

영구자석 동기 전동기의 온도 변동을 고려한 인공 신경망 기반 MTPA 제어

이준혁¹⁾, 우태겸¹⁾, 이운재¹⁾, 윤영두²⁾

한양대학교 미래자동차공학과(미래자동차-SW융합전공)¹⁾, 한양대학교 미래자동차공학과²⁾

Neural Network-based MTPA Control Considering Temperature Variation in IPMSMs

Jun-Heok Lee¹⁾, Tea-Gyeom Woo¹⁾, Yun-Jae Lee¹⁾, Young-Doo Yoon²⁾

Department of Automotive Engineering (Automotive-Computer Convergence)¹⁾

Department of Automotive Engineering, Hanyang University²⁾

ABSTRACT

본 논문에서는 인공 신경망(ANN)을 활용하여 온도 변동을 고려한 영구자석 동기전동기(IPMSM)의 단위전류당 최대 토크 (MTPA) 제어 알고리즘을 제안한다. 회전자 내부에 위치한 영구자석의 자속은 온도가 상승함에 따라 그 크기가 감소하게 된다. 또한 동일한 온도에서 d-q 축 자속은 자속 포화 현상에 의해 전류 운전점 마다 다르게 변동하게 된다. 제안된 방법은 주파수 적응형 자속 관측기(FAO)를 사용해 현재 온도에서 d 축 자속을 추정하고, 인공 신경망을 이용하여 온도 상승에 따른 운전점 별 d 축 자속 변동을 고려해 MTPA 운전점을 조정하는 것이다. 이때 인공 신경망을 이용하여 d 축 자속의 변동과 MTPA 운전점 변동 사이의 비선형 관계를 표현할 수 있다. 제안된 알고리즘은 11kW IPMSM을 이용한 실험을 통해 검증하였다.

1. 서 론

매입형 영구자석 동기 전동기는 높은 효율과 토크 및 출력 밀도를 가지기 때문에 전기 자동차 산업과 항공우주와 같은 여러 산업 분야에서 널리 사용되고 있다. 매입형 영구자석 동기 전동기는 영구자석 토크 성분만 아니라 릴럭턴스 토크 성분이 존재한다. MTPA 운전을 위한 d-q 축 전류 지령을 실시간으로 구하기 위해 수치해석법을 사용할 수 있다. 실시간 수치해석의 계산 부담을 고려하여 미리 결정된 참조표(LUT)를 주로 사용한다.

매입형 영구자석 동기 전동기 내의 영구자석은 온도가 증가함에 따라 잔류 자속 밀도가 감소하므로, 영구자석 토크는 자석 온도 변화에 직접적인 영향을 받는다. 이러한 문제에 대응하기 위해, 온도를 고려한 3-차원의 운전 참조표(속도, 토크지령, 온도)를 사용해야 하며, 회전자 내부에 위치한 영구자석의 온도를 알아야 한다. 그러나, 영구자석의 온도를 직접 측정하는 것은 고비용 및 측정 장치의 신뢰성 문제로 인해 일반적으로 실현이 어렵다. 다른 접근방법으로, 열 모델을 활용한 영구 자석 온도의 추정 방법^[1]과 실시간 자속 및 동적 인덕턴스 추정을 통해 이중 루프 제어를 이용하여 MTPA 운전점을 결정^[2]하는 다양한 알고리즘이 제안되었다.

본 논문에서는 인공 신경망을 사용해 영구자석 동기 전동기의 온도 변동을 고려해 MTPA 전류 운전점을 조정하는 알고리즘을 제안한다. 실험을 통해 11kW IPMSM의 온도에 따른 d-q 축 자속을 측정하고, 온도에 따른 MTPA 및 등토크 곡선을 파악하였다. 온도 변동을 자속 변동으로 파악하기 위하여 주파수 적응형 자속 관측기(FAO)^[3]를 사용하였고, 온도와 MTPA 전류 운전점의 비선형성을 표현하기 위해 인공 신경망을 사용하였다. 두 기법을 활용하여 온도 변화에 따른 MTPA 전류 운전점을 조정하였다.

2. 본 론

2.1 IPMSM의 온도 변동에 의한 MTPA 운전점 변화

D-q축 동기 좌표계에서의 IPMSM의 토크 방정식은 (1)과 같다.

$$T_e = \frac{3}{2}p(\lambda_d^r i_q^r - \lambda_q^r i_d^r) = \frac{3}{2}p\{\lambda_f i_q^r + (L_d - L_q)i_d^r i_q^r\} \quad (1)$$

여기서 T_e 는 전자기 토크(Nm)이며 p 는 IPMSM의 극 쌍수이다. 온도 상승 시, 영구자석의 잔류 자속 밀도는 감소하게 되며, 이는 d-q 축 자속의 크기 변화를 초래한다. 결과적으로, 동일한 전류 운전점에서 발생하는 토크는 온도에 따라 달라지게 된다.

온도 변화에 따른 d-q 축 자속의 변동이 토크 생성에 미치는 영향을 확인하기 위해 11kW IPMSM를 대상으로 온도별 d-q 축 자속을 실험을 통해 추정하였다. 해당 전동기의 주요 제정수는 표 1이다.

표 1. 11kW IPMSM 공칭 매개 변수

내용	값 [단위]
정격 용량	11 [kW]
정격 속도	1750 [r/min]
극 쌍수	3
정격 전압	184 [V_{rms}]
정격 전류	39.5 [A_{rms}]
영구자석의 자속	0.2625 [$V \cdot s$]
고정자 저항	0.1398 [Ω]

그림 1은 온도를 포화시킨 상태에서 모터의 외함 온도 기준 20도와 65도에서 실험을 통해 취득한 d-q 축

자속 데이터의 변동분을 나타낸다.

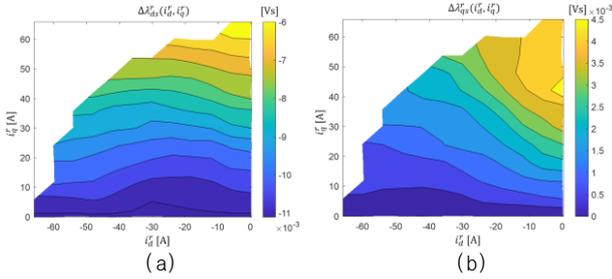


그림 1. d-q 축 자속의 변동분 (a) d 축; (b) q 축

이때 d-q 축 자속의 변동분은 (2)와 같이 표현된다.

$$\Delta\lambda_{dq} = \lambda_{dq,65} - \lambda_{dq,20} \quad (2)$$

여기서 $\lambda_{dq,65}$ 는 65도에서 추정된 자속이며, $\lambda_{dq,20}$ 은 20도에서 추정된 자속이다. d 축 자속은 온도 상승에 따라 쇄교 자속의 크기가 감소하는 경향을 보였으며, 반대로 q 축 자속은 온도가 상승함에 따라 쇄교 자속의 크기가 증가하는 경향을 나타냈다. 자속 포화로 인해 d-q 축 쇄교 자속의 변동분이 운전점마다 다르게 나타나는 것을 알 수 있다.

그림 2는 실험을 통해 취득한 자속 데이터를 통해 나타낸 MTPA 곡선과 등토크 곡선이다. 이 중 검은색 실선은 20도에서 추정된 자속을 통해 계산한 등토크 곡선이며, 빨간색 실선은 모터의 온도가 65도일 때 추정된 자속을 통해 계산한 등토크 곡선이다.

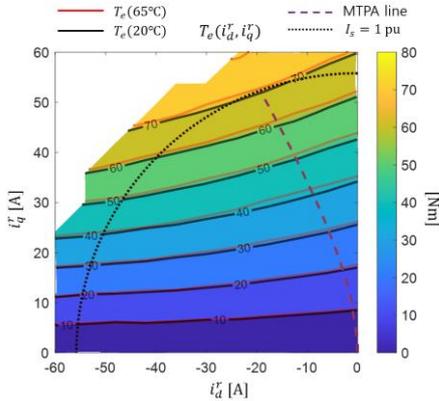


그림 2. MTPA 곡선과 등토크 곡선

대상 전동기는 릴럭턴스 토크의 크기가 영구자석 토크에 비해 작아서 MTPA 곡선은 온도 변화에 따라 크게 변화하지 않는다. 하지만 MTPA 라인 위에서 나타나는 운전점 별 토크 크기와 등토크 곡선은 온도가 증가함에 따라 변화하는 것을 볼 수 있다. 따라서 온도를 고려하지 않은 MTPA 참조표를 사용해 제어를 진행시 토크 지령을 만족하지 못하는 전류 지령을 발생시키게 된다.

1.2 제안하는 알고리즘

실시간으로 영구자석의 자속을 추정해 온도 계수를 사용하면, 영구자석의 온도를 추정할 수 있다. 하지만 영구자석 자속 추정을 위해 모델 기반 관측기를

사용하는 경우, 고정자 저항과 d-q 축 인덕턴스 등 제정수의 오차에 영향을 받아 추정 성능이 저하될 수 있다. 이에 반해 d-q 축 자속은 전압의 적분 관계로 나타나므로 d-q 축 자속을 추정하는 것이 영구자석의 자속을 추정하는 것에 비해 제정수 오차에 강인하다. 온도에 따라 감소하는 영구자석의 자속은 d 축 자속의 감소로 나타나므로, 실시간으로 주파수 적응형 자속 관측기(FAO)^[3]를 사용해 현재 상태의 d 축 자속을 실시간으로 추정하면 온도 변화에 따른 영구자석의 감소를 간접적으로 알 수 있다.

동일한 온도 조건에서도 d 축 자속은 자속 포화 현상으로 인하여 운전점에 따라 다양하게 변화하는 비선형적 특성을 지닌다. 이러한 비선형적 특성을 고려하기 위해 인공 신경망을 사용하였다. 인공 신경망은 입력과 출력 사이의 복잡한 비선형 관계를 모델링할 수 있다. 따라서, 각각의 전류 운전점에서 관찰되는 d 축 자속의 변화와 해당 변화가 MTPA 운전점의 이동에 미치는 영향을 인공 신경망의 가중치, 편향, 활성화 함수를 통해 표현할 수 있다. 그림 3은 제안된 알고리즘의 블록 선도이다.

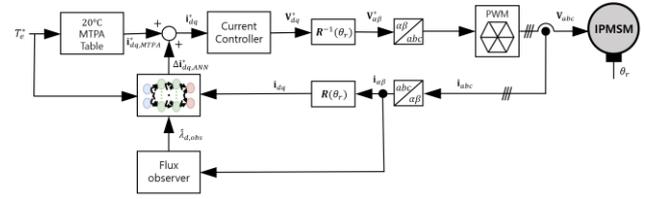


그림 3. 제안하는 알고리즘의 블록 선도

제어의 안정성을 확보하기 위해 20도에서 취득한 자속 데이터를 기반으로 제작된 MTPA 참조표에서 발생한 전류 지령과 인공 신경망 출력으로 온도에 의해 변동한 MTPA 운전점을 조정해주는 d-q 축 전류를 더해준 최중 전류 지령으로 사용하였다. 따라서 자속 포화와 온도 변화에 따른 영구자석의 변동을 고려하기 위해 인공 신경망의 입력으로 d-q 축 전류(i_{dq}), 해당 운전점에서 추정된 d 축 자속($\lambda_{d,obs}$)을 사용하였다. 또한 MTPA 운전을 위해 토크 지령(T_e^*)을 입력으로 사용하였다. 이때 ANN모델의 출력은 기존 20도 MTPA 참조표의 전류 지령을 조정하는 d-q 축 전류($\Delta i_{dq,DNN}^*$)이다.

인공 신경망 구조는 두 개의 레이어로 구성되었으며, 첫 번째 레이어에는 8개의 노드, 두 번째 레이어에는 4개의 노드가 배치되었다. 레이어와 노드가 많을수록 복잡한 비선형 상관관계를 나타내기 유리하지만 연산량이 크게 증가하게 되어 모터 드라이브 시스템에 적용하기 힘들다. 따라서 연산시간과 오차를 고려해 8x4 모델을 선정하였다. 활성화 함수로는 ReLu(Rectified Linear Unit)가 적용되었다. 최적화 기법으로는 Adam(Adaptive Moment Estimation) 알고리즘이 사용되었고, 손실 함수로는 MSE(Mean Squared Error)를 사용하여 총 1000회의 학습이 수행되었다. 학습 후 최종 MSE 오차는 0.05이다.

3. 실험 결과

실험에서 사용된 제어보드는 TMS320F28377이고, 11kW IPMSM에 대해서 검증했다. ANN 모델 그리고 ANN 연산 모두 DSP 내부에 구현하였다. System Clock은 200 MHz이다. 설정된 테스트 조건은 다음과 같다. 부하 전동기가 0.5 p.u의 속도로 속도 제어를 하는 동안, 테스트 모터는 1 p.u의 토크를 발생시키는 MTPA 운전을 수행하였다. 해당 M-G 세트에 토크 센서가 장착되어 있지 않기 때문에, 토크는 부하 전동기의 속도 제어기 출력인 토크 명령을 사용하였다.

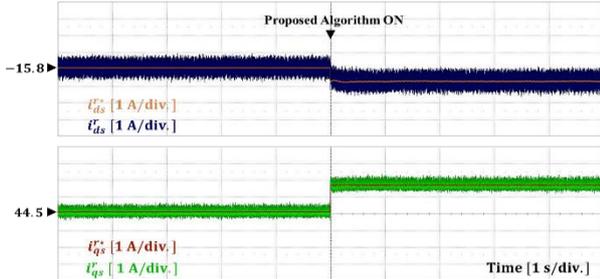


그림 4. 제안하는 알고리즘을 적용한 d-q축 전류 파형; 65도

그림 4는 65도일 때 제안된 알고리즘에 따라 조정된 d-q 축 전류의 파형을 나타낸다. 토크 지령은 60 Nm로 설정하였다. 기존 20도 MTPA 참조표만을 사용하여 제어하였을 때 d 축 전류 지령은 -15.8 A, q 축은 44.5 A가 출력되었다. 이때 제안된 알고리즘을 사용함으로써, 온도 변화를 고려하여 MTPA 운전점을 조정하는 d-q 축 전류가 기존 20도 MTPA 참조표의 전류 지령과 더해져 최종 지령 전류가 발생하는 것을 볼 수 있다.

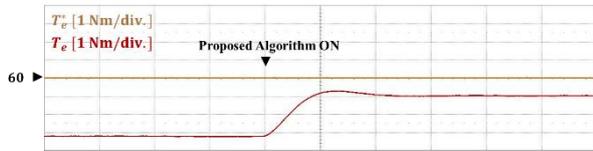


그림 5. 제안하는 알고리즘을 적용한 토크 파형; 65도

그림 5는 계산한 토크와 토크 지령에 대한 파형이다. MTPA 참조표에 따라 운전을 수행했을 경우, 온도 변화에 의해 변경된 자속으로 인해 지령 토크와 실제 토크 사이에 오차가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 제안된 알고리즘을 적용했을 때, 기존 20도 참조표만을 사용한 제어에 비해 토크 오차가 약 3 Nm에서 1 Nm로 감소하였다. 토크가 속도제어기 출력이므로 실제 토크 오차는 더 작을 것이라 추정할 수 있다.

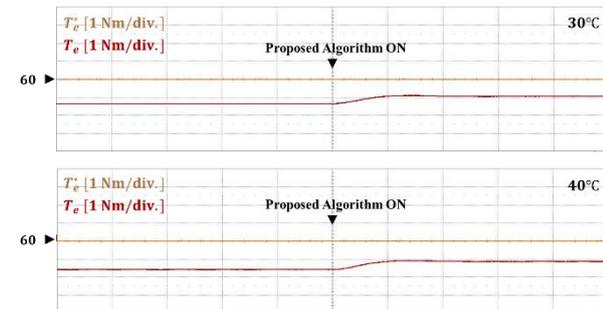


그림 6. 제안하는 알고리즘을 적용한 토크 파형; 30도, 40도

그림 6은 20도와 65도 사이의 온도에서 제안한 알고리즘을 적용한 토크 파형이다. 학습 데이터가 없는 영역이지만 입출력간 상관관계의 경향성을 학습하는 ANN 특성에 따라 20도와 65도 사이의 경향에 대해 학습이 진행되어, 데이터가 없는 영역 또한 기존 MTPA 참조표를 사용했을 때보다 토크 오차가 감소한 것을 확인할 수 있다. 이때 인공 신경망 모델(8x4)의 연산 시간은 약 21 us가 소요되었다.

3. 결론

본 논문에서는 온도 변동에 따른 쇄교 자속 변화를 고려하여, IPMSM의 MTPA 운전점 조정을 위한 인공 신경망 기반 알고리즘을 제안하였다. 11kW IPMSM의 온도 변화에 따른 자속 데이터를 실험적으로 추정하고, 이를 바탕으로 MTPA 참조표를 구성하였다 또한, d 축 자속의 변화에 대응하여 MTPA 운전점을 조정하는 인공 신경망 모델을 개발하였다. 실험 결과, 온도를 고려하지 않고, 기존 MTPA 참조표만을 사용하여 제어 시 온도 상승에 따른 토크 지령과 실제 토크 사이의 오차가 발생함을 확인하였다. 제안된 알고리즘을 통해 온도를 고려하여 MTPA 운전점을 조정함으로써, 토크 지령과 실제 토크가 일치하는 것을 검증하였다.

이 논문은 본 연구는 산업통상자원부 소재부품기술개발사업 '자동차 제조장비용 전류응답 6.2kHz급 및 전원회생 서보시스템 기술개발(No. 20017351)'으로 수행된 연구임

참고 문헌

- [1] C. Kral, A. Haumer and S. B. Lee, "A Practical Thermal Model for the Estimation of Permanent Magnet and Stator Winding Temperatures," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 29, no. 1, pp. 455-464, Jan. 2014, doi: 10.1109/TPEL.2013.2253128.
- [2] A H. -S. Kim, J. Yoo and S. -K. Sul, "Online MTPA Operation of IPMSM Based on Dual-Loop Control in Polar Coordinates," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 37, no. 4, pp. 4431-4441, April 2022, doi: 10.1109/TPEL.2021.3120405.
- [3] Y. Park, H. -S. Kim and S. -K. Sul, "Frequency-Adaptive Observer to Extract AC-Coupled Signals for Grid Synchronization," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 53, no. 1, pp. 273-282, Jan.-Feb. 2017, doi: 10.1109/TIA.2016.2604299.