

# 零相電流を利用した透磁率変調に基づく 可変界磁 PM モータの基礎検討

野口 季彦\*, 岩間 清大, 青山 真大 (静岡大学)

Preliminary Study of Permeability Modulation Based Variable Magnetic Flux PM Motor Utilizing Zero-Phase Current  
Toshihiko Noguchi, Kiyohiro Iwama, Masahiro Aoyama (Shizuoka University)

## 1. はじめに

近年, 低速高トルク運転と高速低トルク運転の両立を目的とした可変界磁 PM モータが盛んに検討されている<sup>(1)~(2)</sup>。しかし, 従来の可変界磁 PM モータの多くはリラクタンストルクの利用が困難な構造となっているため, 一般的な埋込磁石同期モータと比べてトルク密度が低いという欠点がある。そこで, 筆者らは逆突極性を有する可変界磁 PM モータの検討をしてきた<sup>(3)</sup>。

筆者らは文献<sup>(3)</sup>で, 軟磁性材料の透磁率変調を利用することにより, 逆突極性を有しながら純電磁氣的に可変界磁を実現できる PM モータの原理モデルについて報告した。しかし, 原理モデルは文献<sup>(1)</sup>, <sup>(2)</sup>と同様, 透磁率変調コイル用の DC/DC コンバータにおける損失や, 銅損による損失増加の課題が残されている。さらに, この原理モデルではコンシークエントポール形モータと類似した運転特性となることから, 無負荷誘起電圧に偶数次高調波が重畳されるという課題が残されている。

以上の課題に対して本稿では, モータ結線に三相 4 線式を採用することにより零相電流  $i_0$  を制御し, その  $i_0$  を軟磁性材料の透磁率変調に利用する手法を提案する。さらに, ロータを 2 段構造にした透磁率変調に基づく可変界磁 PM モータを提案し, その基本特性について原理モデルと比較検討したので報告する。

## 2. 提案モータの回路構成

Fig. 1 に提案するモータドライブの回路構成を示す。本回路ではモータ中性点とインバータ直流バス間に電流経路を設けることにより, 三相平衡電流に加え  $i_0$  を制御できる。本回路の  $0dq$  軸電圧方程式を以下に示す。

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (R_a + 3R_0) + 3pL_0 & 0 & 0 \\ 0 & R_a + pL_d & -\omega L_q \\ 0 & \omega L_d & R_a + pL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \omega \Psi_f \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここで,  $v_0$ ,  $v_d$ ,  $v_q$  はそれぞれ  $0dq$  軸上の電圧,  $i_0$ ,  $i_d$ ,  $i_q$  はそれぞれ  $0dq$  軸上の電流,  $R_a$  は三相の巻線抵抗,  $R_0$  は零相の巻線抵抗,  $L_0$ ,  $L_d$ ,  $L_q$  は  $0dq$  軸上のインダクタンス,  $\Psi_f$  は  $0dq$  軸上の界磁磁石磁束鎖交数,  $p$  は微分演算子,  $\omega$  は角速度である。(1)より,  $0dq$  軸 3 つの電流を独立して制御で

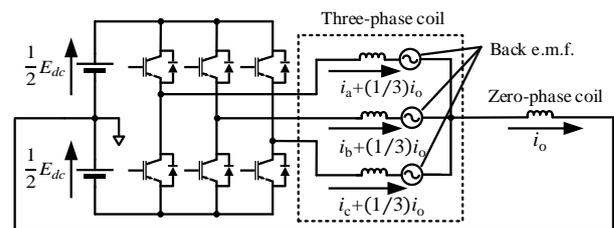


Fig. 1. Circuit configuration of proposed motor drive.

きる事がわかる。さらに本稿では,  $i_0$  を直流電流として利用するため, モータ内の中性点電位変動は巻線抵抗による電圧降下分のみである。よって,  $i_0$  を重畳することによる電圧利用率への影響はほとんどない。また,  $i_0$  はコモンモード電圧により制御できるため, インバータのスイッチング回数は変化せず, インバータのスイッチング損失への影響もわずかである。

以上より,  $i_0$  を軟磁性材料の透磁率変調に利用することにより, インバータの電圧利用率を悪化させることなく, 従来の界磁用 DC/DC コンバータで生じていた損失削減を期待することができる。ただし, 三相コイルに  $i_0$  が流れることによって生じる起磁力はトルク発生に直接寄与しないため, 三相コイルに生じる零相分の銅損は無駄な損失となる。しかし, この損失は零相起磁力を零相コイルの巻数によって補い,  $i_0$  の直流値を小さくすることにより最小限に抑えることができる。

## 3. 電磁界解析による可変界磁特性の検証

Fig. 2 に JMAG-Designer17.0™ により解析を行った原理モデルと提案モータモデルを示す。提案モータは Fig. 2(c) のようにロータを上段および下段の 2 段構造としている。このモータ磁気回路の変更は,  $z$  方向の寸法短縮およびステータ形状の簡素化などモータ構造に対して有利にはたらく。また, 三相コイルを上段および下段のティースに共巻きすることにより, 巻線抵抗の低減および構造の簡素化を図っている。

原理モデルとの比較検討をするための条件として, ロータ形状, 各部品の使用材料, 各コイルの巻数および磁石体積を同一とした。

Fig. 3 に  $1800 \text{ min}^{-1}$  で回転させ, 零相起磁力を 0 AT およ

び 1800 AT としたときの原理モデルにおける無負荷誘起電圧および、零相起磁力を 0 AT および 900 AT としたときの提案モータにおける無負荷誘起電圧を示す。また、Fig. 4 にそれぞれの無負荷誘起電圧のフーリエ解析結果を示す。Fig. 3 および Fig. 4 より、提案モータでは無負荷誘起電圧に偶数次高調波が重畳されないことが確認できる。原理モータは零相磁束が N 極または S 極の一方を強め、他方を弱めるという可変界磁の原理により、偶数次高調波が重畳されている。それに対して提案モータは、ロータの上段が N 極または S 極の一方を強めるが、下段が他方を強める向きに零相磁束が作用するので、モータ全体として磁極の偏りがなく、偶数次高調波が重畳されない。さらに Fig. 4 より、提案モータは半分の零相起磁力で、原理モデルと同等の可変界磁性能を得られることがわかる。これは、提案モータの磁気回路とすることにより、原理モータにおける上下 2 つの零相磁束の磁路を共通化できるためであると考えられる。

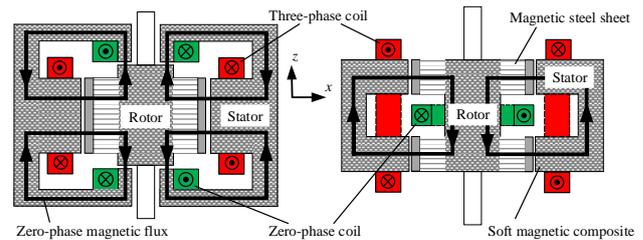
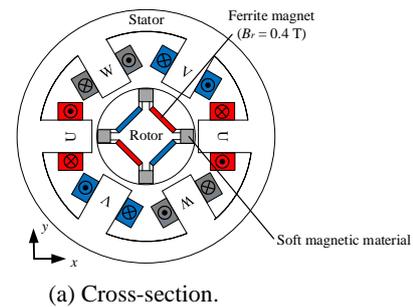
Fig. 5 に  $1800 \text{ min}^{-1}$  および  $q$  軸電機子起磁力 600 AT の条件におけるトルクのフーリエ解析結果を示す。同図より平均トルクは、原理モデルと提案モータでほとんど変化がないことがわかる。これは、提案モータは原理モデルの半分の零相起磁力で同量の無負荷誘起電圧を得られたためである。さらに同図より、提案モータでは 3 次トルクリプルを約 87% 低減できていることが確認できる。これは、提案モータの磁気回路を採用することにより、無負荷誘起電圧の偶数次高調波を低減することができたためである。ただし、提案モータの磁気回路を採用することにより 3 次トルクリプルは低減できたが、コンシークエントポール形モータと類似した運転特性になる可変界磁原理は変わらないため、軟磁性材料を空気に置き換えた理想状態と比べればトルクは若干小さくなる。

#### 4. まとめ

本稿では、モータ結線を三相 4 線式とすることにより零相電流  $i_0$  を制御し、 $i_0$  を軟磁性材料の透磁率変調に利用する可変界磁法を提案した。これにより、界磁用 DC/DC コンバータにおける損失削減が期待できる。さらに、ロータを上段および下段の 2 段構造とすることにより、モータ構造の小型化および簡素化を達成しながら、原理モデルの半分の零相起磁力で従来と同等の可変界磁性能を得ることができ、さらに 3 次トルクリプルを約 87% 低減できる。

#### 文献

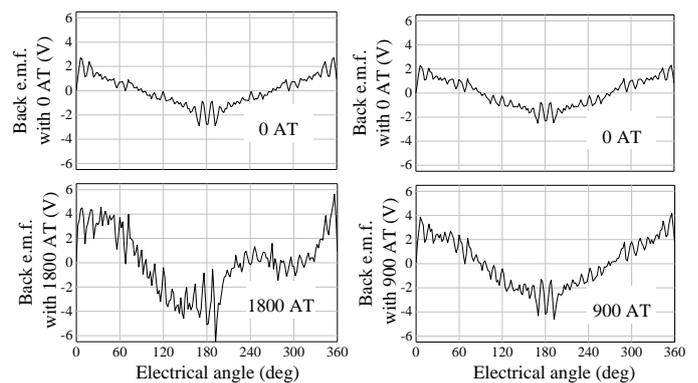
- (1) 水野・永山・足利・小林：「ハイブリッド励磁形ブラシレス同期機の動作原理と基本特性」電学論 D, vol.115-D, no.11, pp. 1402-1411 (1995)
- (2) 難波・平本・中井：「可変界磁機能を有する 3 次元磁気回路モータの提案」電学論 D, vol.135, no.11, pp. 1085-1090 (2015)
- (3) 岩間・野口・青山：「磁気飽和を利用した可変界磁 PM モータの基礎検討」平成 31 年電気学会全国大会(2019)



(b) Principle axial cross section.

(c) Proposed axial cross section.

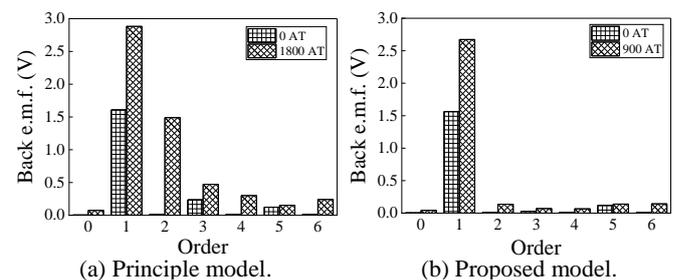
Fig. 2. Proposed motor model.



(a) Principle model.

(b) Proposed model.

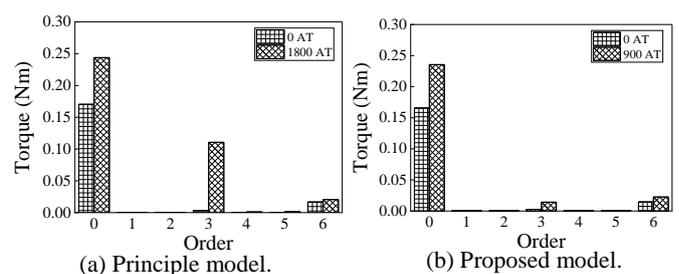
Fig. 3. Waveforms of back e.m.f. in proposed motor.



(a) Principle model.

(b) Proposed model.

Fig. 4. FFT results of back e.m.f.



(a) Principle model.

(b) Proposed model.

Fig. 5. FFT results of Torques.