとユーザインタフェースとなる RMW の管理処理、システムマネージャに対する制御の指令値設定や制御モジュールのパラメータ更新を行っています。サンプルプログラムでは、RMW を使用 (RMW UI) して、設定及び処理を行います。また、この UI からモータの駆動/停止や、制御の指令値設定などを行っています。

9.5.1　機能

アプリケーション層で行われる機能一覧を表 9-7 に示します。

表 9-7　アプリケーション層の機能一覧

機能	説明
メイン処理	ユーザの指令に対してシステムを有効 / 無効に設定します。
RMW の UI 処理	RMW の管理、指令値含むパラメータの取得・設定を行います。
MCU の初期設定	FSP/SC を用いて MCU の初期設定を行います。キャリブレーションやアプリケーションに合わせた設定も併せて行います。
FSP/SC との仲介処理	FSP/SC に設定された、周辺機能に割り付けられたコールバック関数の定義と、システムマネージャを通じて下位のモジュールに受け渡す処理を行います。
LED の処理	ユーザが自由に使用可能な LED 操作機能を用意しています。

9.5.2　構造体・変数情報

アプリケーション層でユーザが使用可能な変数一覧は、システムマネージャにて定義・管理されていますが、サンプルソフトウェアの利用の便宜上、RMW の章の表 6-5 に示します。また、RMW を使用してモータモジュールのパラメータを更新するための構造体を用意しており、その構造体メンバを表 9-8 に示します。

変数は、RMW から値を設定することで、本アプリケーション層が表 9-8 に示す構造体を介して、各制御モジュールの変数に、変更した値が各モジュールの Update 関数を介して反映されます。

表 9-8　RMW によるパラメータ更新用構造体の変数一覧

構造体	変数	説明
st_rmw_param_buffer_t RMW 変数更新用構造体	u2_offset_calc_time	電流オフセットの検出時間[s]
	u2_charge_bootstrap_time	ブートストラップ回路への充電時間 [cnt]
	st_motor	モータパラメータ用の構造体
	f4_max_speed_rpm	最大速度 [r/min] (機械角)
	u1_ctrl_loop_mode	制御ループのモード (速度制御)
	f4_ol_ref_id	オープンループ制御時 Id 電流指令値 [A]
	f4_id_up_time	Id 上昇時間 [cnt]
	f4_id_down_time	Id 下降時間 [cnt]
	f4_id_down_speed_rpm	モータ制御方式切り替え速度（加速時）[r/min]
	f4_id_up_speed_rpm	モータ制御方式切り替え速度（減速時）[r/min]

構造体	変数	説明
	f4_current_omega_hz	電流制御系固有周波数 [Hz]
	f4_current_zeta	電流制御系減衰係数
	f4_speed_omega_hz	速度制御系固有周波数 [Hz]
	f4_speed_zeta	速度制御系減衰係数
	f4_speed_lpf_hz	速度 LPF カットオフ周波数[Hz]
	f4_ref_speed_rpm	速度指令値 [r/min] (機械角)
	f4_speed_rate_limit_rpm	速度の変化量制限 [r/min/s] (機械角)
	f4_overspeed_limit_rpm	速度制限値 [r/min] (機械角)
	u1_flag_volt_err_comp_use	電圧誤差補償の有効/無効
	u1_flag_fluxwkn_use	弱め磁束制御の有効/無効
	u1_flag_mtpa_use	最大トルク/電流制御の有効/無効
	u1_flag_flying_start_use	フライングスタートの有効/無効
	u1_flag_stall_detection_use	脱調検出の有効/無効
	u1_flag_trq_vibration_comp_use	トルク振動抑制の有効/無効
	u1_flag_trq_vibration_comp_mode	トルク振動抑制・補償信号生成方式
	f4_e_obs_omega_hz	誘起電圧推定系固有周波数 [Hz]
	f4_e_obs_zeta	誘起電圧推定系減衰係数
	f4_pll_est_omega_hz	位置推定系固有周波数 [Hz]
	f4_pll_est_zeta	位置推定系減衰係数
	u1_flag_less_switch_use	センサレス切り替えのソフトスイッチングの有効/無効
	f4_switch_phase_err_deg	センサレス切り替え角度誤差[deg]
	f4_opl2less_sw_time	センサレス切り替え時間[s]
	f4_phase_err_lpf_cut_freq	角度誤差 LPF 周波数[Hz]
	u1_flag_openloop_damping_use	ダンピング機能の有効/無効
	f4_ed_hpf_omega	ダンピング制御・HPF 固有周波数[Hz]
	f4_ol_damping_zeta	ダンピング制御・減衰係数
	f4_ol_damping_fb_limit_rate	ダンピング制御・フィードバック制限率
	f4_id_hpf_time	脱調検知・Id 振動検出用 HPF 定数
	f4_iq_hpf_time	脱調検知・Iq 振動検出用 HPF 定数
	f4_threshold_level	脱調検知・閾値[A]
	f4_threshold_time	脱調検知・監視時間[s]
	u1_target_2f	トルク振動抑制・抑制対象の 2 次成分の抑制 有効/無効
	f4_timelead_1f	トルク振動抑制・位相調整値（1 次成分）

構造体	変数	説明
	f4_timelead_2f	トルク振動抑制・位相調整値（2 次成分）
	f4_tf_lpf_omega	トルク振動抑制・LPF カットオフ周波数
	f4_output_gain_1f	トルク振動抑制・TF 出力ゲイン（1 次成分）
	f4_output_gain_2f	トルク振動抑制・TF 出力ゲイン（2 次成分）
	f4_input_weight2	トルク振動抑制・重みづけ 2
	f4_input_weight1	トルク振動抑制・重みづけ 1
	f4_input_weight0	トルク振動抑制・重みづけ 0
	f4_suppression_th_1f	トルク振動抑制・抑制目標（1 次成分）
	f4_suppression_th_2f	トルク振動抑制・抑制目標（2 次成分）
	f4_abnormal_output_th_1f	トルク振動抑制・TF 出力異常度（1 次成分）
	f4_abnormal_output_th_2f	トルク振動抑制・TF 出力異常度（2 次成分）
	f4_restart_speed	フライングスタート・再始動速度 [r/min](機械角)
	f4_off_time	フライングスタート・短絡 OFF 時間[s]
	f4_over_time	フライングスタート・短絡検出監視時間 [s]
	f4_active_brake_time	アクティブブレーキ時間[s]
	f4_on_current_th	短絡電流閾値[A]

9.5.3　マクロ定義

RMW のマクロ一覧を表 9-9 に示します。

表 9-9　マクロ一覧

ファイル名	マクロ名	定義値	備考
r_app_mcu.h	ICS_DECIMATION	RA6T2, RA6T3, RA4T1, RX26T: 3	RMW watchpoint のスキップ回数
	ICS_BRR	RA6T2,RX26T: 19 RA6T3, RA4T1: 250	RMW の通信ボーレート
	ICS_INT_MODE	RA6T2,RX26T: 1 RA6T3, RA4T1: 3	RMW の通信モード選択

【注】 RMW で通信を行うためのチャネルを定義したマクロが ICS2_RAyyy.h, ICS2_RX26T.h に用意されています。（yyy は MCU の名称）

9.5.4　パラメータ調整・設定

アプリケーション層で設定できるパラメータは、RMW で使用する com 変数のみです。システムマネージャやモータマネージャ、PFC マネージャで使用するパラメータは、それぞれの章を参照してください。

運転中の変数の設定・更新は、RMW から行ってください。RMW の操作は 6.7 及び Renesas Motor Workbench ユーザーズマニュアル（r21uz0004）を参照ください。

9.6　システムマネージャ

システムマネージャ(r_system_manager)は、アプリケーション層から与えられる指令値やパラメータ設定、コールバック通知を元に、モータマネージャと PFC マネージャの指令値設定や制御モジュールのパラメータ更新を行っています。

9.6.1　機能

システムマネージャで設定している機能一覧を以下に示します。

表 9-10　システムマネージャの機能一覧

機能	説明
システムマネージャ処理	アプリケーション層から与えられる指令値、パラメータの処理ならびにコールバック関数の受け渡しを行います。また、モータマネージャと PFC マネージャ間における検出値や状態の受け渡し処理も行います。
モータマネージャ処理	速度制御の指令値の取得・設定を行います。
PFC マネージャ処理	PFC 制御を行います。

9.6.2　モジュール構成図

モジュール構成図を図 9-2 に示します。

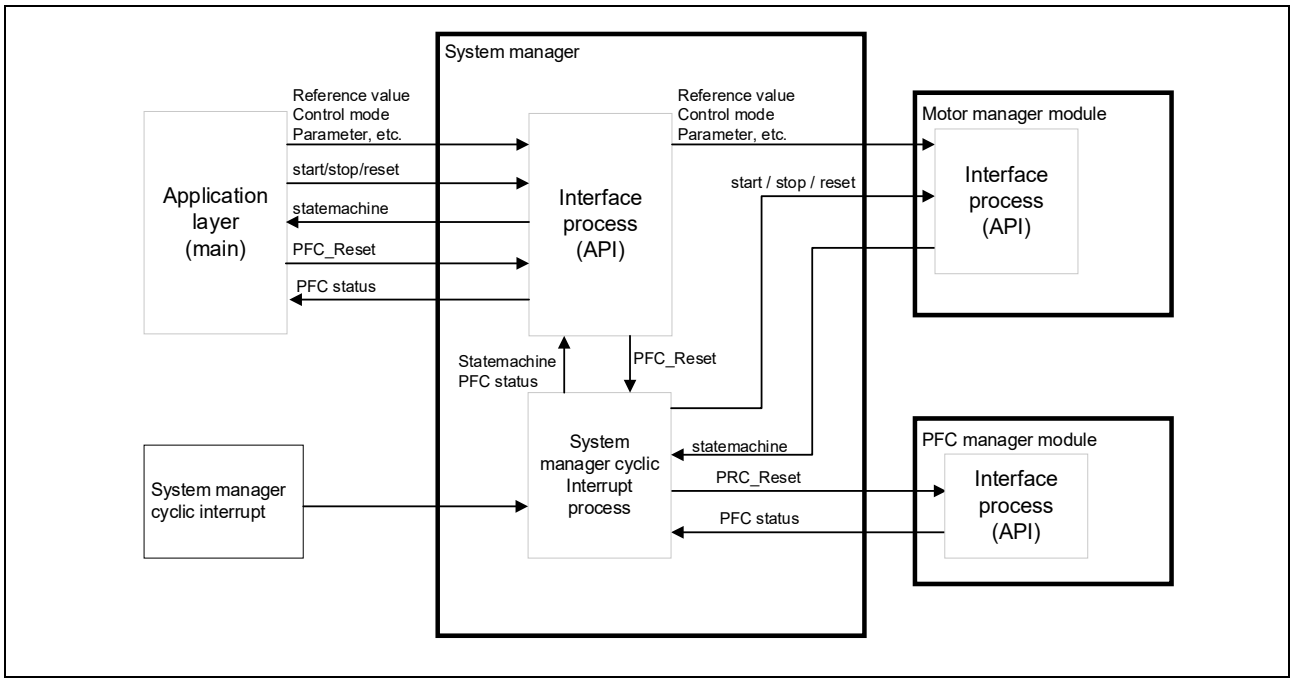


図 9-2　システムマネージャのモジュール構成図

9.7　モータマネージャ

モータマネージャ(r_motor_sensorless_vector_manager)は、モータ制御モジュールに含まれる各制御モジュールを適切に使用してモータ制御を行うモジュールです。各モジュールのインタフェースやモータ制御のシステム全体の管理、システム保護などを行っています。

9.7.1　機能

モータマネージャの機能一覧を表 9-11 に示します。モータ制御モジュールの機能の一覧を表 9-12 及び表 9-13 に示します。

表 9-11　モータマネージャモジュールの機能一覧

機能	説明
モード管理	ユーザの指令に対してシステムを切り替えてモータを制御します。
保護機能	システム保護機能によりエラー処理を行います。
制御方式の管理	速度制御や電流制御の状態の取得・設定を行います。
速度・位置情報の取得	速度制御・電流制御モジュールから、速度・位置情報の取得を行います。
制御モジュールの指令値設定	電流制御・速度制御モジュールに対して入力する指令値を制御の状態から選択します。
フライングスタート	モータが回転中であっても、始動する機能です。
割り込み処理	FSP/SC で設定したコールバック関数（割り込み）を受けて処理を行い、適切なモジュールへ処理の割り振りを行います。

表 9-12　速度制御モジュールの機能一覧

機能	説明
速度制御	速度指令値に追従するよう演算を行い、電流指令値を出力します。
速度指令設定	速度モジュールに速度指令値を設定します。
弱め磁束制御	d 軸電流を制御し、定格回転速度以上でも運転できるように制御します。
最大トルク/電流制御	d 軸電流を制御し、負荷状況に応じて最大のトルクが出力されるようにします。

表 9-13　電流制御モジュールの機能一覧

機能	説明
電流制御	電流指令値に追従するよう演算を行い、PWM 出力値を設定します。
電流オフセット調整	AD で検出した電流値のオフセット値を計算します。
電圧誤差補償	出力電圧のデッドタイムによる影響を補償します。
順変換、逆変換	ベクトル制御を行うために検出した電流値に対して、座標変換を行います。演算結果に対して座標の逆変換を行い元の座標軸に戻します。
PWM 変調	PWM 信号に変調してモータに任意の周波数・電圧を印加します。
非干渉制御	dq 軸の干渉を防ぐために干渉を打ち消す演算を行います。
サンプルディレイ補償	3 相電圧指令値を生成する際に電流制御サイクル分のサンプル遅延を補償します。
トルク振動抑制	機械角 1 周期の負荷振動を検知して、抑制する制御を行います。
脱調検知	モータの磁極位置と制御系の磁極がずれたことを検知し、停止させます。
誘起電圧オブザーバ	中高速運転時に誘起電圧オブザーバを使って、位置・速度を推定します。

9.7.2　モジュール構成図

モジュール構成図を図 9-3 に示します。

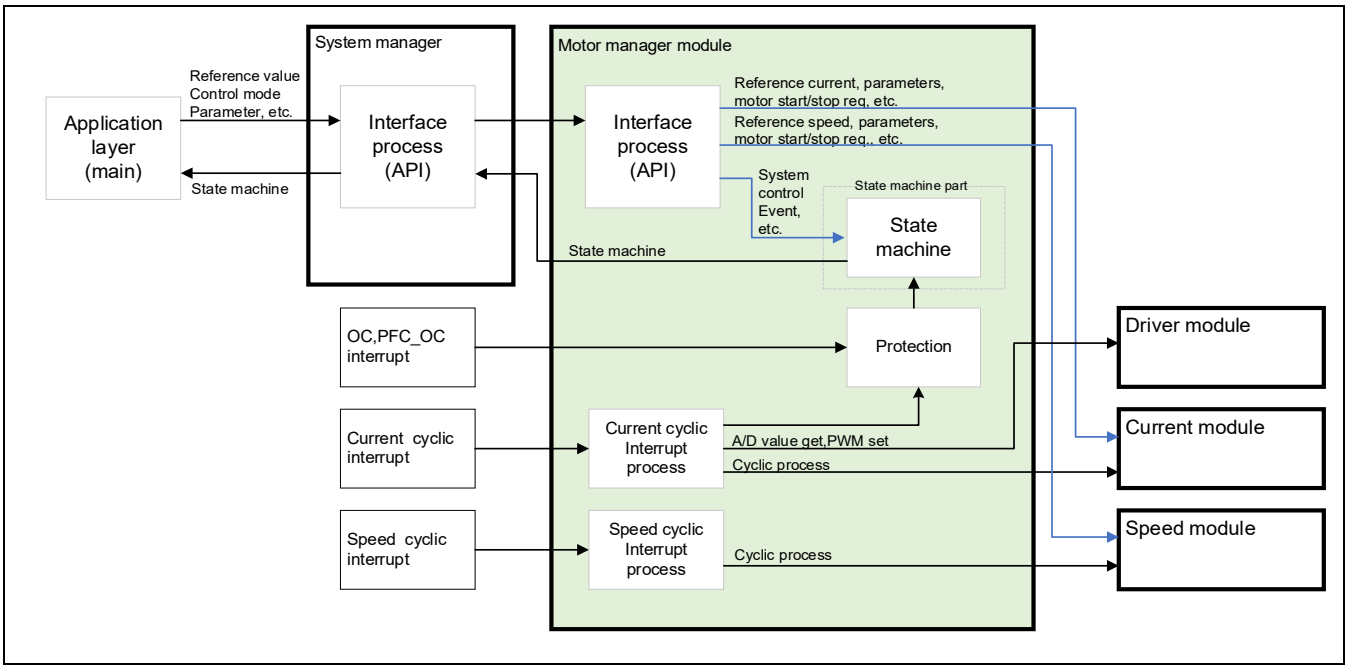


図 9-3　マネージャモジュール構成図

9.7.3　モード管理

図 9-4 に本サンプルプログラムにおける状態遷移図を示します。本サンプルプログラムでは、「SYSTEM MODE」と、「RUN MODE」により状態を管理し、「Control Config」は、ソフトウェア内でアクティブになっている制御系を表しています。

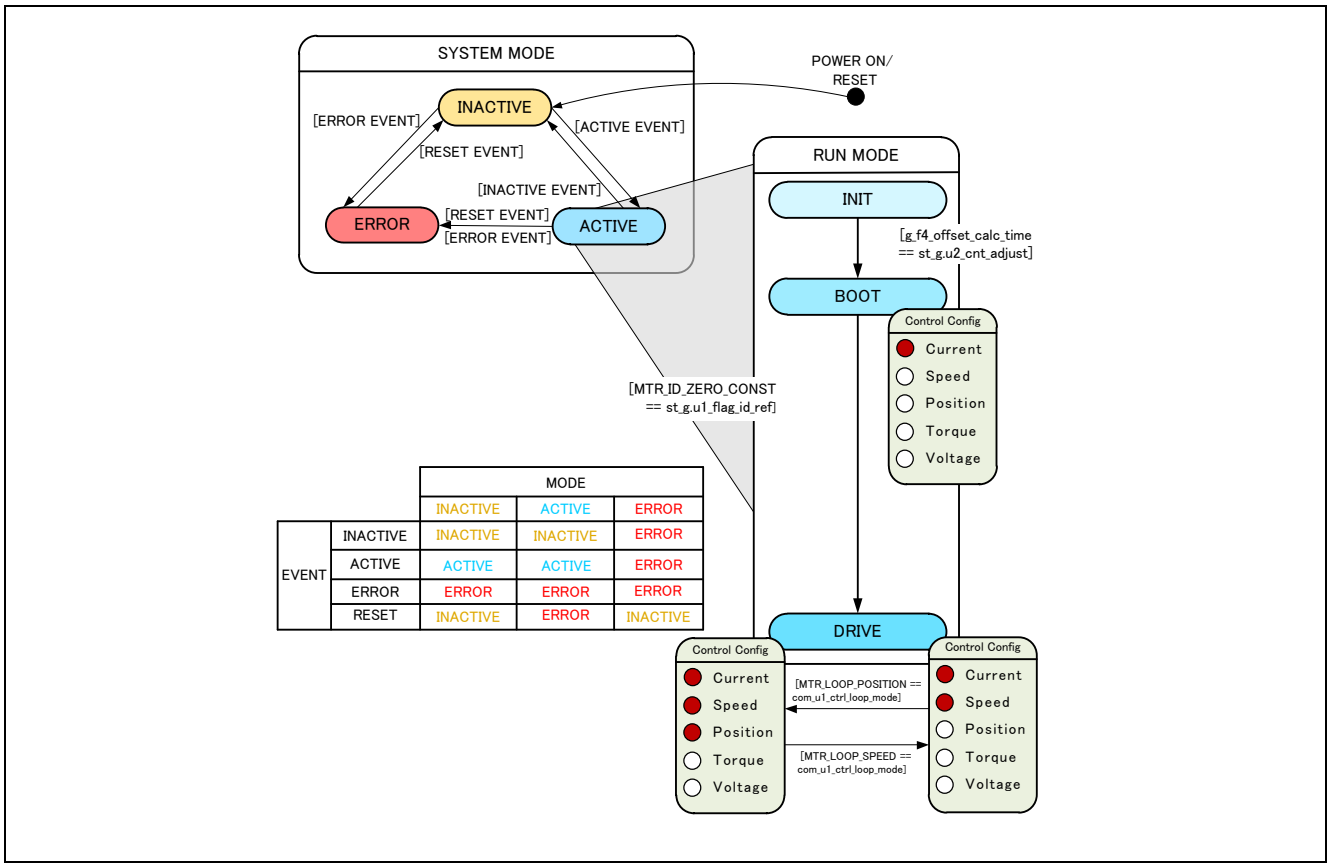


図 9-4　モータ制御ソフトウェアの状態遷移図

(1)　SYSTEM MODE

システム動作状態を表します。各イベント（EVENT）の発生により、状態が遷移します。システムの動作状態は、モータ駆動停止（INACTIVE）、モータ駆動（ACTIVE）、異常状態（ERROR）があります。

(2)　RUN MODE

モータの制御状態を表します。システムの状態が ACTIVE になると、モータの駆動状態が図 9-4 のように遷移します。

(3)　EVENT

各 SYSTEM MODE 中に EVENT が発生すると、その EVENT に従って、システム動作状態が図 9-4 中の表のように遷移します。各 EVENT の発生要因は下記となります。

表 9-14　EVENT 一覧

イベント名	発生要因
INACTIVE	ユーザ操作により発生します
ACTIVE	ユーザ操作により発生します
ERROR	システムが異常を検出したときに発生します
RESET	ユーザ操作により発生します

9.7.4　シーケンスの説明

本サンプルプログラムでは、モードと呼ばれる運転・停止・エラーを管理する状態遷移に加えて、２種類の方式を速度に応じて切り替えるセンサレス制御を行います。そのための運転状態を管理するシーケンスの２つを有しています。モードは、9.7.3 を参照してください。ここでは、後者の運転状態を管理するシーケンスを説明します。以下に示します。

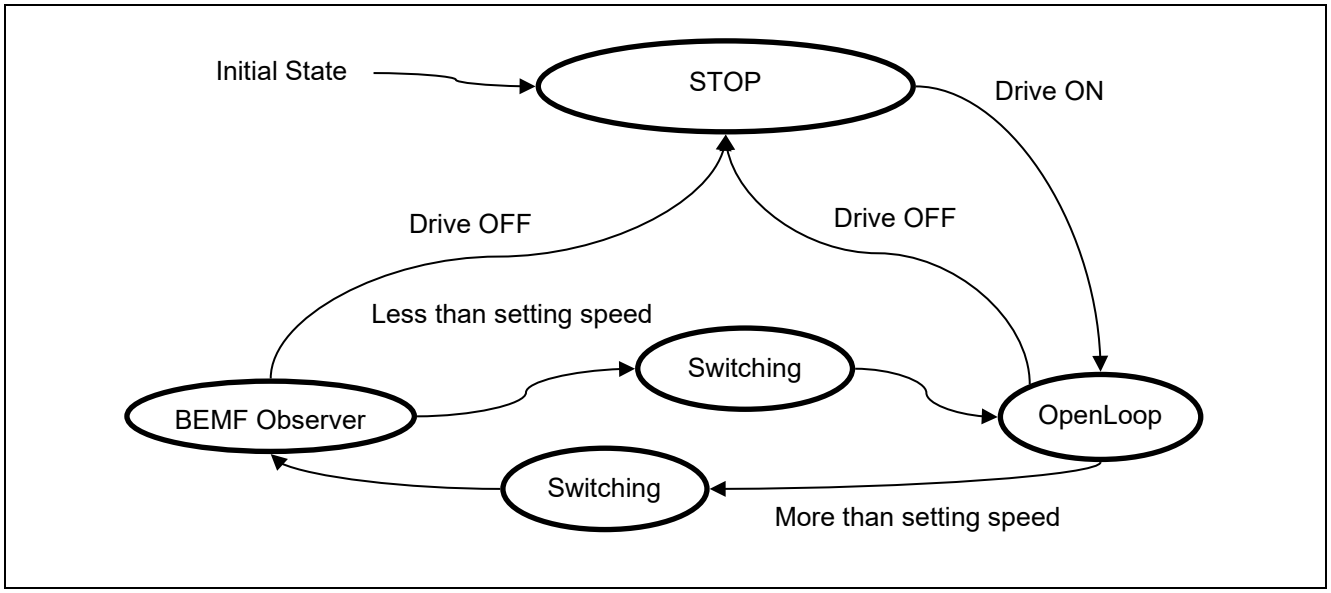


図 9-5　運転シーケンスの状態遷移図

表 9-15　運転シーケンスの状態とその説明

状態	状態の説明
初期状態	CPU が初期化される前の状態です。
停止	CPU ボードの電源が ON して、起動した状態です。モータは停止状態です。
オープンループ	0r/min(モータに電流が流れている状態であるが停止)から 600r/min 程度(変更可能)までの間でモータを運転している状態です。OpenLoop 制御アルゴリズムを用いてモータ制御を行います。
切り替え	低速運転で使用している OpenLoop 制御から、中高速運転で使用するセンサレスアルゴリズムに切り替えを行う状態です。 加速時は、中高速運転のアルゴリズムにデータの引継ぎを行います。データの引継ぎが完了次第、自動的に中高速運転状態に切り替わります。 減速時は、OpenLoop 制御にデータの引継ぎを行っている状態です。データの引継ぎが完了次第、自動的に低速運転状態に切り替わります。
BEMF オブザーバ	センサレスベクトル制御で運転するように設定された速度から、モータの定格速度までの範囲でモータを運転している状態です。誘起電圧オブザーバを用いたセンサレスベクトル制御を行います。

9.7.5　始動シーケンス

マネージャモジュールでは RUN MODE のステータスに合わせて、速度指令値を管理するフラグを変更してモータを制御しています。また、これらの指令値を適切に変更することで始動シーケンスを作成し、モータの始動を行います。始動シーケンスの動きを図 9-6 に示します。

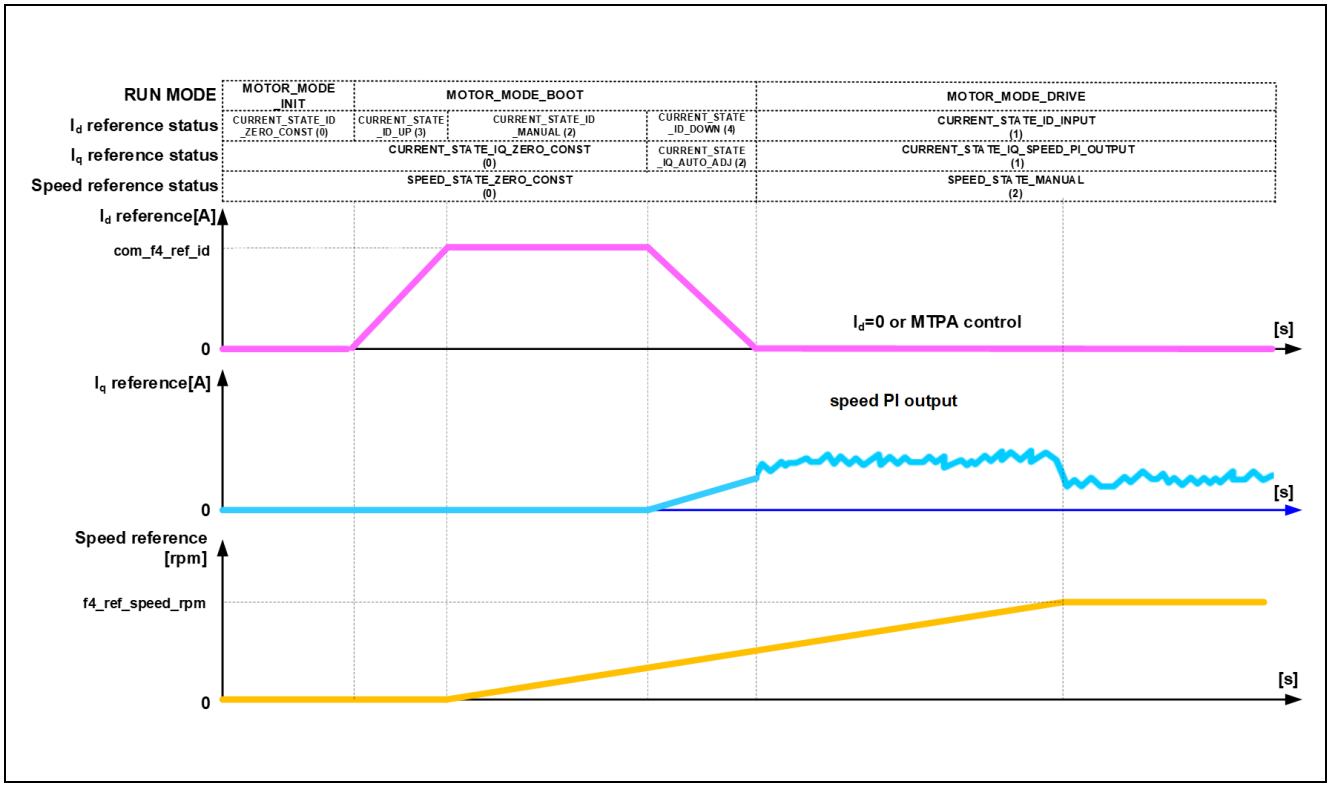


図 9-6　始動シーケンスの内容

9.7.6　保護機能

本制御プログラムは、以下のエラー状態を持ち、それぞれの場合に緊急停止機能を実装しています。システム保護機能に関わる各設定値は表 9-16 を参照してください。

- 過電流エラー
  過電流エラーはハードウェア及びソフトウェア両方で検出されます。
  ハードウェアからの緊急停止信号（過電流検出）により、PWM 出力端子をハイインピーダンス状態にします。また、過電流監視周期で U 相、V 相、W 相電流を監視し、過電流（過電流リミット値を超過）を検出した時に、緊急停止します（ソフトウェア検出）。
  過電流リミット値はモータの定格電流 (MOTOR_CFG_NOMINAL_CURRENT_RMS)から自動で計算されます。

- 過電圧エラー
  過電圧監視周期でインバータ母線電圧を監視し、過電圧（過電圧リミット値を超過）を検出した時に、緊急停止します。過電圧リミット値は検出回路の抵抗値の誤差等を考慮して設定した値です。

- 低電圧エラー
  低電圧監視周期でインバータ母線電圧を監視し、低電圧（低電圧リミット値を下回った場合）を検出した時に、緊急停止します。低電圧リミット値は検出回路の抵抗値の誤差等を考慮して設定した値です。

- 回転速度エラー
  回転速度監視周期で速度を監視し、速度リミット値を超過した場合、緊急停止します。

- 脱調検知エラー
  センサレスベクトル制御で運転中に脱調の兆候が見られた場合、緊急停止します。本機能を使用する場合、脱調検知機能を有効にする必要があります。

表 9-16　各システム保護機能の動作条件・設定値

過電流エラー	過電流リミット値 [A]	9.33
	監視周期 [μs]	電流制御周期*1
過電圧エラー	過電圧リミット値 [V]	450
	監視周期 [μs]	電流制御周期*1
低電圧エラー	低電圧リミット値 [V]	100
	監視周期 [μs]	電流制御周期*1
回転速度エラー	速度リミット値 [r/min]	4200
	監視周期 [μs]	電流制御周期*1
脱調検知エラー	発生条件	脱調を検知した場合
	監視周期 [us]	電流制御周期*1

【注】　1. 表 9-1　本ソフトウェア基本仕様参照

9.7.7　API

マネージャモジュールの API 一覧を表 9-17 に示します。

表 9-17　API 一覧

API	説明
R_MOTOR_SENSORLESS_VECTOR_Open	本モジュールと使用するモジュールのインスタンスを生成します。
R_MOTOR_SENSORLESS_VECTOR_Close	本モジュールをリセット状態にします。
R_MOTOR_SENSORLESS_VECTOR_Reset	モジュールの初期化を行います。
R_MOTOR_SENSORLESS_VECTOR_ParameterUpdate	本モジュールの制御パラメータを更新します。また、関連するモジュールの制御パラメータ更新を行います。
R_MOTOR_SENSORLESS_VECTOR_MotorStart	モータ駆動状態にします。
R_MOTOR_SENSORLESS_VECTOR_MotorStop	モータ停止状態にします。
R_MOTOR_SENSORLESS_VECTOR_MotorReset	システムのエラー状態を解除します。
R_MOTOR_SENSORLESS_VECTOR_ErrorSet	システムにエラー状態を設定します。
R_MOTOR_SENSORLESS_VECTOR_SpeedSet	速度指令値を設定します。速度制御時に有効になります。
R_MOTOR_SENSORLESS_VECTOR_SpeedGet	速度情報を取得します。
R_MOTOR_SENSORLESS_VECTOR_StatusGet	ステートマシンの状態を取得します。
R_MOTOR_SENSORLESS_VECTOR_ErrorStatusGet	エラー状態を取得します。
R_MOTOR_SENSORLESS_VECTOR_CtrlTypeSet	制御方式を設定します。制御方式を変更する場合は、モータを停止状態にしてください。 0：位置制御(Not use) 1：速度制御
R_MOTOR_SENSORLESS_VECTOR_LoopModeStatusGet	制御方式を取得します。 0：位置制御(Not use) 1：速度制御
R_MOTOR_SENSORLESS_VECTOR_SpeedInterrupt	速度制御を行うための割り込み処理を行います。
R_MOTOR_SENSORLESS_VECTOR_CurrentInterrupt	電流制御を行うための割り込み処理を行います。（3shunt 電流検出用）
R_MOTOR_SENSORLESS_VECTOR_1ShuntCurrentInterrupt	電流制御を行うための割り込み処理を行います。（1shunt 電流検出用）
R_MOTOR_SENSORLESS_VECTOR_OverCurrentInterrupt	過電流が発生した際の割り込み処理を行います。

表 9-18　電流制御モジュールの API 一覧

API	説明
R_MOTOR_CURRENT_Open	電流制御モジュールのインスタンスを生成します。
R_MOTOR_CURRENT_Close	電流制御モジュールをリセット状態にします。
R_MOTOR_CURRENT_Reset	電流制御モジュールの初期化をします。
R_MOTOR_CURRENT_Run	電流制御モジュールをアクティブ状態にします。
R_MOTOR_CURRENT_ParameterSet	電流制御に使用する変数情報を入力します。
R_MOTOR_CURRENT_ParameterGet	電流制御結果の出力を取得します。
R_MOTOR_CURRENT_ParameterUpdate	電流制御モジュールの制御パラメータを更新します。
R_MOTOR_CURRENT_CurrentCyclic	電流制御を行います。
R_MOTOR_CURRENT_OffsetCalibration	電流検出のオフセット調整を行います。
R_MOTOR_CURRENT_CurrentOffsetRemove	電流検出オフセット値を除いた値を返します。
R_MOTOR_CURRENT_VoltErrCompParamSet	電圧誤差補償パラメータ設定を行います。
R_MOTOR_CURRENT_BEMFObserverParameterUpdate	誘起電圧オブザーバの制御パラメータを更新します
R_MOTOR_CURRENT_HuntingSupress	センサレス切り替え時の振動低減のために、 位置・速度推定用の PLL 積分項の初期値を設定します。
R_MOTOR_CURRENT_PLLSpeedSet	位置・速度推定用の PLL 積分項の初期値を設定します。
R_MOTOR_CURRENT_RotorAngleSet	磁極位置を設定します。
R_MOTOR_CURRENT_RefstateSet	電流制御のステータスを設定します。
R_MOTOR_CURRENT_BEMFObserverParameterSet	誘起電圧オブザーバの q 軸電圧外乱を設定します。
R_MOTOR_CURRENT_ChargeBootstrap	ブートストラップ回路への充電のための処理を行います。

表 9-19　速度制御モジュールの API 一覧

API	説明
R_MOTOR_SPEED_Open	速度モジュールのインスタンスを生成します。
R_MOTOR_SPEED_Close	モジュールをリセット状態にします。
R_MOTOR_SPEED_Reset	モジュールの初期化します。
R_MOTOR_SPEED_Run	モジュールをアクティブ状態にします。
R_MOTOR_SPEED_ParameterSet	速度制御に使用する変数情報を入力します。
R_MOTOR_SPEED_ParameterGet	速度制御結果の出力を取得します。
R_MOTOR_SPEED_ParameterUpdate	モジュールの制御パラメータを更新します。
R_MOTOR_SPEED_SpdRefSet	速度指令値を設定します。

R_MOTOR_SPEED_SpeedCyclic	速度制御を行います。
R_MOTOR_SPEED_Opl2lessReferenceIqCalc	センサレス制御切り替え時の q 軸電流指令値を計算します。
R_MOTOR_SPEED_Opl2lessPreprocess	センサレス制御切り替え時の前処理を行います。
R_MOTOR_SPEED_OplDampCtrl	オープンループダンピング制御を行います。
R_MOTOR_SPEED_OplDampReset	オープンループダンピング制御で使用する変数情報をリセットします。
R_MOTOR_SPEED_HuntingSuppress	速度 PI 制御の積分項の初期値を設定します。
R_MOTOR_SPEED_SwitchingFlagSet	センサレス制御切り替えフラグをセットします。
R_MOTOR_SPEED_ControlParamSet	速度制御で使用する速度の値を設定します。
R_MOTOR_SPEED_RefstateSet	速度制御で使用する電流制御ステータスを設定します。

9.7.8　構造体・変数情報

マネージャモジュールの構造体・変数一覧を表 9-20 に示します。マネージャモジュールは API のインスタンス確保にて、マネージャモジュール用構造体(g_st_sensorless_vector)を定義します。電流制御モジュールで使用する構造体・変数一覧を表 9-21 に示す速度制御モジュールの構造体・変数一覧を表 9-22 に示します。電流制御モジュールと、速度制御モジュールは API のインスタンス確保にて、電流制御モジュール用構造体(g_st_cc)と、速度モジュール用構造体(g_st_sc)を定義します。

表 9-20　マネージャモジュール用構造体・変数一覧

構造体	変数	説明
st_sensorless_vector_control_t マネージャモジュール用構造体	u1_flag_flying_start_use	フライングスタート機能 有効/無効
	u1_flag_less_switch_use	センサレス制御へのソフトスイッチング機能 有効/無効
	u1_flag_openloop_damping_use	オープンループダンピング制御 有効/無効
	u1_flag_down_to_ol	オープンループ制御への切り替えフラグ
	u1_state_id_ref	d 軸電流制御ステータス
	u1_state_iq_ref	q 軸電流制御ステータス
	u1_state_speed_ref	速度指令値のステータス
	u1_direction	回転方向
	u1_ctrl_loop_mode	制御モード選択（速度・位置）
	u2_error_status	エラーステータス
	u2_run_mode	動作モード
	f4_vdc_ad	母線電圧 [V]
	f4_pfc_vdc_ad	PFC 制御から取得した母線電圧 [V]
	f4_iu_ad	u 相電流 [A]
	f4_iv_ad	v 相電流 [A]
	f4_iw_ad	w 相電流 [A]
	f4_ibus_a_ad	A 点におけるインバータ母線電流（1shunt のみ）
	f4_ibus_b_ad	B 点におけるインバータ母線電流（1shunt のみ）
	f4_overcurrent_limit	過電流制限値 [A]
	f4_overvoltage_limit	過電圧制限値 [V]
	f4_undervoltage_limit	低電圧制限値 [V]
	f4_overspeed_limit_rad	過速度制限値 [rad/s]
	f4_phase_err_rad_lpf	角度誤差に対する LPF の出力 [rad]
	f4_switch_phase_err_rad	センサレス切り替え判断の角度誤差の閾値 [rad]
	f4_id_down_speed_rad	モータ制御方式切り替え速度（加速時）[r/min]
	f4_id_up_speed_rad	モータ制御方式切り替え速度（減速時）[r/min]
	f4_id_damp_comp_speed	オープンループダンピング補償速度 [rad/s]

構造体	変数	説明
	f4_ol_speed_rad	オープンループ制御時の速度 [rad\s]
	u1_relay_first_on	PFC リレーON フラグ
	st_phase_err_lpf	角度誤差用の LPF 構造体
	st_current_output	電流モジュールの出力用構造体
	st_speed_output	速度モジュールの出力用構造体
	st_stm	ステートマシンの構造体
	st_motor	モータパラメータ構造体
	st_flystart	フライングスタート構造体
	*p_st_driver	ドライバモジュールの構造体
	*p_st_cc	電流モジュールの構造体
	*p_st_sc	速度モジュールの構造体
st_sensorless_vector_cfg_t マネージャ モジュール制御 パラメータ設定用 構造体	u1_flag_flying_start_use	フライングスタート機能有効/無効
	u1_flag_less_switch_use	ソフトなセンサレス切り替え機能の有効/無効
	u1_flag_openloop_damping_use	ダンピング機能の有効/無効
	u2_off_time_cnt	フライングスタート・短絡 OFF 時間 [cnt]
	f4_overspeed_limit_rpm	速度制限値 [r/min] (機械角)
	f4_switch_phase_err_deg	センサレス切り替え角度誤差[deg]
	f4_phase_err_lpf_cut_freq	位相誤差 LPF 周波数[Hz]
	f4_id_down_speed_rpm	モータ制御方式切り替え速度（加速時）[r/min]
	f4_id_up_speed_rpm	モータ制御方式切り替え速度（減速時）[r/min]
	f4_ctrl_period	電流制御周期 [s]
	f4_restart_speed	フライングスタート・再始動速度 [r/min](機械角)
	f4_off_time	フライングスタート・短絡 OFF 時間 [s]
	f4_over_time	フライングスタート・短絡検出監視時間 [s]
	f4_active_brake_time	フライングスタート・アクティブブレーキ時間 [s]
	f4_on_current_th	フライングスタート・短絡電流閾値 [A]
	st_motor	モータパラメータ構造体

表 9-21　電流制御モジュール用構造体・変数一覧

構造体	変数	説明
st_current_control_t 電流制御モジュール用構造体	u1_active	電流制御モジュールのアクティブ状態
	u1_flag_volt_err_comp_use	電圧誤差補償機能 有効/無効
	u1_flag_stall_detection_use	脱調検出 有効/無効
	u1_flag_trq_vibration_comp_use	トルク振動抑制制御 有効/無効
	u1_flag_trq_vibration_comp_mode	トルク振動抑制・補償信号生成方式
	u1_state_id_ref	d 軸電流制御ステータス
	u1_state_iq_ref	q 軸電流制御ステータス
	u1_flag_offset_calc	電流オフセット計算のフラグ
	u1_flag_charge_bootstrap	ブートストラップ回路への充電終了フラグ
	u2_offset_calc_time	電流オフセット調整時の測定時間設定
	u2_crnt_offset_cnt	電流オフセット調整時の測定回数
	u2_charge_bootstrap_time	ブートストラップ回路への充電時間 [cnt]
	u2_charge_bootstrap_cnt	ブートストラップ回路への充電カウント [cnt]
	f4_ctrl_period	電流制御周期(期間)[s]
	f4_refu	u 相指令電圧[V]
	f4_refv	v 相指令電圧[V]
	f4_refw	w 相指令電圧[V]
	f4_vd_ref	d 軸電圧指令値[V]
	f4_vq_ref	q 軸電圧指令値[V]
	f4_id_ref	d 軸電流指令値[A]
	f4_iq_ref	q 軸電流指令値[A]
	f4_id_ad	d 軸電流値[A]
	f4_iq_ad	q 軸電流値[A]
	f4_lim_iq	q 軸電流制限値[A]
	f4_offset_iu	u 相オフセット電流値[A]
	f4_offset_iw	w 相オフセット電流値[A]
	f4_sum_iu_ad	u 相電流合計値[A]
	f4_sum_iw_ad	w 相電流合計値[A]
	f4_vdc_ad	母線電圧値[V]
	f4_iu_ad	u 相電流値[A]
	f4_iv_ad	v 相電流値[A]
	f4_iw_ad	w 相電流値[A]

構造体	変数	説明
	f4_modu	u 相デューティ比
	f4_modv	v 相デューティ比
	f4_modw	w 相デューティ比
	f4_speed_rad	速度[rad/s]
	f4_ref_id_ctrl	d 軸電流指令値 [A]
	f4_ref_iq_ctrl	q 軸電流指令値[A]
	f4_id_up_step	d 軸電流指令値の増加幅 (電流制御周期当たり)[A]
	f4_id_down_step	d 軸電流指令値の減少幅 (電流制御周期当たり)[A]
	f4_iq_down_step	q 軸電流指令値の減少幅 (電流制御周期当たり)[A]
	f4_iq_down_step_inv	q 軸電流指令値の減少時間 [cnt] の逆数
	f4_ol_ref_id	オープンループ電流 [A]
	f4_va_max	dq 軸上の最大電圧 [V]
	f4_ed	d 軸誘起電圧推定値 [V]
	f4_eq	q 軸誘起電圧推定値 [V]
	f4_phase_err_rad	角度誤差 [rad]
	f4_ol_speed_rad	オープンループ時の掃引角度 [rad]
	f4_ref_speed_rad_ctrl	速度指令値（LPF 後） [rad/s]
	st_mod	変調モジュールの構造体
	st_volt_comp	電圧誤差補償モジュールの構造体
	st_bemf_observer	誘起電圧オブザーバ構造体
	st_pll_est	位置・速度推定構造体（誘起電圧オブザーバ）
	st_pi_id	d 軸の pi 制御用構造体
	st_pi_iq	q 軸の pi 制御用構造体
	st_rotor_angle	ロータ情報の構造体
	st_rotor_angle_phasecomp	ロータ情報の構造体(進み補償)
	st_motor	モータパラメータの構造体
	st_stalldet	脱調検出構造体
	st_trqvib_comp	トルク振動抑制制御構造体
st_current_cfg_t 電流制御モジュール制御パラメータ設定用構造体	u1_flag_volt_err_comp_use	電圧誤差補償 有効/無効
	u1_flag_stall_detection_use	脱調検出 有効/無効
	u1_flag_trq_vibration_comp_use	トルク振動抑制制御 有効/無効
	u1_flag_trq_vibration_comp_mode	トルク振動抑制・補償信号生成方式

構造体	変数	説明
	u1_target_2f	トルク振動抑制・抑制対象の 2 次成分の抑制有効/無効
	u2_offset_calc_time	オフセット計算時間設定 [cnt]
	u2_charge_bootstrap_time	ブートストラップ回路への充電時間 [cnt]
	f4_ctrl_period	制御周期[s]
	f4_current_omega_hz	電流制御系固有周波数[Hz]
	f4_current_zeta	電流制御系減衰係数
	f4_id_up_step	d 軸電流指令値の増加幅 (電流制御周期当たり)[A]
	f4_id_down_step	d 軸電流指令値の減少幅 (電流制御周期当たり)[A]
	f4_iq_down_step_time_inv	q 軸電流指令値の減少幅 (電流制御周期当たり)[A]
	f4_ol_ref_id	オープンループ電流 [A]
	f4_id_hpf_time	脱調検知・d 軸電流 HPF 時定数[s]
	f4_iq_hpf_time	脱調検知・q 軸電流 HPF 時定数[s]
	f4_threshold_level	脱調検知・検知レベル[A]
	f4_threshold_time	脱調検知・検知時間[s]
	f4_timelead_1f	トルク振動抑制・位相進み [rad] (1 次)
	f4_timelead_2f	トルク振動抑制・位相進み [rad] (2 次)
	f4_tf_lpf_omega	トルク振動抑制・TF 内部の LPF の固有周波数 [Hz]
	f4_output_gain_1f	トルク振動抑制・繰り返し制御器への入力値に対するゲイン(1 次)
	f4_output_gain_2f	トルク振動抑制・繰り返し制御器への入力値に対するゲイン(2 次)
	f4_input_weight2	トルク振動抑制・入力重み 2
	f4_input_weight1	トルク振動抑制・入力重み 1
	f4_input_weight0	トルク振動抑制・入力重み 0
	f4_suppression_th_1f	トルク振動抑制・抑制目標 (1 次)
	f4_suppression_th_2f	トルク振動抑制・抑制目標 (2 次)
	f4_abnormal_output_th_1f	トルク振動抑制・TF 出力異常度の閾値 (1 次)
	4_abnormal_output_th_2f	トルク振動抑制・TF 出力異常度の閾値 (2 次)
	st_motor	モータパラメータの構造体
st_current_output_t 電流制御モジュール出力用構造体	u1_flag_offset_calc	電流オフセットフラグ
	u1_flag_charge_bootstrap	ブートストラップ回路への充電終了フラグ
	f4_modu	u 相デューティ比
	f4_modv	v 相デューティ比

構造体	変数	説明
	f4_modw	w 相デューティ比
	f4_neutral_duty	オフセット測定時のデューティ比
	f4_va_max	dq 軸上の最大電圧 [v]
	f4_ref_id_ctrl	d 軸電流指令値
	f4_speed_rad	推定速度 [rad/s]
	f4_ed	d 軸誘起電圧推定値
	f4_eq	q 軸誘起電圧推定値
	f4_phase_err_rad	角度誤差 [rad]
st_current_input_t 電流制御モジュール入力用構造体	u1_state_id_ref	d 軸電流制御ステータス
	u1_state_iq_ref	q 軸電流制御ステータス
	f4_iu_ad	u 相電流値 [A]
	f4_iv_ad	v 相電流値 [A]
	f4_iw_ad	w 相電流値 [A]
	f4_vdc_ad	母線電圧値 [V]
	f4_id_ref	d 軸電流指令値 [A]
	f4_iq_ref	q 軸電流指令値 [A]
	f4_ol_speed_rad	オープンループ速度 [rad/s]
	f4_ref_speed_rad_ctrl	速度指令値 [rad/s]
st_bemf_observer_cfg_t 誘起電圧オブザーバモジュール入力用構造体	f4_e_obs_omega_hz	誘起電圧推定系固有周波数 [Hz]
	f4_e_obs_zeta	誘起電圧推定系減衰係数
	f4_pll_est_omega_hz	位置推定系固有周波数 [Hz]
	f4_pll_est_zeta	位置推定系減衰係数

表 9-22　速度制御モジュール用構造体・変数一覧

構造体	変数	説明
st_speed_control_t 速度モジュール用構造体	u1_state_id_ref	d 軸電流制御ステータス
	u1_state_iq_ref	q 軸電流制御ステータス
	u1_active	モジュールの有効/無効選択
	u1_state_speed_ref	速度指令値を決定するステート管理。本節のマクロに記載するステートを管理します。
	u1_flag_fluxwkn_use	弱め磁束制御の有効/無効
	u1_flag_switching	センサレスへの切り替えフラグ
	u1_flag_mtpa_use	最大トルク/電流制御の有効/無効
	f4_speed_ctrl_period	速度ループの周期 [s]
	f4_ref_speed_rad_ctrl	制御用の速度指令値 [rad/s]

	f4_ref_speed_rad	速度指令値 [rad/s]
	f4_ref_speed_rad_manual	速度制御時のユーザの速度指令値設定値 [rad/s]
	f4_speed_rad_ctrl	速度（LPF 適用後） [rad/s]
	f4_speed_rad	速度モジュールへの入力速度 [rad/s]
	f4_max_speed_rad	最大速度 [rad/s]
	f4_speed_rate_limit_rad	速度の変化量の制限値 [rad/s]
	f4_id_ref_output	d 軸電流指令値 [A]
	f4_iq_ref_output	q 軸電流指令値 [A]
	f4_va_max	dq 軸上の最大電圧 [V]
	f4_id_ad	d 軸電流値 [A]
	f4_iq_ad	q 軸電流値 [A]
	f4_opl2less_sw_time	センサレス制御へのソフトスイッチング切り替え時間 [s]
	f4_torque_current	トルク電流 [A]（センサレス制御へのソフトスイッチング演算で使用）
	st_motor	モータ定数用構造体
	st_pi_speed	PI 制御用構造体
	st_fluxwkn	弱め磁束制御構造体
	st_opl_damp	オープンループダンピング制御構造体
	st_1st_order_lpf_t	LPF 用構造体
	st_mtpa	MTPA 構造体
st_speed_config_t 速度モジュール制御パラメータ設定用構造体	u1_flag_fluxwkn_use	弱め磁束制御の有効/無効
	u1_flag_mtpa_use	最大トルク/電流制御の有効/無効
	f4_max_speed_rpm	最大速度 [r/min] (機械角)
	f4_speed_ctrl_period	速度制御の周期 [s]
	f4_speed_rate_limit_rpm	速度の変化量の制限値 [r/min] (機械角)
	f4_speed_omega_hz	速度制御系固有周波数 [Hz]
	f4_speed_zeta	速度制御系減衰係数
	f4_speed_lpf_hz	速度制御用 LPF [Hz]
	f4_opl2less_sw_time	センサレス制御へのソフトスイッチング切り替え時間 [s]
	f4_ed_hpf_omega	ダンピング制御・HPF 固有周波数[Hz]
	f4_ol_damping_zeta	ダンピング制御・減衰係数
	f4_ol_damping_fb_limit_rate	ダンピング制御・フィードバック制限率
	f4_ol_ref_id	オープンループ電流
	f4_id_down_speed_rpm	モータ制御方式切り替え速度（加速時）[r/min]

	st_motor	モータ定数用構造体
st_speed_input_t 速度モジュール入力用構造体	u1_state_speed_ref	速度指令ステータス
	f4_speed_rad	入力する速度 [rad/s]
	f4_va_max	dq 軸における最大電圧 [V]
	u1_state_id_ref	d 軸電流制御ステータス
	u1_state_iq_ref	q 軸電流制御ステータス
st_speed_output_t 速度モジュール出力用構造体	f4_id_ref	d 軸電流指令値 [A]
	f4_iq_ref	q 軸電流指令値 [A]
	f4_ref_speed_rad_ctrl	PI 制御に使用する速度 [rad/s]
	f4_speed_rad_lpf	LPF 後の速度 [rad/s]

9.7.9　マクロ定義

マネージャモジュールのマクロ一覧を表 9-23 に示します。

表 9-23　マクロ一覧

ファイル名	マクロ名	定義値	備考
r_motor_sensorless_vector_api.h	MOTOR_LOOP_POSITION	0	位置制御モード。 ※本サンプルプログラムでは未対応。
	MOTOR_LOOP_SPEED	1	速度制御モード。
	MOTOR_SENSORLESS_VECTOR_ERROR_NONE	0x0000	エラーステータス。エラーなし状態。
	MOTOR_SENSORLESS_VECTOR_ERROR_OVER_CURRENT_HW	0x0001	エラーステータス HW 過電流エラー状態。
	MOTOR_SENSORLESS_VECTOR_ERROR_OVER_VOLTAGE	0x0002	エラーステータス。過電圧エラー状態。
	MOTOR_SENSORLESS_VECTOR_ERROR_OVER_SPEED	0x0004	エラーステータス。過速度エラー状態。
	MOTOR_SENSORLESS_VECTOR_ERROR_LOW_VOLTAGE	0x0080	エラーステータス。低電圧エラー状態。
	MOTOR_SENSORLESS_VECTOR_ERROR_OVER_CURRENT_SW	0x0100	エラーステータス。SW の過電流エラー状態。
	MOTOR_SENSORLESS_VECTOR_ERROR_STALL_DETECTED	0x0200	エラーステータス。脱調を検知。
	MOTOR_SENSORLESS_VECTOR_ERROR_PFC	0x0400	エラーステータス。PFC 異常状態。
	MOTOR_SENSORLESS_VECTOR_ERROR_UNKNOWN	0xffff	エラーステータス。エラーコード不明のエラー状態。
r_motor_sensorless_vector_manager.h	MOTOR_MODE_INIT	0x00	初期化を行います。動作モード。
	MOTOR_MODE_BOOT	0x01	駆動準備を行います。動作モード。
	MOTOR_MODE_DRIVE	0x02	モータ駆動状態の動作モード。
r_motor_sensorless_vector_api.h	MOTOR_CTRL_TYPE_POS	0	制御方式切り替え用マクロ。位置制御モード。
	MOTOR_CTRL_TYPE_SPEED	1	制御方式切り替え用マクロ。速度制御モード。

9.8　PFC マネージャ

9.8.1　機能

PFC マネージャ(r_pfc_manager)は 32kHz の AD 変換終了割り込みで起動し、入力電圧と PFC 出力電圧及び PFC リアクトル電流の AD 変換値に基づいて、リレー駆動、エラー検知、PFC 出力電圧制御及び入力電圧と入力電流の力率の調整を行う機能です。また PFC にエラーが発生した際、システムマネージャ経由でリセット処理を行います。

9.8.2　モジュール構成図

以下に、PFC マネージャの機能ブロックを示します。

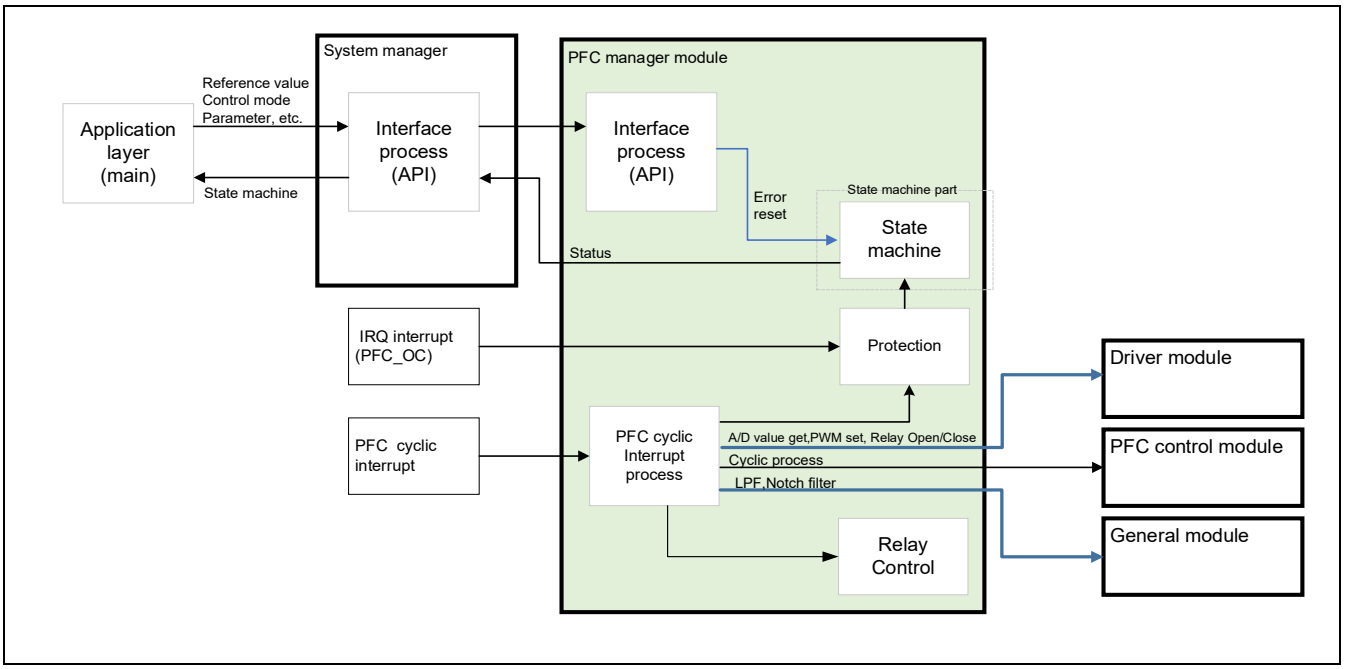


図 9-7　PFC マネージャ機能ブロック

9.8.3　シーケンス

PFC マネージャは、起動シーケンスと停止シーケンスの 2 つのシーケンスを管理しています。

・起動シーケンス

保護停止リスト（表 9-24）に記載のエラーが発生していない条件下において、母線電圧が規定電圧に達してリレーが On したとき、一定時間待機(リレーが Off 状態から On 状態に遷移時のみ 100ms 間の待機)後、PFC 制御を許可します。PFC 制御が許可され、出力電圧指令値が起動条件を満たしたら PFC 起動完了とします。以下の図 9-8 に状態遷移図を示します。

・停止シーケンス

保護停止リスト（表 9-24）に記載のいずれかのエラーが発生したら、PFC 制御を停止し、PWM 出力を GPIO ポート出力に変更し、Low(非アクティブレベル)を出力します。

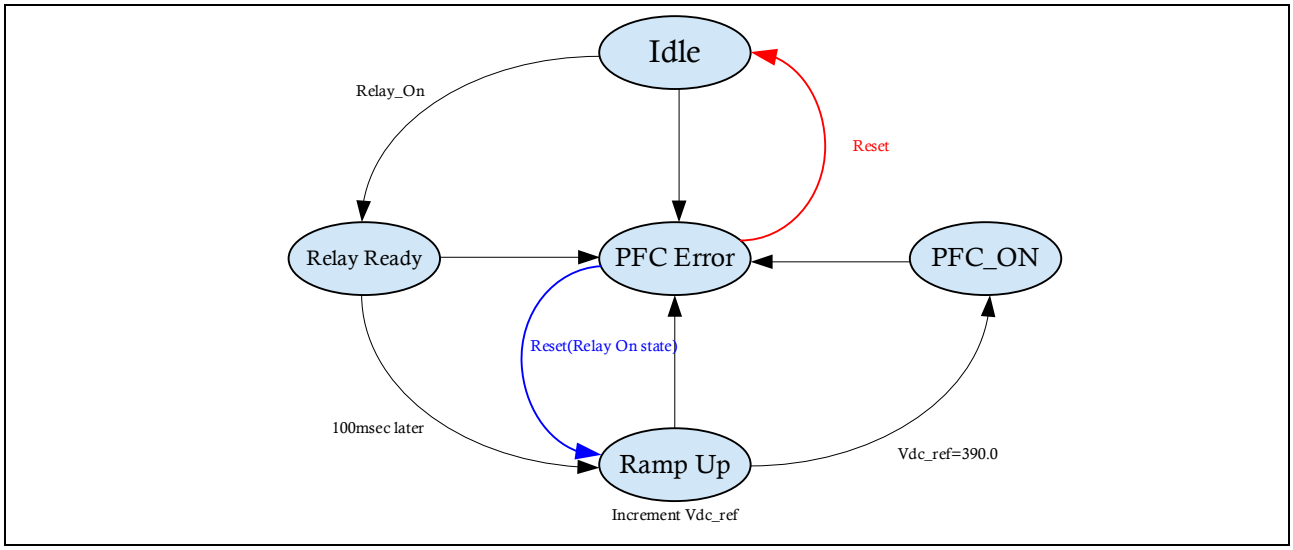


図 9-8　PFC 状態遷移図

9.8.4　保護機能

PFC のハードウェアに関連する電圧・電流・温度の保護停止の判定・エラー処理を行います。以下の表 9-24 に記載されている各状態が検出されると、PFC の PWM ゲート遮断及び INV 駆動停止処理を行います。

直流バス過電圧、直流バス低電圧、PFC 類故障 2(入力過電圧)、PFC 類故障 3(OC_PFC_SW)、PFC 温度異常は PFC マネージャ周期割り込み処理内で周期的に監視します。PFC 類故障 1(OC_PFC_HW)は HW で監視し、IRQ 割り込みを用いて HW 過電流割り込み処理を実行します。各検出端子に関しては 11.4 及び 12.12 を参照してください。

表 9-24　保護停止リスト

エラー項目	検知周期	検知基準	単位	保護動作
直流バス過電圧	PFC キャリア周期	450	V	モータ INV&PFC ゲート遮断
直流バス低電圧	PFC キャリア周期	80	V	
PFC 類故障 1 (OC_PFC_HW)	IRQ 割り込み	49.09	A	
PFC 類故障 2 (入力過電圧)	PFC キャリア周期	388	V	
PFC 類故障 3 (OC_PFC_SW)	PFC キャリア周期	38	A	
PFC 温度異常	PFC キャリア周期	Low ※1	-	

※1) ポートレベルを判定し、エラー発生時は Low となります。

9.8.5　API

マネージャモジュールの API 一覧を表 9-25 に示します。

表 9-25　API 一覧

API	説明
R_PFC_MANAGER_Open	本モジュールと使用するモジュールのインスタンスを生成します。

API	説明
R_PFC_MANAGER_Close	本モジュールを閉じます
R_PFC_MANAGER_Reset	本モジュールをリセット状態にします。
R_PFC_MANAGER_ErrorCancel	システムのエラー状態を解除します。
R_PFC_MANAGER_StatusGet	内部の状態を取得します。
R_PFC_MANAGER_Main	PFC マネージャ処理のための割り込み処理を行います。
R_PFC_MANAGER_OverCurrentInterrupt	過電流が発生した際の割り込み処理を行います。

9.8.6　構造体・変数情報

表 9-26　マネージャモジュール用構造体・変数一覧

構造体	変数	説明
st_pfc_manager_t PFC マネージャモジュール用構造体	u1_pfc_ctrl_enable_flg	PFC 制御オンフラグ
	u1_relay_ctrl_on_flg	リレー制御オンフラグ
	u1_error_cancel_flg	エラーキャンセルフラグ
	u1_volt_dip_flg	入力電圧ディップ検出フラグ
	u2_error_status	エラーステータス
	u2_run_mode	運転モード
	f4_vac_ad	AC 電圧 [V]
	f4_vdc_ad	母線電圧 [V]
	f4_ichp_ad	PFC 電流値 [A]
	f4_vac_ad_lpf	LPF 処理後 AC 電圧[V]
	f4_vdc_ad_lpf	LPF 処理後バス電圧[V]
	f4_ref_vdc_ctrl	母線電圧指令値 [V]
	f4_vdc_up_step	バス電圧加算ステップ値 [V]
	f4_target_vdc	バス電圧目標値 [V]
	f4_ac_overvoltage_limit	AC 電圧・過電圧リミット [V]
	f4_bus_overvoltage_limit	バス電圧・過電圧リミット [V]
	f4_bus_undervoltage_limit	バス電圧・低電圧リミット [V]
	f4_overcurrent_limit	過電流リミット [A]
	u1_overheat_detect_level	過熱エラー検知時の端子レベル
	st_vac_ad_lpf	AC 電圧用 LPF パラメータ構造体
	st_vdc_ad_lpf	バス電圧用 LPF パラメータ構造体
	st_vdc_notch_fil	母線電圧ノッチフィルタパラメータ構造体
	st_pfc_ctrl_output	PFC 制御出力パラメータ構造体
	st_ac_fil	AC 電圧実効値データ構造体
	st_relay_ctrl	リレー制御データ構造体

構造体	変数	説明
	p_st_pfc_driver	PFC ドライバ構造体
	p_st_pfc_ctrl	PFC 制御構造体

9.8.7　マクロ定義

PFC マネージャで使用するマクロを以下に示します。

表 9-27　マクロ一覧

ファイル名	マクロ名	定義値	備考
r_pfc_manager.h	PFC_MODE_IDLE	0x00	待機モード
	PFC_MODE_RELAY_READY	0x01	リレー準備
	PFC_MODE_RAMP_UP	0x02	立ち上げ中
	PFC_MODE_PFC_ON	0x03	PFC オン
	PFC_MODE_PFC_ERROR	0x04	PFC エラー
r_pfc_manager_api.h	PFC_MANAGER_ERROR_NONE	0x0000	エラーなし
	PFC_MANAGER_ERROR_AC_OVER_VOLTAGE	0x0001	Vac 過電圧エラー
	PFC_MANAGER_ERROR_BUS_OVER_VOLTAGE	0x0002	Vdc 過電圧エラー
	PFC_MANAGER_ERROR_BUS_LOW_VOLTAGE	0x0004	Vdc 低電圧エラー
	PFC_MANAGER_ERROR_OVER_CURRENT_SW	0x0008	SW 過電流エラー
	PFC_MANAGER_ERROR_OVER_CURRENT_HW	0x0010	HW 過電流エラー
	PFC_MANAGER_ERROR_OVER_HEATING	0x0020	過熱エラー
	PFC_MANAGER_ERROR_UNKNOWN	0xffff	未定義エラー

9.9　ドライバモジュール

ドライバモジュールは、サンプルプログラムのミドルウェアに相当するマネージャモジュールと MCU のペリフェラルにアクセスするための FSP や SC を接続するインタフェースの役割を持つモジュールです。ドライバモジュールを適切に設定することで、MCU の機能割り当てや使用するボード仕様の差分をモータモジュールの変更無く使用することが可能になります。

9.9.1　機能

ドライバモジュールの機能一覧を表 9-28 に示します。

表 9-28　ドライバモジュールの機能一覧

機能	説明
A/D 変換値の取得	FSP の API 関数経由や SC で設定した AD 変換器のレジスタを読むことで相電流やインバータボードの母線電圧など AD 値を取得します。
PWM の duty 設定	FSP の API 関数経由や SC で設定した GPT のレジスタを制御することで UVW 相へ出力する PWM Duty 値を設定します。
PWM の開始、停止	FSP の API 関数経由や SC で設定した GPT のレジスタを制御することで PWM 出力の開始、停止を制御します。

9.9.2　モジュール構成図

ドライバモジュールのモジュール構成図を図 9-9 に示します。

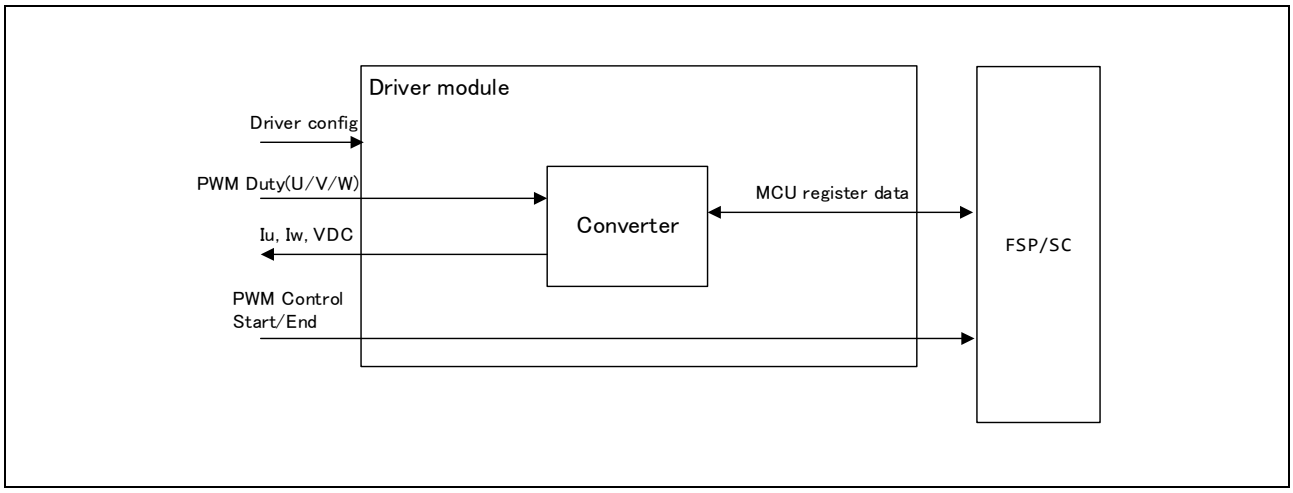


図 9-9　ドライバモジュール構成図

9.9.3　API

ドライバモジュールの API 一覧表と各 API の説明を表 9-29 に示します。

表 9-29　ドライバモジュールの API 一覧

API	説明
R_MOTOR_DRIVER_Open	ドライバモジュールのインスタンスを生成します。
R_MOTOR_DRIVER_Close	ドライバモジュールをクローズします。
R_MOTOR_DRIVER_Reset	ドライバモジュールをリセットします。(1 シャント電流検出時)
R_MOTOR_DRIVER_ParameterUpdate	モジュール内部で使用する変数情報を入力します。
R_MOTOR_DRIVER_BldcAnalogGet	AD 変換結果を取得します。(3 シャント電流検出時)
R_MOTOR_DRIVER_1ShuntBldcAnalogGet	AD 変換結果を取得します。(1 シャント電流検出時)
R_MOTOR_DRIVER_BldcDutySet	PWM Duty の設定を行います。(3 シャント電流検出時)
R_MOTOR_DRIVER_1ShuntBldcDutySet	PWM Duty の設定を行います。(1 シャント電流検出時)
R_MOTOR_DRIVER_ReconstructCurrent	インバータ母線電流検出値から相電流検出値を復元します。 (1 シャント電流検出時)
R_MOTOR_DRIVER_BldcZeroDutySet	GPT の制御モードを出力 0 に強制固定します。 (3 シャント電流検出時)
R_MOTOR_DRIVER_BldcCompareDutySet	GPT の制御モードを PWM モードに変更します。 (3 シャント電流検出時)
R_MOTOR_DRIVER_PWMControlStop	PWM 制御を停止します。
R_MOTOR_DRIVER_PWMControlStart	PWM 制御を開始します。

9.9.4　コンフィグレーション情報

ドライバモジュールのコンフィグレーション情報一覧を表 9-30 に示します。使用する機能や各種パラメータを設定してください。

表 9-30　コンフィグレーション情報一覧

ファイル名	マクロ名	設定	説明
r_motor_module_cfg.h	DRIVER_CFG_FUNC_PWM_OUTPUT_START	R_Config_MOTOR_StartTimerCtrl	PWM 出力許可関数設定
	DRIVER_CFG_FUNC_PWM_OUTPUT_STOP	R_Config_MOTOR_StopTimerCtrl	PWM 出力禁止関数設定
	DRIVER_CFG_FUNC_ADC_DATA_GET	R_Config_MOTOR_AdcGetConvVal	AD 変換結果取得関数設定(3 シャント)
	DRIVER_CFG_FUNC_1SHUNT_ADC_DATA_GET	R_Config_MOTOR_1ShuntAdcGetConVal	AD 変換結果取得関数設定(1 シャント)
	DRIVER_CFG_FUNC_ADC_TRIGGER_SET	R_Config_MOTOR_ADCTriggerSEt	AD 変換トリガ設定関数設定(1 シャント)

	DRIVER_CFG_FUNC_DUTY_SET	R_Config_MOTOR_UpdDuty	Duty Cycle 設定関数設定(3 シャント)
	DRIVER_CFG_FUNC_1SHUNT_DUTY_SET	R_Config_MOTOR_1ShuntUpdDuty	Duty Cycle 設定関数設定(1 シャント)
	DRIVER_CFG_FUNC_ZERO_DUTY_SET	R_Config_MOTOR_UpdZeroDuty	出力 0 固定設定関数設定(3 シャント)
	DRIVER_CFG_FUNC_COMPARE_DUTY_SET	R_Config_MOTOR_UpdCompareDuty	出力を PWM に戻す設定(3 シャント)
	DRIVER_CFG_AD_TRIGGER_DELAY_TIME	2.0f (RA6T2) 3.0f (RX26T)	AD 変換開始遅れ調整時間[us]

9.9.5　構造体・変数情報

ドライバモジュールで使用する構造体一覧を表 9-31 に示します。ドライバモジュールは API のインスタンス確保にて、ドライバモジュール用構造体(g_st_driver)を定義します。

表 9-31　構造体・変数一覧

構造体	変数	説明
st_motor_driver_t ドライバモジュール用構造体	*ADCDataGet	FSP/SC の中継関数へのポインタ（3 シャント） (AD 変換結果取得関数を設定)
	*ADC1ShuntDataGet	FSP/SC の中継関数へのポインタ（1 シャント）
	*BLDCDutySet	FSP/SC の中継関数へのポインタ（3 シャント） (PWM 出力 Duty 設定関数を設定)
	*Bldc1ShuntDutySet	FSP/SC の中継関数へのポインタ（1 シャント） (PWM 出力 Duty 設定関数を設定)
	*ADCTriggerTimingSet	FSP/SC の中継関数へのポインタ（1 シャント） (AD 変換トリガ設定関数を設定)
	*BLDCZeroDutySet	FSP/SC の中継関数へのポインタ（3 シャント） (下アーム出力を 0 に設定)
	*BLDCCompareDutySet	FSP/SC の中継関数へのポインタ（3 シャント） (比較用 Duty 出力に設定)
	*PWMOutputStop	FSP/SC の中継関数へのポインタ (PWM 出力禁止関数を設定)
	*PWMOutputStart	FSP/SC の中継関数へのポインタ (Duty Cycle 設定関数を設定)
	u1_min_phase	最小相（1 シャント）
	u1_mid_phase	中間相（1 シャント）
	u1_max_phase	最大相（1 シャント）
	u2_count_u	U 相コンペアマッチ値（キャリア前半）（1 シャント）
	u2_count_v	V 相コンペアマッチ値（キャリア前半）（1 シャント）
	u2_count_w	W 相コンペアマッチ値（キャリア前半）（1 シャント）
	u2_count_buffer_u	U 相コンペアマッチバッファ値（キャリア後半）（1 シャント）
	u2_count_buffer_v	V 相コンペアマッチバッファ値（キャリア後半）（1 シャント）
	u2_count_buffer_w	W 相コンペアマッチバッファ値（キャリア後半）（1 シャント）
	u2_ad_trigger_a	AD 変換トリガ_A コンペアマッチ値（1 シャント）
	u2_ad_trigger_b	AD 変換トリガ_B コンペアマッチ値（1 シャント）
	s2_minimum_pulse_width	最小パルス幅（1 シャント）
	s2_adjust_adc_delay	AD 変換開始遅れ調整時間（1 シャント）
	f4_ad_crnt_per_digit	電流 AD 変換用スケール
	f4_ad_vdc_per_digit	電圧 AD 変換用スケール

	f4_pwm_period_cnt	PWM カウンター周期のカウント数(Duty 設定用情報)
	f4_pwm_dead_time_cnt	デッドタイムのカウント数(Duty 設定用情報)
st_motor_driver_cfg_t ドライバモジュール制御パラメータ設定用構造体	*ADCDataGet	FSP/SC の中継関数へのポインタ（3 シャント） (AD 変換結果取得関数を設定)
	*ADC1ShuntDataGet	FSP/SC の中継関数へのポインタ（1 シャント）
	*BLDCDutySet	FSP/SC の中継関数へのポインタ（3 シャント） (PWM 出力 Duty 設定関数を設定)
	*BLDC1ShuntDutySet	FSP/SC の中継関数へのポインタ（1 シャント） (PWM 出力 Duty 設定関数を設定)
	*ADCTriggerTimingSet	FSP/SC の中継関数へのポインタ（1 シャント） (AD 変換トリガ設定関数を設定)
	*BLDCZeroDutySet	FSP/SC の中継関数へのポインタ（3 シャント） (下アーム出力を 0 に設定)
	*BLDCCompareDutySet	FSP/SC の中継関数へのポインタ（3 シャント） (比較用 Duty 出力に設定)
	*PWMOutputStop	FSP/SC の中継関数へのポインタ (PWM 出力禁止関数を設定)
	*PWMOutputStart	FSP/SC の中継関数へのポインタ (Duty Cycle 設定関数を設定)
	f4_shunt_ohm	シャント抵抗値[ohm] (f4_ad_crnt_per_digit 計算用)
	f4_volt_gain	電圧変換ゲイン係数(f4_ad_vdc_per_digit 計算用)
	f4_crnt_amp_gain	電流変換ゲイン係数(f4_ad_crnt_per_digit 計算用)
	f4_pwm_period_cnt	PWM カウンター周期のカウント数(Duty 設定用情報)
	f4_pwm_dead_time_cnt	デッドタイムのカウント数(Duty 設定用情報)

9.9.6　パラメータ調整・設定

ドライバモジュールでは、制御パラメータ設定(R_MOTOR_DRIVER_ParameterUpdate)から入力されたパラメータを使用して、モータモジュールと FSP/SC との関連付け、データ変換を行います。ドライバモジュール制御パラメータ設定用構造体(st_motor_driver_cfg_t)を使って入力します。サンプルプログラムでは、コンフィグレーションとして定義されているものをパラメータ設定値として使用しています。設定内容を表 9-32 に示します。

表 9-32　サンプルプログラム設定例

変数名	マクロ名	ファイル名
*ADCDataGet	DRIVER_CFG_FUNC_ADC_DATA_GET	r_motor_module_cfg.h
*ADC1ShuntDataGet	DRIVER_CFG_FUNC_1SHUNT_ADC_DATA_GET	
*BLDCDutySet	DRIVER_CFG_FUNC_DUTY_SET	
*BLDC1ShuntDutySet	DRIVER_CFG_FUNC_1SHUNT_DUTY_SET	
*ADCTriggerTimingSet	DRIVER_CFG_FUNC_ADC_TRIGGER_SET	
*BLDCZeroDutySet	DRIVER_CFG_FUNC_ZERO_DUTY_SET	
*BLDCCompareDutySet	DRIVER_CFG_FUNC_COMPARE_DUTY_SET	
*PWMOutputStop	DRIVER_CFG_FUNC_PWM_OUTPUT_STOP	
*PWMOutputStart	DRIVER_CFG_FUNC_PWM_OUTPUT_START	
s2_adjust_adc_delay	DRIVER_CFG_AD_TRIGGER_DELAY_TIME	
f4_shunt_ohm	INVERTER_CFG_SHUNT_RESIST	r_motor_inverter_cfg.h
f4_volt_gain	INVERTER_CFG_VOLTAGE_GAIN	
f4_crnt_amp_gain	INVERTER_CFG_CURRENT_AMP_GAIN	
f4_pwm_period_cnt	MOTOR_COMMON_CARRIER_SET_BASE	r_motor_module_cfg.h
f4_pwm_dead_time_cnt	MOTOR_COMMON_DEADTIME_SET	

10. パラメータの設定

10.1 概要

本サンプルプログラムでは、パラメータは以下のヘッダファイル内でマクロ定義されています。マクロ定義されたパラメータは、起動時の初期化ルーチンで、各機能モジュールで管理される変数・構造体に設定され、各々の処理に使用されます。

一部のパラメータは、RMW 等から動的に変更が可能です。変更を行った場合には、パラメータアップデートの関数をコールし、反映させる必要があります。詳細は、各機能モジュールの説明を参照してください。

表 10-1　パラメータ設定ファイルの一覧

マクロ名	説明
r_motor_module_cfg.h	モータ制御に関するパラメータの初期値を定義しています。
r_motor_inverter_cfg.h	インバータに関するパラメータの初期値を定義しています。
r_motor_targetmotor_cfg.h	モータに関するパラメータの初期値を定義しています。
r_pfc_cfg.h	PFC に関するパラメータの初期値を定義しています。

10.2 MCU 関連パラメータ

MCU の周辺機能に関連するパラメーター覧を表 10-2 に示します。FSP または SC を用いてマイコンのペリフェラル設定を変更した場合、これらのパラメータで該当する個所は変更を行う必要があります。

表 10-2　MCU 関連パラメータの一覧

ファイル名	マクロ名	RA ファミリ MCU 設定値	RX26T 設定値	説明
r_motor_module_cfg.h	MOTOR_MCU_CFG_PWM_TIMER_FREQ	RA6T2: 120.0 RA6T3: 100.0 RA4T1: 100.0	120.0	PWM のタイマ周波数 [MHz]
	MOTOR_MCU_CFG_CARRIER_FREQ	8.0	8.0	キャリア周波数 [kHz]
	MOTOR_MCU_CFG_INTR_DECIMATION	0	0	キャリア割り込みの間引き回数
	MOTOR_MCU_CFG_AD_FREQ	RA6T2: 60.0 RA6T3: 50.0 RA4T1: 50.0	60.0	ADC の動作周波数 [MHz]
	MOTOR_MCU_CFG_AD_SAMPLING_CYCLE	2.0*(7.25+63.0)	2.0*(7.25+63.0)	ADC のサンプリング周期 [cycle](3 シャント)
		7.25 + 60.0	7.25 + 60.0	ADC のサンプリング周期 [cycle](1 シャント)
	MOTOR_MCU_CFG_AD12BIT_DATA	4095.0	4095.0	ADC の分解能
	MOTOR_MCU_CFG_ADC_OFFSET	0x7FF	0x7FF	ADC のオフセット値

10.3 制御機能の設定パラメータの一覧

モータ制御プログラムに備わっている機能の有効無効を設定するパラメータを、表 10-3、表 10-4、表 10-5 に示します。モータ制御の内部で使用される、モータ定数や設定に関する項目は、後述します。

表 10-3　動作パラメータの一覧(全般)

ファイル名	マクロ名	設定値	説明
r_motor_module_cfg.h	MOTOR_TYPE_BLDC	MOTOR_TYPE_BLDC	デフォルトのまま使用ください。
	MOTOR_COMMON_CFG_LOOP_MODE	MOTOR_LOOP_SPEED	デフォルトのまま使用ください。
	MOTOR_COMMON_CFG_OVERCURRENT_MARGIN_MULT	2.0f	過電流のリミット係数
	MOTOR_COMMON_CFG_IA_MAX_CALC_MULT	MTR_SQRT_3	過電流リミット値計算用係数。 √3 を設定してください。
	MOTOR_MCU_CFG_TFU_OPTIMIZE	MTR_ENABLE	TFU 専用関数処理の設定。 自動的に ENABLE となります。

表 10-4　動作パラメータの一覧(速度制御関連)

ファイル名	マクロ名	設定値	説明
r_motor_module_cfg.h	SPEED_CFG_MTPA	MTR_ENABLE	最大トルク/電流制御の設定 有効：MTR_ENABLE 無効：MTR_DISABLE Ld=Lq のモータ(SPM モータ)は必ず MTR_DISABLE にしてください。
	SPEED_CFG_CTRL_PERIOD	0.0005f	速度制御周期[s]の設定。 0.5ms とするため、0.0005f を設定してください。

表 10-5　動作パラメータの一覧(電流制御関連)

ファイル名	マクロ名	設定値	説明
r_motor_module_cfg.h	CURRENT_CFG_VOLT_ERR_COMP	MTR_ENABLE	電圧誤差補償機能の有効・無効設定です。MTR_ENABLE を設定してください。
	CURRENT_CFG_MODULATION_METHOD	MOD_METHOD_SVPWM	10.6 を参照してください。 通常、 MOD_METHOD_SVPWM を設定してください。
	CURRENT_CFG_OFFSET_CALC_TIME	512	電流オフセットの測定時間設定。
	CURRENT_CFG_CHARGE_BOOTSTRAP_TIME	144	ブートストラップ回路への充電時間[cnt]。

10.4 保護関連パラメータ

モータを運転する際に、安全性を担保するための保護機能のパラメータを以下に示します。

表 10-6　モータパラメータ、インバータパラメータ設定

ファイル名	マクロ名	設定値	説明
r_motor_inverter_cfg.h	INVERTER_CFG_CURRENT_LIMIT	21.2	インバータボードの過電流の制限値 [A]
	INVERTER_CFG_OVERVOLTAGE_LIMIT	450.0	過電圧制限 [V]
	INVERTER_CFG_UNDERVOLTAGE_LIMIT	100.0	低電圧制限 [V]

INVERTER_CFG_CURRENT_LIMIT

インバータが出力可能な最大の電流値から、安全マージンをとった電流値を設定します。

INVERTER_CFG_OVERVOLTAGE_LIMIT

過電圧保護が動作する電圧を設定します。インバータ母線電圧が、設定した電圧超となると、エラーとなり、モータの動作が停止します。ご使用される電源環境に合わせて設定してください。

INVERTER_CFG_UNDERVOLTAGE_LIMIT

低電圧保護が動作する電圧を設定します。インバータ母線電圧が、設定した電圧未満となると、エラーとなり、モータの動作が停止します。ご使用される電源環境に合わせて設定してください。

10.5 モータ制御用 PWM キャリア周波数の変更

モータ制御用 PWM キャリア周波数は、FSP/SC による設定と、r_motor_module_cfg.h で定義されている MOTOR_MCU_CFG_CARRIER_FREQ の定数で設定されています。PWM キャリア周波数を変更した場合、表 10-7 に示す変更箇所を修正してください。PWM キャリア周波数の設定値に合わせて、パラメータの調整が必要となるパラメータがあります。

本サンプルプログラムのモータ制御におけるデフォルト PWM キャリア周波数は、8.0kHz です。

表 10-7 PWM キャリア周波数を変更した場合に変更を行う個所

項目	変更箇所
デッドタイム値	10.7 インバータパラメータを参照
キャリア周波数	・FSP/SC のモータ設定で PWM キャリア周波数を設定 ・10.2 に記載の MOTOR_MCU_CFG_CARRIER_FREQ
モータ制御関連	・電流制御パラメータ ・センサレス制御パラメータ ・フライングスタート ・トルク振動抑制 ・脱調検知

10.6 パルス変調方法の設定

本サンプルプログラムでは、パルス幅変調駆動方式を２種類から設定することができます。デフォルトは空間ベクトル PWM(MOD_METHOD_SVPWM)となります。変調機能のコンフィグ情報一覧を表 10-8 に示します。

パルス幅変調駆動方式を、正弦波 PWM に変更した場合、電圧利用率が 86%に制約され、モータに適切な電圧が出力できず、所望の電圧を得るにはインバータ母線電圧を高く設定する必要があります。空間ベクトル PWM を使用した場合、電圧利用率はインバータ母線電圧に対して 100%利用できます。

表 10-8　コンフィグレーション情報一覧

ファイル名	マクロ名	設定値	説明
r_motor_module_cfg.h	CURRENT_CFG_MODULATION_METHOD	(MOD_METHOD_SVPWM)	パルス幅変調駆動方式

表 10-9　パルス幅変調駆動方式の設定項目

パルス幅変調駆動方式の設定項目	値	パルス幅変調駆動方式
MOD_METHOD_SPWM	0	正弦波 PWM
MOD_METHOD_SVPWM	1	空間ベクトル PWM

パルス変調には、以下の設定項目があります。通常は、デフォルト値のままでご使用ください。

表 10-10　マクロ一覧

ファイル名	マクロ名	設定値	説明
r_motor_current_modulation.h	MOD_DEFAULT_MAX_DUTY	1.0	最大 PWM デューティ比。通常は 1.0f のままとしてください。
	MOD_VDC_TO_VAMAX_MULT	0.6124	インバータ母線電圧で出力可能な最大電圧を得るための変換係数
	MOD_SVPWM_MULT	1.155	空間ベクトル PWM を使用した場合のみ。空間ベクトル PWM 係数

10.7 インバータパラメータ

10.7.1 概要

サンプルプログラムを使用する際に、インバータの情報を正しく設定する必要があります。サンプルプログラムで設定されているインバータパラメータを表 10-11 に示します。

表 10-11　インバータパラメータ設定

ファイル名	マクロ名	RA ファミリ MCU 設定値	RX26T 設定値	説明
r_motor_inverter_cfg.h	INVERTER_CFG_SHUNT_RESIST	0.01	0.01	シャント抵抗値 [ohm]
	INVERTER_CFG_DEADTIME	2.0	2.0	デッドタイム [us]
	INVERTER_CFG_VOLTAGE_GAIN	174.913	174.913	電圧検出用係数
	INVERTER_CFG_CURRENT_AMP_GAIN	4.17	4.17	電流検出用アンプのゲイン
	INVERTER_CFG_INPUT_V	390.0	390.0	入力電圧 [V]
	INVERTER_CFG_ADC_REF_VOLTAGE	3.3	5.0	MCU のアナログ電源電圧 [V]
	INVERTER_CFG_COMP_V0	1.248		電圧誤差補償用係数 [V]
	INVERTER_CFG_COMP_V1	2.496		電圧誤差補償用係数 [V]
	INVERTER_CFG_COMP_V2	3.744		電圧誤差補償用係数 [V]
	INVERTER_CFG_COMP_V3	4.992		電圧誤差補償用係数 [V]
	INVERTER_CFG_COMP_V4	6.24		電圧誤差補償用係数 [V]
	INVERTER_CFG_COMP_I0	0.07		電圧誤差補償用係数 [A]
	INVERTER_CFG_COMP_I1	0.14		電圧誤差補償用係数 [A]
	INVERTER_CFG_COMP_I2	0.22		電圧誤差補償用係数 [A]
	INVERTER_CFG_COMP_I3	0.30		電圧誤差補償用係数 [A]
	INVERTER_CFG_COMP_I4	0.50		電圧誤差補償用係数 [A]

INVERTER_CFG_DEADTIME

インバータの仕様書・設計書に記載された、デッドタイム時間を us(マイクロ秒)単位で指定してください。MCI-HV-1 インバータでは、2.0us が指定されています。

INVERTER_CFG_INPUT_V

単相 AC200V から PFC 回路を通じて昇圧した DC 電圧値 390V をデフォルトとしています。

INVERTER_CFG_ADC_REF_VOLTAGE

MCU のアナログ電圧を指定します。RA ファミリ MCU CPU ボードは 3.3V、RX26T CPU ボードは 5.0V となります。

INVERTER_CFG_COMP_Vx, INVERTER_CFG_COMP_Ix

10.7.4 を参照してください。

10.7.2 電流検出ゲイン

MCI-HV-1 インバータでは、RA ファミリ MCU は表 10-12、RX26T は表 10-13 に示すように、電流の大きさによって、ADC に入力される電圧値が規定されています。

本サンプルプログラムで、電流の検出ゲインを設定するには、INVERTER_CFG_CURRENT_AMP_GAIN と、INVERTER_CFG_SHUNT_RESIST を使用します。

INVERTER_CFG_ADC_REF_VOLTAGE

RA ファミリ MCU では、ADC 基準電圧が 3.3V となっているため、3.3 を設定してください。RX26T では、ADC 基準電圧が 5.0V になっているため、5.0 を設定してください。

INVERTER_CFG_SHUNT_RESIST

シャント抵抗で使用している抵抗値を設定します。シャント抵抗を使わずにホール CT を使用する場合には、1.0 を指定してください。

INVERTER_CFG_CURRENT_AMP_GAIN

ADC で入力する電圧 1V あたり、何 A に相当するかを求める係数を設定します。0-3.3V で±39.6A(Peak to Peak で 79.2A)の換算となっている MCI-HV-1 の仕様では、79.2A/3.3V=24A/V となり、1V あたり 24A となります。シャント抵抗値 0.01Ω とすると、(1/0.01)*(1/24)= 4.166 となります。

以上より、INVERTER_CFG_CURRENT_AMP_GAIN には、4.166 を設定します。

$$INVERTER_CFG_CURRENT_AMP_GAIN = \frac{1}{INVERTER_CFG_SHUNT_RESIST[\Omega]} \times \frac{1}{1V\text{あたりの電流値}[A/V]}$$

表 10-12　MCI-HV-1 の電流信号仕様(3.3V 系 MCU RA6T2 の場合)

3 相出力電流値	ADC 入力電圧値	ADC 変換値
+39.6A	3.3V	4095
0A	1.65V	2048
-39.6A	0.0V	0

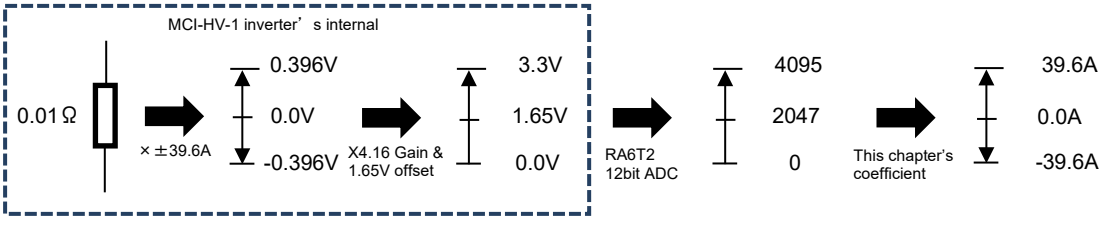


図 10-1　電流検出の計算の流れ(3.3V 系 MCU RA6T2 の場合)

表 10-13　MCI-HV-1 の電流信号仕様(5.0V 系 MCU RX26T の場合)

3 相出力電流値	ADC 入力電圧値	ADC 変換値
+39.6A	5.0V	4095
0A	2.5V	2048
-39.6A	0.0V	0

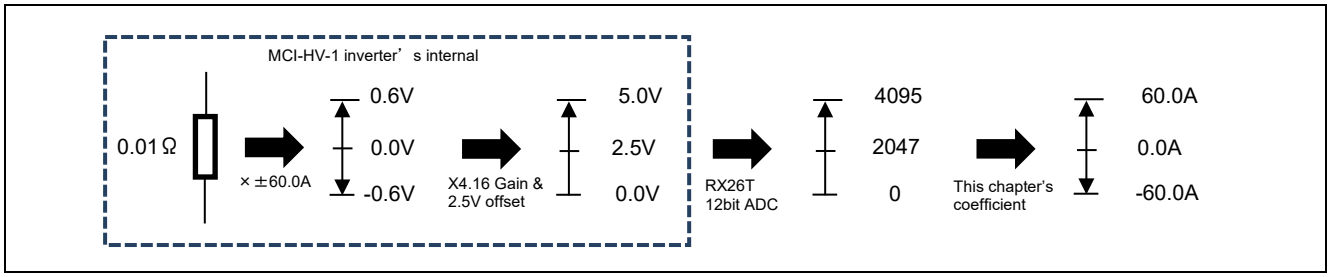


図 10-2　電流検出の計算の流れ(5.0V 系 MCU RX26T の場合)

10.7.3 電圧検出ゲイン

電圧検出ゲインは、INVERTER_CFG_VOLTAGE_GAIN で設定します。以下、10.7.2 章と同様に RA ファミリ MCU を想定して、基準電圧を 3.3V で記述します。RX26T 使用の場合は、基準電圧を 5.0V と想定してください。

ADC で入力する電圧 1V あたり、インバータ母線電圧で何 V に相当するかを求める係数を設定します。ADC に入力される電圧 3.3V で 577.2V に相当する場合は、577.2/3.3= 174.9 となるため、INVERTER_CFG_VOLTAGE_GAIN には、174.9 を設定します。

$$\mathrm{INVERTER_CFG_VOLTAGE_GAIN} = \frac{\textit{インバータ母線電圧の基準}}{\textit{基準となるときのADC入力電圧}} = \frac{577.2}{3.3} = 174.9$$

表 10-14　MCI-HV-1 のインバータ母線電圧信号仕様

インバータ母線電圧値	ADC 入力電圧値	ADC 変換値
0.0V	0.0V	0
577.2V	3.3V	4095

10.7.4 電圧誤差補償パラメータ

電圧誤差補償の機能の使用及び設定方法について説明します。以下の 3 点の設定が必要となります。

① デッドタイム値の選定

インバータに使用されているパワー半導体の特性およびゲート駆動回路の設計により、デッドタイム値は決定されます。Si-IGBT を使用している場合、概ね 2-3us 前後が使用されます。FSP/SC のモータ設定に入力場所が用意されていますので、選定したデッドタイム値を反映させてください。

② 電圧誤差機能有効フラグの設定

電流制御モジュールの制御パラメータ設定(R_MOTOR_CURRENT_ParameterUpdate)呼び出し時に、電圧誤差補償機能の有効/無効使用有無フラグ(u1_flag_volt_err_comp_use)を MTR_FLG_SET に設定することで機能が有効になります。無効にする場合は、上記フラグを MTR_FLG_CLR に設定してください。

③ 電圧補償テーブルの設定

実機のインバータで、電流を流したスイッチング試験を行って、電圧補償テーブルを作成します。スイッチング試験で得られた電流と電圧の関係が求めると、電圧補償テーブルに設定可能な値に換算できます。

インバータ母線電圧 311V、PWM キャリア周波数 16kHz で取得した、U 相の相電圧データを図 10-4 に示します。このデータから電流と電圧の関係を示します。代表点 6 つをプロットして求めると、図 10-5 のように求めることができます。(0,0)を除く、5 つの電流と電圧の点が、電圧誤差補償で使用する情報となります。負の値は、正の値と点対称となるため、内部で絶対値で計算することにより省略することができます。

なお、ここで示した電圧誤差データは PWM キャリア周波数 16kHz のときのものであり、PWM キャリア周波数の設定が変わった場合には、電圧補償テーブルの数値を変更する必要があります。PWM キャリア周波数を 8kHz とする場合には、8/16(1/2)倍の値に換算する必要があります。

また、補償電圧値のリミットは以下の式で計算できます。

補償電圧リミット = （キャリア周期［kHz］× デッドタイム時間［us］÷ 1000）× 母線電圧値

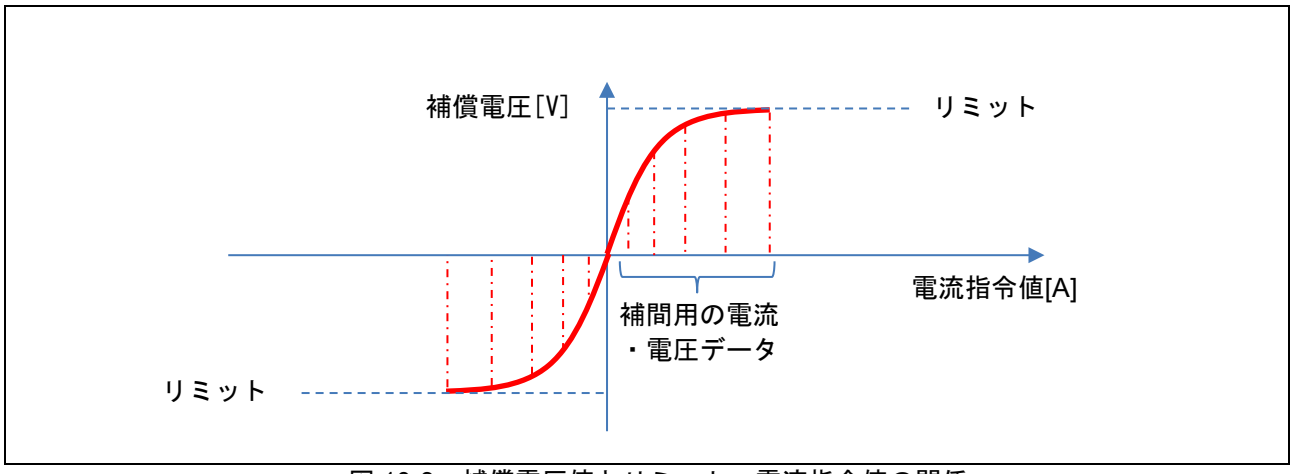


図 10-3　補償電圧値とリミット、電流指令値の関係

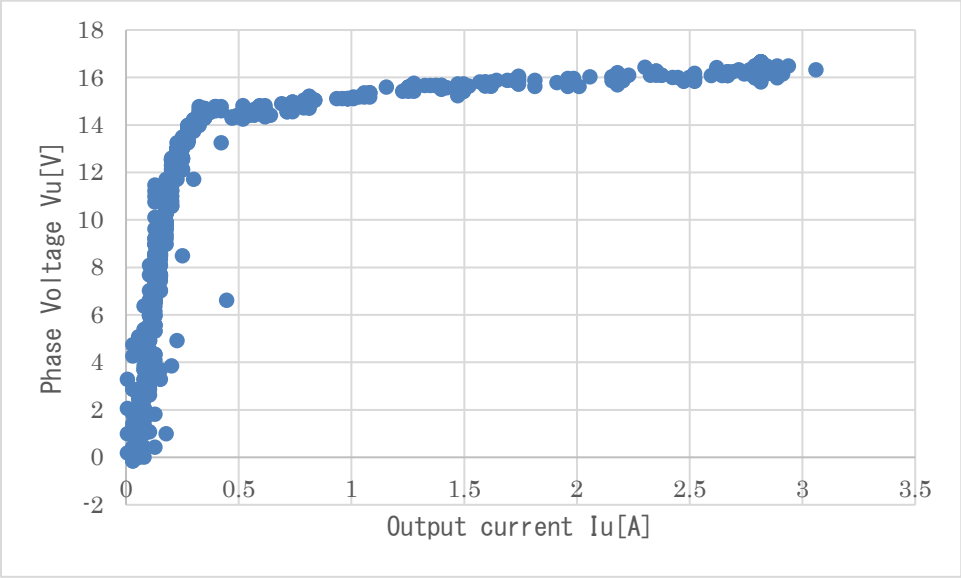


図 10-4　電圧誤差データ例

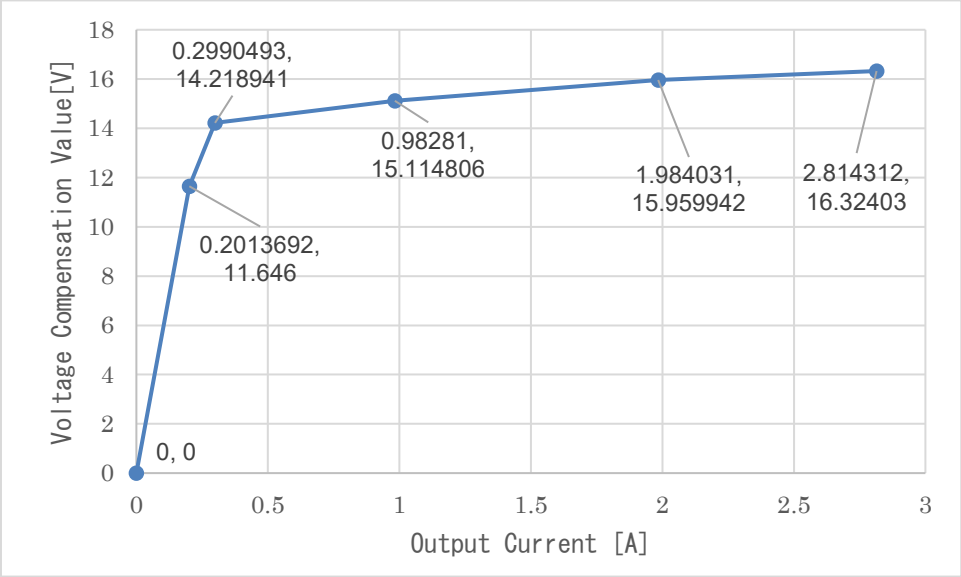


図 10-5　電圧誤差データから選定したデッドタイム補償テーブル例

表 10-15　キャリア周期と補間用の電流・電圧データ

キャリア周期		8kHz	4kHz
	Iu	ΔVu	ΔVu
0	0.00	0.000	0.000
1	0.07	1.248	0.624
2	0.14	2.496	1.248
3	0.22	3.744	1.872
4	0.30	4.992	2.496
5	0.50	6.240	3.120

10.8 モータパラメータ

モータの製造者から、モータパラメータの情報が得られない場合、LCR メータを用いて R,Ld,Lq のモータパラメータを簡易的に得ることができます。また、オシロスコープを用いることで、簡易的に誘起電圧を得ることができます。ここで説明した方法は、磁気飽和などを考慮せず、またモータを速やかに回す事を考慮した、簡易的な方法であり、個体差や測定誤差を含んでいます。このため、実際の製品開発でパラメータを使用する際には、精度を担保した測定設備を用いて、測定を行ってください。

LCR メータは、定期的に校正をされたもので、電源を起動して 30 分以上経過させたウォーミングアップ完了状態で測定してください。また、4 端子法を用いて、プローブの誤差を低減するため、オープン補正とショート補正をあらかじめ行ってください。詳細は、LCR メータの取扱説明書を参照してください。

サンプルプログラムを使用する際に、インバータの情報と使用するモータの情報を正しく設定する必要があります。サンプルプログラムの設定値を表 10-16 に示します。

表 10-16　モータパラメータ設定

ファイル名	マクロ名	設定値	説明
r_motor_targetmotor_cfg.h	MOTOR_CFG_POLE_PAIRS	2	極対数
	MOTOR_CFG_MAGNETIC_FLUX	0.263f	磁束 [wb]
	MOTOR_CFG_RESISTANCE	2.28f	抵抗 [ohm]
	MOTOR_CFG_D_INDUCTANCE	0.0117f	d 軸のインダクタンス [H]
	MOTOR_CFG_Q_INDUCTANCE	0.0157f	q 軸のインダクタンス [H]
	MOTOR_CFG_ROTOR_INERTIA	0.000543f	ロータのイナーシャ [kg m^2]
	MOTOR_CFG_NOMINAL_CURRENT_RMS	3.3f	定格電流 [A]
	MOTOR_CFG_MAX_SPEED_RPM	4000.0f	最大速度 [r/min]

MOTOR_CFG_POLE_PAIRS

PM モータの極対数を設定します。極対数は、極数を 1/2 した値となります。PM モータの仕様書を参照してください。

MOTOR_CFG_RESISTANCE

LCR メータで測定する際の配線は、モータの三相出力線 U,V,W のうち、２つを選び、プローブをつなげてください。抵抗値を求める場合は、直流抵抗(DCR)のモードを用いて、測定します。得られた抵抗値は、２相分の合成抵抗となっていますので、1/2 をすることで、1 相分のモータの抵抗値を得ることができます。得られた抵抗 R は、r_motor_targetmotor_cfg.h の MOTOR_CFG_RESISTANCE に設定してください。単位はΩとなります。

MOTOR_CFG_D_INDUCTANCE, MOTOR_CFG_Q_INDUCTANCE

LCR メータで測定する際の配線は、モータの三相出力線 U,V,W のうち、２つを選び、プローブをつなげてください。計測モードは、直列等価回路モード(Ls)で行います。詳細な測定方法は、LCR メータの取扱説明書を参照ください。

軸をゆっくり回し、表示されるインダクタンスの最大値と最小値をメモします。このとき、最大値の 1/2 が、Lq となり、最小値の 1/2 の値が Ld となります。

得られた Ld 及び Lq は、r_motor_targetmotor_cfg.h の MOTOR_CFG_D_INDUCTANCE, MOTOR_CFG_Q_INDUCTANCE に設定してください。単位は H(ヘンリー)です。

MOTOR_CFG_ROTOR_INERTIA

モータの回転子・軸のイナーシャ（慣性モーメント）を設定します。単位は、kg m^2 です。通常、モータに添付された資料に記述があります。負荷を取り付ける場合には、負荷側のイナーシャも加えて設定してください。

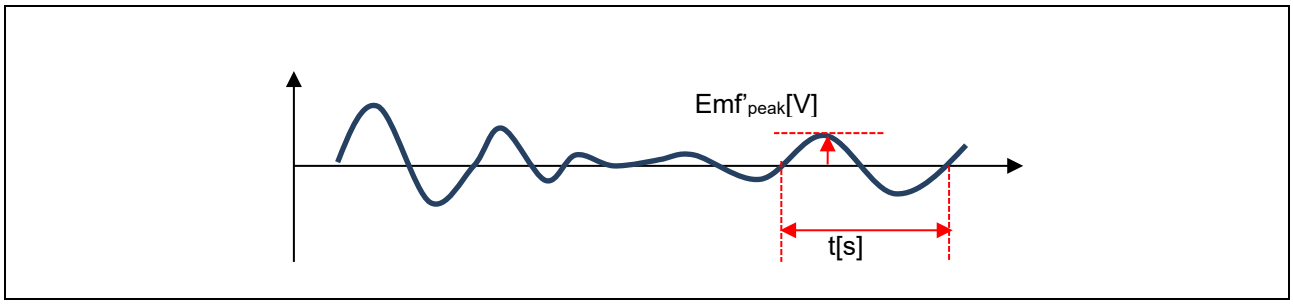
MOTOR_CFG_NOMINAL_CURRENT_RMS

モータの定格電流(実効値)を設定してください。単位はアンペアです。モータの銘板または添付資料に記載されています。

MOTOR_CFG_MAGNETIC_FLUX

モータの三相出力線 U,V,W のうち、２つを選び、オシロスコープにつなげてください。例えば、U 相と V 相を、オシロスコープのプローブを当てて、電圧を測れるようにします。モータの軸の先には、定格速度で回転できるモータを繋げて定格速度で回転させると、U-V 相の線間電圧値が得られます。線間電圧値を√3 で割ることで、相あたりの誘起電圧のピーク値が得られます。鎖交磁束数Ψは、誘起電圧=ωΨ　の式から求められますから、定格速度を電気角速度の周波数 f[Hz]に換算し、ω=2πf に置き換え、誘起電圧=2πfΨとなり、式を変形し、値を代入することで鎖交磁束Ψ[Wb]が得られます。

軸の先にモータを取り付けできない等の場合には、精度は保証されず、試運転目的のみでの利用となりますが、手で素早く回転させ、電圧波形を取得して簡易的に求める手法も使用できます。手で回した際に、以下のようなイメージで電圧波形が得られますが、このとき、正弦波で一定速に近い周期を選び、電圧のピークと周期を求めます。



本アルゴリズムではピーク値を実効値に換算する必要があるため√2 で割って実効値 Emf'rms を得ます。

$$Emf'_{rms}[V] = Emf'_{peak}[V] \times \frac{1}{\sqrt{2}}$$

得られた時間 t[s]を Hz に直すため、f'=1/t の式にあてはめます。得られた f[Hz]と、この PM モータの定格速度から得られる電気角周波数[Hz]の比を求め、同時に得られた電圧 Emf'rms[V]に比を掛け算します。

$$Emf[V] = Emf'_{rms}[V] \times \frac{電気角周波数[Hz]}{f'[Hz]}$$

この結果、この PM モータの定格速度で回転した時に発生する、誘起電圧[V]が簡易的に求められます。実際に誘起電圧を求める場合には、負荷試験装置を使って、定格速度でモータの軸を回転させて測定する必要があります。

次に誘起電圧から、磁束鎖交数Ψ[Wb]を求めます。一般的に、誘起電圧と磁束鎖交数には以下のような関係式があります。f は、定格速度時の電気角周波数[Hz]です。

$$Emf[V] = \omega\Psi = 2\pi f\Psi$$

式を変形し、上記で得られた誘起電圧 Emf[V]と、定格速度運転時の電気角周波数[Hz]を代入することで、磁束鎖交数Ψ[Wb]を求められます。

$$\Psi = \frac{Emf[V]}{2\pi f}$$

得られた磁束鎖交数Ψは、r_motor_targetmotor_cfg.h の MOTOR_CFG_MAGNETIC_FLUX に設定してください。

10.9 電流制御パラメータ

電流制御パラメータを、表 10-17 に示します。モータのパラメータや PWM キャリア周波数、所望の電流応答性能によって、電流制御のパラメータを算出します。

表 10-17 に示す電流制御パラメータのマクロは、起動時に内部の変数に設定・反映されますが、起動後に調整が必要な場合には、RMW から調整することが可能なパラメータが、用意されています。表 6-5 を参照してください。すべてのパラメータを変更できるものではありませんので、ご注意ください。

表 10-17　電流制御パラメータの一覧

ファイル名	マクロ名	設定値	説明
r_motor_module_cfg.h	CURRENT_CFG_OFFSET_CALC_TIME	512	電流オフセットの測定時間設定
	CURRENT_CFG_OMEGA	300.0f	電流制御系固有周波数[Hz]
	CURRENT_CFG_ZETA	1.0f	電流制御系減衰係数

CURRENT_CFG_OFFSET_CALC_TIME

起動時に、電流検出のオフセットを測定するときに、オフセット値の測定回数を指定します。通常はデフォルトのままでご利用ください。

CURRENT_CFG_OMEGA, CURRENT_CFG_ZETA

電流制御系固有周波数と電流制御系減衰係数を調整して制御のゲインを調整します。電流制御系固有周波数は、電流制御を行う頻度に比例して設定してください。電流制御周波数（PWM キャリア周波数）の約 1/10 まで設定できますが、位置検出と電流検出のノイズなどを考慮し、マージンを設けて低く設定する場合が多くあります。

たとえば、電流制御周波数が 20kHz(50us 間隔で電流制御が動作)のときは、1/10 まで設定できますので、電流制御系固有周波数は 2kHz を指定できます。しかし、実際には、モータのパラメータの電気定数に起因して、固有周波数が高いと敏感に反応しすぎる場合があり、2kHz よりも下の周波数(たとえば 500Hz～1kHz)程度に設定することが多いです。

電流制御系減衰係数は、0.7～1.0 が常用範囲です。1.0 に近いほど安定で緩やかな応答になります。

10.10 最大トルク/電流制御

最大トルク/電流制御は、突極性のある PM モータ(Lq>Ld の関係が成り立つ PM モータ)において、出力可能なトルクを最大に調整するためのアルゴリズムです。機能の有効無効は、SPEED_CFG_MTPA で設定します。通常は、有効としてください。

Ld と Lq の値が同じ、またはほぼ同等の PM モータには使用できません。使用できないモータを使っている場合には、必ず最大トルク/電流制御を無効(MTR_DISABLE)にしてください。

表 10-18　コンフィグレーション情報一覧

ファイル名	マクロ名	設定値	説明
r_motor_module_cfg.h	SPEED_CFG_MTPA	MTR_ENABLE	最大トルク/電流制御を使用する場合には、(MTR_ENABLE)を設定してください。使用しない場合には、(MTR_DISABLE)を設定してください。

10.11 速度制御パラメータ

速度制御系のパラメータを、表 10-19 に示します。設定した値が初期値となり、システム起動時に適用されます。表 10-19 に示す速度制御パラメータのマクロは、起動時に内部の変数に設定・反映されますが、起動後に調整が必要な場合には、RMW から調整することが可能なパラメータが用意されています。表 6-5 を参照してください。RMW 上で、すべての速度制御パラメータを変更できるものではありませんので、ご注意ください。

表 10-19　速度制御パラメータの一覧

ファイル名	マクロ名	設定値	説明
r_motor_module_cfg.h	SPEED_CFG_CTRL_PERIOD	0.0005f	制御周期設定 [s]
	SPEED_CFG_OMEGA	3.0f	速度制御系固有周波数 [Hz]
	SPEED_CFG_ZETA	1.0f	速度制御系減衰係数
	SPEED_CFG_LPF_OMEGA	25.0f	速度制御系の LPF 帯域 [Hz]
	SPEED_CFG_SPEED_LIMIT_RPM	4200.0f	速度制限値[r/min]（機械角）
	SPEED_CFG_RATE_LIMIT_RPM	300.0f	加速度制限 [r/min/s]

SPEED_CFG_CTRL_PERIOD

0.0005s(0.5ms)としてください。変更する場合には、11.7 の AGT0 タイマ設定値を変更し、速度制御周期を変更することとなります。

SPEED_CFG_OMEGA, SPEED_CFG_ZETA

速度制御モジュールでは、速度制御系固有周波数と速度制御系減衰係数を調整して制御のゲインを調整します。速度制御系固有周波数を高くすると、応答性が向上し指令速度に対する速度の追従性が向上します。速度制御系固有周波数は電流制御との干渉を防ぐため、設定できる上限は、電流制御系の固有周波数の 1/3 以下にしてください。電流制御系の固有周波数が 500Hz であった場合には、500Hz/3=166Hz となります。しかし、本サンプルプログラムでは、エンコーダを使用せずに速度の推定を行っている関係上、CURRENT_CFG_PLL_EST_OMEGA で設定した固有周波数より低い周波数を設定してください。デフォル

ト値は、追従性を高くせず、マージンを取った値を設定しております。たとえば、外乱が固有周波数より高めで振動する場合には、固有周波数の値を外乱に合わせて増やすことで、外乱の振動への追従性がよくなり、デフォルト設定よりも安定して動く場合があります。

速度制御系減衰係数は 0.7～1.0 は常用範囲とし、値 1.0 に近いほど安定で緩やかな応答になります。速度の応答を確認しながら調整を行ってください。

SPEED_CFG_LPF_OMEGA

推定した速度に対して、フィルタを設定することで、変動を抑制します。値を小さくしすぎると、速度応答性が悪化し、急な速度変化に追従できなくなります。

SPEED_CFG_RATE_LIMIT_RPM

速度指令値を設定した時に、速度が上昇するスピード（加速度）を設定します。値を大きくすると、早く速度が上昇します。100 を指定した時、1 秒当たり 100r/min、上昇します。停止から 2000r/min まで 20 秒で到達します。

10.12 サンプルディレイ補償パラメータ

電流検出タイミングを基準として、実際に PWM が出力されるタイミングまで角度を進ませるための補償値です。本サンプルプログラム及びインバータ構成では、任意のサンプル数を進ませることで、PWM 出力タイミングを一致させることができます。

表 10-20　コンフィグレーション情報一覧

ファイル名	マクロ名	設定値	説明
r_motor_module_cfg.h	CURRENT_CFG_PERIOD_MAG_VALUE	0.5（3shunt） 0.0(1shunt)	進み補償を行います。サンプル数を設定します。

10.13 センサレス制御パラメータ

ここでは、センサレス制御に必要なパラメータの設定方法について説明します。センサレス制御は、電流センサと、あらかじめ設定したモータパラメータや制御パラメータを用いて、始動を行います。パラメータが不適切である場合、センサレス制御に不向きなインバータ・モータを用いた場合は、所望の性能を発揮できない場合があります。

(1) オープンループ制御パラメータ

オープンループ制御に用いる、パラメーター覧を表 10-21 に示します。

表 10-21　オープンループ制御の設定パラメータ

ファイル名	マクロ名	設定値	単位	説明
r_motor_module_cfg.h	CURRENT_CFG_REF_ID_OPENLOOP	3.3f	A	
	CURRENT_CFG_ID_UP_STEP_TIME	2560.0f	cnt	
	CURRENT_CFG_ID_DOWN_STEP_TIME	500.0f	cnt	
	SPEED_OPL2LESS_SWITCH_TIME	0.0625f	sec	
	SPEED_OPL_DAMP_ED_HPF_OMEGA	2.5f	Hz	
	SPEED_OPL_DAMP_ZETA	1.0f	-	
	SPEED_OPL_DAMP_FB_SPEED_LIMIT_RATE	0.5f	-	
	SENSORLESS_VECTOR_ID_DOWN_SPEED_RPM	600.0f	r/min	
	SENSORLESS_VECTOR_ID_UP_SPEED_RPM	400.0f	r/min	
	SENSORLESS_VECTOR_OPL2LESS_SWITCH_PHASE_ERR_DEG	10.0f	deg	
	SENSORLESS_VECTOR_OPL2LESS_SWITCH_PHASE_ERR_LPF_CUT_FREQ	10.0f	Hz	

CURRENT_CFG_REF_ID_OPENLOOP

オープンループ始動時に d 軸に流す電流値を設定します。定格電流値以下を設定してください。イナーシャが大きいモータの場合には、小さい値に設定するとモータを始動できない場合があります。

運転中に変更する場合には com 変数の com_f4_ol_ref_id で調整が可能です。

CURRENT_CFG_ID_UP_STEP_TIME

オープンループ始動時に d 軸に流す電流を上昇させる際にかかる時間を設定します。単位は 1 電流制御周期を 1cnt とした値です。

CURRENT_CFG_ID_DOWN_STEP_TIME

オープンループ始動時にセンサレスベクトル制御に切り替えるために d 軸に流す電流を下降させる際にかかる時間を設定します。単位は 1 電流制御周期を 1cnt とした値です。

SPEED_OPL2LESS_SWITCH_TIME

オープンループ制御からクローズドループ制御（BEMF オブザーバーによるベクトル制御）に切り替える時間を設定します。

SPEED_OPL_DAMP_ED_HPF_OMEGA

d 軸誘起電圧推定用 HPF のカットオフ周波数 [Hz]を設定します。

SPEED_OPL_DAMP_ZETA

オープンループダンピング制御系減衰係数のデフォルト設定値を設定します。0.8～1.0 の値を設定してください。

SPEED_OPL_DAMP_FB_SPEED_LIMIT_RATE

出力速度指令補償値リミッタ算出用定数のデフォルト設定値です。

SENSORLESS_VECTOR_ID_DOWN_SPEED_RPM

オープンループ制御から誘起電圧オブザーバ制御に切り替える際の機械角速度[r/min]を設定します。

SENSORLESS_VECTOR_ID_UP_SPEED_RPM

誘起電圧オブザーバ制御からオープンループ制御に切り替える際の機械角速度[r/min]を設定します。SENSORLESS_VECTOR_ID_DOWN_SPEED_RPM よりも十分低い速度を設定してください。

SENSORLESS_VECTOR_OPL2LESS_SWITCH_PHASE_ERR_DEG

オープンループ制御から誘起電圧オブザーバ制御への切り替え時の角度誤差の閾値です。電気角の角度[deg]で設定してください。

SENSORLESS_VECTOR_OPL2LESS_SWITCH_PHASE_ERR_LPF_CUT_FREQ

オープンループ時から誘起電圧オブザーバによるセンサレスベクトル制御に切り替える際に、誘起電圧オブザーバで得られた位相誤差に対して、切り替えを円滑に行うために LPF のカットオフ周波数を設定します。

(2)　中高速域センサレス制御パラメータ

中高速域センサレス制御に用いる誘起電圧オブザーバのパラメータを表 10-22 に示します。

パラメータの設定方法の詳細については、本サンプルプログラムのベースである永久磁石同期モータのセンサレスベクトル制御 Evaluation System for BLDC Motor 用(R01AN6307) を参照してください。

表 10-22　中高速域センサレス制御の設定パラメータ

ファイル名	マクロ名	設定値	説明
r_motor_module_cfg.h	CURRENT_CFG_E_OBS_OMEGA	750	誘起電圧オブザーバの固有周波数 [Hz]
	CURRENT_CFG_E_OBS_ZETA	1	誘起電圧オブザーバの減衰係数

	CURRENT_CFG_PLL_EST_OMEGA	10	中高速域センサレス制御用 PLL の固有周波数[Hz]
	CURRENT_CFG_PLL_EST_ZETA	1	中高速域センサレス制御用 PLL の減衰係数

CURRENT_CFG_E_OBS_OMEGA
誘起電圧オブザーバの固有周波数を設定します。電流調節器の CURRENT_CFG_OMEGA の設定値よりも 2～3 倍を目安に離した周波数を設定します。近い値を設定すると、発振して正常に角度を求めることができなくなります。

CURRENT_CFG_E_OBS_ZETA
誘起電圧オブザーバの減衰係数を設定します。通常は 1.0 を設定してください。

CURRENT_CFG_PLL_EST_OMEGA
誘起電圧オブザーバで演算した角度誤差を積算し、角度を算出する PLL の固有周波数を設定します。誘起電圧オブザーバの 1/10 程度の値かつ、速度調節器の SPEED_CFG_OMEGA よりも大きくなる周波数を目安に設定します。設定値を誤ると角度が正常に推定できず、発振する場合があります。

CURRENT_CFG_PLL_EST_ZETA
誘起電圧オブザーバで演算した角度誤差を積算し、角度を算出する PLL の減衰係数を設定します。通常は 1.0 を設定してください。

10.14 弱め磁束制御パラメータ

弱め磁束制御は、使用の有無のみを設定します。その他の制御パラメータはありません。母線電圧や速度の状態を監視し、条件が成立した場合に自動的に制御を開始します。

表 10-23　コンフィグレーション情報一覧

ファイル名	マクロ名	設定値	説明
r_motor_module_cfg.h	SPEED_CFG_FLUX_WEAKENING	MTR_ENABLE	弱め磁束制を使用する場合には、(MTR_ENABLE)を設定してください。使用しない場合には、(MTR_DISABLE)を設定してください。

10.15 フライングスタートパラメータ

フライングスタートの動作パラメータを説明します。

表 10-24　コンフィグレーション情報一覧

ファイル名	マクロ名	設定値	説明
r_motor_module_cfg.h	CURRENT_CFG_FLYING_START	MTR_DISABLE	始動時にフライングスタート機能を使用する場合、MTR_ENABLE を設定してください。なお、MTR_DISABLE と設定した場合であっても com 変数 com_u1_flag_flying_start_use で後から変更が可能です。

表 10-25　フライングスタートの設定パラメータ

ファイル名	マクロ名	設定値	説明
r_motor_module_cfg.h	SENSORLESS_VECTOR_FLY_START_CURRENT_TH	2.0f	短絡電流の閾値[A]を設定します。

	SENSORLESS_VECTOR_FLY_START_OVER_TIME_SEC	0.0025f	
	SENSORLESS_VECTOR_FLY_START_OFF_TIME_SEC	0.001f	
	SENSORLESS_VECTOR_FLY_START_ACTIVE_BRAKE_TIME_SEC	1.0f	
	SENSORLESS_VECTOR_FLY_START_RESTART_SPEED_LIMIT	660.0f	フライングスタートによる再始動を許可させる最低速度を設定します。

SENSORLESS_VECTOR_FLY_START_CURRENT_TH

フライングスタート機能における Ton 時間とみなす短絡電流の閾値を設定します。本パラメータによって、Ton 時間が決定されます。

電流検出分解能による回転速度及び磁極位置への推定影響を低減するために、Ton 時間は以下の条件 1,2(0.96A<Ia <5.7A)から、検出した電流ベクトル(Ia)が 2.0A になるまで三相下アームを同時 ON させます。Ton 時間が長くなるほど式 4.10.5 の近似誤差が大きくなるため、2.0A を Ton 時間の閾値電流とします。

条件 1	検出電流ベクトルの大きさ(Ia)が電流検出分解能の 100 倍以上を目安に決定してください。例えば MCI-HV-1 インバータボードの電流検出分解能 79.2A/12bit (19.3mA/LSB)とすると、閾値は 19.3mA の 100 倍は 1.93A 以上となります。 ただし、短絡電流の立ち上がり時間が配線のインピーダンスやモータ定数の影響で緩やかとなり、フライングスタートの(Ton+Toff)max 条件を満たせない場合には、実験的に電流値を 1/2 程度まで下げてください。
条件 2	検出電流ベクトルの大きさ(Ia)は、ターゲットモータの定格相電流実効値 ×√3 以下であること。ターゲットモータの相電流実効値 3.3A×√3≒5.7A から、検出電流ベクトル(Ia)は 5.7A 以下であること。

SENSORLESS_VECTOR_FLY_START_OVER_TIME_SEC

短絡電流の閾値に到達するまで待つ最大時間を秒で設定します。この時間を超過すると、停止または低速回転中とみなしてアクティブブレーキを動作させます。

SENSORLESS_VECTOR_FLY_START_OFF_TIME_SEC

フライングスタートの Toff 時間を設定します。Toff 時間は、以下の条件 1,2(0.61ms<Toff<3.5ms)を満たせるように Toff=2ms とします。

条件 1：dq 軸回転座標系における式 4.10.5 の近似条件 i(0)=0 を満たせるように Ton 時間導通後、3 相電流がゼロまで減衰する必要があります。電流ベクトル Ia が 2A から 0A まで減衰するまでにおける Toff 時間を回路シミュレーションで行うと、最高回転速度 4000r/min における最大 Toff 時間は約 0.61ms となります。よって、Toff > 0.61ms になるように設定します。

条件 2：三相下アーム導通開始タイミングから閾値電流 2A までの導通時間 Ton は、回路シミュレーションを行うと、最大回転速度 4000r/min において Ton=0.25ms が得られます。このとき、回転速度を時間換算して得られる(Ton+Toff)max は 3.75ms となっていることから、Toff<(3.75-0.25)ms=3.5ms を満たす必要があります。

SENSORLESS_VECTOR_FLY_START_ACTIVE_BRAKE_TIME_SEC

フライングスタートで始動できない速度で回転している場合、アクティブブレーキをかけてモータを停止させます。停止させる際のブレーキの動作時間[s]を設定します。

10.16 トルク振動抑制パラメータ

トルク振動抑制機能は、誘起電圧オブザーバによるセンサレスベクトル制御で運転している定常状態時に使用できます。オープンループ制御時や、加減速時には使用できません。オープンループ中や、加減速時でトルク振動抑制制御機能を有効にすると、予期せぬ動作をする可能性があるためご注意ください。また、主に低中速域で使用することや、コンプレッサ等のトルク振動発生源の特性によって、使用条件が異なることから、com_u1_flag_trq_vibration_comp_use の変数を使用して RMW でモータ駆動波形を確認しながら、動作を確認してください。

表 10-26　トルク振動抑制の操作手順

手順	操作内容	RMW の操作
1	速度が定常状態であることを確認する	-
2	トルク振動抑制制御のパラメータを設定	RMW 上で、パラメータ変更を行う 主な調整パラメータは以下の通りです。 ・ 位相進み K_2 [rad]：com_f4_timelead_1f/2f ・ TF 内部の LPF 固有周波数[Hz]：com_f4_tf_lpf_omega ・ 繰り返し制御器への入力ゲイン K_1：com_f4_tf_output_gain_1f/2f ・ 入力信号重み：com_f4_input_weight0/1/2 ・ 抑制目標：com_f4_suppression_th_1f/2f ・ TF 出力異常度閾値：com_f4_abnormal_output_th_1f/2f
3	トルク振動抑制を開始させる	com_u1_flag_trq_vibration_comp_use に 1 をセット RMW の操作手順に沿って、変数を更新する ※上記 com 変数はセンサレスベクトル制御でのみ、ON となるようにしてください。
4	補償信号の生成が終了する	RMW 上で、トルク振動抑制制御のステータスを確認してください。 ステータス：u2_trq_comp_state ※補償信号の発散や、所望の抑制効果を得られない場合には、手順 5 を行った後に、手順 2 に従いパラメータの調整をしてください。
5	速度を変更する必要がある場合、またはトルク振動抑制機能を無効にする場合、トルク振動抑制機能を OFF にする。	com_u1_flag_trq_vibration_comp_use に 0 をセット RMW の操作手順に沿って、変数を更新する
6	速度変更が完了した後、必要に応じて手順 1 に戻る。	-

表 10-27　トルク振動抑制の設定パラメータ

ファイル名	マクロ名	設定値	説明

r_motor_module_cfg.h	CURRENT_CFG_TRQVIB_TARGET_2F	MTR_FLG_SET	0 : 抑制対象は回転周波数の 1 次成分のみ 1 : 抑制対象は回転周波数の 1 次成分と 2 次成分
	CURRENT_CFG_TRQVIB_COMP_MODE	TRQCOMP_MODE_PAT	補償信号の生成方式 : TRQCOMP_MODE_LUT TRQCOMP_MODE_PAT
	CURRENT_CFG_TRQVIB_OUTPUT_GAIN_1F	0.005f	K_1 : 繰り返し制御器への入力値に対するゲイン（回転周波数の 1 次成分）
	CURRENT_CFG_TRQVIB_OUTPUT_GAIN_2F	0.005f	K_1 : 繰り返し制御器への入力値に対するゲイン（回転周波数の 2 次成分）
	CURRENT_CFG_TRQVIB_TIMELEAP_1F	0.0f	K_2 : 位相進み[rad]（回転周波数の 1 次成分）
	CURRENT_CFG_TRQVIB_TIMELEAP_2F	4.0f	K_2 : 位相進み[rad]（回転周波数の 2 次成分）
	CURRENT_CFG_TRQVIB_TF_LPF_OMEGA	0.6f	トラッキングフィルタ内部における LPF の固有周波数 [Hz]
	CURRENT_CFG_TRQVIB_INPUT_WEIGHT_2	1.0f	入力信号の重みづけを設定します。モータや負荷の特性に応じて、設定してください。（LUT 方式のみ）
	CURRENT_CFG_TRQVIB_INPUT_WEIGHT_1	0.0f	
	CURRENT_CFG_TRQVIB_INPUT_WEIGHT_0	0.0f	
	CURRENT_CFG_TRQVIB_SUPP_TH_1F	0.05f	抑制目標 X（回転周波数の 1 次成分）
	CURRENT_CFG_TRQVIB_SUPP_TH_2F	0.1f	抑制目標 X（回転周波数の 2 次成分）
	CURRENT_CFG_TRQVIB_ABNORMAL_TH_1F	0.9f	TF 異常出力度回転周波数の 1 次成分）
	CURRENT_CFG_TRQVIB_ABNORMAL_TH_2F	0.9f	TF 異常出力度回転周波数の 2 次成分）

CURRENT_CFG_TRQVIB_TARGET_2F
本マクロにより、トルク振動抑制制御の補償対象に回転周波数の 2 次成分を含めるか設定が可能です。
0 : 抑制対象は回転周波数の 1 次成分のみ
1 : 抑制対象は回転周波数の 1 次成分と 2 次成分

CURRENT_CFG_TRQVIB_OUTPUT_GAIN_1F/2F
本マクロは、繰り返し制御器への入力値に対するゲイン K_1 を設定します。 K_1 を大きく設定すると、補償信号学習終了までの時間を短縮できますが、条件によっては補償信号が発散してしまいます。一方で K_1 を小さくすると、繰り返し制御器への入力値が小さくなり、補償信号の学習終了まで時間がかかりますが、安定的な補償信号が期待できます。また、トルク振動抑制の内部アルゴリズムは積分器の要素を持っており、過渡状態の時間は変化しますが、発散しない K_1 における定常状態では、ゲインにかかわらずフィードバック値は同じとなります。

CURRENT_CFG_TRQVIB_TIMELEAP_1F/2F [rad]
出力位相を調整するパラメータです。ラジアンで設定します。範囲は、振動成分の 1 周期換算における 0～2π (6.28)です。

CURRENT_CFG_TRQVIB_TF_LPF_OMEGA [Hz]
TF 内部の LPF のフィルタの固有周波数を設定します。TF 内部の LPF は、直流成分のみを通過させることが目的になりますが、抽出の遅れ等を考慮して設定をしてください。

CURRENT_CFG_TRQVIB_INPUT_WEIGHT_0,
CURRENT_CFG_TRQVIB_INPUT_WEIGHT_1,
CURRENT_CFG_TRQVIB_INPUT_WEIGHT_2
内部のテーブルに格納する際に、移動平均の重みづけを設定します。振動抑制効果の変動が激しい場合は、重みづけを調整してください。（LUT 方式のみ）

CURRENT_CFG_TRQVIB_SUPP_TH_1F /2F
学習終了の判断に用いられる抑制目標 X を設定できます。

$$X = \frac{\textit{抑制後の振動成分振幅値}}{\textit{抑制前の振動成分振幅値}}$$

CURRENT_CFG_TRQVIB_ABNORMAL_TH_1F/2F

学習終了の判断に用いられる TF 出力異常度を設定できます。TF 出力異常度とは、TF 出力における抽出したい振動成分に対する、それ以外の成分を表しています。この TF 出力異常度が 1.0 を超えて学習をし続けてしまうと、所望でない成分を学習してしまいます。そのため、TF 出力異常度の閾値を 1.0 以下に設定することを推奨いたします。なお、異常度の検出は、TF で用いる参照機械角の位相によっては、正確に異常度を計算することができない場合があります。したがって、上記の抑制目標と TF 出力異常度を組み合わせて学習終了判断の調整を行ってください。

10.17 脱調検出パラメータ

脱調検出のパラメータを以下に示します。

表 10-28　コンフィグレーション情報一覧

ファイル名	マクロ名	設定値	説明
r_motor_module_cfg.h	CURRENT_CFG_STALL_DETECTION	MTR_ENABLE	脱調検出機能を使用する場合には、(MTR_ENABLE)を設定してください。使用しない場合には、(MTR_DISABLE)を設定してください。

表 10-29　脱調検知の設定パラメータ

ファイル名	マクロ名	設定値	説明
r_motor_module_cfg.h	CURRENT_CFG_STALL_D_HPF_GAIN	0.00025	d/q 軸電流検出値から、振動成分を抽出するために HPF のゲインを設定します。
	CURRENT_CFG_STALL_Q_HPF_GAIN	0.00025	
	CURRENT_CFG_STALL_THRESHOLD_LEVEL	5.0	脱調とみなす電流レベルの閾値[A]を設定します。
	CURRENT_CFG_STALL_THRESHOLD_TIME	0.1	電流レベルの閾値を超えた時に脱調と判定する時間[s]を設定します。

CURRENT_CFG_STALL_D_HPF_GAIN
CURRENT_CFG_STALL_Q_HPF_GAIN
HPF ゲインは以下の式から求められます。脱調検知の処理が動作する電流制御周期は 125us、HPF の時定数を 8ms としたとき、HPF ゲインは 0.016 となります。

$$HPFGain = \frac{Tc[sec]}{HPF\ Time[sec]} = \frac{125us}{8ms} = 0.015625 \fallingdotseq 0.016$$

10.18 PFC 制御パラメータ

(1) 共通

PFC 制御をおこなうための、共通的なパラメータと、その設定値算出方法について示します。以下に、PFC 設定パラメータ（共通）を示します。

表 10-30　PFC 設定パラメータ(共通)

マクロ名	RA ファミリ MCU 設定値	RX26T 設定値	単位	説明
PFC_MCU_CFG_PWM_TIMER_FREQ	RA6T2: 120.0 RA6T3: 100.0 RA4T1: 100.0	120.0	MHz	PWM のタイマ周波数
PFC_MCU_CFG_CARRIER_FREQ	RA6T2: 32.0 RA6T3: 32.0 RA4T1: 25.0	32.0	kHz	キャリア周波数
PFC_MCU_CFG_INTR_DECIMATION	RA6T2: 0 RA6T3: 1 RA4T1: 1	0	-	PFC 制御割り込みの間引き回数
PFC_MCU_CFG_AD12BIT_DATA	4095.0	4095.0	-	ADC の分解能
PFC_MCU_CFG_ADC_OFFSET	0x7FF	0x7FF	-	ADC のオフセット値
PFC_CFG_ADC_REF_VOLTAGE	3.3	5.0	V	ADC の基準電圧値
PFC_CFG_SHUNT_RESIST	0.005		Ohm	シャント抵抗値
PFC_CFG_AC_VOLTAGE_GAIN	426.5319149		-	AC 電圧変換ゲイン
PFC_CFG_BUS_VOLTAGE_GAIN	174.9130435		-	母線電圧変換ゲイン
PFC_CFG_CURRENT_AMP_GAIN	8.333333333		-	電流変換ゲイン
PFC_CFG_BUS_VOLTAGE_OFFSET	0		-	母線電圧オフセット補正値
PFC_CFG_INPUT_VOLTAGE_OFFSET	0		-	AC 電圧オフセット補正値
PFC_CFG_CURRENT_OFFSET	0		-	電流オフセット補正値

PFC_MCU_CFG_PWM_TIMER_FREQ

PFC 制御で使用する GPT のクロックを設定します。デフォルトでは 120MHz を設定しています。

PFC_MCU_CFG_CARRIER_FREQ

PFC 制御の PWM キャリア周波数を設定します。デフォルトは 32kHz です。変更する場合、モータ制御の PWM キャリア周波数と整数倍で一致するようにしてください。

PFC_MCU_CFG_INTR_DECIMATION

PFC 制御割り込みの間引き回数を設定します。変更する場合、周辺機能の間引き回数設定と一致するようにしてください。

PFC_MCU_CFG_AD12BIT_DATA

12bit ADC の最大値を設定します。値は変更しないでください。

PFC_MCU_CFG_ADC_OFFSET

1.65V を 0 とオフセットするための定数を設定します。3.3V では 0x7FF(2047)となります。値は変更しないでください。以下、RA ファミリ MCU を想定して、基準電圧を 3.3V で記述します。RX26T 使用の場合は、基準電圧は 5.0V と想定してください。

PFC_CFG_ADC_REF_VOLTAGE

ADC の基準電圧値を設定します。RA ファミリ MCU では 3.3V、RX26T では 5V となります。値を変更しないでください。

PFC_CFG_SHUNT_RESIST

PFC の電流検出で使用するシャント抵抗の値[Ohm]を設定します。

PFC_CFG_AC_VOLTAGE_GAIN

PFC で使用する入力交流電圧の検出ゲインを設定します。入力電圧 Vac について、：0～3.3V が -703.8V～+703.8V に相当すると仮定します。ADC は 12bit 分解能となっておりますので、0-4095 の範囲で値を検出できます。

表 10-31　入力交流電圧と ADC 検出値の関係

ADC 入力電圧値	ADC 検出値(12bit)	AC 電圧値
0.0V	0	-703.8V
1.65V	2048	0V
3.3V	4095	+703.8V

検出ゲインは以下のように求めます。

$$Gain = \frac{1}{3.3} \times |703.8 - (-703.8)| = 426.5$$

PFC_CFG_BUS_VOLTAGE_GAIN

母線電圧の検出ゲインを設定します。母線電圧（PFC 出力電圧）について、0～3.3V が 0.0V～+577.2V に相当すると仮定します。ADC は 12bit 分解能となっておりますので、0-4095 の範囲で値を検出できます。

表 10-32　入力交流電圧と ADC 検出値の関係

ADC 入力電圧値	ADC 検出値(12bit)	母線電圧値
0.0V	0	0.0V
3.3V	4095	+577.2V

検出ゲインは以下のように求めます。

$$Gain = \frac{1}{3.3} \times 577.2 = 174.9$$

PFC_CFG_CURRENT_AMP_GAIN

PFC で使用する電流検出ゲインを設定します。計算方法は INVERTER_CFG_CURRENT_AMP_GAIN と同様となります。0-3.3V で±39.6A(Peak to Peak で 79.2A)の換算となっている MCI-HV-1 の仕様では、79.2A/3.3V=24A/V となり、1V あたり 24A となります。PFC_CFG_SHUNT_RESIST のシャント抵抗値 0.005Ω とすると、(1/0.005)*(1/24)= 8.333 となります。

以上より、PFC_CFG_CURRENT_AMP_GAIN には、8.333 を設定します。以下の通りです。

PFC_CFG_BUS_VOLTAGE_OFFSET

PFC_CFG_INPUT_VOLTAGE_OFFSET

PFC_CFG_CURRENT_OFFSET

電圧や電流の検出回路に生じる個体差を調整するためのオフセット値を設定します。オフセット値は、ADC やオペアンプのオフセットを補正するために使用するため、ADC を通じて得られる 12bit の検出値の単位を設定します。

オフセット値の調整は、精度の良い電圧計と RMW を用いて、0V～使用最大電圧まで、一定間隔で電圧値と ADC 検出値、内部で求めた母線電圧値を測定し、電圧の傾きとオフセット値が、もっともよく使う電圧領域で一致するように調整します。

(2)　指令値・制限値

PFC 制御に与える、目標となる指令値や出力電力の制限値を設定します。デフォルトでは入力交流電圧 50Hz の設定となっています。60Hz で使用する場合、以降の説明に従って VAC_FREQ と DATA_ARR_SIZE のマクロ値を変更してください。

表 10-33　r_pfc_cfg.h での PFC 設定パラメータ(指令値・制限値)

マクロ名	シングルフェーズ PFC 設定値	インターリーブ PFC 設定値	単位	説明
VAC_FREQ	50.0	50.0	Hz	入力 AC 電圧周波数
DATA_ARR_SIZE	320	320	-	AC 電圧格納用配列
VDC_TARGET_VALUE	390.0	390.0	V	母線電圧目標値
PFC_OUT_MAX_POWER	1000.0	2000.0	W	PFC 最大出力
PFC_OUT_MIN_POWER	500.0	1000.0	W	PFC 最小出力
PFC_OUT_POWER_COEF	1.4	1.4	-	出力調整用係数

VAC_FREQ
入力交流電圧の周波数を設定してください。日本国内では、50Hz または 60Hz となります。初期値から変更した場合、後述の DATA_ARR_SIZE の値も変更してください。

DATA_ARR_SIZE

入力される AC 電圧の周波数によって、調整してください。50Hz の場合は 320、60Hz の場合は 267 です。AD 変換の間引き回数が 0 回の時、サンプリング周波数は Fs=32kHz であり、入力 AC 電圧の周波数が f=50Hz とすると、以下の式から求められます。

$$DATA\ ARR\ SIZE = \frac{Fs[Hz]}{2 \times f[Hz]} = \frac{32000}{2 \times 50} = 320$$

VDC_TARGET_VALUE
PFC で昇圧した母線電圧の指令値[V]を設定してください。デフォルトは 390V となります。ここで指定した母線電圧値は、母線電圧の検出回路の個体差により、実際に計測した値と誤差が生じる場合があります。誤差を補正する場合には、母線電圧の検出ゲインやオフセットをユーザ自身において手動で調整し、校正してください。

PFC_OUT_MAX_POWER
PFC が出力可能な電力[W]の AC200V 入力時の最大値[W]を設定します。MCI-HV-1 に合わせた設定となっているため、値は変更しないでください。

PFC_OUT_MIN_POWER
PFC が出力可能な電力[W]の AC100V 入力時の最大値[W]を設定します。MCI-HV-1 に合わせた設定となっているため、値は変更しないでください。

PFC_OUT_POWER_COEF
電力を調整する係数です。回路の損失分のマージンを係数として設定します。1.0～1.4 の範囲で調整してください。

(3) 電圧・電流制御系

PFC 制御の内部で使用する、AVR（電圧調節器）及び ACR（電流調節器）のゲインを設定します。PFC の動作に影響しますので、正しく設計・検討の上、ご利用ください。計算方法について、以下に解説しています。

表 10-34　r_pfc_cfg.h での PFC 設定パラメータ

マクロ名	シングルフェーズ PFC 設定値	インターリーブ PFC 設計値	単位	説明
PFC_AVR_KP	32.9	RA62T: 32.9 RA6T3: 27.4 RA4T1: 24.7 RX26T: 32.9	-	AVR 比例ゲイン
PFC_AVR_KI	0.003	RA6T2: 0.006 RA6T3: 0.01 RA4T1: 0.011 RX26T: 0.006	-	AVR 積分ゲイン
PFC_AVR_LIMIT	500.0	1000.0	W	AVR 出力リミッタ
PFC_ACR_KP	0.019	RA6T2: 0.01 RA6T3 : 0.005 RA4T1: 0.003 RX26T: 0.01	-	ACR 比例ゲイン
PFC_ACR_KI	0.003	RA6T2: 0.001 RA6T3: 0.0007 RA4T1: 0.0005 RX26T: 0.001	-	ACR 積分ゲイン
PFC_ACR_LIMIT	1.0	1.0	-	ACR 出力リミッタ
PFC_AVR_FF_COMP_MIN_LIMIT	10.0		Vrms	AVR FF 補償における入力電圧実効値の下限値
PFC_ACR_FF_COMP_MIN_LIMIT	10.0		V	ACR FF 補償における母線電圧の下限値
PFC_ACR_DUTY_FF_CTRL_TIME	0.1		sec	デューティ FF 補償のソフトスタート時間
PFC_ACR_DUTY_FF_COMP_COEF	0.85		-	デューティ FF 補償の補償係数
PFC_DUTY_MAX	0.968		-	Duty 最大値
PFC_DUTY_MIN	0.003		-	Duty 最小値

PFC_AVR_KP
PFC の出力電圧となる母線電圧に追従するための電圧調節器の比例ゲインを設定します。以下の定数を用いて、算出します。ご利用になるインバータ回路に合わせて、設計値は適切に選定してください。

表 10-35　AVR・ACR の比例ゲイン・積分ゲイン計算の前提条件となる定数

定数	変数名	シングルフェーズ PFC 設計値	インターリーブ PFC 設計値	単位
入力交流電圧	Vin	100	100	Vrms
出力母線電圧	Vout	390	390	Vdc
出力電力	Pout	500	1000	W
スイッチング周波数	Fsw	32	32	kHz
内部コンデンサ	C	1120	1120	uF
内部インダクタ	L	400	200	uH

ここで、AVR の固有周波数 Fv を 12Hz、Kg を 0.01 とすると、Kp は以下のように算出できます。

$$AVR\ K_p = \frac{2\pi F_v C}{K_g(V_{in}/V_{out})} = \frac{2\pi \times 12 \times 0.00112}{0.01 \times (100/390)} = 32.9$$

PFC_AVR_KI
PFC の出力電圧となる母線電圧に追従するための電圧調節器の積分ゲインを設定します。定数は前述の表 10-35 を使用します。AVR の固有周波数 Fv=12Hz、Kg=0.01、Ts=1/Fsw=31.25us とします。また、Ro を以下のように定義します。

$$R_o = V_{out} \times \frac{V_{out}}{P_{out}} = 390 \times \frac{390}{500} = 304.2[Ohm]$$

このときの Ki は以下の式で求めることができます。

$$AVR\ K_i = \frac{2\pi F_v T_s}{K_g R_o(V_{in}/V_{out})} = \frac{2\pi \times 12 \times 0.00003125}{0.01 \times 304.2 \times (100/390)} = 0.003$$

PFC_AVR_LIMIT
PFC の出力電圧となる母線電圧に追従するための電圧調節器の出力リミット値を設定します。

PFC_ACR_KP
入力交流電流に追従するための電流調節器の比例ゲインを設定します。定数は前述の表 10-35 を使用します。
固有周波数を Fc=1500Hz、Kg=1.0 とします。Fc は、キャリア周波数の 1/20 を目安に設定します。数値の算定根拠としては、電流検出のサンプリング周波数（＝キャリア周波数）に対して十分なサンプル数が得られ、追従できる周波数を選んで設定します。このとき、Kp は以下のように算出できます。

$$ACR\ K_p = \frac{2\pi F_c L}{K_g V_{out}} = \frac{2\pi \times 1500 \times 0.0004}{1.0 \times 390} = 0.019$$

PFC_ACR_KI
入力交流電流に追従するための電流調節器の積分ゲインを設定します。定数は前述の表 10-35 を使用します。固有周波数 Fc は PFC_ACR_KP と同じく Fc=1500Hz、Kg=1.0 とします。また、Ts=1/Fsw=31.25us とします。このとき、Ki は以下のように算出できます。

$$ACR\ K_i = \frac{(2\pi F_c)^2 L}{K_g V_{out}} T_s = \frac{(2\pi \times 1500)^2 \times 0.0004}{1.0 \times 390} \times 0.00003125 = 0.00284$$

PFC_ACR_LIMIT
入力交流電流に追従するための電流調節器の出力リミット値を設定します。

PFC_AVR_FF_COMP_MIN_LIMIT
電圧調節器におけるフィードフォワード補償の最小制限値となる入力電圧実効値[Vrms]を設定します。

PFC_ACR_FF_COMP_MIN_LIMIT
電流調節器におけるフィードフォワード補償の最小制限値となる母線電圧値[V]を設定します。

PFC_ACR_DUTY_FF_CTRL_TIME
デューティ FF 補償のソフトスタート時間[s]を設定します。

PFC_ACR_DUTY_FF_COMP_COEF

デューティ FF 補償の補償係数を設定します。設定可能な値の範囲は 0.0～1.0 です。

PFC_DUTY_MAX
PFC 制御で PWM 出力する最大の Duty を設定します。設定可能な値の範囲は 0.0～1.0 です。

PFC_DUTY_MIN
PFC 制御で PWM 出力する最小の Duty を設定します。値を大きくすると、負荷が非常に小さいとき、最小 Duty で昇圧されて母線電圧が上昇する場合があります。設定可能な値の範囲は 0.0～1.0 です。

(4)　リレー制御

突入電流防止リレーの動作条件を設定するパラメータです。ご利用される環境に応じて設定してください。

表 10-36　r_pfc_cfg.h での PFC 設定パラメータ

マクロ名	設定値	単位	説明
RELAY_ON_VAC_RMS_MIN	78.0	Vrms	リレーON となる入力電圧実効値
RELAY_OFF_VAC_RMS_MIN	70.0	Vrms	リレーOFF となる電圧実効値
RELAY_ON_DIV_MIN	10.0	V	リレーON となる電圧差
RELAY_OFF_DIV_MAX	100.0	V	リレーOFF となる電圧差
RELAY_ON_DELAY_TIME	0.1	sec	リレーON 待機時間
RELAY_OFF_DELAY_TIME	0.03	sec	リレーOFF 待機時間

RELAY_ON_VAC_RMS_MIN
リレーが ON する最小の入力交流電圧の実効値[Vrms]を設定します。

RELAY_OFF_VAC_RMS_MIN
リレーが OFF する最小の入力交流電圧の実効値[Vrms]を設定します。

RELAY_ON_DIV_MIN
リレーが ON する際の電圧の最小変動幅[V]を設定します。

RELAY_ON_DIV_MAX
リレーが OFF する際の電圧の最大変動幅[V]を設定します。

RELAY_ON_DELAY_TIME
リレーが OFF のときに、リレーが ON する条件が成立してから、リレーを ON に駆動するまでの遅延時間[s]を設定します。

RELAY_OFF_DELAY_TIME
リレーが ON のときに、リレーが OFF する条件が成立してから、リレーを OFF に駆動するまでの遅延時間[s]を設定します。

(5)　保護

PFC の保護機能に関する設定を行います。

表 10-37　r_pfc_cfg.h での PFC 設定パラメータ

マクロ名	設定値	単位	説明
VAC_OVER_VOLTAGE	388.0	Vpeak	入力交流過電圧値
VDC_OVER_VOLTAGE	450.0	V	母線電圧過電圧値
VDC_UNDER_VOLTAGE	80.0	V	母線電圧低電圧値
ICHP_OVER_CURRENT	38.0	Apeak	PFC 過電流値
PFC_VAC_DIP_DETECT_LEVEL	70.0	Vrms	入力電圧ディップ検知レベル

VAC_OVER_VOLTAGE
入力の単相交流電圧値の過電圧レベルとなる電圧値[Vpeak]を設定してください。電圧はピーク値です。通常、インバータの入力最大電圧を超えない値を設定します。

VDC_OVER_VOLTAGE
PFC の出力となる母線電圧値の過電圧レベルとなる電圧値[V]を設定してください。通常、インバータの入力最大電圧を超えない値を設定します。

VDC_UNDER_VOLTAGE
PFC の出力となる母線電圧値の低電圧レベルとなる電圧値[V]を設定してください。

ICHP_OVER_CURRENT
PFC の制御電流の過電流レベルとなる電流値[Apeak]を設定してください。電流はピーク値です。

PFC_VAC_DIP_DETECT_LEVEL
瞬停(電圧ディップ)を検知するレベルを電圧実効値[Vrms]で設定してください。

(6)　検出フィルタ関連

PFC 制御に用いる検出フィルタのパラメータを示します。

表 10-38　r_pfc_cfg.h での PFC 設定パラメータ

マクロ名	設定値	単位	説明
VDC_NOTCH_FILTER_D	0.01	-	ノッチフィルタの深度
VDC_NOTCH_FILTER_ZETA	0.05	-	ノッチフィルタのバンド幅
VAC_LPF_CUT_FREQ	2000.0	Hz	AC 電圧向け LPF のカットオフ周波数
VDC_LPF_CUT_FREQ	800.0	Hz	母線電圧向け LPF のカットオフ周波数
ICHP_LPF_CUT_FREQ	0.0	Hz	PFC 電流向け LPF のカットオフ周波数

VDC_NOTCH_FILTER_D
ノッチフィルタの深度を設定します。深度を[db]に直すと以下の式で表せます。深度を 0.01 に設定すると、-40[db]となります。

$$D[db] = 20\log_{10} VDC_NOTCH_FILTER_D$$

VDC_NOTCH_FILTER_ZETA
ノッチフィルタのバンド幅を設定します。帯域幅 Bw[Hz]/ノッチフィルタの周波数 Fn[Hz]で表される係数となります。ノッチフィルタの周波数が 50Hz で帯域幅を 5Hz とすると、0.05 となります。

$$\xi = \frac{B_w}{2F_n}$$

VAC_LPF_CUT_FREQ
PFC 制御で使用する、入力交流電圧の検出に使用する LPF のカットオフ周波数を設定します。入力の交流電圧の周波数に対して、10 倍以上の十分に高い周波数を設定する必要があります。

VDC_LPF_CUT_FREQ
PFC 制御で使用する、直流母線電圧の検出に使用する LPF のカットオフ周波数を設定します。AVR の制御に用いるものであり、モータ制御で利用する母線電圧検出値には、本 LPF の設定値は使用しません。

ICHP_LPF_CUT_FREQ
PFC 電流検出の LPF のカットオフ周波数を設定します。

11. FSP 設定(RA ファミリ MCU 用)

11.1 FSP の概要

RA ファミリ MCU 向けの本サンプルプログラムのソフトウェアアーキテクチャを図 11-1 に示します。FSP は、ADC や GPT、SCI などの MCU 固有のレジスタ設定や割り込みの管理を行います。ハードウェア抽象化レイヤー(HAL)の機能と、ファイルシステムや通信用プロトコルスタックといった、ミドルウェアの機能を包含したソフトウェアパッケージとなっています。

本サンプルプログラムでは、FSP の代表的な機能のうち、タイマや ADC、GPIO などの MCU の周辺機能におけるレジスタ設定や割り込みを抽象化した機能のみを使用しています。モータ制御ならびに PFC 制御機能は、アプリケーション層に実装しており、ユーザが自由にモータ制御アルゴリズムやシーケンス等のソフトウェアの変更を行える設計となっています。

FSP では、本サンプルプログラムに類似した「モータミドルウェア」が標準で提供されていますが、本サンプルプログラムとの間にソフトウェア内部構造・関数・パラメータ等のインタフェース互換性は有しておりませんのでご注意ください。

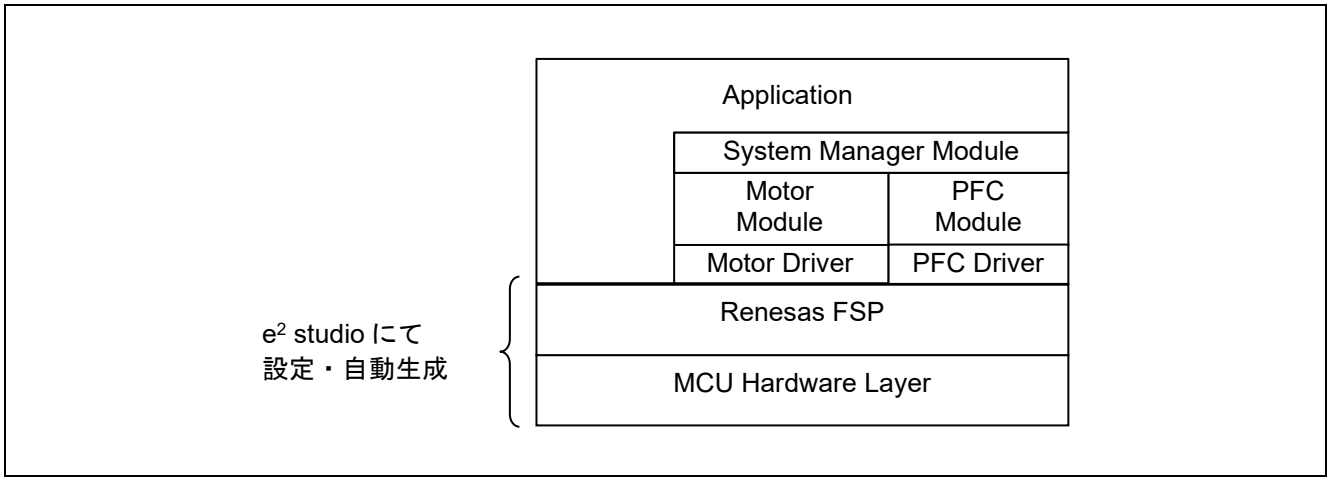


図 11-1　本サンプルプログラムのソフトウェアアーキテクチャ(RA6T2)

11.2 FSP スタック設定

FSP では、周辺機能ごとに機能モジュールを提供しており、「スタック」と呼称しています。本サンプルプログラムで使用する FSP スタックと機能割り当てを表 11-1、表 11-2、表 11-3 に示します。

FSP の Stack Configuration を開いた場合やスタック内部のプロパティを変更した場合、ra_gen フォルダ内の hal_data.c/h 等のファイルが自動生成されます。Generate Project Content を行った場合には、ra フォルダ内の FSP 関連モジュールが自動生成・更新されます。

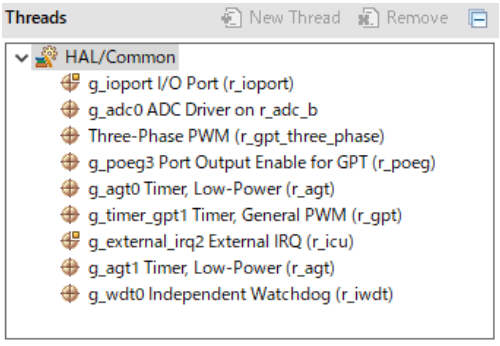


図 11-2　FSP スタックの一覧（RA6T2）

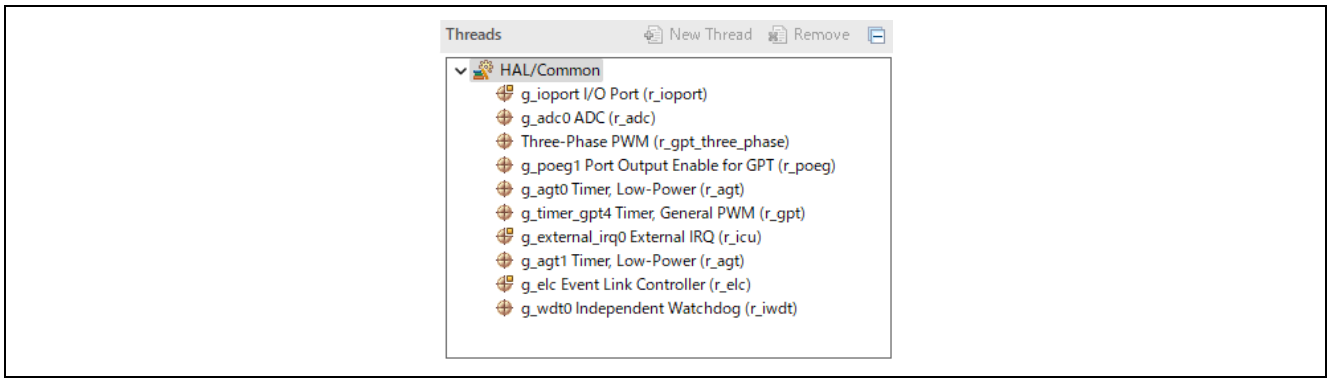


図 11-3　FSP スタックの一覧（RA6T3、RA4T1: 3 シャント）

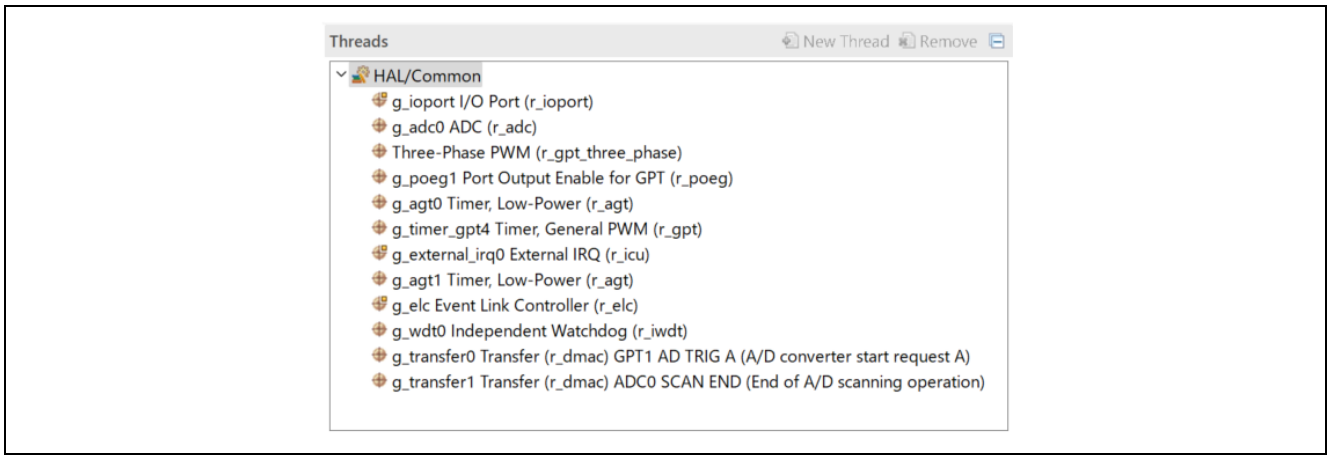


図 11-4　FSP スタックの一覧（RA6T3、RA4T1 :1 シャント）

表 11-1　FSP スタックと機能割り当て（3 シャント & SPFC）（RA6T2）

機能	FSP スタック
3 相 PWM 出力	Three-Phase PWM(r_gpt_three_phase)
モータ用 A/D 変換処理 (U,V,W 相出力電流検出)	g_adc0 ADC Driver on r_adc_b (adc0, sub group0)
PFC 用 A/D 変換処理 (インバータ母線電圧検出,PFC 入力電圧・電流検出)	g_adc0 ADC Driver on r_adc_b (adc0, sub group1)
使用ポートの設定	g_ioport I/O Port (r_ioport)
速度制御割り込みタイマ(0.5ms 周期)	g_agt0 Timer, Low-Power(r_agt)
システムマネージャ用割り込み(1ms 周期)	g_agt1 Timer, Low-Power(r_agt)
PFC 回路 PWM 制御	g_timer_gpt1 Timer, General PWM(r_gpt)
外部割り込み(IRQ2)	g_external_irq2 External IRQ(r_icu)
過電流検出	g_poeg3 Port Output Enable for GPT (r_poeg)
独立ウォッチドッグタイマ	g_wdt0 Independent Watchdog (r_iwdt)

表 11-2　FSP スタックと機能割り当て（1 シャント & IPFC）（RA6T2）

機能	FSP スタック
3 相 PWM 出力	Three-Phase PWM(r_gpt_three_phase)
モータ用 A/D 変換処理 (インバータ母線電流)	g_adc0 ADC Driver on r_adc_b (adc0, sub group0)
PFC 用 A/D 変換処理 (インバータ母線電圧検出,PFC 入力電圧・電流検出)	g_adc0 ADC Driver on r_adc_b (adc0, sub group1)
使用ポートの設定	g_ioport I/O Port (r_ioport)
速度制御割り込みタイマ(0.5ms 周期)	g_agt0 Timer, Low-Power(r_agt)
システムマネージャ用割り込み(1ms 周期)	g_agt1 Timer, Low-Power(r_agt)
PFC 回路 PWM 制御 1	g_timer_gpt1 Timer, General PWM(r_gpt)
PFC 回路 PWM 制御 2	g_timer_gpt0 Timer, Gereral PWM(r_gpt)
PFC 回路 PWM 開始用イベントリンク	g_elc_Event_Link_Controller(r_elc)
外部割り込み(IRQ2)	g_external_irq2 External IRQ(r_icu)
過電流検出	g_poeg3 Port Output Enable for GPT (r_poeg)
独立ウォッチドッグタイマ	g_wdt0 Independent Watchdog (r_iwdt)

表 11-3　FSP スタックと機能割り当て（3 シャント & IPFC）（RA6T3、RA4T1）

機能	FSP スタック
3 相 PWM 出力	Three-Phase PWM(r_gpt_three_phase)
モータ用 A/D 変換処理 (U,V,W 相出力電流検出)	g_adc0 ADC(r_adc) (adc0, Group A)
PFC 用 A/D 変換処理 (インバータ母線電圧検出,PFC 入力電圧・電流検出)	g_adc0 ADC(r_adc) (adc0, Group B)
使用ポートの設定	g_ioport I/O Port (r_ioport)
速度制御割り込みタイマ(0.5ms 周期)	g_agt0 Timer, Low-Power(r_agt)
システムマネージャ用割り込み(1ms 周期)	g_agt1 Timer, Low-Power(r_agt)
PFC 回路 PWM 制御 1/2	g_timer_gpt4 Timer, General PWM(r_gpt)
モータ用 A/D 変換, PFC 用 A/D 変換開始用イベントリンク	g_elc_Event_Link_Controller(r_elc)
外部割り込み(IRQ0)	g_external_irq0 External IRQ(r_icu)
過電流検出	g_poeg1 Port Output Enable for GPT (r_poeg)
独立ウォッチドッグタイマ	g_wdt0 Independent Watchdog (r_iwdt)

表 11-4　FSP スタックと機能割り当て（1 シャント & IPFC）（RA6T3、RA4T1）

機能	FSP スタック
3 相 PWM 出力	Three-Phase PWM(r_gpt_three_phase)
モータ用 A/D 変換処理 (U,V,W 相出力電流検出)	g_adc0 ADC(r_adc) (adc0, Group A)

PFC 用 A/D 変換処理 (インバータ母線電圧検出,PFC 入力電圧・電流検出)	g_adc0 ADC(r_adc) (adc0, Group B)
使用ポートの設定	g_ioport I/O Port (r_ioport)
速度制御割り込みタイマ(0.5ms 周期)	g_agt0 Timer, Low-Power(r_agt)
システムマネージャ用割り込み(1ms 周期)	g_agt1 Timer, Low-Power(r_agt)
PFC 回路 PWM 制御 1/2	g_timer_gpt4 Timer, General PWM(r_gpt)
モータ用 A/D 変換, PFC 用 A/D 変換開始用イベントリンク	g_elc_Event_Link_Controller(r_elc)
外部割り込み(IRQ0)	g_external_irq0 External IRQ(r_icu)
過電流検出	g_poeg1 Port Output Enable for GPT (r_poeg)
独立ウォッチドッグタイマ	g_wdt0 Independent Watchdog (r_iwdt)
AD 変換タイミング転送	g_transfer0 Transfer(r_dmac)
AD 変換結果転送	g_transfer1 Transfer(r_dmac)

上記は、3 シャント&SPFC および 1 シャント&IPFC について示していますが、その他の組み合わせについてもあることに注意ください。

11.3 コールバック・割り込み

FSP では、割り込み処理として呼ばれる関数をコールバック関数として定義します。割り込み一覧を表 11-5, 表 11-6 に示します。

ここに示したコールバック関数は、src/application/mcu/XXX/r_app_mcu_callback.c に実体が置かれています。'XXX'は、RA MCU 毎に異なります。例えば、RA6T2 のプロジェクトの場合は、ra6t2 になります。

表 11-5　割り込み一覧（3 シャント）

FSP スタック	コールバック関数			説明
	RA6T2	RA6T3	RA4T1	
g_adc0	callback_gpt_adc_cyclic()			PFC 制御周期(32kHz)とモータ用電流制御周期(8kHz)が混在。コールバック関数内でマスクして分離を行っています。
poeg	callback_poe_overcurrent()			POEG のコールバック関数内では、必ず R_POEG_Reset() をコールしてフラグをリセットしてください。割り込み優先度によっては、その他の処理が停止する場合があります。
agt0	callback_agt_motor_speed_cyclic()			-
agt1	callback_agt_system_manager_cyclic()			-
irq2	callback_irq2_pfc_error()	-	-	-
irq0	-	callback_irq0_pfc_error()	callback_irq0_pfc_error()	-

表 11-6　割り込み一覧（1 シャント）

FSP スタック	コールバック関数	説明
g_adc0	callback_gpt_adc_cyclic()	PFC 制御周期 (RA6T2 及び RA6T3 :32kHz) (RA4T1 :25kHz)
g_timer_gpt4	callback_gpt_motor_current_cyclic	モータ電流制御周期 (8kHz) キャリア山割り込み
poeg	callback_poe_overcurrent()	POEG のコールバック関数内では、必ず R_POEG_Reset() をコールしてフラグをリセットしてください。割り込み優先度によっては、その他の処理が停止する場合があります。
agt0	callback_agt_motor_speed_cyclic()	-
agt1	callback_agt_system_manager_cyclic()	-
irq2	callback_irq2_pfc_error()	-

上記は、モータの 3 シャント及び 1 シャントについて示していますが、SPFC 及び IPFC の違いでは割り込み一覧に差分はありません。

11.4 端子設定

端子のインタフェース情報を表 11-7, 表 11-8, 表 11-9 に示します。

表 11-7　端子インタフェース（3 シャント&SPFC）（RA6T2）

機　能	端子名	周辺機能	機能割付	備考
LED1	PD01	GPIO	-	CPU ボード上の LED をユーザが利用可能です。
LED2	PD02	GPIO	-	
LED3	PD03	GPIO	-	
U 相電流検出	PA04	S12AD	AN004	-
V 相電流検出	PA02	S12AD	AN002	-
W 相電流検出	PA00	S12AD	AN000	-
AC 入力電圧検出	PB01	S12AD	AN009	-
リアクトル電流検出	PC05	S12AD	AN011	-
インバータ母線電圧検出	PA07	S12AD	AN007	-
温度異常検出	PD07	GPIO	-	Low で異常
PFC 過電流検出	P001	IRQ	IRQ2	立下りエッジで異常
PFC PWM 出力 1	PB14	GPT	GTIOC1A	-
インバータ HW 過電流検出	PC13	POEG	GTETRGD	Low で異常
PWM 出力（U_p）	PB04	GPT	GTIOC4A	Active High
PWM 出力（U_n）	PB05	GPT	GTIOC4B	Active High
PWM 出力（V_p）	PB06	GPT	GTIOC5A	Active High
PWM 出力（Vn）	PB07	GPT	GTIOC5B	Active High
PWM 出力（W_p）	PB08	GPT	GTIOC6A	Active High
PWM 出力（W_n）	PB09	GPT	GTIOC6B	Active High
突入電流防止リレー制御	PE01	GPIO	-	-

表 11-8　端子インタフェース（1 シャント&IPFC）（RA6T2）

機　能	端子名	周辺機能	機能割付	備考
LED1	PD01	GPIO	-	CPU ボード上の LED をユーザが利用可能です。
LED2	PD02	GPIO	-	
LED3	PD03	GPIO	-	
インバータ母線電流検出	PA04	S12AD	AN004	
PFC 用・AC 入力電圧検出	PB01	S12AD	AN009	
PFC 用・リアクトル電流検出	PC05	S12AD	AN011	
PFC・モータ制御用・インバータ母線電圧検出	PA07	S12AD	AN007	
温度異常検出	PD07	GPIO	-	Low で異常
PFC 過電流検出	P001	IRQ	IRQ2	立下りエッジで異常
PFC PWM 出力	PB14	GPT	GTIOC1A	
PFC PWM 出力	PB12	GPT	GTIOC0A	
インバータ HW 過電流検出	PC13	POEG	GTETRGD	Low で異常
PWM 出力（U_p）	PB04	GPT	GTIOC4A	Active High
PWM 出力（U_n）	PB05	GPT	GTIOC4B	Active High
PWM 出力（V_p）	PB06	GPT	GTIOC5A	Active High
PWM 出力（Vn）	PB07	GPT	GTIOC5B	Active High
PWM 出力（W_p）	PB08	GPT	GTIOC6A	Active High
PWM 出力（W_n）	PB09	GPT	GTIOC6B	Active High

突入電流防止リレー制御	PE01	GPIO	-	

表 11-9　端子インタフェース（3 シャント&IPFC）（RA6T3、RA4T1）

機　能	端子名	周辺機能	機能割付	備考
LED1	P113	GPIO	-	CPU ボード上の LED をユーザが利用可能です。
LED2	P106	GPIO	-	
U 相電流検出	P000	S12AD	AN000	-
V 相電流検出	P001	S12AD	AN001	-
W 相電流検出	P002	S12AD	AN002	-
PFC 用・AC 入力電圧検出	P013	S12AD	AN011	-
PFC 用・リアクトル電流検出	P014	S12AD	AN012	-
PFC・モータ制御用・インバータ母線電圧検出	P004	S12AD	AN004	-
温度異常検出	P200	GPIO	-	Low で異常
PFC 過電流検出	P400	IRQ	IRQ0	立下りエッジで異常
PFC PWM 出力 1	P302	GPT	GTIOC4A	-
PFC PWM 出力 2	P301	GPT	GTIOC4B	
インバータ HW 過電流検出	P104	POEG	GTETRGB	Low で異常
PWM 出力（U_p）	P409	GPT	GTIOC1A	Active High
PWM 出力（U_n）	P408	GPT	GTIOC1B	Active High
PWM 出力（V_p）	P103	GPT	GTIOC2A	Active High
PWM 出力（Vn）	P102	GPT	GTIOC2B	Active High
PWM 出力（W_p）	P111	GPT	GTIOC3A	Active High
PWM 出力（W_n）	P112	GPT	GTIOC3B	Active High
突入電流防止リレー制御	P407	GPIO	-	-

上記は、3 シャント&SPFC および 1 シャント&IPFC について示していますが、その他の組み合わせについてもあることに注意ください。

11.5 PFC 用 GPT 設定

PFC 制御用に、GPT を設定しています。主な設定を以下に示します。PWM キャリア周波数は 32kHz(31.25us 制御周期)で動作するように設定しています。

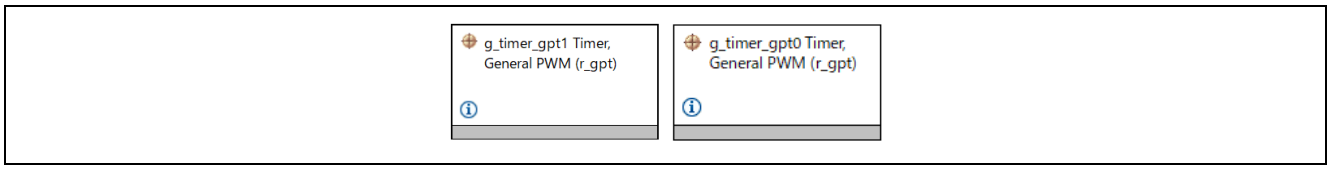


図 11-5　PFC 用 GPT のスタック（RA6T2）

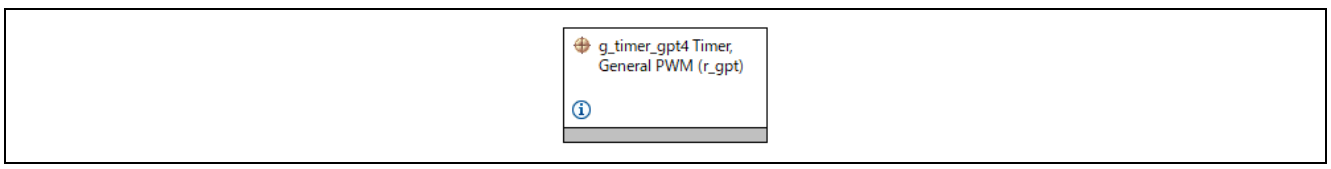


図 11-6　PFC 用 GPT のスタック（RA6T3、RA4T1）

表 11-10　PFC PWM1 用 GPT 設定（RA6T2）

機能および設定項目			設定（SPFC）	設定（IPFC）
General	Name		g_timer_gpt1	
	Channel		1	
	Mode		Triangle-wave PWM (symmetric, Mode1)	
	Period		31250	
	Period Unit		Nanoseconds	
Output	Custom Waveform		Enabled	
	Custom Waveform / GTIOA	Initial Output Level	Pin Level High	
		Cycle End Output Level	Pin Level Retain	
		Compare Match Output Level	Pin Level Toggle	
		Retain Output Level at Count Stop	Disabled	
	Custom Waveform / GTIOB	Initial Output Level	Pin Level Low	
		Cycle End Output Level	Pin Level Retain	
		Compare Match Output Level	Pin Level Toggle	
		Retain Output Level at Count Stop	Disabled	
	Duty Cycle Percent (only applicable in PWM mode)		50	
	GTIOCA Output Enabled		False	
	GTIOCA Stop Level		Pin Level Low	
	GTIOCB Output Enabled		False	
	GTIOCB Stop Level		Pin Level Low	
Input			未使用	
Interrupts			未使用	
Extra Features	Output Disable		未使用	
	ADC Trigger/ Start Event Trigger		Trigger Event A/D Converter Start Request A During Down Counting	
	Dead Time		未使用	
	ADC Trigger (Channels with GTADTRA only)		ADC A Compare Match(Raw Counts)=0	
	ADC Trigger (Channels with GTADTRB only)		ADC B Compare Match(Raw Counts)=0	
	Interrupt Skipping (Channels with GTITC only)		未使用	
	Extra Features		Enabled	
Pins	GTIOC1A		PB14	
	GTIOC1B		None	

表 11-11　PFC PWM2 用 GPT 設定（RA6T2）

機能および設定項目			設定（IPFC）
General	Name		g_timer_gpt0
	Channel		0
	Mode		Triangle-wave PWM (asymmetric, Mode2)
	Period		31250
	Period Unit		Nanoseconds
Output	Custom Waveform		Enabled
		Initial Output Level	Pin Level High

	Custom Waveform / GTIOA	Cycle End Output Level	Pin Level Retain
		Compare Match Output Level	Pin Level Toggle
		Retain Output Level at Count Stop	Disabled
	Custom Waveform / GTIOB	Initial Output Level	Pin Level Low
		Cycle End Output Level	Pin Level Retain
		Compare Match Output Level	Pin Level Toggle
		Retain Output Level at Count Stop	Disabled
	Duty Cycle Percent (only applicable in PWM mode)		50
	GTIOCA Output Enabled		False
	GTIOCA Stop Level		Pin Level Low
	GTIOCB Output Enabled		False
	GTIOCB Stop Level		Pin Level Low
Input	Start Source		GPT1 COUNTER OVERFLOW (Overflow)
Interrupts			未使用
Extra Features			未使用
Pins	GTIOC0A		PB12
	GTIOC0B		None

表 11-12　PFC PWM1/2 用 GPT 設定（RA6T3、RA4T1）

機能および設定項目			設定（IPFC）	
			RA6T3	RA4T1
General	Name		g_timer_gpt4	
	Channel		4	
	Mode		Triangle-wave PWM (symmetric, Mode1)	
	Period		31250	40000
	Period Unit		Nanoseconds	
Output	Custom Waveform		Enabled	
	Custom Waveform / GTIOA	Initial Output Level	Pin Level High	
		Cycle End Output Level	Pin Level Retain	
		Compare Match Output Level	Pin Level Toggle	
		Retain Output Level at Count Stop	Disabled	
	Custom Waveform / GTIOB	Initial Output Level	Pin Level Low	
		Cycle End Output Level	Pin Level Retain	
		Compare Match Output Level	Pin Level Toggle	
		Retain Output Level at Count Stop	Disabled	
	Duty Cycle Percent (only applicable in PWM mode)		50	
	GTIOCA Output Enabled		False	
	GTIOCA Stop Level		Pin Level Low	
	GTIOCB Output Enabled		False	
	GTIOCB Stop Level		Pin Level Low	

Input		未使用
Interrupts		未使用
Extra Features	Output Disable	未使用
	ADC Trigger/ Start Event Trigger	Trigger Event A/D Converter Start Request A During Down Counting
	ADC Trigger (Channels with GTADTRA only)	ADC A Compare Match(Raw Counts)=0
	ADC Trigger (Channels with GTADTRB only)	ADC B Compare Match(Raw Counts)=0
	Dead Time	未使用
	Interrupt Skipping (Channels with GTITC only)/ Interrupt to Count	Trough(triangle)
	Interrupt Skipping (Channels with GTITC only)/ Interrupt Skip Count	1
	Interrupt Skipping (Channels with GTITC only)/ Skip ADC Events	ADC B Compare Match
	Extra Features	Enabled
Pins	GTIOC1A	P302
	GTIOC1B	P301

11.6 3 相 PWM GPT 設定

モータ制御に使用します。

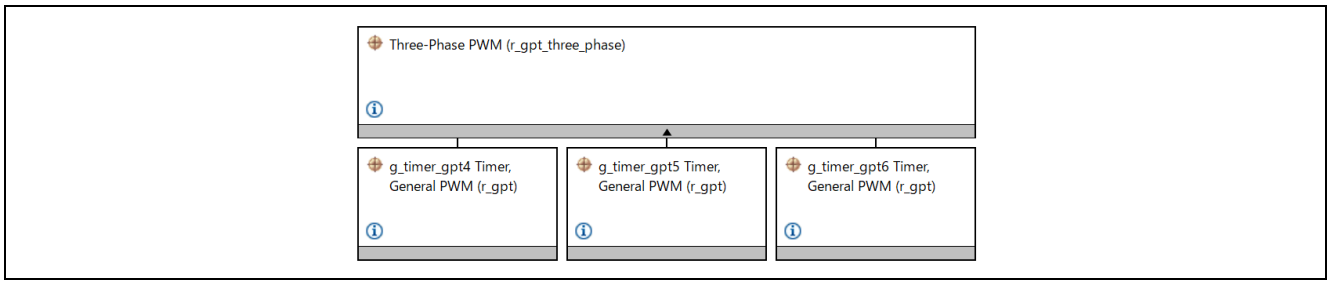


図 11-7　3 相 PWM GPT スタックの関係（RA6T2）

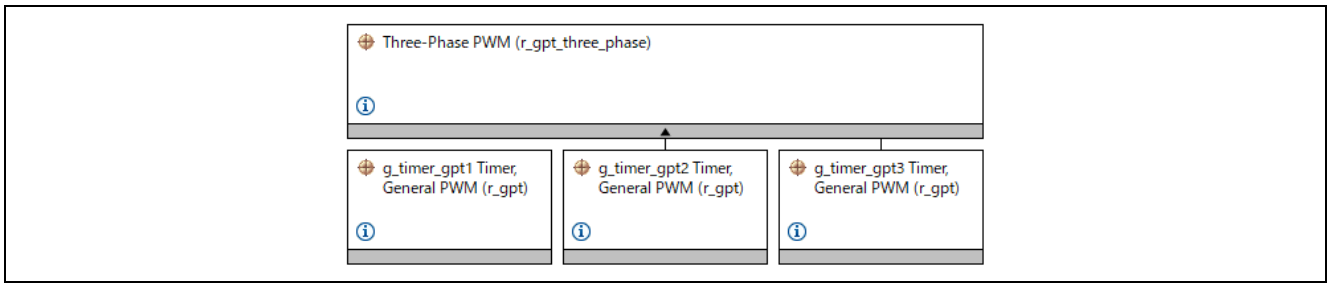


図 11-8　3 相 PWM GPT スタックの関係（RA6T3、RA4T1）

表 11-13　Three-Phase PWM 設定（RA6T2）

機能および設定項目	設定（3 シャント）	設定（1 シャント）

General	Name		g_three_phase0	
	Mode	-	Triangle-Wave Symmetric PWM	Triangle-Wave Asymmetric PWM (Mode3)
	Period	-	125	
	Period Unit	-	Microseconds	
	GPT U-Channel	-	4	
	GPT V-Channel	-	5	
	GPT W-Channel	-	6	
	Callback Channel	-	U-Channel	
	Buffer Mode	-	Single Buffer	Double Buffer
	GTIOCA Stop Level	-	Pin Level Low	
	GTIOCB Stop Level	-	Pin Level High	
Extra Features	DeadTime	Dead Time Count Up (Raw Counts)	240	
		Dead Time Count Down (Raw Counts)	240	

表 11-14　U 相 GPT 設定（RA6T2）

機能および設定項目			設定（3 シャント）	設定（1 シャント）
Module g_timer _gpt4 timer	General	Name	g_timer_gpt4	
	Interrupts	callback	-	call_back_motor_current_cyclic
		Overflow/Crest Interrupt Priority	-	5
	Extra Features	ADC Trigger	Start Event Trigger ・Request A During Down Counting	Start Event Trigger ・Request A During Up Counting ・Request B During Up Counting
			ADC A Compare Match : 0	ADC A Compare Match : 1000, ADC B Compare Match : 2000
Pins		GTIOC4A	PB04	
		GTIOC4B	PB05	

表 11-15　V 相 GPT 設定（RA6T2）

機能および設定項目			設定
Module g_timer_gpt5 timer	General	Name	g_timer_gpt5
	その他項目は、Three-Phase PWM 設定から自動設定されるため省略		
Pins		GTIOC5A	PB06
		GTIOC5B	PB07

表 11-16　W 相 GPT 設定（RA6T2）

機能および設定項目			設定
Module g_timer_gpt6 timer	General	Name	g_timer_gpt6
	その他項目は、Three-Phase PWM 設定から自動設定されるため省略		
Pins		GTIOC6A	PB08
		GTIOC6B	PB09

表 11-17　Three-Phase PWM 設定（RA6T3、RA4T1）

機能および設定項目			設定
General	Name		g_three_phase0
	Mode	-	Triangle-Wave Symmetric PWM
	Period	-	125
	Period Unit	-	Microseconds
	GPT U-Channel	-	1
	GPT V-Channel	-	2
	GPT W-Channel	-	3
	Callback Channel	-	U-Channel
	Buffer Mode	-	Single Buffer
	GTIOCA Stop Level	-	Pin Level Low
	GTIOCB Stop Level	-	Pin Level High
Extra Features	DeadTime	Dead Time Count Up (Raw Counts)	200
		Dead Time Count Down (Raw Counts)	200

表 11-18　U 相 GPT 設定（RA6T3、RA4T1）

機能および設定項目			設定
Module g_timer_gpt1 timer	General	Name	g_timer_gpt1
	Extra Features	ADC Trigger / Start Event Trigger	Request A During Down Counting
Pins		GTIOC1A	P409
		GTIOC1B	P408

表 11-19　V 相 GPT 設定（RA6T3、RA4T1）

機能および設定項目			設定
Module g_timer_gpt2 timer	General	Name	g_timer_gpt2
	その他項目は、Three-Phase PWM 設定から自動設定されるため省略		
Pins		GTIOC2A	P103
		GTIOC2B	P102

表 11-20　W 相 GPT 設定（RA6T3、RA4T1）

機能および設定項目			設定
Module g_timer_gpt3 timer	General	Name	g_timer_gpt3
	その他項目は、Three-Phase PWM 設定から自動設定されるため省略		
Pins		GTIOC3A	P111
		GTIOC3B	P112

11.7 AGT0 設定(速度制御周期設定)

0.5ms 周期の速度制御周期は、AGT を用いて割り込み周期を設定します。以下に AGT の設定例を示します。

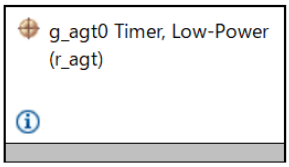


図 11-9　AGT0 のスタック

表 11-21　AGT0(速度制御周期)の設定

機能および設定項目		設定		
		RA6T2	RA6T3	RA4T1
General	Name	g_agt0		
	Counter Bit Width	AGT 32-bit	AGTW 32-bit	AGTW 32-bit
	Channel	0		
	Mode	Periodic		
	Period	500	500	500
	Period Unit	Microseconds	Microseconds	Microseconds
	Count Source	PCLKB		
Output	Duty Cycle Percent	50		
	AGTOA Output	Disabled		
	AGTOB Output	Disabled		
	AGTO Output	Disabled		
Input	Measurement Mode	Measure Disabled		
	Input Filter	No Filter		
	Enable Pin	Enable Pin Not Used		
	Trigger Edge	Trigger Edge Rising		
Interrupts	Callback	callback_agt_motor_speed_cyclic		
	Underflow Interrupt Priority	Priority 9		
Pins	AGTEE0	<unavailable>		
	AGTIO0	<unavailable>		
	AGTO0	<unavailable>		
	AGTOA0	<unavailable>		
	AGTOB0	<unavailable>		

11.8 AGT1 設定(システムマネージャ制御周期設定)

1ms 周期のシステムマネージャの制御周期を設定します。

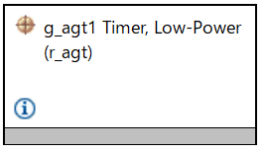


図 11-10　AGT1 のスタック

表 11-22　AGT1(システムマネージャ制御周期)の設定

機能および設定項目		設定		
		RA6T2	RA6T3	RA4T1
General	Name	g_agt1		
	Counter Bit Width	AGT 32-bit	AGTW 32-bit	AGTW 32-bit
	Channel	1		
	Mode	Periodic		
	Period	1	1	1
	Period Unit	Milliseconds	Milliseconds	Milliseconds
	Count Source	PCLKB		
Output	Duty Cycle Percent	50		
	AGTOA Output	Disabled		
	AGTOB Output	Disabled		
	AGTO Output	Disabled		
Input	Measurement Mode	Measure Disabled		
	Input Filter	No Filter		
	Enable Pin	Enable Pin Not Used		
	Trigger Edge	Trigger Edge Rising		
Interrupts	Callback	callback_agt_system_manager_cyclic		
	Underflow Interrupt Priority	Priority 10		
Pins	AGTEE1	<unavailable>		
	AGTIO1	<unavailable>		
	AGTO1	<unavailable>		
	AGTOA1	<unavailable>		
	AGTOB1	<unavailable>		

11.9 ADC 設定

MCU 内蔵の 12bit AD コンバータを用いて、U・V・W 相出力電流（3 シャント検出時）とインバータ母線電流（1 シャント検出時）、PFC 電流、入力 AC 電圧、インバータ母線電圧を測定します。割り当てチャンネルと、検出タイミングを、表 11-23 に示します。

MCU の起動直後に行われる ADC の初期設定では、必ずキャリブレーション完了待ちの処理を行います。キャリブレーションが完了せずに、ADC のスキャンを開始すると ADC 検出値が不正な値となり、動作に支障をきたす場合があります。キャリブレーション完了には、おおよそ数 ms 程度の時間がかかります。

3 シャント電流検出方式ではモータ電流を検出するために GPT のキャリア用カウンタの谷の条件(ダウンカウント条件で 0 に到達でコンペアマッチし、トリガを発生)で電流を取得するように設定しています。また、AD 検出開始から変換終了までを行った後、AD 変換終了割り込みを発生させます。PFC でも同様に 32kHz の周期で PFC 電流検出・AC 電圧検出・母線電圧検出を行い、AD 変換終了割り込みを発生させます。コールバック関数は共通としているため、コールバック関数内でマスクを確認し、PFC 制御周期かモータ電流制御周期かを判別し、処理を分離しています。一方で、1 シャント電流検出方式ではインバータ母線電流を検出するために、GPT のキャリア用カウンタと ADC トリガとのコンペアマッチにより、AD 変換を行っています。

表 11-23 ADC のチャンネルと検出タイミング設定（RA ファミリ MCU）

機　能	割当チャンネル(ADC0 使用)			変換開始トリガ
	RA6T2	RA6T3	RA4T1	
インバータ母線電圧検出	7	4	4	ダウンカウントで 0 に到達時
PFC 電流検出	11	12	12	
入力 AC 電圧検出	9	11	11	
U 相電流検出	4	0	0	
V 相電流検出	2	1	1	
W 相電流検出	0	2	2	
インバータ母線電流検出	4	0	0	GPT のキャリア用カウンタと ADC トリガとのコンペアマッチ

RA6T2 は ADC0 に周辺機能 ADC_B を使用します。そのほかの RA ファミリ MCU（RA6T3 および RA4T1）は ADC12 を使用します。

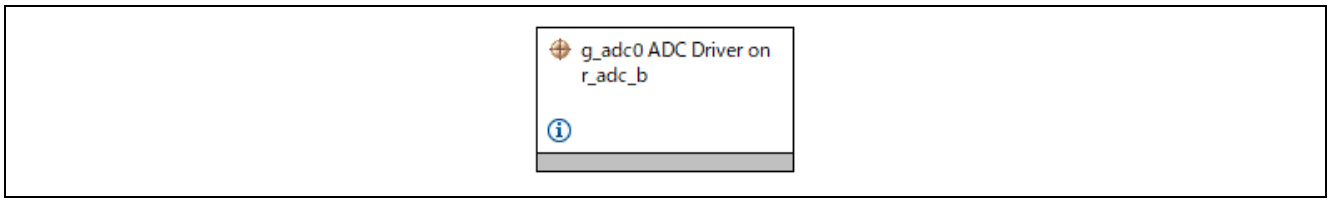


図 11-11　ADC のスタック（RA6T2）

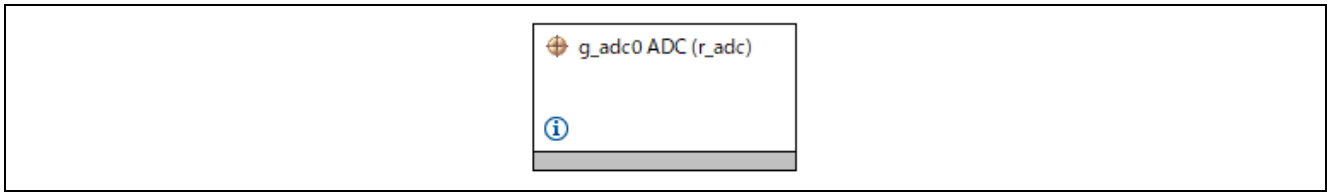


図 11-12　ADC のスタック（RA6T3、RA4T1）

表 11-24　ADC の設定（RA6T2）

機能および設定項目			設定（3 シャント）	設定（1 シャント）
General	Operation/ADC0	Conversion Method	SAR Mode	
		Scan Mode	Single Scan	
	Operation/ADC1	Conversion Method	SAR Mode	
		Scan Mode	Single Scan	
	ADC Successive Approximation Time	ADC0	6	
		ADC1	6	
	Synchronous Operation	Enable for ADC 0	Disable	
		Enable for ADC 1	Disable	
		Synchronous Operation Period Cycle	100	
	Calibration / A/D Calibration	Sampling Time	10	
		Conversion Time	6	
	Calibration / Sample and Hold Calibration	Sampling Time	25	
		Hold Time	3	
	Sampling State Table	Entry 0	10	60
		Entry 1	4	
		Entry 2	24	
		Entry 3~15	95	
	Name		g_adc0	
Clock Configuration	Divider		Div /1	
	Source		PCLKC	
Interrupts	Limiter Clip Priority		全て Disabled	
	Conversion Error Priority		全て Disabled	
	Overflow Priority		全て Disabled	
	Calibration End Priority		Priority 12	
	Scan End Priority	Group 0	Priority 5	Disable
		Group 1	Priority 3	
		Group 2~8	Disabled	
	FIFO Priorities		全て Disabled	
	Callback		callback_gpt_adc_cyclic	
Digital Filter			未使用(デフォルト)	
Sample and Hold	Enable Unit	Unit 0	☑	☐
		Unit 1	☑	☐
		Unit 2	☑	☐
		Unit 4-6	☐	☐
	Analog Channels 0-5	Sampling Time	60	
		Hold Time	3	
	Analog Channels 6-11	Sampling Time	95	
		Hold Time	5	
Programmable Gain Amplifier			未使用(デフォルト)	

User Offset Table			未使用(デフォルト)	
User Gain Table			未使用(デフォルト)	
Limiter Clipping			未使用(デフォルト)	
Virtual Channels	Virtual Channel 0	Scan Group	**Scan Group 0**	**None**
		Channel Select	**AN000**	
		Sampling State Table ID	Sampling State Entry 0	
		Channel Gain Table	Disabled	
		Channel Offset Table	Disabled	
		Add/Average Mode	Disabled	
		Add/Average Count	1-time conversion (Normal Conversion)	
		Limit Clip Table ID	Disabled	
		Conversion Data Format Select	12-bit Data Format	
		Digital Filter Selection	Disabled	
	Virtual Channel 1	Scan Group	**Scan Group 0**	**None**
		Channel Select	**AN002**	
		Sampling State Table ID	Sampling State Entry 0	
		Channel Gain Table	Disabled	
		Channel Offset Table	Disabled	
		Add/Average Mode	Disabled	
		Add/Average Count	1-time conversion (Normal Conversion)	
		Limit Clip Table ID	Disabled	
		Conversion Data Format Select	12-bit Data Format	
		Digital Filter Selection	Disabled	
	Virtual Channel 2	Scan Group	**Scan Group 0**	
		Channel Select	**AN004**	
		Sampling State Table ID	Sampling State Entry 0	
		Channel Gain Table	Disabled	
		Channel Offset Table	Disabled	
		Add/Average Mode	Disabled	
		Add/Average Count	1-time conversion (Normal Conversion)	
		Limit Clip Table ID	Disabled	
		Conversion Data Format Select	12-bit Data Format	
		Digital Filter Selection	Disabled	
	Virtual Channel 3	Scan Group	**Scan Group 1**	
		Channel Select	**AN011**	
		Sampling State Table ID	Sampling State Entry 2	
		Channel Gain Table	Disabled	
		Channel Offset Table	Disabled	
		Add/Average Mode	Disabled	
		Add/Average Count	1-time conversion (Normal Conversion)	
		Limit Clip Table Id	Disabled	

		Conversion Data Format Select		12-bit Data Format
		Digital Filter Selection		Disabled
	Virtual Channel 4	Scan Group		**Scan Group 1**
		Channel Select		**AN009**
		Sampling State Table ID		Sampling State Entry 2
		Channel Gain Table		Disabled
		Channel Offset Table		Disabled
		Add/Average Mode		Disabled
		Add/Average Count		1-time conversion (Normal Conversion)
		Limit Clip Table ID		Disabled
		Conversion Data Format Select		12-bit Data Format
		Digital Filter Selection		Disabled
	Virtual Channel 5	Scan Group		**Scan Group 1**
		Channel Select		**AN007**
		Sampling State Table ID		Sampling State Entry 1
		Channel Gain Table		Disabled
		Channel Offset Table		Disabled
		Add/Average Mode		Disabled
		Add/Average Count		1-time conversion (Normal Conversion)
		Limit Clip Table ID		Disabled
		Conversion Data Format Select		12-bit Data Format
		Digital Filter Selection		Disabled
	Virtual Channel 6~36			未使用
Scan Groups	Scan Group 0	Self Diagnosis	Voltage Selection	Self-Diagnosis Mode Disabled
		External Trigger Enable	External Trigger Input 0 (ADTRG0) Enable	☐
		External Trigger Enable	External Trigger Input 1 (ADTRG1) Enable	☐
		ELC Trigger Enable		未使用
		GPT Trigger Enable	GPT Channel 0 Request A	☐
		GPT Trigger Enable	GPT Channel 1 Request A	☐
		GPT Trigger Enable	GPT Channel 2 Request A	☐
		GPT Trigger Enable	GPT Channel 3 Request A	☐
		GPT Trigger Enable	GPT Channel 4 Request A	☑
		GPT Trigger Enable	GPT Channel 4 Request B	☐ / ☑
		GPT Trigger Enable	GPT Channel 5~9 Request A/B	未使用

		Enable		Enable	
		Converter Selection		ADC 0	
		Start Trigger Delay		0	
		Scan End Interrupt Enable		Enable	Disable
		Limit Clip Interrupt Enable		Disable	
		FIFO Enable		Disable	Enable
		FIFO Interrupt Enable		Disable	
		FIFO Interrupt Generation Level		0	
	Scan Group 1	Self Diagnosis	Voltage Selection	Self-Diagnosis Mode Disabled	
		External Trigger Enable	External Trigger Input 0 (ADTRG0) Enable	☐	
		External Trigger Enable	External Trigger Input 1 (ADTRG1) Enable	☐	
		ELC Trigger Enable		未使用	
		GPT Trigger Enable	GPT Channel 0 Request A	☐	
		GPT Trigger Enable	GPT Channel 1 Request A	☑	
		GPT Trigger Enable	GPT Channel 2 Request A	☐	
		GPT Trigger Enable	GPT Channel 3 Request A	☐	
		GPT Trigger Enable	GPT Channel 4 Request A	☐	
		GPT Trigger Enable	GPT Channel 5~9 Request A/B	未使用	
		Enable		Enable	
		Converter Selection		**ADC 1**	
		Start Trigger Delay		0	
		Scan End Interrupt Enable		Enable	
		Limit Clip Interrupt Enable		Disable	
		FIFO Enable		Disable	
		FIFO Interrupt Enable		Disable	
		FIFO Interrupt Generation Level		0	
	Scan Group 2~8			未使用	

表 11-25　ADC の設定（RA6T3、RA4T1）

機能および設定項目			設定（3 シャント）	設定（1 シャント）
General	Name		g_adc0	
	Unit		0	
	Resolution		12-Bit	
	Alignment		Right	

	Clear after read		Off	
	Mode		Group Scan	
	Double-trigger		Disable	
Input	Channel Scan Mask(channel availability varies by MCU)	Channel 0	☑	
		Channel 1	☑	☐
		Channel 2	☑	☐
		上記以外の Channel	☐	
	Group B Scan Mask(channel availability varies by MCU)	Channel 4	☑	
		Channel 11	☑	
		Channel 12	☑	
		上記以外の Channel	☐	
	Addition/Averaging Mask		未使用	
	Sample and Hold	Channel 0	☑	
		Channel 1	☑	
		Channel 2	☑	
		Sample Hold States	24	60
	Window Compare		未使用	
	Add/Average Count		Disabled	
	Reference Voltage Control		VREFH0/VREFH	
Interrupts	Normal/Group A Trigger		GPT1 COUNTER UNDERFLOW(Underflow)	
	Group B Trigger		GPT4 COUNTER UNDERFLOW(Underflow)	
	Group Priority(Valid only in Group Scan Mode)		Group A can interrupt Group B ; Group B scan restarts immediatey	
	Callback		callback_gpt_adc_cyclic	
	Scan End Interrupt Priority		Priority 5	Priority 1
	Scan End Group B Interrupt Priority		Priority 3	
	Window Compare A Interrupt Priority		Disabled	
	Window Compare B Interrupt Priority		Disabled	
Extra	ADC Ring Buffer		Disabled	
Pins	ADTRG0		<unavailable>	
	AN000		P000	
	AN001		P001	
	AN002		P002	
	AN004		P004	
	AN005		None	
	AN006		None	
	AN007		None	
	AN008		None	
	AN011		P013	
	AN012		P014	
	AN013		None	
	AN016		None	

	PGAVSS000		None

11.10 PFC 過電流用 IRQ 設定

MCI-HV-1 の回路には、ハードウェアで PFC の過電流を検出する機能が含まれており、異常条件を満たすと Active low の信号を発生させます。本サンプルプログラムでは、外部割り込み機能(IRQ)を使用して、Active low 信号をトリガに PFC 過電流の異常として検出し、RA6T2 の場合は、コールバック関数 callback_irq2_pfc_error()を、RA6T3 や RA4T1 の場合は、コールバック関数 callback_irq0_pfc_error()を実行させます。

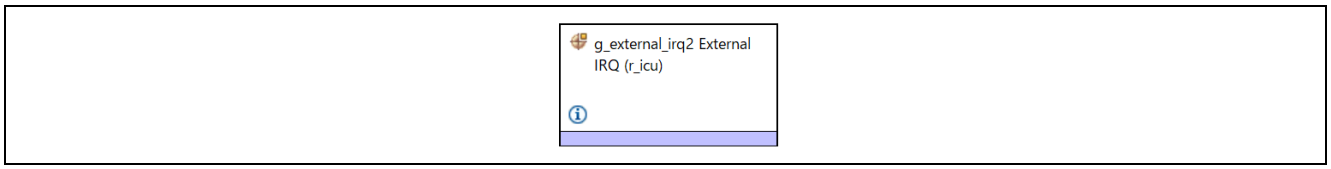


図 11-13　IRQ のスタック（RA6T2）

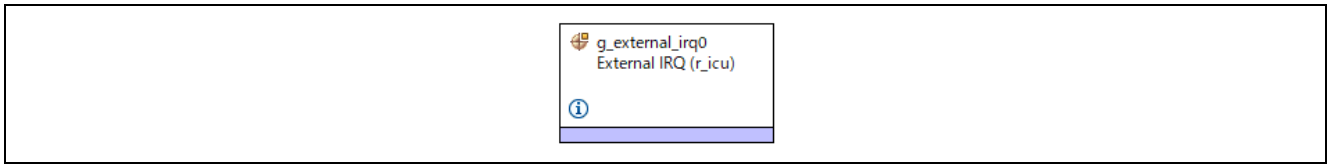


図 11-14　IRQ のスタック（RA6T3、RA4T1）

表 11-26　IRQ(PFC 過電流・外部割り込み)の設定（RA ファミリ MCU）

機能および設定項目		設定		
		RA6T2	RA6T3	RA4T1
	Name	g_external_irq2	g_external_irq0	g_external_irq0
	Channel	2	0	0
	Trigger	Falling		
	Digital Filtering	Enabled		
	Digital Filtering Sample Clock	PCLK / 64		
	Callback	callback_irq2_pfc_error	callback_irq0_pfc_error	callback_irq0_pfc_error
	Pin Interrupt Priority	Priority 0(highest)		

11.11 POEG 設定

POEG は、モータ制御用インバータの回路で異常が発生した場合に、制御中の PWM ゲート信号を速やかに High-Z に切り替える MCU の機能です。POEG の FSP スタックで設定が可能な、POEG 設定を表 11-27 に示します。出力ピン設定は、インバータ仕様によって異なりますので、ご使用のインバータの信号仕様を確認ください。

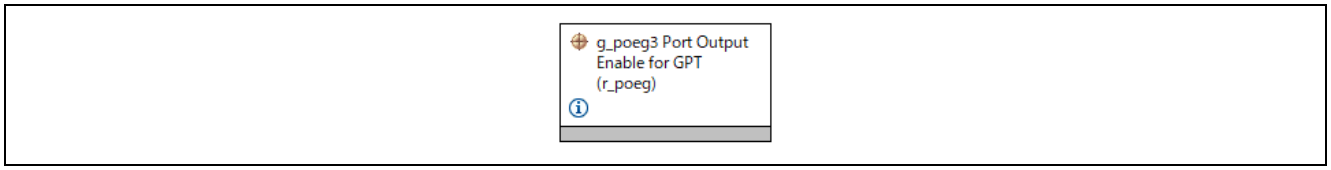


図 11-15　POEG のスタック（RA6T2）

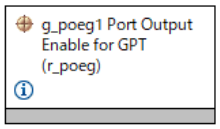


図 11-16　POEG のスタック（RA6T3、RA4T1）

表 11-27　POEG 設定（RA ファミリ MCU）

機能および設定項目			設定		
			RA6T2	RA6T3	RA4T1
General	Trigger	GTETRG Pin	☑		
		GPT Output Level	☐		
		Oscillation Stop	☐		
		ACMPHS0	☐		
		ACMPHS1	☐		
		ACMPHS2	☐		
		ACMPHS3	☐		
	Name		g_poeg3	g_poeg1	g_poeg1
	Channel		3	1	1
Input	GTETRG Polarity		Active Low		
	GTETRG Noise Filter		PCLKB / 32		
Interrupts	Callback		callback_poe_overcurrent		
	Interrupt Priority		Priority 0(highest)		

11.12 ELC 設定

ELC は、RA6T2 では、インターリーブ PFC で使用する PFC PWM2 用タイマのスタートタイミングを、PFC PWM1 用タイマの山に合わせるために使用します。RA6T3 や RA4T1 では、モータ制御で使用する U・V・W 相出力電流の測定を U 相 PWM 用タイマの谷に合わせるために、また、PFC 制御で使用する PFC 電流、入力 AC 電圧、インバータ母線電圧の測定を PFC PWM1 用タイマの谷に合わせるために使用します。

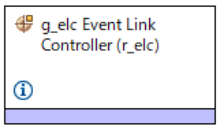


図 11-17　ELC のスタック

表 11-28　ELC 設定

機能および設定項目			設定
Module	Name		g_elc

表 11-29　ELC 設定（Event Links タブ）

Event Links Configuration / Allocations	
Peripheral Function	Event
GPT (A)	RA6T2: GPT1 COUNTER OVERFLOW (Overflow)

ADC12A0	RA6T3, RA4T1: GPT1 COUNTER UNDERFLOW (Underflow)
ADC12B0	RA6T3, RA4T1: GPT4 COUNTER UNDERFLOW (Underflow)
その他	No allocation

11.13 IWDT 設定

IWDT は 14 ビットのダウンカウンタで、システム暴走時に MCU をリセットすることができます。API を使用するために IWDT のスタックは追加しますが、設定自体は BSP タブから行います。



図 11-18　IWDT のスタック

表 11-30　IWDT 設定

機能および設定項目			設定
Module	Name		g_wdt0

表 11-31　IWDT 設定（BSP タブ）

機能および設定項目			設定
RA6T2 : RA6T2 Family RA6T3 : RA6T3 Device Option RA4T1 : RA4T1 Device Option	OFS0 register settings / Indepenedet WDT	Start Mode	IWDT is automatically activated after a reset (Autostart mode)
		Timeout Period	2048 cycles
		Dedicated Clock Frequency Divisor	1
		Window End Position	0% (no window end position)
		Window Start Position	100% (no window start position)
		Reset Interrupt Request Select	Reset is enabled
		Stop Control	Stop counting when in Sleep, Snooze mode, or Software Standby

11.14 DMAC 設定 0

GPT モジュールのコンペアマッチ機能を利用した A/D 変換開始要求ポイントの変更を、DMAC によって実現しています。A/D 変換開始要求の発生をトリガとして、次回の A/D 変換開始要求ポイントを設定するデータを、DMAC により指定メモリから GTADTRA レジスタへ転送します。

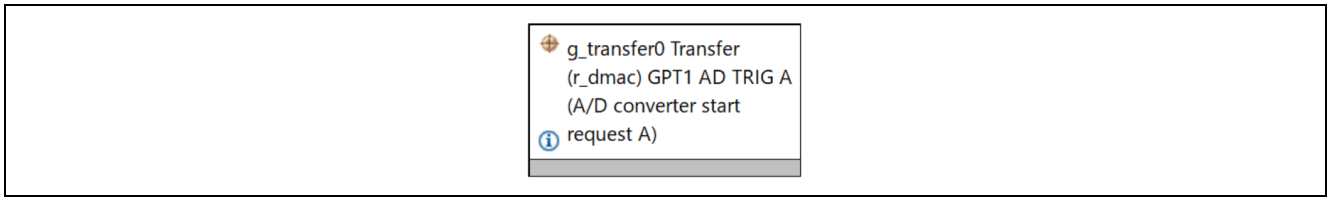


図 11-19　DMAC 設定 0 のスタック

表 11-32 DMAC 設定 0 設定

機能および設定項目			設定
Module	Name		g_transfer0

表 11-33 DMAC 設定 0 設定

機能および設定項目		設定
Common	Parameter Checking	Default (BSP)
Module: g_transfer0 Transfer (r_dmac) GPT1 AD	Name	g_transfer0
	Channel	0
	Mode	Normal
	Transfer Size	4 Bytes
	Destination Address Mode	Fixed
	Source Address Mode	Fixed
	Repeat Area (Unused in Normal Mode)	Destination
	Number of Transfers	1
	Number of Blocks (Valid only in Repeat/Block Mode)	0
	Activation Source	GPT1 AD TRIG A (A/D converter start request A)
	Callback	NULL
	Transfer End Interrupt Priority	Disabled
	Interrupt Frequency	Interrupt after all transfers have completed
	Offset Value (Valid only when address mode is Offset)	1
	Source Buffer Size	1

11.15 DMAC 設定 1

A/D 変換完了をトリガとして、A/D 変換結果を DMAC により指定メモリに転送します。

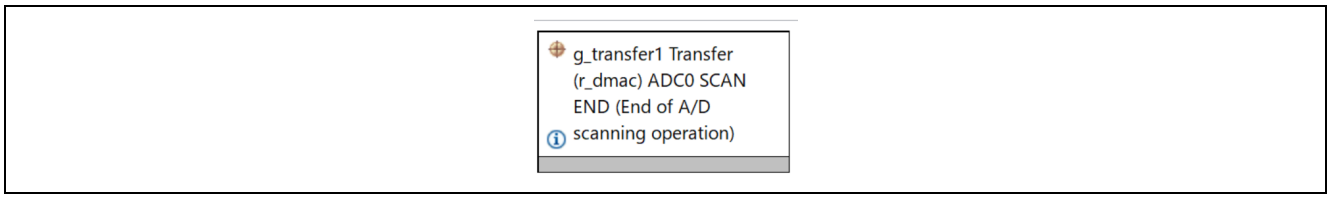


図 11-20　DMAC 設定 1 のスタック

表 11-34　DMAC 設定 1 設定

機能および設定項目			設定
Module	Name		g_transfer1

表 11-35　DMAC 設定 1 設定

機能および設定項目		設定
Common	Parameter Checking	Default (BSP)
Module: g_transfer1 Transfer (r_dmac) ADC0 SCAN END	Name	g_transfer1
	Channel	1
	Mode	Repeat
	Transfer Size	2 Bytes
	Destination Address Mode	Incremented
	Source Address Mode	Fixed
	Repeat Area (Unused in Normal Mode)	Destination
	Number of Transfers	2
	Number of Blocks (Valid only in Repeat/Block Mode)	0
	Activation Source	ADC0 SCAN END (End of A/D scanning operation)
	Callback	NULL
	Transfer End Interrupt Priority	Disabled
	Interrupt Frequency	Interrupt after all transfers have completed
	Offset Value (Valid only when address mode is Offset)	1
	Source Buffer Size	1

12. Smart Configurator 設定(RX26T 用)

12.1 SC の概要

RX26T 用のサンプルプログラムでは、HAL にスマート・コンフィグレータを使用してプロジェクトを作成しています。使用しているコンポーネントとユーザ領域に追加した関数を説明します。RA ファミリでは FSP を HAL に使用します。

RA ファミリ用と RX26T 用の差異は HAL および MCU が異なるのみであり、アプリケーション層は一部の中継モジュールを除き共通化されています。

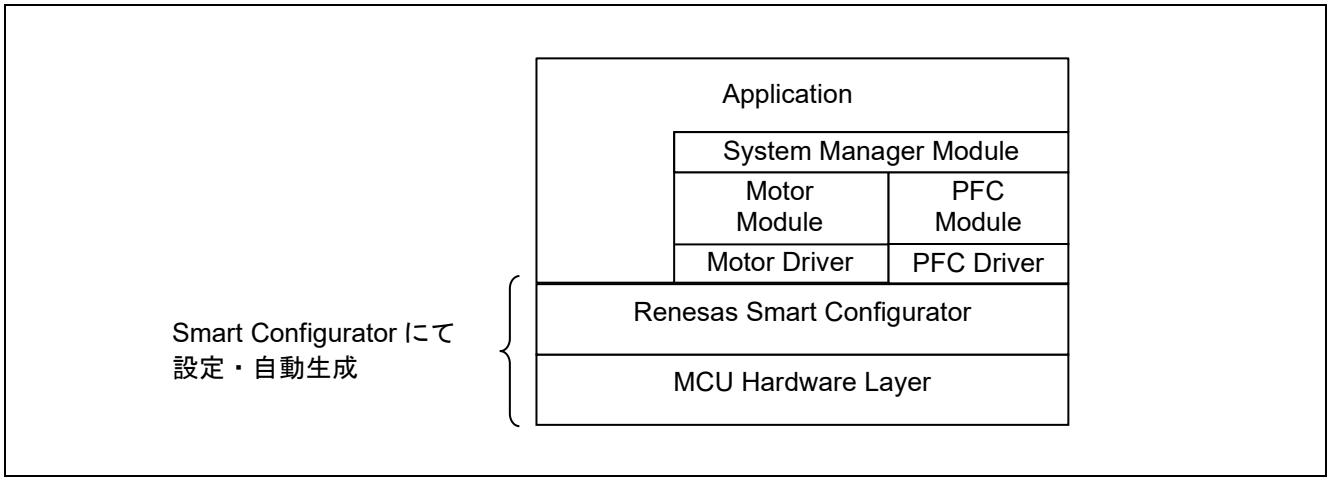


図 12-1　本サンプルプログラムのソフトウェアアーキテクチャ（RX26T）

12.2 クロック設定

クロック設定を表 12-1 に示します。

表 12-1　MCU クロック設定

クロックの種類	設定クロック
メインクロック	10MHz
システムクロック (ICLK)	120MHz
周辺モジュールクロック (PCLKA)	120MHz
周辺モジュールクロック (PCLKB)	60MHz
周辺モジュールクロック (PCLKC)	120MHz
周辺モジュールクロック (PCLKD)	60MHz
FlashIF クロック (FCLK)	60MHz
IWDTCLK	120kHz

12.3 コンポーネント設定

使用するコンポーネント情報と機能割り当てを表 12-2 に示します。

表 12-2　スマート・コンフィグレータのコンポーネントと機能割り当て

機能	コンポーネント	
	RAM64KB 版	RAM48KB 版
W 相 PWM 出力	Config_GPT0	Config_GPT2
V 相 PWM 出力	Config_GPT1	Config_GPT1
U 相 PWM 出力	Config_GPT2	Config_GPT0
PFC PWM 出力 1	Config_GPT3	
PFC PWM 出力 2 (IPFC)	Config_GPT7	
A/D 変換処理 (U,V,W 相出力電流)	Config_S12AD0	
A/D 変換処理 (インバータ母線電圧検出,PFC 入力電圧・電流検出)	Config_S12AD2	Config_S12AD0
使用ポートの設定	Config_PORT	
速度制御割り込みタイマ	Config_CMT0	
システム制御割り込みタイマ	Config_CMT1	
独立ウォッチドッグタイマ	Config_IWDT	
インバータ HW 過電流検出	Config_POEG	
PFC HW 過電流検出	Config_ICU	
PFC PWM 出力開始用イベントリンク (IPFC)	Config_ELC	

12.4 AD 設定

MCU 内蔵の 12bit AD コンバータ(S12AD)を用いて、U 相出力電流と、V 相出力電流、W 相出力電流、インバータ母線電圧、リアクトル電流、AC 入力電圧とインバータ母線電流を測定します。割り当てチャンネルと、検出タイミングを表 12-3 に示します。

表 12-3　AD のチャンネルと検出タイミング設定（RX26T）

機　能	チャンネル		変換開始トリガ
	RAM64KB 版	RAM48KB 版	
U 相電流検出 (3 シャント)	AN000		GPT0 の GTCNT と GTADTRA とのコンペアマッチ GTADTRA = 0 と設定することにより、キャリアの谷で AD 変換を開始する（8kHz）
V 相電流検出 (3 シャント)	AN001		
W 相電流検出 (3 シャント)	AN002		
インバータ母線電圧検出	AN003		GPT3 の GTCNT と GTADTRA とのコンペアマッチ GTADTRA = 0 と設定することにより、キャリアの谷で AD 変換を開始する（32kHz）
リアクトル電流検出	AN200	AN005	GPT3 の GTCNT と GTADTRA とのコンペアマッチ GTADTRA = 0 と設定することにより、キャリアの谷で AD 変換を開始する（32kHz）
AC 入力電圧検出	AN201	AN004	
インバータ母線電流検出 (1 シャント)	AN000		GPT0 の GTCNT と GTADTRA、GTADTRB とのコンペアマッチ（アップカウント中）

12.5 CMT 設定

本サンプルプログラムでは、コンペアマッチタイマ(CMT)を使って、速度制御周期割込とシステム制御割り込みを発生させています。

表 12-4　コンペアマッチタイマの設定

コンポーネント	設定	設定内容
Config_CMT0	クロック設定	PCLK/8
	インターバル時間	500us
	コンペアマッチ割り込みを許可 (CMI0)	☑
	優先順位	レベル 6
Config_CMT1	クロック設定	PCLK/8
	インターバル時間	1ms
	コンペアマッチ割り込みを許可 (CMI1)	☑
	優先順位	レベル 5

12.6 GPT 設定

本サンプルプログラムでは、GPT を用いて PWM を出力します。

表 12-5　Motor（GPT0, GPT1, GPT2）の設定

設定項目		設定値（3 シャント）	設定値（1 シャント）
カウント設定	クロックソース	120 MHz	
	タイマ動作周期	125 us	
	周期レジスタ値	7500	
	バッファ動作	シングルバッファ	
	カウント方向	アップカウント	
	カウンタ初期値	0	
GTCCRA	GTCCRA 機能	コンペアマッチ	
	バッファ動作	シングルバッファ	ダブルバッファ
	GTIOC0A 機能	PWM 出力端子	
	GTIOC0A 出力デューティ	コンペアマッチによって決定	
	GTIOC0A 端子ネゲート制御	Hi-Z	
	開始/停止時の出力レベル	開始時 0 出力 停止時 0 出力	
	コンペアマッチ時の出力レベル	トグル出力	
	周期の終わりの出力レベル	出力保持	
GTCCRB	GTCCRB 機能	コンペアマッチ	
	バッファ動作	シングルバッファ	ダブルバッファ
	GTIOC0B 機能	PWM 出力端子	
	GTIOC0B 出力デューティ	コンペアマッチによって決定	
	GTIOC0B 端子ネゲート制御	Hi-Z	
	開始/停止時の出力レベル	開始時 1 出力 停止時 1 出力	
	コンペアマッチ時の出力レベル	トグル出力	
	周期の終わりの出力レベル	出力保持	
GTCCRC 機能		GTCCRA バッファレジスタ	
GTCCRD 機能		コンペアマッチ	GTCCRA ダブルバッファレジスタ
GTCCRE 機能		GTCCRB バッファレジスタ	
GTCCRF 機能		コンペアマッチ	GTCCRB ダブルバッファレジスタ
ソフトウェア要因カウントスタート		☑	
ソフトウェア要因カウントストップ		☑	
デッドタイム自動設定	自動設定	☑	
	GTDVU 値	240	
	GTDVD = GTDVU	☑	
A/D 変換開始要求設定	GTADTRA（GPT0 のみ）	アップカウント中	
	GTADTRA コンペアマッチ値	1	1000

	GTATDRB （GPT0 のみ）	-	アップカウント中
	GTADTRB コンペアマッチ値	-	2000
出力停止グループ	グループ選択	B	
割り込み設定	GTCNT オーバフロー （GPT0 のみ）	-	レベル 10

表 12-6　PFC（GPT3, GPT7）の設定

設定項目		設定値（GPT3）	設定値（GPT7）
カウント設定	クロックソース	120 MHz	
	タイマ動作周期	31.25 us	
	周期レジスタ値	1875	
	バッファ動作	-	
	カウント方向	アップカウント	
	カウンタ初期値	0	
GTCCRA	GTCCRA 機能	コンペアマッチ	
	バッファ動作	シングルバッファ	ダブルバッファ
	GTIOC3A 機能	PWM 出力端子	
	GTIOC3A 出力デューティ	コンペアマッチによって決定	
	GTIOC3A 端子 ネゲート制御	Hi-Z	
	開始/停止時の 出力レベル	開始時 1 出力 停止時 0 出力	
	コンペアマッチ時の 出力レベル	トグル出力	
	周期の終わりの 出力レベル	出力保持	
GTCCRB	GTCCRB 機能	コンペアマッチ	
	バッファ動作	-	
	GTIOC3B 機能	禁止	
GTCCRC 機能		GTCCRA バッファレジスタ	
GTCCRD 機能		コンペアマッチ	GTCCRA ダブルバッファレジスタ
GTCCRE 機能		コンペアマッチ	
GTCCRF 機能		コンペアマッチ	
ソフトウェア要因カウントスタート		☑	☐
ソフトウェア要因カウントストップ		☑	
デッドタイム自動設定	自動設定	☐	
	GTDVU 値	-	
	GTDVD = GTDVU	-	
A/D 変換開始要求設定	GTADTRA	ダウンカウント中	-
	GTADTRA コンペアマッチ値	1	-
	GTATDRB	-	
	GTADTRB コンペアマッチ値	-	

出力停止グループ	グループ選択	B
割り込み設定	GTCNT オーバフロー（GPT0 のみ）	-

12.7 POEG 設定

Config_POEG で設定が可能な、POEG 設定を表 12-7 に示します。出力ピン設定は、インバータ仕様によって異なりますので、ご使用のインバータの信号仕様を確認ください。

表 12-7　POEG 設定（RX26T）

機　能		設定
GTETRGB 設定	入力反転	☑
	ノイズフィルタ	☑ PCLK_GPTB クロックごとにサンプリング サンプリング回数：3 回
	検出モード	エッジ検出
	GTETRGB 端子からの出力停止要求	☑
割り込み設定	POEGGBI 割り込みを許可	レベル 15

12.8 ICU 設定

Config_ICU で設定が可能な、IRQ 設定を表 12-8 に示します。

表 12-8　IRQ 設定

機　能		設定
IRQ 設定	RAM64KB 版 : IRQ1 RAM48KB 版 : IRQ5	☑
	検出タイプ	立ち下がりエッジ
	デジタルフィルタ	PCLK/64
	優先順位	レベル 15（最高）

12.9 ELC 設定

Config_ELC で設定が可能な、ELC 設定を表 12-9 に示します。

表 12-9　ELC 設定（RX26T）

ソース			送信先		
設定	リソース	イベント	設定	リソース	動作
Config_GPT3	GPT3	GPT3・オーバーフロー	Config_GPT7	GPT イベント要因 A	クリアカウンタまたはインプットキャプチャ

12.10 IWDT 設定

Config_IWDT で設定が可能な、IWDT 設定を表 12-10 に示します。

表 12-10　IWDT 設定（RX26T）

機　能		設定
スタートモード設定	-	レジスタスタートモード
IWDTCLK クロック設定	クロック分周比選択	IWDTCLK
	周波数	120 kHz
	タイムアウトサイクル	1024 サイクル
	タイムアウト期間	8.533333 ms
ウィンドウ位置設定	開始位置	100 %
	終了位置	0 %
スリープモードカウント停止制御設定	-	許可
リセット割り込み要求設定	-	リセット出力

12.11 割り込み設定

モータコンポーネントを使用した MCU の割り込み情報を表 12-11 に示します。

表 12-11　割り込み一覧（RX26T）

コンポーネント	割り込み関数		説明
	RAM64KB 版	RAM48KB 版	
Config_POEG	r_Config_POEG_poeggbi_interrupt		インバータ HW 過電流割り込み 割り込みレベル：15
Config_ICU	r_Config_ICU_irq1_interrupt	r_Config_ICU_irq5_interrupt	PFC HW 過電流割り込み 割り込みレベル：15
Config_S12AD2	r_Config_S12AD2_interrupt	-	PFC AD 変換終了割り込み 割り込みレベル：12
Config_S12AD	-	r_Config_S12AD0_groupb_interrupt	
Config_S12AD （3 シャント）	r_Config_S12AD0_interrupt		モータ AD 変換終了割り込み 割り込みレベル：10
Config_GPT0	r_Config_GPT0_gtiv0_interrupt		キャリア山割り込み 割り込みレベル：10
Config_CMT0	r_Config_CMT0_cmi0_interrupt		速度制御割り込み 割り込みレベル：6
Config_CMT1	r_Config_CMT1_cmi0_interrupt		システム制御割り込み 割り込みレベル：5

12.12 端子設定

端子のインタフェース情報を表 12-12～表 12-14 示します。

表 12-12　端子インタフェース（3 シャント＆SPFC）（RX26T RAM64KB 版）

機　能	端子名	周辺機能	機能割付	備考
LED1	P21	PORT	-	CPU ボード上の LED をユーザが利用可能です。
LED2	P20	PORT	-	

U 相電流検出	P40	S12AD	AN000	-
V 相電流検出	P41	S12AD	AN001	-
W 相電流検出	P42	S12AD	AN002	-
AC 入力電圧検出	P53	S12AD2	AN201	-
リアクトル電流検出	P52	S12AD2	AN200	-
インバータ母線電圧検出	P43	S12AD	AN003	-
温度異常検出	P22	PORT	-	Low で異常
PFC HW 過電流検出	PA5	ICU	IRQ1	立下りエッジで異常
PFC PWM 出力 1	PD1	GPT3	GTIOC3A	
インバータ HW 過電流検出	P70	POEG	GTETRGB	立下りエッジで異常
PWM 出力（U_p）	P73	GPT2	GTIOC2A	Active High
PWM 出力（U_n）	P76	GPT2	GTIOC2B	Active High
PWM 出力（V_p）	P72	GPT1	GTIOC1A	Active High
PWM 出力（V_n）	P75	GPT1	GTIOC1B	Active High
PWM 出力（W_p）	P71	GPT0	GTIOC0A	Active High
PWM 出力（W_n）	P74	GPT0	GTIOC0B	Active High
突入電流防止リレー制御	PA3	PORT	-	-

表 12-13　端子インタフェース（1 シャント＆IPFC）（RX26T RAM64KB 版）

機　能	端子名	周辺機能	機能割付	備考
LED1	P21	PORT	-	CPU ボード上の LED をユーザが利用可能です。
LED2	P20	PORT	-	
インバータ母線電流検出	P40	S12AD	AN000	-
AC 入力電圧検出	P53	S12AD2	AN201	-
リアクトル電流検出	P52	S12AD2	AN200	-
インバータ母線電圧検出	P43	S12AD	AN003	-
温度異常検出	P22	PORT	-	Low で異常
PFC HW 過電流検出	PA5	ICU	IRQ1	立下りエッジで異常
PFC PWM 出力 1	PD1	GPT3	GTIOC3A	
PFC PWM 出力 2	PB2	GPT7	GTIOC7A	
インバータ HW 過電流検出	P70	POEG	GTETRGB	立下りエッジで異常
PWM 出力（U_p）	P73	GPT2	GTIOC2A	Active High
PWM 出力（U_n）	P76	GPT2	GTIOC2B	Active High
PWM 出力（V_p）	P72	GPT1	GTIOC1A	Active High
PWM 出力（Vn）	P75	GPT1	GTIOC1B	Active High
PWM 出力（W_p）	P71	GPT0	GTIOC0A	Active High

PWM 出力（W_n）	P74	GPT0	GTIOC0B	Active High
突入電流防止リレー制御	PA3	PORT	-	-

表 12-14　端子インタフェース（3 シャント&IPFC）（RX26T RAM48KB 版）

機　能	端子名	周辺機能	機能割付	備考
LED1	P65	PORT	-	CPU ボード上の LED をユーザが利用可能です。
LED2	PB5	PORT	-	
U 相電流検出	P40	S12AD	AN000	-
V 相電流検出	P41	S12AD	AN001	-
W 相電流検出	P42	S12AD	AN002	-
AC 入力電圧検出	P44	S12AD	AN004	-
リアクトル電流検出	P45	S12AD	AN005	-
インバータ母線電圧検出	P43	S12AD	AN003	-
温度異常検出	P20	PORT	-	Low で異常
PFC HW 過電流検出	P70	ICU	IRQ5	立下りエッジで異常
PFC PWM 出力 1	PB6	GPT3	GTIOC3A	
PFC PWM 出力 2	PB2	GPT7	GTIOC7A	
インバータ HW 過電流検出	P96	POEG	GTETRGB	立下りエッジで異常
PWM 出力（U_p）	P71	GPT0	GTIOC0A	Active High
PWM 出力（U_n）	P74	GPT0	GTIOC0B	Active High
PWM 出力（V_p）	P72	GPT1	GTIOC1A	Active High
PWM 出力（V_n）	P75	GPT1	GTIOC1B	Active High
PWM 出力（W_p）	P73	GPT2	GTIOC2A	Active High
PWM 出力（W_n）	P76	GPT2	GTIOC2B	Active High
突入電流防止リレー制御	P90	PORT	-	-

表 12-15　端子インタフェース（1 シャント&IPFC）（RX26T RAM48KB 版）

機　能	端子名	周辺機能	機能割付	備考
LED1	P65	PORT	-	CPU ボード上の LED をユーザが利用可能です。
LED2	PB5	PORT	-	
インバータ母線電流検出	P40	S12AD	AN000	-
AC 入力電圧検出	P44	S12AD	AN004	-
リアクトル電流検出	P45	S12AD	AN005	-
インバータ母線電圧検出	P43	S12AD	AN003	-
温度異常検出	P20	PORT	-	Low で異常
PFC HW 過電流検出	P70	ICU	IRQ5	立下りエッジで異常
PFC PWM 出力 1	PB6	GPT3	GTIOC3A	

PFC PWM 出力 2	PB2	GPT7	GTIOC7A	
インバータ HW 過電流検出	P96	POEG	GTETRGB	立下りエッジで異常
PWM 出力（U_p）	P71	GPT0	GTIOC0A	Active High
PWM 出力（U_n）	P74	GPT0	GTIOC0B	Active High
PWM 出力（V_p）	P72	GPT1	GTIOC1A	Active High
PWM 出力（V_n）	P75	GPT1	GTIOC1B	Active High
PWM 出力（W_p）	P73	GPT2	GTIOC2A	Active High
PWM 出力（W_n）	P76	GPT2	GTIOC2B	Active High
突入電流防止リレー制御	P90	PORT	-	-

上記は、3 シャント&SPFC および 1 シャント&IPFC について示していますが、その他の組み合わせについてもあることに注意ください。

13. 評価結果

13.1 PFC 制御評価

13.1.1 入力電圧及び入力電流波形

PFC は入力電流の位相を調整し、力率改善を行う機能です。図 13-1 は負荷印加時の入力電圧と入力電流の位相が一致しており、力率が改善されていることを示しています。

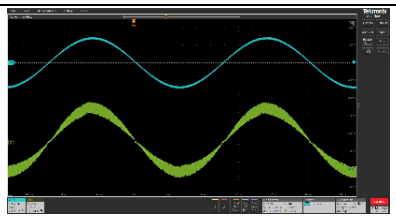
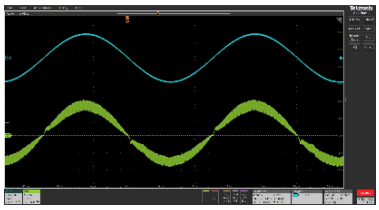
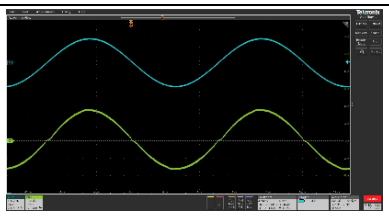
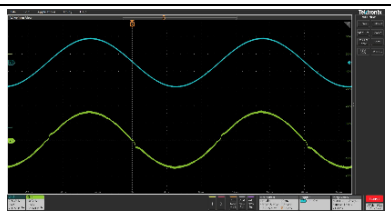
SPFC	 AC100V/50Hz (0.5kW)	 AC200V/50Hz (1.0kW)
IPFC	 AC100V/50Hz (1.0kW)	 AC200V/50Hz (2.0kW)

図 13-1　入力電圧及び入力電流波形

13.1.2 インターリーブ PFC におけるリアクトル電流波形

インターリーブ PFC では、リアクトル電流 IL1 と IL2 の位相差が 180 度となるように制御しています。図 13-2 はリアクトル電流波形 IL1 と IL2 が位相差 180 度となっていることを示しています。

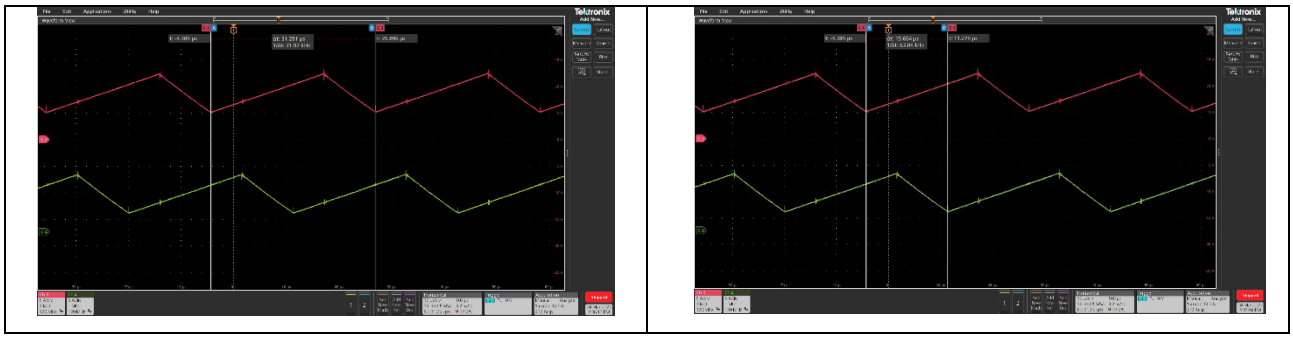


図 13-2　リアクトル電流の位相差
（左：スイッチング周波数, 右：リアクトル電流の位相差）

13.1.3 PFC の効率及び力率

PFC における効率と力率の測定値を表 13-1 に示します。インターリーブ PFC においては 100%負荷を 2.0kW、シングルフェーズ PFC においては 100%負荷を 1.0kW としています。

表 13-1　PFC の力率および効率

	入力電圧	負荷	効率	力率
インターリーブ PFC	200 Vac	25%負荷	96.3 %	0.921

		50%負荷	96.5 %	0.979
		75%負荷	96.7 %	0.995
		100%負荷	96.7 %	0.998
	100 Vac	25%負荷	93.3 %	0.988
		50%負荷	94.4 %	0.998
		75%負荷	93.9 %	0.999
		100%負荷	93.9%	0.999
シングルフェーズ PFC	200 Vac	25%負荷	95.6 %	0.861
		50%負荷	96.4 %	0.942
		75%負荷	96.8 %	0.973
		100%負荷	96.4 %	0.984
	100 Vac	25%負荷	92.2 %	0.917
		50%負荷	93.5 %	0.967
		75%負荷	93.8 %	0.984
		100%負荷	94.1 %	0.99

13.2 モータ制御評価

13.2.1 始動から閉ループ速度制御への移行

誘起電圧オブザーバによる磁極位置の推定を行うセンサレスベクトル制御では、正常な推定が可能になる十分な大きさの誘起電圧を発生させる速度域まで速度を加速させる必要があります。そのため、d 軸とモータの U 相の軸合わせを行った後、オープンループ制御で設定速度まで加速を行います。設定速度に到達後は、閉ループ速度制御（PI 制御）に移行し、高トルク・高効率な駆動が可能になります。図 13-3 はオープンループ制御によって 600r/min まで加速を行い、誘起電圧オブザーバを用いたセンサレスベクトル制御に移行する様子を示しています。

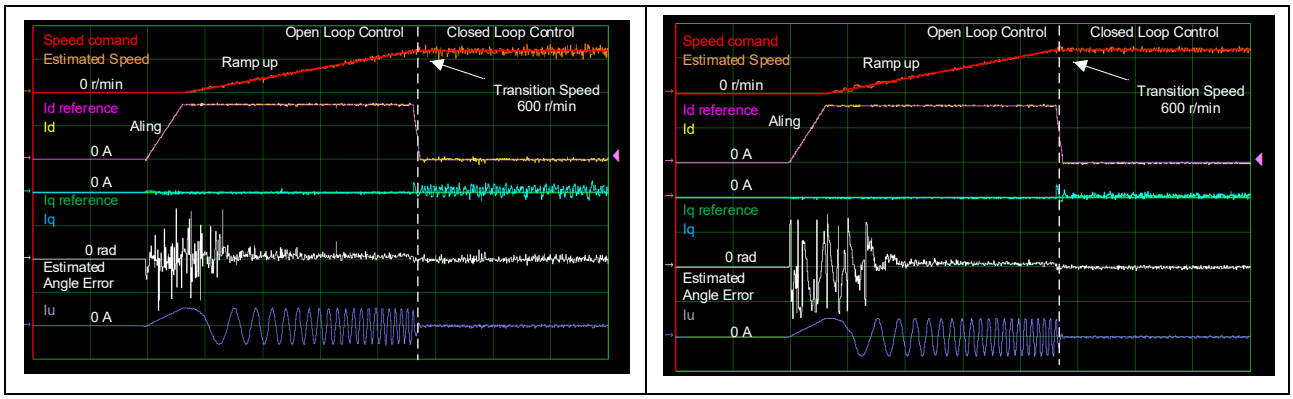


図 13-3　始動から閉ループ速度制御へ移行時の波形
（左：1shunt 電流検出方式, 右：3shunt 電流検出方式）

13.2.2 負荷運転

センサレスベクトル制御（閉ループ速度制御）において、負荷運転が行えることを確認しています。図 13-4 には、600r/min（閉ループ速度制御への遷移速度）、3000r/min（定格速度）、4000r/min（最高速度）における負荷運転の定常状態を示しています。ただし、4000r/min は定格出力に合うように定格トルク 75%を加えています。

	600 r/min (150 W)	3000 r/min (750 W)	4000 r/min (750 W)

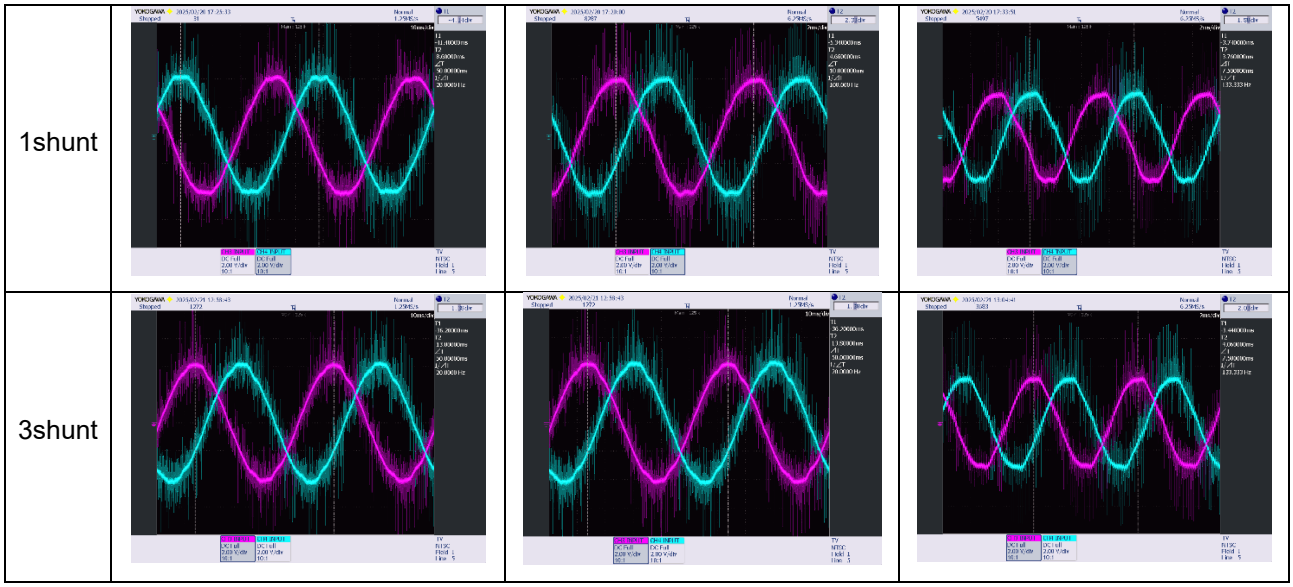


図 13-4　負荷運転時の出力電流波形

13.2.3 フライングスタート

フライングスタート（フリーラン再起動）は、インバータが OFF でモータが回転している状態からセンサレスベクトル制御（閉ループ速度制御）を開始する機能です。モータの磁極位置と速度が不明の状態で、センサレスベクトル制御を始動しようとすると、過電流などの予期せぬ動作が発生し、始動に失敗する可能性があります。そのため、通常はモータをブレーキ等で停止させてからオープンループ制御を行い、センサレスベクトル制御に移行して所望の速度でモータを駆動していました。一方で、フライングスタートは回転しているモータの磁極位置と速度を推定することで、センサレスベクトル制御を直接開始させることができ、始動時間の大幅な短縮を可能にします。図 13-5 には、フリーラン減速時の「アクティブブレーキによる再起動」と「フライングスタートによる再起動」を示しています。また、図 13-6 には惰行再起動実験の様子を示しています。惰行再起動実験では、1000r/min、2000r/min および 3000r/min（定格速度）でフライングスタートを実施しており、広範囲で再起動が可能であることが確認できます

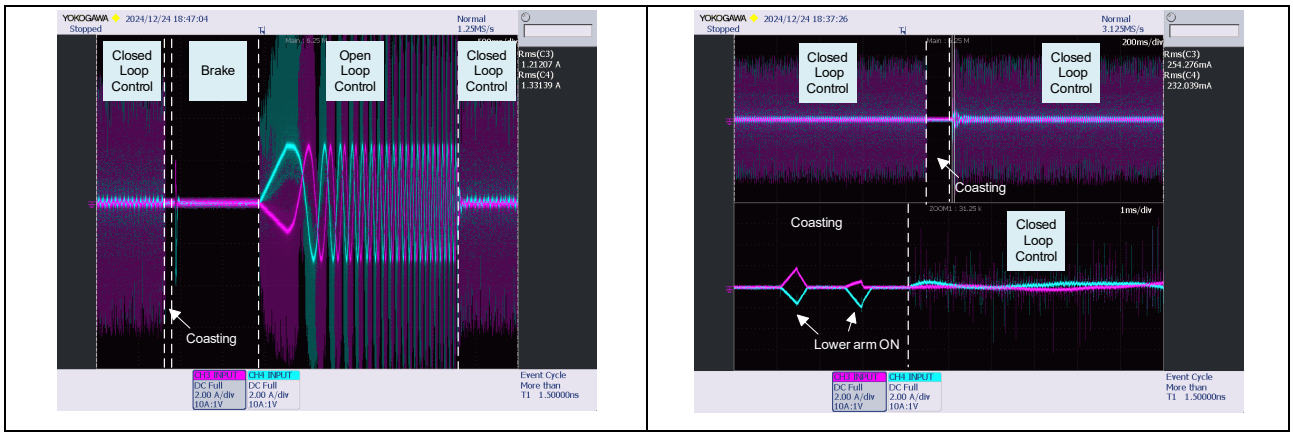


図 13-5　フライングスタート動作時の電流波形
(左: アクティブブレーキ, 右:フライングスタート)

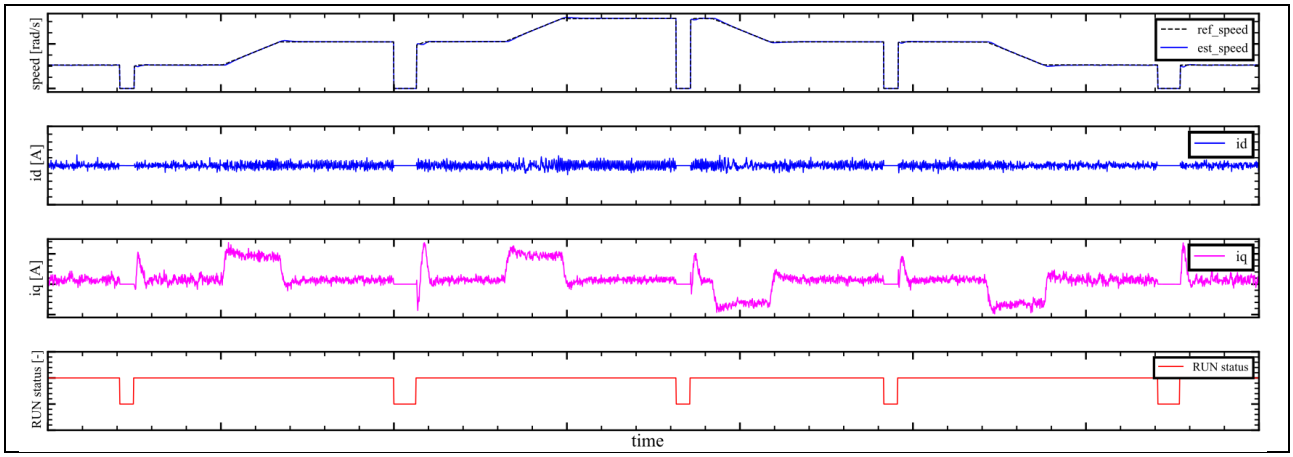


図 13-6　惰行再起動実験の様子

13.2.4 トルク振動抑制制御

トルク振動抑制制御を使用することで、コンプレッサ等を駆動する際に生じる周期的な速度変動を低減させることが期待できます。図 13-7 には、トルク振動抑制制御を OFF 時と ON 時の 600r/min 回転時（回転周波数 10Hz）における速度振動とその FFT 結果を示しております。抑制対象成分は、回転周波数の 1 次成分（10Hz）と 2 次成分（20Hz）としています。評価結果から、トルク振動抑制制御 OFF 時と比較して速度変動が低減していることが確認できます。なお、評価には通常用いられる負荷試験装置では再現が困難なため、市販のコンプレッサモータを用いて評価を実施しており、インバータの運転条件・実験環境条件・制御パラメータを本 APN 記載の内容から変更しています。また、本機能を用いた機械振動の効果は、コンプレッサ及び周囲の機械部品の固有周波数に応じて大きく変わります。

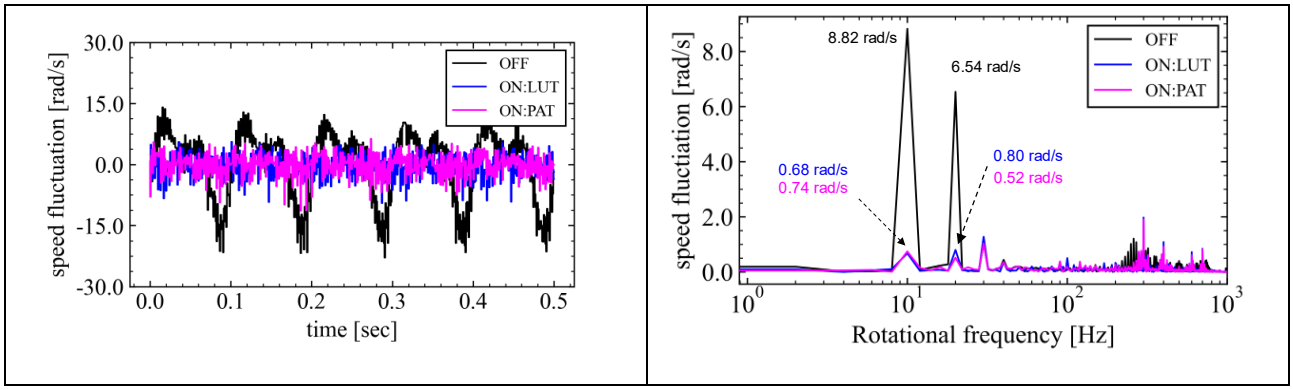


図 13-7　トルク振動抑制の ON/OFF 比較波形

13.3 CPU 使用率

各制御周期の CPU 処理時間と負荷率を以下に示します。

表 13-2　制御ループと CPU 負荷率 (RA6T2)

対象プロジェクト	制御ループ種類	制御周期	処理時間	CPU 負荷率
3shunt/SPFC	PFC 制御ループ	31.25 us	9.9 us	31.7%
	モータ制御・電流制御ループ	125 us (間引き 0 回)	18.9 us	15.1%
	モータ制御・速度制御ループ	500 us	4.4 us	0.9%
3shunt/IPFC	PFC 制御ループ	31.25 us	10.2 us	32.6%
	モータ制御・電流制御ループ	125 us (間引き 0 回)	19.0 us	15.2%
	モータ制御・速度制御ループ	500 us	4.6 us	0.9%

1shunt/SPFC	PFC 制御ループ	31.25 us	9.8 us	31.4%
	モータ制御・電流制御ループ	125 us (間引き 0 回)	20.6 us	16.5%
	モータ制御・速度制御ループ	500 us	4.6 us	0.9%
1shunt/IPFC	PFC 制御ループ	31.25 us	10.2 us	32.6%
	モータ制御・電流制御ループ	125 us (間引き 0 回)	20.6 us	16.5%
	モータ制御・速度制御ループ	500 us	4.5 us	0.9%

表 13-3　制御ループと CPU 負荷率 (RA6T3)

対象プロジェクト	制御ループ種類	制御周期	処理時間	CPU 負荷率
3shunt/IPFC	PFC 制御ループ	62.5 us	18.5 us	29.6%
	モータ制御・電流制御ループ	125 us (間引き 1 回)	28.5 us	22.8%
	モータ制御・速度制御ループ	500 us	7.5 us	1.5%

表 13-4　制御ループと CPU 負荷率 (RA4T1)

対象プロジェクト	制御ループ種類	制御周期	処理時間	CPU 負荷率
3shunt/IPFC	PFC 制御ループ	80.0 us	31.0 us	38.75%
	モータ制御・電流制御ループ	125 us (間引き 1 回)	52.0 us	41.6%
	モータ制御・速度制御ループ	500 us	12.9 us	2.58%

表 13-5　制御ループと CPU 負荷率 (RX26T RAM64KB 版)

対象プロジェクト	制御ループ種類	制御周期	処理時間	CPU 負荷率
3shunt/SPFC	PFC 制御ループ	31.25 us	7.6 us	24.3%
	モータ制御・電流制御ループ	125 us (間引き 0 回)	14.0 us	11.2%
	モータ制御・速度制御ループ	500 us	5.4 us	1.1%
3shunt/IPFC	PFC 制御ループ	31.25 us	7.8 us	25.0%
	モータ制御・電流制御ループ	125 us (間引き 0 回)	14.4 us	11.5%
	モータ制御・速度制御ループ	500 us	5.4 us	1.1%
1shunt/SPFC	PFC 制御ループ	31.25 us	7.6 us	24.3%
	モータ制御・電流制御ループ	125 us (間引き 0 回)	14.6 us	11.7%
	モータ制御・速度制御ループ	500 us	5.4 us	1.1%
1shunt/IPFC	PFC 制御ループ	31.25 us	7.8 us	25.0%
	モータ制御・電流制御ループ	125 us (間引き 0 回)	14.6 us	11.7%
	モータ制御・速度制御ループ	500 us	5.4 us	1.1%

表 13-6　制御ループと CPU 負荷率 (RX26T RAM48KB 版)

対象プロジェクト	制御ループ種類	制御周期	処理時間	CPU 負荷率
3shunt/IPFC	PFC 制御ループ	31.25 us	8.27 us	26.464%
	モータ制御・電流制御ループ	125 us (間引き 0 回)	16.4 us	13.12%
	モータ制御・速度制御ループ	500 us	7.1 us	1.42%
1shunt/IPFC	PFC 制御ループ	31.25 us	8.27 us	26.464%
	モータ制御・電流制御ループ	125 us (間引き 0 回)	17.2 us	13.76%
	モータ制御・速度制御ループ	500 us	7.6 us	1.52%

13.4 プログラムサイズ・RAM 使用量

本サンプルプログラムでのプログラムサイズ(ROM)と、RAM 使用量は以下の通りです。コンパイラの最適化設定において、最適化レベル 2 (-O2)に設定しています。

表 13-7 プログラムサイズと RAM 使用量 (RA6T2)

対象プロジェクト	メモリ	サイズ
3shunt/SPFC	プログラムサイズ(ROM)	42828 [Bytes]
	RAM 使用量	8472 [Bytes]
	スタック解析結果の最大値	448 [Bytes]
	スタックサイズの IDE 環境の設定値	1024 [Bytes]
3shunt/IPFC	プログラムサイズ(ROM)	43272 [Bytes]
	RAM 使用量	8512 [Bytes]
	スタック解析結果の最大値	448 [Bytes]
	スタックサイズの IDE 環境の設定値	1024 [Bytes]
1shunt/SPFC	プログラムサイズ(ROM)	41844 [Bytes]
	RAM 使用量	8496 [Bytes]
	スタック解析結果の最大値	448 [Bytes]
	スタックサイズの IDE 環境の設定値	1024 [Bytes]
1shunt/IPFC	プログラムサイズ(ROM)	42192 [Bytes]
	RAM 使用量	8536 [Bytes]
	スタック解析結果の最大値	448 [Bytes]
	スタックサイズの IDE 環境の設定値	1024 [Bytes]

表 13-8 プログラムサイズと RAM 使用量 (RA6T3)

対象プロジェクト	メモリ	サイズ
3shunt/IPFC	プログラムサイズ(ROM)	42468 [Bytes]
	RAM 使用量	7496 [Bytes]
	スタック解析結果の最大値	480 [Bytes]
	スタックサイズの IDE 環境の設定値	1024 [Bytes]

表 13-9 プログラムサイズと RAM 使用量 (RA4T1)

対象プロジェクト	メモリ	サイズ
3shunt/IPFC	プログラムサイズ(ROM)	42420 [Bytes]
	RAM 使用量	7536 [Bytes]
	スタック解析結果の最大値	480 [Bytes]
	スタックサイズの IDE 環境の設定値	1024 [Bytes]

表 13-10 プログラムサイズと RAM 使用量 (RX26T RAM64KB 版)

対象プロジェクト	メモリ	サイズ
3shunt/SPFC	プログラムサイズ(ROM)	33357 [Bytes]

	RAM 使用量	14680 [Bytes]
	スタック解析結果の最大値	476 [Bytes]
	スタックサイズの IDE 環境の設定値	5120 [Bytes]
3shunt/IPFC	プログラムサイズ(ROM)	33686 [Bytes]
	RAM 使用量	14680 [Bytes]
	スタック解析結果の最大値	476 [Bytes]
	スタックサイズの IDE 環境の設定値	5120 [Bytes]
1shunt/SPFC	プログラムサイズ(ROM)	33250 [Bytes]
	RAM 使用量	14708 [Bytes]
	スタック解析結果の最大値	476 [Bytes]
	スタックサイズの IDE 環境の設定値	5120 [Bytes]
1shunt/IPFC	プログラムサイズ(ROM)	33579 [Bytes]
	RAM 使用量	14708 [Bytes]
	スタック解析結果の最大値	476 [Bytes]
	スタックサイズの IDE 環境の設定値	5120 [Bytes]

表 13-11 プログラムサイズと RAM 使用量 (RX26T RAM48KB 版)

対象プロジェクト	メモリ	サイズ
3shunt/IPFC	プログラムサイズ(ROM)	34709 [Bytes]
	RAM 使用量	14746 [Bytes]
	スタック解析結果の最大値	476 [Bytes]
	スタックサイズの IDE 環境の設定値	5120 [Bytes]
1shunt/IPFC	プログラムサイズ(ROM)	34650 [Bytes]
	RAM 使用量	14774 [Bytes]
	スタック解析結果の最大値	476 [Bytes]
	スタックサイズの IDE 環境の設定値	5120 [Bytes]

14. FAQ

代表的な現象と、その解決例を表 14-1 に示します。

表 14-1　現象と解決例の一覧

現象	解決例
FSP のバージョンが異なるというエラーが出ました。	本サンプルプログラムで指定された e² studio と FSP のバージョンが異なる環境で、プロジェクトを開いた場合、FSP のバージョンが異なる旨の表示のエラーが表示されます。弊社ウェブサイトから、本サンプルプログラムで指定したバージョンの FSP 環境をご利用 PC に導入ください。 FSP のバージョンが異なる場合、API 等の仕様が変更されている場合があり、ユーザの修正が必要となる場合があります。また、実行結果や挙動が変わる可能性があります。FSP のバージョンが異なる環境で動かした場合、サポートが行えませんのでご注意ください。
電源を入れても母線電圧が昇圧されません。	入力交流電圧の周波数がプログラム内での定義値と異なる可能性があります。デフォルトでは 50Hz の設定となっているため、60Hz を印加した場合、正しく昇圧されずエラーとなる場合があります。10.18(2)を参照してマクロ値を変更してください。
1shunt 電流検出対応のプログラムを実行したとき、起動直後に過電流エラーが生じます。	MCI-HV-1 のジャンパ設定が、デフォルトの 3shunt 電流検出用となっている場合があります。表 4-6 を参照してジャンパ設定が正しいか確認してください。
フライングスタート機能を動作させたとき、モータが一旦、停止してしまいます。	フライングスタート機能では、誘起電圧が低く、正常に速度・角度が推定できない設定速度未満と判定した場合にはアクティブブレーキ機能によってモータを強制停止させます。設定速度を見直してください。
フライングスタート機能を動作させたとき、過電流エラーが生じます。	フライングスタートの電流閾値を適切に設計・設定してください。モータ定数や配線のインピーダンスの影響も受けます。
脱調検出が行われません。	脱調検出機能は、過電流保護機能の補完的な機能であり、先に過電流エラーとなる場合があります。また、脱調時に電流に振動成分が生じない場合には検出ができません。過電流エラーの閾値を適切に設計して併用を検討ください。
運転を開始してもモータを始動できません。	制御しているモータに対して、負荷が大きい場合・イナーシャが大きい場合は、オープンループでの始動に失敗する場合があります。オープンループ時の d 軸電流指令値および速度増減幅を見直してください。詳細は 10.13(1)を参照してください。
起動直後に ADC で検出した値がずれている。	RA6T2 に搭載されている周辺機能 ADC_B は、起動時やリセット時等に自己校正を行う必要があります。このため、起動時の ADC の初期設定で、キャリブレーション完了待ちの処理を省略した場合、ADC で検出した値が不正となる場合があります。起動時の処理で、ADC のキャリブレーション完了待ちの処理を必ず実装してください。
トルク振動抑制機能で振動抑制効果が得られません。	振動は、モータやコンプレッサだけでなく、周辺の機械部品やその接合部分、防振部品などの特性・構造・組み合わせによって発生します。トルク振動抑制の効果は、モータの回転速度と、それらの機構部品との関係性によって、効果の有無が大きく変化します。構造や部品の選定、使用する回転速度を見直すなどして、最適解となる条件を実験等によって導き出す必要があります。

センサレスベクトル制御に切り替えできません。	SPM モータを使用している場合に MTPA 機能を有効にすると、正常にモータ制御ソフトウェアが動作しません。MTPA 機能は IPM モータのみで有効ですので、SPM モータ使用時は必ず無効としてください。

改訂記録

Rev.	発行日	改訂内容	
		ページ	ポイント
1.00	2025/10/31	-	新規発行
1.10	2026/10/23	-	・RA6T3 Ver.2 追加 ・RA4T1 Ver.2 追加 ・RX26T RAM48KB 版 Ver.2 追加

製品ご使用上の注意事項

ここでは、マイコン製品全体に適用する「使用上の注意事項」について説明します。個別の使用上の注意事項については、本ドキュメントおよびテクニカルアップデートを参照してください。

1. 静電気対策
   CMOS 製品の取り扱いの際は静電気防止を心がけてください。CMOS 製品は強い静電気によってゲート絶縁破壊を生じることがあります。運搬や保存の際には、当社が出荷梱包に使用している導電性のトレーやマガジンケース、導電性の緩衝材、金属ケースなどを利用し、組み立て工程にはアースを施してください。プラスチック板上に放置したり、端子を触ったりしないでください。また、CMOS 製品を実装したボードについても同様の扱いをしてください。
2. 電源投入時の処置
   電源投入時は、製品の状態は不定です。電源投入時には、LSI の内部回路の状態は不確定であり、レジスタの設定や各端子の状態は不定です。外部リセット端子でリセットする製品の場合、電源投入からリセットが有効になるまでの期間、端子の状態は保証できません。同様に、内蔵パワーオンリセット機能を使用してリセットする製品の場合、電源投入からリセットのかかる一定電圧に達するまでの期間、端子の状態は保証できません。
3. 電源オフ時における入力信号
   当該製品の電源がオフ状態のときに、入力信号や入出力プルアップ電源を入れないでください。入力信号や入出力プルアップ電源からの電流注入により、誤動作を引き起こしたり、異常電流が流れ内部素子を劣化させたりする場合があります。資料中に「電源オフ時における入力信号」についての記載のある製品は、その内容を守ってください。
4. 未使用端子の処理
   未使用端子は、「未使用端子の処理」に従って処理してください。CMOS 製品の入力端子のインピーダンスは、一般に、ハイインピーダンスとなっています。未使用端子を開放状態で動作させると、誘導現象により、LSI 周辺のノイズが印加され、LSI 内部で貫通電流が流れたり、入力信号と認識されて誤動作を起こす恐れがあります。
5. クロックについて
   リセット時は、クロックが安定した後、リセットを解除してください。プログラム実行中のクロック切り替え時は、切り替え先クロックが安定した後に切り替えてください。リセット時、外部発振子（または外部発振回路）を用いたクロックで動作を開始するシステムでは、クロックが十分安定した後、リセットを解除してください。また、プログラムの途中で外部発振子（または外部発振回路）を用いたクロックに切り替える場合は、切り替え先のクロックが十分安定してから切り替えてください。
6. 入力端子の印加波形
   入力ノイズや反射波による波形歪みは誤動作の原因になりますので注意してください。CMOS 製品の入力がノイズなどに起因して、V_{IL}（Max.）から V_{IH}（Min.）までの領域にとどまるような場合は、誤動作を引き起こす恐れがあります。入力レベルが固定の場合はもちろん、V_{IL}（Max.）から V_{IH}（Min.）までの領域を通過する遷移期間中にチャタリングノイズなどが入らないように使用してください。
7. リザーブアドレス（予約領域）のアクセス禁止
   リザーブアドレス（予約領域）のアクセスを禁止します。アドレス領域には、将来の拡張機能用に割り付けられている リザーブアドレス（予約領域）があります。これらのアドレスをアクセスしたときの動作については、保証できませんので、アクセスしないようにしてください。
8. 製品間の相違について
   型名の異なる製品に変更する場合は、製品型名ごとにシステム評価試験を実施してください。同じグループのマイコンでも型名が違うと、フラッシュメモリ、レイアウトパターンの相違などにより、電気的特性の範囲で、特性値、動作マージン、ノイズ耐量、ノイズ幅射量などが異なる場合があります。型名が違う製品に変更する場合は、個々の製品ごとにシステム評価試験を実施してください。

ご注意書き

1. 本資料に記載された回路、ソフトウェアおよびこれらに関連する情報は、半導体製品の動作例、応用例を説明するものです。回路、ソフトウェアおよびこれらに関連する情報を使用する場合、お客様の責任において、お客様の機器・システムを設計ください。これらの使用に起因して生じた損害（お客様または第三者いずれに生じた損害も含みます。以下同じです。）に関し、当社は、一切その責任を負いません。
2. 当社製品または本資料に記載された製品データ、図、表、プログラム、アルゴリズム、応用回路例等の情報の使用に起因して発生した第三者の特許権、著作権その他の知的財産権に対する侵害またはこれらに関する紛争について、当社は、何らの保証を行うものではなく、また責任を負うものではありません。
3. 当社は、本資料に基づき当社または第三者の特許権、著作権その他の知的財産権を何ら許諾するものではありません。
4. 当社製品を組み込んだ製品の輸出入、製造、販売、利用、配布その他の行為を行います。にあたり、第三者保有の技術の利用に関するライセンスが必要となる場合、当該ライセンス取得の判断および取得はお客様の責任において行ってください。
5. 当社製品を、全部または一部を問わず、改造、改変、複製、リバースエンジニアリング、その他、不適切に使用しないでください。かかる改造、改変、複製、リバースエンジニアリング等により生じた損害に関し、当社は、一切その責任を負いません。
6. 当社は、当社製品の品質水準を「標準水準」および「高品質水準」に分類しており、各品質水準は、以下に示す用途に製品が使用されることを意図しております。

   標準水準：　コンピュータ、OA 機器、通信機器、計測機器、AV 機器、家電、工作機械、パーソナル機器、産業用ロボット等

   高品質水準：輸送機器（自動車、電車、船舶等）、交通制御（信号）、大規模通信機器、金融端末基幹システム、各種安全制御装置等

   当社製品は、データシート等により高信頼性、Harsh environment 向け製品と定義しているものを除き、直接生命・身体に危害を及ぼす可能性のある機器・システム（生命維持装置、人体に埋め込み使用するもの等）、もしくは多大な物的損害を発生させるおそれのある機器・システム（宇宙機器と、海底中継器、原子力制御システム、航空機制御システム、プラント基幹システム、軍事機器等）に使用されることを意図しておらず、これらの用途に使用することは想定していません。たとえ、当社が想定していない用途に当社製品を使用したことにより損害が生じても、当社は一切その責任を負いません。
7. あらゆる半導体製品は、外部攻撃からの安全性を 100%保証されているわけではありません。当社ハードウェア／ソフトウェア製品にはセキュリティ対策が組み込まれているものもありますが、これによって、当社は、セキュリティ脆弱性または侵害（当社製品または当社製品が使用されているシステムに対する不正アクセス・不正使用を含みますが、これに限りません。）から生じる責任を負うものではありません。当社は、当社製品または当社製品が使用されたあらゆるシステムが、不正な改変、攻撃、ウイルス、干渉、ハッキング、データの破壊または窃盗その他の不正な侵入行為（「脆弱性問題」といいます。）によって影響を受けないことを保証しません。当社は、脆弱性問題に起因しまたはこれに関連して生じた損害について、一切責任を負いません。また、法令において認められる限りにおいて、本資料および当社ハードウェア／ソフトウェア製品について、商品性および特定目的との合致に関する保証ならびに第三者の権利を侵害しないことの保証を含め、明示または黙示のいかなる保証も行いません。
8. 当社製品をご使用の際は、最新の製品情報（データシート、ユーザーズマニュアル、アプリケーションノート、信頼性ハンドブックに記載の「半導体デバイスの使用上の一般的な注意事項」等）をご確認の上、当社が指定する最大定格、動作電源電圧範囲、放熱特性、実装条件その他指定条件の範囲内でご使用ください。指定条件の範囲を超えて当社製品をご使用された場合の故障、誤動作の不具合および事故につきましては、当社は、一切その責任を負いません。
9. 当社は、当社製品の品質および信頼性の向上に努めていますが、半導体製品はある確率で故障が発生したり、使用条件によっては誤動作したりする場合があります。また、当社製品は、データシート等において高信頼性、Harsh environment 向け製品と定義しているものを除き、耐放射線設計を行っておりません。仮に当社製品の故障または誤動作が生じた場合であっても、人身事故、火災事故その他社会的損害等を生じさせないよう、お客様の責任において、冗長設計、延焼対策設計、誤動作防止設計等の安全設計およびエージング処理等、お客様の機器・システムとしての出荷保証を行ってください。特に、マイコンソフトウェアは、単独での検証は困難なため、お客様の機器・システムとしての安全検証をお客様の責任で行ってください。
10. 当社製品の環境適合性等の詳細につきましては、製品個別に必ず当社営業窓口までお問合せください。ご使用に際しては、特定の物質の含有・使用を規制する RoHS 指令等、適用される環境関連法令を十分調査のうえ、かかる法令に適合するようご使用ください。かかる法令を遵守しないことにより生じた損害に関して、当社は、一切その責任を負いません。
11. 当社製品および技術を国内外の法令および規則により製造・使用・販売を禁止されている機器・システムに使用することはできません。当社製品および技術を輸出、販売または移転等する場合は、「外国為替及び外国貿易法」その他日本国および適用される外国の輸出管理関連法規を遵守し、それらの定めるところに従い必要な手続きを行ってください。
12. お客様が当社製品を第三者に転売等される場合には、事前に当該第三者に対して、本ご注意書き記載の諸条件を通知する責任を負うものといたします。
13. 本資料の全部または一部を当社の文書による事前の承諾を得ることなく転載または複製することを禁じます。
14. 本資料に記載されている内容または当社製品についてご不明な点がございましたら、当社の営業担当者までお問合せください。

注 1. 本資料において使用されている「当社」とは、ルネサス エレクトロニクス株式会社およびルネサス エレクトロニクス株式会社が直接的、間接的に支配する会社をいいます。

注 2. 本資料において使用されている「当社製品」とは、注 1 において定義された当社の開発、製造製品をいいます。

(Rev.5.0-1　2020.10)

本社所在地

〒135-0061 東京都江東区豊洲 3-2-24（豊洲フォレシア）

www.renesas.com

お問合せ窓口

弊社の製品や技術、ドキュメントの最新情報、最寄の営業お問合せ窓口に関する情報などは、弊社ウェブサイトをご覧ください。

www.renesas.com/contact/

商標について

ルネサスおよびルネサスロゴはルネサス エレクトロニクス株式会社の商標です。すべての商標および登録商標は、それぞれの所有者に帰属します。

© 2026 Renesas Electronics Corporation. All rights reserved.