

## dsPIC33CK を使った 3 相 BLDC モータのセンサ付き ( ホール効果センサベース ) 界磁制御

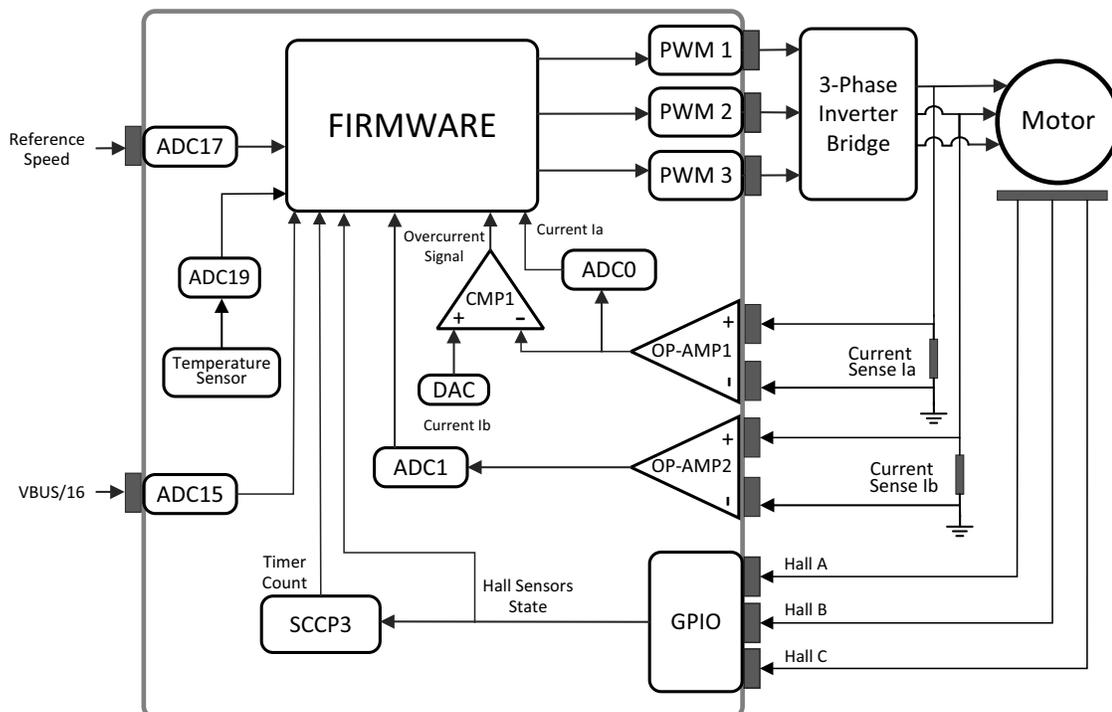
Author: Maria Loida Canada

### はじめに

現在の BLDC モータはその構造から永久磁石式同期モータと同じように制御できます。これは、FOC( 界磁制御 ) と呼ばれる高度な技術を BLDC モータにも適用できる事を意味します。FOC アルゴリズムは、トルクと磁束を分離して扱う事で高速で動的な応答を必要とするアプリケーションに役立ちます。センサベース FOC は低速時にロータ位置を確定する必要がある場合に有利です。

本書では、Microchip Technology 社の 16 ビット dsPIC33CK DSC を使った 3 相 BLDC モータ用のホール効果センサベース FOC アルゴリズムの実装について説明します。DSP エンジンで数値計算と変換を実行すると同時に PWM、SCCP、オペアンプ、DAC 付きコンパレータ等の周辺モジュールが実装をシンプルにし、システム全体の部品点数を減らす事ができます。下図に、このソリューションのブロック図を示します。

図 1: システムブロック図

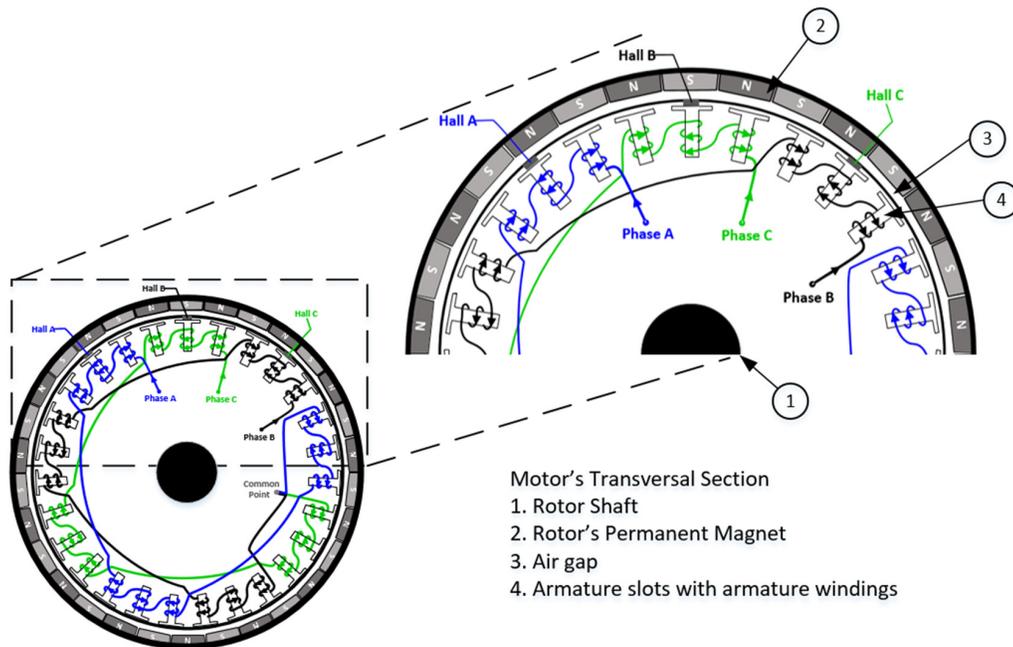


## 1.0 センサ付き BLDC の界磁制御

界磁制御はロータとステータの磁場を 90 度に維持する整流方式で、モータによる最大トルクの生成、そして負荷変動中の速度 / トルクの調整が可能です。FOC は磁束 (ステータ、ロータ、エアギャップ) を制御対象とします。電流のトルク生成成分と磁束生成成分を分離するためにステータ、ロータ、エアギャップのいずれかをそれ以外の量の参照フレームとして使います。他励 DC モータ同様、分離によって 3 相モータを容易に制御できます。これは、アーマチュア電流がトルク生成を担い、励磁電流が磁束生成を担う事を意味します。本アプリケーションではロータ磁束を参照フレームとして使います。

エアギャップ磁束は、ロータの磁束鎖交数の合計 (永久磁石によって生成される磁束鎖交数とステータ電流によって生成されるアーマチュア応答磁束鎖交数の合計) です。このモータのエアギャップ磁束は平滑であり、逆起電力 (BEMF) は正弦波状です。この制御方式は、電動スクーターのハブモータとして使われるセンサ付き BLDC モータ向けに作成されました。下図に、このモータの断面図を示します。

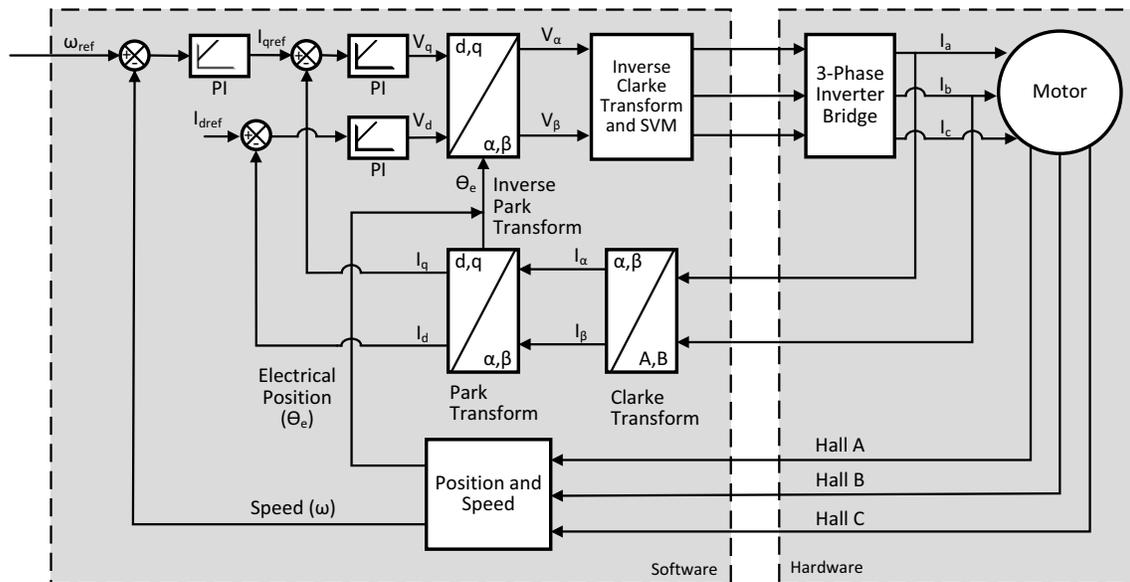
図 2: モータの断面図



精密な制御、または低速度で高トルクを生成する必要があるアプリケーションではセンサ付き制御が適しています。センサ付き FOC ではエンコーダ、レゾルバ、ホール効果センサのいずれかを使ってロータ位置と速度を求めます。本書では、電動スクーターのハブモータ駆動をアプリケーションとして想定したホール効果センサベースの実装を説明します。

## 2.0 センサ付き FOCの ブロック図

図 3: FOCの ブロック図



上図の制御プロセスは以下のように要約できます。

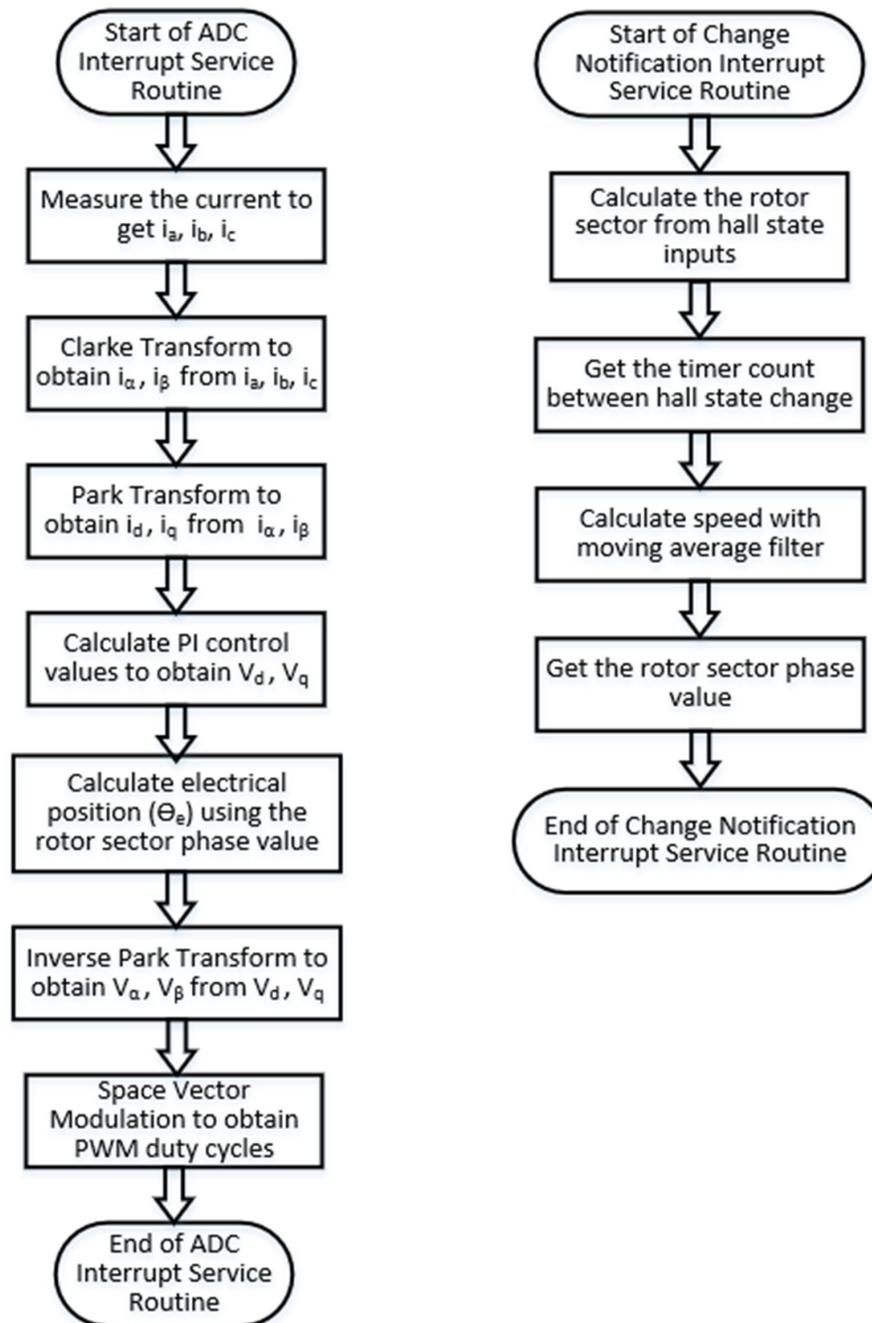
- 3相ステータ電流を計測します。平衡3相巻き線モータでは2相電流のみを計測すれば十分です。3番目の電流は下式で求められます。 $i_a + i_b + i_c = 0$
- Clarke変換: 3相電流を2軸静止系に変換します。この変換によって、計測値  $i_a$  および  $i_b$  から変数  $i_d$  および  $i_q$  が得られます。 $i_d$  および  $i_q$  値は、ステータからみた直交座標系で時間変化します。
- とした方が自然だと思います。
- Park変換: 2軸固定座標系を、直近の制御ループで計測されたロータ磁束の回転角度に一致するように座標を回転させます。この変換によって  $i_d$  と  $i_q$  から変数  $i_d$  および  $i_q$  が得られます。変数  $i_d$  および  $i_q$  は回転座標系に変換された直交電流です。定常状態では、 $i_d$  と  $i_q$  は一定の値です。
- 電流の参照値は以下の通りに定義されます。
  - $i_d$  参照値: ロータの磁束を制御します
  - $i_q$  参照値: モータのトルク出力を制御します
- 各誤差信号がPIコントローラに入力されます。コントローラから電圧ベクトル  $v_d$  および  $v_q$  が出力され、モータに印加されます。
- ホール効果センサの状態に基づいて新しい変換角度が計測および計算されます。この新しい角度に基づいて、FOCアルゴリズムは次周期の電圧ベクトルを決定します。
- 逆Park変換: PIコントローラからの出力値  $v_d$  および  $v_q$  を、新しい角度を用いて回転させて静止参照フレームに戻します。この計算により、後続の直交電圧値  $v_d$  および  $v_q$  が得られます。
- 逆Clarke変換とSVM:  $v_d$  および  $v_q$  値を使って、要求電圧ベクトルを生成する新しいPWMデューティサイクルを計算します。
- 回転速度 ( $\omega$ ) は、PWMサイクルの後に発生するホール信号の状態が変化する毎に計算されます。

FOCファームウェアは、PWMスイッチング周波数と同じレートで動作するADC割り込みサービ斯拉ーチン(ISR)に実装します。

## 3.0 センサ付き FOC のフローチャート

下図のフローチャートに、ソフトウェアにおける FOC と同等のシーケンシャル ルーチン、速度とロータ位置の計測に使われる状態変化通知ルーチンを示します。このソリューションのソースコードは補遺 A: 「ソースコード」に記載しています。

図 4: フローチャート



## 4.0 PIコントローラ

### 4.1 PIコントローラの基礎

本書では、PI(比例積分)コントローラの詳細は説明しません。ただし、PI動作の基礎について以下で簡単に説明します。PIコントローラは閉制御ループ内の誤差信号に応答し、制御量を調整して要求されたシステム応答を実現するものです。制御対象のパラメータは速度、磁束等、計測可能なシステム量です。PIコントローラの利点は、ゲイン値を変化させてシステム応答の変化を観察する事でコントローラを経験的に調整できる事です。

デジタルPIコントローラは一定のサンプリング間隔で実行します。システム制御の前提はコントローラによる高頻度の制御実行です。誤差信号は、制御対象パラメータの計測値から要求値を減算したものです。誤差の符号は制御入力が必要な変化の方向を示します。

PIコントローラのP(比例)項は誤差信号に「P」ゲインを乗算したものです。これにより誤差量に基づく関数としての制御応答を生成します。誤差信号が大きいほどコントローラの「P」項が大きくなり、補正量も増大します。

時間が経過するにつれて「P」項の効果は誤差を減少させます。これに伴い誤差がゼロに近づくにつれ、「P」項の効果が薄れます。P制御のみでは誤差がゼロに近くなっても完全に収束する事はありません。わずかな定常誤差が残ります。

コントローラの「I」(積分)項は、この定常誤差を取り除くために使います。「I」項は誤差信号の累積和を計算します。従って、時間が経過するにつれて定常誤差が累積し、大きな誤差値となります。この累積誤差信号に「I」ゲイン係数を乗算したものがPIコントローラの「I」出力項です。

### 4.2 PIゲインの調整

PIコントローラの「P」ゲインはシステム全体の応答性を決めます。コントローラの調整では、まず「I」ゲインを0に設定します。次に、過剰なオーバーシュートまたは発振を起こさずに設定点の変更に追従するまで「P」ゲインを大きくします。「P」ゲインの値を小さくするとシステムの制御は緩慢となり、大きくすると急峻となります。この時点では設定点に対して収束しないでしょう。

「P」ゲインが決まったら、今度は「I」ゲインを少しずつ大きくしていき誤差がゼロになるようにします。ほとんどの場合、必要な「I」ゲインの量はごくわずかです。「I」ゲインが大きすぎると「P」項の影響を上回って制御応答を鈍化させ、設定点近傍でシステムを発振させる事があります。もし発振する場合、通常は「I」ゲインを小さくして「P」ゲインを大きくすれば解決します。

本アプリケーションでは、積算誤差が出力パラメータを飽和させた場合に発生する積分器ウィンドアップを制限する項を含めています。積算誤差がそれ以上大きくなっても出力に影響しません。累積誤差は、減少する際には出力飽和を引き起こした値を下回るまで減少(アンwind)する必要があります。

本アプリケーションには、3つのインタラクティブな変数を制御する3つのPI制御ループが存在します。外側のループはロータ速度を制御し、内側の2つのループはロータの磁束とモータのトルクを制御します。

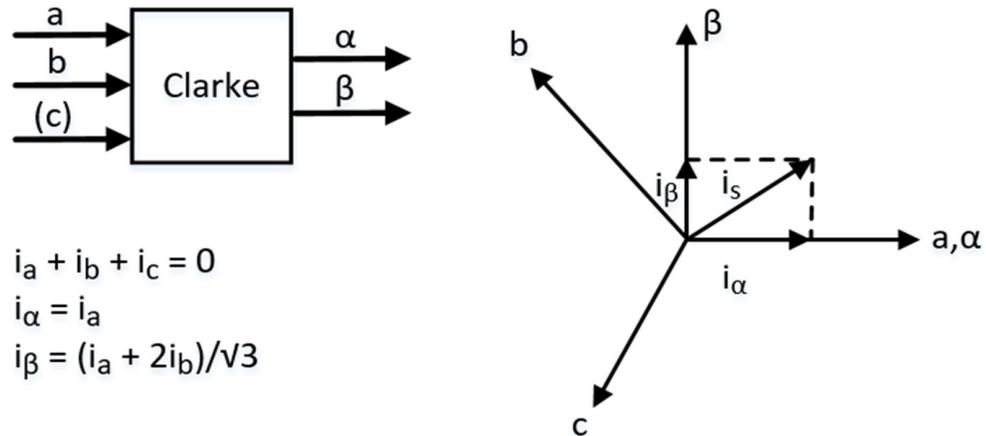
## 5.0 座標変換

座標変換を利用すると、トルクと磁束の時不変値を従来のPI制御ループで間接的に求めて制御できます。このプロセスではまず3相モータ電流を計測します。実際には、3相平衡巻線により3つの電流の瞬時値の合計はゼロです。従って、3相電流のうち2相を計測すれば3相目が求まります。つまり3番目の電流センサは不要で、ハードウェアのコストを低減できます。

### 5.1 Clarke 変換

Clarke変換は、ステータを基準とする3軸(2次元)座標系から2軸静止座標系に数量を変換します。

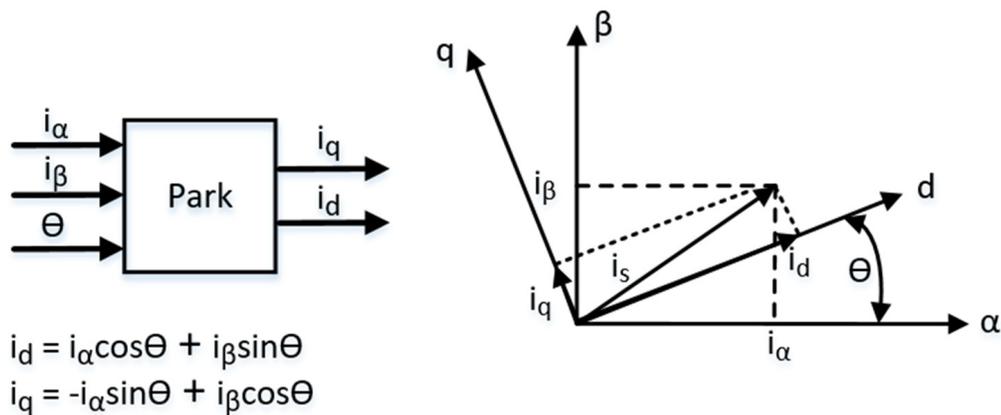
図5: CLARKE変換



### 5.2 Park 変換

Park変換は、2軸静止座標系からロータの磁束に従って回転する2軸回転座標系に数量を変換します。シータ(θ)は固定基準フレームからのロータ磁束の角度です。

図6: PARK変換



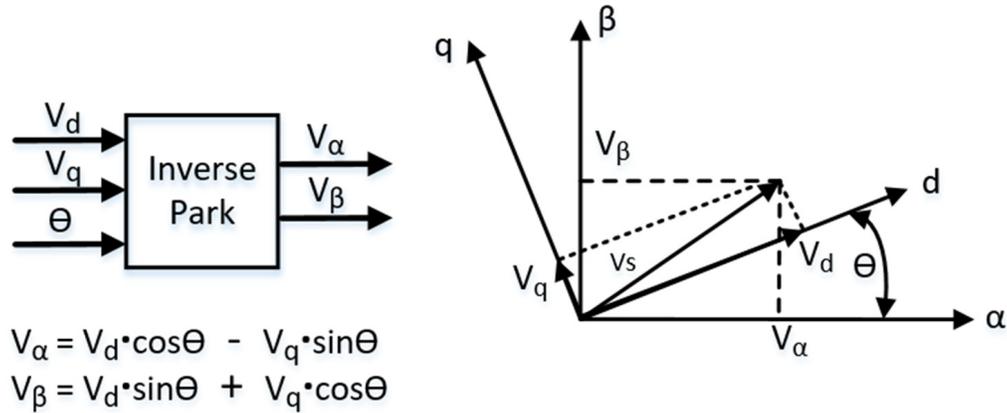
$$i_d = i_\alpha \cos\theta + i_\beta \sin\theta$$

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

### 5.3 逆 Park 変換

逆 Park 変換は、ロータの磁束に従って回転する 2 軸回転座標系から 2 軸静止座標系に数量を変換します。

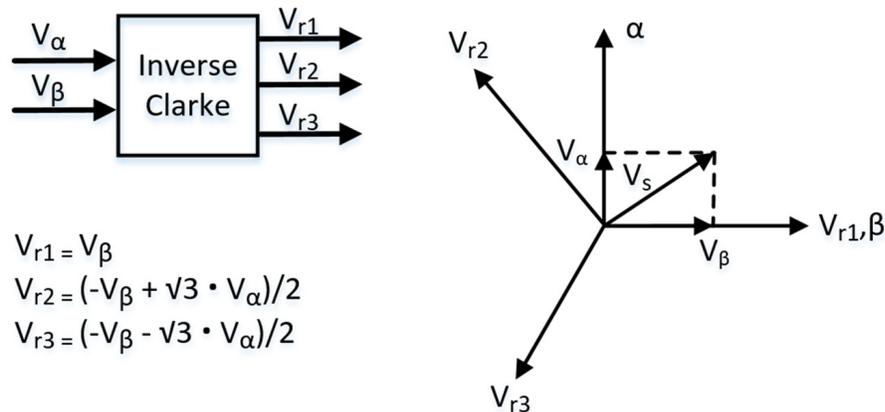
図 7: 逆 PARK 変換



### 5.4 逆 Clarke 変換

逆 Clarke 変換は、2 軸静止座標系からステータを基準とする 3 軸 (2 次元) 座標系に数量を変換します。SVPWM の実装をシンプルにするために、アルファ ( $\alpha$ ) 軸とベータ ( $\beta$ ) 軸を従来の逆 Clarke 変換の軸と入れ替えています。これについては次のセクションで詳しく説明します。

図 8: 逆 CLARKE 変換



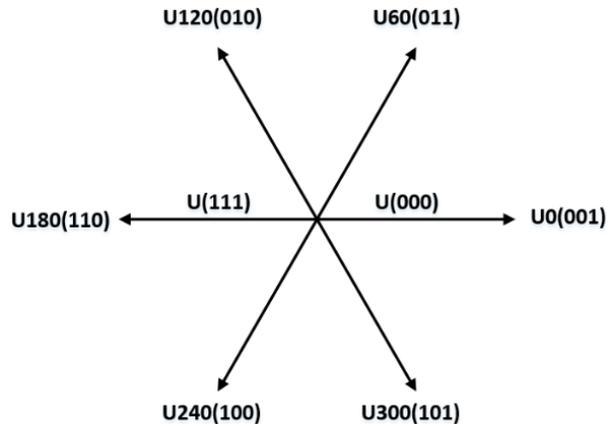
## 6.0 空間ベクトルパルス幅変調 (SVPWM)

ベクトル制御プロセスの最後の手順は 3 相モータ電圧のパルス幅変調信号を生成する事です。SVM(空間ベクトル変調)方式を使うと、3相それぞれのパルス幅を生成するプロセスは簡単な式で表せます。この実装では、逆 Clarke 変換を SVM ルーチンに畳み込み、計算をさらに簡略化しています。

3つのインバータ出力は2つの状態のいずれかをとりまします。インバータ出力はプラス (+) バスレールまたはマイナス (-) バスレールのどちらにも接続できるため、 $2^3 = 8$  通りの出力状態が可能です。

3つの出力全てがプラス (+) バスまたはマイナス (-) バスのどちらかに接続されている2つの状態は、どの相にもライン間電圧がないため NULL 状態と見なせます。この2つの状態は SVM スターの原点にプロットされます。残りの6つの状態は、隣接する状態との間に60度の位相差があるベクトルとして表します。

図 9: 3相インバータの空間ベクトル



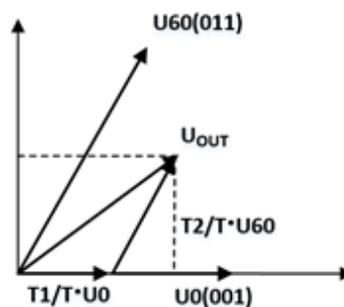
SVMのプロセスでは、全ての合成ベクトルを2つの隣接ベクトルの成分の和で表現できます。下図では  $U_{OUT}$  が目的の合成ベクトルです。 $U_{OUT}$  が位置しているのは  $U_{60}$  と  $U_0$  の間の領域です。PWM 周期  $T$  において  $U_0$  が  $T_1/T$  の出力、 $U_{60}$  が  $T_2/T$  の出力である場合、この周期  $T$  の電圧は  $U_{OUT}$  です。

図 10: 平均 SVPWM

$$T_0 = \text{Null Vector}$$

$$T = T_1 + T_2 + T_0 = \text{PWM Period}$$

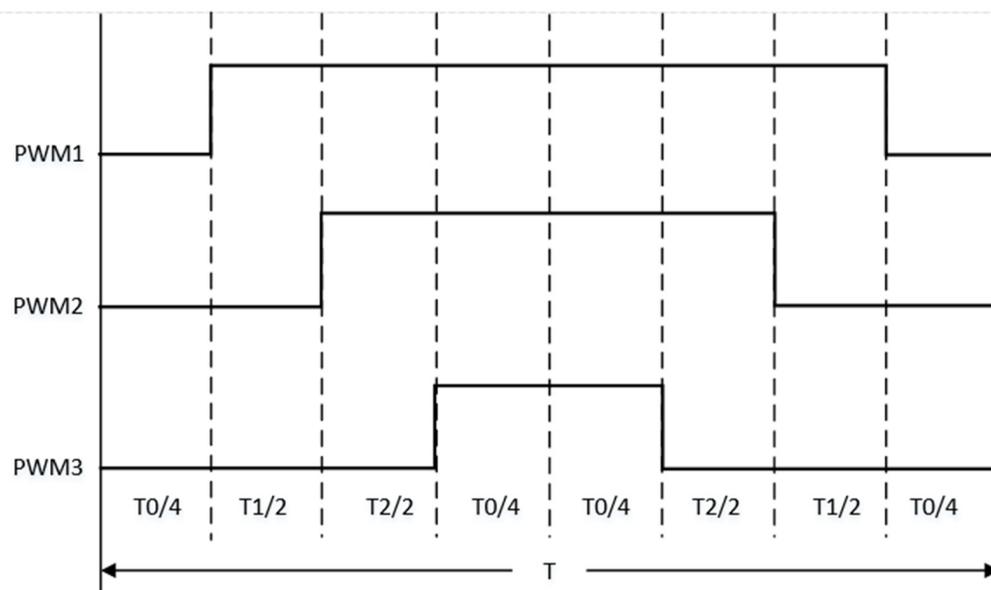
$$U_{OUT} = (T_1/T \cdot U_0) + (T_2/T \cdot U_{60})$$



$T_0$  は有効な電圧が巻き線に印加されていない時間、つまり NULL ベクトルが印加されている時間を表します。 $T_1$  と  $T_2$  は逆 Clark 変換改で求める事ができます。 $V_\alpha$  と  $V_\beta$  を逆にした場合、SVM スターから 30 度ずれた参照軸が生成されます。この結果、6つの各セグメントにおいて1つのセグメントに完全に正対する1つの軸があり、他の2つの軸に対して対称配置のセグメント境界を構成します。これらの2本の境界軸に沿ったベクトル成分の値は  $T_1$ 、 $T_2$  と同じです。スイッチング周期  $T$  の残りの時間  $T_0$  で NULL ベクトルが印加されます。

dsPIC DSC はセンターアライン PWM に設定されており、下図の通り対称的なパルスパターンを生成します。この設定はパワーデバイスのスイッチング損失を最低限に抑えながらリップル電流を低減します。

図 11: 周期 T の PWM 信号

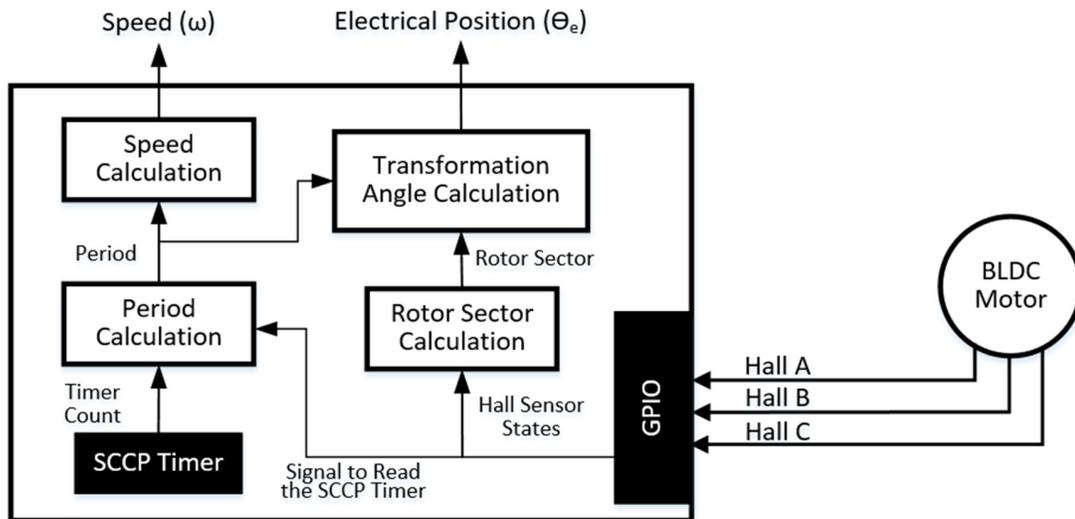


## 7.0 位置および速度計測のセンサ付き実装

このアルゴリズムの重要な部分は、FOC で必要とされるロータ角度を計算する方法です。本セクションでは、ロータ角度 ( $\theta$ ) とモータ速度 ( $\omega$ ) を推定するプロセスについて説明します。センサ付き制御方式では、ホール効果センサ入力のパルス位置から得られる情報を基にそれらのパラメータを推定します。

下に、位置および速度計測のブロック図を示します。センサ付き方式では GPIO と SCCP( キャプチャ/ コンペア / PWM/ タイマ ) モジュールを使います。状態変化通知機能付き GPIO は直近で読みだしたポートパターンとの不一致により状態変化を検出します。SCCP モジュールは、100 MHz の FCY クロックと 64 分割のプリスケアラを使ってタイマモードに設定します。SCCP タイマの周期は、最低モータ速度時にオーバーフローが起こらないような最大周期を確保できるように決定します。

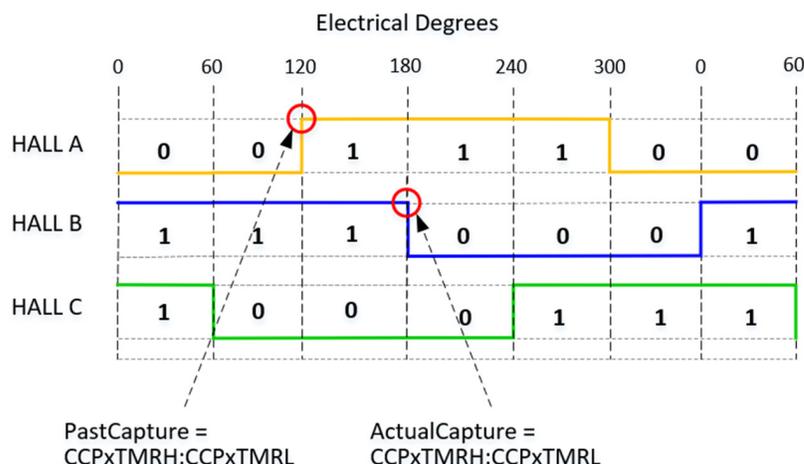
図 12: 位置 / 速度計測図



モータが回転すると電気角度で 60 度ごとにホール状態が変化し、状態変化通知 ISR (CN\_ISR()) が処理されます。ISR ではホール効果センサの状態を読み取り、ロータセクタを計算します。また、割り込みイベントも各割り込みの間に SCCP タイマのカウントを計測します。

下図に、割り込みイベントをトリガするホールの状態とその変化を示します。現在のタイマカウント (ActualCapture) を前回のタイマカウント (PastCapture) から減算すると周期が求められます。求めた周期は移動平均で処理します。移動平均は、急峻な応答を抑止せずにランダムノイズを抑制する最適な手法です。移動平均法は複数サンプルの平均を求めて 1 つの出力を生成します。この平均周期をロータ位置の計算に使い、計算した未処理周期は速度計算ルーチンに渡します。

図 13: 周期計算のためのタイマカウント キャプチャ



## 7.1 位置計測

FOC を正しく機能させるには正確なロータ位置の把握が重要です。適切な制御には高い角度分解能が必要なため、ホール効果センサの状態から得られる低分解能のパルス入力では FOC に不十分です。

ロータセクタ位相値の適切な取得にはロータセクタが必要です。ロータセクタは 60 度刻みの電気角度で表すロータの絶対位置です。ロータセクタを取得するには 3 つのホール効果センサからデジタル値を読み取ります。有効なセクタは 6 つあり、それぞれ位相値が符号付き整数形式で割り当てられています。ホール状態、セクタ番号、位相値の対応を下表に示します。

表 1: 角度位置とセクタの関係

ホール C	ホール B	ホール A	セクタ	参照位相値 (符号付き 16 ビット整数)
0	0	0	無効	無効
1	1	0	6	32767
0	1	0	2	-21844
0	1	1	3	-10922
0	0	1	1	0
1	0	1	5	10922
1	0	0	4	21844
1	1	1	無効	無効

位相値は高分解能の変換角度を計算するための参照値です。セクタに基づく参照位相値を状態変化通知割り込みイベントごとに取得し、ADC\_ISR() で変換角度を求めます。下式で求めた参照位相値は CN\_ISR() 内の変換角度に初期値として読み込みます。

### 式 1: 初期変換角度

$$\theta_{\text{Electrical}} = \text{Reference Phase Value} + \_90\_Degrees\_Phase\_Offset$$

`\_90_Degrees_Phase_Offset` はステータとロータの磁束のオフセットを 90 度に維持します。これは 16384 に相当し、電気角度 1 回転の値 65536 から求めたものです。

後続の各ホール効果センサ状態間の計測期間はモータの速度に反比例するため、比例定数が必要です。PHASE\_INC\_CALC は平均周期から位相インクリメントを求めるために使う定数です。

# AN4064

式 2: 位相インクリメント計算

$$PHASE\_INC\_CALC = \left( \frac{FCY}{Prescaler * PWM\_Switching\_Frequency} \right) \left( \frac{65536}{6} \right)$$

式 3: 位相インクリメント

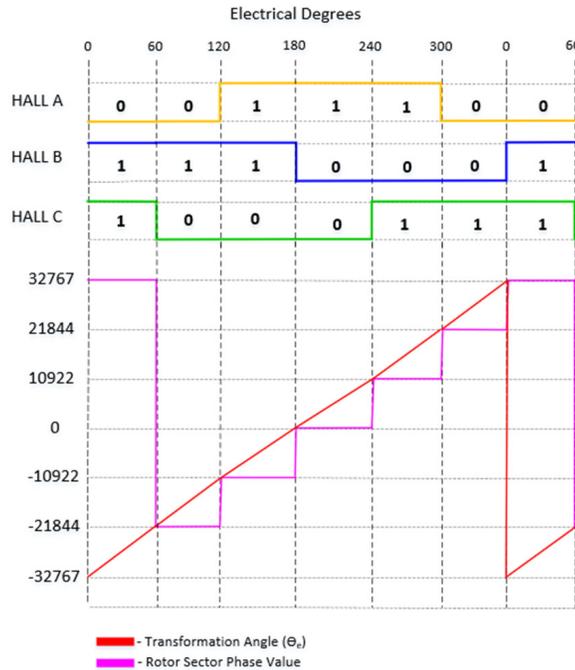
$$phaseInc = \left( \frac{PHASE\_INC\_CALC}{AveragePeriod} \right)$$

式 4: 最終変換角度

$$thetaElectrical = thetaElectrical + phaseInc$$

上式から定数 PHASE\_INC\_CALC を求めるには SCCP タイマクロックをタイマ プリスケラと PWM スイッチング周波数で除算し、その商に電気角度 60 度に相当する位相値を乗算します。phaseInc 変数を求めるには PHASE\_INC\_CALC を平均周期で除算します。phaseInc 値を使って ADC\_ISR() サイクルごとに変換角度をインクリメントします。求めた変換角度は電気角度の瞬時値です。次の状態変化通知割り込みイベントを処理するまでこのプロセスを繰り返し、新しい参照値を取得します。セクタ番号、ロータセクタ位相値、変換角度の関係の詳細は下図を参照してください。

図 14: ロータの角度位置



## 7.2 回転速度の計測

モータの機械的な構造上の理由に加え、ホール効果センサが正確に 120 度おきに配置されていない場合もあるため、ホール状態が変化する間隔には若干のずれがあります。そのため、速度の正確な計算には 1 周期のキャプチャでは不十分です。電氣的な 1 回転には 6 回の状態変化通知割り込みが必要です。その後の割り込み間隔から計測した周期を平均化し、回転速度を計算します。未処理速度は下式で求めます。

## 式 5: 速度の計算

$$\text{calculatedSpeed} = \left( \frac{\text{SPEED\_MULTI}}{\text{Period\_Summation}} \right)$$

$$\text{where: SPEED MULTI} = \left( \frac{\text{FCY} * 60}{\text{Timer\_Prescaler}} \right)$$

*Period\_Summation* は移動平均和で、これにより 6 回の状態変化通知割り込みごとに *calculatedSpeed* を計算します。計測した速度を平滑し、ランダムノイズを取り除くために移動平均フィルタで *calculatedSpeed* を処理します。位置および速度ブロックの最終出力は、PI 制御ブロックに入力する計測速度と電気角度です。

## 8.0 フォルト検出と保護

本アプリケーションのファームウェアは貫通電流、過電流、過熱、低電圧に対するフォルト検出と保護機能を備えています。このような条件はモータとモータドライバを損傷する可能性があるため、防止すべきです。

### 8.1 貫通電流

貫通電流は電圧源インバータの2つの相補スイッチが同時にONになり、電源が短絡状態になる事で発生します。

これを防ぐため、PWM モジュールは信号の立ち上がり / 立ち下がりエッジに適用するデッドタイム ジェネレータを備えています。放電またはターンオフ遅延によって相補スイッチが同時にONにならないようにデッドタイムを1 μs 維持します。

### 8.2 過電流保護

過電流とは急峻に電流が上昇する現象です。原因としては不適切な転流、過負荷、ライン - グランド間またはライン間のフォルトが挙げられます。この時電流値は公称ライン電流を超え、回路を過熱させる恐れがあります。

電流はモータの相 A に接続した電流検出回路で監視しています。抵抗  $R_{SHUNT}$  をインバータのマイナス側に接続しています。 $R_{SHUNT}$  両端の電圧はインバータを流れる電流を反映しています。電圧信号の計測とコンディショニングには DSC の内蔵オペアンプを使います。内蔵オペアンプの出力は DAC 付きコンパレータの非反転入力に供給します。DAC はコンパレータの反転入力に接続し、参照値を設定します。DAC の分解能は 12 ビットで AVDD 電圧の 5 ~ 95% のレンジで使います。計測した電圧信号を DAC が設定した参照電圧と常時比較します。DAC が設定した電圧よりも計測電圧信号が高い状態が 100 μs 続くと、PWM ドライバを無効にしてモータを停止させます。

### 8.3 過熱保護

dsPIC33CK64MP105 の動作時周囲温度レンジは -40 ~ +85 °C です。コントローラの過熱は dsPIC の AN19 ピンに接続した温度センサで検出します。温度センサのダイオードには負の温度係数があります。チャンネル AN19 経由でのダイ温度監視には ADC を使います。温度制限値を通常動作時の計測電圧に応じて設定し、周囲温度レンジに従って調整します。25 °C では ADC の計測値は 240 です。ADC 値を求める公式を下式に示します。

#### 式 6: 検出温度の等価デジタル値

$$ADC\ Result = \left(\frac{V_{temp}}{V_{DD}}\right)(2^n - 1)$$

上式の公式を並べ替えると下式になります。

#### 式 7: 室温で計測した電圧

$$V_{temp} = \frac{ADC\ Result * V_{DD}}{2^n - 1}$$
$$V_{temp} = \frac{240 * 3.3}{2^{10} - 1} = 0.77419$$

この 25 °C 時の  $V_{temp}$  を参照電圧として使い、温度係数を -1.5 mV/°C としてダイオード両端の電圧変化を温度変化に応じて増減させます。新しい  $V_{temp}$  を下式で求めます。

#### 式 8: 任意の温度で計測した電圧

$$V_{temp} = 0.77419 + (Temp_{new} - 25)(-1.5)$$

60 °C (ADC 値 224) を超えて電動スクーターのバッテリーを動作させない事が推奨されているため、フォルト保護機能は、57 °C (ADC 値 225) まで上昇するとシステムをシャットダウンするよう設計されています。

## 8.4 低電圧保護

低電圧とは、電圧が定格の 90% 未満に低下した状態が 1 分以上継続した状態を言います。

$V_{BUS}$  の低電圧は、dsPIC の AN15 チャンネル入力に接続されている  $V_{BUS}/16$  信号を使ってコントローラが監視します。バス電圧の監視に使うルーチンはモータの駆動に使う割り込みサービスルーチンに含まれています。バス電圧は 20  $\mu$ s ごとに確認しています。低電圧の誤トリガを防ぐため、カウンタを使って低電圧条件での経過時間を計測します。低電圧条件が 1 分間を超えると、低電圧フォルトが作動してシステムが無効になります。

バッテリーを 70% 未満に低下させない事が推奨されているため、コントローラの低電圧保護は  $0.7V_{BAT}$  に設定されています。電圧制限は下式で求めます。

### 式 9: 電圧制限

$$\text{Voltage Limit} = \frac{V_{BUS}(2^n - 1)}{16V_{DD}}$$

$$\text{where: } V_{BUS} = 0.7V_{BAT}$$

## 9.0 電動スクーターにおけるセンサ付き FOC アプリケーション

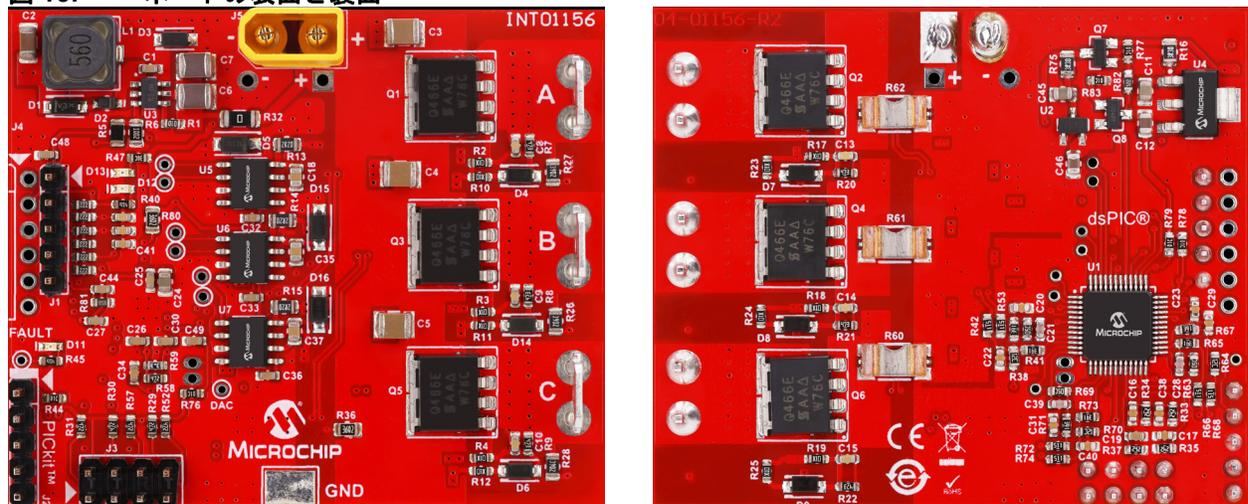
近年、電動スクーター等の電動二輪車が個人の移動手段として広く普及しました。電動スクーターはバッテリー、バッテリー充電器、モータ、モータドライバ、DC/DC コンバータ、インテリジェントコントローラ、その他のアクセサリで構成されています。

モータはホイールのハブに取り付けられています。センサ付き BLDC モータの構造は、ハブモータとして使われる永久磁石同期モータと非常によく似ています。BLDC を選んだ理由はコンパクトで保守の手間が少なく、動作ノイズがない事です。ホール効果センサはモータに組み込まれています。ハブモータの代表電圧は 36 ~ 42 V、速度は 150 ~ 650 rpm (5 ~ 25 km/h) です。

センサ付き FOC 方式は可変速駆動アプリケーションで BLDC モータを効率的に制御できるため、電動スクーターの駆動に適しています。FOC 方式はトルク応答と速度精度に優れています。このソリューションがセンサ付きであるという点はハブモータの高精度駆動に適しています。

電動スクーターに対する需要の高まりに応えるため、インテリジェント制御のニーズに応えるボードを開発しました。本ボードは DC/DC コンバータ、インテリジェントコントローラ、モータドライバ、完全保護された電源段を実装しています。このボードがいかに必要なものはスロットル信号、バッテリー、バッテリー充電器だけです。本書に記載したソリューションの実験にこのボードを使用しました。このボードのリファレンス デザインは別の資料として提供しています。下図に、この電動スクーターボードの表面と裏面を示します。

図 15: ボードの表面と裏面



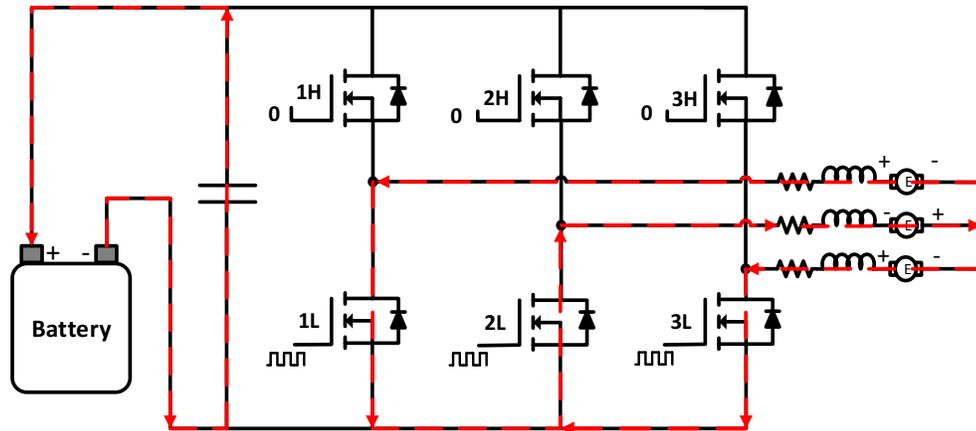
電動スクーターの制御ではモータの減速動作が重要です。回生ブレーキは減速を強めてバッテリー寿命を伸ばす機能です。

### 9.1 回生ブレーキ

回生ブレーキは、モータをジェネレータとして使って減速するプロセスです。このプロセスで回収した電力はバッテリーに蓄えられます。エネルギーを蓄える事ができるのは、BLDC モータが生成する逆起電力がバッテリー電圧より大きい場合のみです。実用アプリケーションでは、モータの高速運転時には回生ブレーキを推奨します。

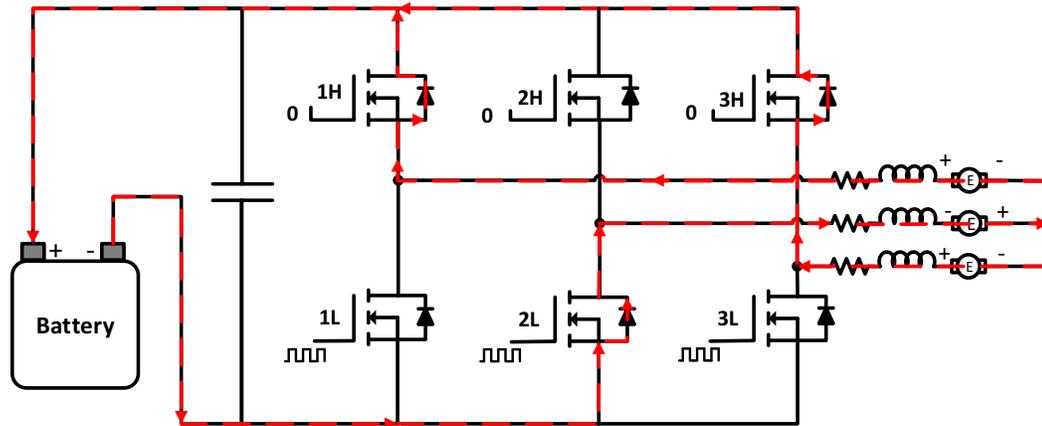
本アプリケーションではローサイド側 3 つのスイッチ素子を用いたブレーキを使用します。ブレーキレバーからの信号を処理するために追加入力ピンを使います。ブレーキレバーはモータ駆動に使う割り込みサービスルーチンに含まれています。ブレーキ信号を検出するとインバータのローサイドスイッチに PWM 信号を印加し、ハイサイドスイッチを OFF にします (下図参照)。

図 16: ローサイドスイッチを変調



このスイッチ構成で、回転するモータから変換した電力をDCバス電圧より高く昇圧します。次にローサイドスイッチをOFFにし、MOSFET ボディダイオード経由で電流を電源に戻します(下図参照)。これでバッテリーが充電されます。

図 17: ローサイドスイッチをOFF



## 10.0 電動スクーターボードを使った実験

本セクションでは、無負荷条件の電動スクーターでセンサ付き FOC 駆動を実験結果を示します。以下にロータ角度位置、SVM のライン - グランド間電圧、SVM のライン間電圧を示します。下図は、ランタイム デバッグとデータの可視化が可能な仮想オシロスコープ ツール X2CScope を使ってキャプチャしたものです。

図 18: ロータ角度位置とセクタ位相値

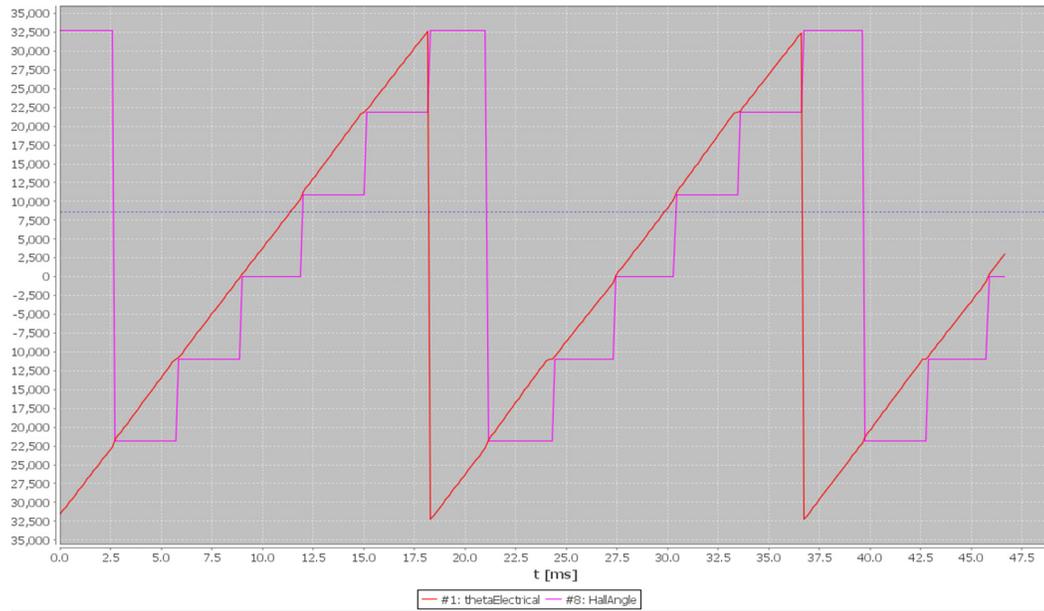


図 19: SVM のライン - グランド間電圧

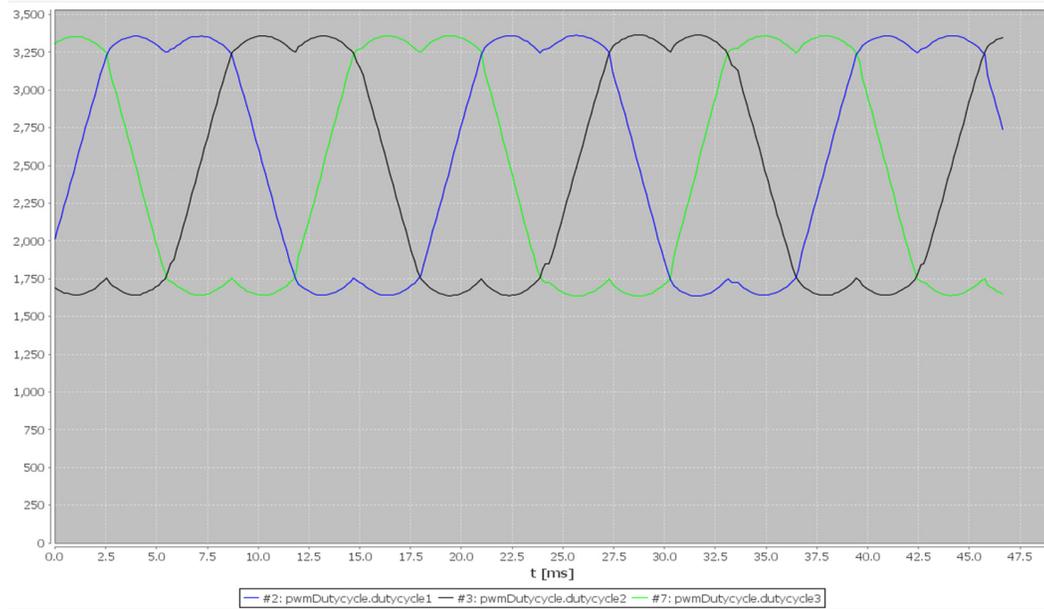
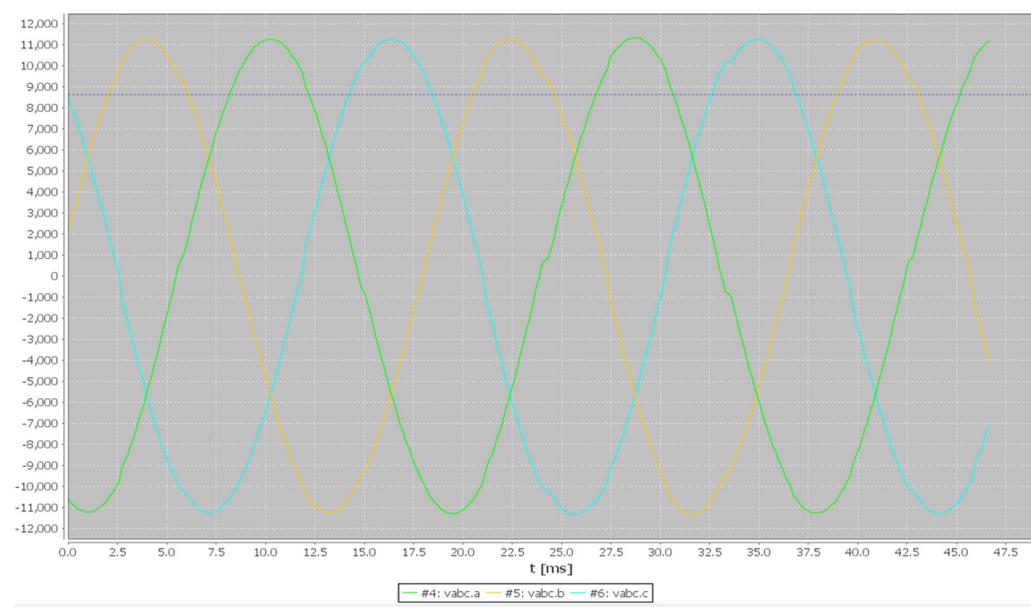


図 20: SVMのライン間電圧



## 11.0 まとめ

センサ付き FOC とホール効果センサの状態を使った高分解能アルゴリズムにより、3 相 BLDC モータの速度と位置を高精度で制御することに成功しました。Microchip 社の 16 ビット dsPIC33CK DSC を使う事で内蔵 DSP による FOC アルゴリズムが可能となり、各種周辺モジュールを使用する事で低コストソリューションを実現しました。本書で説明したソリューションは、電動スクーターの 3 相 BLDC ハブモータを効率的に駆動します。フォルト検出および保護機能の実装により、障害を起こしかねないイベントを検出し、システムを停止できるようになりました。

## 補遺 A: ソースコード

最新バージョンのソフトウェアは Microchip 社ウェブサイト ([www.microchip.com](http://www.microchip.com)) からダウンロードできます。  
ソースコードは Microchip 社ウェブサイトを提供しています。

# AN4064

---

## 補遺 B: 改訂履歴

リビジョン	日付	セクション	説明
A	2021 年 07 月	文書全体	本書は初版です。

---

---

**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動作仕様書の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化しています。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。

---

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う事ができます。それ以外の方法でこの情報を使う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、<https://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、非侵害性、商品性、特定目的への適合性の暗黙的保証、または状態、品質、性能に関する保証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 社の製品を使う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、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、OptoLyzor、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 は米国と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、Libero、motorBench、mTouch、Powermite 3、Precision Edge、ProASIC、ProASIC Plus、ProASIC Plus ロゴ、Quiet-Wire、SmartFusion、SyncWorld、Temux、TimeCesium、TimeHub、TimePictra、TimeProvider、TrueTime、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、Clockstudio、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、IntelliMOS、Inter-Chip Connectivity、JitterBlocker、Knob-on-Display、KoD、maxCrypto、maxView、memBrain、Mindi、MiWi、MPASM、MPF、MPLAB Certified ロゴ、MPLIB、MPLINK、MultiTRAK、NetDetach、Omniscient Code Generation、PICDEM、PICDEM.net、PICKit、PICKtail、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、Trusted Time、TSHARC、USBCheck、VariSense、VectorBlox、VeriPHY、ViewSpan、WiperLock、XpressConnect、ZENA は米国と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 はその他の国における Microchip Technology Incorporated の登録商標です。

GestIC は、その他の国における Microchip Technology Germany II GmbH & Co. KG (Microchip Technology Incorporated の子会社) の登録商標です。

その他の商標は各社に帰属します。

© 2022, Microchip Technology Incorporated and its subsidiaries.

All Rights Reserved.

ISBN: 978-1-5224-9115-6

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

## 各国の営業所とサービス

### 南北アメリカ

**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](http://www.microchip.com/support)  
URL:  
[www.microchip.com](http://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 - 廈門**  
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

### 欧州

**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 - ガーヒンク**  
Tel: 49-8931-9700

**ドイツ - ハーン**  
Tel: 49-2129-3766400

**ドイツ - ハイムロン**  
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 - バドヴァ**  
Tel: 39-049-7625286

**オランダ - ドリュウネン**  
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 - ウォーキンガム**  
Tel: 44-118-921-5800  
Fax: 44-118-921-5820