

직류전류 주입법에 의한 벡터제어 유도전동기의 회전자 시정수 보상

이경주, 남현택, 최종우, 김홍근, 이득기*, 전태원**, 노의철***
 경북대학교, *구미1대학, **울산대학교, ***부경대학교

Rotor Time Constant Compensation for Vector-Controlled IM
 with DC Current Injection Method

K. J. Lee, H. T. Nam, J. W. Choi, H. G. Kim, D. K. Lee*, T. W. Chun**, E. C. Nho***
 Kyungpook Nat. Univ., *Kumi 1 College, **Ulsan Univ., ***Pukyong Nat. Univ.

Abstract - To obtain a high performance in a vector controlled induction machine, it is essential to know the instantaneous position of the rotor flux which depends on the rotor time constant. But the rotor time constant mainly varies due to the temperature rise in the motor winding, so real time compensating algorithm is necessary. This paper proposes that it uses short duration pulses added to the constant flux command current and then resultant torque command current produced by speed controller is utilized for the rotor resistance estimation. This method has advantages with a low computational requirement and does not require voltage sensors. The proposed method is proved by simulations.

1. 서 론

고속 응답과 정밀한 속도제어가 필요한 산업용 전동기 구동시스템에서 벡터제어를 기본으로 하는 고성능 유도전동기 구동시스템이 널리 이용되고 있다. 유도전동기의 고성능 벡터제어를 위해서는 유도전동기의 회전자 자속 벡터의 정확한 위치정보가 필요하며, 이는 고정자전류 토크와 자속성분 전류로 분리하여 독립적으로 제어하는데 이용된다. 슬립주파수를 계산하여 회전자 자속벡터의 위치를 파악하는 간접 벡터제어의 경우, 회전자 시정수가 성능에 큰 영향을 미치는데 회전자 시정수를 잘못 설정하는 경우에는 회전자 자속벡터를 잘못 추정하게 되어 토크와 자속성분 간의 상호간섭과 과도상태에서 제어 성능의 저하를 초래한다.

일반적으로 유도전동기 파라미터 설정에 관한 연구는 유도전동기 간접 벡터제어에 가장 큰 영향을 미치는 회전자 시정수에 집중되어왔다. 전동기 파라미터 설정 방식은 운전 초기에 오프라인으로 필요한 파라미터를 설정하는 방식과 운전 중에 파라미터를 추정하는 온라인방식으로 크게 나눌 수 있다. 오프라인방식에는 고정자에 인가하는 전류를 이용하는 방법, 자화 인덕턴스의 변동을 고려한 방법, 자기 동조방식^[1] 등이 있다. 온라인방식은 유도전동기 파라미터를 운전상태와 온도에 따른 변동 등을 고려할 수 있다는 장점이 있는데, 입력 전력의 차이를 이용하는 방법, 공극전력을 이용하는 방법 등이 연구되었으나 이는 시스템 동특성에 예기치 못한 간섭이 발생할 수 있는 단점이 있다. MRAS 기법을 이용한 방법^[2]과 확장된 칼만 필터(EKF)를 이용하는 방법^[3]은 계산시간이 많으며 구현이 어려운 단점을 가지고 있다.

본 논문에서는 간접 벡터제어 시스템에서 회전자 시정수를 실시간 보상하는 유도전동기 벡터제어 시스템을 제안하였다. 제안한 방법은 자화전류 지령에 짧은 폭의 펄스를 인가하여 과도 시에 발생하는 도크성분 전류 지령의 변화를 이용하여 회전자 저항을 실제값으로 보상하는 방법이다. 제안한 방법을 적용한 시뮬레이션을 통해 회

전자 시정수의 실시간 보상과 유도전동기의 동특성 개선을 확인하였다.

2. 유도전동기의 벡터제어

2.1 유도전동기의 모델링

동기속도 회전좌표계에서의 유도전동기 등가회로는 그림 1과 같으며, 전압 방정식은 식(1)~식(4)에 나타내었다.

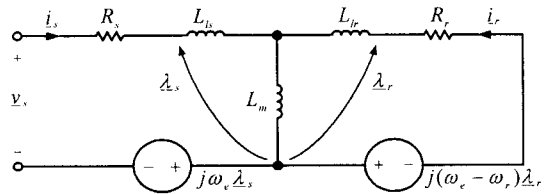


그림 1. 동기속도 회전좌표계에 대한 유도전동기의 등가회로

$$v_s = R_s i_s + p \lambda_s + j \omega_e \lambda_s \quad (1)$$

$$0 = R_r i_r + p \lambda_r + j(\omega_e - \omega_r) \lambda_r \quad (2)$$

$$\lambda_s = L_s i_s + L_m i_r \quad (3)$$

$$\lambda_r = L_r i_r + L_m i_s \quad (4)$$

단, p : 미분연산자, ω_e : 동기 각속도, ω_r : 회전자 각속도

회전자 자속벡터를 동기속도 회전좌표계의 d 축과 일치시키는 회전자 자속 기준 제어에서는 $\lambda_{dr} = |\lambda_r|$, $\lambda_{qr} = 0$ 이 되고, 이때의 자속, 슬립각속도, 발생토크는 식(5)~(7)과 같다.

$$\lambda_{dr} = \frac{1}{\tau_r} \int (L_m i_{ds} - \lambda_{dr}) dt = L_m i_{mr} \quad (5)$$

$$\omega_{sl} = \frac{i_{qs}}{\tau_r i_{mr}} \quad (6)$$

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{L_r} \frac{L_m}{L_r} \lambda_{dr} i_{qs} \quad (7)$$

단, $\tau_r = \frac{L_r}{R_r}$: 회전자 시정수, P : 극수

2.2 회전자 저항 변동에 따른 영향

간접 벡터제어에서 회전자 자속각 θ_f 는 식(6)에 의해 계산된 슬립 각속도(ω_{sl})와 회전자 각속도(ω_r)를 더한 값을 적분하여 얻어진다. 회전자 자속각 θ_f 는 슬립 각속도의 정확도에 의존하는데, 슬립 각속도 계산 시에

이용되는 회전자 시정수의 영향을 크게 받는다. 회전자 인덕턴스 L_r 의 변화를 무시하더라도, 전동기 운전 상태와 온도에 따른 회전자 저항 R_r 의 변화는 무시할 수 없다. 그림 2는 회전자 자속각의 추정이 잘못되었을 경우의 자속성분 전류와 토크성분 전류의 상호 간섭을 나타낸 것이다. 그림 2.(a)는 제어기에서 사용되는 회전자 저항값이 실제 회전자 저항값보다 큰 경우를 나타낸 것으로 슬립 각속도가 크게 추정되어 자속각의 추정값이 실제값보다 크게 되는 것을 보여주며, 그림 2.(b)는 그 반대의 경우로 자속각이 실제값보다 작은 것을 보여준다.

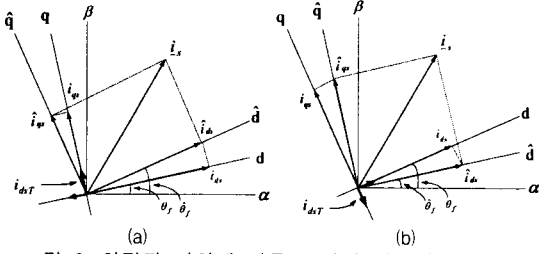


그림 2. 회전자 저항에 따른 고정자 전류성분의 변화
(a) $\hat{R}_r > R_r$ (b) $\hat{R}_r < R_r$

이와 같이 전동기의 회전자 저항과 제어기에서 사용되는 값이 다르면 슬립 각속도를 잘못 추정하게 되어 회전자 자속각의 추정값과 실제값은 일치하지 않는다. 이로 인해 고정자 전류를 자속성분과 토크성분으로 정확하게 분리할 수 없기 때문에 토크성분 전류에 의한 발생토크의 선형제어가 이루어지지 않게 된다.

3. 회전자 저항 보상 알고리즘

3.1 회전자 저항 보상

유도전동기의 간접 벡터제어 시 제어기에서 사용하고 있는 회전자 저항(추정값, \hat{R}_r)과 전동기의 실제 회전자 저항(실제값, R_r)이 일치하면 회전자 자속각을 정확하게 추정할 수 있지만, $\hat{R}_r \neq R_r$ 인 경우에는 제어기에서 추정된 회전자 자속과 실제 회전자 자속이 일치하지 않는다. 그림 2.(a)에서처럼, 추정값이 실제값보다 크면 자속성분 전류(i_{ds}^*)는 토크를 증가시키는 성분(i_{dsT})을 가지므로 토크가 증가하게 되고, 그림 2.(b)는 그 반대로 토크를 감소시키는 성분을 포함하여 토크가 감소한다. 이와 같은 원리로 회전자 저항이 일치하지 않는 경우 자속성분 전류지령에 짧은 시간동안 변화를 주면 회전자 자속은 거의 변하지 않지만, 전동기 발생 토크에는 변화가 생기게 된다. 발생 토크 변화에 따른 이를 보상하기 위한 토크성분 전류지령(i_{ds}^*)의 변화를 파악하여 회전자 저항값을 보상할 수 있다.

그림 3은 자속성분 전류지령에 따른 속도제어기 토크성분 전류지령의 관계를 나타낸 것이다. 자화 전류지령(i_{ms}^*)에 짧은 시간의 펄스를 인가하였을 때, 추정값이 실제값보다 작은 경우 펄스의 시작 부분에서 i_{ds}^* 가 감소한 후 펄스 끝 부분에서 증가한다. 반면에 추정값이 실제값보다 큰 경우에는 i_{ds}^* 가 증가한 후에 감소한다. 이는 속도 제어기에서 발생 토크의 변화를 보상하기 위한 토크성분 전류지령을 만들기 때문이다. 따라서, 펄스 지속에 따른 토크 변화의 극성을 파악함으로써 추정된 저항값의 실제값에 대한 대소를 판단할 수 있다.

다음은 토크 변화의 극성을 이용한 회전자 저항 추정

값을 보상하는 알고리즘이다.

1) 토크성분 전류지령(i_{ds}^*)을 세 부분에서 샘플링

a) 자속 펄스의 시작부 : 0ms ~ $i_{ds(a)}^*$

b) 자속 펄스의 끝부분 : 5ms ~ $i_{ds(b)}^*$

c) 자속 펄스 끝나고, 한 번의 지속시간후 : 10ms ~ $i_{ds(c)}^*$

2) 샘플 b)가 샘플 a)와 c)보다 큰 경우

$$\hat{R}_r(k+1) = \hat{R}_r(k) - \Delta \hat{R}_r$$

단, $\hat{R}_r(k+1)$: 다음추정값, $\hat{R}_r(k)$: 현재추정값,

$\Delta \hat{R}_r$: 보상값

3) 샘플 b)가 샘플 a)와 c)보다 작은 경우

$$\hat{R}_r(k+1) = \hat{R}_r(k) + \Delta \hat{R}_r$$

4) 이 과정을 100ms 주기마다 1)번부터 반복해서 수행

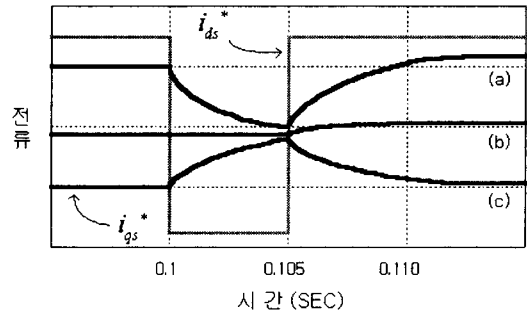


그림 3. 자속전류지령동안의 속도제어기 토크전류지령
(a) $\hat{R}_r < R_r$, (b) $\hat{R}_r = R_r$, (c) $\hat{R}_r > R_r$

3.2 회전자 저항 보상 알고리즘의 개선

3.1절에서 제시한 회전자 저항 알고리즘을 사용하면 보상에 느린 수렴시간이 문제이고, 일정한 증분값($\Delta \hat{R}_r$)을 사용하므로 정상상태에서 수렴하지 못하는 문제점을 가지는데, 이를 개선시켜 주기위해 회전자 저항의 보상값을 세 부분의 샘플값들간의 차이에 따른 가변값으로 만들어 준다.

$$\Delta \hat{R}_r = \frac{\Delta i_{ds}^*}{\Delta i_{ds_{max}}^*} \Delta R_{max} \quad (8)$$

$$\Delta i_{ds}^* = \frac{1}{2} [(i_{ds(a)}^* - i_{ds(b)}^*) + (i_{ds(c)}^* - i_{ds(b)}^*)] \quad (9)$$

$$\hat{R}_r(k+1) = \hat{R}_r(k) + \Delta \hat{R}_r \quad (10)$$

단, ΔR_{max} : 최대 스텝값,

$\Delta i_{ds_{max}}^*$: 토크성분 전류지령 최대값

개선된 알고리즘을 적용하면, 실제값과 추정값의 오차에 따라 수렴속도가 빨라지게 된다.

4. 시뮬레이션 및 실험 결과

4.1 시스템 구성

본 논문에서 제안한 회전자 저항 보상 알고리즘을 갖는 유도전동기 간접 벡터제어 시스템의 타당성을 검증하기 위해 ACSL을 이용한 시뮬레이션과 실험을 수행하였다. 그림 4는 제안한 알고리즘을 적용한 유도전동기 간접 벡터제어 시스템 블록도를 나타낸 것이고, 표 1은 유도전동기의 정격과 파라미터값을 나타낸 것이다.

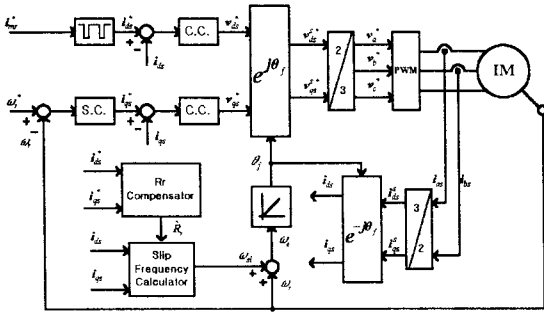


그림 4. 유도전동기 벡터제어 시스템 블록도

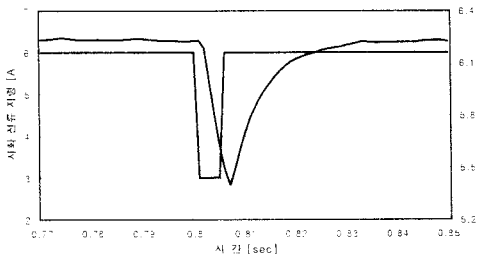
표 1. 유도전동기 정수 및 정격

정격출력	2.2 [kW]	R_r	0.816 [Ω]
정격전압	220 [V]	L_s	71.312 [mH]
정격전류	8.8 [A]	L_r	71.312 [mH]
극 수	4	L_m	69.312 [mH]
R_s	0.435 [Ω]	J	0.1 [$\text{kg} \cdot \text{m}^2$]

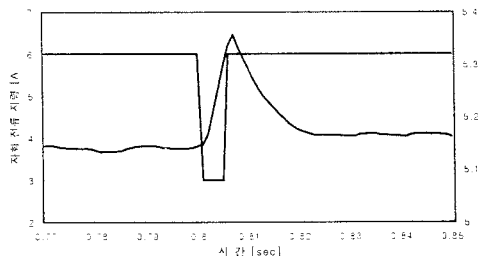
4.2 시뮬레이션 결과

그림 5는 자속성분 전류지령에 짧은 폭의 펄스를 인가하였을 때, 회전자 저항 추정값이 실제값보다 작은 경우와 큰 경우 각각의 토크성분 전류지령의 과도 특성을 보인 것으로, 그림에서와 같이 작은 경우에는 i_{0s}^* 가 감소했다가 다시 증가하는 반면에, 큰 경우에는 증가했다가 감소하는 것을 확인할 수 있다.

그림 7은 전동기 속도 1000[rpm]에서 회전자 저항이 실제값의 0.5배와 1.5배인 경우를 가정하여 회전자 저항을 추정한 결과이다. 보상 알고리즘을 1초 후부터 적용하였으며, 회전자 저항 추정값이 실제값으로 빠르게 수렴하였다. 실제값과 추정값의 차이가 큰 초기에는 보상값이 크지만, 실제값에 수렴할수록 보상값이 작아져 정상 상태에서 맥동 없이 수렴함을 볼 수 있다.

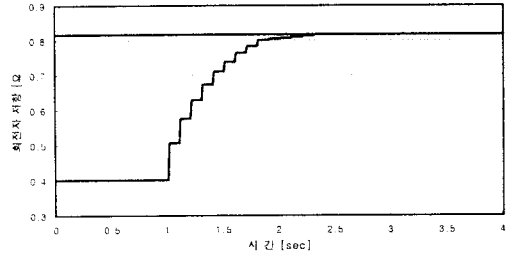


(a) $\widehat{R}_r < R_r$

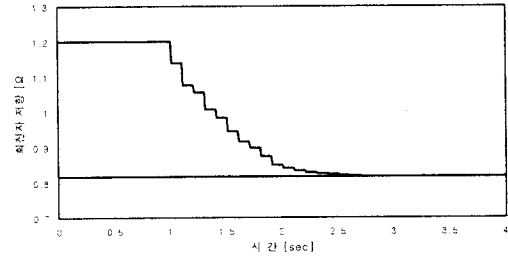


(b) $\widehat{R}_r > R_r$

그림 6. 자화전류 지령변화에 대한 토크전류 지령의 과도 응답



(a) $\widehat{R}_r < R_r$



(b) $\widehat{R}_r > R_r$

그림 7. 정상상태시 회전자 저항 추정 특성(1000 (rpm))

5. 결 론

본 논문에서는 유도전동기의 간접 벡터제어에서 회전자 저항의 변화가 시스템의 특성에 미치는 영향을 해석하고, 온도 변화에 따른 회전자 저항의 변화를 실시간으로 추정하여 보상하는 알고리즘을 제안하였다.

제안한 알고리즘은 기존 시스템에 별도의 하드웨어를 추가하지 않고 소프트웨어의 추가만으로 회전자 시정수를 실시간 보상한다. 사용된 회전자 저항 보상 알고리즘은 제어기의 자화 전류지령에 짧은 폭의 펄스를 인가하고 이에 따른 토크성분 전류지령의 변화를 이용하여 회전자 저항을 실제값으로 보상하는 알고리즘이다. 알고리즘 적용 시, 회전자 저항이 완전히 동조되면 인가한 짧은 폭의 전류는 발생 토크에 영향을 미치지 않으며, 기존의 추정기들에 비해 훨씬 적은 계산량을 가지는 장점이 있다. 제안한 알고리즘의 타당성을 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

본 연구는 한국전력공사의 지원에 의하여 기초전력공학 공동연구소 주관으로 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

- (1) M. Summer and G.M. Asher, "Autocommissioning for voltage-referenced voltage-fed vector-controlled induction motor drives," *IEE Proceedings-B*, vol. 140, No.3, May 1993.
- (2) T.M. Rowan, R.J. Kerman, and D. Leggate, "A Simple On-Line Adaption for Indirect Field Orientation of an Induction Machine," *IEEE-IAS Annu. Meet. Conf. Rec.*, pp.579-587, 1989.
- (3) L. Loran, G. Laliberte, "Application of the Extended Kalman Filter to Parameters Estimation of Induction Motors," *Conf. Rec. EPE'93*, pp.85-90, 1993.