

# 철도차량용 매입형 영구자석 동기전동기의 저속영역 센서리스 제어

강병규\*, 정신명\*\*, 이교범\*  
아주대학교\*, 한국철도기술연구원\*\*

## A Sensorless Control at Low Speed of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor for Railway Traction Motors

Byeong Gyu Kang\*, Shin Myung Jeong\*\*, Kyo Beum Lee\*  
Ajou University\*, Korea Railroad Research Institute\*\*

### ABSTRACT

본 논문에서는 철도차량용 매입형 영구자석 동기전동기의 저속영역에서 구동을 위해 센서리스 제어 기법을 적용하였다. 저속영역에서 센서리스 제어는 회전하는 전동기에 연속적인 고주파 신호를 인가하고 그 신호에 대한 응답을 이용한다. 매입형 영구자석 동기전동기의 회전자 인덕턴스 변화와 자기적 돌극성을 이용하므로 특정 전동기에 대해 우수한 성능을 나타낸다. 따라서 본 논문에서는 동기좌표계 d축 전압에 정현파 신호와 구형파 신호를 주입하여 두 방식에 대한 결과를 시뮬레이션을 통해 분석하였다.

### 1. 서론

매입형 영구자석 동기전동기는 회전자의 위치 정보를 통해 벡터제어를 할 수 있다. 전동기에 회전자 위치 정보를 알기 위해 위치 검출 센서가 사용되고 있지만 위치검출 센서를 취부하기 위해 추가적인 공간이 필요하여 부피가 증가하고, 센서의 장착으로 가격이 증가한다. 이러한 단점들을 개선하기 위해 센서리스 제어에 관한 연구가 지속적으로 진행되어 왔다.

고주파 주입 방법은 저속영역에서 좋은 특성을 가진다. 다양한 신호 주입 방법이 있지만 동기좌표계 d축에 고주파 전압을 주입하는 경우, 동특성이 좋으며, 부하 변동에 따른 주입된 신호 영향이 적게 미친다.<sup>[1]</sup> 고주파 주입 기반으로 전동기에서 추출된 전류는 기본파 성분과 주입된 고주파 성분으로 구성된다. 기본파 성분의 전류는 저역통과필터나 노치 필터를 통해 추출되고, 전동기의 토크 및 자속 제어를 위해 전류 제어기의 피드백으로 사용된다. 고주파 성분의 전류는 대역 통과 필터를 통해 추출되고, 신호처리 및 위치 상태 필터에서 사용된다.

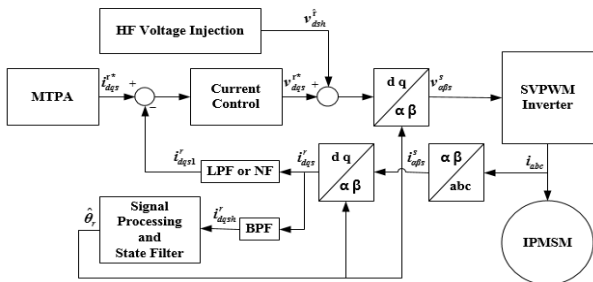


그림 1 전압 주입 방법을 이용한 블록도

Fig. 1 Block diagram of a voltage injection method

본 논문에서는 그림 1과 같이 동기 좌표계 d축에 정현파 전압 주입 시 신호처리 방법과 구형파 전압 주입 시 신호처리 방법 두 가지 기법을 통해 비교 분석하였다.

### 2. 고주파 주입 전압 모델

#### 2.1 동기 좌표계 d축에 정현파 주입 전압 모델

위상각 오차 성분이 충분히 작다고 가정 할 때, 동기 좌표계 d축에 정현파 전압 주입은 다음 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_{ds}^r = V_h \cos \omega_h t, \quad v_{qs}^r = 0, \quad \tilde{\theta}_r = \theta_r - \hat{\theta}_r \approx 0. \quad (1)$$

고주파 주입된 전류와 전압 사이의 관계는 식 (2)를 통해 나타낼 수 있다. 임피던스는 주입된 고주파 전압의 주파수가 충분히 높아 고정자 저항에 의한 전압 강하가 상대적으로 작다고 볼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} v_{dsh}^r \\ v_{qsh}^r \end{bmatrix} = [Z^r] \begin{bmatrix} i_{dsh}^r \\ i_{qsh}^r \end{bmatrix} = [Z^r] [R(\theta_r)] \begin{bmatrix} i_{ash}^s \\ i_{bsh}^s \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$[Z^r] \approx \begin{bmatrix} L_{dh}^r \cdot s & 0 \\ 0 & L_{qh}^r \cdot s \end{bmatrix}$$

정지 좌표계 전류에 대하여 추정된 동기 좌표계에 d축 전압을 주입하여 정리하면 식 (3)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} i_{ash}^s \\ i_{bsh}^s \end{bmatrix} = [R(\theta_r)]^{-1} [Z^r]^{-1} \begin{bmatrix} v_{dsh}^r \\ v_{qsh}^r \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$= [R(\theta_r)]^{-1} [Z^r]^{-1} [R(\tilde{\theta}_r)] \begin{bmatrix} v_{dsh}^r \\ v_{qsh}^r \end{bmatrix}$$

고주파 전압 주입에 대한 전류는 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} i_{ash}^s \\ i_{bsh}^s \end{bmatrix} \approx \frac{V_h \sin \omega_h t}{\omega_h} \begin{bmatrix} \frac{\cos(\theta_r) \cos(\tilde{\theta}_r) + \sin(\theta_r) \sin(\tilde{\theta}_r)}{L_{dh}^r} + \frac{\sin(\theta_r) \sin(\tilde{\theta}_r)}{L_{qh}^r} \\ \frac{\sin(\theta_r) \cos(\tilde{\theta}_r) - \cos(\theta_r) \sin(\tilde{\theta}_r)}{L_{dh}^r} - \frac{\cos(\theta_r) \sin(\tilde{\theta}_r)}{L_{qh}^r} \end{bmatrix}$$

$$\approx \frac{V_h \sin \omega_h t}{\omega_h L_{dh}^r} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) \\ \sin(\theta_r) \end{bmatrix}, \quad \theta_{rCal} = \text{atan2} \left( \frac{i_{bsh}^s}{\sin \omega_h t}, \frac{i_{ash}^s}{\sin \omega_h t} \right) \quad (4)$$

식 (4)는 역탄젠트 함수를 이용한 회전자 위치 성분을 추출하였다. 그러나 분모의 주입된 주파수 성분으로 인해 영 값 또는 매우 작은 값인 경우 실제적인 구현은 매우 어렵다. 그래서 회전자 위치 정보를 추출하기 위해서는 고주파 주입된 주파수

성분을 제거해야 한다.<sup>[2]</sup>

## 2.2 동기 좌표계 d축에 구형파 주입 전압 모델

구형파 주입에 대한 전압 식은 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{v}_{ds}^r = \begin{cases} V_h & (\text{half duty}) \\ -V_h & (\text{otherwise}) \end{cases}; \hat{v}_{qs}^r = 0. \quad (5)$$

동기 좌표계 d축에 구형파 주입 전압에 대한 모델은 정현파 주입 전압 모델과 같다. 식 (6)을 통해 구형파 주입 방법과 정현파 주입 방법을 비교 했을 때 주입된 주파수 성분이 제거된 것을 알 수 있고, 주입된 주파수 성분으로 인해 생기는 단점이 제거 되었다.

$$\begin{bmatrix} \hat{i}_{\alpha sh}^s \\ \hat{i}_{\beta sh}^s \end{bmatrix} \approx \frac{V_h T_s}{\omega_h} \begin{bmatrix} \frac{\cos(\theta_r)\cos(\tilde{\theta}_r) + \sin(\theta_r)\sin(\tilde{\theta}_r)}{L_{dh}^r} + \frac{\sin(\theta_r)\sin(\tilde{\theta}_r)}{L_{qh}^r} \\ \frac{\sin(\theta_r)\cos(\tilde{\theta}_r) - \cos(\theta_r)\sin(\tilde{\theta}_r)}{L_{dh}^r} - \frac{\cos(\theta_r)\sin(\tilde{\theta}_r)}{L_{qh}^r} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\approx \frac{V_h T_s}{\omega_h L_{dh}^r} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) \\ \sin(\theta_r) \end{bmatrix}$$

## 3. 고주파 주입에 대한 신호 처리 기법

### 3.1 정현파 주입 시 신호 처리 방법

식 (4)를 통해 역탄젠트 함수를 이용한 회전자 위치 정보는 실제적인 구현에 어려움이 있어 추가적인 신호 처리 기법이 필요하다. 대역 통과 필터를 통해 추출된 동기좌표계 q축 전류는 위상각 오차 성분과 주입된 고주파 성분을 분리하기 위해  $\sin\omega_h t$ 를 곱한다. 위상각 오차 성분만을 저역 통과 필터를 사용하면 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{\varepsilon}^r(\tilde{\theta}_r) \equiv LPF(\hat{i}_{qsh}^r \sin\omega_h t) \approx \frac{V_h L_{diff}^r}{4\omega_h L_{dh}^r L_{qh}^r} \tilde{\theta}_r \equiv K_{\tilde{\theta}_r}^r \tilde{\theta}_r. \quad (7)$$

### 3.2 구형파 주입 시 신호 처리 방법

매 샘플링 지점에서 동기 좌표계 d, q축 전류는 일정하고 기본파 전류 성분을 구하기 위해 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다. 각 샘플링 시점에서의 전류는 이전 제어주기 전류와 현재 제어주기 전류의 합의 2를 나누면 필터 없이 기본파 전류 성분을 구할 수 있고, 고주파 성분을 가진 동기좌표계 q축 전류는 고주파 전압의 부호를 고려하여 위상각 오차 성분을 구할 수 있다.<sup>[3]</sup>

$$\hat{i}_{qsh}^r[z] = \frac{\hat{i}_{qs}^r[z] - \hat{i}_{qs}^r[z^{-1}]}{2}, \quad |\hat{i}_{qsh}^r| = \hat{i}_{qsh}^r \times \text{sign}(\hat{v}_{dsh}^r) \quad (8)$$

$$\hat{\varepsilon}^r(\tilde{\theta}_r) \equiv \frac{|\hat{i}_{dsh}^r|}{V_h \cdot T_s / 2} \left( \frac{L_{dh}^r L_{qh}^r}{L_{qh}^r - L_{dh}^r} \right)$$

## 4. 시뮬레이션

철도차량용 매입형 영구자석 동기전동기의 파라미터는 표 1과 같다. 철도차량용 견인전동기는 토크제어 기반으로 구동되어 기본 50% (420N·m)조건 이상의 토크 부하 특성을 가진다. MTPA를 적용하여 전류의 입력은 50%(420N·m) 부하에서 75%(630N·m), 100%(840N·m) 부하로 가변되도록 토크 출력을 적용하였다. 10rpm 저속영역에서 고주파 주입을 이용한 센서리스 결과를 확인하기 위해 그림 2 (a)는 정현파 주입 시뮬레이션과 그림 2 (b)는 구형파 주입 시뮬레이션 각각의 결과를 확

인하였다.

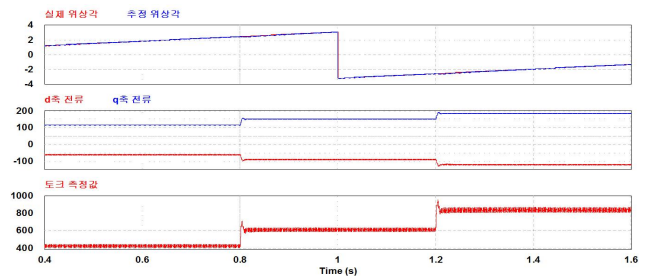
## 5. 결론

본 논문에서는 고주파 전압 주입을 통해 철도차량용 매입형 영구자석 동기전동기의 저속영역에서 센서리스 제어를 구현하였다. 정현파 주입 방법과 구형파 주입 방법에 대한 추정 위상각 성분을 추출하여, 토크 변동 시 시뮬레이션 결과를 통해 구형파 주입 성능이 토크 리플, 속응성에서 좋은 특성이 나타나는 것을 확인하였다.

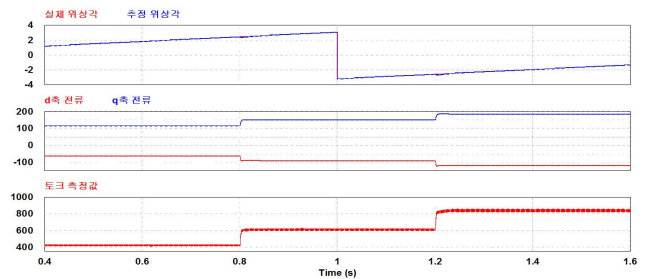
표 1 매입형 영구자석 동기전동기 파라미터

Table 1 IPMSM parameters

정격출력	210 kW	정격토크	840 Nm
정격속도	2400 rpm	정격전압	1100 V
정격전류	220 A	쇄교자속	0.5968 Wb
관성모멘트	0.00179 kgm <sup>2</sup>	극수	6
d축 인덕턴스	1.997 mH	고정자 저항	39.224 mΩ
q축 인덕턴스	5.499 mH	DC Link전압	1500 V



(a) 정현파 전압 주입



(b) 구형파 전압 주입

그림 2 시뮬레이션 결과

Fig. 2 Simulation Results

## 참고 문헌

- [1] T. M. Yoon, J. S. Lee and K. B. Lee, "Rotor Position Estimation Method of IPMSM using HF Signal Injection and Sliding Mode Controller," IEEJ Trans. on Electrical and Electronic Engineering, pp. 56-63, June 2014.
- [2] Y. D. Yoon, S. K. Sul, S. Morimoto and K. Idle, "High Bandwidth Sensorless Algorithm for AC Machines Based on Square Wave Type Voltage Injection," IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 47, No. 3, pp. 1361-1370, Mar. 2011.
- [3] N. C. Park and S. H. Kim, "Simple Sensorless Algorithm for Interior Permanent Magnet Synchronous Motors Based on High Frequency Voltage Injection Methode," IET Electr. Power Appl. Vol. 8, Iss. 2, pp.