

## AVR928 : BLDCモータ駆動のための量感知器なし法

Atmel AVR 8ビット マイクロコントローラ

## 要点

- 強力な感知器なし整流(転流)制御
- 立ち上げ手順

## 概要

この応用記述はBLDCモータでの感知器なし整流(転流)の実装方法を記述します。

BLDCモータの簡単なモードで始めるにあたり、感知器なし整流(転流)の基礎が説明されます。

実装に関する技術的な制限と必要条件が記述されます。

この応用記述の目的はAtmelのデバイスとスタータキットを使用して感知器なし整流(転流)を実装することに関する全ての情報を提供することです。

## 目次

1. 用語	3
2. BLDCモータ理論	3
2.1. BLDCモータの簡単化した模式	3
2.2. 6段階整流(転流)	4
2.3. 電力段	4
3. BEMF	4
3.1. BEMF 0交差	5
3.2. BEMF 対 ホール感知器	5
3.3. BEMF定数	5
4. 感知器なし制御法	5
4.1. PWM計画	5
4.1.1. L側PWM構造	6
4.1.2. 対称PWM構造	6
4.2. BEMF信号特性	6
4.2.1. 傾斜	6
4.2.2. 雑音	6
4.2.3. 式	6
4.3. 0交差検出	7
4.3.1. 信号処理	7
4.3.2. 30°相角	8
5. 感知器なし法流れ図	9
5.1. 整列段階 : ALIGN	9
5.2. 開路加速段階 : RAMP_UP	10
5.2.1. 段階時間変数	10
5.2.2. デューティ サイクル変数	10
5.2.3. BEMF検出	10
5.2.4. トルク	10
5.2.5. S形	10
5.2.6. 立ち上げ表パラメータの相互調節	11
5.2.7. 電流制限パラメータ	11
5.3. 調整段階 : RUNNING	11
5.3.1. 30°相角と消磁	12
6. 調節	12
7. 要約	13
8. 改訂履歴	13

## 1. 用語

- BLDC : ブラシレスDC
- BEMF : 逆起電力
- PWM : パルス幅変調
- PSC : 電力段制御器
- IGBT : 絶縁ゲート型バイポーラトランジスタ

## 2. BLDCモータ理論

ブラシレスDC(BLDC)モータは(機械的整流(転流)される)標準的なDCモータよりもずっと信頼できます。BLDCモータは制御と調整に関してずっと向いています。

BLDCモータは同期電動機です。切り替え制御は回転子位置に同期しなければなりません。これは以下のような2つの異なる方法で達成することができます。

- ・ ホール感知器を使用する感知器動作形態
- ・ 感知器なし形態(ホール感知器を使用しません。)

感知器制御の欠点は以下です。

- ・ ホール効果感知器、配線、コネクタの費用
- ・ 感知器の潜在的な故障

これらの理由のため、感知器なし制御は電動機とシステムの費用を減らします。

物理的な制限(BEMFとPWM雑音電圧レベル)のため、感知器なし整流(転流)は動くための最低速度が必要条件です。

感知器なし整流(転流)は機械的な負荷が不意に変化しないファンやポンプのように、電動機がこの限度を超える速度で回るそれらの応用に適合します。ファンや回転ポンプは予測可能でかなり上手く動きます。

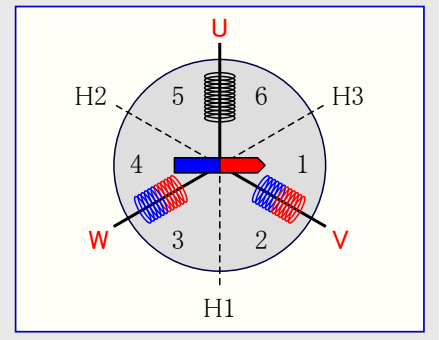
その代表的な速度限界を超える感知器なしでのBLDCモータの操作は、それをホール感知器を装備したBLDCと同様にします。故に以降の節では、回転子位置と切り替え時間に関する説明を明白にするために、仮想ホール感知器(ホール状態30°とホール感知器のような信号)を考慮します。

### 2.1. BLDCモータの簡単化した模式

BLDCモータの簡単化した模式は3つの方向U,V,Wに整列した3つの巻き線から成ります(図1)。永久磁石が回転子を形成します。ここで回転子はU,V,Wの3軸の面に垂直でそれらの軸の交点でその回転軸を持つ棒磁石として概説されます。永久磁石の向き/位置は3つの巻き線を通る電流の形態を駆動することによって制御することができます。棒磁石は電流がWからVに駆動される時に扇状角位置1に来て、そして電流がWからUに駆動される時に次の向き(扇状角2)に来ます。

ホール感知器を装備したBLDCモータについては、それらの感知器が実際の回転子位置を与えます。

図2-1. BLDCモータの簡単化した模式



## 2.2. 6段階整流(転流)

この応用記述で記載される感知器なし法で電動機巻き線を励磁する方法は6段階整流(転流)です。各段階(または扇状角)は電気的な60°の角度と等価です。6つの扇状角は360°の角度または1つの電気的回転を構成します。

巻き線構成図(図2-2.)の矢印は6つの扇状角の各々に於ける電動機巻き線を通して流れる電流方向を示します。

図(図2-3.)は6つの扇状角中で電動機の各々の引き出しに印加される電圧を示します。これら6つの扇状角を通る手順が電動機の電気的1回転を移動します。

全ての扇状角について、2つの巻き線が励磁されて1つがされません。各扇状角中に1つの巻き線が力を与えられない事実は量感知器なし制御理論の使用のために重要な特性です。

図2-2. 電流の流れ 対 回転子位置に於ける BLDCモータの模式

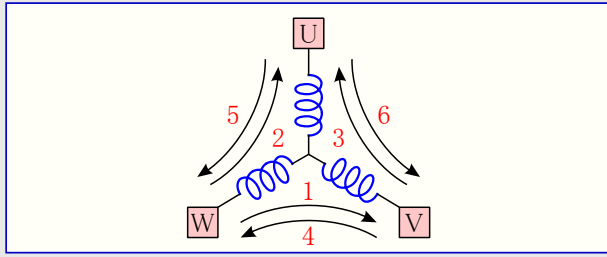
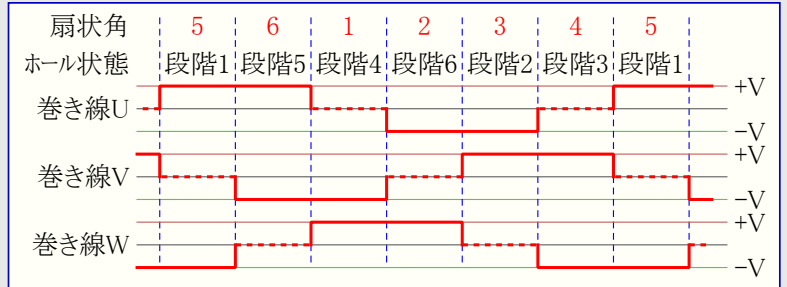


図2-3. 整流(転流)手順

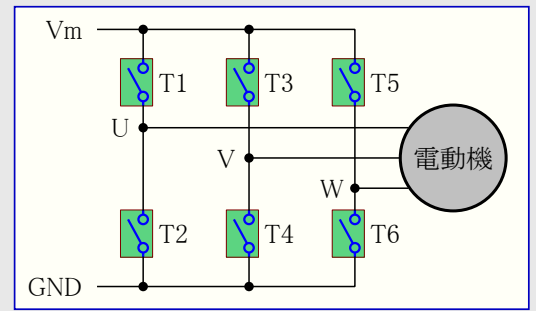


注: ・ 開放相は点線で示されるものです。  
・ ホール状態は3.2項で詳述されます。

## 2.3. 電力段

整流(転流)様式は3相ブリッジで制御されます(図2-4.をご覧ください)。このブリッジは定義された整流(転流)様式に従って切り替える6つの電力スイッチ(IGBTまたはMOS-FET)を持ちます。

図2-4. 3相ブリッジ



## 3. BEMF

回転子の動きは巻き線内での逆起電力(BEMF:Back Electro Motive Force)と呼ばれる切り替え電圧を誘導します。この電圧はそれが回る時に永久磁石回転子によって固定子巻き線で生成され、発電器として働きます。

BEMFは各巻き線と直列の電圧源として模式化することができます。

BEMF電圧特性は以下です。

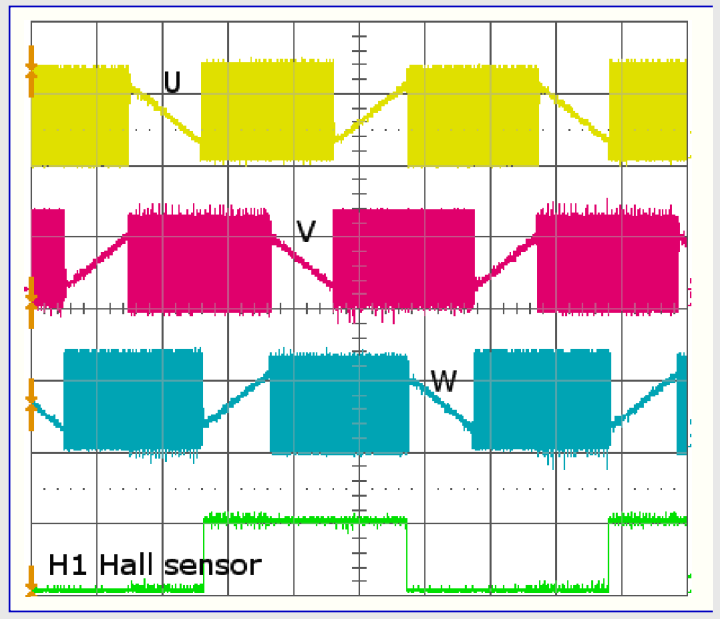
- ・ 正弦波として仮定されますが、概ね台形です。
- ・ 振幅は回転子速度に比例します。
- ・ 傾斜も回転子速度に対して変化します。

図3-1.は感知器制御を用いて電動機が回る時の3つの導線電圧を示します。

2.2項で記述されたように、駆動系は同時に2つの相を励磁し、3相の1つを浮かせます。

開放相は電動機の本EMF検出に使用されます。例えば、W相の未駆動の扇状角6と3(図2-3.)の最中に、BEMF電圧は電動機のW導線で監視されます。

図3-1. 感知器形態に於けるホール状態 対 電動機引き出し



### 3.1. BEMF 0交差

電圧0交差は(ここでは棒磁石として模式化した)永久磁石回転子が巻き線の軸に垂直に向く時に巻き線内で誘導されます。図3-1.ではU巻き線に関して、電圧を誘導する0交差は棒磁石が位置1の時に起きます。

0交差は巻き線電圧がDC電源の半分の水準を横切る時のその瞬間に検出され得ます。0交差技術は後の「4.3. 0交差検出」で詳述されます。

### 3.2. BEMF 対 ホール感知器

例え電動機が動かなくなっても、ホール感知器が常に位置を表す有効な信号を与える一方で、BEMF検出法は0交差検出のために十分な電圧を提供するように電動機が走行することが必要条件です。このため、BEMFの測定に基づく感知器なし整流(転流)に対しては、その位置を決められるようになる前に回転子が動いていなければなりません。

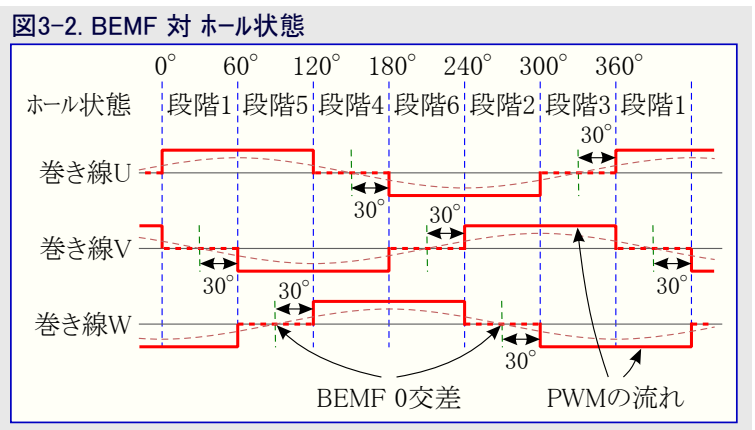
他の違いは段階変化での相でホール感知器によって提供される“ホール状態”(図3-1.)で、一方BEMFの0交差は30°の変遷で現れます(図3-2をご覧ください)。

回転子の位置は電氣的周回内の60°の分解能で“ホール状態”(3ビットの方向量)によって表現されます。それは電氣的周回内に6つの状態があることを意味します。これら3ビットの6つの“ホール状態”は次のように宣言されます。

MS\_001(段階4)、MS\_011(段階6)、MS\_010(段階2)、MS\_110(段階3)、MS\_100(段階1)、MS\_101(段階5)、MS\_001(段階4)、～

次の説明に関し、仮想ホール感知器はBEMFの0交差が対応する巻き線と関連する仮想ホール感知器信号の切り替わりに可能な限り近くで起こるような方法が考慮されます。この目的のために、仮想ホール感知器信号を提供するのに、0交差検出から30°遷移が計算されます。この計算は「4.3.2. 30°位相角」で詳細に記述されます。

6頁の「4.2.3. 式」項では、H1がUと連携され、H2はVと連携され、そしてH3がWと連携されます。



### 3.3. BEMF定数

上で記述されるように、BEMFは速度(Sp)に比例し、BEMF定数(k<sub>e</sub>)は電動機に対してV/rpmの単位で指定されます。

$$\text{BEMF} = k_e[\text{V/rpm}] \times Sp[\text{rpm}]$$

与えられた供給電圧に於いて、BEMFは電動機を速度を制限します。

## 4. 感知器なし制御法

感知器なし制御法の鍵は電動機巻き線が整流(転流)されるべき適切な瞬間を決めることです。この瞬間は回転子位置によって決められます。感知器制御では回転子位置が適切に分かります。けれども、感知器なし制御では回転子位置が別の方法によって決められなければなりません。

この応用記述で記載される感知器なしの仕組みはBEMF 0交差の正確な検出を使用します。

### 4.1. PWM計画

電動機巻き線に可変電圧を印加するためにパルス幅変調が用いられます。トランジスタ(T1～T6)のPWMデューティサイクル変更は電動機の巻き線を通して流れる電流の量を変えます。

以下の2つの最も一般的な駆動構造が台形(塊)整流(転流)に使用されます。

- ・ L側PWM構造
- ・ 対称PWM構造

実効電圧はPWMデューティサイクルに比例します。この電圧は速度と電動機の利用可能なトルクを決めます。

PWM周波数は電動機周波数よりもずっと高くなければなりません。通常の慣例は最高電動機周波数の最低10倍でPWMを形態設定することです。

PWMを使う別の利点はDC電源電圧を電動機定格電圧よりもずっと高くできることです。これは各種の電動機と電圧に制御器を合わせる柔軟性を提供します。

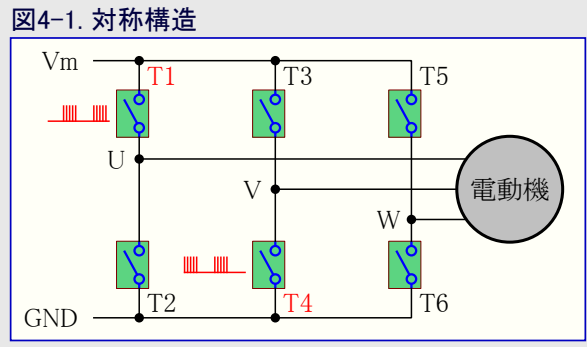
### 4.1.1. L側PWM構造

この構造では、3相ブリッジの下のトランジスタにだけPWM信号が印加されます。1つの相がHighに駆動され、別の1つがパルス幅変調されつつあり、そして3つ目の相は開放です。この方法は安価な解決策を提供します。

この整流(転流)構造では、電動機の中立接続(N)が一定のDC電圧ではなく、この方法での動作は、感知器なし制御に関して疑問です。

### 4.1.2. 対称PWM構造

より良い近似法は同じPWM信号で上と下のトランジスタを駆動する対称PWM構造を用いることです。この方法は中点をDC供給範囲の中央に保ちます。



## 4.2. BEMF信号特性

### 4.2.1. 傾斜

非常に低い速度に於いて、BEMF信号は平坦すぎて正確な0交差事象の検出を許すのに十分ではありません。故に電動機は感知器なし算法処理に切り換えるのに先立って、或る最小速度に駆動されます。

### 4.2.2. 雑音

BEMF信号はPWMの切り替えと巻き線の自己誘導のために雑音性です。回転子位置の決定に用いられるこれらの信号は位置検出誤差、そして整流(転流)誤りを引き起こすかもしれません。故に、適切な信号処理、または整流(転流)を行うソフトウェアによる濾波によって雑音は避けられなければなりません。

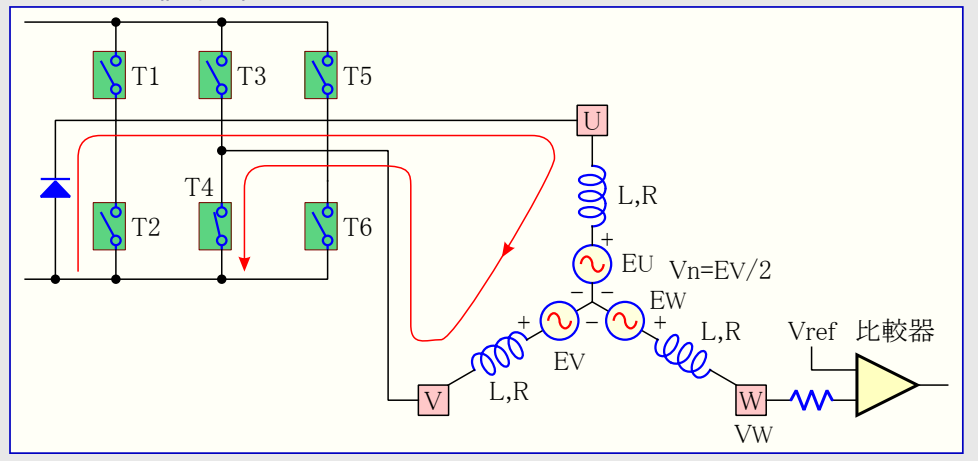
デジタル濾波は強力な方法ですが、それは処理力を消費します。信号が雑音なしに良好な状態にされるなら、このソフトウェア濾波は必要ではありません。

### 4.2.3. 式

BEMFは各巻き線内で回転子の回転によって誘導されます。故に、BEMFは3つの電圧源、 $E_U(t)$ ,  $E_V(t)$ ,  $E_W(t)$ によってモード化することができます。

これらの電圧源の振幅は速度に比例するBLDCモータのBEMF定数 $k_e$ によって与えられます。BEMF形状は正弦波であるべきと仮定され、以下の切り替え電圧を得ます。

図4-2. BEMF信号方程式



$$E_U(t) = k_e [V/rpm] \times Sp[rpm] \times \sin(360^\circ \times Sp[rpm] \div 60 \times t[s])$$

$$E_V(t) = k_e [V/rpm] \times Sp[rpm] \times \sin(360^\circ \times Sp[rpm] \div 60 \times t[s] + 120^\circ)$$

$$E_W(t) = k_e [V/rpm] \times Sp[rpm] \times \sin(360^\circ \times Sp[rpm] \div 60 \times t[s] - 120^\circ)$$

$k_e [V/rpm]$  : 電動機のBEMF定数  
 $Sp[rpm]$  : 定格速度

U相の上(H)側スイッチT1が切断されて下(L)側スイッチT4がGNDから誘導を始める時に(図4-2)、以下の式を生成することができます。

U相からは次のように中立電圧(Vn)の値を得ます。

$$V_n = -RI - L(dI/dt) - EU \dots (1)$$

V相からは次のように中立電圧(Vn)の値を得ます。

$$V_n = RI - L(dI/dt) - EV \dots (2)$$

電流が全く通って行かない未使用のW相について、次のようにVnを計算することができます。

$$V_n = VW - EV \dots (3)$$

(1)と(2)から、電動機のインダクタンスや抵抗と無関係なVnの値を得ます。

$$2 \times V_n = -EU - EV$$

$$V_n = (-EU - EV) / 2 \dots (4)$$

平衡3相システムでは相EMF電圧の和は0に等しくなります。

$$EU + EV + EW = 0 \dots (5)$$

式(5)を式(4)に組み込むことで以下を与えます。

$$V_n = EW / 2 \dots (6)$$

式(3)と式(6)を用いて、端子電圧VWは次のように表すことができます。

$$VW = 3/2EW \dots (7)$$

ここで以下に気付きます。

- ・ W相の逆起電力(BEMF)EWが0交差する時にVWで見られる電圧は0です。
- ・ 逆起電力(BEMF)信号の利得は実際のBEMFの150%です。

これはこのBEMF感知法の感度を確かめます。

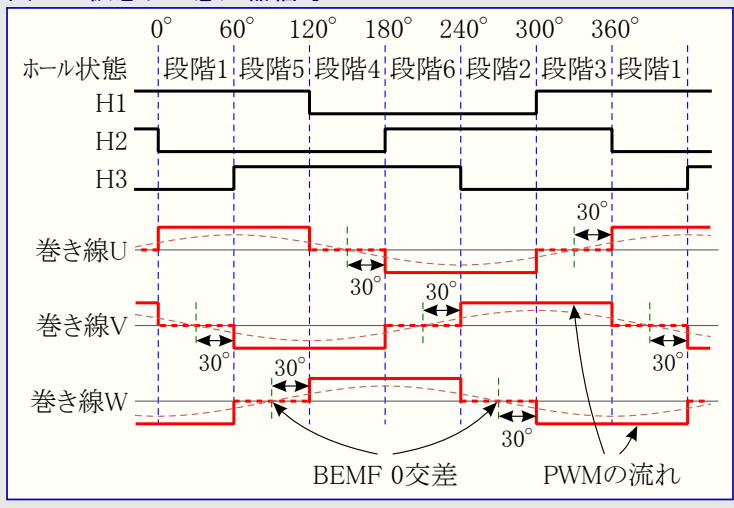
sign(x)=1である関数で、xが負またはsig(x)=0、xが正または0に等しい場合、以下の(30°ホール感知器信号のような)2進信号は正弦波形状のBEMF信号から生成することができます(図4-3をご覧ください)。

$$H1 = \text{sign}(EU(t))$$

$$H2 = \text{sign}(EV(t))$$

$$H3 = \text{sign}(EW(t))$$

図4-3. 仮想ホール感知器信号



### 4.3. 0交差検出

BEMF 0交差信号は正しい整流(転流)の瞬間を予測するために位置を還元するのに使用されます。

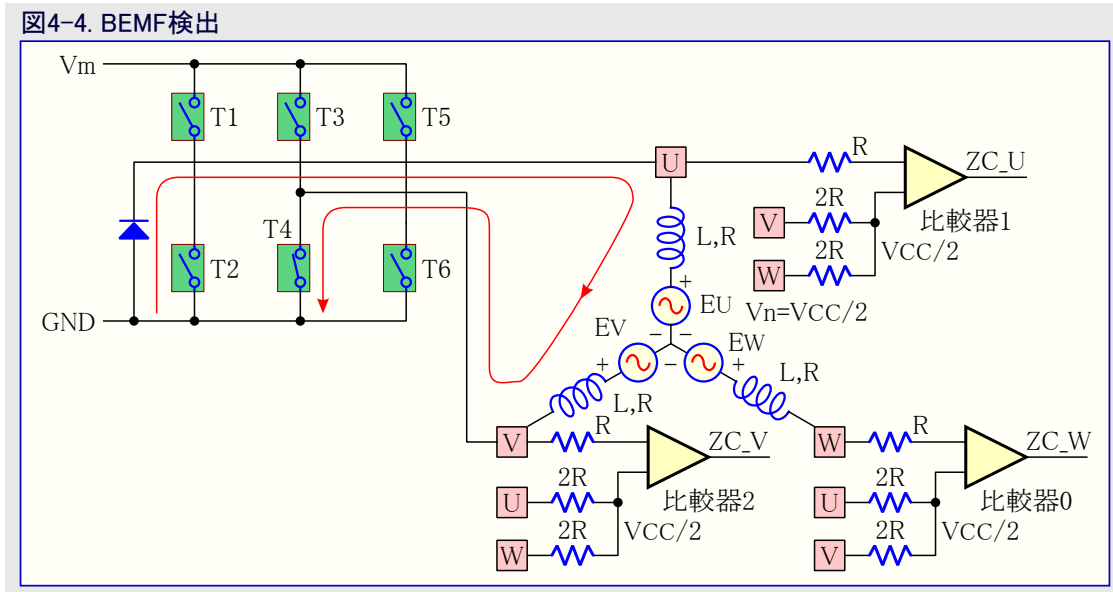
#### 4.3.1. 信号処理

ATMELのマイクロ コントローラは電気的な信号を処理するのに使用されるアナログ比較器機能を提供します。

U,V,W相のBEMFの0交差を検出するのに3つの内部比較器が使用されます。



図4-4.は上(H)側スイッチT1が開放で同時にT4がGNDに誘導する時の事象(第6扇状角、ホール状態5)を示します。



いくつかのY接続BLDCモータに於いて(追加の線経路で)中立端子(N)が利用可能とは言え、△接続の電動機に関しては利用不能です。故に、柔軟な実装のために中立端子なしで0交差検出が実現されなければなりません。

この検出は不活性相の電圧が電動機電源 $V_m$ の半分と交差する時に達成されます。その方法は電動機の各相を違う2つ相の和と比較することです。他の2つの相がフラネル図で反対に位置する時に、考察している相の交差点が起こる事実によって、この方法は使用することができます。

BEMFレベルは電動機特性と速度に依存します。そして信号処理はBEMFレベルをアナログ比較器の入力範囲に適合させることによって行われます。BEMF上のPWM周波数と雑音を濾波するために低域通過濾波器が使用されます。

低域通過濾波器は0交差時間とアナログ比較器出力間に遅延を持ち込みます。この時間は以下の項で詳述される $30^\circ$ 計算に対して考慮しなければなりません。

#### 4.3.2. $30^\circ$ 相角

整流(転流)は0交差点で達成されませんが、この事象は回転子が位置している場所を知るための基準点として使用されます。有用な電氣的(そして機械的)な力は次の通りです。

$$P_e = E \times I$$

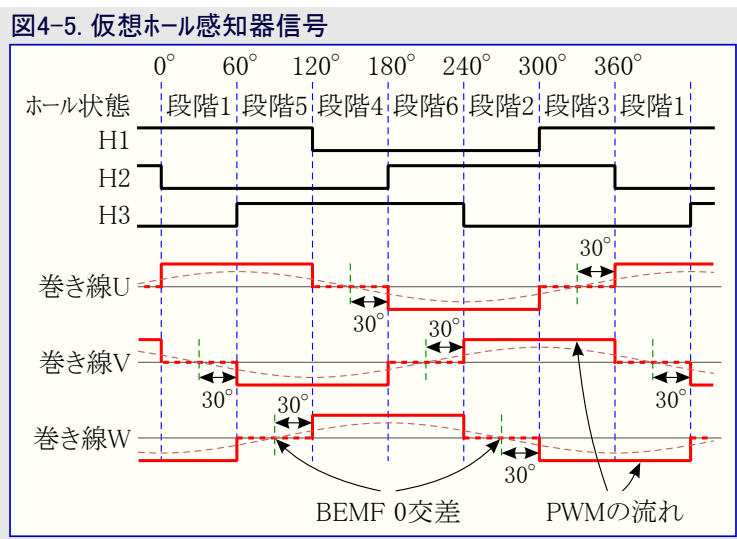
故に制御システムの最良の結果を得るために、信号は相に於いて以下を保たなければなりません。

- ・ 電動機相での電流
- ・ 逆起電力電圧

0交差は整流(転流)に先立って $30^\circ$ の電氣的角度が検出されます。

故に、最適な手順は回転子位置で相にあるべき0交差後 $30^\circ$ でPWMを駆動します。

さもなければ、この $30^\circ$ よりも早いまたは遅い駆動は電動機の電流消費を増すでしょう。





相に於いてこれらの信号を保つための最初の方法は以下です。

- ・ 0交差を検出してください。
- ・ 最後の整流(転流)からの時間を測定してください。
- ・ それを2倍してください。
- ・ それを最後の整流(転流)時間に加えてください。

このように、整流(転流)周期は0交差時間の2倍に等しく、0交差はその周期の正確な中央であるべきです。

しかし、PWM雑音や活動的な変更のため、0交差事象は違う時に起き得たり、失い得たりします。もっと強力な方法は時間窓内で0交差検出を予期することが使用できます。この窓は0交差検出を有効にします。この窓の内側で検出が起きた場合、整流(転流)が再計算され、さもなければ整流(転流)は最後に予測された時間で達成されます。

速度が増す時は0交差事象がより早く起き、計算された遅延は相内の2つの合図を維持するように減らされなければなりません。

## 5. 感知器なし法流れ図

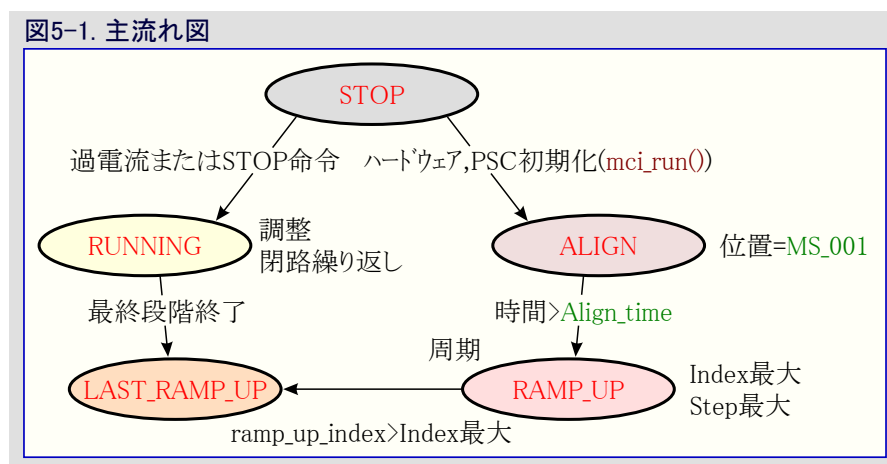
感知器なし制御法は組み込み機能によってATMELのマイクロコントローラで容易に開発することができます。

- ・ 電力段制御器(PSC)：電力トランジスタを駆動するために3つのPWMが6つの出力チャンネルを提供します。
- ・ アナログ比較器：BEMFを検出するための3つの比較器

主プログラムの状態図が図5-1で記載され、それは以下の状態から成ります。

- ・ **STOP**初期状態
- ・ その後にハードウェアとPSCが初期化され、割り込みが許可されます。
- ・ **ALIGN**状態は事前の位置取り段階です。
- ・ **RAMP\_UP**状態は開路強制整流(転流)を成し遂げます。
- ・ **RUNNING**状態はBEMF取得と0交差検出で動きます。

これらの段階は以降の項で詳述されます。



### 5.1. 整列段階：ALIGN

電動機を始動するには初期電動機位置に従って特別な電動機段階が励磁されなければなりません。

故に、最初に対応する電動機段階を励磁することができるように初期回転子位置が知られなければなりません。さもなければ回転子は回転できないでしょう。

感知器なし法に於ける1つの方法は初期回転子位置を検出することです。この方法は可変インダクタンス感知に基づきます。

2つ目の方法は、相の対に給電して回転子の整列を待つことによって電動機を既知の位置に初期化することです。この方法が以下で記述されます。

この段階中、回転子を望む位置に移動するために、電流の方向は巻き線に於いて(整流(転流)なしで)一定に保たれます。1つの相の上(H)側と別の1つ相の下(L)側のトランジスタが駆動されます。

MS\_001位置に配置するため、T1とT6がONで、これはUがHigh、そしてWがLowに駆動されることを意味します。

そして与えられた初期整流(転流)位置に移動するのに十分な時間を回転子に与えるため、待機段階が挿入されます。整列時間は機械的な定数(電動機と負荷)に依存します。最適な遅延時間を探すにはいくつかの経験が必要で、大きな電動機に対する一般的な時間は1秒またはそれ以上です。

電動機巻き線に印加される電流は電力トランジスタと電動機の定格を超えないように制御されなければなりません。故に電圧は大きすぎないようにしなければなりません、また電動機を動かすことができるように小さすぎてもいけません。

別の制限は電動機が回る方向です。ディスクドライブのような特定の応用に関して、逆回転を防ぐために最初の方法(可変インダクタンス感知)を使用することができます。

## 5.2. 開路加速段階 : RAMP\_UP

一旦回転子が既知の位置に配置されると、立ち上げ手順がステップモータのようにBLDCモータを駆動します(同期と切り替え動作)。BEMFの振幅は回転子の角速度に比例します。立ち上げは電動機速度を比較器信号に対して十分なBEMFの振幅範囲に引き上げます。

速度が一定に保たれるなら、回転子は位置の概ね90°の電気的角前方です。故にBEMF交差は正しく感知されないでしょう。この理由については電動機を或る速度に加速する必要があるからです。

可能な限り早くBEMFを検知してRUNNING整流(転流)形態に切り替えるために、立ち上げは電動機を直線的に加速します。この加速は段階時間とデューティサイクルの2つの変数の立ち上げ表で達成されます。

### 5.2.1. 段階時間変数

電動機を加速するために連続する段階時間は累進的に減らします。

### 5.2.2. デューティサイクル変数

電氣的視点からトルク(Tm)は巻き線を通る電流(I)に比例します。

$$T_m[Nm] = k_{\tau} \times I \quad k_{\tau}[Nm/A] : \text{電動機のトルク定数}$$

故にトルク定数を得るために、立ち上げ段階は連続加速段階と一緒に固定の電流レベルを電動機に課すことから成ります。

電動機速度を増すため、BEMFは増されて巻き線電圧から引かれます。故に電動機電流を一定値に保つために、この電圧は開路加速傾斜と共に増されなければなりません。そしてPWMデューティサイクルは実際の整流(転流)角速度の関数として増加されます。

### 5.2.3. BEMF検出

BEMF 0交差比較器は低閾値速度に達するまで開路加速の間で禁止されます。

0交差検出の許可前のいくつかの段階の待機は寄生的な検出を避けます。低速限度以下ではPWM信号によって重ねられるBEMF信号の雑音に対する信号の比率が低すぎます。低速限度はBLDCモータと供給電圧に依存します。例えば、数百mVのBEMF振幅は数Vの電圧振幅を持つPWM切り替えのために雑音との違いが十分ではありません。故に、感知器なし整流(転流)に関して、BLDCモータはこの速度限界を超えて回らされなければなりません。

目的の速度設定に達すると、開路加速サブルーチンを抜ける前にBEMF 0交差比較器が許可されます。

或る数の0交差検出後、制御系は最善効率で電動機回転の調整を開始します(RUNNING段階)。通常の慣例は最低2または3の検出を得ることです。

### 5.2.4. トルク

立ち上げは定加速で達成されます。

$$\gamma = d\omega/dt \quad \omega[rd/s] : \text{角速度}$$

原理的な視点から、摩擦なしで最大加速はニュートンの方程式によって定義されます。

$$F = m \times \gamma \quad \gamma = \Gamma_m/J \quad \Gamma_m \text{はトルクです。} \quad J[kg \cdot m^2] = \text{電動機の慣性} + \text{負荷の慣性}$$

そして $\gamma$ が角加速度です。

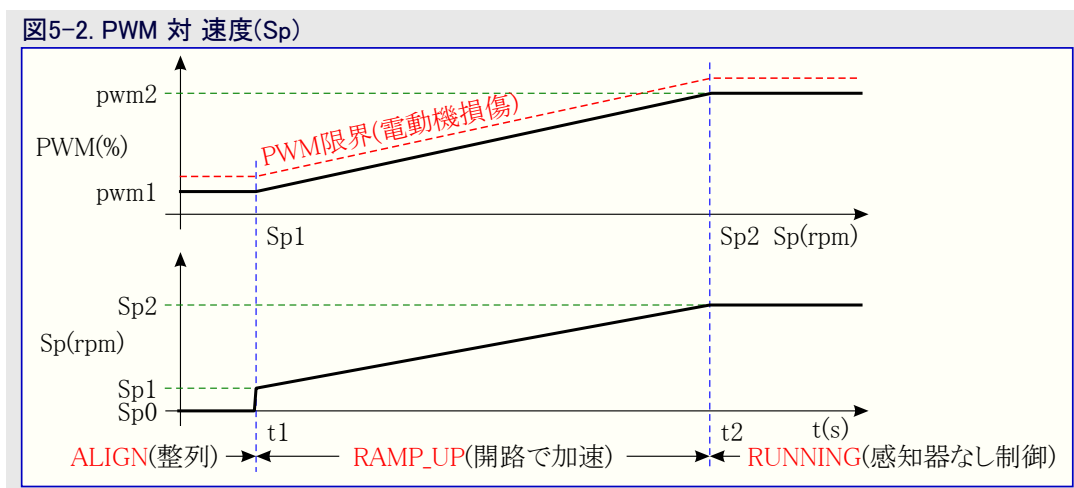
機械的な視点から、電動機を始動するのに必要なトルクは角加速度に依存します。

$$\Gamma_m[Nm] = J \times \gamma$$

その後はトルクも一定です。

### 5.2.5. S形

加速は図5-2のS形に従って達成されます。



立ち上げ表のパラメータは以下のような(特定の電動機特性を含む)機械系全体の既知のパラメータに従って調節されます。

- 電動機慣性
- 初期慣性負荷
- 電動機BEMF定数( $k_e$ )
- 電動機速度定数
- 電源電圧

正当なpwm1とpwm2のデューティサイクル値とSp1とSp2値は、回転子が磁界に従えるよう、充分緩やかに加速するように計算されます。

### 5.2.6. 立ち上げ表パラメータの相互調節

この調整はBEMF感知器なし技法の最も難しい作業です。

#### 段階数

一般的に最適な段階の範囲は6(電氣的1回転)から最大10です。

負荷慣性が変わる場合(例えば、圧縮機について)、開始段階数は6またはそれ以下でなければなりません。

電流が与えられた電動機の公称最大電流を超えないようにpwmを選ぶことにより、立ち上げの間、望まれるのと同じ位緩やかに加速することができます。公称最大電流よりも大きな電流は、巻き線の温度と電動機の温度が与えられた限度を超えない限り、短時間の間許されるかもしれませんが。

定数のpwm1とpwm2は供給電圧に依存します。故に、供給電圧が一定ならば、それらは一定です。可変供給電圧を持つ応用に関して、それらの定数はVm電源の直線依存性に注意して計算されなければなりません。

Vm DC電源とこの定格電圧に従った電動機の指定定格速度Sp\_max(rpm)を考察します。

#### Sp1/pwm1

開始角速度Sp1は0に設定されるかもしれませんが、しかし、より短い立ち上げ段階のために、それは0よりも大きい速度に設定されるかもしれません。

Sp1の一般的な値はSp\_max/60です。

PWM尺度調整定数の相互調節は開路立ち上げで可能です。pwm1は走行電流を供給できるデューティサイクルです。このパラメータを定義するには、最初にBLDCモータが静止している時にpwm1=0とpwm2=0を設定します。そして目的電流に達するまでpwm1を1つ増します。電流測定がpwm1パラメータの自動調整を許します。

$$U_m = R \times I = V_m \times \text{pwm1} \quad \text{故に} \quad \text{pwm1} = R \times I / V_m$$

pwm1に関する通常の慣例は50%です。

#### Sp2/pwm2

BEMFの振幅が速度に比例し、より大きな振幅が比較器に対してより良い信号対雑音比を与えるため、角速度Sp2は可能な限り高くあるべきです。

Sp2の一般的な値はSp\_max/6です。

pwm2はSp2の速度で目標とした電流を提供するデューティサイクルです。

$$U_m = k_e \times \text{Sp2} + (R \times I) = V_m \times \text{pwm2} \quad \text{故に} \quad \text{pwm2} = U_m / V_m$$

pwm2に関する通常の慣例は60~65%の範囲です。

### 5.2.7. 電流制限パラメータ

回転子と共に整流された電流を保つための直前の段階の間、整流(転流)の還元が全くないため、開路電流はトルクを維持するために標準よりも大きくなければなりません。

信頼性の有る始動を保証するため、立ち上げ速度と電圧を電動機と負荷に合わせるだけでなく、整流の電圧と時間を設定することも重要です。

## 5.3. 調整段階 : RUNNING

RUNNING段階は自動整流(転流)形態です。

電動機速度を制御する以下の2つの方法が可能です。

- 電流動作形態 : トルクは電流に比例するため、それは直接的に制御されます。BEMF検出によって一旦整流(転流)が制御されると、今や電圧が電動機のBEMFで整流してトルクを増すので、電動機電流は減らすことができます。
- 電圧動作形態 : 速度を制御することができ、トルクを(電流限界によって設定される)最大に設定することができます。

PWMデューティサイクルは以降の式に従って自動調整されます。

PWMによって尺度調整される与えられた供給電圧に関する、実効電圧電動機給電は以下です。

$$V = E + (R \times I)$$

ここでのRは回路(電動機巻き線、MOS-FETスイッチ、分圧抵抗など)の等価抵抗です。

逆起電力(BEMF)は次の通りです。

$$E = k_e[V/rpm] \times Sp[rpm] \quad (4.2.3.をご覧ください。)$$

ここでのSpは電動機の数rpmです。

$$V = k_e \times Sp + (R \times I)$$

この実効電圧Vは巻き線を通る電流を駆動する電圧変位を表します。

$$V = V_m \times pwm$$

ここでのVmはDC電源電圧、pwmはPWMデューティサイクル[tON/(tON+tOFF)]です。

この結果はトルクが電流の絶対値に比例することです。トルクは電流と負荷角の両方に依存します。与えられた電流は以下で利用可能な最大トルク(tau)を定義します。

$$\Gamma_m = k_{\tau} \times I$$

定数k\_tauは与えられた電動機に対するトルク定数です。

### 5.3.1. 30°相角と消磁

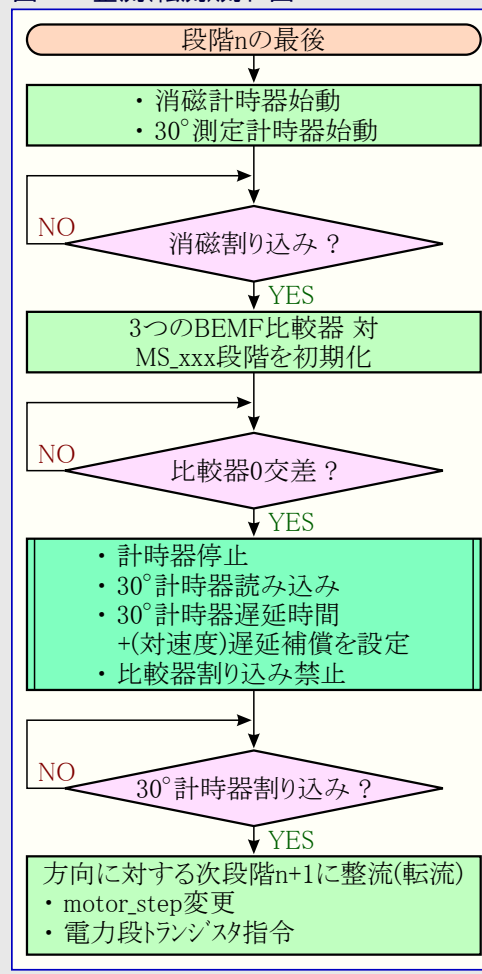
整流(転流)段階の最後で、活性なスイッチが開放されます。この瞬間に於いて、電動機巻き線のインダクタンスのために-Ldi/dt電圧パルスが生成されます。この消磁はブリッジのダイオードを通して達成されます。

消磁時間は段階の最後で生成されたこのパルスを放電する間、0交差検出を遮蔽します。

「4.3.2. 30°相角」で記述されるように、整流(転流)段階“n”の最後で次の整流(転流)段階“n+1”の時を計算するために30°角度移動が達成されます。

遮蔽時間と30°移動を含む処理は段階の最後で開始されます。この処理の流れ図は右で記載されます。

図5-3. 整流(転流)流れ図



## 6. 調節

目標とする応用の特性に対して最も重要なパラメータは以下です。

- ・ 電動機の始動パラメータ
- ・ 立ち上げ表 (段階時間減少、上昇速度)
- ・ 0交差検出なしの段階数
- ・ 連続0交差検出数
- ・ 駆動形態 (電流調整または電圧調整)

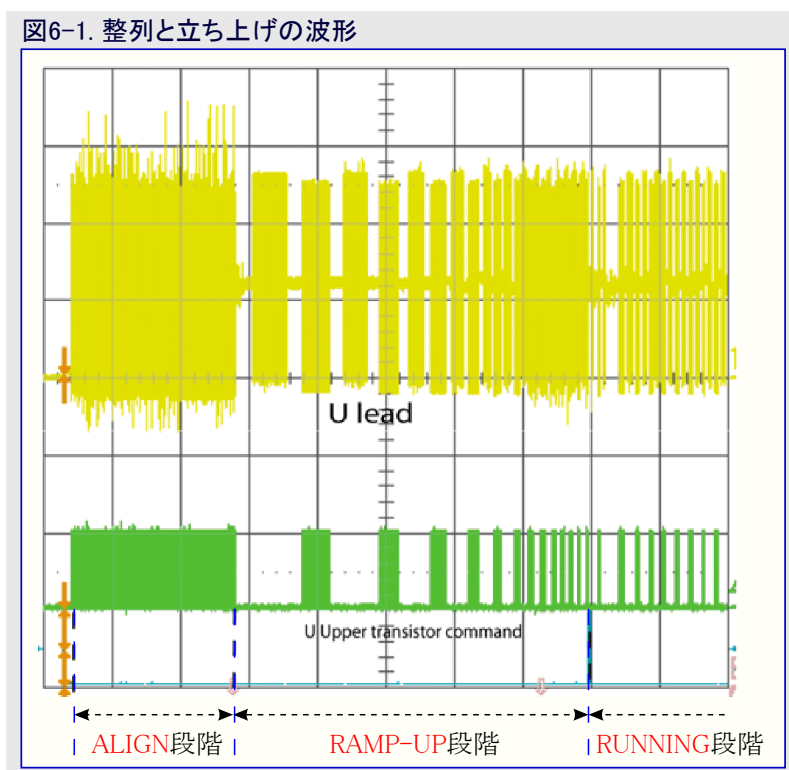
これらのパラメータも回転子慣性と電動機慣性に依存します。

成し遂げるための最初の評価は(電流調整での)開路始動での試験です。

この試験は以下のオシロスコープ測定で構成設定されます。

- 0交差検出に於けるソフトウェアでのI/Oフラグ
- 相の電流信号監視
- 各種立ち上げの試験：試験は立ち上げ表の最後に先立って最低2回の0交差検出が起こる場合に成功です。

整列(ALIGN)と立ち上げ(RAMP-UP)の段階の例が図6-1.で示されます。



このようにして、立ち上げ表の最良のパラメータ(PWMのパラメータ(PWMデューティ サイクルによって定義される開始電流は累進的に増加されるでしょう)と段階時間)は見つかるでしょう。

## 7. 要約

この応用記述で記述される感知器なし法は殆どの応用に使用することができ、上で一覧にされたパラメータは以下の手助けで調節することができます。

- MC300 : 電力基板
- MC301 : ATtiny861子基板
- MC303 : ATxmega128A1子基板
- MC310 : ATmega32M1子基板
- MC320 : MC310+MC300
- MC321 : MC301+MC300
- MC323 : MC303+MC300

以下のATMELの応用記述はATMEL製品でのBLDC感知器なし制御の情報と例を提供します。

- AVR172 : ATmega32M1
- AVR444 : ATmega48, ATmega88, ATmega168
- AVR493 : AT90PWM3
- AVR498 : ATtiny261

## 8. 改訂履歴

資料改訂	日付	注釈
8305A	2010年5月	初版資料公開
8305B	2013年7月	誤り修正と新しい資料雛形





Enabling Unlimited Possibilities®

*Atmel Corporation*

1600 Technology Drive  
San Jose, CA 95110  
USA  
TEL (+1)(408) 441-0311  
FAX (+1)(408) 487-2600  
[www.atmel.com](http://www.atmel.com)

*Atmel Asia Limited*

Unit 01-5 & 16, 19F  
BEA Tower, Millennium City 5  
418 Kwun Tong Road  
Kwun Tong, Kowloon  
HONG KONG  
TEL (+852) 2245-6100  
FAX (+852) 2722-1369

*Atmel Munich GmbH*

Business Campus  
Parking 4  
D-85748 Garching b. Munich  
GERMANY  
TEL (+49) 89-31970-0  
FAX (+49) 89-3194621

*Atmel Japan G.K.*

141-0032 東京都品川区  
大崎1-6-4  
新大崎勸業ビル 16F  
アトメル ジャパン合同会社  
TEL (+81)(3)-6417-0300  
FAX (+81)(3)-6417-0370

© 2013 Atmel Corporation. 全権利予約済 / 改訂:8305B-AVR-07/2013

Atmel®、ロゴとそれらの組み合わせ、Enabling Unlimited Possibilities®、AVR®とその他はAtmel Corporationの登録商標または商標またはその付随物です。他の用語と製品名は一般的に他の商標です。

**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のウェブサイト位置する販売の条件と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。たとえば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、または利益と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。

© HERO 2013.

本応用記述はAtmelのAVR928応用記述(Rev.8305B-07/13)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。