

단상 영구자석 동기 전동기의 비대칭 공극 구조를 고려한 회전자 초기 자극 검출 기법

서승우¹, 황선환[†], 박종원², 김용휴³

Rotor Initial Polarity Detection Method of Single-Phase PMSM Considering Asymmetric Air-Gap Structure

Sung-Woo Seo¹, Seon-Hwan Hwang[†], Jong-Won Park², and Yong-Hyu Kim³

Abstract

This paper proposes an initial rotor polarity detection algorithm of a single-phase permanent magnet synchronous motor (SP-PMSM) related to stable open-loop starting for sensorless operation. Generally, the SP-PMSM needs an asymmetric air-gap structure to avoid the initial starting failure at zero torque point. Therefore, the rotor polarity information can be obtained by using the DC offset current direction of a stator current through a high frequency voltage injection into an SP-PMSM with an asymmetric air gap. In this paper, the proposed rotor initial polarity detection algorithm is verified through several experimental results.

Key words: SP-PMSM, Asymmetric air-gap, Initial rotor polarity detection, Open-loop starting, High frequency voltage signal, Sensorless operation

1. 서 론

3상 영구자석 동기 전동기(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)는 고효율, 고출력, 고응답 및 고신뢰성을 필요로 하는 다양한 산업 분야에서 널리 사용되고 있다^[1]. 반면, 단상 영구자석 동기 전동기(Single-phase Permanent Magnet Synchronous Motor, SP-PMSM)는 에너지 효율 개선과 출력 대비 부피 및 무게 감소 등의 필요성이 요구되는 제품에 활용되고 있다. 또한 소형 경량화, 자기적 및 기구적 형상 설계의 제약이 적고 경제적 측면에서 이점을 가지는 저전력 산업에 적용하기 위한 연구개발이 진행되고 있다.

3상 영구자석 동기 전동기와 달리 단상 영구자석 동기 전동기는 제어 관련 연구가 부족한 상황이기

에 관련된 다양한 연구가 지속적으로 확대될 것이다^[2].

앞서 언급했듯이 SP-PMSM은 인버터 및 전동기 설계 시 상당한 이점이 있다. 그러나 영토크 발생 영역 해결을 위한 비대칭 공극 설계가 일반적이며, 이로 인해 제어의 복잡성이 존재한다^[3]. 또한, 일반적인 3상 PMSM 제어를 위해서는 회전자 위치 정보를 얻기 위한 위치센서가 필요하다. 그러나 별도의 취부 공간, 비용적 측면 및 홀 센서의 자기적 노이즈 문제로 인한 센서리스 제어 기법이 요구된다. SP-PMSM 또한 센서리스 운전의 경우 역기전력을 기반으로 회전자 위치와 속도의 수학적 모델링을 통한 위치 정보를 얻을 수 있다^[4]. 하지만 센서리스 운전의 일반적인 문제로 영속도 영역에서 역기전력 정보를 추정하기 어려움이 있어 별도의 오픈 루프 기동을 요구한다^[5]. 이를 위해 위치 센서를 갖지 않는 SP-PMSM의 안정적인 센서리스 운전을 위한 초기 기동에서 정방향 회전 및 과전류 방지를 위한 고주파 전압 주입 기법을 통해 회전자 초기 자극 검출 기법을 제안하고자 한다. 고주파 전압 주입 기법을 사용하는데 일반적인 정렬보다 정렬에 필요한 시간이 줄어들어 빠른 정렬, 정방향 회전이 가능하고 정렬에 필요한 전류도 감소하여 일반적인 정렬보다 효율적인 운전이 가능하다.

제안한 기법은 3상 PMSM의 회전자 초기 위치 검출에 적용되는 고주파 전압 주입 기법을 기반으로 SP-

Paper number: TKPE-2022-27-1-11

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

[†] Corresponding author: seonhwan@kyungnam.ac.kr, Dept. of Electrical Engineering, Kyungnam University, Korea
Tel: +82-55-249-2744 Fax: +82-505-999-2164

¹ Dept. of Electrical Engineering, Kyungnam University, Korea

² R&D Center, GMB Corp., Korea

³ Smart Mobility Technology Center, Busan Techno Park, Korea

Manuscript received Sep. 15, 2021; revised Oct. 8, 2021; accepted Oct. 20, 2021

PMSM의 회전자 영구자석의 자속과 자기회로의 포화 및 비포화 특성에 따른 고정자 전류의 직류 옴셋 전류 성분을 검출하여 자극을 검출하고자 한다. 이를 위해 고정자 전류에 저역통과필터(Low-pass filter, LPF)를 적용하여 직류 옴셋 전류의 극성을 판별한 후 SP-PMSM의 회전자 초기 자극을 검출할 수 있다.

2. SP-PMSM 회전자 초기 자극 검출 기법

2.1 SP-PMSM의 수학적 모델링

그림 1은 고정자 저항 R_s , 고정자 인덕턴스 L_s 및 역기전력 e_s 를 포함한 SP-PMSM의 등가 회로와 단상 풀 브릿지 인버터 회로를 보여주고 있다. SP-PMSM의 고정자 전압 방정식은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_s = R_s i_s + L_s \frac{di_s}{dt} + e_s \quad (1)$$

2.2 고주파 전압 신호 주입

제안된 영속도 영역에서 회전자 초기 자극 검출 기법을 전개하기 위하여 회전자 각속도와 영구자석의 쇄교 자속을 포함한 고정자 전압 방정식으로 정리하면 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$v_s = R_s i_s + L_s \frac{di_s}{dt} + \omega_r \lambda_{pm} \quad (2)$$

여기서, ω_r 와 λ_{pm} 은 SP-PMSM의 회전자 각속도 및 회전자 영구자석의 쇄교 자속을 나타낸다.

식 (2)를 토대로 초기 회전자 자극 검출을 위한 고주파 전압 신호를 주입하는 경우, 정지 상태에서 ω_r 은 '0'이 되며, 고정자 저항의 전압 강하를 무시할 때 식 (3)과 같이 정의할 수 있다.

$$v_s = v_{s_inj} = \omega_{inj} L_s i_{s_inj} \quad (3)$$

여기서, v_{s_inj} 은 인가한 고주파 전압 신호이며, i_{s_inj} 및 ω_{inj} 은 고주파 전압 신호에 의해 SP-PMSM에 발생된 고정자 전류 및 주파수를 표현한다.

2.3 영구자석 회전자의 영향

앞서 언급했듯이 SP-PMSM는 영토크 영역의 존재로 초기 기동이 불가능한 지점이 있다. 따라서, 전류가 흐르지 않는 지점에서 코깅 토크를 이용해 영토크를 회피할 수 있는 비대칭 공극 설계가 일반적이다. 이로 인해 비대칭 공극을 갖는 SP-PMSM의 공극 일부에서는 작은 고정자 전류로 부분적인 자기포화 현상을 발생시킬 수 있다. 부분적인 자기포화 현상은 일반적인 고정자 자기 포화 현상과 매우 유사하게 작용한다^[6].

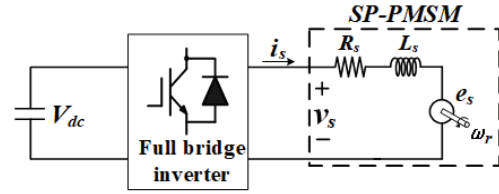
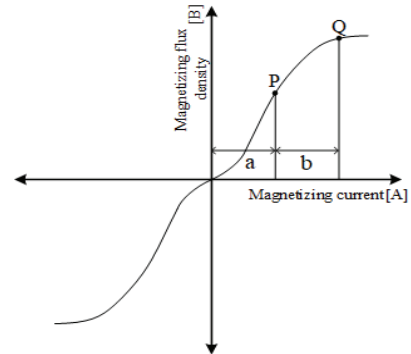
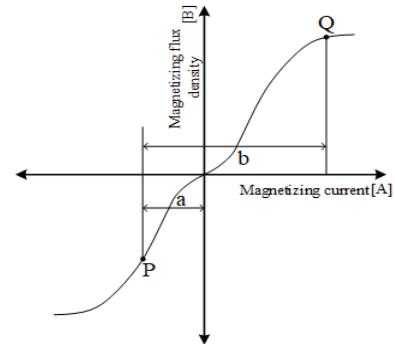


Fig. 1. Schematic circuit of full bridge inverter and SP-PMSM.



(a) Flux increase case



(b) Flux decrease case

Fig. 2. B-H characteristic curve of stator.

그림 2는 SP-PMSM 자기회로의 B-H 곡선으로 'P' 지점은 SP-PMSM 회전자 영구자석 초기 회전자 자극에 따른 자속의 영향으로 자속의 옴셋을 나타내며, 'Q' 지점은 주입되는 고주파 전압 신호에 의한 시작되는 작동점이다. 또한, 'a'는 영구자석에 의한 상쇄 효과를 나타내고, 'b'는 고정자 전압에 의한 영향을 나타내고 있다. 따라서 회전자 영구자석 자속의 옴셋에 의해 증자 작용의 경우 그림 2(a)에서와 같이 포화상태에 적은 전류로 도달할 수 있으며 감자 작용의 경우 (b)와 같이 포화 상태에 이르기 위한 전류가 높다.

따라서, 그림 3과 같이 초기 회전자 위치가 N극일 경우 회전자가 회전이 불가능한 높은 주파수와 진폭을 가지는 고주파 전압 신호를 주입 시 교번 자계로 형성된 자속과 영구자석의 자속 방향이 일치하는 경우 증자 작용으로 고정자에서 포화가 더 쉽게 발생함을 볼 수 있다. 반대일 경우 감자 작용으로 발생하지 않음을 볼 수 있다. 그림 4의 경우 초기 회전자 위치가 S극일 때 고주파

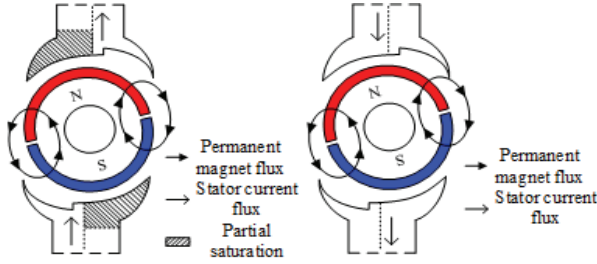


Fig. 3. Effect of permanent magnet flux of SP-PMSM.

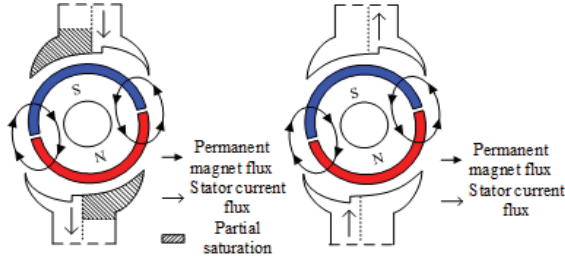


Fig. 4. Effect of permanent magnet flux of SP-PMSM.

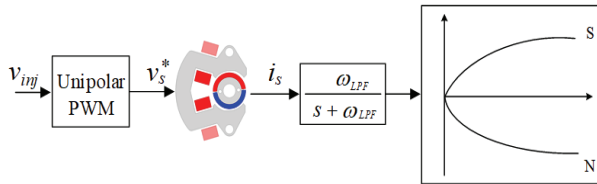


Fig. 5. Block diagram of initial polarity detection based on DC offset current using a high frequency voltage injection and LPF.

전압 신호의 교번 자계로 형성된 자속과 회전자 영구자석의 자속방향이 일치하는 경우 증자 작용으로 고정자에서 부분 포화가 발생함을 볼 수 있으며, 반대일 경우 감자 작용으로 발생하지 않음을 볼 수 있다.

이러한 현상을 정리하면 식 (4)와 같이 회전자 자극의 위치 θ_e 에 따른 직류 오프셋 전류 ΔI_o 를 포함한 고정자 전류로 표현할 수 있다.

$$i_{s_inj} = \frac{v_{s_inj}}{\omega_{inj} L_s} + \Delta I_o \cos(\theta_e) \quad (4)$$

여기서, θ_e 는 회전자 자극의 위치로 N극은 ' π [rad]', S극은 '0[rad]'를 의미한다.

2.4 제안된 회전자 초기 자극 검출 기법

비대칭 공극을 갖는 SP-PMSM의 고정자 자속 증가로 부분 포화가 발생했을 때 투자율이 감소하게 됨에 따라 고정자 인덕턴스는 감소하게 되며 고정자 전류는 증가하게 되고, 자속이 감소되는 경우 높은 투자율로 고정자 전류는 작게 유도된다. 이러한 전류 차이는 교류 전류에 '+' 및 '-' 극성의 직류 오프셋으로 나타난다. 따라서 제안된 알고리즘의 경우 회전자 영구자석 자극에 따른

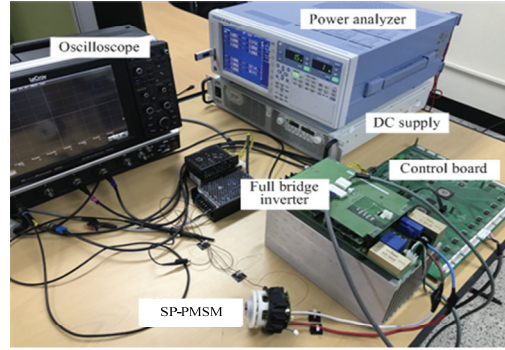


Fig. 6. Experimental setup.

TABLE I
SPECIFICATIONS OF SP-PMSM

Parameters	Value
Number of poles	2
Rated voltage	25 [Vdc]
Stator resistance	0.015 [Ω]
Stator inductance	0.018 [mH]
Back-EMF constant	0.226 [V/krpm]
Switching frequency	10 [kHz]

'+' 및 '-' 극성의 직류 오프셋 성분을 초기 회전자 자극을 판단할 수 있는 정보로 사용하기 위해 그림 5와 같이 저역통과필터(Low Pass Filter, LPF)를 사용하여 샘플링된 고정자 전류에서 양의 값 또는 음의 값의 전류 성분을 검출하여 초기 자극 위치를 판단한다.

3. 실험 결과

제안된 기법을 검증하기 위해 그림 6과 같이 실험장치를 구성하였으며, Table 1은 SP-PMSM의 파라미터 정보를 보여주고 있다.

그림 7은 SP-PMSM의 초기 회전자 자극 검출을 위해 고주파 전압 신호를 주입한 후 저역통과필터를 이용하여 회전자 초기 자극 정보를 포함한 직류 오프셋 전류 i_{S_LPF} 검출 결과이다. 홀 센서 신호가 High일 경우 N극, Low일 경우 S극이며 인가된 고주파 전압의 주파수는 2.7[kHz]이고 LPF의 차단 주파수는 70[Hz]이다.

그림 7에서 볼 수 있듯이 주입된 고주파 전압의 크기는 3[V], 4[V] 및 5[V]를 기준으로 진행하였다. 실험 결과 인가된 고주파 전압의 크기가 증가함에 따라 고정자 전류와 LPF 적용 후의 직류 오프셋 전류가 상승함을 알 수 있다.

이를 통해 회전자 자극 검출 정도를 향상시키기 위해서는 큰 고주파 전압을 인가하는 것이 유리하나 큰 고정자 전류에 의해 SP-PMSM의 회전을 야기할 수 있다. 또한, 홀 센서 신호와 비교하였을 때 직류 오프셋 전류의

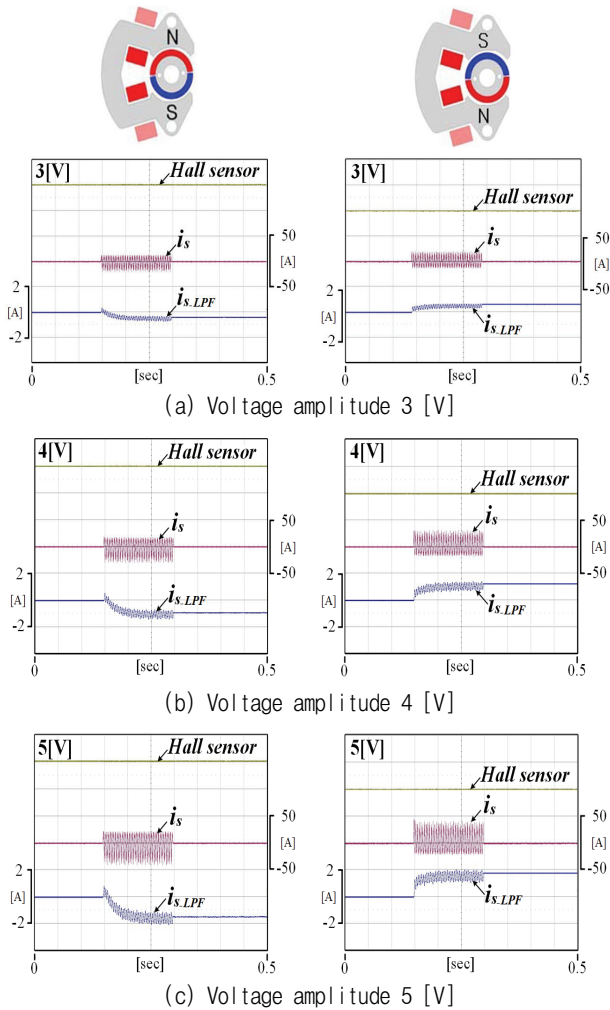


Fig. 7. Rotor initial polarity detection waveforms using LPF and high frequency voltage injection of SP-PMSM.

극성이 ‘-’는 N극, ‘+’는 S극의 자극 정보를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 홀 센서를 사용하지 않는 단상 영구자석 동기 전동기의 센서리스 운전 시 안정적인 오픈 루프 기동을 위한 비대칭 공극을 갖는 단상 영구자석 동기 전동기의 초기 회전자 자극 검출 알고리즘을 제안한다. 제안된 알고리즘은 회전자 영구자석의 자속 및 비대칭 공극의 영향을 고려하여 고주파 전압 신호 주입을 통한 초기 자극 위치에 따른 고정자측 자기회로의 포화

및 비포화 특성을 이용하였다. 회전자 자극 검출하기 위해 고주파 전압 신호 주입하였고, 고정자 전류에 저역통과 필터를 적용하여 고주파 전류에 포함된 직류 성분과 교류 성분의 ‘+’ 및 ‘-’ 극성을 검출함으로써 회전자측 영구자석의 자극을 판별할 수 있다. 제안된 기법은 센서리스 제어 운전을 위한 전환 과정에서 회전자 자극 검출 특성을 개선하고 오픈 루프 기동 시 일정 정방향 회전을 요하는 응용 분야에 적용할 수 있다.

이 논문은 산업통상자원부의 디자인혁신역량강화사업 “반려동물 패밀리 중심 다중 센서 기반 인공지능 탑승자 인식 및 공기청정 콘솔 인테리어 디자인”으로 수행된 것임. (과제번호 20006697)

References

- [1] 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,” in *Proceedings IPEMC 2000 Third International Power Electronics and Motion Control Conference*, Aug. 2002.
- [2] W. C. Chen and Y. Y. Tzou, “Current-mode sensorless control of single-phase brushless DC fan motors,” in *IEEE Ninth International Conference on Power Electronics and Drive Systems*, pp. 659–663, Dec. 2011.
- [3] B. J. Kim, H. S. Hwang, and C. W. Lee, “Design of a high-speed single-phase BLDC motor in terms of asymmetric air gap,” *Journal of the Korean Magnetics Society*, Vol. 28, No. 2, pp. 58 - 65, Apr. 2018.
- [4] 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,” in *IEEE Industry Application Conf.*, Vol. 2, pp. 861 - 865, Oct. 2006.
- [5] H. D. Kang, S. H. Hwang, and J. S. Lee, “Initial rotor position estimation of single-phase permanent magnet synchronous motors with asymmetric air-gap,” in *IEEE Transportation Electrification Conf.*, pp. 1 - 5, Jun. 2018.
- [6] 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, Apr. 2010.