

맥동하는 구형파 주입 매입형 영구 자석 전동기의 센서리스 운전에서 위치 추정 오차에 대한 분석

황채은, 이영기, 설승기
서울대학교 공과대학 전기정보공학부

Analysis on the Position Estimation Error in Position-Sensorless Operation of IPMSM Using Pulsating Square Wave Signal Injection

Chae-Eun Hwang, Younggi Lee, and Seung-Ki Sul

Dept. of Electrical and Computer Engineering, Seoul National University

ABSTRACT

본 논문에서는 위치 센서에 의존하지 않는 매입형 영구자석 전동기의 센서리스 구동 시 전압 왜곡으로 인해 나타나는 위치 추정 오차를 이론적으로 분석하고자 한다. 특히, 추정 d축에 맥동하는 구형파 전압을 주입하는 방법에서 주입하는 신호의 주파수에 따라 위치 추정 성능이 달라지는 현상에 초점을 맞춘다. 무부하에서 스위칭 주파수의 신호를 주입할 때 전압 왜곡은 on/off sequence에서 서로 반대의 위상을 갖는 역상분 2고조파의 형태로 나타나며, 위치 추정 오차는 3고조파의 형태로 나타난다. 반면, 반스위칭 주파수의 신호를 주입하는 경우에는 샘플링 주기 동안 주입 전압 왜곡의 효과가 상쇄되기 때문에 인덕턴스의 영향만이 주로 고려되어 위치 추정 오차가 6고조파의 형태로 나타난다. 시뮬레이션과 실험을 통해 이론적 분석의 타당성을 검증하였다.

1. 서론

영구자석 전동기의 고성능 제어를 위해서는 회전자 위치에 대한 정보가 필요하다. 돌극성이 있는 매입형 영구자석 전동기의 저속 운전 영역에서는 고주파 전압을 주입하고, 유도되는 전류 신호로부터 회전자의 위치 정보를 추출하는 방법이 위치 센서 없이 전동기를 제어하는 방법으로 널리 사용되고 있다.^[1]

신호 주입 방법에서 나타나는 위치 추정 오차는 상호 결합 인덕턴스와 인버터에 의한 전압 왜곡의 영향을 받는다. 비이상적(non-ideal)인 인버터에서 전압 합성의 오차는 스위칭 순간의 전류에 의해 결정되기 때문에 위치 추정 오차는 센서리스 방법에 의존한다.

본 논문에서는 이러한 전압 합성의 오차에 의해 나타나는 위치 추정 오차를 이론적으로 분석하였다. 주입하는 신호의 주파수에 따라 위치 추정 성능이 다르게 나타난다는 현상에 기초하여 연구가 진행되었기 때문에, 전동기의 d축에 서로 다른 주파수의 맥동하는 고주파 신호를 주입하였을 때의 특성에 초점을 맞춘다. 시뮬레이션과 실험을 통해 분석의 타당성을 검증하였다.

2. 맥동하는 구형파를 주입하는 센서리스 운전

2.1. 이상적인 경우의 위치 추정 오차

매입형 영구자석 전동기의 전기적 특성을 영구자석의 N극에 동기된 좌표계에서 표현하면 (1)과 같다.

$$\begin{bmatrix} v_{ds}^* \\ v_{qs}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + sL_{ds} & -\omega_r L_{qs} \\ \omega_r L_{ds} & R_s + sL_{qs} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds}^* \\ i_{qs}^* \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_r \lambda_f \end{bmatrix}. \quad (1)$$

회전자의 속도는 주입하는 신호의 주파수에 비해 매우 느리므로 속도 항은 무시하면 d축에 $v_{ds}^*[n] = v_{inj}^*[n]$ 의 전압을

주입하였을 때의 전류 변화량은 (2)와 같이 표현 될 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \Delta i_{ds}^*[n] \\ \Delta i_{qs}^*[n] \end{bmatrix} = \frac{T_s}{L_{ds}L_{qs}} \begin{bmatrix} \Sigma L_{sh} - \Delta L_{sh} \cos 2\tilde{\theta}_r & -\Delta L_{sh} \sin 2\tilde{\theta}_r \\ -\Delta L_{sh} \sin 2\tilde{\theta}_r & \Sigma L_{sh} + \Delta L_{sh} \cos 2\tilde{\theta}_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{inj}^*[n-2] \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

, where $\Sigma L_{sh} \equiv (L_{dsh} + L_{qsh})/2$ and $\Delta L_{sh} \equiv (L_{dsh} - L_{qsh})/2$.

실제 위치와 추정 위치 사이의 오차, $\tilde{\theta}_r$, 이 작을 때, q축 전류의 변화량은 $\tilde{\theta}_r$ 에 비례한다. 따라서 (3)에서 q축 전류 변화량이 0이 되도록 제어하여 위치를 추정하게 된다.

$$\tilde{\theta}_{r,est}[n] = \left(-\frac{L_{dsh}L_{qsh}}{2T_s\Delta L_{sh}} \right) \cdot \frac{\Delta i_{qs}^*[n]}{v_{inj}^*[n-2]} \approx \tilde{\theta}_r. \quad (3)$$

2.2. 위치 추정 오차에 영향을 주는 요인

2.2.1. 상호 결합 인덕턴스

상호 결합 인덕턴스, L_{dqsh} , 를 고려하면 식 (4)에서처럼 전류의 변화에도 그 효과가 반영된다.^[2]

$$\begin{bmatrix} \Delta i_{ds}^*[n] \\ \Delta i_{qs}^*[n] \end{bmatrix} = \frac{T_s}{L_{dsh}L_{qsh} - L_{dqsh}^2} \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} \\ L_{21} & L_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{inj}^*[n-2] \\ 0 \end{bmatrix}$$

여기서 $L_{11} = \Sigma L_{sh} - \Delta L_{sh} \cos 2\tilde{\theta}_r + L_{dqsh} \sin 2\tilde{\theta}_r$, $L_{12} = -\Delta L_{sh} \sin 2\tilde{\theta}_r - L_{dqsh} \cos 2\tilde{\theta}_r$, (4)

$$L_{21} = -\Delta L_{sh} \sin 2\tilde{\theta}_r - L_{dqsh} \cos 2\tilde{\theta}_r, L_{22} = \Sigma L_{sh} + \Delta L_{sh} \cos 2\tilde{\theta}_r - L_{dqsh} \sin 2\tilde{\theta}_r.$$

앞선 경우와 마찬가지로 q축 전류 변화량이 0이 되도록 위치를 추정하였을 때, 위치 추정 오차는 (5)와 같이 계산된다.

$$\tilde{\theta}_r = -\frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{L_{dqsh}}{\Delta L_{sh}} \right). \quad (5)$$

2.2.2. 인버터 비선형성에 의한 전압 왜곡

인버터의 비선형성은 위치 추정 성능을 저하시키는 원인이 된다.^[3] 데드타임과 반도체 소자 내부의 전압 강하에 의한 출력 전압의 왜곡을 고려하여 전류 변화량에 대한 (2)를 다시 쓰면 (6)과 같이 표현할 수 있다. 또한, 이 때의 위치 추정 오차는 (7)로 계산된다.

$$\begin{bmatrix} \Delta i_{ds}^*[n] \\ \Delta i_{qs}^*[n] \end{bmatrix} = \frac{T_s}{L_{dsh}L_{qsh}} \begin{bmatrix} \Sigma L_{sh} - \Delta L_{sh} \cos 2\tilde{\theta}_r & -\Delta L_{sh} \sin 2\tilde{\theta}_r \\ -\Delta L_{sh} \sin 2\tilde{\theta}_r & \Sigma L_{sh} + \Delta L_{sh} \cos 2\tilde{\theta}_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ds}^*[n-1] \\ v_{qs}^*[n-1] \end{bmatrix}. \quad (6)$$

$$\text{여기서 } \begin{bmatrix} v_{ds}^*[n-1] \\ v_{qs}^*[n-1] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{ds}^*[n-2] - \delta v_{ds}^*[n-1] \\ v_{qs}^*[n-2] - \delta v_{qs}^*[n-1] \end{bmatrix}.$$

$$\tilde{\theta}_r = -\frac{1}{2} \sin^{-1} \left(\frac{k_3}{\sqrt{k_1^2 + k_2^2}} v_{qs}^*[n-1] \right) + \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{k_2}{k_1} \right). \quad (7)$$

여기서 $k_1 = -\Delta L_{sh} - L_{dqsh} \frac{v_{qs}^*[n-1]}{v_{ds}^*[n-1]}$, $k_2 = L_{dqsh} - \Delta L_{sh} \frac{v_{qs}^*[n-1]}{v_{ds}^*[n-1]}$, and $k_3 = \frac{\Sigma L_{sh}}{v_{ds}^*[n-1]}$

그림 1은 시물레이션과 실험에 사용한 IGBT 소자 내부의 전압 강하를 고려하였을 때의 전류와 전압 왜곡 사이의 관계를 나타낸 것이다. 전류의 크기가 작을 때 전압 왜곡은 전류가 변화에 따라 급격히 변하는 반면, 전류가 어느 정도 증가하면 전압 왜곡의 정도가 크게 변하지 않는다. 이러한 특성에 의한 차이를 확인하기 위해 영전류와 정격 전류에서 위치 추정 오차에 대해 분석하였다.

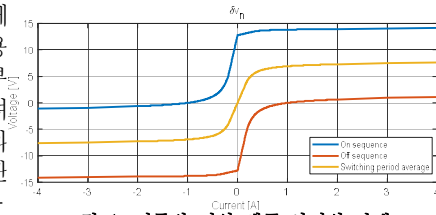


그림 1. 전류와 전압 왜곡 사이의 관계

2.3. 위치 추정 오차에 관한 이론적 분석

위치 추정 오차에 영향을 미치는 두 가지 요소 중 인덕턴스의 경우 제어 방법에 영향을 받지 않는다. 반면, 인버터 비선형성에 의한 전압 왜곡은 신호 주입 방법에 따라 달라진다. 스위칭 순간의 전류가 전압 왜곡의 크기를 결정하므로, 각 조건에서의 전류 크기를 계산할 필요가 있다.

이 때, 계산의 편의를 위해 인버터는 이상적이라고 가정한다. A상의 전압 지령이 3상 중 중간 값을 갖는 구간에서 스위칭 주파수의 전압을 주입하였을 때 on sequence에서 스위칭 순간의 전류를 (8)과 같이 계산할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} i_{dh,s}^s \\ i_{gh,s}^s \end{bmatrix} = -\frac{V_h T_{smp}}{2L_{dh}} \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix} + \frac{V_h T_{smp} \cos(\theta - \frac{5}{6}\pi)}{\sqrt{3}L_{dh}L_{qsh}} \begin{bmatrix} -\Sigma L_{sh} + 2\Delta L_{sh} \cos(2\theta + \frac{\pi}{3}) \\ \sqrt{3}\Sigma L_{sh} + 2\Delta L_{sh} \sin(2\theta + \frac{\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (8)$$

계산 결과, 전류가 매우 작은 경우, 스위칭 순간의 전류는 그림 2와 같이 역상분 2고조파의 형태가 된다. 한편, off sequence에서는 이와 반대되는 위상을 갖는다. 따라서, 추정된 회전자의 위치와 동기된 좌표계에서의 전압 왜곡은 on/off sequence에서 서로 반대 위상을 가지는 3고조파로 나타난다. 그 결과, 스위칭 주파수의 신호를 주입한 경우 위치 추정 오차 또한 3고조파 성분을 갖는다.

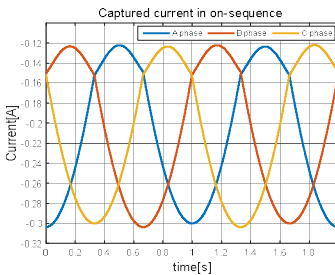


그림 2. 스위칭 순간의 전류

반스위칭 주파수의 신호를 주입하는 경우에는 주입되는 전압의 부호도 고려해야 한다. 스위칭 주파수를 주입하는 경우와 같은 구간에서 양의 지령 전압이 주입되었을 때 on/off sequence에서 스위칭 순간의 전류는 (9)와 같이 계산할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} i_{dh,s}^s \\ i_{gh,s}^s \end{bmatrix} = \begin{cases} \begin{bmatrix} -\frac{V_h T_{smp}}{L_{dh}} \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix} + \frac{V_h T_{smp} \cos(\theta - \frac{5}{6}\pi)}{\sqrt{3}L_{dh}L_{qsh}} \begin{bmatrix} -\Sigma L_{sh} + 2\Delta L_{sh} \cos(2\theta + \frac{\pi}{3}) \\ \sqrt{3}\Sigma L_{sh} + 2\Delta L_{sh} \sin(2\theta + \frac{\pi}{3}) \end{bmatrix} \\ \frac{V_h T_{smp}}{L_{dh}} \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix} - \frac{V_h T_{smp} \cos(\theta - \frac{5}{6}\pi)}{\sqrt{3}L_{dh}L_{qsh}} \begin{bmatrix} -\Sigma L_{sh} + 2\Delta L_{sh} \cos(2\theta + \frac{\pi}{3}) \\ \sqrt{3}\Sigma L_{sh} + 2\Delta L_{sh} \sin(2\theta + \frac{\pi}{3}) \end{bmatrix} \end{cases} \quad (9)$$

(a) On sequence (b) Off sequence

계산 결과, on sequence와 off sequence에서의 전류의 부호는 반대로 나타난다. 즉, 그림 1의 관계로부터 전압 왜곡의 부호가 반대가 되기 때문에 샘플링 한 주기 동안 나타나는 전압 왜곡의 효과는 상쇄되어 위치 추정 오차에 영향을 주지 못한다.

정격 부하에서 반스위칭 주파수의 신호를 주입하였을 때 지령 전압과 실제 합성되는 전압의 차이는 그림 3과 같이 나타난다. 공통성분을 제외하면 on sequence와 off sequence에서 전압 왜곡의 형태가 기본파로 유사하게 나타나므로, 이는

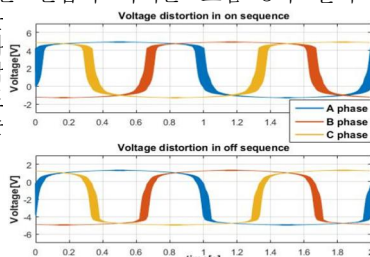


그림 3. 정격 부하에서의 전압 왜곡

전류의 변화 및 위치 추정 오차에 영향을 주지 못한다. 스위칭 주파수의 신호를 주입한 경우에도 부하가 걸리면 전류가 커져 3고조파 성분이 없으므로 위치 추정 오차는 인덕턴스의 영향만 나타나 6고조파의 형태를 갖는다.

3. 실험 결과

분석의 타당성을 검증하기 위해 실험을 진행하였다. 시스템의 특성은 표 1과 같다. 그림 4에 보인 바와 같이 영전류 부근에서 스위칭 주파수의 신호를 주입한 경우의 위치 추정 오차는 분석 결과와 마찬가지로 3고조파의 형태로 나타난다. 또한, 반스위칭 주파수의 신호를 주입한 경우에는 샘플링 주기 동안의 전압 왜곡의 효과가 상쇄되기 때문에 인덕턴스의 영향만이 주로 고려되어 위치 추정 오차가 6고조파의 형태로 나타난다.

표1. 실험에 사용된 시스템 특성

Index	Value
Dead time	2 (μs)
Switching Frequency	10 (kHz)
V _h	40 (V)
Rated power	300 (W)
Rated current	4 (A _{peak})
Pole number	6
Back EMF constant (λ _f)	0.064 (V·s)
Resistance (R _s + R _{inv})	0.76 (Ω)
Synchronous inductances	L _{dh} : 7.15, L _{qsh} : 10.6 (mH)

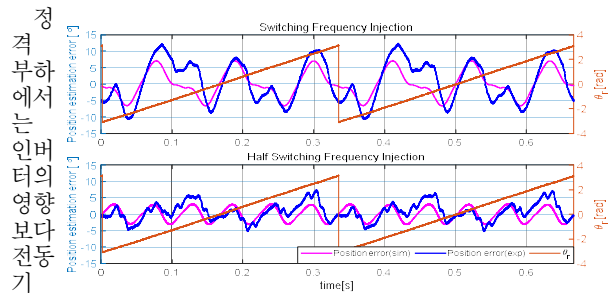


그림 4. 영전류 부근에서 서로 다른 주파수 주입 시 실험과 시뮬레이션의 비교

특성에 의한 영향이 더 크게 나타나므로 스위칭 주파수의 신호를 주입한 경우에도 반스위칭 신호를 주입하는 경우와 유사하게 6고조파의 위치 추정 오차를 갖는다.

4. 결론

본 논문에서는 주입하는 신호의 주파수에 따른 신호 주입 센서리스 방법에서의 전압 합성 오차와 위치 추정 오차에 대해 분석하였다. 인덕턴스와 인버터 비선형성이 위치 추정 오차에 미치는 영향에 대해 분석하고, 스위칭 순간의 전류와 전압 왜곡 간의 관계를 고려하여 인버터 비선형성의 영향을 분석하였다. 무부하 상태에서 스위칭 주파수의 신호를 주입하는 경우 스위칭 순간의 전류는 역상분 2고조파의 형태로 나타나며, 그로 인한 위치 추정 오차는 3고조파의 형태가 된다. 부하가 걸리는 경우에는 전압 왜곡이 위치 추정 오차에 영향을 미치지 못하므로, 반스위칭 주파수나 스위칭 주파수의 신호를 주입하는 두 경우 모두 인덕턴스 효과만 반영되어 위치 추정 오차는 6고조파 형태의 비교적 작은 위치 추정 오차를 갖는다.

참고 문헌

- [1] Y-D Yoon, S-K Sul, S. Morimoto, and K. Ide, "High-Bandwidth Sensorless Algorithm for AC Machines Based on Square-Wave-Type Voltage Injection," *IEEE Trans. Ind. Appl.* vol 47, pp 1361-1370, May/June 2011
- [2] Y. Li, Z. Q. Zhu, D. Howe, C. M. Bingham, and D. A. Stone, "Improved Rotor-Position Estimation by Signal Injection in Brushless AC Motors. Accounting for Cross-Coupling Magnetic Saturation," *IEEE Trans. Ind. Appl.* vol 45, pp 1843-1850, Jul 2009
- [3] D. Kim, Y.-C. Kwon, S.-K. Sul, J.-H. Kim, and R.-S. Yu, "Suppression of Injection Voltage Disturbance for High-Frequency Square-Wave Injection Sensorless Drive With Regulation of Induced High-Frequency Current Ripple," *IEEE Trans. Ind. Appl.* vol 52, pp 302-312, Jan/Feb 2016