

スライディング モード オブザーバを使った 永久磁石式同期モータのセンサレス磁界方向制御

はじめに

永久磁石式同期モータ (PMSM) は、モータ制御アプリケーション向けに幅広く用いられているモータの 1 つです。PMSM のロータには永久磁石が使われるため、ロータへの電流は不要であり、小さな筐体で大きなトルクが得られます。これらは全て AC 誘導モータ (ACIM) に対する長所となります。PMSM は出力/サイズ比が大きいため、トルクを維持したまま小型化が可能です。これらの特長により、PMSM は可変周波数ドライブ (VFD) アプリケーションの幅広いレンジで使用可能です。

PMSM 向け VFD の制御には、一般的に磁界方向制御 (FOC) が使われます。FOC は、三相 AC モータの相電流とロータ磁束角度を入力とし、ロータ磁束に対するステータ磁束の角度が指定された値となるように三相電圧源インバータ向けの転流パターンを生成します。これにより、理想的なトルクおよび速度性能が得られます。これを達成するため、FOC はステータ参照フレーム内の三相成分をロータ参照フレーム内の 2 つの成分 (モータ内総磁束量の制御用とトルクの制御用) へと変換します。

ステータ参照フレームからロータ参照フレームへ変換するには、ロータの磁束角度を正確に知る必要があります。この角度は、ロータ位置センサ (センサ式 FOC) またはロータ位置推定器 (センサレス FOC) を使って特定できます。センサレス FOC では温度等の変動、スイッチング ノイズ、電磁ノイズ等の影響を除去可能な信頼性の高い速度推定器を実装する事が重要課題となります。外乱等の未知の信号と不確実性が存在する状況でロータ位置推定器を使う場合、スライディング モード オブザーバ (SMO) が優れた効果を提供します。

Microchip 社は、FOC の背後にある原理を解説する各種文書を提供しています (例: AN2520 - Sensorless Field Oriented Control (FOC) for a Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) Using a PLL Estimator and Equation-based Flux Weakening (FW)、[「参考資料」](#) 参照)。

本書の主な内容は以下の通りです。

- 永久磁石式同期モータ (PMSM)
- 磁界方向制御 (FOC) の原理
- スライディング モード オブザーバ (SMO) を使ったロータ位置と速度の推定
- センサレス FOC サンプル ソフトウェアの設計と実装

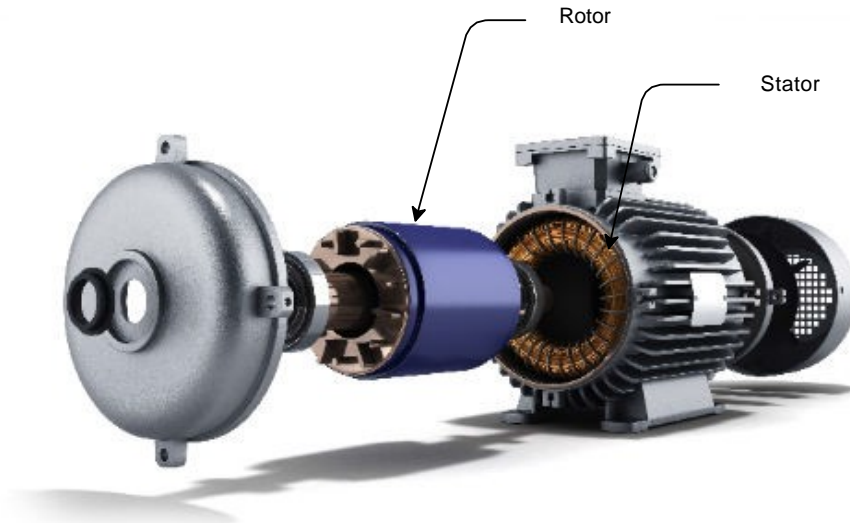
目次

はじめに	1
1. 永久磁石式同期モータ	3
1.1. 数学モデル	4
2. 磁界方向制御(FOC).....	6
2.1. FOCに基づく可変周波数 PMSM 駆動.....	6
3. ロータの位置と速度の推定.....	14
3.1. 起動プロセス	14
3.2. スライディング モード オブザーバ(SMO).....	15
3.3. ロータ角度の計算	16
3.4. ロータ速度の計算	17
4. 磁界方向制御(FOC)の実装	18
4.1. SAME70 MCU の特長と周辺モジュールの設定	18
5. まとめ.....	21
6. 補遺: モータ制御アプリケーション向け 32 ビット MCU アーキテクチャの特長	22
6.1. PIC32CM MC ファミリ	22
6.2. SAM D2x および C2x ファミリ	22
6.3. SAM D5x および SAM E5x ファミリ	22
6.4. PIC32MK ファミリ	22
6.5. SAM S70 および SAM E70 ファミリ	23
7. 参考資料	24
Microchip 社のウェブサイト.....	25
製品変更通知サービス	25
カスタマサポート 25	
Microchip 社のデバイスコード保護機能	25
法律上の注意点.....	25
商標.....	26
品質管理システム	27
各国の営業所とサービス	28

1. 永久磁石式同期モータ

永久磁石式同期モータ(PMSM)は、三相制御 AC 電源によって駆動される AC 同期モータです。図 1-1 に、標準的な PMSM の分解図を示します。

図 1-1. PMSM の分解図



PMSM は、ステータと呼ぶ固定部とロータと呼ぶ回転部を有します。ステータは三相巻き線で構成され、平衡三相電圧で励起された時に回転磁場を生成します。ロータは、コアに固定された永久磁石によりロータ磁場を生成します。ロータトルクは、ロータ磁場とステータ磁場の相互作用により発生します。

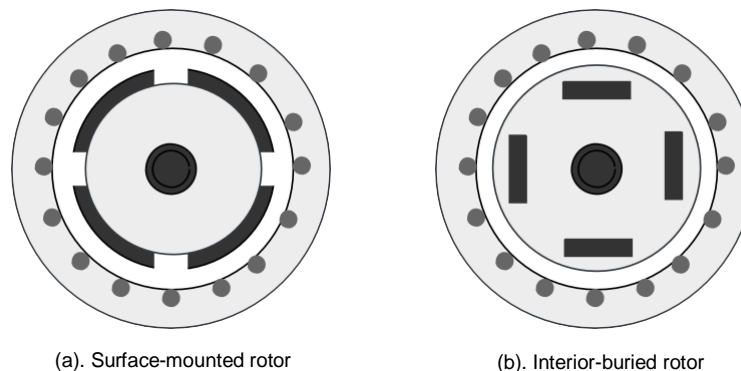
PMSM は、ロータの構造に基づいて大まかに以下の 2 タイプに分類されます。

- 表面磁石型 PMSM (SPMSM)
- 埋め込み磁石型 PMSM (IPMSM)

SPMSM の永久磁石はロータの表面に固定されており、ロータとステータコア間のラジアル方向のエアギャップ リラクタンس経路は対称となります。IPMSM の永久磁石はロータコアの内部に埋め込まれており、ロータとステータコアの間のラジアルエアギャップリラクタンس経路は非対称となります。

図 1-2 に、PMSM と IPMSM のロータ/ステータ横断面図を示します。

図 1-2. ロータ/ステータの横断面図



1.1 数学モデル

PMSM の数学モデルは、PMSM 用可変周波数ドライブ(VFD) 向けのコントローラとオブザーバを設計する上で極めて重要です。PMSM は本質的に非線形システムですが、ほとんどの実用目的では、線形非時変系動的システムとして近似およびモデル化が可能です。以下では、固定および回転参照フレームにおける PMSM のシンプルな線形動的モデルを簡潔に紹介します。

1.1.1 固定参照フレームモデル

式 1-1 は、PMSM の固定参照フレームモデルを表します。

式 1-1. 固定参照フレームモデル

$$\begin{bmatrix} U_\alpha \\ U_\beta \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + pL_{\alpha\beta} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix}$$

- $\begin{bmatrix} U_\alpha \\ U_\beta \end{bmatrix}$: 固定参照フレームにおけるステータ電圧
- $\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}$: 固定参照フレームにおけるステータ電流
- $\begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix}$: 固定参照フレームにおけるステータ逆起電力
- R_s : ステータの各相の抵抗
- $p = d/dt$: 微分演算子

式 1-2. インダクタンス行列

$$L_{\alpha\beta} = \begin{bmatrix} \frac{L_d + L_q}{2} + \frac{L_d - L_q}{2} \cos(2\theta_e) & \frac{L_d - L_q}{2} \sin(2\theta_e) \\ \frac{L_d - L_q}{2} \sin(2\theta_e) & \frac{L_d + L_q}{2} - \frac{L_d - L_q}{2} \cos(2\theta_e) \end{bmatrix}$$

- L_d : 巻き線軸とロータ磁束軸の向きが一致する時のインダクタンス
- L_q : 巻き線軸とロータ磁束軸が直交する時のインダクタンス
- θ_e : ロータ磁束角度

式 1-3. 逆起電力

$$\begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix} = w_e \lambda_m \begin{bmatrix} -\sin(2\theta_e) \\ \cos(2\theta_e) \end{bmatrix}$$

- λ_m : 永久磁石磁束鎖交
- w_e : モータの電気的速度

1.1.2 回転参照フレームモデル

PMSM の回転参照フレームモデルは、PMSM の式を固定参照フレームから回転参照フレームへと線形変換(パーク変換)する事により導出します。この変換は、正弦波状に変化する全ての成分を 2 つの DC 成分に変換する事で、古典的な手法による制御および解析を容易にします。1 つの DC 成分はロータ磁束と同じ向きの成分(d 軸)であり、もう 1 つの DC 成分はロータ磁束に直交する成分です(q 軸)。モデルの詳細な導出方法は本書の範囲外であるため、説明は省略します。

式 1-4 に、パーク変換後の回転参照フレームにおける最終的なモデルを示します。

式 1-4. 回転参照フレームモデル

$$\begin{bmatrix} U_d \\ U_q \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + pL_{dq} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + Jw_e L_{dq} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + w_e \begin{bmatrix} 0 \\ \lambda_m \end{bmatrix}$$

- $\begin{bmatrix} U_d \\ U_q \end{bmatrix}$: 回転参照フレームにおけるステータ相電圧ベクトル
- $\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix}$: 回転参照フレームにおけるステータ相電流ベクトル
- $\mathbf{J} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$: 回転行列
- L_d : d軸に沿うインダクタンス
- L_q : q軸に沿うインダクタンス

2. 磁界方向制御 (FOC)

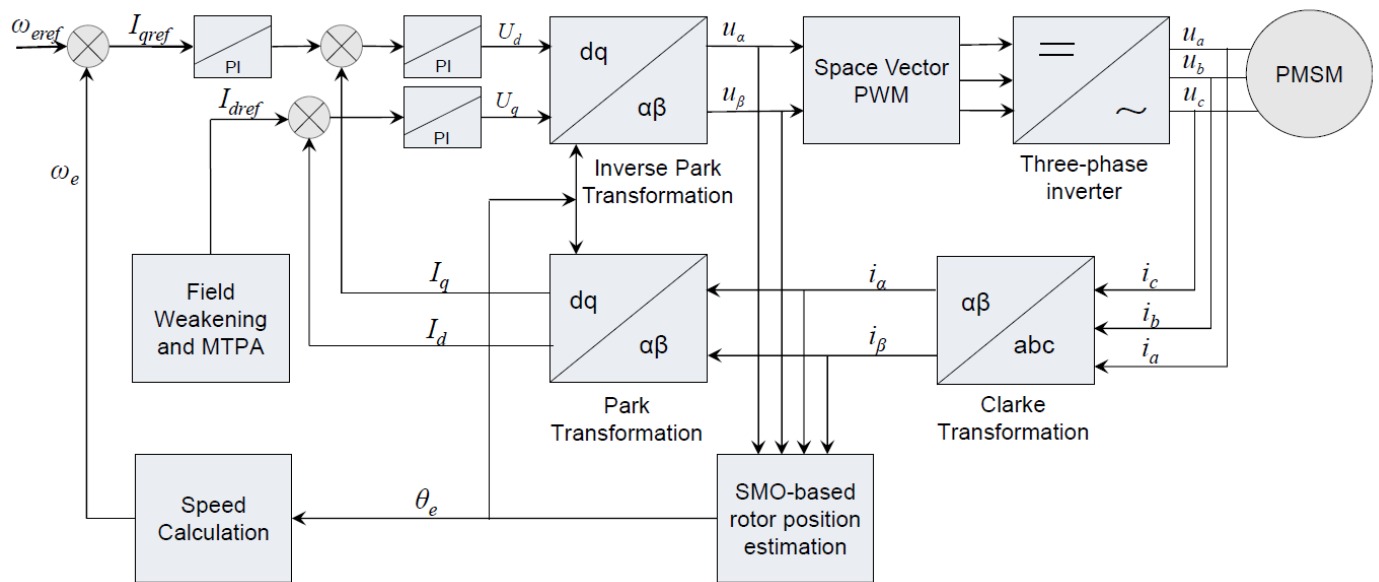
磁界方向制御(FOC) は、三相 AC モータの相電流とロータ磁界ベクトル角度を入力とし、三相電圧源インバータ向けの転流パターンを生成します。その結果、ロータ磁界ベクトルとステータ磁束のなす角が指定された値となる事で、理想的なトルクおよび速度性能が得られます。

以下では、PMSM VFD を制御するための基本的な FOC スキームについて説明します。

2.1 FOC に基づく可変周波数 PMSM 駆動

図 2-1 に、標準的な FOC に基づく PMSM 可変周波数駆動の概略ブロック図を示します。

図 2-1. FOC のブロック図



センサレス FOC の基本的な動作ステップは以下の通りです。

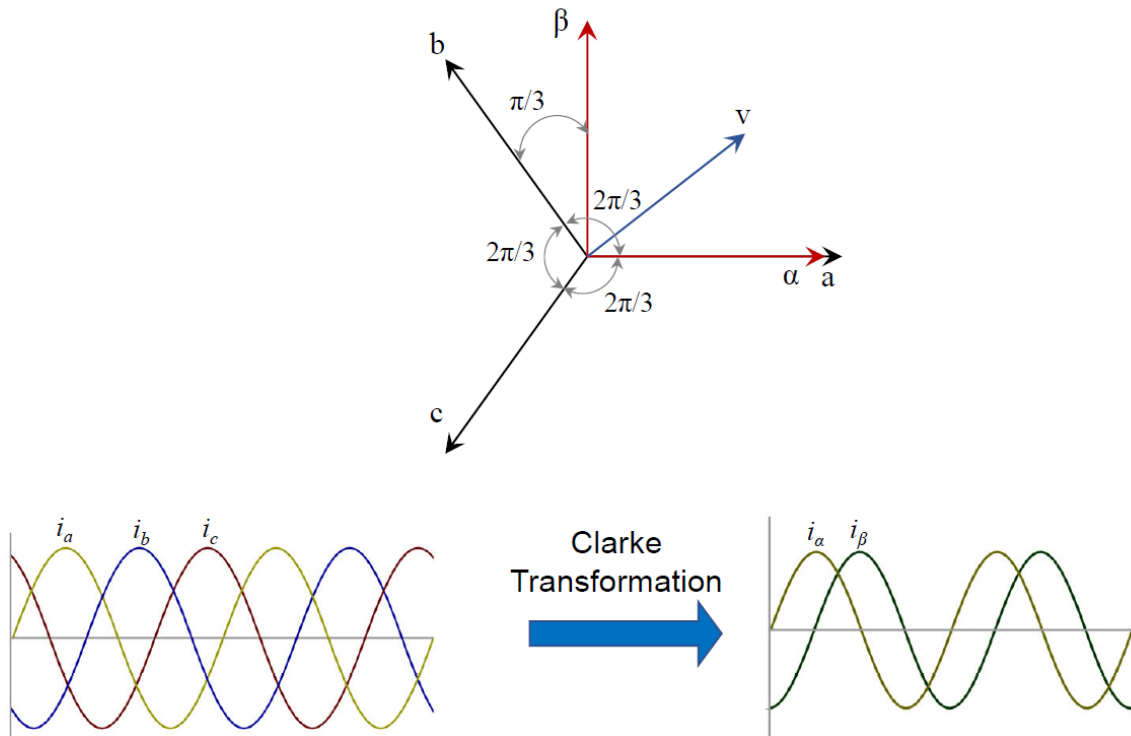
1. **モータに流れる電流を計測する:** モータに流れる三相電流の計測方法は各種存在します。一般的に用いられる計測方法には、ホール効果変換器に基づく磁気センサを使う方法と、適切に配置された 1~3 個のシャントを使う方法があります。
2. **ロータ磁束角度を推定する:** ロータ磁束角度は、逆起電力に基づくアルゴリズムを使うか、高周波パルスを注入する事により推定できます。
3. **計測した電流を $\alpha\beta$ 参照フレームに変換する:** クラーク変換により、計測したモータ相電流を $\alpha\beta$ 参照フレーム内の 2 つの直交成分に変換します。
4. **$\alpha\beta$ 電流を dq 電流に変換する:** 推定されたロータ磁束角度を使って、パーク変換により $\alpha\beta$ 電流を dq 参照フレーム内の 2 つの直交成分に変換します。
5. **計測された dq 電流を目標電流と比較して誤差信号を生成する:** トルクを制御するための目標 q 軸電流と、磁束を制御するための目標 d 軸電流を、それぞれに対応する計測量と比較する事により、それぞれの誤差信号を生成します。
6. **誤差信号から制御電圧を計算する:** 誤差信号を使って補正電圧を計算します。通常、この計算には PI レギュレータを使った閉ループ フィードバック方式が使われます。
7. **モータ端子に制御電圧を印加する:** dq 参照フレーム内の補正電圧を abc 参照フレーム内の電圧に逆変換します。電源スイッチング方式により、これらの電圧をモータ端子に印加します。通常、MCU ベースのシステムでは、PWM 変調方式(空間ベクトル変調等)が使われます。

以下では、FOC に基づく可変周波数駆動の各ブロックについて、より詳細に説明します。

2.1.1 クラーク変換

クラーク変換は、電気信号を3軸参照フレーム(abc)から2軸直交参照フレーム($\alpha\beta$)に変換します(図2-2参照)。

図 2-2. クラーク変換



この変換は下式により表されます。

$$i_a + i_b + i_c = 0$$

$$i_\alpha = i_a$$

$$i_\beta = \frac{1}{\sqrt{3}}(i_b - i_c)$$

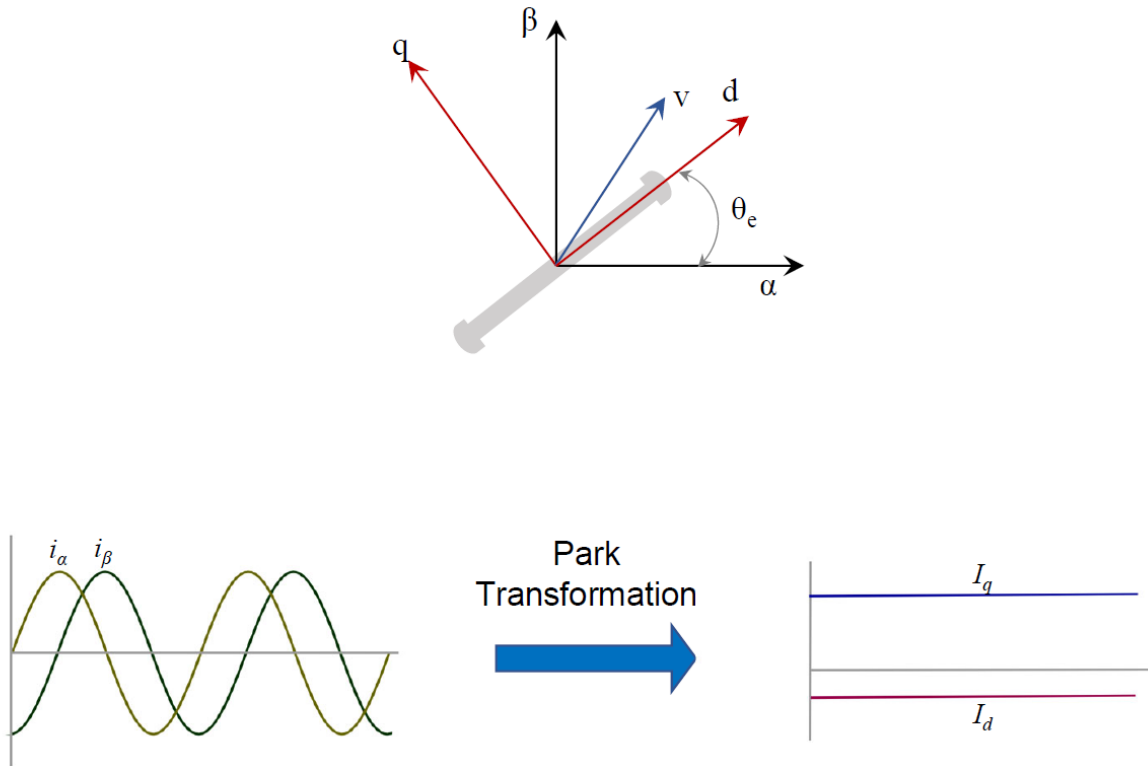
i_a 、 i_b 、 i_c : abc 参照フレームにおける三相電流

i_α 、 i_β : $\alpha\beta$ 参照フレームにおける二相直交電流

2.1.2 パーク変換

パーク変換は、電気信号を 2 軸直交固定参照フレーム($\alpha\beta$) から 2 軸直交回転参照フレーム(dq) へ変換します(図 2-3 参照)。

図 2-3. パーク変換



この変換は下式により表されます。

$$I_d = i_\alpha \cos\theta + i_\beta \sin\theta$$

$$I_q = -i_\alpha \sin\theta + i_\beta \cos\theta$$

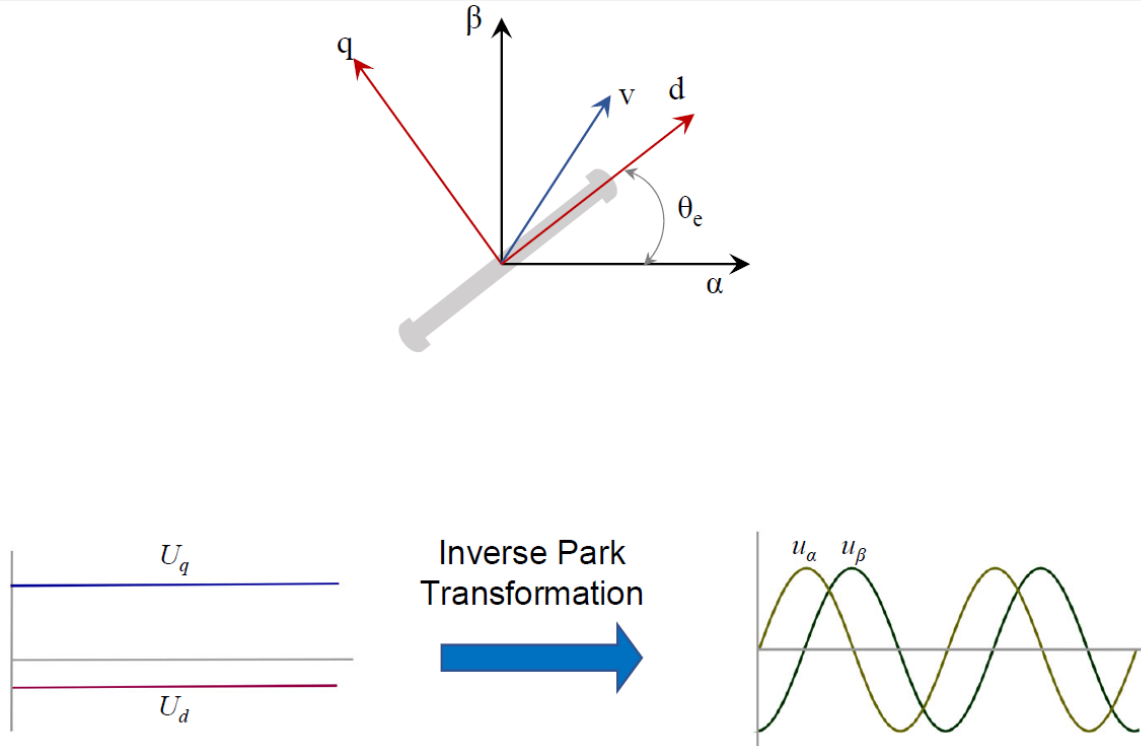
i_α 、 i_β : 2 軸直交 $\alpha\beta$ 固定参照フレームにおける電流

I_d 、 I_q : 2 軸直交 dq 回転参照フレームにおける電流

2.1.3 逆パーク変換

逆パーク変換は、電気信号を 2 軸直交回転参照フレーム(dq) から 2 軸直交固定参照フレーム(αβ) へ変換します (図 2-4 参照)。

図 2-4. 逆パーク変換



この変換は下式により表されます。

$$u_{\alpha} = U_d \cos(\theta_e) - U_q \sin(\theta_e)$$

$$u_{\beta} = U_d \sin(\theta_e) + U_q \cos(\theta_e)$$

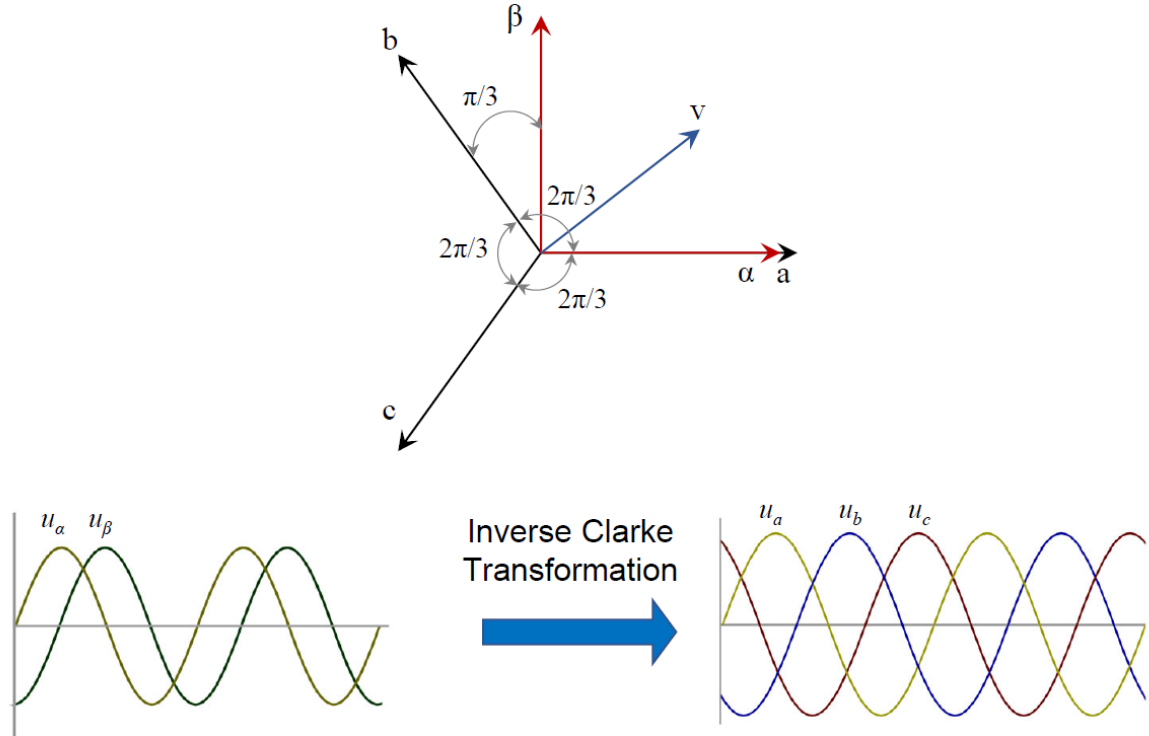
U_d 、 U_q : 2 軸直交 dq 回転参照フレームにおける電圧

u_{α} 、 u_{β} : 2 軸直交 αβ 固定参照フレームにおける電圧

2.1.4 逆クラーク変換

逆クラーク変換は、電気信号を 2 軸直交固定参照フレーム($\alpha\beta$) から 3 軸参照フレーム(abc) へ変換します (図 2-5 参照)。

図 2-5. 逆クラーク変換



この変換は下式により表されます。

$$U_a = U_\alpha$$

$$U_b = -\frac{1}{2}U_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2}U_\beta$$

$$U_c = -\frac{1}{2}U_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}U_\beta$$

U_α 、 U_β : $\alpha\beta$ 参照フレームにおける二相直交電圧

U_a 、 U_b 、 U_c : abc 参照フレームにおける三相電圧

2.1.5 PIコントローラ

PI (比例積分)コントローラは、モータ制御アプリケーション向けに最も広く用いられているアルゴリズムです。PIコントローラは、全てのアプリケーションに最適であるとは言えませんが、理解しやすく調整が容易です。伝統的なPIコントローラを表す式を以下に示します。

式 2-1. 追従誤差

$$e(t) = r(t) - y(t)$$

式 2-2. PIコントローラ

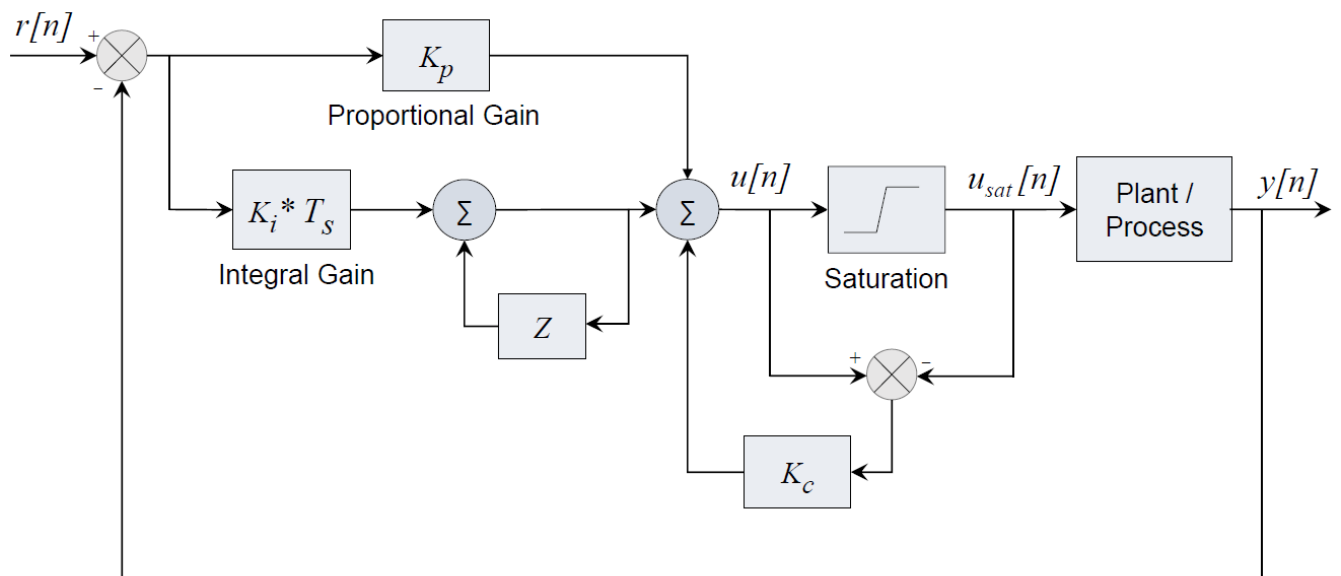
$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt$$

- $r(t)$: 参照信号
- $y(t)$: 実際のプロセス/プラント信号
- K_p : 比例ゲイン
- K_i : 積分ゲイン

実用的なPIコントローラでは、積分器windアップ問題に直面します。積分器windアップは、プラントまたはプロセスに大きな連続した偏差が現れる場合に発生する状態です。たとえ出力が飽和しても、積分器は後続のこの偏差を積算し続けます。プラントがその最終値に達した時に積分器はアンwindして過大な振動が生じます。出力が飽和した時に積分器の積算を防ぐため、アンチwindアップテクニックが使われます。

図 2-6 に、逆算方式のアンチwindアップを備えたPIコントローラを示します。

図 2-6. ディスクリートPIコントローラ



2.1.6 空間ベクトルパルス幅変調

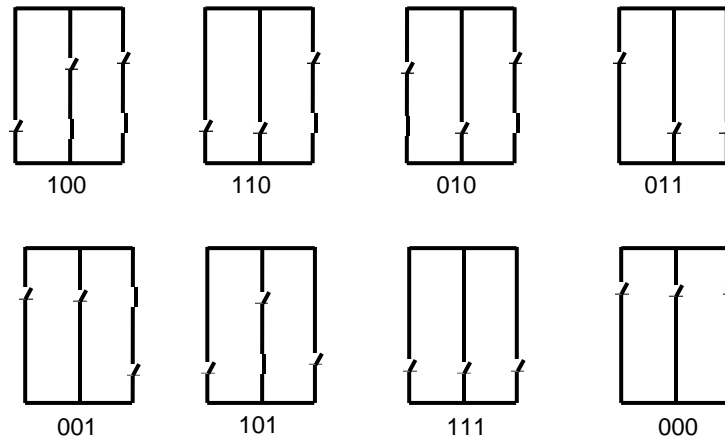
空間ベクトルパルス幅変調(SVPWM)は、2レベル電圧源インバータを駆動するための標準的な方法です。SVPWMは以下の長所を備えます。

- 三相電圧の高調波成分を低減する
- DCバスの利用レンジを約15%拡大する

以下では、SVPWMの背景にある理論を説明します。

各インバータ相出力は、2つの状態(0: 負極性レールに接続時、1: 正極性レールに接続時)のどちらかになります。従って、三相インバータには $2^3 = 8$ 通りの状態が存在します(図2-7参照)。

図 2-7. 空間ベクトル変調



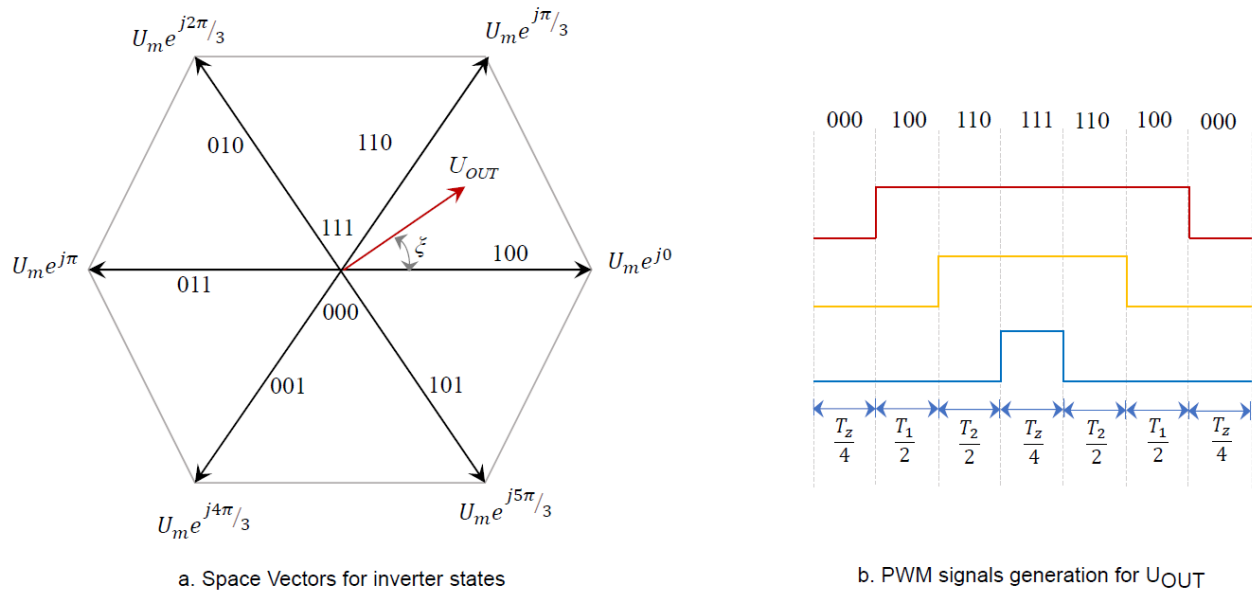
各状態は、大きさと位相角度を持つ空間ベクトルを表2-1の通りに表します。

表 2-1. ベクトルの大きさと位相角度

インデックス	状態	空間ベクトル
0	000	0
1	100	$U_m e^{j0}$
2	110	$U_m e^{j\pi/3}$
3	010	$U_m e^{j2\pi/3}$
4	011	$U_m e^{j\pi}$
5	001	$U_m e^{j4\pi/3}$
6	101	$U_m e^{j5\pi/3}$
7	111	0

インデックス0および7の状態(000および111)はNull状態です。なぜなら、これらの状態では全ての相と相の間でライン間電圧が生じないためです。その他の状態は全てアクティブ状態であり、空間ベクトル平面内で大きさと位相角度を持つベクトルを表します。図2-8に、これらの空間ベクトルを示します。

図 2-8. 空間ベクトル変調



SVPWM テクニックは、2 つの隣接するアクティブ ベクトル(それらのベクトルの間に目標ベクトルが位置する)と Null ベクトルの間で変調する事により、指定された大きさと角度を持つ任意の空間ベクトルを生成します。状態間の遷移は、パワースイッチを1つだけ切り換える事により実行されます。

式 2-3. 目標空間ベクトルの計算

$$U_{OUT} = \frac{1}{T_s} \left(T_k U_m e^{jk\pi/3} + T_l U_m e^{jl\pi/3} + \frac{T_z}{2} U_0 + \frac{T_z}{2} U_7 \right)$$

$$T_s = T_k + T_l + T_z$$

- U_m : 最大 AC ピーク電圧
- T_s : PWM 周期
- T_k , T_l : 隣接するアクティブ ベクトルが与えられる時間
- U_0 , U_7 : 000 および 111 状態の Null ベクトル
- T_z : Null ベクトルが与えられる時間

3. ロータの位置と速度の推定

PMSM のトルクおよび磁束の独立制御においては、ロータ位置の正確な値を得る事が極めて重要です。ロータ位置は、専用のロータ位置センサ(センサ方式)を使うか、位置推定器(センサレス方式)を使う事により取得できます。

センサレス方式の場合、逆起電力信号に基づく位置推定テクニックが広く用いられます。オブザーバは相電流および電圧を入力として取り込み、PMSM のロータ逆起電力を特定します。この逆起電力を使ってロータ位置が計算されます。これらのテクニックの主たる短所の 1 つは、必要最小レベルの逆起電力が得られるまでロータの電気的位置を推定する事ができないという事です。従って、これらのテクニックでは、FOC の実行前にモータを起動するための開ループ起動プロセスが必要となります。

以下では、シンプルな開ループ起動プロセスについて説明した後に、スライディングモードオブザーバを使った逆起電力ベースの角度/速度推定テクニックについて説明します。

3.1 起動プロセス

逆起電力に基づくセンサレス位置推定テクニックでは、必要最小レベルの逆起電力が得られるまでロータの電気的位置を推定できません。逆起電力がロータ位置推定用に十分な大きさになる最小速度に達するまで、開ループ起動プロセスによって PMSM を駆動します。

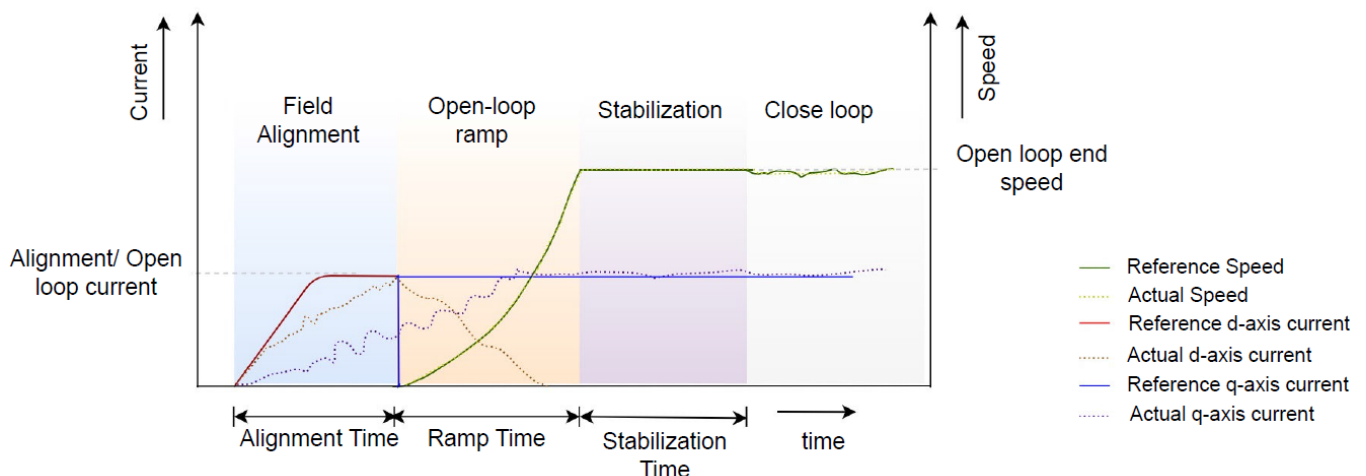
開ループ起動プロセスでは、速度ループを無効にします。電流は、 dq 参照フレーム内で直接制御されます。この時、変換用に仮のロータ位置が使われます。

完全な起動プロセスは、以下のフェイズに分割可能です。

- **初期位置アライメント:** このフェイズでは、DC 電流をステータ相巻き線に印加する事により、PMSM ロータを指定された位置にロックします。これには、2 通りの方法(d 軸アライメントと q 軸アライメント)があります。図 3-1 は d 軸アライメントを示しています。この場合、ロータ位置角度を固定するために、d 軸電流を指定した値まで徐々に増加させます。
- **開ループ立ち上げ:** このフェイズでは、ユーザが定義した立ち上げ時間中に、指定された q 軸電流にてロータ速度が増加し続け、逆起電力オブザーバの最小要求速度に達します。最小立ち上げ時間および速度は、PMSM 駆動の電気的および数学的パラメータによって決まります。確実な起動を実現するため、立ち上げ時間と参照電流を適正に調整する必要があります。
- **安定化:** このフェイズでは、PMSM は一定の開ループ速度で回転できます。このフェイズにより、閉ループモードへの円滑な移行が確保されます。

完全な起動プロセスを図 3-1 に示します。

図 3-1. 開ループ起動プロセス

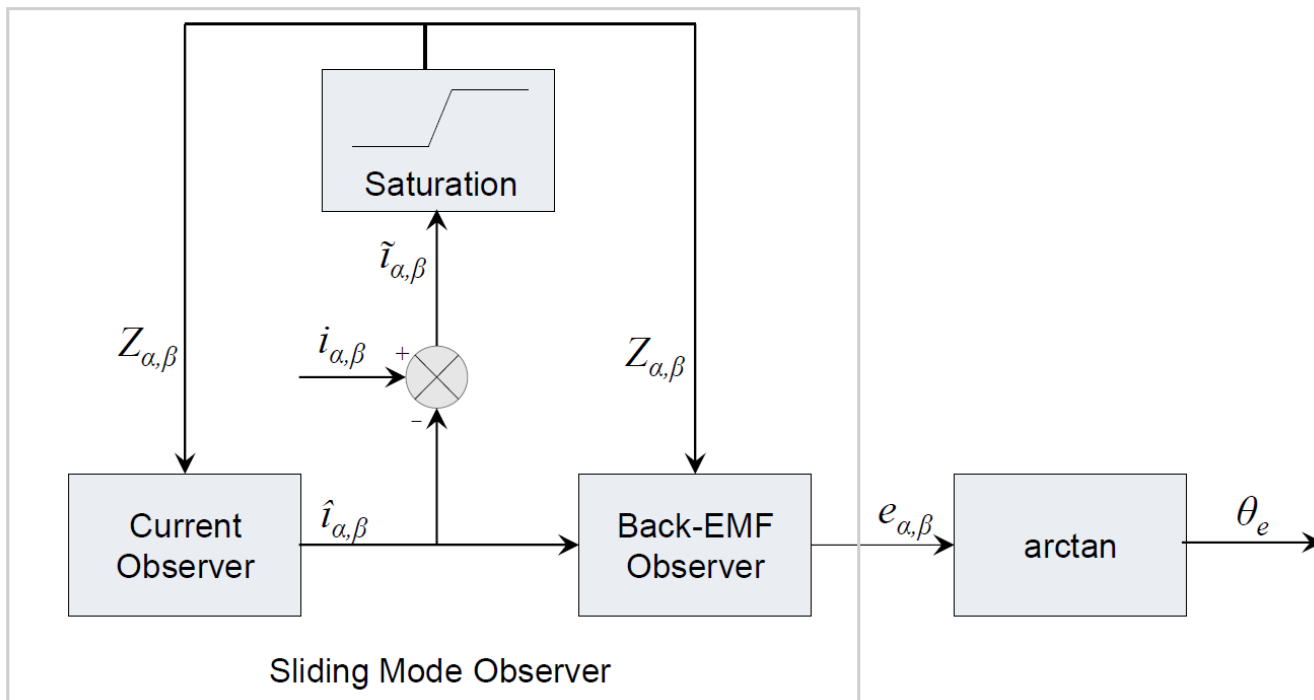


3.2 スライディングモードオブザーバ(SMO)

スライディングモードオブザーバ(SMO)は非線形オブザーバに属し、計測された入力と出力に基づいて観測可能システムの内部状態を推定するために使われます。本書の応用例では、PMSMの逆起電力を推定するためにSMOを使います。通常の線形オブザーバを使った逆起電力ベース位置/速度推定法に比べた場合、SMOは未知の信号と不確実性が存在する状況での信頼性に優れています。

SMOは、PMSMシステムモデル、電圧、電流ベクトル入力を使って逆起電力を推定します。図3-2に、SMOに基づくロータ位置/速度推定法の概略ブロック図を示します。

図3-2. スライディングモードオブザーバに基づく角度計算



以下に、PMSMの状態空間モデルを表す一連の式を示します。

式 3-1. 電流状態空間

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_\alpha \\ \dot{i}_\beta \end{bmatrix} = -\frac{R_s}{L_s} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} - \frac{1}{L_s} \begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix} + \frac{1}{L_s} \begin{bmatrix} U_\alpha \\ U_\beta \end{bmatrix}$$

式 3-2. 逆起電力状態空間

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_\alpha \\ \dot{e}_\beta \end{bmatrix} = w_e \mathbf{J} \begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix}$$

オブザーバは下式により表現可能です。

式 3-3. スライディングモード電流オブザーバ

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{i}}_\alpha \\ \dot{\hat{i}}_\beta \end{bmatrix} = -\frac{R_s}{L_s} \begin{bmatrix} \hat{i}_\alpha \\ \hat{i}_\beta \end{bmatrix} - \frac{1}{L_s} \begin{bmatrix} \hat{e}_\alpha \\ \hat{e}_\beta \end{bmatrix} + \frac{1}{L_s} \begin{bmatrix} \hat{U}_\alpha \\ \hat{U}_\beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \sigma(i_\alpha - \hat{i}_\alpha) \\ \sigma(i_\beta - \hat{i}_\beta) \end{bmatrix}$$

式 3-4. 逆起電力オブザーバ

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{e}}_\alpha \\ \dot{\hat{e}}_\beta \end{bmatrix} = w_e \mathbf{J} \begin{bmatrix} \hat{e}_\alpha \\ \hat{e}_\beta \end{bmatrix} - \mathbf{L} \begin{bmatrix} \sigma(i_\alpha - \hat{i}_\alpha) \\ \sigma(i_\beta - \hat{i}_\beta) \end{bmatrix}$$

- Σ : スライディング関数
- L : 逆起電力オブザーバ極配置行列

これらの式から、推定誤差は下式により表現できます。

式 3-5. 電流推定誤差ダイナミクス

$$\begin{bmatrix} \tilde{i}_a \\ \tilde{i}_\beta \end{bmatrix}' = -\frac{R_s}{L_s} \begin{bmatrix} \tilde{i}_a \\ \tilde{i}_\beta \end{bmatrix} - \frac{1}{L_s} \begin{bmatrix} \tilde{e}_a \\ \tilde{e}_\beta \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \sigma(i_a - \hat{i}_a) \\ \sigma(i_\beta - \hat{i}_\beta) \end{bmatrix}$$

式 3-6. 逆起電力推定誤差ダイナミクス

$$\begin{bmatrix} \tilde{e}_a \\ \tilde{e}_\beta \end{bmatrix}' = w_e \mathbf{J} \begin{bmatrix} \tilde{e}_a \\ \tilde{e}_\beta \end{bmatrix} + \mathbf{L} \begin{bmatrix} \sigma(i_a - \hat{i}_a) \\ \sigma(i_\beta - \hat{i}_\beta) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \tilde{i}_a \\ \tilde{i}_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_a - \hat{i}_a \\ i_\beta - \hat{i}_\beta \end{bmatrix} : \text{電流推定誤差}$$

$$\begin{bmatrix} \tilde{e}_a \\ \tilde{e}_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_a - \hat{e}_a \\ e_\beta - \hat{e}_\beta \end{bmatrix} : \text{逆起電力推定誤差}$$

スライディング関数 σ は、スライディング条件が保証されるよう、推定誤差の不連続関数となるように設計され、システム状態は有限時間でゼロに固定されます。本書では、以下のスライディングモード関数を使います。

式 3-7. スライディングモード関数

$$\sigma(x) = \begin{cases} \frac{mx}{\varphi} & \text{if } |x| < \varphi \\ m, & \text{if } x \geq \varphi \\ -m & \text{if } x \leq -\varphi \end{cases}$$

スライディングモード関数内の m の値が十分に大きければスライディング条件が成立し、従って誤差ダイナミクスはゼロへと近付きます。これは以下を意味します。

$$\begin{bmatrix} \sigma(i_a - \hat{i}_a) \\ \sigma(i_\beta - \hat{i}_\beta) \end{bmatrix} \rightarrow -\frac{1}{L_s} \begin{bmatrix} \tilde{e}_a \\ \tilde{e}_\beta \end{bmatrix}$$

上式から、逆起電力オブザーバの誤差ダイナミクスは下式の通りに表せます。

式 3-8. スライディング条件成立後の逆起電力オブザーバ

$$\begin{bmatrix} \tilde{e}_a \\ \tilde{e}_\beta \end{bmatrix}' = \left(w_e \mathbf{J} - \frac{1}{L_s} \mathbf{L} \right) \begin{bmatrix} \tilde{e}_a \\ \tilde{e}_\beta \end{bmatrix}$$

安定した逆起電力オブザーバでは、行列 $\left(w_e \mathbf{J} - \frac{1}{L_s} \mathbf{L} \right)$ は負の固有値を持つ必要があります。言い換えると、固有値 λ に対して行列 L は以下の通りに決定できます。

$$w_e \mathbf{J} - \frac{1}{L_s} \mathbf{L} = \lambda \mathbf{I}$$

すなわち、

式 3-9. 逆起電力オブザーバ極配置行列

$$\mathbf{L} = -L_s(\lambda \mathbf{I} - w_e \mathbf{J})$$

3.3 ロータ角度の計算

ロータ位置は、以下の関係を使って、観測された逆起電力から求められます。

$$\theta_e = \tan^{-1}(e_\beta / e_a) - \text{sign}(w_e) \pi / 2$$

- $\text{sign}(w_e)$: 速度(w_e)に対する符号

3.4 ロータ速度の計算

ロータ速度は、観測されたロータ位置値を使って計算できます。下式の通りに、ロータ位置角度の変化量($\Delta\theta_e$)を使って移動平均フィルタにより速度が計算されます。

$$\theta_e(n) = \frac{1}{NT_s} \left[\Delta\theta_e(n) + \Delta\theta_e(n-1) + \dots + \Delta\theta_e(n-N+1) \right]$$

N : 移動平均フィルタ内のサンプル数

T_s : サンプルング時間

$\Delta\theta_e$: 電氣的ロータ位置の変化量

さらに、計算されたロータ速度に対して LPF (カットオフ周波数 = Θ_c)を適用する事で、結果に影響を及ぼす可能性のある有害な外乱を防ぎます。離散時間系での LPF(サンプルング時間 = T_s) は、下式の通りに実装できます。

$$\theta_{eFilt}(n) = (1 - \theta_c T_s) \theta_{eFilt}(n-1) + \theta_c T_s \theta_e(n)$$

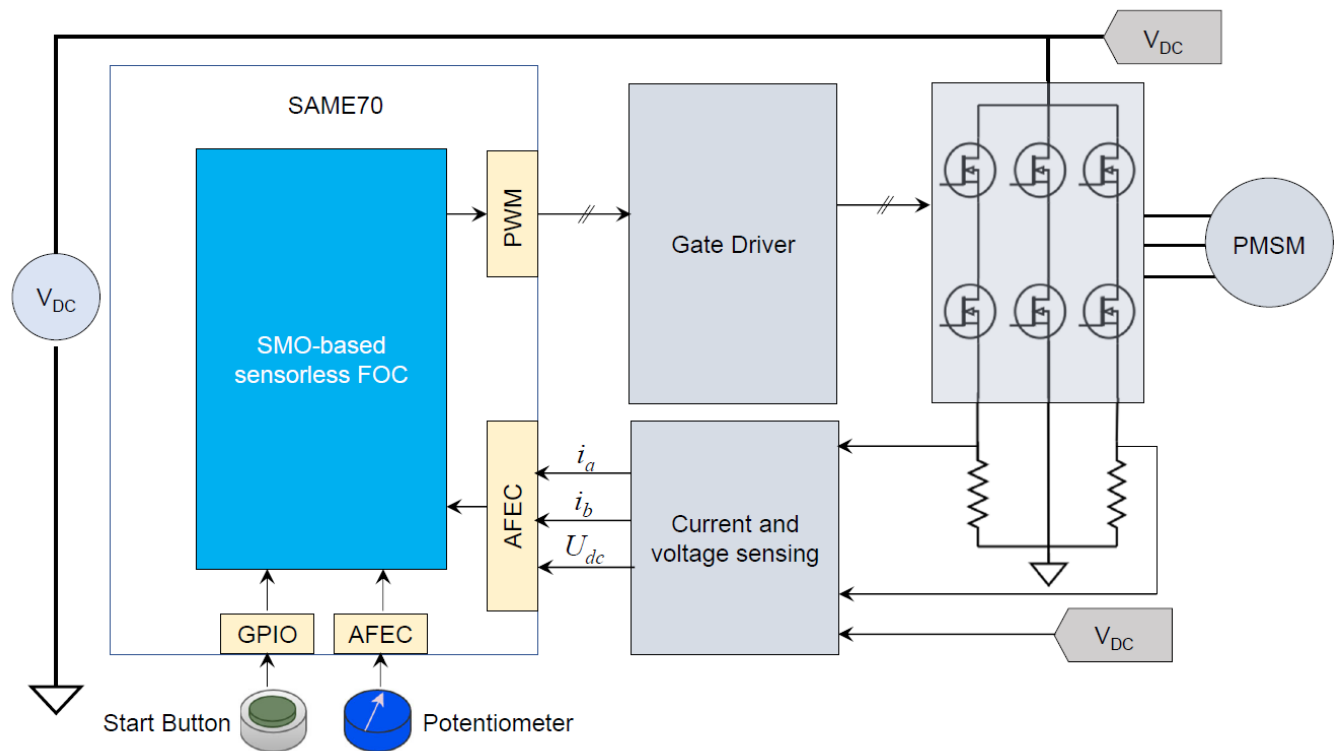
4. 磁界方向制御(FOC)の実装

Microchip 社は、極めて幅広いアプリケーションに対応するために 32 ビット マイクロコントローラを豊富に提供しており、それらはモータ制御アプリケーションにも広く採用されています。Microchip 社の 32 ビットモータ制御 MCU ポートフォリオの詳細は、「補遺」を参照してください。

以下では、SMO に基づくセンサレス FOC 実装の概要と、Microchip 社製 SAME70 MCU を使った実装例の詳細を説明します。実装の詳細は、他の Microchip 社製 32 ビット MCU にも応用可能です。

図 4-1 に、SMO に基づくセンサレス FOC PMSM 駆動の概略システムレベル図を示します。

図 4-1. SMO に基づくセンサレス FOC PMSM 駆動のシステムレベル図



4.1 SAME70 MCU の特長と周辺モジュールの設定

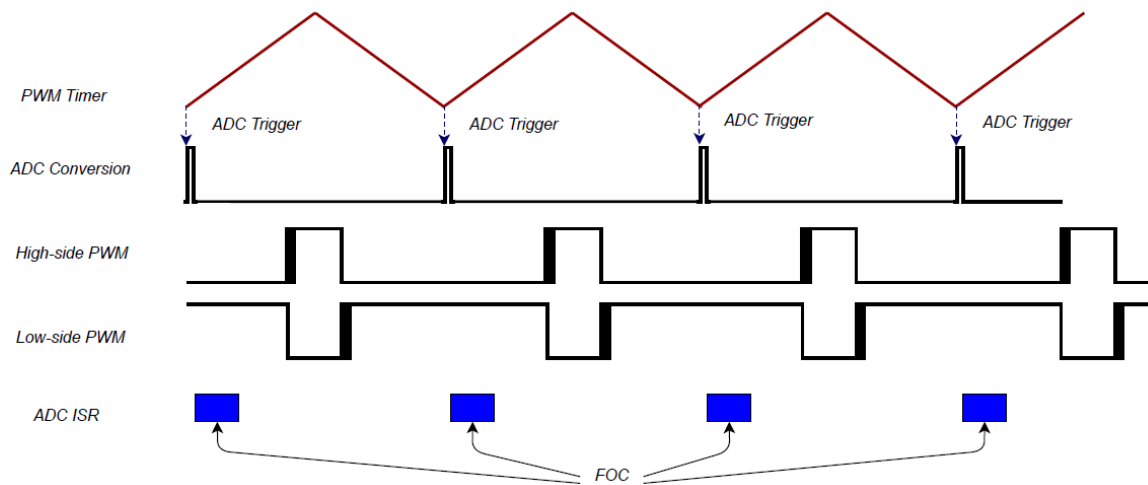
SAME70 マイクロコントローラは 300 MHz Arm Cortex-M7 コアと、高速 FOC に対応する最大 64 KB の密結合メモリおよび高性能アプリケーションをサポートする 2 MB フラッシュメモリを搭載しています。この MCU は、1 ペアのデュアル サンプル/ホールド(S/H)型 12 ビット ADC エンジン(12 ビットモードにて最大 2 MS/s でサンプリング可能)と、最大 8 つの PWM チャンネル (エッジアラインまたはセンターアライン モードでデッドタイムを持つ相補 PWM を生成可能)を備えています。詳細は SAME7x デバイスのデータシートを参照してください。

4.1.1 ハードウェアのタイミングと同期

最善のモータ制御性能を達成するために、磁界方向制御にはハードウェアおよびソフトウェア機能を正確なタイミングで実行する事が求められます。SAME70 MCU のモータ制御専用周辺モジュールは、最小限のユーザ設定で、これらのタイミング要件の処理をハードウェア レベルで可能にします。

図 4-2 に、ハードウェアのタイミングと同期を示します。

図 4-2. ハードウェアのタイミングと同期



マイクロコントローラの PWM 周辺モジュールは、これらの三相 PWM 信号を生成すると共に、周期一致イベントに基づいて ADC チャンネルを周期的にトリガします。トリガされた ADC チャンネルは、相電流 A と相電流 B を入力として取り込み、それらの信号をソフトウェアで処理するためにデジタル等価値に変換します。最善の性能を得るため、これらの相電流は同時にサンプリングされます。相電流に加えて、ソフトウェアは DC バス電圧も計測します。相電流の A/D 変換が完了した後に、割り込みが生成されます。生成された割り込みは、起動および後続の FOC タスクの実行用に使われます。計算された PWM サイクルは、モータを動作させるために PWM モジュール内で更新されます。

4.1.2 主なモータ制御用周辺モジュールの使用法

4.1.2.1 AFEC モジュール

AFEC (ADC)は、アナログ量を計測するために使われます。相電流 A、相電流 B、DC バス電圧、ポテンシオメータ値を計測するために 4 チャンネルが必要です。ADC は、PWM タイマが 0 に一致してからスイッチ遅延後にトリガされます。

4.1.2.2 PWM モジュール

このモジュールは、3 ペアの相補 PWM 信号を生成するために使われます。出力波形を非同期で OFF にするフォルト機能も有効にされます。

4.1.3 ソフトウェア アーキテクチャ

ソフトウェアは以下のタスクを実行します。

- マイクロコントローラとモータ制御周辺モジュールの初期化
- ADC ISR 内の FOC ステートマシン
- GPIO ボタンによるモータ起動および停止コマンド
- ポテンシオメータからのモータ速度コマンド

4.1.3.1 モータ制御周辺モジュールの初期化

パワーオン リセット(POR)時に、ソフトウェアはマイクロコントローラとモータ制御周辺モジュールをユーザ要件に従って初期化します。

4.1.3.2 モータ制御ステートマシン

ソフトウェアは、ADC ISR 内にモータ制御タスクを実装します。ADC ISR は以下のステートを含みます。

- **アイドル:** このステートではモータは回転しません。ソフトウェアは、ユーザが適切なボタンを押してモータの起動を要求するまで待機します。
- **起動:** このステートでは、ソフトウェアは「[起動プロセス](#)」で説明した PMSM 起動プロセスを実行します。
- **閉ループ速度制御:** このステートでは、ソフトウェアは SMO に基づくセンサレス FOC を実行します。

4.1.3.3 ポテンシオメータからのモータ速度コマンド

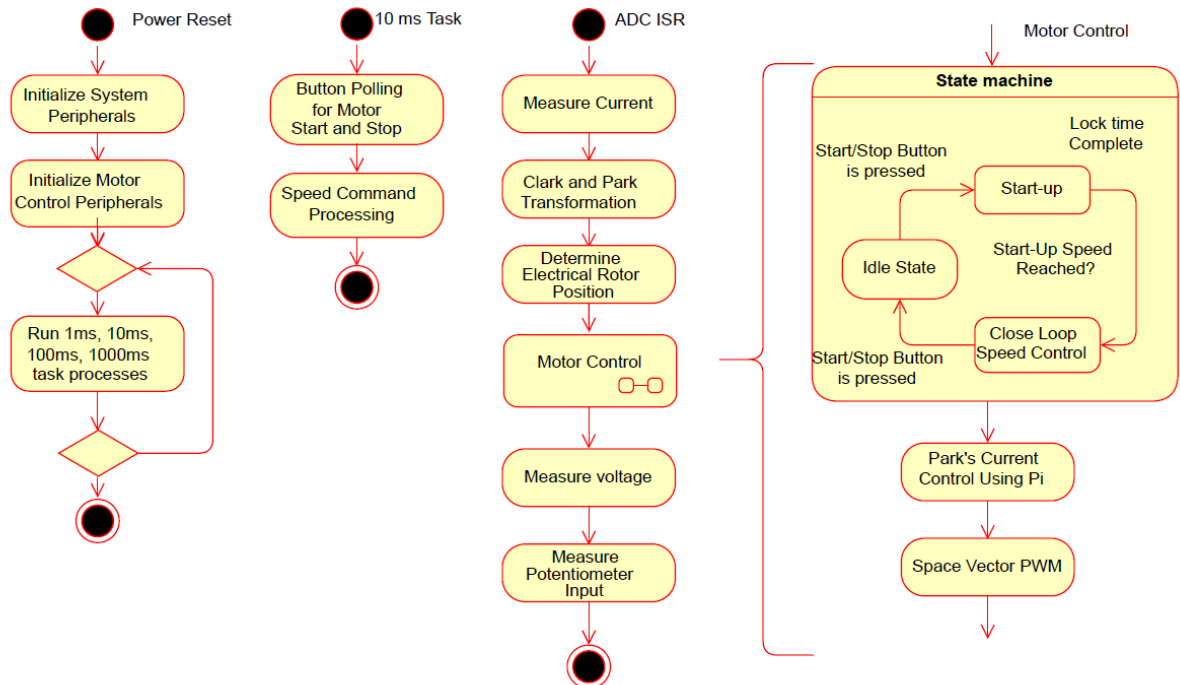
ソフトウェアは、計測されたポテンシオメータ入力から速度基準値を計算します。

4.1.3.4 GPIO ボタンによるモータの起動および停止コマンド

ソフトウェアは、10 ms 周期で GPIO ボタンをポーリングしてボタンの押し下げを検出します。ボタンの押し下げが検出されると、ソフトウェアはモータ制御ステートをアイドルから起動へ変更します。これにより、モータは指定された速度で回転し始めます。

図 4-3 に、サンプル プロジェクトのソフトウェア フローチャートを示します。

図 4-3. ソフトウェア フローチャート



5. まとめ

本書では、スライディング モード オブザーバに基づく磁界方向制御による PMSM 速度制御アプリケーションについて説明しました。

さらに、線形 PMSM モデルの背後にある理論的概念、起動プロセス、スライディング モード オブザーバによる位置/速度推定について説明しました。最後に、Microchip 社の SAME70 MCU を使ったサンプル アプリケーションのソフトウェア実装について説明しました。

SAME70 MCU と Microchip 社が提供するモータ制御ソフトウェアを使う事で、市場投入までの開発期間を大幅に短縮できます。

6. 補遺: モータ制御アプリケーション向け 32 ビット MCU アーキテクチャの特長

以下には、モータ制御アプリケーション向けの主要機能を備えた Microchip 社製 32 ビット MCU のポートフォリオを記載しています。詳細は各デバイスのデータシートを参照してください。

6.1 PIC32CM MC ファミリ

主な特長

- 48 MHz Arm® Cortex®-M0+ベース MCU (最大 128 KB フラッシュ)
- 最大 1 Msps の ADC
- デュアル 12 ビット ADC と 10 ビット DAC
- モータ制御 PWM
- モータ制御用 PDEC (Positional Decoder)
- アナログ コンパレータ
- 16 ビット $\Delta\Sigma$ 型 ADC
- 動作電圧: 2.7~5.5 V
- 除算および平方根アクセラレータ (DIVAS)
- TCC (制御用タイマ/カウンタ)モジュール - 産業用およびモータ制御用の専用タイマを提供

6.2 SAM D2x および C2x ファミリ

主な特長

- 48 MHz Arm Cortex-M0+ベース MCU (最大 256 KB フラッシュ)
- 最大 1 Msps の ADC
- 12 ビット DAC
- モータ制御 PWM
- アナログ コンパレータ
- CAN FD
- $\Delta\Sigma$ 型 ADC
- 5 V デバイス

6.3 SAM D5x および SAM E5x ファミリ

主な特長

- 120 MHz Arm Cortex-M4 ベース MCU (最大 1 MB フラッシュ)
- 最大 1 Msps の ADC
- モータ制御 PWM
- 12 ビット DAC
- アナログ コンパレータ
- CAN FD
- ポジション エンコーダ インターフェイス
- USB
- Ethernet

6.4 PIC32MK ファミリ

主な特長

- 120 MHz MIPS®コア (ライブ アップデート可能な最大 1 MB の ECC ありデュアルパネル フラッシュ)
- 7 x 12 ビット ADC: 3.75 Msps
- 最大 3 x 12 ビット DAC
- 5 x アナログ コンパレータ
- 最大 4 x CAN FD
- 直交エンコーダ インターフェイス(QEI)
- 最大 2 x フルスピード USB
- 4 x 高帯域幅オペアンプ
- 単精度および倍精度浮動小数点ユニット(FPU)と DSP 拡張サポート

6.5 SAM S70 および SAM E70 ファミリ

主な特長

- 300 MHz Arm Cortex-M7 ベース MCU (最大 2 MB フラッシュ)
- 最大 2 Msps の ADC
- モータ制御 PWM
- 12 ビット DAC
- アナログ コンパレータ
- CAN FD
- ポジション エンコーダ インターフェイス
- USB
- Ethernet
- TCM

7. 参考資料

- Speed Estimators, Flux Weakening and Efficient Use of SPMSM and IPMSM, 20089 MC7, Microchip MASTERS Conference 2016
- 以下の文書は、Microchip 社ウェブサイト(www.microchip.com) からダウンロードできます。
 - PIC32CM MC00 ファミリ データシート(DS60001638):
ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/PIC32CM-MC00-Family-Data-Sheet-DS60001638D.pdf
 - SAM C20/C21 ファミリ データシート(DS60001479):
ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/SAM-C20-C21-Family-Data-Sheet-DS60001479H.pdf
 - SAM D20 ファミリ データシート(DS60001504E):
ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/SAM-D20-Family-Data-Sheet-DS60001504E.pdf
 - SAM D21/DA1 ファミリ データシート(DS40001882H):
ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/SAM-D21-DA1-Family-Data-Sheet-DS40001882H.pdf
 - SAM D5x/E5x ファミリ データシート(DS60001507G):
ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/SAM_D5x_E5x_Family_Data_Sheet_DS60001507G.pdf
 - PIC32MK 汎用およびモータ制御(GP/MC)ファミリ データシート(DS60001402G):
ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/PIC32MK_GP_MC_Family_Datasheet_60001402G.pdf
 - SAM E70/S70/V70/V71 ファミリ データシート(DS60001527E):
ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/SAM-E70-S70-V70-V71-Family-Data-Sheet-DS60001527E.pdf
 - AN2520 - Sensorless Field Oriented Control (FOC) for a Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) Using a PLL Estimator and Equation-based Flux Weakening (FW) (DS:00002520C):
ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/Sensorless-FOC-For-PMSM-using-PLL-Estimator-FW-AN-DS00002520C.pdf
 - AN1292 - Sensorless Field Oriented Control (FOC) for a Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) Using a PLL Estimator and Field Weakening (FW) (DSDS01292A):
ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/01292A.pdf
 - AN908 - Using the dsPIC30F for Vector Control of an ACIM (DS00908B):
ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/00908B.pdf

Microchip 社ウェブサイト

Microchip 社はウェブサイト(www.microchip.com)を通してオンライン サポートを提供しています。当ウェブサイトでは、お客様に役立つ情報やファイルを簡単に見つけ出せます。以下を含む各種の情報をご覧になれます。

- **製品サポート** - データシートとエラッタ、アプリケーション ノートとサンプル プログラム、設計リソース、ユーザガイドとハードウェア サポート文書、最新のソフトウェアと過去のソフトウェア
- **技術サポート** - FAQ(よく寄せられる質問)、技術サポートのご依頼、オンライン ディスカッション グループ、Microchip 社のデザイン パートナー プログラムおよびメンバーリスト
- **ご注文とお問い合わせ** - 製品セレクトと注文ガイド、最新プレスリリース、セミナー/イベントの一覧、お問い合わせ先(営業所/正規代理店)の一覧

製品変更通知サービス

Microchip 社の製品変更通知サービスは、お客様に Microchip 社製品の最新情報をお届けする配信サービスです。ご興味のある製品ファミリまたは開発ツールに関する変更、更新、リビジョン、エラッタ情報をいち早くメールにてお知らせします。

<http://www.microchip.com/pcn> にアクセスし、登録手続きをしてください。

カスタマサポート

Microchip 社製品をお使いのお客様は、以下のチャンネルからサポートをご利用になれます。

- 正規代理店
- 技術サポート

サポートは販売代理店にお問い合わせください。各地の営業所もご利用になれます。本書の最後のページに各国の営業所の一覧を記載しています。

技術サポートは以下のウェブページからもご利用になれます。 www.microchip.com/support

Microchip 社のデバイスコード保護機能

Microchip 社製品のコード保護機能について以下の点にご注意ください。

- Microchip 社製品は、該当する Microchip 社データシートに記載の仕様を満たしています。
- Microchip 社では、通常の条件ならびに仕様に従って使った場合、Microchip 社製品のセキュリティ レベルは、現在市場に流通している同種製品の中でも最も高度であると考えています。
- Microchip 社はその知的財産権を重視し、積極的に保護しています。Microchip 社製品のコード保護機能の侵害は固く禁じられており、デジタル ミレニアム著作権法に違反します。
- Microchip 社を含む全ての半導体メーカーで、自社のコードのセキュリティを完全に保証できる企業はありません。コード保護機能とは、Microchip 社が製品を「解読不能」として保証するものではありません。コード保護機能は常に進歩しています。Microchip 社では、常に製品のコード保護機能の改善に取り組んでいます。

法律上の注意点

本書および本書に記載されている情報は、Microchip 社製品を設計、テスト、お客様のアプリケーションと統合する目的を含め、Microchip 社製品に対してのみ使用する事ができます。それ以外の方法でこの情報を使用する事はこれらの条項に違反します。デバイス アプリケーションの情報は、ユーザの便宜のためにのみ提供されるものであり、更新によって変更となる事があります。お客様のアプリケーションが仕様を満たす事を保証する責任は、お客様にあります。その他のサポートは Microchip 社正規代理店にお問い合わせ頂くか、www.microchip.com/en-us/support/design-help/client-support-services をご覧ください。

Microchip 社は本書の情報を「現状のまま」で提供しています。Microchip 社は、明示的、暗黙的、書面、口頭、法定のいずれであるかを問わず、本書に記載されている情報に関して、状態、品質、性能、商品性、特定目的への適合性をはじめとする、いかなる類の表明も保証も行いません。

いかなる場合も Microchip 社は、本情報またはその使用に関連する間接的、特殊的、懲罰的、偶発的、または必然的損失、損害、費用、経費のいかににかかわらず、また Microchip 社がそのような損害が生じる可能性について報告を受けていた場合あるいは損害が予測可能であった場合でも、一切の責任を負いません。法律で認められる最大限の範囲を適用しようとも、本情報またはその使用に関連する一切の申し立てに対する Microchip 社の責任限度額は、使用者が当該情報に関連して Microchip 社に直接支払った額を超えません。

Microchip 社の明示的な書面による承認なしに、生命維持装置あるいは生命安全用途に Microchip 社の製品を使用する事は全て購入者のリスクとし、また購入者はこれによって発生したあらゆる損害、クレーム、訴訟、費用に関して、Microchip 社は擁護され、免責され、損害をうけない事に同意するものとします。特に明記しない場合、暗黙的あるいは明示的を問わず、Microchip 社が知的財産権を保有しているライセンスは一切譲渡されません。

商標

Microchip 社の名称とロゴ、Microchip ロゴ、Adaptec、AnyRate、AVR、AVR ロゴ、AVR Freaks、BesTime、BitCloud、CryptoMemory、CryptoRF、dsPIC、flexPWR、HELDO、IGLOO、JukeBlox、KeeLoq、Kleer、LANCheck、LinkMD、maXStylus、maXTouch、MediaLB、megaAVR、Microsemi、Microsemi ロゴ、MOST、MOST ロゴ、MPLAB、OptoLyzer、PIC、picoPower、PICSTART、PIC32 ロゴ、PolarFire、Prochip Designer、QTouch、SAM-BA、SenGenuity、SpyNIC、SST、SST ロゴ、SuperFlash、Symmetricom、SyncServer、Tachyon、TimeSource、tinyAVR、UNI/O、Vectron、XMEGA は米国およびその他の国における Microchip Technology Incorporated の登録商標です。

AgileSwitch、APT、ClockWorks、The Embedded Control Solutions Company、EtherSynch、Flashtec、Hyper Speed Control、HyperLight Load、IntelliMOS、Libero、motorBench、mTouch、Powermite 3、Precision Edge、ProASIC、ProASIC Plus、ProASIC Plus ロゴ、Quiet-Wire、SmartFusion、SyncWorld、Temux、TimeCesium、TimeHub、TimePictra、TimeProvider、TrueTime、WinPath、ZL は米国における Microchip Technology Incorporated の登録商標です。

Adjacent Key Suppression、AKS、Analog-for-the-Digital Age、Any Capacitor、AnyIn、AnyOut、Augmented Switching、BlueSky、BodyCom、CodeGuard、CryptoAuthentication、CryptoAutomotive、CryptoCompanion、CryptoController、dsPICDEM、dsPICDEM.net、Dynamic Average Matching、DAM、ECAN、Espresso T1S、EtherGREEN、GridTime、IdealBridge、In-Circuit Serial Programming、ICSP、INICnet、Intelligent Paralleling、Inter-Chip Connectivity、JitterBlocker、Knob-on-Display、maxCrypto、maxView、memBrain、Mindi、MiWi、MPASM、MPF、MPLAB Certified ロゴ、MPLIB、MPLINK、MultiTRAK、NetDetach、NVM Express、NVMe、Omniscient Code Generation、PICDEM、PICDEM.net、PICKit、PICtail、PowerSmart、PureSilicon、QMatrix、REAL ICE、Ripple Blocker、RTAX、RTG4、SAM-ICE、Serial Quad I/O、simpleMAP、SimpliPHY、SmartBuffer、SmartHLS、SMART-I.S.、storClad、SQI、SuperSwitcher、SuperSwitcher II、Switchtec、SynchroPHY、Total Endurance、TSHARC、USBCheck、VariSense、VectorBlox、VeriPHY、ViewSpan、WiperLock、XpressConnect、ZENA は米国およびその他の国における Microchip Technology Incorporated の商標です。

SQTP は米国における Microchip Technology Incorporated のサービス マークです。

Adaptec ロゴ、Frequency on Demand、Silicon Storage Technology、Symmcom、Trusted Time はその他の国における Microchip Technology Incorporated の登録商標です。

GestIC は、米国以外の国における Microchip Technology Inc.の子会社である Microchip Technology Germany II GmbH & Co. KG の登録商標です。

その他の商標は各社に帰属します。

© 2023, Microchip Technology Incorporated and its subsidiaries. All Rights Reserved.

ISBN: 978-1-6683-2571-1/978-1-5224-9691-5

品質管理システム

Microchip 社の品質管理システムについては www.microchip.com/quality をご覧ください。

各国の営業所とサービス

北米

本社

2355 West Chandler Blvd.
Chandler, AZ 85224-6199
Tel:480-792-7200
Fax:480-792-7277
技術サポート：
<http://www.microchip.com/support>
URL:
www.microchip.com

アトランタ

Duluth, GA
Tel:678-957-9614
Fax:678-957-1455

オースティン、TX

Tel:512-257-3370

ボストン

Westborough, MA
Tel:774-760-0087
Fax:774-760-0088

シカゴ

Itasca, IL
Tel:630-285-0071
Fax:630-285-0075

ダラス

Addison, TX
Tel:972-818-7423
Fax:972-818-2924

デトロイト

Novi, MI
Tel:248-848-4000

ヒューストン、TX

Tel:281-894-5983

インディアナポリス

Noblesville, IN
Tel:317-773-8323
Fax:317-773-5453
Tel:317-536-2380

ロサンゼルス

Mission Viejo, CA
Tel:949-462-9523
Fax:949-462-9608
Tel:951-273-7800

ローリー、NC

Tel:919-844-7510

ニューヨーク、NY

Tel:631-435-6000

サンノゼ、CA

Tel:408-735-9110
Tel:408-436-4270

カナダ - トロント

Tel:905-695-1980
Fax:905-695-2078

アジア / 太平洋

オーストラリア - シドニー

Tel:61-2-9868-6733

中国 - 北京

Tel:86-10-8569-7000

中国 - 成都

Tel:86-28-8665-5511

中国 - 重慶

Tel:86-23-8980-9588

中国 - 東莞

Tel:86-769-8702-9880

中国 - 広州

Tel:86-20-8755-8029

中国 - 杭州

Tel:86-571-8792-8115

中国 - 香港 SAR

Tel:852-2943-5100

中国 - 南京

Tel:86-25-8473-2460

中国 - 青島

Tel:86-532-8502-7355

中国 - 上海

Tel:86-21-3326-8000

中国 - 瀋陽

Tel:86-24-2334-2829

中国 - 深圳

Tel:86-755-8864-2200

中国 - 蘇州

Tel:86-186-6233-1526

中国 - 武漢

Tel:86-27-5980-5300

中国 - 西安

Tel:86-29-8833-7252

中国 - 厦門

Tel:86-592-2388138

中国 - 珠海

Tel:86-756-3210040

アジア / 太平洋

インド - バンガロール

Tel:91-80-3090-4444

インド - ニューデリー

Tel:91-11-4160-8631

インド - プネ

Tel:91-20-4121-0141

日本 - 大阪

Tel:81-6-6152-7160

日本 - 東京

Tel:81-3-6880-3770

韓国 - 大邱

Tel:82-53-744-4301

韓国 - ソウル

Tel:82-2-554-7200

マレーシア - クアラルンプール

Tel:60-3-7651-7906

マレーシア - ペナン

Tel:60-4-227-8870

フィリピン - マニラ

Tel:63-2-634-9065

シンガポール

Tel:65-6334-8870

台湾 - 新竹

Tel:886-3-577-8366

台湾 - 高雄

Tel:886-7-213-7830

台湾 - 台北

Tel:886-2-2508-8600

タイ - バンコク

Tel:66-2-694-1351

ベトナム - ホーチミン

Tel:84-28-5448-2100

ヨーロッパ

オーストリア - ヴェルス

Tel:43-7242-2244-39
Fax:43-7242-2244-393

デンマーク - コペンハーゲン

Tel:45-4485-5910
Fax:45-4485-2829

フィンランド - エスポー

Tel:358-9-4520-820

フランス - パリ

Tel:33-1-69-53-63-20
Fax:33-1-69-30-90-79

ドイツ - ガーヒング

Tel:49-8931-9700

ドイツ - ハーン

Tel:49-2129-3766400

ドイツ - ハイムブロン

Tel:49-7131-72400

ドイツ - カールスルーエ

Tel:49-721-625370

ドイツ - ミュンヘン

Tel:49-89-627-144-0
Fax:49-(89-627)-144/-44

ドイツ - ローゼンハイム

Tel:49-8031-354-560

イスラエル - ラーナナ

Tel:972-9-744-7705

イタリア - ミラノ

Tel:39-0331-742611
Fax:39-0331-466781

イタリア - パドヴァ

Tel:39-049-7625286

オランダ - ドリュエーン

Tel:31-416-690399
Fax:31-416-690340

ノルウェー - トロンハイム

Tel:47-7288-4388

ポーランド - ワルシャワ

Tel:48-22-3325737

ルーマニア - ブカレスト

Tel:40-21-407-87-50

スペイン - マドリッド

Tel:34-91-708-08-90
Fax:34-91-708-08-91

スウェーデン - ヨーテボリ

Tel:46-31-704-60-40

スウェーデン - ストックホルム

Tel:46-8-5090-4654

イギリス - ウォーキングム

Tel:44-118-921-5800
Fax:44-118-921-5820