

단일 전류센서를 가진 IPMSM 드라이브의 고주파 신호 주입 센서리스 제어

임준혁, 김상일, 김래영[†]
한양대학교

A High Frequency Signal Injection Sensorless Control of an IPMSM Drive with Single Current Sensor

Jun Hyuk Im, Sang Il Kim, Rae Young Kim[†]
Hanyang University

ABSTRACT

본 논문에서는 단일 전류 센서를 가진 IPMSM 구동 시스템의 고주파 신호 주입 센서리스 제어를 제안한다. 단일 전류 센서 시스템에서 3상 전류를 재구축하기 위해 DC link 전류를 검출한다. DC link 전류를 이용하여 3상 전류를 재구축하는 경우의 문제점은 1개 또는 2개의 유효벡터가 DC link 전류를 검출하는데 필요한 최소 시간보다 짧게 인가될 때 발생한다. 센서리스 제어시 이러한 경우가 발생하면, 재구축된 전류의 왜곡에 의해 제어 성능이 저하된다. 본 논문은 전압 벡터가 작은 경우, 전류 예측을 통하여 신뢰할 만한 3상 전류를 재구축하여 전류의 왜곡을 줄임으로써 센서리스 제어 성능을 향상시켰다. 시뮬레이션을 통하여 제안한 기법의 타당성을 검증하였다.

1. 서론

전동기 드라이브는 고성능 제어를 위해서 전류 센서 및 위치/속도 센서를 필요로 한다. 최근에는 구동 시스템의 경제성, 소형화, 센서의 신뢰성 등의 문제 때문에, 센서의 수를 줄이고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있다.

전류 센서의 수를 줄이고자 하는 연구는 인버터의 여러 가지 스위치 상태에서 DC link 전류와 상 전류사이의 관계를 이용한다. 즉 PWM 매 주기마다 인가하는 전압 벡터를 이용하여 2개의 상 전류를 DC link 전류로부터 알 수 있다. 그러나 유효 벡터가 DC link 전류로부터 상 전류를 검출하기 위한 최소 시간보다 짧게 인가된 경우에는 상 전류를 재구축할 수 없다.

위치/속도 센서를 없애고자 하는 연구는 크게 전동기 모델을 이용하는 역기전력 방법과 전동기의 돌극성을 이용하는 방법으로 분류된다. 역기전력 방법은 중·고속 운전영역에서는 충분한 제어 성능을 나타내지만, 저속 운전영역에서는 역기전력이 작기 때문에 만족할 만한 성능을 얻지 못한다. 전동기의 돌극성을 이용하는 방법은 고주파 신호 주입을 통해 전동기의 자기적 돌극성을 추출하여 회전자의 위치를 추정한다. 이 방법은 전동기의 물리적 특성을 이용하므로 정지 상태 및 저속 운전영역에서 만족스러운 제어 성능을 보인다.

본 논문에서는 단일 전류 센서를 가진 IPMSM(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor, IPMSM) 구동 시스템의 고주파 신호 주입 센서리스 제어를 제안한다. DC link 전류에서 상 전류를 검출할 수 없는 경우, 전류 예측 통하여 상 전류를 재구축한다. 센서리스 제어 및 유효 벡터가 작은 경우

를 줄이기 위해 고주파 전압 신호를 전동기의 d 축에 주입한다. 제안한 기법은 시뮬레이션을 통하여 타당성을 검증하였다.

2. 상 전류 재구축 및 전류 예측

인버터의 여러 가지 스위치 상태에서 DC link 전류와 상 전류 사이의 관계는 이미 연구된 바가 있다 [1]. 표 1은 유효 벡터와 DC link 전류로부터의 상 전류관계를 나타낸다. 하나의 유효 벡터는 1개의 상전류를 재구축할 수 있다.

표 1 유효 벡터에 따른 DC link 전류와 상 전류 관계

Voltage Vector	V ₀ (000)	V ₁ (100)	V ₂ (110)	V ₃ (010)	V ₄ (011)	V ₅ (001)	V ₆ (101)	V ₇ (111)
DC link Current	0	+I _a	I _c	+I _b	I _a	+I _c	I _b	0

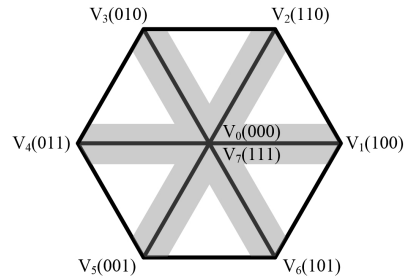


그림 1 상 전류를 재구축할 수 없는 전압 벡터 영역

DC link 전류로부터 상 전류를 재구축하기 위해서는 DC link 전류를 검출하기 위한 최소 시간이 필요하다. 그림 1에서 음영 처리한 부분은 전압 벡터 영역에서 그 최소 시간을 확보하기 어려운 영역을 나타낸다. 이 경우는 식 (1)과 같이 전동기의 dq 축 전류 예측 모델을 이용하여 상 전류를 재구축한다.

$$\begin{aligned} \hat{i}_{ds}^r[n+1] &= \hat{i}_{ds}^r[n] + \frac{L_{ds}}{T_s} (v_{ds}^r[n] - R_s \hat{i}_{ds}^r[n] + \omega_r L_{qs} \hat{i}_{qs}^r[n]) \\ \hat{i}_{qs}^r[n+1] &= \hat{i}_{qs}^r[n] + \frac{L_{qs}}{T_s} (v_{qs}^r[n] - R_s \hat{i}_{qs}^r[n] + \omega_r (L_{ds} \hat{i}_{ds}^r[n] + \lambda_m)) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, $\hat{i}_{d,qs}^r[n+1],[n]$ 는 $n+1$ 과 n 시점에서의 dq 축 전류, $v_{d,qs}^r[n]$ 는 dq 축 전압, $L_{d,qs}$ 는 dq 축 인덕턴스, R_s 는 고정자 저항, ω_r 는 전동기 속도, λ_m 는 영구자석의 자속, T_s 는 샘플링 주기를 나타낸다.

3. 고주파 신호 주입 센서리스 제어

본 논문에서는 회전자 위치를 추정하기 위해서, 추정된 동기좌표계의 d 축에 정현파 형태의 고주파 전압 신호를 주입하는 방법을 적용한다 [2]. 추정된 동기좌표계의 d 축에 고주파 전압 신호를 주입하면, 유기된 고주파 전류는 식 (2)와 같이 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{i}_{ds,h}^* &= \frac{V_{\in j}}{\omega_h} \sin \omega_h t \left(\frac{\cos 2\theta_{err}}{L_{ds}} + \frac{\sin 2\theta_{err}}{L_{qs}} \right) \\ \hat{i}_{qs,h}^* &= \frac{V_{\in j}}{4\omega_h} \sin \omega_h t \left[\left(\frac{L_{qs} - L_{ds}}{L_{ds}L_{qs}} \right) \sin 2\theta_{err} \right] \end{aligned} \quad (2)$$

식 (2)의 고주파 q 축 전류를 헤테로다인(Heterodyne) 방법을 사용하면, 식 (3)과 같이 위치 오차를 추출할 수 있다. 추출한 위치 오차는 위치/속도 관측기를 통해 최종적으로 회전자 위치 및 속도를 추정한다.

$$\begin{aligned} LPF(\hat{i}_{qs,h}^* \times \sin \omega_h t) &= \frac{V_{\in j}}{8\omega_h} \left(\frac{L_{qs} - L_{ds}}{L_{ds}L_{qs}} \right) \sin 2\theta_{err} \\ &\approx \frac{V_{\in j}}{8\omega_h} \left(\frac{L_{qs} - L_{ds}}{L_{ds}L_{qs}} \right) 2\theta_{err} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, $\hat{i}_{d,q,s,h}^*$ 는 추정된 동기좌표계의 고주파 dq 축 전류, $V_{\in j}$ 는 주입 전압의 크기, ω_h 는 주입 주파수, $\theta_{err} = \theta_r - \hat{\theta}_r$ 는 회전자 위치 오차를 나타낸다.

4. 시뮬레이션 결과

제한된 단일 전류 센서를 가진 IPMSM 구동 시스템에서 센서리스 제어의 타당성을 시뮬레이션을 통하여 검증하였다.

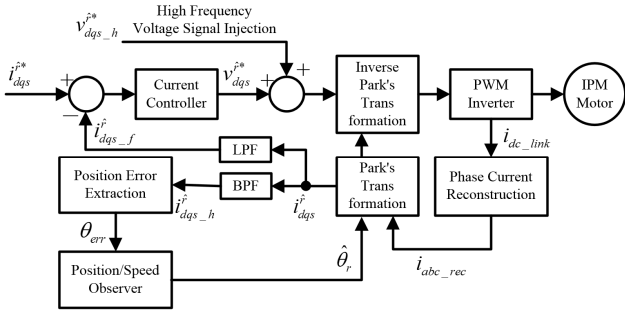


그림 2 단일 전류 센서를 가진 전동기 시스템에서의 센서리스 제어 블록도

그림 2는 제안한 제어 블록도를 나타낸다. 그림 3과 4는 100rpm으로 센서리스 운전시, 정상상태에서 전류 예측을 적용하지 않은 방법과 적용한 방법의 센서리스 성능과 재구축한 상전류의 품질을 보여준다. 그림 3과 같이 상전류를 재구축하지 못할 때, 전류 예측을 사용하지 않은 경우 이전 상전류 값을 유지하도록 하면 현재 재구축하는 상전류가 왜곡된다. 이는 회전자 위치 오차 정보를 가지고 있는 $\hat{i}_{q,s,h}^*$ 를 왜곡시키므로 센서리스 제어 성능의 저하를 가져온다. 그림 4는 전류 예측을 통해 상전류를 재구축한 경우로, 그림 3의 경우에 비해 재구축한 상전류의 왜곡이 적으며, $\hat{i}_{q,s,h}^*$ 를 정확하게 추출할 수 있다. 이는 센서리스 제어 성능의 전반적인 향상을 가져온다.

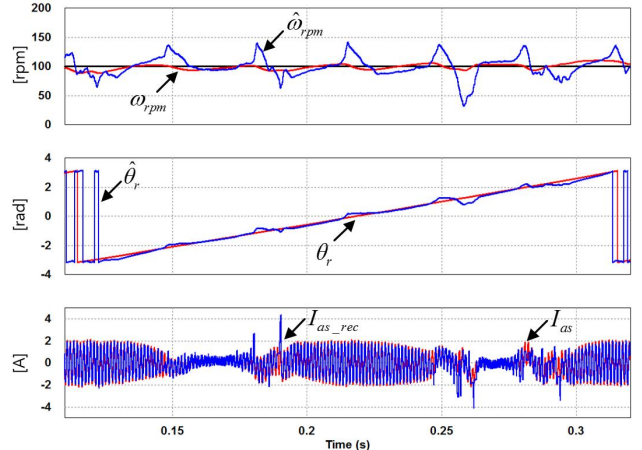


그림 3 상전류를 재구축하지 못한 경우, 전류 예측을 적용하지 않은 고주파 주입 센서리스 제어

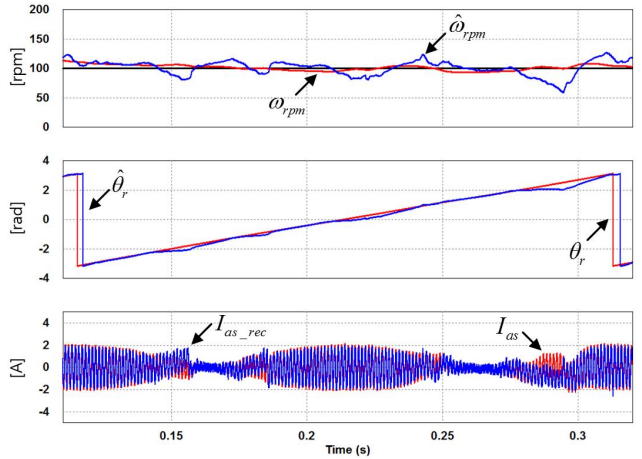


그림 4 상전류를 재구축하지 못한 경우, 전류 예측을 적용한 고주파 주입 센서리스 제어

5. 결론

본 논문에서는 단일 전류 센서를 가진 IPMSM 구동 시스템의 센서리스 제어를 제안하였다. 유효 벡터 인가 시간이 짧아 DC link 전류를 검출하지 못할 경우, 전류 예측을 통하여 상전류를 재구축함으로써 센서리스 제어 성능을 전반적으로 향상시켰다. 제안한 기법을 시뮬레이션에 적용하여 타당성을 검증하였다.

참고 문헌

- [1] M. Carpaneto, P. Fazio, M. Marchesoni, and G. Parodi, "Dynamic performance evaluation of sensorless permanent magnet synchronous motor drives with reduced current sensors," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 59, no. 12, pp. 4579-4589, Dec. 2012.
- [2] J. H. Jang, S. K. Sul, J. I. Ha, K. Ide, and M. Sawamura, "Sensorless drive of surface mounted permanent magnet motor by high frequency signal injection based on magnetic saliency," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 39, no. 4, pp. 1031-1039, Jul./Aug. 2003.