

RX210

R01AN1193JT0100

Rev.1.00

2013.03.22

空間ベクトル変調によるモータ制御

要旨

このプロジェクトの目的は RX210 MCU を搭載したアプリケーションボードと、力率改善回路(PFC: Power Factor Corrector)を伴う永久磁石同期モータ (PMSM: Permanent Magnetic Synchronous Motor) のソフトウェア制御の参考例を実装することです。

対象デバイス

RX210

目次

1. 仕様.....	2
2. PFC コントローラ的设计.....	4
2.1 電流制御ループのコントローラ设计.....	5
2.2 電圧制御ループのコントローラ设计.....	5
3. PMSM 駆動のコントローラ设计.....	6
3.1 PMSM のモデル.....	6
3.2 PMSM のベクトル制御.....	7
3.3 空間ベクトルの変調.....	8
3.4 d 軸電流コントローラ的设计.....	9
3.5 q 軸電流コントローラ的设计.....	10
3.6 速度コントローラ的设计.....	11
4. 起動手順.....	12
5. ソフトウェアの実装.....	14
6. 実験の結果.....	15
7. 結論.....	19
8. 参考ドキュメント.....	20

1. 仕様

● 対象デバイス: RX210

PFC

- 入力電圧: 110 V AC / 60 Hz
- 出力電圧: 200 V DC
- 出力電力: 400 W
- 力率: > 0.9
- 電流制御モード: 平均電流モード
- 制御方式: PI コントローラ
- キャリア周波数: 20 kHz
- モジュール: 単相タイマ

PMSM

- 電力: 300 W
- 定格速度: 3000 rpm
- タイプ: 表面実装 PMSM
- モジュール: 3 相タイマ
- コントローラ: 速度と電流の制御
- コントローラタイプ: PI コントローラ
- キャリア周波数: 20 kHz

図 1 と図 2 は PFC と PMSM 駆動回路を実装するためのブロック図を示しています。図 1 に示されているように PFC と PMSM 駆動回路のソフトウェア制御を行うために RX210 が使われています。図 1 では、平均電流モードと速度/電流制御が RX210 を使用してソフトウェアで実現されています。表 1 と表 2 はこのプロジェクトの PFC と PMSM の仕様です。

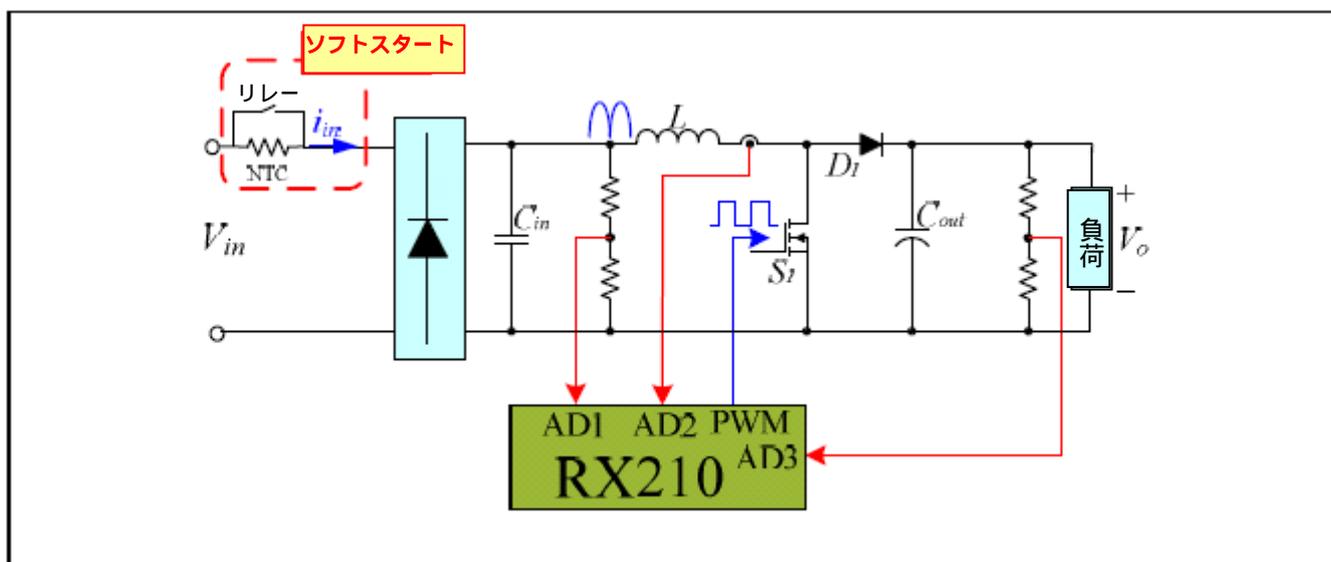


図1 力率改善回路

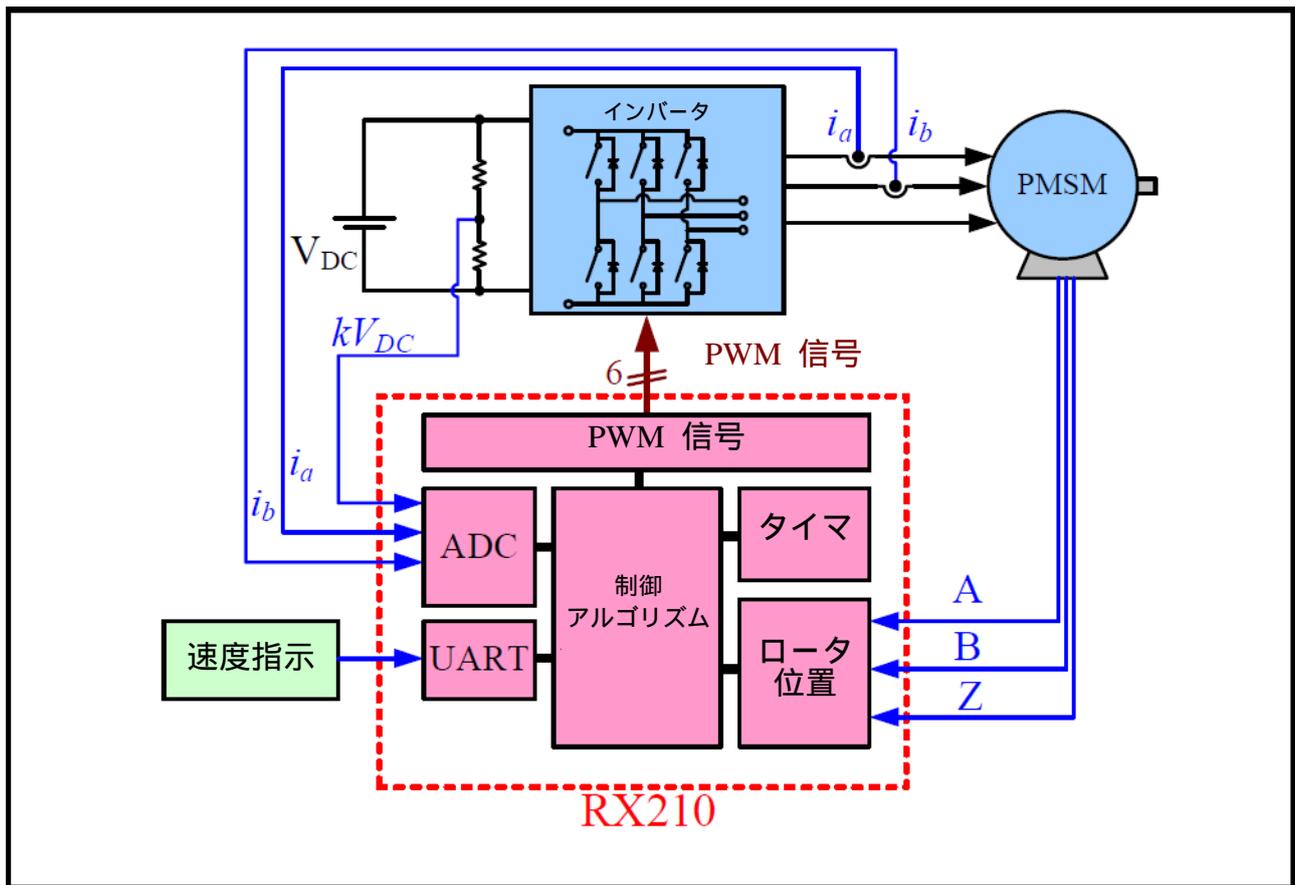


図2 ベクトル制御 PMSM 駆動回路

表1 PFC仕様

パラメータ	値
入力電圧 V_{in}	• 110 V AC / 60Hz
出力電圧 V_{out}	• 220 V DC
定格電力 P_o	• 400 W
電流制御モード	• 平均電流モード制御
力率	• 0.90 ~ 0.98
スイッチング周波数	• 20 KHz

表2 PMSM仕様

パラメータ	値
定格電力	• 300 W
定格電流 (rms)	• 2 A
定格速度	• 3000 RPM
定格トルク	• 0.95 Nt-m
極数	• 8
エンコーダ分解能	• 2000 C/T
q-軸固定子インダクタンス (L_{qs})	• 5.63 mH
d-軸固定子インダクタンス (L_{ds})	• 6.47 mH
漏洩フラックス (σ)	• 0.06 V-s/rad
固定子抵抗 (R_s)	• 2.65 Ω

2. PFC コントローラ的设计

表 3 は PFC 設計の回路パラメータで、図 3 が実装のブロック図です。図 3 に示されているように電圧コントローラを介した電流参照値を得るために出力電圧がセンスされています。さらに、入力電圧は電流参照値の波形を得るためにフィードバックされています。入力電流がセンスされ電流コントローラのデューティ比を生成するために参照値と比較されています。コントローラ的设计仕様は次のとおりです。

1. 電流制御ループ的设计値

- A. 電流制御ループのバンド幅 < 2 kHz
- B. 位相余裕 > 45 度

2. 電圧制御ループ的设计値

- A. 電圧制御ループのバンド幅 < 120 Hz
- B. 位相余裕 > 45 度

表3 PFC 回路パラメータ

パラメータ	値
入力電圧 (V_{in})	• 110 V rms
出力電圧 (V_o)	• 200 VDC
入力電流 (I_L)	• 3.63 A rms
インダクタ (L)	• 1321.7 μ H
キャパシタ (C)	• 943 μ F
インダクタ DCR (R_{DCR})	• 125.3 m Ω
キャパシタ ESR (R_{ESR})	• 76.37 m Ω
MOSFET オン抵抗 (R_{on})	• 0.175 Ω
出力電力 (P_o)	• 400 W
スイッチング周波数 (f_{sw})	• 20 KHz

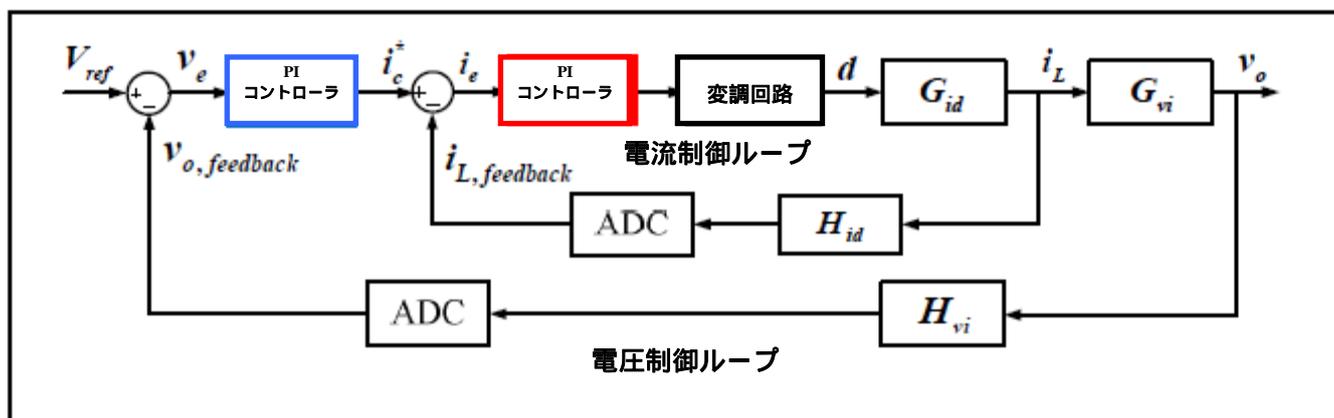


図3 PFC 設計のブロック図

2.1 電流制御ループのコントローラ設計

電流制御ループのボード線図が図 4 に示されています。この図にあるように、電流制御ループは $BW = 1.18$ kHz、 $PM = 70.4^\circ$ となっています。コントローラ的设计値は次の式となります。

$$PI \text{ controller} = 0.2319 + \frac{634.09375}{s}$$

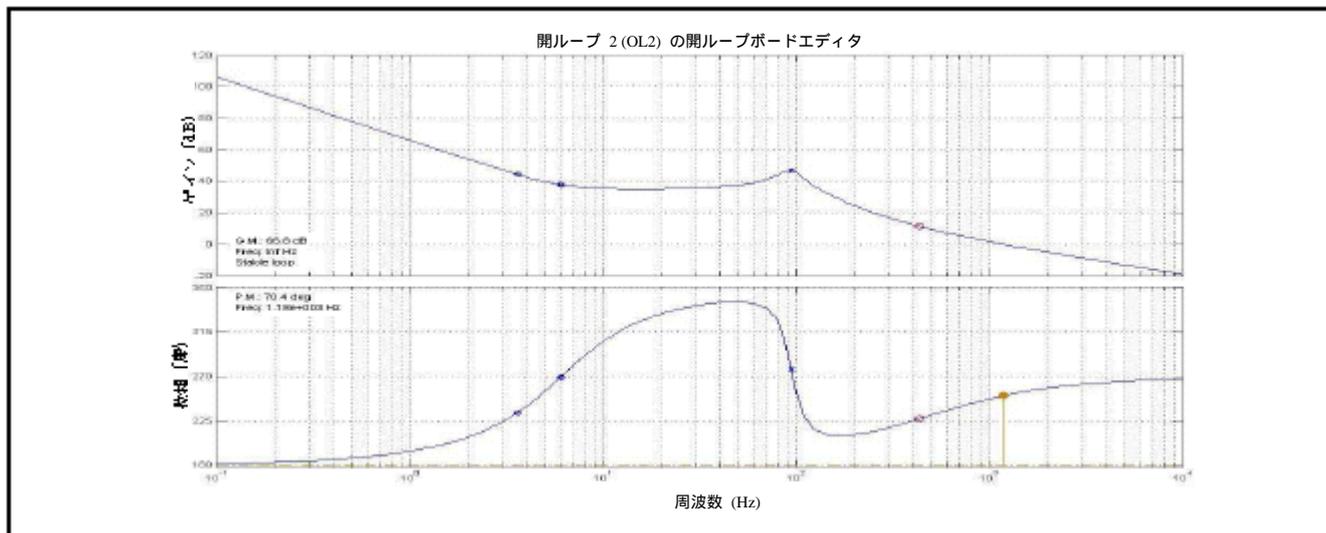


図4 電流制御ループのボード線図

2.2 電圧制御ループのコントローラ設計

図 5 が電圧制御ループのボード線図で、電圧制御ループは $BW = 6.54$ Hz、 $PM = 70.8^\circ$ となっています。コントローラ的设计値は次の式となります。

$$PI \text{ controller} = 1.7119 + \frac{77.84375}{s}$$

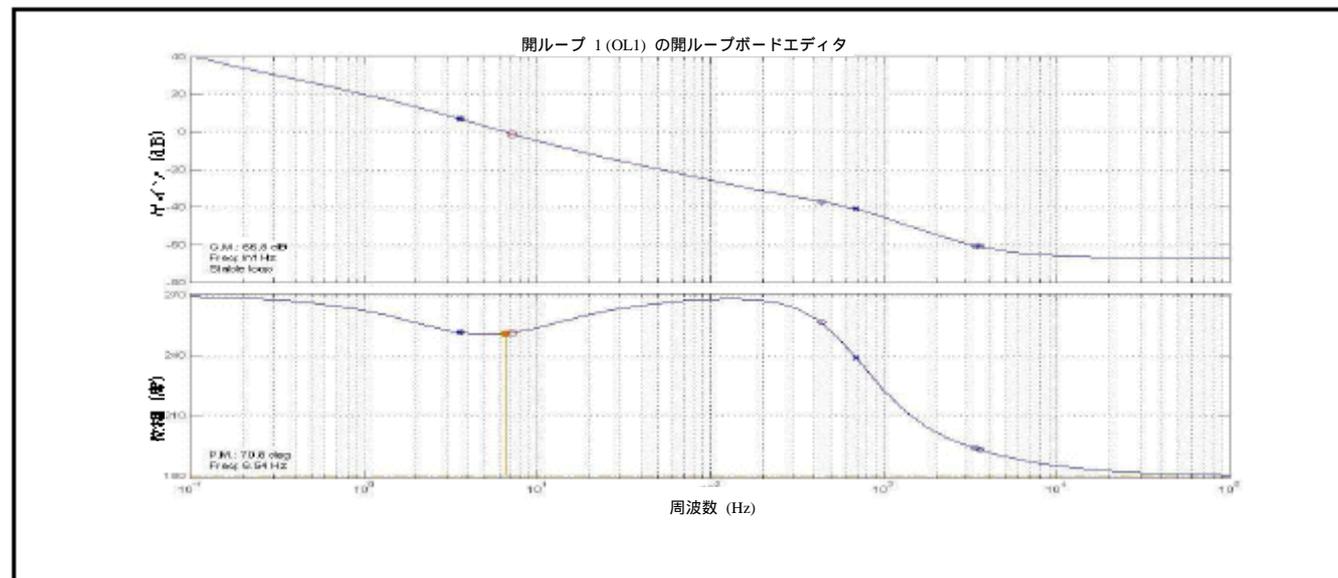


図5 電圧制御ループのボード線図

3. PMSM 駆動のコントローラ設計

3.1 PMSM のモデル

同期座標系を基準とする PMSM の数学モデルは次のように導かれます。

電圧の式:

$$\begin{bmatrix} v_{ds}^e \\ v_{qs}^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + L_d p & -\omega_e L_q \\ \omega_e L_d & R_s + L_q p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds}^e \\ i_{qs}^e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_e i_{fd} L_{md} \end{bmatrix} \quad (1)$$

トルクの式:

$$T_e = \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{2} [\lambda_{ds}^e i_{qs}^e - \lambda_{qs}^e i_{ds}^e] \quad (2)$$

磁束の式:

$$\lambda_{ds}^e = L_d i_{ds}^e + L_{md} i_{fd} \quad (3)$$

$$\lambda_{qs}^e = L_q i_{qs}^e \quad (4)$$

式 (1) を変形すると電気回路の状態式は次の式 (5) のようになります。

$$p \begin{bmatrix} i_{ds}^e \\ i_{qs}^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_d} & 0 \\ 0 & -\frac{R_s}{L_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds}^e \\ i_{qs}^e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} (v_{ds}^e + \omega_e L_q i_{qs}^e) \\ \frac{1}{L_q} (v_{qs}^e - \omega_e L_d i_{ds}^e - \omega_e L_{md} i_{fd}) \end{bmatrix} \quad (5)$$

式 (2) にあるように、コントローラで d 軸の電流要素をゼロに保つとトルクは q 軸の電流値の調整で制御することができます。式 (2)(3)(4) からトルクの式は次のように表されます。

$$T_e = \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{2} [(L_d - L_q) i_{ds}^e i_{qs}^e + \lambda_m i_{qs}^e] \quad (6)$$

磁化電流の d 軸の電流要素をゼロとすると、トルクの式は次のように書き直すことができます。

$$T_e = \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{2} (L_{md} i_{fd} i_{qs}^e) = \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{2} (\lambda_m i_{qs}^e) \quad (7)$$

トルクが一定になるように制御されていると磁束も一定となりますので(減磁が発生しない)、q 軸電流によりトルクが制御されます。さらに、同期した座標系の d 軸に沿ったロータの磁束は回転子電流の q 軸要素であるトルクを生じる電流に垂直となるため、最大のトルクを得ることができます。

3.3 空間ベクトルの変調

ここで紹介されているキャリアを使用する PWM 手法は文献 [1] に記されているものと同等のものです。この手法ではベース電圧 0.5 V DC で変調インデックスの直線性の最大値を 1.0 p.u. から 1.1547 p.u に拡張することができます。さらに、直流結合電圧の 1/2 とそれぞれの位相の電圧参照値との比率 T_a^* 、 T_b^* 、 T_c^* を与える元の値として V_{as}^* 、 V_{bs}^* 、 V_{cs}^* が使用されています。この最小値と最大値がパルスに式 (12) に示されている時間シフトを与えるために使われます。変調インデックスの直線性を拡張する目的で、図 7 にあるようにスイッチング期間の中央にパルス位置が来るよう調節するためにこのシフト量を使い式 (13) から (15) に示されているように修正されます。

$$T_{\max} = \max \{T_a^*, T_b^*, T_c^*\} \quad (10)$$

$$T_{\min} = \min \{T_a^*, T_b^*, T_c^*\} \quad (11)$$

$$T_0 = \frac{1}{2}(T_s - T_{\max} - T_{\min}) \quad (12)$$

$$T_a = T_a^* + T_0 \quad (13)$$

$$T_b = T_b^* + T_0 \quad (14)$$

$$T_c = T_c^* + T_0 \quad (15)$$

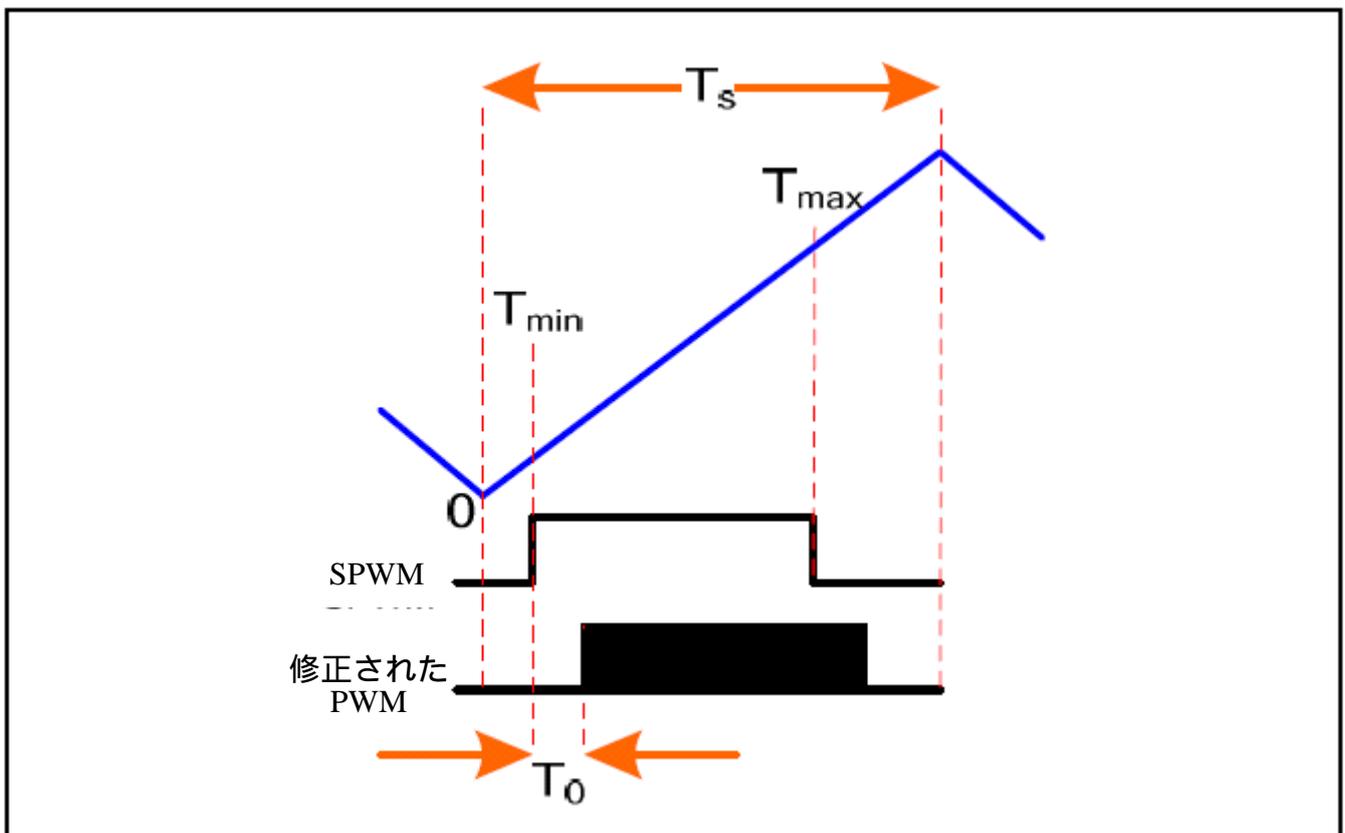


図7 T_0 要素計算の図

3.4 d 軸電流コントローラ的设计

図 8 は d 軸の電流コントローラと被制御系のブロック図です。設計上のバンド幅は 2 kHz です。式 (16) の伝達関数から、式 (17) に示されるように閉ループ伝達関数が導かれます。極零相殺によりコントローラのパラメータと被制御系のパラメータの関係は式 (18) で示されるように導くことができます。極零相殺を行った閉ループ伝達関数は式 (19) のようにさらに単純化することができます。そのため、コントローラのパラメータはバンド幅を与えることで式 (20) のように導かれます。d 軸電流コントローラのボード線図は図 9 で、バンド幅 (BW) = 2 kHz でゲイン = -3.04 dB であることが示されています。

$$G_{id}(s) = \frac{1}{R_s + L_{ds}s} = \frac{1}{2.65 + 6.4775 \times 10^{-3} s} \quad (16)$$

$$T_d(s) \square \frac{i_{ds}^e}{i_{ds}^{e*}} = \frac{\left(\frac{K_p s + K_i}{s}\right) \left(\frac{1}{R_s + L_{ds}s}\right)}{1 + \left(\frac{K_p s + K_i}{s}\right) \left(\frac{1}{R_s + L_{ds}s}\right)} \quad (17)$$

ここで

$$\frac{K_p}{K_i} = \frac{L_{ds}}{R_s} \quad (18)$$

とすることで、 $T_d(s)$ は次のように書き換えられます。

$$T_d(s) = \frac{K_i / R_s}{s + (K_i / R_s)} \quad (19)$$

$$K_i = 2.65 \times 12.566 \times 10^3 = 33299.9$$

$$K_p = (6.4775 \times 10^{-3} / 2.65) \times 33299.9 = 81.396265 \quad (20)$$

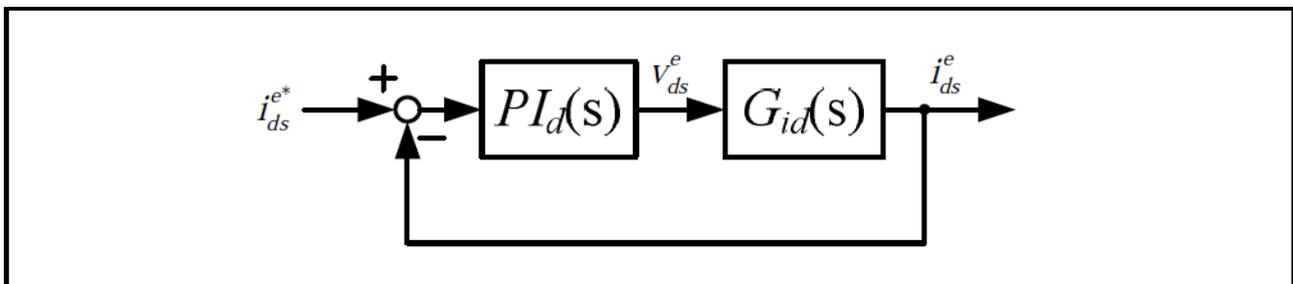


図8 d 軸電流コントローラ設計のブロック図

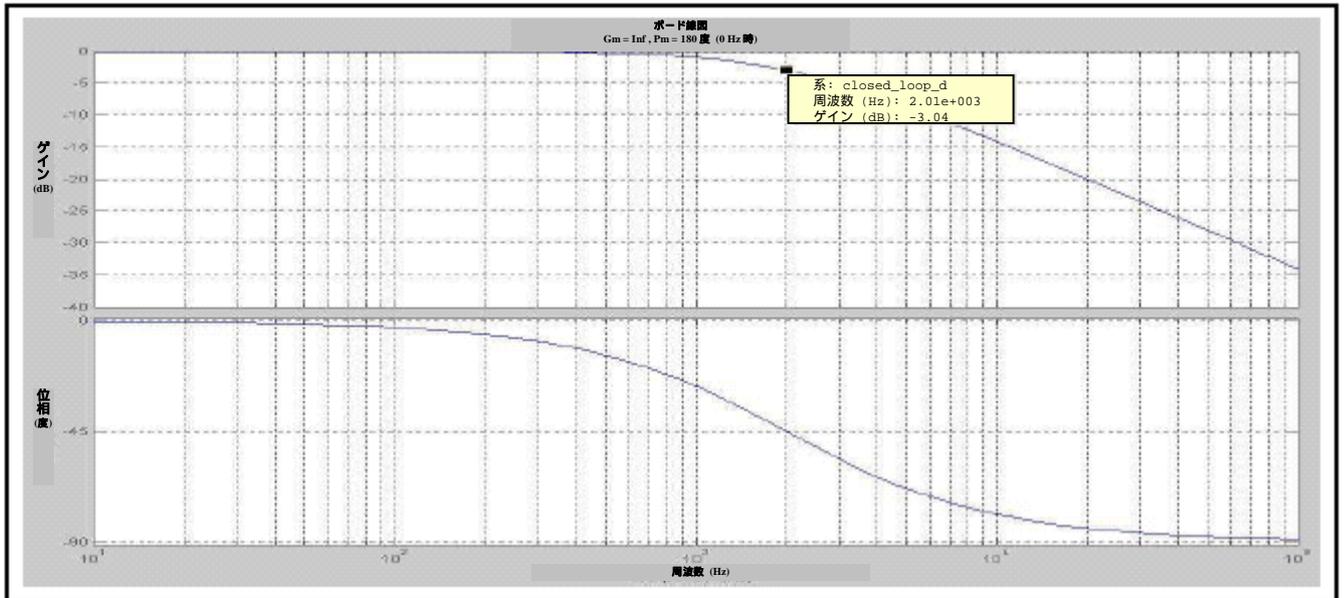


図9 d 軸電流コントローラのボード線図

3.5 q 軸電流コントローラ的设计

図 10 は q 軸の電流コントローラと被制御系のブロック図です。設計上のバンド幅は d 軸と同じく 2 kHz です。同様に、コントローラのパラメータはバンド幅 を与えることで式 (21) のように導かれます。q 軸電流コントローラのボード線図は図 11 で、バンド幅 (BW) = 2 kHz でゲイン = -3.02 dB となっています。

$$K_i = 2.65 \times 12.566 \times 10^3 = 33299.9$$

$$K_p = (5.634 \times 10^{-3} / 2.65) \times 33299.9 = 70.796844 \tag{21}$$

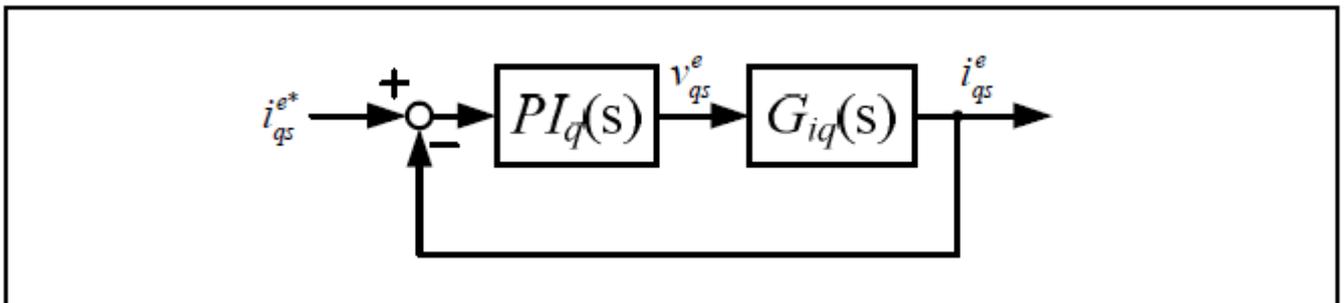


図10 q 軸電流コントローラ設計のブロック図

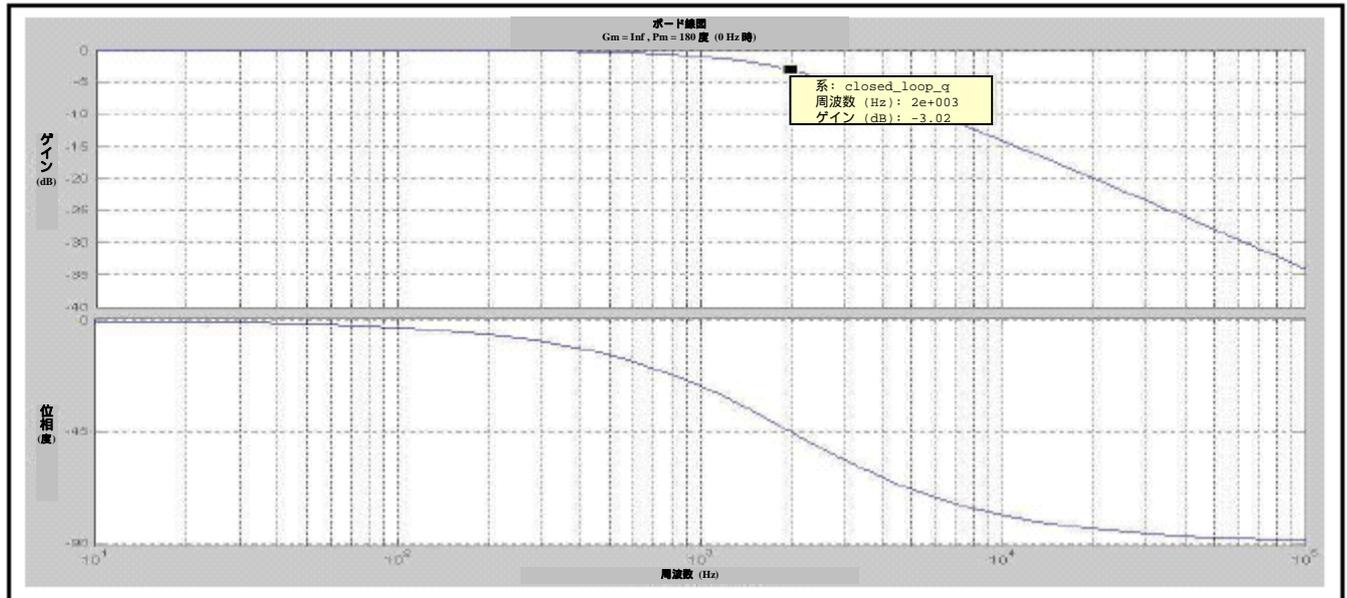


図11 q 軸電流コントローラのボード線図

3.6 速度コントローラの設計

図 12 は速度コントローラと被制御系のブロック図です。設計上のバンド幅は 200 Hz です。式 (22) の伝達関数から式 (23) に示される閉ループ伝達関数が導かれます。極零相殺によりコントローラのパラメータと被制御系のパラメータの関係は式 (24) で示されるように導くことができます。極零相殺を行った閉ループ伝達関数は式 (25) のようにさらに単純化することができます。そのため、コントローラのパラメータはバンド幅を与えることで式 (26) のように導かれます。速度コントローラのボード線図は図 13 で、バンド幅 (BW) = 200 Hz でゲイン = -3.06 dB となっています。

$$G_r(s) = \frac{\omega_r}{B + J_s} = \frac{1}{0.0033 + 0.0008s} \quad (22)$$

$$J = 0.0008 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$B = 0.0033 \text{ Nt} \cdot \text{m} / (\text{rad} / \text{sec})$$

$$T_{\text{speed}}(s) = \frac{(K_p + \frac{K_i}{s})(\frac{1}{J_s + B})}{1 + (K_p + \frac{K_i}{s})(\frac{1}{J_s + B})} \quad (23)$$

ここで

$$\frac{K_p}{K_i} = \frac{J}{B} \quad (24)$$

とすることで、 $T_{\text{speed}}(s)$ は次のように書き換えられます。

$$T_{\text{speed}}(s) = \frac{K_p / J}{s + K_p / J} \quad (25)$$

$$\therefore J = 0.0008 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad \therefore K_p = 0.36161$$

$$\therefore B = 0.0033 \text{ Nt} \cdot \text{m}^2 \quad \therefore K_i = K_p \frac{B}{J} = 1.49165 \quad (26)$$

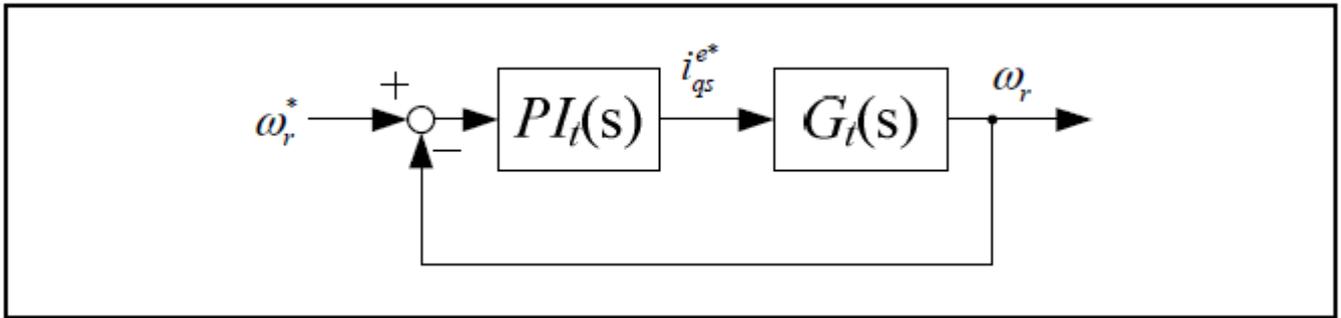


図12 速度コントローラ設計のブロック図

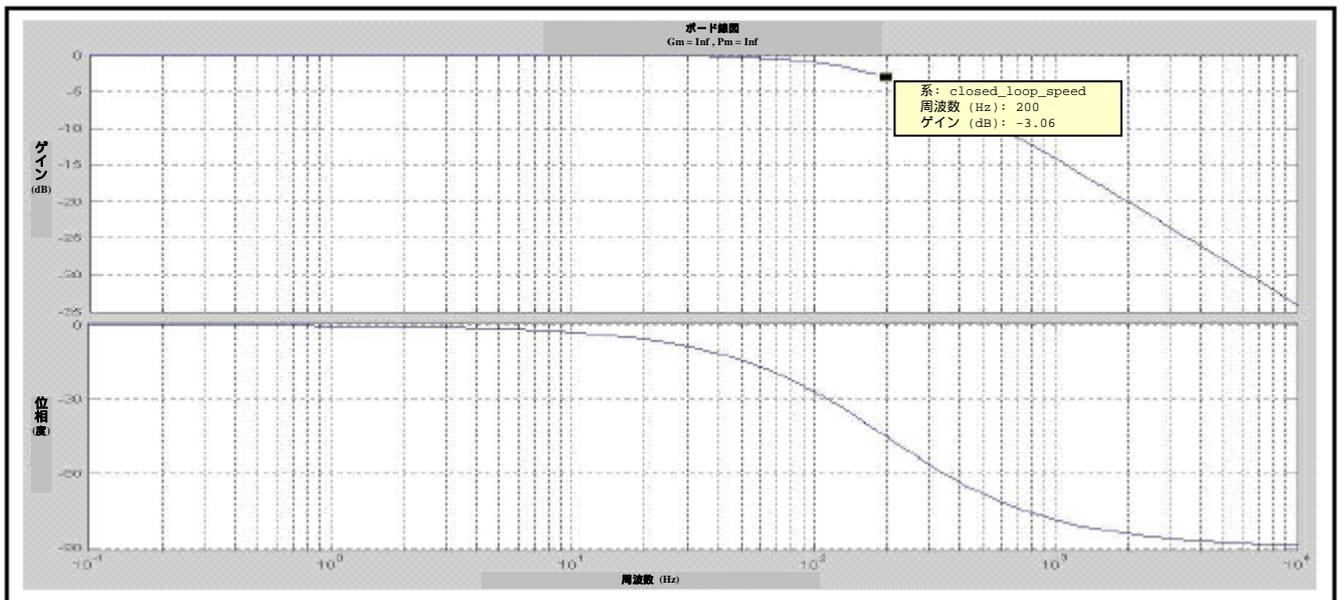


図13 速度コントローラのボード線図

4. 起動手順

図 14 は 2 相通電モードを、図 15 は 3 相通電モードを示しています。図 16 は 2 相通電モードと 3 相通電モードにおけるロータの吸引位置の関係を示すもので、LSn の位置は 2 相通電モードを、LVn の位置は 3 相通電モードに対応しています。

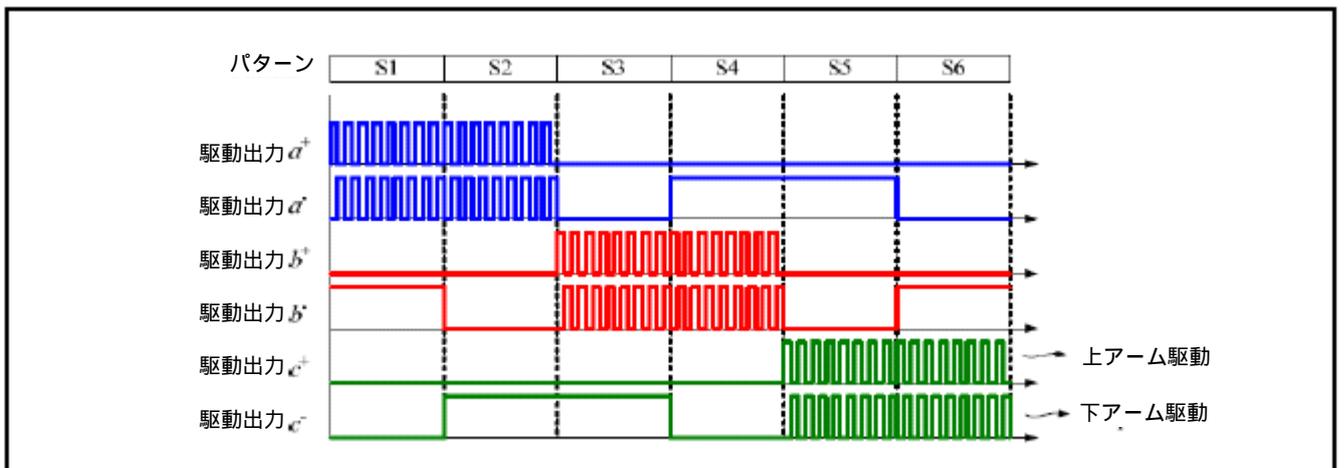


図14 2 相通電モード

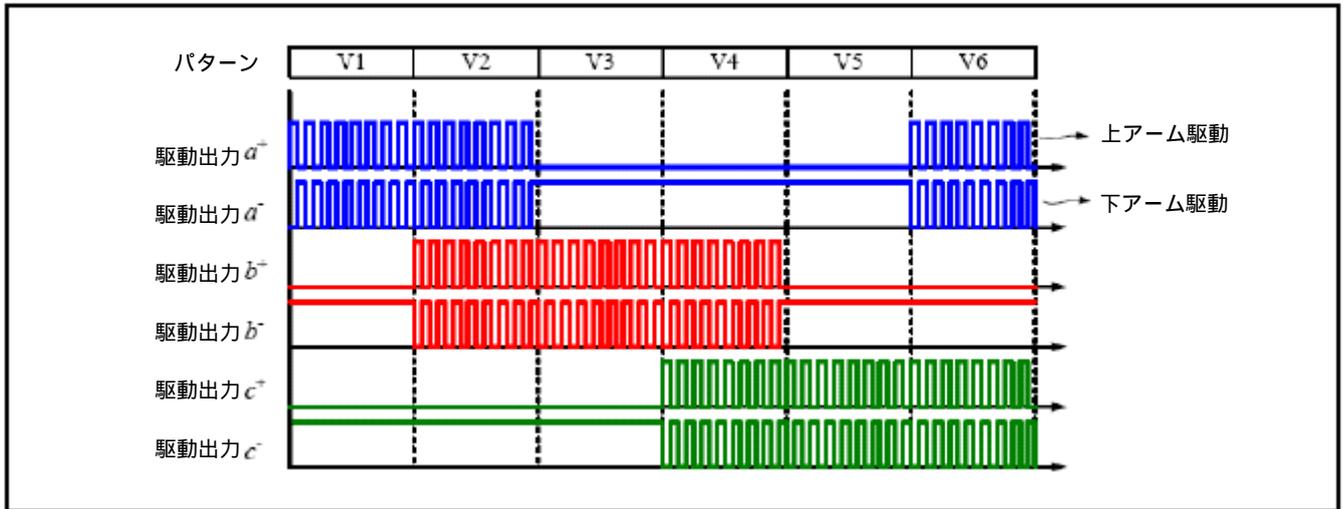


図15 3相通電モード

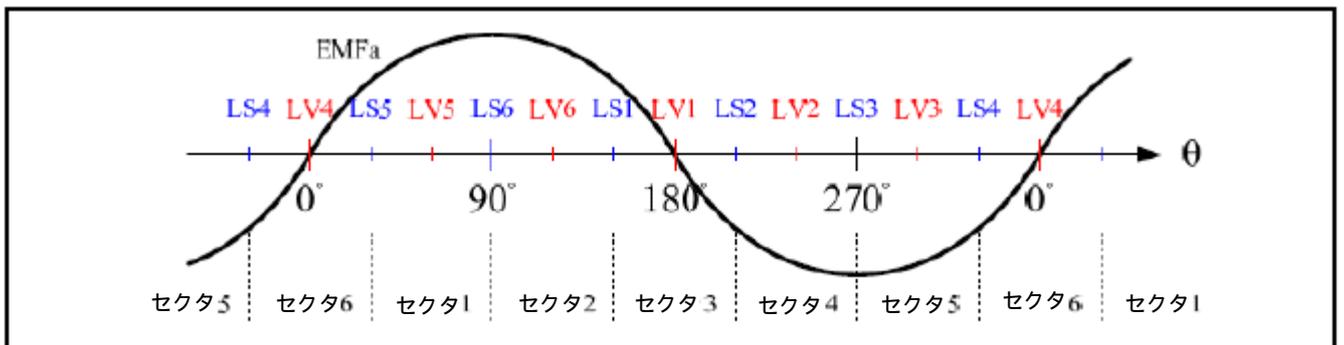


図16 ロータ位置との関係

5. ソフトウェアの実装

図 17 は PFC ソフトウェア実装のフローチャートです。

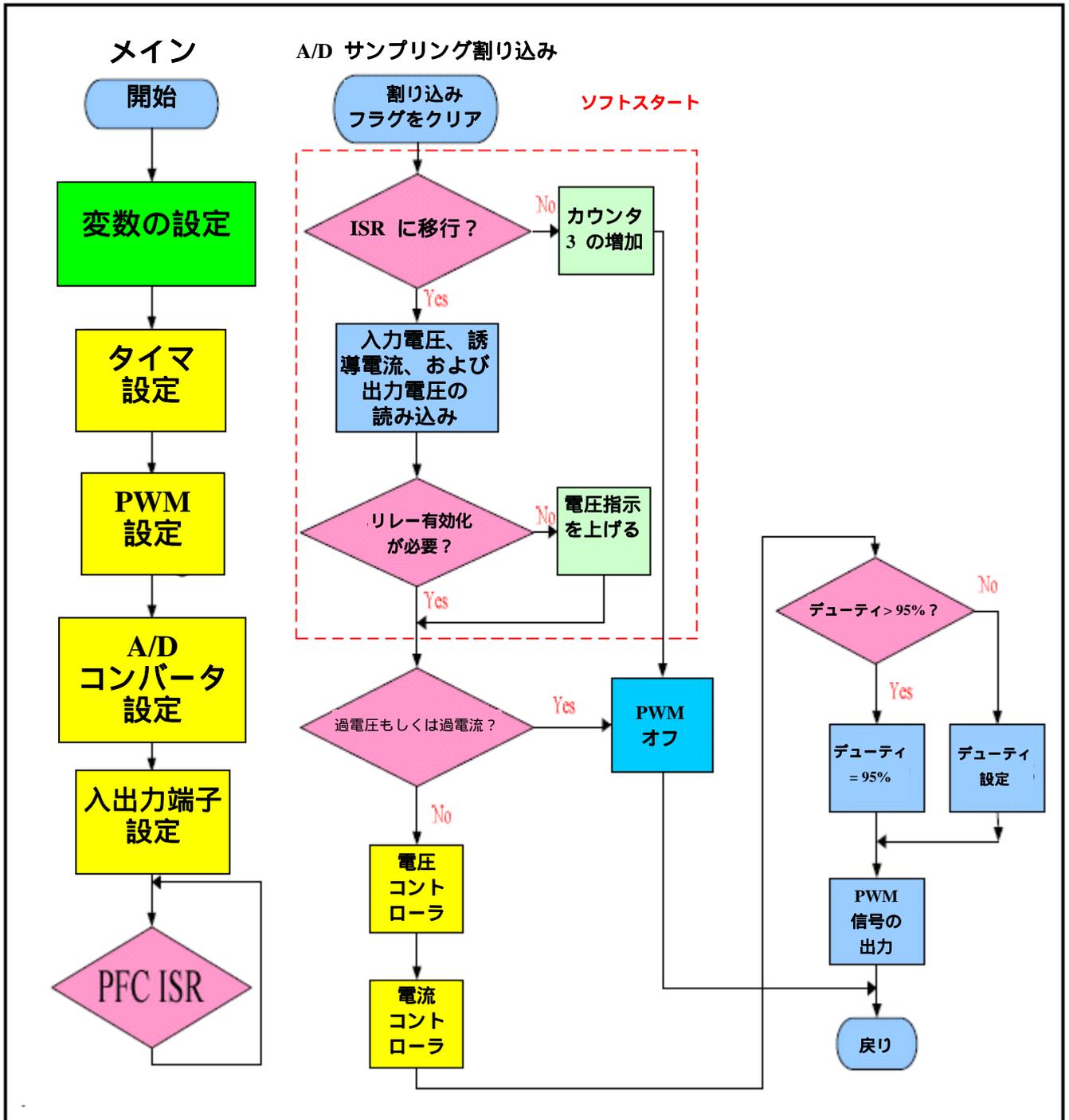


図17 PFC ソフトウェア実装のフローチャート

図 18 はモータ制御ソフトウェア実装のフローチャートです。

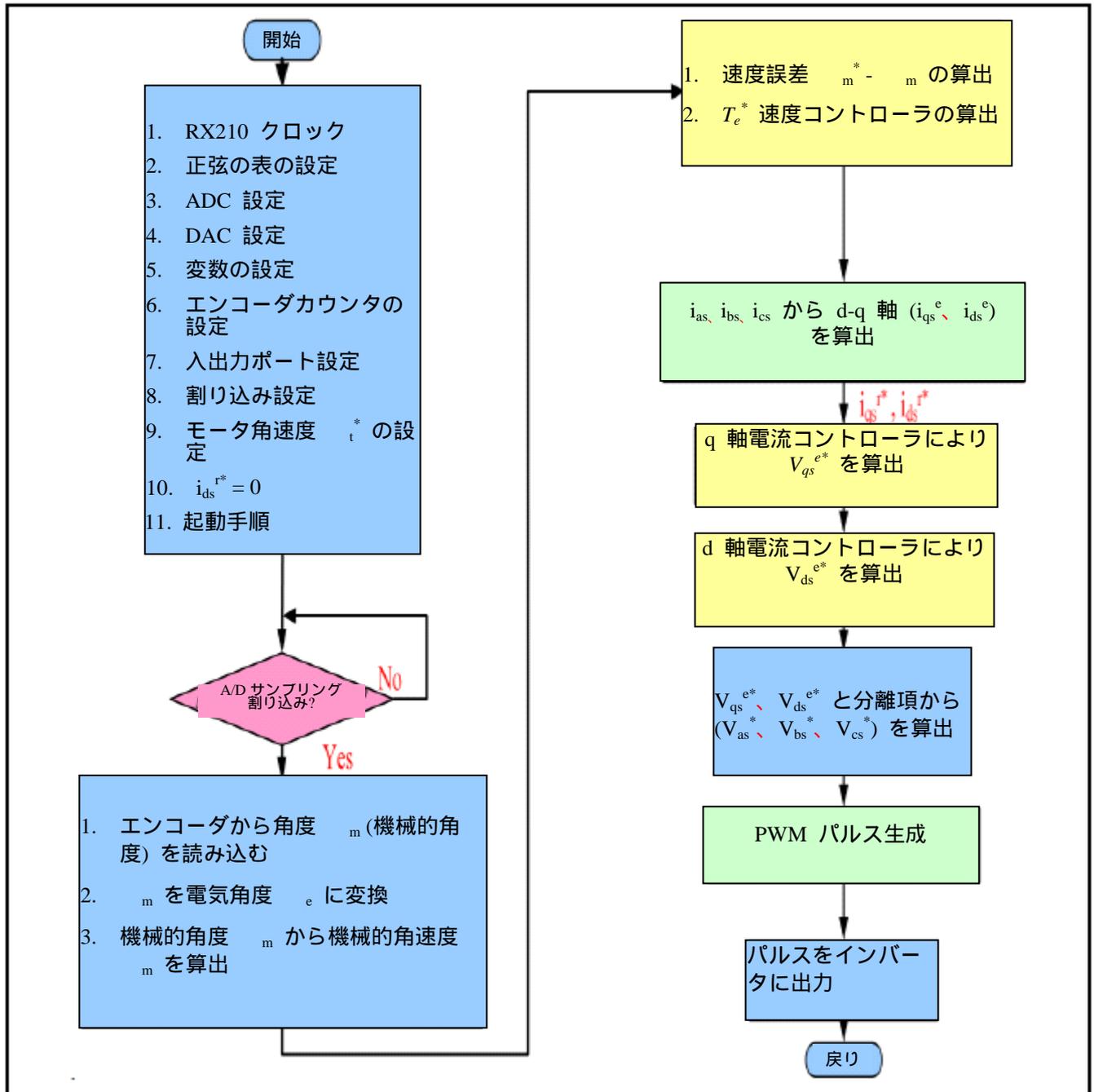


図18 モータ制御ソフトウェア実装のフローチャート

6. 実験の結果

図 19 は試作したシステムです。この一体化された実験システムでは PFC とベクトル制御 PMSM 駆動をテストします。図 3 と図 6 のブロック図にある制御ブロックで必要とされる計算は図 20 にある RX210 を搭載した制御ボードを用いて実現されています。

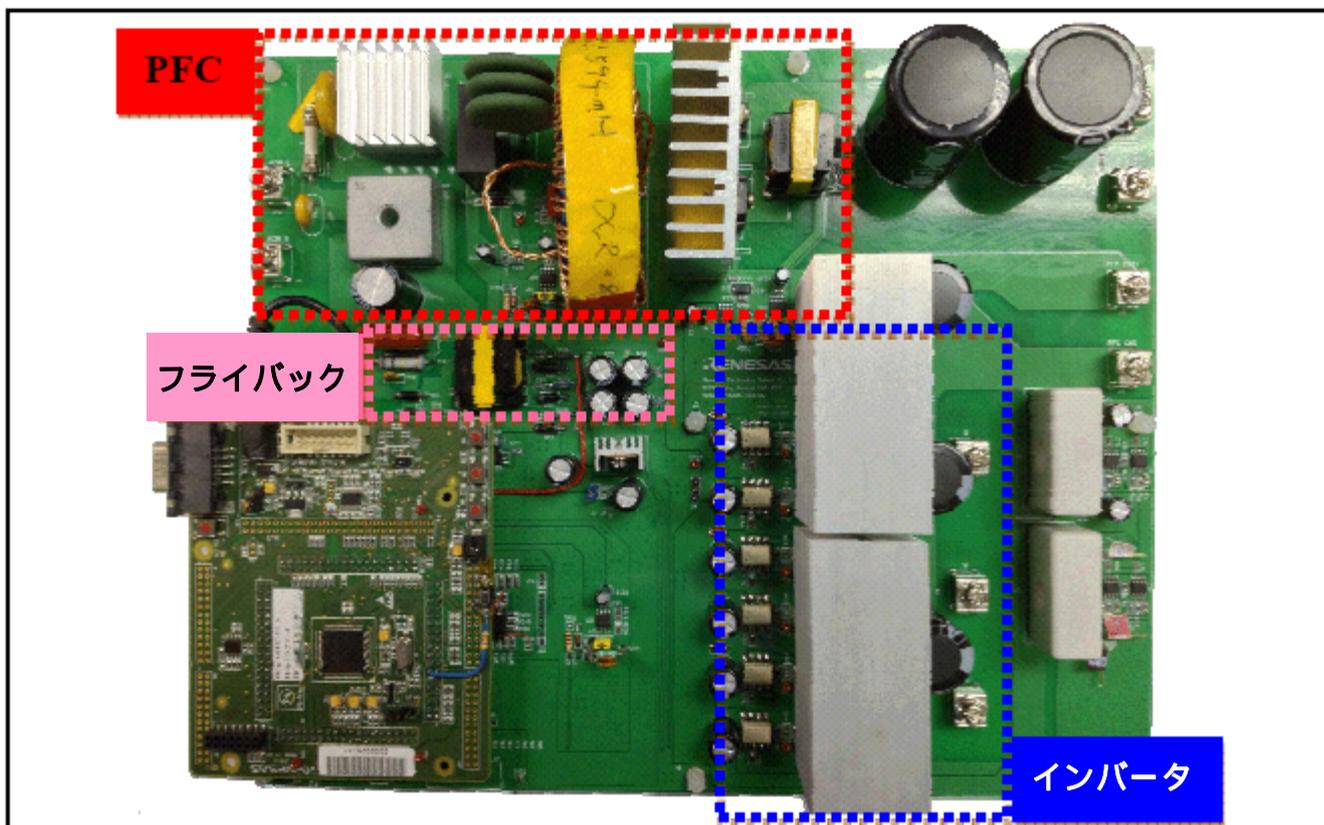
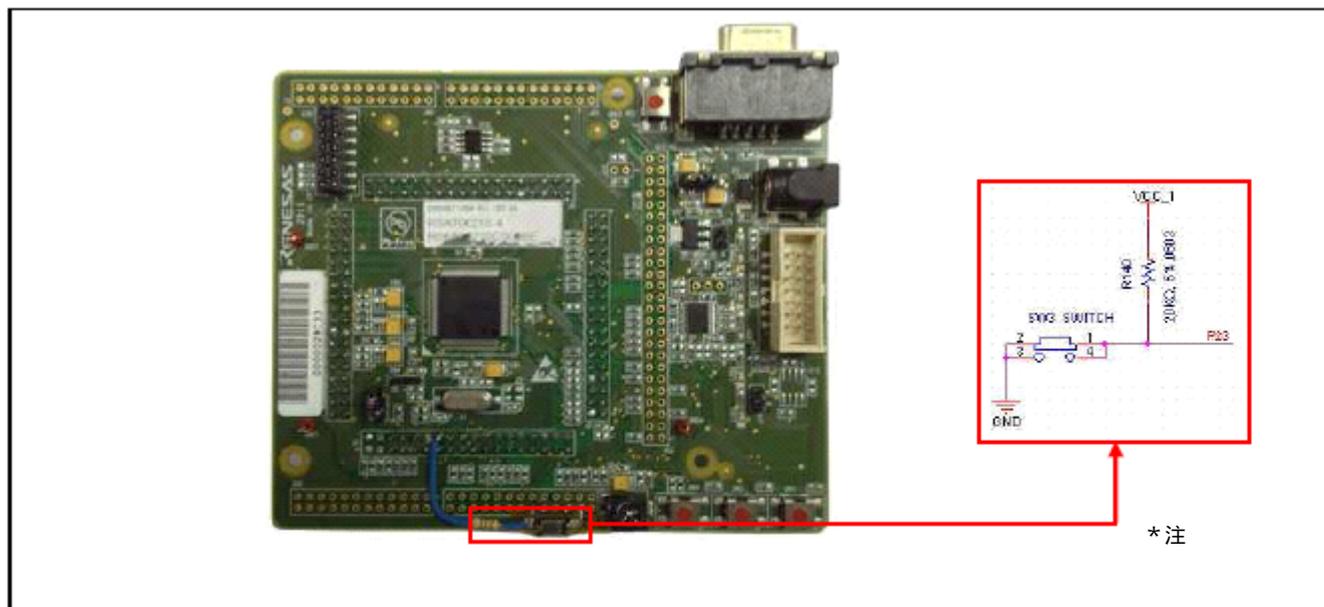


図19 試作したボード



*注

図20 RX210 を搭載した制御ボード

注: 端子はプルハイ抵抗および RSK 上のスイッチボタンに接続されており、モータ制御を有効にするために使われています (P23 = ローレベル のとき、モータ制御開始フラグ = 1)。

図 21 と図 22 はモータ制御を含まない力率改善回路での測定波形です。実験の結果では全負荷 (400W) の状態で力率が 0.98 に達しています。

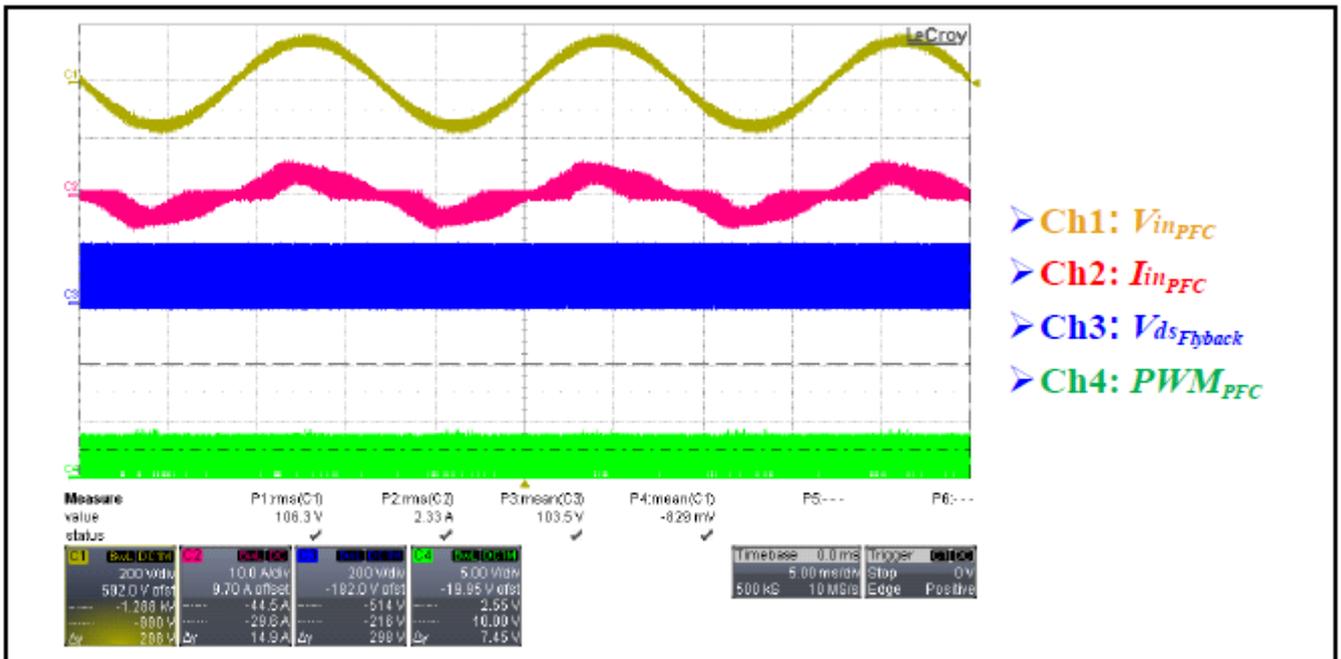


図21 負荷 = 200W、Vout = 205.5V、力率 (PF) = 0.963

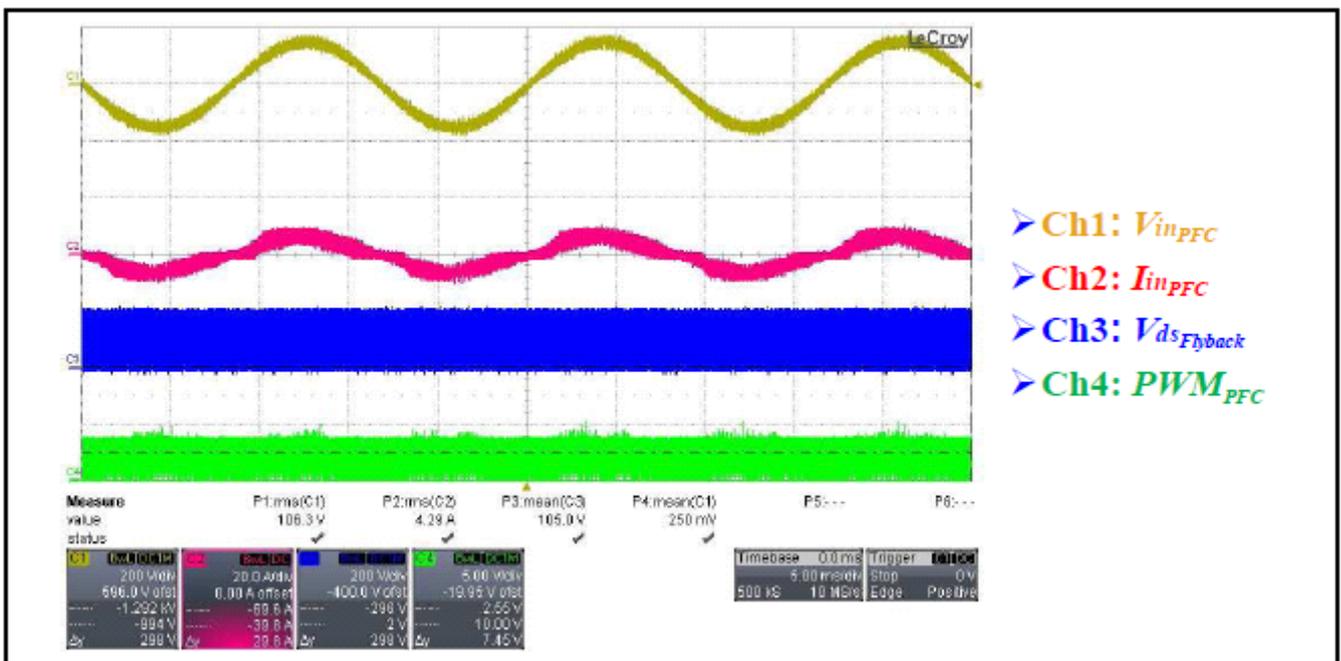


図22 負荷 = 400W、Vout = 205.5V、力率 (PF) = 0.982

図 23 と図 24 は力率改善を含まないモータの電流と速度を示す測定波形です。それぞれのモータ速度は図 23 と図 24 に示されています。

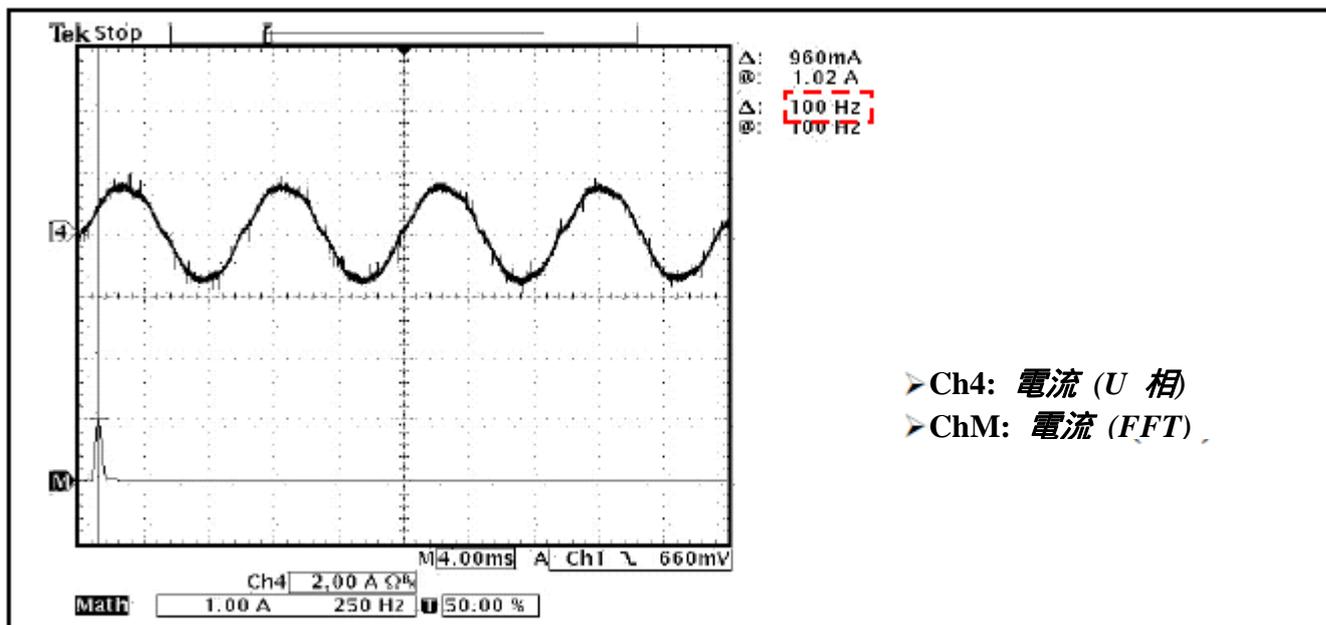


図23 1500 rpm

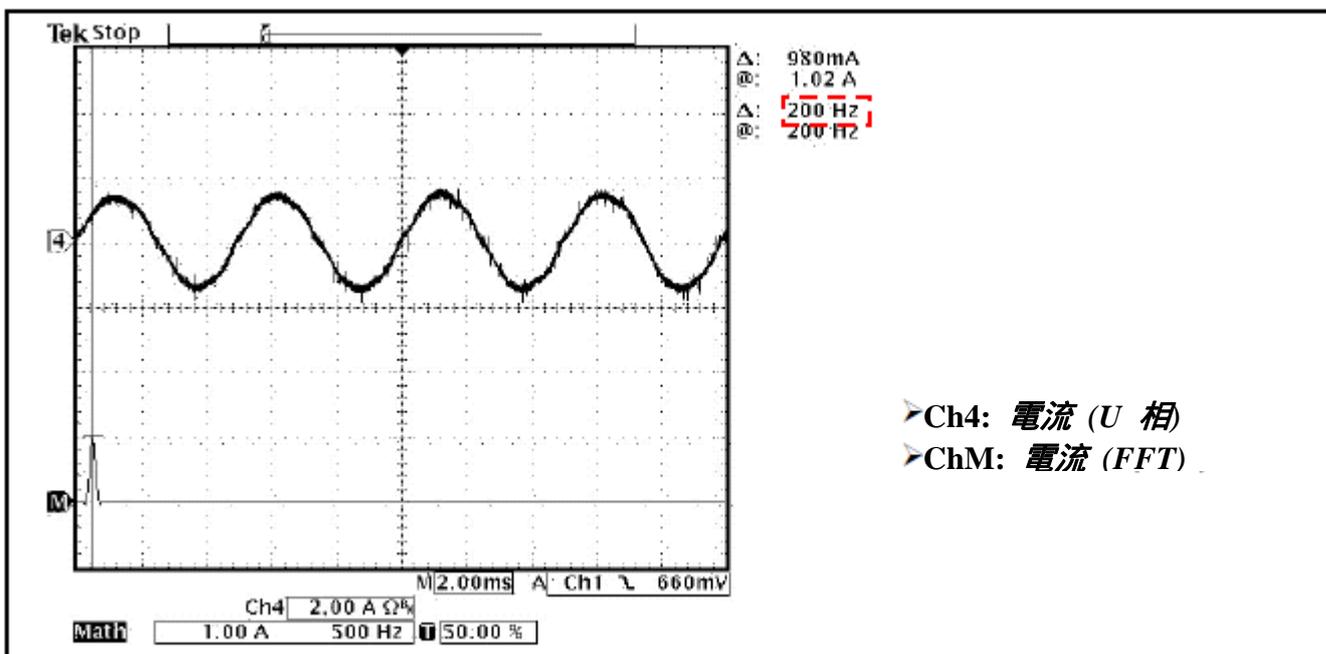


図24 3000 rpm

図 25 は力率改善を行っているときのモータ制御の測定波形を示しています。図 26 のモータ速度は 3000 rpm で力率改善を行っています。

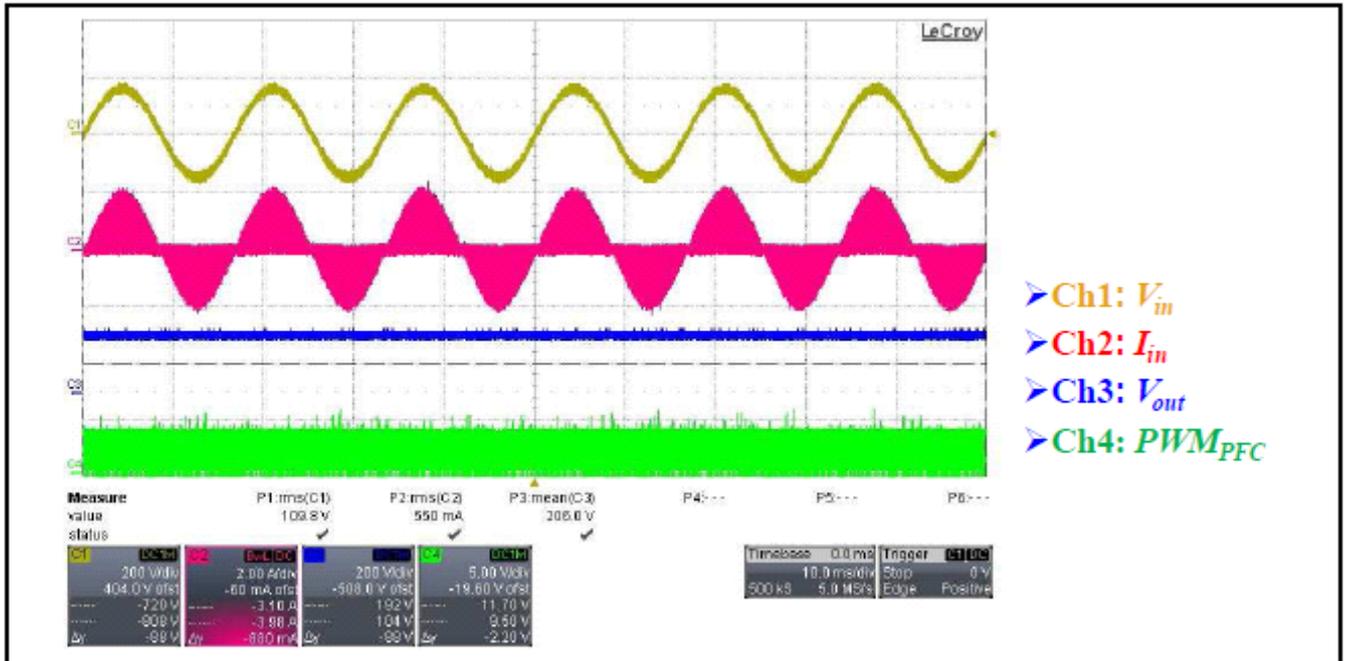


図25 PFC によるモータ制御の測定波形

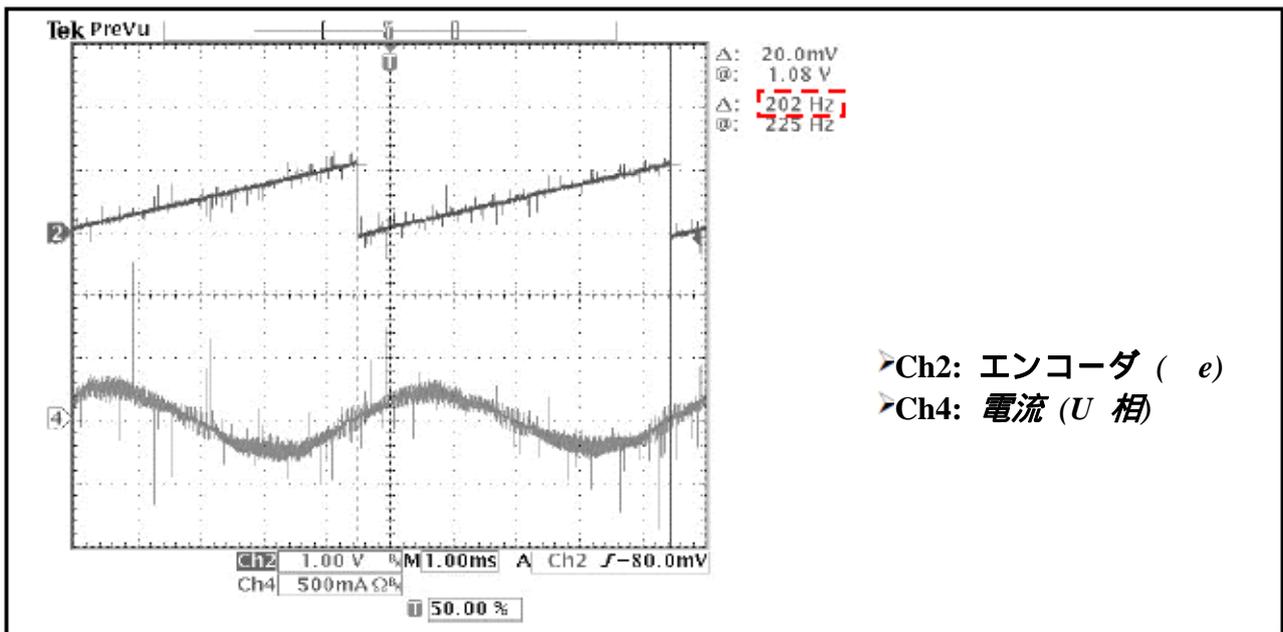


図26 エンコーダ信号と U 相電流の関係

7. 結論

力率改善とベクトル制御 PMSM 駆動は RX210 を使用して設計および実装されています。実験の結果では全負荷状態の力率が 0.98 となり、モータ速度は定格速度の 3000 rpm に達しています。この結果により要求仕様を満たしていることが示されています。

8. 参考ドキュメント

- [1]. S. R. Bowes and Y. S. Lai, "The relationship between space vector modulation and Regular-sampled pulse-width modulation," IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 44, No. 5, pp. 670-679, 1997.

ホームページとサポート窓口

ルネサス エレクトロニクスホームページ

<http://japan.renesas.com>

お問い合わせ先

<http://japan.renesas.com/contact/>

改訂記録	RX210 空間ベクトル変調によるモータ制御
------	------------------------

Rev.	発行日	改訂内容	
		ページ	ポイント
1.00	2013.03.22	—	初版発行

すべての商標および登録商標は、それぞれの所有者に帰属します。

製品ご使用上の注意事項

ここでは、マイコン製品全体に適用する「使用上の注意事項」について説明します。個別の使用上の注意事項については、本ドキュメントおよびテクニカルアップデートを参照してください。

1. 未使用端子の処理

【注意】未使用端子は、本文の「未使用端子の処理」に従って処理してください。

CMOS 製品の入力端子のインピーダンスは、一般に、ハイインピーダンスとなっています。未使用端子を開放状態で動作させると、誘導現象により、LSI 周辺のノイズが印加され、LSI 内部で貫通電流が流れたり、入力信号と認識されて誤動作を起こす恐れがあります。未使用端子は、本文「未使用端子の処理」で説明する指示に従い処理してください。

2. 電源投入時の処置

【注意】電源投入時は、製品の状態は不定です。

電源投入時には、LSI の内部回路の状態は不確定であり、レジスタの設定や各端子の状態は不定です。

外部リセット端子でリセットする製品の場合、電源投入からリセットが有効になるまでの期間、端子の状態は保証できません。

同様に、内蔵パワーオンリセット機能を使用してリセットする製品の場合、電源投入からリセットのかかる一定電圧に達するまでの期間、端子の状態は保証できません。

3. リザーブアドレス（予約領域）のアクセス禁止

【注意】リザーブアドレス（予約領域）のアクセスを禁止します。

アドレス領域には、将来の機能拡張用に割り付けられているリザーブアドレス（予約領域）がありません。これらのアドレスをアクセスしたときの動作については、保証できませんので、アクセスしないようにしてください。

4. クロックについて

【注意】リセット時は、クロックが安定した後、リセットを解除してください。

プログラム実行中のクロック切り替え時は、切り替え先クロックが安定した後に切り替えてください。

リセット時、外部発振子（または外部発振回路）を用いたクロックで動作を開始するシステムでは、クロックが十分安定した後、リセットを解除してください。また、プログラムの途中で外部発振子（または外部発振回路）を用いたクロックに切り替える場合は、切り替え先のクロックが十分安定してから切り替えてください。

5. 製品間の相違について

【注意】型名の異なる製品に変更する場合は、製品型名ごとにシステム評価試験を実施してください。

同じグループのマイコンでも型名が違っていると、内部 ROM、レイアウトパターンの相違などにより、電気的特性の範囲で、特性値、動作マージン、ノイズ耐量、ノイズ輻射量などが異なる場合があります。型名が異なる製品に変更する場合は、個々の製品ごとにシステム評価試験を実施してください。

ご注意書き

1. 本資料に記載された回路、ソフトウェアおよびこれらに関連する情報は、半導体製品の動作例、応用例を説明するものです。お客様の機器・システムの設計において、回路、ソフトウェアおよびこれらに関連する情報を使用する場合には、お客様の責任において行ってください。これらの使用に起因して、お客様または第三者に生じた損害に関し、当社は、一切その責任を負いません。
2. 本資料に記載されている情報は、正確を期すため慎重に作成したのですが、誤りがないことを保証するものではありません。万一、本資料に記載されている情報の誤りに起因する損害がお客様に生じた場合においても、当社は、一切その責任を負いません。
3. 本資料に記載された製品データ、図、表、プログラム、アルゴリズム、応用回路例等の情報の使用に起因して発生した第三者の特許権、著作権その他の知的財産権に対する侵害に関し、当社は、何らの責任を負うものではありません。当社は、本資料に基づき当社または第三者の特許権、著作権その他の知的財産権を何ら許諾するものではありません。
4. 当社製品を改造、改変、複製等しないでください。かかる改造、改変、複製等により生じた損害に関し、当社は、一切その責任を負いません。
5. 当社は、当社製品の品質水準を「標準水準」および「高品質水準」に分類しており、各品質水準は、以下に示す用途に製品が使用されることを意図しております。
標準水準： コンピュータ、OA機器、通信機器、計測機器、AV機器、
家電、工作機械、パーソナル機器、産業用ロボット等
高品質水準： 輸送機器（自動車、電車、船舶等）、交通用信号機器、
防災・防犯装置、各種安全装置等
当社製品は、直接生命・身体に危害を及ぼす可能性のある機器・システム（生命維持装置、人体に埋め込み使用するもの等）、もしくは多大な物的損害を発生させるおそれのある機器・システム（原子力制御システム、軍事機器等）に使用されることを意図しておらず、使用することはできません。たとえ、意図しない用途に当社製品を使用したことによりお客様または第三者に損害が生じて、当社は一切その責任を負いません。なお、ご不明点がある場合は、当社営業にお問い合わせください。
6. 当社製品をご使用の際は、当社が指定する最大定格、動作電源電圧範囲、放熱特性、実装条件その他の保証範囲内でご使用ください。当社保証範囲を超えて当社製品をご使用された場合の故障および事故につきましては、当社は、一切その責任を負いません。
7. 当社は、当社製品の品質および信頼性の向上に努めていますが、半導体製品はある確率で故障が発生したり、使用条件によっては誤動作したりする場合があります。また、当社製品は耐放射線設計については行っておりません。当社製品の故障または誤動作が生じた場合も、人身事故、火災事故、社会的損害等を生じさせないよう、お客様の責任において、冗長設計、延焼対策設計、誤動作防止設計等の安全設計およびエージング処理等、お客様の機器・システムとしての出荷保証を行ってください。特に、マイコンソフトウェアは、単独での検証は困難なため、お客様の機器・システムとしての安全検証をお客様の責任で行ってください。
8. 当社製品の環境適合性等の詳細につきましては、製品個別に必ず当社営業窓口までお問合せください。ご使用に際しては、特定の物質の含有・使用を規制するRoHS指令等、適用される環境関連法令を十分調査のうえ、かかる法令に適合するようご使用ください。お客様がかかる法令を遵守しないことにより生じた損害に関し、当社は、一切その責任を負いません。
9. 本資料に記載されている当社製品および技術を国内外の法令および規則により製造・使用・販売を禁止されている機器・システムに使用することはできません。また、当社製品および技術を大量破壊兵器の開発等の目的、軍事利用の目的その他軍用途に使用しないでください。当社製品または技術を輸出する場合は、「外国為替及び外国貿易法」その他輸出関連法令を遵守し、かかる法令の定めるところにより必要な手続を行ってください。
10. お客様の転売等により、本ご注意書き記載の諸条件に抵触して当社製品が使用され、その使用から損害が生じた場合、当社は何らの責任も負わず、お客様にてご負担して頂きますのでご了承ください。
11. 本資料の全部または一部を当社の文書による事前の承諾を得ることなく転載または複製することを禁じます。

注1. 本資料において使用されている「当社」とは、ルネサス エレクトロニクス株式会社およびルネサス エレクトロニクス株式会社とその総株主の議決権の過半数を直接または間接に保有する会社をいいます。

注2. 本資料において使用されている「当社製品」とは、注1において定義された当社の開発、製造製品をいいます。



ルネサスエレクトロニクス株式会社

■営業お問合せ窓口

<http://www.renesas.com>

※営業お問合せ窓口の住所・電話番号は変更になることがあります。最新情報につきましては、弊社ホームページをご覧ください。

ルネサス エレクトロニクス販売株式会社 〒100-0004 千代田区大手町2-6-2 (日本ビル)

(03)5201-5307

■技術的なお問合せおよび資料のご請求は下記へどうぞ。
総合お問合せ窓口：<http://japan.renesas.com/contact/>