

## 약계자 영역에서 유도전동기의 최대 토오크 운전

김 상훈\*, 설 승기  
서울대학교 전기공학과

### Maximum Torque Control Of Induction Machines in Field Weakening Region

Sang-Hoon Kim, Seung-Ki Sul  
Seoul National University

**Abstract** - In this paper, a novel field weakening scheme for the induction machine by the voltage control strategy is presented. The proposed algorithm ensures producing the maximum torque over the entire field weakening region. Also by introducing the direct field-oriented control in the field weakening region with large variation in machine parameters, the drive system can obtain the robustness to machine parameter variation. Moreover, by using estimated speed, sensorless speed control can be possible in very high speed region

Experimental results for a laboratory induction motor drive system confirm the validity of the proposed control algorithm.

#### 1. 서 론

전동기의 가변속 구동은 산업의 발전과 더불어 생산성이나 품질의 향상을 목적으로 하여 많은 산업분야에서 그 필요성이 증대되고 있다. 최근 전력전자 기술의 비약적인 발전으로 인하여 교류전동기를 이용한 구동시스템은 직류전동기 이상의 구동 성능을 실현할 수 있기 때문에 고성능의 전동기 가변속 구동시스템을 요구하는 분야에서 그 적용범위가 확대되고 있다.

AC 서보, 스피들 및 전인 전동기 구동시스템과 같은 전동기 가변속 구동시스템에서는 전동기의 빠른 가속속 성능과 더불어 고속 운전 능력을 필요로 한다[1]. 이와 같은 성능을 얻기 위해서는 벡터제어로 유도전동기를 구동하는 것이 가장 적합한데, 벡터제어 유도전동기는 약계자 운전이 용이하여 쉽게 고속 운전이 가능하며, 넓은 속도범위를 얻을 수 있도록 인버터 전압과 전류 정격의 충분한 이용이 가능하기 때문이다[2]. 이 경우 고속운전을 위해서는 약계자 영역에서 속도에 반비례로 자속성분 전류를 감소하는 방법이 널리 사용되어 왔다[3]. 그러나 이 방법을 사용하는 경우, 약계자영역에서는 회전자 자속이 변동하고 이에따라 전동기 상수가 변동하기 때문에 이를 고려하지 않는 경우 올바른 벡터제어가 이루어지지 않으며, 더우기 이 방법에 의해서는 고속운전시 전동기의 출력 토오크 능력을 충분히 이용할 수 없다[4]. 또한 제어를 위해 속도센서가 사용되는데, 고속에서는 속도센서 사용에 한계가 발생하므로 속도센서 정보를 이용하는 것보다 추정된 속도로 제어를 하는 방법이 바람직하다[1].

따라서 본 연구에서는 전동기 상수 변화에 대한 강인성을 갖는 고성능 제어를 실현하였고, 이와 더불어 약계자 영역에서 전동기의 출력 토오크 능력을 최대한으로 이용하기 위해 전압제어를 통한 최대 토오크 운전을 수행하였으며, 또한 고속에서 한계가 발생하는 속도센서 이용 문제를 해결하고자 속도센서를 사용하지 않는 속도제어를 수행하였다.

#### 2. 약계자 제어

##### 2.1 최대 토오크 운전

전동기 입력 전압과 전류는 인버터 용량의 제한에 의해 식(1)과(2)와 같이 제한된다. 식(1)은 전압 방정식을 사용하여 식(3)과 같이 나타낼 수 있다. 이들 전압제한식(1)과 전류제한식(3)은  $d^e - q^e$  축 전압평면에서 각각 원과 타원을 나타내고 있는데 그림 1에 보인다.

$$V_{qs}^{e*2} + V_{ds}^{e*2} \leq V_{smax}^2 \quad (1)$$

$$I_{qs}^{e*2} + I_{ds}^{e*2} \leq I_{smax}^2 \quad (2)$$

$$\left(-\frac{V_{qs}^{e*}}{\omega_e L_s}\right)^2 + \left(\frac{V_{ds}^{e*}}{\omega_e L_s}\right)^2 \leq I_{smax}^2 \quad (3)$$

여기서,  $V_{ds}^{e*}$ ,  $V_{qs}^{e*}$ ,  $I_{ds}^{e*}$ ,  $I_{qs}^{e*}$  :  $d^e - q^e$  축 고정자 기준 전압과 전류,  $V_{smax}$ ,  $I_{smax}$  : 최대 고정자 전압과 전류.

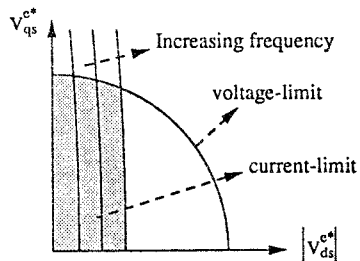


그림 1 전압과 전류 제한영역

제한된 약계자 방법에서는 앞서 기술된 제한조건을 만족하면서 전동기가 최대 토오크를 발생할 수 있도록 기준전압을 설정하여 이에 따라 전동기의 전압을 제어하게 된다. 전 약계자 영역은 크게 영역I과 영역II의 2개 영역으로 나누어 각 영역에서 최대 출력 토오크 발생을 위한 최적의 기준전압  $V_{ds}^{e*}$ 와  $V_{qs}^{e*}$ 를 설정한다.

영역 I ( $\omega_{base} < \omega_e \leq \omega_1$ ) : 운전 주파수가 증가함에 따라 인가 전압은 증가하게 되고, 기준주파수  $\omega_{base}$ 에서 인가전압은  $V_{smax}$ 에 이르게 되는데, 이 운전 주파수 이상에서는 약계자 운전을 시작해야 한다. 벡터제어시, 정상상태 토오크식(4)로부터 토오크함수  $T$ 를 식(5)와 같이 정의하고 이를  $d^e - q^e$  축 전압평면에 표시하면 주어진 운전 주파수에서 그림 2에 보이듯이 쌍곡선으로 나타낼 수 있다. 이로부터 운전가능영역내에서 출력 토오크가 최대로 되

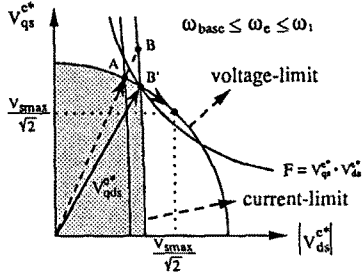


그림 2 약계자 영역 I

은 운전점은 토오크합수  $F$ 를 최대로 하는  $B'$ 점임을 알 수 있다. 즉 전압제한 원과 전류제한 타원의 교점이 된다.

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m^2}{L_r} I_{ds}^* \cdot I_{qs}^* \quad (4)$$

$$F = \frac{T_e}{k} = V_{qs}^* \cdot V_{ds}^* \quad (5)$$

여기서,  $T_e$  = 토오크,  $L_m$  = 상호 인덕턴스,  $L_r$  : 고정자 자기 인덕턴스,  $P$  = 극수,  $k = -\frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m^2}{L_r L_s L_r \omega_c^2}$ .

이 영역에서 최대 토오크 운전을 위한  $V_{qs}^*$ 는 운전 주파수의 증가에 따라 원주상을 이동한다. 그 결과  $V_{qs}^*$ 는 감소하며  $|V_{ds}^*|$ 는 증가하는데  $V_{qs}^*$ 와  $|V_{ds}^*|$ 가 같아지는 운전 주파수  $\omega_1$ 에 이르면 영역 II가 시작된다.

영역 II ( $\omega_c \geq \omega_1$ ): 운전 주파수가 더욱 증가하여 주파수  $\omega_1$ 에서  $V_{qs}^*$ 는 그림 3의 C점에 이르게 되는데 이때부터 영역 II의 운전이 시작된다. 이 경우 최대 토오크 운전을 위해서는  $V_{qs}^*$ 를 운전 주파수와 관계없이 언제나 C점으로 유지해야 한다. 이를 위해  $V_{ds}^*$ 와  $|V_{ds}^*|$ 를 언제나  $V_{smax}/\sqrt{2}$ 로 일정하게 유지해야 한다.

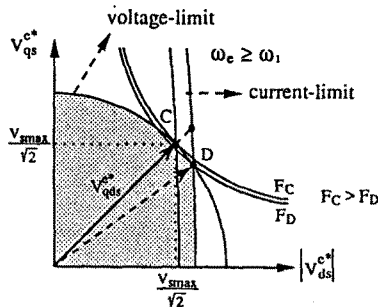


그림 3 약계자 영역 II

그림 4는 최대 토오크 운전의 구현을 위한 전압제어기를 나타낸다. 전압제어기는 두개의 PI제어기로 구성되어 있는데 앞 절에서의 최대 토오크 운전을 위한 최적의 전압패턴에 따라 전동기의 인가 전압을 제어하기 위해 각각 자속성분 전류와 토오크 성분 전류의 최대값을 조절한다.

부하 감소시 기준전압의 선정 :

부하 조건이 변동하여 전동기의 최대 토오크 운전이 요구되지 않는 경우에 전압벡터를 어떻게 선정하는가에 따라 동적 특성(dynamic performance)이 달라질 수 있다. 전동기가 최대 토

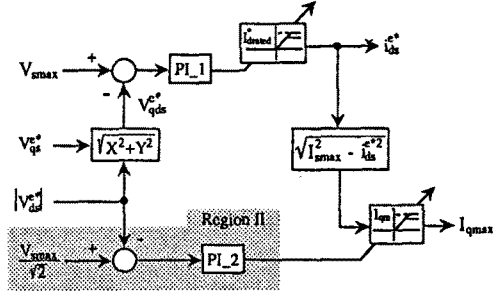


그림 4 전압 제어기

오 운전점 O에서 부하 토오크의 변동시 예를 들어 최대 토오크  $F_1$ 에서  $F_2$ 로 감소시에 선정될 수 있는 여러 전압 벡터가 그림 5에 보인다. B나 C점에서의 운전은 부하가 다시 증가하는 경우나 속도 지령치가 변동하는 경우 자속의 변동이 필요하게 되어 과도 응답 특성이 늦어진다. 따라서 좋은 과도 응답특성을 얻기 위해서는 부하조건에 상관없이 자속을 최대 토오크 운전시의 자속 수준으로 일정하게 유지시켜 주어야 한다. 이를 위한 운전점은 A점으로 주어지며 이 운전점에서  $V_{qs}^*$ 는 부하의 감소와 관계없이 일정하게 유지되는데 이로 인하여 자속은 전부하시의 수준으로 일정하게 유지된다. 따라서 부하변동에 따라 자속 변동은 없게 되며 단지 부하에 비례하여  $I_{qs}^*$ 가 변동하게 되어 빠른 과도 응답을 얻을 수 있다.

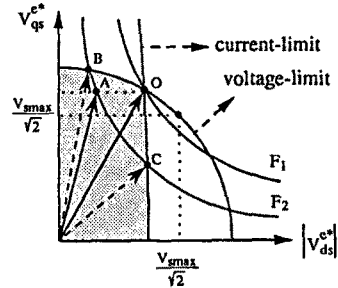


그림 5 부하 감소시의 전압 벡터

## 2.2. 직접 벡터제어와 속도 추정

회전자 자속은 고정자 회로의 전압모델을 사용하여 식(6)과 같이 추정하며, 이로부터 직접벡터제어를 위한 회전자 자속각을 식(7)과 같이 추정한다.

$$\hat{\lambda}_{dr}^s = \frac{T_e}{1 + T_c p} e_{qs}^s - \sigma L_s i_{qs}^s, \quad (6)$$

$$\hat{\theta}_r = \tan^{-1} \left( \frac{\hat{\lambda}_{qr}^s}{\hat{\lambda}_{dr}^s} \right) \quad (7)$$

단,  $e_{qs}^s = v_{qs}^s - R_s i_{qs}^s$ ,  $T_c$  : 일차 지연필터의 시정수 [sec],  $p$  : 미분 연산자

속도 추정은 먼저 동기 각 주파수  $\omega_c$ 를 추정하고, 이로부터 식(8)과 같이 속도들 추정한다.

$$\begin{aligned} \hat{\omega}_r &= \hat{\omega}_e - \omega_{sl}^s \\ &= \frac{\hat{\lambda}_{ds}^s (p \hat{\lambda}_{qr}^s) - \hat{\lambda}_{qs}^s (p \hat{\lambda}_{dr}^s)}{\hat{\lambda}_{qr}^s + \hat{\lambda}_{dr}^s} - \frac{L_m R_r}{L_r} \frac{i_{qr}^s}{\sqrt{\hat{\lambda}_{qr}^s + \hat{\lambda}_{dr}^s}} \end{aligned} \quad (8)$$

그림 6은 전체 제어시스템의 블럭도를 나타낸다.

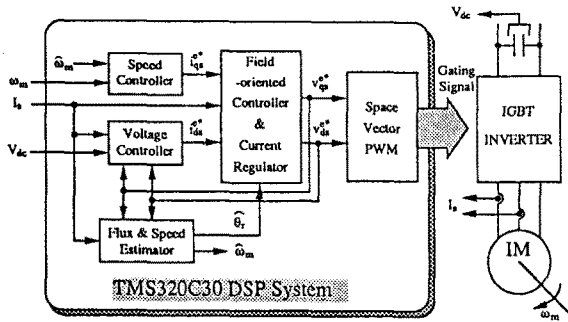


그림 6 제어 시스템의 구성도

### 3. 실험 결과

IGBT 인버터로 구동되는 3hp 6극 유도전동기 시스템에 대하여 TMS320C30 DSP를 사용한 실험을 행하였다. 그림 7은 100 [rpm]부터 가속시 제안된 방법을 사용한 경우 최대 토오크 운전 특성을 보인다. 그림 8은 리얼속도가 500[rpm]에서 2600[rpm]으로 변동시 1/ω<sub>s</sub> 방법과 제안된 방법을 사용한 경우 각각에 대한 속도 응답특성을 보인다. 제안된 방법을 사용한 경우 최대 토오크 운전으로 인하여 기준속도에 더 빨리 도달함을 알 수 있다.

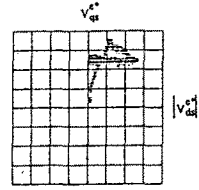
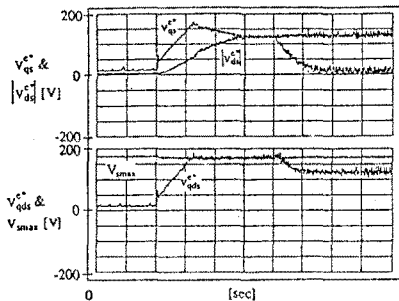
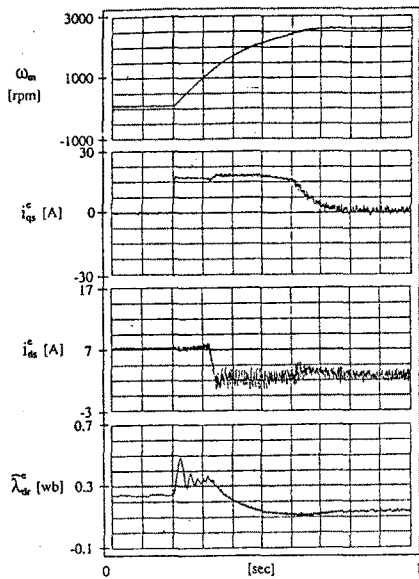


그림 7 약제자 운전 특성

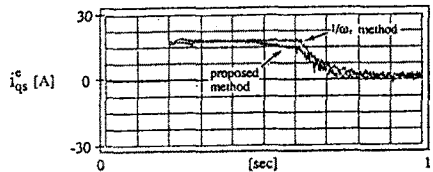
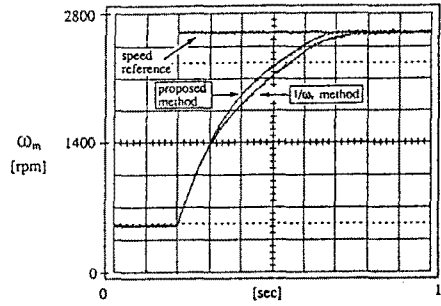


그림 8 속도 응답특성 비교

### 4. 결론

본 연구에서는 벡터제어 유도전동기의 고속영역 운전을 위한 새로운 약제자 방법이 제안되었다. 약제자 영역에서 전동기의 상수 변동에 강인성을 갖도록 직접벡터제어를 도입하였고, 또한 전압제어를 통한 약제자제어로 최대 토오크 운전을 가능하게 하였으며, 고속에서 속도센서를 사용하지 않는 속도제어를 수행하였다. 유도전동기 구동시스템에 대하여 실험을 통해 제안된 방법의 타당성을 입증하였고, 기존의 약제자 방법보다 출력 토오크를 크게 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

### 참고 문헌

- [1] T. Kume, et. al, "High Speed Vector Control without Encoder for a High Speed Spindle Motor," IEEE-IAS Ann. Mtg. Conf. Rec., pp. 390-394, 1990.
- [3] R. D. Lorenz and D. B. Lawson, "Flux and Torque Decoupling Control for Field-Weakening Operation of Field-Oriented Induction Machines," IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 26, No. 2, Mar/Apr, pp. 290-295, 1990.
- [3]R. Joetten and H. Schierling, "Control of the Induction Machine in the Field Weakening Range," in Proc. IFAC 1983, pp.297-304.
- [4]S. H. Kim, S. K. Sul and M. H. Park, "The Maximum Torque Control of an Induction Machine in the Field Weakening Region," IEEE-IAS Ann. Mtg. Conf. Rec. pp.401-407, 1993.