

영구자석 동기전동기 확장형 칼만필터를 이용한 개방성 고장진단 기법

안성국 박병건 김래영 현동석
한양대학교

Fault Diagnosis for Open-Phase Faults of PMSM Drives Using EKF

Sung-Guk Ahn, Byoung-Gun Park, Rae-Young Kim, Dong-Seok Hyun
Hanyang University

Abstract

This paper proposes a novel diagnosis scheme using Extend Kalman Filter (EKF), especially, in subject to the open-phase faults of the inverter switches. The stator resistances of PMSM are estimated by the EKF in real time. The proposed diagnosis scheme is implemented without any extra devices. Moreover, since it uses a simple algorithm by analyzing only estimated stator resistances of each phase, the detection speed becomes fast. The feasibility of the proposed fault diagnosis scheme is proved by several simulation and experimental results.

1. 서론

최근, 영구자석 동기전동기(Permanent Magnet Synchronous Motor)는 높은 전력밀도, 고효율, 저렴한 유지 보수비용과 같은 많은 장점들로 인하여 가전제품, 전기자동차, 항공 및 군사분야와 같은 응용분야에서의 사용이 증가하고 있다. 그러므로 이러한 응용분야에서 구동 시스템의 고장에 대한 신뢰성 확보는 매우 중요하며 필수적인 요건으로 되고 있다[1].

본 논문에서는 인버터구동 시스템의 스위칭 소자에 개방성 고장이 발생할 경우 추가적인 장치나 비용 없이 빠른 고장 검출 및 확인하는 방법을 제안하고자 한다. 고정자 저항 변화를 추정하기 위해 확장형 칼만필터(EKF) 알고리즘을 사용했고, 그것을 실시간으로 추정한다.

제안된 고장진단 기법 시스템의 가능성과 우수성은 시뮬레이션과 실험을 통하여 검증하였다.

2. 영구자석 동기전동기 모델링

그림 1은 영구자석 동기전동기 구동 시스템의 등가회로를 보여준다. 각 상에 대한 시스템 방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다[2]. 전동기가 정상 운전시에는 한 샘플링 내에서 고정자 저항의 변화량이 0에 가깝기 때문에 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_j \\ R_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_j}{L_j} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_j \\ R_j \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \frac{1}{L_j} [v_j - e_j] \quad (1)$$

(j = a, b, c)

여기서 i_j 는 각각 상 전류이고, v_j 는 각각 상 전압을 나타내며 e_j 는 각 상의 역기전력이다. 또한, L_j 는 각 상의 인덕턴스, R_j 는 각 상의 저항을 나타낸다.

여기서, 상태방정식 A, B, C는 다음과 같다.

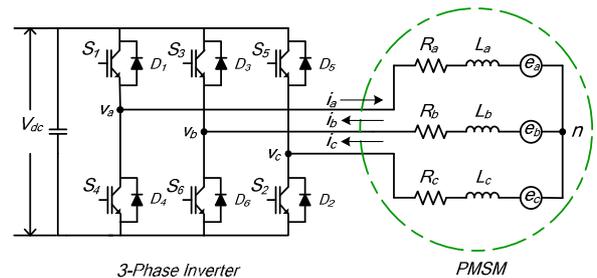


그림 1. 영구자석 동기전동기 등가회로

Fig. 1. The electrical equivalent circuit of PMSM drives

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R_j}{L_j} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 1 \\ L_j \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$C = [1 \quad 0]$$

3. 제안한 고장진단 방법

3.1 확장형 칼만필터(EKF)

확장형 칼만필터는 비선형 시스템에 적용 가능한 관측기로서 다양한 모델에 적용이 가능하고 적절한 모델 사용 시 최고의 성능을 가지며, 높은 Tracking 능력을 갖고 있다. 또한, PWM에 의한 전류리플, 모델링에서 발생하는 오차, 측정오차 등의 노이즈를 갖는 동적 시스템에 적합한 특성을 갖는다. 이러한 확장형 칼만필터 알고리즘으로 3상 고정자 저항을 실시간으로 각각 추정할 수 있다.

3.2 고장진단 기법

제안한 고장진단 기법은 고정자 저항을 확장형 칼만필터에 의해 추정하여 고장을 검출하는 부분과 회전자 위치에 따라 고정자 저항을 관측하여 고장위치를 알아내는 고장확인 부분으로 나눌 수 있다. 이와 같이 그림 2(a)와 (b)는 고장진단 기법의 흐름도이다. 영구자석 동기전동기 인버터 구동회로에서 스위치에 개방된 형태의 고장이 발생하였을 경우 확장형 칼만필터 알고리즘에 의해 추정된 고정자 저항이 갑자기 증가하는 특성을 분석함으로써 고장진단을 수행할 수 있다. 확장형 칼만필터 알고리즘에 의해 추정된 고정자 저항의 변화는 실시간으로 추정되며 표 1은 개방성 고장스위치와 공간전압 벡터의 스위칭에 관련한 추정된 고정자 저항 변화값을 나타낸다. 개방성 고장 시 스위치에 대한 공간전압 벡터 영향에 따라 변하는 고정자 저항값과 문턱저항 값을 비교함으로써 고장발생 여부를 확인할 수 있다. 따라서 공간전압 벡터 3개의 개방성 고장 스위치와

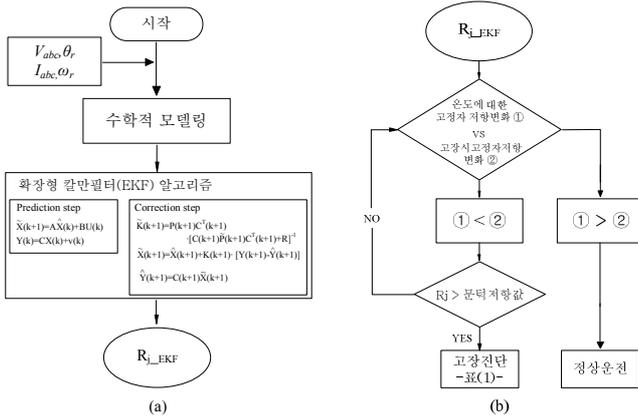


그림 2. 확장형 칼만필터를 이용한 고장진단 흐름도
Fig. 2. Flowchart for fault diagnosis using EKF

표 1. 공간전압 벡터에 대한 고장자 저항 변화

Table 1. Resistance variation for space vector modulation

	V1 (100)	V2 (110)	V3 (010)	V4 (011)	V5 (001)	V6 (101)
S ₁	R _a ↑ R _b ↓ R _c ↑	R _a ↓ R _b ↑ R _c ↓	•	•	•	R _a ↓ R _b ↑ R _c ↓
S ₃	•	R _a ↓ R _b ↑ R _c ↓	R _a ↑ R _b ↓ R _c ↑	R _a ↓ R _b ↑ R _c ↓	•	•
S ₅	•	•	•	R _a ↓ R _b ↑ R _c ↓	R _a ↑ R _b ↓ R _c ↑	R _a ↓ R _b ↑ R _c ↓
S ₄	•	•	R _a ↑ R _b ↓ R _c ↑	R _a ↓ R _b ↑ R _c ↓	R _a ↓ R _b ↑ R _c ↓	•
S ₆	R _a ↓ R _b ↑ R _c ↓	•	•	•	R _a ↓ R _b ↑ R _c ↓	R _a ↑ R _b ↓ R _c ↑
S ₂	R _a ↓ R _b ↑ R _c ↓	R _a ↑ R _b ↓ R _c ↑	R _a ↓ R _b ↑ R _c ↓	•	•	•

• 열함없음

관련한 스위칭 상태에 따라 2 섹터내에 빠른 고장진단을 수행할 수 있다.

4. 시뮬레이션 결과

본 논문에서 제안한 개방성 고장진단 방법의 유효성을 검증하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 3은 인버터 a 상 상단 스위치인 S₁에 개방 고장 발생 시 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 그림 3(a)는 확장형 칼만필터 알고리즘에 의해 추정된 각 상 고정자 저항 파형이다. 고장 시점은 섹터 1에서 0.394[s]에서 발생시켰고, 고장 발생 시 개방성 고장 상의 고정자 저항이 갑자기 증가하는 것을 볼 수 있다. 이러한 특성으로 문턱저항 값을 비교함으로써 고장검출 신호가 나타난다. 그림 3(b)는 문턱저항값에 의한 고장 검출 신호 파형이다.

5. 실험 결과

제안된 인버터 개방성 고장진단 방법의 실제 적용 가능성을 확인하기 위해 영구자석형 동기 전동기(250W) 부하를 갖는 인버터 시스템을 제작하였고, 시뮬레이션과 동일한 조건에서 실험을 실시하였다. 개방된 고장상태는 게이트 드라이버에 강제로 턴-오프 신호를 인가하여 구성하였다. 그림 4는 확장형 칼만필터에 의해 추정된 각 상의 고정자 저항, 고장검출 신호의 실험결과이며 시뮬레이션 결과와 마찬가지로 개방성 고장상의 고정자

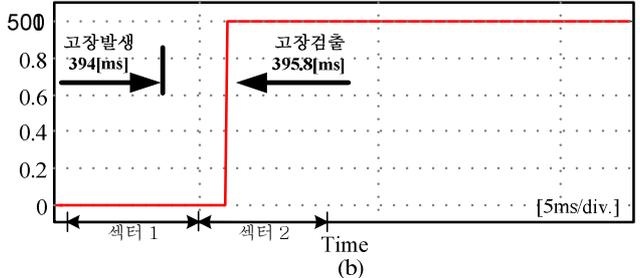
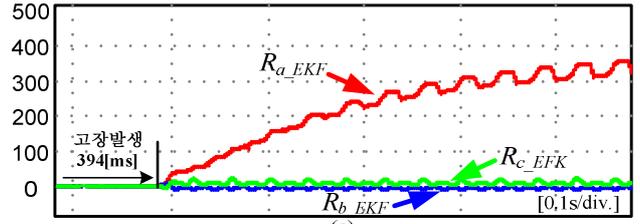


그림 3. 스위치 S₁ 개방성 고장 시 시뮬레이션 결과
Fig. 3. Simulation results in switch S₁ open phase fault

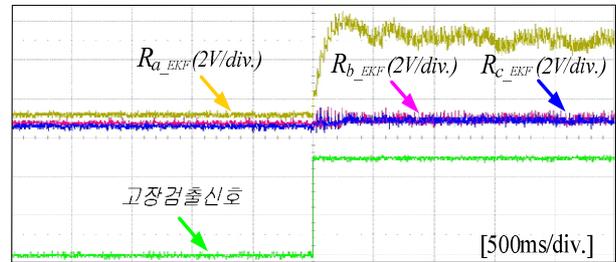


그림 4. 스위치 S₁ 개방성 고장 시 실험 결과
Fig. 4. Experimental results in switch S₁ open phase fault

저항이 증가하는 동일한 결과를 얻을 수 있었다.

실험 결과들의 검토로 인하여 제안한 고장진단 기법의 타당성은 입증되었다.

6. 결론

본 논문에서 제안한 개방성 고장진단 방법은 영구자석형 동기전동기 구동용 인버터 스위치의 개방된 고장 시 벡터제어의 2 섹터구간 내에 빠르게 고장을 검출함으로써 제어성능을 유지할 수 있다. 고장진단을 위한 제어 알고리즘을 기존의 시스템에 프로그램으로 추가함으로써 추가비용 없이 고장에 강인한 제어 시스템을 구성할 수 있다. 제안된 고장진단 방법의 실현 가능성과 우수성을 보이고자 시뮬레이션과 실험을 통하여 고장에 대한 강인한 특성을 검증하였다.

본 연구는 전력 IT 사업단을 통해 지식경제부의 전력산업 기술개발 사업으로부터 지원받아 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] P. Pillay and P. Freere, "Literature survey of permanent magnet Ac motors and drives," in *Conf. Rec. IEEE-IAS Annu. Meeting*, pp. 74-84, 1989.
- [2] 김경화, 최동욱, 구분관, 정인성, "영구자석 동기 전동기 구동 인버터 스위치의 개방 고장에 의한 제어 특성해석 및 고장모델 연구", *조명·전기설비학회 논문지*, 제 23 권, 제 6 호, pp. 40~51, 2009년 6월.