

단상 영구자석 동기전동기의 속도 가변형 비례공진 전류제어에 관한 연구

A Study on Speed Variable Proportional Resonant Current Controller of Single-Phase PMSM

이 원 석*, 황 선 환*[★], 박 중 원**

Won-Seok Lee*, Seon-Hwan Hwang*[★], Jong-Won Park**

Abstract

This paper proposes a speed variable proportional resonant current control method for a single-phase permanent magnet synchronous motor(PMSM). Due to the electromagnetic characteristics of a single-phase PMSM, negative and zero torques are generated in the part corresponding to the phase difference between the stator current and the back electromotive force. In addition, overcurrent limitation is required because of the low stator resistance and inductance in sensorless operation. When using the vector control for current control of single-phase PMSM under these conditions, processes of coordinate transformation, inverse coordinate transformation, and generation of virtual dq -axis components are required. However, the proposed variable speed proportional resonant current control method does not need the coordinate transformation used for AC motors. In this paper, we have confirmed stable maneuverability by using variable proportional resonant current control algorithm, and proposed sensorless control based on a mathematical model of a single-phase PMSM without a position sensor when reaching a constant speed. The usefulness of the current control method was verified through several experiments.

요 약

본 논문은 단상 영구자석 동기전동기의 속도 가변형 비례공진 전류제어 기법을 제안한다. 단상 영구자석 동기전동기는 전자 기적 특성상 고정자 전류와 역기전력의 위상차에 따른 부토크 및 영토크가 발생하며 센서리스 운전 시 낮은 고정자 저항과 인덕턴스로 인해 과전류 제한이 필요하다. 이러한 조건하에서 전류제어를 위해 3상 교류 전동기에 사용되는 벡터 제어를 이용할 경우, 좌표변환, 역좌표변환 및 가상의 dq 축 성분을 생성하는 과정이 필요하다. 하지만, 단상 영구자석 동기전동기의 자기적 특성을 고려하여 제안한 속도 가변형 비례공진 전류제어 기법은 3상 교류 전동기에 사용되는 좌표변환 과정이 필요하지 않다. 본 논문에서는 가변 비례공진 전류제어 기법을 이용하여 안정적인 기동 성능을 확인하며 일정 속도 도달 시 위치 센서 없이 단상 영구자석 동기전동기의 수학적 모델 기반 센서리스 제어로 제안한 전류제어 기법의 효용성을 다수의 실험을 통해 검증하였다.

Key words : Single-phase PMSM, Coordinate Transformation, Speed Variable, Proportional Resonant, Current Controller

*[★] Dept. of Electrical Engineering, Kyungnam University

** R&D Center, GMB Korea Cooperation

[★] Corresponding author

E-mail : seonhwan@kyungnam.ac.kr, Tel : +82-55-249-2744

※ Acknowledgment

This research was supported by the Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE) and Korea Institute for Advancement of Technology (KIAT) through the National Innovation Cluster R&D program (P0006469 Fuel cell system and thermal management parts development and manufacturing technology).

Manuscript received Sep. 16, 2020; revised Dec. 13, 2020; accepted Dec. 18, 2020.

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

일반적으로 3상 영구자석 동기전동기는 고효율, 고효율 및 유지보수가 용이한 특성 등을 가지고, 다양한 산업 현장에서 사용하며 구조적으로 위치 센서와 6개의 스위칭 소자가 필요하다. 하지만 단상 영구자석 동기전동기는 고효율과 속도제어가 용이하며 3상 교류 전동기 대비 간단한 구조와 적은 스위칭 소자로 인해 소형화가 가능하여 산업 분야, 가전기기 등에 쓰임이 빠르게 확대되고 있는 추세이다. 그러나 단상 영구자석 동기전동기는 전자기적 특성으로 고정자 전류와 역기전력의 위상차에 따른 부토크 및 영토크가 발생하며 고속 운전 및 센서리스 운전 시 낮은 고정자 저항 및 인덕턴스로 인한 과전류 제한이 필요하여 이러한 단상 영구자석 동기전동기의 특성을 고려하여 기동 및 센서리스 운전이 용이한 전류 제어 알고리즘이 필요하다[1]-[5].

단상 영구자석 동기전동기의 전류 제어를 위해 3상 교류 전동기에 널리 사용되는 벡터 제어를 이용할 경우, 좌표변환, 역좌표변환 및 가상의 d, q축 성분을 생성하는 과정이 필요하다. 하지만 공진주파수에서 위상지연이 없고 오픈루프 이득이 무한대인 특징을 가진 비례공진 전류 제어 기법을 사용할 경우 교류신호를 정상상태 오차가 없고 좌표변환과 가상의 dq축 성분을 생성하는 과정이 없이 정좌표계로 제어가 가능하다[6]-[8].

본 논문에서는 단상 영구자석 동기전동기의 속도 가변형 비례공진 전류 제어 기법을 제안한다. 단상 영구자석 동기전동기의 수학적 모델 기반 속도 가변형 비례공진 전류 제어기의 특징과 효용성을 다수의 실험을 통해 검증 하였다.

II. 본론

1. 단상 영구자석 동기전동기 수학적 모델링

단상 영구자석 동기전동기는 그림 1과 같이 일반적으로 직류전원, 직류단 커패시터, 풀 브리지 인버터, 단상 영구자석 동기전동기로 구성되어 있으며 고정자 전압 방정식의 수학적 모델링을 통해 자속과 역기전력을 추정할 수 있다.

단상 영구자석 동기전동기의 고정자 전압 방정식은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_s = R_s i_s + \frac{d\lambda}{dt} \tag{1}$$

여기서, v_s 는 고정자 전압, i_s 는 고정자 전류, R_s 는 고정자 저항, λ 는 고정자 쇄교자속이다.

고정자의 쇄교자속은 회전자인 영구자석에 의한 쇄교자속과 고정자에 흐르는 전류에 의한 자속으로 표현할 수 있다.

$$\lambda = \lambda_p + \lambda_s, \lambda_p = -K_E \cos\theta, \lambda_s = L_s i_s \tag{2}$$

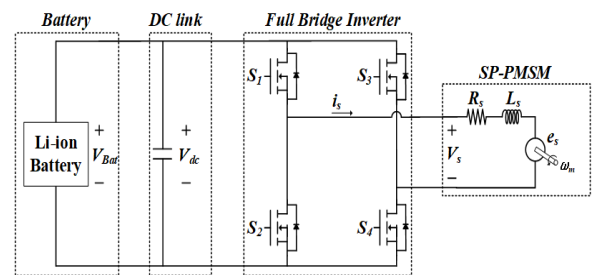


Fig. 1. Circuit of single-phase PMSM with full-bridge inverter. 그림 1. 풀 브리지 인버터를 갖는 단상 영구자석 동기전동기의 회로도

여기서, λ_p 는 고정자에 의한 자속, λ_s 는 고정자에 흐르는 전류에 의한 자속, K_E 는 역기전력 상수, θ 는 위치각, L_s 는 고정자의 인덕턴스, i_s 는 고정자 전류이다.

식 (2)를 고정자 전압 방정식인 식 (1)에 대입하여 전개하면 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_s = R_s i_s + L_s \frac{di_s}{dt} - K_E \omega \sin\theta \tag{3}$$

2. 제안한 속도 가변형 비례공진 전류 제어

단상 영구자석 동기전동기의 역기전력 기반 센서리스 제어 기법은 정지 상태와 저속 운전일 경우 낮은 역기전력으로 인해 회전자의 정확한 위치를 추정하기 힘들다. 이에 본 논문에서는 V/f, AC PI, 속도 가변형 비례공진 전류 제어를 통해 각각의 기동 특성을 확보하고 속도 가변형 비례공진 전류 제어기의 효용성을 검증하려고 한다.

단상 영구자석 동기전동기의 이상적인 속도 가변형 비례공진 전류 제어기는 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$G_{PR}(s) = K_p + \frac{2K_r}{s^2 + \omega_o^2} \tag{4}$$

여기서, K_p 는 비례 이득, K_r 는 공진 이득, ω_o 는 공진주파수를 나타낸다.

전동기가 운전함에 따라 운전주파수의 변동으로 이상적인 비례공진 전류 제어기의 대역폭이 충분하지 않기 때문에 오픈루프의 이득이 감소하고 안정성이 저하된다. 이러한 안정성 문제를 해결하기 위한 비례공진 전류 제어기의 전달함수 $G_{PR}(s)$ 는 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$G_{PR}(s) = K_p + K_r \frac{2K_r \omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_o^2} \quad (5)$$

여기서, K_p 는 비례 이득, K_r 는 공진 이득, ω_c 는 대역폭주파수, ω_o 는 공진주파수를 나타낸다.

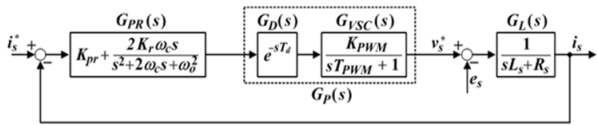


Fig. 2. Block diagram of current control loop.
그림 2. 전류 제어 루프 블록도

그림 2는 비례공진 전류 제어기와 단상 영구자석 동기전동기를 포함한 전체 내부 전류 시스템 블록도이다.

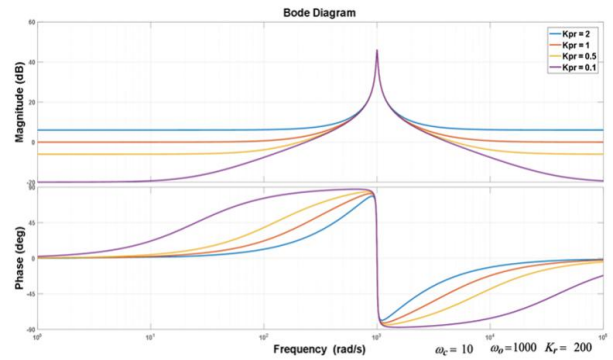
이를 기반으로 교류 전류 지령과 외란을 포함한 폐루프 전달함수를 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$i_s = \frac{G_{PR}(s) \cdot G_p(s) \cdot G_L(s)}{1 + G_{PR}(s) \cdot G_p(s) \cdot G_L(s)} i_s^* - \frac{1}{1 + G_{PR}(s) \cdot G_p(s) \cdot G_L(s)} e_s \quad (6)$$

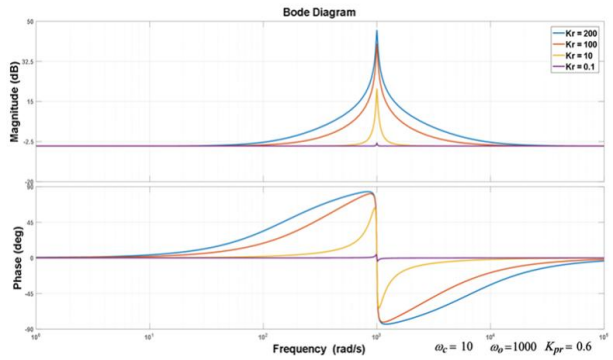
공진주파수(운전주파수) 지점에서의 제어 시스템 이득 $G_{PR}(s) \cdot G_p(s) \cdot G_L(s)$ 은 1보다 크다. 가변 비례공진 전류 제어기의 높은 이득에 의해 폐루프 전달함수의 왼쪽 항은 '1', 오른쪽 항은 '0'으로 수렴함에 따라 식 (7)과 같이 나타 낼 수 있으며 가변 비례공진 전류 제어기는 정상상태 오차가 거의 없으며 외란에 강인한 특성을 가진다.

$$i_s \approx i_s^* \quad (7)$$

그림 3은 속도 가변형 비례공진 제어기를 구성하는 비례 이득과 공진 이득의 변화에 따른 주파수 응답 그래프이다. 비례 이득과 공진 이득이 증가할



(a)



(b)

Fig. 3. Frequency response considering parameter variation of speed variable proportional resonant current controller. (a) Bode diagram at K_{pr} variation (b) Bode diagram at K_r variation.

그림 3. 속도 가변형 비례공진 전류 제어기의 이득 변동을 고려한 주파수 응답 보드선도 (a) K_{pr} 보드선도 (b) K_r 보드선도

수록 시스템의 응답성을 높아지는 반면 주파수의 변동 시 시스템의 안정성은 떨어진다. 따라서 비례 이득과 공진이득을 고려하여 동적, 정적 성능 및 안정성을 확보하여 실험을 진행 하였다.

단상 영구자석 동기전동기의 센서리스 운전과 속도제어를 위해 회전자인 영구자석의 위치와 속도를 추정해야한다.

그림 4는 속도 가변형 비례공진 전류 제어기를 포함한 전체 블록도이다. 회전자인 영구자석의 자속을 기반으로 가변 차단 주파수를 갖는 전역통과 필터의 특성을 통해 회전자의 각을 얻을 수 있다. 이렇게 연산된 위치각 정보를 PLL을 적용하여 회전자의 위치각과 속도를 추정하게 된다.

추정한 속도는 운전주파수 ω_c 로서 식 (5)의 비례공진 전류 제어기의 공진주파수를 아래와 같이 대신한다.

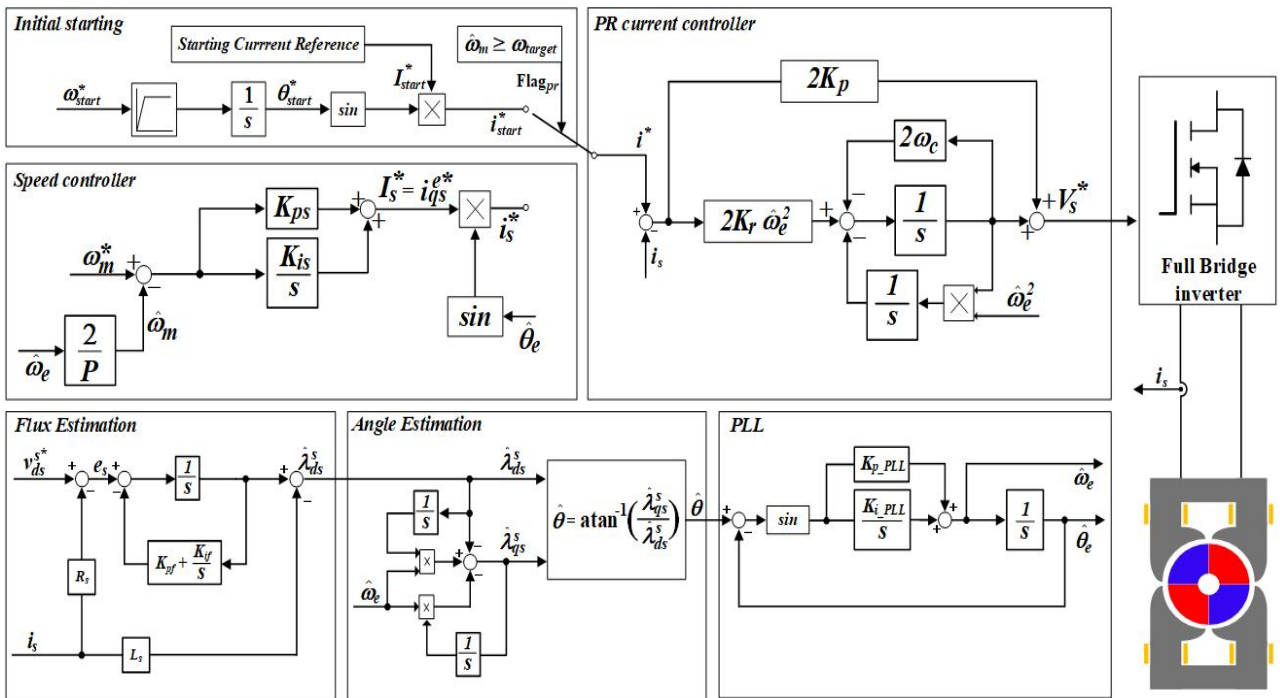


Fig. 4. Overall block diagram with speed variable proportional resonant current controller.
 그림 4. 속도 가변형 비례공진 전류 제어기를 포함한 전체 블록도

$$\omega_o = \omega_e \tag{8}$$

3. 실험 결과

속도 가변형 비례공진 전류 제어 기법을 이용한 단상 영구자석 동기전동기의 센서리스 운전의 효율성을 검증하기 위해 고성능 DSP(Digital Signal

Processor)를 사용한 제어보드와 풀 브리지 인버터를 그림 5와 같이 구성하였다.

속도 가변형 비례공진 전류 제어기를 이용한 단상 영구자석 동기전동기의 센서리스 운전을 효율성을 검증하기 위해서 V/f와 AC I/f 기동 방법과 비교하였다. 이를 통해 속도 가변형 비례공진 전류 제어기의 센서리스 운전의 기동 특성을 확보하고, 효율성을 검증하였다.

Table 1. Parameters of a single-phase PMSM and driving system.

표 1. 단상 영구자석 동기전동기 및 구동 시스템의 파라미터

Parameters		Value
Single-phase PMSM	Number of poles	4
	Rated voltage	25Vdc
	Stator resistance	0.015Ω
	Stator inductance	0.018mH
	back-EMF constant	0.29V/krpm
Full bridge inverter	IGBT(SKiip28GH066V1)	600V/100A
	Capacitor	540uF/400V
	Current sensor	50A
	Voltage sensor	500V
Processor	TMS320VC33	
Power analyzer	WT1800	1000V/50A
DC power supply	N8757A(5100W)	60V/85A

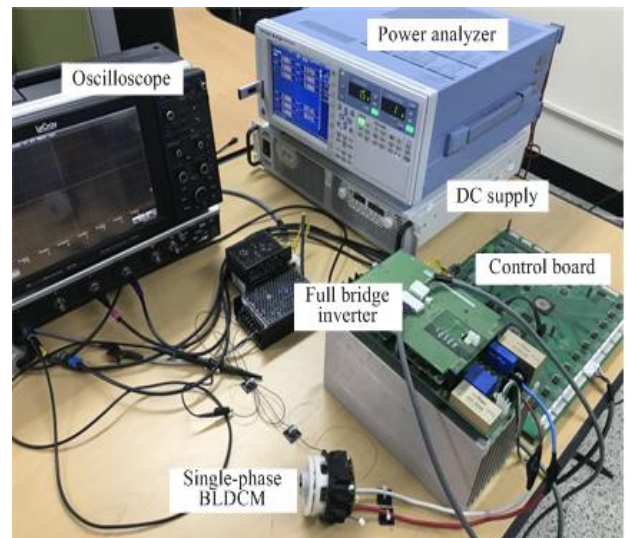


Fig. 5. Experimental setup.
 그림 5. 실험장치

그림 6은 V/f, AC I/f 및 속도 가변형 비례공진 전류 제어기를 사용한 오픈루프 기동 실험 파형이다. V/f는 낮은 고정자의 저항과 인덕턴스로 인해 과전류로 인한 초기 기동을 실패하였고 인가전압 및 주파수 선정에 어려움이 있다.

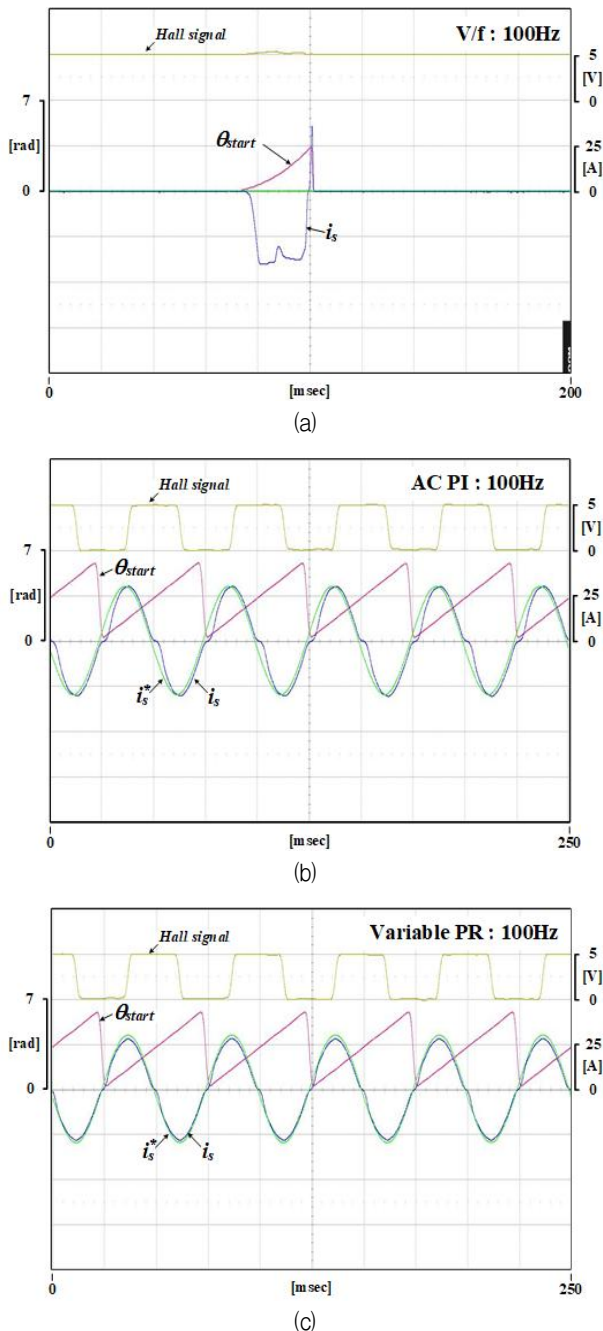


Fig. 6. Experimental waveforms of open loop operation. (a) Waveform of V/f (b) Waveform of AC PI (c) Speed variable proportional resonant current controller.

그림 6. 오픈루프 기동 실험 파형 (a) v/f 파형 (b) AC PI 파형 (c) 속도 가변형 비례공진 전류제어기 파형

그림 7은 AC I/f와 가변 비례공진 전류 제어기의 센서리스 모드로 전환 시 실험 파형이다. AC I/f는 전환 시점의 동적 특성으로 인해 운전 주파수까지의 동작에 어렵고 일정지령 및 실제전류의 위상 및 크기 오차가 존재하지만 속도 가변형 비례공진 전류제어기는 과도상태에서의 과전류 발생을 억제할 수 있으며 실제전류의 위상 및 크기의 오차가 작은 것을 확인할 수 있다.

그림 8은 속도 가변형 비례공진 전류 제어기의 센서리스 운전 실험 파형이다. 30[krpm] 및 50[krpm] 정상상태 운전 조건에서 안정적으로 구동됨을 확인할 수 있다.

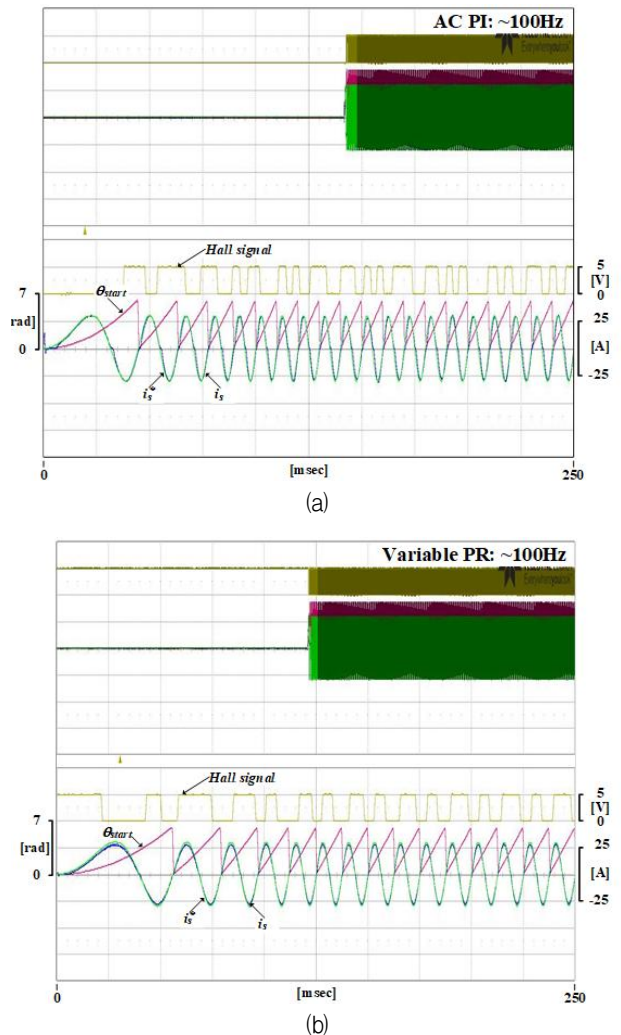


Fig. 7. Experimental waveforms of operation mode conversion. (a) Waveform of AC PI (b) Waveform of speed variable proportional resonant current controller.

그림 7. 운전모드 전환 실험 파형 (a) AC PI 파형 (b) 가변 비례공진 전류제어기 파형

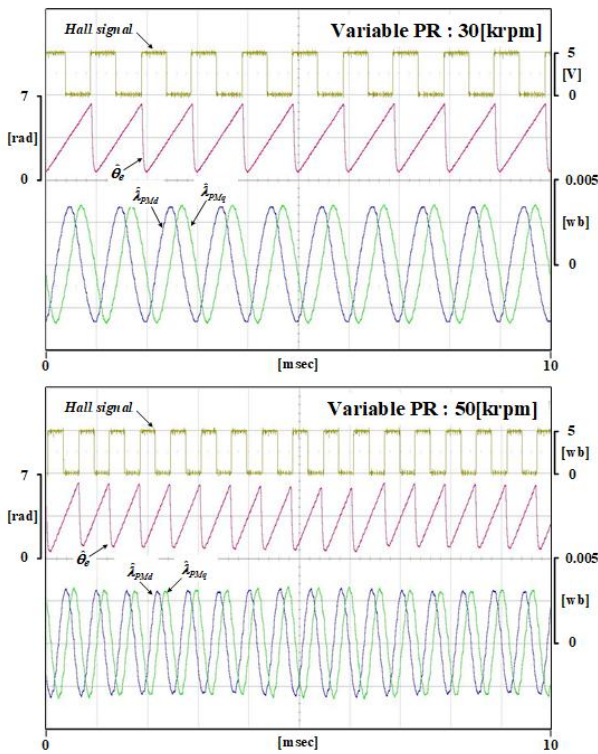


Fig. 8. Experimental waveforms of sensorless operation.
그림 8. 센서리스 운전 시 실험 파형

III. 결론

본 논문은 단상 영구자석 동기전동기의 속도 가변형 비례공진 전류 제어 기법을 제안하였다. 제안한 전류 제어 기법은 3상 동기전동기의 벡터제어에 적용되는 좌표변환 이론을 적용하지 않고 정지좌표계상에서 제어가 가능함을 확인하였고 직류단의 전압 및 기동 전류의 변화에도 안정적인 구동을 다수의 실험을 통해 확인하였다.

이를 통해 제안한 단상 영구자석 동기전동기의 속도 가변형 비례공진 전류 제어 기법의 효용성을 검증하였다.

References

[1] J. Y. Park, and J. I. Ha, "Senseless Control of Single-Phase PM Motor drive and Restart Strategy," *Proceeding of the KIPE Conference*,

pp.99-100, 2016.

[2] C. Chiu, Y. Chen, Y. Liang and R. Liang, "Optimal driving efficiency design for the single phase brushless DC fan motor," *IEEE Trans. on Magnetics*, vol.46, no.4, pp.1123-1130, 2010.

DOI: 10.1109/TMAG.2009.2035051

[3] C. Chiu, Y. Chen and W. Jhang, "Properties of cogging torque, starting torque, and electrical circuits for the single-phase brushless DC motor," *IEEE Trans. on Magnetics*, vol.44, no.10, pp.2317-2323, 2008. DOI: 10.1109/TMAG.2008.2000761

[4] L. Iepure, I. Boldea and F. Blaabjerg, "Hybrid I-f starting and observer-based sensorless control of single-phase BLDC-PM motor drives," *IEEE Trans. on Ind. Electr.*, vol.59, no.9, pp. 3436-3444, 2012. DOI: 10.1109/TIE.2011.2172176

[5] J. Shao, D. Nolan and T. Hopkins, "A novel direct back EMF detection for sensorless brushless DC (BLDC) motor drives," *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, vol.1, pp.300-305, 2002.

DOI: 10.1109/APEC.2002.989224

[6] Trung-Kien, Vn and S. J. Seong, "PR Controller based Current Control Scheme for Single-Phase Inter-Connected PV Inverter," *J. Korean Academic Industrial Society*, vol.10, no.12, pp.1123-1130, 2010. DOI: 10.5762/KAIS.2009.10.12.3587

[7] C. Hanju, et al, "Design and control of Proportional-Resonant controller based Photovoltaic power conditioning system," in *Energy Conversion Congress and Exposition*, pp.2198-2205, 2009.

DOI: 10.1109/ECCE.2009.5316374

[8] R. Teodorescu,, F. Blaabjerg, M. Liserre and P. C. Loh, "Proportional-resonant controllers and filter for grid-connected voltage-source converters," *IEEE Proceeding Electric Power Applications*, vol.153, no.5, pp.750-762, 2006.

DOI: 10.1049/ip-epa:20060008

BIOGRAPHY

Won-Seok Lee (Member)

2020 : BS degree in Electrical Engineering, Kyungnam University.
 2020~Present : MS Course in Electrical Engineering, Kyungnam University.

Seon-Hwan Hwang (Member)

2004 : B.S. degree in Electrical Engineering, Pusan National University.
 2006 : M.S. degree in Electrical Engineering, Pusan National University.
 2011 : Ph.D. degree in Electrical Engineering, Pusan National University.

2011~2012 : Postdoctoral Researcher, Center for Advanced Power Systems(CAPS), Florida State University, Tallahassee, FL, USA.

2012~Present : Professor in Department of Electrical Engineering, Kyungnam University.

Jong-Won Park (Member)

2001 : B.S. degree in Control and Measurement Engineering, Pukyong National University.
 2003 : M.S. degree in Mechanical Engineering, Pukyong National University.

2003~2005 : Researcher, R&D Center for KAERI,

2005~2008 : Researcher, R&D Center for Hyoseong Electric Cooperation.

2008~Present : Researcher, R&D Center for GMB Korea Cooperation.