鉄損を考慮した誘導電動機ベクトル制御の方式

正員 辻 峰 男 (長崎大学) 学生員 本 城 隆 (長崎大学)
正員 泉 勝 弘 (長崎大学) 正員 山 田 英 二 (長崎大学)

A Vector Control System of Induction Motor Taking into Account Iron Loss
Mineo Tsuji, Takashi Honjo, Katsuhiko Izumi, Eiji Yamada
(Nagasaki University)

Taking into account the iron loss, a vector control method is proposed to compensate the torque accuracy. An efficiency maximizing control method of this system is also presented by changing the flux command. The effectiveness of the proposed system has been verified by digital simulation.

キーワード：誘導電動機、鉄損、ベクトル制御、最大効率制御、磁束制御

Keywords: Induction Motor, Iron Loss, Vector Control, Efficiency Maximizing Control, Flux Control

1. まえがき

鉄損を考慮した誘導電動機のベクトル制御と最大効率制御に関しては、既に幾つかの方式が提案されている⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾。しかし、磁束制御が考慮されていないものやベクトル制御演算が一般的な滑り周波数制御形と異なって複雑であるものなどが提案されていて、十分とは言えない。本稿では、鉄損を考慮した一般的な d - q モデルを基に、理論の一般性を保ちながら、鉄損を考慮していない従来の滑り周波数制御形ベクトル制御を拡張した制御系として、一方式を提案する。また、最大効率制御に関し、本方式に基づく磁束指令の制御法も提案する。

2. 鉄損を考慮した誘導モータのモデル

任意の角速度 ω で回転する d - q 座標系で、鉄損を等価うず電流回路として考慮した誘導電動機のモデルは以下のように表せる⁽⁵⁾。

励磁電流：

$$i_{md} = i_{sd} + i_{rd} + i_{cd} \quad (1)$$

$$i_{mq} = i_{sq} + i_{rq} + i_{cq} \quad (2)$$

ここで、 i_{cd}, i_{cq} ：鉄損電流

二次鎖交磁束：

$$\psi_{rd} = l_r i_{rd} + M i_{md} \quad (3)$$

$$\psi_{rq} = l_r i_{rq} + M i_{mq} \quad (4)$$

ここで、 l_r ：二次漏れインダクタンス

電圧方程式：

$$e_{sd} = R_s i_{sd} + P \psi_{sd} - \omega \psi_{sq} \quad (5)$$

$$e_{sq} = R_s i_{sq} + P \psi_{sq} + \omega \psi_{sd} \quad (6)$$

$$0 = R_r i_{rd} + P \psi_{rd} - (\omega - \omega_r) \psi_{rq} \quad (7)$$

$$0 = R_r i_{rq} + P \psi_{rq} + (\omega - \omega_r) \psi_{rd} \quad (8)$$

$$0 = M P i_{md} - \omega M i_{mq} + R_c i_{cd} \quad (9)$$

$$0 = M P i_{mq} + \omega M i_{md} + R_c i_{cq} \quad (10)$$

ここで、 P ：微分演算子、 R_c ：等価鉄損抵抗

発生トルク：

$$\tau_e = p(M/L_r) \{ \psi_{rd}(i_{sq} + i_{cq}) - \psi_{rq}(i_{sd} + i_{cd}) \} \quad (11)$$

ここで、 p ：極対数

3. 鉄損を考慮したベクトル制御⁽⁶⁾

二次磁束に同期して回転する d - q 座標系を選び、 d 軸を二次磁束の方向に一致させると $\psi_{rq} = 0$ とおける。(7)式に(1),(3)式を用い、 $\tau_r = L_r / R_r$ と置くと

$$\psi_{rd} = \frac{M}{\tau_r P + 1} (i_{sd} + i_{cd}) \quad (12)$$

が得られる。また、(2),(4),(8)式より、次式が求まる。

$$\omega = \omega_r + \frac{M}{\tau_r P} (i_{sq} + i_{cq}) \quad (13)$$

鉄損回路の過渡現象を無視し、(9),(10)式の微分項を 0 とおくと、鉄損回路の電流は次式で表せる。

$$i_{cd} = \frac{\omega M l_r}{R_c L_r} (i_{sq} + i_{cq}) \quad (14)$$

$$i_{cq} = -\frac{\omega M}{R_c L_r} \{ \psi_{rd} + l_r (i_{sd} + i_{cd}) \} \quad (15)$$

トルクは(11)式より

$$\tau_e = p(M/L_r) \psi_{rd} (i_{sq} + i_{cq}) \quad (16)$$

となる。

次に最大効率制御を考える。定常状態で R_c の鉄損と R_s, R_r の銅損の和を P_{loss} とすると、 P_{loss} は次式で与えられる。

$$P_{loss} = A i_{md}^2 + B i_{mq}^2 + 2 R_s \frac{M}{l_r} \frac{\omega M}{R_c} i_{md} i_{mq} \quad (17)$$

ここで、 $A = R_s \{ 1 + (\frac{\omega M}{R_c})^2 \} + R_c (\frac{\omega M}{R_c})^2$

図1 鉄損を考慮したベクトル制御系

Fig.1. Vector control system taking into account iron loss.

$$B = R_s \left\{ \left(\frac{\omega M}{R_c} \right)^2 + \left(\frac{L_r}{l_r} \right)^2 \right\} + R_c \left(\frac{\omega M}{R_c} \right)^2 + R_r \left(\frac{M}{l_r} \right)^2$$

(17)式の第3項は発生トルクに比例するので一定とし、損失を最小化するように電流を配分すると、次式を得る。

$$|i_{mq}/i_{md}| = \sqrt{A/B} \quad (18)$$

よって、磁束電流指令を次式で与えると効率 は最大となる。

$$i_{sd}^* + i_{cd}^* = \frac{\sqrt{C\tau_e^*/p}}{M} \quad (19)$$

$$C = \frac{R_s \left\{ \left(\frac{\omega M l_r}{R_c} \right)^2 + L_r^2 \right\} + R_c \left(\frac{\omega M l_r}{R_c} \right)^2 + R_r M^2}{R_s \left\{ 1 + \left(\frac{\omega M}{R_c} \right)^2 \right\} + R_c \left(\frac{\omega M}{R_c} \right)^2}$$

以上の式から鉄損を考慮したベクトル制御を図1のように提案する。

4. シミュレーション結果

2.2kW の誘導機で、回転角速度指令のステップ変化に対する応答のシミュレーション結果を図2に示す。図(a)の鉄損を制御器側に考慮していない場合は、図1で $R_c^* \rightarrow \infty$ に相当し、図(b)は制御器に鉄損を考慮した提案方式の結果である。実際の誘導機は、(1)~(11)式により鉄損を厳密に考慮したモデルで計算している。なお、比較のため効率制御は省いている。(a)の場合、トルクと二次磁束の波形において制御器の演算値と実際値に差が生じている。一方、(b)の鉄損を考慮した制御の場合には、トルクや二次磁束の波形は、演算値と実際値がほとんど一致していることがわかる。

図3は、回転数が1700(rpm)での負荷トルク対効率の定常特性である。最大効率制御は(19)式を用いて磁束分電流指令値をトルク指令値によって変化させて解析した。磁束一定制御方式では低トルク領域で効率が悪化しているのに対し、最大効率制御による結果は全トルク領域で最大効率が得られることがわかる。

5. あとがき

鉄損を考慮した誘導電動機のベクトル制御について、厳密な解析モデルに立脚し比較的簡単な構成のベクトル制御法を最大効率制御を含めて提案し、シミュレーションによりその有効性を確認した。鉄損を表す等価うず電流回路の過渡現

(a) 制御器鉄損無視 (b) 制御器鉄損考慮

図2 速度指令の変化に対するステップ応答

Fig.2. Step responses for the change of speed command.

図3 負荷トルク-効率特性

Fig.3. Load torque versus efficiency characteristics.

象が無視できることと電流制御が正しく行われることを前提として制御系を導出したが実用上問題ないと考える。

(平成14年1月7日受付)

文献

- (1) 水野・高山・市岡・寺島：「固定子鉄損を考慮した誘導電動機の非干渉制御法」電学論D, 109, 841 (1989)
- (2) 金原・小山：「鉄損を考慮した誘導電動機の高効率・高応答ベクトル制御法」平成7年電気学会産業応用部門大会, No.68
- (3) K.Matsuse, shizumi, S.Katsuta, Taniguchi : "High-Response Flux Control of Direct-Field-Oriented Induction Motor with high Efficiency Taking Core loss into Account" ,IEEE Trans.IA vol.35, 62 (1999)
- (4) E.Levi : "Impact of Iron Loss on behavior of Vector Controlled Induction Machines" ,IEEE Trans.IA,vol.31, 1287 (1995)
- (5) 辻・久保田・内藤：「誘導電動機モデル及び高性能制御」平成13年電気学会産業応用部門大会シンポジウムS11-2, Vol.3, 1127
- (6) 辻・本城・泉・山田：「鉄損を考慮した誘導モータベクトル制御の一方式」同上 No.129, Vol.2, 711