

자속 변동을 고려한 IPMSM의 모델링

양두영⁽¹⁾, 최현우⁽²⁾, 목형수⁽²⁾, 이주석⁽³⁾, 이진우⁽⁴⁾

⁽¹⁾서울대학교 제어계측신기술연구센터, ⁽²⁾건국대학교 전기공학과, ⁽³⁾경기과학기술대학교 공조기계과, ⁽⁴⁾두원공과대학교 전기과

Modeling of IPMSM considering flux variation

Dooyoung Yang⁽¹⁾, Hyunwoo Choi⁽²⁾, Hyungsoo Mok⁽²⁾, Jusuk Lee⁽³⁾, Jinwoo Lee⁽⁴⁾

⁽¹⁾Research Center for Advanced Control and Instrumentation, ⁽²⁾Konkuk University, ⁽³⁾Gyeonggi College of Science and Technology, ⁽⁴⁾Doowon Technical University College

ABSTRACT

IPMSM의 자속은 전류의 크기와 상호간섭 성분에 의해 변하는 비선형성을 가지고 있다. 이런 비선형성 때문에 정확한 토크 제어가 불가능 하다. 이것은 토크 값을 발생하기 위한 정확한 전류의 값을 계산하기가 불가능 하다. 그래서 현재 토크제어가 적용되는 모터에서는 Table을 만들어서 사용한다. 하지만 Table을 만들기 위해서는 실험 장비와 많은 실험을 진행해야 하는 문제가 있다. 본 논문에서는 IPMSM의 자속 모델을 비선형으로 만들어 비선형성이 고려된 토크 식을 제안한다.

1. 서론

최근 국제 유가 급등 및 환경오염에 대한 관심이 증대로 인하여 승용차에 요구되는 배기 기준 및 연비 기준의 수준이 높아지고 있어서 친환경 자동차의 도입을 통하여 유해 배출가스저감에 만족시킬 수 있는 친환경 미래형 자동차가 주목을 받고 있다.

친환경 자동차용 전동기로는 효율이 높고 넓은 가변속 운전이 가능한 영구 자석 매입형 동기전동기가 주로 적용되고 있다. 매입형 영구자석 동기 전동기는 회전자에 자속의 발생을 위한 여자 권선이 없으므로, 이로 인한 손실이 없어 효율이 좋으며, 고회전 밀도를 가지고 있어 전동기 무게에 대한 출력 토크의 비가 크고, 속응성이 좋다. 이러한 특성 때문에 순시 토크 제어가 요구 되는 고성능 전동기 제어분야에 이용되고 있다.

친환경 자동차에서 사용되는 매입형 영구자석 전동기에서는 토크제어가 필수적이다. 토크 제어에 사용되는 단위전류 당 최대토크를 발생하기 위해서는 영구자석에 의한 마그네틱 토크와 릴럭턴스 차이에 의한 릴럭턴스 토크의 비율을 부하에 따라 적절히 조절해야 한다. 하지만 토크에 영향이 있는 인덕턴스의 값이 전동기의 온도와 인가되는 전류가 증가 하면서 고정자 및 회전자 철심의 포화에 의하여 감소하게 된다. 따라서 전동기에 인가되는 전류의 변화에 따라 단위 전류 당 최대토크 운전점이 변하게 된다. 이러한 문제로 인하여 현재 토크제어에 사용되는 최대토크 운전 점의 전류 값은 수식을 통하여 구하는데 어려움이 있어서 Table을 사용하고 있다.

하지만 Table 방식은 실험 장비와 많은 실험이 진행해야 하는 단점이 있어, 이 문제를 해결하기 위해 전류에 따른 자속의 변화를 고려한 비선형 식을 제안하고자 한다.

본 논문에서는 영구 자석 동기 전동기의 자속 변동을 고려한 비선형 토크식을 적용하여 모의 해석과 실험을 통하여 검증하였다.

2. 비선형 모델을 이용한 토크 식

2.1 매입형 영구자석 동기 전동기의 비간섭 자속 모델
d-q축 쇄교자속의 간섭부분이 고려되지 않은 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\lambda_d = L_d i_d + \lambda_m \quad (1)$$

$$\lambda_q = L_q i_q \quad (2)$$

여기서 L_d 는 d축 인덕턴스, L_q 는 q축 인덕턴스이고, λ_m 은 자석에 의한 자속 값이다.

이상적으로는 d-q 축의 인덕턴스의 값은 일정한 값이다. 그러나 모터의 자속 포화가 이뤄 졌을 때는 이를 충족시키지 못한다. 식 (1), (2)를 이용하여 토크 식을 쓰면 다음이 된다.

$$T_e = \frac{P}{2} (\lambda_d i_q - \lambda_q i_d) \quad (3)$$

식 (3)에 식 (1), (2)를 대입하면 다음과 같이 표현된다.

$$T_e = \frac{P}{2} (\lambda_m i_q + (L_d - L_q) i_d i_q) \quad (4)$$

식 (4)에서 첫 번째 항은 자석에 의한 전기적인 토크고, 두 번째 항은 릴럭턴스 토크에 대한 항이다.

또한 여기서 자속을 전류에 대한 함수로 쓰면 식 (5)과 같아진다.

$$\lambda_d = f(i_d), \lambda_q = f(i_q) \quad (5)$$

식 (5)에서 λ_d 는 i_d 전류에, λ_q 는 i_q 전류에 의한 식으로 표현이 되는데, 이것은 실제 모터의 자속 포화나 전류에 따른 인덕턴스의 변화로 인해 만족하지 못하는 식이다.

2.2 쇄교자속의 변화 분석 및 수식^[1,2]

식 (5)와 다르게 실제 모델은 d-q축 자속의 값이 서로간의 상호 간섭이 있는 것을 알 수 있다.^[1,2]

이를 고려한 식으로 다시 쓰면 식 (6), (7)와 같아진다.

$$\lambda_d = L_d i_d + \lambda_m + L_{dq} i_q \quad (6)$$

$$\lambda_q = L_q i_q + L_{qd} i_d \quad (7)$$

여기서 L_{dq} 는 q축 전류에 의한 d축 자속의 상호 간섭 인덕턴스, L_{qd} 는 d축 전류에 의한 q축 자속의 상호 간섭

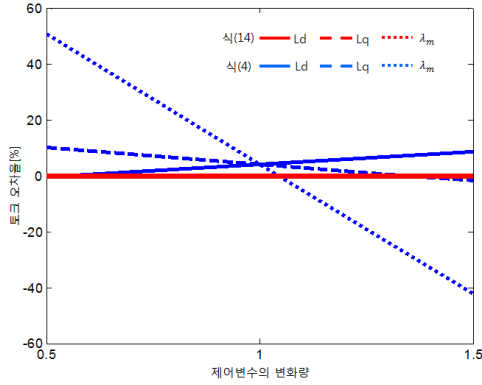


그림 1 모의해석 결과(제어변수 변화량에 따른 토크 오차율)

인덕턴스이다. 파라미터의 변동을 고려하여 식을 다시 쓰면,

$$\lambda_d = (\Delta L_d + L_{d0})i_d + (\Delta\lambda_m + \lambda_{m0}) + (\Delta L_{dq} + L_{dq0})i_q \quad (8)$$

$$\lambda_q = (\Delta L_q + L_{q0})i_q + (\Delta L_{qd} + L_{qd0})i_d \quad (9)$$

식 (8), (9)에서 ΔL_d 는 d축 인덕턴스의 변화량, ΔL_q 는 q축 인덕턴스의 변화량, $\Delta\lambda_m$ 은 자속의 변화량, ΔL_{dq} 는 q축 전류에 의한 상호 간섭 인덕턴스의 변화량, ΔL_{qd} 는 d축 전류에 의한 상호 간섭 인덕턴스의 변화량이고, L_{d0} , L_{q0} , L_{m0} , L_{dq0} , L_{qd0} 는 고유 값이다.

여기서 변화량에 대한 값을 상호 간섭성분 항에 넣어서 같이 정리를 하면 다음 식이 된다.

$$\lambda_d = L_{d0}i_d + \lambda_{m0} + L_{\varepsilon d}(\cdot)i_q \quad (10)$$

$$\lambda_q = L_{q0}i_q + L_{\varepsilon q}(\cdot)i_d \quad (11)$$

식 (10), (11)에서 $L_{\varepsilon d}(\cdot)$, $L_{\varepsilon q}(\cdot)$ 는 전류에 대한 함수이며, 이후 계산의 단순화 때문에 각 자속의 다른 축으로 정리를 하였다.

$$L_{\varepsilon d}(\cdot) = f(i_d, i_q) \quad (12)$$

$$L_{\varepsilon q}(\cdot) = f(i_d, i_q) \quad (13)$$

이후 $L_{\varepsilon d}(\cdot)$, $L_{\varepsilon q}(\cdot)$ 는 $L_{\varepsilon d}$, $L_{\varepsilon q}$ 로 표현한다. 식 (3)에 식 (12), (13)을 넣어 토크 식으로 다시 정리하면 식 (14)이 된다.

$$T_e = \frac{P}{2} \frac{3}{2} (\lambda_{m0}i_q + (L_{d0} - L_{q0})i_d i_q - L_{\varepsilon q}i_d^2 + L_{\varepsilon d}i_q^2) \quad (14)$$

식 (14)에서 3,4번째 항인 상호 간섭과 인덕턴스의 변화를 고려한 토크식이 추가 된 것을 확인할 수 있다.

2. 모의해석 및 실험결과

표 1 실험 및 모의해석 전동기 파라미터

V_{dc}	135V	R	12.8mΩ
I_{max}	250A	L_{d0}	0.220mH
Pole Number	16	L_{q0}	0.280mH
MAX Speed	4500rpm	λ_{pm0}	44.2mVsec/rad

3.1 모의해석

실제 토크와 제안한 식 (14)의 정확도를 보기 위해 식 (4)와 비교 하여 모의해석을 실시하였다. 모의해석 및

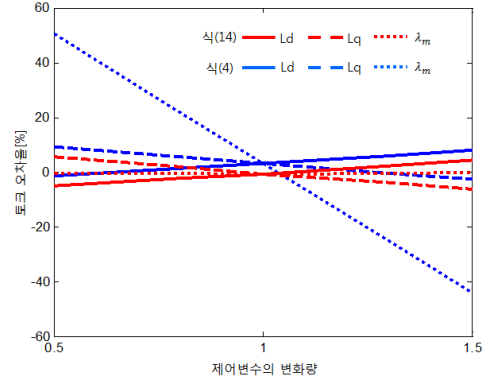


그림 2 실험 결과(제어변수 변화량에 따른 토크 오차율)

실험에 사용된 전동기의 제정수는 표 1과 같으며, 그림 1 은 제정수 오차에 따른 토크 오차율을 나타낸다.

3.2 실험결과

그림 2의 결과에서 \hat{L}_{d0} , \hat{L}_{q0} 오차가 있는 경우 토크 오차율의 목표 값인 $\pm 5\%$ 이내의 값을 식 (4)는 만족하지 못했지만, 제안한 식 (14)는 만족하는 것을 확인하였다. 또한 λ_{m0} 에 대한 오차가 식 (4)에서는 최대 50.3%의 토크 오차가 나타났지만, 식 (14)의 값은 오차가 최대 0.66%로 식 (4)에 비해 매우 정확한 것을 확인하였다.

4. 결론

본 논문에서는 매입형 영구 자석 동기 전동기의 토크 계산을 정확도를 향상시키기 위해 상호 간섭과 인덕턴스의 변동을 고려한 자속식을 제안하였다. 제안한 식은 일반적으로 알고 있는 L_{d0} , L_{q0} , L_{m0} 의 값에 변동이 있어도 식(4)에 비해 토크의 오차율이 감소하는 것을 모의해석과 실험을 통하여 증명하였으며, 모의해석에서는 토크의 오차율이 0.08%로 정확하였으며, 실험에서는 목표 값인 $\pm 5\%$ 안에 들어오는 것을 확인하였다. 실험과 모의해석에서 사용한 $\hat{L}_{\varepsilon d}$, $\hat{L}_{\varepsilon q}$ 을 구하는 방법은 추후 논문으로 발표할 예정이다.

참고 문헌

- [1] Junnosuke Nakatsugawa, Norihisa Iwasaki, "Proposal of Mathematical Models taking into Consideration Magnetic Saturation and Cross-Coupling Effects in Permanent Magnet Synchronous Motor", The Institute of Electrical Engineers of Japan. 2010. pp1212-1220
- [2] Katsumi Yamazaki, Masaki Kumagai, Takashi Fukuoka, "Parameter Determination and Torque Investigation of Interior Permanent Magnet Motors Considering dq-Axis Interference Caused by Magnetic Saturation", IEEJ Transactions on Industry Applications, Vol.133 NO.7 pp747-755, 2013