# 스위칭 주파수의 구형파 전압 주입을 이용한 IPMSM 센서리스 기법의 개선된 신호처리 기법

남상훈, 박내춘, 김상훈
강원대학교

# Improved Signal Processing Method for IPMSM Sensorless Technique using Switching Frequency Square-wave Voltage Injection

S.H. Nam, N.C. Park, S.H. Kim
Kangwon National Univ.

## ABSTRACT

본 논문에서는 스위칭 주파수의 구형파 전압 주입을 이용한 IPMSM의 센서리스 제어 기법에서 개선된 신호처리 방법을 제안하였다. 제안된 기법에서는 기본파 전류와 고주파 성분 전류 추출에 필요한 필터를 간단히 구현함으로써 신호처리에서 발생하는 시지연을 줄일 수 있으며, 그 결과 센서리스 제어의 동특성을 개선할 수 있다. 800[W]급 IPMSM에 대한 실험을 통해 제안된 방법의 타당성을 검증하였다.

## 1. Introduction

매입형 영구자석 동기전동기(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor, IPMSM)는 큰 출력밀도, 높은 효율, 고속 운전의 유리함으로 인하여 고성능 제어가 요구되는 분야에 적용이 확대되고 있다. 최근 이러한 IPMSM의 벡터 제어 시에 회전자의 위치 검출기를 사용하지 않는 센서리스 제어(Sensorless control)에 대한 많은 연구가 진행되고 있다[1].

IPMSM의 센서리스 제어 기법은 크게 역기전력 정보를 이용하는 방법과 전동기의 자기적 돌극성을 이용하는 방법으로 나눌 수 있다. 전자는 역기전력이 작은 저속 및 영속영역에서 운전 시의 근본적 문제점을 가지므로 후자에 대한 연구들이 활발히 진행되어 왔는데, 주로 고주파 신호를 이용한다[2],[3]. 최근 신호 처리에 유리하고 주입 신호의 주파수가 높아 소음 저감에 유리한 스위칭 주파수의 구형파 펄스 전압을 주입을 이용한 센서리스 제어 기법이 제안되었다[2].

본 논문은 스위칭 주파수의 구형파 전압을 이용한 IPMSM의 센서리스 제어에서 신호처리에 필요한 필터를 간단하게 구현할 수 있는 방법을 제안하였다. 실험을 통해 제안된 방법의 타당성을 검증하였다.

## 2. 개선된 신호 처리 방법

그림 1은 스위칭 주파수의 구형파 전압을 이용한 IPMSM의 회전자 위치 추정을 위한 블록도이다. 전류제어와 센서리스 제어를 위해서는 전동기의 상전류로부터 기본파 성분과 고주파 성분 전류를 추출하기 위한 신호처리 과정이 필요하다. 이를 위해 기존의 방법에서는 두 개의 필터를 사용하는데, 저역 통과 필터(LPF)를 사용해 기본파 전류($i^r_{dqs1}$)를 추출하고 대역 통과 필터(BPF)를 사용해 고주파 성분 전류($i^r_{dqsh}$)를 추출한다[2].

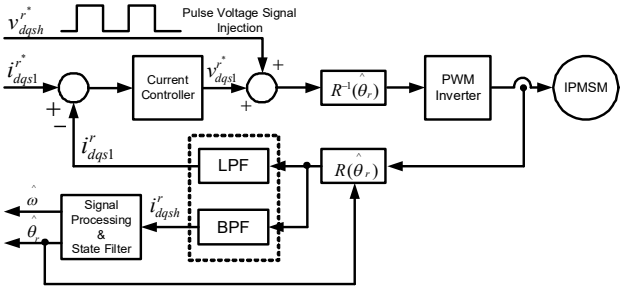


그림 1 회전자 위치 추정 블록도
Fig. 1 Block diagram of rotor position estimator

본 논문에서는 이러한 필터를 간단하게 구현할 수 있는 방법을 제안한다. 동기좌표계 d축 전류($i^r_{ds}$)는 주입된 구형파 전압으로 인해 그림 2와 같이 스위칭 주파수로 변동하는 성분을 갖게 된다. 따라서 기존의 방법에서는 LPF를 사용하여 $i^r_{dqs1}$을 추출한다. 그러나 본 논문에서는 $i^r_{dqs}$의 현재 전류와 한주기 전 샘플링 전류로부터 식(1)과 같이 $i^r_{dqs1}$을 간단히 추출한다. 이 경우 언제나 한 샘플링의 지연만 발생한다.

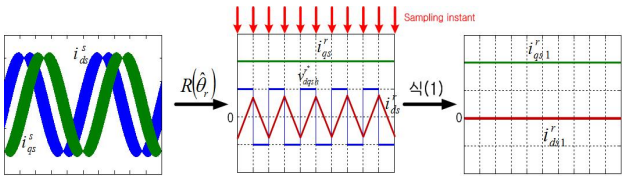


그림 2 동기좌표계 기본파 전류의 추출 과정
Fig. 2 The extraction process of synchronous reference frame current

$$i^r_{dqs1} = 0.5 \times \left( i^r_{dqs}[k] + i^r_{dqs}[k-1] \right) \tag{1}$$

또한 회전자 위치를 얻기 위해서는 $i^r_{ds}$로부터 유기된 고조파 성분 전류 $i^s_{dqsh}$를 추출할 필요가 있다. 기존의 방법에서는 BPF를 사용하여 이 전류를 얻지만, 본 논문에서는 앞 과정에서 추출한 $i^r_{dqs1}$을 정지좌표계 전류($i^s_{dqs1}$)로 변환 후 식(2)과 같은 과정으로 대역 통과 필터 없이 추출한다.

$$i^s_{dqsh} = i^s_{dqs} - i^s_{dqs1} \tag{2}$$

이와 같이 제안된 방법으로 기본파 전류($i^r_{dqs1}$)와 고주파 성분 전류($i^s_{dqsh}$)를 필터의 사용 없이 간단히 추출할 수 있다. 제안된 신호처리 과정이 그림 3에 보인다.

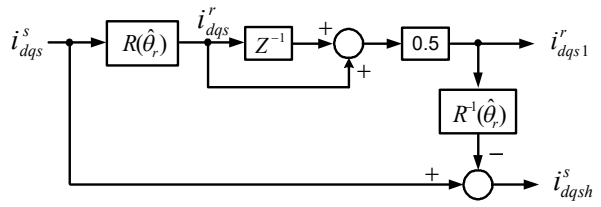


그림 3 제안된 신호 처리 기법
Fig. 3 Proposed signal processing method

## 3. 회전자 위치 추정 기법

추정된 동기 좌표계 d축에 스위칭 주파수의 구형파 전압을 주입한 경우, 유기된 고주파 전류 $i^s_{dqsh}$는 식(3)과 같다[2]. 여기서 $V_{\in j}$는 인가한 전압 크기, $T_s$는 샘플링 시간, $\tilde{\theta}_r$는 위치 오차로서 거의 0이라고 가정한다.

$$\begin{bmatrix} i^s_{dsh} \\ i^s_{qsh} \end{bmatrix} = V_{\in j} T_s \begin{bmatrix} \frac{\cos(\theta_r)\cos(\tilde{\theta}_r)}{L^r_{dh}} + \frac{\sin(\theta_r)\sin(\tilde{\theta}_r)}{L^r_{qh}} \\ \frac{\sin(\theta_r)\cos(\tilde{\theta}_r)}{L^r_{dh}} - \frac{\cos(\theta_r)\sin(\tilde{\theta}_r)}{L^r_{qh}} \end{bmatrix} \approx \frac{V_{\in j} T_s}{L^r_{dh}} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) \\ \sin(\theta_r) \end{bmatrix} \quad (3)$$

이로부터 회전자의 위치 $\hat{\theta}_r$은 식(4)과 같이 역탄젠트 함수를 이용하여 구할 수 있다.

$$\hat{\theta}_r = \text{atan2}(i^s_{qsh}, i^s_{dsh}) \quad (4)$$

기존의 방법에서는 $i^s_{dqsh}$을 구하기 위해 연속된 두 샘플링 전류를 사용한다. 그러나 본 논문에서는 식(5)와 같이 매 샘플링 전류 $i^s_{dqsh}$에 주입 전압에 따른 부호를 고려하여 바로 그 전류의 크기를 얻게 되어 샘플링 지연이 발생하지 않는다.

$$\left| i^s_{dqsh} \right| = i^s_{dqsh} \times sign(\hat{v^r_{dsh}}) \quad (5)$$

## 4. 실험 결과

제안된 방법의 타당성을 검증하기 위하여 800[W] IPMSM을 사용하여 실험을 수행하였다. 스위칭 주파수는 5[kHz]이고 전류 샘플링 주기는 100[usec]이다. 위치 추정을 위해 주입된 전압의 크기는 20[V]이다.

그림 3은 스위칭 주파수의 구형파 전압 주입 시 제안된 방법으로 추출된 고주파 전류를 나타낸다. 그림 4는 300r/min의 센서리스 정속 운전 조건에서 추출된 고주파 전류의 크기와 실제 회전자 위치($\theta_r$), 추정된 회전자 위치($\hat{\theta}_r$)이다. 그림 5는 속도 지령을 500r/min에서 500r/min까지 변화시켰을 때의 실제 속도, 추정 속도와 실제 회전자 위치, 추정된 회전자 위치를 나타내고 있다.

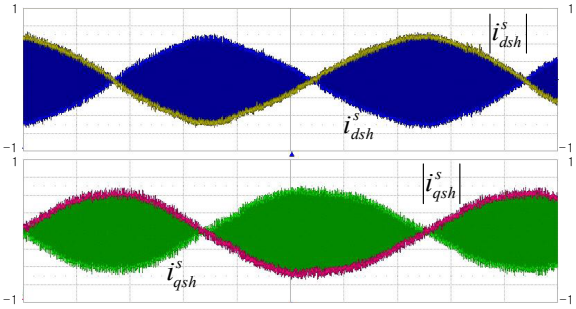


그림 3 추출된 고주파 전류
Fig. 3 Extracted high frequency currents

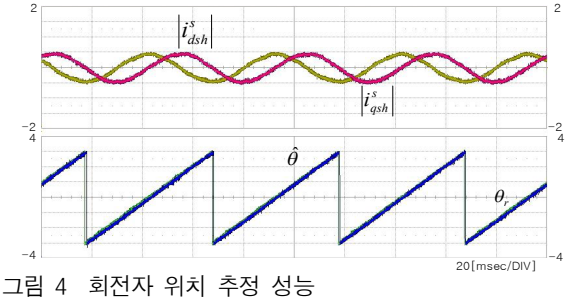


그림 4 회전자 위치 추정 성능
Fig. 4 Rotor position estimation performance

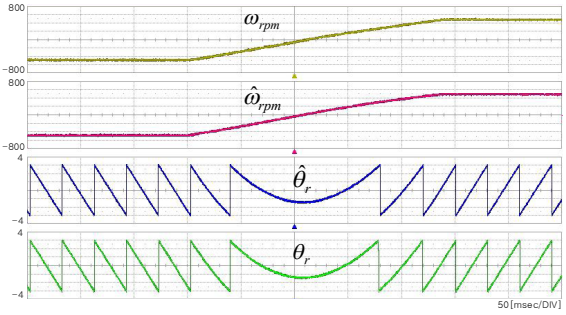


그림 5 속도 제어 성능
Fig. 5 Speed control performance

## 5. 결 론

본 논문에서는 스위칭 주파수의 구형파 전압 주입을 이용한 IPMSM의 센서리스 제어 기법에서 개선된 신호처리 기법을 제안하였다. 제안된 방법은 기본파 전류와 고주파 전류의 추출에 필요한 필터를 간단하게 구현하여 시지연을 줄일 수 있어 이로 인해 센서리스 제어 동특성을 개선할 수 있다. 제안한 기법을 실제 IPMSM 구동 시스템에 적용하여 그 타당성을 검증하였다.

## 참고 문헌


[1] 김상훈, *DC, AC, BLDC 모터 제어*, 복두출판사, 2010.

[2] 윤영두, "구형파 전압 주입을 이용한 교류 전동기의 센서리스 제어에 관한 연구", 서울대학교 공학박사 학위논문,2010.

[3] S. M .Kim, J. I. Ha and S. K. Sul, "PWM switching frequency signal injection sensorless method in IPMSM," *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol.48, No.5, pp. 1576 1587, Sept./Oct., 2012.