

최소자승법과 자기 인덕턴스 포화현상을 이용한 매입형 영구자석 동기전동기의 초기 위치 추정

김건영, 신혜웅, 이교범
아주대학교

Initial Rotor Position Estimation of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor using Least Squares Method and Self-Inductance Saturation

Keon Young Kim, Hye-Ung Shin, and Kyo-Beum Lee
AJOU UNIVERSITY

ABSTRACT

본 논문에서는 매입형 영구자석 동기전동기를 위치센서 없이 기동하기 위해 회전자의 초기 위치를 추정하는 방법을 제안한다. 제안된 방법은 자기 인덕턴스의 포화현상에 따른 고정자 전류를 해석하고 최소자승법을 통해 회전자의 초기 위치를 추정한다. 전 구간에서 회전자의 초기 위치와 극성을 정확하게 알아낼 수 있어 돌극성 때문에 나타나는 킬러 토크를 효과적으로 사용할 수 있다. 또한, 전동기 정수에 영향을 받지 않으므로 다양한 전동기 구동 시스템에 적용할 수 있으며, 추가적인 하드웨어가 필요하지 않아 경제적이다. 제안하는 방법의 유효성과 우수성은 시뮬레이션을 통해 검증한다.

회전자의 초기 위치 추정을 위한 대표적인 방법은 고주파 신호 주입법이다. 전동기에 고주파 입력 전압을 인가하면 IPMSM의 돌극 특성에 의해 고정자 전류는 타원을 형성하며, 이 타원을 최소자승법을 통해 해석함으로써 초기 위치를 추정한다. 그러나 이 방식은 회전자의 극성을 판별할 수 없으므로 정확한 위치 추정이 어렵다는 단점이 있다. 본 논문에서는 자기 인덕턴스의 포화현상을 이용한 회전자의 N극 판별 기법을 통해 전 구간에서 회전자의 위치 추정이 가능한 방법을 제안한다. 시뮬레이션을 통해 제안된 방법의 타당성을 검증한다.

1. 서론

영구자석 동기전동기는 높은 출력 밀도와 효율을 가지며 고속 운전에 적합한 전동기로서 산업용 로봇, 전기 자동차 및 풍력 발전 등에 널리 적용되고 있다. 특히, 매입형 영구자석 동기전동기(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor, IPMSM)는 기계적 견고함이 우수하며, 단위 전류당 최대 토크 제어를 사용할 경우에 효율을 극대화한 운전이 가능하다.

IPMSM의 초기 구동 및 정확한 벡터 제어를 위해서는 회전자의 초기 위치 정보가 필요하다. 회전자의 위치는 절대형 엔코더나 레졸버 등의 위치센서를 사용하여 얻을 수 있다. 그러나 위치센서는 가격 및 부피를 증가시키며, 노이즈에 취약하므로 시스템의 신뢰성을 저하시킨다. 이에 따라 근래에는 위치센서 없이 초기 위치를 추정하는 연구가 활발히 진행되고 있다.

2. 제안하는 초기 위치 추정 방법

2.1 회전자의 N극 판별

그림 1은 IPMSM의 자기 인덕턴스 포화현상을 나타낸다. 이상적으로 IPMSM의 자기 인덕턴스는 회전자 위치 θ 에 따라 회전자 1회전당 $\cos 2\theta$ 로 변동한다. 하지만 실제 전동기의 자기 인덕턴스는 고정자 쇄교 자속의 방향에 영향을 받는다. 그러므로 자기 인덕턴스의 크기는 a상 권선의 자속 축인 +d축에 위치하는 회전자의 극성에 따라 그림 1과 같이 달라진다. 회전자의 N극이 +d축과 일치하는 경우, 철심의 포화가 가장 많이 발생하므로 인덕턴스는 가장 작아진다. 따라서 +d축 전류의 크기는 가장 작긴다^[1].

그림 2는 회전자 N극의 위치에 따른 $\pm d$ 축 전류를 나타낸다. IPMSM의 자기 인덕턴스 포화현상 때문에 $\pm d$ 축 전류의 크기는 서로 다르다. I_{+d} 는 +d축 방향 전압 벡터인 [PNN] 인가 시에 발생하는 전류를 나타내며, I_{-d} 는 -d축 방향 전압 벡터인 [NPP] 인가 시에 발생하는 전류를 의미한다.

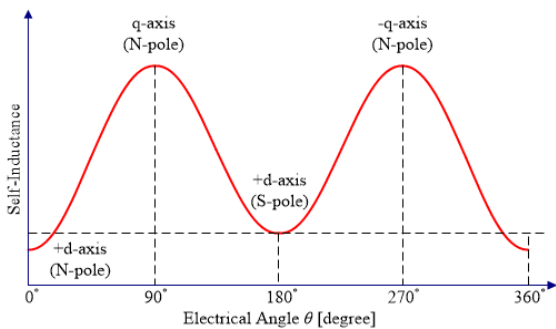


그림 1 자기 인덕턴스 포화현상
Fig. 1 Self-inductance saturation effect

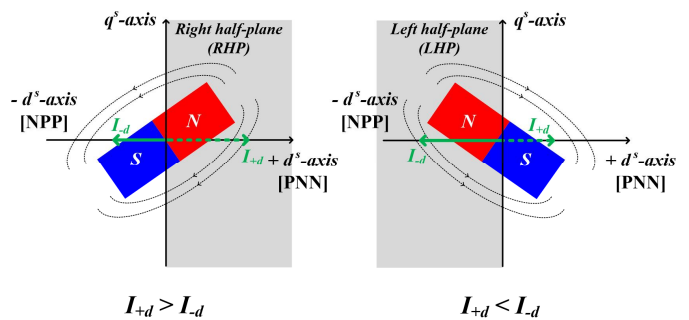


그림 2 회전자의 N극 판별
Fig. 2 Rotor N-pole detection

회전자의 N극이 우반면에 위치하면 $I_{+d} > I_{-d}$ 이고, 좌반면에 위치하면 $I_{+d} < I_{-d}$ 이다. 정지 좌표계의 d축 전류는 abc축 좌표계의 a상 전류와 동일하므로, 전류 측정을 위한 추가적인 하드웨어가 필요하지 않다.

2.2 회전자 위치 추정

전동기의 운전 주파수보다 높은 고주파의 입력 전압을 IPMSM의 고정자에 인가하면, 고정자 전류는 식 (1)과 같이 회전자의 초기 위치에 따라 원점을 중심으로 기울기가 달라지는 타원 궤적을 형성한다.

$$\left[\frac{i_d^r}{(V_{mag}/\omega_i L_d)^2} \right]^2 + \left[\frac{i_q^r}{(V_{mag}/\omega_i L_q)^2} \right]^2 = 1 \quad (1)$$

여기서, V_{mag} 는 입력 전압의 크기, ω_i 는 입력 전압의 주파수를 나타낸다.

원점을 중심인 기본 타원 방정식을 θ_r 만큼 회전한 결과는 식 (2)와 같다.

$$\left(\frac{\cos^2 \theta_r}{a^2} + \frac{\sin^2 \theta_r}{b^2} \right) x^2 + \left(\frac{2 \cos \theta_r \sin \theta_r}{b^2} - \frac{2 \cos \theta_r \sin \theta_r}{a^2} \right) xy + \left(\frac{\sin^2 \theta_r}{a^2} + \frac{\cos^2 \theta_r}{b^2} \right) y^2 = 1 \quad (2)$$

여기서, a는 타원의 장축, b는 타원의 단축을 나타낸다.

식 (2)를 회전된 타원 방정식의 기본 형태인 식 (3)과 비교하고 최소자승법을 이용하여 A, B, C를 구하면 타원의 회전각, 즉 회전자의 초기 위치를 추정할 수 있다^[2].

$$Ax^2 + Bxy + Cy^2 = 1. \quad (3)$$

측정된 정보로부터 함수의 계수를 추출해 낼 수 있는 최소자승법을 이용하기 위해 식 (4), (5), (6)과 같이 치환하면 식 (3)을 통해 식 (7), (8), (9)를 얻을 수 있다.

$$x = i_d^s, xy = i_d^s i_q^s, y = i_q^s \quad (4)$$

$$R_1 = \frac{1}{B}, R_2 = -\frac{A}{B}, R_3 = -\frac{C}{B} \quad (5)$$

$$M_1 = 1, M_2 = x^2, M_3 = y^2, M_4 = xy \quad (6)$$

$$\sum M_4 M_1 = R_1 \sum M_1^2 + R_2 \sum M_1 M_2 + R_3 \sum M_1 M_3 \quad (7)$$

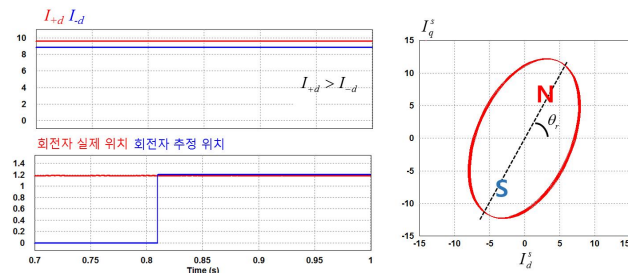
$$\sum M_4 M_2 = R_1 \sum M_1 M_2 + R_2 \sum M_2^2 + R_3 \sum M_2 M_3 \quad (8)$$

$$\sum M_4 M_3 = R_1 \sum M_1 M_3 + R_2 \sum M_2 M_3 + R_3 \sum M_3^2 \quad (9)$$

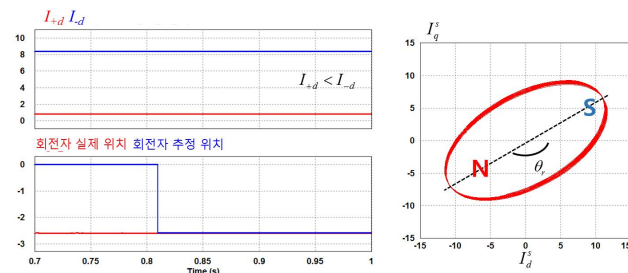
식 (7), (8), (9)를 통해 구한 A, B, C를 사용하여 식 (10)과 같이 회전자의 초기 위치를 구할 수 있다.

$$\theta_r = \tan^{-1} \left(\frac{BX}{X^2 - AX + CX} \right) \quad (10)$$

여기서, $X = \sqrt{-2CA + B^2 + A^2 + C^2}$ 이다.



(a)



(b)

그림 3 시뮬레이션 결과 (a) 우반면, (b) 좌반면

Fig. 3 Simulation result (a) RHP, (b) LHP

3. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션을 통해 제안하는 회전자 초기 위치 추정 방법의 타당성을 검증하였다. I_{+d} 와 I_{-d} 를 비교하여 회전자 N극의 위치를 판별하고, 0.81 [s]부터 최소자승법을 이용하여 초기 위치를 추정하였다. 그림 3은 회전자 위치 추정 시뮬레이션 결과를 나타낸다. (a)의 경우 $I_{+d} > I_{-d}$ 이므로 우반면에 N극이 위치하며 추정된 회전자 위치는 실제 위치와 동일하다. (b)의 경우 $I_{+d} < I_{-d}$ 이므로 좌반면에 N극이 위치하며 추정된 회전자 위치가 실제 위치를 잘 추정하고 있다.

4. 결론

본 논문에서는 자기 인덕턴스의 포화현상에 따른 고정자 전류를 해석하여 회전자의 극성을 판별하고, 최소자승법을 사용하여 회전자 위치를 추정하는 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 기존 고주파 신호 주입법과 달리, 전 구간에서 위치 추정이 가능하다. 제안된 방법의 타당성을 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

참고 문헌

- [1] N. C. Park, Y. K. Lee, and S. H. Kim, "Initial Rotor Position Estimation for an Interior Permanent Magnet Synchronous Motor using Inductance Saturation," Trans. KIEPE., Vol. 16, No. 4, pp. 374-381, Aug. 2011.
- [2] Y. K. Kang, H. G. Jeong, K. B. Lee, D. C. Lee, and J. M. Kim, "Simple Estimation Scheme for Initial Rotor Position and Inductances for Effective MTPA Operation in Wind Power Systems using an IPMSM," Journal of Power Electronics, Vol. 10, No. 4, pp. 396-404, Jul. 2010.