

# 최적화 기법을 이용한 PMSM의 MTPA 제어

김도현<sup>1</sup>, 박승찬<sup>2</sup>, 김상훈<sup>1</sup>  
 강원대학교<sup>1</sup>, 다원시스<sup>2</sup>

## A MTPA Control of PMSMs Using an Optimization Method

Do-Hyun Kim, Seung-Chan Park, Sang-Hoon Kim  
 Kangwon National University, Dawonsys

### ABSTRACT

본 논문에서는 PMSM(Permanent Magnet Synchronous Motor)의 구동 효율 향상을 위한 MTPA(Maximum Torque Per Ampere) 제어 기법에 대해 제안한다. 제안된 기법은 전동기의 동손이 최소가 되도록 최적화 기법을 통해 전류각 지령을 조정한다. 제안된 기법을 통해 모든 부하 조건에서 짧은 시간 내에 동손이 최소가 되는 최적 전류각을 추종할 수 있으며, 전동기의 제정수 혹은 위치 측정 오차에 강인하다. 800W IPMSM 구동 실험을 통해 제안된 기법의 효용성을 검증하였다.

### 1. 서론

PMSM은 높은 효율과 출력 밀도 우수한 동특성으로 인해 다양한 전동기 구동 분야에서 사용되고 있다. PMSM 구동 시에는 통상 동손을 최소화하기 위한 MTPA 제어가 적용된다<sup>[1]</sup>. 통상적인 MTPA 제어 방식은 MTPA 제어를 위한 전류 지령을 수학적 모델로부터 도출한다. 하지만 이러한 방식은 전동기의 제정수 혹은 위치 측정 오차가 존재할 경우 실제 MTPA 운전점에서 구동하지 못하게 된다.

본 논문에서는 최적화 기법을 통해 동손이 최소가 되는 최적 전류각을 추종하는 방법을 제안한다. 제안된 기법은 고정자 전류의 크기 정보만을 이용하기 때문에 전동기의 제정수 혹은 위치 측정 오차에 영향을 받지 않고 동손을 최소화할 수 있다. 또한, 제안된 최적화 기법을 사용함으로써 모든 운전 조건에서 거의 동일한 수 백 msec의 짧은 시간 내에 최적 전류각을 추종할 수 있다. 제안된 기법의 유효성을 800W IPMSM 구동 실험을 통해 확인하였다.

### 2. 제안된 MTPA 제어 방법

#### 2.1 PMSM의 최소 동손 조건

영구자석형 동기 전동기에서 동일한 크기의 토크를 발생시키는 d, q축 전류의 조합은 무수히 많다. 토크 발생에 필요한 d, q축 전류에 의한 동손  $P_{cu}$ 는 식(1)과 같이 고정자 전류 크기  $I_s$ 의 제곱에 비례한다.

$$P_{cu} = \frac{3}{2}R_s(i_{ds}^2 + i_{qs}^2) = \frac{3}{2}R_s I_s^2 \quad (1)$$

여기서  $R_s$ 는 고정자 저항이다. 출력 토크 지령  $T_e^*$ 에 대한 고정자 전류의 크기  $I_s$ 는 식(2)와 같이 전류 각  $\beta$ 의 함수로 표현된다.

$$I_s = \frac{-\phi_f \sin\beta + \sqrt{\phi_f^2 \sin^2\beta - \frac{8(L_{ds} - L_{qs})T_e^*}{3P} \sin 2\beta}}{(L_{ds} - L_{qs})\sin 2\beta} \quad (2)$$

여기서  $L_{ds}, L_{qs}$ 는 각각 d, q축 인덕턴스,  $\phi_f$ 는 영구자석에 의한 쇄교자속의 세기,  $P$ 는 극 수이다.  $\beta$ 에 따라 동손이 달라지며, 동손이 최소가 되는 전류 각 조건은 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\min(P_{cu}) \rightarrow \frac{\partial P_{cu}}{\partial \beta} = 0 \quad (3)$$

#### 2.2 최적화 기법을 이용한 MTPA 제어 방법

본 논문에서 제안하는 최적화 기법의 원리가 그림 1에 보인다. 동손을 목적 함수로 선정하여 식(3) 조건을 만족하는 전류 각  $\beta_{MTPA}$ 를 찾기 위해 식(4)로 정의한  $Q$ 를 이용하여 식(5)와 같이  $Q$ 에 비례하게 전류 각 지령  $\beta^*$ 를 점진적으로 조정한다.

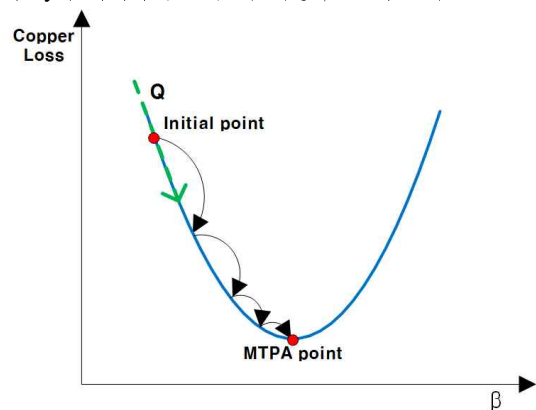


그림 1 제안하는 최적화 기법의 원리

$$Q = \frac{(P_{cu_{k-1}}/P_{cu_k}) - 1}{\beta_k - \beta_{k-1}} \quad (4)$$

$$\beta_{k+1}^* = \beta_k^* + \Delta\beta = \beta_k^* + \rho Q \quad (5)$$

여기서  $P_{cu_{k-1}}$ 과  $P_{cu_k}$ 는 각각 이전 제어주기와 현재 제어주기

에 계산된 동손이며,  $\rho$ 는 step size이다.

$Q$ 는 전류 각이 증가하는 상황에서 동손이 감소하는 경우 양(+)의 값을 가지며, 동손이 증가하는 경우 음(-)의 값을 가진다. 반대로 전류 각이 감소하는 상황에서 동손이 감소하는 경우 음(-)의 값을 가지며, 동손이 증가하는 경우 양(+)의 값을 가진다. 이와 같이  $Q$ 는 모든 상황에서 동손의 크기를 감소하기 위한 전류 각 지령의 방향 정보를 내포하는 것을 알 수 있다. 따라서  $\beta^*$ 를  $Q$ 의 부호에 따라 식(5)와 같이 변화시키는 경우  $\beta_{MTPA}$ 를 추종할 수 있다.

또한, 현재 전류 각과 최적 전류 각의 차이가 클수록 동손의 변동이 커지게 되어  $Q$ 는 큰 값을 가진다. 이로 인해 식(5)의  $\Delta\beta$ 의 크기는 현재 전류 각과 최적 전류 각의 차이가 클수록 크므로 식(5)를 이용하여  $\beta_{MTPA}$ 를 추종하는 경우 추종 속도를 향상시킬 수 있다. 그림 2는 제안된 MTPA 제어 기법의 순서도를 나타낸다.

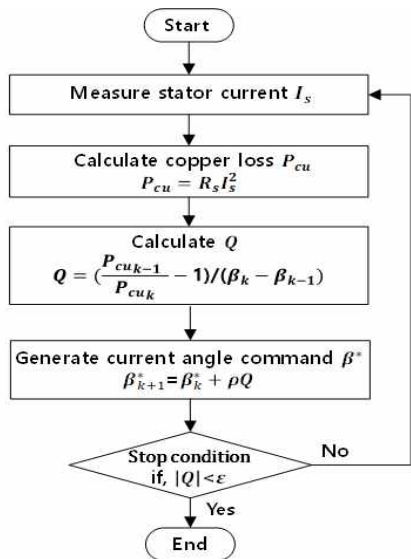


그림 2 제안된 MTPA 제어 기법의 순서도.

### 3. 실험 결과

제안된 기법의 타당성을 검증하기 위해 800W IPMSM 구동 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 IPMSM의 사양은 표 1과 같으며, 인버터의 스위칭 주파수는 5kHz이다.

표 1 800W IPMSM 파라미터

Parameter	Value	Parameter	Value
$P_{rated}$	800 W	P	8 poles
$T_{rated}$	3.18 N·m	$R_s$	1.8 $\Omega$
$I_{rated}$	4 A(peak)	$L_{ds}$	7.8 mH
$V_{rated}$	220 V	$L_{qs}$	14.5 mH
$\omega_{rated}$	2000 r/min	$\phi_f$	0.13 Wb

그림 3과 그림 4는 각 운전 조건에 대해 초기 전류 각 지령이 90°, 즉 d축 전류를 0으로 제어하던 중에 제안된 기법을 적용한 경우의 계산된 토크  $\hat{T}_e$ 와 회전자 속도  $\omega_{rpm}$ , 그리고 고정자 전류 크기  $I_s$ 와 전류 각 지령  $\beta^*$ 를 나타낸다.

그림 3은 1000r/min, 75% 부하에서의 실험 결과를 나타낸다. 제안된 기법이 적용된 이후  $\beta^*$ 가 90°에서 98.2°로 약 0.125초 만에 조정되었으며,  $\beta^*$ 가 조정됨에 따라  $I_s$ 가 3.04A에서 3.01A로 감소함을 볼 수 있다. 그림 4는 2000r/min, 100% 부하에서의 실험 결과를 나타낸다.  $\beta^*$ 가 90°에서 운전 중 제안된 기법이 적용됨에 따라 101.6°로 약 0.125초 만에 조정되었으며,  $\beta^*$ 가 조정됨에 따라  $I_s$ 가 4.08A에서 3.99A로 감소함을 볼 수 있다.

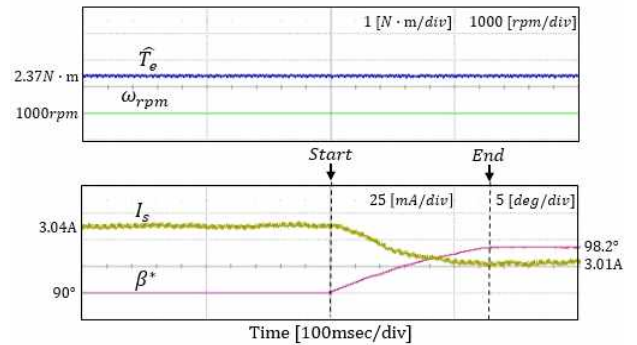


그림 3 1000r/min, 75% 부하에서 실험 결과

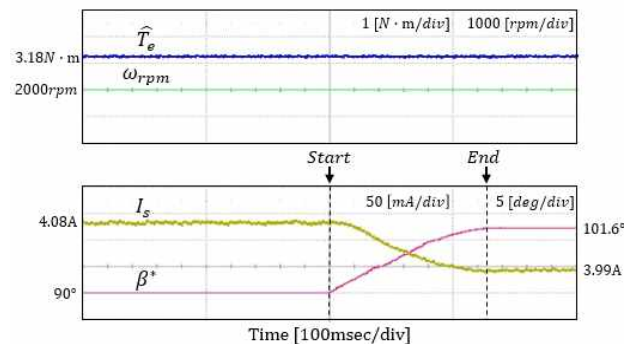


그림 4 2000r/min, 100% 부하에서 실험 결과

### 4. 결론

본 논문에서는 PMSM의 최적화 기법을 이용한 MTPA 제어 기법을 제안하였다. 제안된 기법은 모든 부하 조건에서 최적 점의 추종 성능이 동일하게 보장되도록 하여 짧은 시간 내에 최적의 전류 각을 추종할 수 있도록 하였다. 또한, 고정자 전류의 크기 정보만을 이용하기 때문에 제정수 혹은 위치 측정 오차에 강인하다. 800W IPMSM 구동 실험을 통해 제안된 MTPA 제어 기법의 유효성을 검증하였다.

### 참고 문헌

- [1] Sang-Hoon Kim, *Electric Motor Control, DC AC and BLDC Motors*, Elsevier Inc., Ch.5 & 6, 2017.
- [2] D. Anton, Y. K. Kim, S. J. Lee, and S. T. Lee, "Robust self-tuning MTPA algorithm for IPMSM drives," in Proc. IEEE Ind. Electron. Conf., 2008, pp. 1355 - 1360.