

매입형 영구자석 전동기의 초기 극위치 추정에 관한 연구

박창수, 이근호, 남혁, 이지영, 홍정표
 창원대학교 전기공학과

A Study of Initial Pole Position Estimation for Interior Permanent Magnet Motor

Chang-Soo Park, Geun-Ho Lee, Hyuk Nam, Ji-Young Lee, Jung-Pyo Hong
 Dept. of Electrical Eng. Changwon Nat'l University

Abstract - In this paper deal with Initial Pole Position Estimation for Interior Permanent Magnet Motor. Generally, Brushless motor is considered Initial Pole Position with absolute encoder or resolver, etc. In the motor, the flux from the magnets is large enough to saturate the stator iron, results in different inductance values along the pole position. Based upon the relationship between magnitude of inductance and the resultant magnetic filed, initial pole position is estimated at standstill without position sensors. especially, this paper provide the direction of the magnetization. Finally, analysis results are presented to confirm ability of initial pole position estimation

위치 추정에 관한 발표된 논문을 살펴보면 일정 펄스 전압에 의한 전류가 인버터회로의 다이오드를 통해 프리휠링되는 시간을 검출하여 추정하는 방안이 있다[1]. 이때 전류센서가 필요 없지만 극위치를 추정하는 정도가 매우 낮아 정밀도가 떨어지며 전류 인가시 발생하는 토크를 상쇄하기 위한 방안을 강구할 수 없다. 입력한 전압의 위상각변화에 대한 전류의 변화량으로 회전자의 극위치를 추정하는 방안[2]은 정현적인 공극자속의 분포를 가정하기 때문에 정현적인 분포를 가지지 않는 전동기에서의 응용이 어려우며 그 정밀도가 떨어질 우려가 있다. 본 논문에서 제시하는 방안은 측정 전류의 크기만을 비교하여 최대값 및 최소값만을 고려하며 전동기의 파라미터가 필요하지 않으므로 타전동기의 응용에 유용하게 사용될 수 있다.

1. 서 론

일반적으로 브러시리스 전동기는 초기 기동시 극위치를 고려해야한다. 영구자석형 전동기의 최대토크는 이상적인 경우 제자(영구자석)와 전기자(고정자)에 의해 형성되는 자극이 서로직각일 때 발생한다. 즉 영구자석 전동기는 정확한 극 위치 정보가 필요하며 초기 기동시 극위치를 잘못 판단할 경우 잘못된 방향으로 회전하거나 토크가 발생하지 않고 과전류가 흘러 전동기 및 구동회로가 소손될 우려가 있다.[1]

영구자석형 브러시리스 전동기의 회전자 절대 위치를 검출하기 위해서 Hall IC나 Absolute Type Encoder를 사용하는데 이 경우 가공 및 조립의 어려움이 있으며 이에 따른 오차를 수반하고 특히 보수시 신뢰성이 극히 저하된다. 또한 센서가 부착되어야 하는 공간을 확보해야 하므로 공간적인 제약뿐만 아니라 비용이 증가하는 단점이 있다. [1] 이러한 문제점은 회전자 초기 위치각 추정기술을 사용하여 극복할 수 있으며, 또한 속도 검출 및 회전자 위치 검출을 위한 Absolute Type 대신 Incremental Encoder를 사용할 수 있어 비용을 절감할 수 있다.

연구 발표된 위치 센서 없는 극위치 추정방법을 살펴보면, 전동기의 역기전력을 이용하는 방법이 있다. 이 경우 역기전력신호가 여러 파라미터 변수에 민감하고, 오프셋을 해결해야는 문제를 안고 있다.[2]또한 회전자가 정지되어 있을 경우 역기전력이 발생하지 않으므로 회전자가 정지되어 있는 상태에서 초기 극위치 추정이 불가능하다. 전동기의 회전자 위치에 따른 인덕턴스 변화 및 쇄교자속을 이용한 기법의 경우, 영구자석형 전동기는 고정자 철심과 영구자석이 일치하는 부분과 일치하지 않는 부분에서 포화정도가 달라 극위치에 따라 인덕턴스 차이가 생기는 기본적인 원리를 이용한다.[1] 본 논문에서는 매입형 영구자석 전동기를 이용하여 일정 크기의 펄스 전압을 인가하여 전기자 권선에 흐르는 전류의 크기를 측정하고, 회전자 위치에 따른 전류의 상대적인 크기를 비교하여 극위치를 추정하고자 한다. 초기 극

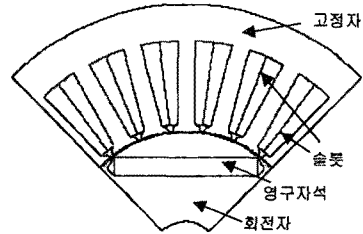


그림 1. IPM 전동기 모델

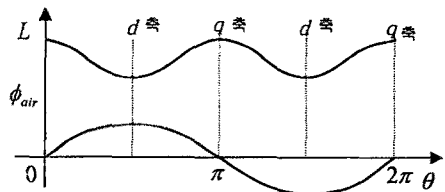


그림 2. 공극의 자속과 인덕턴스

2. 본 론

2.1 기본 원리

그림 1은 3상 IPM 브러시리스 전동기로 회전자 내부에 영구자석이 매입되어 있다. 회전자 내부의 영구자석은 회전자의 내부 자기 장벽으로 이는 유효 공극을 돌극형으로 가져간다. 따라서 표면 부착형 영구자석 전동기의 회전자에 비해 자기 돌극비가 크져 효과적인 초기 극위치 추정을 기대할 수 있다.[3]

전동기의 회전자 영구자석에서 발생하는 자속축을 d 축이라고하고 이와 전기적으로 직각인 축을 q축이라 할 때 공극의 자속 분포와 인덕턴스는 그림 2와 같다.

전동기 회전자의 영구자석이 고정자 철심을 충분히 포화시킬 수 있다면 d 축과 일치하는 고정자 철심부분은 자기 포화가 된다. 반면에 q 축의 고정자 철심부분은 포화되지 않는다. 즉 철심의 자기 포화 특성에서 철심의 포화도가 높을수록 인덕턴스가 작아지고 포화가 되지 않는 구간에서는 인덕턴스가 크다. 따라서 고정자 철심이 포화되는 부분(d 축)은 인덕턴스가 크게 감소하여 최소값을 가지며 포화가 되지 않는 부분(q 축)은 인덕턴스가 최대값을 가진다. 이처럼 전동기의 회전자 초기 극위치 선정을 위한 기본 원리는 자기포화 현상과 인덕턴스 크기와의 관계에서 설명할 수 있다. [2][3]

그림 3은 고정자 권선에서 인덕턴스 크기가 최소값(L_d), 최대값(L_q)에 따른 전류의 상승 양상을 나타낸 것이다. 동일한 펄스 전압을 인가하였을 때 인덕턴스가 큰 경우는 작은 경우보다 전류의 상승 속도가 낮다. 또한 그림 3에서 시간 t_1 지점의 전류 크기를 비교하였을 때 인덕턴스가 큰 경우는 전류의 크기가 작다. [1] 따라서 전류의 크기는 회전자 초기 위치 정보를 담고 있으며 회전자 위치에 따른 전류의 상대적인 크기를 비교하여 회전자 초기 위치를 판단한다.

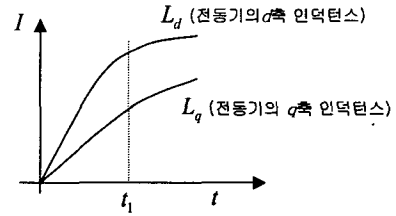


그림 3. 인덕턴스에 따른 전류의 양상

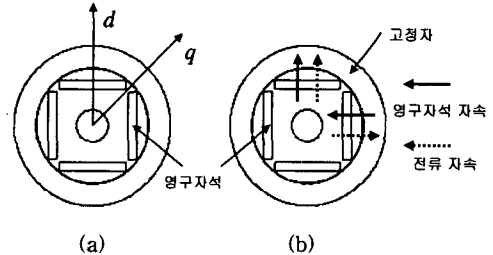


그림 4. (a)회전자 d, q 축, (b)극에서 증자, 감자

2.2 초기 극위치 선정 방법

A상을 기준으로 한 고정 좌표계 $\alpha\beta$ 평면에서 θ 각의 전압을 인가하기 위해 식(1-1,2,3)과 같이 각 상전압을 인가한다. θ 를 일정하게 변화시키면서 펄스 전압을 인가하며 각 상전압을 α, β 축 성분으로 변환하면 그 크기를 얻을 수 있다. 펄스 전압의 크기는 회전자가 정지된 상태에서 DC 전압을 인가할 경우 큰 전류가 발생하여 스위칭 소자가 소손되거나, 기동토크를 발생할 우려가 있으므로 기동에 영향을 미치지 않는 무부하 전류보다 작은 전류를 흘릴 수 있는 정도를 인가하여야 한다. [3] 따라서 PWM 방식을 이용하여 펄스 전압의 크기를 조절한다. 펄스 전압을 인가하여 각 상의 상전류를 측정하면 전체 전류의 크기는 식(2-1,2,3)과 같이 구할 수 있다. 하지만 전류크기가 미소할수록 측정시 오차를 수반할 수 있다. 오차를 줄이기 위해 PWM의 매 주기마다 전류를 측정하며 펄스 전압이 OFF 될 때까지 전류를 합산한다.

회전자의 d, q 축을 추정하기 위해서는 θ 에 따른 전류값을 비교하여 최소값 또는 최대값일 때의 θ 를 취한다. 전류가 최소값일 때는 고정자 권선의 전류에 의한 자속과 회전자의 q 축이 일치하며, 최대값 일 때는 고정자 권선의 전류에 의한 자속과 회전자의 d 축과 일치한다. 즉 θ 에서 인가한 펄스전압에 의한 전류가 최대일 때 고정자표계의 α 축과 회전자의 d 축은 θ 각을 이룬다. [3]

$$V_A = V_0 \cos \theta \quad (1-1)$$

$$V_B = V_0 \cos(\theta - \frac{2}{3} \pi) \quad (1-2)$$

$$V_C = V_0 \cos(\theta - \frac{4}{3} \pi) \quad (1-3)$$

$$I_d = \frac{2}{3} (I_A - \frac{1}{2} I_B - \frac{1}{2} I_C) \quad (2-1)$$

$$I_q = \frac{2}{3} (\frac{\sqrt{3}}{2} I_B - \frac{\sqrt{3}}{2} I_C) \quad (2-2)$$

$$I_M = \sqrt{I_d^2 + I_q^2} \quad (2-3)$$

2.3 극 위치 판단

그림 2에서 공극의 자속 분포에 따른 인덕턴스는 자속분포 주기의 2배 주기를 갖는다. 즉 전류의 최대값인 한 주기동안 2개를 얻을 수 있으므로 회전자의 극성을 판단 할 수 없다.

초기, 극위치 선정 방법에 의해 추출된 전류의 최대값은 영구자석의 극 중심(d 축)에서의 전류값이다. 이때 인가된 전류에 의해 발생한 자속은 그림 4(b)와 같이 영구자석에 의한 자속의 방향과 일치하거나 또는 반대 방향으로 증자 또는 감자 작용을 한다. 따라서 최초 추정된 d 축과 180도 위치의 d 축에서 전류값을 비교하여 극 위치를 판단한다. [2][3] 하지만 권선의 전류가 작을 경우 영구자석에 의한 자속의 영향이 크며 IPM 브러시리스 전동기는 회전자 내부의 영구자석을 삽입한 부분의 인덕턴스가 이미 매우 작은 상태이므로 극성을 판단하기가 용이하지 않다. 따라서 펄스 전압을 크게 인가하여 d 축 전류를 크게 흐르게 한다면 전류에 의한 자속이 영구자석의 극성과 일치하게 되는 d 축 지점에서 N극성일 경우 자속이 더 높고 S극성일 경우 영구자석에 의한 자속과 전류에 의한 자속이 각자작용을 하기 때문에 N극의 인덕턴스가 S극 보다 작게된다. 또한 d 축에 전류를 흘릴 경우 전류의 자속에 의해 자속축의 왜곡이 없으므로 d 축의 극성을 판단하기 위해서 큰 전류를 흘릴 수 있다. 전류의 크기가 클수록 영구자석의 극성을 뚜렷이 구분할 수 있다. [3]

2.4 해석 결과

그림 5는 고정 $\alpha-\beta$ 좌표계에서 전류값이 최대, 최소 인점에서 해석한 전류 결과이다. 빗금친 영역의 펄스 전압 OFF 시점(0.01(sec))까지 합산한 값과 OFF 시점의 최대 전류를 나타내었다. 그림 6은 θ 각 10도 마다 해석한 전류값을 그림 5와 같이 취하여 θ 에 따라 나타내었다. 최대, 최소가 되는 지점이 각각 회전자의 d, q 축이며 OFF 시점까지 전류를 합산한 값이 OFF 시점에서 전류 최대값보다, d, q 축을 구분하기가 용이하다.

q 축 방향으로 전류를 인가 할 경우 전류에 의한 자속과 영구자석에 의한 자속이 수직을 이루며 토크가 발생한다. 또한 영구자석의 자속축에 왜곡이 발생하는데 이는 전류에 의한 자속과 영구자석에 의한 자속의 합성 방향이다. 반면에 d 축 방향으로 전류를 인가 할 경우는 영구자석과 전류에 의한 자속이 동일한 방향이므로 토크가 발생하지 않고 d 축 자속의 왜곡도 생기지 않는다. 따라서 회전자 d 축에서 최대 전류값을 판단하는 것이 정확한 각을 추정할 수 있다. 그림 6에서 N, S극 즉 d 축의

최대전류의 차이 ΔI 를 확인 할 수 있으며 상대적으로 큰 전류가 흐르는 d 축이 N 극의 중심이다. 전류의 크기가 커질수록 ΔI 의 값이 뚜렷해진다.

2.5 실험 방법

그림 7은 3상 브러시리스 전동기 구동 인버터 회로이다. 전류를 검출하기 위해 각상에 Shunt 저항을 삽입하고 저항의 양단에서 발생하는 전압의 크기를 측정하여 전류를 계측한다. 펄스 전압을 인가하였을 때 발생할 수 있는 토르크를 상쇄하기 위해 펄스 전압 인가후 역전압을 인가하여 회로 내부에 흐르는 전류를 급격히 감소시키거나 역토크를 발생하여 전동기의 기동 문제를 해결한다.

그림 9는 초기 극위치 추정을 위한 알고리즘이다. 초기 낮은 전압에서 θ 각을 추정하고 N, S 극성 판별을 위해 높은 전압을 인가하여 전류를 측정한다.

3. 결 론

브러시리스 전동기의 초기 극위치 추정을 위한 방안을 제시하고 해석결과를 바탕으로 극위치 추정의 용이성을 살펴 보았다. 기존의 극위치 추정방법에 비해 보다 정확성을 확보하고 영구자석 전동기 및 릴럭턴스 전동기 등에서 파라미터를 요구하지 않고 극위치를 추정하는데 응용이 가능할 수 있을 것으로 사료된다. 나아가 센서리스 제어와 결합하여 초기 기동시 센서리스 제어에 응용될 것이다. 향후 본 논문에서 제시한 초기 극위치 추정 방안과 해석 결과를 바탕으로 실험을 통한 실용성 및 신뢰성을 검증하고자 한다.

[참 고 문 헌]

- [1] Yen-Shin Lai, Senior Member, IEEE, Fu San Shyu, and Shian Shau Tseng, New Initial Position Detection Technique for Three-Phase Brushless DC Motor Without Position and Current Sensors, IEEE Trans. on Industry application, VOL.39, No.2, March/April 2003.
- [2] P.B.Schmidt, M.L.Gasper, G.Ray and A.H.Wijenayake, Initial Rotor Angle Detection Of A Non-Salient Pole Permanent Magnets Synchronous Machine, in conf. record of IEEE, IAS, pp.459-463, 1997
- [3] Stefan Ostlund, Sensorless Rotor-Position Detection from Zero to Rated Speed for an Integrated PM Synchronous Motor Drive, IEEE Trans. on Industry application, Vol.32, NO.5, 1996
- [4] N. Matsui, Sensorless PM Brushless DC Motor Drives, IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 43, No. 2, Apr, 1996, pp. 300-308.

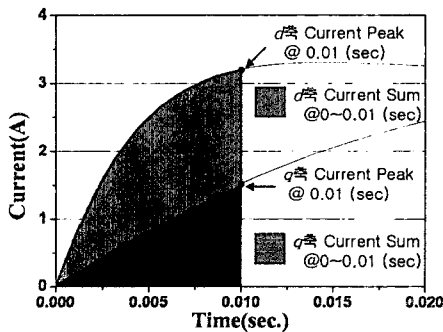


그림 5. θ 각에 따른 전류 상승곡선

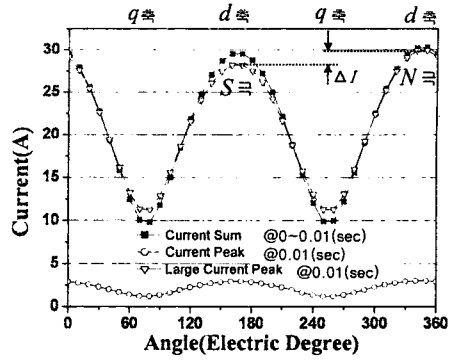


그림 6. 회전자 위치에 따른 전류 크기

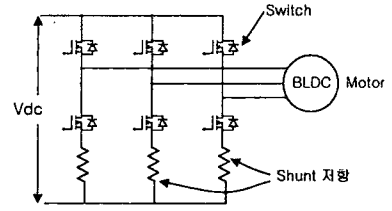


그림 7. 실험 구성 및 전류 검출 회로

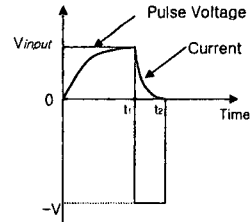


그림 8. 펄스 전압, 전류 프로파일

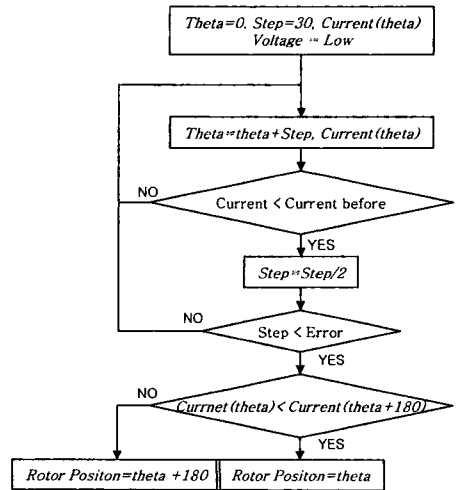


그림 9. 회전자 초기 위치 선정 알고리즘 흐름도