

위치 검출기가 없는 영구 자석 전동기의 제어

PART 1 - 표면부착형 영구 자석 전동기

장지훈, 하정익, 설승기  
서울대학교 전기공학부

Vector Control of PM Motor without any Rotational Transducer  
PART 1 - Surface Mounted Permanent Magnet Motor

Ji-Hoon, Jang, Jung-Ik, Ha, Seung-Ki, Sul  
School of Electric Engineering, Seoul National University

**Abstract** - 본 논문에서는 속도검출기가 없는 표면부착형 영구자석 동기 전동기의 속도제어 기법을 제안한다. 표면부착형 영구자석 동기 전동기는 그 형상에 있어서는 자기적 돌극성을 가지지 않지만 기본 주파수에 비하여 높은 주파수를 가지는 전압을 전동기의 추정된 회전자의 위치와 같은 축에 인가함으로써 자속의 포화에 의한 고주파 임피던스의 차이를 관측할 수 있다. 본 논문에서는 이 고주파 임피던스의 차이를 이용하여 전동기 회전자의 위치를 추정하고, 추정된 회전자의 위치를 이용하여 속도 및 위치 검출기가 없이도 벡터제어를 수행한다. 또한, 이 고주파 임피던스의 특성은 부하조건에 따라 변하기 때문에 추정하는 회전자의 위치가 부하조건에 따라서 왜곡된다. 본 논문에서는 회전자의 위치를 추정된 후 부하조건에 따라 회전자의 위치를 보정하는 기법도 제안한다. 마지막으로 실험을 통하여 제안된 기법의 타당성을 검증한다.

의 포화가 변화함에 영향을 받는다.

본 논문에서는 [5]와는 달리 일정한 축상에서 맥동하는 고주파 신호를 주입하는 방법으로써 유도 전동기에서 제안되었던 방법[6]을 표면 부착형 영구자석 전동기에 적용하며 표면 부착형 영구자석의 고주파 임피던스의 특성을 분석하고 부하상황에 따른 추정된 회전자의 위치를 보정하는 기법을 사용하여 제안된 센서리스 제어기법이 영속도와 저속 영역과 영속도에서 안정된 성능을 내는 것을 확인한다.

2. 본 론

2.1 임피던스 특성

서론에서 제시한 내용을 확인하기 위하여 표 1.의 표면부착형 영구자석 동기 전동기를 사용하여 고주파를 주입하였을 때, 임피던스의 특성을 살펴보았다.

1. 서 론

영구자석 전동기는 브러쉬, 슬립링을 사용하지 않으며 회전자의 동손이 없어 높은 효율을 얻을 수 있음뿐 아니라 전동기의 동손이 주로 고정자에만 존재하기 때문에 방열설계를 하기가 쉽다. 또한, 근래에 들어 높은 에너지 밀도를 가지는 영구자석이 개발됨에 따라 전동기 자체의 무게, 부피등을 줄일 수 있는 장점까지 더해져 응용범위가 넓어지고 중요성이 커지고 있는 실정이다. 이러한 영구자석 동기 전동기를 안정적으로 제어하기 위해서는 속도 검출기나 위치 검출기를 통해 얻은 전동기 회전자의 위치, 혹은 속도에 관한 정보가 필수적이다. 그러나, 속도 검출기나 위치 검출기는 시스템을 복잡하게 하고 가격과 유지비를 증가시키며 기계적 강인성과 신뢰성을 떨어뜨릴 뿐 아니라 적용 환경에 따라 존재하는 잡음(noise)에 매우 취약하기 때문에 부가의 속도 검출기나 위치 검출기가 없는 벡터제어기법(센서리스 제어기법)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는 실정이다 [1].

가장 간단한 센서리스 제어기법으로는 고정자의 전압을 적분하여 자속의 위치를 추정하는 방법이 있는데 이는 간단하고 효과적인 방법이지만 고정자 전압의 크기가 작아 외란이 두드러지는 저속 영역에서는 사용할 수 없다 [2]. 또한, 확장 칼만필터를 이용하여 자속의 위치를 추정하는 방법 [3]과 고정자 INFORM Method를 이용한 방법 [4]이 있는데, [3]의 방법은 복잡하며 만족할 만한 성능을 얻을 수 없다. [4]의 방법은 상 인덕턴스의 돌극성을 이용하지만 전류의 미분값을 이용하기 때문에 잡음 등에 취약하다.

이런 방법과는 달리 전동기에 고주파의 신호를 인가하고 대응하는 신호를 검출하여 제어에 이용하는 기법이 있다 [5-6]. [5]의 방법은 전동기에 고주파수로 회전하는 전압벡터를 인가하여 그에 따른 인덕턴스의 차이분 제어에 이용하는 방법으로 저속 영역뿐 아니라 영속도에서도 어느 정도의 성능을 보이지만 부하상황에서는 자속

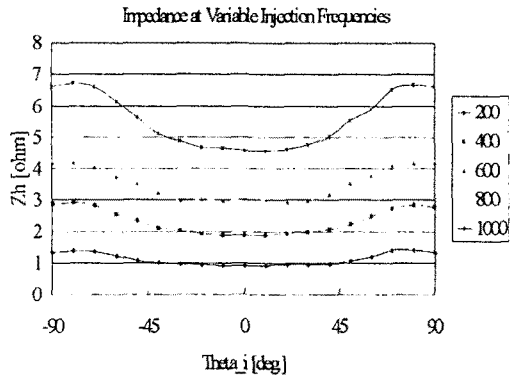


그림 1. 주입 주파수에 따른 임피던스 특성

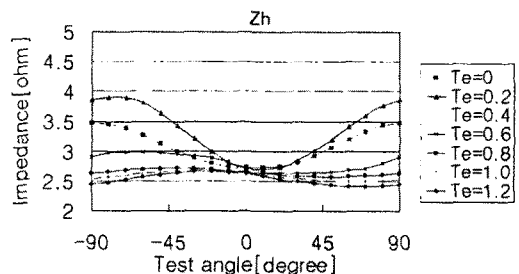


그림 2. q축 전류 지령치에 따른 임피던스의 특성

그림 1.은 영구자석 전동기의 회전자를 고정한 후에 주입 주파수를 200Hz에서 1000Hz까지 변화시키고 각 주파수에서 전압대 주파수의 비율, 즉 자속의 크기가 일

정하도록 주파수에 따라 크기를 가변하여 주입한 후 주입하는 위치에 따른 임피던스의 추이를 관찰한 것이다. 동기 전동기에서는 무부하시에는 슬립 주파수(slip-frequency)가 없으므로 회전자의 위치가 바로 공극자속(air-gap flux)의 위치가 된다. 주입각이 0° (d축)에서 임피던스가 가장 작고 90° 혹은 -90° 에서 임피던스가 가장 큰 것을 알 수 있고, 주입 주파수가 높을수록 d축과 q축의 임피던스 차이가 큼을 알 수 있다.

그림 2는 d축 전류 지령치를 일정하게 유지하고 q축 전류 지령치, 즉 토오크분 전류 지령치를 정격의 0%에서 120%까지 20%씩 증가시키면서 관찰한 임피던스의 추이이다. 토오크분 전류 지령치가 증가할수록 d축과 q축 사이의 임피던스 차이가 급격하게 감소하는 것을 볼 수 있으며 임피던스가 최소가 되는 위치 또한 이동하는 것을 알 수 있다. 따라서, 전동기에 부하가 인가되었을 때에는 회전자의 위치를 추정할 때 오차가 발생할 수 있으므로 부하조건에 따라 추정된 위치를 보정해 주어야 한다.

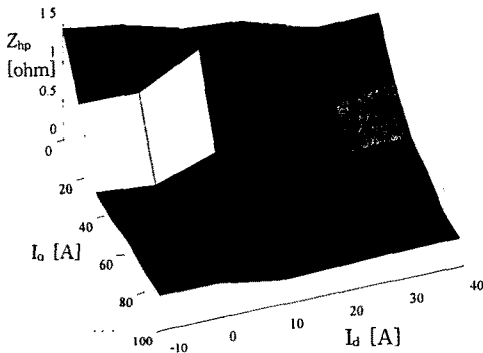


그림 3. d,q축 전류 지령치에 따른 임피던스의 차이

그림 3은 40V, 800Hz의 전압을 주입하고 d축 및 q축의 전류 지령치를 변화시키면서 임피던스의 특성을 살펴본 것이다. 그림 3.으로부터 d축 전류 지령치가 달라지면 q축 전류 지령치가 증가함에 따른 임피던스 차이의 감소 추세가 달라지는 것을 알 수 있다. 이를 바탕으로 q축 전류 지령치에 따라 임피던스 차이를 나타내는 d축 전류 지령치를 선택할 수 있다.

## 2.2 임피던스 차이를 이용한 제어기법

표면 부착형 영구자석 전동기의 고정자측 전압방정식과 고주파 임피던스는 식 (1),(2)와 같다

$$\begin{aligned} v_d &= R i_d + L_d \dot{i}_d - \omega_r L_q i_q \\ v_q &= R i_q + L_q \dot{i}_q + \omega_r (L_d i_d + K_e) \end{aligned} \quad (1)$$

$K_e$  ([Nm/A])는 전동기의 토오크 상수를 나타낸다.

$$\begin{aligned} Z_{dh} &\approx \frac{v_{dh}}{i_{dh}} = R_{dh} + L_{dh} \omega_h \\ Z_{qh} &\approx \frac{v_{qh}}{i_{qh}} = R_{qh} + L_{qh} \omega_h \\ Z_h(\theta_r) &= Z_{ha} - \frac{1}{2} Z_{hp} \cos 2(\theta_r + \phi) \end{aligned} \quad (2)$$

$\phi$ 는 고주파 임피던스가 최소일 때의 위치이다.

식 (1)과 (2)를 바탕으로 회전자의 위치를 추정하는 데에 필요한 error signal을 유도할 수 있는데, 전압을 주입하는 방식이므로 측정된 전류에서 주입한 전압과 같은 주파수의 전류 성분만을 추출하여 축변환을 하면 식 (3)과 같은 error signal을 얻어낼 수 있다.

$$\begin{aligned} Err &\equiv |i_d^m| - |i_q^m| \\ &\approx \frac{\sqrt{2} V_{dh}^* Z_{hp}}{Z_{ha}^2 - \frac{Z_{hp}^2}{4}} \sin 2(\theta_r + \phi - \hat{\theta}_r) \end{aligned} \quad (3)$$

식(3)에서  $\hat{\theta}_r \approx \theta_r + \phi$  이므로  $Err$ 은 다음의 식(4)와 같이 간단히 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} Err &\approx \frac{2\sqrt{2} V_{dh}^* Z_{hp}}{Z_{ha}^2} (\theta_r + \phi - \hat{\theta}_r) \\ &\equiv Y_{err}(\theta_r + \phi - \hat{\theta}_r) \end{aligned} \quad (4)$$

또한,  $\theta_r(s)$ 로부터  $\hat{\theta}_r(s)$ 까지의 전달함수와 수정 제어기의 식은 각각 다음의 식(5),(6)와 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\hat{\theta}_r(s)}{\theta_r(s)} &= \frac{K_1 s + K_2}{s^2 + K_1 s + K_2} \\ \text{단, } K_1 &= Y_{err} K_p, \quad K_2 = Y_{err} K_I \end{aligned} \quad (5)$$

$$G(s) = \frac{1}{s} \left( K_p + \frac{K_I}{s} \right) \quad (6)$$

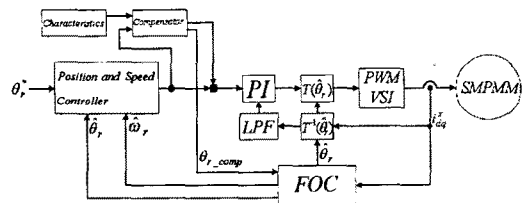


그림 4. 시스템의 블록 다이어그램

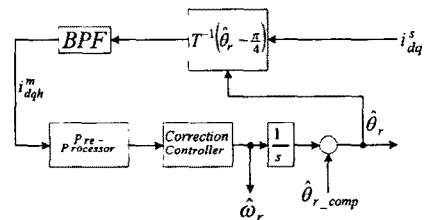


그림 5. FOC 내부의 블록 다이어그램

그림 4.와 그림 5.는 센서리스 벡터제어를 수행하기 위하여 구성된 시스템과 제한된 센서리스 벡터제어기법이 적용된 FOC(Flux Oriented Controller)의 블록 다이어그램이다. 시스템에는 일반적인 벡터제어 시스템과는 달리 측정된 임피던스의 특성을 분석한 결과와 분석된 결과를 이용하여 추정된 위치를 보상하는 보상기(Compensator)가 추가되어 있고, 전동기에는 제어에는 사용되지 않지만 실제 전동기 회전자의 속도와 위치를 측정하기 위하여 증분형 엔코더(Incremental Encoder)가 부착되어 있다. 그림 5.의 FOC는 측정된 전류 중 주입 주파수 성분만을 추출하여 축변환 후 회전자의 위치와 속도를 추정하는 부분이다.

## 2.3 실험 결과

### 2.3.1 전동기 사양과 시스템 구성

2.2에서 제안한 제어기법을 확인하기 위하여 2.1에서와 같은 전동기를 사용하여 실험을 하였다. 표 1.은 실험에 사용된 전동기의 사양이고 그림 6.은 시스템의 구성이다.

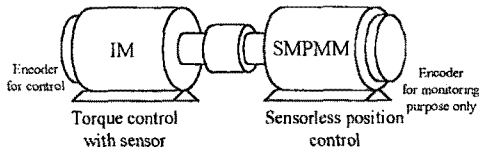


그림 6. 시스템의 구성

부하로 사용된 유도 전동기(IM)는 Yaskawa Elec.의 11kW 전동기이고 엔코더를 사용한 벡터제어를 수행하여 토오크 제어 모드로 운전되면서 부하를 인가하도록 하였다. controller는 Texas Instruments사의 DSP chip인 TMS320C31을 사용하였고 PWM의 스위칭 주파수는 5kHz이다.

### 2.3.2 실험결과

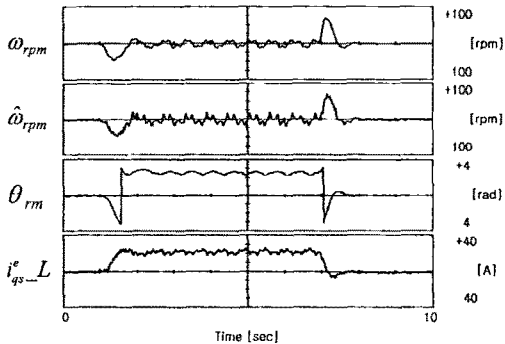


그림 7. 30% 부하 상황에서 영속도 제어

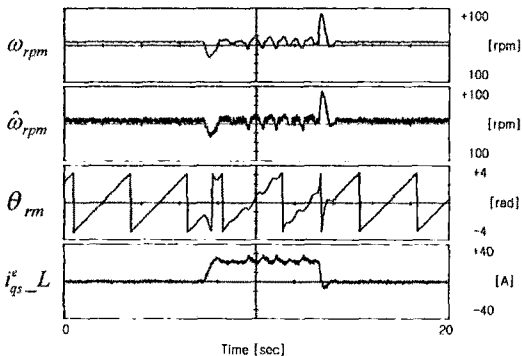


그림 8. 30% 부하상황에서 20rpm 속도제어

그림 7.은 영속도 제어를 수행하고 있는 상황에서 정격의 30% 부하가 스텝(step)으로 걸렸다가 빠지는 상황의 실험 결과이다. 엔코더로 관찰한 실제 전동기의 속도( $\omega_{rpm}$ )과 제안한 기법으로 추정된 속도( $\hat{\omega}_{rpm}$ )이 일

치하는 것을 알 수 있다. 그림 8.은 20rpm으로 속도제어를 수행하는 도중 정격의 30% 부하가 스텝으로 걸렸다가 빠지는 상황의 실험결과이다. 그림 7.의 결과와 마찬가지로 추정속도가 실제속도를 잘 추종하는 것을 알 수 있다.

## 3. 결 론

본 논문에서는 표면부착형 영구자석 동기 전동기의 센서리스 제어를 수행하기 위하여 유도 전동기에 적용되었던 고주파 주입방법을 사용하였다. 이를 위하여 고주파 전압을 주입하였을 때 전동기의 임피던스 특성을 다양한 주입 주파수와 주입 전압에 따라 살펴보고 전동기의 형상 자체로는 돌극성이 없지만 고주파 신호 주입시 그에 따르는 임피던스의 차이가 발생하는 것을 확인하였다. 또한, 고주파 임피던스의 특성은 부하상황에 따라 그 차이가 현저하게 줄어들고 임피던스의 추이가 왜곡되는 것을 알 수 있었다. 이에 따라 정확한 위치의 추정을 위하여 부하상황에 따라서 추정된 회전자의 위치를 보정하는 기법을 사용하였다.

제안된 기법의 타당성을 검증하기 위하여 범용의 전동기를 사용하여 실험하였으며 제안된 기법으로 영속도와 저속 영역에서 만족할만한 성능을 나타냄을 확인할 수 있었다.

### [참 고 문 헌]

- [1] Peter Vas, "Sensorless Vector Control and Direct Torque Control", Oxford University Press, 1998
- [2] D. Antic, J.B. Klaassens, W. Deleroi, "Side Effects in Low-Speed AC Drives", PESC '94 Rec., IEEE, pp.998-1002, 1994
- [3] R. Dhaouadi, N. Mohan, L. Norum, "Design and Implementation of an Extended Kalman Filter for the State Estimation of a Permanent Magnet Synchronous Motor", IEEE Trans. on PE, vol. 6, No. 3, pp. 491-497, 1991
- [4] M. Schroedl, "Sensorless Control of AC Machines at Low Speed and Standstill Based on the "INFORM" Method", Proc. of IEEE IAS Ann. Mtg. pp. 270-277, 1996
- [5] A. Consoli, G. Scarcella, A. Testa, "Sensorless Control of PM Synchronous Motors at Zero Speed", Conf. Rec. IEEE IAS Ann. Mtg. pp. 1033-1040, 1999
- [6] J.I. Ha, S.K. Sul, "Sensorless Field Orientation Control of an Induction Machine by High Frequency Signal Injection", Conf. Rec. IEEE IAS Ann. Mtg. pp. 426-432

표 1. 표면부착형 영구자석 동기 전동기의 사양

Rated Power	11 [kW]
Rated Torque	70 [Nm]
Number of Pole	8
Rated Current	58.6 [A(rms)]
Rated Speed	1500 [rpm]
Torque Coefficient	1.25 [Nm/A(rms)]
Inertia	0.0281 [kg-m <sup>2</sup> ]
Resistance(per phase)	0.0217 [ohm]
Inductance(per phase)	0.49 [mH]