

영구자석 동기전동기의 최대 효율점 추적 제어

이광운*, 김성환**, 유지윤*
고려대학교*, 목포대학교**, 고려대학교*

Maximum Efficiency Point Tracking Control of Permanent Magnet Synchronous Motors

Lee Kwang-Woon, Kim Seong-Hwan, Yoo Ji-Yoon
Korea University, Mokpo University, Korea University

ABSTRACT

전동기의 동손 및 철손을 포함한 손실이 최소가 되는 운전 점을 추적함으로써, 전동기의 제정수 변동에 무관하게 항상 최대 효율점에서 영구자석 동기전동기를 운전할 수 있는 새로운 최대 효율 제어 알고리즘을 제안한다. 제안된 최대 효율점 추적 제어 알고리즘은 전류의 위상각 변동에 따른 가변속 구동 장치의 입력 전력 변화로부터 부하 변동에 의한 영향을 제거함으로써 정상 상태에서 부하변동에 무관하게 최대 효율점으로 수렴이 가능하고, 그 구성이 단순하기 때문에 산업계에 널리 적용될 수 있다. 실험을 통해 제안된 알고리즘의 효용성을 입증한다.

1. 서 론

영구자석 전동기는 고효율 특성으로 인하여 가전용에서 산업용에 이르기까지 널리 적용되고 있으며, 특히 에너지 절약에 대한 관심 증가에 힘입어 그 적용 비율은 지속적으로 증가할 것으로 예상된다.^[1] 영구자석 전동기에서 발생하는 손실은 철손과 동손으로 구분된다. 영구자석 전동기의 효율을 개선하기 위해서는 철손과 동손 모두를 종합적으로 고려한 설계 및 제어가 필요하다.

제어 관점에서 영구자석 동기전동기의 효율을 개선하기 위한 다양한 방법들이 현재까지 제안되어 왔다. 제안된 방법들은 크게 최소 동손 제어와 동손 및 철손을 모두 고려한 최대 효율 제어로 분류될 수 있다. 일반적으로 저속 운전 영역에서는 동손이, 고속 영역으로 갈수록 철손이 지배적인 손실 요소가 되기 때문에 전동기의 효율 개선을 위해서는 동손 및 철손을 모두 고려한 최대 효율 제어가 바람직하다고 할 수 있다.^[2-6]

최대 효율 제어에는 Search control 방식과 Loss-model control 방식이 있다. Search control 방식은 전동기의 입력 전력을 기준으로 입력이 최소화 되는 운전점을 찾아가는 방식으로 전동기의 제정수에 대한 정보 없이도 최대 효율점을 찾아갈 수 있다는 장점이 있으나, 수렴 문제를 해결하지 못하여 실제 시스템에 적용하면 진동하는 응답이 발생하게 된다.^[4] Loss-model control 방식은 전동기의 Loss 모델을 기반으로 최대 효율점을 직접 구하는 방식으로, 손실을 포함한 전동기 모델의 제정수에 대한 정확한 정보를 필요로 한다. 또한, 매입형 영구자석 전동기의 경우에는 최대 효율점에 대한 해(解)를 간단하게 구할 수 없다는 단점이 있다.^[6] 상기와 같은 단점들로

인하여 현재까지 제안된 최대 효율 제어기법들은 실제로 산업계에 적용하기에 적합하지 못하다.

최대 효율 제어의 산업계 적용을 위해서는 전동기의 제정수 변동에 영향을 받지 않고, 알고리즘 구성이 단순한 새로운 최대 효율 제어 알고리즘의 개발이 필수적으로 요구된다. 따라서, 본 논문에서는 기존의 Search control 방식의 단점인 수렴 문제로 인한 진동 응답 현상을 해결할 수 있는 새로운 최대 효율점 추적 제어(MEPT, Maximum Efficiency Point Tracking) 알고리즘을 제안하고자 한다. 또한, 영구자석 동기전동기 구동 장치를 기반으로 제안된 MEPT 알고리즘이 부하 변동에 관계없이 전동기의 최대 효율 운전점으로 수렴함을 실험을 통해 입증하고자 한다.

2. 최대 효율점 추적 제어

영구자석 동기 전동기의 토크 방정식은 다음과 같다.

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \{ \lambda_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q \} \quad (1)$$

동기 좌표축에서 d, q축 전류와 고정자 전류 I_s 의 관계는 그림 1과 같고, 식 (1)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \left\{ \lambda_f I_s \sin \theta + \frac{1}{2} (L_d - L_q) I_s^2 \sin 2\theta \right\} \quad (2)$$

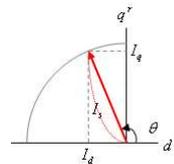


그림 1 전류 페이저 다이어그램
Fig. 1 Current phasor diagram

그림 1과 식 (2)로부터 영구자석 동기전동기의 토크는 전류 위상각 θ 에 따라 변화함을 알 수 있다. 기존의 Search control 방식의 최대 효율 제어에서는 정상 상태에서 전동기 구동 시스템의 입력을 기준으로 입력이 감소되는 방향으로 d축 전류를 조절해 가는 방식을 사용하였다. 전동기 구동 시스템의 입력을 변화시키는 인자로는 전동기의 효율 변동과 부하 변동이 있다. 그러나, 기존의 Search control 기반 최대 효율 제어에서는 전동기 구동 시스템의 입력 변화 인자를 효율로 보았기 때문에 정상 상태라 하더라도 전동기 부하에 변화가 있는 경우 최대 효율점으로 수렴하지 못하는 진동 응답이 발생하게 된다.

본 논문에서는 전류의 위상각을 일정한 형태의 패턴으로 변화시키면서 동일 전류 위상각에서 입력 전력을 비교함으로써 전동기 구동 시스템에 인가되는 부하 변동에 관계없이 최대 효율점으로 수렴할 수 있는 새로운 최대 효율 제어 알고리즘을 제안한다. 본 논문에서 제안하는 최대 효율 추적 제어 알고리즘을 포함하는 영구자석 동기전동기 구동시스템의 구성은 그림 2와 같다.

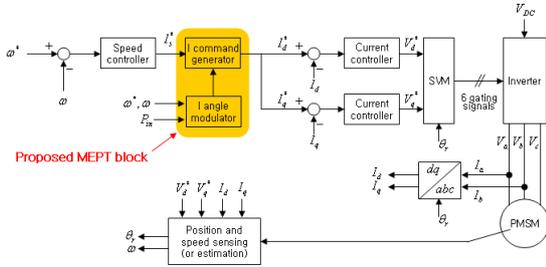


그림 2 영구자석 동기전동기의 최대 효율점 추적 제어 시스템 구성도
Fig. 2 Configuration of a maximum efficiency point tracking control system for permanent magnet synchronous motors

그림 2에서 I command generator는 I angle modulator에서 전달하는 전류 위상각에 따라 속도 제어기의 출력으로부터 다음과 같이 d축 및 q축 전류 지령을 생성한다.

$$\begin{aligned} I_d^*(t_i) &= I_s^* \cdot \cos(\theta + k_2 \cdot \alpha(t_i)) \\ I_q^*(t_i) &= I_s^* \cdot \sin(\theta + k_2 \cdot \alpha(t_i)) \end{aligned} \quad (3)$$

식 (3)에서 $\theta + k_2 \cdot \alpha(t_i)$ 항은 I angle modulator의 출력으로, θ 항은 전류 위상각 조절의 기준이 되는 전류 위상각, $k_2 \cdot \alpha(t_i)$ 항은 θ 항을 기준으로 변화되는 전류 위상각을 의미한다. k_2 항은 +1 또는 -1의 값을 가지며, 전류 위상각의 변화 방향을 설정한다. 전류 위상각 변화에 따른 전동기의 토크 변동을 부드럽게 하기 위하여 전류 위상각 변화 패턴을 다음과 같이 정현파 형태로 설정하였다.

$$\alpha(t_i) = k_1 \sin\left(\pi \cdot \frac{i}{m}\right), \quad i = 0, \dots, m \quad (4)$$

식 (4)에서 m 은 변화되는 전류 위상각의 한 주기를 전류 위상각 조절 수행 주기로 나눈 값이다. 전류 위상각이 변화되면서 전동기의 출력 토크가 증가되는 경우 입력 전력은 그림 3(a)와 같이 감소되는 방향으로 변화한다. 이때 입력 전력의 변화량 $\Delta\eta$ (그림 3의 노랑색 표시 부분)을 구하면 다음과 같다.

$$\Delta\eta = \sum_{i=1}^m \left\{ I_s^* \omega(t_i) - \left[\frac{I_s^* \omega(t_m) - I_s^* \omega(t_0)}{m} \times i + I_s^* \omega(t_0) \right] \right\} \quad (5)$$

만약 $\Delta\eta$ 이 0보다 작은 값을 가진다면, 전동기의 출력 토크는 전류 위상각 변화에 따라 증가하는 방향이므로 현재의 전류 위상각 조절 전략을 지속적으로 유지한다. 그림 3 (a)의 경우, $\Delta\eta$ 이 0보다 작은 값을 가지므로 전류의 위상각을 증가시키는 방향으로 전류 위상각을 변화시킨다. 만약, 현재의 전류 위상각 변화 패턴이 위상각을 감소시키는 방향이라면($k_2 = -1$) 전류 위상각을 감소시키는 방향으로 전류 위상각을 변화시킨다.

$\Delta\eta$ 이 0보다 큰 값을 가지는 경우에는 현재의 전류 위상각 변화 패턴이 전동기의 출력 토크를 감소시키는 것으로 판단하고 전류 위상각 변화 방향을 변화시킨다. 예를 들어, 현재의 전류 위상각 변화 방향이 위상각을 증가시키는 것이라면 감소

시키는 것으로 전류 위상각 변화 패턴을 변경한다. 그림 3 (b)는 $\Delta\eta$ 이 0보다 큰 값을 가지는 경우의 전류 위상각 변화 패턴을 나타낸다.

전류 위상각 변화 패턴을 결정하는 데 있어서, $\Delta\eta$ 의 값을 0과 비교하면 잡음 등의 영향으로 인하여 최대 효율점으로 일정하게 수렴하지 못하고 최대 효율점 근처에서 진동 응답이 발생할 수 있다. 본 논문에서는 $\Delta\eta$ 의 값을 Δ_B 와 비교하여, 그림 3 (c)와 같이 $|\Delta\eta| \leq |\Delta_B|$ 인 경우에는 전류 위상각은 변화시키지 않고 기존의 전류 위상각 변화 패턴만 유지시키는 방식을 사용하였다. 그림 4는 본 논문에서 제안된 MEPT 알고리즘의 순서도로, 알고리즘의 구성이 단순하기 때문에 저가의 마이크로 프로세서를 사용해도 쉽게 구현할 수 있다는 특징이 있다.

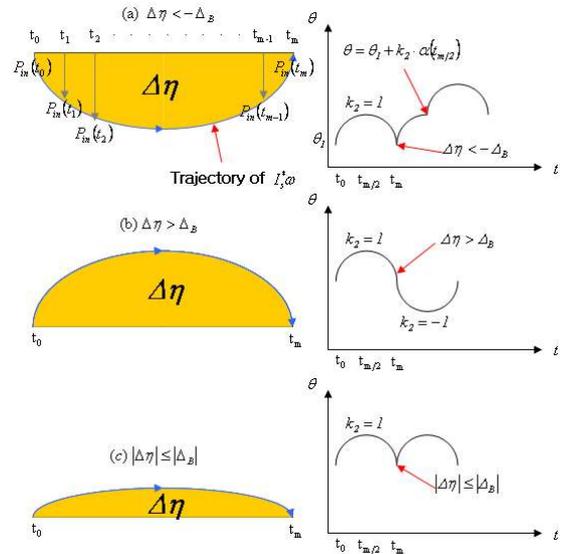


그림 3 전류 위상각 조절 전략
Fig. 3 Current phase angle modulation strategy

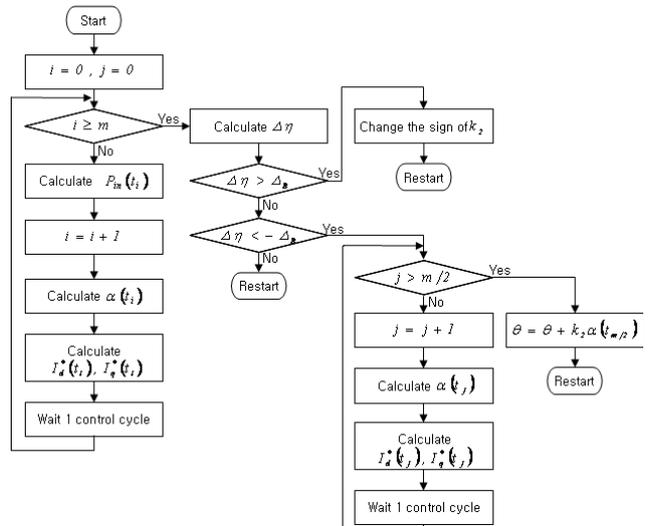


그림 4 제안된 MEPT 알고리즘의 순서도
Fig. 4 Flowchart of the proposed MEPT algorithm

3. 실험 결과

제안된 MEPT 알고리즘의 효과를 입증하기 위해 750W급 8

극 SPMSM 구동 장치에 기존의 Search control 방식의 최대 효율제어 알고리즘과 제안된 MEPT 알고리즘을 모두 적용하여 그 특성을 비교하였다. SPMSM에 인가되는 부하를 조절하기 위해 150W급의 DC 서보 전동기의 회전축과 SPMSM의 회전축을 기계적으로 연결하고, DC 서보 전동기의 출력을 DC Electronic Load에 접속하였다. 그림 5, 그림 6은 SPMSM에 일정 부하(62W)를 인가하고, 1000 [rpm]으로 운전하면서 각각 기존의 Search control 및 제안된 MEPT 알고리즘을 적용했을 때의 실험 결과이다. 그림 7, 그림 8은 SPMSM에 인가되는 부하에 3%의 변동을 주기적(40초 주기)으로 인가하고, 1000 [rpm]으로 운전하면서 각각 기존의 Search control 및 제안된 MEPT 알고리즘을 적용했을 때의 실험 결과이다. 실험 결과로부터 제안된 MEPT 알고리즘의 경우 부하 변동에 대해서도 진동 응답이 억제됨을 확인할 수 있다.

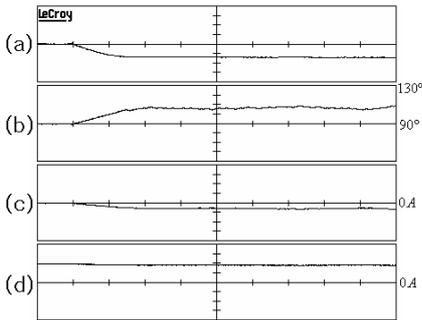


그림 5 일정 부하에서의 최대 효율점 추적(기존 방법)
(a)입력 전력, (b)전류 위상각,
(c)D축 전류지령(d)Q축 전류지령(1.25A/div.), (20sec./div.)
Fig. 5 Maximum efficiency point tracking at constant load
(conventional method)

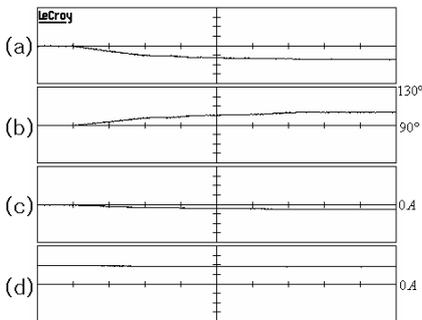


그림 6 일정 부하에서의 최대 효율점 추적(제안된 방법)
(a)입력 전력, (b)전류 위상각,
(c)D축 전류지령(d)Q축 전류지령(1.25A/div.), (20sec./div.)
Fig. 6 Maximum efficiency point tracking at constant load
(proposed method)

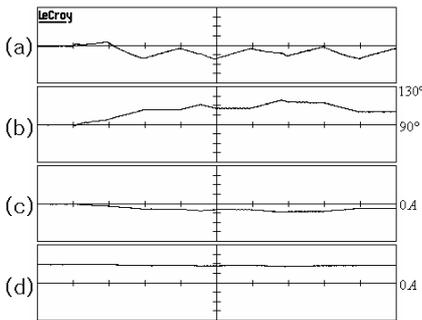


그림 7 주기적인 변동 부하에서의 최대 효율점 추적(기존 방법)
(a)입력 전력, (b)전류 위상각,

(c)D축 전류지령(d)Q축 전류지령(1.25A/div.), (20sec./div.)

Fig. 7 Maximum efficiency point tracking at periodical varying load (conventional method)

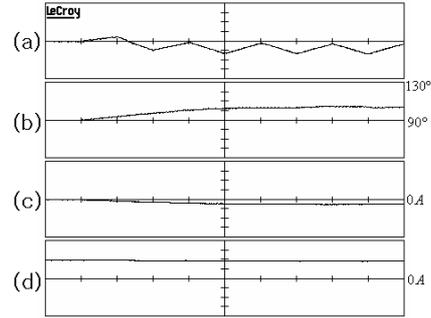


그림 8 주기적인 변동 부하에서의 최대 효율점 추적(제안된 방법)
(a)입력 전력, (b)전류 위상각,
(c)D축 전류지령(d)Q축 전류지령(1.25A/div.), (20sec./div.)
Fig. 8 Maximum efficiency point tracking at periodical varying load (proposed method)

4. 결론

본 논문에서는 부하 변동에 관계없이 최대 효율점으로 수렴이 가능한 새로운 최대 효율점 추적 제어 알고리즘을 제안하고, 영구자석 동기전동기 구동장치에 적용하여 기존에 제안된 Search control 방식과의 기술적 차별성과 우월성을 입증하였다. 본 논문에서 제안된 MEPT 알고리즘은 팬, 압축기 구동과 같은 Slow 다이내믹 시스템에 적합하며, 알고리즘의 구성이 단순하기 때문에 기존의 전동기 구동 시스템에 손쉽게 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

참고 문헌

- [1] Industrial Environment Research Report for Small Motor, KETI, 2002.
- [2] S. Motorimoto et al., "Loss Minimization Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Drives", IEEE Trans. Ind. Elec., Vol. 41, No. 5, pp. 511-517, 1994, October.
- [3] T.M. Jahns et al., "Interior Permanent-Magnet Synchronous Motors for Adjustable-Speed Drives", IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. IA-22, No. 4, pp. 738-747, 1986, Jul./Aug.
- [4] Sadegh Vaez, M.A. Rahman, "An On-line Loss Minimization Controller for Interior Permanent Magnet Motor Drives", IEEE Trans. Energy Conversion, Vol. 14, No. 4, pp. 1435-1440, 1999, December.
- [5] Christos Mademlis et al., "Loss Minimization in Surface Permanent-Magnet Synchronous Motor Drives", IEEE Trans. Ind. Elec., Vol. 47, No. 1, pp. 115-122, 2000, February.
- [6] Calogero Cavallaro et al., "Efficiency Enhancement of Permanent-Magnet Synchronous Motor Drives by Online Loss Minimization Approaches", IEEE Trans. Ind. Elec., Vol. 52, No. 4, pp. 1153-1160, 2005, August.