

영구자석 동기전동기의 자속 포화 현상을 고려한 자속 포화 모델 및 자기식별 방법

우태겸¹⁾, 김병호¹⁾, 박지원¹⁾, 윤영두²⁾

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

Magnetic flux saturation model and self-identification method considering flux saturation of permanent magnet synchronous motor

Tae-gyeom Woo¹⁾ Byeong-ho Kim¹⁾ Ji-won Park¹⁾ Young-Doo Yoon²⁾

Department of Automotive Engineering(Automotive-Computer Convergence), Hanyang University¹⁾
Department of Automotive Engineering), Hanyang University²⁾

ABSTRACT

본 논문은 영구자석 동기 전동기의 자속 포화 현상과 시스템을 고려한 자속 포화 모델 및 추정 방법을 설명한다. 자속 포화 정보는 d-q 축 전압을 각각 또는 동시에 주입하여 얻는다. D 축 전압만 주입한 경우에는 d 축 자기 포화에 대한 정보를 얻을 수 있지만, q 축 전압만 주입한 경우 d 축에 존재하는 영구자석의 자속때문에 q 축 자기 포화와 상호 포화 효과가 동시에 나타난다. Q 축 자기 포화에 대한 정보를 얻기 위해서는 d 축 자속이 영이 되는 d 축 전류를 발생시켜야 하지만 시스템에 따라 어려울 수 있다. 본 논문에서는 영구자석의 자속으로 인한 상호 포화를 고려한 자속 포화 모델 및 추정 방법을 제안한다. 제안한 알고리즘은 11 kW IPMSM에 대하여 검증하였다.

1. 서론

영구자석 동기 전동기는 토크 밀도 및 효율이 높기 때문에 다양한 시스템에서 사용되며, 매립형 영구자석 동기 전동기의 토크는 영구자석 토크와 릴럭턴스 토크를 포함한다. 릴럭턴스 토크는 d-q 축 인덕턴스의 차이에 의해 발생하는 토크이므로 높은 토크 밀도를 얻기 위해 돌극성을 크게 설계한다. 토크 밀도를 높이기 위해서는 q 축 인덕턴스를 증가시킬수록 부피당 q 축 자속 밀도가 커지므로 비선형적인 자속 포화가 심해진다.

우수한 전동기 제어 성능을 확보하기 위해서는 자속 포화에 대한 모델링이 필수적이다. 자속 포화에 대해 모델링하기 위해서는 자속 포화에 대한 정보가 필요하다. 자기 포화에 대한 정보는 직교축 자속이 영일 때 얻을 수 있으며, 상호 포화에 대한 정보는 d-q 축 자속이 모두 있을 때 얻을 수 있다.

먼저, d 축 자기 포화에 대한 정보를 얻기 위해서는 q 축 전류가 영이고 d 축 전류만 있어야 한다. 그리고, 영구자석이 d 축에 존재하므로 d 축 전류가 양일 때 자속 포화와 음일 때 자속 포화가 다르게 나타난다. Q 축 자기 포화에 대한 정보는 d 축 자속이 영인 경우에 얻을 수 있다. 그러나, d 축 전류가 영일 때 d 축 자속은 영구자석의 자속과 같기 때문에 얻을 수 없다. 따라서, d 축 자속이 영이 되는 d 축 전류가 흐를 때, q 축 전류를 발생시켜 q 축 자기 포화에 대한 정보를 얻을 수 있다. 상호 포화는 d-q 축 전류가 동시에 발생시켜 얻는다.

수집한 자속 포화에 대한 정보를 기반으로 모델링하기 위한 방법 중에는 수식 기반 모델링이 있다. 전류에 대한 자속을

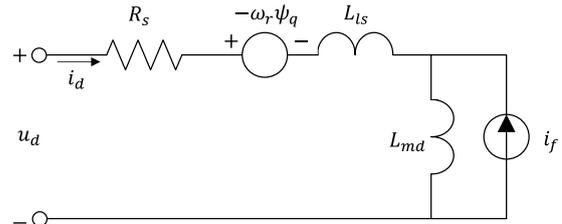


그림 1. 영구자석 동기 전동기의 d 축 등가 회로

모델링 하기 위해 그림 1과 같이 영구자석을 일정한 크기의 전류를 발생시키는 전류원, i_f 로 모델링한다. D 축 전류가 $-i_f$ 인 경우 d 축 자속은 영이 되므로 q 축 자기 포화에 대한 정보를 얻을 수 있지만, i_f 를 정확히 알 수 없을 뿐만 아니라 시스템에 따라 d 축 자속이 영이 되는 d 축 전류를 발생시키기 어려울 수 있다.

본 논문은 d-q 축 자속 포화 모델을 제안한다. D 축 자속 모델은 자기 포화 및 상호 포화에 대한 항을 포함한다. 그리고, 제안한 q 축 자속 모델은 d 축 전류가 영일 때 영구자석의 자속에 의해 상호 포화가 발생한 q 축 자속 항과 d-q 축 전류가 동시에 발생한 경우에 q 축 자속 변화를 고려한 항을 포함한다. Q 축 자속 모델은 q 축 자기 포화에 대한 항을 모델링하지 않는다. 따라서, 제안한 q 축 자속 모델을 사용하여 자기 식별을 하는 경우에 d 축 자속이 영이 되는 d 축 전류를 발생시키기 어려운 시스템에서도 q 축 자속 포화 모델링이 가능하다.

제안한 자속 포화 모델이 PMSM의 자속 포화를 잘 나타내는지 11 kW IPMSM에 대하여 실험을 통해 검증하였다.

2. 기본 방정식

회전자 좌표계에서의 PMSM의 고정자 전압 방정식은 (1)과 같다.

$$\frac{d\psi_d}{dt} = u_d - R_s i_d + \omega_r \psi_q \quad , (1a)$$

$$\frac{d\psi_q}{dt} = u_q - R_s i_q - \omega_r \psi_d \quad , (1b)$$

여기서, ψ_d 와 ψ_q 는 자속, u_d 와 u_q 는 고정자 전압, R_s 는 고정자 저항, i_d 와 i_q 는 전류 그리고 ω_r 는 회전자의 전기

각속도이다.

자속 성분은 (2)와 같이 d 축 전류와 q 축 전류에 대한 함수로 나타낸다.

$$\psi_d = \psi_d(i_{dm}, i_q), \quad \psi_q = \psi_q(i_{dm}, i_q) \quad , (2)$$

$$i_{dm} = i_d + i_f \quad , (3)$$

여기서, i_f 는 영구자석을 일정한 크기의 직류 전류를 발생시키는 전류원으로 모델링하는 경우의 직류 전류이다. 그리고, 전기적 에너지가 발생하거나 소산되지 않으면, (3)의 상호 조건을 만족해야 한다.

$$\frac{d\psi_d(i_{dm}, i_q)}{di_q} = \frac{d\psi_q(i_{dm}, i_q)}{di_d} \quad . (3)$$

2. 제안한 자속 포화 모델

제안한 자속 포화 모델은 (4)과 같다.

$$\psi_d = \underbrace{A_d \tan^{-1}(B_d i_{dm}) + C_d i_{dm}}_{\psi_{d1}} + \underbrace{\frac{D_{dq} i_{dm}}{i_{dm}^2 + K_d} \ln\left(1 + \frac{i_q^2}{K_q}\right)}_{\psi_{d2}} \quad , (4a)$$

$$\psi_q = \underbrace{A_q \tan^{-1}(B_q i_q) + C_q i_q}_{\psi_{q1}} + \underbrace{\frac{D_{dq} i_q}{i_q^2 + K_q} \left\{ \ln\left(1 + \frac{i_{dm}^2}{K_d}\right) - \ln\left(1 + \frac{i_f^2}{K_d}\right) \right\}}_{\psi_{q2}} \quad , (4b)$$

여기서, A_d, B_d 과 C_d 은 음이 아닌 실수이며 자기 포화에 대한 매개 변수다. A_d 와 B_d 는 선형 영역의 기울기 및 임계값 부근에서 부드러운 정도를 나타내며 C_d 는 포화 영역의 기울기를 나타낸다. 그리고, K_d, K_q 그리고, D_{dq} 는 음의 실수이며 상호 포화에 대한 매개 변수다.

그림 2는 d-q 축 자속 포화 현상에 대한 예시이다. 그림 2(a)에서 $i_q = 0$ 일 때 d 축 자속은 (4a)의 ψ_{d1} 항으로 표현이 가능하며, $|i_q| > 0$ 일 때 d 축 자속은 (4a)로 표현이 가능하다. 그리고, 그림 2(b)에서 $i_{dm} = i_f$ 일 때 q 축 자속은 (4b)의 ψ_{q1} 으로 표현이 가능하며, $i_{dm} \neq i_f$ 일 때 q 축 자속은 (4b)로 표현이 가능하다.

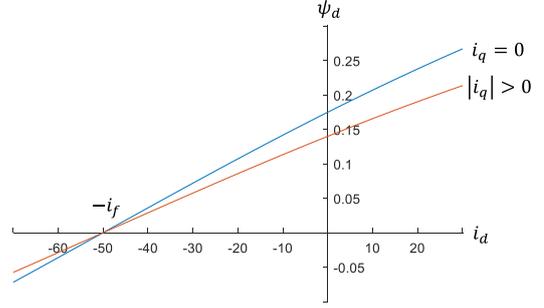
식 (4)에 대한 d-q 축 동적 인덕턴스는 다음과 같다.

$$\frac{\partial \psi_d}{\partial i_d} = \frac{A_d B_d}{1 + (B_d i_{dm})^2} + C_d - D_{dq} \frac{i_{dm}^2 - K_d}{(i_{dm}^2 + K_d)^2} \ln\left(1 + \frac{i_q^2}{K_q}\right) \quad , (5a)$$

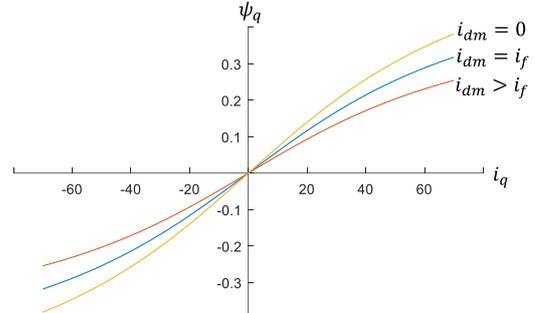
$$\frac{\partial \psi_q}{\partial i_q} = \frac{A_q B_q}{1 + (B_q i_q)^2} + C_q - D_{dq} \frac{i_q^2 - K_q}{(i_q^2 + K_q)^2} \ln\left(1 + \frac{i_{dm}^2}{K_d}\right) \quad , (5b)$$

$$\frac{d\psi_d}{di_q} = \frac{d\psi_q}{di_d} = 2D_{dq} \frac{i_{dm}}{i_{dm}^2 + K_d} \frac{i_q}{i_q^2 + K_q} \quad . (5c)$$

식 (5c)를 통해 자속 포화 모델이 상호 조건식 (3)을 만족하는 것을 알 수 있다.



(a)



(b)

그림 2. D-q 축 자속 포화 현상 예시

3. 매개 변수 추정 기법

3.1 자기 축

Q 축 전류가 영인 경우의 d 축 자속 포화 모델은 ψ_{d2} 가 영이고, d 축 전류가 영인 경우의 q 축 자속 포화 모델은 ψ_{q2} 가 영이다. D 축 또는 q 축 전류만 발생하는 경우에 매개 변수들은 기존 매개 변수 추정 기법 [1]을 사용해서 추정한다.

3.2 상호 축

D-q 축 전류가 모두 발생하는 경우에 K_d, K_q 그리고, D_{dq} 는 기존 매개 변수 추정 기법 [2]을 사용하여 추정한다. K_d 를 적절히 선정하고 D_{dq} 와 K_q 를 추정하기 위해 (4b)를 k 번째 시점에 대해서 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & [\psi_{q,k} - \{A_q \tan^{-1}(B_q i_{q,k}) + C_q i_{q,k}\}] (i_{q,k}^2 + K_q) \\ & = D_{dq} i_{q,k} \left\{ \ln\left(1 + \frac{i_{dm,k}^2}{K_d}\right) - \ln\left(1 + \frac{i_f^2}{K_d}\right) \right\} \end{aligned} \quad , (6)$$

여기서, $i_{dm,k}$, $i_{q,k}$, 그리고 $\psi_{q,k}$ 는 k 번째 얻은 전류와 자속이다. 최소제곱법을 적용하기 위해 (6)을 정리하면 다음과 같다.

$$P_{q,k} (i_{q,k})^2 + K_q P_{q,k} + D_{dq} Q_{q,k} = 0 \quad , (7a)$$

$$P_{q,k} = [\psi_{q,k} - \{A_q \tan^{-1}(B_q i_{q,k}) + C_q i_{q,k}\}] \quad , (7b)$$

$$Q_{q,k} = -i_{q,k} \left\{ \ln\left(1 + \frac{i_{dm,k}^2}{K_d}\right) - \ln\left(1 + \frac{i_f^2}{K_d}\right) \right\} \quad , (7c)$$

여기서, $P_{q,k}$ 와 $Q_{q,k}$ 는 k번째 얻은 데이터를 사용하여 계산한다. (7)에 최소제곱법을 적용하면 K_q 와 D_{dq} 는 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} K_q \\ D_{dq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ b & c \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} d \\ e \end{bmatrix} \quad , (8)$$

여기서, 각각의 성분들은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} a &= \sum_{k=1}^{N_{dq}} P_{q,k}^2, b = \sum_{k=1}^{N_{dq}} P_{q,k} Q_{q,k}, c = \sum_{k=1}^{N_{dq}} Q_{q,k}^2, \\ d &= \sum_{k=1}^{N_{dq}} -(P_{q,k} i_{q,k})^2, e = \sum_{k=1}^{N_{dq}} -(P_{q,k} Q_{q,k} i_{q,k}^2) \end{aligned} \quad . (9)$$

추정한 K_q 와 D_{dq} 를 기반으로 K_d 를 추정한다.

4. 실험

제안한 자속 포화 모델은 11 kW IPMSM에 대해서 검증했다. 대상 전동기의 공칭 매개 변수는 표 1과 같다. 인버터의 스위칭 주파수는 5 kHz이고 더블 샘플링 방법을 사용하였다. 데드타임에 의한 전압 왜곡을 보상하는 알고리즘을 적용하였다.

표 1. 11 kW 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 [Vs]

자속 포화 데이터를 얻기 위해 히스테리시스 전압 주입 기법을 사용했다. 이때, 자속 포화에 대한 데이터를 얻기 위한 전류 제한 범위를 1.5 p.u.로 설정하였다. 매개 변수는 기존 매개 변수 추정 알고리즘을 사용하여 추정하였다. 시험 전동기의 i_f 는 77 A이며 표 2는 제안한 자속 포화 모델에 대해 추정한 매개 변수 결과를 보여준다.

표 2. 매개 변수 추정 결과

A_d	B_d	C_d	A_q	B_q	C_q	K_d	K_q	D_{dq}
0.555	0.006	0	0.201	0.024	0.001	27120	8095	-4.14

그림 3은 추정한 자속 포화 모델을 보여준다. 제안한 자속 포화 모델에 대한 추정 결과가 d-q 축 자속 포화 현상을 모두 잘 나타내는 것을 확인하였다.

5. 결론

본 논문은 영구자석 동기 전동기에 대한 자속 포화 모델을 제안하였다. 시스템 사양에 따라 q 축 자기 포화에 대한 정보를 얻기 어려울 수 있다. 제안한 자속

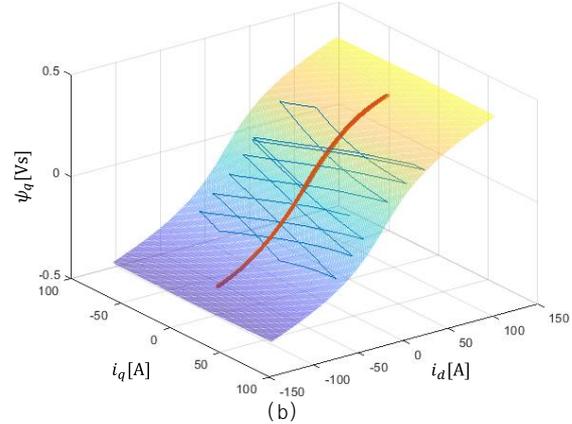
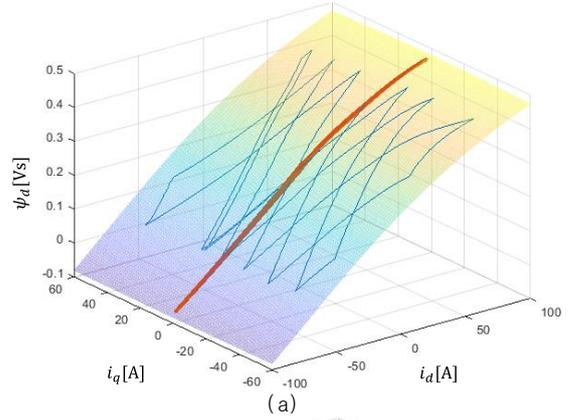


그림 3. 추정한 d-q 축 자속 포화 모델 및 자속 포화 데이터 비교: (a) d 축 자속 포화; (b) q 축 자속 포화

포화 모델은 q 축 자기 포화에 대한 정보를 얻을 수 없는 시스템에서도 자속 포화 모델링이 가능하며 상호 조건을 만족한다. 제안한 자속 포화 모델에 대해 기존 매개 변수 추정 기법을 적용했다. 추정한 자속 포화 모델은 11 kW IPMSM의 자속 포화 현상을 잘 나타내는 것을 확인하였다.

이 논문은 2023년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임 (P0017120, 2023년 산업혁신인재성장지원사업)

참고 문헌

- [1] T. -G. Woo, S. -W. Park, S. -C. Choi, H. -J. Lee and Y. -D. Yoon, "Flux Saturation Model Including Cross Saturation for Synchronous Reluctance Machines and Its Identification Method at Standstill," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 70, no. 3, pp. 2318-2328, March 2023.
- [2] 우태겸, 이승은, 배석민, 윤영두, "자기저항 동기 전동기에서 자속 포화 모델의 상호 포화항에 대한 매개변수 추정", 전력전자학회대회, 2022.