

## 개선된 순시 무효전력 보상기와 함께 적용된 적응 역기전력과 전류 모델 관측기 적용한 돌극형 영구자석 동기 전동기의 센서리스 제어

이준민\*, 박순제\*, 홍주훈\*, 김우희\*, 김영석\*  
인하대학교\*

### Improved Instantaneous Reactive Power Compensator Applied Sensorless Control of IPMSM with Adaptive Back EMF and Current Model Observer

Joonmin Lee\*, Soon-je Park\*, Ju-Hoon Hong\*, Woohee Kim\*, Young Seok Kim\*  
Inha University\*

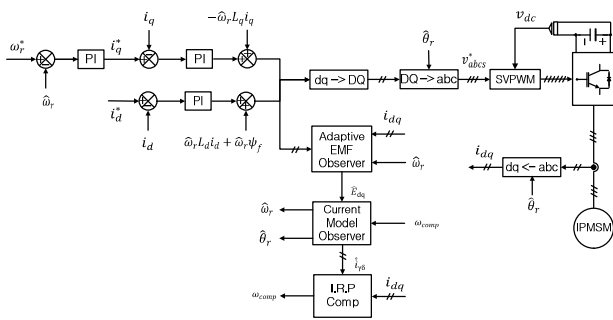
**Abstract** - This paper presents the sensorless control method that employs the adaptive back-EMF(Electromotive Force) and current model observer of interior permanent magnet synchronous motor(IPMSM). The estimated back EMF considering a saliency is obtained by using the adaptive control method. The estimated EMF is inputted to the current model observer which is connected in series with adaptive back EMF estimator and is used to estimate the position and speed of the rotor. In order to improve the shortcomings of conventional method using the current error components multiplied in the compensation constant, the modified instantaneous reactive power compensator is applied. The validity of the control system presented is verified by the simulation.

#### 1. 서 론

영구자석 동기 전동기(PMSM)는 큰 공극자속 밀도와 고효율 밀도, 고효율의 특성과 높은 토크 및 제어성으로 인하여 저용량의 서보 시스템에서부터 고용량의 추진 장치 시스템에까지 다양한 산업 분야에 응용된다[1].

영구자석 동기기를 제어하기 위해선 회전자속의 속도와 위치를 아는 것이 필수적이다. 그러나 회전자의 위치와 속도를 측정하기 위한 센서를 사용하는 것은 전체 시스템의 가격을 높이고, 신뢰도를 저하시키며 시스템의 가격을 상승시킨다.

본 논문은 위치 센서를 사용하지 않는 개선된 순시무효전력 보상기가 적용된 적응 역기전력과 전류 모델 관측기를 사용한 돌극형 영구자석 동기 전동기의 센서리스 제어 시스템을 제안한다. 제안된 시스템의 블록도는 <그림 1>에 보인다.



<그림 1> 제안된 영구자석 동기기 센서리스 제어 시스템

#### 2. 본 론

##### 2.1 영구자석 동기 전동기 모델링

회전자 기준 d-q 좌표계에서 돌극성을 가지는 영구자석 동기전동기의 동기좌표계 전압방정식은 다음과 같다.[2]

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_d & -\omega_r L_q \\ \omega_r L_d & R_s + pL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \omega_r \psi_f \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서,  $v_d, v_q$ 은 회전자 좌표계에서 표현된 고정자 d-q축 전압;  $R_s$ 는 고정자 저항,  $L_d, L_q$ 는 d-q축 인덕턴스,  $i_d, i_q$ 는 회전자 좌표계에서 표현된 고정자 d-q축 전류,  $\psi_f$ 는 역기전력 상수이다.

식 (1)의 모델 방정식은 고성능의 벡터 컨트롤을 수행하기 위하여 일반적으로 사용되는 방정식이다. 그러나 d-q축의 전압방정식은 회전자 위치에 관한 정보를 포함하고 있지 않으며 임피던스 행렬은 대칭이 아니므로 이 수식을 이용하여 센서리스 제어를 수행할 수 없다.

임피던스 행렬을 대칭으로 바꾸고 회전자의 위치를 검출하기 위하여 식 (1)을 확장 역기전력 형태로 변환한 뒤 추정된  $\gamma-\delta$  좌표계로 변환하면 다음과 같은 수식을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} v_\gamma \\ v_\delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_d & -\omega_r L_q \\ \omega_r L_d & R_s + pL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\gamma \\ i_\delta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_\gamma \\ e_\delta \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} e_\gamma &= -E_{ex} \sin \theta_e - (\hat{\omega}_r - \omega_r) L_d i_\delta \\ e_\delta &= E_{ex} \cos \theta_e + (\hat{\omega}_r - \omega_r) L_d i_\gamma \end{aligned} \quad (3)$$

여기서,  $v_\gamma, v_\delta$ 는 추정 좌표계에서 표현한 고정자  $\gamma-\delta$ 축 전압;  $i_\gamma, i_\delta$ 는 추정 좌표계에서 표현한 고정자  $\gamma-\delta$ 축 전류,  $E_{ex}$ 는 확장 역기전력  $\omega_r$ 은 회전자 속도;  $\hat{\omega}_r$ 은 추정된 회전자 속도;  $\theta_e$ 는 실제 회전자와 추정된 회전자의 위치 오차 성분이다. 식 (2)를 다음과 같이 정류의 미분에 관한 항으로 정리하여 기준 모델의 형태로 변환한다.

$$p \begin{bmatrix} i_\gamma \\ i_\delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_d} & \omega_r \frac{L_q}{L_d} \\ -\omega_r \frac{L_q}{L_d} & -\frac{R_s}{L_d} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\gamma \\ i_\delta \end{bmatrix} + \frac{1}{L_d} \begin{bmatrix} v_\gamma \\ v_\delta \end{bmatrix} - \frac{1}{L_d} \begin{bmatrix} e_\gamma \\ e_\delta \end{bmatrix} \quad (4)$$

##### 2.2 적응 역기전력 관측기

식 (2)를 참고하여 다음과 같은 적응 모델을 설계한다.

$$p \begin{bmatrix} \hat{i}_\gamma \\ \hat{i}_\delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_d} & \hat{\omega}_r \frac{L_q}{L_d} \\ -\hat{\omega}_r \frac{L_q}{L_d} & -\frac{R_s}{L_d} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_\gamma \\ \hat{i}_\delta \end{bmatrix} + \frac{1}{L_d} \begin{bmatrix} v_\gamma \\ v_\delta \end{bmatrix} - \frac{1}{L_d} \begin{bmatrix} \hat{e}_\gamma \\ \hat{e}_\delta \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서,  $\hat{i}_\gamma, \hat{i}_\delta$ 는 추정된 추정 좌표계 고정자  $\gamma-\delta$ 축 전류;  $\hat{e}_\gamma, \hat{e}_\delta$ 는 추정된 역기전력이다. 식 (4)에서 (5)를 뺀 전류의 오차 방정식으로부터 다음과 같은 오차 상태 방정식을 유도 할 수 있다.

$$\dot{\epsilon} = \hat{A}\epsilon + W \quad (6)$$

$$\text{여기서, } \hat{A} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_d} & \hat{\omega}_r \frac{L_q}{L_d} \\ -\hat{\omega}_r \frac{L_q}{L_d} & -\frac{R_s}{L_d} \end{bmatrix}, \quad W = \begin{bmatrix} \Delta e_\gamma \\ \Delta e_\delta \end{bmatrix}$$

식 (6)의 오차방정식의 시 불변 시스템의 순방향 전달 함수가 강정실(strictly positive real,SPR)하고 비선형 제한 시스템부가 다음과 같은 Popov의 적분 부등식을 만족한다면 제안된 제어 시스템은 안정하게 된다[3].따라서 적응 법칙에 의해 추정 역기전력은 다음과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned} \hat{e}_\gamma &= K_{i.e_\gamma} \int_0^t \left(-\frac{1}{L_d} \epsilon_\gamma\right) dt + K_{p.e_\gamma} \left(-\frac{1}{L_d} \epsilon_\gamma\right) + \hat{e}_\gamma(0) \\ \hat{e}_\delta &= K_{i.e_\delta} \int_0^t \left(-\frac{1}{L_d} \epsilon_\delta\right) dt + K_{p.e_\delta} \left(-\frac{1}{L_d} \epsilon_\delta\right) + \hat{e}_\delta(0) \end{aligned} \quad (7)$$

### 2.3 전류 모델 관측기

적용 알고리즘을 통해 돌극성을 포함하는 실제의 역기전력과 추정된 역기전력의 오차 성분은 0으로 수렴하며 이 때 추정된  $\gamma-\delta$  좌표계의 전류와 실제 d-q축 전류는 같아진다. 만약 실제 전동기의 전류와 추정된 적용 모델의 전류의 오차성분이 존재 할 경우 전류의 오차 방정식은 다음과 같이 표현된다.[1]

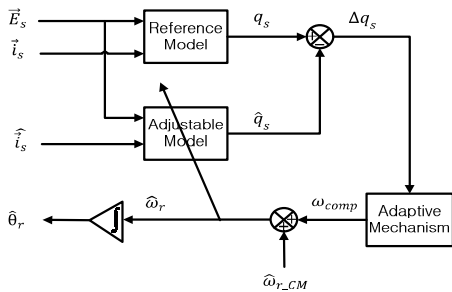
$$\begin{aligned} \Delta i_\gamma &= i_\gamma(k) - \hat{i}_\gamma(k) = \frac{T_s}{L_d} E_{ex}(k) \sin\theta_e \\ \Delta i_\delta &= i_\delta(k) - \hat{i}_\delta(k) = -\frac{T_s}{L_d} (E_{ex}(k) - \hat{E}_{ex}(k)) \end{aligned} \quad (8)$$

제안된 논문은 기존의 논문이 전류의 오차 성분에 위치 오차에 비례하는 상수를 곱해서 회전자 위치와 속도를 추정하는 방법을 개선하기 위하여 2.4절에 제안된 순시 무효전력 보상기를 적용한 추정기를 식 (9)와 같이 적용한다. 회전자의 위치는 식 (9)를 적분하여 구할 수 있다.

$$\omega_r(k) = \frac{\hat{\theta}_r(k) - \hat{\theta}_r(k-1)}{T_s} = \frac{\hat{E}_{ex}}{\psi_f} + \omega_{r\_comp} \quad (9)$$

$$\hat{\theta}_r(k) = \hat{\theta}_r(k-1) + \hat{\omega}_r \cdot T_s \quad (10)$$

### 2.4 개선된 순시 무효전력 보상기



<그림 2> 개선된 순시 무효전력을 이용한 오차 보상기

기존의 순시 무효전력을 보상기는 무효전력을 d축 전류와 역기전력 상수만의 곱만으로 가정한다. 이는 회전자의 위치 오차가 존재 할 시 발생하는 돌극성 역기전력 성분의 오차를 고려할 수 없다. 기존의 위치 오차 보상기의 성능을 개선하기 위하여 본 논문은 역기전력 추정기에서 얻어진 추정 역기전력을 이용하여 위치 오차를 보상한다.

추정전류가 실제 전류보다 앞선 경우와 추정전류가 실제 전류보다 뒤진 경우의 보상값을 결정하기 위해 식 비례이득과 적분이득을 결정하여 다음과 같이 보상값  $\omega_{comp}$ 를 결정하고 이를 이용해 식 (11)의 추정 속도를 보상한다.

$$\omega_{comp} = (K_{cp} + \frac{K_{ci}}{p}) \cdot \Delta q_s \quad (11)$$

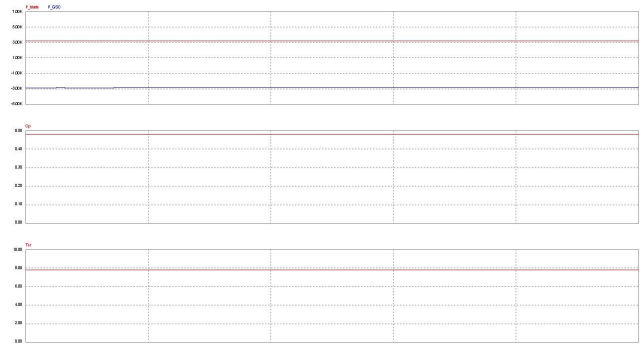
여기서,  $K_{cp}$ ,  $K_{ci}$ : 상수;  $\Delta q_s$ 는 무효전력의 오차 성분이다.

### 3. 시뮬레이션

제안된 시스템의 성능을 검증하기 위하여 모의 실험은 PSIM tool을 이용하였다. 모의 실험에 사용된 돌극형 영구자석 동기 전동기의 파라미터는 표 1과 같다. 인버터의 스위칭 주파수와 제어의 sampling rate는 10kHz이다.

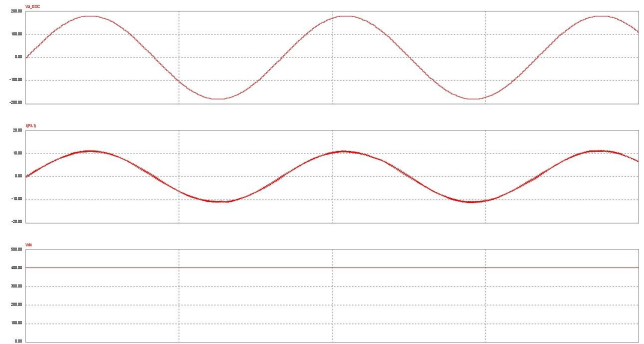
<표 1> 돌극형 영구자석 동기 전동기 파라미터

Parameter	Value
정격 용량	3.7 [KW]
정격 상 전압	380 [V-Y]
정격 속도	1800 [rpm]
고정자 저항	0.324 [ $\Omega$ ]
고정자 d축 인덕턴스	0.0101 [H]
고정자 q축 인덕턴스	0.02737 [H]
영구자석 쇠교 자속	0.628 [Wb]
극수	4 [극]



<그림 3> 지령속도 500rpm

기존의 위치 오차 보상 순시 무효전력을 이용한 보상 or 고속



<그림 4> 지령속도 500rpm

순시 무효전력을 이용한 보상

#### 시뮬레이션 결과:

<그림 3>의 결과를 보면 알 수 있듯이 추정 위상각과 실제 위상각이 일치하며 추정 속도와 실제 속도 또한 125[rad/sec]로 일치하는 것을 확인 가능하다. <그림 5>의 결과를 보면 알 수 있듯이 정격 유속 13[m/s]에서 블레이드에서 3[kW]의 정격파워가 나오며 그 파워가 계통으로 넘어가는 것을 확인 가능하다. Tsr을 볼때 전력변환계수가 0.477 정도로써 최적동작지점에서 동작함을 알 수 있다. <그림 6>는 계통측 인버터를 단위 역률로 제어함으로써 전압 전류의 위상차가 동상으로 최대 파워를 계통으로 전달하는 것을 확인 가능하며, DC 링크 전압은 지령 전압에 맞게 400[V]로 직류 링크가

#### 결론

본 논문은 적용 역기전력 추정기와 전류 모델 관측기를 사용한 돌극형 영구자석 동기기의 센서리스 제어를 제안한다. 추정 역기전력을 사용하여 위치 오차 성분을 보상하는 본 논문은 기존 순시무효전력 보상기와 전류 모델 기반의 센서리스 기법을 개선하였다. 제안된 논문의 정확성을 차후 실험을 통해 검증하도록 하겠다.