

인덕턴스의 포화현상을 이용한 IPMSM의 회전자 초기위치 추정

이윤규, 김상훈
강원대학교

Initial Rotor Position Estimation for an Interior Permanent-Magnet Synchronous Motor using Inductance Saturation

Yoon-Kyu Lee, Sang-Hoon Kim
Kangwon National Univ

ABSTRACT

This paper propose a method to detect the rotor position of IPMSM(Interior permanent magnet synchronous motor) at standstill without a position sensor. The proposed method is based on current variation caused by the magnetic saturation of stator core as rotor position. By choosing an appropriate voltage vector and applying it to phase winding, it enables the algorithm to discern between a north pole and south pole, and subsequently estimates an absolute position. This method dose not depend on the model of the motor and the motor parameter.

1.서론

매입형 영구자석 동기전동기(Interior permanent magnet synchronous motor, IPMSM)는 효율이 높고 단위 체적당 토크 및 출력이 크며 빠른 동특성을 얻을 수 있기 때문에 고성능 서보 운송분야에 주로 사용되어 왔다. 최근에는 영구 자석의 가격 하락으로 인하여 많은 산업응용분야에서 사용되며 관심이 높아지고 있다^[1].

IPMSM을 기동시키기 위해서는 회전자의 초기 위치의 정보가 필수적이다. 초기위치를 잘못 추정한 경우 회전자가 역방향으로 회전하거나 기동에 실패할 가능성이 있다. 초기위치 검출을 위해 사용되는 절대형 엔코더나 레졸버의 경우 시스템의 가격 및 부피를 상승시키고 신뢰성을 떨어뜨리는 등의 단점을 가지며 비교적 가격이 저렴한 증분형 엔코더를 사용하는 경우 회전자의 초기위치를 알 수 없다^[1,2].

이런 단점들을 극복하기 위해서 IPMSM의 초기 위치 추정을 위한 연구들이 활발히 진행되어 왔다. 회전자의 위치추정 방법은 주로 역기전력(back electromotive force)을 이용한 방법^[3,4]이 사용되어 왔다. 역기전력은 회전자의 위치 정보를 포함하고 있으므로 이를 추정함으로써 회전자의 위치에 대한 정보를 얻는다. 그러나 이러한 방법들은 저속이나 정지 시에 역기전력을 이용할 수 없기 때문에 일정속도까지는 특별한 방법으로 구동시켜야 한다. 따라서 저속과 정지 시에 회전자 위치를 추정하기 위해 회전자의 위치에 따른 고정자 축의 인덕턴스 변화를 이용한 방법에 대한 연구가 활발히 진행되었다.^[5-7]

본 논문은 고정자 인덕턴스의 변화를 이용한 초기각 추정 방법을 제안하는데, 전압벡터를 인가하여 얻은 전류를 사용하

여 기존 방법들 보다 간단히 초기각을 추정할 수 있다. 제안된 방법은 실험을 통해 타당성을 검증하였다.

2. 고정자 인덕턴스

IPMSM의 고정자 쇄교 자속 λ_{phase} 는 다음식과 같이 회전자의 영구자석에 의한 쇄교 자속 λ_{PM} (rotor flux)과 고정자 전류에 의해 발생하는 쇄교 자속 $\lambda_{current}$ (stator flux)의 합으로 나타낼 수 있다^[8].

$$\lambda_{phase} = \lambda_{current} + \lambda_{PM} \quad (1)$$

고정자 인덕턴스는

$$L_s = \lambda_{phase} / i_{phase} \quad (2)$$

와 같이 주어지는데, IPMSM에서는 회전자의 돌극성으로 인해 회전자 자석의 위치 θ_r 에 따라 $\cos 2\theta_r$ 로 변동한다. 또한 이러한 인덕턴스는 회전자 자속의 방향에도 영향을 받게 되는데, 그림 1에 보이는 바와 같이 a상 권선의 자속축이 회전자 N극과 일치하는 경우와 S극과 일치하는 경우 철심의 포화정도가 달라져 그림 2에 보이는바와 같이 인덕턴스의 크기가 달라진다. a상 권선의 자속축이 회전자 N극과 일치하는 경우 가장 포화가 많이 발생하여 인덕턴스가 가장 작아진다.

본 논문에서는 이러한 인덕턴스 변동 현상을 이용하여 회전자의 위치를 추정한다.

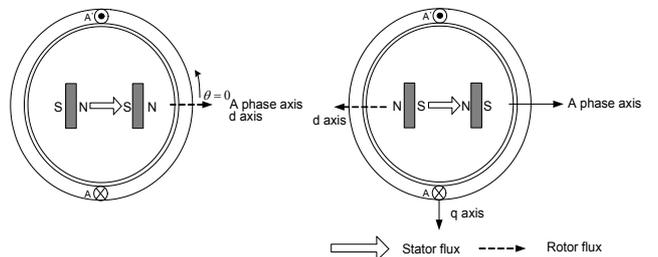


그림 1. 회전자 자속과 고정자 권선에 의한 자속
Fig 1. Rotor flux and Stator flux produced by phase winding

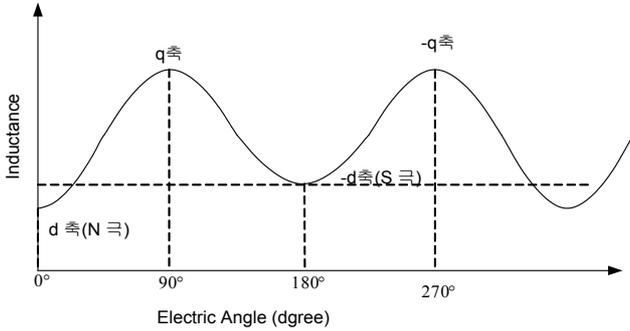


그림 2. 고정자 쇄교자속에 의한 인덕턴스의 변화
Fig 2. Inductance variation due to Stator linkage flux

3 회전자 위치 추정

본 논문에서 제안하는 회전자 위치 추정방법은 회전자의 N극 위치를 180도 영역 내에서 판별하는 극성 판별 단계와 회전자의 절대위치를 계산하는 2 단계로 구성된다.

3.1 회전자 자석의 극성 판별

회전자 자석의 N극 위치를 알기 위해 우선 2개의 반대 방향의 V_1 과 V_4 전압벡터를 인가한다. 이로부터 측정된 상전류들의 대소 관계를 비교하여 N극의 위치를 180도 이내로 판별한다. 전압벡터를 인가하였을 때 측정된 전류가 $I_1 > I_4$ 인 경우 회전자는 우반면에 위치하고 $I_4 > I_1$ 일 때 회전자는 좌반면에 위치한다.

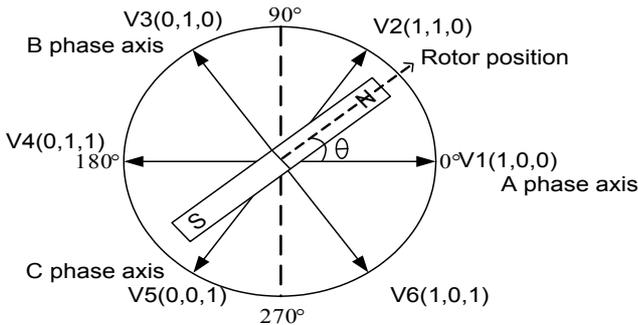


그림 3. 공간 전압 벡터
Fig 3. Space Voltage vector

3.2 회전자 위치 계산

앞에서 알아낸 회전자의 N극 위치정보에 추가적으로 2개의 전압벡터를 인가하면 회전자의 절대 위치를 알아 낼 수 있다.

예를 들어 그림 3에서 보이는 것처럼 회전자의 위치가 우반면에 있다고 가정한다면 극성 판별 후 추가적으로 2번과 6번 전압벡터를 인가하여 얻어진 전류 I_2 와 I_6 를 이용하여 회전자의 위치를 알아낼 수 있다. 회전자 위치 θ 에 대해 V_1 , V_2 와 V_6 의 3개 벡터에 대한 전류는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} I_1 &= I_o + I_m \cos 2\theta \\ I_2 &= I_o + I_m \cos 2(\theta - \pi/3) \\ I_6 &= I_o + I_m \cos 2(\theta + \pi/3) \end{aligned} \quad (3)$$

이로부터 회전자 위치 θ 는 다음과 같이 얻어진다.

$$\theta = \tan^{-1} \frac{I_2 - I_6}{-2\sqrt{3}(I_2 + I_6 - 2I_o)} \quad (4)$$

여기서 $I_o = (I_1 + I_2 + I_6)/3$ 이다.

식(3)은 d축과 -d축에서 인덕턴스 포화정도에 차이가 없다고 가정한 경우의 전류이다. 실제로 그림 2에서 설명하였듯이 d축과 -d축에서 인덕턴스가 다르다. 이러한 인덕턴스 차이로 인해 실제 전류 중에 회전자와 가장 멀리 떨어져있는 전압벡터에 의한 전류는 식(3)과는 다르게 되며, 따라서 식(4)에 의한 회전자 위치 추정에 있어 오차가 발생하게 된다. 이를 보정하기 위해 오차를 발생시키는 벡터의 반대 방향 벡터를 인가하여 대체함으로써 오차를 보정한다.

그림 4는 제안된 회전자 위치 추정과정의 순서도이다. 추정된 회전자의 위치가 $60^\circ > \theta > -60^\circ$ 와 $120^\circ > \theta > 240^\circ$ 인 경우 총 4번의 전압벡터를 인가하고 $120^\circ > \theta > 60^\circ$ 와 $300^\circ > \theta > 240^\circ$ 인 경우 총 5번의 전압벡터를 인가하여 회전자의 위치를 추정함으로써 평균 4.3번의 전압벡터를 인가한다.

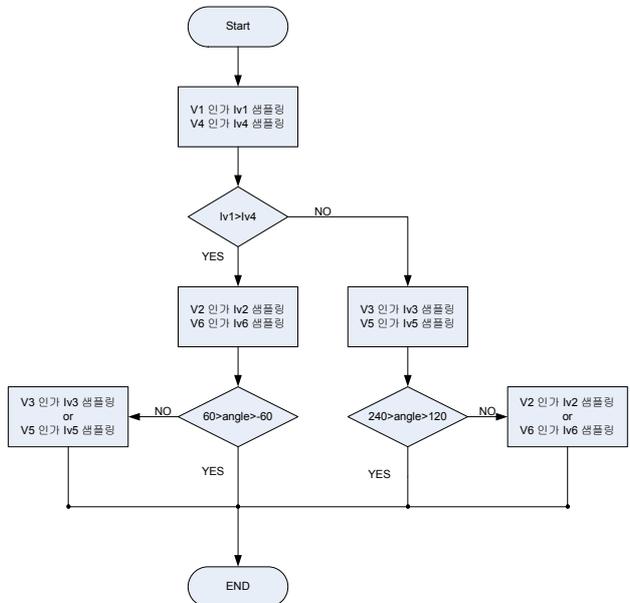


그림 4. 순서도
Fig 4. Flowchart of a whole estimation process

4. 실험결과

제안된 추정방법의 타당성을 검증하기 위해 표 1에 보이는 650 W 급 IPMSM(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor, IPMSM)을 사용하여 초기각을 추정하였다. 초기위치 추정을 위해 인가한 전압펄스의 시간은 500 us이다. 그림 6은 인가한 전압 펄스와 전류를 나타낸다. 전압 펄스의 하강 에지(edge)에서 전류를 샘플링 하여 사용하였다.

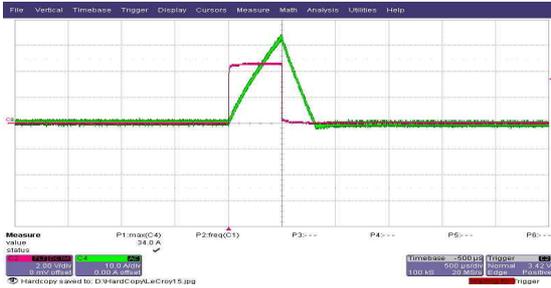


그림 6. 전압펄스와 상전류 (10A/div, 500 us/div)
 Fig 6. voltage pulse and phase current (10A/div, 500 us/div)

표 1 모터 파라미터
 Table 1 Motor parameter

정격출력	650 [W]
극수	6극
V_{dc}	12 [V]
정격전류	80 [A]
R_s	20 [mΩ]
L_d	0.063 [mH]
L_q	0.073 [mH]
λ_{PM}	0.0107 [Wb]

회전자의 위치를 a상 방향을 회전자의 위치를 0도로 정의 고 추정된 회전자의 위치를 그림 7에 나타내었다. 오차 범위는 1.6 % 이다.

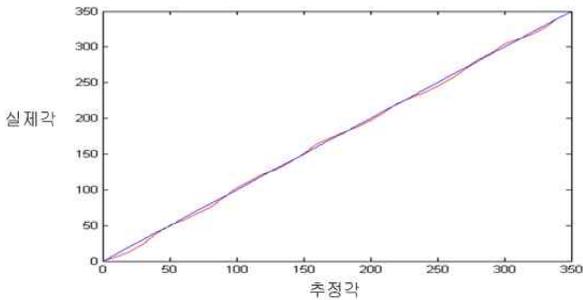


그림 7. 회전자 초기위치 추정결과
 Fig 7. Initial rotor-position estimation result

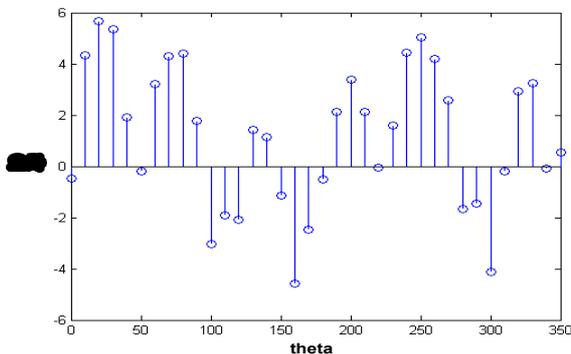


그림 8. 회전자 위치 추정오차
 Fig 8. Initial rotor-position estimation error

5. 결론

본 논문에서는 IPMSM의 초기기동을 위한 회전자의 위치를 위치 센서없이 효과적으로 추정하는 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 인덕턴스의 포화 현상을 이용하여 회전자의 초기 위치를 추정한다. 이 방법은 고정자 인덕턴스의 변화에 따른 전류를 측정하여 위치를 추정하기 때문에 전동기의 전기적, 기계적 상수에 영향을 받지 않으며 회전자의 위치를 파악하기 위해 평균 4.3번의 전압 벡터를 인가하기 때문에 다른 기존의 방법들에 비해 비교적 간단하다.

참고 문헌

- [1] 장지훈, "영구자석 동기전동기 센서리스 제어의 운전 영역 확장에 대한 연구," 서울대학교 공과대학 전기공학부 박사 학위 논문, 2006.
- [2] Ostlund S, Brokemper M. "Initial rotor position detections for an integrated PM synchronous motor drive". *Proceedings of 30th IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, 1995, pp741-747.
- [3] D. H. Jung and I. J. Ha, "Low-cost sensorless control of brushless DC motors using a frequency-independent phase shifter," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 15, no. 4, pp. 744-752, 2000.
- [4] N. Matsui "Sensorless PM Brushless DC Drives," *IEEE Trans. on Industrial Electronics* No.2, pp.300-308, 1996.
- [5] Shin Nakashima, Yuya Inagaki, and Ichiro Miki, "Sensorless Initial Rotor Position Estimation of Surface Permanent-Magnet Synchronous Motor" *IEEE trans on Industry Applications*, Vol. 36, No. 6, Nov/Dec, pp. 525-527, 2000.
- [6] Wook-Jin Lee, Seung-ki Sul, "A new starting method of BLDC motors without position sensor" *IEEE trans on Industry Applications*, Vol. 42, No. 6, Nov/Dec, pp. 1532-1538, 2006.
- [7] Schmidt P.B, Gasperi M.L, Ray G, Wijenayake .A.H " Initial rotor angle detection of a nonsalient pole permanent magnet synchronous machine" *Proceedings of 32nd IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, pp 459-463.1997.
- [8] 김상훈 "DC 및 AC 모터 제어" 북두출판사, 2007, 제4장