

인덕턴스의 포화현상을 이용한 IPMSM의 회전자 초기 위치 추정

朴內春*, 李允揆**, 金相勳†

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

Nae-Chun Park, Yoon-Kyu Lee, and Sang-Hoon Kim

요 약

본 논문에서는 매입형 영구자석 동기전동기의 정지 시 위치센서 없이 회전자의 초기 위치를 추정하는 방법을 제안한다. 제안된 방법은 자기적 포화에 의한 인덕턴스 변화를 이용하여 비교적 간단히 회전자의 초기 위치를 추정한다. 최소의 전압 벡터들을 인가하여 인덕턴스의 차이에 대응한 전류를 측정하여 회전자의 위치와 극성을 정확하게 판별할 수 있다. 제안된 방법은 추가적인 하드웨어가 필요하지 않으며, 전동기 파라미터에 영향을 받지 않고 전압 벡터를 최소로 인가하여 측정할 수 있다는 장점을 가진다. 실험을 통해 제안된 방법의 타당성을 검증하였다.

ABSTRACT

This paper proposes a new method to acquire an initial rotor position for IPMSM(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor) without a position sensor at standstill. The proposed method is based on the variation of inductance caused by the magnetic saturation of stator core. Minimum number of voltage vectors are chosen to determine the initial rotor position. By using the resultant currents in combination with the inductance variation, the north pole and the absolute position of the rotor can be easily obtained. This method also has the advantage of not requiring motor parameters and additional hardware. Its validity is verified by experiments.

Key Words : IPMSM, Initial Rotor position, Magnetic saturation, Voltage vector

1. 서 론

매입형 영구자석 동기전동기(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor, IPMSM)는 효율이 높고 출력밀도가 크며 빠른 동특성을 얻을 수 있기 때문에 순시 토크 제어가 요구되는 고성능 제어분야에 유리하다. 최근 자석의 가격 하락으로 인하여 다양한 산업분

야 응용에 대한 관심이 높아지고 있다^[1].

IPMSM을 기동시키기 위해서는 회전자의 초기 위치의 정보가 필수적이다. 초기 위치를 잘못 추정할 경우 회전자가 역방향으로 회전하거나 기동에 실패할 가능성이 있다. 절대형 엔코더나 레졸버의 경우 회전자의 초기 위치 검출이 가능하지만 구동시스템의 가격 및 부피를 상승시키고 신뢰성을 떨어뜨리는 등의 단점을 가진다. 이에 비해 비교적 가격이 저렴한 증분형 엔코더를 사용하는 경우 회전자의 초기 위치를 알 수 없다^[1,2].

이러한 문제를 해결하기 위해서 IPMSM의 초기 위치 추정을 위한 연구들이 활발히 진행되어 왔는데, 주로 고주파 신호 주입법과 전압펄스를 이용하는 방법들이 제안되어 왔다^[2].

†교신저자 : 정희원, 강원대 전기전자공학부 교수

E-mail : kshoon@kangwon.ac.kr

*정희원, 강원대 대학원 전기전자공학부 박사과정

**정희원, 현대엘리베이터 기술연구소 연구원

접수일자 : 2011. 4. 8

1차 심사 : 2011. 4. 28

2차 심사 : 2011. 6. 10

심사완료 : 2011. 6. 16

고주파 신호 주입법은 높은 주파수의 전압 또는 전류를 인가하여 전동기가 운전되는 기본과 주파수 영역에서는 측정하기 힘든 자기적 포화 현상과 자기 이력 현상(hysteresis)에 의한 인덕턴스의 차이 및 불평형 현상을 이용하여 회전자의 초기 위치를 추정한다^[4]. 고주파 신호를 인가하는 방법으로는 정자 좌표계 상에서 신호를 인가하는 방법^[4]과 동기 좌표계 상의 한 축에서 높은 주파수로 맥동하는 신호를 이용하는 방법^[5]이 있다. 고주파 신호를 이용하는 방법들은 디지털 필터 등의 복잡한 신호 처리를 요구하며 가칭 주파수에 소음이 발생하는 문제가 있다.

전압펄스를 이용하는 방법은 회전자의 위치에 따른 고정자 철심의 포화현상을 이용하는데, 일정 크기와 폭을 가지는 전압펄스를 인가하고 그에 반응하는 전류의 변화율을 이용하여 회전자의 초기 위치를 추정한다^[6-9]. 전압 펄스를 인가하는 방법으로는 30° 간격으로 돌아가며 12개의 전압벡터를 인가하여 회전자의 위치를 판별하는 방법^[6]과 d축 인덕턴스와 q축 인덕턴스의 대소 관계를 비교하는 방법^[7], 특정 간격으로 돌아가며 전압 펄스를 인가하여 전류의 크기를 비교하는 방법^[8], 그리고 회전자의 위치 θ_r 에 따른 인덕턴스의 변동이 $\cos 2\theta_r$ 로 변하는 특성을 이용하는 방법^[9] 등이 있다. 이 방법들은 회전자 위치를 추정하기 위해 많은 전압 벡터를 인가해야 하거나 절대위치가 아닌 일정 범위 내의 위치를 추정하게 되는 단점이 있다.

본 논문에서는 전압 펄스를 이용한 IPMSM의 초기 위치 추정 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 부가적인 주입 신호가 없으므로 구현이 간단하고, 전압 펄스에 대하여 반응하는 전류의 변화율을 이용하여 회전자의 초기 위치를 추정함으로써 전동기의 전기적, 기계적 상수에 영향을 받지 않으며, 평균 4.6 번의 전압 벡터를 인가하여 회전자의 절대 위치를 추정할 수 있기 때문에 기존에 방법들에 비해 효과적이다.

2. IPMSM의 인덕턴스 특성^[1]

IPMSM의 회전자는 자기적인 돌극성을 가지므로 회전자의 위치에 따라 자기 인덕턴스의 크기도 달라진다. 인덕턴스가 가장 큰 경우는 그림 1에 보이는 유효 공극이 가장 최소가 되는 회전자 위치 θ_r 이 90°와 270°일 때이고, 최소가 되는 경우는 회전자 위치 θ_r 이 0°와 180°일 때이다. 따라서 자기 인덕턴스는 그림 2와 같이 회전자 1회전당 $\cos 2\theta_r$ 로 변동하게 된다.

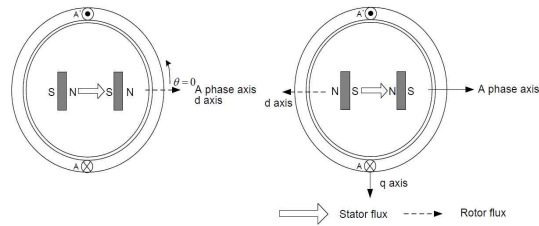


그림 1 고정자 쇄교자속
Fig. 1 Stator linkage flux

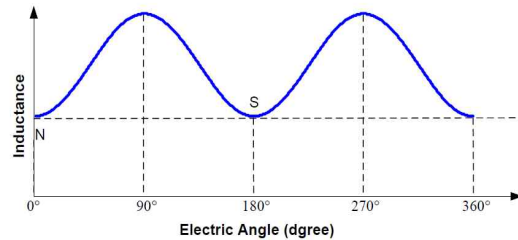


그림 2 회전자 위치에 따른 인덕턴스
Fig. 2 Stator inductance as a function of rotor position

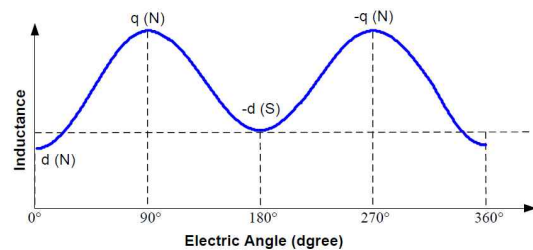


그림 3 고정자 쇄교자속에 의한 인덕턴스의 변화
Fig. 3 Inductance variation due to Stator linkage flux

고정자 전류가 흐르는 경우 이러한 인덕턴스는 고정자 쇄교 자속의 방향에도 영향을 받게 되는데, 그림 1에 보이는 바와 같이 a상 권선의 자속축이 회전자 N극과 일치하는 경우와 S극과 일치하는 경우 철심의 포화정도가 달라져 인덕턴스의 크기는 그림 3과 같이 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.

3. 회전자 초기 위치 추정

본 논문에서 제안하는 회전자의 초기 위치 추정 방법은 크게 회전자의 N극 위치를 180° 영역 내에서 판별

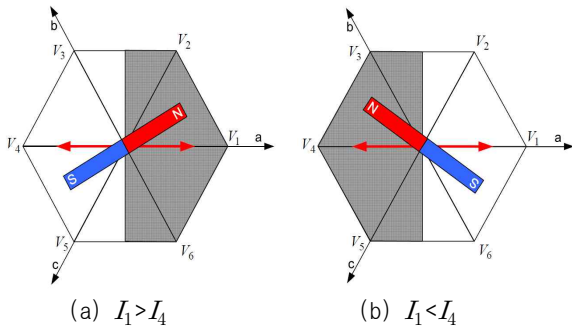


그림 4 N극 판별
Fig. 4 N-pole Detection

하는 극성 판별 단계와 회전자 위치를 계산하는 절대 위치 추정 단계로 구성된다.

3.1 회전자 자석의 N극 판별

초기 회전자 자석의 N극 위치를 알기 위해 우선 2개의 반대 방향의 V_1 과 V_4 전압벡터를 인가한다. 포화 정도에 차이로 인해 전류의 차이가 발생하므로 측정된 전류들의 대소 관계를 비교하여 N극의 위치를 180° 이내로 판별한다. 그림 4와 같이 전압벡터를 인가하였을 때 측정된 전류가 큰 쪽에 회전자의 N극이 위치하게 된다. 즉, $I_1 > I_4$ 인 경우 회전자는 우반면에 위치하고 $I_4 > I_1$ 인 경우는 좌반면에 위치한다. 여기서, I_1, I_4 는 V_1, V_4 전압벡터에 의한 전류이다.

3.2 회전자 위치 계산

회전자의 N극 위치를 판별한 후 추가적으로 두개의 전압벡터를 인가하여 다음과 같이 회전자의 절대 위치를 추정할 수 있다.

그림 5와 같이 회전자의 N극이 좌반면에 위치하면 극성 판별 후 추가적으로 V_2 와 V_6 전압벡터를 인가하고, 대응하는 전류 I_2 와 I_6 를 이용하여 회전자의 위치를 알아낼 수 있다. 만약 회전자의 N극이 우반면에 위치한다면 V_4 를 V_1 로 보고 위와 같은 방법으로 두 벡터를 인가하여 회전자의 위치를 추정한다. 그러므로 위치 추정을 위해서는 V_1, V_2, V_6 의 세 가지 전압 벡터만을 이용하게 된다.

우선 회전자 위치를 고려하고 고정자 전류에 의한 포화차이가 없다고 가정하였을 때 인가한 전압 벡터에 의한 전류는 회전자 위치 θ_r 의 함수로 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

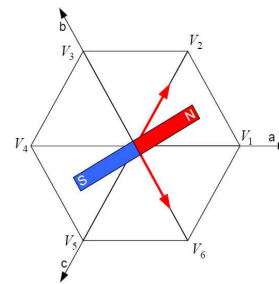


그림 5 회전자 극성에 따른 전압 벡터
Fig. 5 Voltage vector for rotor polarity

$$\begin{aligned} I_1 &= I_o + I_m \cos 2\theta_r \\ I_2 &= I_o + I_m \cos 2(\theta_r - \pi/3) \\ I_6 &= I_o + I_m \cos 2(\theta_r + \pi/3) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, $I_o = (I_1 + I_2 + I_6)/3$ 이다.

식(1)을 $\sin 2\theta_r$ 과 $\cos 2\theta_r$ 로 다시 정리하면 식(2)가 된다.

$$\begin{aligned} \sin 2\theta_r &= \frac{I_2 - I_6}{\sqrt{3} I_m} \\ \cos 2\theta_r &= \frac{-(I_2 + I_6 - 2I_o)}{I_m} \end{aligned} \quad (2)$$

식(2)로부터 식(3)과 같이 회전자의 위치 θ_r 을 추정할 수 있다.

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

이 경우 총 4번의 전압 벡터를 인가하여 회전자의 절대적인 위치를 추정할 수 있다.

3.3 오차보정

식(1)은 회전자 위치를 고려한 그림 2의 경우에 대한 전류이다. 하지만 고정자 전류에 의해 발생된 쇄교 자속에 의해 그림 3과 같이 포화 정도에 차이가 발생하게 되어 인덕턴스가 달라져 식(1)을 사용한 위치 계산은 오차를 발생하게 된다. 특히 회전자의 N극과 가장 멀리 떨어져있는 전압벡터에 의한 전류는 그림 2의 경우를 가정한 식(1)과는 상당히 다르게 되며, 식(3)에 의한 회전자 위치 추정에 오차를 발생하게

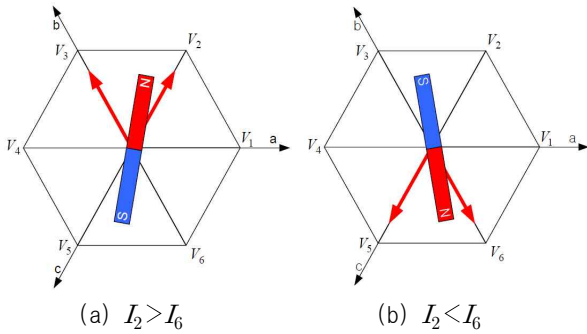


그림 6 오차 보정
Fig. 6 Error correction

된다. 예를 들어 회전자가 그림 6a같이 위치하는 경우 회전자의 위치를 계산하기 위해 V_2 와 V_6 전압 벡터에 의한 전류 I_2 와 I_6 를 사용되게 되면 I_6 는 회전자의 N극과 멀어지게 되어 철심의 포화정도의 차이에 의해 추정된 회전자는 오차를 포함하게 된다.

이를 보정하기 위해 그림 6과 같이 I_2 와 I_6 의 크기를 비교하여 $I_2 > I_6$ 이면 회전자는 V_2 에 인접한 곳에 위치함으로 V_3 전압벡터를 다시 인가하고, $I_6 > I_2$ 이면 V_5 전압벡터를 다시 인가하여 I_2 와 I_6 대신 I_5 와 I_3 를 사용하여 회전자의 절대 위치를 계산한다.

정확한 위치 추정을 위하여 I_1, I_2, I_6 전류의 크기를 비교하여 I_1 이 가장 큰 경우에는 I_1, I_2, I_6 를 이용하여 회전자의 위치를 계산하고, I_2 나 I_6 가 가장 큰 경우에는 추가적으로 V_3 나 V_5 전압벡터를 인가하여 회전자의 위치를 구하게 된다. I_1 이 가장 큰 경우 4번의 전압벡터를 인가하고, I_2 나 I_6 가 큰 경우에는 5번의 전압 벡터를 인가함으로 평균 4.6번의 전압벡터를 인가하여 정확한 회전자의 위치를 추정할 수 있다.

3.4 극성 판별이 어려운 경우

회전자 초기 위치 추정 과정에서 만약 회전자의 N극이 90° 혹은 270° 부근에 위치하게 된다면 V_1 과 V_4 의 전압 벡터가 q축과 -q축 근처의 방향에 있게 되고 이 두 방향에서의 인덕턴스의 차이는 매우 작기 때문에 I_1 과 I_4 의 차이가 매우 작게 되어 정확한 위치를 판별하기 어렵다.

이와 같은 경우에 I_1 과 I_4 의 차이가 일정한 문턱값보다 작다면 정확한 회전자 위치 판별을 위해 V_2 와 V_6 전압 벡터를 인가하고 I_2 가 I_6 보다 큰 경우 V_3

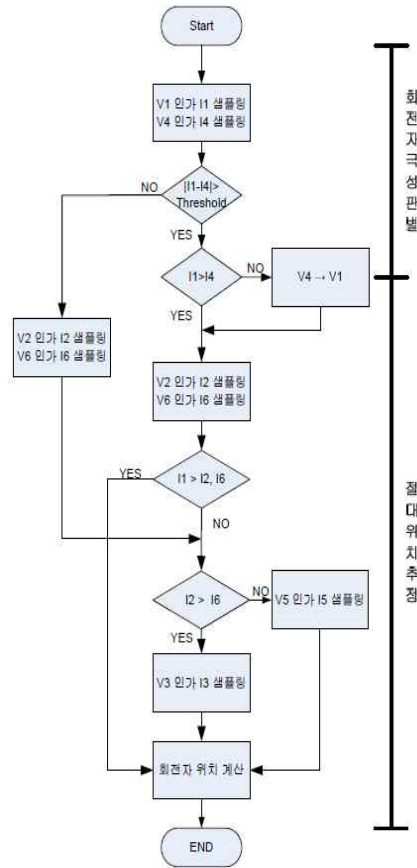


그림 7 전체 초기각 추정 과정의 순서도
Fig. 7 Flowchart of a whole estimation process

벡터를 인가하여 회전자의 위치를 계산하고 I_2 가 I_6 보다 작은 경우 V_5 벡터를 인가하여 정확한 회전자의 위치를 추정하게 된다.

이 경우 회전자 극성 판별을 위해 4번의 벡터를 인가하게 되고 위치 계산을 위해 1번의 벡터를 추가적으로 인가하여 총 5번의 벡터를 인가하게 되는데 이 영역은 오차 보정 영역에 포함되므로 전체적인 벡터 인가 횟수에는 영향을 주지 않는다.

제한한 추정 기법을 순서도로 나타내면 그림 7과 같다.

3.5 기존의 방법과 비교

표 1에 기존의 전압벡터를 이용한 방법들과 제안한 방법의 성능을 비교하였다. 인가한 전압벡터에 대한 측정 전류의 크기를 비교하는 방법^[6], 방법^[7] 그리고 방법^[8]은 회전자의 절대적인 위치가 아니라 일정한 범위 내의 위치를 판별하며, 인덕턴스 특성을 고려한

표 1 기존 방법과의 비교

Table 1 Comparison with existing methods

	벡터 인가 횟수	추정 범위
기존의 방법1 ^[6]	18	$\pm 1.785^\circ$
기존의 방법2 ^[7]	4.5	$\pm 15^\circ$
기존의 방법3 ^[8]	30(최대)	$\pm 5^\circ$
기존의 방법4 ^[9]	6	직접 추정
제안한 방법	4.6	직접 추정

표 2 측정 전류

Table 2 Measured currents

인가 시간[usec]	측정 전류[A]		
	+d축	-d축	Δd (+d)-(-d)
50	26.3	25	1.3
100	50	45	5
150	73.8	63.8	10
200	98.8	82.5	16.3
250	123.8	98.8	25

방법4^[9]는 회전자의 절대적인 위치를 추정할 수 있지만 전압 벡터를 6번 인가하여야 한다. 제안한 방법은 기존의 방법에 비해 벡터 인가 횟수가 적고 회전자의 절대적인 위치를 추정할 수 있다.

4. 인가 전압 선정

제안된 방법은 인가한 전압 벡터에 대한 전류의 응답을 이용하기 때문에 인가하는 전압 벡터의 크기가 중요하다. 인가하는 전압의 크기가 너무 작게 되면 d축과 -d축의 차이가 너무 작아 0°와 180°를 판별하기 어렵고, 전압 크기가 너무 큰 경우에는 모터가 회전하게 되어 정확한 초기 위치 추정이 어렵게 된다.

그림 8은 40[V], 300[A] 정격의 전동기에 직류전압이 72[V]로 일정할 때 펄스인가 시간을 50[usec] 부터 250[usec]까지 변경하면서 전압펄스에 대응하는 전류를 측정하여 결과를 나타내고 있다.

측정 결과 전류 응답은 회전자에 위치 θ_r 에 따라 $\cos 2\theta_r$ 로 변하고, 회전자 자속에 의한 포화정도가 달라져 d축과 -d축에서 차이가 발생하게 된다.

표 2는 +d축과 -d축에서 측정 전류와 두 전류의 차이를 나타내고 있다. 전류가 클수록 d축과 -d축 판별

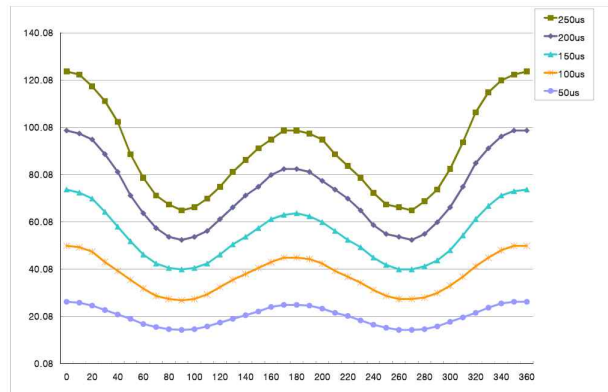


그림 8 전류 응답

Fig. 8 Current Response

이 용의하지만 너무 큰 전류는 전동기를 회전시킬 수 있고, d축과 -d축의 차이에 의해 특정 구간에서 더 많은 오차를 유발시킬 수 있다. 전압 펄스의 인가시간은 정지마찰력으로 인해 회전하지 않는 최대의 시간과 시정수의 중간 값 중에 작은 값으로 정해야 한다^[10].

5. 실험 결과

5.1 실험 장치 구성

제안된 추정방법의 타당성을 검증하기 위해 실험을 수행하였다. 제안한 회전자 초기 위치 추정기법을 적용하기 위하여 제어기로는 TI(Texas Instruments)사의 32bit DSC인 TMS320F28335를 이용하였고, 스위칭 소자로는 Mitsubishi사의 150[V], 300[A]급 MOSFET (FM600TU-3A)를 사용하였다. 실제 회전각과 추정된 회전각을 비교하기 위해 전동기에 레졸버를 장착하여 실제 회전각을 측정하였다.

실험에 사용한 전체 시스템 구성은 그림 9와 같다.

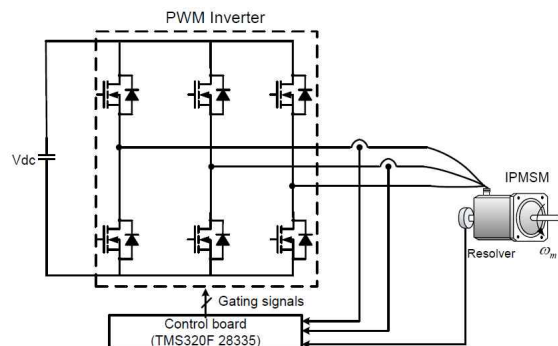


그림 9 실험 장치 구성

Fig. 9 Configuration of experimental sets

표 3 전동기 파라미터
Table 3 Motor parameter

	650[W]	7[kW]
극 수	6 극	8 극
정격전류	80 [A]	300 [A]
R_s	20 [mΩ]	9.84 [mΩ]
L_d	0.063 [mH]	0.105 [mH]
L_q	0.073 [mH]	0.179 [mH]
λ_{PM}	0.0107 [Wb]	0.0395 [Wb]

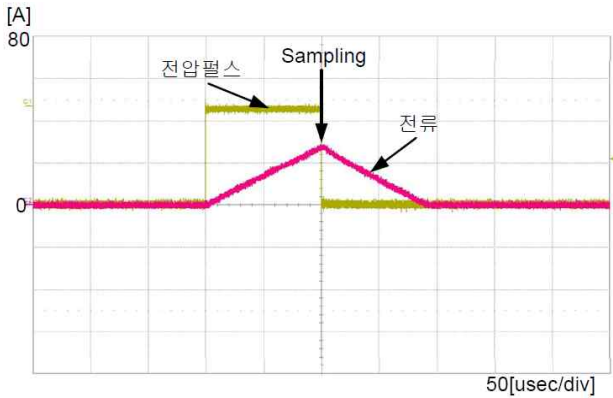


그림 10 전압 펄스와 측정 전류
Fig. 10 Voltage pulse and measured current

정확한 검증을 위해 650[W]와 7[kW]의 두 IPMSM을 사용하였고, 직류전압은 전동기에 따라 각각 12[V]와 72[V]이다. 실험에 사용한 전동기의 파라미터를 표 3에 나타내었다.

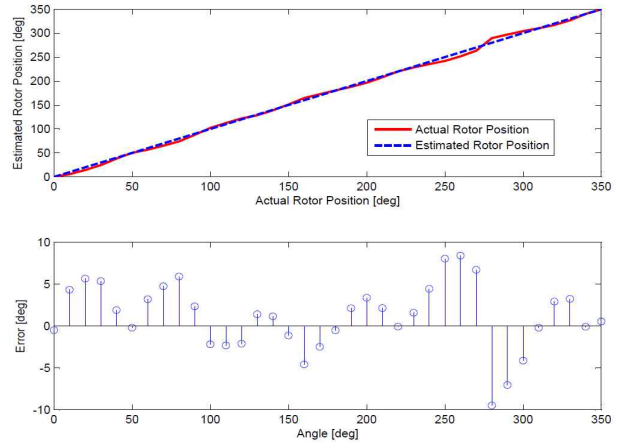
그림 10은 7[kW] 전동기에 전압 펄스를 인가하였을 때 전류 파형을 나타내고 있다.

정확한 전류를 측정하기 위해 전류의 최대값에서 전류를 샘플링하였고, 펄스와 다음 펄스 사이에 시간은 4[msec]의 간격을 두고 전압펄스를 인가하였다.

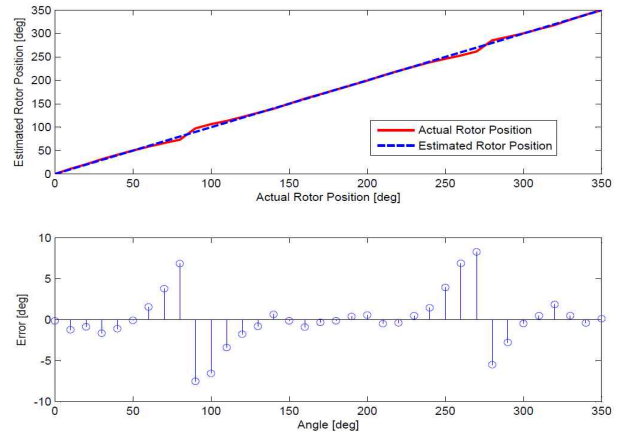
제안한 기법으로 초기 위치를 추정한 후 기동 시에는 RDC(Resolver to Digital Converter)의 A,B펄스를 이용하여 추정된 초기 위치에 대한 상대적인 위치로 회전자의 위치를 측정하였다. 증분형 엔코더만을 사용하는 경우에도 동일한 방법으로 기동이 가능하다.

5.2 실험 결과

650[W]와 7[kW]의 두 전동기에 대하여 회전자를 전기가각 10° 간격으로 이동하면서 제안된 추정 알고리즘



(a) 650[W]



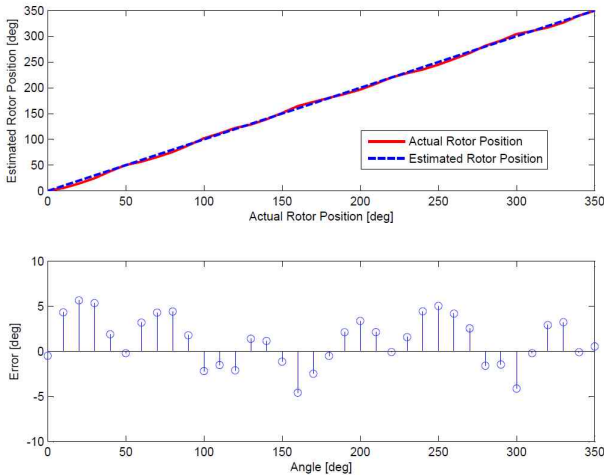
(b) 7[kW]

그림 11 회전자 초기위치 추정결과
Fig. 11 Initial rotor-position estimation result

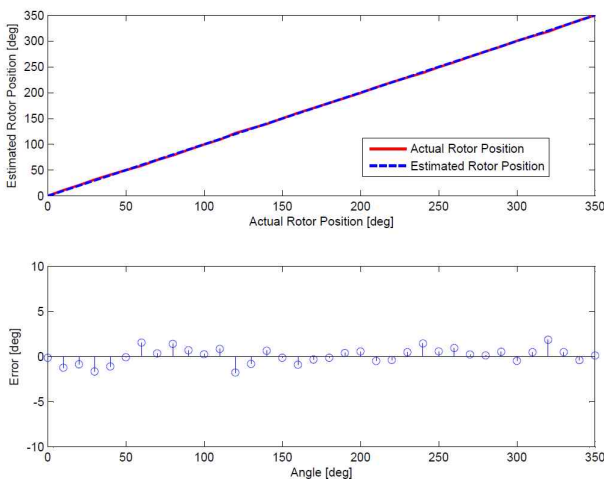
으로 위치를 추정된 결과를 그림 11에 나타내었다. 평균 오차는 650[W] IPMSM의 경우 3.23°이고 7[kW] IPMSM의 경우 2.06°이지만, 60°~120°구간과 240°~300°구간에서는 최대오차가 각각 9.47°와 8.29°로 크게 발생하게 된다.

특정 구간에서 오차 발생은 인덕턴스의 포화현상으로 인해 발생한 것으로 제안된 오차보상 기법 이용하여 보상할 수 있다. 그림 12는 오차 보정후 회전자의 위치 추정결과를 나타내고 있다. 평균오차는 650[W] 전동기의 경우 2.45°이고 7[kW] 전동기의 경우 0.7°이며 각각 오차 구간에서 최대 오차는 5.66°와 1.87°이다.

제안된 방법으로 회전자의 초기위치를 검출하고 전동기를 회전시킨 후 전동기의 상역기전력과 회전자의 위치를 그림 13에 나타내었다. 역기전과 회전자의 위상이 거의 오차 없이 일치하는 것을 확인할 수 있다.



(a) 650[W]



(b) 7[kW]

그림 12 오차 보정 결과
Fig. 12 Error correction results

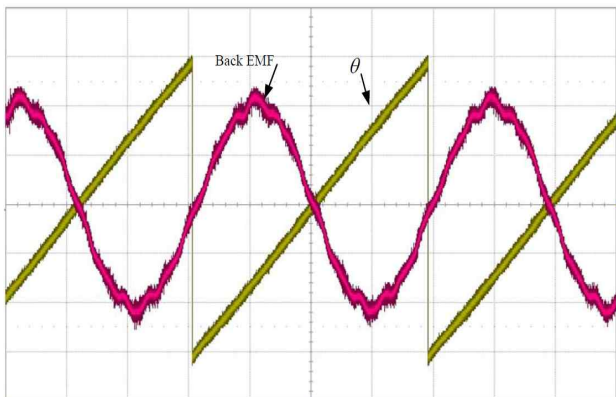


그림 13 역기전력과 회전자 위치
Fig. 13 Back EMF and rotor position

5. 결 론

본 논문에서는 IPMSM의 인덕턴스 포화 현상을 이용하여 절대형 위치센서 없이 회전자의 위치를 추정하는 기법을 제안하였다. 이 방법은 전압펄스를 인가하여 고정자 인덕턴스의 변화에 따른 전류를 측정하여 회전자의 위치를 추정하기 때문에 전동기의 전기적, 기계적 상수에 영향을 받지 않는다. 제안된 방법은 평균 4.6번의 전압 벡터를 인가하여 회전자의 위치를 추정하기 때문에 기존의 방법들에 비해 간단하다.

참 고 문 헌

- [1] 김상훈, *DC, AC, BLDC 모터 제어*, 복두출판사, 2010
- [2] 장지훈, “영구자석 동기전동기 센서리스 제어의 운전 영역확장에 대한 연구”, 서울대학교 공학박사 학위논문, 2006.
- [3] Ostlund S, Brokemper M. “Initial rotor position detections for an integrated PM synchronous motor drive”, *Proceedings of 30th IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, pp. 741-747, 1995.
- [4] Jung-Ik Ha, Kozo Ide, Toshihira Sawa, Seung-Ki Sul, “Sensorless Rotor Position Estimation of an Interior Permanent-Magnet Motor from Initial States”, *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol. 39, No. 3, pp. 761-767, 2003.
- [5] T. Noguchi, K. Yamada, S. Kondo, and I. Takahashi, “Initial rotor position estimation method of sensorless PM motor with no sensitivity to armature resistance”, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 45, pp. 118-125, 1998, Feb.
- [6] 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, pp. 525-527, 2000, Nov/Dec.
- [7] 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, pp. 1532-1538, 2006, Nov/Dec.
- [8] S. Ostlund and M. Brokemper, “Sensorless rotor -position detection from zero to rated speed for an integrated PM synchronous motor drive,” *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, Vol. 32, No. 5, pp. 1158-1165, 1996, Sept./Oct.
- [9] 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.

- [10] 이육진, "위치 센서가 없는 소형 BLDC 전동기의 기동 방법에 관한 연구", 서울대학교 공학석사 학위논문, 2004.

저 자 소 개



박내춘(朴內春)

1982년 1월 24일생. 2006년 강원대 전기 전자공학부 졸업. 2008년 동 대학원 졸업(석사). 현재 강원대 전기전자공학부 박사 과정.



이윤규(李允揆)

1982년 3월 19일생. 2008년 강원대 전기 전자공학부 졸업. 2010년 동 대학원 졸업(석사). 현재 (주)현대엘리베이터 기술연구소 연구원.



김상훈(金相勳)

1964년 9월 11일생. 1987년 서울대 전기 공학과 졸업. 1989년 동 대학원 졸업(석사). 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1994년~1996년 대우 중공업 철도 차량 연구소 선임연구원. 1997년~현재 강원대 전기전자공학부 교수.