

영구자석 동기 전동기의 고조파 주입

센서리스 기법 시뮬레이션 모델

Simulation Model of Harmonics Injection Sensorless Technique for Permanent Magnet Synchronous Motor

윤진우*, 이동명*

Jin-Woo Yoon*, Dong-Myung Lee*

Abstract

In this study, a simulation model of the harmonic injection sensorless control technique is proposed. This model is suitable for the sensorless technique of low-speed area operation of motors. The motor of this model is permanent magnet motor. For sensorless control, 1kHz square wave is injected. The change in motor constant according to rotor position is realized by having different d - q inductance values. Sensorless techniques is implemented through functions of Simulink and models provided by Simulink libraries. It is shown that the harmonic component contained in the current is extracted using a filter, and the angle of the permanent magnet of the motor is detected using the extracted waveform. The validity of the simulation model is demonstrated through the estimated motor angle waveform and the related waveforms of the motor control applied to the 1kW permanent magnet motor.

요약

본 연구에서와 같이 전동기의 저속 영역 운전의 센서리스 기법으로 적합한 고조파 주입 센서리스 제어기법의 시뮬링크 시뮬레이션 모델을 제안한다. 본 모델에 적용되는 전동기는 영구자석 전동기이다. 또한, 다양한 고조파 주입 기법중 1kHz 구형파를 주입하는 기법을 사용한다. 고조파 주입에 따른 전동기의 전동기 상수의 변화는 시뮬링크에서 제공하는 전동기의 상수 조절을 통해 구현한다. 시뮬링크의 함수와 라이브러리에서 제공하는 모델을 통해 센서리스 기법을 구현한다. 전류에 포함된 고조파 성분을 필터를 이용하여 추출하고, 추출된 파형을 이용하여 영구자석 전동기의 각도를 검출함을 보인다. 그리하여 1kW 영구자석 전동기에 적용된 시뮬레이션 파형에서의 전동기 각도 추정파형과 전동기 제어관련 파형을 통해 시뮬레이션 모델의 타당성을 보인다.

Key words : Sensorless operation, High-frequency wave injection, Simulation model, Observer, PMSM

* School of Electronic and Electrical Engineering, Hongik University

★ Corresponding author

E-mail : dmllee@hongik.ac.kr, Tel : +82-2-320-3047

Manuscript received Feb. 17, 2020; revised Mar. 18, 2020; accepted Mar. 20, 2020.

※ Acknowledgment

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

전동기의 정밀한 제어를 위해서 벡터제어기법이 널리 적용되고 있으며, 최근에는 속도 센서 등을 제거한 센서리스 기법은 널리 개발되어 적용되고 있다. 이러한 센서리스 기법은 센서류의 고장에 따른 비상 운전에 대비하기 위함과, 가전제품 등에서 비교적 고가인 위치 센서의 제거를 통한 저가격화를 위한 센서리스 알고리즘의 적용이 이루어지고 있다[1]-[3]. 또한, 유도 전동기보다 전력밀도, 토크

대 관성비율, 그리고 효율 면에서 영구자석 전동기가 더욱 우위를 점함으로써 영구자석 전동기의 센서리스 알고리즘이 많이 연구되었다[4].

센서리스 알고리즘은 크게 2 가지로 나눌 수 있다. 고속에서 적합한 역기전력을 이용하는 방식과 역기전력의 크기가 작은 저속영역에서 고조파 주입을 통한 센서리스 기법이라 하겠다. 역기전력을 이용하는 방식은 전동기의 전압 전류 방정식으로부터, 역기전력의 크기와 위치를 계산하는 방식이다[5], [6]. 이 방식은 역기전력을 검출할 수 있을 정도의 속도영역에서 전동기의 위치를 검출하는 기법이다. 고조파 신호 주입 방식은 역기전력 방식에서는 검출하기 어려운 저속에서 전동기의 위치를 검출하기 위해 고안된 센서리스 방식이다[7], [8]. 고조파 전압 신호에 의해 생성된 전류의 정보로부터 전동기의 위치를 검출하는 기법이다.

본 논문의 대상은 고조파 주입을 통한 영구자석 전동기의 센서리스 기법이다. 우선, 역기전력을 이용하는 방식에 대한 시뮬레이션은 전동기의 실제 모델과 예측모델에서의 출력 값을 이용하는 것으로, 시뮬레이션 모델이 비교적 간단하다. 이에 비하여 고조파 주입을 이용하는 방식은 고조파 주입부, 검출부, 연산부, 전동기를 포함한 전력변환기 부분 등 역기전력을 이용하는 방식에 비하여 비교적 많은 연산 블록이 필요하다. 이에 본 논문에서는 고조파 주입을 이용한 센서리스 기법에 대한 시뮬레이션 모델을 소개하고자 한다.

논문의 구성은 2장에서는 알고리즘에 대하여 설명한다. 3장에서는 각 시뮬레이션 모델에 대하여 설명한다. 4장에서는 1kW 영구자석 전동기에 적용한 시뮬레이션을 통해 제안 모델의 타당성을 보인다.

II. 본론

1. 고조파 주입 기법

영구자석 동기전동기의 전압방정식은 식(1)과 같고, $j\omega$ 형태로 변환 후 임피던스의 인덕턴스가 전동기 고정자 저항치보다 충분히 크다고 보면 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} V_{ds}^e &= R_s i_{ds}^e + L \frac{di_{ds}^e}{dt} - \omega_r L i_{qs}^e \\ V_{qs}^e &= R_s i_{qs}^e + L \frac{di_{qs}^e}{dt} + \omega_r L i_{ds}^e \end{aligned} \quad (1)$$

$$\Rightarrow \begin{bmatrix} i_{dsh}^s \\ i_{qsh}^s \end{bmatrix} = [R(\theta)]^{-1} [Z_h^e]^{-1} \begin{bmatrix} V_{dsh}^e \\ V_{qsh}^e \end{bmatrix} \quad (2)$$

이 때 구형과 전압을 d축에 주입하는 경우 식(3)과 같이 표현된다. 식(2)와 식(3)을 이용하여 식(4)로 나타낼 수 있다.

$$v_{dsh}^e = \begin{cases} V_{Inj} & \text{Half Duty} \\ -V_{Inj} & \text{Otherwise} \end{cases}, v_{qsh}^e = 0 \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} i_{dsh}^s \\ i_{qsh}^s \end{bmatrix} &= [R(\theta)]^{-1} [Z_h^e]^{-1} \begin{bmatrix} V_{dsh}^e \\ V_{qsh}^e \end{bmatrix} \\ &= \frac{V_{Inj} T_s}{L_{dh} \cdot s} \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \sin(\theta) \end{bmatrix} \quad (\because \bar{\theta} \approx 0) \end{aligned} \quad (4)$$

이에 d축과 q축의 전류를 이용하여 arc tan 함수를 사용하면 각도를 찾아낼 수 있다.

2. 고조파 주입 알고리즘 블록

그림 1은 제어기의 전체 블록 다이어그램을 보인다. 그림 1은 본 연구에서 적용한 논문[7]의 알고리즘 그림으로 본 연구 다이어그램의 기반이라 하겠다. 본 연구에서는 기존 알고리즘에서의 BPF(Band Pass Filter)를 대신하여 NF(Notch Filter)를 사용한다. 위치 검출을 위하여 v_d (회전좌표계축)에 구형과 전압을 주입한다. 이 구형과 주입 전압에 대응하는 고조파 전류 성분의 검출을 한다. 검출은 필터 통과 이전의 전류 값에서 노치 필터를 통과한 이후의 전류의 차를 이용하여, 고조파 성분의 전류를 구한다. 이 고조파 전류로부터, 논문 [7]의 식 (12)에서의 차동 성분인 Δi_{dqsh} 를 구한다.

Δi_{dqsh} 는 n 과 $n-1$ 차 샘플링 시점에서의 검출 전류의 차이량이라 하겠다. i_{dsh}^s 는 고정좌표계 d축 고정자 저항의 고조파 성분, i_{qsh}^s 는 고정좌표계 q축 고정자 저항의 고조파 성분을 각각 의미한다.

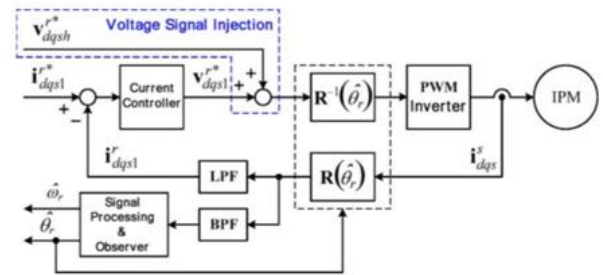


Fig. 1. Overall control block diagram. 그림 1. 전체 제어 블록 다이어그램

논문 [7]의 식(13)을 이용하여, $\Delta i_{dqsh}'$ 을 구한다. 여기서, 논문 [7]의 식(14)에서 언급과 같이 $\Delta i_{dqsh}'$ 에는 각각 $\cos(\theta_r)$ 의 정보와 $\sin(\theta_r)$ 의 정보가 들어 있다. [7]의 식(15)와 같이 arc tan 함수를 이용하여 회전자의 위치를 검출한다.

$$\theta_{rCal} - \hat{\theta}_r \approx K_{error} \tilde{\theta}_r \quad (5)$$

K_{error} ripple을 없애기 위하여 옵저버(observer)를 이용한다. 본 연구에서 사용한 옵저버는 그림 4와 같다. 여기서 $\hat{\theta}_r$ 은 옵저버의 최종 출력 값으로 최종 추정된 회전자의 위치이다.

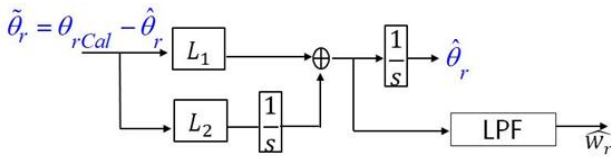


Fig. 2. Rotor position detection block using observer scheme. 그림 2. 옵저버를 이용한 회전자 위치 검출 블록

3. 시뮬레이션 모델

알고리즘의 검증을 위하여 Matlab/Simulink를 이용한 시뮬레이션을 수행하였다. 전동기는 PMSM을 사용하였으며, SPM(표면부착형 영구자석 전동기)에서의 자속의 포화로 나타나는 현상이 IPM(매입형 영구자석 전동기)의 L_d , L_q 변화에 의해 나타나는 현상과 동일하므로 전동기는 IPM으로 설정하였다. 블록 1은 속도제어기, 블록 2는 전류제어기, 블록 3은 회전좌표계 지령치 전압을 정직좌표계 변환, 블록 4는 SVPWM 블록, 블록 5는 게이트 시그널 생성블록, 블록 6은 위치 및 속도 검출 블록이다.

블록 1의 속도제어기에서, $i_{ds}=0A$ 이고, i_{qs} 지령치는 속도제어기의 출력이다. 블록 2는 전류제어기 블록으로 PI제어기를 사용하며, 안티 와인드업 이 추가된 형태이다. 이 때, 전류 제어 후 d 축 전류에

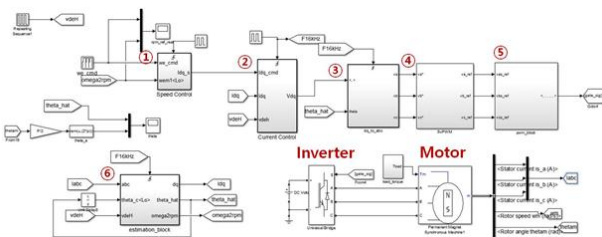


Fig. 3. Overall simulation model. 그림 3. 전체 시뮬레이션 모델

고조파 성분을 주입하여 전압 지령치를 내보낸다. 블록 3에서 블록 5는 좌표변환, SVPWM등 널리 알려져 있는 블록으로 설명은 생략한다.

그림 4는 블록 6의 내부를 보인다. 블록 6에서는 센서리스 기법에 의해서 위치 및 속도를 검출한다.

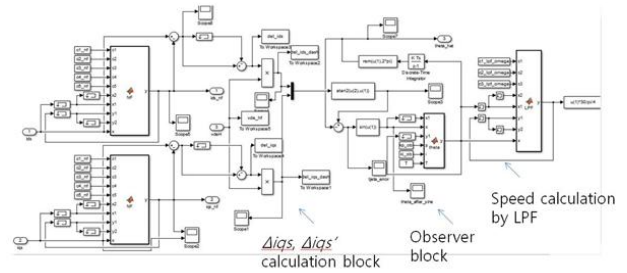


Fig. 4. Position and speed detection block. 그림 4. 위치 및 속도 검출 블록

그림 4에서 NF로 표시된 노치 필터를 이용하여 고조파 성분을 구하고, 이를 옵저버를 이용하여 위치를 검출하며, 저역통과 필터를 이용하여 속도를 검출한다. 각각 블록의 구현은 Matlab의 function을 이용하며, 전달함수의 미분항인 s에 해당하는 것은 식(6)과 (7), (8)의 관계 이용하여 이산화 하여 전개하였다. 여기서, T_s 는 샘플링 시간을 말한다. 즉, 노치 필터, 옵저버, 저역통과 필터 등은 식(6)을 이용하여, 이산화한 것이다.

$$s \rightarrow \frac{x(n) - x(n-1)}{T_s} \quad (6)$$

본 시뮬레이션에서 사용된 s-domain에서의 저역통과 필터는 식(7)과 같다.

$$G(s) = \frac{a^2}{s^2 + 2as + a^2} \quad (7)$$

여기서, f_c 는 차단주파수, $a = w_0 = 2 \times \pi \times f_c$ 이다.

본 시뮬레이션의 노치필터는 아래와 같다. 고조파 성분은 1kHz의 0.2V 크기인 구형파를 사용하였다. 따라서, f_c 는 1kHz이다.

$$G(s) = \frac{s^2 + w_0^2}{s^2 + (\frac{w_0}{Q})s + w_0^2} \quad (8)$$

여기서, $Q = \frac{f_c}{f_{bandwidth}}$, $w_0 = 2 \times \pi \times f_c$

4. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션 모델의 타당성을 보기 위하여 시뮬레이션을 행하여 보았다. 아래 그림은 센서리스 운전시 0 → 200rpm → 300rpm 운전시의 시뮬레이션 파형이다. 그림 5에서 볼 수 있듯이, 좌측 상단부터 속도의 지령 치와 실제 치가 잘 따라가는 것을 볼 수 있고 속도가 변화하는 부분에서 전류 값의 상전류와 좌표축 변환 전류가 변하는 것을 볼 수 있다.

그림 5의 좌측 하단의 상전류 파형을 노치 필터를 이용하여 계산한 파형은 그림 6과 같다. 그림 6은 노치 필터의 적용 이전 d 축 전류 값과 노치 필터로 고조파 성분을 제거한 이후 값을 보여준다.

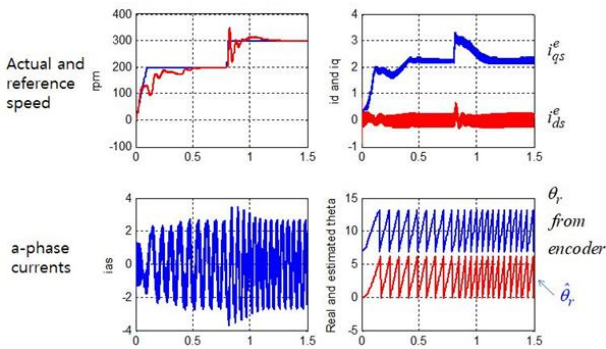


Fig. 5. Simulation results (from clockwise, speed, d - q current, phase current, and actual and estimated position).

그림 5. 시뮬레이션 결과 파형(시계방향으로, 속도, d - q 전류, a상 전류, 실제 각도와 추정된 각도)

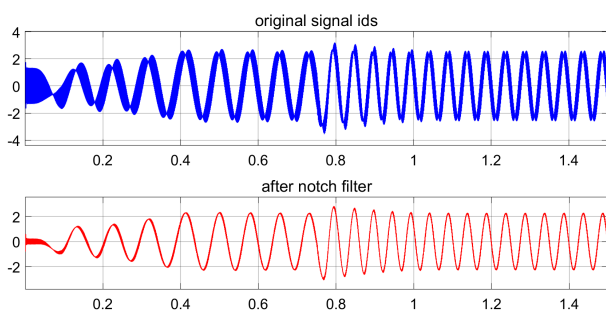


Fig. 6. i_{ds} waveform before and after NF.

그림 6. NF 통과 전 후의 i_{ds} 파형

이는 고조파 성분의 제거가 잘 되었음을 보여주는데, 노치필터로 고조파 성분을 뽑아내었음을 보여준다. 이어 고조파 성분이 제거된 전류파형을 축 변환 하여 d 축과 q 축으로 PI제어를 한 파형이 그림 5의 우측 상단 파형이다.

그림 7은 고조파 성분이 곱해진 전류 값을 보여

주는데, 상전류에 노치필터를 사용하여 추출한 고조파 전류파형과 고조파 전압을 곱해줌으로써 나타나는 파형이다. 이는 식(4)와 같이 전동기의 회전자 N극의 위치인 θ 를 구하기 위해 $\sin(\theta)$ 와 $\cos(\theta)$ 로 이루어진 전류를 나타낸다. 이를 통해 d 축 전류와 q 축 전류를 사용하여 \arctan 함수를 이용하면 θ 를 구할 수 있다.

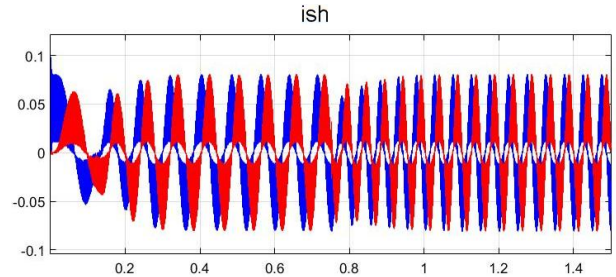


Fig. 7. i_{dsh} and i_{qsh} .

그림 7. i_{dsh} 와 i_{qsh}

그림 8은 \arctan 함수를 이용하여 구한 θ 값을 보여준다. 이는 옵저버 이전 값으로, K_{error} 를 제거하기 전 값이다. 이에 약간의 노이즈가 보임을 알 수 있다.

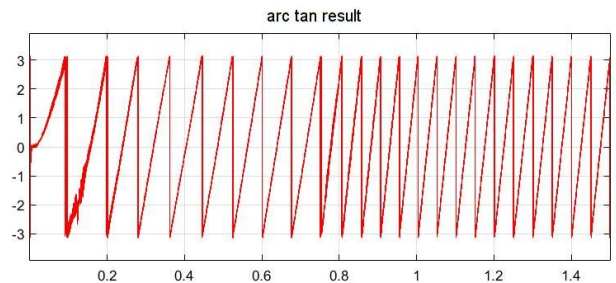


Fig. 8. Arc tan result waveform before observer.

그림 8. 옵저버 이전의 아크 탄젠트 함수 결과 파형

그림 9는 본 시뮬레이션에 사용된 고조파 성분을 보여준다. V_{p-p} 0.2V에 1kHz를 사용하였다.

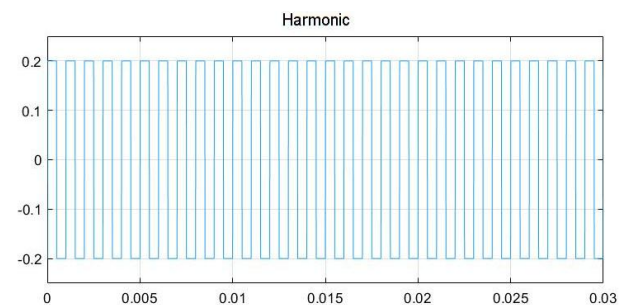


Fig. 9. 1 kHz harmonic waveform for position detection.

그림 9. 위치 검출을 위해 주입된 1kHz 고조파 전압 파형

III. 결론

본 논문은 고조파 주입 기법의 모터제어 이론을 시뮬레이션으로 검증한다. 다양한 고조파 주입기법 중 구형파 주입을 바탕으로 제어기의 정상 작동을 보여준다. 속도 제어기의 급격한 지령치의 변화에도 동작하는 모습을 보여주며, 제안 모델의 타당성을 보여준다. 추정된 위치의 오차는 거의 없어 사실상 지연되지 않는다고 할 수 있다. 제안된 모델의 타당성은 시뮬레이션과 이론적 분석을 통해 검증되었으며, 이는 다양한 전동기에도 적용 할 수 있다.

References

- [1] Z. Zhang, H. Xu, L. Xu, and L. E. Heilman, "Sensorless direct field oriented control of three-phase induction motors based on sliding mode for washing-machine drive applications," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol.42, No.3, pp.694-701, 2006. DOI: 10.1109/TIA.2006.872919
- [2] M. Tursini, R. Petrella, and F. Parasiliti, "Sensorless control of an IPM synchronous motor for city-scooter applications," *Conf. Rec. of IEEE IAS Annu. Meet.*, 2003, pp.1472-1479. DOI: 10.1109/IAS.2003.1257751
- [3] J. I. Ha, and S. K. Sul, "Sensorless field orientation control of an induction machine by high frequency signal injection," *IAS 97*, pp.426-432, 1997.
- [4] J. H. Jang, S. K. Sul, J. I. Ha, K. Ide, and M. Sawamura, "Sensorless drive of surface-mounted permanent-magnet motor by high frequency signal injection based on magnetic saliency," *IEEE Trans. on Indus. Appli.*, vol.39, no.4, pp.1031-1039, 2003. DOI: 10.1109/TIA. 2003.813734
- [5] S. H. Kim, Motor control DC, AC, BLDC Motors, *BogDoo Publishing Co.*, 2018.
- [6] B. H. Kim and D. M. Lee, "Sensorless control of PMSM by a four-switch inverter with compensation of voltage distortion and adjustment of position estimation gain," *Journal of Elect. Eng. and Tech.*, Vol.12, No.1, pp.100-109, 2017.

DOI: 10.5370/ JEET.2017 .12.1.100

[7] Y. D. Yoon, S. K. Sul, S. Morimoto, and K. Ide, "High-bandwidth sensorless algorithm for AC machines based on square-wave-type voltage injection," *IEEE Trans. on Indus. Appli.*, Vol.47, No.3, pp.1361-1370, 2011.

DOI: 10.1109/TIA.2011.2126552

[8] Y. D. Yoon, "Sensorless control of AC machines based on square-wave voltage injection," *Ph. D. Thesis*, Seoul National University, 2010.

BIOGRAPHY

Jin-Woo Yoon (Member)



2018 : BS degree in Electronic and Electrical Engineering, Hongik University.

2018~ : MS degree in Electrical and Electronic Engineering, Hongik University.

Dong-Myung Lee (Member)



1994 : BS degree in Electrical Engineering, Hanyang University.

1996 : MS degree in Electrical Engineering, Hanyang University.

2004 : PhD degree in ECE Georgia Tech.

2008~present : Professor, School of Electronic and Electrical Engineering, Hongik University.