

전동기 상수를 고려한 유도전동기 약계자 천이시점에 관한 연구

이 상훈*, 최철*, 박성준**, 김철우*
 부산대학교*, 거제대학**

A Study on the field weakening operation of Induction Motor considering Motor Parameters

Sang-Hun Lee* · Cheul-Choi* · Sung-Jun Park** · Cheul-U Kim*
 Pusan Univ.* , Koje College**

Abstract - This paper presents the field weakening base speed considering stator resistance effect. It uses the algorithm of estimating rotor and stator resistance to compensate resistance variation. And by using estimated stator resistnace the field weakening base speed is determinded. Simulation results demonstating the effectiveness of this method.

유도전동기의 고속운전을 위해 가장 많이 사용되는 약계자 제어방식인 $1/\omega_r$ 방식은 기준속도이상에서는 속도에 반비례로 자속성분 또는 회전자자속을 감소시키는 개루프 방식이다. 회전자 자속을 줄이기 위해서 d축 기준전류를 줄이고 q축 기준전류는 전류 정격을 최대한 활용하기 위해서 d축 기준전류의 감소에 따라 반대로 증가된다. 이때 d축 기준전류는 유도전동기의 무부하전류를 d축의 정격전류로 두고 회전자 각속도는 동기속도에 대한 단위 속도비율로 나타내면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

1. 서 론

간접벡터제어는 저속특성의 우수함과 구현의 편리성으로 인해 저속으로부터 고속에 이르는 넓은 가변속 구동에 현재 널리 사용되고 있다. 고속의 운전을 위해 사용되는 약계자 제어방식은 기준속도이상에서 속도에 반비례로 자속성분전류 혹은 회전자 자속을 감소시키는 개루프 방식인 $1/\omega_r$ 방식과 주어진 전압과 전류를 최대치로 이용하면서 전동기가 최대 토크를 발생하도록 하는 최대 토크 출력 제어법에 의한 약계자 제어방식이 있다. $1/\omega_r$ 방식은 간단하게 실행할 수 있기 때문에 널리 사용되어 왔으나 약계자 영역에서 회전자 자속의 동특성을 고려하지 않는 개루프 제어가 행해지므로 제어기에서 사용되는 전동기 상수가 정확하지 않다면 올바른 제어가 이루어질 수 없다. 또한 부하조건을 고려하지 않기 때문에 $1/\omega_r$ 방식에서 이용되는 회전자 기준자속은 속도의 증가에 따른 전류제어를 하기 위한 적절한 전압을 확보할 수 없는 문제점을 가지게 된다. 반면에 최대 토크 출력 제어법은 제한된 전압과 전류로부터 운전 가능한 전압의 영역을 알아내어 이 영역을 만족하면서 전동기가 최대 토크를 발생할 수 있도록 제어 하는 방법이다. 유도전동기의 속도제어구간에서 전동기 상수에 변동이 많은 약계자 영역에서는 직접벡터제어를 수행하고 정격속도이하의 저속영역에서는 간접벡터제어를 수행함으로써 저속과 고속의 속도범위에 대해 고성능 제어를 실현할 수 있고 전동기 상수 변동에 강인한 고속운전이 가능하게 된다. 이와 같은 하이브리드형의 벡터제어방식에서 약계자 천이시점은 전동기의 누설 인덕턴스나 정격전류의 설정조건과 DC링크단의 전압의 이용조건에 따라 정격주파수보다 낮은 시점에서 결정될 수 있다. 따라서 고속영역이 아닌 정격속도이하에서 결정되는 천이속도는 전동기 상수의 영향에 민감해지게 되어 고정자 저항의 영향은 무시할 수 없게 된다. 본 연구에서는 원활한 벡터제어를 수행하기 위해 고정자 및 회전자 저항을 추정 알고리즘을 통해 얻어낸 파라미터값을 이용하여 약계자 천이시점 결정에 고려해 줌으로써 출력 토크의 특성을 보인다.

$$i_{ds}^* = I_{ds\ rate} / \omega_{r\ pu} \tag{1}$$

$$i_{qs}^* = \sqrt{I_{smax}^2 - i_{ds}^{*2}} \tag{2}$$

$I_{ds\ rate}$: 정격 자속전류
 $\omega_{r\ pu}$: 회전자 각속의 p.u. 값
 I_{smax} : 최대 고정자 전류

식(1),(2)를 조합하면 다음과 같이 정리된다.

$$(i_{qs}^*)^2 + \left(\frac{I_{ds\ rate}}{\omega_{r\ pu}}\right)^2 = I_{smax}^2 \tag{3}$$

이 식은 d축 기준전류가 $1/\omega_{rpm}$ 에 따라 감소될 때 q축 기준전류의 값이 속도가 증가함에 따라 증가하게 됨을 의미한다. 이 방법에서는 전압조건을 고려하지 않았으므로 기준전류를 충분히 유지하기 위한 전압여유를 확보할 수 없게 된다. 이 때문에 출력 토크는 기대치 이하로 작아지게 된다.

이에 대해 주어진 전압과 전류제한을 고려하여 d축 기준전류와 q축 기준전류를 구하고 이를 바탕으로 약계자 천이시점을 결정할 수 있다. 여기서 전압제한조건은 주어진 최대 고정자 전압하에서 다음과 같다.

$$(V_{ds}^{**})^2 + (V_{qs}^{**})^2 \leq V_{smax}^2 \tag{4}$$

$$\text{여기서 } V_{qs}^{**} = \omega_e L_s I_{ds}^{**}, \quad V_{ds}^{**} = -\omega_e L_s \alpha_{qs}^{**}$$

$$V_{smax} = \frac{V_{dc}}{\sqrt{3}} K$$

여기서 V_{dc} 는 직류 링크 전압이고 K는 전압이용률이 된다. 인버터가 전동기에 공급할 수 있는 최대 고정자 전류 I_{smax} 는 인버터의 전류정격과 열정격을 고려하여 정격전류를 결정하고 다음과 같이 주어진다.

$$(I_{ds}^{**})^2 + (I_{qs}^{**})^2 \leq I_{smax}^2 \tag{5}$$

이러한 식(4)와 식(5)의 조건을 고려하여 출력 토크를 최대로 하는 최적의 기준전류를 구하여 약계자 영역

2. 본 론

의 천이시점을 산출할 수 있다. 이때 이 약계자 영역의 최대범위를 최대슬립에 도달할 때까지의 주파수로 한다.

이때의 기준전류는

$$i_{ds}^{**} = \sqrt{\frac{(V_{smax}/\omega_e)^2 - (\sigma L_s I_{smax})^2}{L_s^2 - (\sigma L_s)^2}} \quad (6)$$

$$i_{qs}^{**} = \sqrt{I_{smax}^2 - i_{ds}^{**2}} \quad (7)$$

식(6)을 이용하여 기준자속은

$$\lambda_{ds}^{**} = L_m i_{ds}^{**} \quad (8)$$

그리고 약계자 천이시점은 다음과 같이 주어진다.

$$\omega_{base} = \frac{V_{smax}}{\sqrt{L_s^2 i_{ds\ rated}^2 + \sigma L_s^2 (I_{smax}^2 - I_{ds\ rated}^2)}} \quad (9)$$

여기서 $I_{ds\ rated}$ 은 정격 자속전류가 된다.

식(9)로부터 구한 약계자 천이시점은 대개 정격 주파수와 동일하게 설정되지만 일정 토오크 영역에서 큰 출력 토오크를 얻기 위해서 정격보다 큰 전류를 설정한 경우와 전동기의 누설 인덕턴스가 큰 경우 그리고 이용가능한 직류링크단 전압이 작게 설정된 경우 정격주파수보다 낮은 시점에서 약계자 천이시점이 설정될 수 있다.

그러므로 주어진 고정자 최대전압 V_{smax} 하에서 d축 및 q축 지령전압항을 구성하는 성분중 고속영역에서 무시가능한 고정자 저항성분의 전압강하분은 상술한 천이시점 변경조건을 고려해 볼 때 그 기여분을 무시할 수 없게 된다. 따라서 그 기여분을 고려하여 식(4)에 주어진 전압제한식을 나타내면 다음과 같다.

$$V_{qs}^{**} = R_s i_{qs}^{**} + \omega_e L_s i_{ds}^{**} \quad (10)$$

$$V_{ds}^{**} = R_s i_{ds}^{**} - \omega_e L_s \lambda_{ds}^{**} \quad (11)$$

이 식(10)과 식(11)의 고정자 저항이 포함된 식으로부터 새로운 약계자 천이시점을 결정하면 다음과 같다.

$$\omega_{base} = \frac{-b_w + \sqrt{b_w^2 - a_w c_w}}{a_w} \quad (12)$$

여기서

$$A_w = (L_s I_{ds\ rate})^2 + (\sigma L_s \sqrt{I_{smax}^2 - I_{ds\ rate}^2})^2$$

$$B_w = R_s (L_s - \sigma L_s) I_{ds\ rate} \sqrt{I_{smax}^2 - I_{ds\ rate}^2}$$

$$C_w = (R_s I_{smax})^2 - V_{smax}^2$$

동기속도 이하의 저속영역과 약계자 영역에서 약계자 천이시점을 결정함으로써 원활한 벡터제어를 수행하기 위해 고정자 저항 및 회전자 저항의 적절한 추정치 요구된다. 추정방법은 유도전동기의 단자전압과 전류를 바탕으로 동기좌표계에서 저항변동분을 추정하고 그 추정값을 간접벡터제어 슬립계산기의 이득값과 전향보상항에 포함된 고정자 저항값을 보상하는 방법을 이용하였다.

정상상태에서 동기좌표계의 고정자 전압방정식은 고정자 전류와 회전자 자속이 포함된 방정식으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_{ds}^c = R_s i_{ds}^c - \omega_e \sigma L_s i_{qs}^c \quad (13)$$

$$v_{qs}^c = R_s i_{qs}^c + \omega_e L_s i_{ds}^c \quad (14)$$

피드포워드블록에서 d-q축 기준전압 v_{ds}^{ff} 와 v_{qs}^{ff} 는 아래와 같이 주어진다.

$$v_{ds}^{ff} = R_{s0} I_{DREF} - \omega_e \sigma L_s I_{QREF} \quad (15)$$

$$v_{qs}^{ff} = R_{s0} I_{QREF} + \omega_e L_s I_{DREF} \quad (16)$$

여기서 $\sigma = 1 - L_m^2 / (L_s L_r)$ 는 누설 인덕턴스를 나타내고 R_{s0} 는 제어기에 설정된 고정자 저항값을 나타낸다.

동기각속도 ω_e 는 회전자 속도 ω_r 과 슬립각속도 ω_{sl} 의 합으로 주어진다.

d축 기준전압 v_{ds}^{ff} 과 v_{ds}^{fb} 과 d축 PI제어기의 출력전압 v_{ds}^{fb} 의 합으로 q축 기준전압 v_{qs}^{ff} 는 v_{qs}^{ff} 과 q축 PI 제어기의 출력전압 v_{qs}^{fb} 의 합으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} v_{ds}^{**} &= v_{ds}^{ff} + v_{ds}^{fb} \\ &= R_{s0} I_{DREF} - \omega_e \sigma L_s I_{QREF} + v_{ds}^{fb} \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} v_{qs}^{**} &= v_{qs}^{ff} + v_{qs}^{fb} \\ &= R_{s0} I_{QREF} - \omega_e L_s I_{DREF} + v_{qs}^{fb} \end{aligned} \quad (18)$$

저항보상블록에서는 회전자 및 고정자의 저항값 오차 ΔR_r , ΔR_s 를 제어기에 설정된 저항값과 전동기 기준 저항값의 차이로 정의하고 그 관계를 다음과 같이 나타낸다.

$$R_r = R_{r0} + \Delta R_r \quad (19)$$

$$R_s = R_{s0} + \Delta R_s \quad (20)$$

여기서 R_r , R_s 는 전동기의 기준 저항값이고 ΔR_r , ΔR_s 는 제어기에 설정된 저항값과 전동기의 기준 저항 값의 차가 된다.

정상상태 동기좌표계에서 고정자 전압방정식을 고정자 및 회전자 전류의 행렬식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} v_{ds}^c \\ v_{qs}^c \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -\omega_e L_s & 0 & -\omega_e L_m \\ \omega_e L_s & R_s & \omega_e L_m & 0 \\ 0 & -\omega_{sl} L_m & R_r & -\omega_{sl} L_r \\ \omega_{sl} L_m & 0 & \omega_{sl} L_r & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds}^c \\ i_{qs}^c \\ i_{dr}^c \\ i_{qr}^c \end{bmatrix} \quad (21)$$

행렬식을 고정자 전류만의 항으로 정리하여 d-q축 고정자 전압식으로 정리하면

$$v_{ds}^c = R_s i_{ds}^c - \omega_e L_s i_{qs}^c + \omega_e L_m \frac{\omega_{sl} L_m R_r i_{dr}^c + \omega_{sl}^2 L_m L_r i_{qr}^c}{R_r^2 + \omega_{sl}^2 L_r^2} \quad (22)$$

$$v_{qs}^c = R_s i_{qs}^c + \omega_e L_s i_{ds}^c + \omega_e L_m \frac{\omega_{sl} L_m R_r i_{qs}^c - \omega_{sl}^2 L_m L_r i_{ds}^c}{R_r^2 + \omega_{sl}^2 L_r^2} \quad (23)$$

제어기의 d-q축 지령전압인 식(17)과 식(18)을 저항관계식을 고려하여 상술한 고정자 전류만의 항으로 정리된 식(22)와 식(23)과 같게 두고 저항변동분 ΔR_r , ΔR_s 에 관하여 정리한다. 그리고 이 변동분을 그림1의 블록도에서 슬립각속도의 연산과 v_{ds}^{ff} 와 v_{qs}^{ff} 의 항에 고려해줌으로써 기준저항값에 수렴할 수 있게 한다.

3. 시뮬레이션 결과

동기속도 이내에서 추정된 고정자 저항을 바탕으로 하여 약계자 진입시 고정자 저항을 반영하여 결정된 천이시점과 기존의 약계자 제어방법인 $1/\omega_r$ 제어법을 적용하였을 때의 출력토크와 회전자 자속은 다음과 같다.

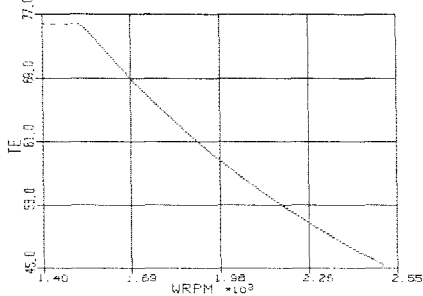


그림2. $1/\omega_r$ 제어시 출력 토크

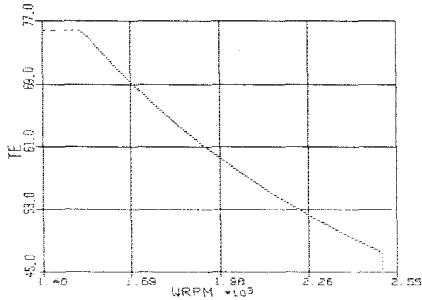


그림3. 적용한 약계자 제어시 출력 토크

그림2와 3은 22[Kw] 4극 유도전동기의 정상상태 출력토크를 나타낸다. 전류정격은 정격전류의 1.4배인 62[A]를 사용하였고 이때의 약계자 천이시점은 정격속도보다 낮은 1494 [rpm]으로 선정되었다. $1/\omega_r$ 제어법에 비해서 적용한 약계자 제어법은 약계자 천이시점에서는 출력 토크의 차이점이 관찰되지는 않으나 속도의 증가에 따라 출력 토크의 차이가 커짐을 알 수 있다.

그림4와 그림5는 동일한 속도구간에서 회전자 자속의 변화를 살펴본 것이다.

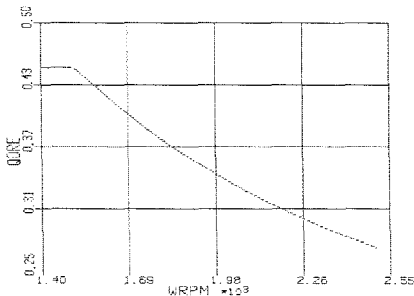


그림4. $1/\omega_r$ 제어시 회전자 자속

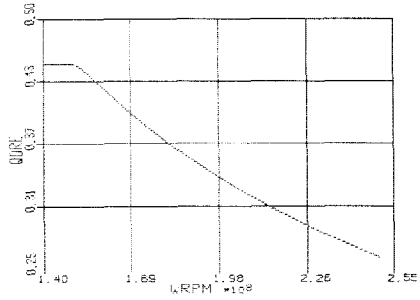


그림5. 적용한 약계자 제어시 회전자 자속

3. 결론

본 연구에서는 유도전동기의 약계자 제어시 고정자 저항의 변동을 고려하고 이때의 전압 및 전류조건에 따른 천이시점을 결정해줌으로서 개루프 방식의 약계자 제어법인 $1/\omega_r$ 에 비해 출력 토크가 향상될 수 있으므로 보다 약계자 제어시 효율적으로 벡터제어를 수행할 수 있음을 보였다.

4. 참고문헌

- [1]D.W.Novotny, T.A.Lipo, "Vector Control and Dynamics of AC Drives", CLARENDON PRESS · OXFORD, 1996
- [2]Takafumi Maruyama, Hideto Negoro, "A Stator and Rotor Resistance Estimation Method Based on Motor Voltage Equations and Current Control Variation in Steady Steady State", IPEC-Yokohama, pp.1290-1295, 1995
- [3]S.H.Kim, S.K.Sul "Maximum Torque Control of an Induction Machine in the Field Weakening Region", IEEE-IAS Ann. Mtg. Conf.Rec., pp.401~407, 1993