

전압 오차를 이용한 인버터의 스위치 개방 고장 감지 및 진단

임규철, 최영현, 하정익

서울대학교

Model Based Switch Open Fault Detection and Diagnosis for SPMSM

Gyu Cheol Lim, Young Hyun Choi, Jung-Ik Ha

Department of Electrical Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea

ABSTRACT

영구자석 전동기는 전력 밀도가 높고 효율이 좋은 특징으로 견인, 의료, 군사 분야 등 다양한 산업 분야에서 사용되고 있다. 이러한 분야에서 사용되는 전동기 구동 시스템은 높은 신뢰성이 요구되므로 인버터에서 발생하는 전력 반도체 스위치 고장을 빠르게 감지해야 한다. 본 논문에서는 제어기 상전압 지령과 추정된 상전압 사이의 오차를 통해 전력 반도체 개방 고장을 감지하고 진단하는 방법을 제시하였다. 제안된 방법은 추가적인 측정 회로 없이 제어기 내부 값을 사용하여 개방 고장을 감지하고 개방된 스위치를 진단할 수 있다. 특히 부하 변동을 고려한 감지 방법을 제안하여 고장 감지의 신뢰성을 개선한다.

1. 서론

최근 영구자석 전동기는 높은 전력 밀도 및 고효율 등의 장점으로 자동차, 항공, 엘리베이터 등 다양한 산업 분야에서 활용되고 있다. 특히 견인, 군사, 의료 분야에서 영구 자석 전동기의 제어 및 구동 시스템은 높은 신뢰성 및 안정성이 요구된다.

영구 자석 전동기 구동 시스템은 전압형 전력 변환기(VSI PWM 인버터)를 사용하여 출력 전압을 교류 전압으로 합성한다. 이러한 인버터 시스템은 전력 반도체, 직류단 캐패시터, 각종 센서 등으로 구성되며, 인버터의 신뢰성 증대를 위한 고장 감지 및 분리 그리고 비상 운전에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다.

인버터의 고장은 크게 직류단 캐패시터 단락 고장, 전력 반도체 개방 및 단락 고장, 센서 고장으로 분류할 수 있다. 특히 전력 반도체 스위치 개방 고장은 물리적인 제한으로 인해 합성하고자 하는 교류 전압과 전류를 제어할 수 없다. 또한 비정상적인 동작이 지속되는 경우 시스템의 추가적인 고장을 유발 할 수 있다.^[1] 따라서 전력 반도체 소자의 고장을 빠르고 정확하게 감지할 수 있는 알고리즘이 필요하다.

본 논문에서는 가변속 구동 시스템에서 전력 반도체 개방 고장 감지 방식을 제시한다. 잘못된 고장 감지를 방지하고 부하 변동 및 속도 변동이 있는 시스템에 대하여 과도 상태를 고려한 개방 감지 방법을 제시한다. 제안된 방법은 제어기의 상전압 지령과 추정된 상전압 사이의 오차를 통해 고장을 감지하고 진단한다. 부하 변동 시간 및 문턱 전압을 고려하여 시스템의 신뢰성을 확보하였다.

2. 본론

2.1 스위치 개방에 따른 평균 전압 합성

정상적으로 동작하는 인버터의 극전압(V_{xn})은 스위칭 상태에 따라서 결정된다. 스위칭 주기 동안 합성되는 평균 극전압(V_{xn_avg})은 식(1)과 같이 시비율과 직류단 전압에 의해 결정된다. 이때 V_{dc} 는 직류단 전압을 의미한다.

$$V_{xn_avg} = DV_{dc} - V_{dc} \quad (1)$$

인버터의 스위치 개방 고장의 경우 극전압은 전류 방향에 의해 정해진다.

윗상 스위치 개방 고장 시, 전류가 음수 일 경우, 윗상의 환류 다이오드와 아랫상 스위치를 통해 식(1)과 같이 평균 극전압을 합성할 수 있다. 전류가 음수인 경우 윗상 스위치의 도통이 불가능 하여 식(1)과 다른 평균 극전압이 합성된다.

아랫상 스위치 개방 고장 시, 전류가 양수일 경우, 아랫상 환류 다이오드와 윗상 스위치를 통해 평균 극전압은 시비율과 직류단 전압에 의해 결정되며, 전류가 음수인 경우 아랫상 스위치의 도통이 불가능하여 인가되는 평균 극전압은 식(1)처럼 합성 할 수 없다.

윗상, 아랫상 스위치 모두 개방 고장인 경우, 환류 다이오드만 존재하며, 전류 방향에 상관 없이 극전압 합성이 불가능하다.

2.2 상전압 오차를 통한 개방 고장 감지

전류 지령과 측정된 전류 사이의 오차를 비례 적분 제어기의 입력으로 사용하여 인버터의 출력 전압이 결정된다. 스위치 개방 고장의 경우 고장 난 스위치의 위치에 따라 평균 극전압을 합성할 수 없는 구간이 결정 되며, 극전압 합성이 불가능한 영역에서 해당 상의 전류는 0이 된다. 따라서 제어기 출력 전압 지령은 해당 구간 내에서 크게 증가하게 된다. 하지만 실제 인가되는 상전압은 전압 지령과 관계없이 측정되는 전류와 전동기의 전압 방정식으로부터 식(2)와 같이 표현할 수 있다.

$$V_{dq_est} = R_s i_{dq} + L_s \frac{di_{dq}}{dt} + L_s \omega_r i_{dq} + e(\theta_r) \quad (2)$$

식(2)를 회전 변환하면, 실제 인가되고 있는 각 상전압으로 추정할 수 있다.

$$V_{abcs_est} = T^{-1}(\theta_r) V_{dq_est} \quad (3)$$

전압 지령과 실제 인가되는 전압 사이의 오차는 식(4)로 정의한다.

$$V_{abcs_err} = V_{abcs}^* - V_{abcs_est} \quad (4)$$

스위치 개방 고장이 발생 시 전압 오차는 크게 증가하게

되므로, 고장 난 상의 위치와 전류의 방향에 따라 나타나는 전압 오차의 패턴을 분석함으로써 개방 고장 스위치를 감지할 수 있다. 각 상의 전압 오차 크기가 문턱 전압의 크기보다 클 경우 *flag*를 1로 표시하고 그렇지 않은 경우 0으로 표시하면, 전압 오차 *flag* 패턴이 표 1과 같이 나타나게 된다.

표 1 스위치 개방 고장 시 상전압 오차 *flag* 패턴
Table 1 *flag* pattern of phase voltage error with open switch fault

개방 스위치	전류>0			전류<0		
	<i>flag_a</i>	<i>flag_b</i>	<i>flag_c</i>	<i>flag_a</i>	<i>flag_b</i>	<i>flag_c</i>
<i>S_{aU}</i>	1	0	0	0	0	0
<i>S_{aL}</i>	0	0	0	0	1	1
<i>S_{aU}& S_{aL}</i>	1	0	0	0	1	1
<i>S_{bU}</i>	0	1	0	0	0	0
<i>S_{bL}</i>	0	0	0	1	0	1
<i>S_{bU}& S_{bL}</i>	0	1	0	1	0	1
<i>S_{cU}</i>	0	0	1	0	0	0
<i>S_{cL}</i>	0	0	0	1	1	0
<i>S_{cU}& S_{cL}</i>	0	0	1	1	1	0

A상 윗상 스위치 (*S_{aU}*) 개방의 경우, [1 0 0], [0 0 0]의 전압 오차 패턴이 반복되며 아랫상 스위치 (*S_{aL}*) 개방의 경우, [0 0 0], [0 1 1]의 오차 패턴이 반복된다. 윗상, 아랫상 스위치 모두 개방 고장인 경우 [1 0 0], [0 1 1]의 오차 패턴이 반복된다. 이러한 각 상별 전압 오차 패턴을 통해 개방된 상을 감지할 수 있다. 개방 고장인 스위치를 진단하기 위해서는 개방 고장 감지 후, 전기각 주파수의 한 주기 동안 기록된 오차 패턴을 바탕으로 개방된 스위치를 구별해 낼 수 있다.

1.3 문턱 전압 및 부하 변동 시간

인버터 비선형성으로 인한 전압 지령의 왜곡과 전동기 제정수 오차에 의한 추정 전압 오차에 의하여 정상 운전 상황에서도 상전압 지령과 추정 전압 사이의 오차가 발생할 수 있다.

그림1(b)의 정상 운전 구간에서 상전압 지령과 추정된 상전압 사이의 오차가 발생하며, 이를 방지하기 위해 문턱 전압 ($-V_{err,th}$) 크기를 정상 운전 시 발생하는 전압 오차 크기보다 더 큰 값으로 설정해야한다. $-V_{err,th}$ 는 부하에 따라서 값을 조절할 필요가 있다.^[2]

또한 부하나 속도 변동이 고려되는 시스템의 경우, 과도 상태에서 급격한 전류의 변화로 인해 전압의 오차의 크기가 문턱 전압의 크기보다 커져 잘못된 고장 감지가 발생할 수 있다. 이를 방지 하기 위해 부하 변동 시간을 고려하여, 변동 시간 이내의 전압 오차 패턴을 기록 하지 않으며 부하 변동 시간 이후의 기록된 전압 오차 패턴을 통해 개방 고장을 감지 할 수 있다.

표 2 모터 상수
Table 2 Motor Parameter

저항	13 [mΩ]	역기전력 상수	5.2 [mV/(rad/s)]
L_d	32 [μH]	L_q	32 [μH]
직류단 전압	12 [V]	극 수	8

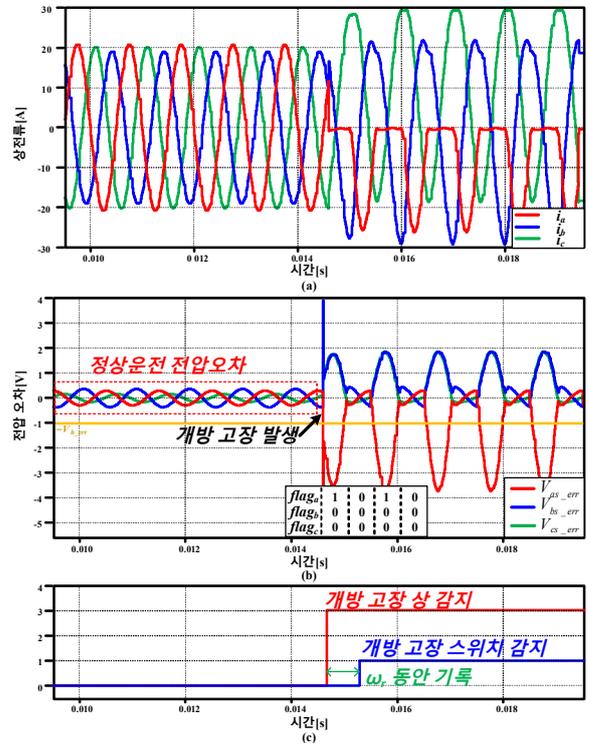


그림 1 A상 윗상 스위치 개방 고장 시 (a) 상전류, (b) 상전압 오차, (c) 고장 감지 및 분리 파형

Fig 1 Simulation result of (a) phase current, (b) phase voltage error, (c) *S_{aU}* open fault detection and diagnosis

그림 1의 시뮬레이션에서 운전 중 개방 고장이 발생하였고, 부하 변동 시간을 고려하여 개방 고장 난 상을 감지 하였다. 개방 상 감지 후, 전기각 주파수의 한 주기 동안 전압 오차 패턴([1 0 0] [0 0 0])을 통해 A상 윗상 스위치 개방 고장을 진단 하였다.

3. 결론

본 논문에서는 상전압 지령과 추정된 상전압 사이의 오차를 통해 인버터의 스위치 개방 고장을 감지하는 방법을 제시하였다. 제안된 방법을 통해 개방 고장 난 상을 감지하고, 개방된 스위치를 진단하였다. 부하 변동이 고려되는 시스템에서 개방 고장 감지의 신뢰성 확보를 위해 과도 상태에서의 잘못된 고장 감지를 방지하는 방법을 제시하고 운전 조건에 따른 개방된 스위치 진단 방법을 제시하였다.

이 논문은 2017년도 BK21플러스 사업에 의하여 지원되었음

참고 문헌

[1] Hag-Wone Kim, "Simple Switch Open Fault Detection Method for Voltage Source Inverter," *The Transactions of Korean Institute of Power Electronics*, vol. 13, no. 6, pp. 430-438, 2008.

[2] S. M. Jung, J. S. Park, H. W. Kim, K. Y. Cho and M. J. Youn, "An MRAS-Based Diagnosis of Open-Circuit Fault in PWM Voltage-Source Inverters for PM Synchronous Motor Drive Systems." in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, no. 5, pp. 2514-2526, May 2013.