

스위칭 주파수 전압 주입 센서리스 운전 시 인버터 비선형성에 의한 각 추정 오차 분석

배승훈, 이옥진

충남대학교

Analysis of Position Estimation Error Due to Inverter Nonlinearity in Switching Frequency Voltage Injection Sensorless Operation

SeungHoon Bae, Wook-Jin Lee

Chungnam National University

ABSTRACT

본 논문은 스위칭 주파수 전압 주입 센서리스에서 인버터의 비선형성에 의한 각 추정 오차를 절반 스위칭 주파수 전압 주입 방식과 비교하여 분석하였다. 인버터의 비선형성에 의한 각 추정 오차는 주입 주파수에 따라 다르게 나타난다. 스위칭 주파수 전압 주입 방식의 경우 전압 왜곡이 스위칭 on/off sequence에서 부호가 반대로 나타나 각 추정 오차가 발생한다. 반면, 스위칭 절반 주파수 전압 주입 방식의 경우 전압 왜곡이 스위칭 on/off sequence에서 각각 양과 음의 부호를 모두 갖게 되고 이는 상쇄되어 인버터 비선형성에 의한 각 추정 오차를 유발하지 않는다. 본 논문에서는 두 주입 주파수에 따른 인버터 비선형성에 의한 각 추정 오차를 이론적으로 분석하고 이를 시뮬레이션을 통해 타당성을 검증한다.

1. 서 론

매입형 영구자석 동기전동기(IPMSM, Interior Permanent-Magnet Synchronous Motor)는 높은 효율을 가져 많은 산업 분야에서 고성능 가변속 모터로 사용되고 있다. IPMSM의 고성능 제어를 위해서는 회전자 위치에 대한 정보가 필요하다. 돌극성이 있는 IPMSM의 경우 저속 운전 영역에서는 고주파 전압을 주입하고, 유도되는 전류신호로부터 회전자의 위치 정보를 추출하는 방법이 위치 센서 없이 전동기를 제어하는 방법으로 널리 사용되고 있다.^[1]

구형과 전압 주입 방법은 추정된 회전자 좌표계 d축에 구형과 전압을 인가한다. 인버터가 비이상적인 경우, 동기좌표계 d축 구형과 전압 지령과 실제 인가되는 전압 사이에 오차가 발생하여 각 추정 오차를 유발한다. 이러한 인버터에 의한 전압 왜곡 현상은 인가되는 전압의 주파수에 따라 다르게 나타난다. 본 논문에서는 이러한 인버터 비선형성에 의해 나타나는 각 추정 오차를 인가되는 전압 주파수에 따라 분석하고 이를 시뮬레이션을 통해 타당성을 검증하였다.

2. 맥동하는 구형과 전압 주입 센서리스 운전에서의 각 추정 오차

2.1. 맥동하는 구형과 전압 주입 센서리스

IPMSM의 전압방정식을 회전자와 동기된 동기좌표계에서 표현하면 (1)과 같다.

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

회전자의 속도는 주입하는 신호의 주파수에 비해 매우 느리고 고주파 영역에서 R_s 의 크기는 L_{ds}, L_{qs} 에 비해 작기 때문에 무시하면 추정된 d축에 식(2)와 같이 전압을 주입하였을 때의 전류변화량은 식(3)과 같다. (k는 양의 정수, $R(\tilde{\theta}_r)$ 은 $\tilde{\theta}_r$ 만큼 회전시키는 회전변환 행렬이다.)

$$v_{dqsh}^r[n] = \begin{bmatrix} v_{dsh}^{r*} \\ v_{qsh}^{r*} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{inj}^*[n] \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

$$\text{where } v_{inj}^*[n] = \begin{cases} V_h, & n = 1, \dots, k \\ -V_h, & n = k+1, \dots, 2k \end{cases}$$

$$\Delta i_{dqsh}^r[n] = \begin{bmatrix} \Delta i_{dsh}^r[n] \\ \Delta i_{qsh}^r[n] \end{bmatrix} = R(\tilde{\theta}_r) \cdot \Delta i_{dqsh}^r[n] \approx T_{samp} \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{ds}} \cos^2 \tilde{\theta}_r + \frac{1}{L_{qs}} \sin^2 \tilde{\theta}_r \\ \frac{1}{2} \frac{(L_{qs} - L_{ds})}{L_{ds} L_{qs}} \sin 2\tilde{\theta}_r \end{bmatrix} \cdot v_{inj}^*[n-2]. \quad (3)$$

식(3)의 q축 전류변화량으로부터 실제 위치와 추정 각 사이의 오차($\tilde{\theta}_r$)는 (4)와 같이 계산된다.

$$\tilde{\theta}_r[n] = \frac{\Delta i_{qsh}^r[n]}{v_{inj}^*[n-2]} \frac{L_d L_q}{T_{samp} (L_d - L_q)}. \quad (4)$$

2.2. 인버터 비선형성에 의한 전압 왜곡

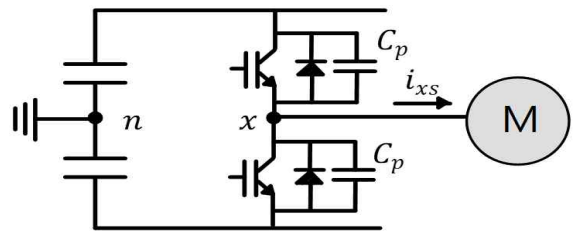


그림 1. 모터에 공급하는 인버터의 한 상의 레그

한편, 각 추정 성능은 인버터의 비선형에 의해 저하될 수 있다. 인버터의 출력전압은 데드타임, 스위칭 반도체 소자의 전압 강하 등의 이유로 왜곡된다.^[2] 그 결과 지령 전압과 실제 인가되는 전압 간 차이가 발생한다.

$$\delta v_{xn}[n] \equiv v_{xn}^*[n-1] - v_{xn}[n]. \quad (5)$$

그림1과 같이 기생커패시터(C_p)가 포함된 인버터에서 데드타임의 영향을 그림2와 같이 나타낼 수 있다

2.3. 전압 왜곡에 의한 각 추정 오차

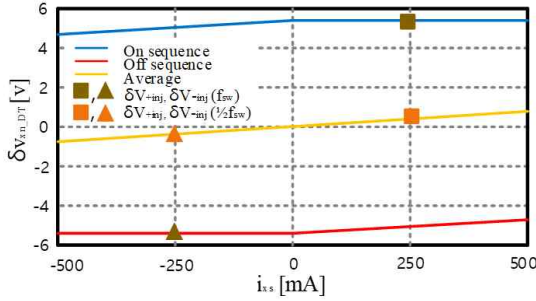


그림 2. 영전류에서 전류와 전압 왜곡 사이의 관계

인버터 비선형성에 의해서, 주입되는 전압 (2)에 극전압 왜곡 성분 (5)를 포함하여 전류변화량을 계산하면 식(6)으로 표현된다.

$$\begin{bmatrix} \Delta \hat{i}_{dsh}^r[n] \\ \Delta \hat{i}_{qsh}^r[n] \end{bmatrix} \approx T_{smp} \begin{bmatrix} -\frac{L_{qs}-L_{ds}}{L_{ds}L_{qs}}\delta v_{qsh}[n-1] \cdot \tilde{\theta}_r \\ + \frac{v_{inj}^*[n-2]-\delta v_{dsh}[n-1]}{L_{ds}} \\ \frac{L_{qs}-L_{ds}}{L_{ds}L_{qs}}(v_{inj}^*[n-2]-\delta v_{dsh}[n-1]) \cdot \tilde{\theta}_r \\ - \frac{\delta v_{qsh}[n-1]}{L_{qs}} \end{bmatrix} \quad (6)$$

식(6)을 식(4)에 대입하여 식(7)과 같이 표현할 수 있다.

$$\tilde{\theta}_{r,est}[n] \approx (1 - \frac{\delta v_{dsh}[n-1]}{v_{inj}^*[n-2]}) * \tilde{\theta}_r - \frac{L_{ds}}{L_{qs}-L_{ds}} * \frac{\delta v_{qsh}[n-1]}{v_{inj}^*[n-2]} \quad (7)$$

$\tilde{\theta}_{r,est}[n]$ 는 전압 왜곡이 포함되었을 때의 추정 각 오차, δv_{+inj} , δv_{-inj} 는 각각 양의 전압, 음의 전압의 주입 동안 극 전압 오차의 평균으로 정의한다. 먼저 스위칭 주파수(f_{sw})의 경우, 주입하는 전압의 부호가 ON sequence일 때 양의 값, OFF sequence일 때 음의 값으로 서로 반대이다. 이 때, 인버터의 비선형성에 의한 전압 왜곡도 반대로 나타난다. 즉, δv_{+inj} 는 그림2의 On sequence 그래프로, δv_{-inj} 는 Off sequence의 그래프로 나타난다. 이러한 극전압 오차는 식(7)에서 추정 각 오차를 유발한다. 특히, 영전류 근처에서는 극 전압 오차가 더욱 크게 나타나 추정 각 오차를 심화시킨다. 반면, 절반 스위칭 주파수($1/2f_{sw}$)의 경우, 주입하는 전압의 부호가 ON/OFF sequence에서 모두 양과 음의 값을 갖게 되고 δv_{+inj} , δv_{-inj} 모두 그림2의 On과 Off sequence의 평균(Average)의 그래프 위에 나타난다. 이는 고주파 전류의 리플이 기생커패시터의 영향을 무시할 정도로 큰 경우가 아니라면, 구형파 전압 인가 한주기 동안의 극전압 오차를 상쇄하는 효과를 갖게 되어 인버터의 비선형성에 의한 추정 각 오차는 거의 발생하지 않는다.

3. 시뮬레이션 결과

표 1 시뮬레이션에 사용된 시스템 파라미터

Dead time	2(μs)	Switching frequency	16(kHz)
Synchronous inductance	$L_{dsh}:7.15(\text{mH})$ $L_{qsh}:10.6(\text{mH})$	V_h	20(V)
pole number	6	Back EMF constant(λ_f)	0.064(V · s)
phase resistance	0.76(Ω)	Rated Current	4(A_{peak})

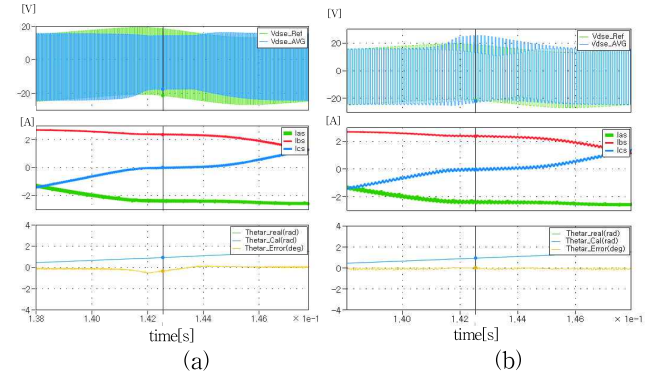


그림 3. 인버터 비선형성에 의한 각 추정 오차. (a) 정격 전류/스위칭 주파수 주입.(b)정격 전류/절반 스위칭 주파수 주입

그림3은 그림1의 인버터를 이용하여 표1 시스템 파라미터를 갖는 진동기 시스템에서 시뮬레이션한 결과를 나타낸다. 앞서 분석한 결과처럼 스위칭 주파수 주입에서는 인버터 비선형성에 의해 각 오차가 나타나며 특히 영전류 근처에서 두드러지게 나타나는 반면, 절반 스위칭 주파수 주입에서는 전압 왜곡이 상쇄되어 각 오차가 나타나지 않은 것을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 스위칭 주파수 전압 주입 센서리스에서 인버터의 비선형성에 의한 각 추정 오차를 절반 스위칭 주파수 전압 주입 방식과 비교하여 분석하였다. 절반 스위칭 주파수 전압 주입 시 주입 전압 한 주기에서 전압 왜곡이 상쇄되어 인버터 비선형성에 의한 추정 각 오차가 거의 발생하지 않는 반면, 스위칭 주파수 전압 주입 시 전압왜곡의 부호가 스위칭 한 주기에서 반대 부호로 나타나며, 특히 영전류 근처에서 전압왜곡의 효과는 증폭되어 각 추정 오차를 심화시킨다.

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/Jun. 2011.
- [2] 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.