

# 약계자 영역에서 외부 전압제어 루프에 의한 매입형 영구자석 동기전동기의 최대 토오크 운전

김장목, 설승기  
서울대학교 전기공학부 전력전자 연구실

## Outer Voltage Regulation Loop for Maximum Torque Operation of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor in the Flux

Jang-Mok Kim and Seung-Ki Sul  
School of Electrical Engineering, Seoul National University

**Abstract** - A novel flux-weakening scheme for the Interior Permanent Magnet Synchronous Motor (IPMSM) is proposed. This is implemented based on the output of the synchronous PI current regulator-reference voltage to the PWM inverter. Attractive features of this flux weakening scheme include no dependency on the machine parameters, the guarantee of current regulation at any operating condition, and smooth and fast transition into and out of the flux weakening mode without a discontinuity. Experimental results are presented to verify the feasibility of the proposed control scheme.

### 1. 서 론

IPMSM의 일정 출력 영역에서 운전을 위해서 약계자 제어기가 필요하며, 이 약계자 제어 알고리즘에 관한 여러 편의 논문이 최근에 발표되었다 [1][2]. 기존의 IPMSM 약계자 제어기는 일정 출력 영역에서 약계자 운전을 위하여 고정자 전압 방정식을 근거로 약계자 제어기가 구성되었다.

그러나, 전동기에 사용되는 자석은 재질에 따라서 다르지만 대부분 온도의 영향을 크게 받는다[3]. 이러한 영향으로 약계자 영역에서 최대 토오크를 발생하기 위한 정확한 전류궤적과 최적의 약계자 운전 시작점을 선정하기가 쉽지않고, 전체 시스템의 안정도에도 좋지 않은 영향을 줄 수 있다.

본 논문에서는 전동기 상수가 변동하더라도 견실하게 제어 가능한 새로운 약계자 제어기를 제안한다. 일정 출력 영역에서 인버터 출력전압은 제안된 약계자 제어기의 주요한 특징 중 하나인 외부 전압 제어 루프에 의하여 이용 가능한 최대 전압 값까지 제어된다. 약계자 운전 시작점과 자속의 크기는 이 외부 전압 제어 루프에 의하여 자동적으로 조절된다. 그리고 제안된 제어기는 전동기 상수와 무관하

게 전류 제어기의 확실한 운전, 불연속점 없이 약계자 운전 모드로 부드럽고 빠른 전환이 가능하다. 여러 가지 실험 조건하에서 제안된 제어기의 유용성이 IPMSM 구동 시스템을 이용하여 실험으로 증명되었다.

### 2. 약계자 제어 시스템의 구성

#### 2.1 약계자 영역에서의 운전 제한조건

일정 출력 영역에서 최대 토오크 운전을 위한 약계자 제어는 일정 토오크 영역에서의 운전과 달리 전압과 전류 제한 조건이 동시에 고려되어야 하며 그 제한 식은 식(1), (2)와 같다[4].

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

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

#### 3.2 약계자 영역에서의 최대 토오크 운전

일정 출력 영역에서 단위 전류당 최대 토오크를 발생하는 d-q 동기 좌표계의 전류와는 일정 토오크 영역과는 달리 전압 제한 타원과 전류 제한 원이 만나는 교점이 된다. 약계자 영역에서 최대 토오크 운전을 위한 와의 궤적은 식(3), (4)와 같다. 이 궤적은 그림1에서 A와 B이다.

$$i_{qs}^e = sign(i_{sq}^e) \sqrt{i_{sq}^{e2} - i_{ds}^{e2}} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \text{if } i_{sq}^e \geq 0, \text{sign}(i_{sq}^e) = 1 \\ \text{if } i_{sq}^e < 0, \text{sign}(i_{sq}^e) = -1 \end{cases}$$

( $i_{sq}^e$ 는 약계자 운전시 속도 제어기의 출력)

(식 (4)는 아래에 있다)

여기서  $V_f = V_{smax} - R_s I_{smax}$ .

전류제어기의 포화 시작점은 전동기의 부하 조건과 전동기 상수에 따라서 변하므로 약계자 제어 시작점은 이러한 상황에 따라서 변해야 한다. 최적의 약계자 운전 시작점은 식 (5)와 같이 얻어 진다.

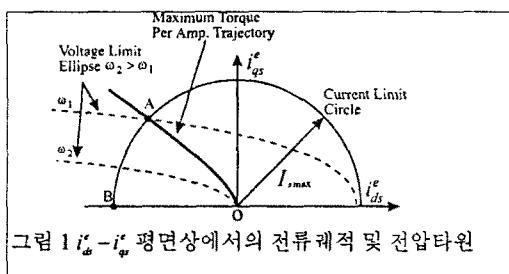
$$i_{ds}^e = \frac{L_{ds} \psi_f - \sqrt{(L_{ds} \psi_f)^2 + (L_{qs}^2 - L_{ds}^2)(\psi_f^2 + (L_{ds} i_{sq}^e)^2 - (\frac{V_f}{\omega_e})^2)}}{L_{qs}^2 - L_{ds}^2} \quad (4)$$

$$\omega_{base} = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (5)$$

여기서,

$$\begin{aligned} a &= (L_{qs} i_{qs}^e)^2 + (L_{ds} i_{ds}^e)^2 + \psi_f^2 + 2 L_{ds} \psi_f i_{ds}^e \\ b &= 2(L_{ds} - L_{qs}) R_s i_{ds}^e i_{qs}^e + 2 R_s \psi_f i_{qs}^e \\ c &= R_s^2 (i_{ds}^e)^2 + (i_{qs}^e)^2 - V_{max}^2 \end{aligned}$$

일정 출력 영역에서 전동기의 전기적 모델인 고정자 전압 방정식을 이용한 약계자 제어기는 식 (3), (4), 그리고 (5)에 의하여 구성될 수 있다. 이들 식에서 알 수 있듯이 고정자 전압 방정식에 의한 약계자 제어기는 전동기 상수 변동에 크게 영향을 받기 때문에 전동기 상수 변동과 관계없이 운전될 수 있는 새로운 약계자 제어기가 필요하다.



### 2.3 제안된 약계자 제어기의 동작원리

그림 2는 제안된 약계자 제어기를 갖는 IPMSM의 제어 볼록도이며 제어영역은 크게 3부분으로 나눌 수 있다.

영역 I은 일정 토오크 영역에서 단위 전류당 최대 토오크를 발생하는 토오크 제어기이며, 함수  $f_{dk}$  와  $f_{ak}$ 는 그림 1에서 단위전류당 최대 토오크를 발생하는 전류계율이다

그림 2 제안된 약계자 제어기를 포함한 IPMSM의 제어 블록도이며, 이 제어기는 영역 II와 영역 III으

로 나눌 수 있다.

영역 II에서는 전동기의 속도가 높을 때 전류 제어기의 출력전압  $V_{ads}^*$ 은 최대공급전압  $V_{smax}$ 보다 크므로 d축 전류증가분이 훌러 자동적으로 약 계자 제어가된다. d축 전류 증가분  $\Delta i_d^*$ 은 영역 III의 제어 입력으로 작용하며, 이 전류의 최대 제한 값은 아래 식 (6)과 같이 표현 된다.

$$I_{dmin} = I_{smax} - I_{drate} \quad (6)$$

여기서,  $I_{drate}$ 는 그림 1에서 보여진 점 A에서의 d축 전류 값이다.

영역 III 제어기의 주요한 역할은 약계자 영역에서 단위 전류당 최대 토오크를 발생하기 위하여 그림 2에서 보여지듯이 d축 전류가 증가될 때 q축 전류를 제한하는 작용을 한다. 영역 III에서 q축 전류 지령치를 제한함과 동시에 제어 전압 여유분이 확보되어 영역 II에서 d축 전류 지령치를 음의 방향으로 동시에 증가시킬 수 있다. 따라서, 전류 제한 원과 전압 제한 타원의 교점을 따라 d-q전류 궤적( $i_{ds}^e$ ,  $i_{qs}^e$ )이 움직이므로 약계자 영역에서 전압 여유분이 확보되어 전류에 대한 제어성이 확보된다.

#### 4. 실험결과

제안된 약계자 제어기가 포함된 전체 시스템은 그림 2에 보여진다.

속도 지령치가 -2500rpm에서 2500rpm로 변할 때 일정 토오크 영역과 일정 출력 영역 사이의 전환을 포함한 전동기 구동 시스템의 4상한 동작이 그림 3에서 보여지고 있다. 토오크와 속도의 방향에 관계 없이 일정 토오크 영역 뿐만 아니라 일정 출력 영역에서 전동기는 잘 동작되고 있다. 저역 통과된 동기 PI 전류제어기의 출력 전압이 전압 가 인버터가 낸다.

TMS320C31 DSP Control Board

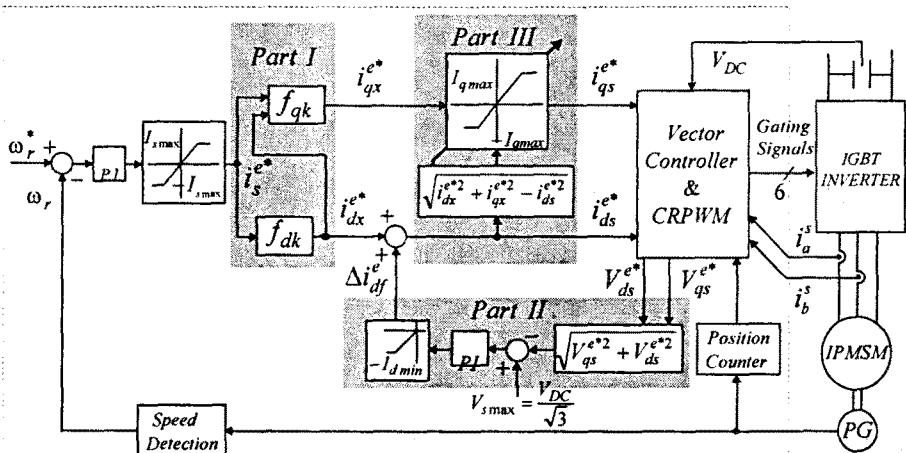


그림2 제안된 약계자 제어기를 포함한 IPMSM의 제어 블록도

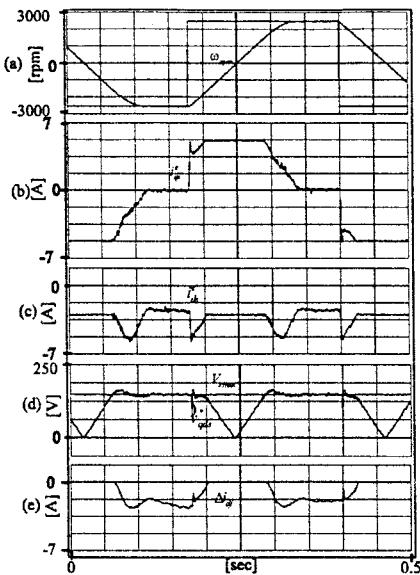


그림 3 제안된 약계자 제어기의 동특성

있는 최대 전압에 도달하는 속도에서 약계자 제어가 시작된다.

이 실험에 사용된 전동기 사양은 표 1에 있다.

그림 4는 전동기 상수가 정확한 25°C에서의 보다 확장된 속도 지령을 속도영역에서의 실험 과형이다. 속도 영역은 0rpm에서 3500rpm이며, 3500rpm은 정격속도의 2배 이상이다. 전류제어기의 출력전압인  $V_{qds}^e$ 의 저역통과하지 않은 전압파형이 그림 4(d)에 나타나져 있으며 전압백분율이 많음을 알 수 있다.

이상과 같이 제안된 약계자 제어기는 전동기의 전압 방정식을 이용하지 않고 외부 전압 제어기를 사용하므로 전동기의 부하 조건과 전동기 상수변동에 강인한 특징이 있다. 이러한 특징은 실험결과로부터 알 수 있었다.

표 1 IPMSM의 정격

900[W], 220[V], 4[pole], 1700[rpm]
$R_s : 4.3[\Omega]$ , $\psi_0 : 0.272[Wb]$ , $L_{ds} : 27[mH]$ ,
$L_{qs} : 67[mH]$ , $V_{max} : 300[V]$ , $I_{rate} : 3[A]$ ,
$I_{max} = 2 I_{rate}$

## 5. 결 론

본 논문에서는 새로운 약계자 제어 알고리즘을 제안하였다. 제안된 약계자 제어기의 주요한 특징은 외부 전압 제어 루프의 사용이며, 이 전압 제어기에 의하여 전동기의 자속 크기가 적절하게 조절되어 전류 제어기의 포화를 방지할 수 있었다. 그러므로, 약계자 제어기의 시작점과 약계자 제어를 위한 자속제어는 전류제어기의 출력전압을 이용한 전압제환 제어기에 의하여 자동적으로 이루어진다.

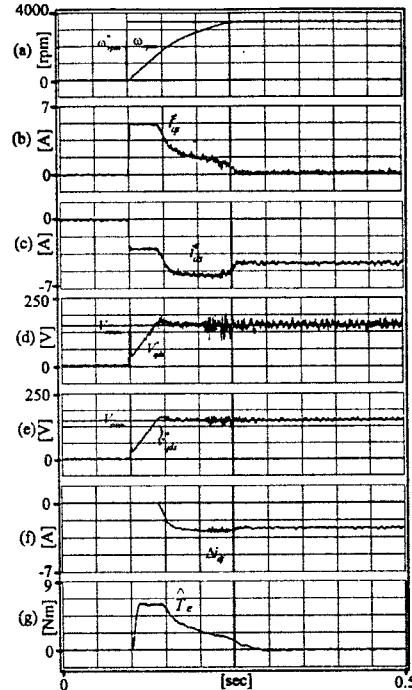


그림 4 전동기 상수가 25°C로 동조된 경우

제안된 약계자 제어기의 다른 장점으로는 전동기 전압을 측정하기 위한 부가적인 신호측정 장치가 필요 없으며, 전동기의 상수 변동에 강인한 점이다. 다양한 운전 조건에서도 일정 토오크 영역과 일정 출력영역 사이의 전환은 큰 토오크 백동을 발생시키는 불연속점 없이 빠르고 자연스럽게 진행된다. 제안된 약계자 제어기의 이러한 특징들은 실험으로부터 알 수 있었다.

## (참 고 문 헌)

- [1] S. R. MacMinn and T. M. Jahns, "Control Techniques for Improved High-Speed Performance of Interior PM Synchronous motor Drives," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. IA-27, no. 4, Sep./Oct., pp.997~1004, 1991.
- [2] S. Morimoto, M. Sanada and Y. Taketa, "Wide-Speed Operation of Interior Permanent Magnet Synchronous Motors with High-Performance Current Regulator," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. IA-30, no.4, July/Aug., pp.920~926, 1994.
- [3] T. Sebastian, "Temperature Effects on Torque Production and Efficiency of PM Motors using NdFeB Magnets," in Proc. IEEE/IAS Conf. Rec., pp.78~83, 1993.
- [4] 김장목, 매입형 영구자석 동기 전동기의 제어특성 개선, 서울대학교 대학원 전기공학부 공학박사 학위논문, 1996년 8월.