

DC링크 전류센서를 가진 고주파 신호 주입 센서리스 드라이브의 전류 예측을 이용한 전류 재구축 방법

임준혁, 김래영[†]
한양대학교

Current Reconstruction Method Using Current Prediction of High Frequency Signal Injection Sensorless Drive With DC-Link Current Sensor

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

ABSTRACT

본 논문에서는 DC링크 전류센서를 가진 고주파 신호 주입 센서리스 드라이브에서 전류 예측을 이용한 전류 재구축 방법을 제안한다. DC링크 전류센서를 가진 드라이브에서 DC링크 전류로부터 재구축된 3상 전류는 재구축 오차를 포함하고 있다. 이 오차는 고주파 신호 주입 주파수가 높아질수록 커지며, 센서리스 성능을 저하시킨다. 본 논문은 전류 예측을 통하여 재구축 오차를 줄임으로써 센서리스 성능을 향상시켰다. 이는 실험을 통하여 제안한 방법의 유효성을 검증하였다.

1. 서론

오늘날 전동기 드라이브에서는 순시 토크제어를 위해서 전류 및 속도 센서를 필요로 한다. 그러나 경제성, 소형화, 센서의 신뢰성 등의 문제로 인해 센서리스 제어에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

센서리스 제어에 대한 연구는 크게 두가지로, 전동기 모델을 기반으로 하는 역기전력 방법과 전동기의 돌극성을 이용하는 방법으로 분류된다. 전동기 모델을 기반으로 하는 방법은 역기전력이 속도에 비례하므로, 중·고속 운전영역에서 충분한 성능을 나타내지만, 저속 운전영역에서는 역기전력이 작기 때문에 만족할 만한 성능을 보여주지 못한다. 반면에, 전동기의 돌극성을 이용하는 방법은 고주파 신호를 주입을 통해 회전자 위치정보를 포함하고 있는 돌극성 전류를 추출하여 회전자 위치를 추정한다. 이 방법은 전동기의 물리적 특성을 이용하므로 저속 운전영역에서도 충분한 성능을 나타낸다.

최근에는 더 많은 원가 절감을 위해 DC링크 전류센서를 가진 센서리스 제어에 대한 연구가 이루어지고 있다.^{[1][2]} 그러나 DC링크 전류로부터 3상 전류를 재구축하기 때문에, 재구축 오차가 발생한다. 이 오차는 고주파 신호 주입 센서리스에서 주입 주파수가 높아질수록 커지며, 센서리스 성능을 저하시킨다.

본 논문에서는 DC링크 전류센서를 가진 고주파 신호 주입 센서리스 드라이브에서 제어 성능 향상을 위해 전류 예측을 이용한 전류 재구축 방법을 제안한다. 제안한 방법은 전동기 모델을 기반으로, 3상 전류 센서를 가진 드라이브에서의 전류를 예측함으로써 재구축 오차를 줄인다. 그리고 재구축 오차를 줄임으로써 센서리스 성능을 향상시킬 수 있다. 실험을 통하여 제안한 방법의 타당성을 검증하였다.

2. DC링크 전류센서를 가진 고주파 신호 주입 센서리스 드라이브

2.1 일반적인 상전류 재구축

DC링크 전류센서를 가진 드라이브에서 3상 전류는 인버터의 스위칭 상태에 따라 DC링크와 상전류 사이의 관계에 의해 재구축 된다. 그림 1과 같이, 일반적으로 스위칭 한 주기에서 유효 전압벡터가 2개가 존재하므로, 2상의 전류를 재구축할 수 있다. 또한 나머지 한상은 3상 평형이라는 가정에서 재구축된 2개의 전류로부터 얻을 수 있다. 그러나 전류 샘플링 시점이 평균 전류 샘플링을 위한 시점이 아니고, 2상의 전류를 동시에 샘플링 하지 못하므로 전류 재구축 오차가 발생한다. 여기서, Δi_{a-err} 는 a상 전류의 재구축 오차를 의미한다.

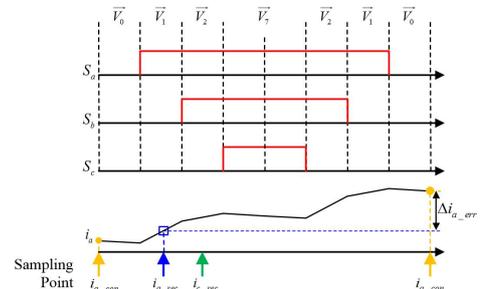


그림 1 PWM 스위칭 패턴과 전류 샘플링 시점
Fig. 1 PWM switching patterns and current sampling point

2.2 고주파 신호 주입에 따른 재구축 오차 분석

DC링크 전류센서를 가진 드라이브에서 고주파 신호주입 센서리스를 적용하면, 전류 샘플링 시점의 차이로, 그림 2와 같이 고주파 신호 주입 주파수가 높아질수록 재구축 오차가 커진다. 그림 2는 주입 주파수에 따른 재구축 오차를 나타낸다.

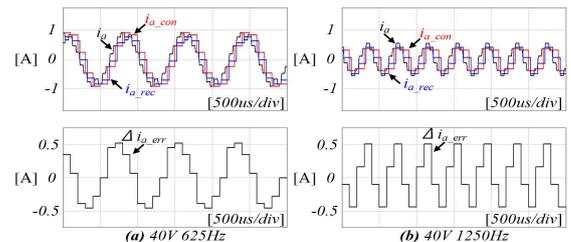


그림 2 정지상태에서 주입 주파수에 따른 재구축 오차
Fig. 2 Reconstruction error under different injection frequencies at standstill

2.3 전류 예측을 이용한 재구축 방법

재구축 오차를 줄이기 위해서는 평균 전류 샘플링 시점의 전류 정보를 얻어야 한다. 그러나 일반적인 상전류 재구축 방법으로는 이 시점의 전류 정보를 얻을 수 없다. 따라서 본 논문에서는 제안한 방법을 통해 평균 전류 샘플링 시점의 전류를 예측한다. 제안한 방법의 전류 예측은 전동기 모델을 바탕으로 식(1)과 식(2)을 이용한다. 예를 들어, 그림 1에서 \bar{v}_0 와 \bar{v}_1 의 DC링크 전류 샘플링 시점 사이까지는 측정된 전류가 없으므로 식(1)을 이용하고, \bar{v}_1 의 DC링크 전류 샘플링 시점과 \bar{v}_2 의 DC링크 전류 샘플링 시점 사이까지는 측정된 전류를 이용할 수 있으므로 식(2)을 적용한다. 마찬가지로, \bar{v}_2 의 DC링크 전류 샘플링 시점과 \bar{v}_3 의 가운데 시점까지는 식(2)을 이용하며, 마지막 스위칭의 off sequence에서 식(1)을 이용하면 최종적으로 평균 전류 샘플링 시점의 전류를 예측할 수 있다.

$$\hat{i}_d^r[n] = \hat{i}_d^r[n-1] + \frac{T_s}{L_d}(v_d^r[n] - R_s \hat{i}_d^r[n-1] + \omega_r L_q \hat{i}_q^r[n-1]) \quad (1)$$

$$\hat{i}_q^r[n] = \hat{i}_q^r[n-1] + \frac{T_s}{L_q}(v_q^r[n] - R_s \hat{i}_q^r[n-1] - \omega_r (L_d \hat{i}_d^r[n-1] + \lambda_{PM} i))$$

$$\hat{i}_d^r[n] = \hat{i}_d^r[n-1] + \frac{T_s}{L_d}(v_d^r[n] - R_s \hat{i}_d^r[n-1] + \omega_r L_q \hat{i}_q^r[n-1]) + K_p(i_{d,ref}^r[n-1] - \hat{i}_d^r[n-1]) \quad (2)$$

$$\hat{i}_q^r[n] = \hat{i}_q^r[n-1] + \frac{T_s}{L_q}(v_q^r[n] - R_s \hat{i}_q^r[n-1] - \omega_r (L_d \hat{i}_d^r[n-1] + \lambda_{PM} i)) + K_p(i_{q,ref}^r[n-1] - \hat{i}_q^r[n-1])$$

그림 3은 그림 2와 같은 조건에서 제안한 방법의 재구축 오차를 나타낸다. 제안한 방법은 주입 주파수와 관계없이 매우 작은 재구축 오차를 유지하고 있다. 그러므로 제안한 방법의 예측 전류를 제어 피드백으로 사용하면, 전류 재구축 정확성의 향상으로 전반적인 센서리스 성능을 향상시킬 수 있음을 예상할 수 있다.

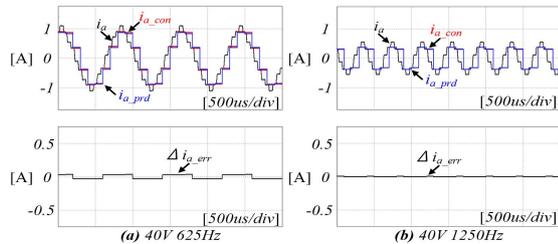


그림 3 주입 주파수에 따른 제안한 방법의 재구축 오차
Fig. 3 Reconstruction error of proposed method under different injection frequencies at standstill

3. 실험 결과

그림 4는 속도 100 rpm 정상상태에서 기존 방법의 40V 625 Hz 신호 주입 센서리스 제어 성능 실험 결과를 나타낸다. 기존 방법은 큰 재구축 오차로 인하여, 속도 리플이 ± 40 rpm 정도, 위치 오차는 $\pm 23^\circ$ 정도를 나타낸다.

반면에, 그림 5는 그림 4와 같은 조건에서 제안한 방법의 센서리스 제어 성능 실험 결과를 나타낸다. 그림 5와 같이, 속도 리플이 ± 10 rpm 정도, 위치 오차는 $\pm 10^\circ$ 정도로 나타난다. 이를 통해 제안한 방법에 의해 줄어든 재구축 오차로 인하여 전반적인 센서리스 성능을 향상된 것을 확인할 수 있다.

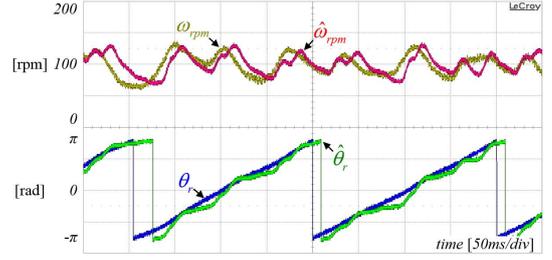


그림 4 기존 방법의 센서리스 성능 실험결과
Fig. 4 Experimental result of sensorless performance with conventional method

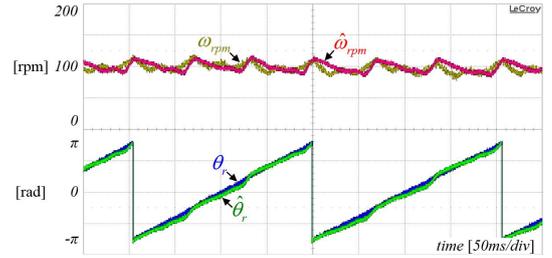


그림 5 제안한 방법의 센서리스 성능 실험결과
Fig. 5 Experimental result of sensorless performance with proposed method

4. 결론

본 논문에서는 DC링크 전류센서를 가진 고주파 신호 주입 센서리스 드라이브에서 제어 성능 향상을 위해 전류 예측을 이용한 전류 재구축 방법을 제안하였다. DC링크 전류센서를 가진 드라이브에서는 전류 샘플링 시점의 차이로 재구축 오차가 발생한다. 이 재구축 오차는 드라이브의 전반적인 제어 성능을 저하시킨다. 특히, DC링크 전류센서를 가진 드라이브에서 고주파 신호 주입 센서리스 제어 적용시 주입 주파수에 따라 재구축 오차가 커진다. 이 분석을 기반으로, 전류 예측 모델을 이용하여 일반적인 평균 전류 샘플링 시점의 전류를 예측함으로써 재구축 오차를 줄였다. 그리고 줄어든 재구축 오차로 인해 전반적인 센서리스 성능을 향상시킬 수 있었다. 제안한 방법은 실험을 통하여 그 유효성을 검증하였다.

본 연구는 2016년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 에너지인력양성사업으로 지원받아 수행한 인력양성 성과입니다. (No. 20164010200860)

참고 문헌

- [1] S. C. Yang, "Saliency Based Position Estimation of Permanent Magnet Synchronous Machines Using Square Wave Voltage Injection with a Single Current Sensor," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 51, no. 2, pp. 1561-1571, Mar./Apr. 2015.
- [2] 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.