

# Adaptive 알고리즘을 이용한 PMSM의 최대 효율 제어

박승찬, 김도현, 김상훈  
강원대학교 BIT 의료전기전자융합공학

## Maximum Efficiency Control of PMSMs Using Adaptive Algorithm

Seung-Chan Park, Do-Hyun Kim, Sang-Hoon Kim  
BIT Electrical & Medical Convergent Eng., Kangwon National Univ.

### ABSTRACT

본 논문에서는 PMSM(Permanent Magnet Synchronous Motor)의 구동 효율을 향상시키기 위한 최대 효율 제어 기법에 대해 제안한다. 제안된 기법은 전동기의 입력 전력이 최소가 되도록 Gradient Decent 알고리즘을 기반으로 하는 최적화 기법인 Adaptive 알고리즘을 통해 전류각을 조정한다. 제안된 기법을 통해 동손을 최소로 제어하는 기존 MTPA(Maximum Torque Per Ampere) 제어 방식 보다 구동 효율을 향상시킬 수 있으며 전동기의 제정수 오차에 강인하다. 1.7kW IPMSM의 모의실험을 통해 제안된 기법의 효용성을 검증하였다.

### 1. 서론

영구 자석 동기 전동기(PMSM)는 높은 효율과 전력 밀도, 우수한 동특성으로 인해 넓은 응용 분야에서 사용되고 있다.<sup>[1]</sup> MTPA 제어는 전동기의 동손만을 최소화하기 때문에 전동기를 최대 효율로 구동하지 못한다. 이러한 한계를 극복하고 전동기를 최대 효율로 구동하기 위한 기존 제어 기법은 크게 수학적 손실 모델로부터 최적의 전류 지령을 도출하는 방식인 LMC(Loss Model Control) 기법과 Gradient Decent 알고리즘 등을 통해 점진적으로 제어 입력을 변화시켜 효율이 최대가 되는 제어 입력을 추종하는 방식인 SC(Search Control) 기법으로 분류할 수 있다.<sup>[2]</sup> LMC 기법은 단순한 계산만으로 최적의 운전점을 결정할 수 있지만 손실의 비선형적인 특성으로 인해 모델링이 어렵다는 단점이 있으며 제정수 오차에 취약하다. SC 기법은 제정수 오차에 강인하지만 운전 조건에 따라 추종 성능이 달라진다는 단점이 있다. 본 논문에서는 추정된 입력 전력이 최소가 되는 최적 전류각을 추종한다. 속도제어기 출력으로부터 고정자 전류의 크기를 결정하고, SC 기법을 기반으로 Gradient Decent 알고리즘을 응용한 Adaptive 알고리즘 중 하나인 Adam(Adaptive Moment) 알고리즘을 통해 전류각을 조정하여 모든 운전 조건에서 추종 성능이 보장된 최대 효율 제어 기법을 제안한다.

## 2. Adaptive 알고리즘을 이용한 최대 효율 제어

### 2.1 PMSM의 최대 효율 운전 조건

전동기의 효율은 전동기의 입력 전력에 대한 기계적 출력의 비로 d-q축 전류와 속도의 함수로 표현할 수 있으며 식(1)로 표현된다. 일정한 속도와 부하로 구동 중인 경우 전동기의 효율은 d-q축 전류의 함수로 표현되며  $P_{mech}$ 은 일정하기 때문에

전동기의 효율이 최대가 되기 위해서는  $P_{in}$ 이 최소가 되어야 한다. d-q축 전류는 전류각에 대해 식(2)와 같이 표현되며,  $P_{in}$ 이 최소가 되는 조건은 식(3)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\eta = \frac{P_{mech}}{P_{in}} = \frac{T_e \omega_m}{P_{in}} = f(i_{ds}^r, i_{qs}^r, \omega_m) \quad (1)$$

$$i_{ds}^r = I_s \cos \beta, \quad i_{qs}^r = I_s \sin \beta \quad (2)$$

$$\frac{\partial P_{in}}{\partial \beta} = 0 \quad (3)$$

여기서  $\eta$ 은 효율,  $\beta$ 은 전류각이다.

### 2.2 Adam 알고리즘을 이용한 최적 전류각 추종

본 논문에서 제안하는 최대 효율 제어는 SC 기법을 기반으로 Gradient Decent 알고리즘을 응용한 최적화 기법 중 하나인 Adam 알고리즘을 사용하여 추정된 입력 전력이 최소가 되는 최적 전류각을 추종한다. Gradient Decent 알고리즘은 식(3) 조건을 만족하는 전류각을 결정하기 위해 식(4)와 같이 미분을 차분 방정식으로 근사화하여  $\Delta\beta$ 가 0이 될 때까지 점진적으로 전류각 지령을 변화시킨다. 하지만 운전점이 최적점으로 수렴함에 따라  $\beta_k - \beta_{k-1}$ 가 0에 가까워지는 경우 실제 구동 환경에서는 계산된 입력 전력에 포함된 잡음으로 인해 계산된  $\Delta\beta$ 가 발산하는 문제가 발생하게 된다. 이는  $\beta_k - \beta_{k-1}$ 의 부호만을 고려하여 식(5)와 같이 근사화함으로써 해결할 수 있다.

$$\begin{aligned} \beta_{k+1} &= \beta_k - \Delta\beta = \beta_k - \rho \frac{\partial P_{in}}{\partial \beta} \\ &\approx \beta_k - \rho \frac{P_{in_k} - P_{in_{k-1}}}{\beta_k - \beta_{k-1}} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \Delta\beta &= \rho \cdot \text{sign}(\beta_k - \beta_{k-1}) \cdot (P_{in_k} - P_{in_{k-1}}) \\ \Delta P &= \text{sign}(\beta_k - \beta_{k-1}) \cdot (P_{in_k} - P_{in_{k-1}}) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\text{sign}(\beta_k - \beta_{k-1}) = \begin{cases} 1 & \text{if } (\beta_k - \beta_{k-1}) > 0 \\ 0 & \text{else} \\ -1 & \text{if } (\beta_k - \beta_{k-1}) < 0 \end{cases} \quad (6)$$

여기서  $\rho$ 는 step size이다.

알고리즘을 통한 최적점 추종 성능은  $\rho$ 로 인해 결정되는데,  $\rho$ 를 일정한 상수로 선정하는 경우 다음과 같은 문제가 발생한다. 먼저,  $\rho$ 를 작게 선정할 경우  $\Delta\beta$ 의 크기가 작아 최적점에서의 수렴하기까지 오랜 시간이 소요되며 최적점 이전 다른 운

전점에 수렴할 가능성이 있다. 반대로  $\rho$ 를 크게 선정할 경우  $\Delta\beta$ 의 크기가 커지게 되어 최적점에 수렴하지 못하고 진동하거나 발산하는 문제점이 있다. 또한 특정 운전 조건에 대해  $\rho$ 를 적절히 선정하더라도 운전 조건이 달라지는 경우 운전 조건에 따라  $\Delta P$ 의 크기가 다르기 때문에 추종 성능이 달라진다.

위와 같은 문제점을 극복하고자 본 논문에서는 상황에 따라  $\rho$ 를 변동시키는 Adam 알고리즘을 이용한 최대 효율 제어 기법을 제안한다. Adam 알고리즘을 이용한 최적 전류각 추종 원리는 아래와 같다.

식(7)의  $r$ 을 이용하여 step size을 조정하게 되는데,  $r$ 은 이전  $\Delta P$ 의 크기를 가중치에 따라 누적한 성분으로  $r$ 의 크기에 따라  $\rho$ 가 조정된다.  $r$ 이 큰 경우  $\rho$ 가 작아지게 되어 운전 점이 진동하거나 발산하는 문제점을 해결할 수 있고, 반대로  $r$ 이 작은 경우  $\rho$ 가 커지게 되어 수렴 속도를 증가시키고 다른 운전점에 수렴하는 문제점을 해결할 수 있다.

$$\rho = \frac{\mu}{\epsilon + \sqrt{r}} \quad (7)$$

$$r = \alpha_1 r + (1 - \alpha_1)(\Delta P)^2 \quad (0 \leq \alpha_1 \leq 1)$$

여기서  $\mu, \epsilon$ 은 상수,  $\alpha_1$ 은 가중치이다.

또한,  $P_{in}$ 에 존재하는 잡음으로 인해 계산된  $\Delta\beta$ 에도 잡음이 섞일 가능성이 크다.  $\Delta\beta$ 에 포함된 잡음으로 인해 추종 성능이 저하 될 수 있기 때문에 잡음을 제거할 필요성이 있다. 이는 식 (9)의  $v$ 을 통해 해결할 수 있다.  $v$ 은 이전  $\Delta P$ 을 누적하기 때문에 물리적으로 관성이 생기는 효과를 얻을 수 있어  $\Delta P$ 에 포함된 잡음으로 인한 작은 변화는 무시된다.

$$v = \alpha_2 v + (1 - \alpha_2)\Delta P \quad (0 \leq \alpha_2 \leq 1) \quad (9)$$

여기서  $\alpha_2$ 은 가중치이다.

최종적인 Adam 알고리즘을 이용한 최적 전류각 추종 식이 식(9)에 나타나 있다.

$$\beta_{k+1} = \beta_k - \Delta\beta, \quad \Delta\beta = \rho \cdot v \quad (9)$$

### 3. 시뮬레이션 결과

제안된 기법의 효율성 검증을 위해 Matlab/Simulink을 이용하여 철손이 고려된 1.7kW IPMSM 구동 시스템에 대해 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션에 사용된 1.7kW IPMSM의 제정수가 표 1에 보인다.

표 1 1.7kW IPMSM 파라미터

Rated power	1.7kW
Number of Poles	6
Rated speed	4000r/min
Rated current	15 A
$R_s$	0.51 $\Omega$
$L_{ds}$	4.54 mH
$L_{qs}$	7.66 mH
$\lambda_{pm}$	0.067 Wb

그림 1과 그림 2는 제어가  $L_{qs}$ 를 실제 값의 70%로 작게,  $\lambda_{pm}$ 을 실제 값의 130%로 크게 알고 있을 시, 1p.u의 부하를 정격속도 4000r/min에서 MTPA 제어 중 1초에 제안된 기법이 적용된 경우 전류각 지령과 d-q축 전류, 그리고 추정된 입력 전력과 효율을 나타낸다. 제안된 기법을 통해 전류각 지령을 변동시킴으로써 입력 전력이 약 15W 감소하였고, 효율이 약

0.74% 개선되었다. 그림 3은 주어진 운전 조건에서 전류각에 대한 입력 전력의 관계를 보인다. 제안된 기법을 통해 운전점이  $P_{in}$ 이 최소가 되는 최적점으로 수렴함을 확인할 수 있다.

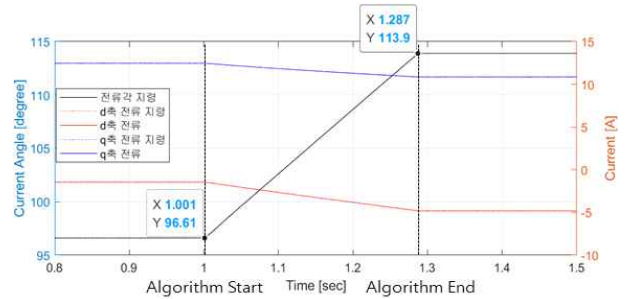


그림 1 전류각 지령 & d-q축 전류

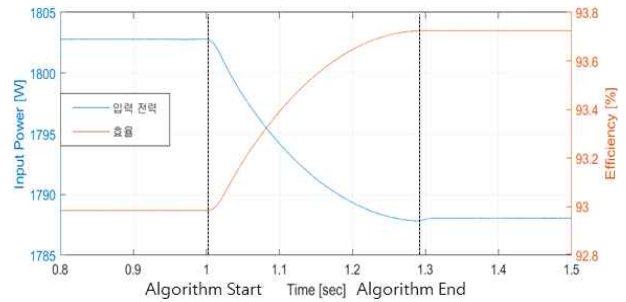


그림 2 입력전력 & 효율

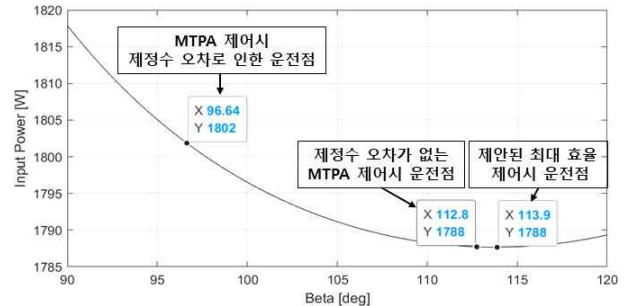


그림 3 속도 4000r/min에서 1p.u부하 구동시 전류각에 대한 입력전력

### 4. 결론

본 논문에서는 Adam 알고리즘을 이용한 PMSM의 최대 효율 기법에 대해 제안하였다. 제안된 기법을 통해 제정수 오차에 영향을 받지 않고 기존 MTPA 제어 방식 보다 효율이 정격 속도, 정격 부하에서 약 0.74% 개선되었다. 1.7kW IPMSM의 모의실험을 통해 제안된 기법의 효율성을 검증하였다.

### 참고 문헌

- [1] Sang-Hoon Kim, *Electric Motor Control, DC AC and BLDC Motors*, Elsevier Inc., Ch.5, 2017.
- [2] Aiswarya Balamurali, et al., "Maximum Efficiency Control of PMSM Drives Considering System Losses Using Gradient Descent Algorithm Based on DC Power Measurement", *IEEE Trans. Energy Conversion*, Vol.33, No.4, pp. 2240 - 2249, DEC. 2018.
- [3] Do-Hyun Kim and Sang-Hoon Kim, "Input Power Estimation Method of a Three-phase Inverter for High Efficiency Operation of an AC Motor", *Transactions of the KIPE*, Accepted, 2019.