

# 간단한 IPMSM의 센서리스 회전자 초기 위치 추정 기법

임준혁, 김상일, 김래영<sup>†</sup>  
한양대학교

## An Simplified Method for Initial Rotor Position Estimation in IPMSM Sensorless Control

Jun Hyuk Im, Sang Il Kim, Rae Young Kim<sup>†</sup>  
Hanyang University

### ABSTRACT

본 논문에서는 PWM 스위칭 주파수 신호 주입 센서리스 제어와 전압 펄스 인가 방법을 혼합한 회전자의 초기 위치 추정 기법을 제안하였다. d축 전류제어기 출력에 PWM 스위칭 주파수의 펄스 전압 신호를 주입하여 회전자의 위치를 추정하고, 추정된 위치에 해당하는 전압 벡터를 인가하여 자기 포화에 따른 인덕턴스의 차이를 이용함으로써, 회전자 영구자석의 극성을 판별하였다. 실험을 통하여 제안된 기법의 타당성을 검증하였다.

### 1. 서론

매입형 영구자석 동기 전동기(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor, IPMSM)는 출력 밀도가 크고, 효율, 토크 대 관성 비 그리고 신뢰성이 높기 때문에 많은 산업 분야에서 사용되고 있다.<sup>[1]</sup>

근래에는 시스템의 경제성, 소형화, 센서의 신뢰성 등의 문제 때문에, IPMSM의 제어 시 구동 시스템에서 위치/속도 센서(레졸버, 엔코더, 홀센서 등)를 사용하지 않는 센서리스(Sensorless) 제어에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 최근에 주입 신호의 주파수를 스위칭 주파수 대역까지 높여 소음 저감에 유리한 PWM (Pulse width Modulation) 스위칭 주파수 신호 주입을 이용한 센서리스 제어 기법이 제안되었다.<sup>[2]</sup> 그러나 센서리스 제어 시에도 IPMSM을 기동시키기 위해서는 회전자의 초기 위치 정보가 필요하다. 초기 위치 정보를 잘못 추정할 경우, 기동에 실패하거나 전동기가 역방향으로 회전하여 시스템에 손상을 줄 수 있다.

초기 위치 추정 방법으로는 크게 고주파 신호 주입법과 전압 펄스를 이용한 방법이 제안되어 왔다. 고주파 신호 주입법은 높은 주파수의 신호를 주입하고 자기 이력 현상(Hysteresis)에 의해 주입된 신호의 왜곡을 이용하여 초기 위치를 추정한다.<sup>[3]</sup> 하지만 이 기법은 주입한 신호를 검출하기 위한 디지털 필터 등의 구현으로 복잡한 신호 처리를 요구한다. 전압 펄스를 이용한 기법은 고정자 자속 포화현상을 이용하여 전압 펄스에 대한 전류의 변화를 비교함으로써 회전자의 초기 위치를 추정한다.<sup>[4]</sup> 전압 펄스를 이용한 기법은 회전자의 위치 오차가 큰 문제가 있다.

본 논문에서는 PWM 스위칭 주파수 신호 주입과 전압 벡터를 이용한 회전자 초기 위치 추정 기법을 제안한다. 우선,

PWM 스위칭 주파수 신호를 주입하여 회전자의 위치를 추정할 다음, 이에 해당하는 전압 벡터를 인가하여 영구자석의 극성을 판별한다. 제안된 기법은 실험을 통하여 타당성을 검증하였다.

### 2. 회전자 위치 추정 기법<sup>[2]</sup>

d축 전류제어기 출력에 PWM 스위칭 주파수의 펄스 전압을 인가한 경우, 동기좌표계에서의 고주파 전류( $i_{dqs}^*$ )는 식(1)과 같다.

$$\begin{bmatrix} i_{ds}^* \\ i_{qs}^* \end{bmatrix} = 2T_{samp} \cdot V_{\in j} \begin{bmatrix} \cos^2 \Delta \theta_r + \frac{\sin^2 \Delta \theta_r}{L_q} \\ \frac{1}{2} \left( \frac{1}{L_d} - \frac{1}{L_q} \right) \sin 2 \Delta \theta_r \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서,  $T_{samp}$ 는 샘플링 주기,  $V_{\in j}$ 는 주입한 전압의 크기,  $L_{d,q}$ 는 d q축 인덕턴스,  $\Delta \theta_r$ 는 위치 오차를 나타낸다. 위치 오차( $\Delta \theta_r$ )가 작다고 가정하고 식(1)의 q축 전류 성분을 정리하면, 위치 오차를 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

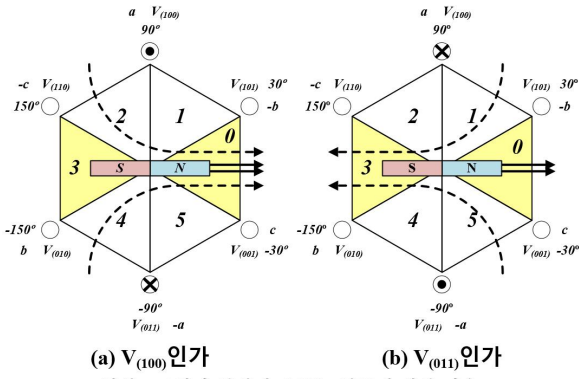
$$\Delta \theta_r = \frac{1}{K} \cdot i_{qs}^* \quad (\text{여기서, } K = 2T_{samp} \cdot V_{\in j} \cdot \frac{1}{2} \left( \frac{1}{L_d} - \frac{1}{L_q} \right)) \quad (2)$$

회전자의 위치는 식(2)를 이용하여 위치/속도 관측기로부터 추정할 수 있다. 그러나 이 기법은 회전자의 위치를 추정할 때, d축과 d축을 구별하지 못한다. 따라서 추가적으로 회전자 영구자석의 극성을 판별하는 기법이 필요하다.

### 3. 회전자 영구자석 극성 판별 기법

본 논문에서는 간단한 전압 벡터를 인가하여 고정자 자속의 포화현상을 유발시키고, 이를 이용한 회전자 영구자석 극성 판별 기법을 제안한다. 고정자 전류와 자석에 의한 합성 자속은 자석의 방향에 따라 포화정도가 달라지므로 d축과 d축의 인덕턴스가 서로 다르게 나타난다.<sup>[4]</sup>

그림 1과 같이, 미리 정의한 0섹터에 회전자의 d축이 위치한다면, 0섹터 전압 벡터( $V_{(100)}$ )와 반대쪽 3섹터 전압 벡터( $V_{(011)}$ )의 두 전압 벡터를 인가하였을 때 측정된 전류의 최대치가 큰 쪽에 회전자 영구자석의 N극이 위치함을 알 수 있다.



(a)  $V_{(100)}$ 인가 (b)  $V_{(011)}$ 인가

점선: 고정자 권선에 흐르는 전류에 의한 자속  
실선: 회전자 영구자속에 의한 자속

그림 1 회전자 영구자석 극성 판별  
Fig. 1 Rotor Permanent Magnet Polarity Detection

제안한 초기 기동 기법은 아래와 같은 절차를 따른다.

- 1) 고주파 주입법을 통하여 회전자 위치( $\theta_r$ )를 찾는다.
- 2) 2개의 전압 벡터를 통하여 회전자 d축/ q축을 판별한다.
  - a)  $\hat{\theta}_r$ 가 포함된 섹터의 전압 벡터를 인가하여 해당 상전류( $I_{ph1}$ )를 최대치를 측정한다.
  - b)  $\hat{\theta}_r + 180^\circ$ 가 포함된 섹터의 전압 벡터를 인가하여, 해당 상전류( $I_{ph2}$ )를 최대치를 측정한다.
  - c)  $|I_{ph1}| > |I_{ph2}|$ 이면, 1)에서 추정된  $\hat{\theta}_r$ 로 기동한다.
  - d)  $|I_{ph1}| < |I_{ph2}|$ 이면,  $\hat{\theta}_r = \hat{\theta}_r + 180^\circ$ 로 기동한다.

#### 4. 실험 결과

제안한 회전자의 초기 위치 추정기법을 실험을 통하여 그 타당성을 검증하였다. 제어기는 TMS320F28335를 이용하였으며, 스위치 주파수는 5[kHz], 전류 제어 주기는 100[usec], 속도 제어 주기는 1[msec]이다. 회전자 위치 추정을 위한 고주파 주입 전압은 20[V], 회전자 영구자석 자극 판별을 위한 펄스 주입 전압은 80[V]이다.

그림 2의 경우,  $|I_{ph1}| > |I_{ph2}|$ 인 경우이므로 고주파 주입법으로 추정된 회전자 위치에 오차가 없으며, 따라서 회전자의 위치 보상없이 기동한다.

그림 3의 경우,  $|I_{ph1}| < |I_{ph2}|$ 인 경우이므로 고주파 주입법으로 추정된 회전자 위치가 실제 회전자 위치와  $180^\circ$ 차이가 있다. 따라서 추정된 회전자 위치( $\hat{\theta}_r$ )에  $+180^\circ$ 를 보상하여 기동하며, 이에 따라 초기부터 회전자 위치를 잘 추정하고 있다.

#### 5. 결론

본 논문에서는 PWM 스위칭 주파수 신호 주입 센서리스 제어와 전압 펄스 인가 기법을 혼합한 회전자의 초기 위치 추정 기법을 제안하였다. 이 기법은 기존의 전압 펄스를 이용한 기법보다 정확하게 회전자의 위치를 추정하며, 기존의 고주파 신호 주입법보다 간단한 알고리즘으로 회전자의 영구자석 극성을 판별한다. 제안한 기법을 실제 IPMSM 구동 시스템에 적용하여 타당성을 검증하였다.

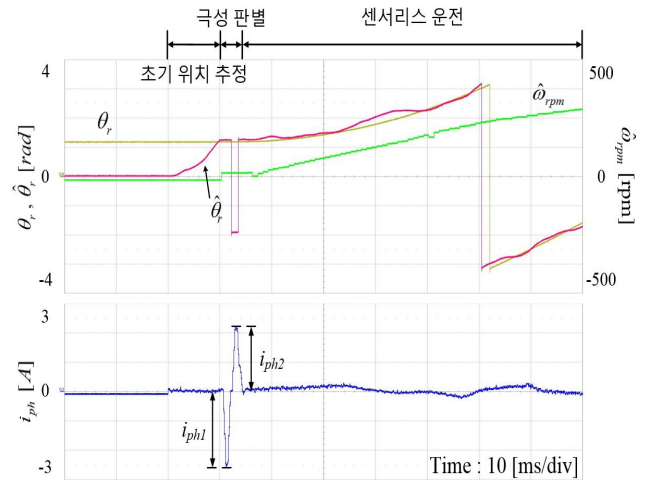


그림 2 초기 위치 추정 오차가 없는 경우의 기동  
Fig. 2 Initial operation without error of rotor

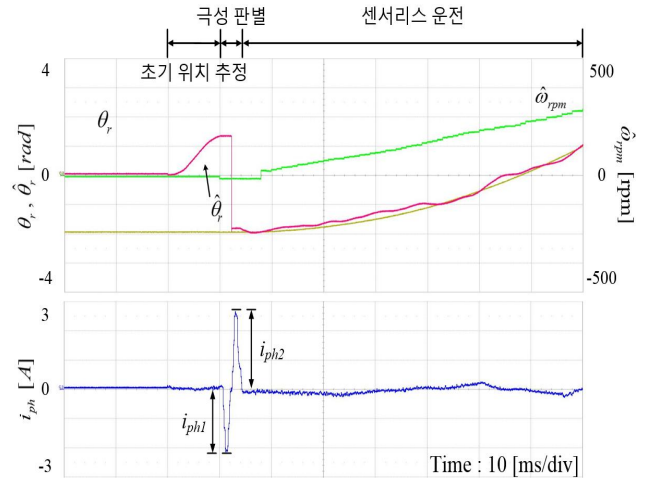


그림 3 초기 위치 추정에 180도 위치 오차가 있는 경우의 기동  
Fig. 3 Initial operation with error of rotor

#### 참고 문헌

- [1] L. Youndon and Z. Hao, "Sensorless Control of Permanent Magnet Synchronous Motor - A Survey," in Proc. IEEE VPPC, 2008, pp. 1-8
- [2] S. Kim, J. I. Ha, and S. K. Sul, "PWM Switching Frequency Signal Injection Sensorless Method in IPMSM," IEEE Trans. on Ind. Appl., vol. 48, no. 5, SEP/OCT. 2012
- [3] Jung Ik Ha, Kozo Ide, Toshihira Sawa, Seung Ki Sul, "Sensorless Rotor Position Estimation of an Interior Permanent Magnet Motor from Initial States", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 39, No. 3, pp. 761-767, 2003.
- [4] S. Ostlund and M. Brokemper, "Sensorless Rotor Position Detection from Zero to Rated Speed for an Integrated PM Synchronous Motor Drive"