

dsPIC30F DSC を使用した PMSM モーターの正弦波制御

著者： Jorge Zambada
Microchip Technology Inc.

はじめに

このアプリケーション ノートでは、dsPIC30F デジタル シグナル コントローラ (DSC) で正弦波電流を制御してセンサ付きの永久磁石同期モーター (PMSM) を駆動する方法について説明します。モーター制御ファームウェアは dsPIC30F の周辺モジュールを使用して、算術演算は DSP エンジンで実行します。ファームウェアは C 言語で作成されていますが、一部、dsPIC30F の特別な DSP 演算機能を利用するためのサブルーチンをアセンブリで記述しています。

アプリケーションの特長

- 空間ベクトル変調 (SVM) を使用して、PMSM モーターの位相制御用の正弦波電流を生成
- 正弦波電圧と PMSM モーターの位置を同期化
- 4 象限演算により、正転、逆転、ブレーキ動作が可能
- デジタル PID (Proportional Integral Derivative) 制御による閉ループ速度調整
- 位相進み動作による速度範囲の拡大
- 小数の算術演算を dsPIC[®] DSC の DSP エンジンで実行

デジタル シグナル コントローラによるモーター制御

dsPIC30F モーター制御ファミリは、AC 誘導モーター (ACIM)、DC ブラシ モーター (BDC)、ブラシレス DC モーター (BLDC)、永久磁石同期モーター (PMSM) など、多くの一般的なモーターを制御できるように専用の設計がなされています。これまでに、dsPIC30F モーター制御ファミリ ベースのアプリケーション ノートとして、ACIM の動作に関するもの (AN984、AN908、GS004) や、ブラシレス DC モーターの制御操作に関するもの (AN901、AN957、AN992) が公開されています。これらのアプリケーション ノートは、マイクロチップ社のウェブサイト (www.microchip.com) で入手できます。

このアプリケーション ノートでは、dsPIC30F2010 を使用してセンサ付き PMSM モーターを正弦波電圧で制御する方法について説明します。設計には、dsPIC30F の周辺モジュールの中でも、特にモーター制御向けに用意されているモーター制御パ

ス幅変調 (MCPWM) と高速 ADC (Analog-to-Digital Converter) を利用します。dsPIC30F2010 の DSP エンジンには、ここで必要となる高速算術演算をサポートしています。

このファミリの中の dsPIC30F2010 は、特に低コスト / 高効率のモーター制御アプリケーション用に設計された 28 ピンの 16 ビット DSC です。dsPIC30F2010 の主な特長は次のとおりです。

- 30 MIPS の処理性能
- 6 つの独立した (または 3 つの相補ペアとなる) 専用のモーター制御 PWM 出力
- 6 入力、4 つまでの入力からの同時サンプリング機能を備えた 1 Msps の ADC
- 複数のシリアル通信 : UART、I²C[™]、SPI
- 組み込み制御アプリケーションに適した小型パッケージ (6 mm × 6 mm QFN)
- 制御ループでの高速応答を可能にする DSP エンジン

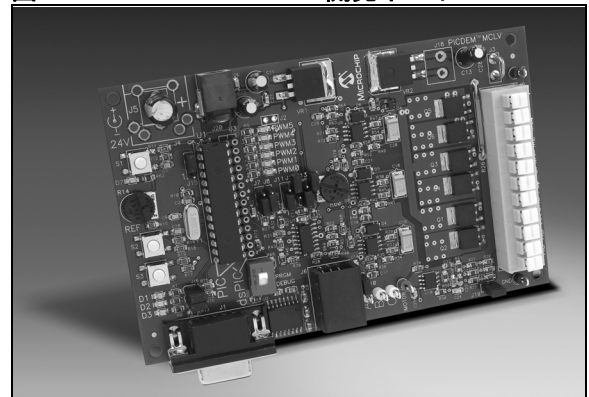
必要なハードウェア

ここで説明するモーター制御アプリケーションの実装には、次のハードウェアが必要です。

- PICDEM[™] MCLV 開発ボード (図 1)
- ハースト社製 DMB0224C10002 BLDC モーター
- 24 VDC 電源

これらのハードウェアは、キット一式として、または個別の部品単位でマイクロチップ社から購入できます。注文情報については、マイクロチップ社ウェブサイトの開発ツール セクションをご覧ください。

図 1: PICDEM[™] MCLV 開発ボード

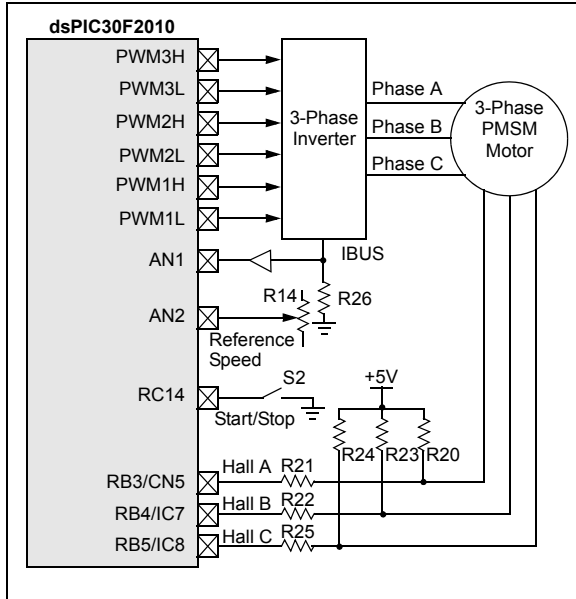


DSPIC30F DSC を使用した PMSM モーターの正弦波制御

このアプリケーション ノートで使用するハードウェア トポロジを完全に理解するために、「PICDEM™ MCLV Development Board User's Guide」(DS51554)をお読みになることを強く推奨します。このユーザー ガイドはマイクロチップのウェブ サイトからダウンロードできます。

図 2 に、正弦波による PMSM モーター制御アプリケーションのシステム ブロック図の概略を示します。ハードウェアを自作する際は、この図を参照にしてください。

図 2: システム ブロック図



このトポロジには、次の重要な特長があります。

- ポテンショメータ R14 で目的の速度 (リファレンス速度) を選択
- RB3、RB4、RB5 ピンに接続されたホール効果センサでロータ位置を検出
- シンプルなオペアンプ回路による電流帰還
- 電流帰還回路に接続されたコンパレータ回路からフォールト入力を受信、 0.1Ω の抵抗 (R26) を使用して電流を検知

抵抗の値は、アプリケーションで使用するモーターの電流能力に合わせて容易に調整できます。これに対して、モーター駆動回路は 24V PMSM モーターを駆動するように設計されています。個々のモーターの駆動要件を満たすには、ハードウェアの変更が必要です。

注: 24V 以外のモーター用にハードウェアを変更する方法の詳細については、「PICDEM™ MCLV Development Board User's Guide」(DS51554)を参照してください。

下限の電圧は 10V です。上限の電圧は 48V です。なお、IGBT のヒートシンクは放熱能力がそれほど高くなく、PICDEM™ MCLV 開発ボードでは大電流の要件を満たすことが困難なので注意が必要です。

このアプリケーションで PICDEM™ MCLV 開発ボードを使用するには、ジャンパを表 1 のように設定して、モーターを表 2 および表 3 のように接続します。

表 1: PICDEM™ MCLV 開発ボードのジャンパ設定

Jumpers	Position for Sinusoidal Control (dsPIC® DSC Sensored)
J7, J8, J11	Open
J12, J13, J14	Open
J15, J16, J17, J10	Open
J19	Short

表 2: モーター巻線の接続 *

Connector J9	Position for Sinusoidal Control (dsPIC® DSC Sensored)
M3	Phase A (White)
M2	Phase B (Black)
M1	Phase C (Red)
G	Ground (Green) if available

表 3: ホール センサのモーター接続 *

Connector J9	Position for Sinusoidal Control (dsPIC® DSC Sensored)
+5V	Red
GND	Black
HA	White
HB	Brown
HC	Green

* 表 2 および表 3 にそれぞれ示したモーター巻線とホール センサのカラー表記は、マイクロチップ社から提供されるハースト社製 24V モータに準じています。モーターによっては、グランド線がないことがあります。

コードを作成して dsPIC30F にダウンロードしたら、スイッチ S2 を押すことでモーターが回転 / 停止します。REF と記載されたポテンショメータ (R14) が、モーターの目的の速度と回転方向を決定します。モーターは停止しなくても回転方向を変更できます。

dsPICDEM™ MCLV 開発ボードによる dsPIC30F2010 のプログラミング

dsPICDEM MCLV 開発ボードでは、dsPIC30F2010 のインサーキット プログラミングが可能です。プログラミングには、DIP スイッチ S4 を PRGM の位置に設定します。プログラミングが完了したら、この DIP スイッチを DEBUG の位置に設定してコードを実行します。デバッグとして IDC2 を PICDEM™ MCLV 開発ボードに接続する場合は、コネクタ J6 を使用します。MPLAB® ICD 2 をデバッグとして使用する場合は、RJ11 ケーブルをボード (J6) に接続します。MPLAB ICD 2 をプログラマとしてのみ使用する場合は、パーツのプログラミング時のみ RJ11 ケーブルを接続して、通常のプログラム実行時はケーブルを外します。

PICDEM™ MCLV 開発ボード上でアプリケーションを動作させるには、次の構成とします。

発振源：主発振器
主発振器のモード：XT (16 倍 PLL)
通信チャンネルの選択：EMUC2 および EMUD2

その他の設定は必要に応じて有効または無効にするか、あるいはアプリケーションで変更できます。

予備知識

BLDC モーターはサイズがコンパクト、制御が容易、高効率などの理由により、多くのコンシューマー機器や産業用アプリケーションで使用されています。また車載アプリケーションでも、ベルトおよび油圧システムの削減、高機能化、燃費向上などの目的の一環として、BLDC モーターの採用が増えています。工作機械や低ノイズのファン アプリケーションなどの高性能アプリケーションでは、スムーズなトルクを生成することが重要となります。

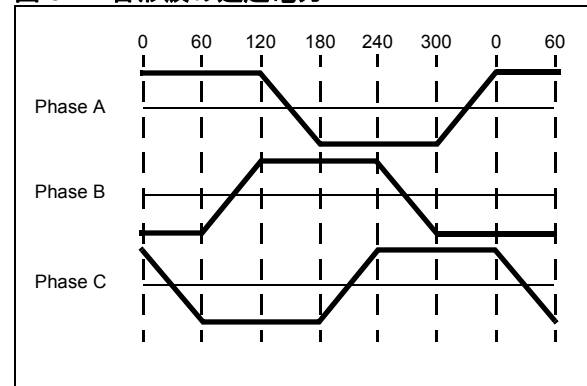
低トルク リップルと静音動作が要求される場合、BLDC モーターはステータ巻線が非正弦波分布であることが大きな短所となります。非正弦波の巻線分布の BLDC モーターでは、図 3 に示したような台形波の逆起電力が発生します。台形波逆起電力の BLDC モーターは、モーターの角度位置に同期した矩形波電圧で駆動されるように設計されています。一般に、この制御方法は 6 ステップ整流と呼ばれます。

6 ステップ整流については読者に知識があることを前提としているため、本アプリケーション ノートでは詳述しません。6 ステップ整流による BLDC モーターの操作方法の詳細については、マイクロチップ社の次のアプリケーション ノートを参照してください。

- AN857 「Brushless DC Motor Control Made Easy」 (DS00857)
- AN957 「Sensored BLDC Motor Control Using dsPIC30F2010」 (DS00957)

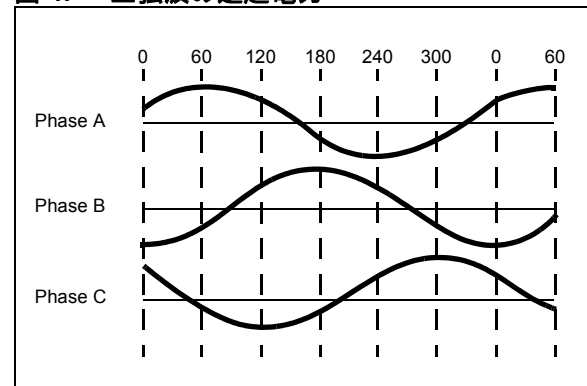
BLDC モーターの基本的な動作原理を含めた入門情報については、AN885 「Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals」 (DS00885) も参照してください。

図 3: 台形波の逆起電力



BLDC モーターのモーター巻線は台形波分布であるため、生成される電流も台形波となり、モーター動作時にトルク リップルが発生します。このトルク リップルによって速度がわずかに発振して、可聴帯域のノイズが発生します。一方、永久磁石同期モーター (PMSM) とも呼ばれる正弦波逆起電力の BLDC モーターでは、正弦波の電流が得られるためトルク リップルが小さく、可聴帯域のノイズが最小限に抑えられます。図 4 に、正弦波の巻線分布であるモーターから得られる正弦波逆起電力の電圧を示します。

図 4: 正弦波の逆起電力

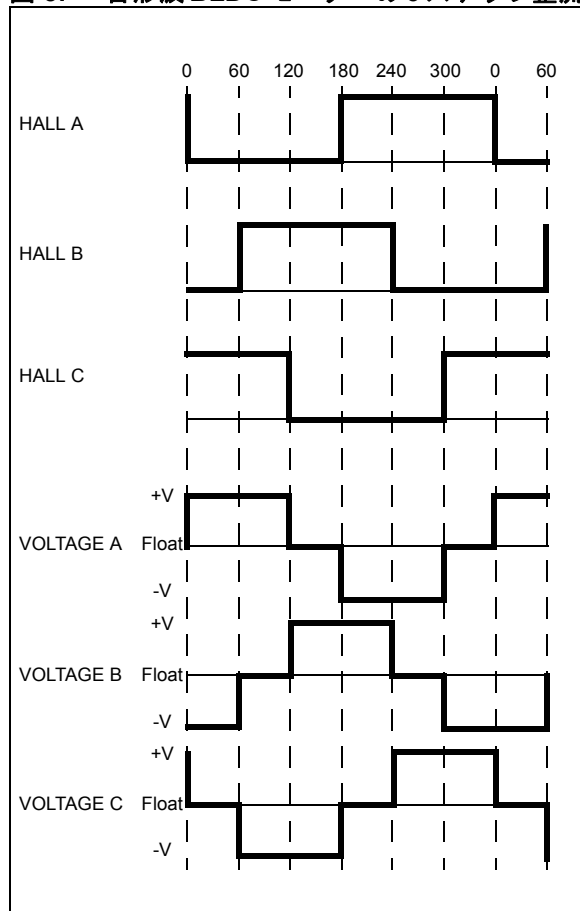


このアプリケーション ノートでは、3 つのホール効果センサを使用した正弦波逆起電力の 3 相 PMSM モーターを使用するものとします。

センサを使用した BLDC モーターの動作

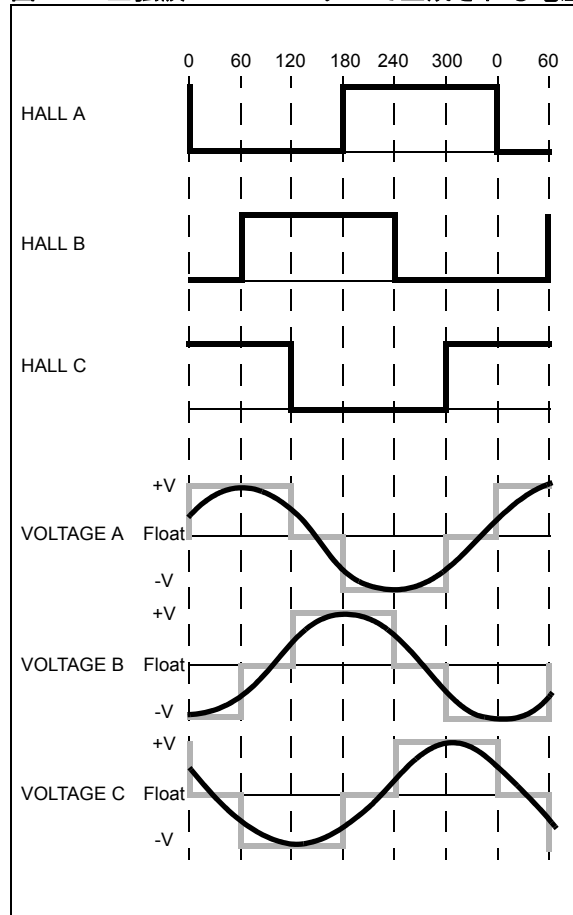
モーターの整流を正確に行うには、電気サイクル内での絶対位置を測定する必要があります。ロータの位置情報は 3 つのホール効果センサから取得します。これらのセンサは、1 回の電気サイクルで 6 つの異なるロジック状態を生成するように、ステータに沿って分散して配置されます。電気サイクル数と機械的回転数の比は、モーターの極ペアの数によって決まります。例えば、このアプリケーションノートで使用するモーターには 5 つの極ペアがあるので、1 回の機械的回転には 5 回の電気サイクルが必要です。従来の励磁方法 (6 ステップ整流) だと、1 電気サイクルにつき、等間隔で 6 回の整流が必要です。これは通常、3 つのホール効果センサまたは光学スイッチを使用して、ロータ上に適切なディスクを配置して実装します。連続的な位置情報は必要ありません。必要な整流インスタンスを検出するだけで十分です。図 5 に、3 つのセンサからの出力と、それぞれに対応したモーター巻線の駆動電圧を示します。

図 5: 台形波 BLDC モーターの 6 ステップ整流



これを見ると、特定のセクタでの電圧は、新しいモーター位置またはホール効果センサの組み合わせが検出されるまで変化しないことが分かります。このアプリケーションノートで説明する手法では、6 ステップ整流と同様、3 つのホール効果センサでロータ位置を検出します。ただし、矩形波ではなく、連続的に変化する正弦波の電圧が生成されます。この結果得られる正弦波の電圧を図 6 に示します。この図には、位相電圧と 3 つのホール効果センサの関係が示されています。正弦波電圧の振幅の大きさにより、一定の機械的負荷に対するモーターの速度が決まります。

図 6: 正弦波 BLDC モーターで生成される電圧



正弦波電圧制御の実装

図 7 は、アプリケーション ソフトウェアをブロック図として表現したものです。モーター動作中は、Reference Speed (目的の速度) から Measured Speed (計測速度) を引いて得られる偏差を PID コントローラで処理して、正弦波の振幅を生成します。Reference Speed は外部のポテンシオメータによって設定され、Measured Speed はホール効果センサから取得します。

振幅 (Amplitude) が得られたら、正弦波の生成にはあと 2 つのパラメータが必要です。1 つは正弦波の周期 (Period) で、これはホール効果センサの 1 つから取得します。もう 1 つは位相 (Phase) で、これは速度範囲の要件およびホール効果センサから得たロータ位置に応じて、位相進み (Phase Advance) を用いて計算します。

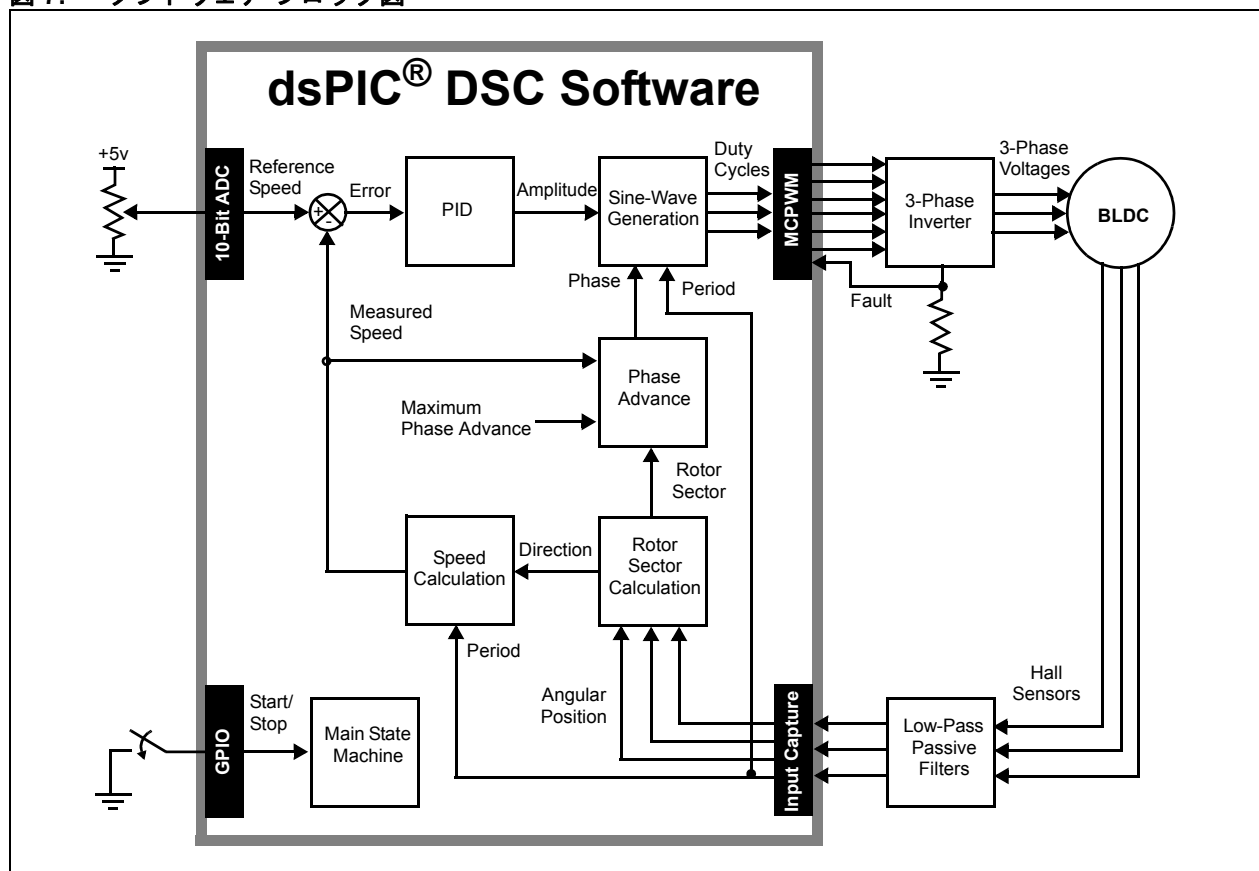
変数 Amplitude は、モーター電流とそれによって生じるトルクの量を設定します。速度が増加すると、それに応じてトルクも増加します。速度制御ループは、Amplitude のみを制御します。

Phase Advance ブロックからの Phase の値はホール効果センサの情報から取得します。これを利用してロータに対する正弦波電圧の位置合わせを維持します。

このアプリケーション ノートのこれ以降のセクションでは、このソフトウェア ブロック図を参照しながら、ソフトウェアの機能を詳しく説明します。まず、メイン ステート マシン (Main State Machine) の説明から始めます。メイン ステート マシンは、グローバル変数を用いて他のすべてのソフトウェア ブロックと連携します。次に、速度の計測 (Reference Speed と Measured Speed) について説明した後、PID コントローラのソフトウェア実装の説明に移ります。ここでは、PID 制御の基礎についても簡単に触れておきます。

その次に、3 相正弦波を生成するためのパラメータの計算について説明します。ここではまず、ロータセクタと位相進みの計算について解説します。最後に、Amplitude、Phase、Period をパラメータとして、空間ベクトル変調によって正弦波電圧を生成する方法について説明します。

図 7: ソフトウェア ブロック図



メインステートマシン

図 8 に示す状態遷移図では、それぞれの割り込み（太線の矢印）とモーター制御ソフトウェアの連携を図示しています。パワーオン リセット時にソフトウェアはすべてのソフトウェア変数を初期化して、すべての周辺モジュールをアプリケーションで使用できるようにイネーブルします。変数と周辺モジュールが初期化された後、ソフトウェアは **Motor Stopped**（モーター停止）ステートに入り、外部押しボタン（S2）が押されて **Start** コマンドが実行されるまでこの状態にとどまります。

S2 を押すと **RunMotor()** サブルーチンが呼び出され、このサブルーチンの最初の処理 (**ChargeBootstraps()**) が実行されます。インバータ回路は、上段と下段のデバイスに対して N チャネル MOSFET を使用します。ブートストラップ回路は、上段デバイスのゲート駆動用に浮動電圧源を生成します。上段デバイスを確実にオンにできるように、ブートストラップの電源電圧はインバータの電圧レールよりも 15V 大きくすることができます。モーターを動作させる前に初めてモーターを励磁する際は、毎回 **ChargeBootstraps()** サブルーチンを実行してブートストラップ コンデンサを充電する必要があります。

ChargeBootstraps() サブルーチンは下段のトランジスタを 10 ms の間ターンオンしてこれらコンデンサに十分な電圧を印加した後、出力の制御を PWM モジュールに渡します。

次に、モーター制御用の変数が初期化されます。次に、PID 速度コントローラで使用される PID 係数、累積偏差、コントローラ出力の各変数が初期化されます。**RunMotor()** サブルーチンでは、タイマカウンタも 0 に初期化され、ホール効果センサの周期をキャプチャするための変数も初期化されます。このサブルーチンの最後で割り込みフラグがクリアされ、割り込みがイネーブルされます。

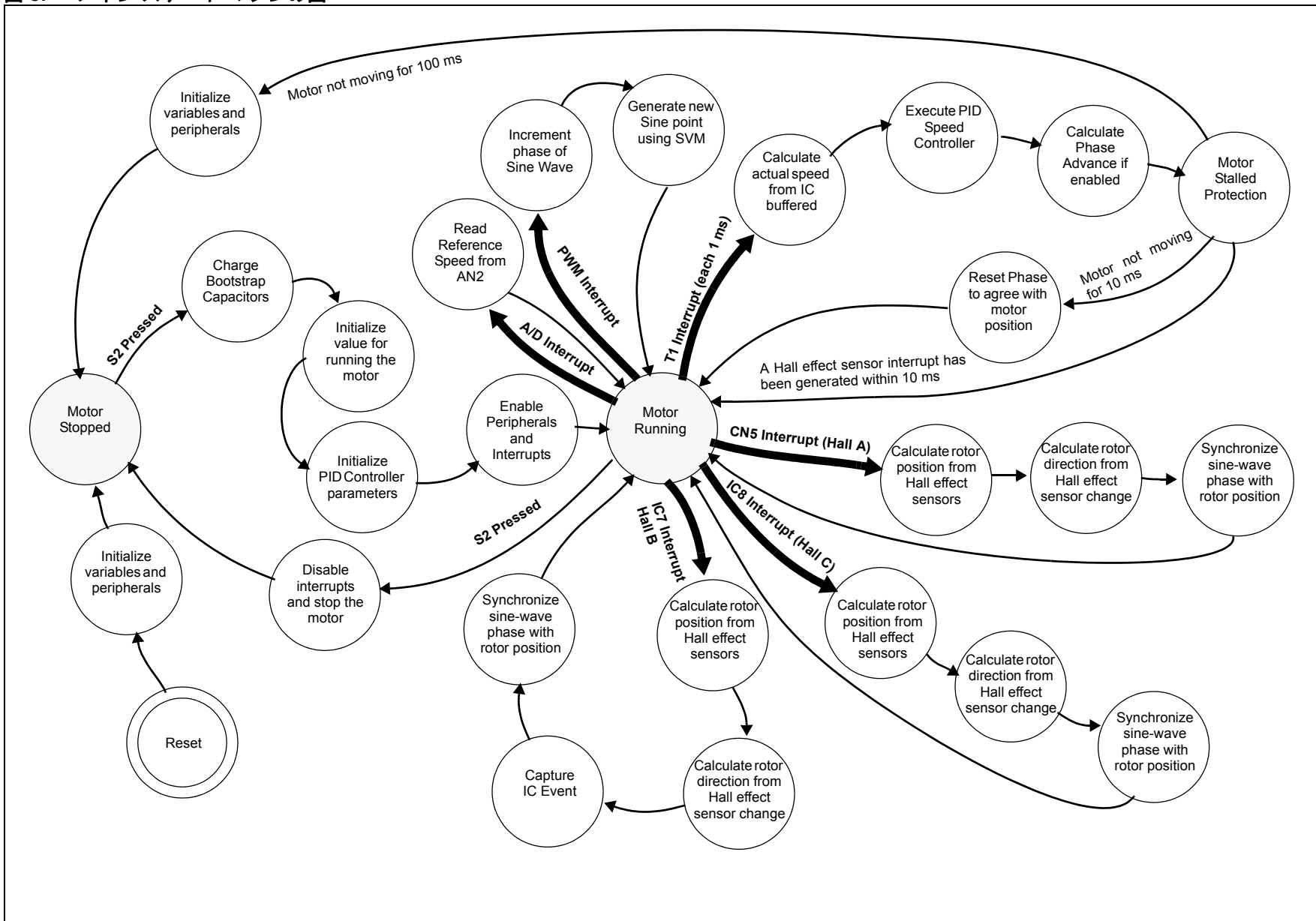
RunMotor() サブルーチンで変数が初期化されると、ステートマシン内の他のすべての動作は割り込みサービスルーチン (ISR) によって実行されます。表 4 に、割り込みサービスルーチンの種類とそれらが呼び出されるタイミング、および各 ISR で実行される処理の簡単な内容を一覧にまとめます。

モーターが動作中に S2 が押されると、**StopMotor()** サブルーチンによってすべての割り込みがディスエーブルされ、モーターが停止します。

表 4: 割り込みサービスルーチンのまとめ

Interrupt	When Called	Operations Performed
A/D	20 kHz	• Reads new Reference Speed value from AN2
PWM	20 kHz	• Generates sine wave using SVM
T1	1 kHz	• Measures Speed Calculation using IC7 data • Executes PID control • Calculates Phase Advance • Provides Motor Stalled protection
CN5	Every Hall A transition	• Calculates rotor position • Determines rotor mechanical direction • Synchronizes sine-wave pointer to rotor position
IC7	Every Hall B transition	• Calculates rotor position • Determines rotor mechanical direction • Captures Hall transition timing using IC • Synchronizes sine-wave pointer to rotor position
IC8	Every Hall C transition	• Calculates rotor position • Determines rotor mechanical direction • Synchronizes sine-wave pointer to rotor position

図 8: メインステートマシンの図



速度の計算

リファレンス速度の計算

変数 Reference Speed (図 7 参照) は、ADC (AN2 入力ピン) を使用する A/D 割り込みによって読み出されます。ADC は、PWM の周波数レート (このアプリケーションでは 20 kHz) で割り込みを生成するように設定されています。A/D ISR において、A/D 変換バッファは符号付き小数点の形式で RefSpeed 変数にコピーされます。この変数は、-1.0 ～ 0.99997 の範囲で目的の速度を表現します。表 5 に、この変数の最小値と最大値、および本アプリケーション ノートで使用されるモーターにおけるそれぞれの値の解釈を一覧にまとめます。

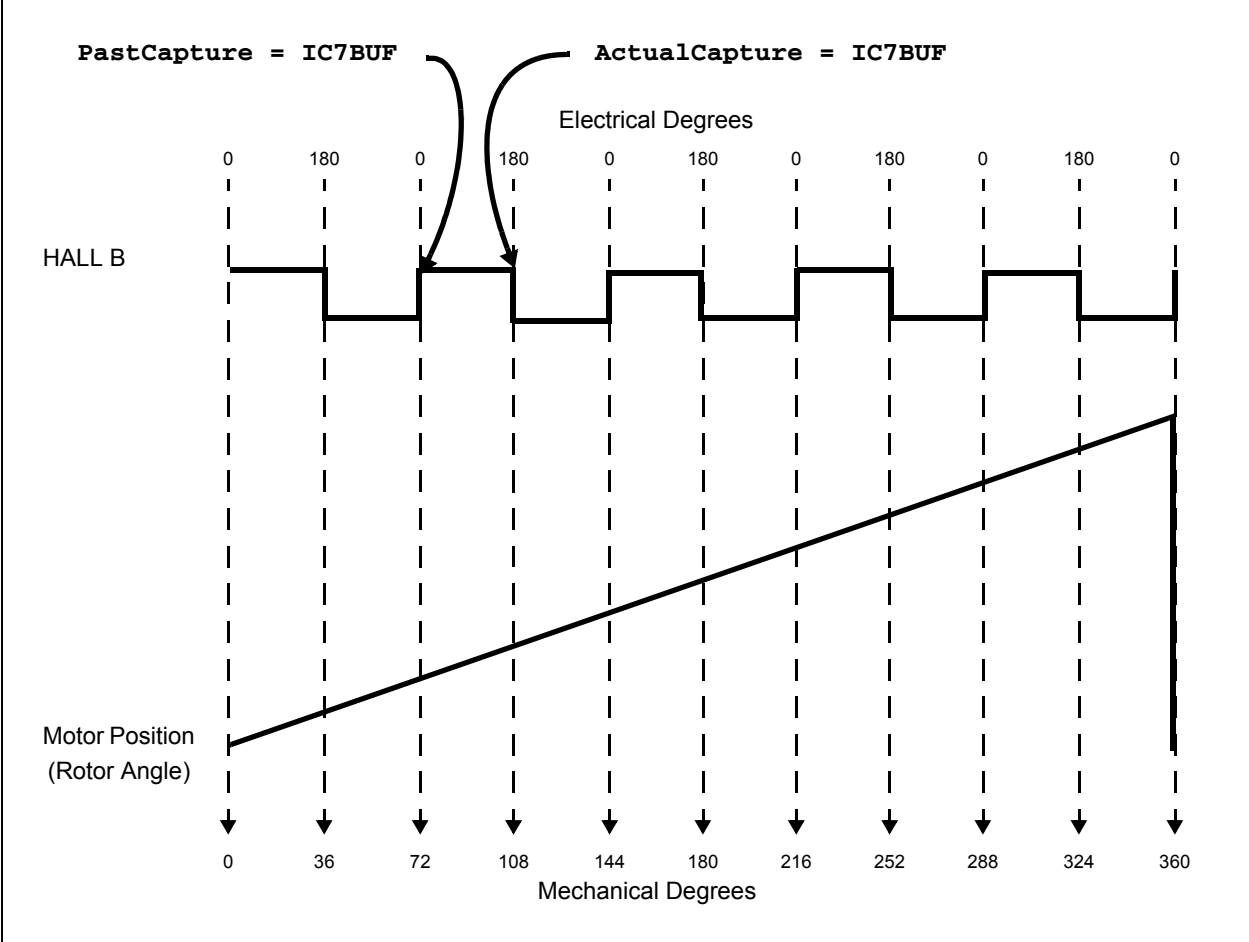
表 5: リファレンス速度の計算例

	RefSpeed Variable		
	Hex Value	Fractional Value	Desired Speed in RPM
Min Value	0x8000	-1.0	6000 RPM Reverse
Max Value	0x7FFF	0.99997	6000 RPM Forward

計測速度の計算

モーターの実際の速度は、ホール効果センサの 1 つ (Hall B) から計算します。この計算には Input Capture チャンネル (IC7 入力ピン) を使用して、ホール効果センサ B の 2 つの連続する遷移の間の時間を測定します。図 9 のタイミング図は、ホール効果センサ B の遷移間の時間を測定するためのキャプチャ イベント、および 2 つの連続するキャプチャ値を保存するための変数を示しています。また、この図には 5 極ペア モーターの機械的回転角度もプロットしており、ホール効果センサ B の信号と実際の機械的な動きの関係が分かるようにしています。

図 9: ホール センサ B とモーターの機械的位置との関係



連続する 2 つの遷移間の時間を格納する変数は Period と呼ばれ、Timer 1 ISR で計算されます。この ISR は 1 ミリ秒ごとに発生し、速度コントローラを実行します。モーターの実際の速度は次の式で計算します。

$$Period = ActualCapture - PastCapture$$

ここで、ActualCapture と PastCapture には、図 9 に示すようにホール効果センサ B の連続する 2 つの遷移に関する時間の情報が格納されています。Period は、正弦波の生成に使用するポインタのステップ サイズを計算するために使用します。これは、生成される正弦波電圧を、ホール効果センサの情報と比較して同じ周波数にする必要があるためです。

Speed の計算では、次の式を使用して Period (ホール効果センサの 2 つの遷移間の時間) を MeasuredSpeed (計測速度) に変換します。

$$MeasuredSpeed = FractionalDivide\left(\frac{MINPERIOD}{Period}\right)$$

MINPERIOD は、ホール効果センサで検出した速度が最大値の 6000 RPM のときに小数値 0.99997 を出すよう計算される定数値です。MINPERIOD の計算式は次のとおりです。

$$\begin{aligned} MINPERIOD &= \frac{(Timer\ 1\ Input\ Clock) \times 60}{(Max\ Speed\ in\ RPM) \times (Motor\ Poles)} \\ &= \frac{(20\ MHz/64) \times 60}{6000\ RPM \times 10} \\ &= 312 \end{aligned}$$

表 6 に、PastCapture と ActualCapture に格納された入力キャプチャの値から計算した速度 (MeasuredSpeed) の例を示します。

MeasuredSpeed の値には、ホール効果センサ割り込みで計算した変数 CurrentDirection に応じて符号が付けられます。CurrentDirection は、ホール効果センサの連続する 2 つの組み合わせ (または連続する 2 つのセクタ) に基づいて計算されます。モーターが正転 (CW) している場合、MeasuredSpeed の値は正のままです。モーターが逆転 (CCW) している場合は、MeasuredSpeed が負の値に変換されます。

表 6: 計測速度の計算例

ActualCapture	PastCapture	Period	MeasuredSpeed		
			Hexadecimal	Fractional	RPM
0x0000	0xFEC7	0x0139	0x7F97	0.99679	5990.4
0x2000	0x1D8E	0x0272	0xFCB	0.49838	2995.2
0x4000	0xC5EE	0x7A12	0x0147	0.00998	60

PID 速度コントローラ

PID 速度コントローラは、1 ミリ秒ごとに T1 割り込み (Timer 1 ISR) で実行されます。このサブルーチンは SpeedControl() と呼ばれ、符号付き小数形式のリファレンス速度 (RefSpeed) とモーターの実際の速度 (MeasuredSpeed) の両方を使用します。RefSpeed から MeasuredSpeed を引いて速度の偏差 (Error) を求め、これに基づいてモーターの速度を上げるか下げるかを決定します。モーターをスムーズに動作させるため、偏差の値を PID (比例、積分、微分) 成分に分解して合成出力を求め、これを使用して速度偏差の補償を実行します。

PID コントローラの実装では、dsPIC DSC の MAC 命令を利用して高い実行速度を実現しています。コントローラの出力 (ControlOutput) を求める式では、最後の 3 回の T1 割り込みで保存された 3 つの偏差の値 (ControlDifference[0]、ControlDifference[1]、ControlDifference[2]) および 3 つの PID 係数 (PIDCoefficients[0]、PIDCoefficients[1]、PIDCoefficients[2]) を使用します。次に、この式を示します。

$$\begin{aligned} \text{ControlOutput} = & \text{ControlOutput} \\ & + \text{ControlDifference}[0] \times \text{PIDCoefficients}[0] \\ & + \text{ControlDifference}[1] \times \text{PIDCoefficients}[1] \\ & + \text{ControlDifference}[2] \times \text{PIDCoefficients}[2] \end{aligned}$$

表 7 に、PID 制御変数の簡単な説明を示します。

この PID の実装では、MAC 命令、および MAC 命令実行時の dsPIC DSC の自動飽和機能を使用しています。PID ゲインを調整する際、PID 係数の最大値を回避するのはユーザー側の責任となります。これらの値は小数値を表現しており、次の範囲の値とする必要があります。

$$Kp + Ki + Kd < 0.9999 (0x7FFF)$$

$$-Kp - 2 \times Kd > -1.0 (0x8000)$$

$$Kd < 0.9999 (0x7FFF)$$

図 10 に、SpeedControl() 関数の実装方法をフローチャートで示します。

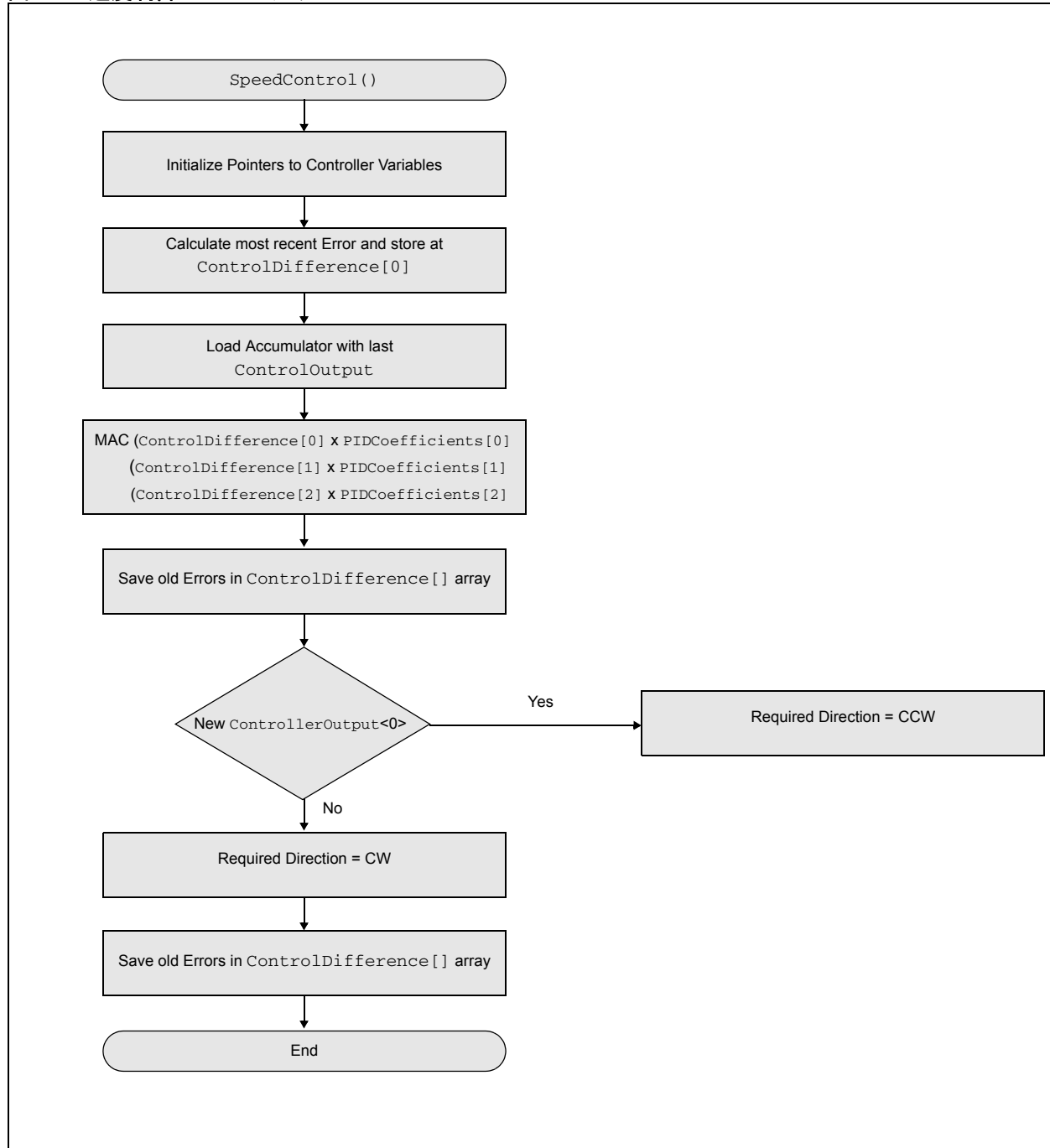
Required_Direction は、PID コントローラ出力 (ControlOutput) の符号から取得され、これによってモーターの回転方向を CW とするか CCW とするかをソフトウェアに知らせます。次のサンプルコードは、要求に応じてモーターの回転方向をソフトウェアで計算する方法を示したものです。

```
// ControlOutput determines the motor
// required direction
if (ControlOutput < 0)
    Required_Direction = CCW;
else
    Required_Direction = CW;
```

表 7: PID 制御の変数

Variable	Description
ControlOutput	The output of the controller in 16-bit signed fractional format
ControlDifference[0]	Most recent calculated speed error (RefSpeed - MeasuredSpeed)
ControlDifference[1]	Speed error in the previous T1 ISR (1 ms old)
ControlDifference[2]	Speed error before ControlDifference[1] (2 ms old)
PIDCoefficients[0], PIDCoefficients[1] and PIDCoefficients[2]	Modified PID coefficients from regular PID form to filter-like PID implementation: $PIDCoefficients[0] = Kp + Ki = Kd$ $PIDCoefficients[1] = -Kp - 2Kd$ $PIDCoefficients[2] = Kd$

図 10: 速度制御のフローチャート



PID の基礎知識

PID (Proportional Integral Derivative) コントローラの詳細については、このアプリケーション ノートの目的からはずれるため省略します。ただし、ここでは PID の動作の基礎について簡単に説明します。

PID コントローラは閉制御ループにおける偏差信号に応答して、被制御量を調整することで目的のシステム応答を達成することを意図しています。制御対象となるパラメータは、速度、トルク、磁束などの測定可能なシステム量です。PID コントローラの利点は、1 つまたは複数のゲイン値を調整してシステム応答の変化を観察することによって、コントローラを経験論的に調整できることにあります。

デジタル PID コントローラは、周期的なサンプリング間隔で実行されます。システムを適切に制御するには、コントローラの実行頻度が十分であることが前提条件となります。制御対象のパラメータの実際の測定値から目標値を差し引いたものが、偏差信号となります。偏差の符号は、制御入力に必要な変化の方向を示します。

コントローラの P (比例) 項は偏差信号を P ゲインで乗算したものであり、これによって偏差の大きさの関数としての (すなわち、偏差の大きさに比例した) 制御応答が PID コントローラから出力されます。偏差信号が大きくなるにつれてコントローラの P 項も大きくなり、大きな補正量が出力されます。時間とともに、P 項の効果によって全体的な偏差が小さくなっていきます。ただし、偏差がゼロに近づくにつれて P 項の効果は小さくなります。多くのシステムにおいて、制御対象のパラメータの偏差はゼロにきわめて近くなりますが、ゼロに収束することはありません。この結果、わずかな定常偏差が残ることになります。

コントローラの I (積分) 項は、このわずかな定常偏差を取り除くために使用します。I 項では、偏差信号の連続した累積値を計算します。このため、わずかな定常偏差が時間とともに大きな偏差へと累積されます。この累積偏差信号を I ゲイン ファクタで乗算したものが、PID コントローラの I 出力項となります。

PID コントローラの D (微分) 項はコントローラの速度を高めるために使用され、偏差信号の変化のレートに応答します。D 項の入力は、直前の偏差の値から現在の偏差の値を引いて求めます。この偏差の差分を D ゲイン ファクタで乗算したものが、PID コントローラの D 出力項となります。システム偏差の変化が速いと、コントローラの D 項から得られる制御出力も大きくなります。

PID ゲインの調整

PID コントローラの P ゲインは、全体的なシステム応答を設定します。コントローラを最初にチューニングする際は、I ゲインと D ゲインをゼロに設定します。次に、過剰なオーバーシュートや発振が発生しない範囲で目標値の変化にシステムが良く応答している間は P ゲインを増やしていきます。P ゲインの値を小さくするとシステムの制御が「緩やか」になり、P ゲインの値を大きくすると「急峻な」制御となります。この時点では、システムが目標値に収束する可能性は稀です。

P ゲインを適正に選択したら、I ゲインをゆっくりと増やしてシステム偏差がゼロになるようにします。多くのシステムにおいて、I ゲインはわずかな量で十分です。I ゲインを大きくしすぎると I ゲインの影響が P 項の作用を上回り、全体的な制御応答が遅くなってシステムが目標値付近で発振するので注意が必要です。発振する場合、通常は I ゲインを減らして P ゲインを増やすことで問題が解決します。

D ゲインは、システム応答の高速化に寄与します。ただし、D ゲインは出力の振りを大きくしてモーターに機械的損傷を与えるおそれがあるため、慎重に使用する必要があります。

ロータ セクタの計算

ここでもう一度図 2 のソフトウェア ブロック図を参照すると、正弦波電圧の生成にはロータ セクタの値が必要であることが分かります。ロータ セクタとは、ロータの絶対位置を 60 度単位の電気角度で表したものです。この情報は、3 つのホール効果センサからデジタル値を読み出して取得します。ソフトウェアの Rotor Sector Calculation ブロックでは、3 つのホール効果センサ割り込み (図 8 の CN5、IC8、IC7 割り込み) を使用します。セクタは、表 8 に示す関係を用いて計算します。

表 8: セクタと角度位置の関係

Hall C	Hall B	Hall A	Sector
0	0	0	Invalid
0	0	1	4
0	1	0	2
0	1	1	3
1	0	0	0
1	0	1	5
1	1	0	1
1	1	1	Invalid

実際のモーターの回転方向 (Current Direction) を計算するには、ホール効果センサ割り込みの最後 2 つの連続するセクタを比較します。表 9 に、最後 2 つのセクタに基づいた回転方向の計算方法をまとめます。

表 9: 現在の回転方向の計算

LastSector	Sector	Current_Direction
0	1	CCW
1	2	CCW
2	3	CCW
3	4	CCW
4	5	CCW
5	0	CCW
0	5	CW
1	0	CW
2	1	CW
3	2	CW
4	3	CW
5	4	CW

実際のモーターの回転方向は、Speed Calculation ブロックで使用します。実際の回転方向が CCW の場合、速度は負の値となります。

次のコードは、この処理を記述したものです。

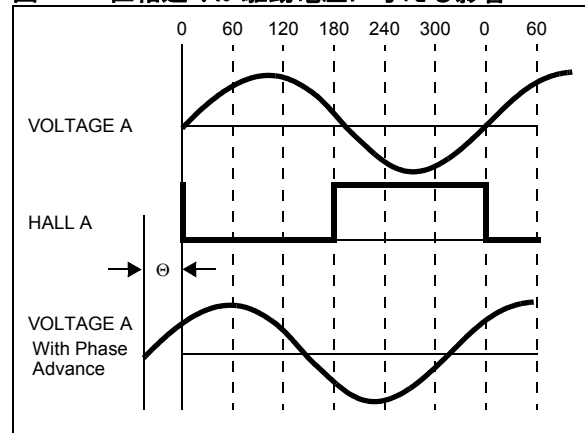
```
// MeasuredSpeed sign adjustment based on
// current motor direction of rotation
if (Current_Direction == CCW)
    MeasuredSpeed = -MeasuredSpeed;
```

計算によって求めた Rotor Sector の値を計測速度と最大位相進みで修正すると、正弦波電圧の位相角度が決定します。

位相進み

通常の状態では、モーターの速度はインバータからモーター巻線に供給される電圧による制限を受けます。図 11 に示す電圧 A とホール A の関係を見ると分かるように、通常、モーター巻線にかかる電圧はロータの位置と同期します。この状態では、ロータの磁場より 90 度進んだ回転電場がステータに生じ、このときにモーターのアンペア当たりのトルクは最大値となります。

図 11: 位相進みが駆動電圧に与える影響



ステータに生じる場を角度 θ だけシフトすると、ステータとロータの間に生じる磁場は大きくなります。この位相進みを追加することでロータには負の場が生じ、これによってロータの永久磁石によって生じる場も小さくなります。この位相シフトには、次に示すようにいくつかの重要な影響があります。

- 位相進みによって場のベクトルが大きくなるので、公称の速度限界を超えて速度範囲が拡大する。
- 位相進みによってロータには負の場が生じるため、ロータの場が弱まる。場が弱まると、モーターの全体的なトルク出力が低下する。
- 位相進みを使用するとステータの場がロータの場と反対に作用するため、モーターの消費電流、モーターの動作温度、可聴帯域のノイズが大きくなる。

DSPIC30F DSC を使用した PMSM モーターの正弦波制御

モーターの速度範囲を大きくすることが要求されるアプリケーションでは、位相進みアルゴリズムを推奨します。このアルゴリズムは、SinusoidalBLDC v1.1.c ファイル内の PHASE_ADVANCE を定義するとイネーブルされます。本アプリケーションノートでは、この機能はディスエーブルされています。

```
#define PHASE_ADVANCE    // for extended
                        // speed ranges this
                        // should be defined
```

空間ベクトル変調を使用した正弦波の生成

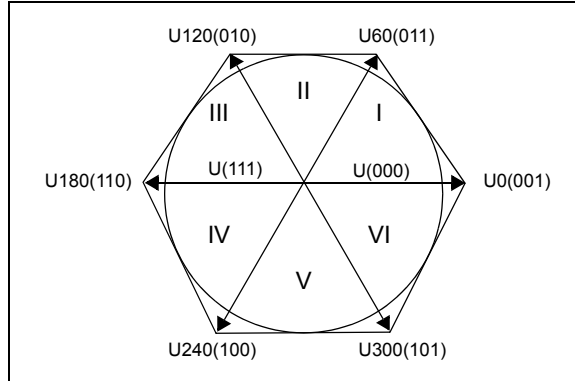
PMSM モーターの正弦波制御で最後の処理となるのが、3 相モーター電圧信号に対するパルス幅変調 (PWM) 信号の生成です。空間ベクトル変調 (SVM) を使用すると、3 相のそれぞれに対してパルス幅を生成する処理は、いくつかの簡単な等式に簡略化されます。3 つのインバータ出力はそれぞれ、+ バスレールまたは - バスレールのいずれかの状態になります。このため、出力は表 10 に示すように 8 通り ($2^3 = 8$) が考えられます。

表 10: 空間ベクトル変調のインバータの状態

C	B	A	V _{ab}	V _{bc}	V _{ca}	V _{ds}	V _{qs}	Vector
0	0	0	0	0	0	0	0	U(000)
0	0	1	V _{DC}	0	-V _{DC}	2/3V _{DC}	0	U ₀
0	1	1	0	V _{DC}	-V _{DC}	V _{DC} /3	V _{DC} /3	U ₆₀
0	1	0	-V _{DC}	V _{DC}	0	-V _{DC} /3	V _{DC} /3	U ₁₂₀
1	1	0	-V _{DC}	0	V _{DC}	-2V _{DC} /3	0	U ₁₈₀
1	0	0	0	-V _{DC}	V _{DC}	-V _{DC} /3	-V _{DC} /3	U ₂₄₀
1	0	1	V _{DC}	-V _{DC}	0	V _{DC} /3	-V _{DC} /3	U ₃₀₀
1	1	1	0	0	0	0	0	U ₍₁₁₁₎

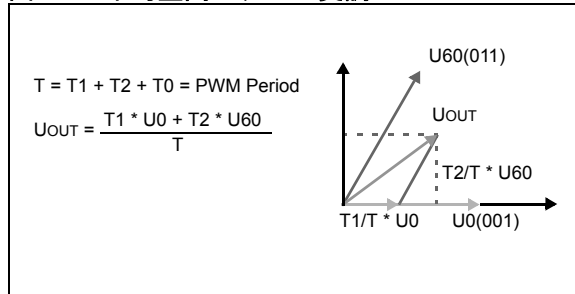
このなかで、3つの出力がすべて+バスまたは-バスに接続された2つの状態については、いずれの相でもライン間電圧が存在しないため、NULL 状態と見なされます。このような状態は、SVM スターの原点にプロットされます。その他の6つの状態は、図12に示すようにそれぞれ60度ずつ異なる回転角度のベクトルとして表現されます。

図 12: 空間ベクトル変調



空間ベクトル変調では、合成ベクトルはすべて隣接する2つのベクトルの成分の合計として表現できます。図13では、UOUT が目的の合成ベクトルです。このベクトルはU60とU0の間のセクタに存在します。あるPWM周期Tにおいて、T1/TではU0が出力され、T2/TではU60が出力されるとすると、この周期の平均がUOUTとなります。

図 13: 平均空間ベクトル変調



T1 と T2 の値は、0 ～ 60 電気角度に対する 172 通りの正弦波小数値を含むルックアップテーブルから取得します。この結果、6つのセグメントのそれぞれにおいて1つの軸がそのセグメントの正反対に位置しており、残りの2つの軸は対称にセグメントの境界にあります。これら2つの境界軸に沿ったベクトル成分の値が、T1 と T2 に等しくなります。計算方法の詳細については、本アプリケーション ノートに付属の SVM.c ファイルを参照してください。

図14に示すように、PWM 周期 T において、T1/T ではベクトル T1 が出力され、T2/T ではベクトル T2 が出力されます。その他の期間は、NULL ベクトルが出力されます。dsPIC30F デバイスはセンターアライン PWM として設定されており、周期の中央で波形が左右対称となります。この構成とすること

で、毎周期ごとにライン間で2つのパルスが得られます。実質的なスイッチング周波数は2倍になり、パワー デバイスのスイッチング損失を増大させずにリップル電流を低減できます。

図 14: 周期 T における PWM

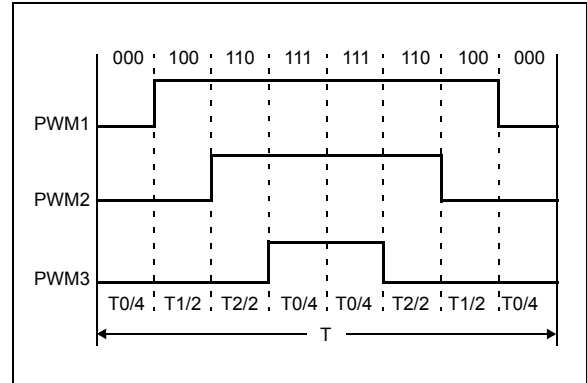
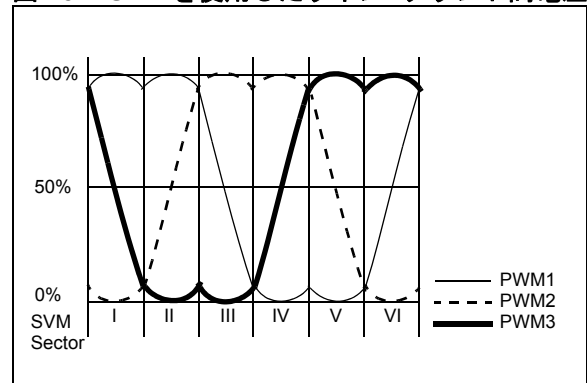


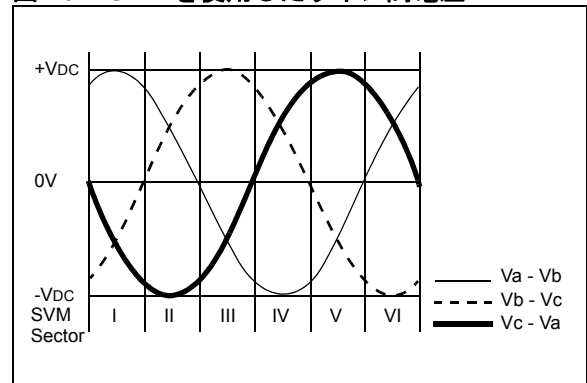
図15に、SVMを使用したデューティ サイクルでの1回転の完全な電気角度を示します。値は、0% ～ 100% のデューティ サイクルを表します。

図 15: SVM を使用したライン/グランド間電圧



この結果得られるライン間電圧を図16に示します。全振幅の正弦波電圧がモーター巻線に供給されることになります。

図 16: SVM を使用したライン間電圧



結論

dsPIC30F2010 は、PMSM モーターを正弦波電圧で制御する低コストのソリューションとして理想的です。MCPWM などのモーター制御用周辺モジュールと強力な処理能力を組み合わせることで、空間ベクトル変調による正弦波生成や PID ループによるモーター速度の制御など、多くのアルゴリズムを利用できます。

dsPICDEM™ MCLV 開発ボードにはこうしたアプリケーションの動作に必要なハードウェアが揃っており、システム全体のコストを低く抑えることができます。

複数のソフトウェア ファイルは AN1017.zip に圧縮されており、マイクロチップ社のウェブサイト www.microchip.com からダウンロードできます。

改版履歴

リビジョン A (2005 年 12 月)

- 本文書の初版リリース

マイクロチップ社デバイスのコード保護機能に関する以下の点にご留意ください。

- マイクロチップ社製品は、その該当するマイクロチップ社データシートに記載の仕様を満たしています。
- マイクロチップ社では、通常の条件ならびに仕様どおりの方法で使用情况、マイクロチップ社製品は現在市場に流通している同種製品としては最もセキュリティの高い部類に入る製品であると考えております。
- コード保護機能を解除するための不正かつ違法な方法が存在します。マイクロチップ社の確認している範囲では、このような方法のいずれにおいても、マイクロチップ社製品をマイクロチップ社データシートの動作仕様外の方法で使用する必要があります。このような行為は、知的所有権の侵害に該当する可能性が非常に高いと言えます。
- マイクロチップ社は、コードの保全について懸念を抱いているお客様と連携し、対応策に取り組んでいきます。
- マイクロチップ社を含むすべての半導体メーカーの中で、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、マイクロチップ社が製品を「解読不能」として保証してい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。マイクロチップ社では、製品のコード保護機能の改善に継続的に取り組んでいます。マイクロチップ社のコード保護機能を解除しようとする行為は、デジタルミレニアム著作権法に抵触する可能性があります。そのような行為によってソフトウェアまたはその他の著作物に不正なアクセスを受けた場合は、デジタルミレニアム著作権法の定めるところにより損害賠償訴訟を起こす権利があります。

本書に記載されているデバイス アプリケーションなどに関する情報は、ユーザーの便宜のためにのみ提供されているものであり、更新によって無効とされることがあります。アプリケーションと仕様の整合性を保証することは、お客様の責任において行ってください。マイクロチップ社は、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。マイクロチップ社は、本書の情報およびその使用に起因する一切の責任を否認します。マイクロチップ社デバイスを生命維持および/または保安のアプリケーションに使用することはデバイス購入者の全責任において行うものとし、デバイス購入者は、デバイスの使用に起因するすべての損害、請求、訴訟、および出費に関してマイクロチップ社を弁護、免責し、同社に不利益が及ばないようにすることに同意するものとします。暗黙的あるいは明示的を問わず、マイクロチップ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 の社名とロゴ、Microchip ロゴ、Accuron、dsPIC、KEELOQ、KEELOQ ロゴ、MPLAB、PIC、PICmicro、PICSTART、rPIC、SmartShunt 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。


FilterLab、Linear Active Thermistor、MXDEV、MXLAB、SEEVAL、SmartSensor、The Embedded Control Solutions Company は、米国における Microchip Technology Incorporated の登録商標です。

Analog-for-the-Digital Age、Application Maestro、CodeGuard、dsPICDEM、dsPICDEM.net、dsPICworks、dsSPEAK、ECAN、ECONOMONITOR、FanSense、In-Circuit Serial Programming、ICSP、ICEPIC、Mindi、MiWi、MPASM、MPLAB Certified ロゴ、MPLIB、MPLINK、mTouch、PICkit、PICDEM、PICDEM.net、Pictail、PIC³² logo、PowerCal、PowerInfo、PowerMate、PowerTool、Real ICE、rLAB、Select Mode、Total Endurance、UNI/O、WiperLock、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。

その他、本書に記載されている商標は、各社に帰属します。

© 2008, Microchip Technology Incorporated, Printed in the U.S.A., All Rights Reserved.

 再生紙を使用しています。

QUALITY MANAGEMENT SYSTEM
CERTIFIED BY DNV
== ISO/TS 16949:2002 ==

マイクロチップ社では、Chandler および Tempe (アリゾナ州)、Gresham (オレゴン州) の本部、設計部およびウエハ製造工場そしてカリフォルニア州とインドのデザインセンターが ISO/TS-16949:2002 認証を取得しています。マイクロチップ社の品質システムプロセスおよび手順は、PIC® MCU および dsPIC® DSC、KEELOQ® コードホッピングデバイス、シリアル EEPROM、マイクロペリフェラル、不揮発性メモリ、アナログ製品に採用されています。また、マイクロチップ社の開発システムの設計および製造に関する品質システムは、ISO 9001:2000 の認証を受けています。

世界各国での販売およびサービス

北米

本社

2355 West Chandler Blvd.
Chandler, AZ 85224-6199
Tel: 480-792-7200
Fax: 480-792-7277
テクニカル サポート :
<http://support.microchip.com>
ウェブ アドレス :
www.microchip.com

アトランタ

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

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

Farmington Hills, MI
Tel: 248-538-2250
Fax: 248-538-2260

ココモ

Kokomo, IN
Tel: 765-864-8360
Fax: 765-864-8387

ロサンゼルス

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

サンタクララ

Santa Clara, CA
Tel: 408-961-6444
Fax: 408-961-6445

トロント

Mississauga, Ontario,
Canada
Tel: 905-673-0699
Fax: 905-673-6509

アジア / 太平洋

アジア太平洋支社

Suites 3707-14, 37th Floor
Tower 6, The Gateway
Harbour City, Kowloon
Hong Kong
Tel: 852-2401-1200
Fax: 852-2401-3431

オーストラリア - シドニー

Tel: 61-2-9868-6733
Fax: 61-2-9868-6755

中国 - 北京

Tel: 86-10-8528-2100
Fax: 86-10-8528-2104

中国 - 成都

Tel: 86-28-8665-5511
Fax: 86-28-8665-7889

中国 - 香港 SAR

Tel: 852-2401-1200
Fax: 852-2401-3431

中国 - 南京

Tel: 86-25-8473-2460
Fax: 86-25-8473-2470

中国 - 青島

Tel: 86-532-8502-7355
Fax: 86-532-8502-7205

中国 - 上海

Tel: 86-21-5407-5533
Fax: 86-21-5407-5066

中国 - 瀋陽

Tel: 86-24-2334-2829
Fax: 86-24-2334-2393

中国 - 深川

Tel: 86-755-8203-2660
Fax: 86-755-8203-1760

中国 - 武漢

Tel: 86-27-5980-5300
Fax: 86-27-5980-5118

中国 - 厦門

Tel: 86-592-2388138
Fax: 86-592-2388130

中国 - 西安

Tel: 86-29-8833-7252
Fax: 86-29-8833-7256

中国 - 珠海

Tel: 86-756-3210040
Fax: 86-756-3210049

アジア / 太平洋

インド - バンガロール

Tel: 91-80-4182-8400
Fax: 91-80-4182-8422

インド - ニューデリー

Tel: 91-11-4160-8631
Fax: 91-11-4160-8632

インド - プネ

Tel: 91-20-2566-1512
Fax: 91-20-2566-1513

日本 - 横浜

Tel: 81-45-471- 6166
Fax: 81-45-471-6122

韓国 - 大邱

Tel: 82-53-744-4301
Fax: 82-53-744-4302

韓国 - ソウル

Tel: 82-2-554-7200
Fax: 82-2-558-5932 または
82-2-558-5934

マレーシア - クアラルンプール

Tel: 60-3-6201-9857
Fax: 60-3-6201-9859

マレーシア - ペナン

Tel: 60-4-227-8870
Fax: 60-4-227-4068

フィリピン - マニラ

Tel: 63-2-634-9065
Fax: 63-2-634-9069

シンガポール

Tel: 65-6334-8870
Fax: 65-6334-8850

台湾 - 新竹

Tel: 886-3-572-9526
Fax: 886-3-572-6459

台湾 - 高雄

Tel: 886-7-536-4818
Fax: 886-7-536-4803

台湾 - 台北

Tel: 886-2-2500-6610
Fax: 886-2-2508-0102

タイ - バンコク

Tel: 66-2-694-1351
Fax: 66-2-694-1350

ヨーロッパ

オーストラリア - 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: 45-4450-2828
Fax: 45-4485-2829

フランス - パリ

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

ドイツ - ミュンヘン

Tel: 49-89-627-144-0
Fax: 49-89-627-144-44

イタリア - ミラノ

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

オランダ - ドリユーネン

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

スペイン - マドリッド

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

英国 - ウォーキングラム

Tel: 44-118-921-5869
Fax: 44-118-921-5820