

선형화된 유도전동기의 특성 및 속도제어에 관한 연구

윤 병 도 김 대 훈\*

중앙대학교 전기공학과\*

A Study on Speed Control and Characteristics of I.M. Having Linear Transfer Function

Byung - Do Yoon, Dae - Hoon Kim\*

Department of Electrical Engineering, Chung - Ang University

ABSTRACT

This paper describes a fast response control of an inverter-fed induction motor. The transfer function of the induction motor controlled by this control method is very similar to that of a separately excited dc motor.

This paper presents the linear control method for the transfer function in the control of an inverter-fed induction motor. According to this control, the response speed is correctly grasped taking the leakage inductances into account and the inverter-fed induction motor is controlled with fast response.

1. 서론

산업계에서 기동시 큰 토크를 요구하고, 빠른 과도응답을 필요로 하는 서보 구동계에 사용해 왔던 전동기는 대부분 직류 서보 전동기이었다.

서보 전동기란 로보트나 NC 공작기계등을 구동하는 전기식 구동장치이며 위치 혹은 속도의 급격한 변화명령에 대해 신속히 대응하도록 설계된 전동기이므로, 1970년대만 하더라도 서보 전동기라 하면 직류 서보 전동기가 그 주류를 이루어 왔다.

직류 전동기는 여러가지 제약에도 불구하고 전기자 전류와 계자전류를 분리제어할 수 있다는 장점 때문에 종래 직류 전동기를 많이 사용하여 왔다. 그러나 최근 제어 기술의 발달, 즉 트랜지스터나 다이리스

터등 전력용 반도체소자의 발달로 인하여 직류 서보 전동기의 장점을 그대로 유지하면서 기계적 정류 기구를 제거시키고, 신뢰성과 내환경성을 크게 향상시킨 유도전동기를 사용하고 있다.

특히 능형 유도전동기는 구조가 간단하고 견고하기 때문에 유지 및 보수 측면에서 대단히 유리하고, 회전자와 권선이 작기 때문에 속응제어 시스템에 응용할 경우 직류 전동기보다 유리한점이 많다.

그러므로 유도전동기의 이러한 장점 때문에 속도제어 방식에 속응성이 뛰어난 벡터제어 혹은 자속기준(Field-Oriented Control) 방식을 이용하였다.

벡터제어 방식에는 직접벡터제어와 간접벡터제어 방식이 있는데 직접벡터제어는 전동기 내부에 홀소자나 센서코일을 장치하여 2차자속을 직접검출하는 것으로 특수소자를 쓰기 때문에 사용하기 어렵고 센서코일을 장치할 경우 저속 운전시 정확도가 떨어지는 단점이 있다. 반면에 간접벡터제어는 전동기의 파라미터를 이용하여 2차자속을 계산하는 방법으로 일반적으로 널리사용하고 있다. 따라서 본 논문에서 벡터제어방식을 이용하여 유도전동기를 선형제어시켜 고속응답 특성에 이용하였다. 그리고 유도전동기도 타여자 직류전동기와 같이 선형화시켜 전달함수 및 블록선도를 나타내었고 속도제어에 대해 시뮬레이션을 보였다.

2. 유도전동기의 수학적모델

동기 각속도  $\omega$ 를 가지고 회전하는  $d^e-q^e$  좌표 축에서 다음과 같은 전압방정식이 얻어지고, 등가회로는 그림1과 같다.

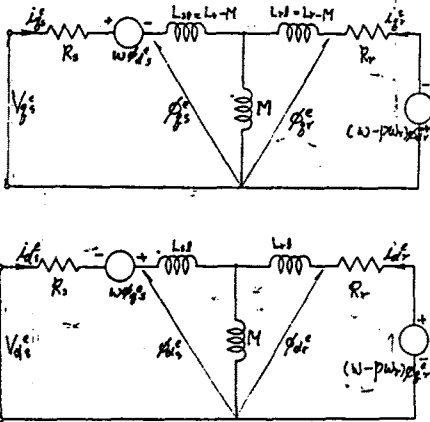


그림 1 동기회전 기준축에서  $d^e - q^e$  등가회로

$$\begin{bmatrix} V_d^e \\ V_q^e \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + SL_s & -\omega L_s \\ \omega L_s & R_s + SL_s \\ SM & -(w-pwr)M \\ (w-pwr)M & SM \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d^e \\ i_q^e \\ \phi_d^e \\ \phi_q^e \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

여기서,  $V_d^e, V_q^e$  :  $d^e-q^e$  축 고정자 전압  
 $i_d^e, i_q^e$  :  $d^e-q^e$  축 고정자 전류  
 $\phi_d^e, \phi_q^e$  :  $d^e-q^e$  축 회전자 전류  
 $S$  : 미분 연산자( $d/dt$ )  
 $\omega$  : 회전자 각속도

식(2.1)로부터 1차전류와 2차자속을 상태변수로한 상태방정식이 구하여 진다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d^e \\ i_q^e \\ \phi_d^e \\ \phi_q^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s/\sigma L_s - R_r(1-\sigma)/\sigma L_r & -\omega \\ \omega & R_s/\sigma L_s - R_r(1-\sigma)/\sigma L_r \\ 0 & MR_r/L_r \\ MR_r/L_r & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d^e \\ i_q^e \\ \phi_d^e \\ \phi_q^e \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} MR_r/\sigma L_s L_r^2 & pwrM/\sigma L_s L_r \\ -pwrM/\sigma L_s L_r & MR_r/\sigma L_s L_r^2 \\ -R_r/L_r & \omega-pwr \\ -(\omega-pwr) & -R_r/L_r \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} i_d^e \\ i_q^e \\ \phi_d^e \\ \phi_q^e \end{bmatrix} + 1/\sigma L_s \begin{bmatrix} V_d^e \\ V_q^e \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

여기서,  $\phi_d^e = M i_d^e + L_r i_d^e$  :  $d^e$  축 2차 자속  
 $\phi_q^e = M i_q^e + L_r i_q^e$  :  $q^e$  축 2차 자속  
 $\sigma = 1 - M^2 / L_s L_r$  : 누설계수  
 $p$  = 극수

$M i_d^e, M i_q^e$ 는 고정자에 의해 회전자에 발생하는 자속벡터 성분이고,  $L_r i_d^e$ 와  $L_r i_q^e$ 는 회전자 전류에 의해서 발생하는 자속벡터 성분이다.

토크  $T_e$ 는 식(2.3)과 같다.

$$T_e = (3/2)pM(i_q^e \phi_d^e - i_d^e \phi_q^e) / L_r \quad (2.3)$$

식(2.2)인 상태방정식은 계수행렬 부분에  $\omega$  및  $w_r$  이 포함되어 있으므로 비선형이다.

선형제어 하기위해  $d^e$  축 상태변수  $i_d^e$ 와  $\phi_d^e$  혹은  $q^e$  축 상태변수  $i_q^e$ 와  $\phi_q^e$  어느한쪽을 일정하게 제어한다면 선형이 될 수 있다.

3. 선형제어법

식(2.2)에서 다음과 같은 상태방정식이 얻어진다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_d^e \\ \phi_q^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_r/L_r & \omega-pwr \\ -(\omega-pwr) & -R_r/L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_d^e \\ \phi_q^e \end{bmatrix} + MR_r/L_r \begin{bmatrix} i_d^e \\ i_q^e \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

2차 자속을  $d^e$  축과 일치시키고, 일정제어할 경우 아래식과 같이 된다.

$$\phi_q^e = 0 \quad (3.2)$$

$$i_d^e = I_d^e \text{ (일정)} \quad (3.3)$$

$$\phi_d^e = M I_d^e \quad (3.4)$$

위의 선형조건 식(3.2)-(3.4)로부터 전기적 슬립각 속도  $\omega_s$  인 식(3.5)가 구하여 진다.

$$\omega_s = (R_r/L_r)(i_q^e/I_d^e) \quad (3.5)$$

4. 불럭선도와 전달함수

식(2.2)에서 식(3.2)-(3.5)의 관계를 대입하면 식(4.1)이 된다.

$$\frac{di_q^*s}{dt} = -\left(\frac{R_s}{\sigma L_s} + \frac{R_r}{\sigma L_r}\right) i_q^*s - \frac{p\omega_r Id^*s}{\sigma} + \frac{V_q^*s}{\sigma L_s} \quad (4.1)$$

식(2.3)에서 토오크식은 식(4.2)와 같이 구하여 진다.

$$T_e = \frac{3}{2} pM^2 Id^*s i_q^*s / L_r \quad (4.2)$$

유도전동기의 운동방정식은 아래와 같다.

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{-R\omega_r}{J} + \frac{(T_e - T_L)}{J} \quad (4.3)$$

식(4.2)의 수식을 식(4.3)에 대입하면 식(4.4)와 같이 구하여 진다.

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{(3/2)pM^2 Id^*s i_q^*s}{L_r J} - \frac{R\omega_r}{J} - \frac{T_L}{J} \quad (4.4)$$

식(4.1)과 식(4.4)를 행렬식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_q^*s \\ \omega_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_r}{\sigma L_s} & -\frac{R_r}{\sigma L_r} & \frac{pId^*s}{\sigma} \\ \frac{(3/2)pM^2 Id^*s}{L_r J} & -\frac{R_r}{J} & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_q^*s \\ \omega_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{V_q^*s}{\sigma L_s} \\ \frac{-T_L}{J} \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

위행렬식 으로부터 불럭선도를 도시하면 그림2와 같다.

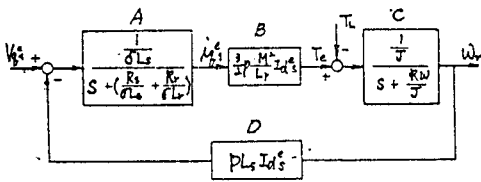


그림 2 선형화된 유도전동기의 불럭선도

그림 2의 불럭 A는 타여자 직류 전동기의 전기자 권선 임피던스에, 불럭 B는 토오크 정수에, 불럭 C는 회전 계동 계수 및 관성 모멘트에 그리고 불럭 D는 유기 전압 정수에 대응한다.

불럭 선도에서 전달함수는 다음과 같다.

$$G(S) = \frac{W_r(S)}{V_q^*s(S)} = \frac{1}{pL_s Id^*s} \cdot \frac{1}{(pMId^*s)^2 / \sigma L_r J} \cdot \frac{1}{S^2 + (R_s/\sigma L_s + R_r/\sigma L_r)S + (pMId^*s)^2 / (\sigma L_r J)}$$

$$= \frac{1}{pL_s Id^*s} \cdot \frac{W_n^2}{S^2 + 2\delta W_n S + W_n^2}$$

단,  $W_n = \frac{pMId^*s}{\sqrt{\sigma L_r J}}$  : 고유 주파수

$$\delta = \frac{1}{2} \frac{1}{W_n} \left[ \frac{R_s}{\sigma L_s} + \frac{R_r}{\sigma L_r} \right]$$

: 감쇠계수

Rw : 무시

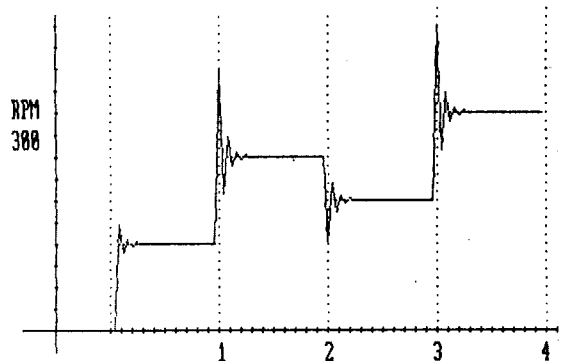
전기적 시정수  $T_E$ 와 기계적 시정수  $T_M$ 은 불럭선도에서 구할 수 있다.

$$T_E = \frac{1}{R_s/\sigma L_s + R_r/\sigma L_r}$$

$$T_M = \frac{(R_s/L_s + R_r/L_r)L_r J}{(pMId^*s)^2}$$

5. 시뮬레이션

유도전동기의 속도 제어시의 성능을 시뮬레이션을 통해 알아보았다. 이때 시뮬레이션 결과를 그림 3에 나타낸다.



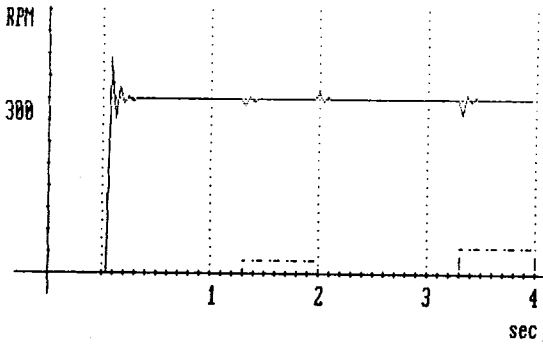


그림 3. 속도 응답 파형

### 6. 결 론

본 연구에서는 선형제어 방법을 이용하여 유도 전동기를 선형화시킨 식으로 표현 하였고, 그리고 유도 전동기의 속도응답 파형의 시뮬레이션 결과를 보였다.

유도전동기를 선형화 시킴으로서 직류서어보 전동기와 같이 속응성이 필요한 곳에 많이 응용될 전망이다.

참고문헌

1. P.C.Kause et al, "Simulation of Symmetrical Induction Machinery,"IEEE Tran. Power. Appr. Syst. Vol. PAS, pp.1038-1053, 1965.
2. H.Sugimoto,E.Ohno,"Theory and Characteristics of a new I.M. drive system having linear transfer function,"JIBB-IPEC, Vol. 1, pp 462-473.Mar 1983.
3. B.K.BOSE,"Power Electronics and AC Drives," 1986.
4. S.Bolognani,G.S. Buja, "Adaptive Control of a voltage inverter I.M. drive,"IECON,pp 83-88, 1984.
5. R.Gabriel et al, "Field-Oriented Control of Standard AC Motor Using Microprocessors,"IEEE IAS,Vol.IA-16,no.2,pp 186-192. MAR/APR.1980.