

# PWMパルス合成手法によるナイキスト周波数帯域における PMSMの電流制御の高帯域化

野口 生那, 藤本 博志 (東京大学)

High-Bandwidth Current Control Based on PWM Pulse Merge Method in Semi Nyquist Frequency Band  
 Shona Noguchi, Hiroshi Fujimoto (The University of Tokyo)

PI feedback control is commonly used as the current control of the permanent magnet synchronous motors (PMSMs). However, its tracking performance deteriorates for signals outside the control band. This is particularly problematic when the torque ripple is needed to be suppressed. Therefore, the reference tracking performance needs to be guaranteed in high-bandwidth. To archive this, the merging two PWM pulses method is proposed. In this paper, the theory of the proposed control method is described first. Next, the design of the controller is described. Finally, simulations and experimental verifications were conducted to demonstrate the effectiveness of the proposed method.

キーワード：モータドライブ, 電流制御, 完全追従制御, PWM, 永久磁石同期モータ, 指令値追従特性  
 (motor drive, current control, perfect tracking control, PWM, PMSM, reference value tracking performance)

## 1. はじめに

トルクリプルはモータの騒音や振動の原因となることが一般的に知られている [1]。このトルクリプルの原因は電気角の6の倍数次の高調波成分であることが知られており、この高調波を抑制するために電機子巻線での解決 [1] や位相を変えて電磁鋼板を積層するスキューによる方法 [2] が挙げられる。これらの方法は容易にトルクリプル対策を行えるメリットがあるが、製造方法の複雑化による製造コストの増加やトルクの低下等を引き起こすデメリットがある。そこで、本研究ではモータのトルクを低下させずにトルクリプル抑制を目指す研究を行う。

一般的にモータの電流制御にはPI (Proportional Integral) 制御が用いられる。PI制御に基づく手法でトルクリプル抑制を行った研究は様々あるが [3-6], 指令値が急峻に変化するほどPI制御では補償できなくなることが知られている。PMSMにおけるトルクリプル抑制制御では、電気角の6の次数倍高調波を抑制しなければならないため、モータを高速で回すほど高帯域での指令値追従特性が保証される制御が必要である。高帯域での電流制御の手法として完全追従制御 (Perfect Tracking Control: PTC) に基づくフィードフォワード制御での電流制御が報告されている [7,8]。PTCに基づく電流制御を利用することによって指令値追従特性の高帯域化が可能であると考えられる。さらに、擬似マルチレートデッドビート制御が新たなデジタル制御手法として提案され [9], その手法を用いたフィードフォワード制御をすることで指令値追従特性を向上したことが報告されている [10]。本論文では擬似マルチレートフィードフォワード制御の考え方を利用したPTCに基づく電流制御により、指令値追従特性の向上を狙う。本論文の構成は次の通りである。最初に第2章で提案制御理論について述べ、第3章ではシミュ

レーションについて述べる。第4章で実験結果について述べた後、最後に第5章で結論を述べる。

## 2. 制御系設計

〈2・1〉 完全追従制御 完全追従制御 (Perfect Tracking Control: PTC) とはサンプリング点ごとに誤差なく目標軌道に追従する制御系 [11] と定義され、マルチレートフィードフォワード制御 [12] 等の制御手法により達成可能であることが確認されている。デジタル制御系では指令値  $r(t)$  と出力信号  $y(t)$  の2つのサンプリングと制御入力  $u(t)$  のホールドがある。そのため、 $r(t)$ ,  $y(t)$ ,  $u(t)$  それぞれの周期ごとのパラメータを  $T_r$ ,  $T_y$ ,  $T_u$  で表す。

〈2・2〉 PWM ホールド 本節では簡単化のため Fig. 1 に示す単相インバータで説明する。単相インバータでは Fig. 2 に示されるように  $0V$  か  $\pm E V$  の値のみを出力する。この時の制御系からプラントに指令値を送るときの離散化方法について述べる。Fig. 3 にパルスの離散化方法について示す。一般的にはゼロ次ホールドが用いられるが、瞬時値を正確に捉えて制御するためにはパルス幅を制御する必要がある。そのため、PWMパルス幅を利用して離散化する手法であるPWMホールド [13] を用いる。この離散化手法による制御入力  $u[k]$  はスイッチングのオン時間  $\Delta T[k]$  である。このPWMホールドによる離散化によって可制御標準系状態方程式 (1), (2) が得られる。

$$\mathbf{x}[k+1] = \mathbf{A}_s \mathbf{x}[k] + \mathbf{b}_s \Delta T[k] \dots \dots \dots (1)$$

$$y[k] = \mathbf{c}_s \mathbf{x}[k] \dots \dots \dots (2)$$

ただし、 $\mathbf{A}_s = e^{\mathbf{A}_c T_u}$ ,  $\mathbf{b}_s = e^{\mathbf{A}_c T_u/2} \mathbf{b}_c E$ ,  $\mathbf{c}_s = \mathbf{c}_c$  であり、 $\Delta T < 0$  のときの出力電圧は  $-E$  である。

## 〈2・3〉 逆系によるフィードフォワード制御器設計 2.2

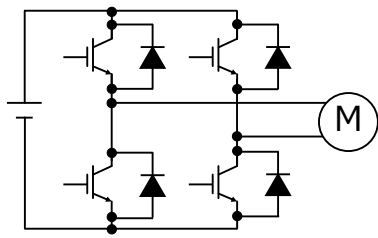


図1 単相インバータの回路図

Fig. 1. Circuit Diagram of Single Phase Inverter

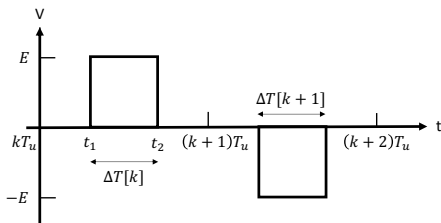


図2 単相インバータの出力

Fig. 2. Output of Single Phase Inverter

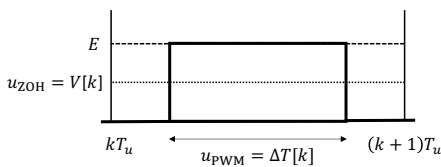


図3 PWM ホールドによる離散化

Fig. 3. Discretization by PWM Hold

節で求めた可制御正準系状態方程式から安定な逆プラントモデルを以下のように求めることによって制御入力  $u[k]$  が導出される。

$$u[k] = B^{-1}(I - z^{-1}A)x[k+1] \\ = \left( \begin{array}{c|c} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ \hline -B^{-1}A & B^{-1} \end{array} \right) x[k+1] \dots \dots \dots (3)$$

$$y[k] = z^{-1}Cx[k+1] \dots \dots \dots (4)$$

ただし、 $A = A_s$ ,  $B = b_s$ ,  $C = c_s$ ,  $z = e^{sT_r}$  である。

〈2・4〉 シングルレートでの2パルス合成制御 擬似マルチレートフィードフォワード制御 [10] の手法を応用して、PWM パルスを合成する方法について述べる。本研究での制御対象は1次のプラントモデルとし、シングルレート系で隣り合うパルスを中央に寄せて新たに1つのパルスを作る方法を Fig. 4 に示す。疑似マルチレートフィードフォワード制御は、平均電圧を考えることで、指令値のサンプリング周期ごとにキャリア周期内に複数立ち上がる PWM パルスのオン時間の値を全て足し合わせた後の値を制御入力として使用する方法である。同様にしてシングルレートでも隣り合うパルスの制御入力  $u[k]$ ,  $u[k+1]$  を足すことで新たな制御入力  $u'[l]$  を得る。

$$u'[l] = u[k+1] + u[k] \dots \dots \dots (5)$$

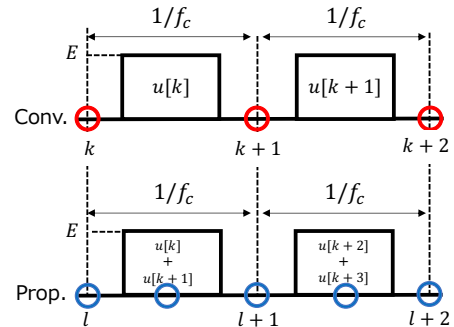


図4 パルス合成手法

Fig. 4. Pulse Merge Method

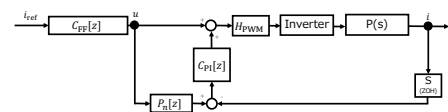


図5 PTC に基づく電流制御器

Fig. 5. Current Controller based on PTC

Fig. 4 の赤い丸が従来 PTC によって指令値と出力値の誤差が0になる点であり、青い点がパルス合成によって擬似完全追従制御を達成する点である。青い点で示されるように提案手法では従来手法より2倍指令値をサンプリングしているため、指令値をより正確に再現できる可能性が高い。この時に同じキャリア周期で制御を行うため、スイッチングロスを増加させることなく、キャリア周期の半分(従来法のナイキスト周波数)以上の帯域での指令値追従特性の向上を目指す。

### 3. シミュレーション

〈3・1〉 制御器設計 Fig. 5 にシミュレーションの制御ブロック図を示す。モータのプラントモデルは1次系のプラントモデル  $P(s) = 1/(Ls+R)$  である。1次系のプラントモデルから状態方程式を求めると定数  $A_c = -R/L$ ,  $b_c = 1/L$ ,  $c_c = 1$  がそれぞれ求まる。さらに、これらの定数からフィードフォワード制御器を設計すると  $A_s$ ,  $b_s$ ,  $c_s$  がそれぞれ求まる。Fig. 5 のフィードフォワード制御器  $C_{FF}$  を Fig. 6 に示す。擬似マルチレート制御と同様に隣り合う PWM パルスを足し合わせるために、導出した PTC に基づくフィードフォワード制御器を1制御周期分ずらした制御器と並列に計算させ、そのブロックで導出された制御入力をそれぞれ合算してプラントに入力する。また、フィードバックの電流制御器  $C_{PI}$  は 800Hz の2次バターワースパターンに極配置設計をする。最後に、本研究では Fig. 7 に示す表面形永久磁石同期モータ (Surface Permanent Magnet Synchronous Motor : SPMSM) の実験装置のパラメータ Table 1 を用いて制御器設計をし、シミュレーションと実験による検証を行う。

〈3・2〉 結果 シミュレーションでは従来手法として PI 制御と PTC, 提案手法のパルス合成 PTC で制御を行った。q 軸電流波形のシミュレーション結果を Fig. 8 に示す。

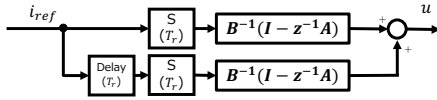


図6 提案フィードフォワード制御器  
Fig. 6. Proposed Feedforward Controller

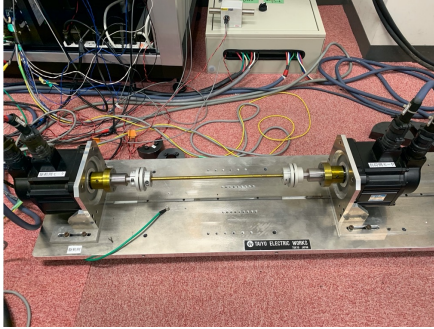


図7 モータベンチ (SPMSM)  
Fig. 7. Motor Bench (SPMSM)

表1 シミュレーションのパラメータ  
Table 1. Parameters of the Motor for the Simulation

Parameter	Value
Resistance $R$ [ $\Omega$ ]	0.1567
Inductance $L$ [mH]	2.28
Carrier Frequency $f_c$ [kHz]	10
Sampling period of Reference $T_r$ [ $\mu s$ ]	50(prop.)/100(conv.)
Sampling period of Output $T_y$ [ $\mu s$ ]	100
Control Period $T_u$ [ $\mu s$ ]	100
DC Input Voltage of Inverter $E$ [V]	250
Reference Current Input $I_{qref}$ [A]	1

Fig. 8 の結果より従来手法では 5000 Hz で波形を再現できていないが、提案手法は波形を出力することに成功している。さらに、Fig. 9 に各制御手法の入出力値の DFT 値の比  $|G_{yy}|$  を示す。 $|G_{yy}|$  は以下の式で算出した。

$$|G_{yy}| = 20 \log \left( \frac{\text{出力波形の DFT 後の基本周波数での値}}{\text{入力波形の DFT 後の基本周波数での値}} \right) \quad (6)$$

Fig. 9 より、提案手法ではゲインが低下し始める電流制御の帯域は従来手法よりも高くなっている。特に、従来手法では波形が出ない帯域でもゲイン値を返していることが特徴である。よって、提案手法を用いることで電流制御を従来手法よりも高帯域化できることが予想される。

#### 4. 実験

本研究では Fig. 7 の SPMSM のモータベンチで実験を行った。実装は  $dq$  軸で考えて、三相 PWM は文献 [14] 方法で実装している。実験結果の波形を Fig. 10, 周波数応答を Fig. 11 に示す。キャリア周期は 10 kHz であるので従来手法 (PTC) ではナイキスト周波数までしか追従は保証できないが、提案手法では 5 kHz から 10 kHz においても誤差はあるものの追従特性を有していることが分かる。よって、提案手法を

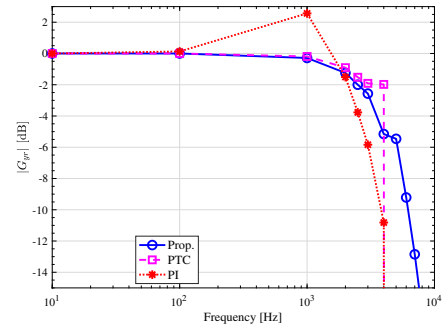


図9 シミュレーションでの  $|G_{yy}|$  の周波数応答  
Fig. 9. Frequency Response of  $|G_{yy}|$  (Simulation)

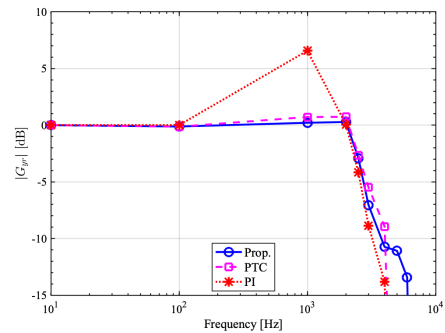


図11 実験での  $|G_{yy}|$  の周波数応答  
Fig. 11. Frequency Response of  $|G_{yy}|$  (Experiment)

用いることで電流制御を従来手法よりも高帯域化できることが実験からも示された。

#### 5. まとめ

本研究では PTC に基づく制御法で導出される制御入力のうち、隣り合う 2 つの PWM パルスを結合することで指令値追従特性の向上を狙った。シミュレーションと実験の結果からこの手法によって従来の電流制御では指令値波形を再現できなかった帯域で提案手法は電流を出力することができた。今後は提案手法を用いることで高帯域での電流制御を行い、モータのトルクリプル抑制に関する研究につなげていく。

#### 文 献

- (1) 樋口剛・阿部貴志・横井裕一・宮本恭祐・大戸基道:「交流モータの原理と設計法-永久磁石モータから定数可変モータまで」, pp.142-146, 科学情報出版株式会社 (2017)
- (2) 森本茂雄・真田雅之:「省エネモータの原理と設計法～永久磁石同期モータの基礎から設計・制御まで～」, 科学情報出版株式会社 (2013)
- (3) 関野 真吾・新中 新二:「PMSM のための簡易高品質トルク制御 – 誘起電圧歪みに起因したトルクリプルの補償 –」, 電気学会論文誌 D, 136 巻 10 号 pp.819-828(2016)
- (4) 服部 知美:「動作点変動に対応した学習制御による PMSM

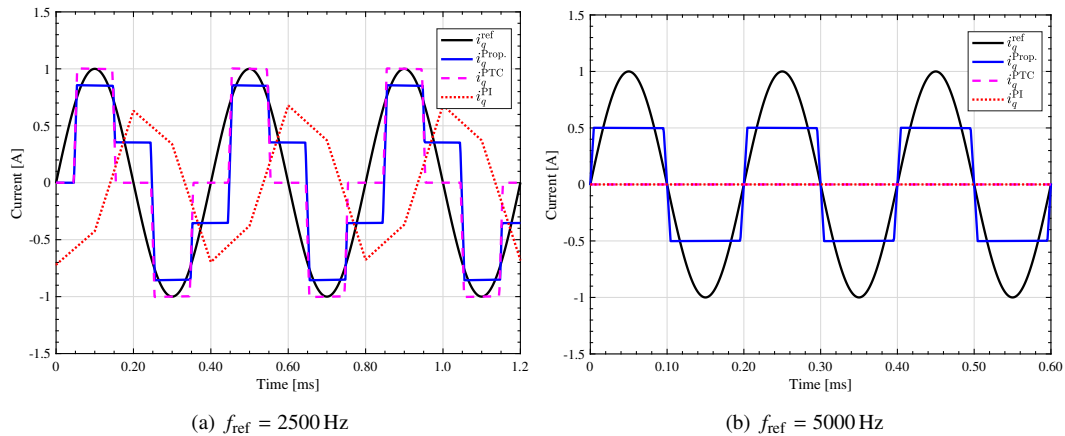


図 8 シミュレーションでの  $q$  軸電流の出力波形  
Fig. 8. Simulation Current Waveform

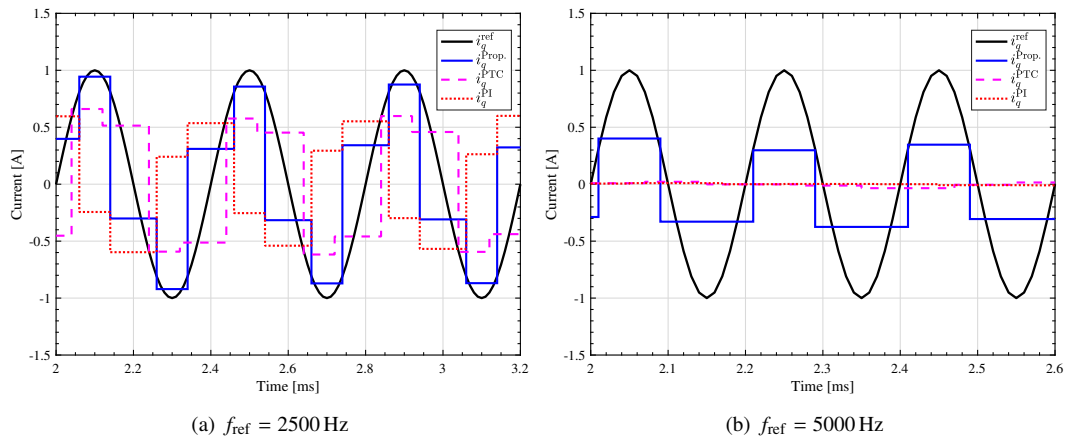


図 10 実験での  $q$  軸電流の出力波形  
Fig. 10. Experimental Current Waveform

の振動抑制制御法」, 電気学会論文誌 D, 137 巻, 1 号 pp.10-16(2016)

- (5) 安村 昂平・井上 征則・森本 茂雄・真田 雅之: 「FPGA を用いた超高速 PMSM 駆動システムによる 効率向上とトルクリプル低減効果」, 電気学会論文誌 C, 139 巻, 1 号, pp.106-112(2018)
- (6) X. Sun, C. Hu, J. Zhu, S. Wang, W. Zhou, Z. Yang and Y. Guo: "MPTC for PMSMs of EVs with Multi-Motor Driven System Considering Optimal Energy Allocation", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 23, No. 3, pp.1314-1325(2019)
- (7) 中井孝洋・藤本博志: 「完全追従制御による PMSM の高調波電流制御」, 電気学会論文誌 D, 128 巻, 9 号 pp.1083-1089(2008)
- (8) 中村建太・藤本博志・藤網雅巳: 「トルクメータの帯域を考慮した PM モータのトルクリプル抑制制御法」, 電気学会論文誌 D 130 巻, 11 号 pp.1241-1247(2010)
- (9) R. Saito, K. Tsuchida and T. Yokoyama: "Digital Control of PWM Inverter Using Ultrahigh-Speed Network for Feedback Signals with Communication Disturbance Observer Based on Rocket I/O Protocol", IEEE Journal of Industry Applications,

Vol.4, No.6, pp.752-757(2015)

- (10) S. Noguchi, M.Mae and H.Fujimoto: "High-Bandwidth Current Control of PMSM Based on Quasi Multirate Feedforward Control", IEEE International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization, (2020)
- (11) M. Tomizuka: "Zero Phase Error Tracking Algorithm for Digital Control," Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, vol. 109, no. 1, p. 65(1987)
- (12) H. Fujimoto, Y. Hori, A. Kawamura: "Perfect Tracking Control based on Multirate Feedforward Control with Generalized Sampling Periods", IEEE Trans. Industrial Electronics, vol.48, No.3, pp.636-644(2001)
- (13) K. P. Gokhale, A.Kawamura and R. G. Hof: "Dead beat micro-processor control of PWM inverter for sinusoidal output waveform synthesis", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.23, no.3, pp.901-910(1987)
- (14) 坂田晃一・藤本博志: 「電流ループと PWM ホールドを考慮した厳密モデルに基づく サーボモータの完全追従制御法」, 電気学会論文誌 D, 127 巻, 6 号, pp.587-593(2007)