

## 스파스 매트릭스 컨버터의 간단한 개방 사고 검출 기법

이은실<sup>1</sup>, 이교범<sup>†</sup>, 정규범<sup>2</sup>A Simple Open-Circuit Fault Detection Method  
for a Sparse Matrix ConverterEunsil Lee<sup>1</sup>, Kyo-Beum Lee<sup>†</sup>, and Gyu-Bum Joung<sup>2</sup>

**Abstract** - This paper presents a diagnostic method for a sparse matrix converter that detects faults in any single switch or a pair of switches. The sparse matrix converter is functionally equivalent to the standard matrix converter but has a reduced number of switches. The proposed diagnostic method is based in the measurement of input and output currents. The currents have respective characteristic according to the location of faulty switches. This method not only detects the switches of open-circuit fault but identifies the location of the faulty switching devices without complicated calculations. The simulation and experimental results verify that, based on the proposed method, the fault of sparse matrix converter can be easily and fast detected.

**Keywords:** matrix converters, fault diagnosis, fault location, open-circuit fault, current patterns

## 1. 서 론

매트릭스 컨버터는 직류단에 에너지 저장소자 없이 일정한 교류를 원하는 크기와 주파수의 교류로 직접 변환해주는 전력 변환 시스템이다. 매트릭스 컨버터는 에너지 저장소자의 부재로 인해 비교적 높은 온도/압력에서의 구동이 가능하며, 전력 회로가 간단하고 4상한 운전이 가능하다. 또한 정현적인 입력 전류를 가질 수 있으며 부하의 형태에 관계없이 입력 역률을 제어할 수 있다. 일반적인 3상 매트릭스 컨버터는 18개의 절연 게이트 양극성 트랜지스터(Insulated-Gate Bipolar Transistor, IGBT)와 18개 다이오드로 구성된다<sup>[1]</sup>. 전류원 정류단이 전압원 인버터로 에너지 저장 소자 없이 직접 연결된 형태인 간접 매트릭스 컨버터 토폴로지와 기능은 동일하나 스위치의 개수를 줄인 스파스 매트릭스 컨버터 토폴로지가 제안되어 왔다<sup>[2,3]</sup>.

현재까지 매트릭스 컨버터 분야는 변조 기법, 정류 기법, 낮은 전압 전달률의 극복, 고조파의 영향 등에 대해

중점적으로 연구되어 왔다<sup>[4-8]</sup>. 전력용 반도체로 구성된 스위치 또는 그에 따른 게이트 드라이버 회로는 전력 변환 시스템에서 쉽게 파괴될 수 있으므로 신뢰성의 향상 문제가 대두되고 있다. 이러한 소자의 고장은 컨버터의 1차/2차적인 고장을 발생시키며, 전체 시스템의 중단과 비싼 수리비용의 결과를 가져온다. 그러므로 전력 변환 시스템에서는 고장의 진단, 분류 및 허용 제어는 필수적인 과정이라고 할 수 있다.

현재까지 고장진단 알고리즘에 대한 연구는 인버터 기반 시스템에 적용되어왔다<sup>[9-14]</sup>. 대부분의 기법은 전류의 측정을 통해 Park's 벡터 기반으로 연구되었다<sup>[15]</sup>. 그러나 매트릭스 컨버터에 대한 고장 진단 기법에 대한 연구는 아직 미비하다.

매트릭스 컨버터의 고장 상황에 대한 진단 방법으로는 9개의 양방향 스위치에 배정된 9개의 전압 오차를 관찰하는 알고리즘을 기반으로 하는 고장 진단 기법이 있다<sup>[16,17]</sup>. 전압 오차 신호는 측정된 입력과 출력 전압의 간단한 비교를 통하여 구할 수 있다. 또한 개방 스위치 고장 상황에서 제어를 허용하는 매트릭스 컨버터의 구조와 변조 기법을 제안하였다<sup>[18,19]</sup>. 이 구조에서는 고장난 스위치가 존재하는 상의 모든 스위치가 꺼지고 부하의 중성점과 전원의 중성점이 연결 된다. 이러한 진단 기법은 추가적인 하드웨어, 즉 출력단의 전압 센서의 사용이 요구되는 특징을 가지며, 시스템의 비용과 부피의 증가를 가져온다.

Paper number: TKPE-2013-18-3-3 ISSN: 1229-2214

<sup>†</sup> Corresponding author: kyl@ajou.ac.kr, Div. of Electrical & Computer Eng., Ajou Univ.

Tel: +82-31-219-2376 Fax: +82-31-212-9531

<sup>1</sup> Dept. of Electrical & Computer Eng., Ajou Univ.

<sup>2</sup> Dept. of Electricity and Electrical Eng., Woosuk Univ.

Manuscript received Oct. 12, 2012; accepted Feb. 5, 2013

다른 방식으로는 9개의 변조된 오차 전압의 절대 값을 통한 고장 진단 방법이 있다<sup>[20,21]</sup>. 이러한 오차 전압은 매트릭스 컨버터의 측정된 전압과 추정된 전압의 차이를 계산하여 구할 수 있다. 또한 저자는 최적 Alesina-Venturini 변조를 통한 매트릭스 컨버터의 구동에서의 새로운 스위치 개방 사고의 고장 진단 방법을 제안하였으나 이 방법 역시 추가적인 센서를 요구한다<sup>[22]</sup>.

본 논문에서는 간접형 매트릭스 컨버터 중에서 스파스 매트릭스 컨버터의 스위치 개방 사고를 Park's 벡터를 기반으로 진단할 것이다<sup>[23]</sup>. 2장에서는 스파스 매트릭스 컨버터의 토폴로지에 대하여 살펴보고, 3장에서는 스파스 매트릭스 컨버터의 동작과 스위치 개방 사고 시 발생하는 현상에 대하여 알아볼 것이다. 4장에서는 개방 사고 발생 시 진단하는 방법에 대하여 서술하고 마지막으로 제한한 방법을 시뮬레이션과 실험을 통하여 검증한다.

### 2. 3상 스파스 매트릭스 컨버터

일반적인 3상 매트릭스 컨버터는 18개의 IGBT와 18개의 다이오드로 구성되어 있다. 3상 스파스 매트릭스 컨버터는 12개의 IGBT와 30개의 다이오드로 그림 1과 같이 구성된다. 이러한 스파스 매트릭스 컨버터는 스위치의 개수는 줄었지만 기존의 매트릭스 컨버터와 기능은 동일하다.

전원이 있는 입력 부분을 정류단이라 하고 부하가 있는 출력 부분을 인버터단이라 하며, 이 둘 사이의 직류단에는 어떠한 에너지 저장장치도 존재하지 않는다. 정류단은 하나의 스위치 반도체와 4개의 다이오드로 구성된 각각의 조합들이 양방향 스위치로 동작한다. 인버터단은 기존의 6-스위치 인버터와 같은 동작을 한다.

#### 2.1 정류단

정류단에서의 변조의 목적은 직류단에서 양의 전압을 유지하며 정현적인 입력 전류와 단위 입력 역률을 유지하는 것이다. 직류단에서 최대 전압을 생성하기 위해서 절대값이 가장 큰 입력전압은 그림 2와 같이 각  $\pi/3$  구간에서 양의 극 또는 음의 극으로 연결된다. 예를 들어  $-\pi/6 \sim \pi/6$  구간에서, 입력전압  $u_a$ 의 순시 값은 양의 값이며  $a$ 상의 위 쪽 스위치가 온 된다. 반면에 입력 전압  $u_b$ 과  $u_c$ 은 음의 값으로  $b$ 상과  $c$ 상은 아래의 스위치가 온 된다. 이 구간에서 다른 모든 스위치들은 오프가 된다. 그러므로 직류단 전압은 정류단에서 입력 전압의 가장 큰 전압과 두 번째로 큰 전압의 스위칭을 통해 생성된다. 변조를 통한 통류율은 다음과 같다.

$$d_{ab} = -\frac{\bar{i}_b}{i_a} = -\frac{u_b}{u_a}, d_{ac} = -\frac{\bar{i}_c}{i_a} = -\frac{u_c}{u_a}, d_{ab} + d_{ac} = 1 \quad (1)$$

여기서 입력 전압은 평형하다고 가정한다.

이와 유사하게 다른 모든 구간에서도 통류율을 구할 수 있다.

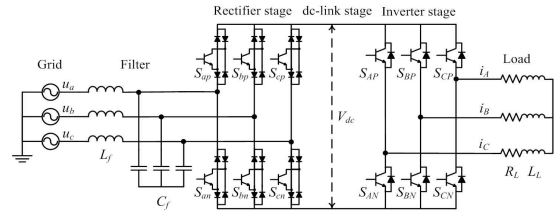


Fig. 1 Schematic for the sparse matrix converter

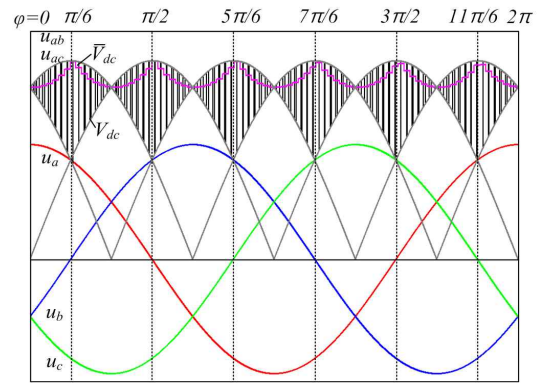


Fig. 2 The waveforms of dc-link voltage and switching states of rectifier stage according to the input phase voltages

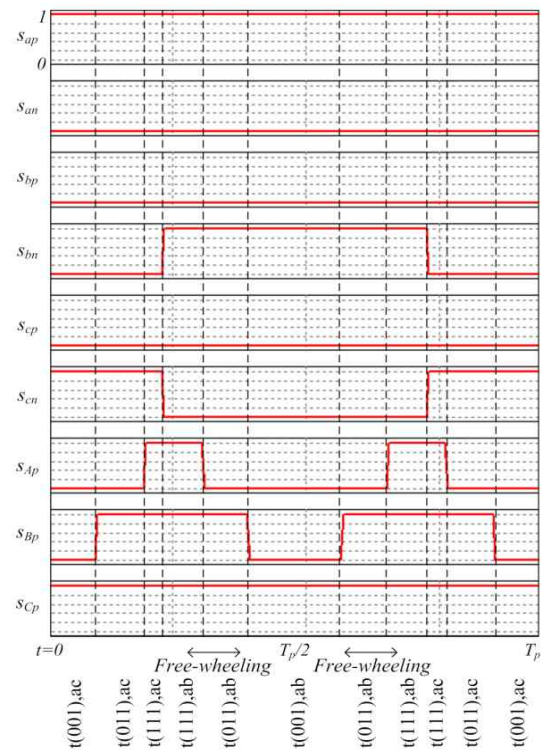


Fig. 3 An example of the switching sequence in the rectifier and inverter stage for the sparse matrix converter in a sampling period

### 2.2 인버터단

스파스 매트릭스 컨버터의 인버터단은 기존의 6-스위치 인버터와 같으므로, 기존의 PWM 기법을 사용할 수 있다. 단, 인버터단은 free-wheeling 상태로 스위치 될 때에만 직류단의 전류가 영이 되어 정류단이 정류를 할 수 있다.

예를 들어,  $-\pi/6 \sim \pi/6$  구간에서 유효 전압 공간 벡터  $V_1(001)$  와  $V_2(011)$ , free-wheeling 상태 벡터  $V_7(111)$  로 구성된 기존의 SVPWM 기법에서 고려하면 통류율은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} d_{(001)} &= m_i \cdot \sin\left(\frac{\pi}{3} - \theta_{inv}\right), \\ d_{(011)} &= m_i \cdot \sin(\theta_{inv}), \\ d_0 &= 1 - (d_{(001)} + d_{(011)}) \end{aligned} \tag{2}$$

여기서  $\theta_{inv}$  은 지령 전압 벡터의 각도이며  $m_i$ 는 인버터의 변조 지수이다.

유사하게 다른 모든 구간에서도 통류율을 구할 수 있으며 전체의 통류율은 정류단과 인버터단의 곱을 통해 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} d_{(011),ab} &= d_{ab} \cdot d_{(001)}, d_{(001),ac} = d_{ac} \cdot d_{(001)}, \\ d_{(011),ab} &= d_{ab} \cdot d_{(011)}, d_{(011),ac} = d_{ac} \cdot d_{(011)}, \\ d_{(111),ac} &= d_{ab} \cdot d_0, d_{(111),ac} = d_{ac} \cdot d_0 \end{aligned} \tag{3}$$

그림 3에서 보듯이, 인버터단의 스위칭 주파수는 정류단 스위칭 주파수보다 두 배 빠른 것을 알 수 있다.

### 3. 스파스 매트릭스 컨버터의 개방 사고

매트릭스 컨버터의 고장 형태는 스위치 단락 사고와 개방 사고로 분류할 수 있다<sup>[12]</sup>. 본 논문에서는 스위치의 개방 사고에 대하여 다룰 것이다. 여기서 다루는 고장은 스위치의 물리적인 고장 또는 게이트 구동 회로의 고장일 수 있다. 개방 사고가 발생하면, 전압과 전류는 크게 왜곡되고 이로 인해 다른 스위치나 인버터, 또는 부하 등에 안 좋은 영향을 줄 수 있다.

#### 3.1 정류단 스위치의 개방 사고

스파스 매트릭스 컨버터의 정류단의 스위치는 하나의 스위치 반도체와 4개의 다이오드가 조합되어 하나의 양방향 스위치와 같이 동작하므로, 두 개의 IGBT의 개방 사고와 동일한 현상을 가져온다. 이 경우 개방 사고가 발생한 스위치의 상의 입력 전류는 음의 값 또는 양의 값 만을 가지게 된다. 정류단의 스위치  $S_{ap}$ 의 개방 사고가  $t = 0.05s$  에서 발생하면 입력과 출력 전류, 그리고 직류단 전압은 그림 4의 (a)와 같은 결과가 나타난다. 개방 사고가 난 상의 입력 전류는 음의 값만을 나타낸다.

이렇게 정류단의 스위치 개방 사고가 발생하면 입력 전류와 출력 전류가 모두 왜곡되어 더 이상 정현적이지도, 평형하지도 않은 것을 볼 수 있다. 또한 직류단의 전압 역시 왜곡되는 것을 볼 수 있다.

#### 3.2 인버터단 스위치의 개방 사고

인버터단 스위치의 개방 사고가 발생하면 그림 4의 (b)와 같이 출력 전류의 왜곡이 발생한다. 그림 4의 (b)는 인버터단 스위치  $S_{Ap}$ 의 개방 사고가 발생한 경우의 파형이다. 이 역시 입력 전류와 출력 전류의 큰 왜곡을 발생시키는 것을 볼 수 있으나, 정류단에서의 개방 사고 발생과 달리 직류단 전압의 왜곡은 거의 없음을 볼 수 있다.

### 4. 제안하는 개방 사고 진단 기법

본 논문에서 제안하는 기법은 출력 전류 패턴의 변화를 감지하여 개방 사고를 검출하는 방법이다. 이를 위해 필요한 정보는 전류 패턴의 모양, 넓이 그리고 중심각도이다. 또한 사고 난 스위치의 위치를 알기 위해서는 직류단 전압 값 역시 필요하다.

#### 4.1 개방 사고의 발견

스파스 매트릭스 컨버터의 개방 사고 진단은 입력과 출력 전류의 측정을 기반으로 한다. 측정된 3상의 전류들은 정지 좌표계 변환을 통해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$i_d = \frac{2i_a - i_b - i_c}{3}, i_q = \frac{i_b - i_c}{\sqrt{3}} \tag{4}$$

입력과 출력 전류를  $d-q$ 축 평면에 나타낼 수 있으며, 그림 5는 인버터단 스위치의 개방 사고에 따른 출력 전류의 패턴을 나타낸다. 일반적인 상태에서의 출력 전류는 일정한 원의 형태로 나타나지만, 인버터단의 스위치가 하나라도 고장이 나면 출력 전류는 더 이상 원의 형태가 아니다. 또한 고장 난 스위치에 따라서 모양과 각도가 다른 것을 볼 수 있다. 만일 하나의 스위치에서 개방 사고가 발생한 경우에는 반원 형태의 출력 전류 파형을 보이며, 두 개의 스위치가 동시에 고장 난 경우에는 부채꼴 혹은 선 모양의 전류 파형을 나타냄을 알 수 있다. 그러므로 이러한 출력 전류의 패턴을 통해 인버터단 스위치의 개방 사고를 진단할 수 있으며, 유사하게 정류단 스위치의 개방 사고 역시 입력 전류의 패턴을 통해 알 수 있다.

전류 패턴의 넓이는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$S = \sum_{i=0}^n S_i = \sum_{i=0}^n \frac{\pi r_i^2 \rho}{360} \tag{5}$$

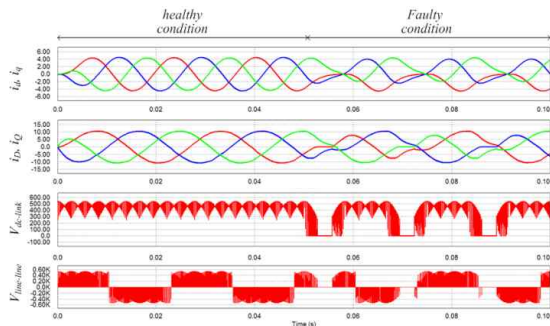
여기서,  $\rho = \rho_{i+1} - \rho_i$ 는 중심각도이고,  $r = \sqrt{i_d^2 + i_q^2}$ 은 전류 패턴의 반지름이다. 넓이  $S$ 는 한 주기 동안 측정된 전류의 값들의 합으로 구할 수 있다.

전류 패턴의 넓이를 이용하여 그림 5와 같이 스위치의 고장을 구분할 수 있다.

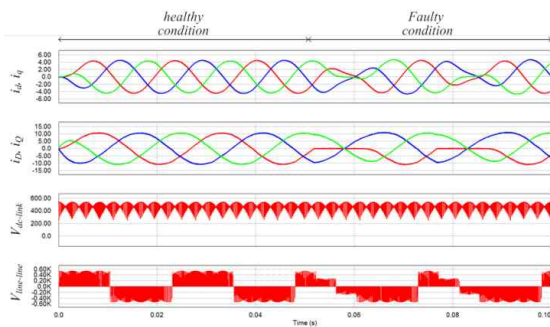
**4.2 고장 난 스위치의 판별**

먼저 스파스 매트릭스 컨버터의 개방 사고 진단을 위해서 직류단 전압값이 필요하다. 이 값을 통해 스위치의 고장이 정류단에서 발생하였는지, 인버터단에서 발생하였는지 알 수 있다. 만일 정류단의 스위치에서 개방 사고가 발생한 경우, 직류단의 전압에는 큰 왜곡이 발생한다. 반면 인버터단의 스위치에서 개방 사고가 발생한 경우에는 그 영향이 미비하다.

다음으로 전류 패턴의 중심각도 필요하다. 이 각도 정보를 통해서 고장 난 스위치의 위치를 정확히 파악할 수 있다. 이 각도는 전류 패턴의 무게 중심과 평면상의 수평축 사이의 각도를 통해 구할 수 있다. 전류 패턴의 최대값과 최소값을 통해 무게 중심을 구할 수 있으며 각도는 다음과 같다.



(a) fault of  $S_{ap}$



(b) fault of  $S_{Ap}$

Fig. 4 The input (2A/div) and output (5A/div) current, voltage in dc-link (100V/div), and output line-to-line voltage (200V/div) waveforms of sparse matrix converter with the open-circuit fault introduced at  $t = 0.05s$ .

Output current		
Normal		
$S_{Ap}$ Fault	$S_{An}$ Fault	$S_{Bp}$ Fault
$S_{Bn}$ Fault	$S_{Cp}$ Fault	$S_{Cn}$ Fault
$S_{Ap}, S_{An}$ Fault	$S_{Bp}, S_{Bn}$ Fault	$S_{Cp}, S_{Cn}$ Fault
$S_{Ap}, S_{Bp}$ Fault	$S_{Ap}, S_{Bn}$ Fault	$S_{Ap}, S_{Cp}$ Fault
$S_{Ap}, S_{Cn}$ Fault	$S_{An}, S_{Bp}$ Fault	$S_{An}, S_{Bn}$ Fault
$S_{An}, S_{Cp}$ Fault	$S_{An}, S_{Cn}$ Fault	$S_{Bp}, S_{Cp}$ Fault
$S_{Bp}, S_{Cn}$ Fault	$S_{Bn}, S_{Cp}$ Fault	$S_{Bn}, S_{Cn}$ Fault

Fig. 5 The shape of the output current trajectory in the  $d-q$  plane of the according to the location of faulty switches in inverter stage

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{i_{q(mid)}}{i_{d(mid)}} \right) \quad (6)$$

여기서  $i_{d(mid)} = 0.5(i_{d(max)} + i_{d(min)})$ 는 전류의 한 주기 동안  $d$ 축의 중심값이며  $i_{q(mid)} = 0.5(i_{q(max)} + i_{q(min)})$ 는  $q$ 축의 중심값이다(그림 6 참조).

이와 같은 방법으로 각각의 스위치의 개방 사고를 판별할 수 있다. 그림 7은 스파스 매트릭스 컨버터의 스위치 개방 사고 진단 방법의 과정을 나타낸다. 측정된 3상의 입력과 출력 전류는 정지 좌표계로 좌표변환하여 이를  $d-q$  평면에 나타내어 전류의 패턴 정보와 직류단 전압의 값을 통해 고장 난 스위치의 위치를 정확하고 쉽게 진단할 수 있다.

또한 AC 드라이브 시스템의 가변속과 같이 전류의 크기가 변하는 경우에는 전류를 단위 크기로 정규화 하여 같은 방법으로 적용할 수 있다<sup>[24]</sup>.

### 5. 시뮬레이션

제안한 개방 사고 진단 기법의 효용성을 검증하기 위하여, PSIM 툴을 이용하여 스파스 매트릭스 컨버터를

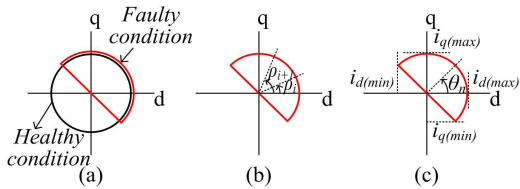


Fig. 6 Definition of the detection parameters. (a) different shape, (b) calculation of surface, and (c) angle of pattern

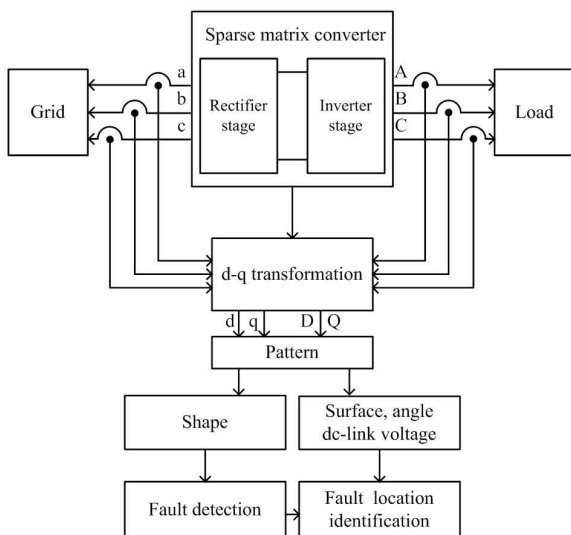


Fig. 7 Block diagram of the diagnosis method of open-circuit fault for sparse matrix converter

시뮬레이션 하였다. 시스템은 평형 3상 입력 전압 380  $V_{rms}$ , 60Hz 과 10Ω, 30mH 의 부하로 구성하였다. 출력 주파수는 40Hz이며, 개방 사고 상태를 구현하기 위하여 스위칭 신호를 간단한 회로를 통해 0으로 인가하였다.

그림 8은 스파스 매트릭스 컨버터의 개방 사고 시의 출력 파형을 나타낸다. 여기서는  $t = 0.1s$  에서 개방 사고가 발생한 경우 정지 좌표계의 입력과 출력 전류와 전류의 패턴, 직류단의 전압, 그리고 고장 진단 신호를 나타낸다. 이 고장 진단 신호의 0은 일반적인 상태를 나타내고 각 숫자는 고장 난 스위치의 고유의 위치를 나타낸다. 그림 8의 (a)는 정류단 스위치  $S_{ap}$ 에서 개방 사고가 발생한 경우의 결과 파형이다. 측정된 입력 전류와 직류단 전압은 개방 사고가 발생하였을 경우 크게 왜곡

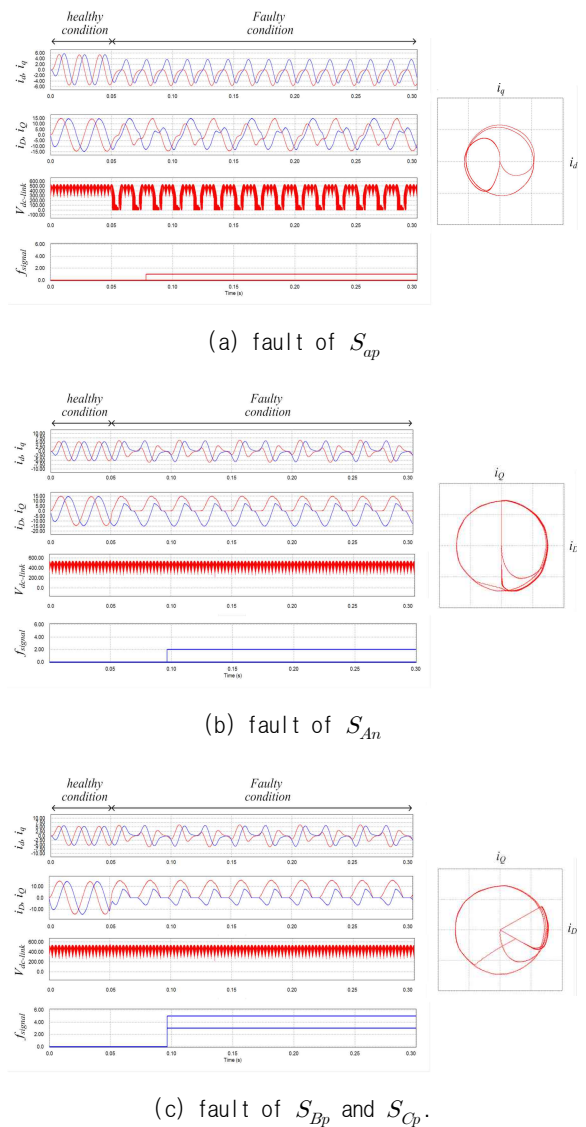


Fig. 8 Simulation results : stationary reference frame of input (2A/div) and output (5A/div) currents, dc-link voltage (100V/div), fault signal, and current pattern



되는 것을 알 수 있다. 직류단 전압이 왜곡되었다는 것은 정류단의 스위치에서 개방 사고가 발생하였다는 뜻이다. 따라서 입력 전류의 패턴의 변화가 발생하였을 것이다. 그림 8의 (a)에서는 입력 전류의 패턴은 반원의 형태를 가지고 중심 각도는 180°임을 볼 수 있다. 이를 통해 스위치  $S_{ap}$ 에서 개방 사고가 났음을 알 수 있다. 따라서 제안된 기법을 통해 스파스 매트릭스 컨버터의 개방 사고를 판별하고 그 위치까지 정확히 판단을 할 수 있다.

그림 8의 (b)는 인버터단의 스위치  $S_{An}$ 에서의 개방 사고가 발생하였을 경우의 파형을 나타낸다. 이 파형의 경우 앞의 파형과 다르게 직류단 전압의 왜곡이 거의 없음을 볼 수 있다. 이는 정류단 스위치에서의 개방 사고가 일어나지 않았음을 알려준다. 따라서 출력 전류의 패턴을 통해 고장 난 스위치의 위치를 알 수 있다. 여기서는 출력 전류가 중심각도 0°를 기준으로 반원의 모양을 나타낸다. 이는 스위치  $S_{An}$ 의 개방 사고임을 알려준다(그림 5 참조).

그림 8의 (c)는 인버터단의 스위치  $S_{Bp}$ 와  $S_{Cp}$ 의 개방 사고가 발생하였을 경우의 파형을 나타내며 그림 8의 (b)와 유사하지만, 전류 패턴의 모양이 부채꼴 형태임을 볼 수 있다. 이는 스위치 두 개의 개방 사고를 나타내는 것으로 중심각도를 통해  $S_{Bp}$ 와  $S_{Cp}$ 의 개방 사고임을 쉽게 알 수 있다(그림 5 참조). 이러한 전류의 패턴을 통해 개방 사고를 감지하는 데에 걸리는 시간은 적어도 전류의 한 주기가 소요되며, 과도상태에 대해서 고려하지 않았다. 매트릭스 컨버터의 경우 입력단과 출력단을 모두 고려하기 때문에 직류단의 전압을 측정하여 판단하는 시간도 고려되어야 한다. 그러므로 전체 시스템에서 스위치 개방 사고를 감지하는 시간은 전류의 1 주기 이상이 필요하다. 본 논문에서 제안한 고장진단 기법은 기존의 방법들에 비하여 느리다는 단점이 있지만, 추가적인 하드웨어가 필요하지 않으며 진단 방법이 간단하다는 장점이 있다<sup>[25]</sup>.

### 6. 실험

실험을 통해 제안한 기법을 검증하기 위하여 3상 스파스 매트릭스 컨버터 시스템을 구성하였다. 실험 장치는 그림 9과 같다. 그림 9의 (a)는 제어 보드와 전원, 그리고 센서 등을 나타낸다. 제어 보드는 TMS320F28335로 구성하였다. 그림 9의 (b)는 스파스 매트릭스 컨버터로 12개의 IGBT와 30개의 다이오드로 구성하였다.

그림 10은 일반적인 스파스 매트릭스 컨버터의 동작을 나타낸다. 파형은 직류단의 전압, 출력 선간 전압, 그리고 출력 3상 전류를 나타낸다.

그림 11은 스파스 매트릭스 컨버터의 개방 사고가 발생하였을 경우의 정지 좌표계에서의 입력과 출력 전류의 파형, 직류단 전압, 사고 판단 신호, 전류의 패턴을

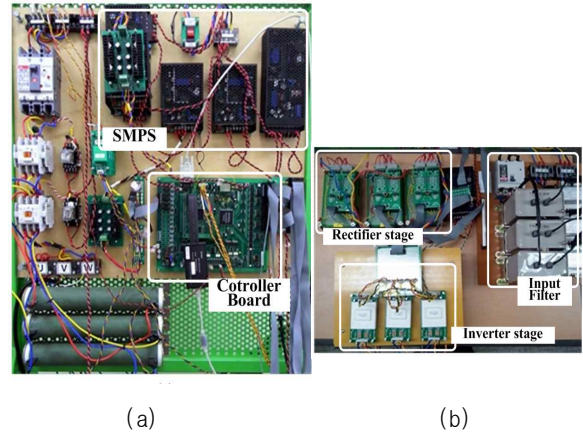


Fig. 9 Experiment setup. (a) control board and power supply and (b) rectifier stage and inverter stage of sparse matrix converter

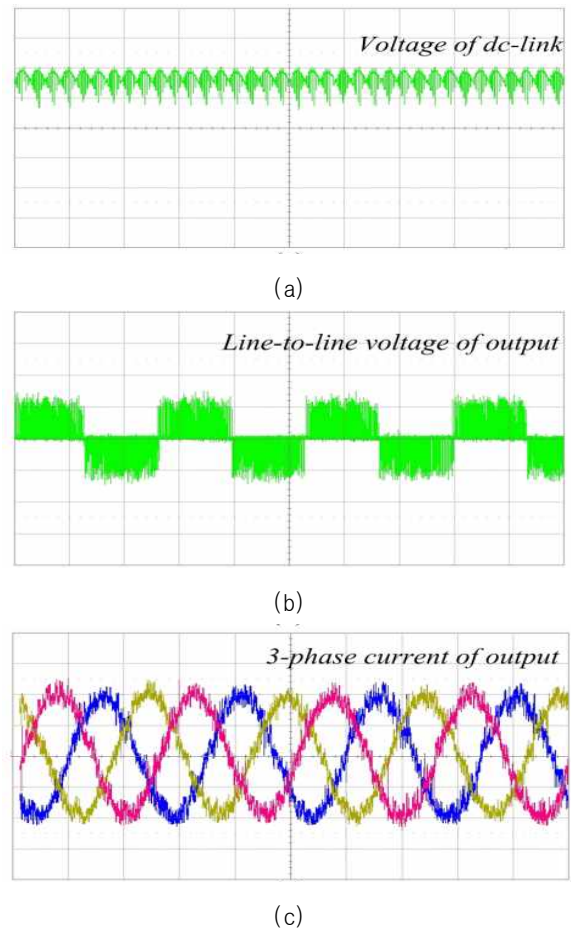


Fig. 10 Experimental waveforms of the instantaneous dc-link voltage, the output line-to-line voltage, and output three-phase currents

나타낸다. 그림 11의 (a)는 스파스 매트릭스 컨버터의 정류단 스위치  $S_{ap}$ 의 개방 사고가 발생할 경우의 결과 파형이다. 사고가 발생한 경우 직류단 전압이 왜곡됨을 한눈에 볼 수 있다. 사고 판단 신호는 0에서 1로 스위치  $S_{ap}$ 의 고장임을 나타낸다.

그림 11의 (b)는 인버터단의 스위치  $S_{An}$ 의 개방 사고가 발생하였을 경우의 파형이다. 전류 패턴의 정보와 직류단 전압의 값을 통해 사고 신호가 0에서 2로 변하는 것을 볼 수 있다. 이는 스위치  $S_{An}$ 의 사고임을 나타낸다.

그림 11의 (c)는 인버터단의 스위치  $S_{Bp}$ 와  $S_{Cp}$ 의 개방 사고가 발생하였을 경우의 파형을 나타내며 제안한 기법을 통해 고장 난 스위치의 위치를 정확히 파악할 수 있었다.

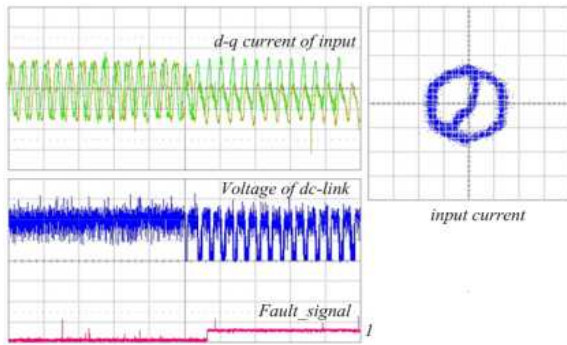
이러한 결과들을 통해 제안한 기법의 효용성 스파스 매트릭스 컨버터에 적용하여 검증하였다.

이 외의 다른 위치의 스위치들에 대하여도 그림 5와 같은 결과가 나왔으며, 본 논문에서의 파형은 생략한다.

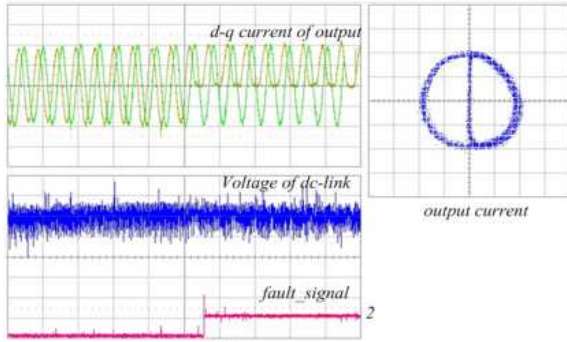
### 6. 결 론

본 논문에서는 스파스 매트릭스 컨버터의 스위치 고장 진단 방법을 제안하였으며, 시뮬레이션과 실험을 통해 유효함을 검증하였다. 본 논문에서는 스위치의 개방 사고가 발생하였을 경우에 대하여 고려하였다. 고장 난 스위치는 전류의 패턴과 직류단 전압을 통해 간단하고 정확하게 진단할 수 있다. 측정된 3상 전류는 정지 좌표계로 변환되어  $d-q$  평면에 나타낼 수 있다. 이 전류 패턴의 정보를 통해 고장 난 스위치의 위치를 파악할 수 있다. 이 기법은 복잡한 계산식이 필요하지 않다는 장점을 가진다.

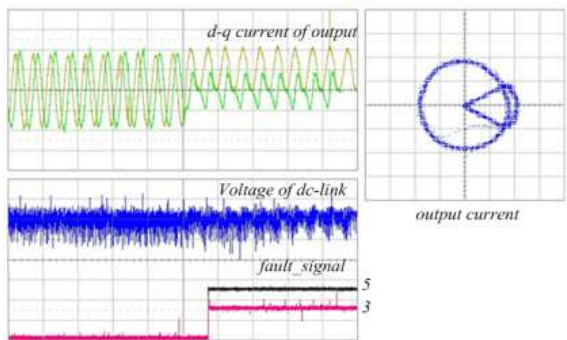
이 논문은 2012년도 한국에너지기술평가원(지식경제부)의 재원으로 에너지자원기술개발사업 지원을 받아 수행된 연구임 (20111020400030-12-1-000).



(a) fault of  $S_{op}$



(b) fault of  $S_{An}$



(c) fault of  $S_{Bp}$  and  $S_{Cp}$ .

Fig. 11 Experimental results : stationary reference frame of input and output currents, dc-link voltage, fault signal (2/div), and current pattern

### References

- [1] P. W. Wheeler, J. Rodriguez, J. C. Clare, L. Empringham, and A. Weinstein, "Matrix converters: a technology review," *IEEE Trans. Industrial Electronics*, Vol. 49, No. 2, pp. 176-228, 2002.
- [2] L. Huber and D. Borojovic, "Space vector modulated three-phase to three phase matrix converter with input power factor correction," *IEEE Trans. Industrial Applications*, Vol. 31, No. 6, pp. 1234 - 1246, 1995.
- [3] J. W. Kolar, F. Schafmeister, S. D. Round, and H. Ertl, "Novel three-phase AC-AC sparse matrix converters," *IEEE Trans. Power Electronics*, Vol. 22, No. 5, pp. 1649-1661, 2007.
- [4] Y. D. Yoon and S. K. Sul, "Carrier-based modulation technique for matrix converter," *IEEE Trans. Power Electronics*, Vol. 21, No. 6, pp. 1691-1703, 2006.
- [5] P. W. Wheeler, J. Clare, and L. Empringham, "Enhancement of matrix converter output waveform quality using minimized commutation times," *IEEE Trans. Industrial Electronics*, Vol. 51, No. 1, pp. 240 - 244, 2004.
- [6] K. Park, K. B. Lee, and F. Blaabjerg, "Improving output performance of a Z-source sparse matrix converter under unbalanced input-voltage conditions," *IEEE Trans. Power Electronics*, Vol. 27, No. 4, pp. 2043 - 2054, 2012.
- [7] K. Park, E. Lee, and K. B. Lee, "A Z-source sparse matrix converter with a fuzzy logic controller based

- compensation method under abnormal input voltage conditions," in *Proc. IEEE ISIE*, pp. 614-619, 2010.
- [8] I. Sato, J. Itoh, H. Ohguchi, A. Odaka, and H. Mine, "An improvement method of matrix converter drives under input voltage disturbances," *IEEE Trans. Power Electronics*, Vol. 22, No. 1, pp. 132 - 138, 2007.
- [9] J. O. Estima and A. J. Marques Cardoso, "A new approach for real-time multiple open-circuit fault diagnosis in voltage-source inverters," *IEEE Trans. Industrial Applications*, Vol. 47, No. 6, pp. 2487 - 2494, 2011.
- [10] R. L. de A. Ribeiro, C. B. Jacobina, E. R. C. da Silva, and A. M. N. Lima, "Fault detection of open-switch damage in voltage-fed PWM motor drive systems," *IEEE Trans. Power Electronics*, Vol. 18, No. 2, pp. 587-593, 2003.
- [11] F. Zidani, D. Diallo, M. El Hachemi Benbouzid, and R. Nait-Said, "A fuzzy-based approach for the diagnosis of fault modes in a voltage-fed PWM inverter induction motor drive," *IEEE Trans. Industrial Electronics*, Vol. 55, No. 2, pp. 586-593, 2008.
- [12] Y. J. Ko and K. B. Lee, "Fault diagnosis of a voltage-fed PWM inverter for a three-parallel power conversion system in a wind turbine," *Journal of Power Electronics*, Vol. 10, No. 6, pp. 686-693, 2010.
- [13] O. Moseler and R. Isemann, "Application of Model-Based Fault Detection to a Brushless DC Motor", *IEEE Trans. Industrial Electronics*, Vol. 47, No. 5, pp. 1015-1020, 2000.
- [14] B. Lu and S. Sharma, "A Literature Review of IGBT Fault Diagnostic and Protection Methods for Power Inverters", *IEEE Trans. Industry Applications*, Vol. 45, No. 5, pp. 1770-1777, 2009.
- [15] R. Peugeot, S. Courtine, and J.-P. Rognon, "Fault detection and isolation on a PWM inverter by knowledge-based model," *IEEE Trans. Industrial Electronics*, Vol. 34, No. 6, pp. 1318 - 1326, 1998.
- [16] S. S. Kwak, "Investigation of fault-mode behaviors of matrix converters," *Journal of Power Electronics*, Vol. 9, No. 6, pp. 949-959, 2009.
- [17] S. Kwak and T. Kim, "Fault detection and location of open-circuited switch faults in matrix converter drive systems," in *Proc. IEEE VPPC*, pp. 1476-1481, 2009.
- [18] S. Kwak, "Fault-tolerant structure and modulation strategies with fault detection method for matrix converters," *IEEE Trans. Power Electronics*, Vol. 25, No. 5, pp. 1201-1210, 2010.
- [19] S. Kwak and H. A. Toliyat, "An approach to fault-tolerant three-phase matrix converter drives," *IEEE Trans. Energy Conversion*, Vol. 22, No. 4, pp. 855-863, 2007.
- [20] S. M. A. Cruz, M. Ferreira, A. M. S. Mendes, and A. J. M. Cardoso, "Analysis and diagnosis of open-circuit faults in matrix converters," *IEEE Trans. Industrial Electronics*, Vol. 58, No. 5, pp. 1648-1661, 2011.
- [21] S. M. A. Cruz, M. Ferreira, and A. J. M. Cardoso, "A new method for the detection and location of faults in matrix converters," in *Proc. IEEE IEMDC*, pp. 165-170, 2009.
- [22] S. M. A. Cruz, A. M. S. Mendes, and A. J. M. Cardoso, "A new Fault Diagnosis Method and a Fault-Tolerant Switching Strategy for Matrix Converters Operating with Optimum Alesina-Venturini modulation," *IEEE Trans. Industrial Electronics*, Vol. 59, No. 1, pp. 269-280, 2012.
- [23] E. Lee and K. B. Lee, "Fault Diagnosis for a Sparse Matrix Converter using Current Patterns," in *Proc. IEEE APEC*, pp. 1549-1554, 2012.
- [24] Y. J. Ko, K. B. Lee, D. C. Lee, and J. M. Kim, "Fault Diagnosis of Three-Parallel Voltage-Source Converter for a High-Power Wind Turbine," *Institution of Engineering and Technology*, Vol. 5, No. 7, pp. 1058-1067, 2012.
- [25] B. Lu and S. K. Sharma, "A Literature Review of IGBT Fault Diagnostic and Protection Methods for Power Inverters," *IEEE Trans. Industrial Electronics*, Vol. 45, No. 5, pp. 1770-1777, 2009.

#### 이은실(李恩實)

1988년 1월 6일생. 2010년 아주대 전자공학부 졸업. 2012년 동 대학원 전자공학부 졸업(석사). 2012년~현재 동 대학원 전자공학과 박사과정.



#### 이교범(李敎範)

1972년 6월 30일생. 1997년 아주대 전자공학과 졸업. 1999년 동 대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 2003년 고려대 전기공학과 졸업(공학박사). 2003년~2006년 The Institute of Energy Technology, Aalborg University in Denmark 연구원. 2006년~2007년 전북대 전자정보공학부 조교수. 2007년~현재 아주대 전자공학부 부교수. 당 학회 JPE 편집위원.



#### 정규범(鄭圭範)

1961년 12월 25일생. 1984년 아주대 공과대학 전자공학과 졸업. 1986년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 1990년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(공학박사). 1990년~1991년 Virginia Polytechnic Institute and State University 연구원. 1992년~1993년 (주)파워테크 이사. 1993년~1995년 한국 항공우주연구소 선임연구원. 1995~현재 우석대 전기전자공학과 교수.

