

고주파 전류 맥동 제어를 통한 신호 주입 센서리스 방법의 신호 대 잡음 비(SNR) 개선

김동욱, 권용철, 설승기
서울대학교 전기 정보공학부

Enhancement of Signal to Noise Ratio for High Frequency Square-Wave Injection Sensorless Drive with Regulation of Induced High Frequency Current Ripple

DongOuk Kim, Yong Cheol Kwon, and Seung Ki Sul

Department of Electrical and Computer Engineering, Seoul National University

ABSTRACT

신호 주입 센서리스 구동 시, 인버터의 비선형성으로 인한 주입 전압 왜곡현상은 전류 신호 정보의 SNR을 떨어뜨리게 된다. 이로 인하여 회전자 위치를 추정하는 과정에서 오차가 발생하는 문제점이 발생한다. 본 논문에서는 인버터의 비선형성이 주입 전압에 미치는 영향을 분석하고, 전류 신호 정보의 SNR을 개선하기 위하여 고주파 전류 맥동의 크기를 일정하게 제어하는 주입 전압을 인가하는 방법을 제안한다. 실험을 통하여, 제안된 방법의 성능을 검증하였다.

1. 서론

지난 20년 동안 교류 전동기 백터 제어에 있어 위치 센서를 사용하지 않고 회전자의 위치를 추정할 수 있는 센서리스 제어 기법이 폭 넓게 연구되었으며 정지시와 저속에서는 신호 주입을 통해 회전자의 위치를 추정하는 방식이 주로 연구되었다. 신호 주입 센서리스 제어 기법은 전동기에 추가적인 전압 신호를 주입하여 이에 반응하는 전류 신호를 통해서 회전자 위치를 추정하는 기법이다. 주입하는 전압 신호는 크게 회전하는 전압을 주입하거나 맥동하는 전압을 주입하는 방법으로 나눌 수 있으며, 최근에는 제어 대역폭을 크게 넓힐 수 있는 고주파 구형파를 주입하는 방법^[1]이 연구되고 있다.

그러나 추가적인 신호 주입은 가청 소음 발생, 인버터의 전압 마진 감소 그리고 추가적인 동손 및 철손 발생과 같은 문제점을 가지고 있다. 주입 전압의 크기를 감소시킨다면 이와 같은 문제점들은 완화시킬 수 있다. 하지만 주입 전압을 감소시킬 경우 인버터 비선형성 문제에 의하여 신호 대비 잡음비(Signal to Noise Ratio, SNR)가 감소하여 위치 추정 성능이 크게 저하된다^[2].

본 논문에서는 신호 대 잡음비를 향상시킬 수 있는 고주파 전류 맥동의 크기를 일정하게 하는 제어를 통한 신호 주입 센서리스 방법의 SNR을 개선하는 방법을 제안한다.

2. 본론

2.1 현상 분석 및 제안하는 센서리스 방법 설명

본 절에서는 동기 좌표계 d축에 구형파 전압을 주입하는 센서리스 제어 시, 인버터 비선형성에 의한 전류 왜곡 현상이 위치 추정에 미치는 영향을 분석하고 본 논문에서 제안하는 센서리스 방법에 대해서 설명한다.

2.1.1 현상 분석

센서리스 제어를 위하여 스위칭 주파수의 1/2 주파수인 구

형파를 동기 좌표계 d축에 주입할 경우 인버터 비선형성에 의한 극(Pole) 전압오차로 인하여 스위칭 시퀀스(Sequence)에 따라 주입 전압 오차가 발생한다. 이로 인하여 d축 전류 맥동이 왜곡될 뿐만 아니라 인버터 비선형성으로 인하여 q축 전류 맥동이 존재하게 된다. 신호 주입 센서리스 제어 시, 위치 추정에 필요한 정보는 d축 전류 맥동뿐이므로 q축 전류 맥동은 위치 추정에 있어서 잡음 역할을 한다. 결과적으로 인버터 비선형성으로 인하여 위치 추정의 SNR이 나빠진다.

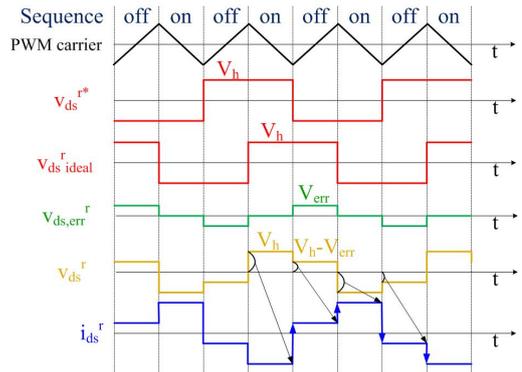


그림 1 인버터 비선형성에 의한 전류 왜곡
Fig. 1 Distortion of current ripple by inverter nonlinearity

2.1.2 제안하는 센서리스 방법 설명

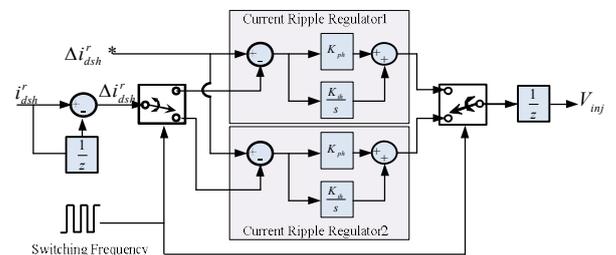


그림 2 전류 맥동 제어기
Fig. 2 Current ripple regulator

SNR을 향상시키기 위해서는 d축 전류 맥동을 일정하게 유지 시켜줘야 한다. 기존 방법과는 달리 그림 2의 전류 맥동 제어기를 이용하여 전압을 주입할 경우 d축 전류 맥동의 크기를 일정하게 유지할 수 있다. 전류 맥동 제어기는 d축 전류 맥동을 제한하여 비례 적분 제어기를 통해 전류 맥동의 크기가 일정해지는 전압 지령을 출력한다. 이 때, 인버터 전압 오차가 스위칭 시퀀스에 따라 달라지므로 스위칭 시퀀스에 따라 전류 맥

등을 분리하여 제어한다.

2.2 실험 결과

실험에서 사용한 전동기 및 제어 상수는 표. 1과 같다.
표 1 전동기 및 제어 상수

Table 1 Motor and control parameters

정격 전압	144V	sampling 주파수	20 kHz
정격 전류	84A _{peak}		
R _s	0.01Ω	스위칭 주파수	10kHz
L _{ds}	143μH		
L _{qs}	21μH	주입전압 주파수	5kHz
극 수	10		

2.2.1 d축 맥동 전류 측정

정지 상태에서 전압을 주입할 때, 그림 3은 전류 맥동 제어기를 적용했을 때의 d축 전류 맥동이다. 실험 결과 전류 맥동 제어기에 의해 주입 전압의 크기가 변동하여 d축 전류 맥동의 크기가 일정해짐을 확인할 수 있다.

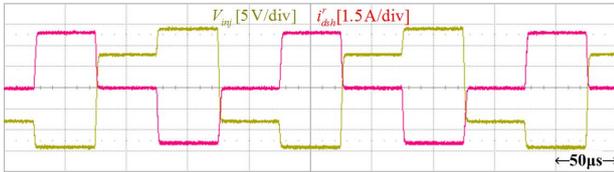


그림 3 제안된 방법 적용 시, 주입 전압과 d축 전류 맥동
Fig. 3 Injection voltage and d-axis current ripple of proposed method

2.2.2 신호 대 잡음 비 비교

아래와 같이 SNR_{th}을 정의할 때, 위치 센서를 이용하여 무부하 조건에서 60r/min으로 회전 시 구형파 전압을 주입하여 기존의 방법과 제안된 방법의 SNR_{th}을 비교한다. 이 때 두 방법 모두 전류 맥동의 rms 값은 동일하다. 실험 결과는 각각 그림 4와 그림 5와 같으며 제안된 방법이 기존 방법보다 SNR_{th}이 36% 향상된 성능을 가졌다.

$$SNR_{th} = \frac{\Delta i_{dsh}^r}{\Delta i_{qsh}^r} \quad (1)$$

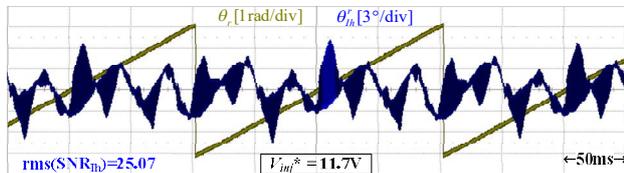


그림 4 기존 방법으로 전압 주입 시, SNR_{th}
Fig. 4 SNR_{th} of under conventional method

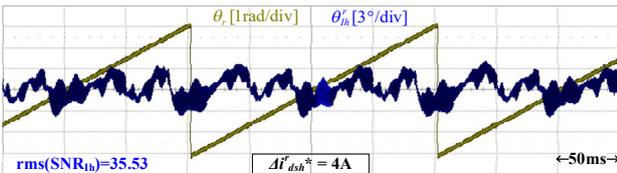


그림 5 제안된 방법으로 전압 주입 시, SNR_{th}
Fig. 5 SNR_{th} of under proposed method

2.2.3 센서리스 제어 성능 비교

무부하 조건에서 기존 방법과 제안된 방법의 센서리스 제어

성능을 비교하였다. 이 실험 또한 2.2.2절의 실험과 동일하게 각 방법들의 전류 맥동 rms값은 동일하게 유지되었다. 실험 결과는 그림 6과 7과 같다. 기존의 방법의 위치 추정 오차의 평균 약 7.064°, 제안된 방법은 약 5.7°로 제안된 방법이 기존 방법보다 약 20% 향상된 결과를 얻을 수 있었다.

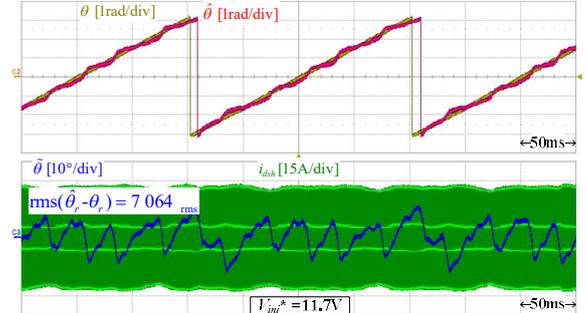


그림 6 기존 방법으로 센서리스 제어 시, 위치 추정 성능
Fig. 6 Sensorless operation performance of proposed method

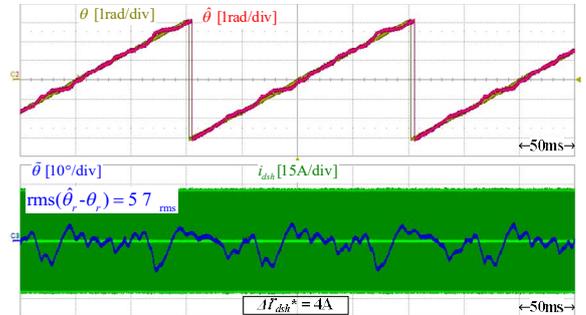


그림 7 제안된 방법으로 센서리스 제어 시, 위치 추정 성능
Fig. 7 Sensorless operation performance of proposed method

3. 결론

본 논문에서는 인버터 비선형성이 구형파 주입 센서리스 제어에 미치는 영향을 분석하고 이를 개선하기 위하여 고주파 전류 맥동의 크기를 일정하게 하는 제어를 통해 센서리스 제어의 성능을 향상시키는 방법을 제안하였다. 제안된 방법이 기존의 방법보다 신호 대 잡음비를 크게 향상시켰으며, 센서리스 제어 성능 또한 향상되었음을 실험을 통하여 검증하였다.

참고 문헌

- [1] Y. D. Yoon, S. K. Sul, Morimoto, K. Ide, "High Bandwidth Sensorless Algorithm for AC Machines Based on Square Wave Type Voltage Injection," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 47, no. 3, pp. 1361-1370, May./Jun. 2011.
- [2] J. M. Guerrero, M. Leetmaa, F. Briz, A. Zamarron, and R. D. Lorenz, "Inverter nonlinearity effects in high frequency signal injection based sensorless control methods," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 41, no. 2, pp. 618-626, Mar./Apr. 2005.