

<https://doi.org/10.7236/JIIBC.2021.21.1.115>
JIIBC 2021-1-16

비례공진 전류제어기 기반의 단상 영구자석 동기전동기 운전에 관한 연구

A Study on Driving Algorithm of Single-phase PMSM based on Proportional Resonant Current Controller

성의석*

Uiseok Seong*

요약 본 논문에서는 비례공진 전류제어기 기반의 단상 영구자석 동기전동기의 운전 알고리즘을 제안하였다. 일반적으로 단상 영구자석 동기전동기의 경우 회전자의 형상에 따른 비대칭 공극이 발생할 수 있으며, 이는 고속 운전시 소음과 진동의 원인이 된다. 따라서 본 논문에서는 제어 안정성이 뛰어난 비례공진 전류제어기를 적용한 단상 영구자석 동기전동기의 운전 알고리즘을 제안하였다. 비례공진 전류제어기법은 정상상태 오차가 없고 왜란에 대해 비교적 강인한 특성을 가지고 있으며, 복잡한 연산과정 없이 교류입력의 정상상태를 제거할 수 있다. 제안한 알고리즘의 유효성과 타당성을 실험을 통해 검증하였다.

Abstract In this paper, an operating algorithm for single-phase permanent magnet synchronous motor based on PR current controller is proposed. In general, an asymmetric gap may occur depending on the shape of the rotor of single-phase PMSM, and this causes noise and vibration during high-speed operation. Therefore, in this paper, an operating algorithm for a single-phase PMSM using a proportional resonant current controller with excellent control stability was proposed. Proportional resonant current controller has on steady state error is relatively robust against distortion. Also, steady state error of AC input can be eliminated without complicated calculation process. The validity and availability of the proposed algorithm are verified through the experiment.

Key Words : Single-phase PMSM, Proportional Resonant Current Controller

1. 서 론

영구자석 동기전동기는 높은 에너지밀도와 전동기 제어 기술의 향상으로 유도 전동기에 비해 순간 기동성 및 체적과 중량 대비 높은 출력을 갖는 이점으로 산업계의 다양한 분야에서 적용되고 있다. 특히 단상 영구자석 동

기전동기(PMSM, Permanent Magnet Synchronous Motor)의 경우 기존의 3상 PMSM과 3상 BLDCM (Brushless Direct Current Motor)에 비해 상대적으로 큰 토크 리플과 낮은 효율을 갖지만 센서 수 감소, 소형화 구성, 저전력소모, 모듈화, 제어 용이성, 간단한 구동 회로 구성 등이 가능하다. 이러한 특성으로 인해 단상

*정회원, 국방과학연구소 부설 방위산업기술지원센터
접수일자 2020년 11월 16일, 수정완료 2021년 1월 13일
게재확정일자 2021년 2월 5일

Received: 16 November, 2020 / Revised: 13 January, 2021 /
Accepted: 5 February, 2021

*Corresponding Author: uiseoks@add.re.kr
Dept. of Defense Industry Technology Center, Korea

PMSM은 소형펌프, 블로워, 청소기 등과 같은 소형·휴대용 제품 등에 적용되고 있다^{[1],[2],[3]}. PMSM은 보통 전동기 회전자 위치 정보를 실시간으로 획득하여 벡터제어를 수행하기 때문에 위치센서를 통한 정확한 위치정보가 필요하다. 그러나 위치센서가 없는 센서리스 운전에 대한 학계·산업계의 활발한 연구가 진행됨에 따라 단상 PMSM 전동기 구동에 센서리스 운전을 적용 시 제어기 구조를 보다 소형화하여 설치 공간 확보, 센서 비용 절감 등 장점이 극대화 될 수 있다^{[4],[5]}. 하지만 대부분의 센서리스 운전 기법 관련 연구는 3상 전동기를 대상으로 진행되어 왔으며, 단상 PMSM에 대한 활용이 점차 확대됨에 따라 보다 활발한 연구가 필요한 실정이다^{[6],[7],[8]}. 일반적으로 단상 PMSM은 고정자와 회전자의 자기적 구조로 인한 비대칭 공극이 발생할 수 있으며, 이를 보완하기 위해 입력 전원에 인위적으로 비대칭 신호를 인가하여 제어할 수 있다. 하지만 정확한 신호가 입력되지 않는 경우 코깅 토크가 발생하여 소음 및 진동이 발생된다^[9]. 이러한 현상을 예방하기 위해 안정적인 속도 및 전류제어가 필수적이며 특히, 다양한 전류제어기법 중 비례공진 전류제어기의 경우 특정 주파수에서 높은 이득을 가지며 위상지연이 없는 제어 특성을 가지므로 빠른 응답특성과 안정적인 전류제어가 가능하다^{[10],[11]}. 따라서 본 논문에서는 센서리스 운전을 기반으로 제어 안정성이 뛰어난 비례공진 전류제어기를 적용한 단상 PMSM 운전 알고리즘을 제안하고 실험을 통해 알고리즘의 타당성을 검증한다.

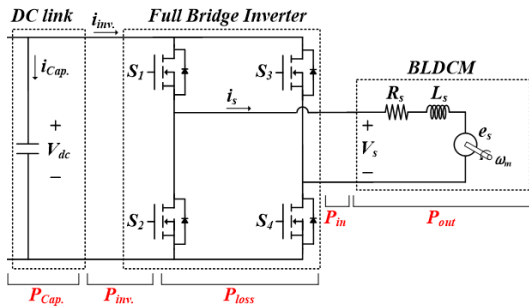


그림 1. 단상 PMSM의 풀-브릿지 인버터 회로 구성도
Fig. 1. Configuration of Full-bridge Inverter Circuit of Single-phase PMSM

II. 단상 영구자석 동기전동기의 모델링

1. 단상 영구자석 동기전동기의 수학적 모델

그림 1은 단상 PMSM과 풀-브릿지 인버터 회로 모델

을 나타낸다. 단상 PMSM의 고정자 전압 방정식은 식(1)과 같이 고정자 저항과 고정자 권선에 쇄교하는 자속의 변화율과 역기전압의 합으로 나타낼 수 있다.

$$v = L_s \frac{di}{dt} + iR_s + e_s \quad (1)$$

여기서, v 는 고정자 전압, L_s 는 고정자 인덕턴스, i 는 고정자 권선에 쇄교하는 자속, e_s 는 역기전력을 나타낸다.

식(2)에서 단상 PMSM에 입력되는 전력은 인버터에 의한 전력손실이 없다는 가정하에 인버터의 입력전력과 같다고 나타낼 수 있다.

$$P_{inv} = P_{in} + P_{loss} \approx P_{in} \quad (2)$$

여기서, P_{inv} 는 인버터의 입력전력, P_{loss} 는 인버터에 의한 전력손실, P_{in} 는 인버터의 출력전력을 나타낸다.

식(1)과 식(2)를 통해 단상 PMSM에 소비되는 전력을 나타내면 식(3)과 같다.

$$P_{in} = v \cdot i_s = R_s \cdot i_s^2 + L_s \cdot i_s \frac{di_s}{dt} + e_s \cdot i_s \quad (3)$$

식(3)에서와 같이 단상 PMSM에서 소비하는 전력은 동손, 자계에너지 변화량, 기계적 출력으로 나타낼 수 있다. 전기적 출력에 의한 운동 방정식은 식(4)와 같이 기계 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$T_e = J_m \frac{d\omega_m}{dt} + B_m \omega_m + T_L \quad (4)$$

여기서, J_m 는 관성 모멘트, B_m 는 점성마찰계수, ω_m 은 회전자 기계각속도, T_L 은 부하토크를 나타낸다.

2. 비례공진 전류제어기의 수학적 모델

비례공진제어기는 공진 주파수영역에서 비례이득 만큼의 제어기 이득을 가지는 특성을 가지고 있다. 이러한 비례공진제어기의 특성으로 인해 비례적분제어기로는 완벽하게 추종할 수 없었던 특정 주파수에 대한 지령값을 제어기의 대역폭의 변화 없이 추종한다. 비례공진제어기의 전달함수는 식(5)와 같다.

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

여기서, K_{pr} 는 비례이득, K_r 은 공진이득, ω_c 은 차단주파수, ω_o 은 공진주파수를 나타낸다.

그림 2는 비례공진제어기의 오픈루프 응답특성 보드 선도를 나타낸다. 그림 2(a)와 그림 2(b)는 비례이득 K_{pr} 과 공진이득 K_r 을 각각 조정할 결과 파형이며, 비례이득과 공진이득이 증가할수록 시스템 응답성은 높아지나 대역폭이 증가하여 주파수 변동 시 시스템의 안정성이 낮아짐을 알 수 있다.

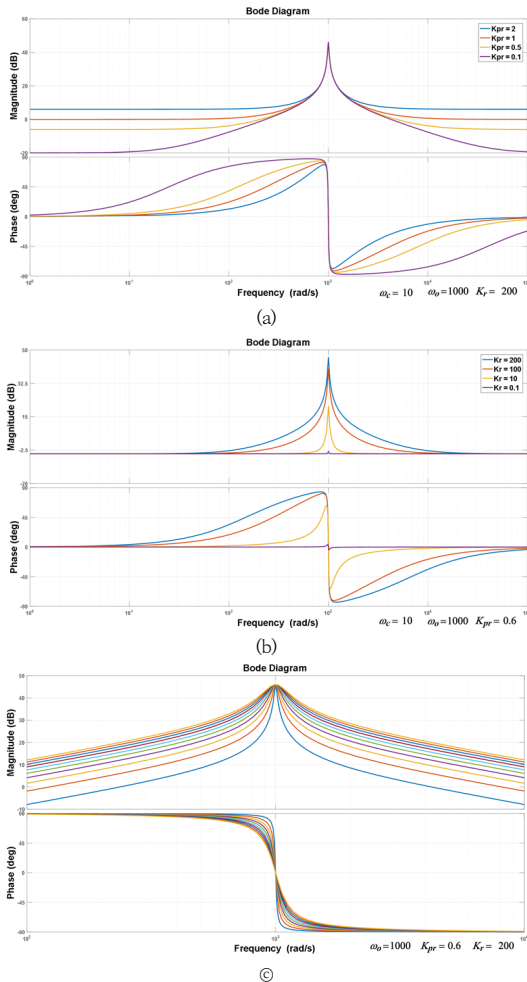


그림 2. 비례공진제어기의 응답특성 보드선도 (a) 비례이득 증가 (b) 공진이득 증가 (c) 대역폭 이득 증가
 Fig. 2. Characteristics of PR controller when changing each gain (a) Increase of Proportional gain (b) Increase of Resonant gain (c) Increase of bandwidth gain

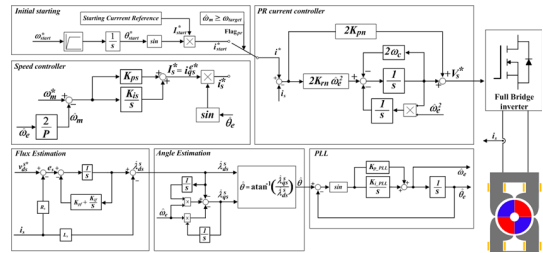


그림 3. 제안한 비례공진 전류제어기 기반의 단상 PMSM 구동 알고리즘 구성도
 Fig. 3. Configuration of Proposed Operation Algorithm for Single-phase PMSM based on PR Current Controller

그림 2(c)는 대역폭 ω_c 를 조정할 결과 파형으로 대역폭이 증가할수록 시스템의 응답성은 높아지나 공진 주파수를 중심으로 주파수 변동에 따른 위상차가 발생할 수 있다. 따라서 매우 높은 값의 이득은 대역폭 증가로 필터 성능을 저하시키게 되며, 매우 낮은 값의 이득은 장시간 비감쇠 과도 응답을 야기한다.

그림 3은 본 논문에서 제안하는 비례공진 전류제어기 기반의 단상 PMSM 구동 알고리즘의 구성도를 나타낸다. 센서리스 기반의 단상 PMSM의 경우 하나의 홀센서 사용으로 전동기 회전자의 초기 위치를 추정하는데 어려움이 있다. 따라서 초기 기동 방식으로 오픈루프 운전을 통해 회전자 초기 위치를 추정한다. 이를 통해 얻어진 회전자 위치 정보를 기반으로 비례공진 전류제어를 수행한다. 이때 필요한 전동기의 각속도는 추정된 자속 정보를 기반으로 실시간으로 속도 및 전류제어기에 제공된다^[12].

III. 실험

1. 실험장치의 구성

본 논문에서 제안한 비례공진 전류제어기 기반의 단상 PMSM 구동 알고리즘의 효율성을 검증하기 위해 그림 4와 같이 실험 환경을 구성하여 실험을 수행하였다. 시스템 기본 구성은 단상 풀-브릿지 PWM 인버터, 단상 PMSM, 전체 시스템 제어를 위한 디지털 신호 처리기기 (TMS320VC33)로 구성되어있다. 시스템의 세부 정격 및 파라미터는 표 1과 같다.

표 1. 실험 파라미터

Table 1. Experimental Parameters

구분		제원
Single-phase PWM inverter	IGBT(SKiiP28GH066V1)	600V / 100A
	DC Link Capacitor	540uF / 400V
	Current Sensor	50A
	Voltage Sensor	500V
	Processor	TMS320VC33
Single-phase PMSM	Number of poles	4
	Rated Voltage	25Vdc

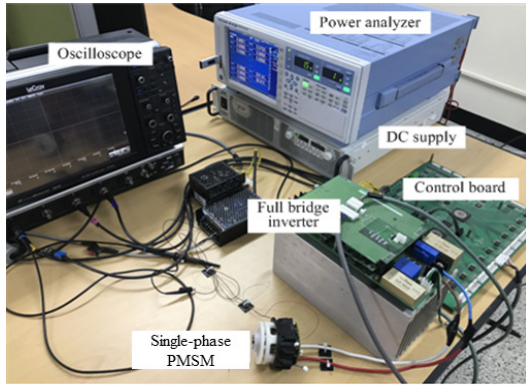


그림 4. 실험 구성도
Fig. 4. Experimental Setup

IV. 실험 및 결과

본 논문에서 제안한 비례공진 제어기 기반 단상 PMSM 구동 알고리즘의 효율성을 검증하기 위해 전동기 초기기동 시 오픈루프 운전에서 각속도의 안정적 추종에 따라 속도제어기로 전환하여 속도 지령을 20[krpm], 40[krpm]으로 속도를 변화하며 실험을 수행하였다.

그림 5는 단상 PMSM 구동 파형의 초기기동 부분을 확대한 파형으로 초기기동 시 오픈루프 운전을 통해 초기기동 각속도 θ_{start} 와 상전류 i_s 의 위상각이 일치하여 안정적으로 기동함을 보여주고 있다. 그 이후 오픈루프 운전에서 속도제어기로 전환하여 구동하였다.

그림 6은 단상 PMSM이 20[krpm], 40[krpm]의 속도로 구동하고 있을 때의 각속도 및 추정된 dq 축 자속의 파형을 보여준다. 홀센서에 따라 모터 각속도 및 자속 파형이 정렬된 상태로 나타나며 제안한 비례공진 전류제어기 적용을 통해 고속 회전에서도 왜곡되지 않은 자속 파형으로 모터가 정상 구동됨을 확인할 수 있다.

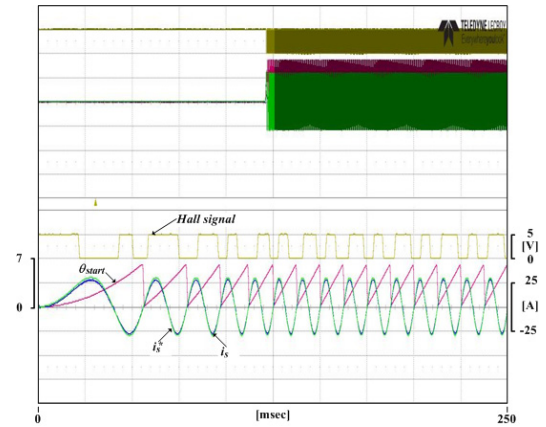


그림 5. 초기 기동시 각속도 및 상전류 파형
Fig. 5. Waveform of Angular Velocity and Phase Current at Startup

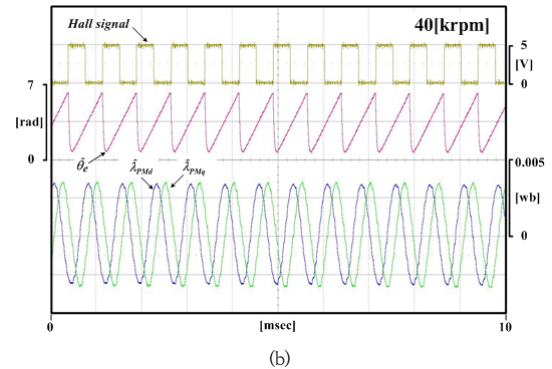
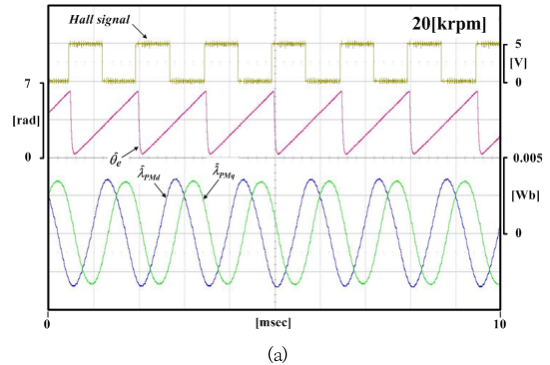


그림 6. 제안한 비례공진 전류제어기 기반의 각속도 및 추정된 dq 축 자속 파형 (a) 20[krpm], (b) 40[krpm]
Fig. 6. Waveform of Angular Velocity and estimated dq -axis flux based on Proposed PR Current Controller (a) 20[krpm], (b) 40[krpm]

그림 7은 앞서 설명된 실험파형과 동일한 구동 조건에서(20[krpm],40[krpm]) 전류센서를 통해 측정된 상전류 파형을 보여주며 추정된 자속대비 측정된 상전류의

파형이 정현파 형태로 나타나며 안정적으로 동작함을 확인할 수 있다.

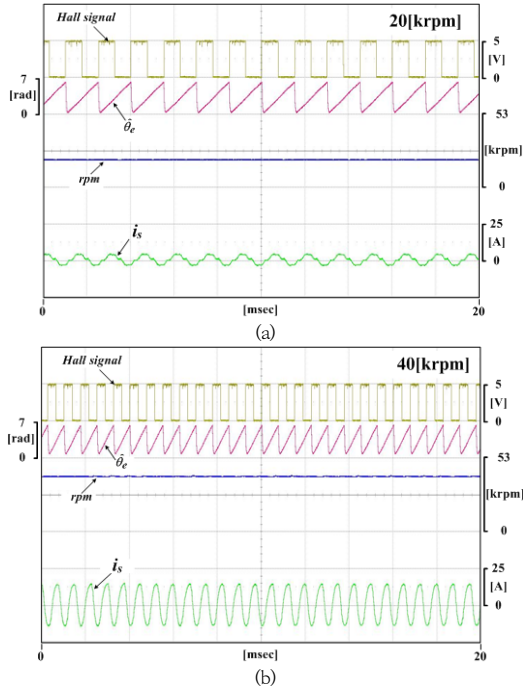


그림 7. 제안한 비례공진 전류제어기 기반의 각속도 및 전류 파형
 (a) 20[krpm], (b) 40[krpm]

Fig. 7. Waveform of Angular Velocity and Current based on Proposed PR Current Controller (a) 20[krpm], (b) 40[krpm]

V. 결 론

본 논문의 제어 대상 전동기인 단상 PMSM는 회전자에 따른 비데칭 공극이 발생할 수 있으며, 이로 인해 고속 운전시 소음과 진동이 발생된다. 따라서 본 논문에서는 단상 PMSM의 수학적 모델링을 기반으로 안정적 제어가 가능한 비례공진 전류제어기를 적용한 운전 알고리즘을 제안하였다. 실험을 통해 전동기의 초기기동부터 다양한 속도변화 시 안정적인 제어가 가능함을 보였으며, 제안한 알고리즘의 타당성과 유효성을 검증하였다.

References

- [1] P. Pillay and R. Krishnan, "Application characteristics of permanent magnet synchronous and brushless dc motor for servo drive", IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 27, No. 5, pp.986-996, Sep. 1991.
DOI: <https://doi.org/10.1109/28.90357>
- [2] G. Pellegrino, A. Vagati, P. Guglielmi, B. Boazzo, "Performance Comparison Between Surface-Mounted and Interior PM Motor Drives for Electric Vehicle Application", IEEE Trans. on Ind. Elec., vol.59, no.2, Feb. 2012
DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2011.2151825>
- [3] J.M. Gwon, K. J. Lee, H. S. Ann, "Controller Scheduling and Performance Analysis for Multi-Motor Control", The journal of the institute of internet, broadcasting and communication, vol.15, no.6, pp.71-77, 2015
DOI : <http://dx.doi.org/10.7236/IIBC.2015.15.6.71>
- [4] W.S. Park, K.Y. Cho, H.W. Kim, "Analysis of influence of parameter error for extended EMF based sensorless control and flux based sensorless control of PM synchronous motor", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 20, No. 3, pp. 8-15, 2019.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2019.20.3.8>
- [5] K.J. Kim, C.H. K, "Control of EM-PM Hybrid Type Magnetic Levitated Conveyor System", JKIIIT, Vol. 15, No. 1, pp. 55-62, 2017
DOI: <https://doi.org/10.14801/jkiit.2017.15.1.55>
- [6] R. Mizutani, T. Takeshita, and N. Matsui, "Current model-based sensorless drives of salient-pole PMSM at low speed and standstill," IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 34, No. 2, pp. 841-846, July/Aug. 1998.
DOI: <https://doi.org/10.1109/28.703990>
- [7] 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 Trans. on Ind. Applic., vol.38, no.4, pp.1054-1061, July/Aug. 2002.
DOI: <https://doi.org/10.1109/TIA.2002.800777>
- [8] S. Singh, A. N. Tiwari, S. N. Singh, "Performance of Sensorless Method for PMSM Drive", 2018 8th IEEE India International Conference on Power Electronics (IICPE), 13-15 Dec. 2018
DOI: <https://doi.org/10.1109/IICPE.2018.8709556>
- [9] Y.U. Park, J.H. Cho, D.K. Kim, "Cogging Torque Reduction of Single-Phase Brushless DC Motor With a Tapered Air-Gap Using Optimizing Notch Size and Position", IEEE Trans. on Ind. Applic., vol.51, Issue. 6, Nov.-Dec. 2015
DOI: <https://doi.org/10.1109/TIA.2015.2453131>
- [10] A. Kuperman, "Proportional-Resonant Current Controllers Design Based on Desired Transient Performance", IEEE Trans. on Power Elec., vol.30, Issue.10, Oct. 2015
DOI: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2015.2408053>
- [11] J. Chen, Z. Chen, J. Duan, C. Zhang, "Four-phase transverse flux permanent magnet motor control

system with AC current control based on PR regulator", 2019 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems 11-14, Aug. 2019
DOI: <https://doi.org/10.1109/ICEMS.2019.8921686>

- [12] H.D. Kang, S.H. Hwang, "Starting algorithm based on the DQ model of single-phase PMSM using variable APF", Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol.42, no. 7, pp. 602~608, 2018
DOI : <https://doi.org/10.5916/jkosme.2018.42.7.602>

저 자 소 개

성 의 석(정회원)



- 2015년 2월 : 경남대학교
전기공학과(학사)
- 2017년 2월 : 경남대학교
첨단공학과(석사)
- 2018년~현재 : 국방과학연구소 부설
방위산업기술지원센터 연구원