

전압원 인버터의 간단한 스위치 개방 고장 감지 방법

金學源[†]

Simple Switch Open Fault Detection Method for Voltage Source Inverter

Hag-Wone Kim

요 약

최근 영구자석 동기전동기는 여러 장점으로 인해 많은 응용 분야에서 적용이 확대되고 있다. 특히 전기 자동차, 항공기 분야, 의료 및 군사 분야에 그 적용이 활발히 진행되고 있어 상대적으로 고 신뢰 운전이 매우 중요한 과제로 대두되고 있으며, 특히 전압 원 인버터의 고장 감지 및 진단 등에 관한 많은 연구가 진행되고 있다. 본 논문에서는 영구자석 동기전동기의 개방 고장을 감지하고 진단하는 방법을 제안하였고, 모의해석 및 실험을 통해 제안된 방법이 실제 적용이 가능성을 확인하였다. 제안된 방법은 기존의 개방 고장 감지 방법과 달리 별도의 하드웨어를 요구하지 않으며, 또한 빠른 개방 고장 감지 특성을 가지고 있다.

ABSTRACT

Recently, permanent magnet synchronous motor are applied to various applications such as electric vehicle, aerospace, medical service and military applications due to several outstanding characteristics. Because of the importance of high reliable operation in these areas, many research related to the fault detection and diagnosis of inverter system are conducted. In this paper, new simple fault detection method of voltage source inverter for permanent magnet synchronous motor is proposed. The feasibility of the proposed method are improved by simulation and experiment. By the simulation and experiments, rapid detection characteristic of the proposed method has been proved without any additional voltage sensor.

Key Words : Fault detection, Open fault, Voltage source inverter, Permanent magnet synchronous motor, FDD

1. 서 론

최근, 영구자석 동기 전동기 (Permanent Magnet Synchronous Motor)는 가전 및 산업용을 중심으로 적용이 점차 확대되고 있다. 또한 항공 및 전기 자동차 등의 운송 분야, 의료 분야, 군사 분야 및 핵연료를 활

용한 발전 분야 등 운전 신뢰성이 강력히 요구되는 분야까지 적용되고 있으며, 이는 영구자석 동기 전동기의 높은 전력 밀도와 고효율, 우수한 기동 특성, 저렴한 유지 보수비용 등이 그 원인이라 할 수 있다^[1]. 이런 추세에 따라 영구자석 동기 전동기 구동을 위한 전압원 인버터(Voltage Source Inverter)의 운전 신뢰성 확보는 매우 중요한 과제가 되고 있다. 특히 항공 및 운송, 의료 분야는 신뢰성과 안전성이 더욱 강조됨에 따라, 전동기 구동 시스템의 고장 감지 및 분석에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

[†]교신저자 : 정희원, 총주대 정보제어공학과 전임강사

E-mail : khw@cjnu.ac.kr

접수일자 : 2008. 8. 27

심사완료 : 2008. 10. 17

1차 심사 : 2008. 10. 7

한편, 영구자석 동기 전동기 구동 시스템에서 전압원 인버터는 높은 전압과 큰 전류로 스위칭 소자에 많은 전기적 또는 열적인 스트레스가 가해지며, 특히 펄스 폭 변조(Pulse Width Modulation)방식의 고주파 스위칭 동작으로 인해, 과도한 스트레스를 받는다. 이로 인해 전압원 인버터의 스위칭 소자는 다른 부품에 비해 고장 발생할 수 있는 확률이 매우 높다. 이러한 전압원 인버터에서 발생할 수 있는 잠재 고장에 대하여 참고 문헌 [2]에서 보고된 바 있다. 일반적으로 전압원 인버터의 잠재 고장은 크게, 직류 링크 캐패시터 단락 고장(DC Link Capacitor Short-circuit Fault), 인버터 스위치의 개방 고장(Open-circuit Fault of Inverter Switch), 인버터 스위치의 단락 고장(Short-circuit Fault of Inverter Switch) 등으로 나눌 수 있다. 이들 잠재 고장 중 직류 링크 캐패시터 단락 고장은 직류 링크 전압 감지 회로를 사용하여 그 고장을 쉽게 판단할 수 있다. 인버터 스위치 단락 고장의 경우, 단락 고장 시 전동기 및 인버터에 이상 과전류 (Abnormal Over Current)를 발생시킬 수 있으며, 이 이상 과전류는 영구자석 동기 전동기의 감자 고장 (Demagnetization Fault) 등 추가적인 고장을 발생시킬 수 있다. 이에 따라 인버터 제어회로는 단락 고장 등에 의한 과전류를 방지하기 위한 별도의 하드웨어를 활용하여 빠른 감지 특성을 갖도록 설계하는 것이 일반적이다. 반면, 인버터 개방 고장의 경우 단락 고장에 비해 상대적으로 빠른 응답 특성을 요구하지 않으므로 그 중요성이 다소 간과되는 경향이 없지 않다. 그러나 인버터 개방 고장의 경우 전동기의 전류 파형을 왜곡시켜, 구동 시스템의 소음, 진동을 유발하고, 베어링 등의 추가적인 고장을 동반할 가능성이 존재한다. 이에 따라 최근 인버터의 개방 고장을 감지하고 대응하기 위한 고장 감지 및 대응 방법들이 연구되어 왔으며, 전압 감지 센서를 포함한 하드웨어 등을 활용한 고장 감지 방법 등이 제안된 바 있다^[1,3]. 또 다른 개방 고장 감지 방법으로 별도의 하드웨어 센서 없이 전동기의 전류를 감지하여 인버터의 개방 고장을 감지하는 방법 등이 제안된 바 있으나^[4,6], 이러한 방법들은 개방 고장 감지를 위해 여러 전류 벡터 주기를 거쳐 개방 고장을 감지하여 속응성이 떨어지거나, 전류를 이용한 간접적인 방법으로 인하여 오감지 가능성이 존재한다.

본 논문에서는 인버터 스위치의 개방 고장에 대해 별도의 추가적인 하드웨어 없이 빠른 감지 특성을 갖는, 간단한 인버터 스위치의 개방 고장 감지하는 방법

을 제안하고자 한다. 이를 위해 먼저 기존의 스위치 개방 고장 방법에 대하여 그 장단점에 대하여 논하고, 기존의 제안된 방법의 단점을 보완하기 위한 간단한 개방 고장 감지 방법을 제안하고자 한다. 또한 제안된 전압원 인버터의 개방 고장 시 감지 방법에 대해 모의 해석 및 실험을 실시하여 적용 가능성을 확인하였다.

2. 기존의 전압원 인버터의 개방고장 감지 방법

기존에 제안된 인버터 스위치 개방 고장 감지 방법은 크게 전압 감지 센서를 활용하여 전압원 인버터의 개방 고장을 감지하는 방법과^[1,3], 추가적인 하드웨어 없이 소프트웨어(Software)만으로 개방 고장을 감지하는^[4] 두 가지 방법으로 나눌 수 있다.

리카르도 루시오(Ricardo Lucio) 등은 전동기의 각 상에 인가된 실제 전압을 전압 감지 센서를 활용하여 감지하고, 이 실제 인가 전압을 전압 명령과 비교하여 인버터 스위치의 개방 고장을 감지하는 방법을 제안하였다^[3]. 이 방법은 인버터 스위치의 개방 고장을 감지하기 위해 전압 감지 센서를 추가하였으며, 감지 센서의 위치에 따라 단자 전압 감지 방법(Terminal Voltage Measure Method), 선간 전압 감지 방법(Line Voltage Measure Voltage), 상 전압 감지 방법(Phase Voltage Measure Method), 중성점 전압 감지 방법(Neutral Voltage Measure Method) 등이 가능하다. 제안된 모든 방법은 전동기에 인가된 전압을 전압 감지 센서를 활용하여 직접 감지하는 방법으로, 개방 고장 발생 시, 고장을 감지할 때까지의 시간이 짧은 장점을 가지고 있으나, 전동기에 인가된 전압을 감지하기 위한 전압 감지 회로 및 절연 회로 등이 추가로 요구된다. 또한 전압 감지 회로 및 절연 회로 등은 인버터의 출력 전압이 펄스 폭 변조 방법 (Pulse Width Modulation Method)에 의하여 발생되기 때문에 스위치의 작은 전압 강하 전압과 큰 역방향 전압 및 짧은 턴 온, 오프 시간 등을 모두 감지해야 함으로 넓은 전압 범위에 걸쳐 큰 정밀도가 요구되므로, 저가격(Low Material Cost)의 재료비로 회로를 설계하기 어렵다^[5].

지웨이 쉐(Jingwei Zhu) 등은 게이트 구동 회로 (Gate Drive Circuit)를 사용하여 인버터 스위치의 개방 고장을 감지하는 방법을 제안한 바 있다^[1]. 이 방법은 스위치 턴 온 시 스위치의 전압 강하를 측정하여 스위치의 이상 유무를 판단하는 방법으로, 이상 전압 레벨을 감지하는 회로를 게이트 구동 회로에 내장하

여, 개방 고장을 위한 별도의 감지회로가 필요하지 않은 장점을 가지고 있다. 그러나 이 방법은 특정한 게이트 구동 회로에만 적용이 될 수 있는 방법이며, 또한 게이트 구동 회로의 고장으로 발생하는 스위치의 개방 고장은 감지할 수 없는 단점이 존재한다.

이러한 단점을 극복하기 위해 별도의 전압 감지 회로 사용 없이 소프트웨어만을 활용하여 스위치의 개방 고장을 감지하는 방법이 제안된 바 있다^{[4],[6]}. 라파엘 푸젯 (Raphael Peugot) 등은 전기적으로 한 주기 동안 전류 벡터의 궤적(Current Vector Trajectory)을 분석하여 정상상의 개방 고장을 감지하는 방법을 제안하였다^[4]. 이 방법은 별도 회로 없이 정상상의 개방 고장을 용이하게 감지할 수 있는 장점을 가지고 있으나, 한 주기 동안 전류 벡터의 궤적을 관측하고 저장해야 하므로 개방 고장을 감지하는데 시간 지연이 발생한다. 또한 한 주기 이상의 전류 벡터 궤적을 저장하기위한 많은 메모리(Memory)를 요구하며, 특히 저속 운전의 경우 많은 메모리를 요구함으로써 실용상의 문제가 발생할 수 있다. 소프트웨어로 개방 고장을 감지하는 방법으로 박병근 등은 전류 파형이 사다리꼴파인 경우에 적용이 가능한 개방 고장 감지 방법을 제안한 바 있다^[6]. 이 방법은 전류 명령과 전동기의 실제 전류를 비교하고 그 차이로 정상상의 개방 고장을 감지하는 방법이다. 이 방법은 쉽게 적용이 가능한 개방 고장 감지 방법이지만, 인버터의 입력 전압 등의 제한으로 전동기의 전류 값이 작아지게 될 때, 정상운전을 개방 고장으로 오감지할 가능성이 있으며 특히 고속 및 전류가 급격히 변화해야하는 과도상태의 경우 감지 오류가 발생할 수 있다.

3. 정상 인버터 스위치에서 전압 왜곡

최근, 인버터 스위치의 데드 타임(Dead Time), 턴 온 및 오프 타임(Turn On and Off Time), 그리고 스위치의 전압 강하 특성에 기인한 전압 왜곡을 실시간으로 감지하고 보상하는, 데드 타임 효과 보상 방법이 제안된 바 있다^{[5],[7]}. 본 논문에서 제안하는 인버터 고장 감지 알고리즘은 참고문헌 [5],[7]에서 제안된 실시간 전압 왜곡 관측 방법을 활용한 알고리즘으로, 스위치의 전압 오차를 관측하여, 특정 단자의 스위치의 개방 고장을 감지하는 방법이다. 본 논문에서 제안하는 개방고장 감지 알고리즘을 설명하기 위해 먼저 정상 인버터 스위치의 전압 왜곡을 설명하고, 개방고장 시 고장 현상을 비교 설명하고자 한다.

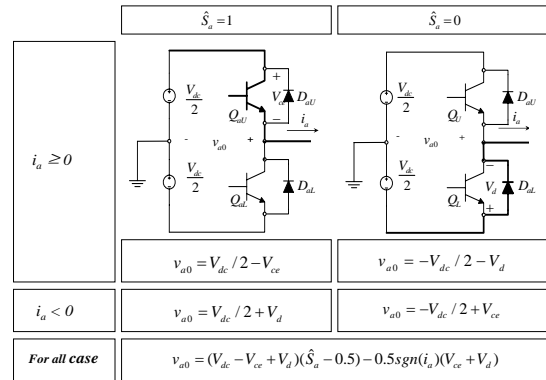


그림 1 스위칭 함수 및 상전류 방향에 따른 단자 전압
Fig. 1 Terminal voltage according to switching function and direction of phase current

만약 인버터의 a,b,c상의 스위치 쌍 중에서, a상의 인버터 스위치에 개방 고장이 발생되었다고 가정하자. 이 때 a상 단자 전압(Terminal Voltage)은 전압 명령과 다른 전압 오차를 갖게 되며, 전압 오차는 식 (1)과 같이 표현된다.

$$ev_{a0} = v_{a0}^* - v_{a0} \tag{1}$$

여기서, v_{a0}^* 은 a상의 단자 전압 지령, v_{a0} 는 a상의 실제 단자 전압, ev_{a0} 은 a상의 전압 오차이다. 정상적인 경우와 고장의 경우를 구분하기 위해 각 경우 전압 오차에 대하여 살펴보자.

a상 스위치 쌍이 정상인 경우, a상의 단자 전압을 그림 1에 나타내었다. 그림 1에서 실제 인가된 단자 전압은 스위칭 함수(Switching Function) 및 전동기의 전류에 따라 다른 값을 갖는다. 여기서 \hat{S}_a 는 a상의 스위칭 함수이며, 그 값은 스위치의 온(On), 오프(Off) 상태에 따라 1 또는 0을 갖는다. 이 때, 스위칭 함수가 1이면 이상적인 경우 인버터 스위치 쌍의 윗 단 스위치가 켜지고, 스위칭 함수가 0이면 아랫단 스위치가 켜진다. 인버터의 단자 전압을 스위칭 함수 및 전동기 전류의 방향에 따라 단자 전압을 나타내면 식 (2)와 같다.

$$v_{a0}(t) = (V_{dc} - V_{ce} + V_d)\hat{S}_a(t) - 0.5 - 0.5(V_{ce} + V_d)\text{sgn}(i_a) \tag{2}$$

여기서, $v_{a0}(t)$ 는 t시점에서 단자 전압, $\hat{S}_a(t)$ 는 t시점

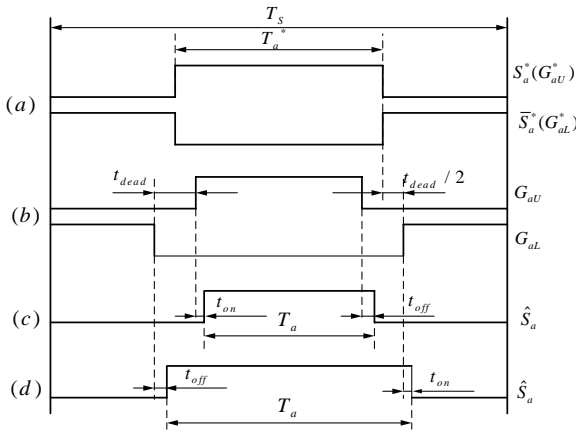


그림 2 상전류의 방향에 따른 유효한 스위치 도통 시간
Fig. 2 Effective on time according to direction of phase current

에서의 실제 스위칭 함수, V_{dc} 는 직류 링크 전압, $V_{\alpha c}$ 는 트랜지스터의 순방향 전압 강하, V_d 는 스위치에 역병렬로 연결된 다이오드(Diode)의 순방향 전압 강하를 의미한다. 또한 $sgn(i_a)$ 는 i_a 값의 부호가 양 또는 음에 따라 그 값이 +1, -1이되는 부호함수이다. 식 (2)를 펄스 폭 변조 한 주기에서의 평균 전압으로 나타내면 식 (3)과 같다.

$$v_{a0}(k) = (V_{dc} - V_{\alpha c} + V_d) \left(\frac{T_a(k)}{T_s} - 0.5 \right) - 0.5(V_{\alpha c} + V_d)sgn(i_a) \quad (3)$$

여기서, T_s 는 펄스 폭 변조 주기, $T_a(k)$ 는 k번째 PWM 주기에서의 스위칭 함수가 1이 되는 시간을 뜻하며, a상의 데드 타임 및 온, 오프 지연을 포함한 실제적인 윗 단 스위치의 도통 시간을 의미한다.

인버터의 스위치가 정상적인 경우 인버터 스위치 쌍에서의 스위칭 동작과 이에 따른 실제적인 윗 단 스위치 도통 시간 $T_a(k)$ 를 그림 2에 나타내었다. 그림 2의 (a)에서 T_s 는 인버터의 펄스 폭 변조를 위한 스위칭 주기이고, Sa^* 는 a상의 스위칭 함수의 지령값, 그리고 Ta^* 는 a상의 스위칭 함수에 따른 윗 단 스위치 의 온 지령 시간이다. 그림 2의 (b)는 인버터 데드 타임을 반영한 게이트 구동 신호를 나타내었다. 그림 (c)는 $i_a \geq 0$ 인 경우, (d)는 $i_a \leq 0$ 인 경우의 유효한 윗 단 스위치 도통 시간을 나타내었다. b상과 c상의 평균 단자 전압도 동일한 방법으로 구할 수 있으며, 이를 나

타내면 식 (4)와 같다.

$$v_{i0}(k) = (V_{dc} - V_{\alpha c} + V_d) \left(\frac{T_b(k)}{T_s} - 0.5 \right) - 0.5(V_{\alpha c} + V_d)sgn(i_b)$$

$$v_{c0}(k) = (V_{dc} - V_{\alpha c} + V_d) \left(\frac{T_c(k)}{T_s} - 0.5 \right) - 0.5(V_{\alpha c} + V_d)sgn(i_c) \quad (4)$$

스위치 쌍이 정상인 경우, $T_a^*(k)$ 와 $T_a(k)$ 의 차이는 전류의 방향에 따라 그 값이 달라지며, 데드 타임 t_{dead} , 턴 온 시간 t_{on} 및 턴 오프 시간 t_{off} 의 차이를 갖는다. 이를 식으로 나타내면 식 (5)와 같다.

$$T_a(k) = T_a^*(k) - sgn(i_a)(t_{dead} + t_{on} - t_{off}) \quad (5)$$

이제 식 (5)를 식 (3)에 대입하면 단자 전압은 아래의 식 (6)과 같이 구해진다.

$$v_{a0}(k) = (V_{dc} - V_{\alpha c} + V_d) \left(\frac{T_a^*(k)}{T_s} - 0.5 \right) - sgn(i_a) \left(0.5(V_{\alpha c} + V_d) + \frac{(V_{dc} - V_{\alpha c} + V_d)(t_{dead} + t_{on} - t_{off})}{T_s} \right) \quad (6)$$

한편, 단자의 전압 지령은 식 (7)와 같으므로, 정상적인 상태에서의 단자 전압 오차를 구하면 식 (8)과 같이 쓸 수 있다.

$$v_{a0}^*(k) = V_{dc} \left(\frac{T_a^*(k)}{T_s} - 0.5 \right) \quad (7)$$

$$ev_{a0}(k) \approx (V_{\alpha c} - V_d) \left(\frac{T_a^*(k)}{T_s} - 0.5 \right) + sgn(i_a) \left(0.5(V_{\alpha c} + V_d) + \frac{V_{dc}(t_{dead} + t_{on} - t_{off})}{T_s} \right) \quad (8)$$

식 (8)에서 알 수 있는 것처럼 스위치가 정상적인 경우 트랜지스터의 특성에 기인한 전압 오차는 인버터 스위치의 공칭 데이터로부터 용이하게 계산할 수 있다.

4. 새로운 인버터 개방 고장 감지 방법

한편, 인버터 스위치 개방 고장이 발생할 경우, 단자

전압 오차는 식 (8)의 값과 달리 큰 값을 갖게 된다. 인버터 스위치 특정상 개방 고장의 한 예로 a상 상단 스위치 개방 고장인 경우를 그림 3에 나타내었다. 이때 a상 전류가 양의 값을 갖는 경우 유효한 스위치의 온 시간 $T_{a0}(k)$ 는 전압 지령에 관계없이 영의 값을 가지며, 이로 인해 고장이 발생된 상의 단자 전압은 전압 명령과 오차를 갖게 된다. 이때 단자 전압 값은 전동기의 중성점 전압과 해당 상 권선 전압강하의 합으로 구할 수 있다. 그러므로 인버터 스위치의 단자 전압을 전동기의 상 전압과 중성점 전압의 합으로부터 구하여, 이 단자 전압을 해당 단자의 전압 지령과 비교하여 고장 유무를 판단할 수 있다.

위에서 설명한 바와 같이 특정상의 개방 고장을 판단하려면 그 상의 실제 인가된 단자 전압을 구하여야 한다. a상의 단자 전압은 키르히호프의 전압법칙으로부터 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$v_{a0}(k) = v_{an}(k) + v_{n0}(k) \tag{9}$$

여기서, $v_{an}(k)$ 는 k번째 PWM 주기에서의 a상 권선 상 전압 강하의 한 주기 평균 값, $v_{n0}(k)$ 는 전동기 중성점 전압의 PWM 한주기 평균 값을 의미한다. 상 평형을 이룬 전동기의 경우 중성점 전압은 식 (10)과 같다.

$$v_{n0}(k) = \frac{v_{a0}(k) + v_{b0}(k) + v_{c0}(k)}{3} \tag{10}$$

여기서, $v_{b0}(k)$ 는 k번째 PWM 주기에서의 b상 단자 전압, $v_{c0}(k)$ 는 c상의 단자전압이다. 식 (9)와 (10)으로부터 a상의 단자 전압은

$$v_{a0}(k) = \frac{3v_{an}(k) + v_{b0}(k) + v_{c0}(k)}{2} \tag{11}$$

가됨을 알 수 있다. 식 (11)에서 알 수 있는 바와 같이, b상과 c상의 단자 전압과 a상의 상 전압 강하를 알면 a상의 인가된 실제 단자전압 $v_{a0}(k)$ 을 관측할 수 있으며, 이 값과 단자 전압 지령을 비교하여 a상 단자의 개방 고장을 검출할 수 있다.

개방 고장을 관측하기 위해 관측 전압 오차는

$$e\widehat{v}_{a0}(k) = v_{a0}^*(k) - \widehat{v}_{a0}(k) \tag{12}$$

과 같다. 여기서 $\widehat{v}_{a0}(k)$ 는 관측된 단자전압이며, $e\widehat{v}_{a0}(k)$ 는 관측된 단자전압 오차다.

b상 및 c상의 인버터 스위치가 정상의 경우 a상의 단자 전압 왜곡은

$$e\widehat{v}_{a0}(k) = v_{a0}^*(k) - \frac{v_{b0}^*(k) - ev_{b0}(k) + v_{c0}^*(k) - ev_{c0}(k)}{2} - \frac{3}{2}v_{an}^*(k) \tag{13}$$

로 나타난다. 이 식에서 a,b,c 각 상 단자 전압 지령은 식 (7)로부터, b, c상의 단자 전압 오차는 식 (8)을 사용하여 계산할 수 있다. 전동기의 상 전압은 전동기의 공칭 파라미터 (Nominal Parameter)인 공칭 저항 R_{s0} , 공칭 인덕턴스 L_{s0} , 공칭 자속 쇄교량 λ_{m0} 과 계측된 상 전류를 사용하여 식 (14)와 같이 계산된다.

$$\widehat{v}_{a0}(k) = R_{s0}\widehat{i}_a(k) + L_{s0}\frac{\widehat{i}_a(k) - \widehat{i}_a(k-1)}{T} + \omega_e\lambda_{m0}\cos\theta(k) \tag{14}$$

식 (14)로부터 계산된 관측된 상 전압을 식 (13)에 대입하여 관측된 단자 전압 오차를 구할 수 있고, 이 값과 전압 지령의 차이로부터 전압 오차를 구할 수 있다.

이제 감지된 전압 오차와 미리 설정된 전압 오차 범위를 K 값과 비교하여 그 값에 따라 개방 고장 감지 여부를 판단할 수 있다.

$$|e\widehat{v}_{a0}(k)| \geq K|ev_{a0}(k)| \tag{15}$$

여기서, $ev_{a0}(k)$ 는 식(8)로부터 계산된 값이고, K 는 개방 고장 감지 범위를 설정하는 상수이다. K 값은

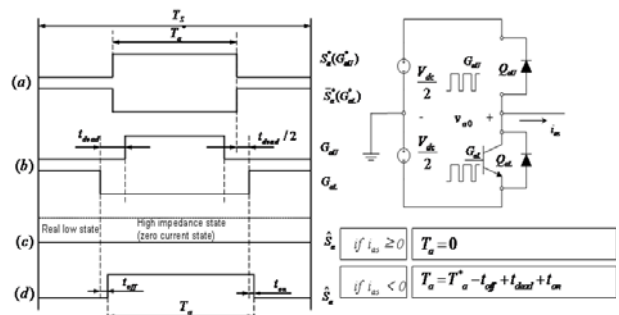


그림 3 상단 스위치 개방 고장시 스위칭 동작
Fig. 3 Switching action on the upper switch open fault

개방 고장 감지 시 발생될 수 있는 감지 전압 오차에 따라 설정 값을 바꾸어 주어야한다. 단자 전압 오차 관측 시 발생될 수 있는 감지 오차는 공칭 파라미터를 활용하여 계산된 상 전압 오차에 기인한다. 일반적으로 공칭 파라미터 중 저항과 자속 쇄교량은 온도에 따라 변화한다. 각 온도계수의 값은 구리 저항의 경우 0.393%/°C Ferrite의 경우 -0.18%/°C의 변화를 가진다. 일반적으로 권선의 저항 오차는 그 값이 작으므로, 상 전압 오차에 미치는 영향이 작으나, 공극 자속의 값은 고속의 경우 감지 오차에 큰 영향을 미칠 수 있다. 이에 따라 K값은 저속 운전 시 작게 설정하고, 고속 운전시 그 값을 다소 크게 설정하는 것이 좋다.

5. 모의해석 결과

제안된 방법의 효용성을 확인하기위해 모의해석을 실시하였다. 모의 해석 및 실험에서 사용된 영구자석 동기전동기의 파라미터와 인버터에 사용된 전력용 반도체의 파라미터를 표1과 표2에 각각 나타내었다.

표 1 제어 대상 전동기의 사양
Table 1 Specification of test motor

Rated power	750[W]	Number of poles	8
Rated torque	2.4[Nm]	Rated speed	3000[rpm]
Stator resistance	0.49[Ω]	Rated current	6.0[A]
Linkage flux	0.0667[Wb]	Stator inductance	6.9[mH]

표 2 인버터의 주요 사항
Table 2 Specification of drive system

DC link voltage(V_{dc})	310[V]	Switching period	120[μ Sec]
Dead time	3[μ Sec]	Switching device	IGBT
Turn-on time*	0.8-2.0[μ Sec]	Turn-off time*	2.0-2.9[μ Sec]
Saturation voltage*	1.8-2.7[V]	Forward Voltage	2.2-3.3[V]

모의해석에서 사용된 각 인버터 파라미터는 다음과 같다. PWM 주파수는 5kHz, PWM 주기 T_s 는 200 μSec이다. 파워 스위칭 소자인 IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)의 순방향 전압 강하는 1.8V, 역 병렬로 연결된 다이오우드(Diode)의 전압 강하는 2.2V로 가정하였다. 또한 파워 스위칭 소자의 턴 온 시간(Turn on Time)은 1.4μSec 턴 오프 시간(Turn off

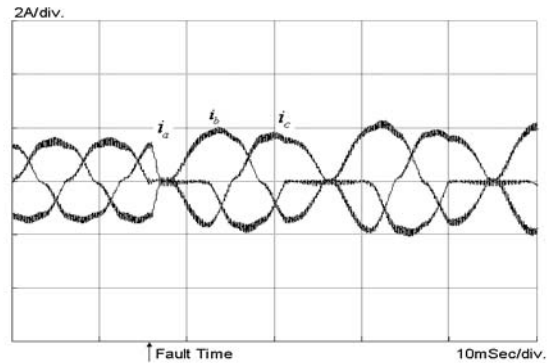


그림 4 상단 스위치 개방 고장시 상전류 모의해석 파형
Fig. 4 Simulation waveform for phase current on the upper switch open fault

Time)는 2.45μSec 그리고 데드 타임(Dead time)은 3.0 μSec로 설정하였다. 또한 운전 조건에 대한 파라미터는 다음과 같다. 전동기의 운전 rpm은 800rpm, 전류 제어 모드로 해석하였으며, 전류 명령은 q축 전류 명령이 1.5A, d축 전류 명령은 0A로 설정하였다.

그림 4는 운전 중 상단 스위치 개방 고장 시 상전류 파형에 대한 모의 해석 결과이다. 그림에서 나타난 화살표는 고장이 발생하는 고장 시간(Fault time)을 뜻하며, 이 때 윗 단의 IGBT에서 개방 고장이 발생하는 것으로 가정하여 모의 해석을 실시하였다. IGBT의 개방 고장 발생시, 고장 상의 양의 전류는 단자 전압에 양의 전압이 인가되지 않아 급격히 0A로 줄어든다. 한편 윗 단 스위치 개방 고장이 발생되더라도, 음의 전류는 정상적으로 흐른다. 또한 고장 상 이외의 다른 상의 전류는 정상적인 형태를 가지며, 고장 상으로 인하여 감소된 q상의 전류를 보상하기위해 다소 상승하는 경향을 보인다.

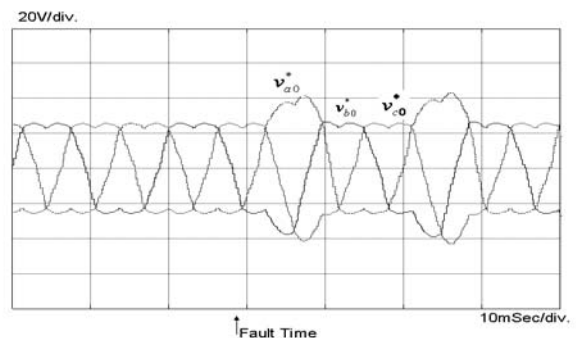


그림 5 상단 스위치 개방 고장 시 각 단자 전압 명령
Fig. 5 Simulation waveform for terminal voltage command on the upper switch open fault

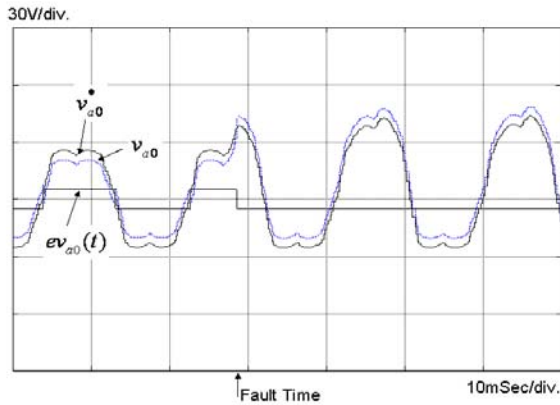


그림 6 상단 스위치 개방 고장 시 계산된 단자 전압 오차
Fig. 6 Simulation waveform for calculated terminal voltage error on the upper switch open fault

그림 5는 상단 스위치 개방 고장 시 각 상의 단자 전압 명령을 나타내었다. 각 단자 전압 명령이 발생하는 과정은 다음과 같다. 전류 제어기에 의해 전류 오차로부터 d상과 q상의 전압 명령이 생성되며, a,b,c상의 상 단자 전압 명령으로 변환된다. 고장이 발생되기 전, 각 상의 단자 전압 명령은 0을 기준으로 상하 대칭 구조를 가지며 120도의 위상차로 발생된다. 이 때 개방 고장이 발생하게 되면, 개방 고장이 발생한 상 전류 값이 0이 된다. 이에따라 전류 제어기는 개방 고장이 발생한 상 전류 명령을 증가시키고, 단자 전압 명령도 증가 된다.

그림 6은 상단 스위치 개방 고장 시 단자 전압 명령과 식 (8)에서 계산된 단자 전압 오차를 나타내었다. 정상적인 인버터 동작의 경우 식 (8)에서와 같이 전류 방향에 따라 그 값이 달라지며, 실제 인가된 단자 전압은 전압 명령보다 다소 작은 값을 갖게 된다. 한편 인버터의 개방 고장이 발생하게 되면, 전류는 그림 4에서와 같이 한방향의 전류만을 갖게 되고, 이에 따라 계산된 단자 전압 오차는 일정한 음의 값을 유지하게 된다.

그림 7은 상단 스위치 개방 고장 시 고장 감지에 대한 모의해석 결과이다. 여기서는 식 (8)에 의해서 계산된 단자 전압 오차와 식 (13)으로부터 관측된 단자 전압 오차를 비교하였다. 인버터의 스위치가 정상적인 경우 계산된 단자 전압과 관측된 단자 전압 값은 거의 일치함을 알 수 있다. 다만 관측된 단자 전압은 저역 통과 필터가 적용되어있으므로 약간의 위상 지연이 발생된다. 한편, a상에서 개방 고장이 발생되면, 전동기

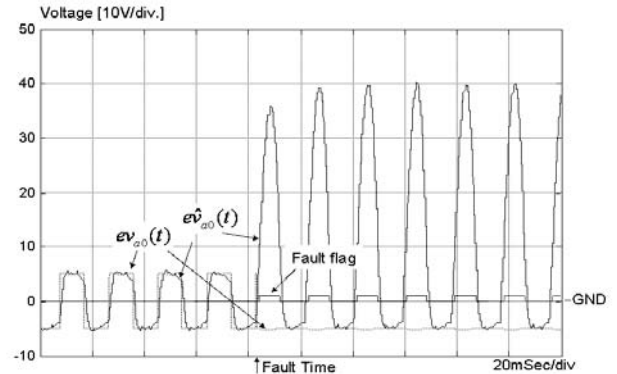


그림 7 상단 스위치 개방 고장 시 고장 감지 (모의해석)
Fig. 7 Simulation waveform for calculated terminal voltage error on the upper switch open fault

의 단자 전압은 단자 전압 명령과 다른 값을 갖게 되고 전압 왜곡을 발생시킨다. 이에 따라 관측된 단자 전압 오차는 큰 값을 갖게 되고, 계산된 단자 전압 오차와 관측된 단자 전압 오차를 비교하여 특정 상에서 개방 고장이 발생되었는지를 확인할 수 있다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 개방 고장이 발생되면, 개방 고장 신호를 발생되게 되며, 본 모의해석에서는 식 (15)의 K값을 2로 설정하여 모의해석을 실시하였다. 이에따라 그림에서 보는 바와 같이 개방 고장이 발생하는 즉시 인버터의 개방 고장을 감지함을 알 수 있다.

6. 실험 결과

제안된 인버터 개방 고장 감지 방법의 실제 적용 가능성 여부를 확인하기 위해 모의해석과 동일한 조건에서 실험을 실시하였다. 인버터의 개방 고장 상태는 고장 시점에서 단자 전압 명령에 관계없이 IGBT의 게이트 구동 신호 (Gate Drive Signal)을 인가하지 않는 형태로 개방 고장을 모사하였다.

그림 8은 a상의 상단 스위치 개방 고장 시 상전류 파형을 나타낸 것이다. 개방 고장이 발생하였을 때, 해당 상의 전류는 해당 스위치의 고장에 의해 전류가 흐르지 않으며, 다른 상의 전류는 고장 상의 전류 감소를 보상하기 위해 전류가 증가된다. 이는 그림 4의 모의해석결과와 동일한 경향을 보이고 있다.

그림 9는 상단 스위치 개방 고장 시 각 단자의 전압 명령을, 그림 10은 단자 전압 명령과 식 (8)로부터 계

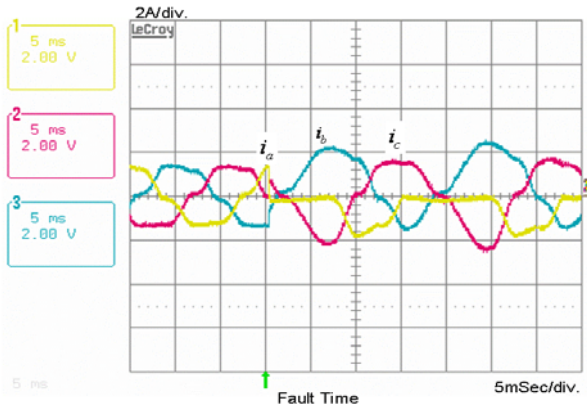


그림 8 상단 스위치 개방 고장 시 상 전류 파형
 Fig. 8 Experimental results for phase current on the upper switch open fault

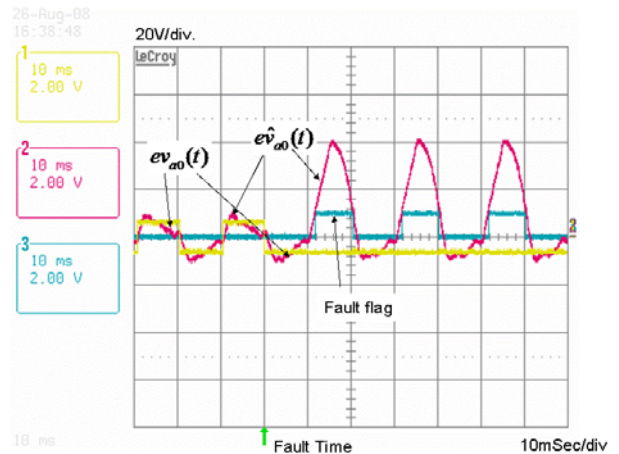


그림 11 상단 스위치 개방 고장 시 고장 감지(실험결과)
 Fig. 11 Experimental waveform for calculated terminal voltage error on the upper switch open fault

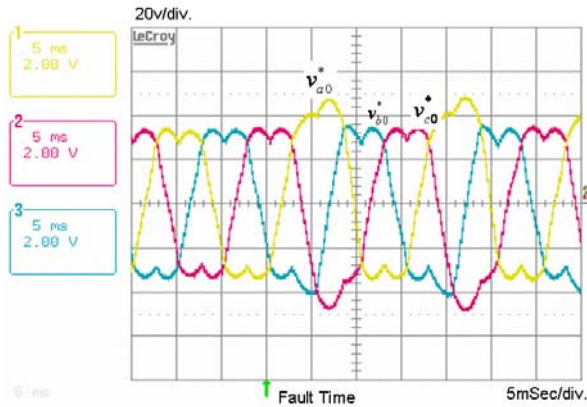


그림 9 상단 스위치 개방 고장 시 각 단자 전압 명령
 Fig. 9 Experimental waveform for terminal voltage command on the upper switch open fault

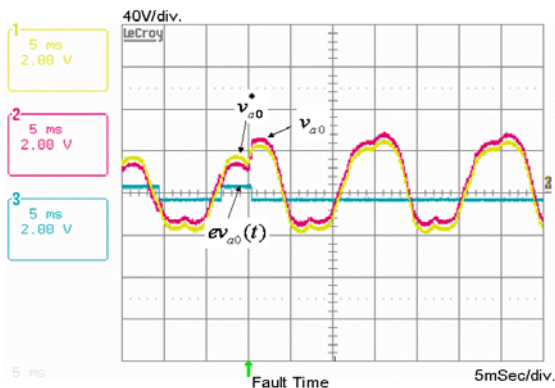


그림 10 상단 스위치 개방 고장 시 계산된 단자 전압 오차
 Fig. 10 Experimental waveform for calculated terminal voltage error on the upper switch open fault

산된 정상 스위치 상태로 가정하여 계산된 단자 전압 오차를 각각 나타내었다. 그림 9는 a상의 상단 스위치 고장 발생시점에서 a상 및 이에 대응되는 다른 상의 전압 명령이 상승됨을 알 수 있으며, 이는 모의 해석 결과와 일치한다. 또한 그림 10에서 개방 고장 발생 시 계산된 단자 전압 오차는 모의 해석 결과와 동일하게 일정한 값을 가짐을 알 수 있다.

그림 11은 계산된 단자 전압 오차와 관측된 단자 전압 오차에 대한 실험 결과이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 인버터가 정상적으로 운전되는 경우 식 (8)에서 계산된 단자 전압과 식 (13)에 의해 관측된 단자 전압은 다소 오차가 발생되고 있으나, 그 차이는 작고, 이에 따라 고장 감지 신호가 발생되지 않는다. 그러나 인버터의 개방 고장 발생 시, 관측된 전압 오차가 식 (8)로부터 계산된 전압 오차에 비해 매우 큰 값을 가지며, 이에 따라 개방 고장 신호가 발생된다. 실험 결과로부터 감지 특성은 모의 해석과 같이 매우 빠른 응답 특성을 가진다는 것을 확인할 수 있다.

7. 결 론

본 논문에서는 새로운 인버터의 개방 고장 감지 방법을 제안하고, 제안된 방법을 활용한 인버터의 개방 고장 감지 방법에 대한 모의해석 및 실험을 실시하였다. 기존의 인버터 개방 고장 감지 방법은 인버터에서 전동기로 인가되는 전압을 감지하기 위한 별도의 센서를 요구하거나, 간접적인 전류 감지를 통한 방법으로 인한 감지 지연 및 감지의 정확도 등의 문제가 있었

다. 본 논문에서는 별도의 하드웨어 없이 빠른 감지 특성을 갖는, 간단한 인버터 개방 고장 감지 방법을 제안하였다. 제안한 방법에 대하여 특정상의 특정 스위치가 개방 고장을 일으키는 조건에 대하여 모의 해석을 실시하였고, 고장 발생 시 빠르게 개방 고장을 감지함을 확인하였다. 또한 같은 조건으로 실험을 실시하여 개방 고장을 모사하고, 개방 고장 모사 시점에서 빠르게 개방 고장을 감지함을 확인할 수 있었다.

이 논문은 2008년도 충주대학교 교내 학술연구비의 지원을 받아 수행한 연구임.

감사의 글

본 연구의 실험 수행에 많은 도움을 주신 한국과학기술원의 정신명, 박진식님께 감사드립니다.

참 고 문 헌

[1] Jingwei Zhu, Nesimi Ertugrul and Wen Liang Soong, "Detection and Remediation of Switch Faults on a Fault Tolerant Permanent Magnet Motor Drive with Redundancy", *2007 Second IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*.

[2] Debaprasad Kastha and Bimal K. Bose, "Investigation of Fault Modes of Voltage-Fed Inverter System for Induction Motor Drive", *IEEE Trans. On Industrial Applications*, Vol. 30, No. 4, 1994, July/August.

[3] Ricardo Lucio de Araujo, Cursino Brandao Jacobina, Edison Roberto Cabral da Silva and Antonio Marcus Nogueira Lima, "Fault Detection of Open-Switch Damage in Voltage-Fed PWM Motor Drive Systems", *IEEE Trans. On Power Electronics*, Vol. 18, No. 2, 2003, March.

[4] Raphael Peuguet, Stephane Courtine and Jean-Pierre Rignon, "Fault Detection and Isolation on a PWM Inverter by Knowledge-Based Model", *IEEE Trans. On Industry Applications*, Vol. 34, No. 6, 1998, Nov.

[5] H.-W. Kim, H.-S. Kim, M.-J. Youn and K.-Y. Cho, "Online Observation and Compensation of Voltage Distortion in PWM for PMSM", *IEEE Proc.-Electr. Power Appl.*, Vol. 151, No. 5, 2004, Sep.

[6] Byoung-Gun Park, Tae-Sung Kim, Ji-Su Ryu and

Dong-Seok Hyun, "Fault tolerant Strategies for BLDC Motor Drives under Switch Faults", *IEEE IAS Annual Meeting*, Tampa, Florida, 2006, Oct.

[7] 김학원, 윤명중, 김현수, 조관열 "영구자석 동기전동기 구동을 위한 전압원 인버터의 적응제어기법을 이용한 전압 왜곡 관측 및 보상", *전력전자학회 논문지*, 제10권, 제1호, pp. 52-60, 2005. 2.

[8] Jong-Woo Choi and Seung-Ki Sul, "A New Compensation Strategy Reducing Voltage/Current Distortion in PWM VSI systems Operating with Low Output Voltages", *IEEE Trans. On Industry Applications*, Vol. 31 No. 5, 1995, Sept./Oct.

저 자 소 개



김학원(金學源)

1968년 3월 30일생. 1989년 고려대 전기공학과 졸업. 1991년 한국과학기술원 전자전산학과 졸업(석사). 2005년 동 대학원 전자전산학과 졸업(공학박). 1991년~2008년 LG전자(주) 디지털 어플라이언스 연구소 책임연구원. 현재 충주대 정보제어공학과 전임강사.