

# 전압 사용율 증대를 통한 매입형 영구자석 동기 전동기의 고속 운전 성능 향상에 대한 연구

유 안노, 김 혜승, 홍 찬욱, 김 경서  
LS산전

## Operation of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor with Improved Voltage Utilization

Anno Yoo, Hyeseung Kim, Chanook Hong and Kyung Seo Kim  
LSIS R&D Center, LSIS

### ABSTRACT

본 논문에서는 전압 사용율 증대를 통한 매입형 영구자석 동기 전동기의 약자속 운전 성능 향상 방법을 제시한다. 팬, 펌프 등과 같이 고속 운전이 빈번한 분야에 사용되는 매입형 영구자석 동기 전동기는 운전 속도에 따라, 적절한 약자속 운전 방법이 필요하다. 본 논문에서는 전류 지령 수정을 하는 매입형 영구자석 동기전동기의 약자속 운전 방법을 제시하고, 실험을 통하여 그 타당성을 입증하였다.

### 1. 서론

매입형 영구자석 동기 전동기(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor : IPMSM)는 표면부착형 영구자석 동기 전동기(Surface Mounted Permanent Magnet Synchronous Motor : SMPMSM)에 비해 기계적으로 강인하여 팬(fan), 펌프(pump)와 같은 고속 운전에 적합하다. 팬, 펌프에 사용되는 전동기는 기저 속도(base speed)가 높으며, 비용(cost) 및 크기(size)의 문제로 인하여 엔코더(encoder), 레졸버(resolver)와 같은 위치 센서를 부착하지 않는 경우가 많다. 따라서 이러한 적용 분야에서는 위치 센서가 없는 센서리스 운전이 필수적이다.

또한, 팬, 펌프의 급 가속시에는 직류 단(DC link) 전압 크기의 제한으로 인하여 속도 제어 성능이 제한될 수 있으며, 이에 따라서 적절한 약자속 운전(flux weakening operation)이 필요하다<sup>[1, 2]</sup>.

본 논문에서는 위치 센서를 사용하지 않는 고속 운전 분야에서 전압 사용율을 증대시키기 위한 매입형 영구자석 동기 전동기의 약자속 운전 방법에 대해서 제안하고, 실험을 통하여 검증하도록 한다.

### 2. 제안된 매입형 영구자석 동기 전동기의 약자속 운전 방법

식 (1)과 (2)는 회전자 좌표계에서 나타난 매입형 영구자석 동기 전동기의 전압 방정식이며 식 (3)는 발생 토크(torque) 식이다.

$$V_{ds}^r = R_s i_{ds}^r + L_{ds} \frac{di_{ds}^r}{dt} - \omega_r \lambda_{ds}^r \quad (1)$$

$$V_{qs}^r = R_s i_{qs}^r + L_{qs} \frac{di_{qs}^r}{dt} + \omega_r \lambda_{qs}^r \quad (2)$$

$$T_e = \frac{3P}{4} \{ (L_{ds} - L_{qs}) i_{ds}^r + \lambda_f \} i_{qs}^r \quad (3)$$

여기서, P는 전동기의 극(pole) 수이고,  $\lambda_f$ 는 영구자석에 의한 쇠교자속(magnet flux linkage)이며, 식 (1)과 (2)로부터 과변조(over modulated)된 전압을 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$V_{ds}^r \text{ sat} \left( K_{pd} + \frac{K_{id}}{s} \right) (i_{ds}^r - i_{ds}^r) - \widehat{\omega}_r \widehat{\lambda}_{qs}^r - V_{ds}^r \text{ lim} \quad (4)$$

$$V_{qs}^r \text{ sat} \left( K_{pq} + \frac{K_{iq}}{s} \right) (i_{qs}^r - i_{qs}^r) + \widehat{\omega}_r \widehat{\lambda}_{ds}^r - V_{qs}^r \text{ lim} \quad (5)$$

여기서,  $V_{ds}^r \text{ lim}$  과  $V_{qs}^r \text{ lim}$  는 d, q축 전압 제한이다.

또한, 식 (3)의 토크 식으로부터 일정 토크(constant torque)를 유지하려는 벡터(vector)는 다음과 같이 구할 수 있으며, 그림 1은 일정 토크 방향 벡터의 전류 궤적이다.

$$\left( -\frac{\partial T_e}{\partial i_{qs}^r}, \frac{\partial T_e}{\partial i_{ds}^r} \right) = \frac{3P}{4} (- (L_{ds} - L_{qs}) i_{ds}^r - \lambda_f, (L_{ds} - L_{qs}) i_{qs}^r) \quad (6)$$

식 (4)와 (5)의 d, q축 전압 부족분으로부터 전체 전압 부족분의 크기를 알 수 있으며, 식 (6)의 일정 토크 벡터 방향 벡터를 정규화(normalize)하여 약자속 운전 시 일정 토크를 유지하는 전류 지령을 구할 수 있다.

그림 2는 센서리스 운전을 포함한 전체 제어 블록도이다<sup>[3, 4]</sup>.

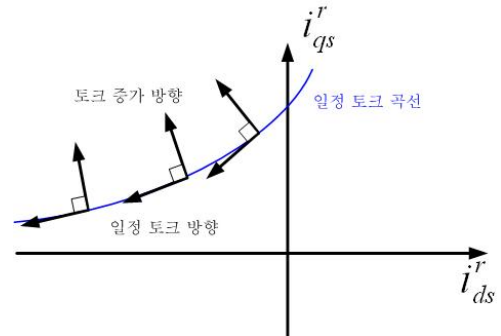


그림 1 일정 토크 방향의 벡터  
Fig. 1 Constant torque trajectory

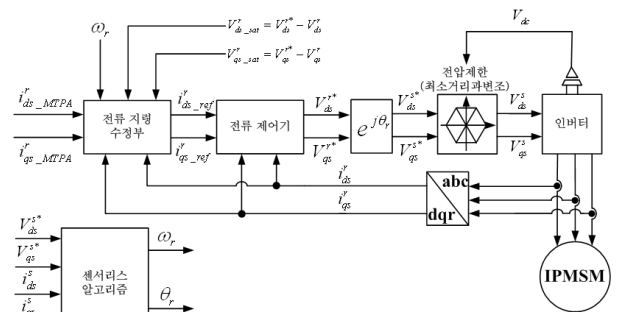
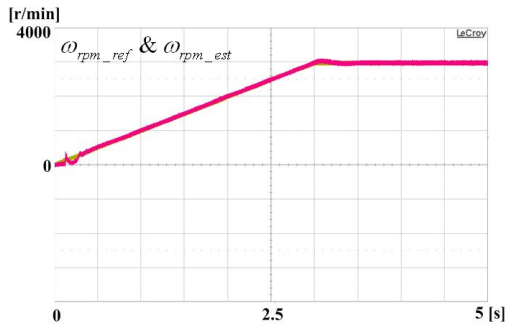
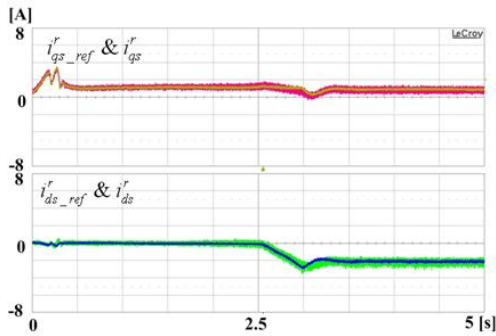


그림 2 제어 블록 다이어그램  
Fig. 2 Control Block Diagram

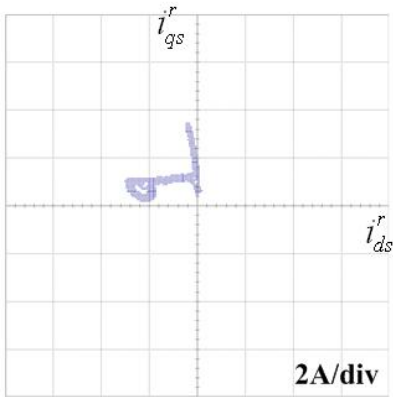
### 3. 실험 결과



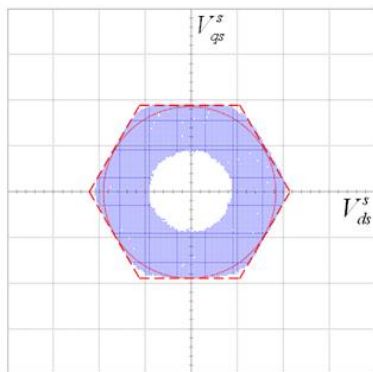
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 3 가속 시 성능: (a) 회전자 속도 지령과 추정 속도, (b) 전류 제어, (c) 전류 궤적, (d) 전압 궤적

Fig. 2 Control performance at acceleration: (a) rotor speed and estimated rotor speed, (b) current control, (c) current trajectory, (d) voltage trajectory

표 1 매입형 영구자석 동기 전동기의 제정수

Table 1 Parameters of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor

정격 출력	2kW	정격 전압	220V <sub>rms</sub>
정격 전류	7.7A <sub>rms</sub>	기저속도	2000r/min
극수	8	Rs	0.433Ω
Ld	5mH	Lq	7.5mH
영구자석 쇠교자속	0.416wb turn	관성	0.005kg m <sup>2</sup>

표 1은 실험에 사용된 2kW급 매입형 영구자석 동기 전동기의 제정수이며, 그림 3은 제안된 약자속 운전 방법에 따른 제어 성능이다. 그림에서 실험용 매입형 영구자석 동기 전동기는 초당 1,000r/min의 가속도로 가속되었으며, 저속 영역의 과도 상태를 제외하고 안정적으로 동작하고 있음을 확인할 수 있다. 특히, 그림 2 (b)와 (c)에서 확인할 수 있듯이, 제안된 운전 방법에 따라 전류 지령이 적절히 수정되어 전류 제어가 원활하게 수행되는 것을 확인할 수 있으며, 그림 2 (d)에서 전압 사용 범위가 전압 제한 육각형(hexagon)에 가까운 것을 확인할 수 있다.

### 4. 결론

본 논문에서는 팬, 펌프와 같이 고속 센서리스 운전이 필요한 분야에 사용될 수 있는 매입형 영구자석 동기 전동기의 약자속 운전 방법에 대해서 제안을 하였다.

제안된 약자속 방법은 전류 제어를 기반으로 하여 전압 부족분을 계산하고, 일정 토크 방향의 벡터를 이용하여 전류 지령을 수정하는 방법이다. 제안된 방법은 전압 제한의 설정 범위에 따라 인버터가 합성할 수 있는 최대 전압에 가까운 전압을 합성할 수 있다. 제안된 방법의 성능을 실험 장치를 통하여 검증하였다.

### 참고 문헌

- [1] T.Kwon, G.Choi, M.Kwak, and S.Sul, "Novel Flux weakening Control of an IPMSM for Quasi Six Step Operation", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol.44, No.6, Nov/Dec, 2008.
- [2] 김장목, "매입형 영구자석 동기전동기의 제어특성 개선", 서울대학교 대학원 전기공학부 공학 박사학위 논문, 1998.
- [3] P.L.Jansen, and R.D.Lorenz, "A Physically insightful approach to the design and accuracy assessment of flux observers for field oriented induction machine drives", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol.30, No.1, pp.101 110, Jan/Feb, 1994.
- [4] A.Yoo, and S.Sul, "Design of Flux Observer Robust to Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Flux Variation", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol.45, No.5, Sep/Oct, 2009.