

슬라이딩 모드 관측기를 이용한 고속 영구자석형 동기 전동기의 센서리스 제어

김종무*, 이석규**
한국전기연구원*, 영남대**

Sensorless control of PMSM in high speed with sliding mode observer

Jong-Moo Kim*, Suk-Gyu Lee**
Korea Electrotechnology Research Institute*, Yeungnam University**

Abstract - 본 논문은 고속 영구자석형 동기전동기의 센서리스 제어에 관한 것이다. 정지상태에서 초기 기동시 부터 고속영역까지 센서리스 알고리즘을 구현하기 위하여 슬라이딩 모드 관측기를 적용하여 회전자의 회전각을 실시간으로 관측하여 벡터제어 알고리즘을 구현 하였다. 슬라이딩 모드 관측기의 채터링을 개선하고 넓은 속도 범위에서 안정된 응답을 얻기 위하여 속도에 따른 가변 이득 알고리즘과 관측기의 수렴을 여부를 판별하여 제한된 PWM 주기 내에서 관측기를 반복수행 관측기의 성능을 개선하는 알고리즘을 제안 하였다. 또한 제안된 알고리즘을 실험을 통하여 검증을 하였다. 초기 기동시 및 고속 영역에서 우수한 성능의 센서리스 알고리즘 구현되었을 확인 하였다.

1. 서 론

영구자석형 동기 전동기(Permanent Magnet Synchronous Motor; PMSM)는 정확한 토오크 제어를 위해서는 회전자의 위치를 알아야만 한다. 이를 위해서는 회전자에 엔코더 또는 리졸버를 부착하여 실시간으로 회전각 및 속도를 측정하여 벡터 제어 알고리즘에 반영하여 토오크 및 속도 제어를 수행한다. 그러나, 회전자의 회전각 측정을 위해 센서를 부착하는 경우 사용환경에 따라서 설치가 어렵거나 오동작의 원인이 되기도 한다. 특히 수만 rpm의 고속 전동기의 경우 적절한 센서가 없거나 고가의 센서를 부착하여야 하여야 하는 단점이 있어 고속전동기를 적용한 시스템의 구현에 많은 어려움이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 센서없이 회전자의 위치 및 속도를 실시간으로 연산이 가능한 다양한 센서리스 알고리즘이 제안되었으며 많은 연구가 진행되고 있다.

영구자석형 전동기의 회전각 추정을 위한 센서리스 알고리즘은 동기 전동기의 회로 방정식을 이용하여 역기전력을 추정하여 회전자의 위치를 구하는 연구가 진행 되었다. 또한 상태 추정기를 이용한 알고리즘, 칼만 필터를 이용한 방법 알고리즘 등이 제안되었으나, 정확한 전동기의 파라메타를 구하기 어렵고 실제 구동시 운전조건에 따라 파라메타 변동으로 정확한 회전자의 위치 추정이 어려운 점이 있다.

본 논문에서는 영구자석형 동기 전동기의 센서리스 제어를 위하여 슬라이딩 모드 관측기를 적용하여 센서리스 알고리즘을 제안하고 초기 기동 및 정격속도에서의 운전 상태를 비교 검토한다. 슬라이딩 모드 관측기는 파라메타 변동이나 외란에 강한 특성을 가지지만 채터링에 의한 회전각 추정시 오차를 유발하여 적용에 어려운 점이 있다. 이를 위해서 경계층을 설정하고 경계층 내에서는 선형함수를 두어 리플을 저감 시켰다. 또한 역기전력의 추종 속도를 개선하기 위하여 슬라이딩 모드 관측기를 반복 실행하여 PWM 주기동안 추정된 역기전력의 오차를 최소화하여 다음 주기 연산에 오차가 누적되어 채터링을 일으키는 문제점을 개선하여 측정 오차를 최소화 하였다.

2. 영구자석형 동기전동기의 모델링

영구자석형 동기 전동기의 2상 정지 좌표계에서 전압 방정식은 다음과 같다.

$$v_{\alpha s} = R_s i_{\alpha s} + L_s \frac{di_{\alpha s}}{dt} - K_e \omega_r \sin\theta_r \quad (1)$$

$$v_{\beta s} = R_s i_{\beta s} + L_s \frac{di_{\beta s}}{dt} + K_e \omega_r \cos\theta_r \quad (2)$$

여기서, 역기전력 상수 $K_e = \sqrt{\frac{3}{2}} K_T$, 권선저항 $R_s = R_a$, 자기 인덕턴스

$L_s = \frac{3}{2} L_a$ 이다.

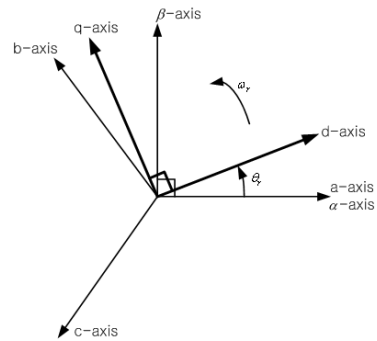
식 (1), (2)를 전류에 대한 상태 방정식으로 전개를 하면

$$\dot{i}_s = A i_s + B v_s - B e_s \quad (3)$$

$$A = \begin{bmatrix} -R_s/L_s & 0 \\ 0 & -R_s/L_s \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 1/L_s & 0 \\ 0 & 1/L_s \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$i_s = \begin{bmatrix} i_{\alpha s} \\ i_{\beta s} \end{bmatrix}, v_s = \begin{bmatrix} v_{\alpha s} \\ v_{\beta s} \end{bmatrix}, e_s = \begin{bmatrix} e_{\alpha s} \\ e_{\beta s} \end{bmatrix} = K_e \cdot \omega_r \cdot \begin{bmatrix} -\sin\theta_r \\ \cos\theta_r \end{bmatrix}$$

이다. 그림 1은 동기전동기의 좌표계를 나타낸다.



<그림 1> 동기전동기의 좌표계

3. 슬라이딩 모드 관측기를 적용 센서리스 알고리즘

본 논문에서는 고속 영구자석형 동기전동기를 위한 슬라이딩 모드 관측기를 적용한 개선된 센서리스 알고리즘을 제안한다. 슬라이딩 모드 관측기는 동기전동기에 실제 인가된 전압과 전류 및 추종된 역기전력으로 부터 상태방정식을 이용하여 전류를 추종하고 이를 다시 실제전류와 비교하여 오차를 슬라이딩 모드 관측기를 통하여 추종된 역기전력을 보상하는 알고리즘이다. 이때 추종된 역기전력을 이용하여 회전자의 회전각을 구하고 이를 통하여 회전속도를 구한다.

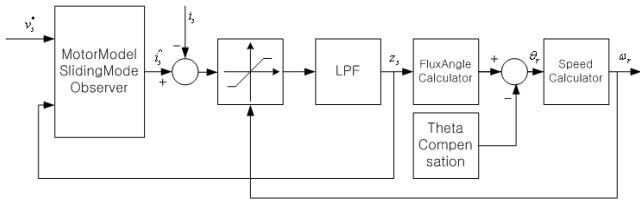
$$\dot{i}_s^* = A i_s^* + B v_s - z_s \quad (5)$$

$$z_s = K \text{Slide}(i_s^* - i_s) \frac{w_c}{s + \omega_c} \quad (6)$$

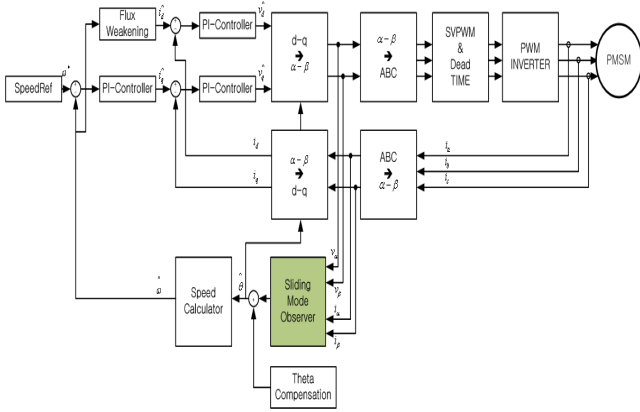
$$\text{Slide}(i_s^* - i_s) = \begin{cases} k & \text{if } (i_s^* - i_s) > E_{\text{lim}} \\ k(i_s^* - i_s) & \text{otherwise} \\ -k & \text{if } (i_s^* - i_s) < -E_{\text{lim}} \end{cases}$$

여기서, $z_s = [z_{\alpha s}, z_{\beta s}]^T$ 는 전류오차에서 구한 슬라이딩 모드 관측기의 스위칭값이 된다. 이 값에는 역기전력의 정보와 채터링에 의해 고주파 성분 포함되어 있어서 저역 통과 필터가 필요하게 되며 이로인한 위상지연을 보상하는 기능이 필요하게 된다. 관측기를 통하여 구한 z_s 의 전압 정보를 이용하여 회전자의 위치를 구할수 있으며 이를 식(7)에 나타낸다. 또한 회전속도에 따라서 가변 이득 조정기 K를 속도에 비례하게 설정하여 넓은 속도 범위에 안정된 센서리스 알고리즘이 구현될수 있게 제어를 설계 하였다. 또한 슬라이딩 모드 관측기의 단점인 채터링 문제점을 개선하기 위하여 그림2에 나타낸 슬라이딩 관측기를 PWM 주기 동안 DSP가 허용하는 연산 시간 범위에서 반복 수행하여 역기전력의 오차를 최소화 하였다.

$$\theta_r = -\tan^{-1}\left(\frac{e_{\alpha s}}{e_{\beta s}}\right) = -\tan^{-1}\left(\frac{z_{\alpha s}}{z_{\beta s}}\right) \quad (7)$$



〈그림 2〉 슬라이딩 모드 관측기의 구조



〈그림 3〉 PMSM 전동기용 센서리스 알고리즘 구조

4. 실험

제안한 센서리스 알고리즘을 검증하기 위하여 제작한 30,000RPM 37.5kW 영구자석형 동기전동기를 이용하여 실험을 수행하였다. 전동기의 사양은 표1에 나타낸다. 전원은 3상 380V인가하여 정류한 후 SVPWM 방식으로 IGBT를 구동하며 스위칭 주파수는 10kHz이고 전류 제어기 주기는 20kHz로 수행하였다. 또한 센서리스 알고리즘을 수행하기 위하여 DSP제어기는 TI사의 TMS320VC33을 적용하고 SVPWM 및 주변 인터페이스 및 보호회로를 VHDL을 이용하여 로직을 구성하고 ACTEL사의 재프로그램 가능한 APA075 FPGA 디바이스를 이용하여 구현하였다. 실험에 적용한 인버터 및 전동기의 사진을 그림 4에 나타낸다.

그림 4는 정지상태에서 기동시의 센서리스 알고리즘을 적용하여 회전자의 각도를 추정하는 파형을 보이고 있다. 실제 회전자의 각도 측정은 홀소자를 120도씩 3개를 배치하고 회전자 축에 링 자석을 설치하여 1회전당 6펄스를 얻어서 회전자의 각도 측정에 비교하였다. 기동시 회전자의 초기각을 알지 못해도 안정된 기동 특성을 보임을 알 수 있다..

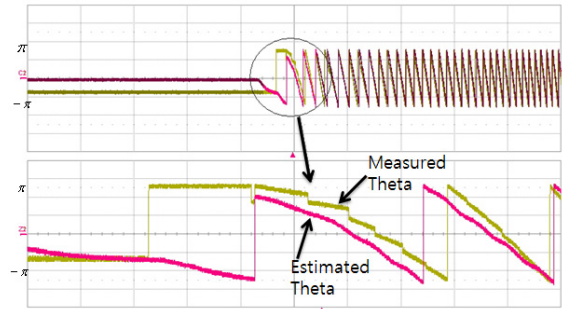
그림 5는 영구자석형 동기전동기를 20,000RPM 운전시 회전자의 각도를 실시간으로 추정하는 파형을 나타낸다. 이때 고속 전동기에 인가된 전류 파형은 큰 리플과 외형을 가지는데 이는 고속전동기의 낮은 임피던스로 인하여 PWM시 큰 리플 전류가 흐른다. 또한 인버터의 비선형성 등으로 인하여 작은 출력 외곽에도 전류의 외형이 나빠지는 특성에 불구하고 회전자의 위치 추정이 잘 이루어지고 있음을 확인할 수 있다.



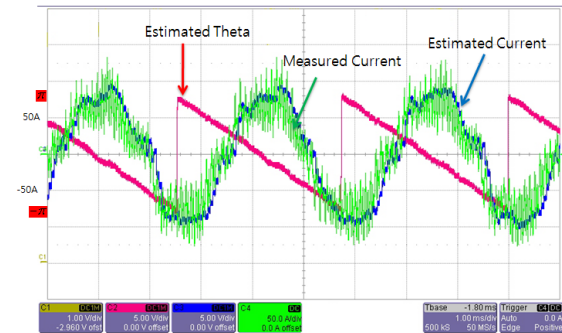
〈그림 4〉 센서리스 인버터 및 PMSM 전동기 사진

〈표 1〉 전동기 사양

극수	2극
정격출력	37.5kW
정격전압	350V
정격전류	65A
정격속도	30,000RPM
고정자 권선저항	17.5mΩ
고정자 인덕턴스	133.5μH



〈그림 5〉 초기 기동시의 센서리스 파형



〈그림 6〉 20,000RPM 구동시의 센서리스 파형

4. 결 론

본 논문에서 제안한 슬라이딩 모드 관측기를 적용한 고속 영구자석형 동기전동기용 센서리스 제어 알고리즘을 실험을 통하여 검증하였다. 고속 전동기의 경우 임피던스가 매우 낮아 인버터의 작은 출력의 외곽에도 큰 전류 리플로 나타나 회전자 관측기를 설계하는데 어려움이 있다. 이는 센서리스 제어기의 불안함을 유발 할 수 있어 제어기 설계시 주의를 요한다. 본 알고리즘은 속도에 따라서 관측기의 게인을 조정하여 응답을 개선하고 또한 관측기를 다중으로 반복하여 추정치의 오차를 최소화 하여 안정된 응답을 얻을 수 있었다. 또한 중래에 초기 기동시 v/f 운전으로 기동하던 것을 초기부터 임의의 각도에서 기동이 가능하다는 것을 실험을 통하여 입증하였다.

[참 고 문 헌]

[1] M. J. Corley and R. D. Lorenz, "Rotor position and velocity estimation for permanent magnet synchronous machine at standstill and high speed," in Conf. Rec. IEEE-IAS Annu. Meeting, vol.1, pp. 36-41. 1996.

[2] Vadim Utkin, J. Guldner and Jingxin Shi, Sliding mode control in electromechanical systems, 1st ed., Taylor&Francis, 1999.

[3] Kye-Lyong Kang, Jang-Mok Kim, Keun-Bae Hwang, Kyung-Hoon Kim, "Sensorless control of PMSM in high speed range with iterative sliding mode observer", APEC2004, vol.2, pp.1111-1116. 2004.,