

# 고장허용 운전을 위한 영구자석동기전동기의 전류센서리스 알고리즘

임정우 윤동관 조영훈  
 건국대학교 전기기계 및 전력전자연구실

## Current Sensorless Algorithm of PMSM Drive for Current Fault Tolerant

J.W. Lim D.K Yoon Y.H. Cho  
 Power electronics laboratory, Konkuk Univ

### ABSTRACT

Motor drive has used in many industrial application. In this situation the motor performance reliability has been more and more important. Sensor fault is critical defect to motor performance especially current sensor. Therefore this paper is dealing with SPMSM current sensorless algorithm in Luenberger estimation method with only a phase current information for current sensor fault situation. And the algorithm is verified with experimental results.

### 1. 서론

영구자석동기전동기(PMSM)는 높은 효율, 출력밀도와 빠른 동특성을 갖기 때문에 순시 토크제어가 요구되는 고성능 전동기 구동분야에서 주로 사용되고 있다. 산업현장에 널리 사용되고 있는 이러한 모터의 고장은 큰 인명, 재산피해를 줄 수 있기 때문에 모터구동에 대한 신뢰성이 더욱 중요시 되고 있다. 모터를 정상적으로 구동하기 위해서는 3상에 흐르는 전류정보가 필수적이지만, 현대에는 원가절감의 목적으로 두 상만을 측정하는 모터드라이브가 개발되고 있다. 이러한 모터드라이브는 하나의 전류센서의 고장만으로도 모터성능에 지대한 영향을 미칠 수 있으며, 정상구동이 불가능하게 된다. 본 논문에서는 전류센서고장환경에서도 정상작동을 하기위한 모델링 기반 루엔버그형태(Luenberg type)의 전류센서리스 알고리즘을 제안하고 실험을 통해 제안한 알고리즘을 검증하였다.<sup>[1]</sup>

### 2. 표면 부착형 영구자석 동기 전동기(SPMSM)

SPMSM은 PMSM의 한 종류로 특히 고토크 저속운전에 유리하고, 고조파 영향이 작기 때문에 정밀형 전동기에 주로 사용된다. 본 논문에서 제안하는 알고리즘은 SPMSM을 기반으로 진행하였다.

#### 2.1 모델링

SPMSM은 d,q동기좌표계를 이용하여 모델링을 정의할 수 있다. 특히 각 d,q축은 같은 공극을 갖기 때문에  $L_d = L_q = L_s$ 로 정의하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a + sL_s & -\omega_e L_s \\ \omega_e L_s & R_a + sL_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega\psi \end{bmatrix} \quad (1)$$

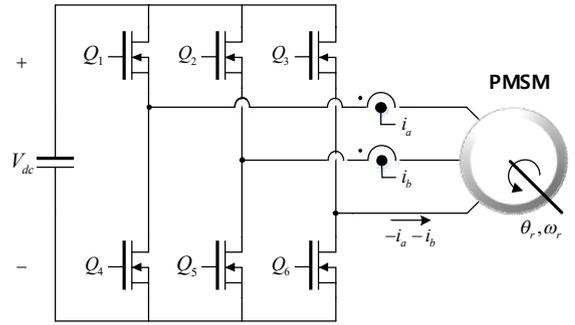


그림 1 영구자석 동기전동기와 모터드라이브 시스템  
 Fig. 1 PMSM and motor drive system

여기서  $v_d, v_q, i_d, i_q$ 는 모터에 인가되는 d,q축 전압과 전류이고(아래첨자가 축을 나타냄),  $R_a, L_s, \omega_e$ 는 동기좌표계에서의 고정자 저항과 인덕턴스 그리고  $\omega_e$ 는 극(pole)수를 고려한 전류의 전기각속도를 나타낸다.  $\omega\psi$ 는 역기전력 함수로, 모터의 기계적 회전속도  $\omega$ 와 역기전력 계수  $\psi$ 의 곱으로 나타낼 수 있다.

#### 2.2 모델링 기반 전류추정<sup>[1]</sup>

식(1)을 이용하여 고정자에 흐르는 전류  $i_d$ 와  $i_q$ 를 역계산하여 간단하게 추정이 가능하다. 아래 식(2)은 식(1)을  $i_d, i_q$ 로 정리한 식이다.

$$sL_s \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R_a & -\omega_e L_s \\ \omega_e L_s & R_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ \omega\psi \end{bmatrix} \quad (2)$$

식(2)를 전향 차분 방식(Forward difference or Forward Euler)을 이용하여 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$i_d(n+1) = i_d(n) + \frac{T_s}{L_s} \{v_d(n) + \omega_e(n)L_s i_q(n) - R_a i_d(n)\} \quad (3)$$

$$i_q(n+1) = i_q(n) + \frac{T_s}{L_s} \{v_q(n) - \omega(n)\psi - \omega_e(n)L_s i_d(n) - R_s i_q(n)\} \quad (4)$$

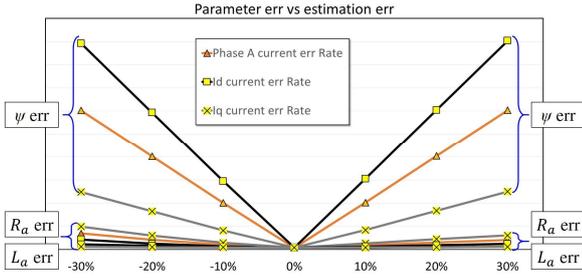


그림 2 제정수 오차에 따른 전류추정 오차율  
Fig. 2 Parameter err vs estimation err rate

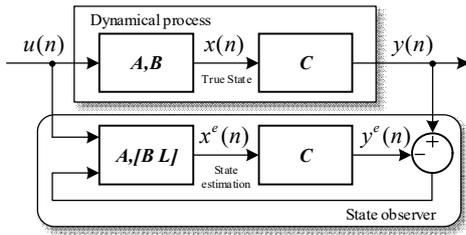


그림 3 루엔버거 관측기 블록다이어그램  
Fig. 3 Luenberger observer block diagram

이러한 개루프 형태(open loop type)의 전류추정 알고리즘은 비교적 간단하게 구현이 가능한 반면 방정식에 사용되는 제정수 오차에 매우 민감하기 때문에 실제 모터제원과 정확한 제정수를 요구한다. 하지만 식(3),(4)에 사용된 역기전력, 저항, 인덕턴스는 모두 시변함수이며, 열에 의해 변화하기 때문에 추정하는 전류에 오차가 발생하여 정확한 전류추정이 어렵다. ( $T_s$ : 샘플링 시간)

그림 2는 모의실험을 통해 제정수 오차에 따른 전류추정 오차율을 확인한 결과그래프로 역기전력 상수의 오차가 전류추정에 가장 큰 악영향을 미치는 것을 확인할 수 있다('x축' 제정수 오차율 'y축' 추정전류 오차율)

### 3. 제안하는 전류센서리스 알고리즘

#### 3.1 루엔버거 관측기(Luenberger observer)<sup>[2]</sup>

루엔버거 관측기는 출력행렬(Output Matrix)을 통해 원하는 상태정보를 간접적으로 추정하는 알고리즘으로 개루프 형태의 추정 알고리즘보다 빠른 동특성과 제정수 오차에 대한 낮은 민감도를 갖고 있다는 장점이 있다. 그림 3은 루엔버거 관측기 블록 다이어그램을 나타내고 있다.

$$x(n+1) = Ax^e(n) + Bu^e(n) + L(y(n) - Cx^e(n)) \quad (5)$$

#### 3.2 제안하는 전류센서리스 알고리즘

제안하는 관측기는 두 개의 상전류센서 중 한 개의 전류센서가 오작동을 일으킬 경우 정상 센서의 검출정보를 관측기의 궤환정보로 사용하는 알고리즘이다. 자세한 알고리즘 구성은 그림 4에 블록다이어그램으로 나타내었다. 그림 4에서 위치자 'e'는 추정한 정보를 나타내며  $sw_{ab}$ 는 전류센서 고장시 A상과 B상 전류센서 중 오작동 센서에 따라 알고리즘을 선택하는 역할을 한다. 또한  $\beta$ 블록은 위상 90°를 지연하는 알고리즘으로 정직좌표계  $\alpha\beta$ 를 출력한다. (제안하는 전류센서리스 알고리즘은 정확한 모터의 위치정보와 속도정보를 검출할 수 있다는 가정을 전제한다.)

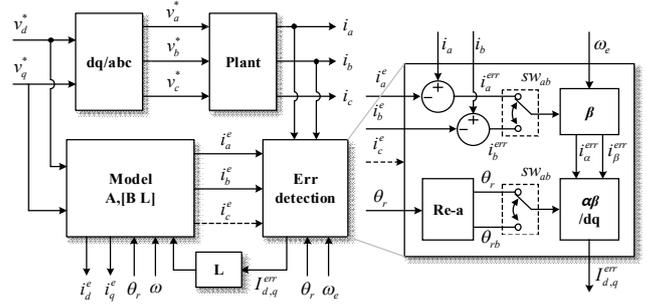


그림 4 제안하는 전류센서리스 알고리즘  
Fig. 4 Proposed current sensorless algorithm block diagram

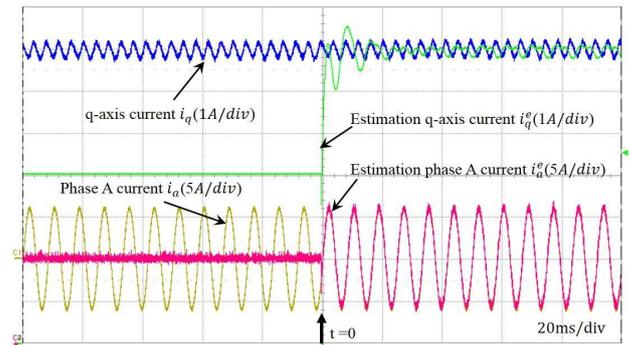


그림 5 제안하는 전류센서리스 알고리즘 실험결과  
Fig. 5 Proposed sensorless algorithm experiment result

### 3.3 실험결과

그림 5는 제안하는 알고리즘을 이용하여 실제 모터에 흐르는 전류를 추정한 결과파형으로 t=0일 때 전류추정알고리즘을 시작하였으며, 20msec이하에서 추정전류가 정상상태로 돌입하는 것을 확인하였다. 또한 추정한 q축 전류를 이용하여 복원한 상전류 역시 높은 정확성을 갖는 것을 확인하였다.

### 3. 결론

제안하는 전류센서리스 알고리즘은 추가적인 설비없이 하나의 상전류 정보만으로 모터에 흐르는 동기좌표계 전류를 높은 정확도로 추정하였으며, 모터의 내부 제정수 오차에서도 높은 신뢰성을 갖는 것을 확인하였다.

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.  
(No. 20174030201660)

이 논문은 2017년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임.  
(No.2017R1C1B2009425)

### 참고 문헌

- [1] Morimoto, Shigeo, Masayuki Sanada, and Yoji Takeda. "High performance current sensorless drive for PMSM and SynRM with only low resolution position sensor." IEEE Transactions on Industry Applications 39.3 (2003): 792-801.
- [2] Olarescu, N. V., et al. "Enhanced current sensorless drive system for PMSMS using two hall effect sensors for wide speed range." Optimization of Electrical and Electronic Equipment, 2008. OPTIM 2008. 11th International Conference on. IEEE, 2008.