

# V/f 制御に基づく IPMSM の最大効率制御

中島 雄希, 伊東 淳一 (長岡技術科学大学)

Maximum Efficiency Control for IPM Synchronous Motor based on V/f Control

Yuki Nakajima, Jun-ichi Itoh (Nagaoka University of Technology)

## 1. はじめに

内部永久磁石同期電動機(IPMSM)の駆動には一般にベクトル制御が用いられるが, 磁極位置情報を必要としない簡便な方法としては, V/f 制御も有力である。しかし, ベクトル制御ではトルク/電流を最大とする最大トルク制御や鉄損を含めて損失を極小化する最大効率制御が提案されている<sup>(1)(2)</sup>。一方, V/f 制御に基づく最大トルク制御は提案されている<sup>(3)</sup>が, 最大効率制御については著者らの知る限りない。

そこで本論文は, V/f 制御に基づいた最大効率制御を提案する。本論文では制御原理を述べ, その後実機による検証結果を示す。

## 2. 制御原理

図 1 に IPMSM の V/f 制御の制御ブロック図を示す。本制御法ではインバータの出力電圧ベクトルの方向を $\delta$ 軸,  $\delta$ 軸より 90 deg.遅れた軸を $\gamma$ 軸とした,  $\gamma\delta$ 軸直交座標系にて制御を行う。電圧指令値は  $v_\delta^*$  のみによって生成され,  $v_\gamma^*$  は常に 0 である。また, 図 1 中における安定化制御は, V/f 制御で IPMSM を駆動する際に生じるトルクの振動を抑制する制御である<sup>(4)</sup>。

IPMSM はリラクタンストルクを有するため, d 軸電流を負方向に流したときに最大のトルク/電流が得られる。言い換えれば, この最大トルク/電流制御はモータの銅損を最小にできる。しかし, 実際のモータの損失は銅損に加え鉄損が存在し, 最大効率での動作点は最大トルク/電流制御の動作点と異なる。ここでは, V/f 制御の IPMSM の最大トルク/電流制御<sup>(3)</sup>を応用した最大効率制御を提案する。

dq 座標上で突極性をもつ IPMSM の電圧方程式は(1)式で表される。

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a + pL_a & -\omega_{re}L_a \\ \omega_{re}L_a & R_a + pL_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_{re}\psi_m \end{bmatrix} \dots\dots\dots (1)$$

ここで,  $v_{d(q)}$  は d(q)軸電圧,  $i_{d(q)}$  は d(q)軸電流,  $\omega_{re}$  は電気角周波数,  $p$  は微分演算子,  $R_a$  は電機子抵抗値,  $L_{d(q)}$  は d(q)軸インダクタンス値,  $\psi_m$  は永久磁石による鎖交磁束数である。(1)式より, dq 座標上の無効電力  $Q_{dq}$  は(2)式で得られる。

$$Q_{dq} = \omega_{re} \{ L_d I_a^2 \sin^2 \beta + L_q I_a^2 \cos^2 \beta - \psi_m I_a \sin \beta \} \dots\dots\dots (2)$$

ここで,  $I_a$  は電流ベクトルの大きさ,  $\beta$  は電流位相である。次に, (2)式に最大トルク/電流制御時の電流位相(3)式)を代入し, 最大トルク/電流制御時の無効電力を表す(4)式を得る。

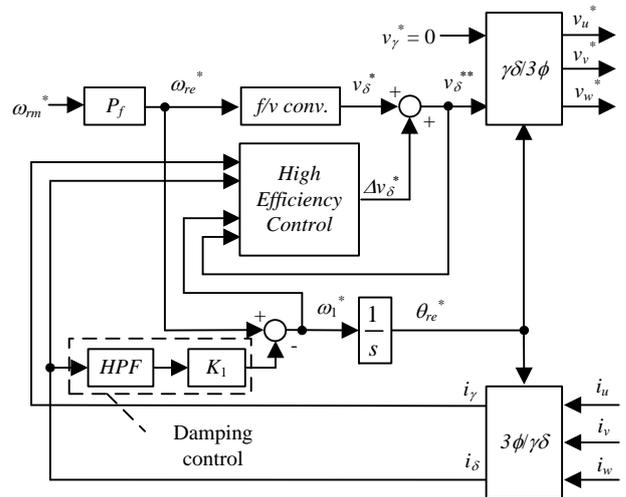


Fig.1 V/f control method based on  $\gamma\delta$ -frame.

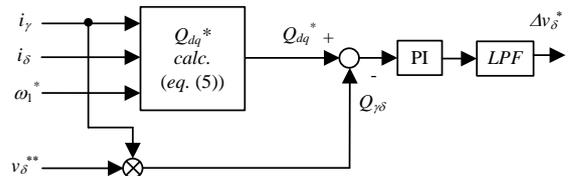


Fig.2 High Efficiency control method for IPMSM.

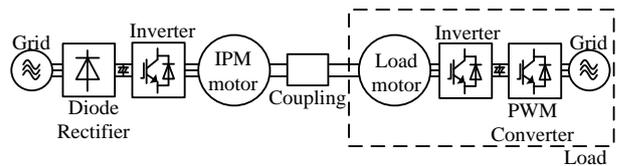


Fig.3. Schematic of the experimental system.

$$\beta = \sin^{-1} \left\{ -\frac{\psi_m}{4(L_q - L_d)I_a} + \sqrt{\left( \frac{\psi_m}{4(L_q - L_d)I_a} \right)^2 + \frac{1}{2}} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

$$Q_{dq} = \omega_{re} \{ L_d X^2 + L_q (I_a^2 - X^2) - \psi_m X \} \dots\dots\dots (4)$$

ここで,  $X = I_a \sin \beta$  である。なお,  $(L_q - L_d)$  が 0 に近づくと, (3)式の平方根内第 1 項が第 2 項に比べ十分大きくなるため, 円筒機( $L_d = L_q$ )では  $\beta = 0$  である。

V/f 制御に基づく最大トルク/電流制御<sup>(3)</sup>では, 無効電力の制御により電流位相を制御する。最大効率制御時の電流位相は, 最大トルク/電流制御時に対し鉄損分を考慮することで得られるため, 言い換えれば最大効率制御時の無効電力は, 最大トルク/電流制御の無効電力に補償項を追加するこ

とで得ることができる。最大効率制御時の無効電力方程式を(6)式に示す。

$$Q_{dq} = Q_{dqref\_cmp} + \omega_{re} \{L_d X^2 + L_q (I_a^2 - X^2) - \psi_m X\} \dots \dots \dots (6)$$

ここで、 $Q_{dqref\_cmp}$  は無効電力補償値である。(6)式は dq 座標上の電流および電圧を含まず、電流の大きさとモータパラメータで演算できる。従って、磁極位置情報を用いない V/f 制御上で演算可能である。

最大効率制御を達成するには、 $\gamma\delta$ 座標上で求めた無効電力が最大効率制御時の無効電力に一致するよう  $v_\delta$  を調節すればよい。 $\gamma\delta$ 座標上における無効電力  $Q_{\gamma\delta}$  は(7)式で表せる。

$$Q_{\gamma\delta} = v_\delta i_\gamma \dots \dots \dots (7)$$

これをフィードバック制御により(6)式の値に一致させる。

図2に高効率制御の制御ブロック図を示す。(6)式および(7)式の偏差を求め、PI制御器により偏差をゼロにするよう  $\delta$ 軸電圧指令  $v_\delta^*$  を補償する。また、最大効率制御は定常的に動作すればよいので、過渡的には比較的ゆっくりな応答でよい。そこで、PI制御器の後段にローパスフィルタを挿入し、再帰演算を防止すると共に、安定性を高めている。なお、定常的には  $\omega_{re} = \omega_1$  であるので、(6)式における  $\omega_{re}$  はインバータの角周波数指令値  $\omega_1$  を用いる。

### 3. 実験結果

図3に実験システムを示し、表2に IPMSM のモータパラメータを示す。実験に用いた IPMSM の定格電力は 1.5kW、突極比は 2 である。

図4に最大効率制御の実験結果を示す。最大効率制御の効果を確認するため、無効電力指令値に誤差量  $Q_{dqref\_vary}$  を加え、それぞれの場合における銅損、鉄損および総合損失を算出した。本実験時の無効電力指令値の式を(8)式に示す。

$$Q_{dq} = Q_{dqref\_vary} + Q_{dqref\_cmp} + \omega_{re} \{L_d X^2 + L_q (I_a^2 - X^2) - \psi_m X\} \dots \dots \dots (8)$$

ここで、無効電力指令補償値  $Q_{dqref\_cmp}$  は実験により定めた最大効率点での無効電力値であり、0.12 p.u. とした。また、銅損は電機子抵抗値およびインバータ出力電流から求め、鉄損は総合損失から銅損分を減算することで求めているため機械損を含んでいる。

図4より、 $Q_{dqref\_vary}$  によって銅損、鉄損および総合損失は変化し、 $Q_{dqref\_vary} = -0.12$  p.u. のとき、銅損が最小となる。これは、 $Q_{dqref\_vary}$  が  $Q_{dqref\_cmp}$  による無効電力指令補償分を相殺し、無効電力指令値が最大トルク電流制御時の値に等しくなったためである。また、 $Q_{dqref\_vary} = 0$  のとき総合損失が最小となる。このとき、総合損失は最大トルク/電流制御時に比べて 2.8 W と損失を 2.2% 低減した。したがって、本制御法は最大トルク/電流制御よりも高効率な最大効率制御を達成できている。今回試験に使用したモータは最大トルク/電流制御と最大効率の動作点が近い位置にあり、大きな効果

Table.1 Motor Parameters used in simulations.

Motor Power	1.5kW
Rated Current	6.1A <sub>rms</sub>
Rated Speed	1800rpm
Number of Poles	6poles
Winding Resistance	0.783Ω
d-axis Inductance	11.5mH
q-axis Inductance	23.0mH
Interlinkage magnetic flux	0.246V·s/rad

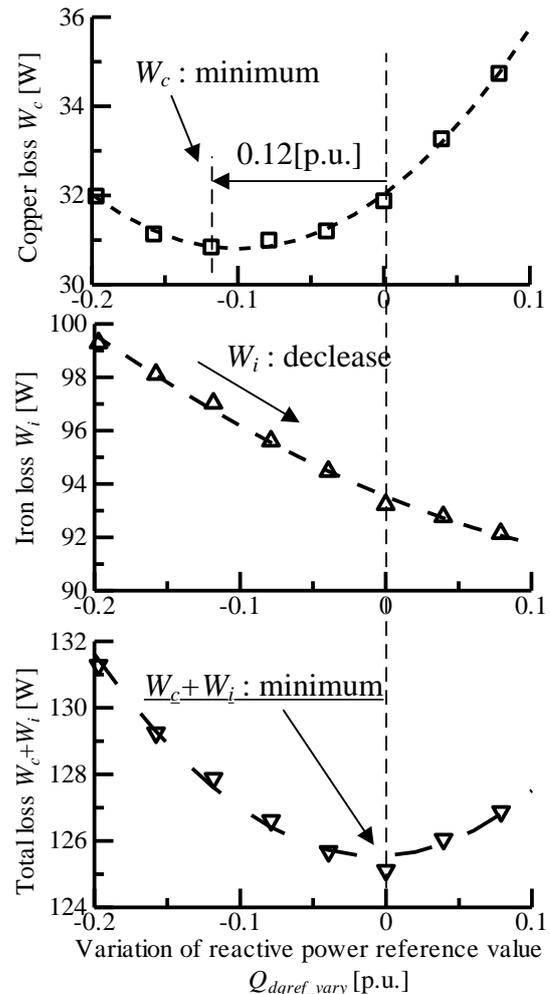


Fig.4. The relationships between the Qdqref\_vary and the copper loss, iron loss, and total loss with maximum efficiency control (Load torques are 0.6 p.u. and rotating speeds are 1.0 p.u.)

が見られなかったが、高速モータのような鉄損の大きなモータでは本制御はさらに有効と考えられる。

### 文献

- (1) S. Morimoto, Y. Takeda, K. Hatanaka, Y. Tong, T. Hirasu, IEEE on IA, Vol. 29, No. 6, pp. 1150-1155, 1993.
- (2) S. Morimoto, Y. Tong, Y. Takeda, T. Hirasu, IEEE on IE, Vol. 41, No. 5, pp. 511-577, 1994.
- (3) 中島, 伊東, SPC 苫小牧, MD-12-032, 2012.
- (4) J. Itoh, J. Toyosaki, H. Ohsawa, T.IEEJapan, Vol. 122, No. 3, pp. 253-259, 2002.