

유도전동기의 속도 추정 벡터제어에 관한 연구

설승기 권봉현 강준구*

금성산전(주) 연구소

A STUDY ON THE VECTOR CONTROL OF INDUCTION MOTOR
BASED ON SPEED ESTIMATION

Seung Ki Sul Bong Hyun Kwon Jun Koo Kang

GoldStar Industrial Systems Co., Ltd.

ABSTRACT-In the vector controlled induction machine drives, mechanical speed sensors such as shaft encoder and resolver have been used. However, the mechanical speed sensors present some problems and restrict the wide applications of high performance AC drives. This paper describes the vector control strategy with the speed estimation algorithm in which motor slip frequency is calculated. Also, the angle deviation of the rotor flux vector is calculated and instantaneously compensated to keep the q axis flux zero in the rotary reference frame.

2. 유도전동기의 기본제어 방정식

동기속도로 회전하는 회전좌표계에서 유도전동기의 전압 방정식은 식 (1) 과 같다.

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + L_s p & -L_s \omega_s & L_m p & -L_m \omega_s \\ L_s \omega_s & R_s + L_s p & L_m \omega_s & L_m p \\ L_m p & -L_m \omega_s & R_r + L_r p & -L_r \omega_s \\ L_m \omega_s & L_m p & L_r \omega_s & R_r + L_r p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} \quad (1)$$

1. 서 론

산업전자 분야의 급속한 발전과 함께 벡터제어를 이용한 유도 전동기의 고성능 제어도 그 응용영역이 광범위해지고 있다.

종래의 벡터제어에서는 전동기의 속도정보를 엔코더, 레졸버 등의 속도측정 장치를 부착하여 제어를 하는 방법 등이 널리 사용되어왔다. 그러나 속도측정 장치는 1)제품가격이 비싸고, 2)전동기와 커플링이 어렵고 설치환경에 민감하며, 3)인버터와 전동기가 멀리 떨어져 있을 때 전기적 노이즈에 취약한 문제점 등을 가지고 있기 때문에 유도전동기에 벡터제어를 쉽게 적용하는 데에 큰 제한요소로 작용해왔다.

근래에 위와 같은 문제점을 해결하기 위해 속도측정 장치를 사용하지 않고 전동기 속도를 추정하여 벡터제어를 하는 방법이 연구되어 왔다. 대부분의 경우, 전동기의 전압과 전류가 측정되고 이를 통하여 추정속도가 계산되어지는데 MRAS 방식이나 자속위상 보정 방식등으로 전동기의 2차속 자속을 계산하는 과정을 통하여 속도를 얻어내는 방법과 전동기의 슬립 속도를 추정하여 속도를 얻는 방법, 토모르 성분 전류의 오차를 PI 제어하여 속도를 계산하는 방법 등이 알려져있다.

본 연구에서는 전류제어형 전압형 인버터로 전동기의 슬립각속도를 추정하여 속도제어 루우프를 구성하고 2차속 자속을 순시적으로 보정하여 q 축 성분의 자속을 영으로 유지하게 하는 자속위상 보정 알고리즘을 제안하여 벡터제어 시스템을 구성하였다.

여기서 ω_s 는 동기속도, ω_r 는 슬립속도, L_s 는 회전자속 누설분을 포함한 고정자속 인덕턴스이다.

고정자와 회전자의 자속에 관한 식을 나타내면 다음 식들과 같다.

$$\Phi_{ds} = L_s I_{ds} + L_m I_{dr} \quad (2)$$

$$\Phi_{qs} = L_s I_{qs} + L_m I_{qr} \quad (3)$$

$$\Phi_{dr} = L_m (I_{ds} + I_{dr}) \quad (4)$$

$$\Phi_{qr} = L_m (I_{qs} + I_{qr}) \quad (5)$$

식 (2)-(5) 를 식 (1)에 대입하여 전개하면 전압과 자속의 관계식 식 (6)-(9)를 얻을 수 있다.

$$V_{ds} = R_s I_{ds} + p \Phi_{ds} - \omega_s \Phi_{qs} \quad (6)$$

$$V_{qs} = R_s I_{qs} + p \Phi_{qs} + \omega_s \Phi_{ds} \quad (7)$$

$$0 = R_r I_{dr} + p \Phi_{dr} - \omega_s \Phi_{qr} \quad (8)$$

$$0 = R_r I_{qr} + p \Phi_{qr} + \omega_s \Phi_{dr} \quad (9)$$

한편 유도 전동기의 토모르식은 식 (10)으로 된다.

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{p}{L_r} (\Phi_{dr} I_{qs} - \Phi_{qr} I_{ds}) \quad (10)$$

여기서 d 축을 회전자 자속축과 일치시키면 $\Phi_{qr} = 0, \Phi_{dr} =$

Φ_{dr} 되고 식 (2)-(10)의 관계에 의하여 회전자 쇄교자속 Φ_r 및 슬립각속도 ω_s , 토오크 T_e 는 각각 식 (11), (12) (13)으로 된다.

$$\Phi_r = \frac{L_m}{1 + pT_r} i_{ds} \quad (11)$$

$$\omega_s = \frac{L_m i_{qs}}{T_r \Phi_r} \quad (12)$$

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m}{L_r} \Phi_r i_{qs} \quad (13)$$

여기서 회전자속 시정수 $T_r = \frac{L_r}{R_r}$

3. 속도 추정 벡터제어의 원리

유도전동기의 속도 ω_r 은 입력 각속도 ω_s 와 슬립 각속도 ω_s 의 차인 $\omega_s - \omega_r$ 로 나타낼 수 있으며, ω_s 는 인버터가 인가하는 각속도이므로 슬립 각속도의 추정치 ω_s^{\wedge} 를 계산하면 전동기 속도 ω_r^{\wedge} 을 추정할 수 있다.

식 (12) 에서 토오크분 실제 전류 i_{qs} 가 지령치 i_{qs}^* 와 일치하도록 제어가 이루어지면 ω_s^{\wedge} 는 식 (14) 와 같이 나타낼 수 있다.

$$\omega_s^{\wedge} = \frac{L_m i_{qs}^*}{T_r \Phi_r^{\wedge}} \quad (14)$$

따라서,

$$\omega_r^{\wedge} = \omega_s - \omega_s^{\wedge} = \omega_s - \frac{L_m i_{qs}^*}{T_r \Phi_r^{\wedge}} \quad (15)$$

4. 회전자 쇄교자속의 추정 방법

슬립 각속도 ω_s^{\wedge} 의 정확한 연산을 위해서는 회전자 쇄교자속의 정확한 추정이 중요한 문제이다.

일반적으로 고정좌표계의 d-q 축에서 본 회전자 쇄교자속은 각각 식 (16), (17) 과 같이 나타낸다.

$$\phi_{dr} = \int (V_{ds} - R_s i_{ds}) dt - \sigma L_s i_{ds} \quad (16)$$

$$\phi_{qr} = \int (V_{qs} - R_s i_{qs}) dt - \sigma L_s i_{qs} \quad (17)$$

여기서 전동기 순시 누설 인덕턴스 σL_s 는

$$\sigma L_s = L_{ls} + L_{lr} L_m / (L_{lr} + L_m)$$

위의 식들을 통하여 자속을 얻는 방법은 고속에서는 비교적 정확하지만 저속으로 갈수록 전동기의 제 정수의 영향을 크게 받게되어 온도변동에 취약하다. 또, 적분연산에 포함될 수 있는 초기 오프셋 (offset) 도 문제가 될 수 있다.

따라서 최근에는 순수적인 대신에 일차지연 필터를 사용하는 사례가 많아지고 있다.

본 연구에서도 인버터의 출력전압에 포함되는 고주파 성분을 감쇄시키면서 적분동작을 할 수 있는 일차지연 필터

를 채택한다.

회전자 쇄교자속을 다른 표현 방법으로 식 (18), (19)와 같이 나타낼 수도 있다.

$$p \phi_{dr} = -\phi_{dr} / T_r - \omega_r \phi_{qr} + (L_m / T_r) i_{ds} \quad (18)$$

$$p \phi_{qr} = -\phi_{qr} / T_r + \omega_r \phi_{dr} + (L_m / T_r) i_{qs} \quad (19)$$

회전자의 회전 각속도가 충분히 작은 경우 ω_r 을 0로 볼 수 있다. 이를 대입하여 다시 풀면 식 (20), (21)과 같다.

$$\phi_{dr} = \frac{L_m}{(1+T_r p)} i_{ds} \quad (20)$$

$$\phi_{qr} = \frac{L_m}{(1+T_r p)} i_{qs} \quad (21)$$

위의 관계를 이용하여 저속에서는 식 (20), (21)의 특성을 나타내도록 필터계수를 선정한다.

그림 1. 은 회전자 자속추정의 블록도를 나타낸다.

인버터의 출력전압에서 고정차속 전압 강하분을 빼서 회전자의 역기전력 e_{dqr} 을 계산한 후 필터 $T_c / (1+T_c p)$ 를 거치고 회전자 쇄교자속의 지령치 ϕ_{dqr}^* 가 필터 $1 / (1+T_c p)$ 를 거친 후 서로 더해지면 식 (22) 와 같다.

$$\phi_{dqr}^{\wedge} = \frac{T_c}{(1+T_c p)} e_{dqr} + \frac{1}{(1+T_c p)} \phi_{dqr}^* \quad (22)$$

식 (22) 우변의 첫째 항은 고속에서 회전자 쇄교자속을 지배하고 둘째 항은 저속에서 자속을 지배하게 되어 모든 운전영역에서 안정된 자속추정이 가능해진다.

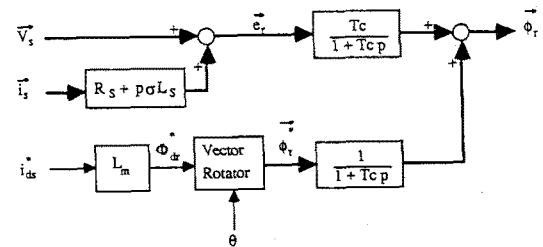


그림 1. 회전자 자속추정 블록도

5. 회전자 쇄교자속의 위상 보상

고정좌표계에서의 회전자 쇄교자속 ϕ_{dr}, ϕ_{qr} 을 회전좌표계로 변환할 때 자속의 위상 θ 를 정확히 추정하면 q축 성분의 자속 ϕ_{qr} 은 영이 되어야 한다.

자속의 위상 θ 를 추정할 때 $\Delta \theta$ 의 오차가 있다고 가정하면 회전자 자속의 벡터도는 그림 2.와 같다. 여기서 Φ_r 축은 실제 자속의 위치이고 d 축은 추정된 자속의 위치를 나타낸다. 그림에서 위상오차 $\Delta \theta$ 는 식 (23) 과 같이

나타낼 수 있다.

$$\Delta\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\Phi_{qr}}{\Phi_{dr}} \right) = \frac{\Phi_{qr}}{\Phi_{dr}} \quad (23)$$

따라서 $\Delta\theta$ 를 자속위상 (Field Angle) θ 에 더하여 보상하면 Φ_{qr} 을 영으로 유지할 수 있다.

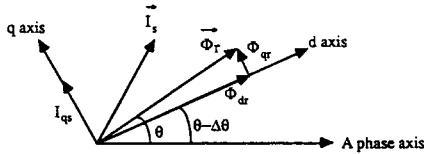


그림 2. 회전자 자속 벡터도

6. 시스템의 구성

그림 3.은 속도 추정 벡터시스템의 구성도이다.

전 연산과정은 고속 프로세서의 내부에서 이루어진다. 시스템은 크게 속도제어부, 회전자자속 연산부, 자속위상 보상부로 나눌 수 있다.

속도제어부에서는 지령속도 ω_r^* 와 추정속도 ω_r^{\wedge} 의 차를 PI 제어하여 토오크 성분전류 지령치 i_{qs}^* 를 만든다. 이때 i_{qs}^* 의 제한기를 둔다. 추정속도 ω_r^{\wedge} 은 슬립각속도 ω_s 에서 슬립각속도의 추정치 ω_s^{\wedge} 를 빼서 얻는다.

회전자자속 연산부에서는 슬립전압에서 임피던스 강하분을 빼서 회전자 역기전력 e_{dr}, e_{qr} 를 만들고 일차지연 필터를 사용하여 자속의 지령치 ϕ_{dr}^*, ϕ_{qr}^* 와 더하여 추정자속 $\phi_{dr}^{\wedge}, \phi_{qr}^{\wedge}$ 를 연산한다.

자속위상 보상부에서는 회전좌표계에서의 자속 Φ_{dr}, Φ_{qr} 을 영도 위상보상각 $\Delta\theta$ 를 연산하여 Φ_{qr} 이 영으로 유지되게 한다.

7. 시뮬레이션

속도 추정 벡터제어 알고리즘을 검증하기위한 시뮬레이션을 수행하였으며, 시뮬레이션에서는 전류제어형 인버터와 5.5 KW 유도전동기를 사용하였다.

그림 4.는 전동기의 속도 응답특성을 보인다.

그림 5.는 추정된 회전자속을 나타낸다. 그림(a)는 회전자 역기전력으로부터 일차지연 필터를 거친 파형이고 아래 그림(b)는 자속의 지령치로부터 얻은 파형, 그림(c)는 위의 두 값으로부터 얻은 회전자 자속의 파형이 된다.

8. 결 론

본 연구에서는 별도의 속도측정 장치를 사용하지 않고 전동기 회전속도를 추정하여 벡터제어 시스템을 구성하고 계특성을 검토하였다.

전동기 속도추정은 슬립각속도의 연산을 통하여 실행했으며 양호한 특성을 얻었다. 회전자속의 쇄고자속을 측정하는 방법으로 일차지연 필터를 사용하여 순수 적분기가 같은 저속에서의 문제점을 해결하고 전 운전영역에서 안정된 자속추정을 가능하게 하였다. 자속위상 보상부를 통하여 자속위상의 오차를 즉각적으로 보상할 수 있도록 하였다. 추후의 과제토 속도추정에 대한 지속적인 알고리즘 개선과 전동기 계 정수의 변동이 시스템에 미치는 영향에 대해 체계적인 규명이 요구된다.

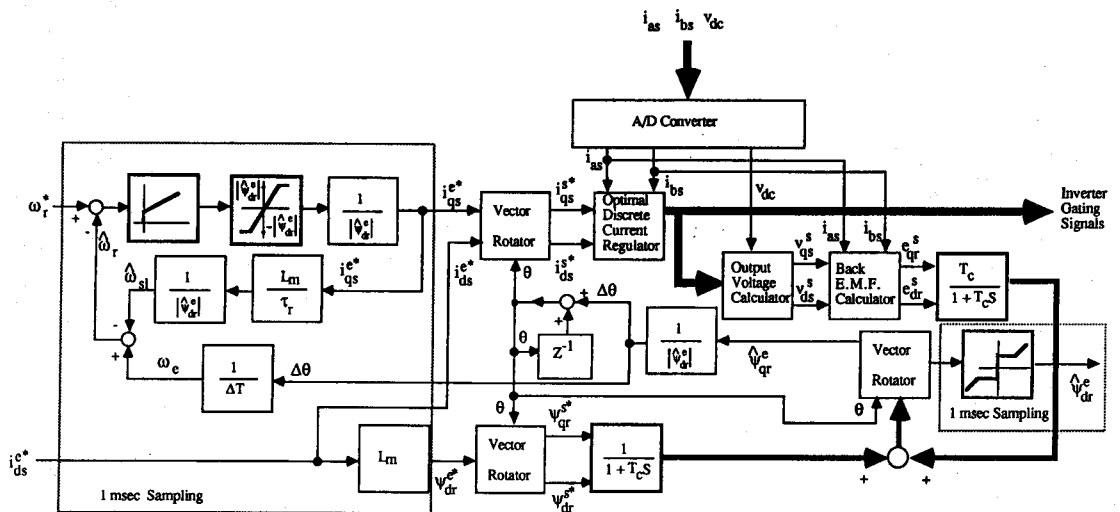


그림 3. 속도 추정 벡터시스템의 구성도

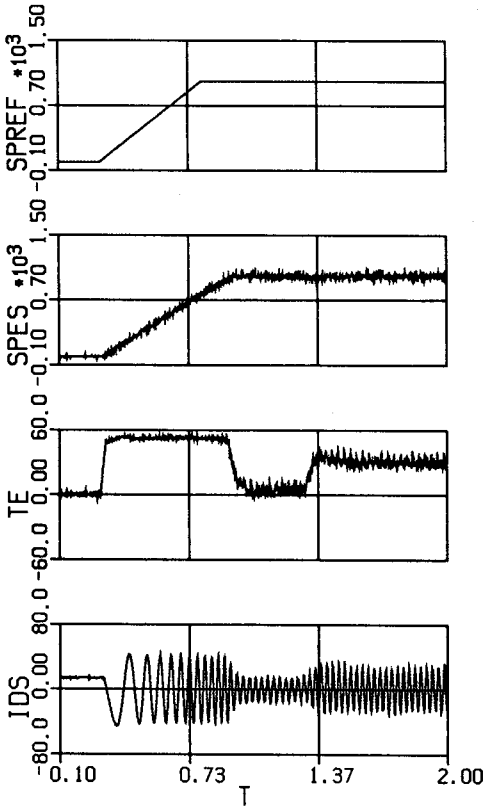


그림 4. 전동기의 속도 응답특성

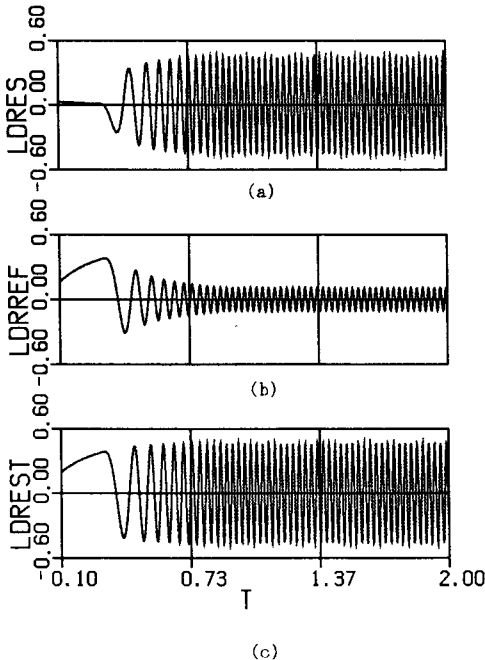


그림 5. 회전자 자속의 추정파형

9. 참고문헌

1. Jotten, R. and Madder, G., "Control Methods For Good Dynamic Performance Induction Motor Drives Based On Current And Voltage As Measured Quantities," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 1A-19, No.3, 1983, pp. 356-363
2. T. Ohtani et. al., "Induction Motor Drives Without Speed Sensor By Vector Control," *T. IEEE Japan*, Vol. 107-D, No. 2, 1987, pp. 199-206.
3. Colin Schauder, "Adaptive Speed Identification For Vector Control Of Induction Motors Without Rotational Transducers," *Conference Record IEEE/IAS Annual Meeting*, 1989, pp. 493-499.
4. T. Okuyama, et. al., "Vector Control Scheme Of Induction Motor Without Speed And Voltage Sensors," *T. IEEE Japan*, Vol. 107-D, No.2, 1987, pp. 191-198.
5. T. Nakano et. al., "Field Oriented Control System For Induction Machine Without Speed Sensor," *Proc. Of International Symposium On Power Electronics*, 1989, pp. 332-336.
6. S. Tamai, et. al., "Speed Sensor-less Vector Control Of Induction Motor With Model Reference Adaptive System," *Conference Record IEEE/IAS Annual Meeting*, 1987, pp. 189-195.
7. U. Badder et. al., "Direct Self Control Of Inverter-Fed Induction Machine, A Basis For Speed Control Without Speed-Measurement," *Conference Record IEEE/IAS Annual Meeting*, 1989, pp. 486-492
8. I. Takahashi, et. al., "A New Quick Response And High Efficiency Control Strategy Of An Induction Motor," *IEEE Transaction on Industry Application*, Vol. 1A-22, 1986, pp. 820-827.
9. 山本 康弘 외, "센서리스 속도 제어 방식," 일본 전기학회 전국대회, 1989, page 13-21.