

# 최적전류를 이용한 IPMSM 드라이브의 최대토크 제어

백정우, 고재섭, 최정식, 강성준, 장미금, 문주희, 정동화  
순천대학교 전기제어공학과

## Maximum Torque Control of IPMSM Drive using Optimal Current

Jeong-Woo Baek, Jae-Sub Ko, Jung-Sik Choi, Sung-Jun Kang, Mi-Geum Jang, Ju-Hui Mun, Dong-Hwa Chung  
Department of Electrical Cotron Engineering, Suncheon National University

### ABSTRACT

This paper proposes maximum torque control of IPMSM drive using optimal current. This control method is applicable over the entire speed range which considered the limits of the inverter's current and voltage rated value. For each control mode, a condition that determines the optimal d-axis current  $i_d$  for maximum torque operation is derived.

This paper considers the design and implementation of novel technique of high performance speed control for IPMSM using multi-MFC and ANN controller. Also, this paper proposes maximum control of IPMSM drive using approximation method. This method is decreased the burden of digital signal process(DSP) in calculation of optimal current.

This paper proposes the analysis results to verify the effectiveness of the MFC and ANN controller. Also it verifies the validity of maximum torque control of IPMSM drive with optimal current.

### 1. 서 론

IPMSM은 기계적으로 회전자 구조가 강인하지만 돌극성을 가지고 있으며 비효율적인 공극 때문에 일정 토크영역에서 일정 출력영역까지 광범위하게 운전하기가 어렵다.<sup>[1]</sup> 일정 출력영역에서 속도를 높이고 최대토크를 발휘할 수 있는 약계자 제어에 관한 연구가 많이 이루어지고 있다.<sup>[2]</sup> 이러한 연구들은 일정 토크영역에서 일정 출력영역까지 제어모드를 변경하기 위하여 자속 정보가 필요하였다. 특히, 전압보상기는 동작조건을 동조할 경우 양호하게 동작할 수 있으나 온도의 상승과 DC 링크전압 등이 변화하여 영구자석의 자속이 약화되는 특별한 전압오차가 발생한다면 전압보상기의 부적절한 동작 때문에 드라이브 시스템의 성능이 악화될 수 있다.<sup>[3]</sup> 따라서 매우 고속인 확장된 속도영역에서 운전을 효율적으로 할 수 있고 다양한 제어모드의 원활한 전이를 위한 연구가 필요하다.

최근 인공지능 제어 기법간의 상호 혼합한 방식은 적응성 및 강인성이 요구되는 IPMSM 드라이브에서 진가를 유감없이 발휘될 전망이다.<sup>[4]</sup> 논문에서 MFC(Model Reference Adaptive Fuzzy Controller) 제어기는 IPMSM의 속도와 전류를 제어하고 출력성분인 지령토크를 이용하여 최대토크 제어를 수행한다. 최대 토크동작을 위하여 최적  $d$ 축 전류를 결

정하고 이 전류를 각 제어모드에서 사용한다. IPMSM 드라이브 시스템을 구성하여 제시한 제어기를 적용하여 다양한 성능과 최대토크의 특성을 분석한다. 그리고 본 논문의 효율성을 입증하기 위하여 종래의 방식과 비교하고 결과를 제시한다.

### 2. 최대토크 제어

#### 2.1 CTR에서 운전

기저속도 이하에서 전동기의 토크는 주로 최대 인버터 전류에 의해 제한된다. 최대토크가 되기 위한 조건은 토크 식을  $d$ 축 전류로 한번 미분하여 영으로 두면 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial T_e}{\partial i_d} = 0 \quad (1)$$

식 (1)의 조건에서  $i_d$ 를 구하면 다음과 같다.

$$i_d = \frac{\phi_a}{2(L_q - L_d)} - \sqrt{\frac{\phi_a^2}{4(L_d - L_q)^2} + i_q^2} \quad (2)$$

#### 2.2 FWR에서 운전

최대 설정토크에서 전동기를 가속할 경우 기저속도 근방에서는 SV PWM 인버터에 의해 공급되지 않는 요구 전압에 도달한다. 인버터에서 전동기에 공급되는 최대전압  $V_{om}$ 은 DC 링크전압과 PWM 방식에 의해 제한된다.

$$v_d = -\omega_r L_q i_q \quad (3)$$

$$v_q = \omega_r L_d i_d + \omega_r \phi_a \quad (4)$$

$$V_a = V_{am} - RI_{am} \quad (5)$$

전류의  $d$ 와  $q$ 축 성분은 FWR 영역에서  $V_a$ 가  $V_{amax}$ 과 같은 값으로 유지하기 위하여 제어한다. FWR 영역에서  $i_d$ 와  $i_q$ 의 관계는 식 (3)-(5)을 식 (1)에 대입하여 유도할 수 있다.

$$i_d = -\frac{\phi_a}{L_d} + \frac{1}{L_d} \sqrt{\frac{V_a^2}{\omega_r^2} - (L_q i_q)^2} \quad (6)$$

여기서  $|i_q| \leq V_a / (\omega_r L_q)$ , i.e.,  $|v_d| \leq V_{amax}$  이다.

IPMSM 드라이브 시스템을 위한 MFC 제어기 및 ANN의 구조는 그림 1과 같다.

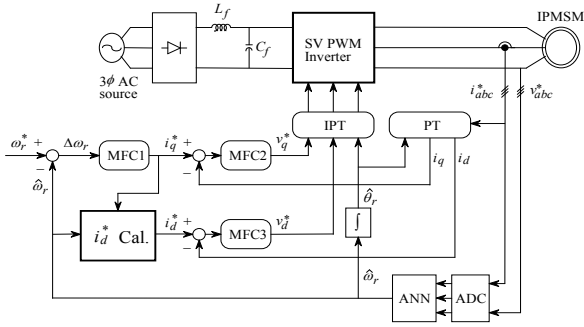


그림 1 제시한 IPMSM의 제어 시스템  
Fig. 1 Proposed control system of IPMSM

### 3. MFC 방식

그림 2는 두 개의 퍼지동작의 상호작용을 나타내며 FLC는 종래의 일반적인 퍼지제어기이고 AFC는 기준 모델을 고려한 적응 퍼지제어기를 나타낸다.

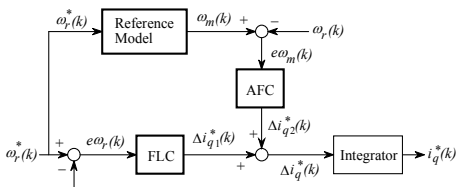


그림 2 MFC1의 설계  
Fig. 2 Design of MFC1

### 4. 시스템 성능분석

그림 3은 지령속도를 1800[rpm]에서 -1800[rpm]으로 정역 운전하였을 경우의 응답특성을 나타낸다. 제시한 MFC 제어기는 종래의 PI제어기에 비해 우수한 성능을 나타낸다. 그림 4는 ANN 속도추정에 대한 응답특성으로 추정속도는 실제 속도에 양호하게 추정하고 있다. 그림 5는 최대토크 제어에 대한 응답특성으로 제시한 알고리즘은 종래의  $i_d = 0$  control에 비해 토크가 높게 나타났으며, 그림 6은 그림 5의 부하토크 부분을 확대하여 나타낸것으로서 부하토크 인가에서도 제시한 알고리즘이 종래의 제어에 비해 양호한 성능을 나타내고 있다.

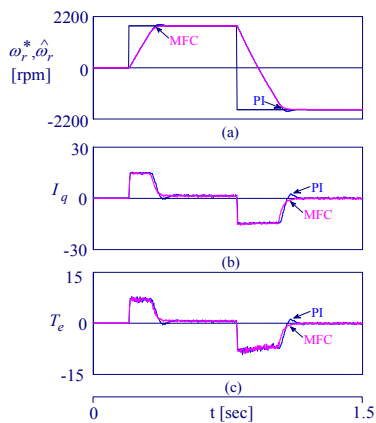


그림 3 지령속도변화에 대한 응답특성  
Fig. 3 Response characteristics of common speed variation

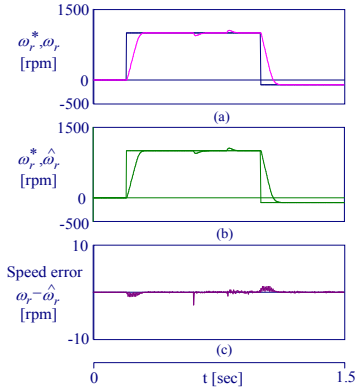


그림 4 속도추정에 대한 응답특성  
Fig. 4 Response characteristics of speed estimation

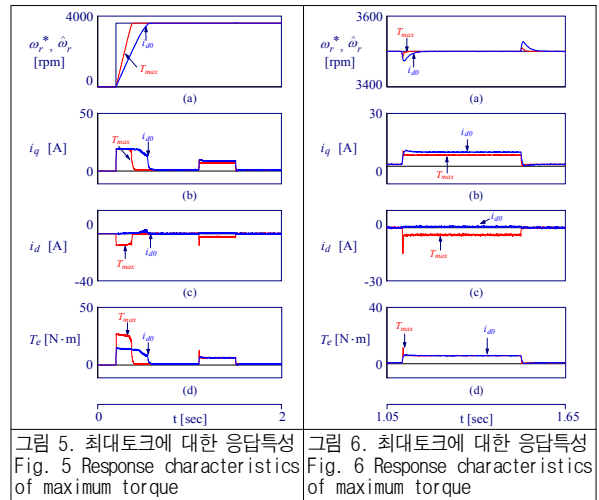


그림 5. 최대토크에 대한 응답특성  
Fig. 5 Response characteristics of maximum torque

그림 6. 최대토크에 대한 응답특성  
Fig. 6 Response characteristics of maximum torque

### 5. 결론

본 논문에서는 최적전류를 이용한 IPMSM 드라이브의 최대 토크 제어를 제시하였다. 제시한 최대토크 제어 알고리즘은 종래의  $i_d = 0$  control에 비해 기동 및 과도상태에서 토크가 높게 나타남을 알 수 있었으며, MFC 제어기는 종래의 PI 제어에 비해 고성능 제어를 확인할 수 있었다. 또한 ANN에 의한 속도추정은 추정오차가 2% 이내로 만족할만한 성능을 나타냈다. 이로써, 본 논문에서 제시한 알고리즘의 타당성을 확인하였다.

### 참고 문헌

- [1] S. Morimoto, M. Sanada and Y. Taketa, "Wide speed operation of interior permanent magnet synchronous motors with high performance current regulator," IEEE Trans. IA., vol. 30, pp. 920-926, 1994.
- [2] J. M. Kim, et al., "Speed control of interior permanent magnet synchronous motor drive for the flux weakening operation," IEEE Trans. IA., vol. 33, pp. 43-48, 1997.
- [3] J. S. Choi, J. S. Ko, J. H. Lee and D. H. Chung, "Speed control of IPMSM drive using neural network PI controller," CEE'06, pp. 102, 2006.
- [4] H. G. Lee, S. M. Nam, J. S. Ko, J. S. Choi, J. C. Lee and D. H. Chung, "The speed control and estimation of IPMSM using adaptive FNN and ANN," ICCAS 2005, p. 134, 2005.