

# 매입형 영구자석 동기 전동기의 고주파 신호 주입 센서리스 제어를 위한 정지 좌표계 상에서의 새로운 회전자 위치 추정 기법

송의영, 임준혁, 김상일, 김래영<sup>†</sup>  
한양대학교

## Novel Rotor Position Estimation Method in Stationary Reference Frame for High Frequency Signal Injection Sensorless Control in IPMSM

Eui Young Song, Jun Hyuk Im, Sang Il Kim, Rae Young Kim<sup>†</sup>  
Hanyang University

### ABSTRACT

본 논문에서는 고주파 신호 주입 센서리스 제어를 위한 정지 좌표계 상의 회전자 위치를 추정하는 새로운 기법에 대하여 제안한다. 기존 방법은 저역 통과 필터의 시지연 및 전류 차로 이루어진 행렬의 역행렬 유무 문제가 존재하였다. 제안된 기법은 이러한 문제의 해결방안으로 정지 좌표계 상에서 변환 행렬을 이용하여 회전자 위치 정보를 추출해 낸다. 또한 추출해 낸 위치 정보로 전대역 통과 필터를 이용하여 회전자 위치를 정밀하게 추정하게 된다. 시뮬레이션을 통하여 제안된 방법의 타당성을 검증하였다.

### 1. 서 론

영구자석 동기 전동기는 높은 효율과 빠른 응답 특성, 고속 운전의 유리함으로 고성능 제어가 요구되는 산업 분야에 널리 사용되고 있다. 일반적으로 영구자석 동기 전동기는 회전자 위치 정보를 얻기 위해 레졸버, 엔코더 등을 사용한다. 하지만 경제성, 신뢰성 등의 문제가 있기 때문에 위치 센서가 필요하지 않은 센서리스 제어에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

기존의 고주파 신호 주입 센서리스 제어의 정지 좌표계 상에서의 회전자 위치 추정 방법은 헤테로다인(Heterodyne) 방법<sup>[1]</sup>과 인덕턴스 행렬을 이용하는 방법<sup>[2]</sup>이 있다. 헤테로다인 방법은 측정된 고주파 전류 신호의 주파수와 다른 주파수의 신호를 발생시켜 두 신호를 혼합하고 저역 통과 필터를 거쳐 회전자 위치 오차를 얻어낸다. 저역 통과 필터로 인한 시지연 문제점이 있다. 반면 인덕턴스 행렬을 이용한 방법은 전류와 전압 차로 이루어진 행렬을 통하여 인덕턴스 행렬을 구함으로써 두 배의 회전자 위치를 추정한다. 전류 차로 이루어진 행렬은 항상 역행렬이 존재하지는 않는다는 문제점이 있다.

본 논문에서는 기존 방법의 문제점을 해결하기 위하여 변환 행렬 및 전대역 통과 필터(All Pass Filter)를 이용하여 직접 회전자 위치를 추정하는 기법을 제안한다. 시뮬레이션 결과를 통하여 제안된 기법의 타당성을 검증한다.

## 2. 회전자 위치 추정 기법

### 2.1 회전 변환 행렬을 이용한 회전자 위치 추정

매입형 영구자석 동기 전동기의 정지 좌표계 상에서의 전압 방정식은 식 (1)과 같다. 고정자 자속을 전류와 영구자석 관련

성분으로 나눠 표현하고 샘플링 주기가 매우 짧다고 가정하면 식 (1)은 식 (2)와 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} v_\alpha^s \\ v_\beta^s \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} v_\alpha^s \\ v_\beta^s \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \lambda_\alpha^s \\ \lambda_\beta^s \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} v_\alpha^s \\ v_\beta^s \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} v_\alpha^s \\ v_\beta^s \end{bmatrix} + \omega_r \lambda_f \begin{bmatrix} -\sin\theta_r \\ \cos\theta_r \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$+ 2L_{dif}\omega_r \begin{bmatrix} -\sin 2\theta_r \cos 2\theta_r \\ \cos 2\theta_r \sin 2\theta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha^s \\ i_\beta^s \end{bmatrix} + L_s \frac{1}{T_s} \begin{bmatrix} \Delta v_\alpha^s \\ \Delta v_\beta^s \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$L_s = \begin{bmatrix} L_{sum} + L_{dif}\cos 2\theta_r & L_{dif}\sin 2\theta_r \\ L_{dif}\sin 2\theta_r & L_{sum} - L_{dif}\cos 2\theta_r \end{bmatrix}$$

$$L_{sum} = (L_d + L_q)/2 \quad L_{dif} = (L_d - L_q)/2$$

샘플링 간의 전압 차는 샘플링 주기가 매우 짧다면 현재 샘플링 값과 이전 값 간의 차이가 작기 때문에 저항에 의한 전압 강하 성분과 속도에 비례하는 성분은 무시할 수 있으므로 식 (4)와 같이 정리할 수 있다. 식 (4)를 회전자 위치 관련 항에 대하여 정리하면 식 (5)와 같고  $i_{sa}$ 와  $i_{sb}$ 로 정의한다.

$$\begin{bmatrix} \Delta v_\alpha^s \\ \Delta v_\beta^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha^s[n] - v_\alpha^s[n-1] \\ v_\beta^s[n] - v_\beta^s[n-1] \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$= L_s \frac{1}{T_s} \begin{bmatrix} \Delta v_\alpha^s[n] - \Delta v_\alpha^s[n-1] \\ \Delta v_\beta^s[n] - \Delta v_\beta^s[n-1] \end{bmatrix} = L_s \frac{1}{T_s} \begin{bmatrix} \Delta v_{\alpha dif}^s \\ \Delta v_{\beta dif}^s \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \end{bmatrix} = \frac{T_s}{L_{dif}} \begin{bmatrix} \Delta v_\alpha^s \\ \Delta v_\beta^s \end{bmatrix} - \frac{L_{sum}}{L_{dif}} \begin{bmatrix} \Delta v_{\alpha dif}^s \\ \Delta v_{\beta dif}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos 2\theta_r & \sin 2\theta_r \\ \sin 2\theta_r & -\cos 2\theta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta v_{\alpha dif}^s \\ \Delta v_{\beta dif}^s \end{bmatrix} \quad (5)$$

식 (5)의 양변에 변환 행렬을 곱하면 회전자 위치 관련 식 (6)을 얻을 수 있고, 식 (7)과 같이 회전자 위치를 추정할 수 있다. 식 (7)의 분자와 분모를  $i_{saa}$ 와  $i_{sbb}$ 로 정의한다.

$$\begin{bmatrix} \cos\theta_r & \sin\theta_r \\ -\sin\theta_r & \cos\theta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_r & \sin\theta_r \\ \sin\theta_r & -\cos\theta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta v_{\alpha dif}^s \\ \Delta v_{\beta dif}^s \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\theta_{r\_calc} = \tan^{-1} \left( \frac{i_{sa} - \Delta v_{\alpha dif}^s}{-i_{sb} + \Delta v_{\beta dif}^s} \right) = \tan^{-1} \left( \frac{i_{saa}}{i_{sbb}} \right) \quad (7)$$

### 2.2 전대역 통과 필터를 이용한 회전자 위치 추정

식 (7)을 통하여 회전자 위치 추정이 가능하지만 스위칭 주파수가 아닌 고주파수의 회전하는 신호 주입의 경우, 레졸루션의 문제로 분자와 분모가 0에 가까운 작은 값을 가지는 경우가 반복적으로 존재하여 회전자 위치를 추정하는데 문제가 있다. 이러한 점은 그림 1과 같이  $i_{saa}$ 와  $i_{sbb}$ 의 포락선을 구함으로써 해결이 가능하다. 포락선은 위치와 동기화된 부드러운 sine,

cosine 함수이므로 회전자 위치를 정확히 추정할 수 있다.

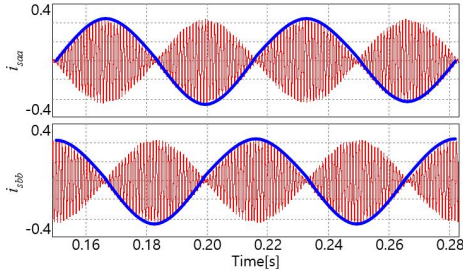


그림 1 식 (7)의 분자와 분모의 형태 및 포락선

식 (7)의  $i_{saa}$ 와  $i_{sbb}$ 와 동상인 성분과 전대역 통과 필터를 통한  $90^\circ$  앞서는 성분과 동상인 성분을 찾아내어 구한 포락선을 통한 회전자 위치 추정 기법에 대하여 제안한다.

주입 전압 신호는 회전하는 전압 신호로써 식 (8)과 같다. 샘플링 주기가 매우 짧다면 고주파 이외의 신호는 변하지 않으므로 식 (4)의 전압 차는 식 (9)와 같다. 또한 식 (7)의  $i_{saa}$ 와  $i_{sbb}$ 는 식 (4)와 (9)를 통하여 식 (10)과 같이 정리된다.

$$\begin{bmatrix} v_{\alpha h}^s \\ v_{\beta h}^s \end{bmatrix} = V_{\in j} \begin{bmatrix} \cos \omega_h t \\ \sin \omega_h t \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta v_{\alpha}^s \\ \Delta v_{\beta}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{\alpha}^s[n] - v_{\alpha}^s[n-1] \\ v_{\beta}^s[n] - v_{\beta}^s[n-1] \end{bmatrix} = 2V_{\in j} \sin \omega_h \frac{T_s}{2} \begin{bmatrix} -\sin \omega_h (t - T_s/2) \\ \cos \omega_h (t - T_s/2) \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} i_{saa} \\ i_{sbb} \end{bmatrix} = \frac{4T_s}{L_q} V_{\in j} \sin \omega_h \frac{T_s}{2} \begin{bmatrix} \sin \theta_r \cos(\omega_h (t - T_s/2) - \theta_r) \\ \cos \theta_r \cos(\omega_h (t - T_s/2) - \theta_r) \end{bmatrix} \quad (10)$$

$i_{saa}$ 와  $i_{sbb}$ 는 고주파 포함 성분은 동일하며 회전자 위치만 포함된 성분은 sine, cosine 형태를 보임을 확인할 수 있다. 회전자 위치 추정을 위하여 식 (10)을  $90^\circ$  앞서도록 전대역 통과 필터를 거치면 식 (11)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} i_{saa\_APF} \\ i_{sbb\_APF} \end{bmatrix} = \frac{4T_s}{L_q} V_{\in j} \sin \omega_h \frac{T_s}{2} \begin{bmatrix} -\sin \theta_r \sin(\omega_h (t - T_s/2) - \theta_r) \\ -\cos \theta_r \sin(\omega_h (t - T_s/2) - \theta_r) \end{bmatrix} \quad (11)$$

식 (10)과 (11)의 고주파 포함 성분은 식 (9)의 beta축과 alpha축 전압 차와 회전자 위치만큼의 위상차가 존재함을 알 수 있다. 따라서 회전자 위치 오차가 작다면 동상인 성분은 추정된 좌표계 상의 전압 차임을 추측할 수 있다. 추정된 좌표계 상의 전압 차는 식 (12)와 같다.

$$\begin{bmatrix} \Delta v_d^{\hat{r}} \\ \Delta v_q^{\hat{r}} \end{bmatrix} = 2V_{\in j} \sin \omega_h \frac{T_s}{2} \begin{bmatrix} -\sin(\omega_h (t - T_s/2) - \hat{\theta}_r) \\ \cos(\omega_h (t - T_s/2) - \hat{\theta}_r) \end{bmatrix} \quad (12)$$

식 (12)의 q축 전압 차는  $i_{saa}$ 와  $i_{sbb}$ 의 고주파 포함 성분과 동상이며 d축 전압 차는  $i_{saa\_APF}$ 와  $i_{sbb\_APF}$ 의 고주파 포함 성분과 동상임을 확인할 수 있다. 식 (10)과 (11)과 q축 전압 차와 d축 전압 차를 각각 곱하여 더한 후 크기로 나뉘면 식 (13) (15)와 같이 회전자 위치를 추정할 수 있다.

$$i_{num} = \frac{i_{saa} \Delta v_q^{\hat{r}} + i_{saa\_APF} \Delta v_d^{\hat{r}}}{\sqrt{\Delta v_q^{\hat{r}2} + \Delta v_d^{\hat{r}2}}} = \frac{4T_s}{L_q} V_{\in j} \sin \omega_h \frac{T_s}{2} \sin \theta_r \cos \tilde{\theta}_r \quad (13)$$

$$i_{den} = \frac{i_{sbb} \Delta v_q^{\hat{r}} + i_{sbb\_APF} \Delta v_d^{\hat{r}}}{\sqrt{\Delta v_q^{\hat{r}2} + \Delta v_d^{\hat{r}2}}} = \frac{4T_s}{L_q} V_{\in j} \sin \omega_h \frac{T_s}{2} \cos \theta_r \cos \tilde{\theta}_r \quad (14)$$

$$\theta_{r\_cal2} = \tan^{-1}(i_{num}/i_{den}) \quad (15)$$

그림 2는 고주파 신호 주입 센서리스 제어의 블록도이다. 고주파 신호 주입은 정지 좌표계 상에서의 주입이며, 전대역 통과

필터를 이용한 식 (13) (15)로 회전자 위치를 추정하였다.

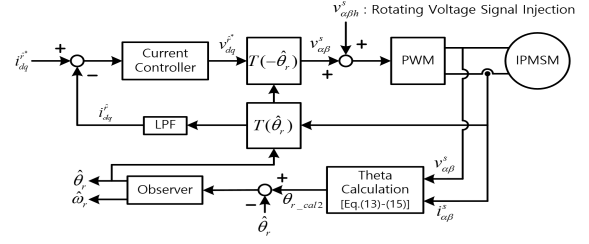


그림 2 정지 좌표계 상에서의 회전자 위치 추정 기법을 포함한 센서리스 제어의 블록도

### 3. 시뮬레이션 결과

제안된 기법의 검증을 위하여 시뮬레이션을 진행하였다. 고주파 주입 신호의 크기 및 주파수는 50[V], 1[kHz]이며, 스위칭 주파수는 5[kHz], 전류 샘플링 주파수는 10[kHz]로 선정하였다.

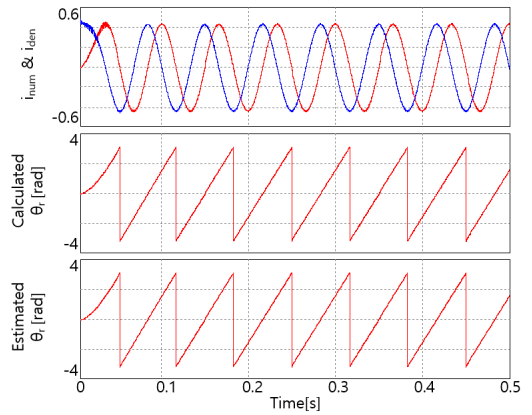


그림 3 회전자 위치 관련 성분과 계산 각도 및 추정 각도

그림 3은 위치 관련 성분과 계산된 회전자 위치 및 추정된 회전자 위치의 시뮬레이션 파형이다. 첫 번째 파형의 위치 관련 성분은 sine, cosine 함수의 형태임을 확인할 수 있다. 또한 이 성분으로 계산한 회전자 위치는 속도 관측기의 출력인 추정된 회전자 위치와 동일함을 확인할 수 있다.

### 4. 결론

본 논문에서는 고주파 신호 주입 센서리스 제어를 위하여 변환 행렬과 전대역 통과 필터를 이용한 정지 좌표계 상의 회전자 위치 추정 기법에 대하여 제안하였다. 제안된 기법은 기존의 헤테로다인 방법과 인덕턴스 행렬을 이용한 방법의 문제점을 보완하였으며 시뮬레이션을 통하여 타당성을 검증하였다.

### 참고 문헌

[1] P. L. Jansen and R. D. Lorenz, "Transducerless Position and Velocity Estimation in Induction and Salient AC Machines", IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 31, no. 2, pp. 240-247, Mar./Apr. 1995.  
 [2] S. Kim, Y. C. Kwon, S. K. Sul, J. Park, and S. M. Kim, "Position sensorless operation of IPMSM with near PWM switching frequency signal injection," in Proc.