

# 電圧飽和を考慮したPMモータの速度制御の一手法

学生員 江頭 洋一\* 正員 大石 潔\*

## Speed Control Method for PM Motor Considering Voltage Saturation

Youichi Egashira\*, Student Member, Kiyoshi Ohishi\*, Member

We have already proposed a new anti-windup algorithm for Induction motors, and it regulates the motor speed smoothly and stably. This paper applies the proposed algorithm to the speed servo system for PM motor. However, the actual motor speed becomes smaller than it speed reference due to the field forcing caused by d-axis voltage saturation. Therefore, this thesis proposes a new anti-windup control scheme that is avoids the field forcing operation on condition of voltage saturation for a PM motor. The experimental results show that the proposed speed servo system regulates a motor speed smoothly and stably.

キーワード：電圧飽和，windアップ現象，強め界磁，非干渉制御

**Keywords:** voltage saturation, windup phenomena, field forcing, decoupling control

### 1. はじめに

PMモータのサーボ系は広範囲な可変速駆動制御法<sup>(1)</sup>に加えて、ロバストで高速応答性が要求される。その際、電圧および出力飽和によりwindアップ現象を発生させたりオーバーシュートすることがある。従来は、制御系の操作量飽和を起こした時に積分停止を行って来たが、その場合、振動的な応答になることがある。誘導機の操作量飽和対策は、筆者らがその有効な対策をすでに提案してきた<sup>(2)(3)</sup>。しかしながら、この手法をPMモータに適用した場合、速度が目標値に達しなくなることがある<sup>(4)</sup>。本論文では、PMモータの速度制御系の電圧飽和対策について新しく提案する。

### 2. PMモータの従来の電圧飽和対策

電圧飽和時に、従来から行われているように積分器の積算を停止した場合、図1に示すように速度応答は収束が遅く、オーバーシュートとアンダーシュートをくり返すことがある。これは、d-q座標軸上のリミット値を適切に決められないこと、操作量と制御対象への入力との不一致および過剰積算によるものと考えられる。これに対し、誘導機の操作量飽和対策で行っていたようにd-q座標上の飽和量 $\Delta V_d$ 、 $\Delta V_q$ を負帰還した場合でも速度応答は図2のように目標値に達しなくなってしまう。このときのd軸電流応答 $i_d$ は、d軸電流指令を $i_d^* = 0$ としても指令値に追従せず、正方向に流れている。

### 3. PMモータの電圧飽和現象とその対策

図5に示すd-q座標上のフェーザ図のようにd-q軸の電圧ベクトルは、電機子反作用 $L_q i_q$ によるd-q軸での干渉を打ち消すため、(1)、(2)式のように非干渉分を含んだ電圧ベ

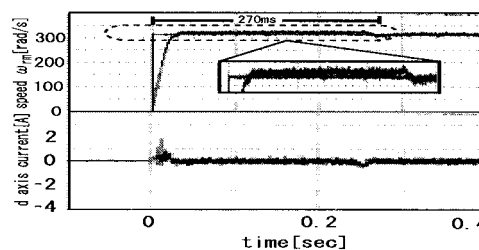


図1 従来の操作量飽和対策をした速度応答  
Fig.1. Speed step response of conventional system.

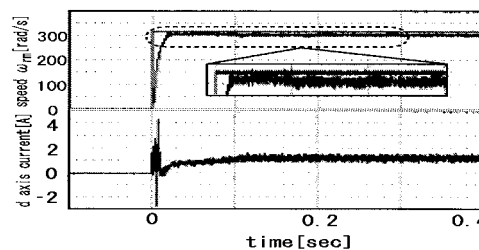


図2 dq軸の電圧飽和を考慮した操作量飽和対策  
Fig.2. Speed step response considering dq axis voltage saturation.

クトルを持ち、その合成ベクトルはq軸方向から傾く形となっている。合成ベクトルが電圧制限円を超えた場合d-q軸の飽和量 $\Delta V_d$ 、 $\Delta V_q$ は発生する。d軸飽和量はq軸電圧指令のみが飽和すればd軸電圧が飽和していない場合でもd軸飽和量に関係なく発生する。これはトルク電流 $i_q$ によってd軸電圧が発生し、合成ベクトルがq軸上に発生しなくなるためである。非干渉項によって発生し、電圧飽和に起因しないd軸飽和量をフィードバックした場合、(3)式のように干渉成分を打ち消せなくなり、強め界磁となってしまう。これらによって速度は目標値に達しなくなるので、電圧飽和時にd軸が強め界磁となるような場合には $\Delta V_d = 0$

\* 長岡技術科学大学  
〒940-2188 長岡市上富岡町 1603-1  
Nagaoka University of Technology  
1603-1, Kamitomioka-cho, Nagaoka 940-2188

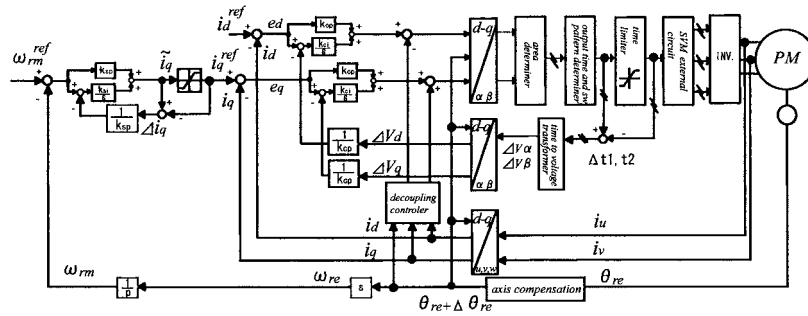


図3 電圧飽和を考慮したPMモータの速度サーボ系  
Fig. 3. Proposed speed servo system considering the saturation of voltage.

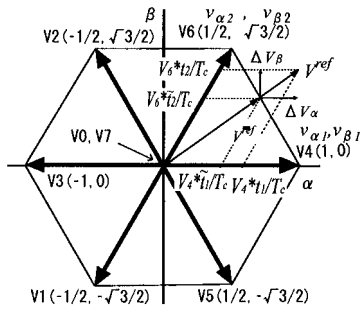


図4 SVM方式での電圧ベクトルおよび電圧飽和  
Fig. 4. Output voltage in SVM.

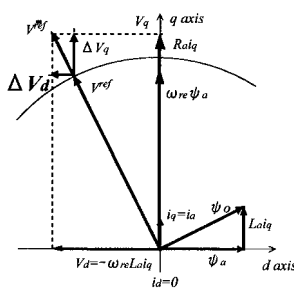


図5 d-q座標上のフェーザ図  
Fig. 5. Vector of d-q axis voltage.

としてd軸の偏差を考慮し、制御することを提案する。

$$V_d = (R_a + sL_a)i_d - \omega_{re}L_a i_q \dots\dots\dots (1)$$

$$V_q = (R_a + sL_a)i_q + \omega_{re}L_a i_d + \omega_{re}\psi_a \dots\dots\dots (2)$$

$$\underbrace{|\omega_{re}L_a i_q|}_{\text{interference term}} - \underbrace{|\omega_{re}L_a i_d|}_{\text{d axis voltage saturation}} - \underbrace{|\Delta V_d|}_{\text{decoupling control}} > 0 \dots\dots\dots (3)$$

4. 実験結果

200 W, 8 極の PM モータに定格負荷を与え、ゼロ速度から 3000 rpm までのステップ指令を与えた。提案法での実験結果を図 6 に示す。速度応答は速度指令にスムーズに追従し、従来法に比べ 150 [ms] 速く収束させることが出来た。図 7 に提案法でのリサージュ波形を示す。外側の円が電圧制限前、その内接六角形がリミッタ後のリサージュ波形となっている。ふたつのリサージュ波形の差から、提案法では飽和量を小さくすることが出来ていることが分かる。

5. まとめ

本論文では、空間ベクトル変調を用いた PM モータの電

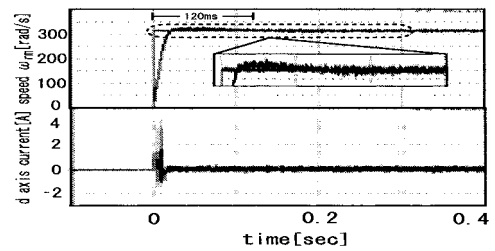


図6 提案法による速度応答  
Fig. 6. Speed step response of proposed system.

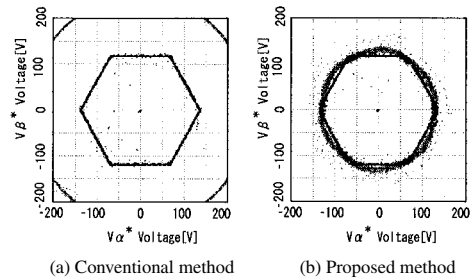


図7 リサージュ波形  
Fig. 7. Lissajous figure.

圧飽和対策について新しく提案した。d 軸飽和量を考慮することで電圧飽和時の強め界磁を回避し、スムーズな速度応答を得ることを実験によって確認できた。

(平成 17 年 3 月 22 日受付, 平成 17 年 9 月 26 日再受付)

文 献

- (1) S. Morimoto, T. Ueno, and Y. Takeda: "Wide Speed Control of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor", *T. IEE Japan*, Vol.114-D, No.6, pp.668-674 (1994-6) (in Japanese)  
森本茂雄・上野智広・武田洋次:「埋込磁石構造 PM モータの広範囲可変速制御」, 電学論 D, **114**, 6, pp.668-674 (1994-6)
- (2) K. Ohishi, E. Hayasaka, T. Nagano, and M. Harakawa: "Speed Servo System Considering Voltage Saturation of Indirect Vector Control System", *T. IEE Japan*, Vol.122-D, No.2, pp.120-127 (2002-2) (in Japanese)  
大石 潔・早坂恵美子・長野鉄明・原川雅哉:「間接形ベクトル制御における電圧飽和を考慮した速度サーボ系の一構成」, 電学論 D, **122**, 2, pp.120-127 (2002-2)
- (3) T. Kanmachi, R. Endo, and K. Ohishi: "High Performance Space Voltage Vector Controlled Inverter Considering Voltage Saturation for Speed Servo System of Induction Motor", 10<sup>th</sup> EPE, No.245, Toulouse, France (2003-9)
- (4) Y. Egashira and K. Ohishi: "Speed Control Method for PM Motor Considering Voltage Saturation—Second Report—", Technical Meeting on Semiconductor Power Converter, IEEJ, SPC-05-27, pp.29-34 (2005)  
江頭洋一・大石 潔:「電圧飽和を考慮した PM モータの速度制御法—第二法—」, 電気学会半導体電力変換研究, SPC-05-27, pp.29-34 (2005)