

AVR494 : 定V/f則と自然PWM法を用いた AC誘導電動機制御



8ビット AVR[®]
マイクロコントローラ

応用記述

1. 要点

- 費用効率的で柔軟な3相誘導電動機駆動
- 割り込み駆動
- 低いメモリと計算の必要条件

2. 序説

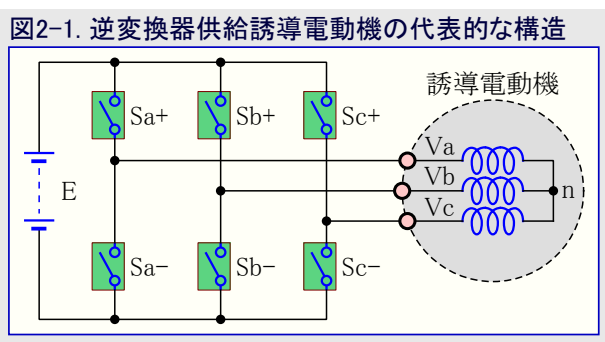
電気機械的な作動機構により、機械的な動き(回転または移動のどちらか)を生成するのに電力が長い時間使われています。米国で生成される電力の50%が電気的な電動機によって消費されていると推測されます。50個よりも多い電動機が代表的に家で、そして車でそれに近い多さで見つけることができます。

環境を保護して温室効果ガスの排出を減らすため、世界中の政府がもっとエネルギー効率的な器具を生産するように白物製造業者と産業工場に必要なとする規則を導入しています。大抵、この目標は効率的な駆動と電動機速度の制御によって達成することができます。これは現在、器具設計者と半導体供給者が安価でエネルギー効率的な可変速度駆動の設計に興味を持っているからです。

それらの高い頑健性、信頼性、安価、そして高い効率(≒80%)のため、次のような多くの産業応用でAC誘導電動機が使われます。

- ・ 器具 (洗濯機、送風機、冷蔵庫、扇風機、掃除機、圧縮機など)
- ・ HVAC (暖房、換気扇、空調装置)
- ・ 産業推進力 (動き制御、遠心ポンプ、ロボット工学など)
- ・ 車両制御 (電気自動車)

けれども、誘導電動機はそれらが主電源に接続された時にそれらの定格速度で動くことができるだけです。これは誘導電動機の回転子速度を変えるのに可変周波数駆動が必要とされるためです。3相誘導電動機の制御に最も普及している算法は図2-1.で示されるように、電圧源逆変換器(VSI:Voltage Source Inverter)を駆動するのに自然パルス幅変調(PWM)技法を用いるV/f制御法です。この応用記述の狙いはこれらの技法が電力制御応用専用のAVR RISCマイクロコントローラのAT90PWM3でどう容易に実装され得るかを示すことです。



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)
- ・ ブートプログラムと応用プログラムに最大4096命令を許す8Kバイトの実装書き込み可能なフラッシュメモリ
- ・ 応用プログラムに使われる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
- ・ 内部発振器を持つ設定可能なウォッチドッグタイマ
- ・ 11チャンネルの10ビットA/D変換器と10ビットD/A変換器

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. 7545A-12/05, 7545AJ2-04/21



このデバイスを電動機制御応用に適合させる主な特徴が(PSCと呼ばれる)3つの“電力段制御器”です。これらの周辺機能は2つの比較器を持つ12ビットの昇降計数器で、これの出力は逆変換器(インバータ)支柱の電力トランジスタを駆動できます。これは逆変換器沈黙時間の容易な管理付きのパルス幅変調によるどんな3相波形の生成をも許します。

4. 動作の理屈

4.1. 同期電動機

ブラシまたはブラシレスの電動機に反して、同期AC電動機は永久磁石を全く持ちません。回転子は回転する電界が磁束を誘導するリス籠型で作られています。固定子の電界と回転子の磁束間の速度差により、電動機はトルクと回転を配給できます。

4.2. 定V/f原理

定V対Hzの原理は今日、誘導電動機速度調節可能な駆動で使われる最も一般的な制御原理です[1,2]。従って、多くの実生活での電動機制御応用は速度が全範囲で効率的に変化することができる限り、高い動的性能を必要としません。これは固定子磁束の大きさが固定子電圧の大きさと周波数間の比率に比例することで、誘導電動機の正弦状定常状態モードの使用を許します。この比率が一定に保たれるなら、固定子磁束は一定に留まり、故に電動機トルクは滑動周波数にだけ依存します。

もっと正確には、以下の固定基準枠で表される誘導電動機の通常モードから始めます。

$$\begin{aligned} \frac{d\phi_s}{dt} + R_s I_s &= V_s; & \frac{d\phi_r}{dt} - j\omega_m \phi_r + R_r I_r &= 0; \\ \phi_s &= L_s I_s + L_m I_r; & \phi_r &= L_r I_r + L_m I_s; \\ C_{em} &= \frac{3p}{2} L_m I_m (I_s I_r); & \Omega_m &= \frac{\omega_m}{p} \end{aligned}$$

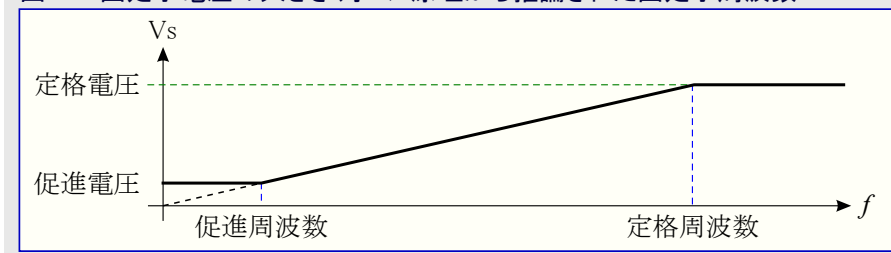
ここで $V_s, \phi_s, \phi_r, I_s, I_r$ は各々固定子電圧、固定子と回転子の磁束、固定子と回転子の電流、 $R_s, R_r, L_s, L_r, L_m, \omega_m$ は各々全体的な固定子抵抗、回転子抵抗、固定子インダクタンス、回転子インダクタンス、全体的な漏れインダクタンス、機械的脈動です。電動機が $\omega_s, V_s = V_{sm} e^{j\omega_s t}$ の脈動を持つ正弦状3相電圧で供給される場合、回転子と固定子の定常状態電流も $\omega_s: I_s = I_{sm} e^{j(\omega_s t + \phi_s)}$ と $I_r = I_{rm} e^{j(\omega_s t + \phi_r)}$ 脈動での正弦状です。前式は以下を導きます。

$$\omega_{lsp} = \omega_s - \omega_m \text{ で } I_s = \frac{R_r + jL_r \omega_{lsp}}{\Delta} V_s, \quad I_r = \frac{jL_m \omega_{lsp}}{\Delta} V_s, \quad \phi_r = \frac{L_m R_r}{\Delta} V_s, \quad \text{と } \Delta = (R_s + jL_s \omega_s)(R_r + jL_r \omega_{lsp}) + L_m^2 \omega_{lsp} \omega$$

従って、回転子の大きさ ϕ_{rm} は比率 $\frac{V_{sm}}{|\Delta|}$ が一定に保たれるならば一定に保たれます。高速では、比率 $\frac{V_{sm}}{\omega_s}$ が一定に保たれるならば、 $\Delta \approx jR_r L_s \omega_s$ と回転子磁束の大きさは一定を保ちます: $\phi_{rm} = \frac{L_m R_r}{R_r L_s \omega_s} V_{sm} = \frac{L_m}{L_s} \frac{V_{sm}}{\omega_s}$ 。

そして電動機のトルクは滑動周波数に比例します: $C_{em} = \frac{3p}{2} \frac{\phi_{rm}^2}{R_r} \omega_{lsp}$ 。これらの式は $\omega_s = \omega_m + \frac{2C_{em} R_r}{3p \phi_{rm}^2}$ ならば望む電動機トルク C_{em} と望む速度 ω_m を得ることができることを示します。低速では、 $\Delta \approx R_s R_r$ と $\phi_r \approx \frac{L_m}{R_s} V_s$ です。固定子周波数が(促進周波数と呼ばれる)与えられた周波数閾値以下で失敗すると、回転子磁束を一定を保つために電圧の大きさは(促進電圧と呼ばれる)与えられた水準を保たなければなりません。反対に周波数が定格値よりも高くなると、逆変換器(インバータ)の飽和を考慮に入れ、電圧の大きさも定格値を保たれます。回転子磁束はもはや一定ではなく、トルクは減少します。

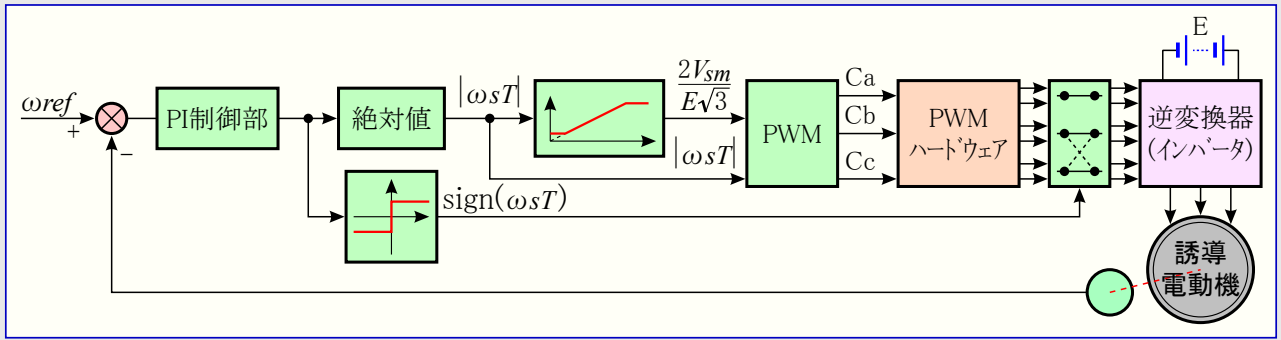
図4-1. 固定子電圧の大きさ 対 V/f原理から推論された固定子周波数



概略で、3相正弦状電圧を電動機巻線に供給することであるスカラーV/f制御原理は、図4-1.で示されるように、促進周波数以下と定格周波数以上を除き、周波数に比例します。実際問題として、電圧の大きさと電圧の周波数間の関係を定義する傾斜は電動機の名板に書かれた定格端子供給電圧と定格供給周波数から推論され、促進周波数は定格周波数の(5%と言う)割合に等しく選ばれます。

この原理は固定子電圧周波数を決めるPI制御部に供給する望む速度と測定した速度間の差で速度制御繰り返し(図4-2.)の構築に使うことができます。制御部の複雑さを減らすため、V/f則と空間ベクトルPWM算法の入力は固定子電圧周波数の絶対値です。PI制御部の出力が負の数なら、逆変換器(インバータ)の電力トランジスタを駆動する2つの切り替え変数が交換されます。ここで記述される制御原理は、負荷トルクが何でも速度が一定に保たれる応用でだけ使うことができることに注意されるべきです。電動機速度が何でも負荷トルクが一定に保たれなければならない応用は固定子電流測定ととも複雑な制御原理が必要です。

図4-2. V/f速度制御繰り返しシステムの構成図



4.3. 自然PWM原理

逆変換器(インバータ)を通して3相の正弦状電圧を固定子巻線に供給するように、1つ目の解決策は各々に120°位相がずれた3つの正弦波を生成するために正弦表を使うことです。このため、各々の固定子電圧の瞬間の位相を計算する3つの離散時間統合部に供給するために固定子脈動 ω_s が用いられます。

$$\begin{aligned} \theta_1[k] &= \theta_1[k-1] + \omega_s[k] T_s \\ \theta_2[k] &= \theta_2[k-1] + \omega_s[k] T_s \\ \theta_3[k] &= \theta_3[k-1] + \omega_s[k] T_s, \end{aligned} \quad \theta_1[0]=0, \theta_2[0]=-\frac{2\pi}{3}, \theta_3[0]=-\frac{4\pi}{3}, T_s \text{は制御算法の採取周期とされます。}$$

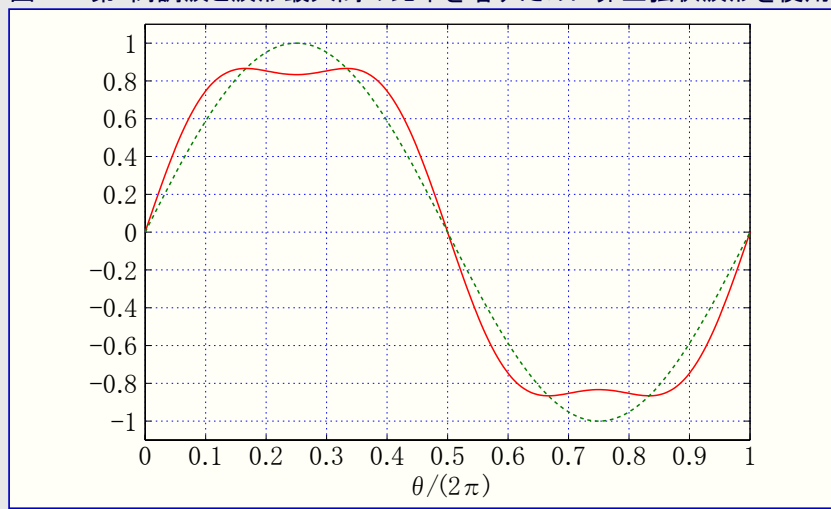
3つの角度の1つが 2π よりも大きくなると、 $0 \sim 2\pi$ の間を保つように 2π が減算されます。固定子に印加されるべき3つの電圧を計算するのに正弦表が用いられます。

$$\begin{aligned} V_a[k] &= V_{sm}(\omega_s[k]) \text{sita}(\theta_1[k]) \\ V_b[k] &= V_{sm}(\omega_s[k]) \text{sita}(\theta_2[k]) \\ V_c[k] &= V_{sm}(\omega_s[k]) \text{sita}(\theta_3[k]) \end{aligned}$$

ここで $V_{sm}(\omega_s)$ は一定のV/Hz(V/f)原理と $\text{sita}(\theta)=\sin(\theta)$ から推論された固定子電圧の大きさです。それが電動機の動きに無効で、第1高調波が信号の最大 $(\frac{2}{\sqrt{3}})$ よりも15.47%高い振幅を持つ信号の生成を許すので、正弦表の正弦波に第3高調波 $\text{sita}(\theta)=\sin(\theta)+\frac{1}{6}\sin(3\theta)$ を追加することによって僅かな改善が得られます(図4-3.をご覧ください)。

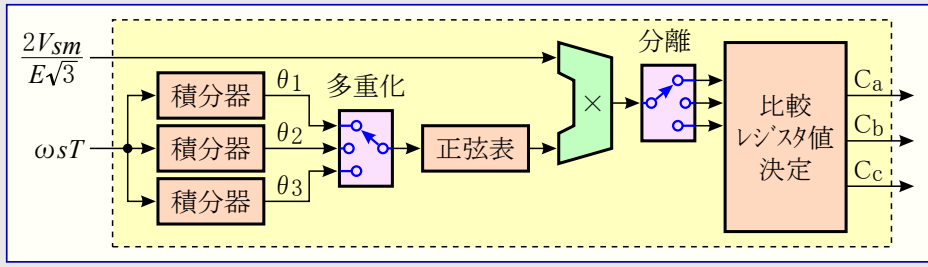
この改善で、同じDCバス電圧でより大きいAC電圧を生成することができ、故に一定のV/f比を保って電動機を増速することができます。

図4-3. 第1高調波と波形最大間の比率を増すために非正弦状波形を使用



これらの値は(三角波発生器として使われる)昇降計数器の出力と比較されます。昇降計数器出力がこれらの値の1つを超える時に対応する比較器出力が切り替わります。結果として、各PWMチャネルのデューティサイクルが対応する固定子電圧値に比例します。3つの比較器を持つこの昇降計数器がソフトウェアによって実装するのが非常に重いので、AC電動機制御応用に適合するようにこのような装置がマイクロコントローラに含められなければなりません。これはAT90PWM3の場合は勿論で、3つの電力段制御機(PSC)を提供します。例として第1相を取ると、対応するPSCの比較レジスタに格納されるデューティサイクルは $\frac{T_s}{2}(1 + \alpha \frac{V_a[k]}{V_{smax}})$ に比例し、 $\alpha = 1 - \frac{2\delta}{T_s}$ で、 V_{smax} と δ は各々、固定子電圧の大きさの最高値と逆変換器(インバータ)切り替えの沈黙時間です。結果のデータの流れ構成図が図4-4.で示されます。

図4-4. 自然PWMデータの流れ構成図



4.4. 正弦表に格納するのに何バイトが必要とされるか?

前項で示されるように、自然PWM算法は0と 2π 間の全ての θ の値に対して $\sin(\theta)$ を計算するための正弦表が必要です。三角関数の特性により、多数の解決策でこの参照表の長さを減らすことが可能です。

$$\frac{\pi}{3} \text{と} \frac{2\pi}{3} \text{間の} \theta \text{に関して} \sin(\theta) = \sin(\theta - \frac{\pi}{3}) + \sin(\frac{2\pi}{3} - \theta)$$

$$\frac{2\pi}{3} \text{と} \pi \text{間の} \theta \text{に関して} \sin(\theta) = \sin(\pi - \theta)$$

$$\pi \text{と} \frac{4\pi}{3} \text{間の} \theta \text{に関して} \sin(\theta) = \sin(\theta - \pi)$$

$$\frac{4\pi}{3} \text{と} \frac{5\pi}{3} \text{間の} \theta \text{に関して} \sin(\theta) = \sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) + \sin(\frac{5\pi}{3} - \theta)$$

$$\frac{5\pi}{3} \text{と} 2\pi \text{間の} \theta \text{に関して} \sin(\theta) = \sin(2\pi - \theta)$$

なので、最も効率的なのは0と $\frac{\pi}{3}$ 間だけの θ に対する正弦関数の値の参照表の使用です。けれども、この解決策は前項で説明されるように、正弦関数に第3高調波を追加することを容易に許しません。これは0と $\frac{\pi}{2}$ 間の θ に対して $\sin(\theta)$ または $\sin(\theta) + \frac{1}{6} \sin(3\theta)$ のどちらかの値を持つ参照表を使うことと、 $\frac{\pi}{2}$ と 2π 間の θ に対して $\sin(\theta)$ を計算するのに以下の関連を使うことを推奨します。

$$\frac{\pi}{3} \text{と} \pi \text{間の} \theta \text{に関して} \sin(\theta) = \sin(\pi - \theta)$$

$$\pi \text{と} \frac{3\pi}{2} \text{間の} \theta \text{に関して} \sin(\theta) = \sin(\theta - \pi)$$

$$\frac{3\pi}{2} \text{と} 2\pi \text{間の} \theta \text{に関して} \sin(\theta) = \sin(2\pi - \theta)$$

後者の解決策は2つの可能な参照表間の容易な交換を許します。

4.5. PI調整部原理

PI制御部はどんな重い制御理論にも頼らずに実装することができる算法です。このような算法の目的は測定した出力(この場合、回転子の速度)が基準(使用者が望む速度)に達する装置入力(この場合、固定子電圧周波数)を決めることです。PIは比例(Proportional)と積分(Integral)を表し、2つの項は制御部の2つの別個の要素を記述します。

- 比例項は比例利得と呼ばれる定数による誤差信号(基準を減算された測定装置出力)の結果と等価です。比例項はそれが基準の変化に制御部がどの位強く反応するかを決めるので、主に制御部の短期間の動きを決めます。
- 積分項は制御部に長期間精度を追加します。この項は積分利得と呼ばれる定数による前の誤差信号値の全総和の結果です。この総和はメモリに前の誤差信号値の全てを保持し、誤差が0でない限り進展します。これは測定した出力と基準間の違いを相殺することを制御部に許しますが、通常はより緩やかな閉路系にし、そのために安定性を減らします。

これら2項は時々、誤差信号の微分に比例する第3のものを追加されます。その結果の調整部はPID(Proportional, Integrator, Derivative)と呼ばれます。V/f原理によって誘導電動機とその速度を制御するには、この第3項は有用ではありません。それは閉路の速度を増しますが、雑音も派生し、閉路の安定性を減らします。故にD項は調整が扱い難いものです。

4.6. 電動機制御用感知器

速度感知器は制御繰り返しに於ける重要な役割です。多くの解決策は回転子の速度と方向を得ることが可能です。

最も正確であるが、最も高価でもあるのは絶対または増量の符号器を使うことです。これらの任意選択感知器は誘導電動機それ自身と同じ位高価かもしれません。

この実験で使った別の解決策は回転子軸に接続した回転計(タコメータ)発生器の出力を使うことです。マイクロコントローラでこの感知器の出力をインターフェースするのにA/D変換器が必要とされます。

3つ目の解決策はホール効果感知器を使うことです。これらの安価な非接触感知器は今や感知器と感知器信号調整回路を含む小さなIC外圍器で提案されます。これらはマイクロコントローラの入出力ポートに直接的に接続することができる出力を提供します。

5. ハードウェア説明(ATAVRMC200)

この応用記述はATAVRMC200評価基板で利用可能です。この基板は同期電動機制御を開始して実験する方法を提供します。

ATAVRMC200の主な特徴は次のとおりです。

- AT90PWM3マイクロコントローラ
- 110～230V AC電動機駆動
- 知的な電力単位部 (230V/370W基板の大きさ)
- ISPとエミュレータのインターフェース
- RS232インターフェース
- 絶縁された感知器用入出力
- 指示または感知器用の0～10V入力

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。CPUは校正付き内蔵RC発振器を用いて8MHzでクロック駆動されます。この応用ではマイクロコントローラの3つの部分が重要な役割を演じます。

A/D変換器とPI制御部の採取周期である1ms毎の割り込みを生成するのに8ビットタイマ/カウンタ0が使われます。この計時器はCTC形態(比較一致での計時器解除)で使われ、32kHzでクロック駆動されます。16ビットタイマ/カウンタ1は他の作業用に空いています。

電力段制御器(PSC)はPLLによって64MHzでクロック駆動され、“主”となる第3のもの(PSC2)と“従”となるPSC0とPSC1の3つの同期計数器として使われます。この構成設定ではPSC0とPSC1の比較レジスタの値の変更はPSC2の比較レジスタが変更される時に考慮されません。これは3つのPSCに同時に進展することを許します。これらは12kHz(比較Rレジスタに値2666が格納され、故にPWM周波数は概ね $64\text{MHz}/(2 \times 2666) = 12\text{kHz}$ と等価)の切り替え周波数で中央整列形態で構成設定されます。

A/D変換器も変換が終了した時に割り込みを生成するように構成設定されます。これは測定速度の2つの採取間で一定の遅延を持つことを許します。変換器の電圧基準はVCCが選ばれます。

A/D変換器は内部変数がどう進展するかを監視するために試験中も使うことができます。空間ベクトルPWM算法については0～120間の k に対して $127\sin(\frac{2\pi k}{480})$ または $127\sin(\frac{2\pi k}{480}) - \frac{1}{6}\sin(\frac{6\pi k}{480})$ の丸めた値の表が使われます。この表の長さ(121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6-1.と図6-2.は+700と-700rpm間の速度基準段階に対してマイクロコントロールで得られる速度応答と固定子電圧を示します。これらの結果は(370W未満の負荷での)750W誘導(電動機)装置で得られました。これらの図は1秒の遷移後に望む速度に達し、PI調整部の出力で得られた固定子周波数 ω_s が0近くの人に固定子電圧の大きさが促進電圧に等しいことを示します。これらの図は同じ速度とトルクが正規の経過でない代償で、第3高調波成分の使用によってより低い固定子電圧尖頭間振幅で得られることも追認します。

図6-1. 純粋な正弦状参照表で得られた試験結果

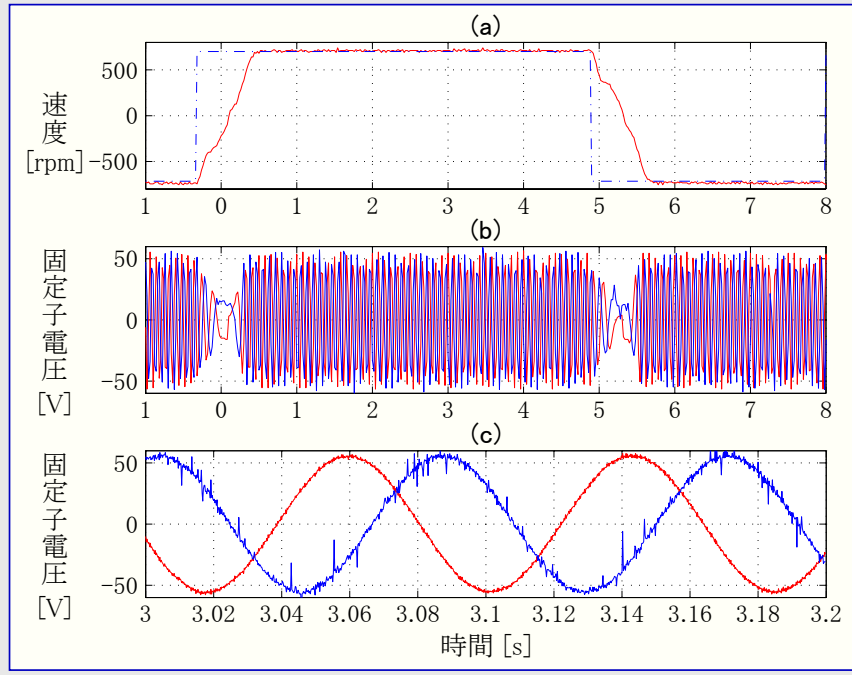
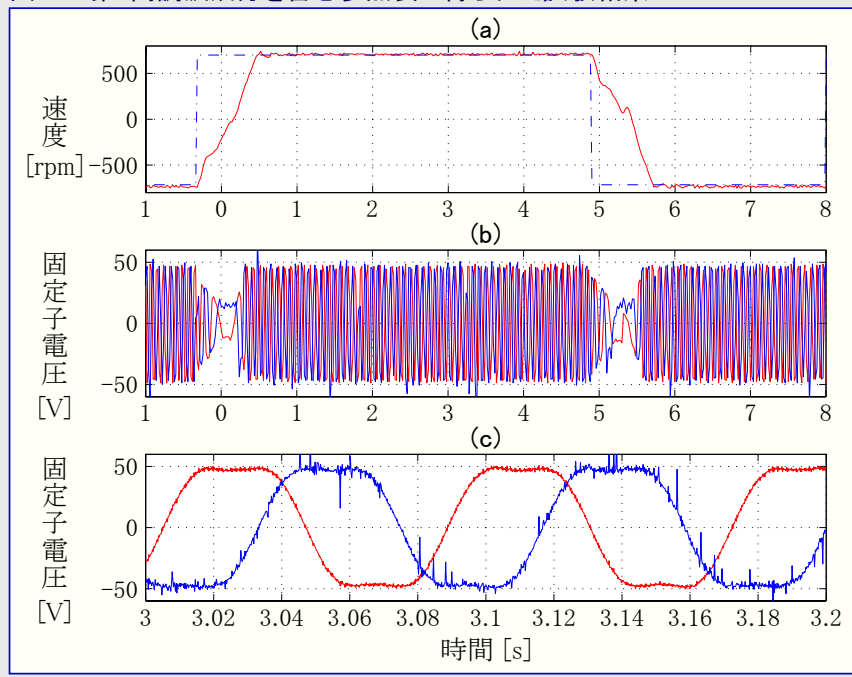


図6-2. 第3高調波成分を含む参照表で得られた試験結果



7. 資源

コード量 : 1947バイト
RAM量 : 246バイト (正弦表を含む)
CPU負荷 : 30% (PI調整なし)/55% (PI調整有り)

8. 参考文献

1. W. Leonhard, "Control of electrical drives", 2 Ed, Springer, 1996.
2. F.A. Toliyat, S.G. Campbell, "DSP-based electromechanical motion control", CRC Press, 2004.



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のウェブサイトには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AVR494応用記述(doc7545.pdf Rev.7545A-12/05)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。