

## 高效率 벡터制御 誘導電動機 鷗動 시스템에 관한 研究

### A Study on High Efficiency Vector Controlled Induction Motor Drive System

金 興 根\*  
(Heung-Geun Kim)

#### 요 약

본 논문에서는 유도전동기의 가변속 구동시 효율이 매우 높으며 과도특성이 우수한 벡터제어 시스템을 제시하였다. 종래에는 벡터제어에 의한 유도전동기의 구동시 속응제어를 위하여 자속성분 전류를 일정히 제어하였는데, 이경우 경부하시 철손이 동손에 비하여 과대하게 되어 효율이 극히 저하되므로 자속을 감소시켜 손실이 최소가 되는 값으로 제어하게 되면 고효율 운전이 가능하다. 일반적으로 자속을 감소시키면 동특성이 저하하는 경향이 있으나 본 시스템은 동특성도 우수하였다. 동기속도 회전좌표계를 사용한 유도전동기의 시스템 방정식에서 좌표계 기준축( $d$ 축)을 회전자 자속 페이서와 일치시키면 고정자전류가 자속성분과 토크 성분으로 분리되고 전동기 토크는 정상상태에서 이 두 성분의 곱에 비례한다. 따라서 전동기의 손실이 최소가 되는 두 전류성분의 조합을 구하여 전동기가 항상 이 조건에서 구동되도록 하는 최대효율제어 시스템을 제시하였으며 제시한 시스템에 대하여 디지털 시뮬레이션을 통하여 가능성을 검토하였고 실험을 통하여 이론의 타당성을 입증하였는데, 최대 효율제어에 의하여 상당한 입력의 감소를 기할 수 있었고 과도특성이 우수함을 알 수 있었다.

**Abstract-** A high efficiency and good dynamic performance drive system of an induction motor is presented in this paper using vector control technique. If the induction motor is driven under light loads with rated flux, the iron loss is excessively large compared with the copper loss, resulting in poor motor efficiency. High efficiency drive of an induction motor can be achieved by adjusting the flux level which leads the total motor loss to be a minimum value. Generally reducing the flux degrades the dynamic performance, but the dynamic performance of the proposed system is also maintained high. If the  $d$ -axis is coincident with rotor flux phasor in synchronous rotating reference frame, the stator current can be decoupled as flux component and torque component. At steady state, the developed motor torque is proportional to the product of the flux and torque component. The combination of the two components minimizing the motor loss could be found with numerical method. As the procedure to obtain the optimal combination is too hard, it is found experimentally. The system block diagram is suggested for maximum efficiency control. The proposed system is studied through digital simulation and verified with experiment. The experimental results show the possibility of a high efficiency drive with good dynamic performance of maximum efficiency control.

### 1. 서 론

산업 현장에서 동력원으로 널리 사용되고 있는 유도전동기의 고효율 운전에 관한 연구가 1970년대 후반 부터 활발히 진행되고 있다. 1977년 F.J. Nola는 경부하로 운전중인 유도전동기의 고정자전압을 감소시킴으로써 전동기의 역률을 개선할 수 있고 따라서 고정손인 철손이 감소되어 효율이 개선된다는 개념을 처음으로 소개하였다. [1] 이 경우 전압을 제어하기 위하여 교류 전압 제어가 필요하게 되므로 이의 손실이 추가될 뿐만 아니라 위상제어로 인하여 전원에 고조파 전류를 발생시키는 단점이 있어 큰 관심을 받지 못했다.

그러나 유도전동기 가변속 구동을 위한 전력변환장치들이 개발됨에 따라 주파수와 고정자 전압을 임의로 제어할 수 있게 되면서 부터 동특성 보다는 효율의 개선이라는 관점에서 공극자속의 제어가 다시 관심의 대상이 되었다. 유도전동기의 손실중에서 제어가 가능한 손실을 철손과 동손으로 분리하여 이 손실이 최소가 되는 조건을 구하면 부하 토크에 무관하게 슬립이 일정하게 된다. 이 슬립을 일정하게 하기 위한 고정자전압 및 주파수를 제어하는 방법 [2, 3]과 고정자전류 및 주파수를 제어하는 방법 [4, 5] 등이 이미 발표된 바 있다.

그런데 위의 방법들은 모두 다 전동기의 상수를 알아야 하고 최적 슬립값을 구해야 하는 단점이 있는데 T.A. Lipo 등이 이를 해결하기 위한 방법으로 적응제어법을 제시하였다. [6] 이 방법은 전력 변환장치의 입력을 직접 측정하여서 이를 최소로 하는 여자 전류의 기준치를 적응제어기의 출력으로 하여 속도제어와 병행하는 것이다. 그러나 이러한 모든 방법들은 정상상태에서는 최대효율 운전이 가능하나 동특성에 대한 고려가 미흡하여 그 특성이 다소 나쁜 단점이 있다.

한편 유도전동기의 고성능 제어를 위한 벡터제어 이론이 1969년 독일의 Hasse [7]와 1972년 Blaschke [8]에 의해서 제시되었는데 이는 유도전동기의 고정자 전류를 동기속도로 회전하는 dg축으로 변환하고, d축을 회전자자속 페이스와 일치시키면 d축성분은 자속성분, q축성분은 토크성분으로 분리할 수 있어 마치 타여자 직류전동기와 유사한 특성을 낼 수 있다는 것이다.

벡터제어시 속도제어를 위해서는 자속성분 전류

는 일정하게 유지하고 토크성분 전류를 제어하는 것이 바람직하다. 그 이유는 토크는 회전자자속과 토크성분 전류의 곱에 비례하는데 회전자자속이 고정자의 자속성분 전류에 의해서 1계 지연되어 제어되기 때문이다. 이 방법을 일정자속제어 (CFC: Constant Flux Control)라고 정의하기로 한다. 반면에 정상상태에서의 효율을 개선한다는 관점에서 보면 최대효율제어 (MEC: Maximum Efficiency Control)를 정의할 수 있다. 즉 부하에서 요구되는 토크를 발생하기 위한 회전자자속과 토크성분 전류의 조합은 무수히 많고 각 조합에 따라 전동기의 손실은 각각 다르다. 따라서 무수히 많은 조합들 중에서 손실이 최소로 되는 조건을 구하여 전동기가 항상 이 조건에서 동작되도록 제어하면 최대효율 운전이 가능하다.

본 논문에서는 위와 같이 동특성이 우수한 유도전동기의 벡터제어 시스템에 최대효율 제어이론을 적용하여 동특성이 비교적 양호하며 고효율 운전이 가능한 시스템을 개발하였다.

### 2. 고효율 벡터제어 이론

동기속도 회전좌표계에 대한 유도전동기의 시스템방정식을 공간벡터 개념을 사용하여 표시하면 식 (1)과 같고 공간벡터 등가회로는 그림 1과 같다. [9]

$$V_s = R_s i_s + \frac{d}{dt} \Psi_s + j\omega_e \Psi_s \quad (1-a)$$

$$0 = R_r i_r + \frac{d}{dt} \Psi_r + j\omega_{sl} \Psi_r \quad (1-b)$$

$$T = \frac{3}{2} \frac{P}{2} L_{olm} [i_{sr}^*] \quad (1-c)$$

유도전동기의 고정자전류를 직접 제어하게 되면 고정자자속 전압방정식은 시스템 방정식에서 제외될 수 있다. 한편 동기속도로 회전하는 d축을 회전자자속축으로 취하면 식 (1-b)와 (1-c)는 다음과 같은 3개의 스칼라 방정식이 된다.

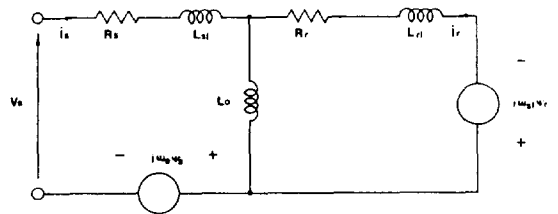


그림 1 동기속도 회전좌표계에 대한 유도전동기 등가회로.

Fig. 1 Space vector equivalent circuit of induction motor for synchronously rotating coordinates.

\*正 會 員 : 慶北大 工大 電氣工學科 助教授 · 工博

接受日字 : 1990年 6月 4日

1次修正 : 1990年 6月 17日

$$T_r \frac{d}{dt} \Psi_r + \Psi_r = L_o i_{sd} \quad (2-a)$$

$$\omega_{st} = \frac{L_o i_{sq}}{T_r \Psi_r} \quad (2-b)$$

$$T = K_{t1} \Psi_r i_{sq} \quad (2-c)$$

단  $K_{t1} = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{1}{1+\sigma_r}$ ,  $T_r = L_r/R_r$  이고

$\sigma_r = (L_r/L_o - 1)$ 이다.

또한 회전자전류를 고정자전류로 나타내면 다음과 같다.

$$i_{rq} = -\frac{1}{1+\sigma_r} i_{sq} \quad (3-a)$$

$$i_{rd} = \frac{\Psi_r}{L_r} - \frac{1}{1+\sigma_r} i_{sd} \quad (3-b)$$

한편 정상상태에서 식(2), (3)은 다음과 같이 표시된다.

$$T = K_{t1} L_o i_{sd} i_{sq} = K_{ti} i_{sd} i_{sq} \quad (4-a)$$

$$\Psi_r = L_o i_{sd} \quad (4-b)$$

$$\omega_{st} = \frac{1}{T_r} \frac{i_{sq}}{i_{sd}} \quad (4-c)$$

$$i_{rq} = -\frac{1}{1+\sigma_r} i_{sq} \quad (4-d)$$

$$i_{rd} = 0 \quad (4-e)$$

유도전동기의 손실중에서 제어가 가능한 손실은 고정자 및 회전자의 동손과 철손이고 이를 표시하면 다음과 같다. 단, 고정자 철손식에서 고정자 자속 대신에 회전자 자속을 사용하였는데 그 크기가 거의 비슷하므로 큰 오차를 수반하지 않는다. 또한  $K_h, K_e$ 는 히스테리시스 손실 및 와류 손실의 계수이다.

- 고정자 동손 :  $i_{sd}^2 R_s + i_{sq}^2 R_s$
- 회전자 동손 :  $i_{rd}^2 R_r + i_{rq}^2 R_r$
- 고정자 철손 :  $K_h \omega_e \Psi_r^2 + K_e \omega_s^2 \Psi_r^2$
- 회전자 철손 :  $K_h \omega_{st} \Psi_r^2 + K_e \omega_{st}^2 \Psi_r^2$

따라서 전체 제어 가능한 손실은 다음식으로 표시된다.

$$P_{CL} = R_s(i_{sd}^2 + i_{sq}^2) + R_r(i_{rd}^2 + i_{rq}^2) + \Psi_r^2 [K_h(\omega_r + 2\omega_{st}) + K_e(\omega_r^2 + 2\omega_r\omega_{st} + 2\omega_{st}^2)] \quad (5)$$

식(5)에 식(4-b) ~ (4-e)의 관계를 대입하면  $P_{CL}$ 은  $i_{sd}, i_{sq}, \omega_r$ 의 함수로 표시된다. 즉

$$P_{CL} = A i_{sd}^2 + \beta i_{sq}^2 + C i_{sd} i_{sq} \quad (6)$$

단  $A = R_s + K_h \omega_r^2 L_o^2 + K_e \omega_r^2 L_o^2$

$$B = R_s - \frac{R_r}{(1+\sigma_r)^2} + \frac{2L_o^2 K_e}{T_r^2}$$

$$C = \frac{2L_o^2}{T_r} (K_h + K_e \omega_r)$$

식(6)에 식(4-a)의 토크식을 대입하면 식(7)과 같다.

$$P_{CL} = A i_{sd}^2 + \left[ \frac{T}{K_t} \right]^2 B \frac{1}{i_{sd}^2} + \left[ \frac{T}{K_t} \right] C \quad (7)$$

식(7)에서 전동기의 동작점 ( $\omega_r, T$ )이 주어지면 전동기의 제어가능한 손실은 자속성분 전류  $i_{sd}$ 만의 함수임을 알 수 있다. 따라서 손실 최소화 조건  $dP_{CL}/di_{sd} = 0$ 으로 부터 다음 관계식을 얻을 수 있다.

$$\frac{i_{sd}}{i_{sq}} = \sqrt{\frac{B}{A}} = K \quad (8)$$

식(8)에서 알 수 있듯이 손실 최소화 조건은 주어진 속도에서 자속성분 전류와 토크성분 전류의 비(최적비)가 부하 토크에 무관하게 일정함을 알 수 있다. 이 최적비는 히스테리시스손 및 와류손의 계수들을 정확히 측정하기가 거의 불가능하므로 실험적인 방법으로 구한다. 일정자속 제어에서는 회전자 자속을 일정히 유지하는데 비해 고효율 운전을 위해서는 식(8)과 같이  $i_{sd}$ 와  $i_{sq}$ 의 비를 일정히 제어하게 되는데 이를 최대효율제어라고 정의한다.

### 3. 고효율 벡터제어 시스템의 구성

전류제어형 PWM인버터로 구동되는 유도전동기의 속도제어를 위한 일정자속 벡터제어 시스템을 연구, 발표한 바가 있는데 전체적인 블럭선도는

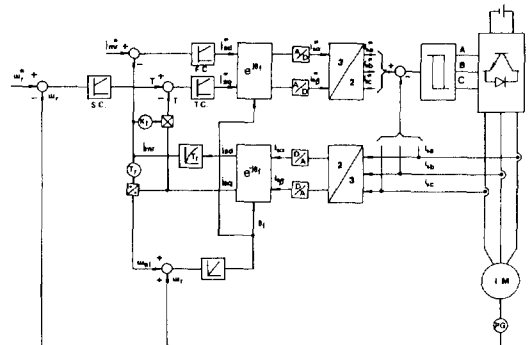


그림 2 일정 자속제어 블럭선도  
Fig. 2 Control block diagram of CFC

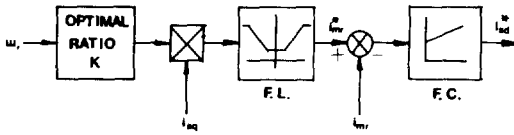


그림 3 최대효율 제어시 자속제어 블록선도  
Fig. 3 Flux control block diagram of MEC

그림 2와 같다. [10] 최대효율제어를 위한 제어 루프는 일정자속제어 루프에서 여자전류 기준치 부분만 수정하면 된다. 실제속도에 대응하는 최적비를 조건표(Look up table)에서 찾아 토크성분 전류의 실제값에 곱하여 최대효율제어를 위한 자속 성분 전류값을 얻게 된다. 그런데 회전자 자속은 정상상태에서만 식(4-b)의 관계를 만족하므로 위에서 구한 값을 여자전류의 기준치  $i_{mr}^*$ 로 취한다.

한편 최대효율제어를 위한 조건은 철의 자화특성을 선형이라고 가정할 경우이고 실제로는 포화현상을 방지하기 위하여 여자전류 기준치의 최대값에 제한을 두어야 한다. 이 상한치는 철심이 포화되기 직전 즉 여자전류의 정격치로 한다. 또한 경부하시 여자전류 기준치가 감소하게 되는데 자속레벨이 과도하게 낮아지면 일반적으로 동특성이 저하하게 되므로 정격치의 1/4로 하한치를 설정한다.

이러한 점들을 고려한 최대효율제어 루프를 자속제어 부분만 표시하면 그림 3과 같다.

#### 4. 시뮬레이션 및 실험결과

##### 4.1 시뮬레이션 결과

시뮬레이션 및 실험에 사용한 전동기의 상수 및 정격은 표1과 같고 인버터 입력전압은 300V이다.

시뮬레이션 과정은 일정자속제어시와 거의 유사하므로 여기서는 생략하기로 한다. 그림 4는 최대

표 1 유도전동기의 파라미터(3상, 4극, Δ 결선)  
Table 1 Induction motor parameters(3phase, 4 pole, Δ connected)

주파수 : 60Hz	전압 : 220v	전류 : 8.8A
출력 : 3HP	속도 : 1735rpm	
$R_s = 0.687\Omega$	$R_r = 0.842\Omega$	
$L_s = 83.97mH$	$L_r = 85.28mH$	$L_o = 81.36mH$
$J = 0.03Kg \cdot m^2$	$B = 0.01N \cdot m \cdot sec/rad(1000rpm$	시)

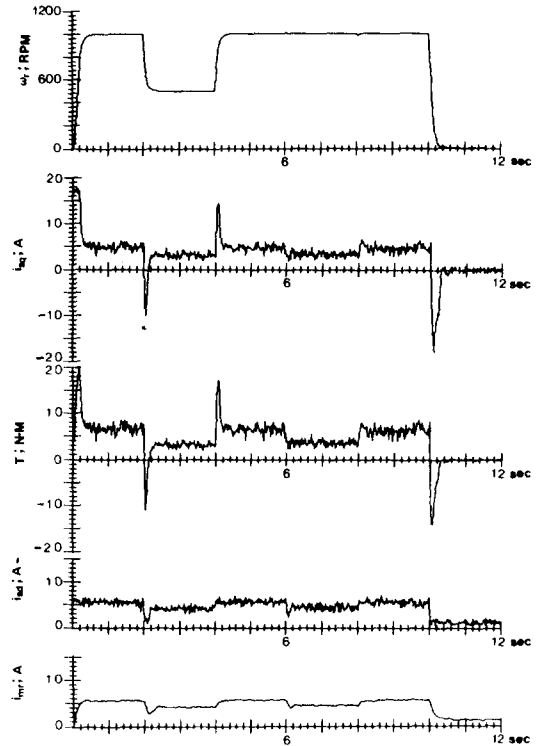


그림 4 최대효율 제어시 과도특성  
Fig. 4 Transient response of MEC

효율제어시 과도특성을 나타낸 것으로 50%부하 상태로 기준속도 1,000rpm으로 기동한 후 기준속도를 500rpm으로 감소시켰다가 다시 1000rpm으로 증가시키고 이 상태에서 부하 토크를 20%로 감소시켰다가 다시 50%부하를 인가한 후 기준속도를 0rpm으로 제동한 것이다.

고정자전류가 자속성분과 토크성분으로 분리되어 제어되고 있음을 볼 수 있으며 자속이 제어됨에도 불구하고 동특성이 우수하다. 따라서 경부하로 장시간 운전되는 시스템에 적용하게 되면 동특성이 뛰어나면서도 고효율 운전이 가능할 것으로 판단할 수 있다.

##### 4.2 실험결과

앞에서 최대효율제어의 조건으로서 자속성분과 토크성분 전류의 최적비를 정의하였는데 이 비는 해석적인 방법으로 구하기는 거의 불가능하다. 따라서 본 논문에서는 여자전류의 기준치를 키 보드를 통하여 임의로 설정할 수 있는 일정자속제어

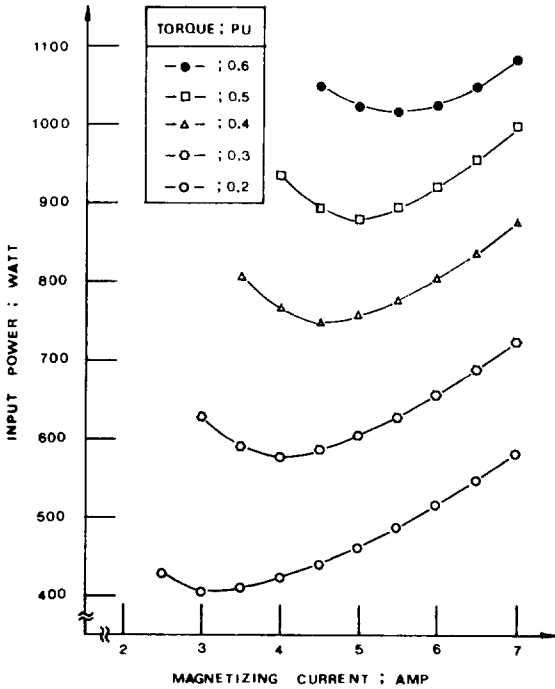


그림 5 여자전류에 대한 입력 특성(1000rpm)  
Fig. 5 Input w.r.t magnetizing current

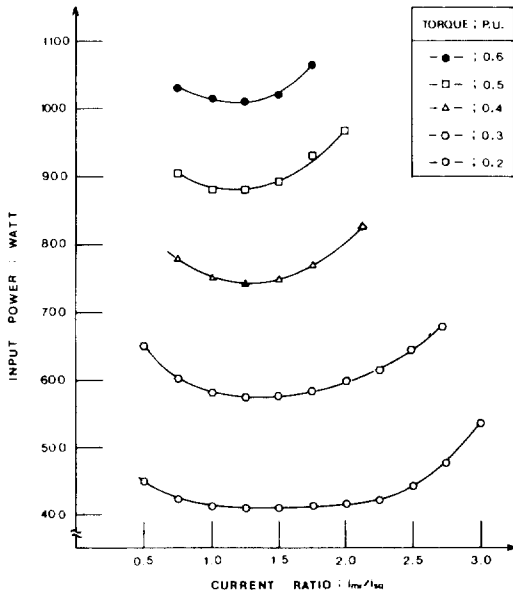


그림 6 전류비에 대한 입력 특성(1000rpm)  
Fig. 6 Input w.r.t current ratio

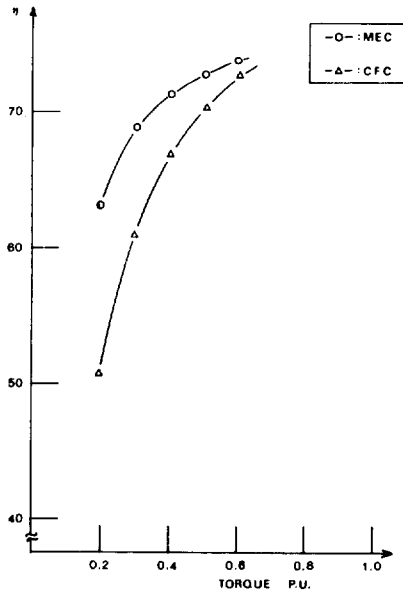


그림 7 부하율에 대한 효율 비교(1000rpm)  
Fig. 7 Efficiency comparison w.r.t load factor

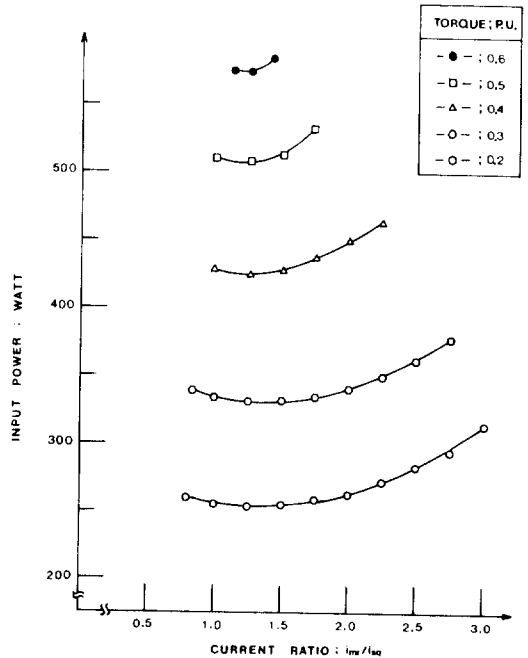


그림 8 전류비에 대한 입력 특성(500rpm)  
Fig. 8 Input w.r.t current ratio

시스템을 우선 개발하여 출력을 일정한 상태로 하

고 여자전류의 기준치를 변화시켜 가면서 인버터의 입력을 측정하여 이 입력이 최소가 되는 여자전류 기준치와 토크성분 전류의 비를 계산하여 최

적비로 선정하였다.

전동기의 속도가 일정한 경우 부하 토크 변화에 따른 최적비의 관계를 알아보기 위해서 1000rpm으로 회전하고 있는 전동기의 부하토크를 20%에서 10%씩 증가시켜 60%일 때까지 여자전류에 대한 입력을 측정하여 나타낸 것이 그림 5이다. 60%이상에서는 거의 정격 여자전류일 때가 입력이 최소로 되었다.

이 실험 데이터로부터 여자전류 대 토크성분 전류의 비에 대한 입력의 관계를 표시한 것이 그림 6이고 그림에서 알 수 있듯이 입력이 최소인 최대 효율 운전점은 부하토크에 거의 무관함을 알 수

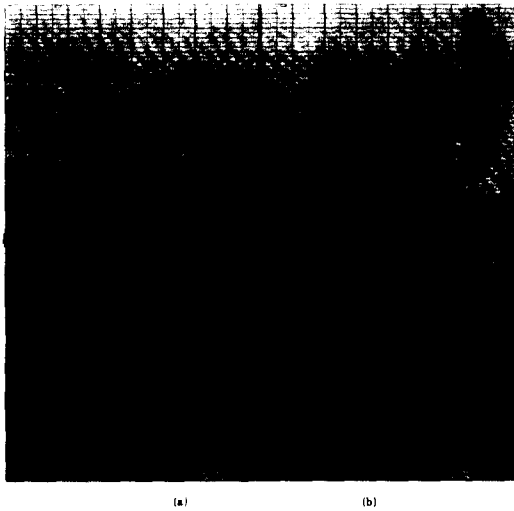


그림 9 (a) 출력 및 입력 (b) 출력 및 고정자 전류 1000rpm, 40% Load  
 Fig. 9 (a) Output & input (b) Output & stator current at 1000rpm, 40% load

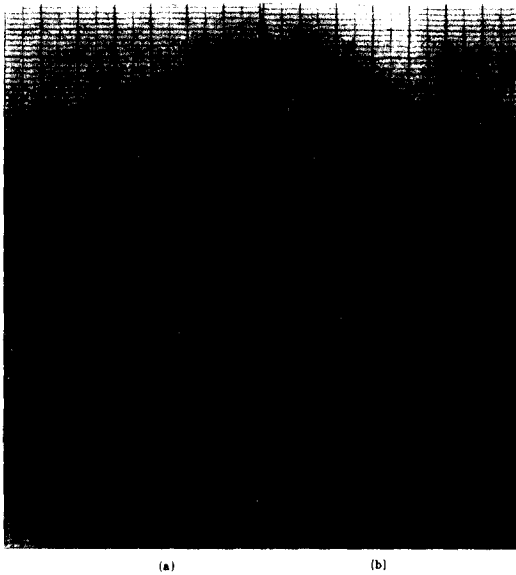


그림 10 (a) 출력 및 입력 (b) 출력 및 고정자 전류 1000rpm, 20% Load  
 Fig. 10 (a) Output & input (b) Output & stator current at 1000rpm, 20% Load

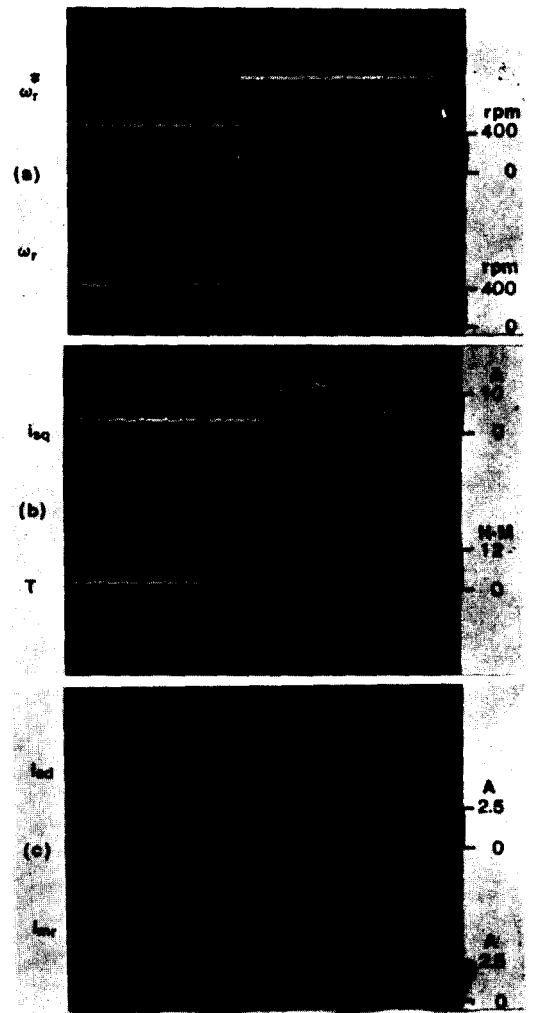


그림 11 MEC의 기준속도 계단증가  
 Fig. 11 Reference speed step increase of MEC  
 time : 100ms/div

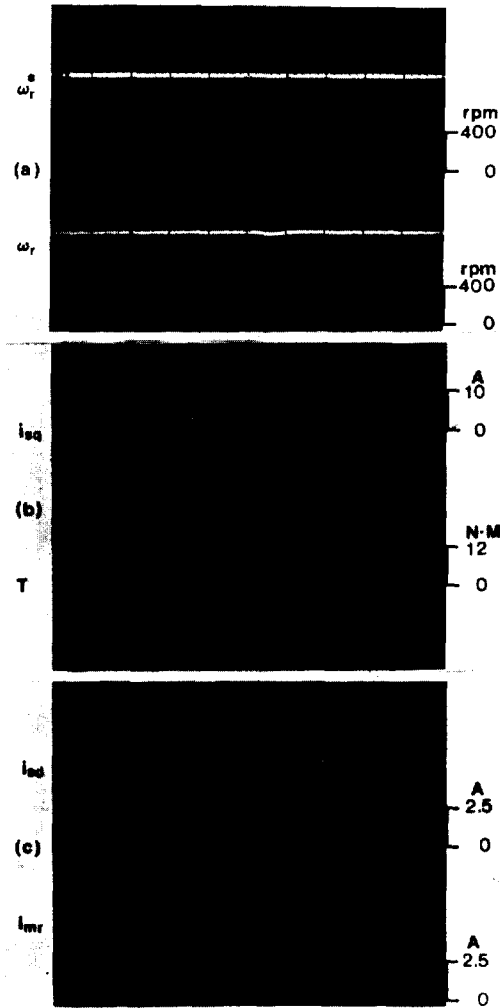


그림 12 MEC의 부하토크 계단 증가  
 Fig. 12 Load torque step increase of MEC  
 time ; 100ms/div

있다. 그림 7은 일정자속제어의 경우와 최대 효율 제어시 부하율에 따른 효율을 나타낸 것으로 20% 부하시 입력으로서는 약 85W의 감소, 효율로서는 약12%의 개선을 볼 수 있다.

최적비의 전동기 속도에 대한 관계를 알아 보기 위해서 이와 같은 실험을 500rpm에서 시행하여 전류비에 대한 입력특성을 그림 8에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 최대효율 운전점 근처에서는 상당한 전류비의 변화에 대하여 입력의 변화가 거의 없기 때문에 최적비의 선정이 곤란하였다.

본 실험에서는 각 속도에 대하여 최대효율 운전점 근처에서의 전류비에 대한 상한치와 하한치를 잡고 모든 속도에 공통되는 비를 최적비로 선택하였는데 이 최적비는 속도에 거의 무관한 상수로 나왔다.

앞에서 유도한 이론 결과식에 의하면 최적비는 속도가 증가함에 따라 감소하는 추세가 되는데 실험결과 거의 변화가 없는 것음 다음 원인으로 생각된다. 첫째는 고정자 철손의 평가시 회전자 자속을 사용하였는데 이에 의한 원인과 철심의 비선형 자화특성에 기인한 것으로 생각되며 두번째는 여자전류값이 감소되어 최적비 근처가 되면 고정자전류의 크기 자체가 상당히 감소된다. 따라서 인버터에서의 손실이 감소하게 되어 전체적인 특성이 속도에 거의 무관하게 된 것으로 추정된다.

그림 9, 10은 일정자속제어에서 최대효율제어로 동작 모드를 변경시켰을 때 출력 및 입력과 출력 및 고정자전류의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 최대효율제어에 의해서 상당한 효율의 개선을 기할 수 있을 뿐만 아니라 고정자전류의 크기도 상당히 줄어든다.

본 논문에서 제시한 최대효율제어 시스템의 과득특성을 고찰해 보기 위해서 시뮬레이션과 같은

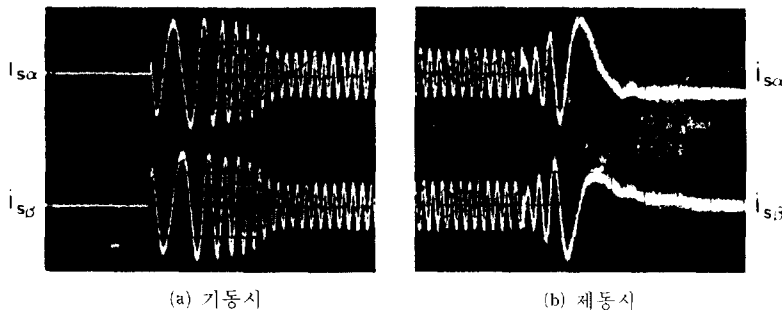


그림 13 등가 고정자 2상전류  
 Fig. 13 Equivalent stator 2 phase current current ; 12.5A/div, time ; 100ms/div

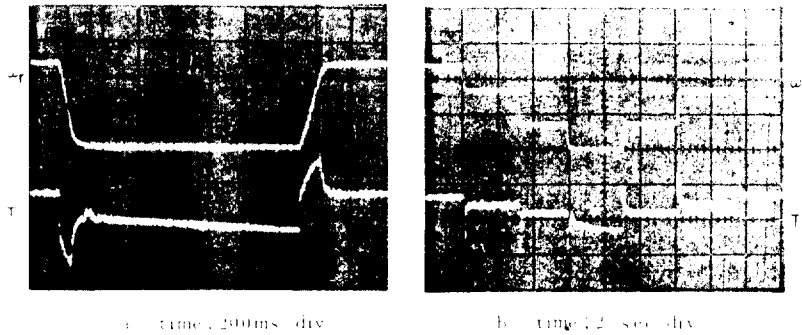


그림 14 속도 및 토크

Fig. 14 Speed and torque speed ; 400rpm/div torque ; 12N · M/div

과정에 대한 실험을 행하여 만족할 만한 결과를 얻을 수 있었다. 여기서는 지면 관계상 전부를 수록하지는 못하고 기준속도 및 부하토크의 계단 증가에 대해서만 그림 11, 12에 나타내었다. 시뮬레이션 결과와 잘 부합하여 고정자전류가 자속성분과 토크성분으로 분리되어 제어됨을 볼 수 있으며 자속이 제어됨에도 불구하고 동특성이 우수하다.

그림 13은 기동 및 제동시 고정자 3상 전류를 동기 2상으로 변환한 전류의 파형이며 그림 14는 기준속도를 변화시켰을때 속도 및 토크를 나타낸 것인데 제어 특성이 뛰어난 것을 볼 수 있다.

### 5. 결 론

본 논문에서는 동특성이 우수하며 정상상태에서 고효율 운전이 가능한 최대효율제어의 이론 및 고효율 벡터제어 시스템을 제시하여 시뮬레이션과 실험을 통하여 타당성을 입증하였다.

최대효율제어에 의한 에너지의 절감 효과는 정격토크의 약 60%이하의 경부하에서만 적용되고, 20%부하시 입력으로서는 약 85W의 감소, 효율로서는 약 12%의 개선을 볼 수 있었다.

따라서 최대효율제어는 기존의 벡터제어 시스템에서 하드웨어 부분은 그대로 사용할 수 있으며 소프트웨어 부분만 약간 수정하면 되므로 경부하로 장시간 구동되는 시스템에 적용하게 되면 효율 개선에 의한 에너지의 절감효과는 대단히리라 생각한다.

최대효율운전 조건인 최적비는 이론에 의하면 부하 토크에는 무관하고 속도에 대해서는 속도가 증가하면 감소하게 되는데 실험결과에 의하면 부하 토크 뿐만 아니라 속도에 대해서도 거의 일정함을 알 수 있었다. 속도에 따라 최적비가 변하면

이를 실현하기 위해서는 속도에 따른 최적비를 메모리에 기억시켰다가 읽어사용하는 조건표를 필요로 하는 다소 번거로움이 수반되는데 본 실험 결과에 의하면 최적비가 일정하므로 실현이 더욱 용이하다. 이러한 이론식과 차이는 이론식에서는 인버터의 손실을 고려하지 않았는데 실험에서는 입력을 인버터의 입력단에서 측정하여 인버터와 유도전동기 전체의 손실이 최소로 되는 동작점을 최대효율운전점으로 선정했기 때문인 것으로 판단된다.

앞으로 인버터의 손실을 고려한 최대효율제어 이론 및 유도전동기의 파라미터 변화에 의한 영향에 대하여 계속 연구가 필요하다.

본 논문은 한국과학재단의 연구비 지원(과제번호 893-0804-013-2)에 의해 수행된 연구임.

### 참 고 문 헌

- [1] F.J. Nola, "Power factor control system for ac induction motor," U.S. Patent 4,052,648, Oct. 4, 1977.
- [2] Min H. Park, Seung K. Sul, Seung K. Jung & Heung G. Kim, "The optimal efficiency drive of an induction motor by slip feedback," KIEE Trans., Vol. 32, No. 3, 1983,
- [3] Min H. Park & Seung K. Sul, "Microprocessor-based optimal efficiency drive of an induction motor," IEEE Trans. Ind. Electr., Vol. IE-31, No. 1 Feb., 1984.
- [4] Min H. Park & Heung G. Kim, "Improve-



ment in efficiency of CSI fed induction motor by means of flux control," KIEE Trans., Vol. 31, No. 3, 1982.

- [5] Heung G. Kim, Seung K. Sul & Min H. Park, "Optimal efficiency drive of a current source inverter fed induction motor by flux control," IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. IA-20, No. 6, Nov./Doc., 1984.
- [6] D.S. Kirschen, D.W. Novotny & T.A. Lipo, "Optimal efficiency control of an induction motor drive," IEEE Trans. Energy Conv., Vol. EC-2, No. 1, March, 1987.
- [7] K. Hasse, "Zur Dynamik drehzahl geregelter antriebe mit stromrichtergespeisten asyn-chronkurzschlu $\beta$ läufermaschinen," Dissertation, TH Darmstadt, 1969.
- [8] F. Blaschke, "The principle of field orientation as applied to the new transvector closed-loop control system for rotating field machines," Siemens Rev., Vol. 34, 1972.
- [9] 김홍근, "벡터제어 유도전동기의 고효율 운전," 공학박사 학위논문, 서울대, 1988. 2.
- [10] 박민호, 홍순찬, 김홍근, 전대원, "전류제어형 PWM 인버터-유도전동기 구동시스템의 속도제어에 관한 연구," 대한전기학회 논문지, 제37권, 제12호, 1988. 12.