

오프셋 전압을 이용한 단상 영구자석 동기 전동기의 초기 회전자 위치 검출

Initial Rotor Position Detection of Single-phase Permanent Magnet Synchronous Motor using Offset Voltage

황 선 환*, 서 승 우*, 정 태 욱*

Seon-Hwan Hwang*, Sung-Woo Seo*, Tae-Uk Jung*

Abstract

This paper propose an initial rotor position detection method for sensorless operation of a single-phase permanent magnet synchronous motor(SP-PMSM) with asymmetric air-gap. In general, the sensorless control based on back-emf estimation is difficult to estimate the back-emf at the zero and low speed regions. For this reason, an open loop start-up technique is indispensable, and it is also necessary to detect the initial position of the rotor in order to rotate in a certain direction. In this paper, we propose a method to detect rotor polarity by adding offset voltage to high frequency voltage signal based on the magnetic characteristics of SP-PMSM. The validity and usefulness of the proposed algorithm are verified through several experimental results.

요 약

본 논문에서는 비대칭 공극을 갖는 단상 영구자석 동기 전동기의 센서리스 운전을 위한 초기 회전자 위치 검출 알고리즘을 제안한다. 일반적인 센서리스 운전 기법 중 역기전력 기반의 센서리스 제어는 영속 및 저속운전에서 역기전력 정보를 추정하기 어렵다. 이를 위해 오픈 루프 기동 기법이 필수적으로 요구되고 일정한 방향으로의 회전을 위해서는 회전자의 초기 위치 검출이 반드시 필요하다. 본 논문에서는 단상 영구자석 동기 전동기의 자기적 특성을 이용하여 고주파 전압 주입 신호에 오프셋 전압을 추가하여 회전자 자극을 검출하는 기법을 제안한다. 다수의 실험 결과를 통하여 제안된 알고리즘의 유효성과 유용성을 검증하였다.

Key words : Initial rotor position estimation, Single-phase permanent magnet synchronous motor, Asymmetric air-gap, High frequency injection, Offset voltage

* Dept. of Electrical Engineering, Kyungnam University

★ Corresponding author

E-mail : tujung@kyungnam.ac.kr, Tel : +82-55-249-2628

※ Acknowledgment

This research was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF-2017R1D1A1B03031807) and the National Research Foundation of Korea(NRF-2018R1D1A1B07046255).

Manuscript received June 4, 2019; revised June 11, 2019; accepted June 13, 2019.

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.

1. 서론

영구자석 동기 전동기는 직류 전동기 및 유도 전동기와 달리 고효율, 높은 밀도 및 우수한 제어 성능 등으로 인해 산업 전반에 널리 사용되고 있다. 영구자석 동기 전동기는 구동 전원에 따라 단상과 3상으로 분류할 수 있으며, 단상 전동기는 인버터 부품 감소 및 제조 공정이 복잡 하지 않으며 구현이 간단한 장점이 있다. 그 결과, 전동기 구동 시스템의 사이즈 및 무게 감소를 요하는 가전분야에 적용이 확대되고 있다. 반면, 3상 대비 효율이 낮고 일반적인 구조에서는 영 토크가 존재하는 문제가

발생한다. 이러한 특성으로 인해 대부분의 단상 영구자석 동기 전동기는 비대칭 공극 설계에 연구의 주안점을 두고 있다[1-3].

또한, 영구자석 동기 전동기는 일반적으로 회전자 위치 정보 획득을 위해 홀 센서 및 엔코더 등의 위치센서를 이용하여 제어하게 된다. 특히, 홀 센서는 자기적 노이즈 및 온도 특성, 추가 인터페이스 회로 구성 등 대한 문제가 발생할 수 있으며, 전동기 내부에 홀 센서를 설치하기 위한 별도의 공간이 필요하기 때문에 부피가 증가된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 다양한 센서리스 제어 알고리즘이 연구되고 있다[1], [4-6].

영구자석 동기 전동기의 일반적인 센서리스 제어 방법은 역기전력 또는 자속 추정을 기반으로 제어된다[4-6]. 역기전력의 경우 회전자의 위치와 속도의 함수로 나타낼 수 있기 때문에 홀 센서를 사용하지 않고 추정된 역기전력으로 위치 정보를 얻는 것이 가능하다. 그러나 역기전력 추정 방법의 경우, 영속 및 저속 운전 영역에서는 역기전력을 추정함에 어려움이 있기에 대부분 오픈 루프 기동 기법을 통해서 일정 속도 지점까지 운전을 하게 된다. 따라서 SP-PMSM의 안정적인 오픈 루프 기동을 위해서는 초기 회전자 위치 검출 알고리즘이 필요하다[7-9]. [4]에서는 대칭형 공극을 갖는 SP-PMSM을 시동하기 위한 자속 추정 및 기동 방법이 제안되었다. 하지만, 비대칭 공극을 갖는 단상 영구자석 동기 전동기의 회전자 초기 위치 검출 및 센서리스 운전에 대한 연구는 미비한 실정이다.

본 논문에서는 비대칭 공극을 갖는 단상 영구자석 동기 전동기의 초기 회전자 위치 검출 알고리즘을 제안한다. 기본적으로 비대칭 공극을 갖는 단상 영구자석 동기 전동기의 자기적 특성을 고려하여 고주파 전압 주입 방법을 선택하였고, 이를 통해 단상 영구자석 동기 전동기의 회전자 위치를 검출할 수 있다. 하지만, 단상의 경우 3상 영구자석 동기 전동기와 달리 교번 자계 발생으로 자기포화 발생 및 검출여부가 불명확하기 때문에 비대칭 공극 특성을 고려한 윗셋 전압을 고주파 신호에 추가하여 공극에서의 자속 포화를 만들어낸다. 제안된 초기 자극 검출 기법은 다수의 실험 결과를 통해 그 타당성을 입증하였다.

II. 본론

1. 단상 영구자석 동기 전동기의 수학적 모델링

그림 1은 단상 풀 브리지 인버터를 갖는 단상 영구자석 동기 전동기의 등가회로를 보여주고 있다.

그림 1에서 알 수 있듯이 단상 영구자석 동기 전동기는 고정자 저항, 고정자 인덕턴스 및 역기전력으로 모델링 할 수 있다. 이를 토대로 정상상태에서의 단상 영구자석 동기 전동기의 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 와 i_s 는 단상 영구자석 동기 전동기의 단자 전압과 고정자 상전류이다. R_s 과 λ 는 각각 고정자 저항과 고정자 권선의 쇄교 자속이다.

식 (1)의 쇄교 자속을 영구자석에 의한 쇄교 자속과 고정자 전류에 의한 자속으로 표현하면 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

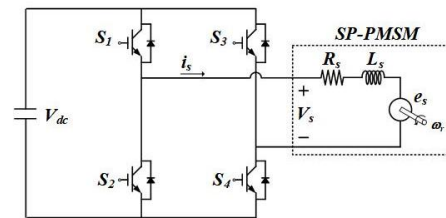


Fig. 1. Equivalent circuit with single-phase full bridge inverter and SP-PMSM.

그림 1. SP-PMSM과 단상 풀 브리지 인버터의 등가 회로

$$v_s = R_s i_s + L_s \frac{di_s}{dt} + e \tag{2}$$

여기서, L_s 와 e 는 단상 영구자석 동기 전동기의 고정자 인덕턴스 및 역기전력이다.

또한, 전기적 출력 토크 T_e 에 의한 기계적 운동 방정식으로 정의하면 식 (3)과 같이 정의된다.

$$T_e = J_m \frac{d\omega_m}{dt} + B_m \omega_m + T_L \tag{3}$$

여기서, ω_m 은 회전자의 기계 각속도이며 J_m 은 전체 시스템의 관성 모멘트, B_m 은 마찰계수, T_L 은 부하 토크이다.

2. 제안한 초기 회전자 위치 검출 알고리즘

2.1 고주파 전압 주입

제안한 초기 회전자 위치 검출 알고리즘의 경우 식 (4)와 같이 단상 영구자석 동기 전동기의 전압 방정식으로부터 유도된다.

$$v_s = R_s i_s + L_s \frac{di_s}{dt} + \omega_r \lambda_{pm} \quad (4)$$

여기서, ω_r 과 λ_{pm} 은 단상 영구자석 동기 전동기의 회전자 전기 각속도 및 영구자석에 의한 쇄교자속이다.

초기 회전자 위치 추정을 위해 고주파 전압 신호만 주입하게 되면 정지 상태에서 ω_r 은 '0'이며 식 (4)의 전압 방정식에서 고주파 저항의 전압 강하를 무시하면 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$v_{s_inj} = \omega_{inj} L_s i_{s_inj} \quad (5)$$

여기서, v_{s_inj} 과 ω_{inj} 는 단상 영구자석 동기 전동기에 주입된 고주파 전압과 주파수이다.

이때, 3상 영구자석 동기 전동기와는 달리 SP-PMSM은 교번 자계로 인해서 자기회로의 포화 정도를 검출하기 불명확한 운전점에 있을 수 있다. 그림 2는 공극 내 SP-PMSM의 $\lambda-i$ 특성 곡선을 나타내는 것으로 식 (5)의 고주파 전압 신호가 SP-PMSM에 적용될 때 그림 2(a)와 같이 공극에서 교번 자계가 발생한다. 따라서 공극에서 초기 회전자 자극의 검출이 어려워진다. 이에 본 논문에서는 공극에서의 자속 포화 정도를 파악하기 용이하도록 식 (6)과 같이 오프셋 전압을 추가하여 자기회로의 포화 정도에 따른 회전자 자극 검출 특성을 용이하게 하고자 한다.

$$v_{s_initial} = v_{s_inj} + V_{offset} \quad (6)$$

여기서, V_{offset} 은 SP-PMSM에 인가되는 오프셋 전압이다.

제안한 회전자 초기 위치 검출은 그림 2(b)와 같이 오프셋 전압의 극성에 따라 전류 성분의 '+' 및 '-' 값에 영향을 미칠 수 있다.

그림 3은 SP-PMSM에 고주파 전압만을 주입하였을 경우의 홀 센서 신호와 고정자 상전류를 보여주고 있다. 실험과형에서 알 수 있듯이 고주파 전

압만을 주입하였을 경우, 상전류에서 자기 포화 정도를 판단하기에 어려움이 있음을 알 수 있다.

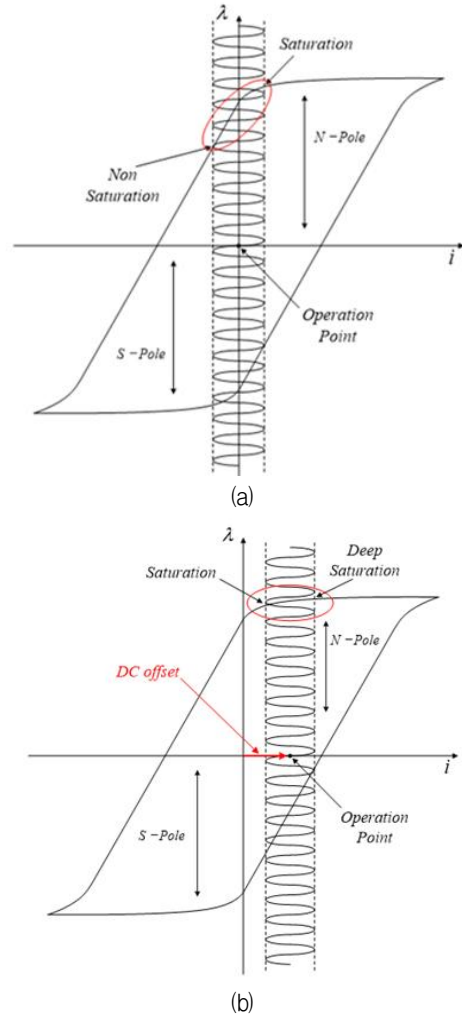


Fig. 2. Linear and saturation regions of $\lambda-i$ characteristics in air gap, (a) Before offset voltage, (b) After offset voltage.

그림 2. 공극 내 $\lambda-i$ 특성의 선형 및 포화영역, (a) 오프셋 전압 인가 전, (b) 오프셋 전압 인가 후

그림 4는 SP-PMSM에 고주파 전압 및 오프셋 전압을 인가하였을 경우, 회전자의 자극에 따른 홀 센서와 고정자 상전류를 나타내고 있다. 그림 4의 홀 센서는 센서리스 운전 시 비교 신호로 사용되고 있는 기준 신호이다. 그림 4에서 볼 수 있듯이 고주파 전압과 오프셋 전압에 의해 고정자 상전류는 회전자의 N극 및 S극에 대해 자기 포화 정도가 상이함을 알 수 있고, 이를 통해 회전자의 위치에 따른 상전류 신호의 차이를 취함으로써 회전자 자극을 용이하게 검출할 수 있다.

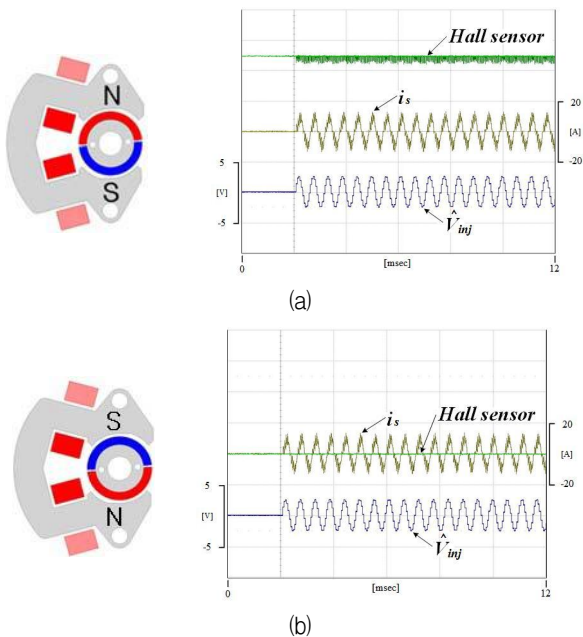


Fig. 3. Detection of a rotor pole in a SP-PMSM when injecting high frequency voltage, (a) Phase current at north pole, (b) Phase current at south pole.
 그림 3. 고주파 전압 주입 시 SP-PMSM에서의 회전자 자극 검출, (a) N극에서의 상전류, (b) S극에서의 상전류

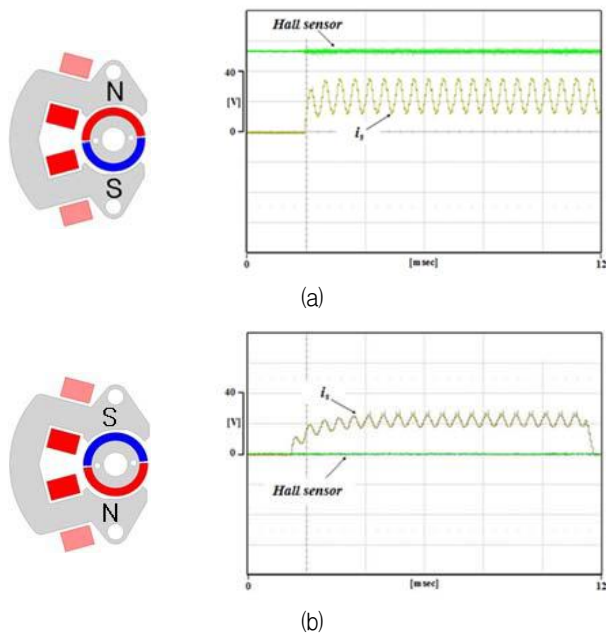


Fig. 4. Detection of a rotor pole in a SP-PMSM when injecting high frequency voltage and offset voltage, (a) Phase current at north pole, (b) Phase current at south pole.
 그림 4. 고주파 전압 및 오프셋 전압 주입 시 SP-PMSM에서의 회전자 자극 검출, (a) N극에서의 상전류, (b) S극에서의 상전류

그림 5는 고주파 전압과 오프셋 전압을 주입하는 경우, 회전자 초기 자극 검출을 위한 전체 제어 알고리즘의 블록도를 나타내고 있다. 블록도에서 알 수 있듯이 고주파 전압 및 오프셋 전압에 따른 전류 크기 차이에 따른 자극 검출 과정을 보여주고 있다.

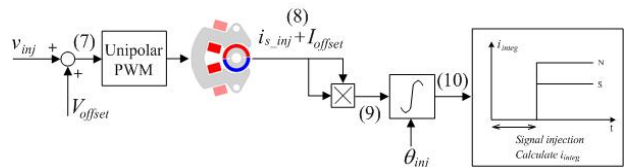


Fig. 5. A block diagram of the initial rotor pole detection algorithm.

그림 5. 초기 회전자 자극 검출 알고리즘 블록도

2.2 고주파 전압 및 오프셋 전압에 따른 회전자 초기 자극 검출

이 절에서는 고주파 전압 및 오프셋 전압에 의한 SP-PMSM의 초기 회전자 자극 검출의 과정을 보여주고자 한다.

그림 5에서 고주파 전압 및 오프셋 전압에 의한 SP-PMSM의 출력 전압은 식 (7)과 같이 정리할 수 있다.

$$v_{s_initial} = v_{s_inj} + V_{offset} = V_m \sin \theta_{inj} + V_{offset} \quad (7)$$

여기서, V_m 은 주입된 고주파 전압의 크기이며, θ_{inj} 은 주입된 고주파 전압의 위상이다.

이를 통해 식 (8)과 같이 고정자 전류 i_{ds_inj} 를 고주파 전압 및 오프셋 전압에 의한 전류 성분으로 표현할 수 있다.

$$i_{ds_inj} = I_{offset} - I_m \cos \theta_{inj} \quad (8)$$

여기서, I_m 은 고주파 전압에 의한 상전류의 크기이며, I_{offset} 은 오프셋 전압에 의한 전류 성분이다.

그림 5와 같이 고정자 상전류를 제공하면 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$(i_{ds_inj})^2 = I_m^2 \cos^2 \theta_{inj} - 2I_m I_{offset} \cos^2 \theta_{inj} + I_{offset}^2 \quad (9)$$

식 (9)를 주입 신호의 위치각에 대해 적분을 취하면 식 (10)과 같이 직류 성분을 얻을 수 있다.

$$\int_0^{2\pi} (i_{ds_inj})^2 d\omega_{inj} t = \frac{I_m^2}{2} + I_{offset}^2 \quad (10)$$

3. 실험결과

제안된 초기 회전자 위치 검출 알고리즘을 검증하기 위해 고성능 프로세서 및 IGBT를 사용하여 풀 브리지 인버터를 구성하였다. 실험장치 및 주요 사양은 표 1 및 그림 6과 같다.

회전자의 초기 위치 검출 실험 결과는 그림 7과 같다. 그림 7에서와 같이 회전자의 초기 자극 위치에 따라 고정자 상전류의 제곱 연산 후 적분 동작에 따른 직류값이 다름을 확인할 수 있다. 대상 모터인 비대칭 공극을 갖는 SP-PMSM은 초기 회전자 자극의 상태에서 S극이 감지되는 것보다 N극이 감지 될 때 고정자 전류의 제곱 이후 적분 값이 더 큰 값으로 생성됨을 알 수 있다.

III. 결론

본 논문에서는 비대칭 공극을 갖는 SP-PMSM에 대한 초기 회전자 위치 검출 알고리즘을 제안하고 이에 대한 효율성 및 유용성을 검증하였다. 이를 위해서 SP-PMSM을 모델링하고 고주파 전압 주입 기법에 기초하여, 오프셋 전압 유무에 따른 자기 회로의 특성을 분석하였다.

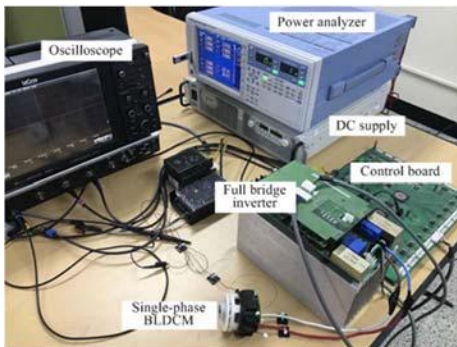


Fig. 6. Experimental set-up.
그림 6. 실험장치

이후 고정자 상전류 정보로부터 회전자 자극의 검출을 빠르고 쉽게 검출할 수 있는 기법을 제시하고 있다. 다수의 실험을 통하여 제안된 알고리즘이 정확히 동작됨을 확인할 수 있었으며, 비대칭 구조를 갖는 SP-PMSM의 센서리스 운전 시 요구되는 안정적인 오픈 루프 구동, 기동 전류 크기 저감 및 센서리스 운전이 가능함을 확인하였다.

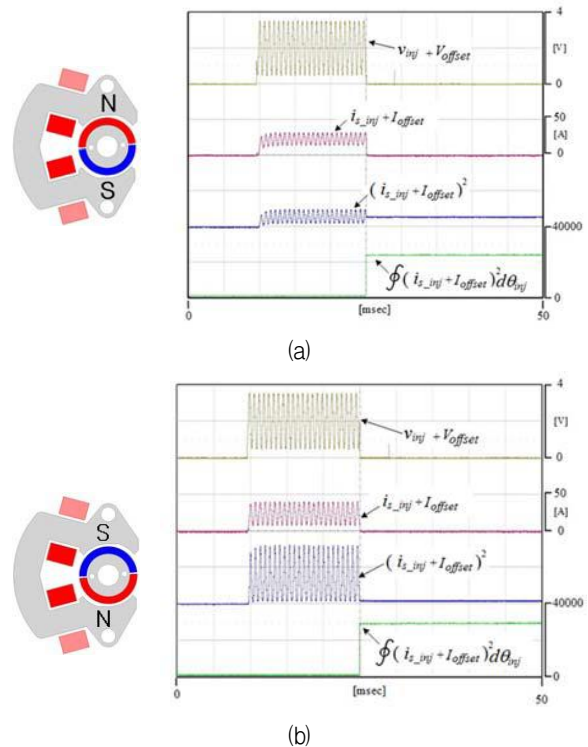


Fig. 7. Experimental waveforms of north and south pole detection, (a) North pole detection and corresponding signal, (b) South pole detection and corresponding signal.

그림 7. N극 및 S극 자극 검출 실험파형, (a) N극 검출 및 관련 신호, (b) S극 검출 및 관련 신호

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

표 1. SP-PMSM 및 구동 시스템의 파라미터

Parameters		Value
Single-phase PMSM	number of poles	4
	rated voltage	25[Vdc]
	stator resistance	0.015[Ω]
	stator inductance	0.018[mH]
	back-emf constant	0.266[V/krpm]
Full bridge inverter	IGBT	600[V]
	capacitor	540[uF]
	current sensor	70[A]
	voltage sensor	500[V]

References

[1] 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

[2] 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

[3] J. Seo, J. Yoo and T. Jung, "Design on notch structure of stator tooth to reduce of cogging torque of single-phase BLDC motor," *2015 18th International Conf. on Electrical Machine and Systems (ICEMS)*, 2015.

DOI: 10.1109/ICEMS.2015.7385273

[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] J. Shao, D. Nolan and M. Teissier, and D. Swanson, "A novel microcontroller-based sensorless brushless DC (BLDC) motor drive for automotive fuel pumps," *IEEE Trans. on Ind. Electr.*, vol.39, pp.1734-1740, 2003. DOI: 10.1109/TIA.2003.818973

[7] D. Kim, K. Lee, B. Kim and B. Kwon, "A novel starting methods of the SPM-type BLDC motors without position sensor for reciprocating compressor," *IEEE Industry Application Conf. (IAS)*, vol.2, pp.861-865, 2006.

DOI: 10.1109/IAS.2006.256626

[8] 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.

[9] 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

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.

Sung-Woo Seo (Member)



2013 ~ : BS degree in Electrical Engineering, Kyungnam University.

Tae-Uk Jung (Member)



1993 : BS degree in Electrical Engineering, Pusan Nat'l University.

1995 : MS degree in Electrical Engineering, Pusan Nat'l University.

1999 : PhD degree in Electrical Engineering, Pusan Nat'l University.

1996~2006 : Chief Research Engineer, LG Electronics.

2006~2007 : Senior Research Engineer, KITECH.

2007~ : Professor, Kyungnam University