

박	민	호	서	울	대	학	교
김	홍	근*	경	북	대	학	교
이	동	춘	서	울	대	학	교

1. 서 론

서어보나 압연기 구동장치와 같이 빠른 과도응답 ( Quick Response ) 과 기동시 부터 전토크운전(Full Torque Operation) 을 요구하는 시스템이 산업체에서 많이 요구되고 있다. 이 경우 지금까지는 직류전동기가 주로 사용되어 왔다. 직류전동기는 전기자전류와 계자전류를 독립적으로 제어할 수 있기 때문에 토크의 빠른 과도특성을 얻을 수 있다. 한편 농형유도기는 정류자와 브러쉬가 없고 관성이 작기 때문에 속응 제어를 요구하는 시스템에의 응용이 매력적이나 출력의 각각이 입력변수들의 함수인 다변수 비선형 결합 시스템 ( Complex Multivariable Nonlinear Coupled System) 이기 때문에 고도의 제어기술이 필요하다 이 제어기술은 1972년 독일의 F. Blaschke<sup>[1]</sup>가 제시한 자속기준제어(Field Oriented Control) 또는 벡터제어 ( Vector Control ) 가 주종을 이루고 있는데 그 이론은 유도전동기의 고정자 전류를 동기속도로

회전하는 dq 축으로 변환하고 d 축을 자속 페이서와 일치시키면 d 축 성분은 자속성분 (Flux Component ), q 축 성분은 토크성분 (Torque Component)으로 상호 분리할 수 있어 마치 타여자 직류전동기와 유사한 특성을 낼 수 있다는 것이다.

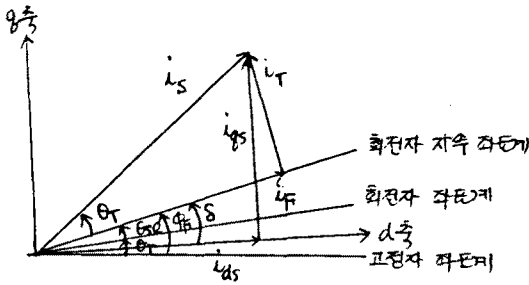
벡터제어에 의한 유도전동기의 구동시 자속성분을 일정히 유지하고 토크성분 전류만을 제어하였는데(일정자속제어) 이는 전동기의 철심을 최대로 이용한다는 점과 저속에서도 큰 회전력을 낼 수 있다는 장점으로 인하여 최선의 제어방법으로 인식되어 왔다.

그러나 최근 효율의 관점에서 바람직하지 못하다는 연구발표가 나오고 있다. [ 2 - 4 ] 즉 경부하시 필요이상의 자속으로 인한 과대한 철손 때문에 효율이 극히 저하하는 단점이 있다. 주어진 부하 토크를 발생하기 위한 고정자 전류의 토크성분과 자속성분의 조합은 무수히 많다. 따라서 본 논문에서는 일정한 동작점 ( $\omega_0, T_0$ ) 에서 토크성분과 자속성분의 비를 변화시켰을 때 전동기의 손

실이 최소가 되는 조건 (최적 효율제어)과 고정자 전류가 최소로 되는 조건 (단위 전류당 최대토크오르 제어)을 유도하고자 한다.

2. 본 론

고정자 전류의 페이서도는 그림 1 과 같다.



$$\theta_T = \int \omega_r dt, \quad \theta_{sl} = \int (\omega_e - \omega_r) dt$$

$$\theta_F = \theta_r + \theta_{sl} : \text{Field Angle}$$

$$\theta_s = \theta_F + \theta_T$$

$$\theta_T = \tan^{-1} (i_T / i_F) : \text{Torque Angle}$$

그림1 고정자 전류 페이서도

동기속도로 회전하는 d 축으로부터 회전자 자속축간의 각을  $\delta$  라고 하면

$$\begin{bmatrix} i_{gs} \\ i_{ds} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta & \sin \delta \\ -\sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_T \\ i_F \end{bmatrix} \quad (1)$$

$\delta$  는 임의로 선정할 수 있는 것으로  $\delta = 0$  를 취하면 즉 d 축과 회전자 자속축을 일치시키면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} i_{ds} &= i_F \\ i_{gs} &= i_T \end{aligned} \quad (2)$$

고정자에 공급되는 전류는 고정자에 고정된 기준축에 대한 전류 벡터이므로

$$i_s = \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{gs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} = \text{Im} \left\{ \begin{bmatrix} 1 \\ e^{j\theta_s} \\ e^{-j\theta_s} \end{bmatrix} (i_F + j i_T) e^{j\theta_F} \right\} \quad (3)$$

$$= \text{Im} \left\{ \begin{bmatrix} 1 \\ e^{-j\theta_s} \\ e^{-j\theta_s} \end{bmatrix} i_s^* e^{j(\theta_r + \theta_F)} \right\} \quad (4)$$

$$\text{단 } i_s^* = \sqrt{i_F^2 + i_T^2}$$

와 같이 표시되고 위식에서 알수 있듯이  $i_F$  와  $i_T$  에 의해서 고정자 전류의 크기  $i_s^*$  뿐만 아니라 토크각  $\theta_T$  도 제어할수 있다. 또한 벡터제어를 위해서는 자속각  $\theta_F$  에 대한 정보가 필수적인 사실도 알수 있는데 직접 측정하느냐 아니면 추정하느냐에 따라 직접 벡터제어 [1], 간접 벡터제어로 구분한다. 자속각을 측정하기 위해서는 자속 측정 코일이나 Hall 소자를 설치하여야 하고 또한 저속에서는 고조파성분에 의한 영향이 커지므로 실용적으로는 간접벡터제어를 주로 사용한다. 간접벡터제어에서는 슬립각의 추정값  $\theta_{sl}$  과 유도전동기의 회전자위치의 측정값  $\theta_r$  의 합으로 자속각을 추정한다.

이제 간접벡터제어방식에서 고정자 전류가 자속성분과 토크성분으로 상호분리할수 있다는 사실과 슬립각속도  $\omega_{sl}$  이 어떻게 표시되는지 보기로 한다. 우선 동기속도로 회전하는 dq 축에 대한 유도전동기 시스템 방정식은 [7] 아래와 같고 그 등가회로는 그림2와 같다. [8]

$$\begin{bmatrix} u_{gs} \\ u_{ds} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r + L_r p & \omega_e L_r & L_m p & \omega_e L_m \\ -\omega_e L_r & R_r + L_r p & -\omega_e L_m & L_m p \\ L_m p & \omega_e L_m & R_r + L_r p & \omega_e L_r \\ -\omega_e L_m & L_m p & -\omega_e L_r & R_r + L_r p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{gr} \\ i_{dr} \\ i_{gr} \\ i_{dr} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$T = \frac{3}{2} \frac{p}{2} L_m [i_{gs} i_{dr} - i_{ds} i_{gr}] \quad (6)$$

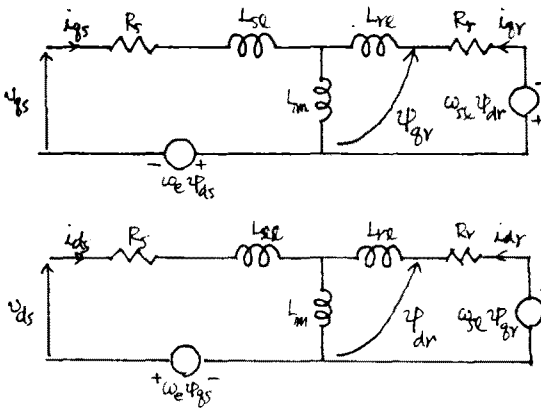


그림2 유도전동기 dq 등가회로

그림2의 등가회로로부터 회전자 쇄교자속에 대한 식을 써보면

$$\psi_{gr} = L_m i_{gs} + L_r i_{gr} \quad (7)$$

$$\psi_{dr} = L_m i_{ds} + L_r i_{dr}$$

와 같고 회전자 전압 방정식은

$$R_r i_{gr} + p \psi_{gr} + \omega_{se} \psi_{dr} = 0 \quad (8)$$

$$R_r i_{dr} + p \psi_{dr} - \omega_{se} \psi_{gr} = 0$$

이다. 회전자의 자속페이스를 d 축과 일치시키면

$$\psi_{dr} = \psi_r \quad (9)$$

$$\psi_{gr} = p \psi_{dr} = 0$$

가 되므로 (9)를 (8)에 대입하면 다음과 같다.

$$R_r i_{gr} + \omega_{se} \psi_r = 0 \quad (10)$$

$$R_r i_{dr} + p \psi_r = 0$$

또한 (9)를 (7)에 대입하여 회전자 전류와 고정자 전류의 관계를 구하면

$$i_{gr} = -\frac{L_m}{L_r} i_{gs} \quad (11)$$

$$i_{dr} = \frac{\psi_r}{L_r} - \frac{L_m}{L_r} i_{ds}$$

이 되므로 (11)을 (6)과 (10)에 대입하면 다음과 같은 시스템 방정식이 유도된다.

$$\omega_{se} = \frac{L_m}{T_r} \frac{i_{gs}}{\psi_r} \quad (12)$$

$$p \psi_r = \frac{1}{T_r} [-\psi_r + L_m i_{ds}]$$

$$T = K_t i_{gs} \psi_r$$

단 여기서  $T_r = L_r / R_r$ ,  $K_t = \frac{3}{2} \frac{p}{2} \frac{L_m}{L_r}$  이다.

식(12)로부터 회전자 쇄교자속은  $i_{ds}$ 에 의해 서 제어가 되고 토오르는 회전자 쇄교자속과  $i_{gs}$ 의 곱으로 표시되므로 상호 분리가 됨을 알수 있다.

정상상태에서  $\psi_r = L_m i_{ds}$ 가 되므로

$$\omega_{se} = \frac{1}{T_r} \frac{i_{gs}}{i_{ds}}$$

$$i_{dr} = 0 \quad (13)$$

$$i_{gr} = -\frac{L_m}{L_r} i_{gs}$$

이다. 따라서 토오르는

$$T = K_T i_{ds} i_{gs} \quad (14)$$

$$= K_T i_s^2 \cos \theta_T \sin \theta_T$$

$$= \frac{1}{2} K_T i_s^2 \sin 2\theta_T, \quad K_T = K_t \cdot L_m$$

이 되므로  $\theta_T = 45^\circ$ 이면 단위전류당 최대

토오르가 됨을 알수 있다. 그림3은 5마력

유도전동기에서 고정자전류를 파라메타로 하

여 토오르 각에 대한 토오르의 곡선을 나타

낸 것으로 A는 최대토오르제어 B는 일정자

속제어를 의미한다.

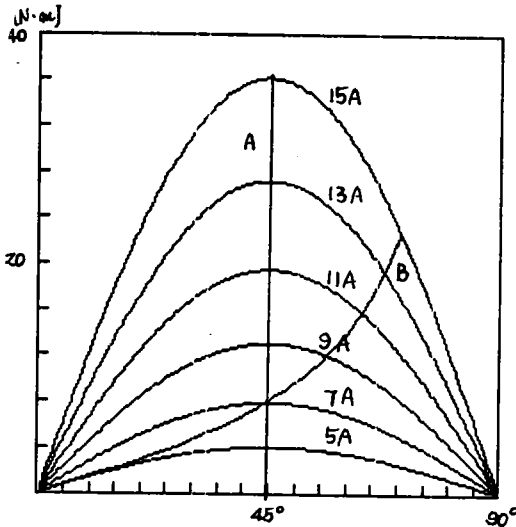


그림3 토오크 특성

한편 유도전동기의 제어가능손실은 다음과 같다.

$$P_T = R_s [i_{gs}^2 + i_{ds}^2] + R_r [i_{dr}^2 + i_{gr}^2] + \Psi_f^2 [K_n(\omega_e + \omega_{fe}) + K_e(\omega_e^2 + \omega_{fe}^2)] \quad (15)$$

식(15)에 (13)의 관계를 대입하면  $P_T$ 는 주어진  $\omega_e$ 에서  $i_{gs}$ 와  $i_{ds}$ 의 함수가 된다. 전동기 토오크식 (14)로부터  $i_{gs} = T / (k_T i_{ds})$ 의 관계를 얻을 수 있으므로 전동기 제어가능손의 식은 주파수와 토오크가 주어지면  $i_{ds}$ 만의 함수로 표시할 수 있고  $dP_T/di_{ds} = 0$ 의 조건으로부터 최소손실 조건을 구할 수 있다. 그 결과는 다음과 같다.

$$i_{ds}^4 = \left( \frac{T}{k_T} \right)^2 \left[ R_s + \left( \frac{L_m}{L_r} \right)^2 R_r + \frac{K_e L_m^2 R_r^2}{L_r^2} \right] / \left[ R_s + K_e L_m^2 \omega_e + K_e L_m^2 \omega_e^2 \right] \quad (16)$$

그런데  $(T/k_T)^2 = (i_{ds} i_{gs})^2$  이므로

$$(i_{ds}/i_{gs}) = \left[ \left\{ R_s + \left( \frac{L_m}{L_r} \right)^2 R_r + \frac{K_e L_m^2 R_r^2}{L_r^2} \right\} / \left\{ R_s + K_e L_m^2 \omega_e + K_e L_m^2 \omega_e^2 \right\} \right]^{1/2} \quad (17)$$

식(17)로부터 최적효율운전의 조건은  $i_{ds}/i_{gs}$ 가 주어진 주파수에서 부하토크에 무관함을 알 수 있다. 그림4는 1,800 rpm, 50m의 동작점에서 토오크각에 대한 손실곡선을 나타낸 것이다.

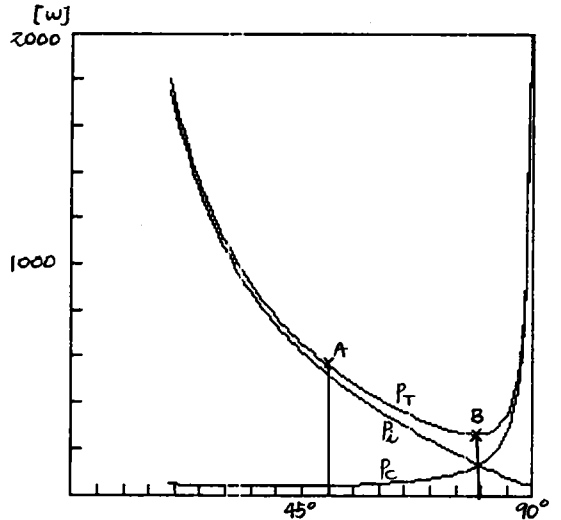


그림4 전동기 손실 특성

### 3. 결 론

벡터제어에 의한 유도전동기의 구동시 고정자 전류의 자속성분과 토오크성분을 함께 제어 함으로서 두가지 특성을 얻을 수 있다. 즉 토오크각을 항상 45°로 유지함으로서 자속성분전류와 토오크성분전류를 같도록 제어하여 단위전류당 최대의 토오크를 낼 수 있다. 이는 직류직권전동기와 유사한 특성으로서 교류인전동기에 적용하게 되면 큰 기동토크를 낼 수 있을 뿐만 아니라 인버터터를 포함한 설비의 용량을 줄일 수 있어 가격면에서 유리하리라 생각한다. 한편 속도에 따라 자속성분전류와 토오크성분 전류의 비율

제어함으로서 항상 최적효율운전이 가능하다.  
이를 경부하로 장시간 운전되는 부하에  
적용하게 되면 효율개선에 의한 에너지 절  
감의 효과는 대단하리라 생각한다.

#### 4. 참 고 문 헌

- [1] 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, pp. 217 - 220 , 1972
- [2] M.H. Park and S.K. Sul , " Microprocessor based -----, " IEEE Trans. Ind. Electr. Vol. IE-31, No.1, 1984
- [3] H.G. Kim, S.K. Sul and M.H. Park, " Optimal Efficiency -----," IEEE Trans. Ind. Appl. vol. IA-20, No.6, 1984.
- [4] D.S. Kirschen et. al. " On-line --," IEEE. Trans., Ind. Appl., vol IA-21, No.4, 1985
- [5] M. Akamatsu et. al., " High -----," IEEE Trans Ind . Appl., vol IA-18, No.4, 1982
- [6] A. Nabae et. al., " An approach -----," IEEE Trans. vol. IA-16, No.3, 1980
- [7] P.C. Krause et. al., " Simulation --," IEEE Trans. vol. PAS-84, No. 11,1965
- [8] M. Kaimoto et.al., " Performance---," IEEE Trans. vol. IA-18, No. 6, 1982