

3상 영구자석 동기전동기의 속도 맥동 저감을 위한 비례공진 전향보상 제어 알고리즘

Proportional Resonant Feedforward Control Algorithm for Speed Ripple Reduction of 3-phase SPMSM

이 선 영*, 황 선 환*, 김 경 엽**, 박 종 원**

Seon-Yeong Lee*, Seon-Hwan Hwang*, Gyung-Yub Kim**, Jong-Won Park**

Abstract

This paper propose a variable proportional resonant feedforward algorithm for reducing the speed ripple of a three-phase permanent magnet synchronous motor. In general, the torque ripples can be generated by electrical pulsation due to current measurement errors and dead time and mechanical pulsation because of rotor eccentricity and eccentric load. These torque pulsations can cause speed pulsations of the motor and degrade the operating performance of the motor drive system. Therefore, in this paper, the factors of the speed ripple is analyzed and an algorithm to reduce the speed ripple is proposed. The proposed algorithm applied a variable proportional resonant controller in order to reduce the specific operating frequency included in the speed pulsation, and utilized a feedforward compensation controller structure to perform the compensation operation. The proposed algorithm is verified through various experiments.

요 약

본 논문에서는 3상 영구자석 동기전동기의 속도리플 저감을 위한 가변형 비례공진 전향보상 알고리즘을 제안한다. 일반적인 토크 맥동의 원인은 전류측정오차 및 데드타임으로 인한 전기적 맥동과 회전자 편심과 편심 부하로 인해 발생할 수 있다. 이러한 토크 맥동은 전동기의 속도 맥동을 야기하고 전동기 구동 시스템의 운전 성능을 저하시킬 수 있다. 이를 위한 본 논문에서는 속도 맥동의 원인을 분석하고 속도 맥동을 저감하기 위한 알고리즘을 제안하였다. 제안한 알고리즘은 속도 맥동에 포함된 특정 운전 주파수를 저감하기 위해 가변형 비례 공진 제어를 적용하였고, 전향보상 제어기 구조를 이용하여 보상 동작이 수행되도록 하였다. 제안한 알고리즘은 다양한 실험을 통하여 타당성과 효용성을 검증하였다.

Key words : 3-phase SPMSM, PR Control, Feedforward, Speed Ripple Reduction, Eccentric Load

*★ 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 financially 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 (P0006906 Fuel cell system and thermal management parts development and manufacturing technology)

Manuscript received Nov. 26, 2020; revised Dec. 25, 2020; accepted Dec. 28, 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

3상 영구자석 동기전동기는 유도전동기 대비 고효율, 고 응답성 및 높은 출력밀도 특성을 가지고 있다. 그로 인해 자동화 설비, 가전기기 및 친환경 자동차 등 다양한 산업분야에 널리 적용되고 있다 [1-6]. 특히, 고정밀 동작 특성을 요하는 시스템의 경우 모터 구동시 야기될 수 있는 진동 및 소음은 매우 민감한 요소가 될 수 있다[1], [2]. 모터 구동에 따른 소음과 진동을 발생시키는 원인은 전기적 요인과 기계적 요인으로 구분할 수 있으며, 이로 인해 토크 및 속도 맥동이 발생되어 소음과 진동의 원인이 된다.

영구자석 동기전동기의 토크 맥동은 전동기 설계 및 제작과정에서 발생할 수 있는 코깅토크, 전류측정과정에서의 스케일 및 오프셋오차, 데드타임에 의한 상전류 왜곡 및 비정현적인 역기전력 등 많은 요인이 있다[3-5]. 기계적인 요인으로는 회전자 편심 및 전동기축에 인가되는 편심 부하로 인해 기계적 진동이 발생하여 전동기의 속도 맥동에 영향을 미칠 수 있다[7].

본 논문에서는 영구자석 동기전동기 구동 시 속도 맥동을 일으킬 수 있는 인자 중 편심 부하에 의한 속도 맥동을 분석하고 이를 저감하기 위한 제어 알고리즘을 제안한다. 제안한 알고리즘은 3상 영구자석 동기전동기의 벡터제어를 기반으로 한 토크분 전류인 q축 전류에 가변형 비례공진 전향보상 제어기를 추가하여 속도 맥동을 저감하고자 한다.

II. 본론

1. 토크 및 속도 맥동 분석

그림 1은 편심 부하를 갖는 3상 영구자석 동기전동기의 축에 작용하는 힘을 보여주고 있다. 이를 토대로 편심 부하에 의한 부하 토크는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_L = T_{LO} + mgr_d \cos(\alpha) \cdot \sin(\theta_d - \psi) = T_{LO} + \Delta T_L \quad (1)$$

여기서, T_L 은 전체 부하토크, T_{LO} 은 평균 부하토크, ΔT_L 은 토크 맥동이다.

식 (1)의 토크 맥동으로부터 속도 맥동 $\Delta\omega_m$ 은

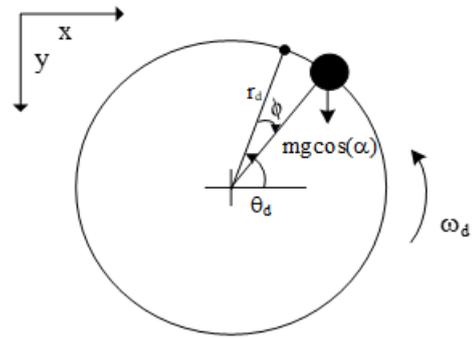


Fig. 1. Force of 3-phase SPMSM with eccentric load.

그림 1. 편심 부하를 갖는 3상 영구자석 동기전동기의 힘

마찰계수 B 를 무시한 운동 방정식으로 표현하면 아래와 같이 식 (2)와 (3)으로 전개할 수 있다.

$$T_e = J \frac{d\omega_m}{dt} + \Delta T_L \quad (2)$$

$$\Delta\omega_m = \frac{1}{J} \int (T_e - \Delta T_L) \quad (3)$$

식 (3)을 전개하면 식 (4)와 같이 표현할 수 있다. 식 (4)에서 알 수 있듯이 속도 맥동은 기계각 운전 주파수를 갖는 정현적 맥동을 가진다.

$$\Delta\omega_m = -K_v \cos\psi (\cos\theta_d) + K_v \sin\psi (\sin\theta_d) \quad (4)$$

여기서, $K_v = mgr_d \cos(\alpha)$, ψ 는 편심 부하의 위치이고 θ_d 는 편심 부하의 축 위치이다.

2. 가변형 비례공진 전향보상 알고리즘

앞서 언급했듯이 편심 부하를 갖는 3상 영구자석 동기전동기의 경우, 기계적 운전 주파수의 1배 맥동을 포함하고 있다. 편심 부하에 의한 저주파 속도 맥동을 검출하여 보상하기 위해 본 논문에서는 특정 주파수 성분에 대한 응답성 및 정상상태 특성

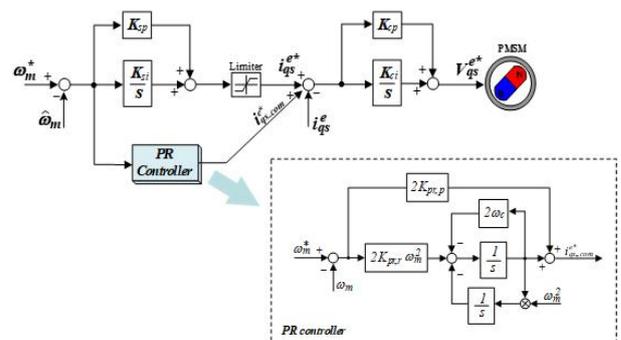


Fig. 2. Block diagram of the proposed algorithm.

그림 2. 제안한 알고리즘의 블록도

이 우수한 비례공진 제어를 적용하고 가변속 운전 을 요하는 구동 시스템의 특성을 고려하여 공진 주 파수 가변형 전향보상 제어기를 설계하였다. 그림 2는 제안한 가변형 비례공진 전향보상 알고리즘의 블록도를 보여주고 있다. 그림 2에서 K_{pr-p} 는 비례 이득, K_{pr-r} 는 공진 이득 및 ω_o 는 공진주파수를 나타 낸다.

3. 실험 결과

그림 3은 제안한 알고리즘을 검증하기 위한 전체 시 스템을 보여주고 있다. 실험은 TI사의 TMS320C28346 기반의 제어보드, 3상 PWM 인버터 및 3상 영구자 석 동기전동기를 구성하여 진행하였다.

실험은 편심 부하 200[g] 및 400[g]을 부착하여 진행하였고 해당 편심 질량은 적용 대상인 세탁기 의 일반적인 부하 실험에 사용되는 조건의 편심 질 량을 적용하였다. 편심 부하 200[g]과 400[g]일 때 의 보상전류는 실험적으로 0.3[A]과 0.5[A]로 설정 하였다. 각 속도별 맥동의 영향에 대해 알아보고 제안한 알고리즘의 적용 전후에 대한 동작 특성을 비교하였다.

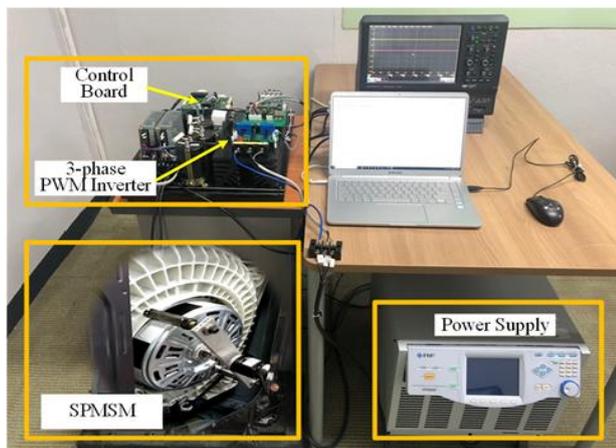


Fig. 3. Experimental setup.
그림 3. 실험장치

그림 4의 (a)는 편심 부하 200[g] 및 200[rpm] 에 서 제안한 알고리즘을 적용하였을 때 속도 맥동이 약 70[%] 저감되는 것을 알 수 있고 이때의 기계적 맥동 주파수는 3.29[Hz]이다. 그림 4의 (b)는 300[rpm] 에서의 동작 특성으로 속도 맥동은 약 75[%] 저감 되었고 기계적 운전 주파수는 4.94[Hz]이다. 그림 5는 편심 부하 400[g]을 인가하였을 때 200[rpm]과 300

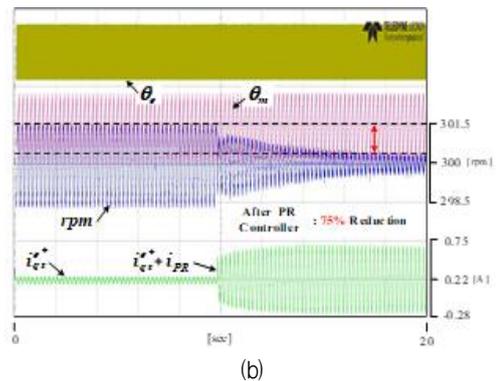
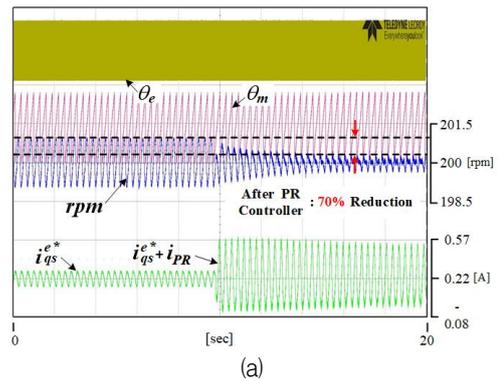


Fig. 4. Experimental waveform under 200[g] eccentric load.
(a) 200[rpm] (b) 300[rpm].
그림 4. 편심 부하 200[g] 실험 파형
(a) 200[rpm] (b) 300[rpm]

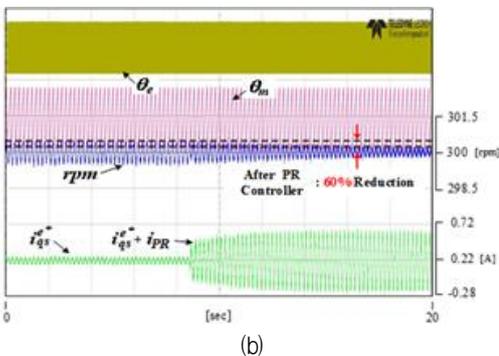
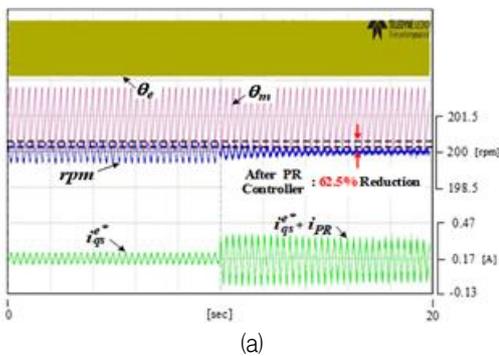


Fig. 5. Experimental waveform under 400[g] eccentric load.
(a) 200[rpm] (b) 300[rpm].
그림 5. 편심 부하 400[g] 실험 파형
(a) 200[rpm] (b) 300[rpm]

[rpm]에서의 동작 특성을 나타내고 있다. 각각 속도 맥동이 약 62.5[%]와 60[%]가 저감되었음을 알 수 있다. 상기의 실험을 통해 제안한 속도 맥동 저감 알고리즘이 부하 및 운전 속도에 따라 잘 적용이 됨을 확인할 수 있다.

III. 결론

본 논문은 3상 영구자석 동기전동기의 속도 맥동 저감을 위한 가변형 비례공진 전향보상 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘은 운전 속도에 따른 임의 편심 부하 조건인 200[g]과 400[g]에서 60[%] 이상 저감됨을 보였다. 또한, 편심 부하가 존재할 경우, 운전 속도에 기계각 기준으로 1배의 정현적 맥동이 발생함을 확인하였다.

이러한 특정한 속도 맥동 성분에 대해서 제안한 운전 속도 가변형 비례공진 전향보상 알고리즘이 특정 주파수 성분을 갖는 속도 맥동을 현저히 저감시킬 수 있음을 확인할 수 있다. 제안한 알고리즘은 실험을 통해 타당성과 효용성을 검증하였다.

Table 1. Specifications of 3-phase SPMSM driving system.

표 1. 3상 SPMSM의 구동 시스템의 사양

Parameters		Value
3-phase SPMSM	Number of poles	48
	Stator resistance	5.488Ω
	Stator inductance	30.488mH
	back-EMF constant	0.1433V/rad/s
3-phase inverter	IPM(PM100RLA1A120)	1200V/100A
	DC-link capacitor	540uF/450V
	Current sensor	25A
	Switching Freq.	10KHz
Processor	TMS320C28346	
	Period of current controller	100us
	Period of speed controller	1ms

References

[1] S. O. Kwon, J. J. Lee, G. H. Lee, and J. P. Hong, "Torque ripple reduction for permanent

magnet synchronous motor using harmonic current injection," *Transaction of Korean Institute of Electrical Engineers*, Vol.58, No.10, pp.1930-1935, 2009. DOI: 10.1109/TMAG.2008.915776

[2] A. Kurnia, R. De Larminat, P. Desmond, and T. O'Gorman, "A low torque ripple PMSM drive for EPS applications," *Applied Power Electronics Conference & Exposition(APEC)*, Vol.2, pp.1130-1136, 2004. DOI: 10.1109/APEC.2004.1295965

[3] D. Y. Yoon and S. C. Hong, "Reduction of torque ripple due to current-sensing errors in inverter-fed AC motor systems," *Transaction of Korean Institute of Power Electronics*, Vol.3, No.4, 1998.

[4] H. Tamura, T. Ajima, and Y. Noto, "A torque ripple reduction method by current sensor offset error compensation," *15th European conference on Power Electronics and Application(EPE)*, pp. 1-10, 2013. DOI: 10.1109/EPE.2013.6631858

[5] S. H. Lee, I. P. Hong, S. J. Park, and C. U. Kim, "Torque ripple minimization for IPMSM with nonsinusoidal back-EMF," *Transaction of Korean Institute of Power Electronics*, Vol.7, No.1, pp.91-100, 2002.

DOI: 10.1109/ME49197.2020.9286703

[6] S. Chen, A. Song, and T. Sekiguchi, "High efficiency and low torque ripple control of permanent magnet synchronous motor based on the current tracking vector of electromotive force," *Conference Record of IEEE Industry Applications Society(IAS)*, Vol.3, pp.1725-1729, 2000.

DOI: 10.1109/IAS.2000.882113

[7] J. W. Park, D. H. Koo, J. M. Kim, G. H. Kang, and J. B. Park, "High performance speed control of permanent magnet synchronous motor with eccentric load," in *Proc. IEEE Ind. Appl. Soc. Conf. (IAS 2001)*, pp.815-820, 2001.

DOI: 10.1109/IAS.2001.955547

BIOGRAPHY

Seon-Yeong Lee (Member)

2018: B.S. degree in Electrical Engineering, Kyungnam University.
 2020 : M.S. Course in Electrical Engineering, Kyungnam University.
 2020~Present : Researcher, Automobile&Robot Center for Gyeongnam Technopark

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.

Gyung-Yub Kim (Member)

2004 : B.S. degree in Mechanical Engineering, Ulsan University.
 2004~2008 : Researcher, R&D Center for Myunghwa Cooperation.
 2011~Present : Researcher, R&D Center for GMB Korea Cooperation.

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.