

약계자영역에서 유도전동기의 고정자자속 기준제어를 위한 최적 기준자속 선정방법

신명호*, 현동석*, 조순봉**

* 한양대학교 전기공학과, ** 두원공과대학 전기과

Selection of Optimal Stator Flux Reference of Stator Flux-Oriented Induction Machine Drive in Field Weakening Region

Myoung-Ho Shin*, Dong-Seok Hyun*, Soon-Bong Cho**

* Dept. of Electrical Engineering, Hanyang University, **Doowon Technical College

ABSTRACT

기존의 약계자영역에서의 유도전동기의 고정자자속 기준제어방법은 고정자기준자속을 회전자의 회전속도에 반비례해서 저감시키는 것이다. 본 논문에서는 이러한 기존의 방법에 의해서는 최대토크를 얻지 못함을 보이고, 최대토크를 얻기 위하여 전압제한조건, 토크제한조건, 및 전류제한조건을 고려한 새로운 고정자기준자속 선정방법을 제안한다.

1. 서론

공작기계, 스피들 드라이브와 같은 응용분야에서 약계자영역에서 최대토크를 유지하는 것은 중요하다. 약계자영역에서 최대토크의 유지는 전류정격과 인버터에서 공급하는 전압에 의해서 영향받는데, 약계자영역에서의 최대토크운전을 위하여 몇몇 연구들이 수행되었다^{[1]-[3]}.

회전자자속 기준제어에서, 전압제한조건과 전류제한조건을 고려한 유도전동기의 약계자영역에서의 최대토크제어에 관한 연구가 발표되었는데^[3], 이 방식에서는 전압제한조건과 전류제한조건을 고려하여 최대토크운전을 달성하였지만 제어기의 파라미터가 모터의 파라미터와 일치하지 않을 때 출력토크가 저감되는 문제가 있다^[4].

유도전동기의 약계자영역에서 최대토크를 얻기 위해서는 기준자속의 선정이 중요한데, 기존의 고정자자속 기준제어(이하 SFO)에서는 고정자기준자속을 회전자의 회전속도에 반비례해서 저감시키는 방법("1/ω_r" 방법)을 사용하였다^[1]. 그러나, 이러한 방법에서는 전동기의 전압제한조건을 고려하지 않았기 때문에 최대토크를 얻을 수 없다.

본 논문에서는 기존의 약계자운전에 의해서 최대토크를 얻을 수 없음을 보이고, 최대토크를 얻기 위하여, 전압제한조건, 토크제한조건, 전류제한조건을 고려한 새로운 고정자 기준자속의 선정방법을 제안하며, 제안한 방법의 타당성을 시뮬레이션과 실험을 통하여 입증한다.

2. 전압, 전류, 및 토크제한조건

2.1 전압제한조건

유도전동기의 고정자자속기준제어에서, 정상상태 전압 방정식은 회전 d-q 좌표계에서 다음과 같다.

$$v_{ds} = R_s i_{ds} \quad (1)$$

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + \omega_e \lambda_{ds} \quad (2)$$

여기서, v_{ds} , v_{qs} = d축 및 q축 고정자전압, R_s = 고정자저항, i_{ds} , i_{qs} = d축 및 q축 고정자전류, ω_e = 동기 각주파수, λ_{ds} = d축 고정자자속이다.

모터에 인가되는 최대전압을 V_{sm} 이라 하면, 식 (3)의 전압제한조건을 만족해야 한다.

$$v_{ds}^2 + v_{qs}^2 \leq V_{sm}^2 \quad (3)$$

(1)식, (2)식, 및 (3)식으로부터 $(R_s i_{qs})^2 \ll V_{sm}^2$ 을 고려하면, 식 (4)와 (5)가 유도된다.

$$i_{qs} \leq \frac{|V_{sm}| - \omega_e \lambda_{ds}}{R_s}, \text{ if } R_s i_{qs} + \omega_e \lambda_{ds} \geq 0 \quad (4)$$

$$i_{qs} \geq \frac{-|V_{sm}| - \omega_e \lambda_{ds}}{R_s}, \text{ if } R_s i_{qs} + \omega_e \lambda_{ds} < 0 \quad (5)$$

q축 지령전류 i_{qs}^* 가 전압제한조건을 만족하는 영역의 밖에 존재하면, 전압여유가 없어서 전류제어가 이루어지지 않는 문제가 발생한다.

2.2 전류제한조건

최대 고정자전류 I_{sm} 은 과도상태에서 가감속을 빠르게 하기 위하여 보통 정격전류의 150%에서 200%로 하는데, 본 논문에서는 150%를 사용하였다. 이때 다음의 전류제한조건을 만족하여야 한다.

$$i_{ds}^* + i_{qs}^* \leq I_{sm} \quad (6)$$

2.3 토크제한조건

SFO 시스템의 토크는 식 (7)과 같으며, 정상상태 방정식으로부터, SFO 시스템의 안정조건은 식 (8)과 같다^[5]. 식 (7) 및 식 (8)로부터 식 (9)의 토크제한이 유도된다.

$$T_e = \frac{3}{4} P \lambda_{ds} i_{qs} \quad (7)$$

$$T_e^* \leq \frac{3}{4} P \frac{(1-\sigma)}{2\sigma L_s} \lambda_{ds}^* \quad (8)$$

$$i_{qs}^* \leq \frac{(1-\sigma)}{2\sigma L_s} \lambda_{ds}^* \quad (9)$$

여기서, P =극수, σ =누설계수 ($=1-L_m^2/L_s L_r$), L_m =자화인덕턴스, L_r , L_s =회전자 및 고정자 자기인덕턴스이다.

시스템이 안정하기 위해서는 위의 토크제한조건이 어떠한 상황에서도 만족되어야만 한다. 토크제한영역은 기계의 누설계수에 영향을 받는데, 누설계수가 크면 영역이 작아지게 된다. 또한, 고정자 기준자속이 작은 경우에 토크제한영역이 작음을 알 수 있다.

3. 최대토크를 위한 최적 기준자속

3.1 기존의 방법

약계자제어를 위한 기존방법($1/\omega_e$)에서, 기준자속은 회전속도에 반비례해서 저장된다. 이 방법에서 기준자속은 기준속도 ω_b 이상에서 식 (10)과 같다. 지령전류 i_{qs}^* 는 식 (9)의 토크제한 또는 식 (6)의 전류제한에 의해서 제한되는데, 약계자영역에서 기준자속값이 감소하기 때문에 보통, 전류제한보다는 토크제한에 의해서 제한된다.

$$\lambda_{ds}^* = \frac{\omega_b}{\omega_e} \lambda_{ds_rated}^* \quad (10)$$

여기서 $\lambda_{ds_rated}^*$ 는 정격 d축 기준자속이다.

그림 1은 주어진 ω_e 에서 기존방법의 전압, 토크제한이다. 자속이 λ_{ds_A} 일 때 q축 전류 i_{qs} 는 전압제한에 의해서 점 A가 될 수 있지만, q축 지령전류 i_{qs}^* 는 토크제한에 의해서 점 A₁으로 제한되기 때문에 i_{qs} 는 점 A₁이 된다. 따라서 전압여유를 충분히 사용하지 못하게 된다.

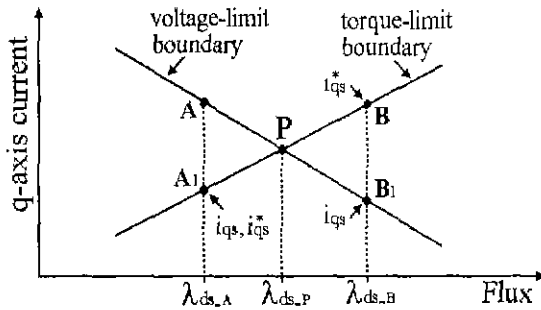


그림 1 $1/\omega_e$ 방법에서의 전압 및 토크제한

자속이 λ_{ds_B} 인 경우 i_{qs}^* 는 토크제한에 의해서 점 B가 되지만, 이 점은 전압제한영역 밖에 있기 때문에 전압여유가 없어서 전류제어가 되지 않으므로 i_{qs} 는 점 B₁으로 떨어지게 된다. 만일 기준자속을 전압제한조건과 토크제한조건이 일치하도록 λ_{ds_P} 로 선정한다면 i_{qs}^* 및 i_{qs} 는 점 P에서 일치하게 되고 i_{qs} 는 P에서 최대값이 된다.

3.1 제안한 방법

전압제한조건만을 고려했을 경우의 토크 T_{e_v} 는 식 (11)과 같이 나타낼 수 있으며, 토크제한조건만을 고려했을 경우의 토크 T_{e_t} 는 식 (12)와 같다

$$T_{e_v} = \frac{3}{4} P \lambda_{ds} i_{qs} = \frac{3}{4} P \frac{V_{sm} \lambda_{ds} - \omega_e \lambda_{ds}^2}{R_s} \quad (11)$$

$$T_{e_t} = \frac{3}{4} P \lambda_{ds} i_{qs}^* = \frac{3}{4} P \frac{(1-\sigma)}{2\sigma L_s} \lambda_{ds}^2 \quad (12)$$

그림 2는 자속변화에 따른 T_{e_v} 와 T_{e_t} 가 나타나 있는데, T_{e_t} 는 주파수와 관계가 없으며, T_{e_v} 는 ω_e 가 증가할 때 작아지는 모습을 나타내고 있다. 주어진 ω_e 에서 T_{e_v} 가 최대가 되는 자속을 $dT_{e_v}/d\lambda_{ds}=0$ 의 조건으로 구하면, 각각의 ω_e 에서 T_{e_v} 는 식 (13)의 자속에서 최대가 된다. $T_{e_v_m}$ 은 T_{e_v} 의 최대점만을 연결한 직선인데, 식 (11)의 ω_e 에 $V_{sm}/(2\lambda_{ds})$ 를 대입한 후 정리하면 식 (14)가 되며, T_{e_v} 와 $T_{e_v_m}$ 이 만나는 점 J에서의 임계자속 λ_{ds_c} 는 식 (15)와 같다.

$$\lambda_{ds} = V_{sm}/(2\omega_e) \quad (13)$$

$$T_{e_v_m} = \frac{3}{4} P \frac{V_{sm}}{2R_s} \lambda_{ds} \quad (14)$$

$$\lambda_{ds_c} = \frac{\sigma L_s V_{sm}}{R_s(1-\sigma)} \quad (15)$$

토크지령은 토크제한에 의해서 제한된다. 그림 2에서, 어떤 특정자속에서, T_{e_t} 가 T_{e_v} 보다 작은 경우 토크지령치 및 출력토크는 T_{e_t} 가 되지만 T_{e_t} 가 T_{e_v} 보다 큰 경우에는 토크지령은 토크제한기에 의해서 T_{e_t} 가 되지만 출력토크는 전압제한조건 때문에 q축 전류가 제어되지 않아서 T_{e_v} 가 된다.

최대토크가 발생하는 점을 살펴보면, 자속이 λ_{ds_c} 보다 작은 경우, T_{e_v} 와 T_{e_t} 의 교점(K, L)에서 발생하며, 동시에 i_{qs} 가 최대가 된다. 그러나 자속이 λ_{ds_c} 보다 큰 경우, i_{qs} 는 T_{e_v} 와 T_{e_t} 의 교점(H₁, I₁)에서 최대가 되지만 최대토크는 T_{e_v} 의 최대점(H, I)이 된다.

자속이 λ_{ds_c} 보다 큰 경우 최대토크를 위한 최적자속의 지령 $\lambda_{ds_opt_1}^*$ 은 식 (13)에서 식 (16)과 같이 나타낼 수 있으며, 자속이 λ_{ds_c} 보다 작은 경우 최대토크를 위한 최적자속의 지령치를 구하기 위해서 T_{e_v} 와 T_{e_t} 를 일치시킨 후 정리하면 최적자속 $\lambda_{ds_opt_2}^*$ 는 식 (17)과 같다.

$$\lambda_{ds_opt_1}^* = V_{sm}/(2\omega_e), \text{ if } \lambda_{ds}^* \geq \lambda_{ds_c} \quad (16)$$

$$\lambda_{ds_opt_2}^* = \frac{2\sigma L_s V_{sm}}{R_s - \sigma R_s + 2\sigma L_s \omega_e}, \text{ if } \lambda_{ds}^* < \lambda_{ds_c} \quad (17)$$

정격에서는 자기포화를 고려한 정격기준자속 $\lambda_{ds_rated}^*$ 가 사용되어야 한다. 약계자영역으로의 천이는 $\lambda_{ds_opt_1}^*$ 또는 $\lambda_{ds_opt_2}^*$ 와 $\lambda_{ds_rated}^*$ 와 만날 때인데, $\lambda_{ds_rated}^*$ 가 λ_{ds_c} 보다 작은 경우, 천이는 $\lambda_{ds_rated}^*$ 와 $\lambda_{ds_opt_2}^*$ 가 만나는 순간이며 약계자영역에서 $\lambda_{ds_opt_2}^*$ 가 지령치로 사용된다. $\lambda_{ds_rated}^*$ 가 λ_{ds_c} 보다 큰 경우 약계자영역으로의 천이는 $\lambda_{ds_rated}^*$ 와 $\lambda_{ds_opt_1}^*$ 이 만나는 순간이며, 약계자영역으로 들어가서는 $\lambda_{ds_opt_1}^*$ 이 지령치로 사용되다가 $\lambda_{ds_opt_1}^*$ 이 $\lambda_{ds_opt_2}^*$ 와 만나게 되면 $\lambda_{ds_opt_2}^*$ 가 지령치로 사용된다.

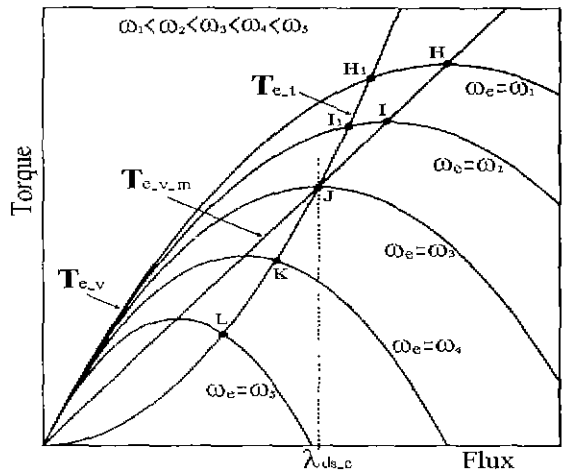


그림 2 전압 및 토크제한조건을 고려한 최대토크

4. 고정자자속 기준벡터제어

그림 3은 본 논문에서 제안한 방식을 적용한 고정자자속 기준벡터제어의 블록도를 나타내고 있다.

자속크기는 식(18), 변환각은 식(19), 슬립각속도는 식(20), 비간섭전류는 식(21), 동기각속도는 식(22)이다.^[5]

$$|\hat{\lambda}_s| = \hat{\lambda}_{ds} = \sqrt{\hat{\lambda}_{qs}^2 + \hat{\lambda}_{ps}^2} \quad (18)$$

$$\cos(\hat{\theta}) = \hat{\lambda}_{qs}/|\hat{\lambda}_s|, \quad \sin(\hat{\theta}) = \hat{\lambda}_{ps}/|\hat{\lambda}_s| \quad (19)$$

$$\omega_{sl} = \frac{(1 + \sigma\tau_r p)L_s i_{qs}^*}{\tau_r(\hat{\lambda}_{ds} - \sigma L_s i_{ds}^*)} \quad (20)$$

$$i_{dq}^* = \frac{\omega_{sl}\tau_r \sigma i_{qs}^*}{1 + \sigma\tau_r p} = \frac{i_{qs}^* \sigma L_s}{\hat{\lambda}_{ds} - \sigma L_s i_{ds}^*} \quad (21)$$

$$\omega_e = \omega_r + \omega_{sl} \quad (22)$$

여기서, “^” = 추정된 값, $\tau_r (= L_r/R_r)$ = 회전자시정수, p = 미분연산자이다.

고정자전압은 인버터의 스위칭상태로부터 구하며^[6] 고정자자속은 역기전력을 적분하여 구하는데, 순수적분기에 의한 고정자자속의 추정은 드리프트(drift) 및 포화의 문제가 있으므로, 이러한 문제를 해결하기 위하여 본 논문에서는 프로그래머블(programmable) 저역통과필터를 이용하였다^[7].

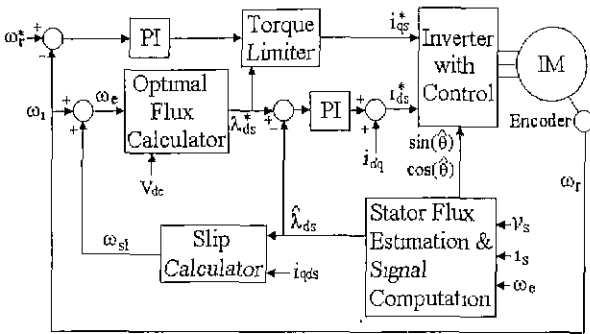


그림 3 고정자 자속기준 벡터제어

5. 시뮬레이션 결과

제한한 방법의 검증을 위하여 시뮬레이션이 수행되었으며, 모터 파라미터는 표 1에 나타나 있다.

표 1. 유도전동기 파라미터

5 hp, 220 V, 4 poles, 60 Hz		
정격자속	0.4	[Wb]
정격전류(peak)	18.2	[A]
고정자 및 회전자저항	1.25, 0.2	[ohm]
자화인덕턴스	50	[mH]
고정자 및 회전자누설인덕턴스	4.7, 4.7	[mH]

표 1의 모터 파라미터와 $V_{sm}(187.6V = V_{dc}/\sqrt{3})$ 을 이용하여 계산하면 λ_{ds-c} 가 1.6인데, 정격자속 $\lambda_{ds-rated}^*(0.4)$ 가 이 값보다 작으므로 약계자영역으로의 전이는 $\lambda_{ds-rated}^*$ 가 $\lambda_{ds-opt_2}^*$ 와 만나는 순간이며, 약계자영역에서는 $\lambda_{ds-opt_2}^*$ 가 기준자속으로 사용되게 된다.

그림 4는 속도 및 자속파형이다. 제안한 방법에서 기준속도 ω_b 는 1807[rpm]이었는데, 기존방법($1/\omega_r$ 방법)과 비교하기 위해서 기존방법의 ω_b 를 1807[rpm]으로 정하였다. 기존방법의 자속수준이 제안한 방법보다 낮고 가속하는데 시간이 더 걸림을 알 수 있다.

그림 5는 자속, q축 전류, 및 토크를 나타내고 있다. 제안한 방법의 자속, q축 전류, 및 토크가 기존방법보다 높게 나타나고 있음을 알 수 있는데, 제안한 방법의 토크가 기존방법의 토크보다 높기 때문에 그림 4에서 보듯이 제안한 방법이 기존방법보다 더 빨리 가속이 됨을 알 수 있다.

기존방법에서 토크의 증가를 위해서는 기준자속을 증가시켜야 하는데, 이를 위하여 기존방법의 ω_b 를 1950[rpm]으로 하여 시뮬레이션한 결과가 그림 6에 있다. 그림 6(a)는 속도 및 자속파형이고 그림 6(b)는 기존방법의 전압제한, 토크제한, 전류제한 및 전류를 나타내고 있으며, 그림 6(c)는 제안한 방법의 결과이다. 그림 6(a)에서, $1/\omega_r$ 방법의 자속수준이 제안한 방법보다 과도상태에서 높지만, q축 전압여유가 없어서 전류제어가 되지 못하기 때문에 제안한 방법보다 느리게 가속되고 있다.

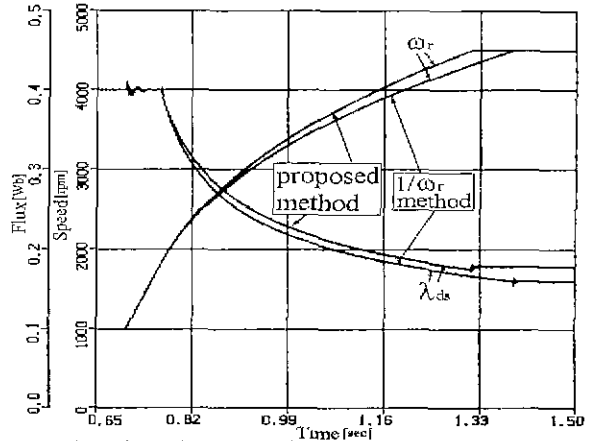


그림 4. 속도 및 자속파형(속도지령 : 1000 → 4500[rpm])

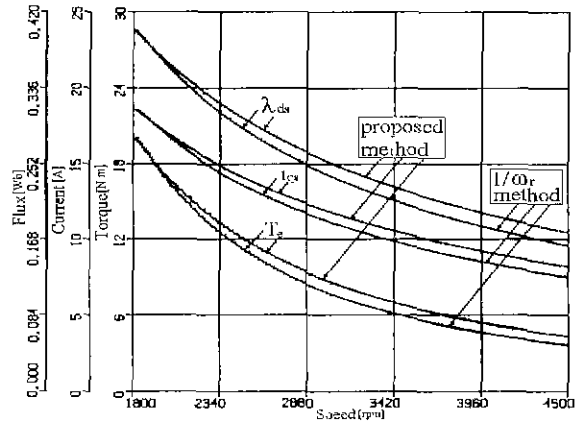


그림 5. 자속, q축 전류, 토크파형

그림 6(b)에서, 약계자운전 시작부분에서 토크제한이 전압제한보다 크기 때문에 전류는 제어되지 못하고 전압제한으로 떨어지는 모습이며, 속도가 증가하면서 토크제한이 전압제한보다 낮아진 다음부터는 지령전류와 전류가 모두 토크제한조건을 따르고 있는 모습을 나타내고 있다. 또한 약계자영역에서 자속의 저감으로 전류는 전류제한이 아니라 토크제한 및 전압제한 조건에 의해서 제한됨을 알 수 있다.

그림 6(c)는 제안한 방법의 경우인데, 약계자영역에서 최적자속의 선정으로 전압제한 및 토크제한이 일치하고 있다.

6. 실험결과

제안한 방법의 타당성을 입증하기 위하여 TMS320C31을 사용한 인버터를 사용하여 실험하였다. DC링크전압 V_{dc} 는 325[V]이며, 스위칭주파수는 4[kHz]이다. 전류제어는 125[μs], 속도제어 및 자속제어는 각각 125[ms]마다 반복 수행했으며, 고정자전류는 Hall CT를 사용하여 검출하였고, 모터의 회전속도는 1024[ppr] 엔코더를 사용해서 검출하였다. 사용한 모터는 표 1의 3상 유도전동기이다.

그림 7은 최대토크를 나타내고 있는데, 제안한 방법의 최대

토크가 기존방법의 최대토크보다 크게 나타나고 있다.

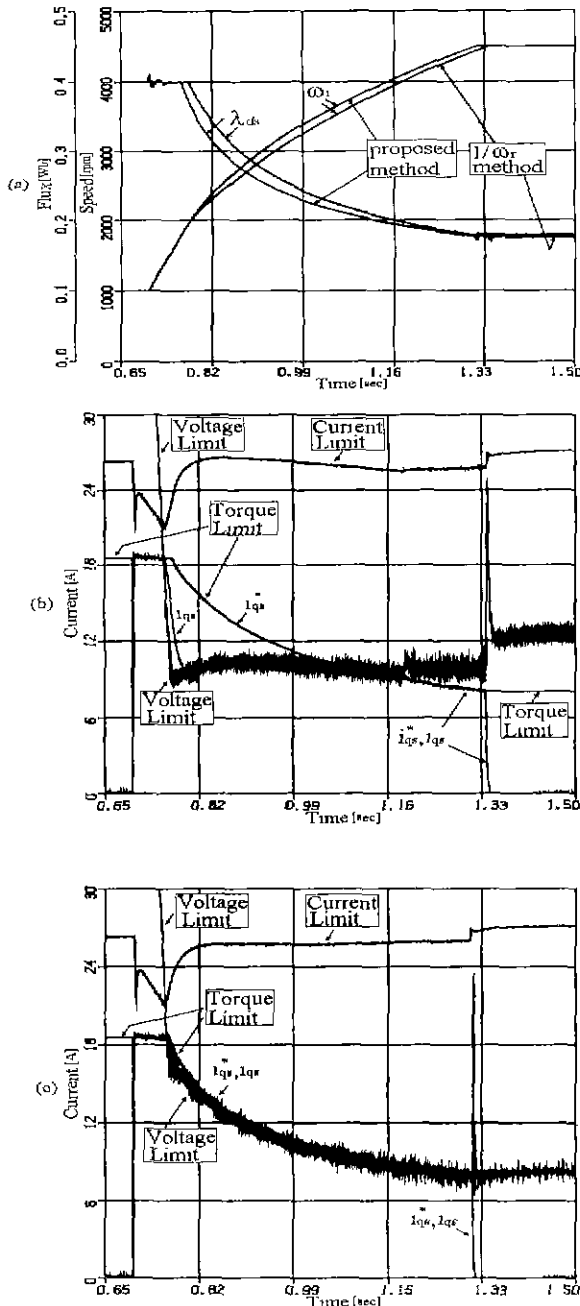


그림 5. 자속, 속도, 전류 ($1/\omega_r$ 방법의 $\omega_b = 1950[\text{rpm}]$)

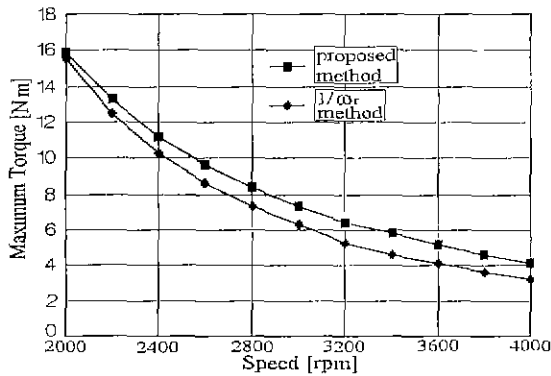


그림 7 최대토크

그림 8은 속도가 1000[rpm]에서 4500[rpm]으로 바뀔 때의 속도, 자속, 및 토크의 과도응답을 나타내고 있다. 제안한 방법의 토크가 기존의 방법보다 크기 때문에 기존방법보다 더 빠르게 가속되는 모습을 나타내고 있다.

7. 결론

본 논문에서는 기존의 SFO 시스템의 약계자운전의 문제점에 대해서 고찰하였으며, 기존방식의 문제를 해결하기 위하여 전압제한조건, 토크제한조건, 전류제한조건을 고려한 새로운 기준자속의 선정방법을 제안하였다.

시뮬레이션 및 실험결과 제안한 방법이 기존방법보다 높은 토크를 발생하였으며, 이로 인하여 제안한 방법의 속도가 기존 방법의 속도보다 더 빨리 가속되었음을 확인하였다.

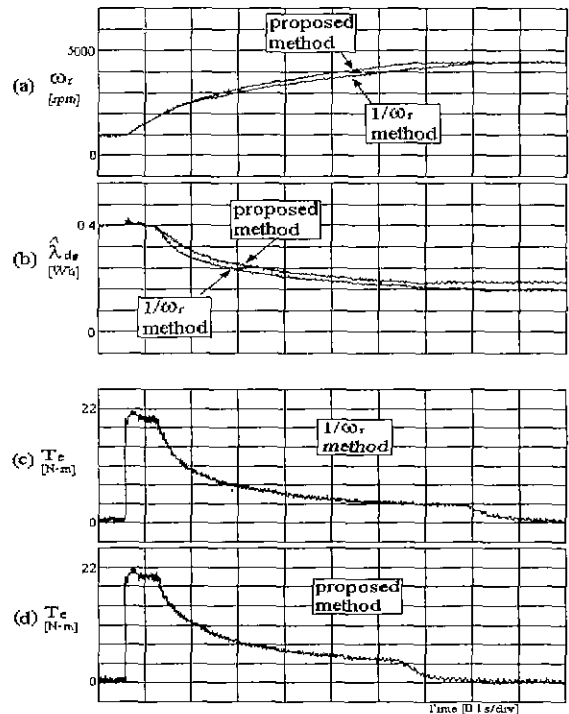


그림 8. 과도응답

참고 문헌

- [1] X. Xu and D. W. Novotny, Selection of the Flux Reference for Induction Machine Drives in the Field Weakening Region, *IEEE Trans IA*, vol. 28, no.6, pp.1353-1358, 1992.
- [2] Y. T. Kao and C. H. Liu, Analysis and Design of Microprocessor-Based Vector-Controlled Induction Motor Drives, *IEEE Trans IE*, vol. 39, no. 1, pp.46-54, 1992.
- [3] S. H. Kim and S. K. Sul, Maximum Torque Control of an Induction Machine in the Field Weakening Region, *IEEE Trans. IA*, vol 31, no.4, pp. 787-794, 1995.
- [4] X. Xu, R. D. Doncker, and D. W. Novotny, Stator Flux Orientation Control of Induction Machines in the Field Weakening Region, *IEEE IAS*, pp 437-443, 1988.
- [5] Xingyi Xu, Rik De Doncker and Donald W. Novotny, A Stator Flux Oriented Induction Machine Drive, *IEEE PESC88*, pp 870-876, 1988.
- [6] T. G. Habetler and D. M. Divan, Control Strategies for Direct Torque Control Using Discrete Pulse Modulation, *IEEE IAS*, pp. 514-522, Oct. 1989
- [7] M. H. Shin, D. S. Hyun, S. B. Cho, and S. Y. Choe, An Improved Stator Flux Estimation for Speed Sensorless Stator Flux Orientation Control of Induction Motors, *IEEE Trans. PE*, vol. 15, no. 2, pp. 312-318, 2000.