

영구자석 동기전동기 구동용 PWM 전압원 인버터의 실시간 다중 스위치 개방고장 검출 및 고장부 판별기법

송재환, 김경화*
서울과학기술대학교

Real-time Multiple Open-switch Fault Detection and Fault Localization for a PWM VSI-fed PMSM Drive System

Jae Hwan Song, Kyeong Hwa Kim
Seoul National University of Science and Technology

ABSTRACT

영구자석 동기전동기 구동 인버터 시스템 내 스위치 고장은 다양한 조합으로 발생한다. 특히 스위치 개방고장의 경우 다른 전기 부품에 과전류를 유발하여 전체 시스템에 심각한 2차 손상을 초래한다. 본 논문에서는 개방고장 진단 알고리즘의 복잡성을 완화하기 위해 고장 그룹을 분류하여 고장 발생 시 false alarm의 영향을 받지 않고 간단하고 체계적인 방식으로 고장을 식별할 수 있는 기법을 제안한다. 스위치의 개방 고장으로 영구자석 동기전동기 구동 시스템 내 PWM 전압원 인버터의 신뢰성을 향상시키기 위해 3중 스위치 개방고장 진단 및 검출 기법을 제시한다. 제안된 기법은 기존의 개방고장 진단방법과 달리 정보처리를 위해 Moving Filter를 사용함으로써 연산부하를 증가시키지 않고 신속한 고장 검출이 가능하며 별도의 하드웨어 구성없이 구현이 가능하다. 제안된 기법의 안정성과 유효성이 시뮬레이션을 통해 입증된다.

1. 서론

영구자석 동기전동기 구동 시스템의 고장은 정류기 다이오드의 고장, 직류 링크 커패시터의 단락 고장, 전압원 인버터를 구성하는 스위치 소자의 단락고장 및 개방고장 등이 있다. 특히 PWM 전압원 인버터는 높은 전류 및 전압을 이용한 펄스 폭 변조 방식의 고조파 스위칭으로 인해 스위칭 소자의 고장 발생 빈도가 매우 높다. 인버터 스위치의 단락 고장은 고장으로 인한 과전류 발생으로 시스템의 치명적 피해가 발생할 수 있으며 이를 방지하기 위해 별도의 하드웨어를 이용한 고장 진단 방법을 적용하고 있다. 반면, 인버터 스위치의 개방 고장은 인버터 전류의 고조파 증가, 토크 리플 발생, 효율저하를 발생시키며, 이로 인해 시스템의 점진적 운전정지로 이어질 수 있다. 따라서 인버터 스위치의 개방고장을 진단하고 실시간으로 모니터링 하기 위한 다양한 고장 검출 기법들이 연구되고 있다. 스위치의 개방 고장 진단 방법은 대표적으로 전압 감지 센서를 이용한 방법과^[1] 추가적인 센서 없이 소프트웨어를 이용한 고장 진단 방법이 있다.^[2] 본 논문에서는 PWM 전압원 인버터 스위치의 개방고장에 대해 별도의 하드웨어 구성없이 Moving Filter를 기반으로 전류의 현재 정보를 사용하여 개방고장을 진단하고, 고장 그룹을 분류하여 신속하고 체계적으로

3중 스위치의 개방 고장 및 고장부를 판별하는 방법을 제안한다. 제안된 개방 고장 진단 및 위치 판별 기법의 타당성을 입증하기 위해 시뮬레이션 결과가 제시된다.

2. 제안된 인버터 스위치의 개방고장 판별

본 논문에서는 신속한 고장검출을 위해 Moving Filter 기반의 RMS 전류 정보를 사용한다. Moving Filter의 연속시간 전달함수 $G(Z)$ 는 다음과 같다.

$$G(Z) = \frac{1}{N} \cdot \frac{1-Z^{-N}}{1-Z^{-1}} \quad (1)$$

이때 $T_w = NT_s$, N 은 하나의 window length에서의 샘플 개수이고, T_s 는 샘플링 주기이다. 식 (1)의 Moving Filter를 이용하여 인버터의 dq 전류 및 상전류가 처리되어 전류의 크기 I_{sm} 과 상전류의 RMS I_{nRMS} 가 다음과 같이 구해진다.

$$I_{sm} = \sqrt{(I_{qs}^2 + I_{ds}^2)} \quad (2)$$

$$I_{nRMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} i_{ns}^2(k-j)} \quad (3)$$

여기서 $n = a, b, c$, I_{qs} 및 I_{ds} 는 Moving Filter를 이용한 평균 전류이다. 식 (2)와 (3)을 이용하여 Normalized RMS 전류가 다음과 같이 구해진다.

$$I_{nM} = \frac{I_{nRMS}}{I_{sm}} \quad (4)$$

고장판별 변수 g_n 은 다음과 같이 정의된다.

$$g_n = I_{nM} - S_{RMS} \quad (5)$$

여기서 S_{RMS} 는 $1/\sqrt{2}$ 로 정상조건에서의 RMS 전류값이다. 정상조건에서 g_n 은 0으로 유지되지만 고장 발생 시 I_{nM} 과 S_{RMS} 의 편차가 발생하게 되고 편차가 발생하면 고장검출 변수

* 교신저자

f_{flag} 는 0에서 1로 변하고, false alarm을 방지하기 위해 f_{count} 가 10보다 커지면 고장검출 변수 f_{status} 의 값이 1로 검출된다. 고장의 검출 시 고장 그룹 및 고장 스위치 판별 알고리즘을 통해 고장부가 검출되며 본 논문에서는 스위치의 개방고장을 고장 그룹별 독립적인 판별 알고리즘의 설계를 통해 false alarm 없이 신속하고 체계적인 고장부의 위치 판별이 가능하다. 스위치의 개방고장 그룹은 인버터 스위치 고장의 수 및 위치에 따라 표 1과 같이 7개의 그룹으로 분류된다.

표 1 인버터 스위치의 개방고장 그룹
Table 1 Inverter open-switch fault group

FG1	(S ₁), (S ₂), (S ₃), (S ₄), (S ₅), (S ₆)
FG2	(S ₁ S ₄), (S ₂ , S ₅), (S ₃ , S ₆)
FG3	(S ₁ S ₅), (S ₁ S ₆), (S ₂ S ₄)
FG4	(S ₂ S ₆), (S ₃ S ₅), (S ₃ S ₄)
FG5	(S ₅ S ₆), (S ₄ S ₆), (S ₄ S ₅)
FG6	(S ₂ S ₃), (S ₁ S ₃), (S ₁ S ₂)
FG7	(S ₁ S ₅ S ₆), (S ₁ S ₂ S ₆), (S ₁ S ₃ S ₅)
	(S ₂ S ₄ S ₆), (S ₂ S ₃ S ₄), (S ₃ S ₄ S ₅)
	(S ₁ S ₂ S ₄), (S ₁ S ₂ S ₅), (S ₁ S ₃ S ₄)
	(S ₁ S ₃ S ₆), (S ₂ S ₃ S ₅), (S ₂ S ₃ S ₆)
	(S ₁ S ₄ S ₅), (S ₁ S ₄ S ₆), (S ₂ S ₄ S ₅)
	(S ₂ S ₅ S ₆), (S ₃ S ₄ S ₆), (S ₃ S ₅ S ₆)

여기서 S₁, S₄는 각각 a상 상·하단 스위치, S₂, S₅는 각각 b상 상·하단 스위치 및 S₃, S₆는 각각 c상 상·하단 스위치를 나타낸다.

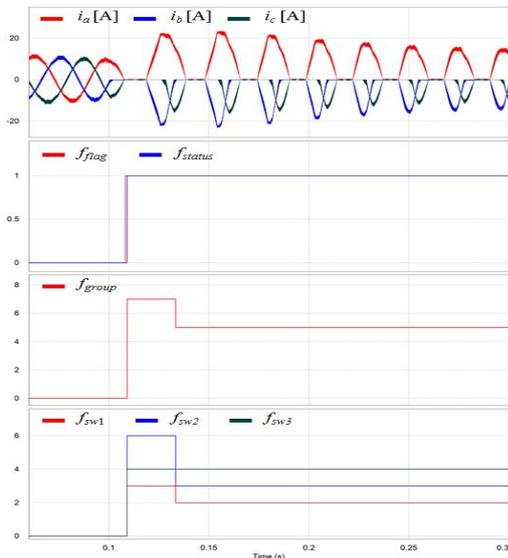


그림 1 S₂ S₃ S₄ 개방고장 시 고장 검출 및 고장부 판별 결과
Fig. 1 Fault detection and localization under open-switch faults in S₂ S₃ S₄

3. 시뮬레이션 결과

제안된 스위치 개방고장 진단 및 위치판별 알고리즘의 유효성을 입증하기 위해 PSIM을 이용하여 시뮬레이션이 수행되었다. 그림 1은 t=0.1s에 개방 고장 발생 시 3상 인버터의 출력

전류 i_a , i_b , i_c , 고장검출변수 f_{flag} , f_{status} , 고장그룹 f_{group} , 고장 스위치 f_{sw1} , f_{sw2} , f_{sw3} 를 나타낸다. 고장 검출과 a상 하단 스위치(S₄), b상 상단스위치(S₂) 및 c상 상단스위치(S₃)에서의 고장 스위치 판별이 효과적으로 이루어짐을 확인할 수 있다. 그림 2는 b상 상단(S₂) 및 하단(S₅) 스위치와 c상 상단스위치(S₃)에서 개방 고장 발생 시 고장 검출 및 고장 스위치 판별 결과를 나타낸다.

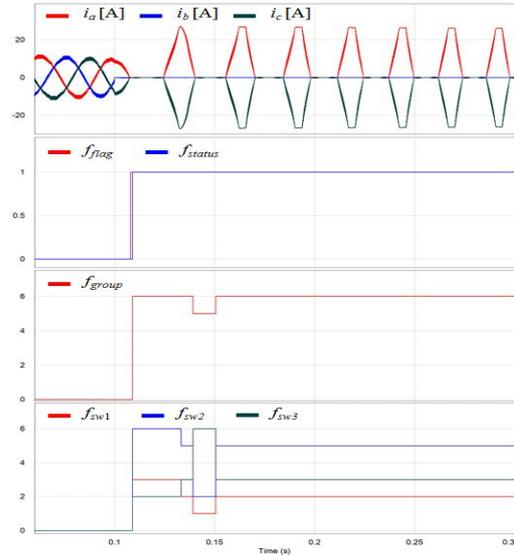


그림 2 S₂ S₃ S₅ 개방고장 시 고장 검출 및 고장부 판별 결과
Fig. 2 Fault detection and localization under open-switch faults in S₂ S₃ S₅

4. 결론

본 논문에서는 추가적인 하드웨어 구성없이 새로운 전압원 인버터의 3중 스위치 개방고장 진단 및 고장부 검출 기법을 제안하였다. 제안된 기법은 Moving Filter를 기반으로 전류의 현재 정보를 이용하여 실시간으로 정확한 개방 고장의 검출이 가능하고 고장 그룹의 분류를 통해 간단하고 신속하게 고장 스위치의 위치 판별이 가능함을 확인하였다.

본 연구는 국토교통과학기술진흥원에서 시행하는 철도기술연구사업(16RTRP B084184 04)의 일환으로 수행되었음

참고 문헌

[1] R. L. A. Ribeiro, C. B. Jacobina, E. R. C. Silva, and A. M. N. Lima, "Fault Detection of Open switch Damage in Voltage Fed PWM Motor Drive Systems", IEEE Trans. Power Electron., Vol. 18, No. 2, pp. 587-593, 2003, March.

[2] J. O. Estima and A. J. M. Cardoso, "A New Algorithm of Real time Multiple Open circuit Fault Diagnosis in Voltage Fed PWM Motor Drives by the Reference Current Errors", IEEE Trans. Indus. Electron., Vol. 60, No. 8, pp. 3496-3505, 2013, August.