

회전자와 고정자 저항 변동에 영향을 받지 않는 유도전동기의 새로운 벡터제어 기법

변운섭*, 백종현, 왕종배, 박현준
한국철도기술연구원

A new vector control approach for induction motor without influence of rotor resistance and stator resistance variation

Yeun-Sub Byun, Jong-Hyen Baek, Jong Bae Wang, Hyun-Jun Park
KRRI(Korea Railroad Research Institute)

Abstract - This paper presents a new vector control scheme for induction motor. An exact knowledge of the rotor flux position is essential for a high-performance vector control. The position of the rotor flux is measured in the direct scheme and estimated in the indirect schemes. Since the estimation of the flux position requires a priori knowledge of the induction motor parameters, the indirect schemes are machine parameter dependent. The rotor and stator resistance among the parameters change with temperature. Variations in the parameters of induction machine cause deterioration of both the steady state and dynamic operation of the induction motor drive. Several methods have presented to minimize the consequences of parameter sensitivity in indirect scheme. In this paper, new estimation scheme of rotor flux position is presented to eliminate sensitivity due to variation in the resistance. The simulation is executed to verify the proposed vector control performance and to compare its performance with that of indirect vector control.

1. 서 론

1970년대 초기 Blasche에 의해 제안된 벡터제어 기법으로 유도전동기를 직류전동기와 동등한 정도의 높은 응답성을 갖도록 제어가 가능해졌고 그에 따라 사용범위가 확대되었다. 이는 전력용 반도체 소자의 급속한 발전과 마이크로 프로세서의 출현에 의해 실용화되었다. 유도전동기의 벡터제어는 고정자 전류를 자속 성분전류와 토오크 성분전류로 분리하여 독립제어 함으로써 직류전동기와 동등한 제어특성을 부여하기 위한 제어 방식이다. 이러한 벡터제어는 회전자 자속의 위치를 찾는 방법에 직접벡터제어와 간접벡터제어로 구분된다. 직접벡터제어는 자속을 직접 측정하거나 자속 추정기를 통하여 회전자 자속의 위치를 알아내고 간접벡터제어는 전동기의 회전속도에 슬립속도를 더해 그 적분한 값으로 회전자 자속의 위치를 구한다. 직접벡터제어에서 자속을 직접 측정하거나 간접벡터에서 슬립을 추정할 때에는 기존의 방법에서는 유도전동기의 고정자저항이나 회전자저항 값이 사용되는데 이들은 유도전동기가 장시간 운전의 경우 온도상승에 의해 그 값이 변화하여 정확한 자속의 위치를 추정하지 못하게된다. 결국 유도전동기의 벡터제어를 통한 정상상태 및 과도상태 응답특성에 악영향을 미친다. 이를 보상하기 위해 현재까지 대부분의 연구는 온도에 따라 변하는 회전자저항과 고정자저항에 대한 정확한 추정을 위해 다양한 기법들을 제시하고 있다. 본 논문에서는 회전자 자속의 위치를 알기 위해 회전자저항이나 고정자저항값이 요구되지 않는 새로운 방법을 제시하고자 한다.

2. 본 론

2.1 유도전동기의 모델링

회전자표속 $d^e - q^e$ 등가회로에서 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$v_{qse} = R_s i_{qse} + \frac{d\psi_{qse}}{dt} + \omega_e \psi_{dse} \quad (1)$$

$$v_{dse} = R_s i_{dse} + \frac{d\psi_{dse}}{dt} - \omega_e \psi_{qse} \quad (2)$$

$$v_{qre} = R_r i_{qre} + \frac{d\psi_{qre}}{dt} + (\omega_e - \omega_r) \psi_{dre} \quad (3)$$

$$v_{dre} = R_r i_{dre} + \frac{d\psi_{dre}}{dt} - (\omega_e - \omega_r) \psi_{qre} \quad (4)$$

$$\psi_{qre} = L_r i_{qre} + L_m i_{qse} \quad (5)$$

$$\psi_{dre} = L_r i_{dre} + L_m i_{dse} \quad (6)$$

$$\psi_{qse} = L_s i_{qse} + L_m i_{qre} \quad (7)$$

$$\psi_{dse} = L_s i_{dse} + L_m i_{dre} \quad (8)$$

$$T_{em} = \frac{3}{2} \frac{P}{2} L_m (i_{ds} i_{qr} - i_{dr} i_{qs}) \quad (9)$$

여기서, ω_e 는 동기 각속도, ω_r 은 회전자 각속도, T_{em} 은 토크

2.2 제안된 유도전동기 벡터제어

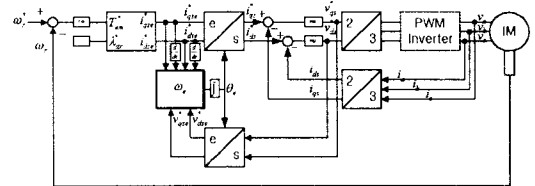


그림 1. 제안된 벡터제어 블록선도

2.2.1 자속관계식의 자속전류 지령 (i_{dse}^*)

(6)식에서 회전자 전류 i_{dre} 는

$$i_{dre} = \frac{1}{L_r} \psi_{dre} - \frac{L_m}{L_r} i_{dse} \quad (10)$$

식(4)에서 회전자전류 i_{dre} 를 제거하기 위해 식(10)을 대입하면

$$R_r \left(\frac{1}{L_r} \psi_{dre} - \frac{L_m}{L_r} i_{dse} \right) + \frac{d\psi_{dre}}{dt} - \omega_s \psi_{qre} = 0 \quad (11)$$

여기서 $\omega_s = \omega_e - \omega_r$

식(11)을 자속전류 i_{dse} 에 관해 정리하고 조건 식(12)를 고려하면 식(14)를 얻을 수 있다.

비간섭 제어시 조건 식(12)

$$\psi_{dre} = \frac{d\psi_{dre}}{dt} = 0, \psi_{dre} = \hat{\psi}_r = L_m i_{dse}, \frac{d\psi_{dre}}{dt} = 0 \quad (12)$$

$$i_{dse}^* = \left(\frac{L_r}{R_r} \frac{d\psi_{dre}}{dt} + \psi_{dre} \right) \Big| L_m \quad (13)$$

$$i_{dse}^* = \psi_{dre}^* / L_m \quad (14)$$

정격자속은

$$\psi_{rate} = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{V_{rate}}{2\pi f_{rate}} \quad (15)$$

2.2.2 토크 관계식에서 토크전류 지령 (i_{qse}^*)

$$T_{em} = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m}{L_r} \psi_{dre} i_{qse} \quad (16)$$

$$i_{qse}^* = T_{em}^* \frac{4L_r}{3PL_m\psi_{dre}} \quad (17)$$

$$T_{em}^* = \left(\frac{G_1}{s} + G_2 \right) (\omega_r^* - \omega_r) \quad (18)$$

여기서, G_1 = 적분이득, G_2 = 비례이득
 s = 미분연산자

2.2.3 새로운 회전자 자속각 θ_e 추정 방법

회전자표측 $d^e - q^e$ 등가회로에서 고정자측 전압관계 식은

$$v_{qse} = R_s i_{qse} + \frac{d\psi_{qse}}{dt} + \omega_e \psi_{dse} \quad (19)$$

$$v_{dse} = R_s i_{dse} + \frac{d\psi_{dse}}{dt} - \omega_e \psi_{qse} \quad (20)$$

(19)식에 i_{dse} 를 곱하면

$$v_{qse} i_{dse} = R_s i_{qse} i_{dse} + \frac{d\psi_{qse}}{dt} i_{dse} + \omega_e \psi_{dse} i_{dse} \quad (21)$$

(20)식에 i_{qse} 를 곱하면

$$v_{dse} i_{qse} = R_s i_{dse} i_{qse} + \frac{d\psi_{dse}}{dt} i_{qse} - \omega_e \psi_{qse} i_{qse} \quad (22)$$

고정자측 저항 R_s 이 포함된 항을 제거하기 위해 (21)식 - (22)식을 하면

$$v_{qse} i_{dse} - v_{dse} i_{qse} = \frac{d\psi_{qse}}{dt} i_{dse} - \frac{d\psi_{dse}}{dt} i_{qse} + \omega_e (\psi_{dse} i_{dse} + \psi_{qse} i_{qse}) \quad (23)$$

(23)식을 동기자속도 ω_e 에 대해 정리하면 (24)식이 된다.

$$\omega_e = \frac{v_{qse} i_{dse} - v_{dse} i_{qse} - \frac{d\psi_{qse}}{dt} i_{dse} + \frac{d\psi_{dse}}{dt} i_{qse}}{\psi_{dse} i_{dse} + \psi_{qse} i_{qse}} \quad (24)$$

(24)식에서 고정자측 자속을 고정자 전류에 관한식으로 변환을 위해 정상상태에서 비간섭제어 조건식(25)를 고려하면 고정자측 자속은 다음과 같이 정리된다.

$$\psi_{dre} = \frac{d\psi_{dre}}{dt} = 0, \psi_{dre} = \hat{\psi}_r = L_m i_{dse}, \frac{d\psi_{dre}}{dt} = 0 \quad (25)$$

$$\psi_{qse} = L_s i_{qse} + L_m i_{dre} = \left(L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \right) i_{qse} + \frac{L_m}{L_r} \psi_{dre} = \left(L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \right) i_{qse} \quad (26)$$

$$\psi_{dse} = L_s i_{dse} + L_m i_{dre} = \left(L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \right) i_{dse} + \frac{L_m}{L_r} \psi_{dre} = \left(L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \right) i_{dse} + \frac{L_m}{L_r} L_m i_{dse} = L_s i_{dse} \quad (27)$$

따라서 (25)식에 (26), (27)식을 대입함으로써 동기 각 속도는 (28)식과 같이 표현된다.

$$\omega_e = \frac{v_{qse} i_{dse} - v_{dse} i_{qse} - \left(L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \right) \frac{di_{qse}}{dt} i_{dse} + L_s \frac{di_{dse}}{dt} i_{qse}}{\left(L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \right) i_{qse}^2 + L_s i_{dse}^2} \quad (28)$$

결국 회전자 자속각 θ_e 은 $\theta_e = \int \omega_e dt$ 로 구할 수 있다.

(28)식에서 볼 수 있듯이 식 자체에 고정자 저항이나 회전자 저항을 볼 수 없다. 따라서 이들 저항 변화의 영향력을 배제시킬 수 있다. 또한 회전자 각속도를 구하는데 간접벡터제어에서처럼 속도를 필요로 하지 않음으로 실제속도오차에 영향을 받지 않는다.

2.2.4 고정자전류 지령

θ_e 로 주어지는 자속각은 직교 단위벡터인 $\cos \theta_e$ 와 $\sin \theta_e$ 의 연산에 사용된다. 고정자전류 지령치는 다음 식에 의하여 동기회전좌표계에서 정지좌표계로 변환된다.

$$\begin{aligned} i_{qs}^* &= i_{dse}^* \sin \theta_e + i_{qse}^* \cos \theta_e \\ i_{ds}^* &= i_{dse}^* \cos \theta_e - i_{qse}^* \sin \theta_e \end{aligned} \quad (29)$$

2.2.5 고정자 전압 지령

고정자 전류 지령치와 전동기의 고정자 전류의 오차는 비례적분기를 사용해 고정자전압 지령치 연산에 사용된다.

$$\begin{aligned} v_{qs}^* &= \left(\frac{G_3}{s} + G_4 \right) (i_{qs}^* - i_{qs}) \\ v_{ds}^* &= \left(\frac{G_3}{s} + G_4 \right) (i_{ds}^* - i_{ds}) \end{aligned} \quad (30)$$

여기서, G_3 : 적분이득, G_4 : 비례이득

고정자 전압 지령치는 다음식에 의하여 정지좌표계에서 동기 좌표계로 변환된다.

$$\begin{aligned} v_{qse}^* &= v_{qs}^* \cos \theta_e - v_{ds}^* \sin \theta_e \\ v_{dse}^* &= v_{qs}^* \sin \theta_e + v_{ds}^* \cos \theta_e \end{aligned} \quad (31)$$

3. 시뮬레이션

제한한 방법의 타당성을 검증하기 위해 Matlab/Simulink를 이용하여 시뮬레이션은 수행하였고 그 성능을 간접벡터제어 기법과 비교 하였다. 표 1은 시뮬레이션에 사용된 도시철도용 유도전동기 사양과 상수이다. 시뮬레이션 조건은 1500[rpm]을 유지하면서 0. 정격자속의 60%[Nm]의 부하를 구형파 형태로 가하였다. 표2는 유도전동기 상수를 독립적으로 변화시키면서 시스템의 응답특성 중 속도, 전류, 토크에 악영향 미치지 않는 최대허용 범위를 구한 것이다. 결과는 간접 벡터제어 기법과 제안한 벡터제어기법의 비교표에서 볼 수 있듯이 유도전동기 인덕턴스의 변화 허용범위는 간접 벡터기법이 조금 더 넓게 나타났다. 고정자 저항값 R_s 변동에 대해 두 방식 모두 거의 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 하지만 회전자 저항값 R_r 변동에 대해서는 제안한 벡터제어기법이 보다 넓은 변동범위를 허용했다. 그림 2는 간접벡터제어시 회전자 저항값 R_r 의 30% 감소한 값으로 고정시켰을 경우 시험결과를 나타낸다. 저항값 변화로 인하여 회전자 자속각을 적절히 추정하지 못하여 속도, 전류, 토크 등에 과도한 출렁임이 발생하였다. 그림 3은 동일한 조건에서 제안하는 방법에 의한 출력결과로 속도, 전류, 토크 등에 출렁임이 없는 좋은 결과를 보여주고 있다.

표 1. 유도전동기 사양 및 상수

정격출력	240[kW]
정격전압 (V_{rate})	1100[V]
정격전류	130[A]
정격주파수 (f_{rate})	66.5[Hz]
정격속도	1945[rpm]
정격토크	1150[N·m]
고정자저항 (R_s)	0.0855[Ω]
회전자저항 (R_r)	0.1514[Ω]
고정자인덕턴스 (L_s)	44.716[mH]
회전자인덕턴스 (L_r)	43.86[mH]
상호인덕턴스 (L_m)	42.76[mH]
극수 (P)	4극
모터관성 (J_m)	0.3[kg·m ²]

그림 4는 간접벡터제어시 회전자 저항값 R_r 의 400% 증가한 값으로 고정시켰을 경우 시험결과를 나타낸다. 역시 저항값 변화로 인하여 회전자 자속각을 적절히 추정하지 못하여 속도에서 높은 주파수의 작은 진동, 더 많은 전류필요, 토크에서 높은 주파수의 과도한 진동이 발생하였다. 그림 5는 동일한 조건에서 제안하는 방법에 의한 출력결과로 속도, 전류, 토크 등에 출렁임이 없는 좋은 결과를 보여주고 있다.

표 2. 시뮬레이션 결과

유도전동기 상수	변동 허용범위	
	간접벡터제어	제안한 벡터제어
고정자저항 (R_s)	2500~0%	700~0%
회전자저항 (R_r)	200~60%	400~5%
고정자인덕턴스 (L_s)	113~94%	106~94%
회전자인덕턴스 (L_r)	118~94%	106~94%
상호인덕턴스 (L_m)	103~91%	103~97%

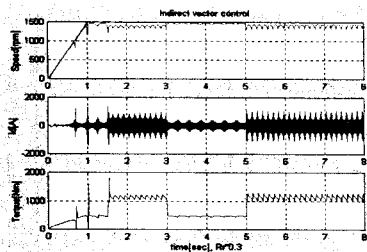


그림 2. $R_r \times 0.3$ 경우 간접벡터제어

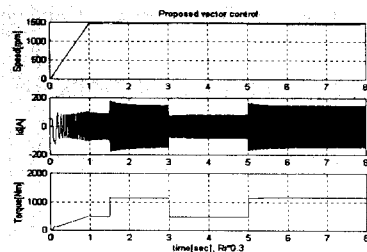


그림 3. $R_r \times 0.3$ 경우 제시한 벡터제어

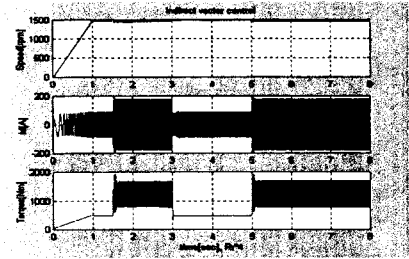


그림 4. $R_r \times 4$ 경우 간접벡터제어

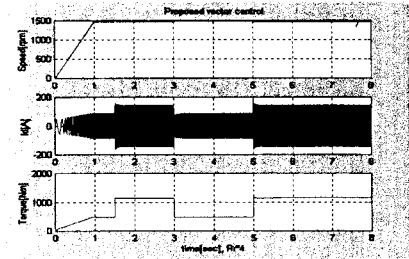


그림 5. $R_r \times 4$ 경우 제시한 벡터제어

4. 결론

본 논문에서는 유도전동기 벡터제어에 있어서 난점으로 제시되고 있는 온도 변화에 따른 회전자 및 고정자 저항값 변동에 영향을 받지 않는 새로운 회전자 자속각 추정기법을 제시하였다. 기존의 간접벡터제어 및 직접벡터제어에 있어서 회전자 자속각 추정시 직간접적으로 영향을 받아온 회전자 및 고정자 저항값을 배제시킴과 동시에 자속각 계산시 전동기 회전속도를 필요로 하지 않음으로 회전속도 오차에 의한 자속각 오차 또한 제거할 수 있었다.

[참고 문헌]

- [1] Chee-Mun Ong, "Dynamic Simulation of Electric Machinery" Prentice Hall PTR, pp.433-440
- [2] Jong-Jin Jung, Deuk-Kee Lee, Heung-Geun Kim "Direct Vector Control of Induction Motor with Compensator of Stator Resistance", Trans. KIEE, Vol 48B, No 10, OCT 1999, pp. 555-561
- [3] Scott Wade, "Modeling and Simulation of Induction Machine Vector Control with Rotor Resistance Identification", IEEE Transactions on Power Electronics, VOL 12, NO. 3, MAY 1997, pp.495-505