

# 모델 기반 센서리스 기법을 적용한 3-선트 전류 검출 인버터

홍성우\*, 김도윤\*, 원일권\*, 장영희\*, 추경민\*, 김영렬\*\*, 원충연\*  
 성균관대학교\*, 안양대학교\*\*

## Three-shunt sensing 3-phase inveter applying model based sensorless method

Sung Woo Hong\*, Do Yun Kim\*, Il Kuen Won\*, Young Hee Jang\*, Kyoung min Choo\*,  
 Young Real Kim\*\*, Chung yuen Won\*  
 Sungkyunkwan University\*, Anyang University\*\*

### ABSTRACT

매입형 영구자석 전동기에 가격과 부피를 줄이기 위해 3개의 선트 저항을 이용하는 인버터를 사용하였고 회전자 위치센서를 제거하기 위해 모델기반 센서리스 기법을 사용하였다. TSSI (Three Shunt current Sensing Inverter)의 문제점인 특정 전압 이상에서는 전류를 검출할 수 없는 영역이 생기게 된다. 이를 예측전류를 사용하여 전류복원 불가영역을 개선하였다.

### 1. 서론

매입형 영구자석 전동기 IPMSM(Interior Permanent Magnet synchronous motor)는 구조적인 특성상 마그네틱 토크와 릴럭턴스 토크를 사용하기 때문에 단위체적당 토크출력이 높고 넓은 속도영역 특성을 갖고 있다. 모델기반 센서리스 제어 방식은 크게 신호 주입 방식과 모델 기반 방식으로 분류 할 수 있다. 그 중 모델기반 방식은 극 저속과 정지 하였을 때 사용하지 못하는 어려움이 있지만 세탁기, 가전 제품 등에서는 극 저속 운전을 하지 않기 때문에 모델 기반 센서리스 제어는 다양한 산업 분야에서 사용되고 있다.<sup>[1]</sup> 이러한 모터에서 부피와 가격을 감소시키기 위해 전류센서를 사용하지 않고 3 선트 전류 검출과 모델기반의 센서리스 기법을 적용하여 시뮬레이션 및 실험을 통하여 정격속도에서 토크와 전류파형을 확인하였다.

### 2. 3-선트 전류검출 인버터

#### 2.1 선트저항을 이용한 전류 측정 방법

선트저항을 통하여 전류가 흐르게 되면 전압이 선트 저항에 걸리게 되고 이 전압을 갖고 역으로 전류를 검출하게 된다. 3 선트를 이용한 전류검출 인버터에서는 하단스위치와 접지단 사이에 각각 선트저항을 설치하여 하단스위치가 켜질 때 마다 선트저항을 통하여 전류가 흐르게 되므로 전류를 검출 할 수 있다.

#### 2.1.2 3-선트전류 검출 인버터의 전류복원 불가 영역

IPMSM의 순시 토크를 제어하는 인버터에서는 3상의 전류를 측정하는 것이 필수적이다. 3선트 전류 검출 인버터에서 3상의 전류를 검출하기 위해선 첫 번째 조건으로 하단 스위치

상태와 두 번째 조건으로 전류를 측정할 수 있는 시간을 확보해야만 한다. 하단스위치가 두 개가 턴 온 된 상태에서 선트저항을 통하여 두상의 전류를 얻을 수 있고 나머지 한상의 전류는 키르히호프의 법칙으로 계산하여 검출 할 수 있다. 또한 하단 스위치가 두 개 이상 턴 온 되어 있는 시간이 전류를 측정하는데 걸리는 최소시간인  $T_{min}$ 보다는 커야만 한다.  $T_{min}$ 은 식 (1)과 같다.

$$T_{min} = T_{dead} + T_{set} + T_{ad} \quad (1)$$

여기서,  $T_{dead}$ 는 데드타임 시간,  $T_{set}$ 은 전류의 링잉에 의한 시간,  $T_{ad}$ 는 아날로그신호를 디지털로 변환하는 시간이다.<sup>[2]</sup>

이러한 조건들 때문에 전압이용률이 그림 1과 같이 제한되고  $T_{min}$ 에 따른 최대 MI(Modulation Index)값을 식 (2)와 같이 구할 수 있다.

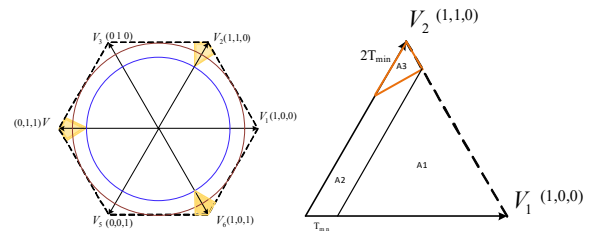


그림 1 3-선트 전류검출 인버터에서 전류 복원 불가 영역  
 Fig. 1 Immeasurable areas in TSSI

$$MI_{(max)} = \frac{4}{3} \left(1 - 2 \frac{T_{min}}{T_s}\right) \quad (2)$$

#### 2.1.3 전류복원 불가 영역에서 예측전류 기법 적용

MI값이 충분히 커져 전류 복원 불가영역에 들어가게 되면 선트저항으로 전류를 측정 할 수 없게 된다. 이럴 때 전 샘플링에서의 전류를 이용하여 다음 샘플링의 전류를 예측 하여 복원불가 영역을 개선시킬 수 있다. AC모터 전압 방정식에서 이항하여 예측전류 식 (3)을 얻을 수 있다.

$$i^p(k+1) = \left(1 - \frac{RT_s}{L}\right)i(k) + \frac{T_s}{L}(v^*(k) - e(k)) \quad (3)$$

## 2.2 모델기반 센서리스

매입형 영구자석 전동기의 회전자 기준 좌표계를 추정 회전자 기준 고정자 전류를 그림 2에서 회전자 기준 좌표계와 추정된 좌표계 사이에는  $\theta_{err}$ 가 생기게 된다.

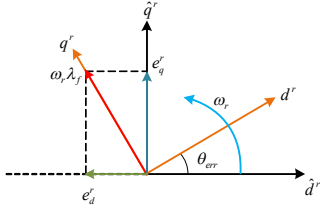


그림 2 위치 추정 오차에 의한 역기전력 효과  
Fig. 2 Effect of back-emf with position estimation error

$$e_{dq}^r = \begin{bmatrix} e_d^r \\ e_q^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_r \lambda_f \sin \theta_{err} \\ -\omega_r \lambda_f \cos \theta_{err} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$q$ 축 방향의 실제 역기전력이 추정된 좌표계로 투영되면서  $d$ 축 역기전력과  $q$ 축 역기전력으로 나뉘게 되어 식 (5) 이용하여  $\theta_{err}$ 를 구할 수 있다. 또한 이를 통하여 추정 회전자 각속도 추정된 회전자 위치를 알 수 있다. 매입형 영구자석 전동기의 회전자 기준 좌표계를 추정 회전자 기준 고정자 전류를 상태변수로 정하여 IPMSM을 상태 방정식으로 나타내었고 관측기를 구성하여 식 (6)으로 표현 할 수 있다.[3]

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{i}}_{ds}^r \\ \dot{\hat{i}}_{qs}^r \\ \dot{\hat{e}}_d^r \\ \dot{\hat{e}}_q^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_d} & \frac{\omega_r L_q}{L_d} & \frac{1}{L_d} & 0 \\ -\frac{R_s}{L_q} & \frac{\omega_r L_d}{L_q} & 0 & \frac{1}{L_q} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_{ds}^r \\ \hat{i}_{qs}^r \\ \hat{e}_d^r \\ \hat{e}_q^r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{V_{ds}^r}{L_d} & 0 \\ 0 & \frac{V_{qs}^r}{L_q} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} + G \begin{bmatrix} \hat{i}_{ds}^r - \hat{i}_{ds}^r \\ \hat{i}_{qs}^r - \hat{i}_{qs}^r \end{bmatrix} \quad (6)$$

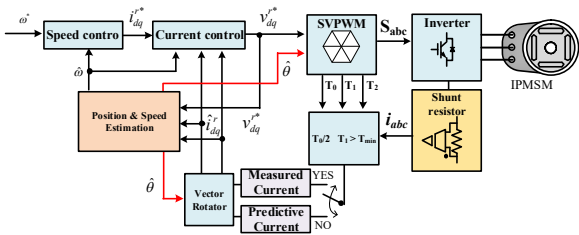


그림 3 3선트전류검출 인버터에 제안된 센서리스 제어블록도  
Fig. 3 Block diagram of proposed sensorless control in TSSI

## 3. 시뮬레이션

표 1 시뮬레이션 파라미터  
Table 1 Parameter of simulation

직류 전압	48[V]	d축 인덕턴스	0.303[mH]
선트 저항	10[mΩ]	q축 인덕턴스	0.907[mH]
스위칭 주파수	5[kHz]	고정자 저항	0.1[Ω]
$T_{min}$	10[μs]	극수	8

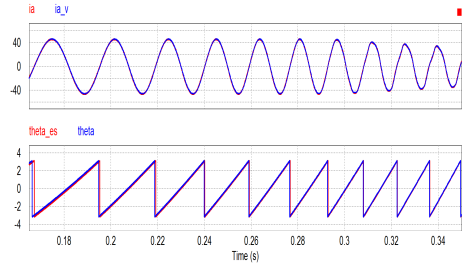


그림 4 역기전력 추정기해에 추정된 회전자 위치  
Fig. 4 Estimated position calculated by back-emf estimator

그림 4는 IPMSM을 제어하기 위해 기존의 TSSI에 모델기반 센서리스를 적용하여 회전자의 위치를 역기전력을 통해 계산하여 추정 각도가 실제 각도에 잘 추종하는 것을 확인하였다.

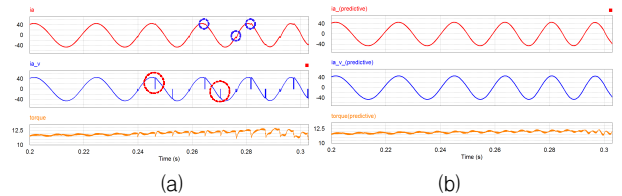


그림 5 (a) 3선트 전류 파형 시뮬레이션 결과  
(b) 제안된 3선트 전류 파형 시뮬레이션 결과  
Fig. 5 (a) Simulation waveforms of current of conventional 3-shunt  
(b) Simulation waveforms of current of proposed 3-shunt

그림 5에서 (a)와 (b)는 모두 모델기반 센서리스 제어를 하였다. 하지만 TSSI에서 MI이상에서 상전류 파형이 왜곡된다. 이를 예측 전류 기법으로 개선하였고 그 결과 토크 리플이 감소한 것을 확인 할 수 있었다.

## 3. 결론

기존의 TSSI에 문제점인 특정 MI이상에서 전류를 검출할 수 없었고 이를 예측전류기법을 적용하여 전류왜곡을 개선시켰다. 또한 모델기반 센서리스 제어를 이용하여 IPMSM의 회전자의 위치를 추정하여 속도 제어를 하였다.

## 참고 문헌

- [1] K.W. Lee, J. Ha "Evaluation of Back-EMF Estimators for Sensorless Control of Permanent Magnet Synchronous Motors", Journal of Power Electronics, Vol. 12, No. 4, pp. 605\*615, 2012, Jul.
- [2] Jose Rodriguez, Jorge Pontt, César A. Silva, Pablo Correa, Pablo Lezana, Patricio Cortes, "Predictive Current Control of a Voltage Source Inverter," IEEE Trans., Vol. 54, No. 1, Feb. 2007
- [3] F. Blaabjerg, J. K. pedersen, "An Ideal PWM VSI Inverter Using Only One Current Sensor In The Dc link", Power Electronics and Variable Speed Drives, pp. 458 464, 1994, Oct.