

주입 전압파형의 형상에 따른 고조파 주입 센서리스 기법의 제어 성능 비교

Comparison of Control Performance according to the Injection Voltage Waveform of the Harmonic Voltage Injection Sensorless Technique

문 경 록*, 이 동 명**

Kyeong-Rok Moon*, Dong-Myung Lee**

Abstract

This paper compares the sensorless control performance according to the applied voltage waveform by injecting sinusoidal, triangular, and square waveform in the harmonic injection sensorless control method. By injecting various voltage shape waveform with a frequency of 1kHz, the error amount of the estimated angle for each waveform is compared and analyzed. For the experiment, the HILS(hardware in the loop simulation) system was used. The hardware is the control board, and the inverter and motor models implemented in Simulink are located in the real-time simulator. The control algorithm is implemented by the FPGA control board, which includes a PWM interrupt service routine with a frequency of 10 kHz, harmonic injection and position detection sensorless algorithm.

요 약

본 논문은 전동기의 저속 영역 운전의 센서리스 기법으로 적합한 고조파 주입 센서리스 제어기법에서 사인파, 삼각파 및 사각파를 주입하여 인가 전압 파형에 따른 센서리스 성능을 비교한다. 본 연구는 영구자석 전동기의 센서리스 기법에 관한 것이다. 1kHz 주파수를 갖는 여러 모양의 파형을 주입하여, 각 파형에 대한 추정된 각도의 오차량을 비교 분석한다. 실험은 HILS(hardware in the loop simulation) 시스템을 이용하였으며, Hardware는 제어보드이며 실시간 시뮬레이터에는 Simulink로 구현된 인버터와 전동기의 모델이 위치한다. 제어 알고리즘은 FPGA 제어보드로 구현하였으며, 이는 10kHz 주파수의 PWM 인터럽트 서비스 루틴, 고조파 주입 및 위치 검출 센서리스 알고리즘 등을 포함한다. HILS 실험을 통해 사인파, 삼각파 및 사각파 고조파 주입시 센서리스 제어 성능을 비교한다.

Key words : HILS; FPGA; High Frequency Voltage Injection; Sensorless control; PMSM; Observer;

* School of Electronic and Electrical Engineering, Hongik University

★ Corresponding author

Email : dmlee@hongik.ac.kr, Tel : +82-2-320-3047

※ Acknowledgment

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by the Ministry of Science, ICT and Future Planning(NRF- 2021R1A2C100578212).

Manuscript received Feb. 24, 2022; revised Mar. 17, 2022; accepted Mar. 19, 2022.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

I. 서론

영구 자석 전동기는 타 전동기에 비하여 효율이 높고, 체적대당 출력 토오크비가 우수하여 가변속 구동 시스템에 널리 적용되고 있다. 통상의 교류 전동기의 벡터 제어에 있어 위치 검출을 위하여 리졸버 또는 엔코더를 사용하고, DSP를 이용하여 전류 및 속도 제어를 행한다[1][2]. 하지만 전동기의 위치 검출 센서는 외부 충격에 취약하여 손상이나 노후가 되어 작동을 못하는 경우가 있다. 이를 해결하기 위하여 센서리스 제어 기법들이 제안되고 있다[3]-[5]. 센서리스 전동기 제어는 엔코더, 리졸버 등의 위치 검출 센서가 없어도 전동기 구동이 가능하게 됨으로써 비용을 절감하고, 시스템 크기를 줄이며, 위치 혹은 속도 센서 고장 문제의 제거로 신뢰성 향상을 가져온다. 하지만 센서리스 모터 제어는 실제값과 추정값의 오차로 인한 제어 성능 저감의 단점이 있다. 따라서 센서리스 제어 성능의 한계로 주 시스템으로 사용하지 못하지만, 위치 센서가 정상 작동하지 못하는 경우 혹은, 고장을 대비한 비상 백업 시스템으로만 센서리스 제어 알고리즘이 활용되는 경우도 있다[6][7].

센서리스 제어 기법은 크게 역기전력을 이용하는 방식과 고조파 신호 인가 방식이 있다[8]. 고조파 주입 센서리스 제어 방식은 기존의 역기전력 추정 센서리스 제어 기법보다 저속에서 위치 추정이 더 용이하다. 고속과 중속에서는 역기전력 센서리스 기법과 결합하여 사용할 수 있다. 또한 기존의 사인파 고조파 전압 주입기법에 비해 노이즈가 적어 효율이 좋으며, 저속에서 각도 추정이 역기전력을 이용하는 센서리스 기법보다 적은 추정 각도값의 오차가 적다는 장점이 있다. 이 기법은 인버터에서 출력되는 전류를 dq 좌표계로 변환된 전류와 전류 제어기의 q 축 전류에 고조파 전압을 주입하게 되며, d 축에서 위치가 추정된다. MCU를 이용하여 사인파를 구현하기가 힘들어 사각파로 대체 하였지만, 사인파보다 각 추종 능력이 떨어진다. 따라서 본 논문에서는 삼각파를 주입하여 사각파보다 구현도 용이하며, 또한 구형파 주입한 경우보다 각도 추정 성능이 우수하다는 것을 보이고자 한다. 본 논문에서는 고조파의 형상을 정현파, 삼각파, 사각파의 형태로 달리했을 때의 센서리스 기법의 성능을 보이고자 한다. 실험은 HILS(hardware in the loop simulation) system을 이용하였다. 전동기 및 전력변환기는 Real time OS 내에 Simulink 모델을 이용하고 구현하고 있으며, 제어기는 FPGA를 이용하여 센서리스 제어를 구현한다.

II. 본론

1. 고조파 주입 센서리스 모터 제어

그림 1은 고조파 주입 센서리스 PMSM의 제어 시스템 구성도이다. 모터 제어 시스템은 속도 제어기, 전류 제어기, dq 변환, SVPWM 시스템으로 구성되어 있다. 센서부착형 제어 즉, 센서드(Sensored) 모터 제어에서는 속도 제어기에서 속도 지령치와 인코더에서 받은 실제 모터의 측정 속도 값과 지령 속도 값을 이용하여 PI제어기 통해 지령 전류를 출력되지만, 센서리스 모터제어에서는 옵저버(Observer)에서 모터의 전류의 정보들을 이용해 모터 속도 추정치 값으로 속도 제어기가 동작하여 전류가 출력 이 되며, 전류 제어기는 속도 제어기의 출력과 전류센서(CT)를 통해 측정된 전류를 dq 좌표계로 변환한 전류 값을 이용하여 전압이 출력이 된다. 출력된 전압을 다시 abc 좌표로 변환하여 SVPWM를 통해 인버터에 게이트 신호를 제어하게 되며, 전력 반도체 소자가 스위칭하여 PMSM에 3상 교류 전원을 공급하여 동작하게 된다[9].

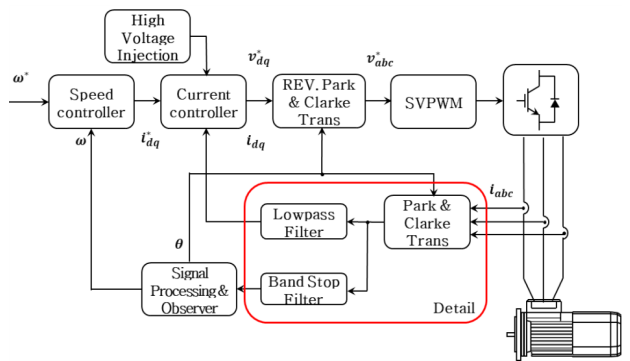


Fig. 1. Motor driver with harmonic voltage injection.

그림 1. 고조파 전압 주입 기법 전동기 구동 시스템

그림 2는 그림 1에 표시된 블록의 상세 그림이며, 고조파 전압 주입 센서리스 제어 시스템도이다. 3상의 전류를 인버터에서 받아 정지좌표계로 변환하여 BSF(bandstop filter) 또는 BPF(bandpass filter)를 이용하여 고조파 성분을 제거한 뒤 고조파 전압을 인가하여 각도 및 속도를 추정하게 된다. 본 논문에서는 BSF를 사용하였다. s -domain에서 BSF는 식 (1)과 같이 표현할 수 있다(여기서, $\omega_0 = 2\pi f_c$, $Q = f_c/f_{bw}$. 단, f_c 는 차단주파수, f_{bw} 는 차단 주파수 폭을 의미한다)[10].

$$G(s) = \frac{s^2 + \omega_0^2}{s^2 + (\frac{\omega_0}{Q})s + \omega_0^2} \tag{1}$$

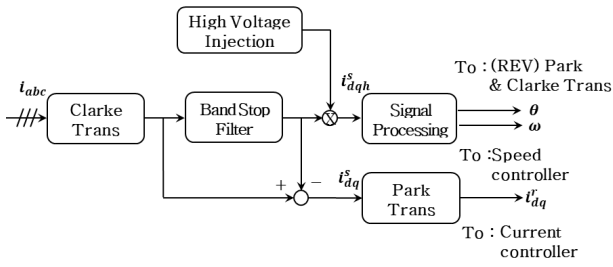


Fig. 2. Rotor angle estimation block diagram.
그림 2. 회전자 각도 추정 블록도

주입 센서리스 기법의 설명은 아래와 같다. PMSM에서 고조파 저항의 크기는 $j\omega_h L_{dq}$ 의 크기에 비해 작아 무시할 수 있으므로 식 (2)와 같이 전동기의 임피던스는 표현된다. 여기서, ω_h 고조파에 대한 각 주파수이다. 고조파 전압과 고조파 전류의 관계는 식 (3)과 같다. 여기서, R 은 고정 좌표계 값을 동기좌표계 값으로 변환하는 행렬을 의미한다.

$$[z^r] = \begin{bmatrix} j\omega_h L_d & 0 \\ 0 & j\omega_h L_q \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} v_{dsh}^r \\ v_{qsh}^r \end{bmatrix} = [z^r] [R(\theta)] \begin{bmatrix} i_{dsh}^s \\ i_{qsh}^s \end{bmatrix} \quad (3)$$

식 (3)을 전류에 대한 식으로 정리하면 식 (4)와 같다. 한편, 회전자의 실제 위치인 θ 와 고조파 전압 주입을 통해 구한 추정 위치인 θ_{cal} 의 위상차는 0도에 수렴하는 작은 값이므로 식 (5)와 같이 변형 가능하다.

$$\begin{bmatrix} i_{dsh}^s \\ i_{qsh}^s \end{bmatrix} = [R(\theta)]^{-1} [z^r]^{-1} \begin{bmatrix} v_{dsh}^e \\ v_{qsh}^e \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} i_{dsh}^s \\ i_{qsh}^s \end{bmatrix} = [R(\theta)]^{-1} [z^r]^{-1} [R(\hat{\theta})] \begin{bmatrix} v_{dsh}^r \\ v_{qsh}^r \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\therefore \hat{\theta} = \theta - \theta_{cal} (\hat{\theta} \approx 0)$$

회전좌표계에서 정지좌표계로 변환하는 식은 식 (6)과 같으며, 식 (2)와 식 (6)의 역행렬을 식 (5)에 대입하면 식 (7)과 같이 정리된다. 같다. 여기서, $v_{qsh}^r = 0$ 이다.

$$[R(\theta)] = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} i_{dsh}^s \\ i_{qsh}^s \end{bmatrix} = \frac{v_{dsh} \sin(\omega_h t)}{L_{dh} \cdot \omega_h} \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \sin(\theta) \end{bmatrix} \quad (7)$$

식 (7)에서 볼 수 있듯이 i_{dqsh}^s 는 cosine, sine 함수 형태이다. 따라서, 고조파 d , q 축 전류에 대해 \arctan 함수를 취하게 되면 회전자 위치를 추정할 수 있다[11][12].

2. 고조파 주입 센서리스 기법 Simulink 모델

그림 3은 Matlab/Simulink로 구현한 고조파 전압 주입기법을 이용한 PMSM의 센서리스 제어 시뮬레이션 모델이다. HILS 실험에서 이 부분은 FPGA 보드를 이용하여 구현된다.

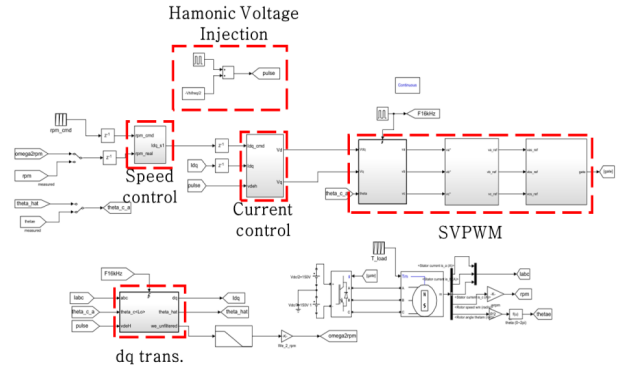


Fig. 3. Sensorless motor control Simulink model.
그림 3. Simulink 센서리스 모터 제어 모델

그림 3에서 보이듯이 각 블록은 식 (6)-(7) 및 BSF를 구현하기 위하여 matlab function 블록을 이용하였다. 고조파가 포함된 3상 전류는 2상으로 변환되고 BSF를 통과하여 고조파 부분이 검출되며, 식 (7)을 구현한 matlab function 블록을 이용하여 회전자 위치를 추정한다. 전류를 위해서는 고조파 전류의 제거를 위하여 LPF를 이용한다.

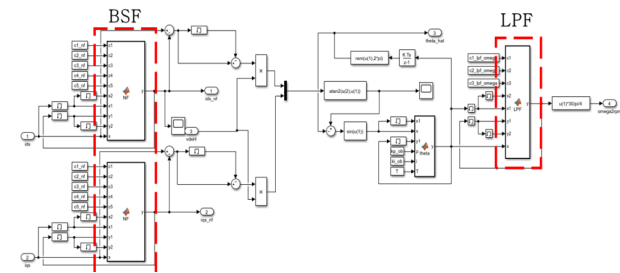


Fig. 4. Rotor position detection Simulink model.
그림 4. Simulink 회전자 위치 검출 모델

3. 실험 구성

PMSM의 파라미터는 표 1과 같이 시뮬레이션에 사용한 값과 동일한 값이다. 그림 5는 실험 장비 사진이다. 각 장치의 명칭은 표 2와 같다. 장치 ③은 제어 보드 ②와 Real time OS ①과의 신호 레벨을 매칭하기 위한 보드이며, 장치 ④와 ⑤은 보드 ③을 위한 전원장치이다. OP4510은 내장 FPGA를 통해 in/output을 받으며, 디지털 신호는 4V-30V, 아날로그 신호는 $\pm 20V$ 로 입출력

을 하게 되며, 외부 FPGA인 DE1-ScC은 최대 3.3V를 출력한다[13]. 따라서, 이 두 장비를 연동하기 위해서 장치 ③을 이용하여 입출력 전압을 조정하였다.

Table 1. System specification used for simulation and HILS experiment.

표 1. 시뮬레이션에 사용한 시스템 사양

Quantity	Comment	Parameter
R_s	Stator resistance	0.15 [Ω]
L_d	d axis inductance	3 [mH]
L_q	q axis inductance	6 [mH]
P	Number of poles	8
P_m	Rated power	1.5 [kW]
f_s	Switching frequency	10 [kHz]
f_h	Frequency of injection voltage	1 [kHz]
V_h	MIN and max magnitude of injection voltage	± 2 [V]

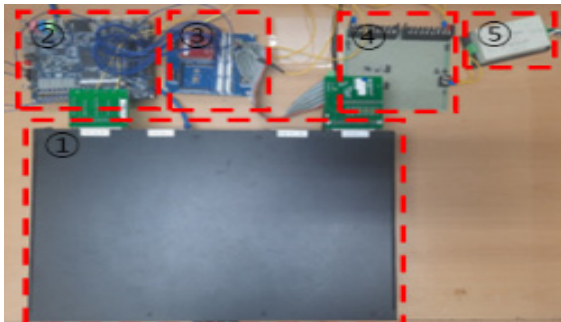


Fig. 5. Experimental equipment.

그림 5. 실험 장비

Table 2. The name of the hardware shown in Figure 5.

표 2. 그림 5에 표시된 하드웨어의 기능

	Comment
①	OP4510
②	DE1-SoC
③	Signal level change board
④	3.3V regulator
⑤	220V to 5V converter

그림 6은 HILS 실험 구성도이다. 10 kHz의 PWM 및 센서리스 알고리즘 구현을 위하여 Verilog HDL을 이용하였으며, FPGA 제어기에서 고조파 주입을 이용한 센서리스 제어기의 알고리즘을 구현하였다. Real time OS인

RT4510에 인버터와 PMSM을 Simulink로 모델링하였다. 실시간 시뮬레이터에 구성된 인버터와 PMSM 동작할 경우 제어기에 필요한 모터의 정보들을 FPGA에 인가하게 된다. 한편, 제어보드에서 Real time simulator로의 출력은 인버터의 게이트 신호이며, HILS에서 사용자가 시스템 동작을 모니터링 할 수 있게 User PC에 사용자가 지정한 데이터를 전송하여 결과값을 그래프로 보여준다.

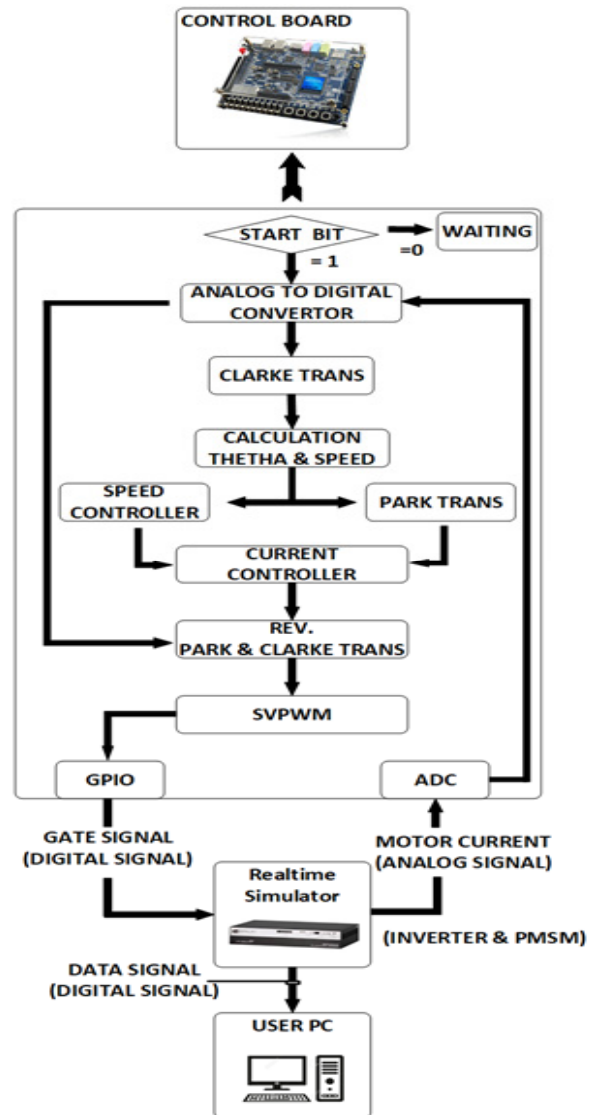


Fig. 6. The design of the experiment.

그림 6. 실험 구성도

4. 실험 결과

외부 FPGA에서 받은 게이트 신호를 받아서 HILS의 Real time simulator에 구현한 모터와 인버터를 구동하여 구한 데이터이다. 실험 결과의 데이터의 경우 OP4510에서 보내진 데이터를 User PC로 보내지며, 이 데이터

는 RT-lab 톨에 내장된 Scope view를 이용하여 그래프화 하였다[14].

그림 7은 d 축 고조파 전류 i_{dsh} 와 q 축 고조파 전류 i_{qsh} 의 그래프이다. 고조파 전류의 위상이 약 90도가 차이가 난다. 그림 7은 BPF를 이용하여 고조파 성분만을 추출한 것이다. 따라서 0을 중심으로 하여 해당 고조파의 주파수의 결과로 나타나는 고조파 성분을 볼 수 있다.

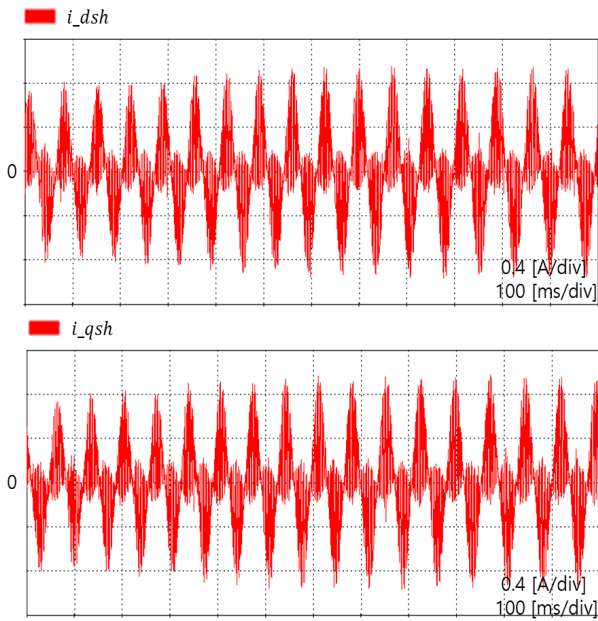


Fig. 7. D -axis and q -axis harmonic current waveform.
그림 7. d 축, q 축 고조파 전류 i_{dsh} , i_{qsh}

그림 8~그림 10은 각각 사각파, 삼각파, 사인파로 주입하였을 경우의 모터의 지령치 속도와 추정 속도(실제 속도)이며, 속도 파형의 아래의 그림은 추정 각도와 실제 각도를 보였다. 그림의 결과는 HILS 실험 결과이다. 한편, 센서리스 운전으로 인해 지령치 속도에 대해서 실제 속도(다시 말해 추정속도)는 오차가 존재함을 볼 수 있다. 다소의 속도 오차는 존재하나 센서리스 동작이 원활하게 이루어짐을 볼 수 있다.

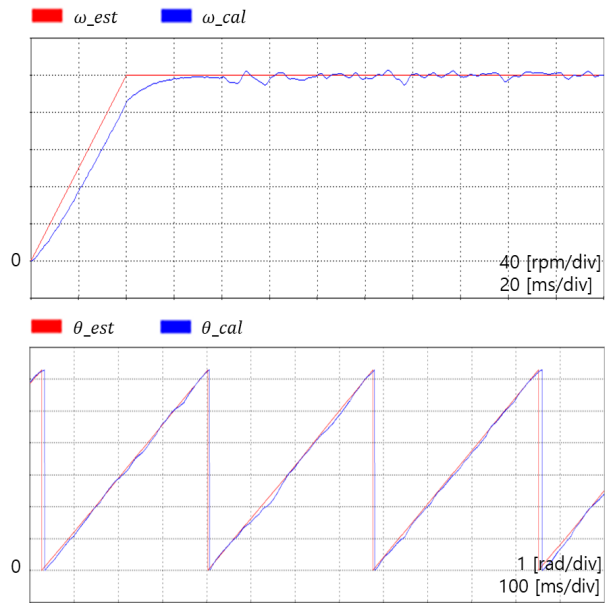


Fig. 9. Speed and angle of triangle wave injection method.
그림 9. 삼각파 주입 시 속도 및 각도

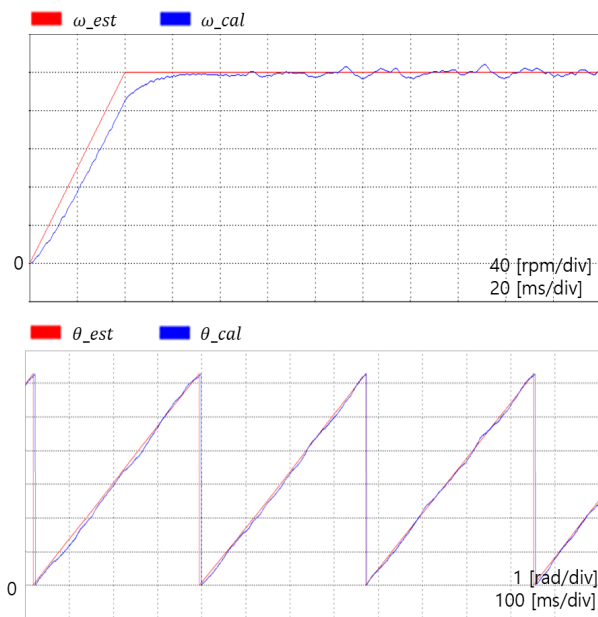


Fig. 8. Speed and angle of square wave injection method.
그림 8. 사각파 주입 시 속도 및 각도

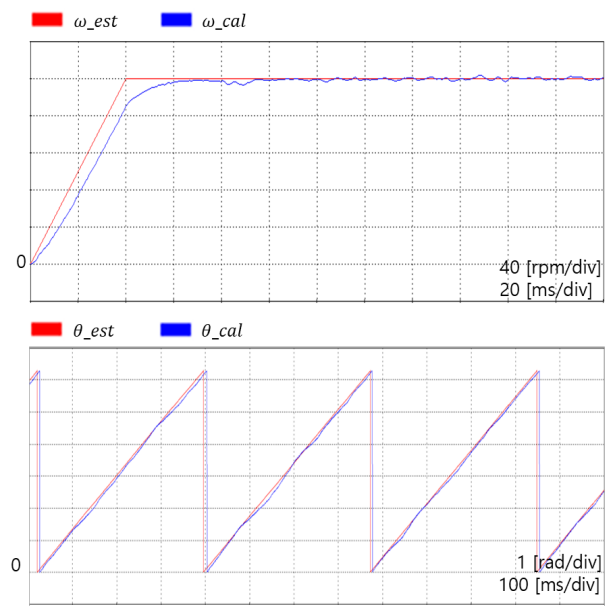


Fig. 10. Speed and angle of sine wave injection method.
그림 10. 사인파 주입 시 속도 및 각도

그림 11은 사각파, 삼각파, 사인파를 주입하였을 경우, 각각의 파형에서 전동기의 추정 각도와 측정 각도 ($\hat{\theta} = \theta_{real} - \theta_{ref}$)의 오차이며, 빨간색 사인파, 파란색 사각파 그리고 초록색은 삼각파이다. 또한, 표 3은 최대 각도 오차를 보이고 있으며, 사인파, 삼각파, 사각파 순으로 최대 오차가 작은 것을 확인할 수 있다.

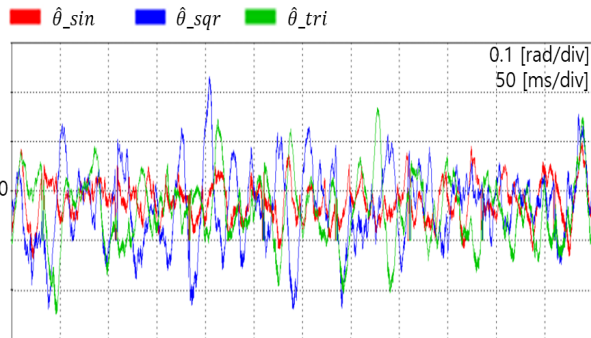


Fig. 11. Angle error for each waveform.
그림 11. 각 파형별 각도 오차의 값

Table 3. The maximum angular error of each waveform.

표 3. 각 파형의 최대 각도 오차($\hat{\theta} = \theta_{real} - \theta_{ref}$)

wave-type	$ \hat{\theta}_{max} [^\circ]$
square	18.97
triangle	15.36
sine	11.35

III. 결론

본 연구에서는 고조파 주입의 파형을 다르게 하여 고조파 전압 주입기법의 센서리스 제어의 성능을 HILS 실험을 통해 보였다. 일반적으로 고조파 주입기법은 사인파, 사각파를 사용되어왔는데 사각파는 소프트웨어로 구현하기 쉽지만 각도의 오차가 크며, 사인파는 각도의 오차는 적지만 구현하기 어렵다는 장단점이 있다. 하지만 삼각파는 사인파보다 구현하기 쉽고, 각도의 오차 또한 사각파보다 적다는 장점이 있다는 것을 실험 결과를 통해 확인하였다. 따라서 고조파 전압 주입 기법에서 삼각파를 이용한 방식이 가장 적합하였다. 즉, 삼각파 주입 기법은 구현이 용이하며, 성능은 사인파와 사각파 주입 기법의 중간 정도의 성능을 보여주어, 다른 파형의 단점을 보완할 수 있음을 알 수 있었다.

References

- [1] J. Holtz. "Sensorless control of induction motor drives," *Proceedings of the IEEE* vol.90, no.8, pp.1359-1394, 2002.
DOI: 10.5370/JEET.2017.12.4.1456
- [2] Sang-Hoon Kim, *모터제어 DC, AC, BLDC Motors*, fudou publishing, 2018.
- [3] S. K. Sul, Y. C. Kwon, and Y. Lee, "Sensorless control of IPMSM for last 10 years and next 5 years," *CES Transactions on Electrical Machines and Systems*, vol.1 no.2, pp.91-99, 2017.
DOI: 10.23919/TEMS.2017.7961290
- [4] C. H. Hong, J. Lee, and D. M. Lee, "Sensorless scheme for interior permanent magnet synchronous motors with a wide speed control range," *Journal of Power Electronics*, vol.16, no.6, pp.2173-2181, 2016. DOI: 10.6113/JPE.2016.16.6.2173
- [5] S. Morimoto, K. Kawamoto, M. Sanada, and Y. Takeda, "Sensorless control strategy for salient-pole PMSM based on extended EMF in rotating reference frame," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol.38, no.4, pp.1054-1061, 2002.
DOI: 10.6113/JPE.2016.16.6.2173
- [6] R. B. Sepe and J. H. Lang, "Real-time observer-based (adaptive) control of a permanent-magnet synchronous motor without mechanical sensors control range," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol.28, no.6, pp.1345-1352, 1992.
DOI: 10.1109/28.175287
- [7] K. Ide, J. K. Ha, and M. Sawamura. "A hybrid speed estimation of flux observer for induction motor drives," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol.53 no.1, pp.130-137, 2006.
DOI: 10.1109/TIE.2005.862306
- [8] S. Makino, et al. "Development of a stator-magnetless linear synchronous motor for sensorless control," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol.53, no.5, pp.4559-4568, 2017.
DOI: 10.1109/TIA.2017.2710942
- [9] B. Han, Y. Shi, X. Song, K. Hong, and K. Mao, "Initial rotor position detection method of SPMSM based on new high frequency voltage

injection method,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol.34, no.4, pp.3553-3562, 2019.

DOI: 10.1109/TPEL.2018.2850318

[10] J. W. Yoon and D. M Lee, “Simulation model of harmonics injection sensorless technique for permanent magnet synchronous motor,” *Journal of Institute of Korean Electrical and Electronics Engineering*, vol.24, no.1, pp.67-71, 2020.

DOI: 10.7471/ikeee.2020.24.1.67

[11] Y. Yoon, S. Sul, S. Morimoto, and K. Ide, “High-bandwidth sensorless algorithm for AC Machines based on squarewave-type voltage injection,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol.47 no.3, pp.1361-1370, 2011.

DOI: 10.1109/ECCE.2009.5316256

[12] B. H. Bae, S. K. Sul, J. H. Kwon, and J. S. Byeon, “Implementation of sensorless vector control for super-high-speed PMSM of turbo-compressor”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol.39, no.3, pp.811-818, 2003.

DOI: 10.1109/TIA.2003.810658

[13] <https://www.opal-rt.com/simulator-platform-op4510/>

[14] D. C. Shin and D. M. Lee, “Development of real-time implementation of a wind power generation system with modular multilevel converters for hardware in the loop simulation using Matlab/Simulink,” *Electronics*, vol.9, no.4, pp.606-626, 2020. DOI: 10.3390/electronics9040606

Dong-Myung Lee (Member)



1994 : BS degree in Electrical Engineering, Hanyang University.

1996 : MS degree in Electrical Engineering, Hanyang University.

2004 : PhD degree in ECE Georgia Tech.

2008~present : Professor, School of Electronic and Electrical Engineering, Hongik Univ.

BIOGRAPHY

Kyeong-Rok Moon (Member)



2016 : BS degree in Electrical Engineering, Hongik University.

2021 : MS degree in Elect. and Electronic Engineering, Hongik University.