

매입형 영구자석 동기전동기의 최소 손실 벡터제어

정의훈¹, 이용재¹, 하정익[†]

Loss Minimizing Vector Control of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor

Euihoon Chung¹, Yongjae Lee¹, and Jung-Ik Ha[†]

Abstract

This paper presents a loss-minimizing vector control method for interior permanent magnet synchronous motor (IPMSM). Conventionally, maximum torque per ampere (MTPA) control, which minimizes copper loss, has been widely used in industry. Iron loss, however, is not considered in MTPA control. In this paper, the loss model, including iron loss and copper loss, is derived to further reduce drive loss. The loss-minimizing vector controller is implemented based on the loss model. The controller generates optimal current vectors according to the operating conditions. The performance and validity of the proposed method are proved by experimental results through comparison with conventional methods.

Key words: Interior permanent magnet synchronous motor, Loss minimization, Motor drive, Vector control

1. 서 론

영구자석 동기전동기는 전력 밀도가 높고 성능이 우수하다는 장점 덕분에 산업계에서 널리 이용되고 있다. 이러한 추세에 따라 영구자석 동기전동기의 구동 효율 개선이 화두가 되고 있다. 전동기의 효율은 설계 단계에서 어느 정도 정해지지만 제어 방식에 의해 변하기도 한다. 전동기에서 제어를 통해 개선할 수 있는 손실은 크게 동손과 철손으로 구분된다. 이 중 동손은 모델화가 간단하기 때문에 동손을 최소화하는 전동기 제어 방식이 산업계에서 널리 사용되고 있다. 표면 부착형 영구자석 동기전동기(Surface mount permanent magnet synchronous motor, SMPMSM)의 경우 토크 생성에 기여하지 않는 d축 전류를 0으로 고정하고 q축 전류만 제어하는 ' $i_{ds}=0$ 제어'를 통해 간단하게 전동기의 동손을

최소화 할 수 있다^[1]. 반면, 매입형 영구자석 동기전동기(Interior permanent magnet synchronous motor, IPMSM)의 경우 동일한 토크를 출력하는 전류 쌍 중에 전류의 크기가 가장 작은 전류 쌍으로 제어하는 단위 전류 당 최대 토크(MTPA, Maximum Torque Per Ampere) 제어 방식을 이용한다^[2-4]. 하지만 이 방식에서는 전동기의 철손을 전혀 고려하지 않기 때문에 전동기를 최대 효율로 구동하지 못한다.

철손은 일반적으로 동손에 비해 비중이 작을 뿐만 아니라 비선형적인 특성 때문에 모델화가 어려워 고려되지 않는 경우가 많았다. 하지만 최근 전동기의 효율적 구동에 대한 요구가 증가하면서 다양한 제어 기법이 제안되었다^[5-13]. 먼저 실험을 통해 미리 속도와 토크 조건에 따른 최적 전류 지령을 구하고 참조표(look up table)로 저장하여 지령을 생성하는 방식이 제안되었다^[5]. 하지만 이 과정에서 많은 시간이 소요되기 때문에 참조표 없이 입력 전력을 측정하여 순시적으로 최적 전류 쌍을 추종하는 방식이 연구되었다^[6]. 전력 측정 기반 방식의 경우 운전 조건에 따른 제정수의 변동에 관계없이 최소 손실로 운전할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 입력 전력 측정을 위한 추가적인 회로가 필요하기 때문에 구현상의 비용이 증가하며, 정상 상태에서 전류 지령이 수렴하지 못하고 진동하게 되는 한계가 있다. 이러한 한계를 극복하기 위한 방법으로 전동기의 손실 모델을 기반으로 최적의 전류 지령을 도출하는 방식이 제안되었다

Paper number: TKPE-2015-20-4-5

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

[†] Corresponding author: jungikha@snu.ac.kr, Dept. of Electrical and Computer Eng., Seoul National University, Electric Power Research Institute.

Tel: +82-2-880-1760 Fax: +82-2-878-1452

¹ Dept. of Electrical and Computer Eng., Seoul National University, Electric Power Research Institute.

Manuscript received Feb. 26, 2015; revised Mar. 28, 2015; accepted June 13, 2015

— 본 논문은 2014년 추계학술대회 외부장학금 수혜논문임

[7]-[13]. 일반적으로 전동기 등가회로에 병렬 연결된 등가 저항으로 철손을 모델화하는 방식이 널리 이용되었다 [7]-[9]. 이와 같이 등가 저항으로 모델화하는 방식뿐만 아니라 최근에는 철손을 전동기의 속도와 자속에 관한 함수로 표현하여 전동기 손실이 최소가 되는 해를 도출하는 방식도 제안되었다 [10]-[13].

본 논문은 철손을 모델화하는 방식과 이를 바탕으로 최적의 전류 지령을 생성하는 벡터제어 방법을 제안한다. 특히 철손 모델화 과정에서 전동기의 비선형적인 특성을 반영하기 위하여 전류 조건에 따른 인덕턴스의 포화를 고려한다. 본 논문은 손실 모델을 바탕으로 손실이 최소가 되는 d, q축 전류 지령의 관계식을 도출하여 주어진 속도와 토크 조건에서 최적의 전류 지령을 생성하는 제어기를 구현한다. 본 논문에서는 제안하는 방식의 성능을 검증하기 위해 실험을 수행하였고 기존 제어 방식과의 차이를 실험적으로 비교하였다.

2. 전동기 손실 분석

2.1 전동기 손실 모델

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

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

여기서 i_{ds} 와 i_{qs} 는 각각 d축과 q축 전류이고 R_s 는 고정자 저항이다. 동손은 단순히 전류의 제곱에 비례하는 성분이므로 R_s 를 정확히 추정할 수 있는 경우 동손의 크기를 예측할 수 있다.

철손(P_{fe})은 고정자 및 회전자 코어에서 발생하는 손실로써 다음과 같이 자속의 제곱에 비례하는 형태로 간단히 모델링할 수 있다 [12].

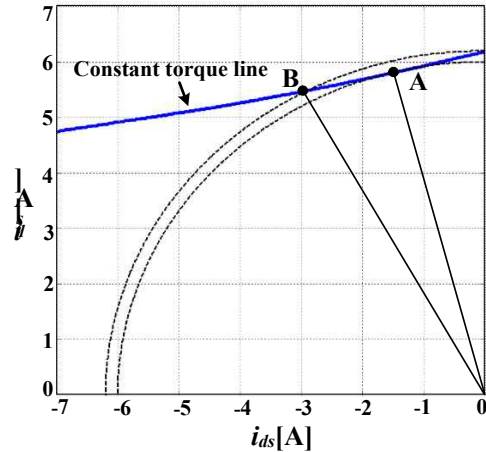
$$P_{fe} = c_{fe} \omega^3 \lambda^2 \quad (2)$$

여기서 ω 는 전기 각속도, λ 는 공극의 자속, c_{fe} 와 β 는 상수이다. 본 논문에서는 c_{fe} 와 β 를 철손 모델의 계수라고 정의한다. 전동기 총 손실(P_{total})은 다음과 같이 동손과 철손의 합으로 나타낼 수 있다.

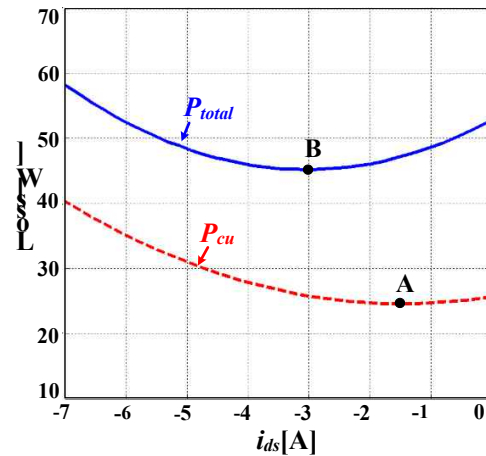
$$P_{total} = P_{cu} + P_{fe} \quad (3)$$

2.2 최소 손실 점

IPMSM에서 동일한 토크를 출력하는 d, q축 전류 쌍은 무수히 많이 존재한다. 그림 1(a)는 동일한 토크를 출력하는 d, q축 전류 쌍들의 예시를 나타낸다. 그림 1(b)는 그림 1(a)의 동일 토크 곡선 상에서 d축 전류를



(a) Constant torque line in d- and q- axis current plane



(b) Copper and total loss according to d-axis current

Fig. 1. Analysis of loss in constant torque line.

변화시킬 때 손실의 변화를 보여준다. 그림을 보면 동손의 크기는 전류 벡터의 크기가 가장 작아지는 점 A에서 최소가 되지만 철손을 포함한 총 손실은 점 B에서 최소가 된다. 점 B에서 동손의 크기가 증가하지만 d축 전류에 의한 자속 약화에 의해 철손이 더 크게 감소하기 때문이다. 이처럼 철손을 고려할 경우 동손을 최소화하는 전류에 비해 d축 전류를 더 주입해야 최소 손실로 전동기를 구동할 수 있다.

본 논문에서는 전동기 손실이 최소가 되는 점을 최소 손실 점이라고 정의한다. 최소 손실 점은 전동기 구동 속도나 토크 조건에 따라 변화할 뿐만 아니라 온도에도 영향을 받는다. 이는 온도 변화에 따라 전동기의 제정수가 비선형적으로 변화하기 때문이다. 본 논문에서는 온도에 의한 제정수의 변동을 무시하기 위하여 고정자 권선의 온도를 100°C로 일정하게 유지하였다.

그림 2는 실험을 통해 속도 및 토크 조건에 따라 최소 손실 점을 측정된 결과를 d, q축 평면상에 나타낸 것이다. 이를 동손을 최소화하는 MTPA 방식과 비교하기 위해 MTPA 곡선을 함께 표시하였다. 동손은 전동기 속

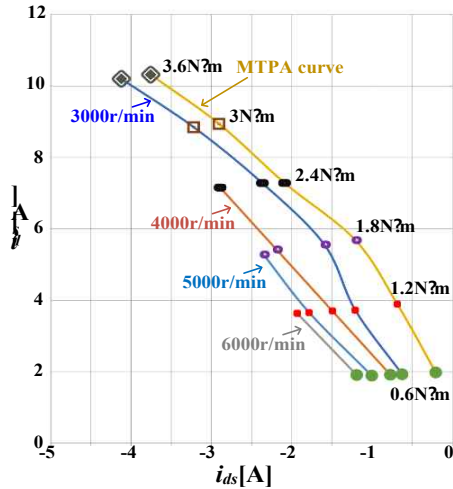


Fig. 2. Loss minimizing points and MTPA points for various speed and torque conditions.

도와 무관하기 때문에 MTPA 곡선은 전동기 속도에 관계없이 항상 일정하게 나타난다. 반면 최소 손실 점은 그림을 통해 확인할 수 있듯이 전동기 구동 속도에 따라 변한다. 결과를 보면 속도가 증가할수록 최소 손실 점의 d축 전류 성분이 증가하는데, 이는 전동기 구동 속도가 증가함에 따라 총 손실에서 철손이 차지하는 비율이 증가하기 때문이다.

3. 철손 모델의 계수 추정

(2)에서 철손 모델의 계수는 전동기마다 다르기 때문에 그 값을 추정해야한다. 본 논문에서는 손실 모델을 통해 얻은 최소 손실 점과 그림 2의 실험 결과와의 오차가 최소가 되도록 철손 모델의 계수를 조정하는 방식을 사용하였다.

(2)의 철손 모델은 다음과 같이 전류에 대한 함수로 표현할 수 있다.

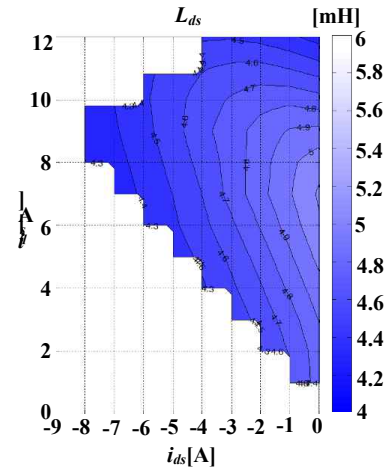
$$P_{fe} = c_{fe}\omega^\beta((\lambda_f + L_{ds}i_{ds})^2 + (L_{qs}i_{qs})^2) \quad (4)$$

여기서 L_{ds} 와 L_{qs} 는 각각 d축과 q축 고정자 인덕턴스이고 λ_f 는 영구자석에 의한 자속이다. (3)으로 나타나는 전동기 총 손실은 (1)과 (4)에 의해 다음과 같이 d, q축 전류에 의한 함수로 나타낼 수 있다.

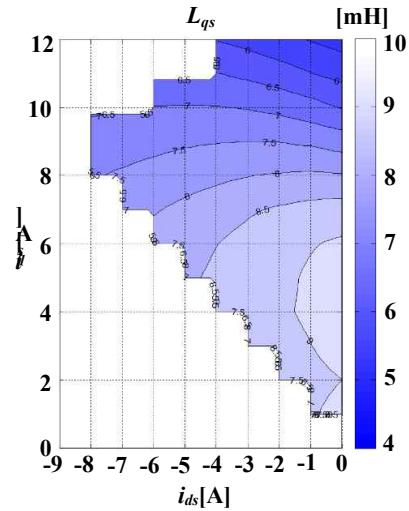
$$P_{total} = a_1 i_{ds}^2 + a_2 i_{qs}^2 + a_3 i_{ds} + a_4 \quad (5)$$

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

이 때 L_{ds} 와 L_{qs} 는 고정자에 흐르는 전류에 따라 비선형적으로 변화하기 때문에 손실의 분포를 정확하게 계



(a) d-axis inductance



(b) q-axis inductance

Fig. 3. Saturation of d- and q-axis inductances.

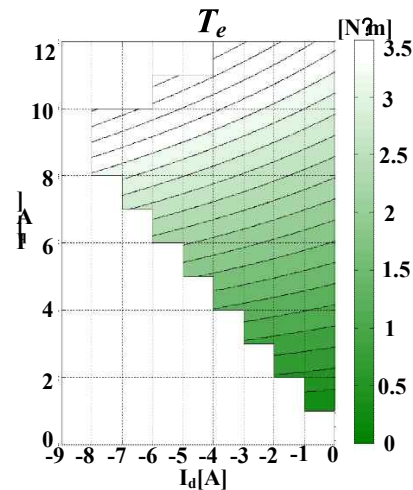


Fig. 4. Torque versus d- and q-axis current.

산하기 위해서는 고정자의 포화를 고려해야 한다. 대상 전동기의 인덕턴스를 전류 조건에 따라 측정한 결과는 그림 3과 같다. 그림 3(a)을 보면 d축 인덕턴스는 전류

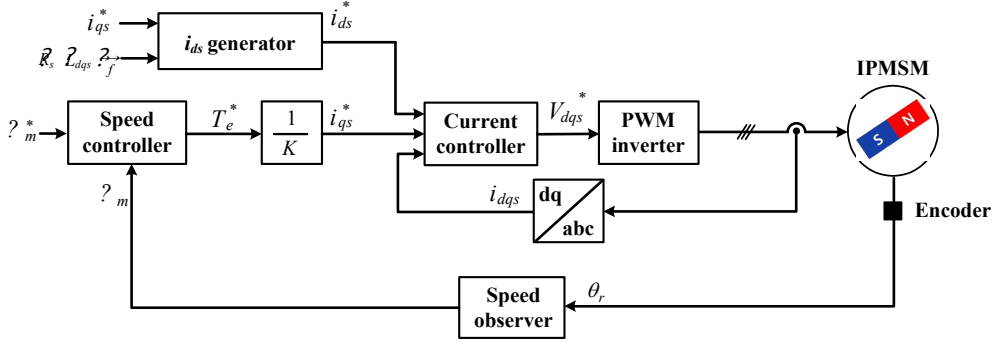


Fig. 5. Configuration of loss minimizing control block diagram for IPMSM.

에 따라 그 값이 크게 변하지 않는 것을 확인 할 수 있다. 그러나 그림 3(b)을 보면 전류에 따라 q축 인덕턴스의 값이 큰 폭으로 변동한다. 특히 q축 전류에 의한 포화뿐만 아니라 d축 전류에 의한 포화도 발생하는 것을 확인할 수 있다. 본 논문에서는 고정자 포화에 의한 인덕턴스 값의 변화를 (5)의 손실 계산에 반영하였다.

IPMSM의 토크 방정식은 다음 식과 같이 나타난다.

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} ((L_{ds} - L_{qs})i_{ds}i_{qs} + \lambda_f i_{qs}) \quad (6)$$

여기서 P는 전동기의 극수이다. (6)의 토크 식 및 그림 3의 인덕턴스 분포를 이용하면 d, q축 전류에 따른 토크의 분포를 그림 4와 같이 구할 수 있다. (6)에서 알 수 있듯이 그림 4의 토크 분포는 철손 모델의 계수와 관계없이 항상 일정하게 나타난다.

그림 2는 기준 속도 및 토크 조건에서 실험적으로 찾은 최소 손실 점 데이터이다. 철손 모델의 계수를 임의로 설정하면 그림 4의 토크 분포와 (5)의 손실 모델을 이용하여 그림 2의 기준 속도 및 토크 조건에서 최소 손실 점을 구할 수 있다. 모델을 통해 얻은 최소 손실 점과 실험 데이터의 오차는 철손 모델의 계수에 따라 달라지는데, 오차가 최소가 되도록 철손 모델의 계수를 선정하였다. 모델과 실험 데이터와의 오차를 분석하는 방식에는 여러 가지가 있지만 본 논문에서는 최소 자승법(Least square method)을 이용하여 기준 속도 및 토크 조건에서 최소 손실 점의 d축 전류 성분의 표준 편차가 최소가 되도록 철손 모델의 계수를 추정하였다. 그 결과 c_{fe} 는 0.008로 β 는 1.4로 결정하였다.

4. 최소 손실 제어기

그림 5는 최소 손실 제어 방식을 적용한 속도 제어 시스템의 블록도이다. 속도 제어기는 속도 지령과 실제 전동기 속도의 오차를 입력으로 받아 토크 지령을 출력한다. 토크 지령에 의해 생성된 d축과 q축 전류 지령은 전류 제어기에 입력되어 전압 지령을 출력한다. PWM

인버터는 전압 지령에 따라 전압을 합성하여 전동기를 일정한 속도로 구동한다.

전동기를 최소 손실로 구동하기 위해서는 속도 제어기에서 출력된 기준 토크에 대해 최적의 d, q축 전류 지령을 생성해야 한다. q축 전류는 속도 제어기의 출력인 기준 토크를 토크 상수 K로 나누어 제어한다고 할 때, 전동기의 손실을 최소화하는 d축 전류는 다음 식으로부터 구할 수 있다^[13].

$$\frac{dP_{total}}{di_{ds}} = 0 \quad (7)$$

(5)와 (7)을 만족하는 최적의 d축 전류는 다음과 같다.

$$i_{ds,opt} = -\frac{1}{a_1} (a_2 i_{qs} \frac{di_{qs}}{di_{ds}} + \frac{a_3}{2}) \quad (8)$$

또한 (6)에 의해 d축 전류에 따른 토크의 변화는 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\frac{dT_e}{di_{ds}} = \frac{3P}{4} (L_{ds} - L_{qs}) i_{qs} + \frac{di_{qs}}{di_{ds}} (\frac{3P}{4} (L_{ds} - L_{qs}) i_{ds} + \lambda_f) \quad (9)$$

전동기가 속도 제어되고 있는 경우 d축 전류가 변화하더라도 정상 상태에서 토크는 일정하게 유지된다. 따라서 동작 점이 빠르게 변화하지 않는 전동기의 경우 다음 식을 가정 할 수 있다.

$$\frac{dT_e}{di_{ds}} = 0 \quad (10)$$

$$\frac{di_{qs}}{di_{ds}} = \frac{(L_{qs} - L_{ds}) i_{qs}}{\lambda_f - (L_{qs} - L_{ds}) i_{ds}} \quad (11)$$

(8)과 (11)에 의해 최적의 d축 전류 지령은 q축 전류 지령에 대해 다음 식과 같이 표현된다.

TABLE I
PARAMETERS OF THE TEST MOTOR

Parameters	Values
Number of pole	6
Phase resistance	0.51 [Ω]
d-axis inductance	4.54 [mH]
q-axis inductance	7.66 [mH]
Rotor flux linkage	0.067 [V·s]
Rated speed	4000 [r/min]
Rated torque	4 [Nm]
Rated power	1.7 [kW]

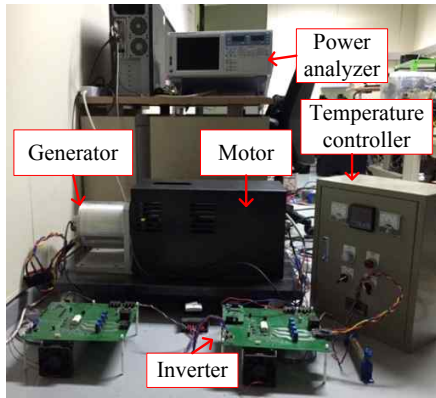


Fig. 6. Experimental setup.

$$i_{ds}^* = \frac{(2A - C)\lambda_f}{2A(L_{qs} - L_{ds})} - \sqrt{\left(\frac{C\lambda_f}{2A(L_{qs} - L_{ds})}\right)^2 + \frac{B}{A}i_{qs}^{*2}} \quad (12)$$

$$\begin{cases} A = \frac{3}{2}R_s + c_{fe}\omega^\beta L_{ds}^2 \\ B = \frac{3}{2}R_s + c_{fe}\omega^\beta L_{qs}^2 \\ C = c_{fe}\omega^\beta L_{ds}\lambda_f \end{cases}$$

즉, q축 전류 지령은 속도 제어기에 의해 제어되도록 하고 d축 전류 지령은 (12)의 관계식을 만족하도록 제어하면 전동기를 최소 손실로 제어하게 된다. 이때 최적의 d축 전류 계산에 필요한 d, q축 인덕턴스는 그림 3의 실험 결과를 참조표로 저장하여 사용한다.

5. 실험 결과

제안된 최소 손실 벡터제어 방법을 검증하기 위하여 표 1과 같은 제정수를 갖는 전동기에 대해 실험을 진행하였다. 그림 6은 실험을 위한 전체 시스템 구성을 나타낸다. 전동기의 손실과 효율을 측정하기 위하여 전동기의 입출력 전력을 전력 측정기를 통해 측정하였다. 이때

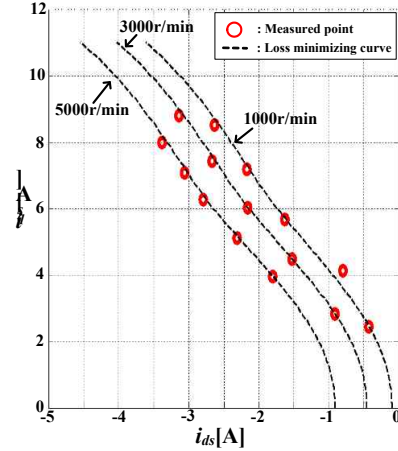


Fig. 7. Measured current according to speed and torque condition and loss minimizing curve.

전동기의 출력 전력은 속도 센서와 토크 센서를 전동기에 연결하여 측정하였다. 실험 과정에서 발생하는 온도 변화는 전동기의 제정수에 영향을 주므로 온도 변화를 최소화하기 위하여 온도 조절 장치와 챔버가 추가적으로 이용되었다. 실험 과정에서 온도는 고정자 권선을 기준으로 100°C 로 일정하게 유지하였다.

그림 7은 제안된 방식을 적용하였을 때 전동기 구동 조건에 따른 전류 동작 점을 측정하여 나타낸 것이다. 실험은 전동기 속도가 1000r/min, 3000r/min, 5000r/min 일 때 수행하였다. 이론적인 결과와의 일치 여부를 확인하기 위해 앞서 추정된 손실 모델을 통해 도출한 최소 손실 곡선을 함께 도시하였다. 그림은 속도 및 토크 조건에 따른 전류 동작 점이 최소 손실 곡선을 추종하는 것을 보여준다. 그림 8은 d축 전류를 0으로 제어하던 전동기에 최소 손실 벡터제어를 적용하였을 때 d, q축 전류의 파형을 나타낸다. 이를 통해 제안된 방법을 적용했을 때 전류가 정상상태에서 진동하지 않고 수렴하는 것을 확인할 수 있다.

본 논문에서는 제안하는 최소 손실 벡터제어 방법의 효율 개선 효과를 확인하기 위하여 기존의 벡터제어 방식과 비교하였다. 여기서 기존의 벡터제어 방식이란 $i_{ds} = 0$ 제어와 MTPA 제어를 의미한다. 실험은 정격 속도에서 진행하였으며 철손에 의한 영향을 두드러지게 확인할 수 있는 저 토크 영역에서 실험을 진행하였다. 그림 9는 속도 4000r/min, 토크 1.2Nm 조건에서 기존 방식과 제안하는 방식의 효율을 비교한 결과이다. 그림 9(a)는 $i_{ds} = 0$ 제어 방식과 비교한 결과로써 최소 손실 벡터제어를 적용했을 때 효율이 0.61% 증가하였다. 그림 9(b)는 동손을 최소화하는 MTPA 제어 방식과 비교한 결과를 나타낸 것이고 이 경우 효율은 0.21% 증가하였다. 실험 결과를 통해 철손을 포함하는 손실 모델을 이용하는 최소 손실 벡터제어 방법을 적용할 경우 기존의 제어 방식에 비해 효율이 개선되는 것을 확인할 수 있다.

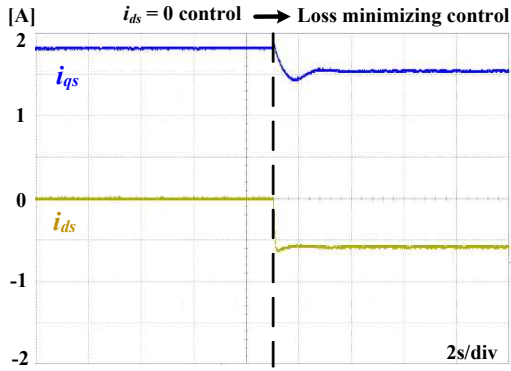


Fig. 8. Waveform of d- and q-axis current when loss minimizing control is applied.

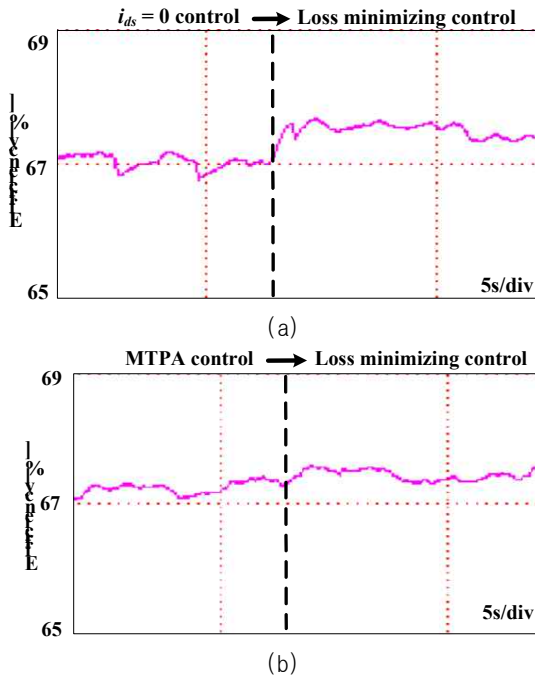


Fig. 9. Efficiency improvement by loss minimizing control comparing with (a) $i_{ds}=0$ control and (b) MTPA control.

6. 결 론

본 논문에서는 IPMSM 구동 효율 향상을 목적으로 손실 모델을 기반으로 한 벡터제어 방법을 제안하였다. 전동기 손실 모델에 철손을 포함하기 위하여 철손을 자속과 전동기 구동 속도에 대한 함수로 모델화하였고 철손 모델에서 전동기의 특성을 나타내는 계수는 대상 전동기의 손실을 측정된 실험 결과를 통해 추정하였다. 이때 전동기의 비선형적인 특성을 포함하기 위하여 전류 조건에 따른 고정자 인덕턴스의 포화현상을 손실 모델 계수 추정에 반영하였다. 전동기 손실 모델을 바탕으로 손실이 최소가 되는 d, q축 전류의 관계식을 유도하였으며 이를 적용하여 주어진 속도 및 토크 조건에 대해 최적의 전류 지령을 생성하는 제어기를 구현하였다. 제안

된 최소 손실 벡터제어 방법의 성능 및 효율성을 기존 벡터제어 방식과의 비교를 통해 실험적으로 입증하였다.

이 논문은 2015년도 두뇌한국21플러스사업에 의하여 지원되었음.

이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2009-0083495)

References

- [1] S. Morimoto, Y. Takeda, and T. Hirasu, "Current phase control methods for permanent magnet synchronous motors," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 5, pp. 133-138, Apr. 1990.
- [2] J. S. Ko, J. S. Choi, and D. H. Chung, "Maximum torque control of an IPMSM drive using an adaptive learning fuzzy-neural network," *Journal of Power Electronics*, Vol. 12, No. 3, pp. 468-476, May 2012.
- [3] S. M. Kim and S. K. Sul, "Maximum torque per ampere control of interior permanent magnet synchronous motor based on signal injection," *Transactions of Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 15, No. 2, pp. 142-149, Apr. 2010.
- [4] K. W. Lee, "Maximum torque per ampere operation point tracking control for permanent magnet synchronous motors," *Transactions of Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 12, No. 4, pp. 291-299, Aug. 2007.
- [5] J. Lee, K. Nam, S. Choi, and S. Kwon, "A lookup table based loss minimization control for FCEV permanent magnet synchronous motors," in *Proc. IEEE VPPC*, pp. 175-179, 2007.
- [6] S. Vaez, V. I. John, and M. A. Rahman, "An on-line loss minimization controller for interior permanent magnet motor drives," *IEEE Trans. Energy Convers.*, Vol. 14, No. 4, pp. 1435-1440, Dec. 1999.
- [7] S. Morimoto, Y. Tong, Y. Takeda, and T. Hirasu, "Loss minimization control of permanent magnet synchronous motor drives," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 41, No. 5, pp. 511-517, Oct. 1994.
- [8] F. F. Bernal, A. G. Cerrada, and R. Faure, "Model-based loss minimization for DC and AC vector-controlled motors including core saturation," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 36, No. 3, pp. 755-763, May/June 2000.
- [9] C. Cavallaro, A. O. D. Tommaso, R. Miceli, A. Raciti, G. R. Galluzzo, and M. Trapanese, "Efficiency enhancement of permanent-magnet synchronous motor drives by online loss minimization approaches," *IEEE*

Trans. Ind. Electron., Vol. 51, No. 4, pp. 1153-1160, Aug. 2005.

- [10] Y. S. Jeong, S. K. Sul, S. Hiti, and K. M. Rahman, "Online minimum copper-loss control of an interior permanent-magnet synchronous machine for automotive applications," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 42, No. 5, pp. 1222-1229, Sep/Oct. 2006.
- [11] C. Mademlis and N. Margaris, "Loss minimization in vector-controlled interior permanent-magnet synchronous motor drives," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 49, No. 6, pp. 1344-1347, Dec. 2002.
- [12] J. Lee, K. Nam, S. Choi, and S. Kwon, "Loss-minimizing control of PMSM with the use of polynomial approximations," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 24, No. 4, pp. 1071-1082, Apr. 2009.
- [13] C. Mademlis, I. Kioskeridis, and N. Margaris, "Optimal efficiency control strategy for interior permanent-magnet synchronous motor drives," *IEEE Trans. Energy Conv.*, Vol. 19, No. 4, pp. 715-723, Dec. 2004.



정의훈(鄭義勳)

1991년 8월 23일생. 2014년 서울대 전기공학부 졸업. 2014년~현재 동 대학원 전기·정보공학부 석·박사 통합과정.



이용재(李鎔在)

1988년 12월 3일생. 2011년 서울대 전기공학부 졸업. 2013년 동 대학원 전기·정보공학부 졸업(석사). 2013년~현재 동 대학원 전기·정보공학부 박사과정.



하정익(河廷穰)

1971년 4월 28일생. 1995년 서울대 전기공학과 졸업. 1997년 동 대학원 졸업(석사). 2001년 동 대학원 졸업(공학박사). 2001년~2002년 일본 Yaskawa전기 연구원. 2003년~2009년 (주)삼성전자 생산기술연구소 책임/수석연구원. 2009년~2010년 (주)LS메카피온 기술총괄이사(CTO). 2010년~현재 서울대 전기·정보공학부 부교수. 당 학회 JPE편집위원.