

電機子コイルエンドと零相巻線を併用した 透磁率変調に基づく可変界磁 PMSM

岩間 清大*, 野口 季彦 (静岡大学)

Adjustable Field IPM Motor Based on Permeability Modulation Utilizing Armature Coil End and Zero-Sequence Winding
Kiyohiro Iwama, Toshihiko Noguchi (Shizuoka University)

1. はじめに

筆者らは、永久磁石同期モータ (PMSM) の駆動領域拡大を企画して、磁気飽和を利用した可変界磁 PMSM について研究してきた⁽¹⁾。この可変界磁 PMSM は、変調巻線に変調電流を与えることでロータコア漏れ磁路の透磁率を変調し、界磁制御を達成する。また、文献(1)ではモータ中性点とインバータ直流バス中点の間に零相巻線として変調巻線を接続した三相 4 線式駆動システムについて検討した。この駆動システムでは、 d 軸電流 i_d および q 軸電流 i_q に加えて 0 軸電流 i_0 を制御できるため、 i_0 を変調電流として利用することで、駆動回路の体積や効率を犠牲にすることなく、界磁制御を実現できる。一方で、文献(1)で提案した可変界磁 PMSM は、電機子巻線に加えて変調巻線を要するため、モータパワー密度の観点で課題がある。そこで文献(2)では、特殊な電機子巻線のコイルエンドと i_0 から成る起磁力によって界磁制御を実現する変調巻線レス可変界磁 PMSM について検討した。変調巻線レス可変界磁 PMSM は変調巻線を用いない分、モータ体積を削減できるものの、界磁制御に必要な i_0 が大きいという課題がある。そこで本稿では、文献(1)で用いた変調巻線と、文献(2)で提案した特殊な電機子コイルエンドを併用した可変界磁 PMSM とその駆動システムについて検討する。

第 2 章では、本稿で用いた解析モデルの諸元を説明する。また、第 3 章ではデュアルインバータの直流バス間に零相巻線として変調巻線を接続した提案駆動システムの利点を述べる。最後に第 4 章では、電機子コイルエンドと零相巻線を併用することで少ない i_0 および銅損で界磁制御ができ、最大トルクが増加することを確認する。

2. 提案モータの主要諸元

Fig. 1 および Table 1 に提案するモータのモデルと主要諸元を示す。Fig. 1 に示した変調磁束を透過させるために、シャフト、フレームおよびベアリングブラケットは磁性材料で構成されている。また、電機子巻線はコイルエンドに流れる i_0 の通流方向が同方向になるように特殊な結線がなされており、変調磁束は電機子巻線または零相巻線に i_0 が通流することで発生させることができる。電機子コイルエン

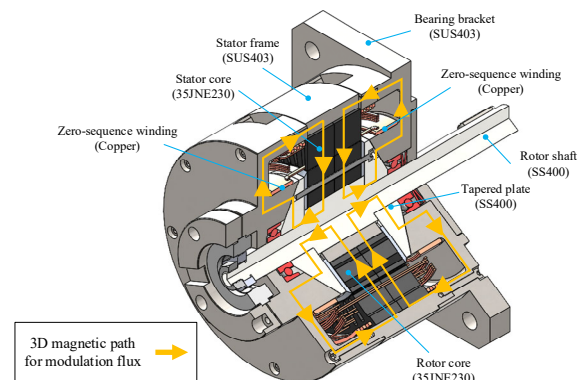


Fig. 1. Basic principle of proposed adjustable field method.

Table 1. Specifications of proposed motor.

Number of poles and slots	8 poles and 48 slots
Armature winding	8 turns/slot, 0.0961 Ω
Zero-sequence winding	100 turns, 1.86 Ω
Stator and rotor diameter	ϕ 148 mm and ϕ 97 mm
Stack length	48 mm

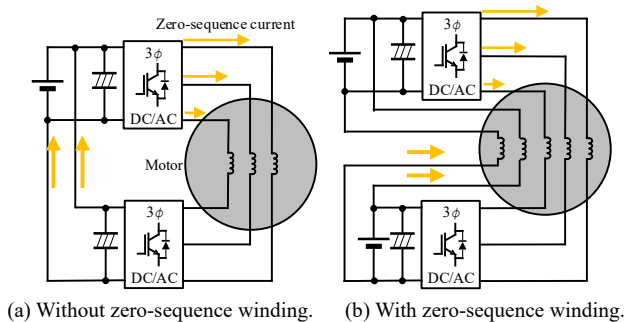


Fig. 2. Dual inverter drive systems.

Table 2. Comparison of drive systems.

	Without zero-sequence winding	With zero-sequence winding
Number of voltage sources	1	2
Number of wires	6	10
Number of voltage levels	$m \leq 0.5$	3
	$0.5 < m$	3

ドと i_0 による変調磁束の発生原理と、磁気飽和を利用した可変界磁原理の詳細は文献(1)(2)で述べた通りである。

3. 駆動システム

Fig. 2 に零相巻線を用いない場合および用いる場合のデュアルインバータ駆動システムを、Table 2 にそれぞれの駆

動システムの比較結果を示す。Fig. 2 および Table 2 からわかるように、零相巻線を用いる場合は互いに絶縁された2つの電圧源や、10本のモータへの配線が必要であるため、駆動システムが複雑化するデメリットがある。一方で、相電圧のレベル数が増えるため、線電流の時間高調波を低減することができる。また、Fig. 2(b)で示した回路のように2つの独立した電圧源を用いる場合は、どちらかの電圧源が故障しても、故障した電圧源側の平滑キャパシタの電位を制御しながら $0dq$ 電流制御が可能であるため、フェールセーフの観点でメリットがある³⁾。

4. 電磁界解析

<4.1>無負荷特性 Fig. 3 に回転速度 3000 r/min での無負荷誘起電圧波形およびそのフーリエ解析結果を示す。図中赤色で示した結果が電機子コイルエンドと i_0 から成る起磁力のみを界磁制御に利用した場合の解析結果であり、35 A の i_0 を与えることで無負荷誘起電圧の基本波成分が 52.1 V_{amp} から 64.6 V_{amp} まで、24%増加していることがわかる。一方で、図中緑色で示した結果が電機子コイルエンドと零相巻線を併用した場合の解析結果である。電機子コイルエンドのみを利用した場合と同等まで無負荷誘起電圧基本波成分を増加させるためには、4.5 A の i_0 が必要であることがわかる。さらに Fig. 3 (b) から、機子コイルエンドと零相巻線を併用した場合は界磁制御に必要な i_0 を小さくできることから、偶数次高調波を低減できることがわかる。

Fig. 4 に任意の無負荷誘起電圧基本波成分に制御するために必要な i_0 と界磁制御に伴って発生する銅損を示す。同図より、電機子コイルエンドと零相巻線を併用することで界磁制御に必要な i_0 を低減できることがわかる。また、界磁制御に伴って発生する銅損については、 i_0 ほどの差はないものの、電機子コイルエンドと零相巻線を併用した方が低減できることがわかる。

<4.2>負荷特性 Fig. 5 に $0q$ 平面上に電流ベクトル i_{0dq} があるときの i_0 および i_q を示す。また、Fig. 6 に Fig. 5 に示したように電流ノルムを 80 A に固定し、電流位相 θ_{0q} を変化させたときのトルクを示す。同図より、電流ノルムが一定の場合でも、 i_0 を与えて界磁磁束を大きくした方がトルクが増加することがわかる。また、電機子コイルエンドと零相巻線を併用することで、界磁制御に必要な電流を低減できるため、トルクも 9.8%程度増加していることがわかる。

5. まとめ

本稿では、これまで筆者らが提案してきた特殊な電機子コイルエンドと i_0 から成る起磁力を利用した可変界磁 PMSM の駆動特性をさらに改善するために、電機子コイルエンドと零相巻線を併用した可変界磁 PMSM の駆動システムと駆動特性について検討した。

駆動システムの検討では、提案モータの駆動システムと

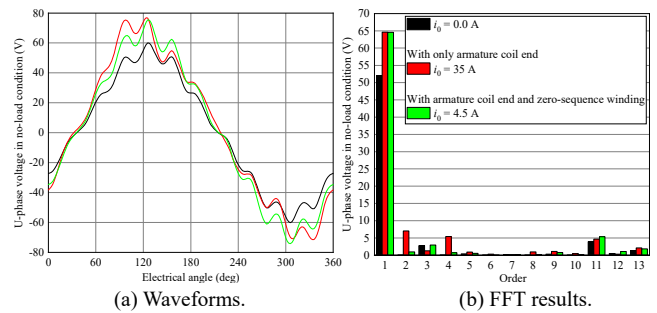


Fig. 3. Analysis results of no-load e.m.f.

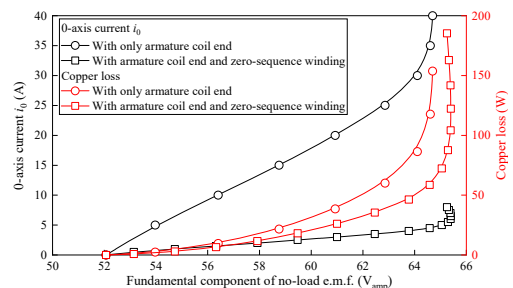


Fig. 4. Current required for field control and resulting copper loss.

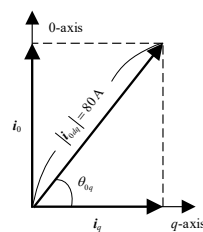


Fig. 5. Current vector on $0q$ plane.

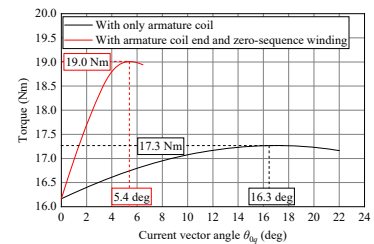


Fig. 6. Relationship between torque and current angle θ_{0q} .

して直流バス間に零相巻線を接続したデュアルインバータを提案し、駆動回路が複雑化するものの、電圧のレベル数やフェールセーフの点で利点があることを示した。

駆動特性の検討では、電機子コイルエンドのみを利用した場合と、電機子コイルエンドに加えて零相巻線を併用した場合の無負荷特性および負荷特性の比較を行った。無負荷特性の解析結果として、電機子コイルエンドと零相巻線を併用することで少ない i_0 で界磁制御が実現でき、銅損や高調波を低減できることがわかった。また、負荷特性の解析から、電機子コイルエンドと零相巻線を併用することで最大トルクが 9.8%程度増加することが明らかになった。

文 献

- (1) K. Iwama and T. Noguchi, "Three-Phase Inverter Fed Adjustable Field IPMSM Drive Utilizing Zero-Sequence Current," *IEEE Trans. on Ind. Electron.*, vol. 70, no. 2, pp. 1239-1249, 2023.
- (2) K. Iwama and T. Noguchi, "Design and Drive Method of Modulation Winding-less Adjustable Field IPMSM Focusing on Coil End of Armature winding," *IEEJ Technical Meeting on SPC and MD*, Jan. 2023.
- (3) K. Yamada and T. Noguchi, "Drive Circuit and Control Method of Adjustable Field PM Motor with Permeance Modulation Windings between Two Inverter DC Bussesr," *IEEJ Technical Meeting on MD and HCA*, pp. 63-68, Mar. 2022.