

단상 영구자석 동기 전동기의 가상 dq축 기반 초기 회전자 자극 검출

Initial Rotor Polarity Detection of Single-phase Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Virtual dq-axis

서 승 우*, 황 선 환*[★], 이 기 창**

Sung-Woo Seo*, Seon-Hwan Hwang*[★], Ki-Chang Lee**

Abstract

This paper proposes an initial rotor magnetic pole detection method for single-phase permanent magnet synchronous motors. The target motor cannot obtain position information based on the back emf in the low speed and stop state. Therefore, an open loop starting process is required, and in this process, initial rotor position information for low current and soft start is need. The proposed initial rotor magnetic pole detection algorithm considers the effect of asymmetric air-gap and magnetic flux. In addition, the high-frequency voltage signal injection and the offset voltage for accurate detection is used. As a result, the permanent magnet poles are is determined by acquiring the maximum value of the induced current using the virtual dq-axis.

요 약

본 논문은 단상 영구자석 동기전동기의 초기 회전자 자극 검출 기법을 제안한다. 대상 전동기는 저속 및 정지 상태에서 역기전력을 기반으로 위치 정보를 얻을 수 없다. 따라서 초기 개루프 기동이 필요하며 이 과정에서 저 전류 및 소프트 기동을 위한 초기 회전자 위치 정보가 필요하다. 제안하는 초기 회전자 자극 검출 알고리즘의 경우 비대칭 공극의 영향 및 영구자석 자속의 영향을 고려하였으며, 고주파 전압 신호 주입을 기반으로 정확한 검출을 위한 오프셋 전압을 이용하였다. 이때 고주파 전압 신호로부터 유도된 고주파 전류의 경우 가상의 dq축을 이용하여 유도된 전류의 최댓값 취득을 통해 회전자 영구자석 자극을 판별한다. 본 논문에서는 센서리스 운전의 저전류 및 소프트 기동을 위해 제안된 초기 회전자 자극 검출 알고리즘을 홀센서 신호를 근거로 효용성 및 타당성을 다수의 실험을 통해 검증하였다.

Key words : Single-phase permanent magnet synchronous motor, High frequency voltage signal, Rotor permanent magnet, Virtual dq-axis, Open-loop starting

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

** Electric Machine and Drives Research Center, Korea Electrotechnology Research Institute

[★] Corresponding author

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

※ Acknowledgment

This research was supported by Unmanned Vehicles Core Technology Research and Development Program through the National Research Foundation of Korea(NRF) and Unmanned Vehicle Advanced Research Center(UVARC) funded by the Ministry of Science and ICT, the Republic of Korea(2020M3C1C1A01086541)

Manuscript received Nov. 26, 2020; revised Dec. 18, 2020; accepted Dec. 22, 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

지속적으로 에너지 효율의 관심이 고조됨에 따라 유도 전동기 대비 높은 전력 밀도와 효율을 가지는 영구자석 동기 전동기는 산업 및 가정용에서의 적용이 지속적으로 증가되는 추세이다. 최근 가전용 어플리케이션의 저용량 전동기는 효율 및 경량화의 필요성이 증가로 3상 영구자석 동기 전동기 대비 간단한 구조 및 코어 형상 설계의 이점으로 소형화 측면에서 우위를 가지는 단상 영구자석 동기 전동기의 활용도가 증가되고 있다. 또한 단일 전류 센서 및 스위칭 소자의 개수가 최소 6개에서 4개로 줄어든 개수를 사용한 인버터 회로 구성이 가능함에 따른 경제적 측면에서도 이점을 가진다. 그러나 3상 영구자석 동기 전동기와 달리 회전자의 특정 위치에 따른 기동 불가능한 사점의 존재로 인해 일반적으로 비대칭 공극 설계가 요구된다[1-3]. 단상 영구자석 동기 전동기의 효율적인 동작을 위해 일반적으로 회전자 자속 기반 제어 방식을 사용한다. 이를 위해서 엔코더, 레졸버 및 홀센서와 같은 위치 센서를 이용하여 회전자 위치정보 취득은 필수적이다. 그러나 센서의 가격적 측면과 함께 전체 시스템의 부피가 증가되는 문제가 발생하며, 단위 부피 당 높은 토크를 가지는 이점을 위해 홀 센서를 이용하는 경우 노이즈 및 비선형적 고온 특성으로 신뢰성 저하의 문제가 발생한다. 따라서 추가적인 H/W 회로와 함께 위치센서를 부착하지 않고 회전자의 위치 및 속도 추정을 위한 센서리스 제어 알고리즘이 요구된다. 그러나 센서리스 제어의 일반적 문제로 영속 및 저속에서 위치정보 취득의 어려움이 존재한다[4], [5]. 본 논문의 경우 단상 PMSM의 초기 회전자 자극 검출 기법을 제안한다. 이는 안정적인 초기 구동을 위해 초기 회전자 위치 검출을 통해 정방향 구동 및 낮은 전류를 통해 정렬을 실현한다. 제안한 방법은 고주파 전압 주입 기법을 기반으로 비대칭 공극 및 단상 PMSM 영구자석 회전자 자속의 영향을 고려하여 가상의 dq축 모델을 이용한 고정자 전류의 크기를 관찰을 통해 초기 회전자 자극을 검출한다. 제안된 방법은 다수의 실험을 통해 타당성을 검증하였다.

II. 단상 영구자석 동기 전동기의 초기 회전자 자극 검출 기법

앞서 언급된 바와 같이 단상 영구자석 동기 전동기의 경우 일반적으로 비대칭 공극을 갖는다. 그림 1과 같이 공극으로 인한 구조적 영향으로 투자율이 높은 곳으로 경로가 한정된다. 때문에 정지 상태에서 발생된 교번 자계 및 자속의 변화를 통해 비대칭 공극에서 자속이 집중되는 부분은 포화가 쉽게 발생한다. 이러한 부분적 포화는 일반적인 고정자 포화 효과와 동일하게 작용하며 포화 효과는 고정자 인덕턴스의 감소를 야기한다[6], [7]. 이때 그림 1 (a)와 같이 회전자 영구자석 위치에 따른 극성의 영향으로 증자 작용이 발생하는 경우 언급된 부분 포화 현상이 발생되며, 그림 1 (b)와 같이 회전자 영구자석의 극성의 영향으로 감자작용이 발생하는 경우 포화는 발생하지 않는다.

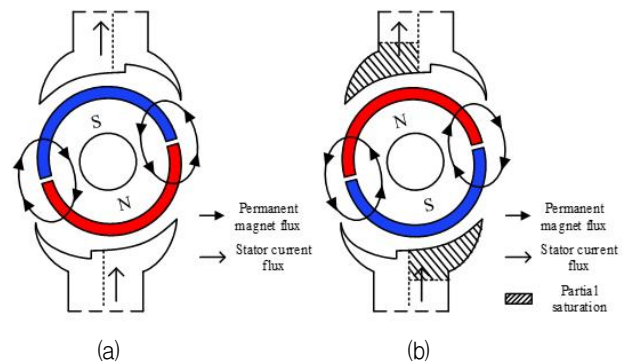


Fig. 1. Partial saturation due to rotor magnetic flux. (a) Demagnetization by rotor magnetic flux, (b) Saturation by rotor magnetic flux.

그림 1. 회전자 자속으로 인한 부분 포화. (a) 회전자 자속에 의한 감자, (b) 회전자 자속에 의한 포화

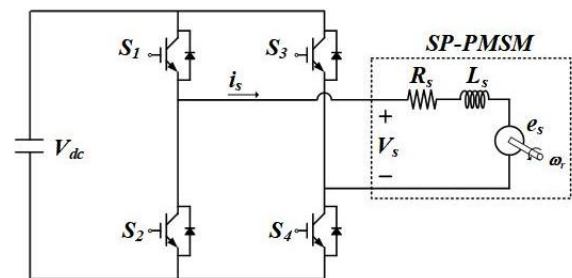


Fig. 2. Equivalent circuit with full bridge inverter of Single-Phase PMSM.

그림 2. 단상 영구자석 동기 전동기의 풀 브리지 인버터 및 등가 회로

1. 고주파 전압 신호의 영향

그림 2는 단상 영구자석 동기 전동기 및 풀 브릿지 인버터를 나타내는 등가회로이다. 직렬의 고정자 저항 및 인덕턴스와 함께 역기전력으로 표현할 수 있으며 정상상태 고정자 전압을 수학적 모델링하는 경우 아래 식으로 나타낸다.

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

여기서 v_s 은 고정자 상 전압, i_s 은 고정자 상 전류, R_s 은 고정자 저항을 나타내며, λ 은 고정자 권선의 쇄교자속을 표현한다. 고정자 권선 쇄교자속은 식(2)와 같이 영구자석에 의한 쇄교자속과 고정자 상 전류에 의한 자속으로 표현 할 수 있다.

$$\lambda = \lambda_{PM} + \lambda_s \tag{2}$$

식 (2)를 식 (1)의 고정자 전압 방정식에 대입 및 고정자 전류에 의한 자속을 인덕턴스와 전류의 관계로 표현 시 다음과 같다.

$$v_s = R_s i_s + L_s \frac{di_s}{dt} + \omega_r \lambda_{pm} \tag{3}$$

이때 L_s 는 고정자 인덕턴스, λ_{PM} 은 회전자 영구자석에 의한 쇄교자속, ω_r 은 전기적 회전 속도 rad/sec를 표현한다.

앞서 언급을 통해 초기 회전자 자극 검출은 고주파 전압 신호를 기반으로 한다. 정지상태에서 고주파 전압 신호 주입을 통해 회전 속도 ω_r 은 '0'이며 식 (3)을 통해 주입된 고주파 전압 신호에 의한 단상 영구자석 동기 전동기 전압 방정식을 표현하는 경우 다음과 같다.

$$v_{s_inj} = \omega_{inj} L_s I_{s_inj} \tag{4}$$

위의 식에서 v_{s_inj} 은 고주파 전압이다. ω_{inj} 은 주입된 고주파 전압 및 유도된 전류의 주파수를 나타내며 I_{s_inj} 의 크기를 가진다. 여기서 단상 영구자석 동기 전동기를 기동이 되지 않도록 선정된 고주파 전압을 통해 회전자의 정지 상태에서 생성된 교번자계 및 고정자 전류에 의한 자속이 회전자 자속에 의한 증자 및 감자 작용을 야기한다. 증자 작용 시 부분포화가 발생하며 고정자 인덕턴스 감소에 의한

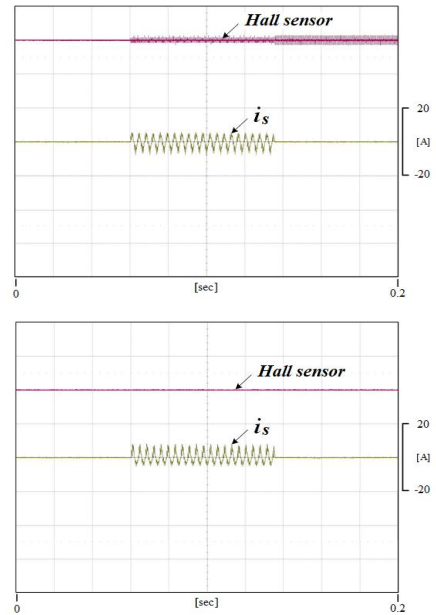


Fig. 3. Induction current according to rotor polarity. 그림 3. 회전자 자극에 따른 유도 전류

전류 크기 I_{s_inj} 는 증가, 감자 작용에 대해서 상대적으로 작은 전류 크기를 가진다[6], [7]. 따라서 회전자 영구자석 자극에 따른 유도 전류의 편차가 발생함에 따라 옴셋으로 나타난다. 그림 3에서 홀 센서를 통해 회전자 자극 정보를 확인할 수 있으며 High일 경우 N극, Low일 경우 S극을 나타낸다. 이때 인가된 고주파 전압 신호에 의해서 유도된 전류의 경우 극성에 따른 크기의 편차가 발생하며 옴셋의 영향으로 나타내고 있음을 볼 수 있다.

2. 옴셋 전압 주입의 영향

그러나 비대칭 공극 형상에 따른 투자율 차이가 적은 경우에 자속의 경로가 집중되지 않아 부분포화의 어려움이 존재할 수 있다. 따라서 일반적인 고주파 전압 신호로는 자극 판별의 어려움이 존재할 수 있다. 이때 고주파 전압 신호에 옴셋 전압을 주입하여 부분 포화 효과를 증대 시켜 자극 판별 용의를 증가 시킨다.

그림 4는 $\lambda-i$ 특성을 통한 공극 내 단상 영구자석 동기 전동기의 선형 및 포화 영역을 나타낸다. 그림 4 (a)와 같이 고주파 전압 주입을 통해 포화 영향이 작은 경우 인덕턴스 변동 폭이 작아 유도 전류정보를 바탕으로 회전자 자극 검출의 어려움이 발생한다. 여기서 고주파 전압 신호에 옴셋 전압을 추가 주입하는 경우 그림 4 (b)와 같이 동작

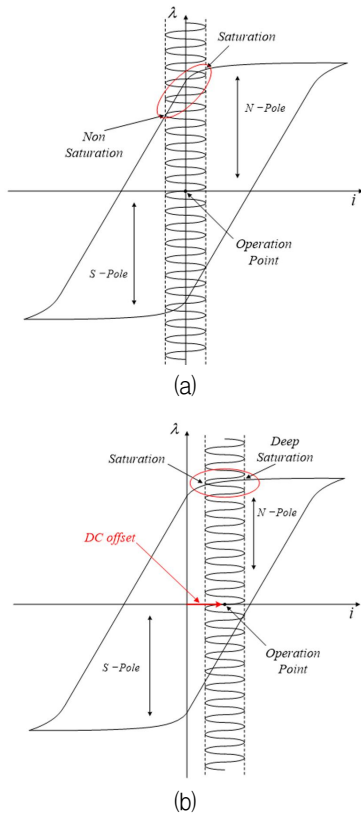


Fig. 4. Linear and saturation regions of $\lambda-i$ characteristics in air-gap. (a) Without DC bias, (b) With DC bias.
그림 4. 공극에서의 선형 및 포화 영역 $\lambda-i$ 특성

점이 이동하며 회전자 영구자석 자속에 의한 포화 현상과 비포화 현상이 뚜렷하게 나타날 수 있다. 이 차이는 인덕턴스의 변동 폭을 증가시켜 유도된 전류 정보의 큰 편차를 발생시킴에 따라 회전자 자극 검출을 용이하게 할 수 있다. 그림 5는 홀 센서를 통한 회전자 자극 정보 및 고주파 전압 신호 및 옹셋 전압을 통해 유도된 전류 크기를 보여주고 있으며, 그림 3과 달리 명확한 크기 차이를 확인할 수 있다. 따라서 나타낸바 고주파 전압 신호 및 옹셋 전압을 통한 유도 전류의 경우 회전자 자극에 따라 상이함을 보이고 이러한 전류 신호의 차이를 취함으로써 초기 회전자 자극 정보를 얻을 수 있다.

3. 제안된 초기 회전자 자극 검출 기법

그림 6은 제안된 초기회전자 자극 검출 기법의 전체 블록다이어그램이다. 고주파 전압 신호 주입 기법을 기반으로 옹셋 전압을 추가로 인가하여 회전자 자극을 검출하기 위해 유도된 전류를 전역통과필터(All Pass Filter, APF)를 통하여 90° 위상차를 가지는 q축을 생성한 가상의 d-q축을 통해 얻

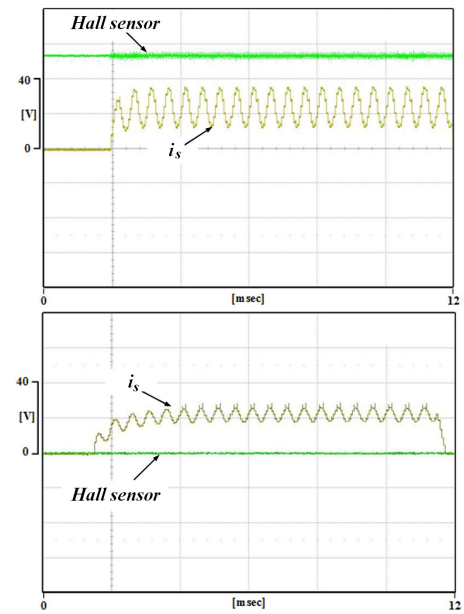


Fig. 5. Induced current through high-frequency voltage signal injection with DC bias.

그림.5. DC 바이어스 및 고주파 전압 신호 주입을 통해 유도된 전류

은 최댓값 크기를 통해 회전자 자극 판단을 한다. 또한 측정 된 전류 값의 경우 저역통과필터(Low Pass Filter, LPF)를 통해 DC offset 성분을 제거한 뒤 피드백 하여 전류제어를 한다.

4. 실험결과

다수의 실험을 통해 검증된 초기 회전자 자극 검출 기법의 경우 TMS320VCC33으로 진행 되었으며, 대상 전동기 및 구동용 풀 브릿지 인버터의 경우 그림 7과 같다. 대상 전동기와 같이 회전자 자속 및 비대칭 공극의 영향이 작은 경우 그림 8과 같이 기존의 고주파 전압 신호 주입으로 판별이 어려울 수 있다. 그림 8은 역기전력을 검출할 수 없는 정지 상태에서의 고주파 전압만 주입 할 때 유도된 전류 정보를 바탕으로 가상의 dq축 기반, 출력된 값을 저역통과 필터를 통해 검출된 자극 정보 결과를 나타내며 홀 센서의 신호에 근거로 자극 정보 판단하기 제한적임을 볼 수 있다. 그러나 그림 9의 경우 offset 전압을 25[V] 주입을 하였으며, (a)는 유도된 위치정보의 크기가 상대적으로 작으며 이는 High 홀 센서 신호와 함께 회전자 자극이 'N'극을 나타내며 그림 8 (b)의 경우 상대적으로 큰 위치정보와 함께 'S'극임을 알 수 있다.

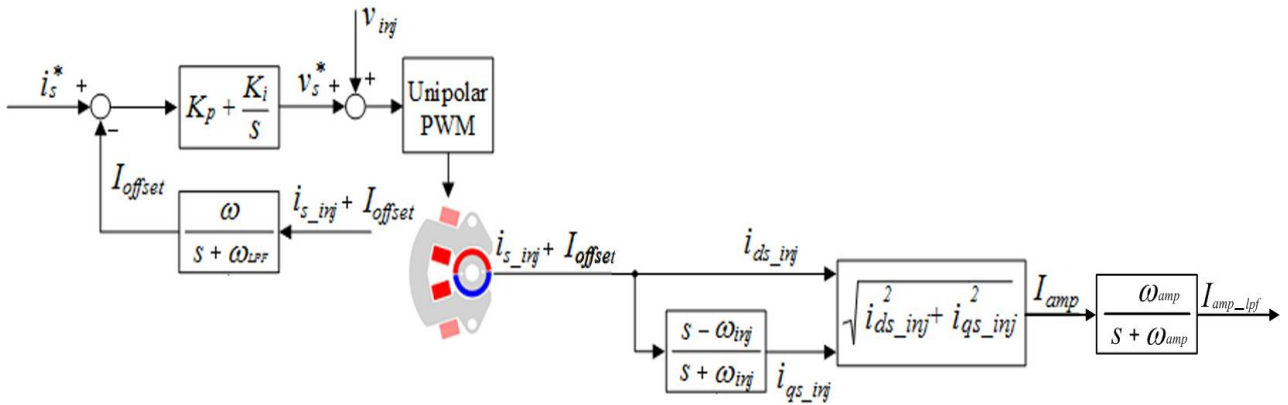


Fig. 6. Proposed rotor polarity detection block diagram.
 그림 6. 제안된 회전자 자극 검출 블록도

III. 결론

본 논문은 단상 영구자석 동기 전동기의 역기전력 측정이 제한적인 정지 상태에서 초기 회전자 자극 검출 알고리즘을 제안한다. 초기 회전자 자극 검출을 통한 회전자 위치정보를 습득하여 Open-loop 초기 기동의 저전류 및 소프트 스타팅 동작을 실현 가능하게 된다. 제안된 방법은 고주파 전압 신호 주입을 기반 하여 회전자 영구자석 자속 영향을 통해 자극 정보를 담고 있는 전류를 유도한다. 이때 가상의 d-q축 기법을 적용하여 유도된 전류의 크기를 판단하여 회전자의 자극 위치정보를 얻는다.

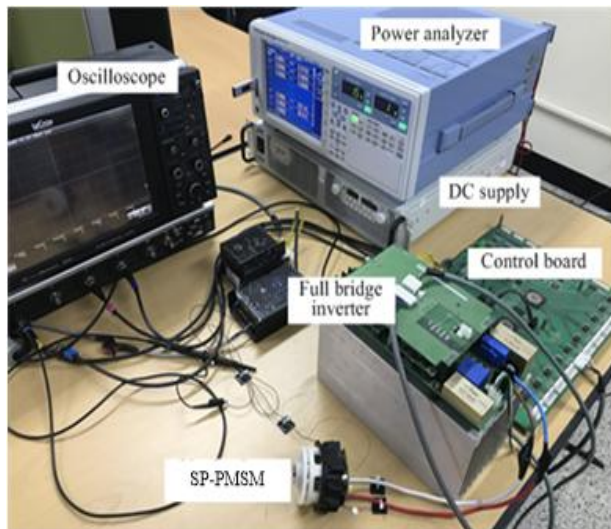


Fig. 7. Experimental setup of single-phase permanent magnet synchronous motor.
 그림 7. 단상 영구자석 동기전동기의 실험장치

Table 1. Parameters of a single-phase permanent magnet synchronous motor and inverter.

표 1. 단상 영구자석 동기전동기 및 인버터 사양

SP-PMSM		Full-bridge inverter	
Pole	4	IGBT	600[V]/100[A]
Rated voltage	25[V dc]	Capacitor	540[uF]/400[V]
Stator winding resistor	0.015[Ω]	Current sensor	70[A]
Stator winding inductance	0.018[mH]	Voltage sensor	500[V]
Bemf constant	0.226[V/krpm]		

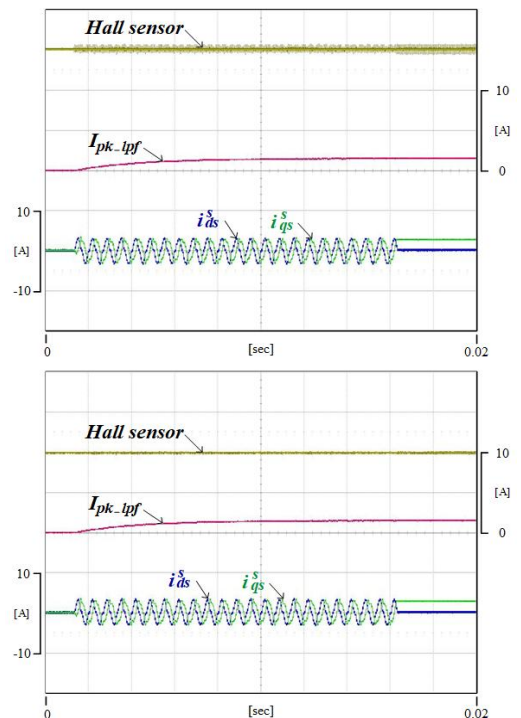


Fig. 8. Hall sensor and induced current information when the offset voltage is '0[V]'.
 그림 8. 오프셋 전압이 '0[V]'인 경우 홀 센서 및 유도된 전류정보

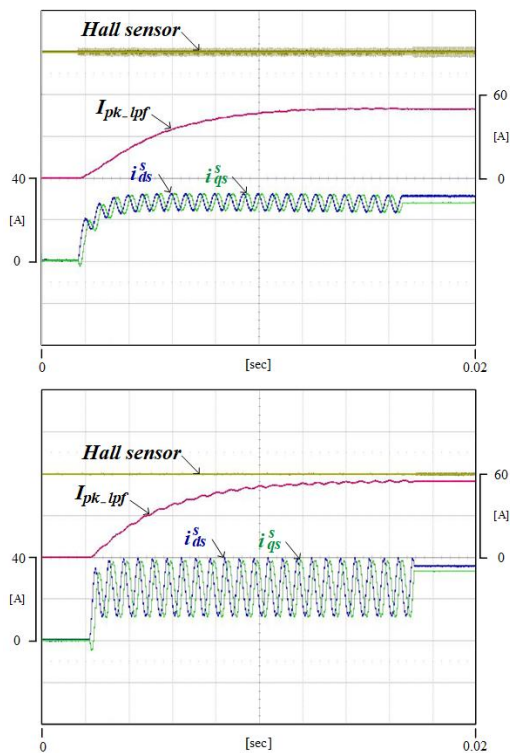


Fig. 9. Detection of polarity information verified by hall sensor signals.

그림 9. 홀 센서 신호에 근거한 극성 검출

References

- [1] F. Muhamamed, and K. R. Rajagopal, "A novel air-gap profile of single-phase permanent-magnet brushless DC motor for starting torque improvement and cogging torque reduction," *IEEE Trans. on Magnetics*, vol.46, pp.3928-3932, 2010. DOI: 10.1109/TMAG.2010.2057514
- [2] K. Byung-Il, Y. Byoung-Yull, P. Seung-Chan and J. Young-Sun, "Novel topology of unequal air gap in a single-phase brushless DC motor," *IEEE Trans. on Magnetics*, vol.37, pp.3723-3726, 2001. DOI: 10.1109/20.952699
- [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.
- [4] L. Ying and N. Ertugrul, "A starting strategy for a robust position sensorless technique in non-salient PM AC motor drives," *IEEE Power Electronics*

and Motion Control Conf.(IPEMC), vol.2, pp. 1028-1032, 2004.

[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] H. Ohta, T. Sato, I. Masugane and K. Matsuse, "Rotor pole discrimination and simple starting method of new single-phase PM motor without position sensor," *IPEMC 2000. Third International Power Electronics and Motion Control Conference*, 2000. DOI: 10.1109/IPEMC.2000.884563

[7] Y. Lai, F. Shyu and S. Tseng, "New initial position detection technique for three-phase brushless DC motor without position and current sensors," *IEEE Trans. on Ind. Appl.*, vol.39, pp. 485-491, 2003. DOI: 10.1109/TIA.2003.809450

BIOGRAPHY

Sung-Woo Seo (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.

Ki-Chang Lee (Member)

1998: B.S. degree in Electrical Engineering, Pusan National University.

2000 : M.S. degree in Electrical Engineering, Pohang University of Science and Technology.

2014 : Ph.D. degree in School of Mechanical Engineering, Pusan National University.

2000~Present : works in Korea Electro- technology Research Institute (KERI).

2015~Present : Principal Researcher, Unman-ned Vehicle Electric Propulsion Team Leader in KERI