ベクトル制御誘導電動機の電圧飽和を考慮した
弱め界磁制御による出力トルク特性の改善正 員 上町 俊幸* 学生員 遠藤 亮*
正 員 大石 潔**Improvement of Output Torque Characteristic of Vector Controlled Induction Motor
using Field-Weakening Control Considering Voltage Saturation

Toshiyuki Kanmachi*, Member, Ryo Endo*, Student Member, Kiyoshi Ohishi**, Member

This paper proposes a new field-weakening control considering voltage saturation for vector controlled induction motor. The proposed method improves the output torque characteristics in the field-weakening region. The effectiveness of proposed method is verified by the experimental results.

キーワード：ベクトル制御，電圧飽和，弱め界磁制御

Keywords: Vector control, Voltage saturation, Field-weakening control

1. まえがき

誘導電動機のベクトル制御において，電圧飽和を考慮した制御法が開発されており⁽¹⁾，これを瞬時空間ベクトルインバータ駆動のベクトル制御に適用する手法を提案してきた⁽²⁾。本稿では，電圧飽和量を用いた弱め界磁制御法⁽³⁾と瞬時空間ベクトルインバータの組み合わせにより，弱め界磁領域において出力トルク特性を改善する手法を提案し，その有効性について述べる。

2. 電圧飽和を考慮した弱め界磁制御法

定格速度以上の高速領域では，逆起電力の影響が大きくなるため，一般に弱め界磁制御が用いられる。従来の弱め界磁制御では，(1)式のように速度 ω_m に反比例した磁束指令 ϕ_{2d}^* を与えている。

$$\phi_{2d}^* = \phi_{2dn}^* \frac{\omega_{mn}}{\omega_m} \dots\dots\dots (1)$$

ただし， ϕ_{2dn}^* ：定格磁束指令， ω_{mn} ：定格速度である。

高速領域では，励磁成分である d 軸に比べ，磁束を回転させる q 軸電圧成分が大きくなるため，回転座標の q 軸において電圧飽和が生じると考えられる。しかし，従来法では電圧飽和を考慮していないため，電圧飽和時に適切な磁束指令が与えられているとはいえない。

(2)式は，定常状態における誘導電動機の q 軸の電圧方程式である。高速領域で同期速度 ω が十分大きいとすれば，逆起電力の項のみで近似できる。

$$v_{1q} = R_1 i_{1q} + \omega \left(\sigma L_1 i_{1d} + \frac{M}{L_2} \phi_{2d} \right) \\ \simeq \frac{\omega M}{L_2} \phi_{2d} \dots\dots\dots (2)$$

ただし， R_1 ：一次抵抗， L_1, L_2 ：一次，二次インダクタンス， M ：相互インダクタンス， $\sigma = 1 - M^2/L_1 L_2$ である。

(2)式において，電圧飽和により v_{1q} が制限された時，右辺の ω に影響が及ばないように，磁束 ϕ_{2d} を小さくする必要がある。そこで，(2)式の関係を用いて(3)式のように磁束指令を修正することで，インバータ電圧飽和量に応じた磁束指令値を与える⁽³⁾。

$$\phi_{2d}^* = \phi_{2dn}^* \frac{\omega_{mn}}{\omega_m} - \frac{L_2}{\omega M} \Delta v_{1q} \dots\dots\dots (3)$$

3. 弱め界磁を用いたベクトル制御システム

図1は，提案する弱め界磁制御法を用いた誘導電動機のベクトル制御システムである。磁束制御系において，指令値 ϕ_{2d}^* と磁束推定値 $\hat{\phi}_{2d}$ が一致するようにPI制御を行い， d 軸電流指令 i_{1d}^* を決定する。また，速度制御系からは， q 軸電流指令 i_{1q}^* が与えられる。それぞれの指令値と実電流 i_{1d} ， i_{1q} が一致するように電流のPI制御を行い，瞬時空間ベクトルインバータの電圧指令 v_{1d}^* ， v_{1q}^* が決定される。瞬時空間ベクトルインバータでは，零電圧ベクトル以外に2つの空間電圧ベクトルが出力されるが，これら2つの電圧ベクトルの出力期間 t_1 ， t_2 を適切に与えることで，電圧指令通り

* 仙台電波工業高等専門学校
〒989-3128 仙台市青葉区愛子中央四丁目 16-1
Dept. of Elec. Cont. Eng., Sendai National College of Tech.
4-16-1, Ayashi-chuo, Aoba-ku, Sendai 989-3128

** 長岡技術科学大学
〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1
Dept. of Electric Eng., Nagaoka University of Technology
1603-1, Kamitomioka, Nagaoka, Niigata 940-2188

図1 弱め界磁を用いたベクトル制御システム

Fig. 1. Vector control system with field-weakening control.

の電圧を出力し、誘導電動機を駆動する。

ここで電圧指令がインバータの出力限界を越える場合は、 $t_1 + t_2$ がサンプリング周期 T_s を上回るため、(4) 式のように電圧出力期間を均等に短縮する。

$$\tilde{t}_1 = \frac{T_s}{t_1 + t_2} t_1, \quad \tilde{t}_2 = \frac{T_s}{t_1 + t_2} t_2 \dots \dots \dots (4)$$

このとき、電圧飽和量が(5)式、(6)式より求められる。

$$\begin{bmatrix} \Delta v_{1\alpha} \\ \Delta v_{1\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{V_{DC}}{T_s} \begin{bmatrix} v_{1\alpha} & v_{2\alpha} \\ v_{1\beta} & v_{2\beta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta t_1 \\ \Delta t_2 \end{bmatrix} \dots \dots \dots (5)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta v_{1d} \\ \Delta v_{1q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta v_{1\alpha} \\ \Delta v_{1\beta} \end{bmatrix} \dots \dots \dots (6)$$

ただし、 $\Delta t_1 = t_1 - \tilde{t}_1$ 、 $\Delta t_2 = t_2 - \tilde{t}_2$ 、 $v_{1\alpha}$ 、 $v_{1\beta}$ 、 $v_{2\alpha}$ 、 $v_{2\beta}$ ：出力電圧ベクトルの α - β 静止座標軸成分である。

この Δv_{1q} を用いて、弱め界磁領域での磁束指令値を(3)式のように修正している。また、 Δv_{1d} 、 Δv_{1q} をフィードバックして電流制御系のPI入力を修正し、積分演算を再計算することで電圧飽和対策も行っている⁽²⁾。

4. 実験結果

1.5 kW、60 Hz、4 極の誘導電動機を用いて、定常状態の出力トルク特性を測定した。図2は、指令速度から0.1%の誤差範囲内で速度制御が達成できるときの、最大出力トルクを示している。定格速度以下の領域では、リミッタにより出力トルクが制限されるため両手法に差はないが、弱め界磁領域では提案法の出力トルクが、従来法より平均11%上昇している。また、図中のA、B点において両手法の相電流を比較すると、提案法の振幅が1~4%小さくなっている。図3は、速度指令を350 rpm から3000 rpm に変化させたときの速度 ω_m と磁束指令値 ϕ_{2d}^* の波形を示している。このとき、3000 rpm において58%の負荷が印加されるよう、負荷発電機に抵抗を接続している。定格速度以上で弱め界磁制御が行われているが、提案法では磁束指令値が修正されるため、従来法より小さな磁束指令となっている。しかし、磁束の修正により出力トルクが増大し、結果的に、より高速な過渡応答が得られている。

図2 トルク出力特性

Fig. 2. Output torque characteristics.

図3 過渡応答特性

Fig. 3. Transient response.

5. むすび

本稿では、瞬時空間ベクトルインバータ駆動のベクトル制御と、電圧飽和を考慮した弱め界磁制御を組み合わせたシステムを提案した。キャリア変調インバータより出力電圧範囲が広がったことや、電圧飽和が生じても適切な弱め界磁指令が与えられたことにより、弱め界磁領域における出力トルク特性が改善された。

(平成16年10月14日受付、平成17年1月11日再受付)

文 献

- (1) 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)
 - (2) T. Kanmachi, R. Endo, and K. Ohishi: "High Performance Space Voltage Vector Controlled Inverter Considering Voltage Saturation for Speed Servo System of Induction Motor", 10th EPE, No.245, Toulouse, France (2003-9)
 - (3) Y. Sato and K. Ohishi: "An Approach of Drive Method of Indirect Vector Control Considering Voltage Saturation at Constant Output Power Region—Second Report—", National Convention Record IEE Japan, No.4-140, pp.227-228 (2002) (in Japanese)
- 佐藤康幸・大石 潔:「電圧飽和を考慮した間接形ベクトル制御誘導機の定出力領域における駆動法—第二報—」平14電気学会全大, No.4-140, pp.227-228 (2002)