

위치 검출기가 없는 영구 자석 전동기의 제어
Part II - 매입형 영구자석 전동기

하 정 익, 설 승 기
서울대학교 전기공학부

Control of Permanent Magnet Motor without any Rotational Transducer
Part II - Interior Permanent Magnet Motor

Jung-Ik Ha and Seung-Ki Sul
School of Electrical Engineering, Seoul National University

Abstract - 본 논문은 위치 및 속도 검출기가 없는 매입형 영구자석 전동기(interior permanent magnet motor, 이하 IPMM)의 위치 제어 기법에 관한 것이다. IPMM은 기본적으로 자기적인 돌극성(magnetic saliency)을 가지고 있지만, 그것은 부하 조건에 의해 쉽게 변하는 특성을 가지고 있기 때문에 제어 성능이 쉽게 떨어질 수 있다. 본 논문에서는 기존의 방법과 같이 그 돌극성, 혹은 임피던스 차이를 이용한다. 하지만, 회전자 위치 정보를 나타내는 임피던스 차이를 극대화하고 어떤 부하 조건에서도 성능을 유지하기 위한 고주파 신호 주입 방법이 제안된다. 제안된 방법은 IPMM의 위치 및 속도 검출기가 없는 센서리스 제어를 가능하게 한다. 단위 전류 당 최대 토크 제어도 제안한다. 제안된 방법을 위해 다양한 부하 조건에서 IPMM의 토크와 고주파 임피던스 특성을 분석한다. 그 특성을 기본으로 하는 속도 및 위치 추정 방법을 제안한다. 제안된 방법은 회전자 위치와 관련된 고주파 임피던스 성분을 추출한다. 실험 결과를 통해 여러 부하 조건에서 제안된 방법의 성능을 확인하였다.

1. 서 론

최근 영구 자석 재료와 유한 요소법의 발달로 인해 다양한 교류전동기가 발명되었다. 특히 매입형 영구 자석 전동기(IPMM)는 자기적인 토크와 릴럭턴스 토크를 동시에 출력하고, 높은 단위 전류 당 토크를 만들어 낼 수 있다. IPMM은 동기적으로 회전하기 때문에 이의 토크, 속도 및 위치 제어를 위해서는 회전식 엔코더(rotary encoder)와 같은 회전 변환기(선형 교류기의 경우 Linear transducer)가 필수적이다. 그러나, 이와 같은 회전 변환기를 설치하거나 그에 따른 배선 처리, 그리고, 이 신호를 속도 및 위치 신호로 변환 시에는 많은 비용과 문제점이 나타난다. 그러므로, 회전 변환기가 없는 제어 즉 센서리스(sensorless) 구동에 관한 연구가 강인성, 신뢰성, 가격 등의 측면에서 연구 되어 왔다.

IPMM을 위한 센서리스 회전자 자속 혹은 회전자 위치 추정 방법은 크게 두 종류로 분류될 수 있다. 그 중 하나는 역기전력을 기본으로 하는 방법이다 이것은 전압 모델을 이용하는 방법[1], 정지 좌표계에서의 관측기를 이용하는 방법[2], 칼만 필터를 이용하는 방법[3], 모델 기준 제어기를 이용하는 방법[4] 등으로 나뉜다. 이 방법들은 정격 속도의 10% 이상의 속도 영역에서는 비교적 좋은 결과를 나타낸다. 그러나, 역기전력의 크기는 회전자의 속도에 비례하기 때문에 상대적으로 전압 외란이 큰 저속 영역(정격 속도의 10% 미만)에서는 이 방법들은 동작하지 않게 된다. 나머지 하나의 방법은 자기적인 돌극성을 이용하는 방법이다. 그 돌극성을 이용하기 위해 전동기에 특별한 전류 또는 전압 신호를 주입하는 방법들이 제안되었다. 어떤 방법들은 회전자의 자속 또는 위치 추정을 위해 샘플링 주기 중에 전압 신호를 주입하기도 한다[5]. 이 방법들은 짧은 시간

안에 전압 신호를 주입하여 인덕턴스를 측정하기 때문에 전동기 상수 변동이나 측정 잡음에 취약하다. 또 다른 방법들은 회전하는 고주파 신호를 이용하는 방법이다 [6]. 이 방법은 고정자 좌표계에서 회전하는 신호를 이용하기 때문에 운전 주파수에 제약이 크다.

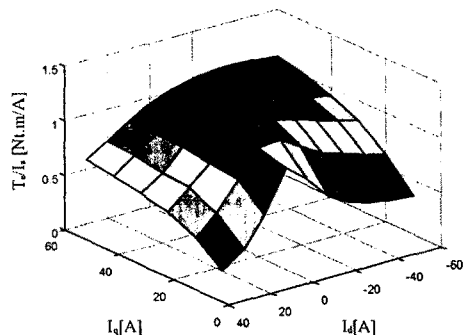
본 논문에서는 고주파 신호를 이용한 센서리스 제어 방법을 제시한다. 본 방법은 IPMM의 고주파 영역에서의 임피던스를 이용하기 위해 다양한 부하 조건에서의 임피던스 특성을 시험하고 분석하였다. 제안된 방법은 회전자 좌표계에서 추정된 d-축에 맥동하는 신호를 주입하여 주입된 주파수에서의 임피던스의 차이를 측정하여 자속의 위치를 추정한다[7]. 고주파 영역에서 IPMM의 임피던스는 부하의 크기에 따라 쉽게 포화될 수 있기 때문에 자기적 돌극성은 부하가 증가함에 따라 감소하거나 사라진다. 이로 인한 센서리스 제어의 실패를 방지하기 위해 추정된 d-축 전류를 이용한 보상 방법이 제시된다. 추정된 d-축 전류의 조절은 교류전동기의 토크 대 전류의 비를 저하시킬 수 있기 때문에 이것이 지나치게 저하되지 않는 범위에서 제어 성능을 얻을 수 있게 제어한다. 제안된 자속 및 위치 추정 방법은 정지 혹은 저속에서의 어떤 부하 조건에도 무관한 센서리스 토크, 속도 및 위치 제어를 가능하게 한다. 실험 결과에서 제안된 방법의 빠르고 정확한 동작을 확인하였다.

2. 본 론

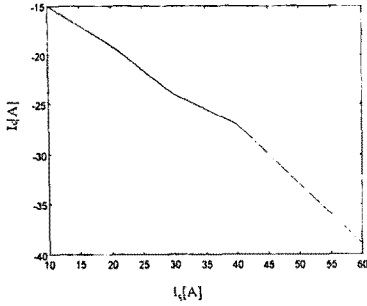
2.1 토크와 고주파 임피던스 특성

그림 1은 표 1에서 열거된 정수를 가지는 IPMM의 시험 결과이다. 그림 1(a)와 (b)는 각각 d-q 축 전류에 따른 단위 전류 당 토크의 크기와 단위 전류 당 최대 토크를 나타내는 d-축 전류를 나타낸다. IPMM은 식 (1)과 같은 토크를 발생시킨다. 최대 토크를 내고 고효율을 유지하려면 그림 1(b)와 같이 d-축 전류를 제어해야 한다.

$$T_e = \frac{3}{4} P(L_d - L_q)i_d + K_e i_q \quad (1)$$



(a) d-q 축 전류에 따른 단위 전류 당 토크의 크기



(b) 단위 전류 당 최대 토크를 나타내는 d-축 전류
 그림 1. IPMM의 출력 토크 특성

IPMM의 고정자 전압식은 다음과 같다.

$$V_d = R i_d + L_d \dot{i}_d - \omega_r L_q i_q \quad (2)$$

$$V_q = R i_q + L_q \dot{i}_q + \omega_r (L_d i_d + K_e) \quad (3)$$

정지 혹은 낮은 속도에서 속도에 의한 전압 항은 무시할 수 있다. 이 경우 고주파 신호가 주입된다면 고주파 임피던스는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Z_{dh} \approx \frac{v_{dh}}{i_{dh}} = R_{dh} + L_{dh} \omega_h \quad (4)$$

$$Z_{qh} \approx \frac{v_{qh}}{i_{qh}} = R_{qh} + L_{qh} \omega_h \quad (5)$$

이 때, R_{dh} , R_{qh} , L_{dh} , L_{qh} 는 각각 주입된 고주파에서의 d축과 q축의 저항 및 인덕턴스임.

D-축 전류가 음일 때 출력 토크가 크고 회전자 구조 상 q-축의 광극이 더 크기 때문에 d-축의 인덕턴스가 크다. 정지 혹은 낮은 속도에서 고주파 임피던스는 인덕턴스가 지배적이다. 따라서, 정지 좌표계에서 측정된 고주파 임피던스는 식(6)과 같이 표현될 수 있다. 이것은 식 (4)와 (5)에서 유도될 수 있다.

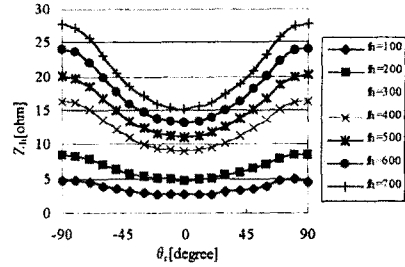
$$Z_h(\theta_r) = Z_{ha} - \frac{1}{2} Z_{hb} \cos(\theta_r + \phi) \quad (6)$$

이 때 ϕ 는 최소 고주파 임피던스를 나타내는 각이다. 그림 2(a)는 무부하 조건에서 회전자의 위치에 따른 고정자 단자 임피던스를 나타내고 있다. 임피던스 측정을 위해 회전자 좌표계에서 맥동하는 신호가 사용되었다. 주파수가 증가함에 따라 임피던스 차이 또한 증가한다. 고주파 임피던스의 평균값 Z_{ha} 는 그림 2(b)에서와 같이 고정자 전류의 크기에 따라 작아진다. 자속의 돌극성을 나타내는 임피던스 차이 Z_{hb} 는 그림 3(a)에서와 같이 부하 전류의 크기에 따라 작아진다. 그러나, 그것은 d-축 전류의 크기에 따라 증가한다. 최소 고주파 임피던스를 나타내는 각 ϕ 는 고정자 전류에 따라 이동한다. 이것은 공간적인 자속 포화를 고려하여 설명될 수 있다.

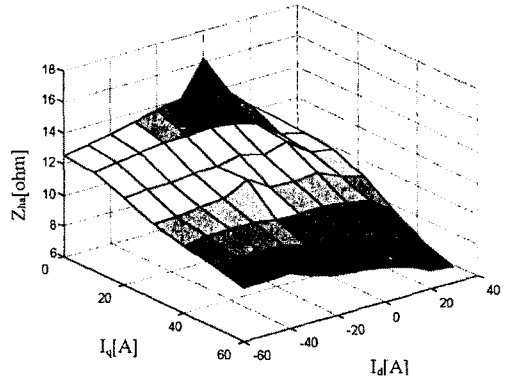
2.2 고주파 주입을 이용한 제어 기법

동기 좌표계에서 맥동하는 신호를 이용하는 센서리스 제어기법은 [7]에서 제안되었다. 고주파 주입 방법에는 전압 주입과 전류 주입의 방법이 있다. 전류 주입 방법은 빠른 동특성을 가진 수 있으나 부하 조건에 따라 임피던스 차이가 감소하는 경우 파부하시에 그 제어 성능을 쉽게 잃어버릴 수 있다. 그러므로, IPMM의 경우 전압 주입 방법이 효과적이다. 그림 4는 제안된 센서리스 방법의 구성도를 나타낸다. 회전자 자속 축에 맥동하는 전압 신호가 주입된다. 자속 기준 제어부(FOC)는 고주파 임피던스 성분을 추출하는 전처리기(preprocessor)와 회전자의 위치 및 속도를 추정하기 위한 수정 제어기(correction controller)로 구성된다.

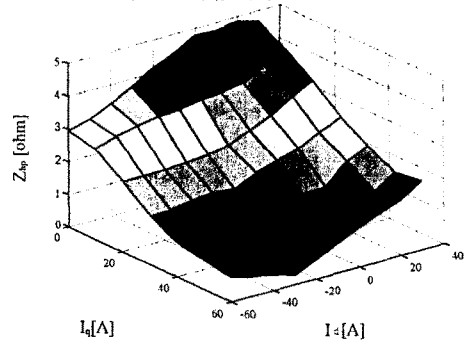
만약 $v_{dh}^* = V_{dh}^* \sin(\omega_h t)$ 의 전압 신호가 주입되고



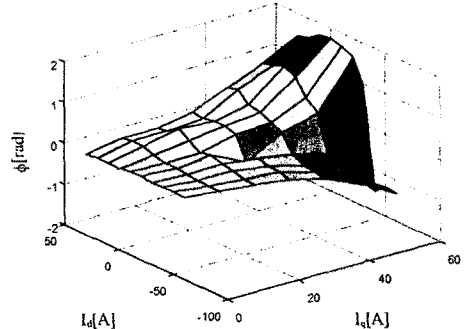
(a) 무부하 조건의 여러 주파수에서의 임피던스.



(b) D-q축 전류에 따른 고주파 임피던스의 평균값 (500Hz 30V 주입)
 그림 2. 시험 전동기의 임피던스



(a) D-q축 전류에 따른 고주파 임피던스의 차이



(b) D-q축 전류에 따른 임피던스가 최소인 각
 그림 3. 고주파 임피던스 특성 (500Hz, 30V주입)

전처리기에서 주입 전류 크기 제어의 신호가 추출된다면 수정 제어기의 입력 신호는 다음과 같다.

$$Err = |i_d^*|^2 - |i_q^*|^2$$

$$\approx \frac{V_{dh}^2 Z_{ha} Z_{hp} \sin 2(\theta_r - \hat{\theta}_r + \phi)}{2(Z_{ha}^2 - Z_{hp}^2 \sin^2(\theta_r - \hat{\theta}_r + \phi))} \quad (7)$$

추정 오차가 작다면 즉 $\hat{\theta}_r \approx \theta_r + \phi$ 이면, 추정 오차는 다음과 같이 근사될 수 있다.

$$Err \approx \frac{V_{dh}^2 Z_{ha} Z_{hp}}{Z_{ha}^2} (\theta_r + \phi - \hat{\theta}_r) \equiv Y_{err} (\theta_r + \phi - \hat{\theta}_r)$$

그리고, 고정자 전류에 의한 편차각 ϕ 이 보상된다면, 회전자 위치의 추정값과 실제값에 대한 주파수 응답 특성은 다음과 같다.

$$\frac{\hat{\theta}_r(s)}{\theta_r(s)} = \frac{K_1 s + K_2}{s^2 + K_1 s + K_2} \quad (8)$$

이 때 수정 제어기 $G(s) = \frac{1}{s} (K_P + \frac{K_I}{s})$ 이고,

$$K_1 = Y_{err} K_P, \quad K_2 = Y_{err} K_I \text{이다.}$$

보상기(compensator)는 IPMM의 측정된 토오크 및 고주파 임피던스를 기본으로 한다. 만약 빠른 동특성이 요구된다면, d-축 전류 지령을 양의 부호로 하고, 주입 신호 크기를 증가시킨다. 이 때 단위 전류 대 토오크는 낮아진다. 높은 효율이 요구될 때는 반대의 경우이다.

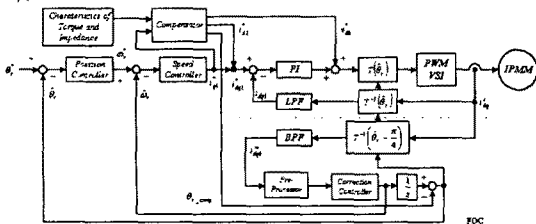


그림 4. 제안된 고주파 주입 방법.

2.3 실험 결과

제안된 방법의 실험을 위한 시스템에서 스위칭 주파수가 5kHz인 PWM VSI가 사용되었고, 제어기의 구현은 TMS320C31 DSP를 이용하였다. 부하 장치로는 속도 신호를 받아 토오크 모드로 동작하는 유도 전동기를 사용하였다. 그림 5는 제안된 센서리스 위치 제어기의 응답을 보여 준다. 각 그림에서 측정된 회전자 위치, 위치 오차, 측정된 속도, 측정된 토오크를 나타내었다. 그림 5(a)는 100% 계단 부하 입력시의 영 위치 제어 응답을 보여주고, 그림 5(b)는 100% 부하시 위치 지령이 $-\pi$ radians에서 π radians로 바뀔 때의 응답을 보여 준다. 부하시에도 제안된 제어기의 위치 오차가 거의 영으로 제한됨을 알 수 있다.

3. 결 론

IPMM은 기본적으로 돌극성을 가지지만, 부하 특성에 따라 그것이 변화한다. 본 논문에서는 이 돌극성 혹은 임피던스 차이를 분석하였다. 이를 이용한 제안된 방법은 센서리스 IPMM에서의 영 혹은 낮은 속도에서의 운전능을 가능하게 한다. 고주파 특성을 이용하고 어떤 부하 조건에서도 강인한 고주파 신호 주입 방법이 제안되었다. 실험 결과를 통해 제안된 방법의 유용성을 확인하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] S. Ogasawara and H. Akagi, "An approach to position sensorless drive for brushless dc motor", IEEE Transaction on Industry Applications, vol. 27, pp. 928-933, Sep./Oct. 1991.
- [2] J. S. Kim and S. K. Sul, "High performance

PMSM drives without rotational position sensors using reduced order observer", Conf. Rec. IEEE IAS Annual Meeting, pp. 75-82, 1995.

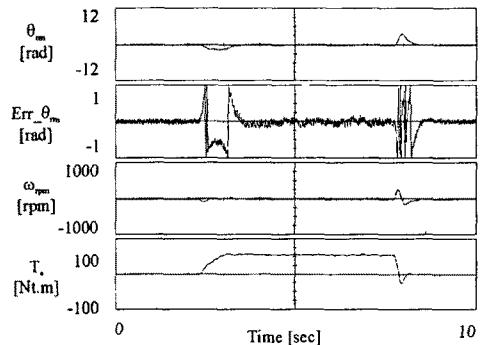
[3] A. B. Kulkarni and M. Ehsani, "A novel position sensor elimination technique for interior permanent-magnet synchronous drive", IEEE Transaction on Industry Applications, vol. 28, pp. 144-150, Jan./Feb. 1992.

[4] M. Schroedl, "Sensorless Control of AC Machines at Low Speed and Standstill Based on the INFORM Method", Conf. Rec. IEEE IAS Annual Meeting, pp. 270-277, 1996.

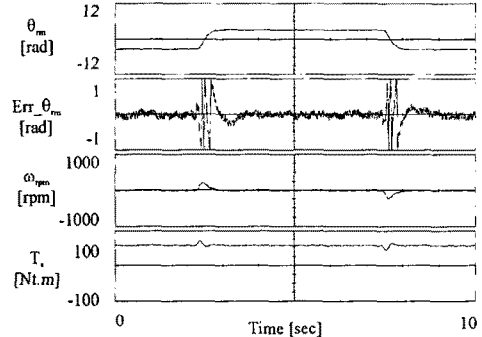
[5] S. Ogasawara and H. Akagi, "Implementation and Position Control Performance of a Position-Sensorless IPM Motor Drive System Based on Magnetic Saliency", IEEE Transaction on Industry Applications, vol. 34, pp. 806-812, Jul./Aug. 1998.

[6] P. L. Jansen and R. D. Lorenz, "Transducerless position and velocity estimation in induction and salient AC machines", IEEE Transaction on Industry Applications, vol. 31, pp. 240-247, Mar./Apr. 1995.

[7] J. I. Ha, S. J. Kang and Seung-Ki Sul, "Position-Controlled Synchronous Reluctance Motor without any Rotational Transducer", IEEE Transaction on Industry Applications, vol. 35, pp. 1393-1398, Nov./Dec. 1999.



(a) 100% 계단 부하시 영 위치 제어



(b) 100% 부하시 $-\pi$ 에서 π 로 위치 지령 변경
그림 5. 제안된 센서리스 위치 제어기의 응답.

표 1. 매입형 영구자석 전동기의 사양

Rated Power	11 [kW]
Number of Poles	6
Rated Current	39.5 [Arms]
Rated Speed	1750 [rpm]
Resistance	0.109 [ohm]
D-축 Inductance	3.60 [mH]
Q-축 Inductance	4.30 [mH]