

영구자석 동기전동기의 최소 손실 벡터제어

정의훈, 이용재, 하정익
서울대학교, 전기정보공학부

Loss Minimizing Vector Control of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor

Euihoon Chung, Yongjae Lee, and Jung Ik Ha
Department of Electrical and Computer Engineering, Seoul National University

ABSTRACT

전동기의 손실은 크게 동손과 철손으로 구분된다. 하지만 철손은 비선형적인 특성 때문에 제어에서 고려되지 않는 경우가 많았다. 본 논문에서는 동손뿐만 아니라 철손까지 제어에 반영하여 최소 손실로 구동하기 위하여 전동기의 철손을 모델링한다. 이때 구동조건에 따라 최소 손실 점을 실험적으로 측정하여 철손의 계수를 결정하였다. 구성된 손실 모델을 바탕으로 주어진 속도와 토크 조건에서 최적의 전류 지령을 생성하는 최소 손실 벡터제어 알고리즘을 소개하고, 실험을 통해 기존의 제어 방식과의 차이를 검증하여 효용성을 입증한다.

1, 서론

영구자석 동기전동기는 고효율, 고 전력 밀도 등의 장점 덕분에 산업계에서 널리 이용되고 있다. 이러한 추세에 따라 영구자석 동기전동기의 효율을 개선하는 것이 중요한 화두가 되고 있다. 전동기 효율은 설계 단계에서 어느 정도 정해지지만 제어 방식에 따라 구동 효율이 바뀌기도 한다. 전동기에서 제어를 통해 조절할 수 있는 손실은 크게 동손과 철손으로 구분된다. 동손은 모델화가 간단하기 때문에 동손을 최소화하는 단위 전류 당 최대 토크(MTPA, Maximum Torque Per Ampere) 제어 방식이 널리 알려져 있다. 반면에 철손은 저속에서 동손에 비해 비중이 작고 비선형적인 특성 때문에 모델화가 어려워 기존 방식에서 고려되지 않는 경우가 많았다. 하지만 최근 산업 영역에서 영구자석 동기전동기의 소형화 및 고속화가 중요해지면서 전동기 손실에서 철손이 차지하는 비중은 점점 늘어나고 있는 추세이며 이에 따라 철손과 동손을 모두 고려한 벡터 제어기법에 대한 관심도 증가하고 있다.

철손은 대단히 비선형적이기 때문에 전동기의 철손을 정확하게 반영하기 위해서는 지나치게 복잡한 철손 모델을 사용해야 한다. 따라서 여러 논문에서 비교적 간단한 철손 모델을 채택하여 제어에 이용하고 있다. [1]의 경우 철손을 전동기 등가회로에 병렬저항을 추가한 형태로 모델링하였고, [2]에서는 철손을 자속의 제곱에 비례하는 간단한 형태로 모델링하였다. 본 논문에서는 [2]와 같은 방식을 이용하였고, 구동 조건에 따라 실험적으로 최소 손실 점을 찾아 철손 모델의 계수를 찾는 데 반영하였다. 또한 구성된 철손 모델을 바탕으로 전동기의 손실을 최소화하는 최소 손실 벡터제어 기법을 연구하고, 실험을 통해 기존 제어 방식과의 차이를 검증하였다.

2. 손실 모델링

2.1 전동기 손실 모델

전동기의 손실은 크게 동손과 철손으로 구분된다. 동손(P_{cu})은 다음과 같이 표현된다.

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

동손은 단순히 전류의 제곱에 비례하는 성분으로 고정자 저항(R_s)을 정확히 알고 있는 경우 추정이 가능하다.

철손(P_{fe})은 고정자 및 회전자 코어에서 발생하는 손실로써 다음과 같이 자속의 제곱에 비례하는 형태로 간단히 모델링할 수 있다.

$$P_{fe} = c_{fe} \omega^{\beta} ((\lambda_f + L_{ds} i_{ds})^2 + (L_{qs} i_{qs})^2) \quad (2)$$

온도에 따른 전동기 파라미터의 변동을 무시하기 위하여 온도 조건은 100°C로 고정하였으며, 실험 조건에서 전동기의 파라미터는 표 1과 같다.

표 1 전동기의 파라미터

Table 1 Parameters of a motor

제정수	값
정격출력	5 [kW]
전동기 극수	6
역기전력 상수(λ_f)	0.067 [V/(rad/s)]
고정자 저항(R_s)	0.51 [Ω]
d축 인덕턴스(L_{ds})	4.54 [mH]
q축 인덕턴스(L_{qs})	7.66 [mH]

2.2 철손 모델 계수 추정

그림 1에서 볼 수 있듯이 등 토크 곡선 상에서 동손은 전류 벡터의 크기가 최소가 되는 A지점에서 가장 적다. 하지만 철손을 고려한 전동기 손실은 B지점에서 최소가 된다. 이는 동작점이 B지점으로 변하면서 전류의 크기는 약간 증가하지만 자속이 약화되어 철손이 크게 줄어들기 때문이다. 이처럼 동손이 최소가 되는 전류 벡터와 실제 전동기 손실이 최소가 되는 전류 벡터에는 차이가 있으며 최소 손실 점을 실험적으로 측정함으로써 철손 모델의 계수를 추정할 수 있다.

실험을 통해 측정된 최소 손실 점과 2.1절의 전동기 손실 모델을 통해 얻은 최소 손실 점의 편차가 최소가 되도록 철손 모델의 계수를 c_{fe} 는 0.08으로 β 는 1.4로 결정하였다.

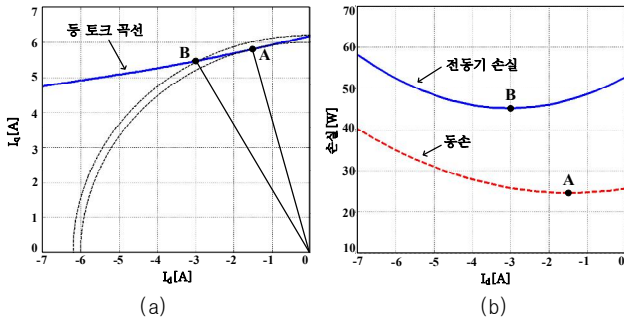


그림 1 (a) 등 토크 곡선, (b) 등 토크 조건에서 d축 전류에 따른 손실
 Fig. 1 (a)Equivalent torque line, (b)Loss versus d axis current for equivalent torque

3. 최소 손실 벡터제어 알고리즘

2절의 손실 모델링을 통해 전동기의 손실은 다음과 같이 표현된다.

$$P_t = a_1 i_{ds}^2 + a_2 i_{qs}^2 + a_3 i_{ds} + a_4 \quad (3)$$

$$\begin{cases} a_1 = \frac{3}{2} + c_{fe} \omega^\beta L_{ds}^2, & a_2 = \frac{3}{2} + c_{fe} \omega^\beta L_{qs}^2 \\ a_3 = 2c_{fe} \omega^\beta L_{ds} \lambda_f, & a_4 = c_{fe} \omega^\beta \lambda_f^2 \end{cases}$$

임의의 등 토크 곡선 상에서 손실을 최소화 하는 전류 벡터는 다음 식에 의해 한 점으로 수렴하게 된다.^[3]

$$i_{ds,opt}^* = \frac{(2b_1 - b_3) \lambda_f}{2b_1 (L_{qs} - L_{ds})} - \sqrt{\left(\frac{b_3 \lambda_f}{2b_1 (L_{qs} - L_{ds})} \right)^2 + \frac{b_2}{b_1} i_{qs,opt}^{*2}} \quad (4)$$

$$\begin{cases} b_1 = \frac{3}{2} + c_{fe} \omega^\beta L_{ds}^2, & b_2 = \frac{3}{2} + c_{fe} \omega^\beta L_{qs}^2 \\ b_3 = \frac{3}{2} + c_{fe} \omega^\beta L_{ds} L_{qs} \end{cases}$$

그림 2는 최소 손실 벡터제어가 포함된 영구자석 동기전동기의 제어 블록도를 나타낸다. 제안하는 벡터 제어 알고리즘은 속도, 토크 조건에서 최적의 전류 쌍을 생성한다.

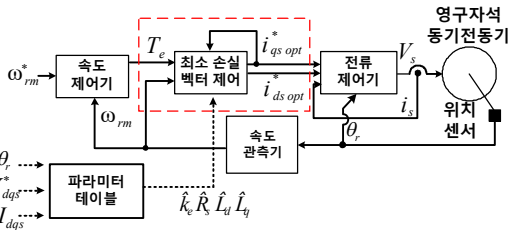


그림 2 최소 손실 벡터제어 알고리즘을 포함한 영구자석 동기전동기의 제어 블록도
 Fig. 2 Control block diagram for IPMSM including loss minimizing vector control algorithm

4. 실험 결과

제안된 최소 손실 벡터제어 알고리즘을 검증하기 위하여 기

존 벡터제어 방식인 Id=0 제어 방식과 MTPA 제어 방식과의 차이를 비교하였다. 그림 3의 결과는 전동기 구동속도 4000rpm, 토크 1.2Nm 조건에서 출력 전력과 입력 전력을 전력 측정기(WT1800)으로 측정하여 효율로 나타낸 것이다.

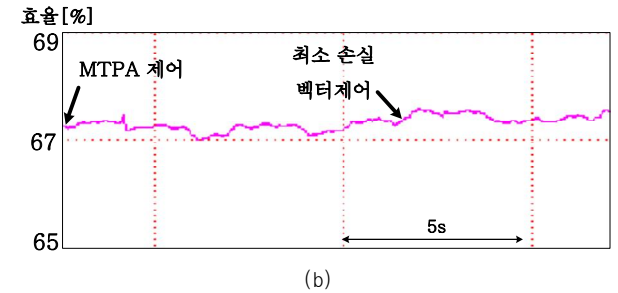
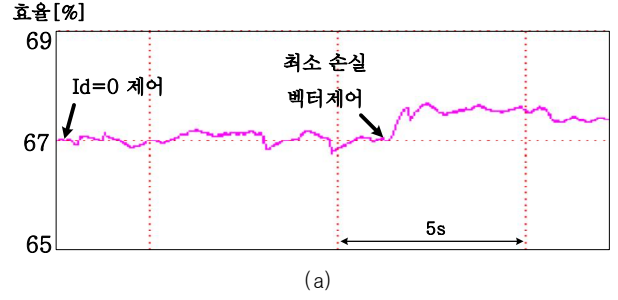


그림 3 최소 손실 벡터제어 적용 시 효율 변화
 (a) Id=0 제어와 비교, (b) MTPA 제어와 비교
 Fig. 3 Efficiency improvement by loss minimizing vector control, comparing with (a) Id=0 control, (b) MTPA control

실험 결과 최소 손실 벡터제어를 적용했을 때 Id=0 제어와 비교하여 0.61%, MTPA 제어와 비교하여 0.21% 향상된 것을 확인하였다.

5. 결론

본 논문은 전동기 구동 시 효율 향상을 목적으로 기존 제어 방식에서는 다루지 않던 철손을 제어에 포함하였다. 실험을 통해 철손 모델의 계수를 추정하는 방식을 제안하고, 특정 속도와 토크 조건에서 손실을 최소화하는 최적의 전류 지령을 생성하는 벡터제어 알고리즘을 제안하였다. 제안하는 방식을 기존 벡터제어 방식인 Id=0 제어 및 MTPA 제어와 비교하여 효율이 개선되는 것을 실험적으로 검증하였다.

참고 문헌

[1] S. Morimoto, Y. Takeda, and T. Hirasu, "Loss minimization control of permanent magnet synchronous motor drives", IEEE Trans. Ind. Electron, vol. 41, pp. 511 517 1994.
 [2] J. Lee, et al., "Loss Minimizing Control of PMSM With the Use of Polynomial Approximations," IEEE Trans. Power Elec. vol. 24, no. 4, pp. 1071 1082, April 2009.
 [2] C. Mademlis, I. Kioskeridis and N. Margaritis "Optimal efficiency control strategy for interior permanent magnet synchronous motor drives", IEEE Trans. Energy Convers., vol. 19, no. 4, pp. 715 723 2004.