

# 巻線切替と 9 スイッチインバータを用いた 永久磁石同期モータの広範囲可変速ドライブ

学生員 片山 翔太\*, 正員 芳賀 仁 (長岡技術科学大学)

## Wide Range Variable Speed Operation of Permanent Synchronous Motor by Nine-Switch-Inverter with Winding Switching Method

Shota Katayama\*, Hitoshi Haga (Nagaoka University of Technology)

A permanent magnet synchronous motor (PMSM) exhibits high torque density and high efficiency, so it is widely used for applications such as EV / HEV. However, in the PMSM, the speed range is limited by the back electromotive force (EMF) generated as the rotation speed increases. In this research, motor drive system using an independent double three-phase winding motor and a 9 switches inverter is proposed. The proposed system has three-operation modes and its output characteristics are acquired by the switching of the current path through the inverter. In this paper, the control method to realize each operation mode is explained. The proposed method is confirmed effectiveness by the simulation and experiment.

キーワード：永久磁石同期モータ，多重巻線構造，広範囲駆動

Keywords : Permanent magnet synchronous motor, Multiple winding structure, Wide range operation

### 1. はじめに

近年，地球環境問題の深刻化により，省エネ効果が期待される電気自動車(EV : Electric Vehicle)やハイブリッド電気自動車(HEV : Hybrid Electric Vehicle)が普及している。主機モータに求められる性能として，高効率，高トルク，定出力動作範囲が 1 : 4以上の広範囲駆動などが示されている<sup>[1]</sup>。

車載用モータとして，従来の 3 相電圧形インバータと永久磁石同期モータ (PMSM) を採用した場合，車載用に要求される高効率化と広範囲な定出力動作の実現は難しい。高トルクを得るために永久磁石の磁束を高めることは低速域で効果的である一方，高速域では速度起電力が影響するため弱め磁束制御が必要になる。弱め磁束制御のための電流増加はインバータとモータの損失特性に悪影響である。

このような趨勢から，電力変換器とモータを含めたシステム全体の検討が進められている。例えば，多相モータ及び巻線切替回路を用いてモータパラメータを可変にし，速度範囲を拡大させる検討などがある<sup>[2]-[6]</sup>。これら構成の多くはインバータを複数用いるため，多くの半導体スイッチを必要としシステムの大型化やコスト増加につながる。

そこで本稿では，巻線切替を用いたモータドライブシステムの一構成として，9 スイッチインバータを応用した構成を提案する。本稿では提案するモータドライブシステムの速度範囲拡大の原理について述べ，実験結果及びシミュレーションにより基本動作を示す。

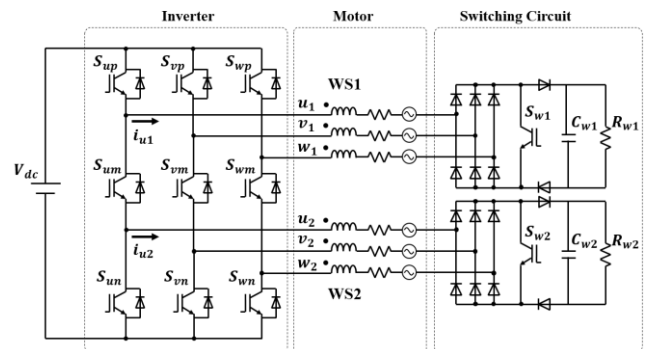


Fig. 1. 提案するモータドライブシステムの構成

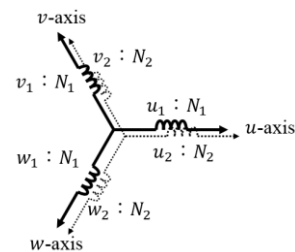


Fig. 2. モータ巻線構造

### 2. 提案するモータドライブシステム

Fig. 1 に提案するモータドライブシステムを示す。二重三  
相巻線モータと 9 スイッチインバータを組み合わせる構成と

なる。従来の巻線切替え技術を搭載したモータドライブシステムと比べて、半導体スイッチを削減し、システムの小型化や低コスト化が期待できる特徴をもつ。以下、本システムの概要は、インバータ部、モータ部、モータ結線部に大別して説明する。

**<2.1> インバータ部の構成** インバータ部には9スイッチインバータを用いており、2台の三相インバータの役割を持つ<sup>[7]</sup>。以下、上アーム $S_{up}, S_{vp}, S_{wp}$ 及び中間アーム $S_{um}, S_{vm}, S_{wm}$ で構成されるレギュレータを Inv. 1、中間アーム及び下アーム $S_{un}, S_{vn}, S_{wn}$ で構成されるレギュレータを Inv. 2 と呼ぶ。

**<2.2> モータ部の構成** Fig.2 にモータ構成を示す。本稿では独立二重三相巻線の構成とする。3相 Y 結線を 1 セットとし、Inv.1 に接続されている3相巻線を Winding Set 1(以下、WS1 と記載)、Inv.2 に接続されている3相巻線を Winding Set 2(以下、WS2 と記載)と呼ぶ。WS1,2 ともに U,V,W 相各巻線は  $120^\circ$  の位相差で配置されており、それぞれ異なる中性点をもつ。また、WS1,2 にはそれぞれ  $N_1, N_2$  ターンの電機子巻線を施すものとする ( $N_1 > N_2$ )。

**<2.3> モータ結線部の構成** 各モータ巻線の終端にはモータの回転速度、及び回路動作に応じて結線を切り替える回路が接続されている。WS1, 2 それぞれに3相ダイオードブリッジと半導体スイッチを用いることで接触遮断器の役割を担う<sup>[4]</sup>。WS1 に注目すると、 $S_{w1}$  を ON にすることにより3相巻線  $u_1, v_1, w_1$  の Y 結線を形成する。また  $S_{w1}$  を OFF にすると、ダイオードを介してスイッチ後段の抵抗  $R_{w1}$  に接続される。

**<2.4> 速度範囲拡大方法** 提案するモータドライブシステムでは、WS1,2 への通電経路を切り替えることで、3つの速度-トルク特性が実現できる。Fig.3 に示すように mode.1 から mode.3 と定義する。mode.1,2 はそれぞれ WS1,2 のどちらか一方のみ通電させることで、WS1,2 の巻数に応じた鎖交磁束が得られる。mode.3 は WS1,2 に同振幅かつ同位相の電流を与えることで、互いの鎖交磁束を強めるよう動作させて、最大トルクを出力する。これら3つの動作モードを運転中に切り替えることで、モータの駆動範囲を拡大する。

### 3. 各動作モードの電流制御方式

Fig.4 に PWM 生成のブロック図を示す。提案するモータドライブシステムは、動作モードによって電流の制御方式が異なる。mode 1 では中間アームスイッチ  $S_{um}, S_{vm}, S_{wm}$  を下アームスイッチ  $S_{un}, S_{vn}, S_{wn}$  と同期させて PWM 動作を行う。mode 2 では  $S_{um}, S_{vm}, S_{wm}$  は上アームスイッチ  $S_{up}, S_{vp}, S_{wp}$  と同期させる。mode.3 では、1つのキャリアに対して Inv.1 及び Inv.2 の指令値を与えて電流制御を行う<sup>[7]</sup>。このとき、電圧利用率を上げるために、キャリアを Inv.1 と Inv.2 への電流指令値の大きさによって分担する。その割合を分担率  $\alpha$  ( $0 \leq \alpha \leq 1$ ) とする。mode.3 では巻線セット 1, 2 に同振幅かつ同位相の電流を通電するが、それぞれ電機子

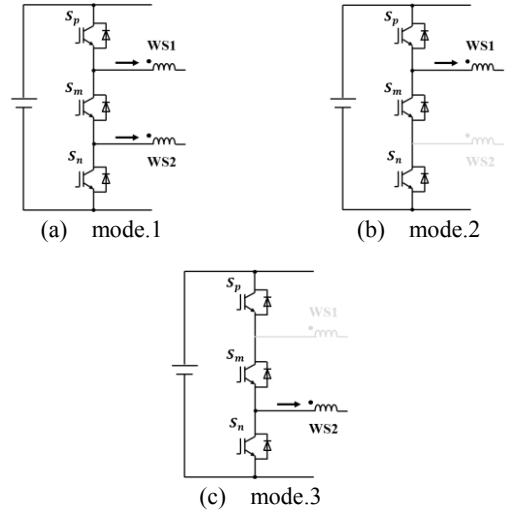


Fig. 3. 各動作モードにおける通電経路

巻線のターン数が異なるため指令値の大きさは異なる。これらを考慮して分担率  $\alpha$  は

$$\alpha = \frac{V_{a1}}{V_{a1} + V_{a2}} \quad (1)$$

とする。ここで  $V_{a1}, V_{a2}$  はそれぞれ WS1,2 の電機子電圧であり、逆起電圧  $V_{o1}, V_{o2}$  を用いて

$$V_{az} = V_{oz} + R_{az}i_a \quad (2)$$

$$V_{oz} = \omega \sqrt{(\Psi_{az} + L_{dz}i_{dz})^2 + (L_{qz}i_{qz})^2} \quad (3)$$

$$z = 1, 2$$

で導出できる。分担率  $\alpha$  を適切に設定することで mode.3 の電圧利用率を最大にし、より高速域で駆動させることが可能となる。

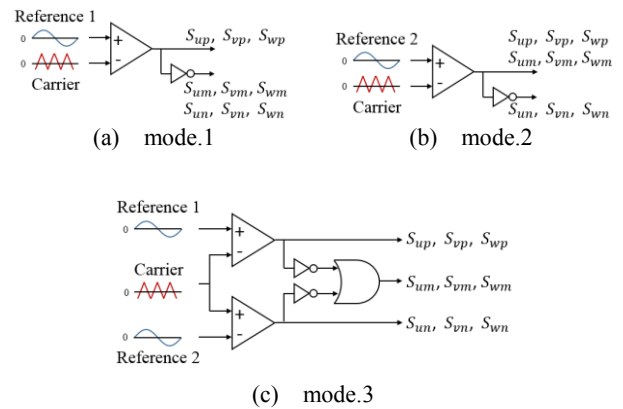


Fig. 4. 各動作モード Duty 決定の制御ブロック

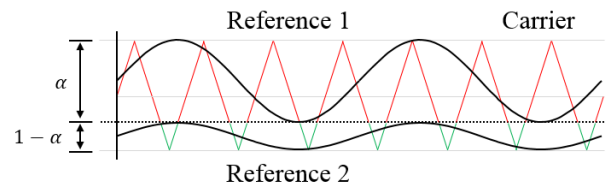


Fig. 5. 分担率を考慮した PWM 変調方式

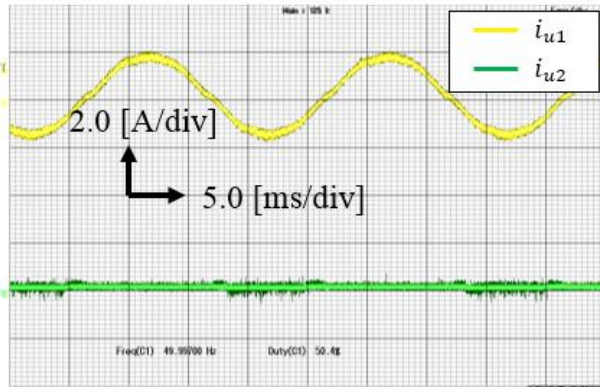
#### 4. RL 負荷での実機実験

各動作モードにおいて所望の電流が得られることを確認するために、実機を作成し実験を行った。本実験では RL 負荷を用いている。実験時の各種パラメータを Table. 1 に示す。RL 負荷にて mode.3 を行う際、式(3)の電機子鎖交 $\Psi_{a1}$ ,  $\Psi_{a2}$ を 0 として分担率 $\alpha$  を計算した。

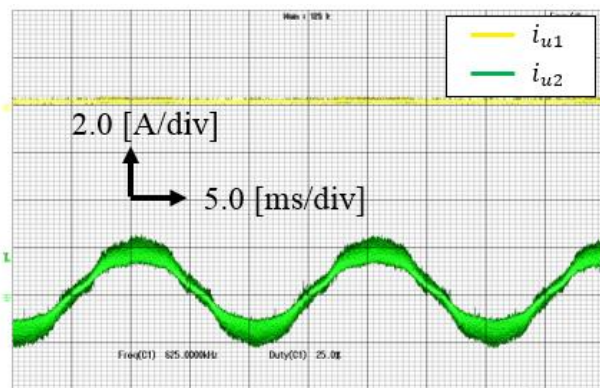
各動作モードの実験で得られた WS1 及び WS2 の U 相電流波形を Fig. 6 に示す。mode.1, 2 では WS1 または WS2 のみに電流が通電されている。また, mode.3 では WS1, WS2 に同振幅かつ同位相の電流が通電されている。よって本実験により、各動作モードにおいて所望の電流波形が得られることが確認できた。

Table. 1. Experiment Parameter

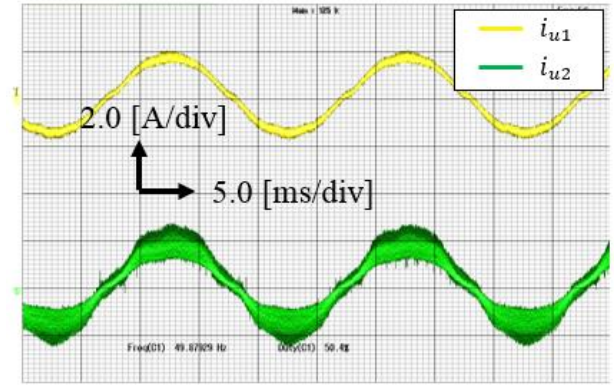
Parameter	Symbol	Value	Unit
DC bus voltage	$V_{dc}$	200	[V]
Resistance	$R_{a1}$	20.0	[ $\Omega$ ]
	$R_{a2}$	12.5	[ $\Omega$ ]
Inductance	$L_{a1}$	3.0	[mH]
	$L_{a2}$	0.6	[mH]
Carrier frequency	$f_{sw}$	20	[kHz]



(a) mode.1



(b) mode.2



(c) mode.3

Fig. 6. RL 負荷での実験結果

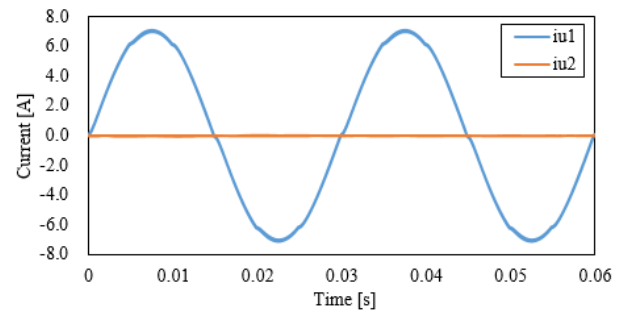
#### 5. モータ負荷でのシミュレーション

次に逆起電圧を考慮したモータモデルにて、各動作モードで所望の電流が得られることをシミュレーションで確認する。シミュレーション時の各種パラメータを Table. 2 に示す。シミュレーションソフトには PLECS を用いた。シミュレーション条件として、回転速度 1000rpm, 巻線 1,2 の巻数比 3:2,  $R$ - $L$ - $V_o$ (逆起電圧)負荷を接続したものとする。

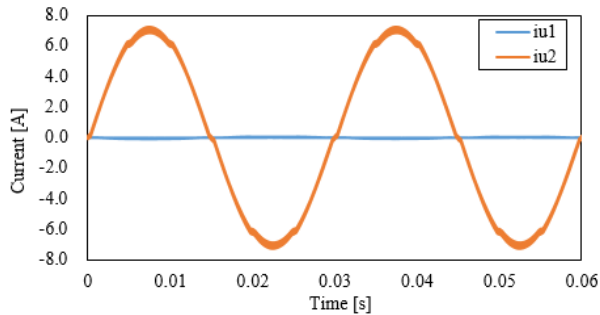
各動作モードのシミュレーションで得られた WS1 及び WS2 の U 相電流波形を Fig. 7 に示す。RL 負荷での実験結果と同様に mode.1, 2 では WS1 または WS2 のみに電流が通電, mode.3 では WS1, WS2 に同振幅かつ同位相の電流が通電されている。これによりモータ負荷においても、各動作モードでの所望の電流が通電できることを確認した。

Table. 2. Simulataion parameter

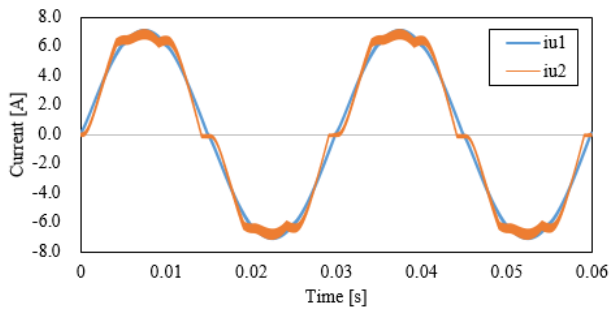
Parameter	Symbol	Value	Unit
DC bus voltage	$V_{dc}$	200	[V]
Resistance	$R_{a1}$	0.58	[ $\Omega$ ]
	$R_{a2}$	0.24	[ $\Omega$ ]
Inductance	$L_{a1}$	4.34	[mH]
	$L_{a2}$	0.73	[mH]
Flux linkage	$\Psi_{a1}$	0.25	[Wb]
	$\Psi_{a2}$	0.103	[Wb]
Carrier frequency	$f_{sw}$	20	[kHz]



(a) mode.1



(b) mode.2



(c) mode.3

Fig. 7. モータ負荷でのシミュレーション結果

また、各動作モードで得られた速度-トルク特性を Fig. 8 に示す。本シミュレーションでは WS2 より WS1 のほうが電機子巻線の巻数を多く設定している ( $N_1 > N_2$ )。そのため mode.1 は mode.2 より高トルクかつ低回転数の特性を示す。mode.3 はモータの全巻線分の鎖交磁束を得るため最大トルク特性を示す。これらの動作モードをモータ駆動中に切り替えることによってモータは特性を可変にし、広範囲な駆動を実現することができる。

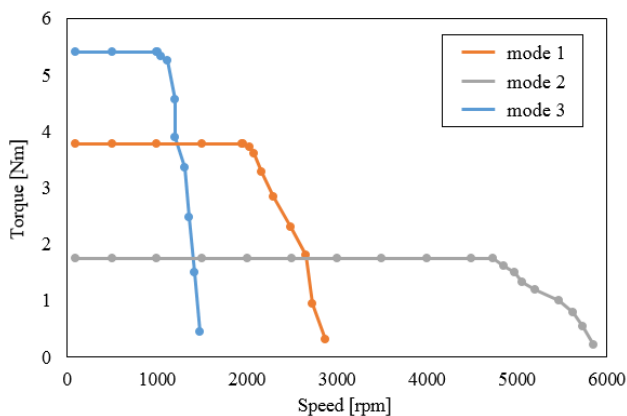


Fig. 8. 動作モードごとの速度-トルク特性

## 6. おわりに

本稿では、永久磁石同期モータの広範囲駆動を実現するモータドライブシステムを提案した。二重三相巻線モータと 9 スイッチインバータを組み合わせることにより、巻線切替え技術を搭載した従来のモータドライブシステムから半導体スイッチを削減し、システムの小型化や低コスト化に貢献する。

9 スイッチインバータと巻線の終端に接続されている切替回路により通電経路を切り替え、3 つの速度-トルク特性を実現しモータの駆動領域を拡大する。RL 負荷での実験や、モータを模擬したモデルにてシミュレーションを行い、所望の電流波形が得られることを確認した。また、各動作モードの速度トルク特性を取得し、実際にモータ駆動領域が拡大したことを確認した。

今後はモータを用いた実機実験を行い、提案手法の有効性を確認すると共に、各動作モードにおけるインバータやモータの効率を取得する。また、動作モード切替時の影響についても調査する。

## 文 献

- (1) 前村明彦:「埋め込み磁石形同期電動機の電子巻線切替による速度範囲の拡大方法」, 平成 22 年電気学会産業応用部門大会, 2-S8-6.
- (2) 荘山拓海, 赤津観:「EV 用多重多相モータにおける高効率駆動実現の検討」, 平成 29 年電気学会産業応用部門大会, 3-37
- (3) Shahid Atiq, Thomas A. Lipo, Byung-Il Kwon, “Wide Speed Range Operation of Non-Salient PM Machines”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol.31, Issue.3, pp.1179-1191, 2016.
- (4) Bo Tian, Zhuoran Zhang, Jiadan Wei, T. A. Lipo, “Investigation of Dual-Inverter-Fed Drives for Permanent Magnet Synchronous Motor with Winding Switching”, *40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pp.709-714, 2014.
- (5) Shahid Atiq, Thomas A. Lipo, Byung-il Kwon “Novel Field Weakening Technique for Surface Mounted Permanent Magnet Machine using Current Ragulated Voltage Source Inverters”, *International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*, pp.836-841, 2014.
- (6) Hiroki Hijikata, Yuki Sakai, Kan Akatsu, Yoshihiro Miyama, Hideaki Arita, Akihiro Daikoku, “Wide Speed Range Operation by Low-Voltage Inverter-Fed MATRIX Motor for Automobile Traction Motor”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol.33, Issue.8, pp.6887-6896, 2018.
- (7) 小南勉, 藤本康孝:「2 つの負荷に対し振幅・周波数を独立制御可能な 9 スイッチインバータの提案」, 電気学会論文誌 D, 128 巻, 5 号, pp.561-568, 2008.