

AVR444 : 3相ブラシレスDC電動機の感知器なし制御

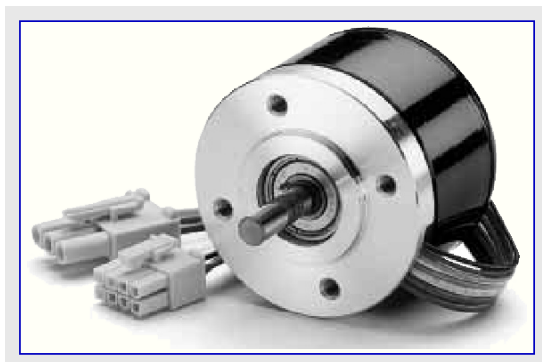
要点

- 強力な感知器なし整流(転流)制御
- 外部速度基準
- 過電流検知/保護
- 基本的な速度制御部内包
- C言語での全ソースコード
- 項目変更によって新規電動機への改造が可能なソースコード
- 電動機制御用に多数のI/Oピン/周辺機能を不使用。
状態LED、通信、使用者入力のような他の目的に使用可能。
- ピンとソースコード互換デバイスのATmega48/88/168に於いて変更なしで動作

1. 序説

この応用記述は安価なATmega48マイクロコントローラとで3相ブラシレスDC(BLDC)電動機の感知器なし整流(転流)制御を実装する方法を記述します。市場に於ける殆どの3相BLDC電動機に適合する一般的な解決策が提供されます。全部のソースコードがC言語で書かれ、アセンブリ言語は全く必要とされません。

ATmega48/88/168デバイスは全てのピンとソースコードが互換です。違いはメモリ容量だけです(訳補:基本的にC言語での場合)。この応用記述はATmega48を意識して書かれていますが、本資料でのATmega48へのどの参照も、ATmega88/168にも適用されます。



2. 動作の理屈

本資料はブラシレスDC電動機に対する原理を詳細に説明しません。代わりにその状況に於いて重要な感知器なし制御に集中します。3相ブラシレスDC電動機の紹介については「AVR443:3相ブラシレスDC電動機の感知器に基く制御」応用記述を調べてください。

2.1. 波形

一般的に受け入れられるBLDC電動機の定義は永久磁石同期電動機で得られる正弦状逆起電力(back-EMF)に対するものとしての、台形逆起電力を持つ永久磁石電動機です。この応用記述は台形逆起電力を持つBLDC電動機に適用します。

3相BLDC電動機の代表的な台形逆起電力と対応する駆動電圧が図1.で示されます。毎回の整流(転流)段階に於いて、1つの相巻き線が正供給電圧に接続され、1つの相巻き線が負供給電圧に接続され、そして1つの相は浮きです。浮いている相の逆起電力は正と負の供給電圧の平均を横切る時に“0交差”に帰着します。この0交差は図1.に於いてZCとして記されます。

0交差は2つの整流(転流)の丁度中央で起こります。一定速または緩やかに変わる速度では、1つの整流(転流)から0交差までの時間と0交差から次の整流(転流)までの時間は同等です。これは感知器なし整流(転流)制御の本実装に対する基本として用いられます。



8ビット AVR[®]
マイクロコントローラ

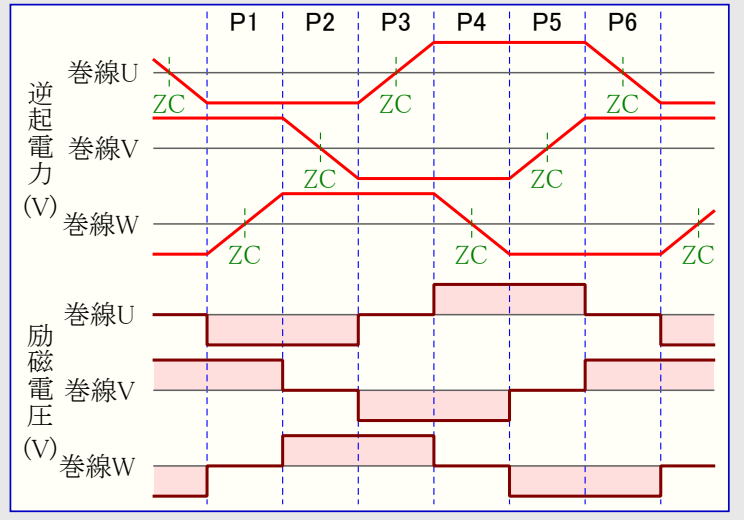
応用記述

本書は一般の方々の便宜のため有志により作成されたもので、Atmel社とは無関係であることを御承知ください。しおりのはじめにでの内容にご注意ください。

Rev. 8012A-10/05, 8012AJ2-03/21

0交差が検出されなければならない浮き段階は整流(転流)の段階毎に変わります。0交差を検出するために各相巻き線に対して1つのADCチャンネルが必要とされます。

図1. 波形



2.2. 始動

逆起電力の大きさは電動機速度に直接比例します。これは低速に於いて信号対雑音比が非常に小さいので、0交差検出を極端に難しくします。従ってこの応用記述で提供される感知器なし整流(転流)の仕組みは始動中と非常に低い速度で動きません。ブラシレスDC電動機の感知器なし始動のために多くの計略が長年に渡って提案されています。これは複雑さと計算の複雑さに於いて異なり、全てに合う1つの解決策があるとは思えません。更に、これらの始動方法の多くは特許です。

この応用記述では簡単な“盲目”始動が用いられます。最初の数回転のための整流(転流)相互間遅延の表がフラッシュメモリに格納されます。この手順は逆起電力帰還に注目しないで実行されます。そして感知器なし整流(転流)制御部へ制御が渡されます。このかなり簡単な方法は予め電動機の負荷が分かっている時に大変上手く動きます。

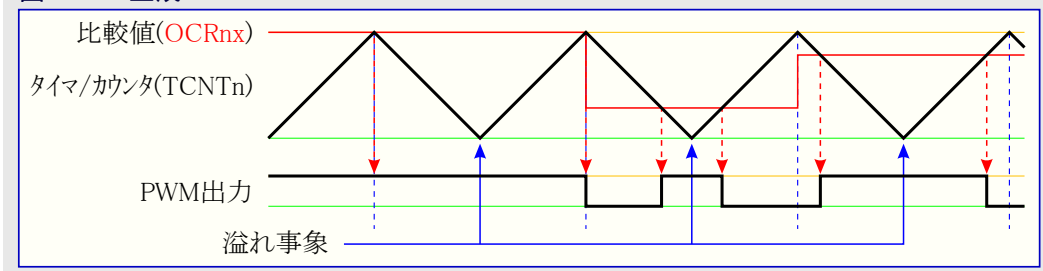
整流(転流)相互間遅延は‘StartupDelay’関数で整流(転流)計時器(タイマ/カウンタ1)を使って生成されます。他の始動方法に関して必要ならば、同梱のソースコード資料をご覧ください。

2.3. PWMとA/D変換

電動機は速度/トルクはパルス幅変調(PWM:Pulse Width Modulation)によって制御されます。PWMがどう動き、そしてPWMによって生成される雑音の多い環境で信頼に足る測定をするためにA/D変換器(ADC)と相互にどう影響し合うのかを理解することが重要です。

PWMは位相基準動作と呼ばれるものを使います。この動作は1つのPWM区間で対称的なPWM出力にする両傾斜動作で計数器を使います。更に、PWM出力のデューティサイクルを決める比較値が緩衝され、このためにPWM周期の中央で更新されません。図2.は計数器値、比較値、PWM出力間の関連を示します。各PWM区間は図で青破線によって分けられます。この図はタイマ/カウンタが0に達する時に溢れ事象を起すことも示します。この事象はADC採取の自動起動に使うことができます。デューティサイクルが非常に低くなければ、これは(或る程度)長い時間の間、PWM出力が安定する点です。これはPWM切り替え雑音が低い時に浮き相電圧のADC採取が行われることを保証するのに使われます。

図2. PWM生成



(訳補) タイマ/カウンタ部に於けるPWM出力のPWM周期と、結果として出力されるPWM信号に於けるPWM周期の定義が異なることに注意してください。タイマ/カウンタ部では頂上(TOP)値を変えない限り、常に一定の周期として説明する都合上、頂上値間をPWM周期としています。これに対して結果のPWM出力では、(一般的にも)上昇端間または下降端間をPWM周期とします。これは比較値が変更された時にPWM周期が前後で異なります。然しながら、この場合でもタイマ/カウンタ部でのPWM周期を適用すると、その周期に対する位相は保たれています。上記では前者をPWM区間、後者をPWM周期として記述しています。

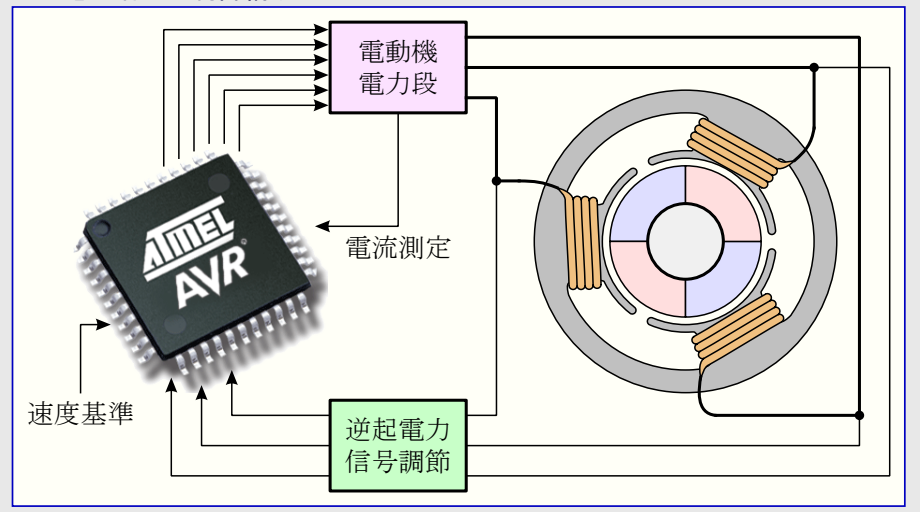
2.4. ハードウェア

3相電動機の感知器なし制御のために提案する解決策は次の6つの部分から成ります。

- AVR ATmega48/88/168マイクロ コントローラ
- 3相電動機
- 電動機電力段
- 逆起電力信号調節回路
- 速度基準入力
- 電流測定回路

これらの部分の相互接続が図3.で示されます。

図3. 感知器なし制御構成



電動機電力段は3相電動機に度々使われる標準的な3つの半ブリッジ構成です。図4.はこの回路の概念回路図を示します。U,V,Wは電動機の3つの相巻線です。xx_PWMと記された信号はマイクロ コントローラからの制御信号です。スイッチは一般的にトランジスタ、またはスイッチとしての働きができる同様な半導体で実装されます。電力段回路実装の詳細は(様々に)異なり、本資料の範囲外です。ATAVRMC100電動機制御キットが広範囲の電動機に適合する電力段回路のような例を与えます。回路図はwww.atmel.comで入手可能です。

V_mに接続されたスイッチはHigh側スイッチと呼ばれます。GNDに接続されたスイッチは同様にLow側スイッチと呼ばれます。図1.で示されるようなBLDC電動機を動かす時に1つのHigh側と1つのLow側のスイッチだけが常に開放され、1つの相巻線と別の1つの相巻線とで電流が流れる閉回路を作成し、一方最後の1つの相巻線は浮き(開放)のままにされます。

各スイッチを渡るダイオードは一般的にフライバックダイオードと呼ばれ、電動機のような大きな誘導性負荷の切り替え時に発生し得る尖頭高電圧からスイッチを保護します。いくつかのトランジスタは外囲器内にこのダイオードを含みます。

電力段とGND間の単一分圧抵抗器は電動機の消費電流測定に使われます。この抵抗器を通じて大電流が通り得るため、この抵抗は可能な限り小さく、然しながら十分な精度でのA/D変換読み取りを与えるように充分大きくあるできます。また、この抵抗器が最大電流で浪費される電力に対して見積られることを保証してください。

図4.は電力段が電動機巻線にどう接続され、スイッチに対して制御信号がどう接続されるかを示します。

図4. 電力段

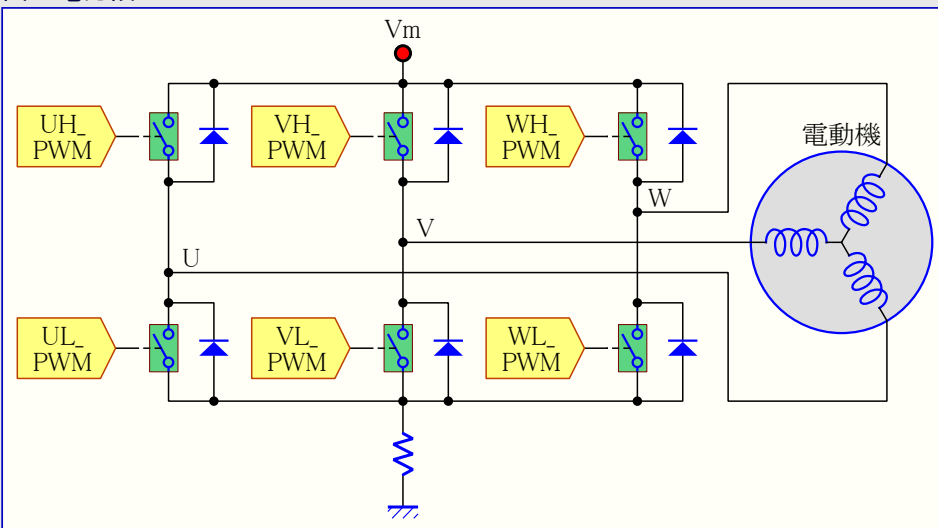


図5. PWM分配論理回路

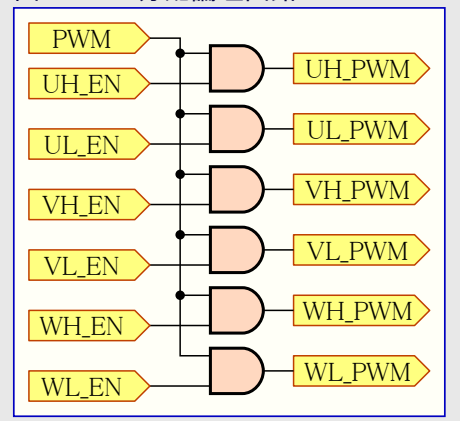


図4.の電力段を制御するために、個別にON/OFFできる6つの同期したPWM信号が必要とされます。ATmega48マイクロ コントローラは6つのPWM信号を生成できますが、全てのタイマ/カウンタ部の使用が必要です。整流(転流)タイミングに利用可能な1つのタイマ/カウンタを持つことが望まれます。これに対する解決策は1つのPWM信号だけを生成し、この信号を活性なスイッチに配線することです。これは6つの外部ANDゲートを使うことによって容易に達成されます。各ANDゲートが1つの電力段スイッチを制御します。PWM信号はANDゲートの入力の1つに配線されます。マイクロ コントローラからの6つの汎用I/Oピンが各ANDゲートに対する許可信号として用いられます。PWM分配論理回路は図5.で示されます。

マイクロ コントローラがリセット中の間の駆動信号浮き状態を防ぐため、PWM線にプルダウン抵抗を配置することが推奨されます。これはPWM線が浮き状態の時に全てのスイッチを効果的にOFFとします。

2.4.1. 分圧器/低域通過濾波器回路

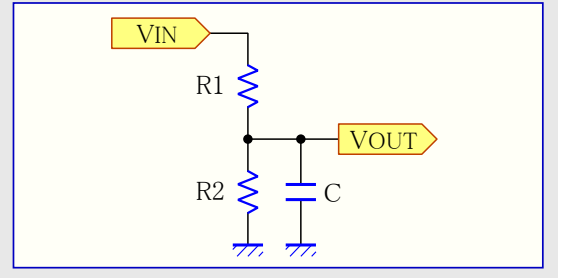
設計の至る所で度々、受動分圧器と低域通過濾波器(VD/LPF)の回路が使用されます。この回路の配置は図6.で示されます。

この回路の部品値は望むDC利得と低域通過濾波器カットオフ周波数に依存します。以下の所見が部品の選択を手助けするでしょう。

- 低い周波数に於いて、回路は通常に分圧器として動きます。 $V_{OUT} = V_{IN} \times (R_2 \div (R_1 + R_2))$ です。
- 高い周波数に対しては、コンデンサCがこれらの周波数を絶えず濾波するGNDへの短絡として動きます。
- 濾波器のカットオフ周波数は次式によって与えられます。

$$\omega_0 = (R_1 + R_2) \div (R_1 \times R_2 \times C)$$
- 濾波器を通る大きな電流を避けるため、 $R_1 + R_2$ は大きく(10~100k Ω)あるべきです。

図6. ADC用の分圧器と低域通過濾波器の回路



2.4.2. A/D変換基準電圧

0交差は浮き相が2つの供給路の平均電圧を横切る時に起きます。この応用記述では負供給がGNDレベルと仮定され、電動機供給電圧の半分を0交差電圧とします。この電動機供給電圧依存性は固定の0交差閾値電圧の使用を非実用的にします。代わりに、A/D変換基準電圧として電動機供給電圧(またはその縮小版)が使われます。電動機供給電圧はADCへ供給される前に低域通過濾波されることが必要です。この目的に図6.の分圧/低域通過濾波器(VD/LPF)が使われるべきです。DC利得はその電圧が1.0V~AVCCの間でADCに関して許容可能な範囲になるように選択されるべきです。

この回路のDC利得がAREFピンの相対的に低いインピーダンスによって影響を及ぼされることに注意してください。これは部品値の選択またはソフトウェアのどちらかで補償されなければなりません。

2.4.3. 逆起電力信号調節

3つの相電圧は3つの分圧/低域通過濾波器(VD/LPF)を通してA/D変換器(ADC)へ接続されるべきです。ADCの全電圧範囲を利用するために、この分圧/濾波器はA/D変換基準電圧と同じDC利得であるべきです。低域通過濾波器は逆起電力信号に対する著しい遅れなしに、可能な限り多くの高周波数雑音を濾波除去するように設計されるべきです。

2.4.4. 電流測定

分圧(電流検出)抵抗を通る電流はPWM切り替えと整流(転流)のために高い周波数成分で満ちています。意味のある消費電流のADC採取にするため、それは低域通過濾波されなければなりません。分圧(電流検出)抵抗上の電圧は代表的に小さいため、分圧は不要です。そうでなければ(分圧が必要なほど大きければ)、不要な電力消費を避けるため、より小さな分圧(電流検出)抵抗が考慮されるべきです。受動低域通過濾波器(直列抵抗とGNDへのコンデンサ)は濾波に関して充分であるべきです。

2.4.5. 固定基準電圧

A/D変換基準電圧(AREFピン)が電動機供給電圧と共に変化するので、正確に電流測定をするために固定、既知の基準電圧が必要とされます。ATmega48はバンドギャップ内部基準電圧を持ち、そしてこれはADCにより、AREFに関して測定できますが、この目的に対しては(基準電圧切り替え後の)安定が遅すぎます。代わりにこの応用記述では外部基準電圧が使われます。それが安定で且つ電圧レベルがコンパイル時に於いて既知である限り、この基準電圧にどんな供給元も使うことができます。この応用記述では、既知の基準電圧を生成するために分圧/低域通過濾波器(VD/LPF)を通してVCC電圧が供給されます。この場合のVD/LPFのDC利得は縮小された固定の基準電圧が決してAREF電圧よりも高くならないように選ばれます。VCCのどんなリプルも取り去るために、コンデンサは充分大きくあるべきです。

2.4.6. 速度基準

この応用記述では速度基準としてアナログ信号が使われました。この速度基準はどんな信号、例えば温度感知器読み取りにもすることができます。この応用記述では単純な可変抵抗器回路が使われました。入力としての電動機供給電圧とAREFと同じ分圧で、R2抵抗器として可変抵抗器を使う図6.のような分圧/低域通過濾波器(VD/LPF)は全ADC範囲が使われることを保証します。

2.4.7. 過電流検出/保護

A/D変換(ADC)での電流測定は各PWM周期に1度、または20kHzのPWM基本周波数で概ね50 μ s毎に行われます。危機的な過電流状態に対してより速い反応が必要とされるなら、アナログ比較器を使うことができます。濾波された分圧(電流検出)抵抗電圧はアナログ比較器入力の1つに接続されます。最大消費電流に於ける分圧(電流検出)抵抗電圧を表す固定電圧が別の入力に接続されます。従って電流が危機的に高い場合に電力を切断する割り込みを得ることが可能です。アナログ比較器割り込みが走行する前に走行中のどの割り込みも終了しなければならず、このために電力が切断される前に小さな遅れが有り得ます。電動機への電力を非常に素早く切断することが重要なら、PWM信号を禁止する外部回路を使うことができます。

2.4.8. ATmega48接続

AVRと各種補助系間の接続は表1.で一覧にされます。ポートBの全信号はお互いに相互交換することができます。同じことはADCチャネルに対して通用します。

表1. ATmega48接続

Tmega48ピン	説明	入出力方向
AREF	電動機供給基準電圧	入力
PB0	WH_EN : W相High側PWM許可	出力
PB1	WL_EN : W相Low側PWM許可	出力
PB2	VH_EN : V相High側PWM許可	出力
PB3	VL_EN : V相Low側PWM許可	出力
PB4	UH_EN : U相High側PWM許可	出力
PB5	UL_EN : U相Low側PWM許可	出力
PC0	U相逆起電力ADC入力	入力
PC1	V相逆起電力ADC入力	入力
PC2	W相逆起電力ADC入力	入力
PC3	分圧(電流検出)抵抗電圧ADC入力	入力
PC4	速度基準ADC入力	入力
PC5	VCC基準電圧ADC入力	入力
PD5	PWM出力信号	出力
PD6	アナログ比較器入力0(非反転入力)	入力
PD7	アナログ比較器入力1(反転入力)	入力

2.4.9. 使用周辺機能

次の内蔵周辺機能部が使われます。

表2. 使用周辺機能

周辺機能部	使い方
タイマ/カウンタ0	PWM生成 ADC採取起動
タイマ/カウンタ1	整流(転流)タイミング 0交差防止タイミング
A/D変換器	0交差検出 電流測定 速度基準入力
アナログ比較器	過電流検出/保護

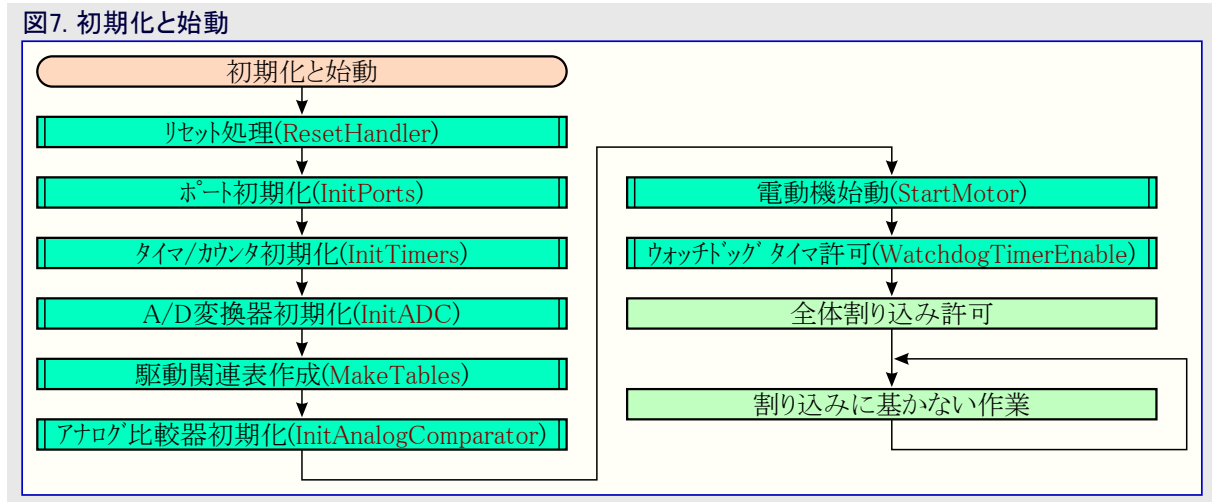
2.5. ソフトウェア

ソフトウェア実装は4つの主要部分に分けられます。

- ・ 初期化と始動
- ・ 感知器なし整流(転流)制御
- ・ 速度と電流の制御
- ・ 停止と過電流の検出

2.5.1. 初期化と始動

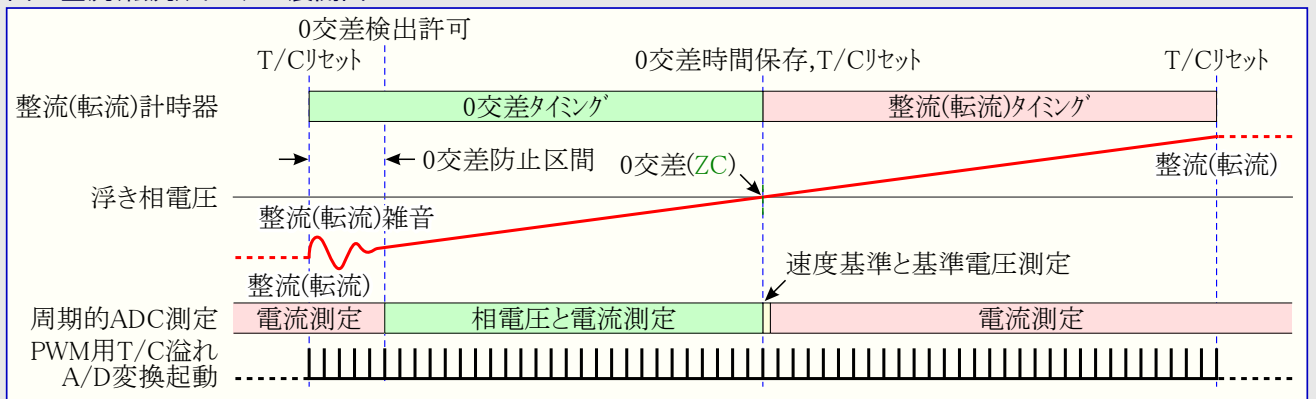
初期化と始動部は全ての周辺機能を初期化し、電動機始動手順を進行して、割り込み駆動感知器なし整流(転流)制御に電動機整流(転流)の制御を完全に手渡します。同時に割り込みに基づかない全ての作業を進行する無限繰り返しへ移行します。含まれる例でのこのような作業は速度と電流の制御だけです。図7は初期化と始動に関する流れ図を示します。'全体割り込み許可'と記された部分は感知器なし整流(転流)制御が割り込み駆動整流(転流)制御に手渡される点を記します。



2.5.2. 感知器なし整流(転流)

感知器なし整流(転流)がどう実装されるかを理解するため、2つの整流(転流)間で起こる事象のタイミングに目を通すことが有用です。図8は2つの整流(転流)間での浮き相の電圧の展開図を示します。

図8. 整流(転流)タイミングの展開図



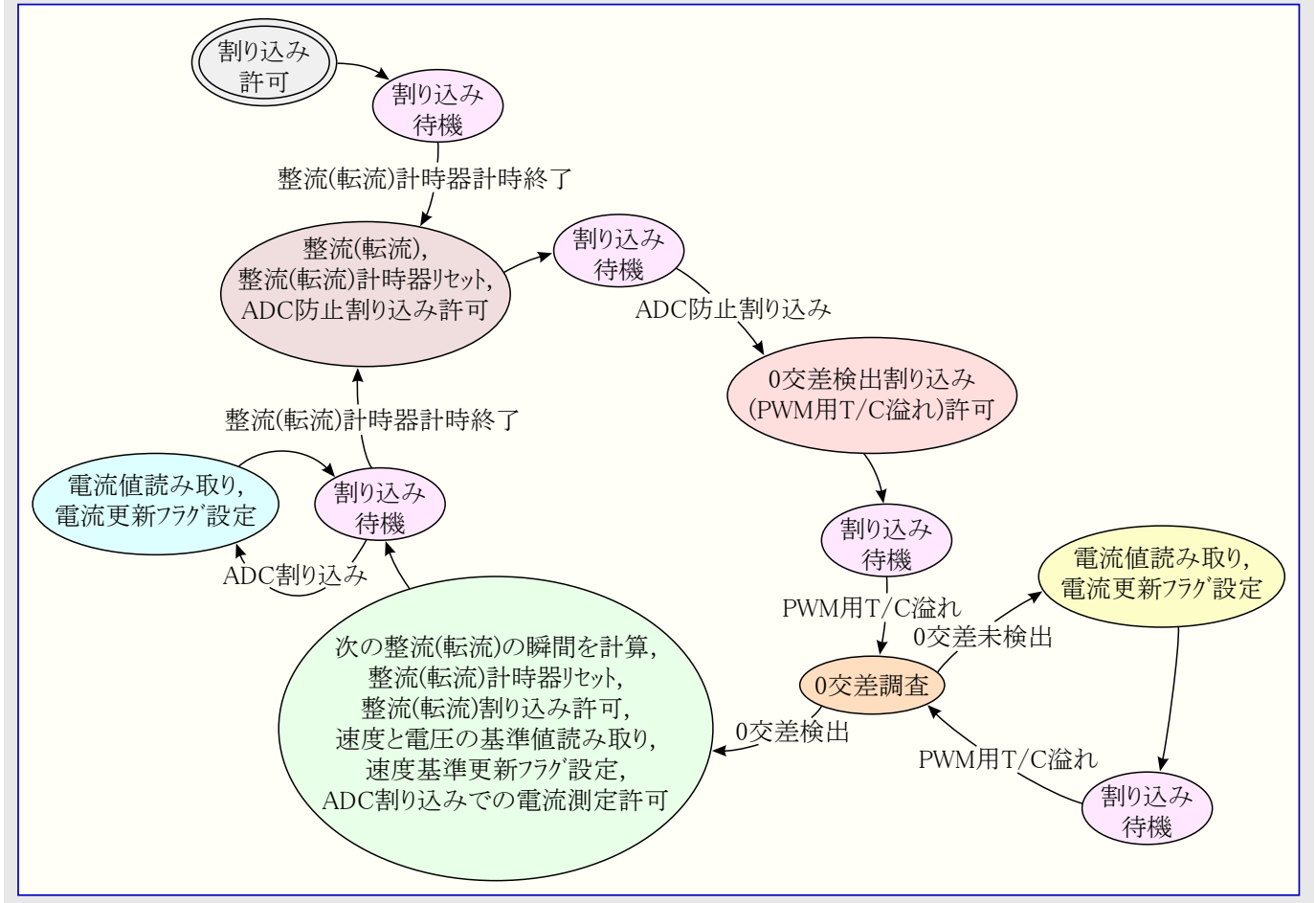
感知器なし整流(転流)制御は多数の割り込みを使って実装されます。割り込みは整流(転流)周回の各種段階の間に許可され、そして禁止されます。表3は各割り込みの責務を示します。図9の状態遷移図は感知器なし整流(転流)を実行するために割り込みがどう連携するかを示します。

mainの無限繰り返しは状態機構が'割り込み待機'と記された状態の1つである時にいつも走行します。

表3. 割り込みの責務

割り込み	責務
タイマ/カウンタ0(PWM計時器)溢れ	0交差検出
タイマ/カウンタ1(整流(転流)計時器)比較A一致	整流(転流)タイミング
タイマ/カウンタ1(整流(転流)計時器)比較B一致	0交差検出防止タイミング
A/D変換完了	電流測定
アナログ比較器条件一致	過電流検出/保護

図9. 感知器なし整流(転流)状態機構



2.5.3. 整流(転流)濾波器

雑音が多い逆起電力測定と、0交差検出がPWM周期毎に1回だけ実行されることは、0交差検出に2つの整流(転流)の中央での小さな偏差を誘引し得ます。一定または緩やかに変わる速度の仮定では、低域通過特性を持つデジタル濾波器が整流(転流)タイミングを改善するでしょう。含まれるソースコードでは不正な0交差検出の影響を抑えるのに無限インパルス応答(IIR)濾波器が使われます。この濾波器は式1の形式を取ります。

式1. 整流(転流)用IIR濾波器

$$y_n = \frac{ax_n + by_{n-1}}{a+b}$$

ここでの y_n は n 段毎に濾波される時間、 x_n は n 段毎に測定される時間、そして a と b は重み係数です。

計算の効率性と数値的な安定性のため、 $a+b$ は2のべき乗であるべきです。含まれるソースコードでは $a=1$ と $b=3$ が用いられます。

2.5.4. 速度と電流の制御

感知器利用不能での速度は整流(転流)制御部からの情報を用いて計算されなければなりません。整流(転流)制御部は全体変数に回転速度を計算するの用にされる整流(転流)と0交差間の時間を格納します。同時に新規の速度測定が利用可能なことを速度制御部に告げるフラグが設定されます。外部速度基準も丁度0交差検出後に採取され、このためにこれらの新鮮な測定が同時に利用可能です。

速度情報が逆起電力0交差毎にだけ更新されるため、更新の頻度は電動機速度に比例します。離散時間制御部のパラメータが間隔に依存するため、これは問題になり得ます。例えば、一定利得のP(比例)調整部を持つためには、現在の間隔に比例した利得パラメータが計算されなければなりません。もう一方の選択は固定値を用いて、速度で変化する制御部利得を受け入れることです。

分圧(電流検出)電圧はPWM周期毎、20kHzで概ね50 μ s毎に採取されます。加えて電動機供給電圧の変化に対して補償するために、毎回の整流(転流)段階に1度、外部固定基準電圧が測定されます。この固定基準電圧は電動機供給元から引き出されたAREF電圧を計算するのに使われます。一旦AREF電圧が分かると、分圧(電流検出)電圧、従って分圧(電流検出)抵抗を通る電流を計算することができます。

2.5.5. 停止検出

回転子は予め決められた時間間隔の間に整流(転流)がなかった場合の停止を考慮されます。この目的にウォッチドッグ タイマが使われます。ウォッチドッグ時間経過周期が初期化中に設定され、ウォッチドッグ タイマは毎回の整流(転流)でリセットされます。これはウォッチドッグ割り込み処理ルーチンとマイクロコントローラ リセットの両方を起動します。(CPUの)始動で走行するリセット処理関数がリセット元を判断して、最初の電源ONとウォッチドッグ リセット後の時でマイクロコントローラの異なる動きを可能にします。これは強力な異常検出と回復を許します。

2.5.6. 過電流検出/保護

過電流検出/保護はアナログ比較器に基づきます。過電流限界を超える分圧(電流検出)電圧がアナログ比較器割り込みを起動します。この割り込みは単に電動機への電力を切断し、ウォッチドッグ タイマがマイクロコントローラをリセットするまで無限繰り返しで待機します。

3. 実装

Cで書かれた動作実装がこの応用記述と共に含まれます。ソースコードの完全な資料とコンパイル情報はソースコードと共に含まれる'[readme.html](#)'ファイルを開くことによって得られます。



本社

Atmel Corporation

2325 Orchard Parkway
San Jose, CA 95131, USA
TEL 1(408) 441-0311
FAX 1(408) 487-2600

国外営業拠点

Atmel Asia

Unit 1-5 & 16, 19/F
BEA Tower, Millennium City 5
418 Kwun Tong Road
Kwun Tong, Kowloon
Hong Kong
TEL (852) 2245-6100
FAX (852) 2722-1369

Atmel Europe

Le Krebs
8, Rue Jean-Pierre Timbaud
BP 309
78054 Saint-Quentin-en-Yvelines
Cedex
France
TEL (33) 1-30-60-70-00
FAX (33) 1-30-60-71-11

Atmel Japan

104-0033 東京都中央区
新川1-24-8
東熱新川ビル 9F
アトメル ジャパン株式会社
TEL (81) 03-3523-3551
FAX (81) 03-3523-7581

製造拠点

Memory

2325 Orchard Parkway
San Jose, CA 95131, USA
TEL 1(408) 441-0311
FAX 1(408) 436-4314

Microcontrollers

2325 Orchard Parkway
San Jose, CA 95131, USA
TEL 1(408) 441-0311
FAX 1(408) 436-4314

La Chantrerie
BP 70602
44306 Nantes Cedex 3
France
TEL (33) 2-40-18-18-18
FAX (33) 2-40-18-19-60

ASIC/ASSP/Smart Cards

Zone Industrielle
13106 Rousset Cedex
France
TEL (33) 4-42-53-60-00
FAX (33) 4-42-53-60-01

1150 East Cheyenne Mtn. Blvd.
Colorado Springs, CO 80906, USA
TEL 1(719) 576-3300
FAX 1(719) 540-1759

Scottish Enterprise Technology Park
Maxwell Building
East Kilbride G75 0QR
Scotland
TEL (44) 1355-803-000
FAX (44) 1355-242-743

RF/Automotive

Theresienstrasse 2
Postfach 3535
74025 Heilbronn
Germany
TEL (49) 71-31-67-0
FAX (49) 71-31-67-2340

1150 East Cheyenne Mtn. Blvd.
Colorado Springs, CO 80906, USA
TEL 1(719) 576-3300
FAX 1(719) 540-1759

Biometrics

Avenue de Rochepleine
BP 123
38521 Saint-Egreve Cedex
France
TEL (33) 4-76-58-47-50
FAX (33) 4-76-58-47-60

文献請求

www.atmel.com/literature

お断り: 本資料内の情報はAtmel製品と関連して提供されています。本資料またはAtmel製品の販売と関連して承諾される何れの知的所有権も禁反言あるいはその逆によって明示的または暗示的に承諾されるものではありません。Atmelのウェブサイトに表示する販売の条件とAtmelの定義での詳しい説明を除いて、商品性、特定目的に関する適合性、または適法性の暗黙保証に制限せず、Atmelはそれらを含むその製品に関連する暗示的、明示的または法令による如何なる保証も否認し、何ら責任がないと認識します。たとえAtmelがそのような損害賠償の可能性を進言されたとしても、本資料を使用できない、または使用以外で発生する(情報の損失、事業中断、または利益の損失に関する制限なしの損害賠償を含み)直接、間接、必然、偶然、特別、または付随して起こる如何なる損害賠償に対しても決してAtmelに責任がないでしょう。Atmelは本資料の内容の正確さまたは完全性に関して断言または保証を行わず、予告なしでいつでも製品内容と仕様の変更を行う権利を保留します。Atmelはここに含まれた情報を更新することに対してどんな公約も行いません。特に別の方法で提供されなければ、Atmel製品は車載応用に対して適当ではなく、使用されるべきではありません。Atmel製品は延命または生命維持を意図した応用での部品としての使用に対して意図、認定、または保証されません。

© Atmel Corporation 2005. 不許複製 Atmel®、ロコとそれらの組み合わせ、AVR®とその他はAtmel Corporationの登録商標または商標またはその付属物です。他の用語と製品名は一般的に他の商標です。

© HERO 2021.

本応用記述はAtmelのAVR444応用記述(doc8012.pdf Rev.8012A-10/05)の翻訳日本語版です。日本語では不自然となる重複する形容表現は省略されている場合があります。日本語では難解となる表現は大幅に意識されている部分もあります。必要に応じて一部加筆されています。頁割の変更により、原本より頁数が少なくなっています。

必要と思われる部分には()内に英語表記や略称などを残す形で表記しています。

青字の部分はリンクとなっています。一般的に赤字の0,1は論理0,1を表します。その他の赤字は重要な部分を表します。