

# 건인용 IPMSM의 최대토크 제어기법에 관한 고찰

반민호, 이상하, 박승훈, 정철현, 조춘호, 김태웅, 최명현\*, 김성곤\*, 김기찬\*\*  
경상대학교, \*전북자동차기술원\*, 한밭대학교\*\*

## Study on MTPA Control Scheme of Traction IPMSM

Min Ho Ban, Sang Ha Lee, Seung Hoon Park, Cheul Hyun Jeong, Choon Ho Cho,  
Tae Woong Kim, Myoung Hyun Choi\*, Seong Gon Kim\*, Ki Chan Kim\*\*  
Gyeongsang National University, Jeonbuk Institute of Automotive Technology\*,  
Hanbat National University\*\*

### ABSTRACT

비대칭 배리어 방법으로 설계된 건인용 매입형 영구자석동기전동기(IPMSM)에 대한 최대토크 제어기법을 Simplorer 기반 시뮬레이션해석에 의해 고찰한다. 그리고 레졸버와 R/D 컨버터를 이용하여 회전자의 절대위치를 검출하고, 이를 위한 절대위치 검출회로 및 제어보드를 제작하여 이에 대한 유효성을 실험을 통해 성능을 확인한다.

### 1. 서론

현재 지구온난화 방지와 같은 지구환경 보호와 화석에너지원의 고갈에 따른 에너지 절감에 대한 세계 각국의 관심이 대두되면서 에너지절감뿐만 아니라, 에너지사용의 효율화에 주력하고 있다. 친환경성 및 에너지 효율성 극대화를 위하여 건인용 전동기는 고효율화, 고출력밀도, 경량화 및 넓은 정격운전속도를 필요로 한다. 이에 영구자석동기전동기(PMSM)는 역률, 토크, 전류, 그리고 효율 측면에서 상기 필요성을 만족시킨다.

PMSM은 표면형 영구자석동기전동기(SPMSM)과 매입형 영구자석동기전동기(IPMSM)로 구분된다. IPMSM은 구조적 특징으로 순수토크 이외에 릴럭턴스토크를 발생시킬 수 있으며, 단위 전류 당 최대토크(MTPA)제어를 통해 전동기 및 구동시스템의 효율을 증대시킬 수 있다. 이에 본 논문에서는 건인용 전동기로 비대칭 배리어 방법으로 설계된 토크리플 저감용 IPMSM<sup>[4]</sup>을 기반으로 MTPA 제어를 위해 전동기 설계에 의한 전류변화량에 따른 파라미터로 Simplorer 기반 시뮬레이션 해석을 통해 유효성을 확인하고, 실험 해석 및 검도를 통해 성능을 확인한다.

## 2. 건인용 IPMSM 제어

### 2.1 IPMSM 수학적 모델링

IPMSM의 동기좌표계 전압 방정식 및 토크 방정식은 식 (1) 및 (2)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} v_d &= R_s i_d + p\lambda_d - \omega_s \lambda_q \\ v_q &= R_s i_q + p\lambda_q + \omega_s \lambda_d \end{aligned} \quad (1)$$

$$T_e = \frac{3}{2} P [\lambda_{af} i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (2)$$

여기서  $p = d/dt$ ,  $\lambda_d = L_d i_d + \lambda_{af}$ ,  $\lambda_q = L_q i_q$ , P is pole pair

$i_d$ 를 0으로 제어하면,  $\lambda_d = \lambda_{af}$  되고 순수토크만 발생하는

토크방정식으로 다음과 같이 표현되고, 토크방정식에 있어서 쇠교자속이 일정하게 되기 때문에 토크가 q축 전류에 직접적으로 비례한다.<sup>[1]</sup>

$$T_e = \frac{3}{2} P \lambda_{af} i_q \quad (3)$$

### 1.2 MTPA 제어

d축 및 q축 전류  $i_d$ ,  $i_q$ 는 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$\begin{aligned} i_d &= i_s \sin \beta \\ i_q &= i_s \cos \beta \end{aligned} \quad (4)$$

여기서  $i_s$  : 고정자전류

IPMSM의 MTPA 제어는 역기전력상수, 고정자전류, 고정자전류 변화량에 따른 d축 및 q축 인덕턴스성분을 토대로 전류 위상각을 식 (5)에 의해 추정하여 릴럭턴스토크 및 순수토크에 의한 전체 토크를 최대로 발생시킬 수 있도록 제어한다.<sup>[3]</sup>

본 논문에서는 온도변화에 따른 인덕턴스 변화량은 무시하고 고정자전류 변화량에 따른 파라미터로 MTPA 제어를 검토하였고, 그림 1은 MTPA 알고리즘 기반 IPMSM 구동시스템의 전체 블록선도를 보여준다.

$$\beta = \sin^{-1} \left[ \frac{-\lambda_{af} + \sqrt{\lambda_{af}^2 + 8(L_q - L_d)^2 i_s^2}}{4(L_q - L_d) i_s} \right] \quad (5)$$

여기서  $\lambda_{af}$  : 역기전력상수,  $L_d$  : d축 인덕턴스,  $L_q$  : q축 인덕턴스

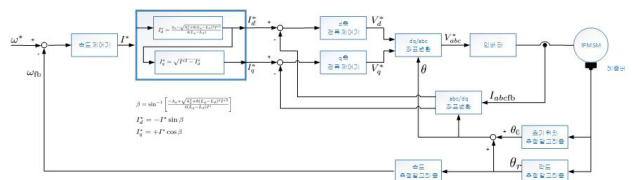


그림 1 MTPA 알고리즘 기반 IPMSM 구동시스템의 전체 블록선도

### 1.3 레졸버 및 R/D 컨버터

일반적으로 레졸버는 기구적으로 간단하여 강한 내구성을 지니며 우수한 온도특성을 가져 산업분야에 널리 사용된다. 따라서 본 논문에서는 건인용 IPMSM 회전자의 절대위치 추정을 위하여 레졸버 및 R/D 컨버터를 실험에 사용하였다.

레졸버의 여자신호 및 출력신호는 식 (6)과 같다. 레졸버의 아날로그 신호를 디지털 값으로 변환시키기 위해 사용 되는

R/D 컨버터는 회전자의 절대위치 신호를 90도 위상 차이가 나는 A, B 펄스와 초기위치 신호 Z 펄스로 변환하여 출력한다.<sup>[2]</sup>

$$E_{R1-R2} = E \sin \omega t \quad (6)$$

$$E_{S1-S3} = k \cdot E \sin \omega t \cdot \cos \theta$$

$$E_{S2-S4} = k \cdot E \sin \omega t \cdot \sin \theta$$

### 3. 시뮬레이션 해석

본 논문에서는 비대칭 배리어 방법<sup>[4]</sup>으로 설계된 견인용 IPMSM의 최대토크 제어기법에 대해 Simplorer 기반 시뮬레이션 해석을 수행하였다. MTPA 제어를 위해 식 (5)에 의해 추정된 전류위상각을 시뮬레이션에 적용하였고, 시뮬레이션 회로는 그림 2와 같이 구성하였다.

비대칭 배리어 기반 전동기 사양은 정격용량 4.5kW, 정격전압 48V, 정격전류 75Arms, 정격토크 14.82Nm, 정격속도 2900rpm 이다.

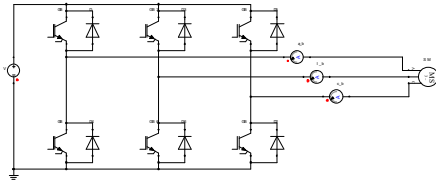


그림 2 시뮬레이션 회로도

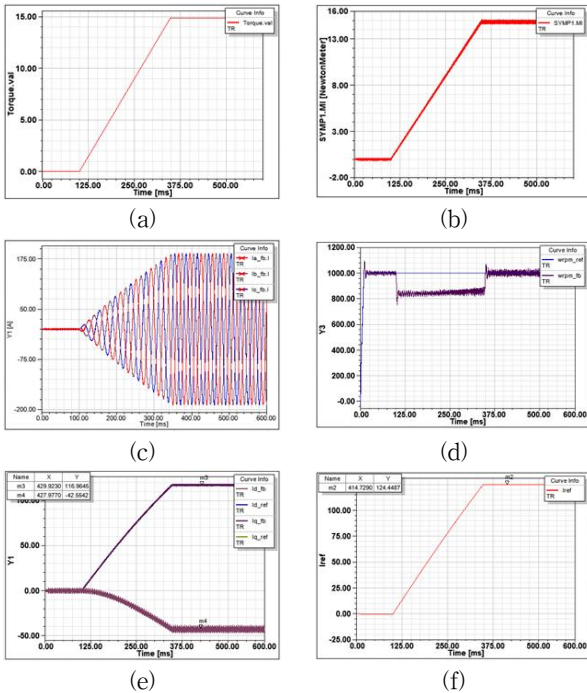


그림 3 (a) 지령토크 (b) 발생토크 (c) 3상 출력전류 (d) 지령속도 및 실제속도 (e) d, q축 지령전류 및 실제전류 (f) 전체 전류

시뮬레이션해석 결과로 지령/발생 토크, 3상 출력전류, 지령/실제 속도, d축 및 q축의 전류, 속도제어기의 출력전류(전체전류)의 파형을 그림 3에 나타내었다. IPMSM의 속도제어는 그림 3(d)와 같이 지령속도를 램프입력으로 하였을 때 오버슈트가 생긴 후에 정상상태에 도달하는 것을 확인하였고, 그 후에 100ms에서 정격토크의 부하를 그림 3(b)와 같이 250ms동안 인가 하였다. 부하를 인가하는동안 모터의 속도가 20~30%감소

함과 동시에 d축 및 q축 실제전류는 지령전류를 잘 추종하였고, 부하가 전부 인가되었을 때 실제속도도 지령속도를 잘 추종하는 것을 확인하였다.

### 4. 실험 해석

비대칭 배리어설계기반 견인용 IPMSM의 구동시험을 위해 인버터 하드웨어, 속도 검출회로 및 제어보드를 제작하였고 이에 대한 시스템을 그림 4에 보여준다.

MG시스템에 있어서 G인 다이내모로 300rpm으로 속도제어를 하고, 전류위상각을 5°씩 변화시켜 0° ~ 45° 가변시켜 d축 및 q축 전류를 계산하여 제어하였을 때 발생토크를 측정하여 최대토크가 발생하는 전류위상각을 도출하였다. 정격전류의 조건에서 최대토크가 발생하는 전류위상각은 15°이며 이에 대한 전류파형 및 발생토크는 그림 5에 보여준다.

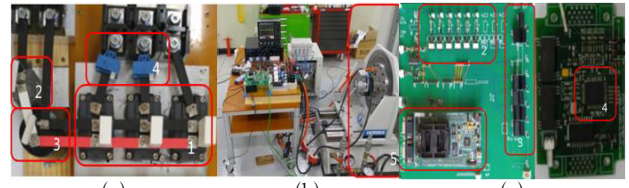


그림 4 (a) 인버터 (b) 다이내모 (c) 속도 검출회로 및 제어보드

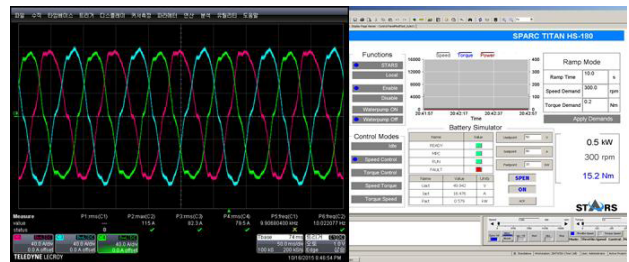


그림 5. 출력전류파형 및 부하토크

### 5. 결론

본 논문에서 비대칭 배리어 방법으로 설계된 견인용 매입형 영구자석동기전동기의 최대토크 제어기법을 Simplorer 기반 시뮬레이션 해석하여 유효성을 확인하였다. 그리고 인버터 하드웨어, 제어보드 및 속도 검출회로를 제작하였고, 평가시험을 통해 결과 해석하여 성능을 확인하였다.

이 논문은 2014년 특구기술사업화사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음

### 참고 문헌

- [1] P. Pragasan and K. ramu, "Modeling, Simulation, and Analysis of Permanent Magnet Motor Drives, Part I: The Permanent Magnet Synchronous Motor Drive", Proc. of IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 25, No. 2, pp. 265-273, 1989
- [2] 박내훈, 김상훈, 목형수 "레졸버를 이용한 IPMSM의 벡터제어 시스템", 전력전자학회논문집, pp. 4-6, 2007
- [3] 이광운, "영구자석 동기전동기의 단위 전류 당 최대 토크 운전 점 추적제어", 전력전자학회논문지, pp. 291-299, 2007
- [4] 김홍현, 박성인, 김재호, 김기찬 "Barrier 비대칭 형상을 이용한 IPMSM 토크 리플 저감 설계", 대한전기학회 학술대회논문집, pp. 859-860, 2013