

**약계자 영역에서의 순시 무효전력을 이용한  
매입형 영구자석 동기전동기의 센서리스 속도제어**

강형석\*, 김원석\*, 김영조\*\*, 김영석\*  
\*인하대학교 전기공학과, \*\*유한대학 컴퓨터제어과

**Sensorless speed Control of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor  
based on Instantaneous Reactive Power in the Field-Weakening Region**

Hyung-Seok Kang\*, Won-Seok Kim\*, Young-Jo Kim\*\*, Young-Seok Kim\*

\*Dept. of Electrical Engineering of Inha University, \*\*Dept. of Computer Aided control Engineering of Yuhan College

**Abstract** - For the interior permanent magnet synchronous motor(IPMSM) drive to operate above the base speed in the constant horsepower region, field weakening control is applied. However, the field weakening control was not almost applied to sensorless control of the interior permanent magnet synchronous motor. In this paper, field weakening control is applied to the sensorless control of IPMSM based on an instantaneous reactive power. The effectiveness of the proposed system is verified by the experimental results.

**1. 서 론**

IPMSM은 전자기 토크 성분 외에도 전동기의 돌극성으로 인한 자기저항 토크 성분이 함께 존재할 뿐만 아니라 토크립턴스 차이에 의한 토크가 존재한다. 이로 인해 작은 체적의 회전자로 큰 토크를 발생시킬 수 있으며, 구조가 견고하고, 작은 유효공극으로 전기자 반작용이 강하므로 일정 토크 영역에서의 운전뿐만 아니라 일정 출력 영역에서 고속운전도 가능하다. 그러나 IPMSM은 회전자에 부착되어진 영구자석으로부터 자속을 공급받기 때문에 원활한 토크 제어를 위해서는 회전자의 정확한 위치 정보를 갖고 전류 제어를 해야 한다. 회전자 위치는 정밀하고 연속적인 시스템의 제어 알고리즘에 필요하다. 정확한 위치정보를 얻기 위해서는 회전자에 절대 엔코더나 레졸버 등의 전자식 위치검출기를 부착하여야 한다. 이러한 위치검출기는 회전하는 위치를 연속적으로 검출할 수 있다는 장점이 있으나 그 가격이 매우 고가이기 때문에 전체 시스템의 가격을 크게 상승시킬 뿐만 아니라 별도의 소프트웨어와 복잡한 하드웨어가 제어기에 구성되어야 하는 단점을 가진다. 따라서 IPMSM의 속도 및 위치 센서리스 제어에 대한 연구가 활발히 진행되고 있고, 속도와 위치 관측기에 대한 다양한 개념이 제시되었다[1]-[3]. 그리고 매입형 영구자석 동기전동기는 정격속도 이상이나 DC링크 전압이 작은 특수한 상황에서 약계자 제어가 요구된다. 그러나 이러한 약계자 제어가 센서리스 알고리즘에 적용된 사례는 거의 없다.

본 논문에서는 순시무효전력을 이용한 센서리스 알고리즘[4]에 약계자 제어 알고리즘을 적용하였고 그 타당성을 실험을 통해 증명하였다.

**2. 본 론**

**2.1 전류관측기의 구성**

IPMSM의 고정자 좌표계의 일반적인 전압 방정식에서 전류 관측기를 구성하기위해 정리하면 식(1)과 같다.

$$\dot{i}_\alpha = -\frac{R}{L_d}i_\alpha - \frac{\omega(L_d - L_q)}{L_d}i_\beta + \frac{\sin\theta K_E \omega}{L_d} + \frac{v_\alpha}{L_d} \quad (1)$$

$$\dot{i}_\beta = -\frac{R}{L_q}i_\beta - \frac{\omega(L_d - L_q)}{L_q}i_\alpha - \frac{\cos\theta K_E \omega}{L_q} + \frac{v_\beta}{L_q}$$

여기서,  $v_\alpha, v_\beta$  : 고정자 좌표계의 D축과 Q축 입력전압

$i_\alpha$  : D축 전류,  $i_\beta$  : Q축 전류,  $\omega$  : 전동기의 속도  
 $\theta$  : 전동기의 위치,  $L_d$  : d축 인덕턴스,  $L_q$  : q축 인덕턴스  
 $K_E$  : 역기전력 상수,  $R$  : 고정자 저항

위의 식으로 전류 관측기를 설계하면 다음과 같다.

$$\hat{i}_\alpha = -\frac{R}{L_d}\hat{i}_\alpha - \frac{\hat{\omega}(L_d - L_q)}{L_d}\hat{i}_\beta + \frac{\sin\theta K_E \hat{\omega}}{L_d} + \frac{v_\alpha}{L_d} + k_1 e_\alpha$$

$$\hat{i}_\beta = -\frac{R}{L_q}\hat{i}_\beta - \frac{\hat{\omega}(L_d - L_q)}{L_q}\hat{i}_\alpha - \frac{\cos\theta K_E \hat{\omega}}{L_q} + \frac{v_\beta}{L_q} + k_2 e_\beta \quad (2)$$

여기서,  $\hat{i}_\alpha, \hat{i}_\beta$  : D축과 Q축 추정전류,  $k_1, k_2$  : 상수

$$e_\alpha = \hat{i}_\alpha - i_\alpha, \quad e_\beta = \hat{i}_\beta - i_\beta \quad (3)$$

$$\dot{e}_\alpha = -\frac{R}{L_d}e_\alpha - \frac{L_d - L_q}{L_d}(\hat{\omega} - \omega)e_\beta + \frac{K_E}{L_d}(\hat{\omega} \sin\hat{\theta} - \omega \sin\theta) + k_1 e_\alpha$$

$$\dot{e}_\beta = -\frac{R}{L_q}e_\beta - \frac{L_d - L_q}{L_q}(\hat{\omega} - \omega)e_\alpha + \frac{K_E}{L_q}(\hat{\omega} \cos\hat{\theta} - \omega \cos\theta) + k_2 e_\beta \quad (4)$$

식(4)로부터 속도오차가 0으로 수렴할 경우, 식(2)의 관측기의  $k_1, k_2$ 가 극배치(pole placement)기법을 통해 안정하도록 설정된다면, 전류 오차는 0으로 수렴되어지며, 역기전력 오차를 최소화하기 위한 알고리즘을 2.2절에 나타냈다.

**2.2 순시무효전력을 이용한 속도추정 오차의 보상**

회전자 좌표계로 표현한 IPMSM의 회전자축 전압방정식은 식(5)와 같으며, 회전자 속도는 식(6)과 같이 산출된다.

$$v_d = (R + pL_d)i_d - \omega L_q i_q, \quad v_q = (R + pL_q)i_q + \omega L_d i_d + K_E \omega \quad (5)$$

여기서,  $v_d, v_q$  : 회전자 좌표계의 d축과 q축 입력전압

$i_d$  : d축 전류,  $i_q$  : q축 전류,  $p$  : 미분연산자

$$\omega = \frac{v_q - (R + pL_q)i_q}{K_E + L_d i_d} \quad (6)$$

식(6)으로부터 회전자의 속도를 산출할 경우, 전동기의 파라미터 계측시 발생하는 오차와 선전류 및 입력전압 검출시 발생하는 오차로 인해 실제속도와 추정속도 사이에 오차가 발생하므로, 이를 보상하기 위해 보상값 C를 고려하여, 추정속도를 식(7)과 같이 구성하며, 보상값 C를 결정하기 위해 회전자 좌표계의 순시무효전력을 이용한다.

$$\hat{\omega} = \frac{v_q - (R + pL_q)i_q}{K_E + L_d i_d} + C \quad (7)$$

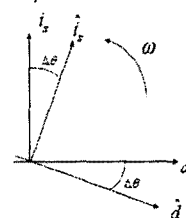
순시무효전력  $q_m$ 을 선전류  $\mathbb{I}_s$ 와 역기전력  $\mathbb{E}_s$ 의 벡터의적이라고 정의하면, 순시무효전력은 식(8)과 같으며,

$$q_m \equiv \mathbb{I}_s \times \mathbb{E}_s \quad (8)$$

$$\mathbb{I}_s = (i_d, i_q), \quad \mathbb{E}_s = (E_d, E_q), \quad E_d = 0, \quad E_q = K_E \hat{\omega}$$

식(3)의 추정전류를 이용한 추정 순시무효전력은 다음과 같다.

$$\hat{q}_m \equiv \hat{\mathbb{I}}_s \times \mathbb{E}_s, \quad \hat{\mathbb{I}}_s = (\hat{i}_d, \hat{i}_q) \quad (9)$$



**<그림 1> 실제 및 추정전류에 대한 위치 추정오차**

회전자 좌표계에서 실제전류  $i_s$ 에 대해 추정전류  $\hat{i}_s$ 가 그림 1과 같이 실제 순시무효전력에 대해  $\Delta\theta$ 만큼 벗어나 있다면, 식(8)과 식(9)는 식(10)과 식(11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$q_m = i_d K_E \hat{\omega} \quad (10), \quad \hat{q}_m = \hat{i}_d K_E \hat{\omega} = (i_d \cos\Delta\theta + i_q \sin\Delta\theta) K_E \hat{\omega} \quad (11)$$

식(11)에서 식(12)의 조건이 만족된다면, 식(11)을 식(13)과 같이 근사시킬 수 있다.

$$\omega \neq 0, \quad \Delta\theta \cong 0 \quad (12), \quad \hat{q}_m \approx (i_d + i_q \Delta\theta) K_E \hat{\omega} \quad (13)$$

식(10)과 식(13)으로부터, 순시무효전력의 오차는 식(14)와 같이 위치오차에 대한 정보를 포함한 식으로 나타난다. 추정전류가 실제전류보다 앞선 경우를  $\Delta\theta > 0$ 라 하면, 속도 오차에 대한 보상값을 결정하기 위해 식(15)의 조건이 만족되도록  $K_{cp}$ 를 결정하고, 안정적으로 보상이 이루어지도록 적분이득을 부가하여 식(16)과 같이 보상값 C를 결정한다.

$$\Delta q_m = \hat{q}_m - q_m = i_q \Delta\theta K_E \hat{\omega} \quad (14)$$

$$\Delta\theta > 0 \text{ 이면, } K_{cp} \cdot i_q \Delta\theta K_E \omega < 0, \quad \Delta\theta < 0 \text{ 이면, } K_{cp} \cdot i_q \Delta\theta K_E \omega > 0 \quad (15)$$

$$C = K_{cp} \Delta q_m + K_{ci} \int_0^t \Delta q_m dt, \quad K_{cp}, K_{ci} : \text{상수} \quad (16)$$

식(12)의 조건이 만족되는 경우, 식(4)의 오차방정식은 식(17)과 같이 나타내어지고,

$$\dot{e}_\alpha = -\frac{R}{L_d}e_\alpha - \frac{L_d - L_q}{L_d}(\hat{\omega} - \omega)e_\beta + \frac{K_E}{L_d}(\hat{\omega} - \omega)\sin\hat{\theta} + k_1 e_\alpha$$

