

### 고정자 저항의 변동에 강인한 유도전동기의 직접 벡터제어

정종진\* 김진규\*\* 이득기\*\*\* 김흥근\*\*\*  
\*성덕대학 \*\*대구공업대학 \*\*\*경북대학교 전기공학과

### Robust Direct Vector Control of Induction Motor for Variation of stator Resistance

Jong-Jin Jung\* Jin-Kyu Kim\*\* Deuk-Kee Lee\*\*\* Heung-Geun Kim\*\*\*

\*Sungduk College \*\*Taegu Technical College \*\*\*Dept. of Electrical Eng. Kyungpook Natl. Univ.

**Abstract** - In this paper, the compensation algorithm of the stator resistance which is essential to improving the performance of the direct vector control system is proposed. This paper focuses on the improvement in the torque response of the direct vector control in a constant speed region. The conventional compensation algorithms are analyzed and a new method is developed to compensate the stator resistance in the direct vector control system. In addition, the effect of the variation of the stator resistance on the drive performance is analyzed for the vector control. The proposed algorithm is very simple to implement that does not require the modifications on the motor model or additional interrupts of the controller. Also, the value of the stator resistance can be obtained in real-time through the measurement of the terminal voltage and current.

From the simulation and experimental results, the validity of the proposed scheme is confirmed.

### 1. 서 론

산업의 발전과 더불어 생산성이나 품질의 향상을 목적으로 전동기 가변속 구동에 대한 필요성이 증대되고 있다. 유도전동기는 직류기에 비해 기계적으로 구조가 간단하고 견고하며 신뢰성이 높다. 또한 동급의 직류기에 비해 부피가 작고 큰 출력을 낼 수 있도록 설계할 수 있으며 유지와 보수를 거의 필요로 하지 않는다[1]. 그러나 유도전동기를 직류전동기에 비해 널리 사용하지 않는 이유는 가변속 운전을 위한 주파수 변환장치를 포함한 전체 구동 시스템의 가격이 고가이며 제어가 복잡하기 때문이다. 마이크로프로세서의 출현에 의한 전력전자 기술의 비약적인 발전으로 저가격, 고속·고신뢰성의 주파수 변환장치의 개발이 가속화되었고, 유도전동기의 가변속 구동 성능 또한 향상되었다[2,3].

유도전동기의 가변속 구동 시스템은 일반적으로 펌프나 압축기, 공작기계 등에서의 정속도 운전 또는 품질 향상을 위한 공작기계의 정토크와 최적 속도 운전, 금속 가공 기계의 고속운전 등의 요구 조건에 따라 여러 분야에서 사용되고 있다[4]. 특히 공작기계에서 NC선반, 수직선반, 연삭기의 스톨 구동, 평면 연삭기 등은 품질 향상을 위해 고속화되고 있고, 정밀한 정속도 제어와 정토크 제어가 요구되고 있다. 그러나 이러한 품질향상을 위한 정밀제어가 요구되는 곳에서의 유도전동기 구동 시스템은 장시간 운전할 경우 전동기의 상수가 변하게 되며 특히 고정자 저항과 회전자 저항의 경우는 전동기 온도에 따라 변하게 되므로 이는 정토크, 정속도 운전 등 벡터제어의 동특성을 저하시키는 원인이 된다.

따라서 전동기 상수 변화에 따른 유도전동기 구동 시스템의 동특성 저하 문제를 해결하기 위해서는 전동기 상수의 정확한 동정과 보상에 관한 연구가 필요하다. 이 연구에서는 고정자 저항을 추정하기 위해 별도의 하드웨어를 추가하지 않고 단지 유도전동기 전압 방정식으로부터 고정자 저항의 변화를 보상할 수 있는 알고리즘을 유도하고 이를 구현함으로써 고정자 저항의 변동에 강인한 유도전동기 구동 시스템을 제안하고자 한다.

### 2. 본 론

#### 2.1 고정자 저항 변동에 따른 영향

직접 벡터제어는 회전자 자속을 직접 측정하여 사용하거나 전동기의 전압, 전류, 속도를 측정하여 회전자 자속을 추정하는 방법 등이 있는데 자속을 직접 측정하는 방법은 전동기 상수의 변화에 강인한 면이 있으나 홀스자 등의 자속센서를 취부해야 하는 단점이 있고, 자속을 추정하는 방법은 전동기 상수의 변화에 민감하다는 단점이 있다. 특히 고정자 저항과 회전자 저항의 경우는 전동기 온도에 따라 변하게 되므로 이들의 변화에 의해 정확한 자속 추정의 어려움이 따른다. 따라서 근래에는 칼만필터[5,6], MRAC(Model Reference Adaptive Control)[7,8], 관측기 등의 제어이론을 사용하여 회전자 자속을 추정하는 연구가 활발하다.

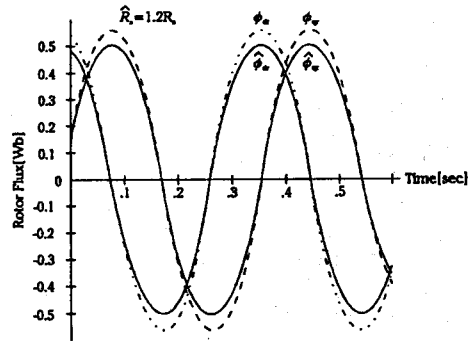


그림 1. 고정자 저항의 변동시 회전자 자속의 변화

특히, 고정자 저항의 변동은 간접 벡터제어에는 별다른 영향을 미치지 않지만 직접 벡터제어에는 자속 추정에 큰 영향을 미친다. 전압과 전류를 이용해 자속을 추정하는 경우 고정자 저항의 변동은 회전자 자속을 변화시키게 되며 그림 1은 고정자 저항이 변동되었을 때의 회전자 자속의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 것처럼 고정자 저항의 변화로 회전자 자속이 변하는 것을 볼 수 있다.

고정자 저항의 변동으로 인해 회전자 자속에는 오차가 수반되고 이 오차가 수반된 자속을 벡터제어에 사용함으로써 유도전동기 구동시스템의 특성 저하, 특히 원하는

토크를 발생시키지 못하게 된다. 그러므로 전압과 전류를 이용한 회전자 자속의 추정에는 고정자 저항의 변동에 따른 보상이 수반되어야 한다.

### 2.2 고정자 저항의 보상

유도전동기의 직접 벡터제어 시스템에서 제어 알고리즘에서 사용하고 있는 고정자 저항과 실제 전동기의 값이 일치한다면 정확한 회전자 자속각의 추정이 이루어지고 따라서  $\lambda_{dr} = |\lambda_r|$ ,  $\lambda_{qr} = 0$ 의 조건을 만족하게 된다. 따라서,  $\lambda_{dr} = |\lambda_r|$ ,  $\lambda_{qr} = 0$ 이 되도록 고정자 저항을 보상하면 고정자 저항의 실시간 보상이 가능해져 고정자 저항의 변화로 인해 발생한 회전자 자속의 오차를 제거할 수 있게 되어 유도전동기 구동 시스템의 동특성을 향상시킬 수 있다.

유도전동기의 전압 방정식을 동기좌표계에서의  $d-q$  식으로 표현하면 다음과 같다.

$$v_{ds} = R_s i_{ds} + p\lambda_{ds} - \omega_e \lambda_{qs} \quad (1)$$

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + p\lambda_{qs} + \omega_e \lambda_{ds} \quad (2)$$

$$v_{dr} = R_r i_{dr} + p\lambda_{dr} - (\omega_e - \omega_{sl}) \lambda_{qr} \quad (3)$$

$$v_{qr} = R_r i_{qr} + p\lambda_{qr} + (\omega_e - \omega_{sl}) \lambda_{dr} \quad (4)$$

식(1)과 (2)의 고정자 전압방정식을 고정자 전류와 고정자 자속, 회전자 자속으로 표현하고 이를 정상상태에서 해석하게 되면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_{ds} = R_s i_{ds} - \omega_e \frac{L_m}{L_r} \lambda_{qr} - \omega_e \sigma L_s i_{qs} \quad (5)$$

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + \omega_e \frac{L_m}{L_r} \lambda_{dr} + \omega_e \sigma L_s i_{ds} \quad (6)$$

식(5)와 식(6)의  $\lambda_{dr}$ ,  $\lambda_{qr}$ 에서 이 두 식을 앞에서 서술한 두 조건, 즉  $\lambda_{dr} = |\lambda_r|$ ,  $\lambda_{qr} = 0$ 을 만족하도록 제어 알고리즘을 구성하여 이의 출력을 고정자 저항의 보상값으로 취한다. 그러나 이 두 식에는 고정자 저항의 항이 포함되어 있으므로 고정자 자속 추정 알고리즘에서의 고정자 저항의 보상과 동시에 보상의 고정자 저항도 함께 변화하게 되어 올바른 제어가 되지 못한다. 따라서 식(5)와 식(6)의 두 식에서 고정자 저항의 항을 소거하여 위의 조건을 만족하도록 정리하면 식(7)과 같다.

$$\lambda_{dr} i_{ds} = A(v_{qs} i_{ds} - v_{ds} i_{qs}) - B(i_{ds}^2 + i_{qs}^2) \quad (7)$$

여기서,  $A = \frac{L_r}{\omega_e L_m}$ ,  $B = \frac{\sigma L_s L_r}{L_m}$ 이다.

또한  $\lambda_{dr}$ 은 정상상태에서는

$$\lambda_{dr} = L_m i_{ds} \quad (8)$$

이므로 식(8)의 좌변은  $L_m i_{ds}^2$ 이 된다. 그러므로 이 좌변의 값을 기준치로 하여 제어기내에서 연산된 값과 비교하여 고정자 저항을 보상한다.

그림 2는 고정자 저항의 보상 블록도를 나타낸다. 고정자 전압과 전류, 동기 각속도를 이용하여 식(7)로  $L_m i_{ds}^2$ 를 계산하고 이를 기준치와 비교하여 얻은 오차 신호를 사용하여 고정자 저항의 보상분  $\Delta R_s$ 를 PI제어를 통하여 구한다. 이 값과 제어기가 사용하였던 고정자 저항  $R_{s(n)}$ 을 더하여 제어기가 사용할 새로운 고정자 저항  $R_{s(n+1)}$ 을 구한다.

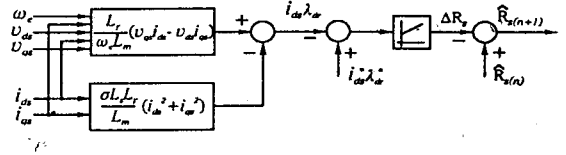


그림 2. 고정자 저항의 보상 블록도.

### 2.3 시뮬레이션 및 실험 결과

제시한 고정자 저항 보상 알고리즘을 갖는 유도전동기 직접 벡터제어 시스템의 타당성을 검증하기 위해 실험에 앞서 디지털 시뮬레이션을 실행하였다. 시뮬레이션에 사용한 전동기의 정격과 상수값은 표 1과 같으며 실제 실험에 사용한 전동기의 값들이다.

그림 3은 전동기 속도가 300 rpm의 정상상태에서 고정자 저항을 2배로 증가시킨 후 8초에서 보상 알고리즘을 적용하였을 때의 파형으로 (a)는 고정자 저항의 추정 특성을 나타내고, (b)는 토크 보상 특성을 나타내는데 제시한 고정자 저항의 보상 알고리즘은 고정자 저항이 스텝으로 변화더라도 제어기가 실시간으로 고정자 저항을 추정함을 알 수 있으며 토크도 실시간으로 보상됨을 알 수 있다. 그림 4는 전동기 속도가 500 rpm에서 보상 알고리즘을 적용하였을 때의 파형으로 300 rpm일때와 같은 우수한 응답 특성을 나타내고 있다. 속도가 증가함에 따라 토크의 감소는 줄어들었는데 이는 전동기 속도가 증가함에 따라 고정자 저항의 전압강하에 비해 역기전력이 커지게 되어 고정자 저항의 변화로 인한 토크 오차는 감소하는 것으로 해석된다.

그림 5는 실험 파형으로 500 rpm에서 고정자 저항을 2배로 변화시켰을 경우에 보상 알고리즘을 적용하여 고정자 저항을 추정하고 이를 보상하는 응답 특성이다. (a)는 고정자 저항의 파형으로 저항이 2배로 되었다가 보상 알고리즘이 수행되면서 실시간으로 보상되어 본래의 고정자 저항값으로 수렴한다. (b)는 고정자 저항의 변화로 감소된 토크가 보상 알고리즘이 동작하면서 토크 오차가 0으로 수렴하여 제안한 보상기는 우수한 동특성을 가지고 정확히 동작하고 있음을 알 수 있다.

표 1. 유도전동기 상수와 정격

정격출력	2.2 [kW]	$R_r$	0.3061 [ $\Omega$ ]
정격전압	220 [V]	$L_s$	82.95 [mH]
정격전류	8.7 [A]	$L_r$	82.95 [mH]
극 수	4	$L_m$	79.65 [mH]
		$R_s$	0.8201 [ $\Omega$ ]
		$J$	0.03 [kg·m <sup>2</sup> ]

### 3. 결 론

이 연구에서는 유도전동기의 직접 벡터제어에서 고정자 저항의 변화가 시스템의 특성에 미치는 영향을 해석하고, 온도 변화에 따른 고정자 저항의 변화를 실시간으로 추정하여 보상하는 제어 알고리즘을 제시하였다. 시뮬레이션을 통해 제시된 알고리즘의 가능성을 확인하였고 2.2 kW급 유도전동기 구동시스템을 제작하여 실험을 통해 제안한 방법의 타당성을 입증하였다.

시뮬레이션과 실험을 통해 고정자 저항의 변화가 직접 벡터제어 시스템에 미치는 영향을 분석, 검토하였고 고정자 저항이 변동되었을 경우의 토크 변화, 자속의 변화 등을 고찰하여 이들의 특성들이 고정자 저항의 변화와 어떤 관계가 있는지를 해석하였다. 제안한 보상 알고리즘을 적용함으로써 고정자 저항의 변화로 발생한 토크 오차, 자속 오차, 전류 오차 등을 보상하여 시스템의 특성을 향상시켰다.

(참고 문헌)

- [1] P. Vas, *Vector Control of AC Machine*, Clarendon Press, 1990.
- [2] W. Leonhard, "Microcomputer Control of High Dynamic Performance," *Automatica*, Vol. 22, pp. 1-19, 1986.
- [3] K. Kenzo, O. Tsutomu and S. Takashi, "Application Trends in AC Motor Drive," *IEEE IECON'92*, pp. 31-36, 1992.
- [4] 미쓰비시 電氣株式會社, *인버터 응용 매뉴얼*, 다기사, 1990.
- [5] G. Henneberger, B. J. Brunsbach, T. Klepsch, "Field Oriented Control of Synchronous and Asynchronous Drives without Mechanical Sensors using a Kalman Filter," *Conf. Rec. EPE'91*, Vol. 3, pp. 664-671.
- [6] Y. R. Kim, S. K. Sul, M. H. Park, "Speed Sensorless Vector Control of an Induction Motor using an Extended Kalman Filter," *Conf. Rec. IEEE-IAS'92*, pp. 594-599.
- [7] C. Schauder, "Adaptive Speed Identification for Vector Control of Inverter-fed Induction Machine, a Basis for Speed Control without Speed-Measurements," *Conf. Rec. IEEE-IAS'89*, pp. 486-492.
- [8] H. Tajima, Y. Hori, "Speed Sensorless Field Orientation Control of the Induction Machine," *Conf. Rec. IEEE-IAS'91*, pp. 385-391.

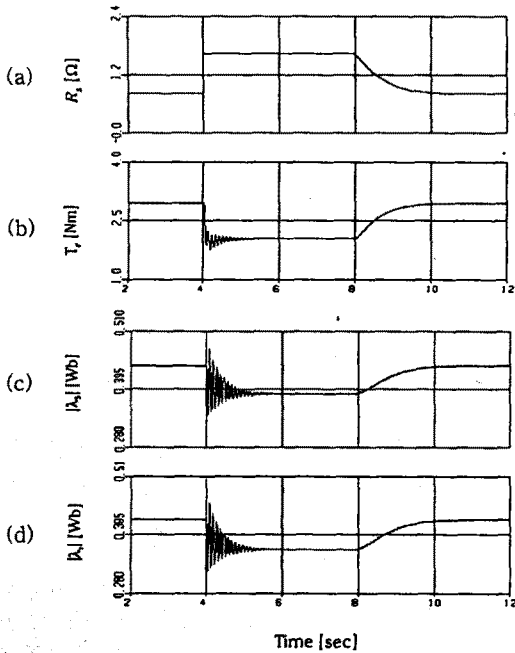


그림 3. 고정자 저항의 변화에 대한 보상 특성

(300 rpm,  $2.0 \times R_s$ )

(a) 고정자 저항 (b) 토크

(c) 고정자 자속의 크기 (d) 회전자 자속의 크기

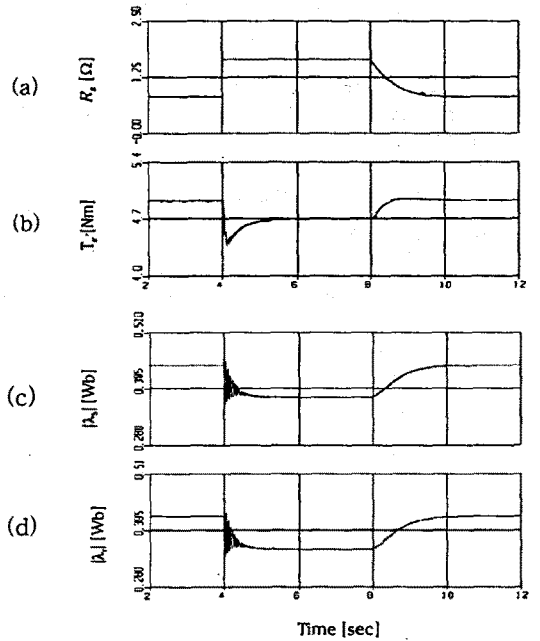


그림 4. 고정자 저항의 변화에 대한 보상 특성

(500 rpm,  $2.0 \times R_s$ )

(a) 고정자 저항 (b) 토크

(c) 고정자 자속의 크기 (d) 회전자 자속의 크기

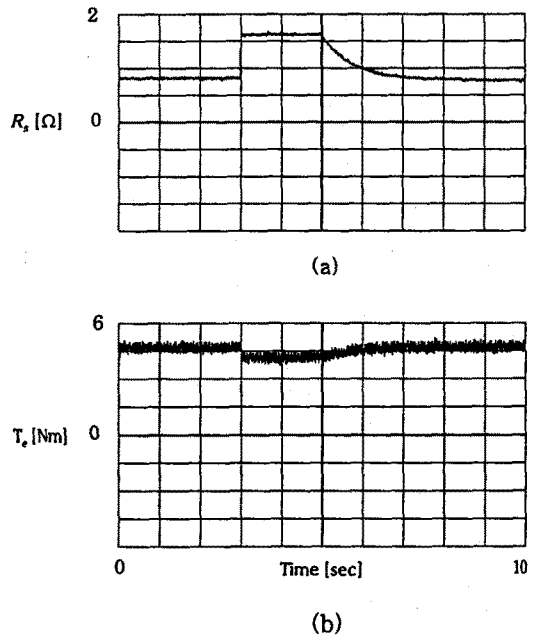


그림 5. 고정자 저항의 변화에 대한 보상 특성

(500 rpm,  $2.0 \times R_s$ )

(a) 고정자 저항 (b) 토크