

Maximum Torque Operation of an Induction Machine
in the field weakening region

金 相 勳* · 薛 承 基** · 朴 旻 鎬***
(Sang-Hoon Kim · Seung-Ki Sul · Min-Ho Park)

Abstract--In this paper, a new approach for the induction machine control which ensures producing maximum torque per ampere over the entire field weakening region is presented. In addition, the relation of the output torque capability with the leakage factor of the machine is examined. Also the smooth and precise transition into the field weakening operation can be achieved by adjusting the base speed for the field weakening operation according to the flux level, the current limit and the voltage limit. The proposed scheme is verified through simulation and experiment for a 5hp laboratory induction motor drive system.

Key Words : Field Weakening Operation, Base speed, Voltage Limit, Current Limit

1. 서 론

견인, 전기자동차 및 엘리베이터의 운전에서 정출력 영역(constant power region)에서의 운전능력은 매우 중요하다. 벡터제어 유도전동기는 고정자 전류를 토크분 전류와 계자분 전류로 분리하여 독립적인 제어가 가능하므로 회전자의 속도가 증가함에 따라 계자분 전류를 감소시킴으로써 쉽게 정출력 영역에서 운전을 할 수 있다[1].

일반적으로 전동기의 출력 토크는 인버터가 전동기에 공급할 수 있는 최대 전압과 전류로 제한된다[2]. 정출력 영역의 운전이 요구되는 곳에서는 주어진 이들의 제한조건하에서 전동기의 토크를 최대로 제어할 필요가 있다. 이 경우 전동기는 통상 벡터제어로 운전되고 있으며, 최대 토크 운전을 위해서는 토크분 전류와 계자분 전류를 주어진 제한조건하에서 최적으로 분배하여 운전하여야 한다.

정출력 영역에서 유도전동기의 출력 토크는 약계자 방법에 따라 크게 달라진다. 통상적인 약계자 방법은 회전자 속도 ω_r 에 반비례하여 계자분 전류를 감소하는 것이다[3]. 그러나 이 방법을 적용할 경우 회전자의 기준자속(reference flux)이 너무 높기 때문에 속도 증가에 따라 전류제어를 위한 여유 전압이 점점 부족하게 되어 정확한 전류제어가 불가능해진다. 그 결과 '1/ ω_r ' 방법을 사용한 경우에는 주어진 전압과 전류의 제한조건하에서 전동기는 최대 토크를 발생시킬 수 없다. 최근 Xu등이 고정자 자속의 제한조건하에서 최대 토크를 위한 회전자의 기준자속을 유도하였다[4]. 그러나 이 방법에 의해서도 전동기가 최대 토크를 발생시킬 수 없는 속도 영역이 존재한다.

본 논문에서는 주어진 전압과 전류의 제한조건을 고려하여 전 약계자 영역에서 전동기가 최대 토크를 발생시킬 수 있도록 하는 새로운 약계자 운전방법이 제시되었다. 또한 전동기의 누설계수가 출력 토크 능력에 끼치는 영향이 조사되었으며, 약계자 운전의 시작 시점 즉, 기준 속도(base speed)를 기준자속과 제한된 전압, 전류에 따라 가변함으로 출력 토크의 저하없는 약계자 영역으로의 정확한 전이가 가능하도록 하였다.

*正 會 員 : 서울대 大 學 院 電 氣 工 學 科 博 士 課 程
 **正 會 員 : 서울대 工 大 電 氣 工 學 科 助 教 授 · 工 博
 ***正 會 員 : 서울대 工 大 電 氣 工 學 科 教 授 · 工 博
 接 受 日 字 : 1993年 6月 30日
 1次 修 正 : 1993年 10月 25日

제한안 방법과 '1/ω,' 방법에 의한 출력 토오크가 시뮬레이션과 실험을 통하여 비교되었다. 제안된 방법이 포함된 전체 제어 알고리즘이 TMS320-C30 DSP를 이용한 디지털 제어 시스템에서 구현되었다.

2. 전압과 전류 제한조건

일반적으로 인버터의 정격전압은 전동기의 정격과 일치하는데 비해, 인버터의 정격전류는 과도상대시 전동기가 높은 가속 토오크를 낼 수 있도록 전동기 정격의 150~200% 정도가 된다. 본 논문에서는 구동시스템의 정격전압은 전동기의 정격전압과 같고, 정격전류는 전동기의 정격전류의 1.5배라 가정한다. 이 주어진 전압과 전류제한조건하에서 제어가능한 기준 토오크분 전류 i_{ds}^e 와 기준 계자분 전류 i_{qs}^e 의 범위는 다음과 같이 구할 수 있다.

2.1 전압 제한 조건

회전자 자속 기준 벡터제어에서 동기좌표계의 정상상태 전압과 토오크는 아래의 식과 같이 나타낼 수 있다[5].

$$v_{qs}^e = R_s i_{qs}^e + \omega_e L_s i_{ds}^e \tag{1}$$

$$v_{ds}^e = R_s i_{ds}^e - \omega_e L_s i_{qs}^e \tag{2}$$

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m^2}{L_r} i_{ds}^e i_{qs}^e \tag{3}$$

여기서, v_{qs}^e, v_{ds}^e : d^e -과 q^e -축 고정자 전압

i_{qs}^e, i_{ds}^e : d^e -과 q^e -축 고정자 전류

ω_e : 동기 각 주파수

$L_e' = L_s - \frac{L_m^2}{L_r}$: 고정자 과도 인덕턴스

T_e : 토오크

인버터가 전동기 인가할 수 있는 최대 고정자 전압 V_{smax} 는 DC 링크 전압과 PWM 방법에 따라 결정된다. 본 논문에서는 넓은 선형 제어 전압영역을 얻을 수 있는 공간전압벡터 PWM 기법을 사용하였는데 이를 통해 얻을 수 있는 최대 고정자 전압 V_{smax} 는 $V_{dc}/\sqrt{3}$ 이 된다[6]. 이와같이 주어진 V_{smax} 하에서 v_{qs}^e 와 v_{ds}^e 는 다음과 같은 조건을 만족하여야 한다.

$$v_{qs}^{e2} + v_{ds}^{e2} \leq V_{smax}^2 \tag{4}$$

고속 영역에서 고정자 저항에 인가되는 전압은 인덕턴스에 인가되는 전압에 비해 매우 작게 되므로 식(1)과 (2)에서 무시될 수 있다. 이 가정하

에서 주어진 V_{smax} 와 기준전류 i_{qs}^e 와 i_{ds}^e 의 관계는 식(1), (2)과 (4)으로부터 식(5)와 같이 표현될 수 있다.

$$(W_e L_{s1}' i_{qs}^e)^2 + (W_e L_s' i_{ds}^e)^2 \leq V_{smax}^2 \tag{5}$$

식(5)는 주어진 속도와 전압제한 조건하에서 제어가능한 기준전류 i_{qs}^e 와 i_{ds}^e 의 범위를 나타내고 있다. 또한 이식은 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$\frac{i_{qs}^{e2}}{a^2} + \frac{i_{ds}^{e2}}{b^2} \leq 1 \tag{6}$$

여기서, $a = \frac{V_{smax}}{W_e L_c'}$, $b = \frac{V_{smax}}{W_s L_s'}$

식(6)으로부터 전압제한조건하에서 제어가능한 기준전류의 영역은 하나의 타원으로 표현될 수 있음을 알 수 있다. 타원의 영역은 속도 증가에 따라 점점 작아지는데, 이것은 제어가능한 기준전류의 영역은 속도 증가에 따라 점점 작아짐을 의미한다. 또한 동일한 속도에서도 타원의 모양, 즉 타원의 영역은 전동기의 누설 인덕턴스 또는 누설계수에 의해 크게 영향을 받는다. 이는 대개 타원의 모양은 이심률에 의해 결정되는데 식(6)의 이심률 e 는 식(7)과 같이 누설계수의 함수이기 때문이다.

$$e = \frac{\sqrt{b^2 - a^2}}{b} = \frac{\sqrt{L_s^2 - L_s'^2}}{L_s} = \sqrt{1 - \sigma^2} \tag{7}$$

여기서, σ 는 누설계수이다. 그림 1(a)와 (b)는 $d-q$ 전류평면에서 속도 증가에 따른 타원들의 모양과 그 타원들의 모양이 일정속도에서 누설계수에 따라 어떻게 달라지는가를 보이고 있다.

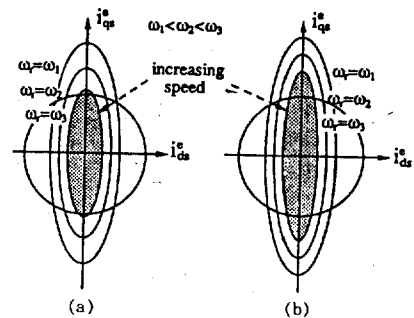


그림 1 전압제한 타원과 전류제한 원

(a) 누설계수가 큰 경우

(b) 누설계수가 작은 경우

Fig. 1 Voltage-limit ellipse and current-limit circle

(a) In case of large leakage factor

(b) In case of small leakage factor

그림 1(a)는 전동기의 누설계수가 큰 경우로 이심률이 작을때이다. 이 경우의 타원은 작은 누설계수를 가진 전동기의 경우인 그림 1(b)의 타원보다 속도 증가에 따라 더 빨리 축소하게 된다. 즉, 누설계수가 큰 경우, 제어 가능한 전류의 영역은 속도 증가에 따라 더욱 빨리 감소함을 나타낸다. 또한 누설계수에 따라 최대 슬립치도 변동하며 최대 출력 토오크도 영향을 받게 된다. 그러므로 전압제한 조건하에서 전동기의 누설계수는 무시될 수 없는 중요한 요소이다.

2.2 전류 제한 조건

인버터가 전동기에 공급할 수 있는 최대 고정자 전류 I_{smax} 는 인버터 자체의 정격과 전동기의 열정격(thermal rating)에 의해 결정된다. 주어진 I_{smax} 하에서 기준전류 i_{ds}^e 와 i_{qs}^e 는 다음과 같은 조건을 만족해야 한다.

$$i_{ds}^{e2} + i_{qs}^{e2} \leq I_{smax}^2 \quad (8)$$

식(8)으로부터 전류제한하에서 제어 가능한 전류의 영역은 I_{smax} 를 반지름으로 하는 원을 알 수 있다. 따라서 (8)의 전류제한조건을 만족시키기 위한 기준전류 i_{qs}^e 와 i_{ds}^e 는 주어진 원의 내부에 존재해야만 한다. 그림 1에서 알 수 있듯이 속도 증가에 따라 전압제한 타원은 줄어드는 반면에 전류제한 원은 일정하게 유지된다.

3. 최대 토오크의 발생을 위한 최적의 전류 조건

3.1 일반적인 방법('1/ωr' 방법)

약제자 운전을 위하여 가장 흔히 사용되는 방법은 회전자의 속도 증가에 반비례로 회전자의 자속을 감소시키는 것인데 이 방법이 앞에서 언급한 전압과 전류의 제한조건을 만족하는지를 알아보자. '1/ωr'방법에서 i_{qs}^e , i_{ds}^e 와 I_{smax} 대한 관계는 식(9)와 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$i_{ds}^e = I_{ds-rated} \cdot \frac{\omega_{base}}{\omega r} \quad (9)$$

$$i_{qs}^e = \sqrt{I_{smax}^2 - i_{ds}^{e2}} \quad (10)$$

여기서, $I_{ds-rated}$ 는 정격 제자분 전류를 나타낸다. 이 방법에서는 회전자의 자속을 속도 증가에 따라 감소시키기 위해 제자분 전류 i_{ds}^e 를 감소시킨다. 이때 전류의 정격을 최대한으로 이용하기 위해 토오크분 전류 i_{qs}^e 는 제자분 전류 i_{ds}^e 가 감소되

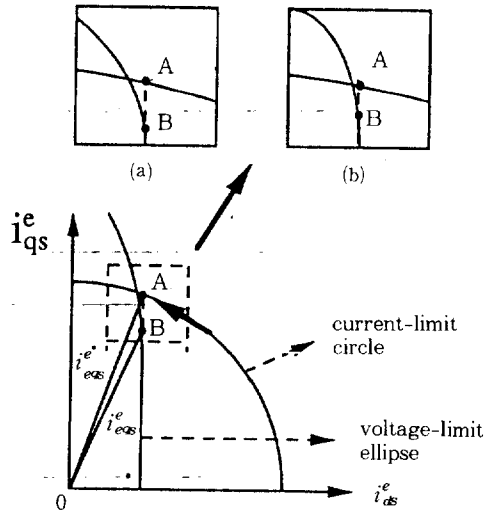


그림 2 '1/ωr' 방법에서의 기준전류벡터

(a) 누설계수가 큰 경우

(b) 누설계수가 작은 경우

Fig. 2 Reference current vector in '1/ωr' method

(a) In case of large leakage factor

(b) In case of small leakage factor

는 비율만큼 증가시킨다. 식(9)와 (10)을 결합하면, i_{qs}^e 와 i_{ds}^e 의 관계는 다음과 같이 된다.

$$\left(\frac{\omega_{base}}{\omega r} \cdot I_{ds-rated}\right)^2 + i_{qs}^{e2} = I_{smax}^2 \quad (11)$$

식(11)로부터 기준전류벡터 i_{qs}^e 의 궤적은 속도가 증가함에 따라 전류제한을 나타내는 원을 따라 이동함을 알 수 있다.

그림 2는 '1/ωr' 방법을 사용한 경우에 특정 속도에서 기준전압벡터 i_{qs}^e 가 (11)식으로부터 A점이 됨을 보여준다. 그림 2에 알 수 있는바와 같이 이 A점은 타원의 밖에 존재하므로 앞에서 언급한 전압 제한조건을 만족시키지 못한다. 결과적으로 실제 전류벡터 i_{qs}^e 는 기준전류벡터 i_{qs}^e 를 추종하지 못하고 전압 제한으로 인하여 B점으로 이동하게된다. 이로 인하여 전동기는 원하는 기동토크를 발생하지 못하게 되고 저하된 토오크를 발생한다. 이 현상은 전동기의 누설계수에 따라 다소 다르다. 큰 누설계수를 가진 전동기의 경우에 이심률 e가 작으므로 그림 2(a)에서 알 수 있듯이 기준전류벡터는 타원에서 더욱 벗어나게 되어 출력 토오크

크의 저하가 두드러지는 반면, 그림 2(b)에서 처럼 작은 누설계수의 전동기 경우에는 이심률 e 는 크므로 타원에서 그다지 벗어나지 않게된다. 그러나 매우 높은 속도에서는 누설계수의 값에 관계없이 이 현상은 두드러지게 나타난다.

3.2 최대 출력 토오크를 위한 최적 방법

앞절에서 언급한 바와 같이, '1/ω' 방법은 전압제한조건을 만족시키지 못하기 때문에 출력 토오크를 최대로 얻을 수 없다. 이에 본 절에서는 전압제한조건과 전류제한조건을 동시에 만족하면서 최대 출력 토오크를 발생을 위한 최적의 전류벡터를 구하는 방법을 제시한다.

전압 제한조건(5)와 제한조건(8)을 동시에 만족하기 위한 기준전류벡터 i_{qs}^{e*} 는 주어진 속도에서 전압제한 타원과 전류제한 원의 내부에 존재해야 한다. 그림 3의 빗금친 부분이 이 조건을 만족하는 기준 전류의 영역을 나타낸다. 이 영역을 만족하는 i_{qs}^{e*} 와 i_{ds}^{e*} 의 조합은 수없이 많다. 이들의 조합중에서 식(12)의 함수 F를 최대로 하는 조합이 바로 최대 출력 토오크를 위한 최적의 조합이 된다. 이 함수 F는 아래와 같이 정의한다.

$$F = \frac{T_e}{k_1} = i_{qs}^{e*} \cdot i_{ds}^{e*} \quad (12)$$

여기서, $k_1 = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m^2}{L_r}$

최대 출력 토오크를 위한 최적의 i_{qs}^{e*} 와 i_{ds}^{e*} 의 조합을 구하는데 있어서 영향을 주는 제한조건에 따라 전 약계자 영역을 크게 두 구간으로 나눌 수 있다.

약계자 영역 I ($\omega_{base} < \omega_e \leq \omega_1$)

이 영역의 범위는 약계자 영역의 운전 시작

속도로부터 최대 슬립에 도달할 때까지의 속도이다. 그림 3의 빗금친 영역에서 함수 F를 최대화하는 점, 즉 출력 토오크를 최대로하는 점은 C점임을 쉽게 알 수 있다. 그러므로 최대 토오크 발생을 위한 최적 기준전류벡터 i_{qs}^{e*} 는 전압제한 타원과 전류제한 원의 교점으로 된다. 이 C점에서의 F_1 은 1/ωr 방법으로 인한 B점에서의 F_2 보다 크다. 이것은 타원과 원의 교점을 기준전류벡터로 선정하게 되면 주어진 제한조건하에서 1/ωr 방법보다 더 큰 출력 토오크를 발생시킬 수 있음을 나타낸다. 이 경우 최대 출력 토오크를 위한 최적 기준전류는 식(5)와 (8)로부터 아래와 같이 구할 수 있다.

$$i_{qs}^{e*} = \sqrt{\frac{(V_{smax}/\omega_e)^2 - (L_s' I_{smax})^2}{L_s^2 - L_s'^2}} \quad (13)$$

$$i_{ds}^{e*} = \sqrt{I_{smax}^2 - i_{qs}^{e*2}} \quad (14)$$

이 최적 기준전류벡터는 속도의 증가에 따라 타원과 원의 교점을 따라 이동하게 된다.

정 토오크 영역(constant torque region)에서 약계자 영역으로의 전이를 위한 기준속도 ω_{base} 를 어떻게 선정하는가에 따라 출력 토오크는 영향을 받는다. 이 기준속도는 대개 정 토오크 영역에서 사용한 기준자속치에 따라 다르게 선정된다. 그러나 전류제어기가 포화되기 시작하는 점은 전압과 전류 제한조건에 따라 달라지기 때문에 기준속도는 기준자속치와 더불어 전압과 전류의 제한조건에 따라 조절되어야 할 것이다. 만약 그러하지 못한다면 출력 토오크가 저하하게 된다. 이 조절된 최적 기준속도는 식(5)로부터 다음식과 같이 된다.

$$\omega_{base} = \frac{V_{smax}}{\sqrt{L_s^2 I_{ds-rated}^2 + L_s'^2 (I_{smax}^2 - I_{ds-rated}^2)}} \quad (15)$$

이 영역에서는 속도 증가에 따라 계자분 전류의 감소로 인하여 슬립 ω_{sl} 은 계속해서 증가하게 된다. 속도가 더욱 더 증가하여, 슬립이 최대치에 이르면 약계자 영역 II가 시작된다.

약계자 영역 II ($\omega_e > \omega_1$)

속도가 더욱 증가함에 따라, 타원은 더욱 줄어들게 되어 그림 4에서 처럼 원에 거의 포함되게 된다. 그러므로 전압제한조건(5)의 범위는 전류제한조건(8)의 범위에 거의 포함되게 된다. 이 영역의 시작시점 ω_1 은 전압제한조건만을 고려하였을 경우 최대 토오크를 발생시키는 기준전류벡터가 전류제한조건(8)의 범위에 포함되기 시작할

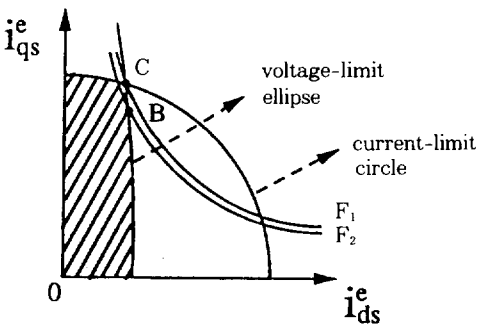


그림 3 제안된 방법에서의 기준 전류 벡터
Fig. 3 Reference current vector in proposed method

때의 속도이며, 이때 슬립은 최대가 된다. 따라서 이 ω_1 이상의 속도에서는 전압제한조건만을 고려하면 된다. 즉, 출력 토오크는 전압제한조건에 의해 결정된다. 이 경우 최대 출력 토오크를 위한 최적 기준전류는 식(5)와 (12)로부터 아래와 같이 구할 수 있다.

$$i_{ds}^{e*} = \frac{V_{smax}}{\sqrt{2} \omega_e L_s} \quad (16)$$

$$i_{qs}^{e*} = \frac{V_{smax}}{\sqrt{2} \omega_e L_s'} \quad (17)$$

그림 4는 이 영역에서 속도 증가에 따라 전압제한조건을 만족하는 최적 기준전류 벡터의 궤적을 보인다. 영역 II에서는 영역 I에서와는 달리 최대 슬립을 유지하기 위하여 i_{ds}^{e*} 가 감소함에 따라 i_{qs}^{e*} 또한 감소되어야 한다. $1/\omega_e$ 방법에서는 이러한 조건이 무시되기 때문에 전동기가 불안정한 토오크 영역에서 운전하게 되고, 그 결과 제어가 불가능해진다.

최대 슬립 ω_{st-max} 은 식(16)과 (17)로부터 얻을 수 있으며, 이때의 속도 ω_1 은 식(16)과 (17)이 식(8)의 최대값을 만족한다는 조건으로부터 아래와 같이 얻어진다.

$$\omega_{st-max} = \frac{i_{qs}^{e*}}{T_r i_{ds}^{e*}} = \frac{L_s}{T_r L_s'} = \frac{1}{T_r \sigma} \quad (18)$$

$$\omega_1 = k_2 \cdot \left(\frac{V_{smax}}{I_{smax}} \right) \quad (19)$$

여기서, T_r = 회전자 시정수,

$$\sigma = \left(1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r} \right) : \text{누설 계수,}$$

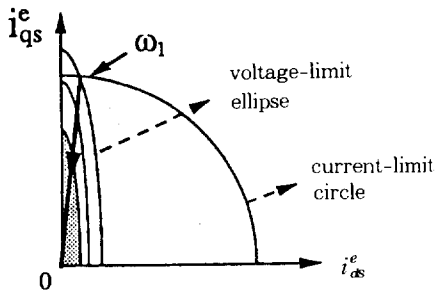


그림 4 영역 II에서 최적 기준전류벡터의 궤적
Fig. 4 Trajectory of optimal current reference vector in field-weakening region II

$$k_2 = \sqrt{\frac{L_s'^2 + L_s'^2}{2L_s^2 L_s'}}$$

식(18)과 (19)로부터 최대 슬립 ω_{st-max} 은 누설 계수에 의해 결정됨을 알 수 있고, 또한 ω_1 은 누설인덕턴스뿐만 아니라 전압과 전류의 제한조건에 의해 결정됨을 알 수 있다.

앞서 기술한 비와 같이 타원의 이심률 즉, 누설계수는 타원의 모양에 크게 영향을 끼친다. 또한 이로 인하여 각 영역의 속도범위는 매우 달라지게 된다. 누설 계수가 작은 경우 영역 I의 속도범위가 매우 넓은데 비하여, 누설계수가 큰 경우에는 영역 I의 범위가 좁은 반면, 영역 II의 속도범위가 넓게된다. 표1의 전동기 A인 경우 누설인덕턴스와 누설계수는 각각 1.8[mH]과 0.05833이다. 이 경우 ω_{base} 와 ω_1 에 대한 회전자의 속도는 각각 1663과 6322[rpm]이 된다. 따라서 전동기 A는 작은 누설계수를 가지는 경우에 해당되며, 영역 I의 범위가 거의 정격속도의 3.65배에까지 확장된다. 그러므로 최대 출력 토오크를 얻기 위해서는 전압제한조건과 전류제한조건을 동시에 고려해야 할 속도범위가 넓어진다. 반면에 표2의 전동기 B의 경우, 누설인덕턴스와 누설계수는 각각 3.5[mH]와 0.10495이고, 이 경우 ω_{base} 와 ω_1 에 대한 회전자의 속도는 각각 1704과 4290[rpm]이 된다. 전동기 B는 다소 큰 누설계수를 가지는 경우에 해당되며, 영역 I의 범위는 전동기 A의 경우에 비해 반으로 줄어든다. 그러므로 슬립이 최대가 되는 속도는 전동기 A의 경우에 비해 작아지고, 최대 출력 토오크는 전동기 A의 경우에 비해 다소 줄어든다.

4. 제어 시스템의 구현

그림 5는 제한된 기법이 포함된 시스템의 블록도를 보인다. 전체 시스템은 속도제어기, 자속제어기, 전류제어기와 간접벡터제어기로 구성되어 있다. 전류제어기법으로써 동기좌표계 PI 제어를 사용하였으며, 전압변조는 선형 제어 전압 영역이 넓은 공간전압벡터 PWM기법을 사용하였다[6]. 또한 d-q 축의 상호 간섭을 제거하기 위해 선향제어(feedforward control)가 포함되었다[5].

자속제어기의 기준 회전자 자속 λ_d^e 은 각 영역에서 구한 최적 기준전류 i_{ds}^{e*} 를 사용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

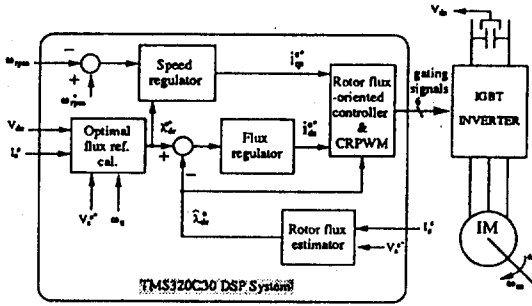


그림 5 제어 시스템의 블럭도
 Fig. 5 Block diagram of the whole control system

$$\lambda_{dr}^e = L_m \hat{i}_{ds}^e \quad (20)$$

실제 회전자 자속은 알기 어려우므로, 대개 그것의 추정치가 사용되는데, 본 논문에서는 전류와 전압으로부터 고정자 자속을 구하여 이로부터 회전자 자속을 다음과 같이 추정하였다[7].

$$\lambda_s^{\wedge} = \int (V_s - r_s I_s) dt \quad (21)$$

$$\lambda_r^{\wedge} = \frac{L_r}{L_m} (\lambda_s^{\wedge} - L_s' i_s) \quad (22)$$

여기서, λ_s^{\wedge} : 추정된 고정자 자속,
 λ_r^{\wedge} : 추정된 회전자 자속,
 (\wedge) : 추정치.

이러한 식들을 통하여 회전자 자속을 얻는 방법에서는 적분연산에 포함될 수 있는 초기 옴셀이 문제가 되기 때문에 실용적으로 구현하기 어렵다. 이에 본 논문에서는 순수 적분대신에 일차 지연 필터를 사용하였는데, 본 논문의 관심인 고속 영역에서 좋은 특성을 보인다[7].

5. 시뮬레이션과 실험 결과

시뮬레이션과 실험은 5kHz IGBT 인버터 5hp 유도전동기 시스템에 대하여 행하여졌다. 제안된 방법을 포함한 전체 제어 알고리즘이 TMS320C30 DSP를 CPU로 사용한 디지털 제어시스템에서 구현되었다. 실험과 시뮬레이션에 사용된 5hp 유도전동기 'A'의 정격과 상수는 표1에 나타내었다.

그림 6(a)와 (b)는 $1/\omega_r$ 방법과 제안된 방법을 사용한 경우의 출력 토오크 특성을 각각 보인다.

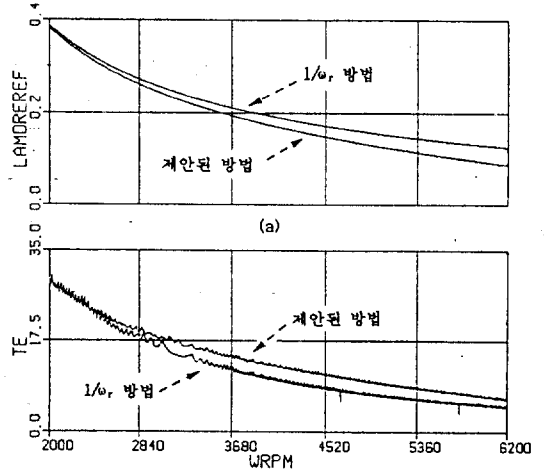


그림 6 기준 자속과 토오크 특성
 (a) 기준 회전자 자속 (b) 토오크
 Fig. 6 Reference flux and torque characteristic
 (a) Reference rotor flux
 (b) Torque

이로부터 제안된 방법을 사용한 경우가 $1/\omega_r$ 방법을 사용한 경우보다 더 큰 출력 토오크를 발생시킬 수 있음을 알 수 있다. 그 출력 토오크의 차이는 최대 3.1 N-m(0.15pu)가 된다. 이 시뮬레이션 결과를 입증하는 실험결과가 그림 7에 보인다.

그림 8(a)와 (b)는 전동기를 정지시부터 5000 [rpm]까지 가속했을 경우 출력 토오크와 기준자

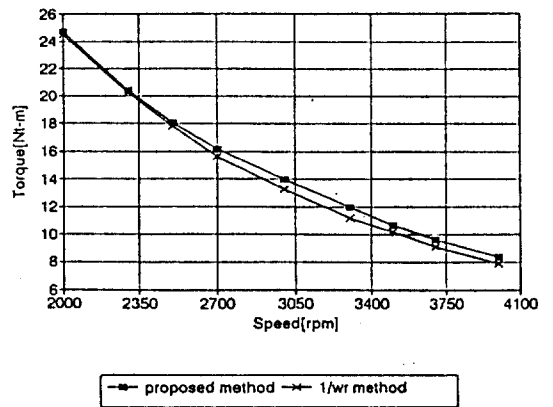


그림 7 실측된 토오크 특성
 Fig. 7 Measured torque capability

속을 보인다. 이 경우 식(15)에서 구한 기준속도 (base speed)가 사용되었다. $1/\omega_r$ 방법에서는, 앞 절에서 기술된 바와 같은 이유로 출력 토오크가 저하되는 현상 이외에 기준자속이 너무 높기 때문에 전류제어를 위한 충분한 전압이 확보되지 못하여 벡터제어가 이루어지지 못한다. 그 결과 지령속도(command speed)에 도달한 경우 출력 토오크에 진동이 발생하고 있음을 그림 8(b)에서 알 수 있다. 따라서 전류제어를 위한 충분한 전압을 확보하기 위하여 고속에서 기준자속을 낮출 필요가 있다. 이를 위해 기준속도가 1480 [rpm]로 낮게 선정되었다. 이로써 비록 고속에서의 자속은 낮아지게 되지만, 저속에서도 기준자속은 최적의 기준자속보다 낮아지게 되어 출력 토오크가 저하된다. 따라서 같은 속도에 도달하기 위해서는 그림 8(c)에 알 수 있듯이 더 많은 가속시간이 필요하다.

그림 9는 약계자 영역으로의 전이시점 부근에서 출력 토오크 특성을 보인다. 기준 속도를 어떻게 선정하는가에 따라 출력 토오크가 달라짐을 알 수 있다. 그림 9(b)는 식(15)로부터 구한 최적 기준속도 1663[rpm]을 사용한 경우로 정격속도를 기준속도로 한 경우인 (a)보다 출력 토오크의 저하없이 정확한 전이가 이루어짐을 알 수 있다.

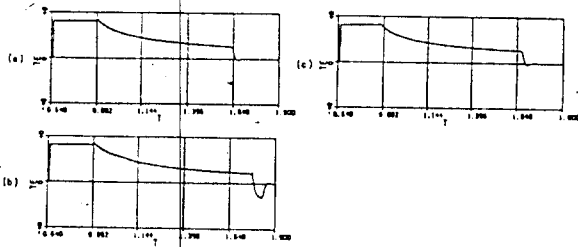


그림 8 과도상태시의 출력 토오크 특성
 (a) 제안된 방법
 (b) $1/\omega_r$ 방법
 (c) $1/\omega_r$ 방법(기준 속도로 1480[rpm] 사용시)
Fig. 8 Output torque characteristic during transient
 (a) proposed scheme
 (b) $1/\omega_r$ method
 (c) $1/\omega_r$ method(using 1480[rpm] as base speed)

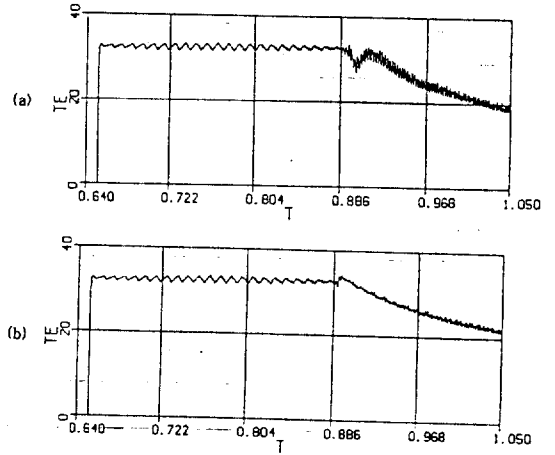


그림 9 기준 속도의 detuning 효과
 (a) 기준속도로서 정격속도 사용시
 (b) 최적의 기준 속도 사용시
Fig. 9 Detuning effect of the base speed
 (a) Using the rated base speed
 (b) Using the optimal base speed

그림 10은 속도가 1500[rpm]에서 3700[rmp]으로 변동할때 출력 토오크의 과도응답을 보여주는 실험파형이다. $1/\omega_r$ 방법으로는 같은 속도에 도달하기 위해서는 제안된 방법보다 더 많은 가속시간이 요구됨을 알 수 있다.

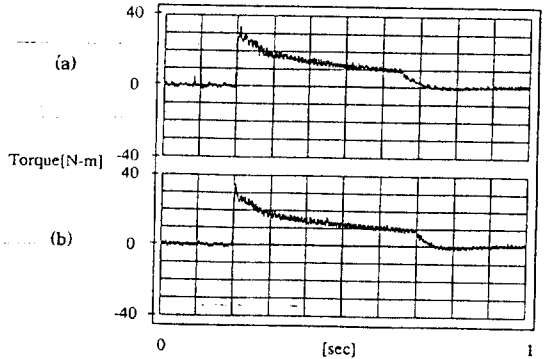


그림 10 과도응답시 토오크의 실험 파형
 (a) 제안된 방법
 (b) $1/\omega_r$ 방법
Fig. 10 Transient response of torque
 (a) proposed scheme
 (b) $1/\omega_r$ method

표 1 유도전동기 A의 정격과 상수

Table. 1 Rating and parameters of induction machine A

| |
|---|
| 5hp, 220V, 4poles 60Hz |
| $R_s : 0.29\Omega$ $R_r : 0.3789\Omega$ |
| $L_{ls} : 1.8mH$ $L_{lr} : 1.8mH$ |
| $L_m : 59mH$ |

표 2 유도전동기 A의 정격과 상수

Table. 2 Rating and parameters of induction machine B

| |
|---------------------------------------|
| 3hp, 230V, 4poles 60Hz |
| $R_s : 0.92\Omega$ $R_r : 0.66\Omega$ |
| $L_{ls} : 3.5mH$ $L_{lr} : 3.5mH$ |
| $L_m : 61.4mH$ |

6. 결 론

약계자 운전을 위하여 일반적으로 이용되는 $1/\omega$ 방법을 사용한 경우, 전압제한 조건을 만족시키지 못함으로 인해 구동 시스템의 최대 토오크 능력을 충분히 이용할 수 없다. 본 논문에서는, 주어진 전압과 전류의 제한조건을 고려하여 전약계자 영역에서 전동기가 최대 토오크를 발생 할 수 있도록 하는 새로운 약계자 운전방법이 제시되었다. 또한 전동기의 누설계수가 출력 토오크에 미치는 영향이 해석되었으며, 약계자 운전의 시작시점 즉, 기준속도를 기준자속과 전압, 전류 제한조건에 따라 가변함으로써 정확한 약계자 영역으로의 전이를 가능하게 하였다. 시뮬레이션과 실험을 통하여 제안된 방법이 적용된 유도 전동기 구동 시스템의 출력 토오크가 '1/ ω ' 방법이 적용된 시스템에서의 출력 토오크보다 크게 향상됨을 확인하였다.

참 고 문 헌

[1] J. M. D. Murphy and F. G. Turnbull, *Power Electronic Control of AC Motors*, Pergamon Press, 1988., pp.285-287.
 [2] P. Vas, *Vector Control of AC Machines*, Clarendon Press, 1990., pp.124-126.
 [3] R. Joetten and H. Schierling, "Control of the Induction Machine in the Field Weakening

Range," in Proc. IFAC 1983., pp.297-304.

[4] X. Xu, R. De Donker and D. W. Novotny, "Stator Flux Orientation Control of Induction Machines in the Field Weakening Region," IEEE- IAS Annual Meeting Conf. Rec., 1988., pp.437-443.
 [5] D. W. Novotny and R. D. Lorenz, "Introduction to Field Orientation and High Performance AC Drives," in Tutorial Course Rec., IEEE- IAS Annual Meeting Conf. Rec., 1985., Section 1 and 6.
 [6] H. W. Van Der Broeck, et. al., "Analysis and Realization of a Pulse-Width Modulator Based on Voltage Space Vectors." IEEE Trans. Ind. Appl., Vol.24, No.,1, Jan./Feb., 1988., pp.142-150.
 [7] Tsugutoshi Ohtani, "A New Method of Torque Control Free from Motor Parameter Variation in Induction Motor Drive," IEEE- IAS Annual Meeting Conf. Rec., 1986., pp. 203-209.

저 자 소 개



김상훈(金相勳)

1964년 9월 11일생 1987년 서울대 공대 전기공학과 졸업 1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사) 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.



설승기(薛承基)

1958년 3월 25일생. 1980년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1986년~88년 미국 Univ. of Wisconsin-Madison 객원연구원. 1988~90년 금성산전 연구소 책임연구원. 현재 서울대 공대 전기공학과 조교수.



박민호(朴旻鎬)

1934년 9월 8일생. 1947년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1953년 동 대학원 졸업(공학박사). 1956년 미국 미네소타 대학원 수학. 1981년~82년 당학회 회장 역임. 현재 서울대 공대 전기공학과 명예교수. 당학회 평의원.