

AVR435 : 正弦状変調PWM法を用いた ブラシレスAC/DCモータ制御

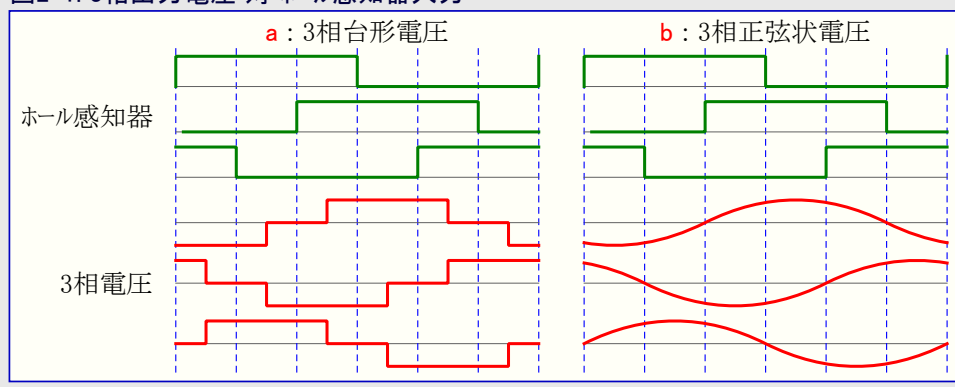
1. 要点

- 費用効果とエネルギー効率的なBLDC/BLAC電動機駆動
- AT90PWM3 AVR[®]低費用マイクロコントローラ
- 低いメモリと計算の必要条件

2. 序説

ホール効果感知器を装備する永久磁石電動機は一般的に'台形'形状の電流によって給電されます(図2-1.のa)。系の性能を改善(雑音低減、トルク波紋低減)するために、'正弦状'形式を持つ電流を使用してそれらの電動機に給電することで有利にできます(図2-1.のb)。BLDC電動機は台形形状電流で、BLAC電動機は正弦状形状電流で、各々供給されるように設計されています。この応用記述はAT90PWM3Bが装着されたATAVRMC100基板で後者を用いた実装を提案します。

図2-1. 3相出力電圧 対 ホール感知器入力



3. 鍵となるAT90PWM3Bの機能

制御算法は最大16MIPSを成し遂げ、DC/DC昇圧変換器、永久磁石同期機械、3相誘導電動機、ブラシレスDC電動機の制御に適合する、安価で低電力な単一チップのAT90PWM3Bマイクロコントローラで実装されています。このデバイスには以下を統合します。

- ・ 8ビットAVR新RISC構造マイクロコントローラ (コアはATmega88と同じ)
- ・ 8Kバイトの実装書き込み可能なフラッシュメモリ
- ・ 応用プログラム専用の変数と参照表を格納するための512バイトのSRAM
- ・ 構成設定データと参照表を格納するための512バイトのEEPROM
- ・ 1つの8ビット計時器と1つの16ビット計時器
- ・ 64MHz PLLクロックでの半ブリッジ電力制御に最適化された6つのPWMチャネル
- ・ 11チャネルの10ビットA/D変換器と10ビットD/A変換器
- ・ 3つのチップ上アナログ比較器
- ・ 内部発振器を持つ設定可能なウォッチドッグタイマ

4. 動作の理屈

4.1. 序説

この実装は空間ベクトル変調(SVPWM)技法の使用に基づきます。種々の扇状角はホール感知器で決められて同期されます。



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. 7671A-09/06, 7671AJ1-01/14

4.2. 空間ベクトル変調の原理

図4-1.は電圧源逆変換器に接続されるBLDC/BLAC電動機の代表的な構造を示します。電動機は未接続中立点を持つ平衡負荷と見做されるため、以下が成り立ちます。

$$\begin{aligned} V_n &= (V_a + V_b + V_c) / 3 \\ V_{an} &= V_a - V_n = (V_{ab} - V_{ca}) / 3 \\ V_{bn} &= V_b - V_n = (V_{bc} - V_{ab}) / 3 \\ V_{cn} &= V_c - V_n = (V_{ca} - V_{bc}) / 3 \end{aligned}$$

上側電力スイッチはONとOFFだけができ、下側は常に逆の状態になることになっているため(逆変換器1区間の沈黙時間は無視されます)、図4-2.で示されるように8つの可能な切り替え状態だけがあります。それらの6つが非0の相電圧になり、2つの相互交換可能な状態が0の相電圧になります。クラーク-コンコルディア変換(Clarck-Concordia Transformation)を用いて固定された2次元枠に固定子を割り当てる時に、6つの非0の相電圧が6角形の頭頂を形成します(図4-3.をご覧ください)。

図4-1. 応用の代表的な構造

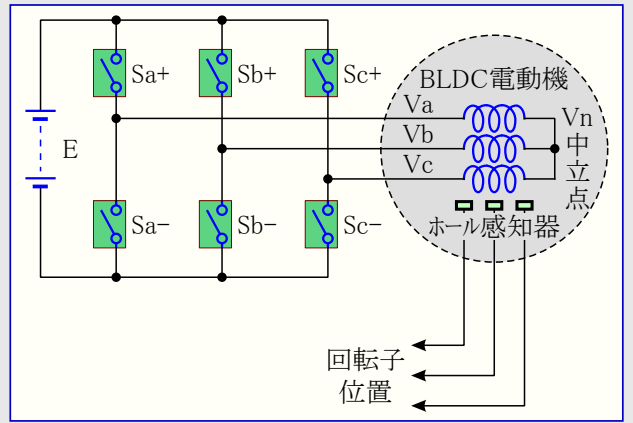


図4-2. 3相逆変換器の可能な切り替え形態設定

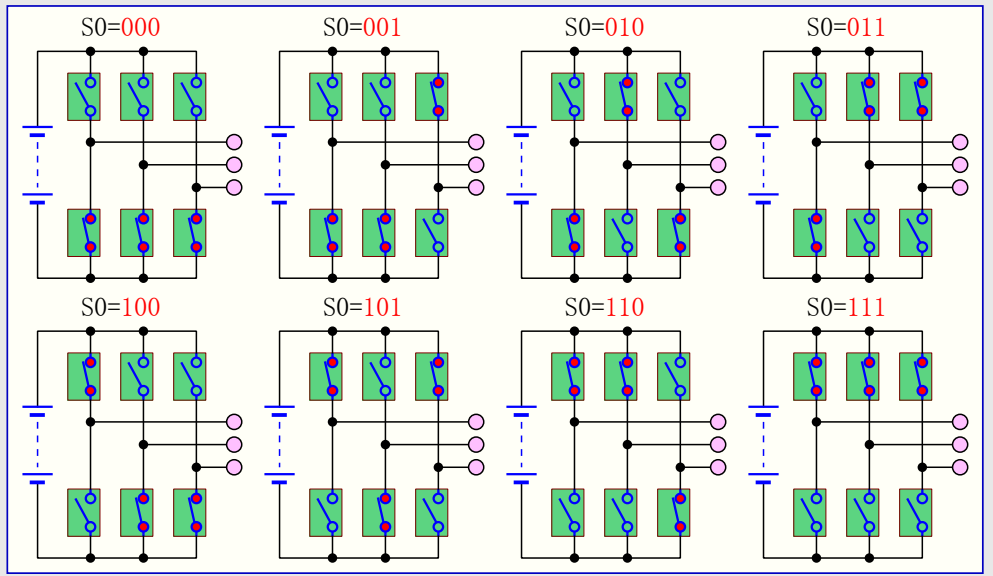


図4-3.で示されるように、2つの連続する非0電圧間の角度は常に60°です。

複雑な形式で、それらの非0相電圧は $k=1\sim 6$ 、 $V_0=V_7=0V$ で $V_k = Ee^{j(k-1)\frac{\pi}{3}}$ として書くことができます。

表4-1.は逆変換器の可能な8つの形態設定の各々に於ける線対線と線対中立点の電圧を示します。

表4-1. 3相逆変換器の切り替え形態設定と出力電圧

Sa+	Sb+	Sc+	Si	Vab	Vbc	Vca	Van	Vbn	Vcn	Vα	Vβ	Vi
0	0	0	S0	0	0	0	0	0	0	0	0	V0
0	0	1	S1	0	-E	+E	-E/3	-E/3	+2E/3	-E/2	-E√3/2	V5
0	1	0	S2	-E	+E	0	-E/3	+2E/3	-E/3	-E/2	+E√3/2	V3
0	1	1	S3	-E	0	+E	-2E/3	-E/3	-E/3	-E	0	V4
1	0	0	S4	+E	0	-E	+2E/3	-E/3	-E/3	+E	0	V1
1	0	1	S5	+E	-E	0	-E/3	-2E/3	+E/3	+E/2	-E√3/2	V6
1	1	0	S6	0	+E	-E	-E/3	+E/3	-2E/3	+E/2	+E√3/2	V2
1	1	1	S7	0	0	0	0	0	0	0	0	V7

図4-3. コンコルディア基準枠での可能な8つの形態設定の表現

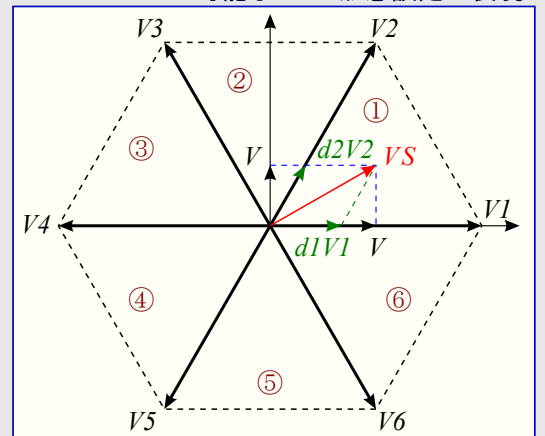


表4-2. 各扇状角に於けるデューティサイクルの式

扇状角番号	θ	d_k	d_{k+1}
1	$[0, \frac{\pi}{3}]$	$\frac{2}{\sqrt{3}} \times \frac{V_s}{E} \times \sin(\frac{\pi}{3} - \theta)$	$\frac{2}{\sqrt{3}} \times \frac{V_s}{E} \times \sin(\theta)$
2	$[\frac{\pi}{3}, \frac{2\pi}{3}]$	$\frac{2}{\sqrt{3}} \times \frac{V_s}{E} \times \sin(\frac{\pi}{3} + \theta)$	$\frac{2}{\sqrt{3}} \times \frac{V_s}{E} \times \sin(\frac{5\pi}{3} + \theta)$
3	$[\frac{2\pi}{3}, \pi]$	$\frac{2}{\sqrt{3}} \times \frac{V_s}{E} \times \sin(\theta)$	$\frac{2}{\sqrt{3}} \times \frac{V_s}{E} \times \sin(\frac{4\pi}{3} + \theta)$
4	$[\pi, \frac{4\pi}{3}]$	$\frac{2}{\sqrt{3}} \times \frac{V_s}{E} \times \sin(\frac{5\pi}{3} + \theta)$	$\frac{2}{\sqrt{3}} \times \frac{V_s}{E} \times \sin(2\pi - \theta)$
5	$[\frac{4\pi}{3}, \frac{5\pi}{3}]$	$\frac{2}{\sqrt{3}} \times \frac{V_s}{E} \times \sin(\frac{4\pi}{3} + \theta)$	$\frac{2}{\sqrt{3}} \times \frac{V_s}{E} \times \sin(\frac{\pi}{3} - \theta)$
6	$[\frac{5\pi}{3}, 2\pi]$	$\frac{2}{\sqrt{3}} \times \frac{V_s}{E} \times \sin(2\pi - \theta)$	$\frac{2}{\sqrt{3}} \times \frac{V_s}{E} \times \sin(\frac{\pi}{3} + \theta)$

コンカルテイヤ枠で、この六角形の内側に配置される固定子電圧 $V_s = V_\alpha + jV_\beta = V_{sm} \cos(\theta) + jV_{sm} \sin(\theta)$ は6つの扇状角の1つに属し、この扇状角の範囲を定める2つの非0相電圧の直線的な組み合わせ、 $V_s = d_k V_k + d_{k+1} V_{k+1}$ として表されます。各扇状角で $d_{k+1} V_{k+1}$ を $V_{sm} \cos(\theta) + jV_{sm} \sin(\theta)$ と等しくすることが表4-2. で示されるデューティサイクルの式を導きます。逆変換器が瞬間的に V_s を生成することができないので、空間ベクトルPWM原理は $T_k = d_k T_s$ 中の T_k と $T_{k+1} = d_{k+1} T_s$ 中の T_{k+1} の生成により、 V_s に等しい平均値の T_s 周期的電圧の生成にあります。 $d_k + d_{k+1} \leq 1$ のため、それらの電圧は V_0 と/または V_7 によって切り替え周期 T_s に渡って完了されなければなりません。多くの解決策が可能で、固定子電流の総高調波歪を最小にする1つは、同じ持続期間 $T_0 = T_7 = \frac{1-d_k-d_{k+1}}{2} T_s$ 中に V_0 と V_7 を印加することにあります。 V_0 は切り替え周期の始めと最後で等しく印加され、これに反して V_7 は中央で印加されます。図解されるように、図4-4. の上側は扇状角1で得られる波形を示します。

4.3. SV(空間ベクトル)-PWMの効率的な実装

表4-2. は各扇状角でデューティサイクルが異なる式を持つことを示すように見えます。にも拘らず、これらの式の検討は $\sin(x) = \sin(\pi - x)$ のために、それら全てのデューティサイクルが $\theta'' = \frac{\pi}{3} - \theta'$ と $\theta' = \theta - (k-1)\frac{\pi}{3}$ で $d_k = \frac{2V_{sm}}{E\sqrt{3}} \sin(\theta'')$ と $d_{k+1} = \frac{2V_{sm}}{E\sqrt{3}} \sin(\theta')$ として統一する方向で書くことができます。これらの式がもはや扇状角番号に依存しないため、それらは d_a と d_b として表すことができます。 θ' が常に 0 と $\frac{\pi}{3}$ のために、 d_a と d_b の計算はこの間隔の内側の角度だけに対する正弦表が必要です。これはこの正弦表を格納するのに必要とするメモリ量を大きく減らします。

AT90PWM3は空間ベクトル算法で計算された切り替え波形を生成するのに必要とされる3つの電力段制御器(PSC)を提供します。計数器は0から(図4-4. の下側で示されるように)切り替え区間の半分に対応する値まで計数し、そして0へ下降計数します。3つの比較レジスタに格納されなければならない値は表4-3. で与えられます。

図4-4. 逆変換器切り替え波形と対応する比較レジスタ値

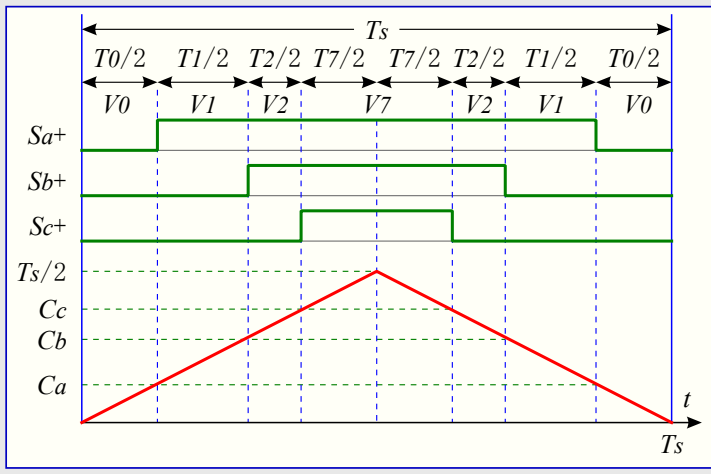


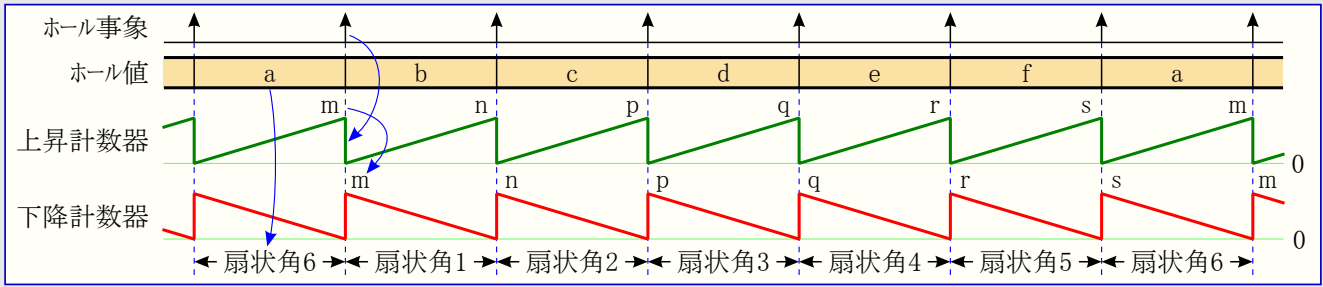
表4-3. 比較レジスタ値 対 扇状角番号

扇状角番号	$\frac{4}{T_s} C_a - 1$	$\frac{4}{T_s} C_b - 1$	$\frac{4}{T_s} C_c - 1$
1	$-d_a - d_b$	$d_a - d_b$	$d_a + d_b$
2	$-d_a + d_b$	$-d_a - d_b$	$d_a + d_b$
3	$d_a + d_b$	$-d_a - d_b$	$d_a - d_b$
4	$d_a + d_b$	$-d_a + d_b$	$-d_a - d_b$
5	$d_a - d_b$	$d_a + d_b$	$-d_a - d_b$
6	$-d_a - d_b$	$d_a + d_b$	$-d_a + d_b$

4.4. 扇状角決定算法

扇状角決定は3つのホール感知器読み取りに基づきます。全ての電氣的1回転に伴い、3つのホール感知器は6つの段階を生成します。これら6段階は円を空間ベクトル(SV)PWMで使用される6つの扇状角に分けます(図4-5をご覧ください)。

図4-5. 扇状角決定



1つの扇状角内側で上昇計数器(CU)は高速基準クロックによって与えられた速度で増加されます。その扇状角の最後で、CU計数器は下降計数器(CD)に複写されます。そしてこのCD計数器は同じ基準速度によって減少されます。このCD計数器は扇状角内側の V_s ベクトルの角度の値を反映します(図4-6をご覧ください)。例えば扇状角1の間、CU計数器は0~nへ増加されます。ホール事象でCU計数器はCD計数器に複写されます。そして扇状角2の間、CU計数器は増加され、CD計数器は減少されます。CD計数器は V_s ベクトルの回転を駆動します(図4-6をご覧ください)。

図4-6. V_s ベクトルの回転

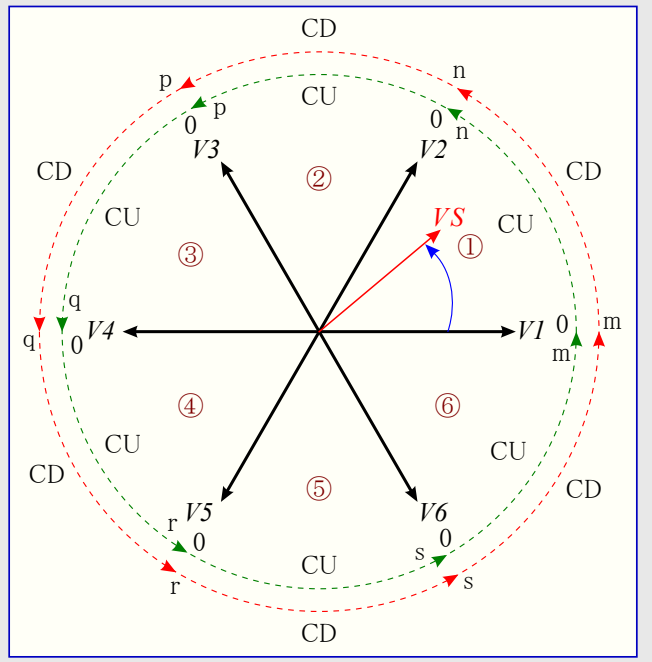
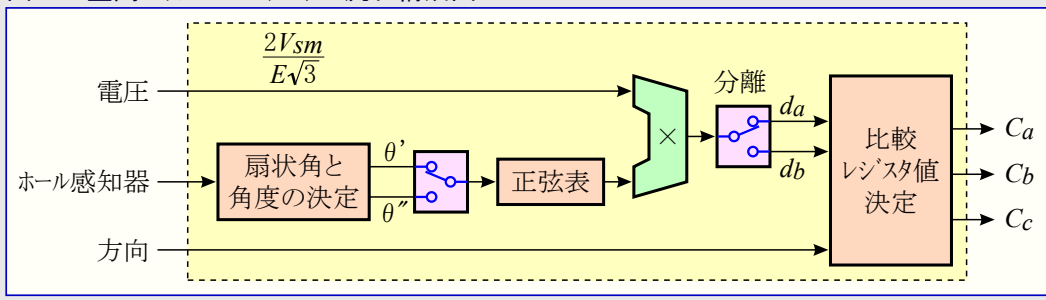


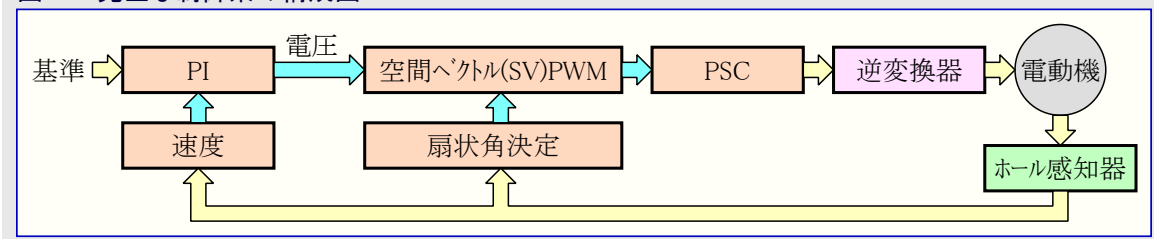
図4-7はこの空間ベクトル(SV)PWM核の実装のデータの流れを示します。ホール感知器が扇状角番号と2つの角度 d_a と d_b を与えます。これらの角度は正弦表内を指示します。正弦値は d_a と d_b を計算するために電圧によって乗算されます。そして d_a と d_b はPSCへ送る比較値を決めるのに使用されます(3頁の図4-4をご覧ください)。

図4-7. 空間ベクトルPWMデータの流れ構成図



望む速度と測定した速度間の差が固定子電圧周波数を決めるPI制御部に供給する速度制御繰り返しを構成するのに、図4-7で示されるデータの流れ構成図の結果を使用することができます(図4-8)。

図4-8. 完全な制御系の構成図



5. ハードウェア説明(ATAVRMC100)

この応用記述はAT90PWM3Bを装備したATAVRMC100評価基板で利用可能です。この基板はBLDCとBLACの電動機制御を開始して実験する方法を提供します。

ATAVRMC100の主な特徴は次の通りです。

- AT90PWM3マイクロコントローラ
- 12V DC電動機駆動
- ISPとエミュレータのインターフェース

6. ソフトウェア説明

全ての算法は開発ツールとしてIAR Embedded Workbench®とAVR Studio®を用いてC言語で書かれています。空間ベクトルPWM算法については0~80間の k に対して $127\sin(\frac{2\pi k}{480})$ の丸めた値の表が使用されます。この表の長さ(81バイト)は利用可能な内部メモリの大きさと回転子移動速度の定量化間隔の良好な妥結です。双方向速度制御については、PI調整部が負の数値の出力の時に比較器の2つで格納された値が交換されます(図4-8をご覧ください)。

6.1. プロジェクト説明

ソフトウェアはATMELのウェブサイト上の付随されたプロジェクトで入手可能です。

その一括内にHTML資料が含まれます。この資料を見始めるにはdocフォルダ内のindex.htmlファイルを使用してください。

6.2. 資源

この値は全ての応用資源(main、シリアル通信など)を含みます。

コード量 : 4408バイト
RAM量 : 291バイト
CPU負荷 : 33%/16MHz

タイマ/カウンタ0は速度測定、主計時、空間ベクトル(SV)PWMに使用されます。

タイマ/カウンタ1は未使用です。

電力段制御器(PSC)0,1,2はPWM生成に使用されます。

A/D変換器は電流測定に使用されます。これはPSCによってPWM波形で同期されます。

6.3. 実験

図6-1.は速度基準7000rpmに対してマイクロコントローラで得られた1つの相と中立点間の電圧を示します。図6-2.は速度基準7000rpmに対してマイクロコントローラで得られた2つの相間の電圧を示します。これらの実験結果はキット内に含まれるBLDC電動機で得られました。

図6-1. 1つの相と中立点間の電圧(7000rpm)

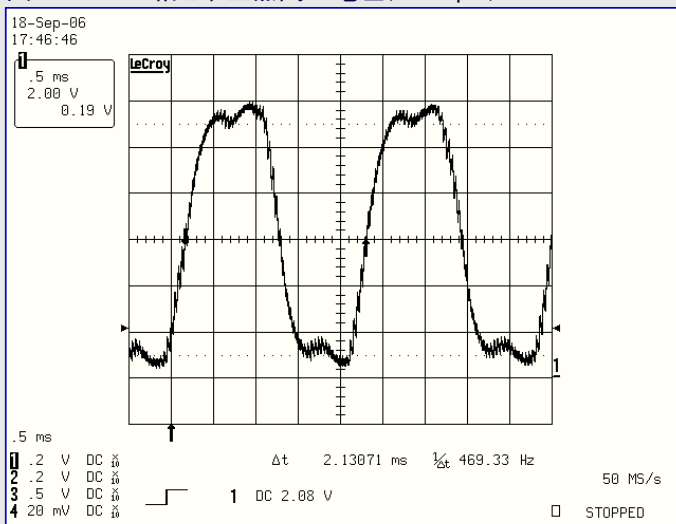
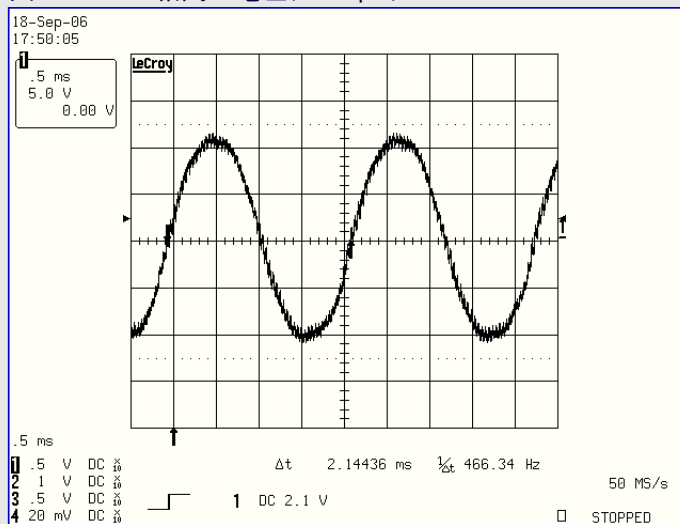


図6-2. 2つの相間の電圧(7000rpm)





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 2006. 全権利予約済 ATMEL®、ロゴ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 2014.

本応用記述はATMELのAVR435応用記述(doc7671.pdf Rev.7671A-09/06)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。