# 透磁率変調に基づく

# 三相4線式インバータ可変界磁 IPMSM 駆動システム

## 岩間 清大\*, 野口 季彦 (静岡大学)

## Three-Phase Four-Wire Inverter Fed Adjustable Field IPMSM Drive System Based on Permeability Modulation

Kiyohiro Iwama\* and Toshihiko Noguchi (Shizuoka University)

This paper describes a new drive technique of an adjustable field IPMSM based on a permeability modulation. The proposed adjustable field IPMSM can control the magnetic field generated by permanent magnet (PMs) using magnetic saturation between the PM poles. However, in order to make a modulation flux used for the magnetic saturation independent of an armature flux used for magnetic saturation, the drive circuit of the proposed adjustable field IPMSM requires to supply an additional magnetomotive force source. Therefore, a three-phase four-wire inverter is proposed as the drive circuit of the proposed adjustable field IPMSM. The drive circuit can control the 0-axis current  $i_0$  in addition to the *d*-axis current  $i_d$  and *q*-axis current  $i_q$  used in conventional motor drives, and the  $i_0$  is used for the PM field control. In this paper, the proposed drive technique is verified through several experimental tests.

キーワード:可変界磁, IPMSM, 透磁率変調, 三相 4 線式インバータ, 0 軸電流, 磁気飽和 Keywords: adjustable field, IPMSM, permeability modulation, three-phase four-wire inverter, 0-axis current, magnetic saturation

### 1. はじめに

2015年のパリ協定締結以降,電気機器の分野においては, 省エネルギーに向けたモータの研究が盛んに行われてき た。特に,永久磁石を利用した永久磁石同期モータ (PMSM) の研究開発は高効率および高パワー密度を実現できるため 産業機器業界や輸送機器業界などで注目されている。一方, トルクは界磁量に比例し,回転速度は界磁量に反比例する というモータの基本原理より,界磁量が一定の PMSM は駆 動領域の観点で課題がある。従来は高速運転を実現するた めに,負の *ia* を利用する弱め界磁制御が賞用されてきた。 しかし,近年更に高エネルギー密度化,高速運転化の需要 が高まり,弱め界磁によって生じる銅損が看過できない程 問題となっている。

この課題を解決するために,界磁量を調整することがで きる可変界磁 PMSM の研究が行われている<sup>(1)-(3)</sup>。しかし, これまで提案されてきた可変界磁手法は,PMSM に界磁調 整機能を付与するため,駆動回路が増大するという問題が あった。そこで筆者らは,磁性材料の磁気飽和現象に着目 した新たな可変界磁手法について提案してきた<sup>(4)</sup>。提案する 手法では、ロータコアの漏れ磁路の透磁率を変調すること で、連続的な界磁制御を実現できる。一方、透磁率を変調 する変調磁束を発生させるために、電機子電流とは独立し た変調電流 *im* を制御する必要がある。そこで、提案する可 変界磁手法を適用した IPMSM の駆動回路として三相4線式 インバータを検討した。この駆動回路では、従来利用され



Fig. 1. Development view of prototype motor.



Fig. 2. Vector plot of magnetic flux density.

てきた iaおよび iqに加えて ioを制御できるため, ioを imと して利用することで、三相の交流電流を制御しつつ1台の インバータで界磁制御も実現できる。本稿では、透磁率変 調に基づく可変界磁 IPMSM の実機を製作し,実機を用いて ioを利用する三相4線式インバータによる駆動方式の妥当性 を検証したので報告する。

### 2. 透磁率変調に基づく可変界磁の原理

前述の通り、提案する可変界磁手法は磁性材料の磁気飽 和現象を利用するものであり、磁気飽和をさせるための変 調磁束は imによって生成される。Fig.1に試作機の展開図を 示す。同図に示す通り, 試作機はステータコアおよびロー タコアが2つに分割されており、分割されたステータコア の間に挿入された変調巻線に imを供給する。Fig.2に PM 磁 束および変調磁束のベクトルプロットの解析結果を示す。 Fig. 2(a)は im を供給していないときの PM 磁束である。同図 より, imを供給していないときは、PM 磁束が磁極間に設け た漏れ磁路を透過し、短絡磁路を形成していることがわか る。このとき多くの PM 磁束はロータ上で短絡するため,ス テータに鎖交する磁束は非常に少ない。一方, Fig. 2(b)およ び(c)は,7Aもしくは-7Aの imを供給したときの変調磁束で ある。同図に示す通り,変調磁束はロータシャフトおよび ステータフレームを透過し、ロータコア上では径方向放射 状に透過している。また、変調磁束の向きはそれぞれ反対 であるが、どちらの場合においても変調磁束により磁極間 の漏れ磁路の磁束密度が1.5T以上に高まり、磁気飽和して いることがわかる。以上の結果から, imを供給することで, ロータコア上で径方向放射状に透過する変調磁束が生成さ れ、磁極間の漏れ磁路が磁気飽和することが確認された。

Table 1. Specifications of prototype motor.



Fig. 4. Relationship between modulation current and magnetic field.

0 Modulation current  $i_m(A)$ 

#### 3 試作機の無負荷特性

22

20 18

Table 1に試作機の主要諸元を示す。三相 4 線式インバー タにより i₀を制御した場合,各電機子巻線には i₀/√3 が通流 し銅損が発生する。この銅損を低減するために、電機子巻 線の巻数6ターンに対して、変調巻線の巻数は120ターン と巻数を多く設定した。これにより、変調巻線は小さな io で大きな変調起磁力 Fm を得ることができる。

Fig.3に0Adcもしくは7Adcのimを供給したときの,回転 速度 1000 r/min における無負荷誘起電圧測定結果を示す。同 図より、7 Adcの imを供給することで、無負荷誘起電圧の基 本波成分が 6.52 Vamp から 11.48 Vamp まで増加していること がわかる。また、第3次高調波成分以外の高調波成分は無 視できるほど小さいことも確認できる。Fig.4に im と界磁量  $\Psi_a$ の関係を示す。同図より、 $\Psi_a$ は $i_m$ の向きには依存せず、 絶対値に依存していることがわかり、以下のように近似す ることができる。

 $\Psi_a(i_m) = -1.87 \times 10^{-3} i_m^4 + 3.94 \times 10^{-1} i_m^2 + 18.7 \text{ (mWb)}$ (1)以上の結果から、提案する可変界磁手法を適用した試作 機の界磁は im の絶対値に依存しており, im を用いて低い高 調波含有率で界磁制御を実現できることがわかった。

### 三相4線式インバータを用いた駆動方式

 $\langle 4 \cdot 1 \rangle$ 従来の可変界磁 PMSM 駆動方式 Fig. 5 にこ れまで提案されてきた可変界磁 PMSM の駆動方式を示す。



(b) Method using de- and re-magnetization.

Fig. 5. Conventional drive techniques of adjustable field IPMSM.



Fig. 6. Proposed drive system using three-phase four-wire inverter.



Fig. 7. Photograph of proposed drive circuit.

Table 2. Electrical conditions of current control.

Dead time	4 μs		
Switching frequency	10 kHz		
Crossover frequency of current control	1000 rad/s		
Frequency of 0-axis current	2.5 Hz		
Rising and falling time of 0-axis current	20 ms		

Fig. 5(a)に示す駆動方式は,界磁巻線を用いてロータ表面の 磁束密度を増磁,減磁させる可変界磁手法に用いられる<sup>(1)</sup>。 この手法では直流の界磁電流を供給するためにチョッパが 必要である。Fig. 5(b)に示す駆動回路は, PMの着磁,脱磁 現象を利用する可変界磁手法に用いられる<sup>(2)</sup>。この手法は着 磁,脱磁の際に大電流を供給する必要があるため,インバ ータが大容量化する傾向がある。Fig. 5(c)に示す駆動回路は, 6つの巻線を接続もしくは分断することで,鎖交磁束を増減 させる可変界磁手法に用いられる駆動回路である<sup>(3)</sup>。この手 法では,6つの巻線に対してそれぞれ単相インバータが必要 である。また、各巻線を接続もしくは分断するために、双 方向耐圧および双方向通流の機能を備えたスイッチング素 子が必要であるため、非常に多くのスイッチング素子が必 要である。以上の通り、これまでに提案された可変界磁 PMSMの駆動方式では、一般的な PMSM の駆動回路よりも 大きく複雑になる傾向がある。

〈4・2〉 提案する可変界磁 IPMSM 駆動方式 Fig.6に 三相4線式インバータを用いた駆動システムを,Fig.7に実際の駆動回路を示す。Fig.6およびFig.7に示す通り,提案 する駆動システムは直流バス電圧を2つの直列キャパシタ によって分圧することで直流バス中点を作り,モータの中 性点との間に変調巻線を接続することで電流経路をつくっ ている。本稿では,この電流経路に流れる電流を零相電流 *i*<sub>2</sub>と呼び,0*dq*回転座標系の0軸電流*i*<sub>0</sub>と区別している。線 電流*i*<sub>4000</sub>には三相平衡成分*i*<sub>40</sub>,*i*<sub>50</sub>,*i*<sub>50</sub>,7に示すように全 ての相の線電流をセンシングする必要がある。

静止座標系から 0dq 回転座標系への変換行列 C は以下の ように表される。

$$C = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ \cos\theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 4\pi/3) \end{bmatrix}$$
(2)

ただし, $\theta$ は空間的な電気角である。(2)を用いて  $i_{uvw}$ を 0dq回転座標系の電流ベクトル  $i_{0dq}$ に変換すると,

$$i_{0dq} = Ci_{uvw}$$

$$= \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} i_z / \sqrt{2} \\ i_u \cos\theta + i_v \cos(\theta - 2\pi/3) + i_w \cos(\theta - 4\pi/3) \\ -i_u \sin\theta - i_v \sin(\theta - 2\pi/3) - i_w \sin(\theta - 4\pi/3) \end{bmatrix}$$
(3)

と表すことができる。(3)より,同位相成分 *i*<sub>2</sub> は *id* および *iq* に,三相平衡成分 *iu*, *iv*, *iw*は *io*にそれぞれ干渉しないこと がわかる。また(3)より, *io*を *im* として利用する場合, *io*と *im* の関係は次式のように表される。

$$i_0 = i_z / \sqrt{3} = i_m / \sqrt{3}$$
 (4)  
次に, 0dq 回転座標系での電圧方程式を示す。

$v_0$		$\left[\left(R_a+3R_z\right)+3pL_z\right]$	0	0	$i_0$			
$v_d$	=	0	$R_a + pL_d$	$-\omega L_q$	i <sub>d</sub>	+	0	(5)
$v_q$		0	$\omega L_d$	$R_a + pL_q$	$i_q$		$\left[ \omega \Psi_{a}(i_{0}) \right]$	

ここで、 $v_0$ ,  $v_d$ ,  $v_q$  はそれぞれ 0dq 回転座標系の各軸電圧,  $R_a$  は 電機子巻線抵抗,  $R_z$  は 変調巻線抵抗,  $L_d$ ,  $L_q$  は dq軸インダクタンス,  $L_z$ は変調巻線の自己インダクタンス, p は微分演算子,  $\omega$  は角速度である。また,  $\Psi_a$  は 界磁磁束 鎖交数であり、(1)に(4)を代入して得られた関係を用いる。 Fig. 6 に示す制御ブロックは、(5)を基にして作られたもので ある。Table 2 に本実験の条件を示す。同表に示す通り、デ ッドタイムは 4 us に設定している。三相 4 線式インバータ においては、デッドタイムによる誤差電圧は  $i_0$  の 3 次高調 波成分の発生要因となるため、三相 3 線式インバータで用 いられてきたデッドタイム誤差電圧補償を施し、高調波の 発生を抑制する。また、提案する駆動回路において  $i_z$ を通電 した場合、平滑キャパシタの充放電が生じるため、直流の



izを流し続けることはできない。そこで本稿では、平滑キャパシタの耐圧を考慮し、2.5 Hzの方形波の ioを im として利用する。方形波は立ち上がりもしくは立ち下がり以外は常に絶対値が一定であるため、提案する駆動方式は im の絶対 値に依存して界磁を制御できる試作機の駆動方式として適している。

## 5. 実機検証結果

Fig.8に三相3線式インバータと直流電源を併用し、0Adc もしくは 6.93 Adcの im, 20 Aの iq, 0 Aの idをモータに供給 したときの実験結果を示す。同図より、6.93 Adcの imを供給 することで、同等の電機子電流で平均トルク Tave が 1.560 Nm から 2.604 Nm まで増加していることがわかる。Fig. 9 に三 相 4 線式インバータを使用し、振幅 6.93A の方形波の im, 20 Aの iq, 0 Aの idをモータに供給したときの実験結果を示 す。Fig. 9(a)より、線電流に方形波の im が重畳されており、 電機子電流と im が独立して制御できていることを確認でき る。また Fig. 9(b)より, im は概ね設定通りの 20 ms で立ち上 がり立ち下がりしており、大きなオーバーシュートがない ことも確認できる。トルクについては、imの通流方向が切り 換わるタイミングで落ち込みが見られるが, im を供給してい ないときの 1.560 Nm よりも大きく, 2.319 Nm の Tave を出力 していることがわかる。Fig. 10 に各駆動方式における Tave と imの関係を示す。同図より、三相 4 線式インバータの駆 動方式を採用した場合,三相 3 線式インバータと直流電源 を併用した駆動方式より Tave は低下するが、1 台のインバー タで可変界磁を達成できていることが確認できる。三相 4 線式インバータの駆動方式の方が直流電源を併用する駆動 方式よりトルクが低下するのは, imの通流方向が切り換わる 際に、界磁量が低下することと、ロータシャフトおよびス テータフレームにて渦電流損が発生するためと考えられ る。





## 6. まとめ

本稿では、透磁率変調に基づく可変界磁 IPMSM の駆動回 路として三相 4 線式インバータを利用した駆動方式を提案 した。実機検証を行い、提案する駆動システムにおいて制 御可能な方形波の ioを imとして利用することで、1台のイ ンバータで界磁制御ができることを確認できた。しかし、io の通流方向が切り換わるタイミングで、界磁量の低下と渦 電流損の発生によるトルク低下が確認されたため、今後は 界磁量低下の補償法と、渦電流損を低減するモータ構造お よび材料の検討をしていく所存である。

## 献

文

- T. Mizuno, K. Nagayama, T. Ashikaga, and T. Kobayashi, "Basic Principles and Characteristics of Hybrid Excitation Type Synchronous Machine," IEEJ Trans. Ind. Appl., vol. 115, no. 11, pp. 1402–1411, 1995.
- (2) R. Tsunata, M. Takemoto, and S. Ogasawara, "Investigation of a Variable Flux Memory Motor Using Delta-type PM Arrangement and Extended Flux Barrier for Traction Applications, Ver.1 – Novel Rotor Structure to Improve Magnetization Characteristics –," in *Proc. JIASC*, 2019.
- (3) H. Hijikata, Y. Sakai, K. Akatsu, Y. Miyama, H. Arita, and A. Daikoku, "Multi-phase inverter-fed MATRIX motor for high efficiency driving," IEEJ Trans. Ind. Appl., vol. 138, no. 3, pp. 257–264, 2018.
- (4) K. Iwama and T. Noguchi, "Experimental Verification of Adjustable Field IPM Motor Based on Permeability Modulation," in *Proc. IEEJ Tech. Meet.* on *MD/HCA*, 2021.