

특 집

# 유도 전동기의 벡터제어

최 종 료

(현대정공 기술연구소 공작기계부문 담당이사)

## 1. 서 론

1950년대 Thyristor의 출현을 기점으로 시작된 전력전자 기술은 크기와 비용 및 효율 측면에서 과거에는 불가능하였던 전력 변환장치의 개발을 가능하게 하였으며, 특히 직류 전동기와 결합되어 속도 제어의 영역을 확장하여 산업용으로 폭 넓게 사용하게 되었다. 1970년대 초 Blaschke에 의해 제안된 벡터 제어 이론<sup>[1]</sup>으로 유도전동기는 직류전동기와 동등한 제어성과 속응성을 가지게 되었으나 그것이 실용적으로 적용되기 시작한 것은 Micro-processor가 실용화되고부터 이다. 이러한 교류전동기는 직류 전동기에 비해 견고성과 무부수성의 장점을 가지고 있고 고속화 및 대용량화가 특히 용이하다. 현재 유도전동기는 IGBT 등의 고속 전력용 반도체 소자와 DSP(Digital Signal Processor) 등의 Micro-electronics 및 진보된 전동기 제어기술에 힘입어 범용에서부터 고성능 용도에 이르기까지 산업용 가변속 구동장치의 대부분을 차지하고 있다. 본고에서는 이와 같은 유도전동기의 제어를 그 적용이 확대되고 있는 벡터 제어를 중심으로 설명하고자 한다. 특히 동적 가감속 특성 및 고속운전에서 제어 방법은 메카트로닉스의 시스템의 성능을 결정하는 중요한 요인이므로 특별한 주의가 요구된다.

## 2. 교류 전동기의 용량별 주요응용분야

앞서 언급된 제반 조건들에 의하여 교류 전동기 제어의 난점, 특히 유도전동기 제어에 있어서 최대 난점인 비선형 특성을 극복할 수 있는 제어 방식의 실현이 가능해졌다. 이에 따라 AC드라이브는 각종 자동화기기에 적용이 확대되고 있으며 현재 메카트로닉스 관련 전동기 구동 시스템 시장의 90%

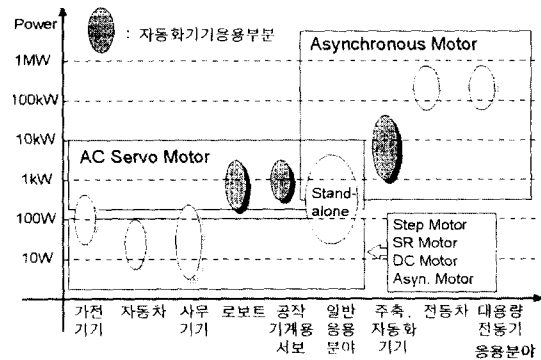


그림 1 교류 전동기의 용량별 응용분야

이상을 점유하고 있다. 아래 그림 1은 교류 전동기의 용량별 응용 분야를 제시하고 있다<sup>[2]</sup>.

벡터 제어된 유도 전동기는 일정 토크 제어를 위한 서보용 뿐만 아니라 정 출력 제어를 위해서 사용된다. 주로 사용되는 분야는 자동화 기기이며 요구되는 회전위치 제어정도는 0.001°, 회전 속도는 최고 20,000RPM, 용량은 5~50kW이다. 특히 저속(0~750RPM)에서의 제어의 안전성이 요구된다.

## 3. 유도전동기의 제어방식

유도전동기의 제어는 전동기의 정상상태 모델을 기반으로 하였는가 또는 동적모델을 기준으로 하였는가에 따라 스칼라 제어와 벡터제어로 구분할 수 있고, 귀환신호의 유무에 따라 개루프 제어와 폐루프 제어로 구분된다. 표 1에 유도 전동기의 대표적인 제어방식을 간단한 블럭 선도과 함께 요약하여



$$\sigma = 1 - \frac{l}{(1 + \sigma_s)(1 + \sigma_r)} \quad (5)$$

그림 2는 이제까지 설명한 벡터제어의 원리를 도해적으로 설명해주고 있다.

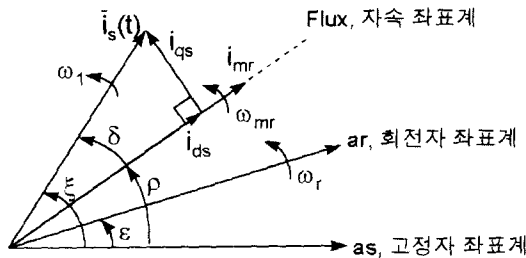


그림 2 벡터제어의 전류벡터도

그림 2는 자속 좌표계상의 직축 전류 성분( $i_{ds}$ )과 횡축 전류 성분( $i_{qs}$ )을 제어함으로써 자속과 토크가 제어됨을 보여준다. 모터단자에 흘러야 할 고정자 전류벡터( $\vec{i}_s$ )는 자속 좌표계상의 지령 전류 벡터를 자속각  $\rho$ 를 이용하여 고정자 좌표계로 좌표 변환함으로써 얻어진다(식(6)).

$$\vec{i}_s = (i_{ds} + j i_{qs})e^{j\rho} \quad (6)$$

#### 4.2 자속 모델<sup>(4)</sup>

상기의 설명에서 결국 벡터제어의 핵심은 자속각의 파악이라는 것을 알 수 있다. 자속각의 파악을 위하여 자기센서 등을 직접 사용할 수도 있으나 실제로는 대부분 자속 모델을 이용, 연산을 통하여 얻어낸다.

자속 모델은 자속 좌표계에서의 식(4)의 회전자 전압 방정식으로부터 얻어진다. 전압방정식의 실수부(d축 성분)를 정리하면 식(7)과 같은 회전자 자속과 비례하는 회전자 자화전류  $i_{mr}$ 의 방정식이 된다. 이 식에서 자화전류는 입력이  $i_{ds}$ 인 시정수  $T_r$ 인 1차 지연계로 나타남을 알 수 있다.

$$T_r \frac{d}{dt} i_{mr} + i_{mr} = i_{ds} \quad (7)$$

식(4)의 회전자 전압 방정식의 허수부(q축 성분)를 정리하면 식(8)와 같이 자속 좌표계와 회전자 좌표계의 속도 차로 정의되는 슬립 각속도  $\omega_2$ 의 식이 도출된다. 이 식에서 자속의 각속도  $\omega_{mr}$ 을 적분함으로써 자속각  $\rho$ 이 구해진다.

$$\omega_2 = \omega_{mr} - \omega_r = \frac{i_{qs}}{T_r i_{mr}} \quad (8)$$

이 식은 슬립이 토크분 전류 즉, 토크와 비례함을 나타낸다. 그림 3에 자속 모델의 블록선도를 나타내었다.

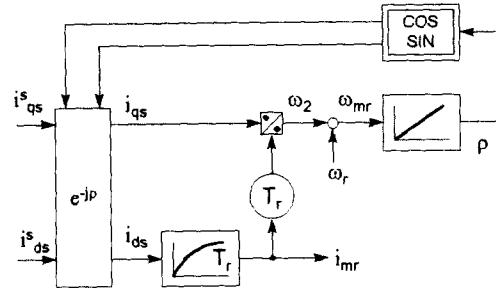


그림 3 자속 모델(Flux model)

### 5. 벡터 드라이브의 실제

#### 5.1 벡터 제어 구동장치의 구조

그림 4는 벡터제어를 적용한 유도전동기 구동장치의 블록선도이다. 자속각  $\rho$ 는 자속 모델에 의해 슬립 각속도와 회전자 속도 feedback의 합을 적분하여 구해진다. 회전자의 위치를 극 저속에서 안정적으로 추정 및 제어하기 위하여 고분해능(2 mill./rev.)을 사용하였다. D-q축 전류 제어기에 의해 발생된 전압성분 명령치는 좌표변환과 2상-3상 변환에 의하여 3상 전압 명령치로 된다. PWM 인버터는 삼각파 변조 혹은 스위칭 시간의 연산을 통해 전압 벡터를 출력한다. 제어기 및 자속 모델은 DSP 등의 Micro-processor를 사용하여 실시간으로 수행된다. 이렇게 구현된 벡터제어 유도전동기는 직류전동기와 유사한 출력특성을 가지며 약제자를 통하여 기저속도의 최고 8배까지 운전이 가능하고 영 속도에서도 최대토크제어가 가능하다. 그림 5는 공작기계의 스피indle에 사용되는 7.5kW급 유도전동기의 벡터 제어시 응답 파형이다. 속도지령을 -8000rpm에서 8000rpm으로 변화 시켰을 때의 실제 속도, q축 전류, 자속 및 d축 전류의 응답을 보여준다.

#### 5.2 Feedforward에 의한 Decoupling 제어

자속 좌표계상의 d-q모델 식(4)의 고정자 전압방정식을 식(9)에 다시 나타내었다.

$$\begin{aligned} v_{ds} &= (R_s + \sigma L_s p) i_{ds} - \omega_{mr} \sigma L_s i_{qs} + \frac{L_m}{1 + \sigma_r} p i_{mr} \\ v_{qs} &= (R_s + \sigma L_s p) i_{qs} + \omega_{mr} \sigma L_s i_{ds} + \omega_{mr} \frac{L_m}{1 + \sigma_r} i_{mr} \end{aligned} \quad (9)$$

위의 두 식은 d, q축이 속도에 비례하는 결합항을 가지고 있음을 보여준다. 기저속도 부근에서 제어를 수행 할 때는 일

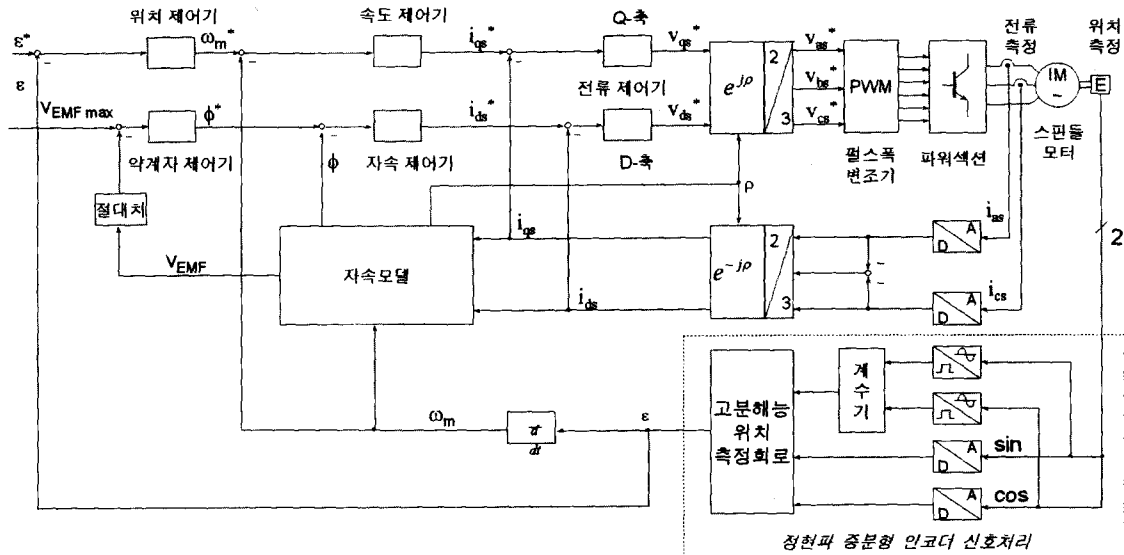


그림 4 벡터제어 유도전동기 구동장치의 제어 블럭선도

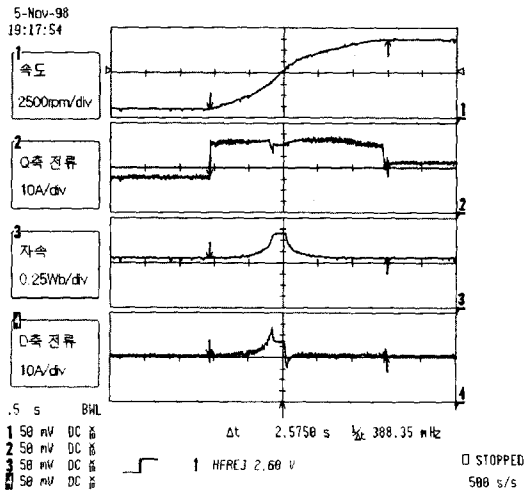


그림 5 유도전동기의 벡터제어 응답파형

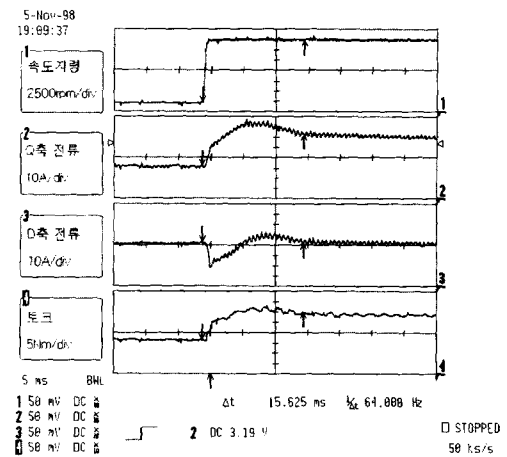


그림 6 D-q축 전류응답의 결합현상

반적으로 결합효과는 미미하여 응답에 영향을 미치지 않는다. 모터속도를 기저속도의 이상의 약계자 영역에서 운전 시킬 때 결합효과는 증가한다.

그림 6은 결합효과를 보상하지 않은 벡터제어에서 8000rpm의 정상상태에서 속도 지령을 계단적으로 변화시켰을 때의 전류 응답이다.

그림에서 전류의 교란이 발생 토크의 응답에 영향을 미침을 알 수 있다. 따라서 고속 응용에서 응답성을 향상시키기 위해서는 이의 보상이 필요해진다.

약계자에 진입하면 자속분 전류의 크기는 속도에 반비례하

여 감소한다. 그 변화율은 기계적 시정수에 의존하므로 제어기에서는 그보다 빨리 응답하는 적분기가 결합 항을 상쇄하게 된다.

실제로 문제가 되는 것은 q축 전류에 의한 d축 전류의 영향이다. 외란이나 속도지령이 계단적으로 변할 때 q축 전류는 급격히 변화하게 되고 이것에 의한 d축 전압성분의 변동을 적분기가 재빨리 상쇄하지 못하기 때문에 d축 전류는 교란을 받게 된다. 이와 같은 결합현상은 결합 항을 feedforward시킴으로써 보상할 수 있다. 그림 7은 decoupling 제어시의 전류 응답이다(그림 6과 동일 조건).

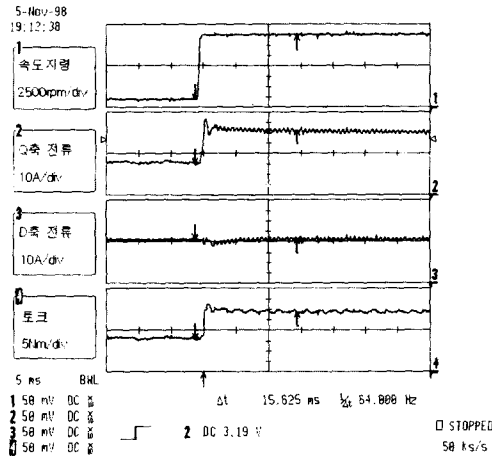


그림 7 Decoupled 제어시 d-q축 전류응답

그림 7에서 보이고 있듯이 그림 6에서 보이고 있는 결합효과가 효과적으로 보상되었고 발생하는 토크도 왜곡되지 않을 수 있다.

### 6. 결론

본 논문에서는 교류전동기의 응용 분야에 대한 분류와 유도전동기의 주요 제어 방법과 특징을 요약하였다. 또한 벡터 제어의 기본 원리에 관하여 간략히 설명하였다.

저속에서의 응답성과 안전성 및 제어 정도를 고려하여 고분해능의 Sin/Cos. 엔코더를 채용하였으며 고속 영역에서 (8000~12000RPM) 나타나는 결합 효과를 Feed-forward로 효과적으로 보상하는 방안을 실험을 통하여 검증하였다.

벡터 제어는 본 논문에서 간단히 소개한 decoupling 제어 기법 외에 전동기 변수(회전자의 Time Constant 등)의 정확한 추정 혹은 측정 방법과 비선형성을 보상하는 기법 등의 발전된 기술로 그 속응성과 고속의 제어 성능이 보다 향상되고

있다. 따라서 벡터 제어된 유도 전동기는 가변속 및 서어보 기능을 가진 구동장치로써 동적 응답성이 뛰어나고 약제자 영역에서의 고속운전이 가능하므로 고정도 및 고속의 산업용 자동화기기에 더욱 폭 넓게 적용될 것이다.

### 참고 문헌

- [1] F. Blaschke, "Das Prinzip der Feldorientierung, die Grundlage für die TRANSVEKTOR-Regelung von Drehfeldmaschine", Siemens-Zeitschrift 45, pp 757~760, 1971
- [2] 최종률, "산업용 고속·고정도 서보/스핀들 드라이브 기술의 최근 동향과 향후 발전전망", 대한전기학회 학회지, pp.28~32, 제45권 1호 1월, 1996
- [3] Werner Leonhard, "30 years Space Vectors, 20 Years Field Orientation, 10 Years Digital Signal Processing with Controlled AC-Drives", a Review Part I, EPE Journal, Vol. 1 No. 1, July, 1991
- [4] Werner Leonhard, Control of Electrical Drives, 2nd. Ed., Springer-Verlag, 1996
- [5] J. Murphy and F. Turnbull, Power Electronic Control of AC Motors, Pergamon Press, 1988

### 〈 저 자 소 개 〉



#### 최종률(崔鍾律)

1954년 10월 27일생. 1986년 베를린 공대 디플롬 취득. 1991년 베를린 공대 졸업(공학). 1986년~91년 베를린 공대 조교수. 1991년~93년 미국 및 독일 Rexroth-Indramat社 제어기 개발 연구관 및 응용 자문관. 1993년~현재 현대 정공(주) 기술연구소 이사. 당 학회 산학협동이사.