

# 속도 정보를 이용한 매입형 영구자석 동기전동기의 약계자 운전

이주호\*, 정영석\*, 권순재\*, 김만고\*, 김태완\*\*, 김원석\*\*  
 부경대학교\*, 한라공조\*\*

## Speed Information based Field Weakening Control for IPMSM

J.H. Lee\*, Y.S. Jung\*, S.J. Kwon\*, M.G. Kim\*, T.W. Kim\*\* W.S. Kim\*\*  
 Pukyung National University\*, Halla Climate Control\*\*

### ABSTRACT

본 논문에서는 고속 운전을 위하여 IPMSM(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor)의 약계자 운전을 제시한다.

IPMSM 운전을 위한 약계자 제어기는 SMO(Sliding Mode Observer)를 통한 추정 속도와 실제 전동기의 속도를 비교하여 나타나는 오차값을 피드백 받아서 이용한다. 기본적으로 속도 오차가 없는 상황에서는 MTPA(Maximum Torque Per Amp.)에서 동작 시키고 속도 오차가 증가하면 이 오차에 대해 d축 전류를 음의 방향으로 증가시켜 약계자 제어를 한다.

본 논문에서는 제시한 약계자 운전으로 IPMSM에 적용시험을 한다. 그리고 시험결과를 분석하여 본 논문의 타당성을 입증한다.

### 1. 서 론

IPMSM은 최근 들어 많은 분야에서 관심의 대상이다. IPMSM은 영구자석을 회전자 코어에 매입하여 기계적으로 강인한 회전자 구조로 설계되어 있다. 그리고 회전자의 전기적 돌극성, 적은 유효 공극을 갖는다. 이러한 특성 때문에 IPMSM은 일정 토크 영역에서 작은 회전자의 체적으로 큰 토크를 발생하는 효율적인 운전 뿐만 아니라 일정 출력 영역에서 약계자 제어에 의한 고속 운전도 가능하다.<sup>[1]</sup>

고속과 과도 동작에서 동작조건은 d, q 축 전류에 의존하고 d, q 축 두축의 전류를 조합을 적절히 이용하여 제어하면 최대 토크를 얻어 낼 수 있다.

본 논문에서 제시하는 IPMSM 운전을 위한 약계자 제어기는 SMO(Sliding Mode Observer)를 통한 추정 속도와 실제 전동기의 속도를 비교하여 나타나는 오차값을 피드백 받아서 이용한다. 속도의 오차가 없는 일정 영역에서 MTPA (Maximum Torque Per Amp.)에서 동작 시키고 속도 오차가 점점 증가하게 되면 약계자 제어를 수행하여 최대 전압한계 내에서 최대 토크로 운전이 가능하다.

## 2. IPMSM과 약계자 제어

### 2.1 IPMSM의 모델링

일반적으로 d q 동기 좌표계에서의 IPMSM의 전압 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a + pL_d & -\omega L_q \\ \omega L_d & R_a + pL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega\psi_a \end{bmatrix} \quad (1)$$

그리고 IPMSM의 토크 식은 식 (2)와 같다.

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

첫 번째 항은 SPMSM(Surface Permanent Magnet Synchronous Motor)와 마찬가지로 영구자석에 의한 자기 토크이고, 두 번째 항은 d축과 q축의 전류에 의한 자속성분  $L_d i_d$ ,  $L_q i_q$ 에 각각에 수직인 전류성분  $i_d$ ,  $i_q$ 가 작용하여 발생하는 토크, 즉 d,q 축의 돌극성 ( $L_q > L_d$ )에 의한 릴럭턴스 토크 성분이다.<sup>[1]</sup>

그림 1은 전류와 전압 한계조건에서 단위 전류당 최대 토크(MTPA) 전류궤적을  $i_d - i_q$  평면에 도시한 것이다.

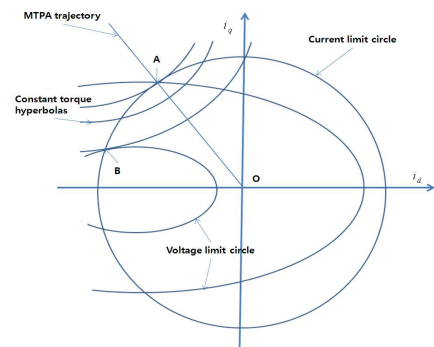


그림 1  $i_d - i_q$  평면에서의 전류궤적

Fig.1 The current trajectory in the  $i_d - i_q$  plane

먼저 일정 최대 토크에 의한 전류제한 영역을 살펴보겠다. 최대 토크를 위한 최적의 전류각과 전류제한에서 동작하는 영역이다. 이 영역은 전류궤적 상에서 A점과 일치한다. 그리고 이 영역에서는 MTPA 제어를 한다. 그 다음 A점에서 B점까지 전류원을 따라가는 전류와 전압의 제한영역이다. 이 영역에서는 전압타원의 크기가 감소하므로 속도는 증가하게 된다. 마

지막으로 전압제한 영역이다. 앞의 영역에서 속도를 더욱 증가시키면 전류가 감소하게 된다. 이 경우에 전류제한에 있는 전류를 발생시키기 위해 전압이 낮아지게 되어 전압을 충분히 낼 수 없고 전동기는 토크궤적이 전압타원에 접해 있는 조건에서 동작한다. [2]

### 2.2 약계자 제어에서의 제한조건 [3][4]

최대 고정자 전압( $v_{smax}$ )은 PWM 방식과 직류 DC링크 전압 그리고 전류 제어를 위한 제어전압 여분의 정도에 의해 제한되므로 동기좌표계 d축 전압( $v_d$ )과 q축 전압( $v_q$ )은 다음의 전압 제한식을 만족하여야 한다.

$$v_d^2 + v_q^2 \leq v_{smax}^2 \quad (3)$$

최대 고정자 전류( $i_{smax}$ ) 도 인버터의 전류 정격과 전동기의 열 정격에 의해 제한되므로 d축 전류( $i_d$ )와 q축 전류( $i_q$ )는 다음의 전류 제한식을 만족하여야 한다.

$$i_d^2 + i_q^2 \leq i_{smax}^2 \quad (4)$$

## 3. 제안된 약계자 제어 기법

본 논문에서 제안된 약계자 제어 기법은 전동기의 실제 속도와 SMO를 기반으로 하여 추정된 속도와의 오차를 피드백 받아서 약계자 제어를 하는 방법이다. 추정된 속도와 전동기 지령 속도와의 오차가 없는 상황에서는 MTPA에서 동작을 시킬 수 있게 하고, 속도 오차가 생기고 그 오차가 점점 더 증가를 하게 되면 약계자 제어를 수행하여 최대 전압한계 내에서 최대 토크로 운전이 가능하다. 다음의 그림 2는 속도 오차를 이용한 약계자 제어의 전체 블록도 이다.

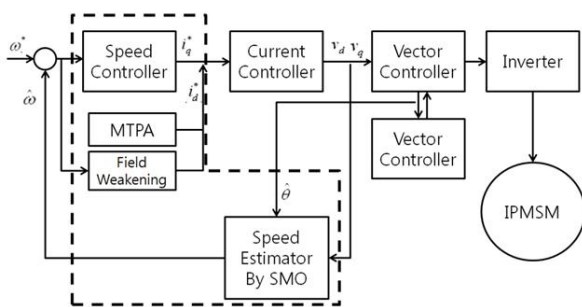


그림 2 속도 정보를 이용한 전체 블록도  
Fig.2 Block Diagram Of Using Speed Information

그림 2의 점선 부분이 제안한 속도 정보를 이용하여 약계자 제어를 하는 부분이다. 속도 정보를 피드백 받아서 오차가 증가하면 이 오차에 대해 d축 전류를 음의 방향으로 증가시켜 약계자 제어를 한다.

## 4. 실험

본 논문에서 제안된 방법은 실제의 인버터와 전동 압

축기를 가지고 실험을 통해 효과를 검증한다.

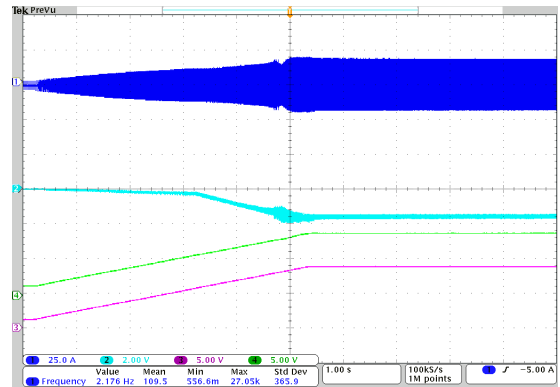


그림 3 실험 결과 측정 파형  
Fig.3 Result Waveforms

위의 그림 3은 본 실험의 결과 파형을 나타낸다. 먼저 제일 위의 1번 파형은 상전류를 나타낸다. 그 밑의 2번 파형은 d축 전류로써 약계자 제어로 진입했을 때 음의 방향으로 감소함을 보여준다. 3번, 4번 파형은 각각 전동기의 지령 속도와 추정 속도를 나타내는데 약계자 영역으로 진입을 성공함으로 두 파형간의 오차가 없음을 보여준다.

## 5. 결론

본 논문에서는 고속 운전을 위하여 IPMSM(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor)의 약계자 운전 방법을 제시하였다. 제안된 방법은 실제 전동기의 속도와 SMO(Sliding Mode Observer)를 기반으로 한 추정 속도와의 오차를 통한 약계자 운전 방법으로 인버터가 전동기에 주어진 전압과 전류의 제한 하에서 최대 토크를 발생하도록 하였다. 그리고 이 제안된 방법의 성능은 실험을 통해 검증하였다.

## 참고 문헌

- [1] J.M Kim, S.K Sul, "Speed Control of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Drive for the Flux Weakening Operation", IEEE, Vol. 33, No. 1, JAN/FEB 1997.
- [2] J.G Kim, G.T Park, D.H Chung, Y.D Cha, "Maximum Torque Control of IPMSM Drive with Field Weakening Control", Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol. 19, No. 8, pp. 85-93, 2005, December.
- [3] H.J Kim, J.S YU, C.Y Won, E.J Kim, H.K Jo, S.H Kim, "Voltage Control Strategy for Maximum Torque Operation of Stator Flux Oriented Induction Machine Drive in the Field Weakening Region", 전력전자학술대회 논문집, pp. 30-32, 2005, July.
- [4] 설승기, "전기기기제어론", 홍릉과학출판사, pp. 309-321.