

# NPC 3-레벨 인버터의 스위치 고장시 고장 진단과 중성점 불평형 전압 제어

論 文  
54B-5-3

## Fault Diagnosis and Neutral Point Voltage Control Under the Switch Fault in NPC 3-Level Voltage Source Inverter

孫 虎 仁<sup>†</sup> · 金 太 進<sup>\*</sup> · 姜 大 旭<sup>\*\*</sup> · 玄 東 石<sup>\*\*\*</sup>  
(Ho-In Son · Tae-Jin Kim · Dae-Wook Kang · Dong-Seok Hyun)

**Abstract** - Many conventional multi-level inverters have detected switching faults by using the over voltage and current. However, fault detection of the switching elements is very difficult because the voltage and current due to each switching fault decrease more than the normal operation. Moreover, the dc-link unbalancing voltage causes a serious problem in the safety and reliability of system when the 3-level inverter faults occur. Therefore, this paper proposes the simple fault diagnose method and the neutral-point-voltage control method that can protect the 3-level inverter system from the unbalancing voltage of the dc-link capacitors when the faults of switching elements occur in the 3-level inverter that is very efficient in ac motor drives of the high voltage and high power applications. Through experiment results, the validity of the proposed method is demonstrated.

**Key Words** : NPC-Level Inverter, Neutral Point Voltage Control

### 1. 서 론

2-레벨 인버터는 반도체 소자의 제한된 정격 전압 문제로 인해 고전압 및 대용량 시스템을 구현하기에는 한계를 가지고 있다. 이러한 단점을 해결하기 위해 멀티-레벨 인버터가 제안되었다[1]. 이 중 NPC 3-레벨 인버터는 같은 스위칭 주파수에서 기존의 2-레벨 인버터 보다 고조파 성분이 작고, 각 스위칭 차단전압이 직류 전압의 절반이기 때문에 고전압과 대용량 시스템의 구현이 가능한 장점들을 가지고 있다. 그러나 3-레벨 인버터는 구조적으로 상단과 하단 직류 커패시터 사이에 불평형 전압이 발생하는데, 불평형 전압은 스위칭 차단 전압의 증가로 인해 시스템의 안전성 및 신뢰성에 상당한 문제를 초래한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 다양한 해석과 대책이 연구되어 왔다[2-4]. 그러나 이러한 연구들은 시스템의 정상 상태만을 고려한 것으로서 고장 발생시에 대한 해석 및 대책으로는 미흡한 실정이다. 시스템의 고장에 대한 이전 연구를 보면 DC 드라이브에서 컨버터의 고장 진단, 가변 속도 AC 드라이브에서 2-레벨 인버터의 고장 진단, 멀티 레벨 컨버터의 부하단락 사고 발생에 따른 단락 전류로

부터 컨버터와 부하를 보호하는 기법이 제안되어졌다[5-7]. 3레벨 인버터의 단락 발생시에는 단락 전류의 증가로 인해 고장 진단이 쉬우나, 개방 상태시에는 정상 전류보다 작은 전류가 흘러 기존의 보호 방법으로 시스템을 보호하기에는 어려움을 가지고 있다. 본 논문에서는 정상 상태에 대한 고장 발생에 따른 전류 벡터 패턴의 변화를 공간 벡터도상에서 비교하여 3-레벨 인버터의 각 스위치 고장을 검출하는 간단한 고장 진단 방법과, 스위치 고장시 발생하는 중성점 불평형 전압으로 인해 전체 시스템의 연계 고장을 피하기 위한 중성점 불평형 전압 제어 방법을 제안한다. 제안된 방법은 정상 상태시와 고장 발생시 3상 부하 전류 패턴의 변화를 이용함으로써, 각 스위치의 고장에 따른 오프셋 전압( $V_{offset-fault}$ )을 기존의 지령 전압에 추가하게 되면 중성점 불평형 전압을 제어할 수 있다. 그리고 제안된 방법의 타당성은 시뮬레이션과 실험으로 증명된다.

### 2. 3-레벨 인버터의 구성 및 SVPWM 방법

#### 2.1 3-레벨 인버터의 구성

그림 1에 3-레벨 인버터의 실제적인 구성도를 나타내었다. 스위치 상태와 출력전압과의 관계를 살펴보면 표 I과 같다. 상단2개의 소자  $S_1, S_2$ 가 도통할 경우 폴 전압  $V_n$ 은  $+V_{dc}/2$  ( $P$  상태)값을 가지며, 아래 2개의 소자  $S_3, S_4$ 가 도통할 경우  $-V_{dc}/2$  ( $N$  상태)값을 가지며, 가운데 두 소자  $S_2, S_3$ 가 도통할 경우 0 ( $O$  상태)의 값을 가진다. 이와 같이 각 레그는 세 가지 출력 상태를 갖는다. 이것은 3-레벨 인버터의 모든 스위치 상태를 나타낼 수 있으며 모두 27(3<sup>3</sup>) 가지의 출력 상태를 가진다. 이러한 27 가지의 상태를 출력 상

<sup>†</sup> 교신저자; 學生會員 : 漢陽大 電氣工學科 碩士課程  
E-mail : shi9788@ihanyang.ac.kr

<sup>\*</sup> 正 會 員 : 漢陽大 電氣工學科 博士課程

<sup>\*\*</sup> 正 會 員 : 漢陽大 電氣工學科 工學博士

<sup>\*\*\*</sup> 正 會 員 : 漢陽大 工大 電氣工學科 教授 · 工學博士

接受日字 : 2004年 8月 26日

最終完了 : 2005年 4月 19日

전압의 값을 기준으로 생각하면 그림 2와 같이 평면상의 벡터도로 나타낼 수 있다.

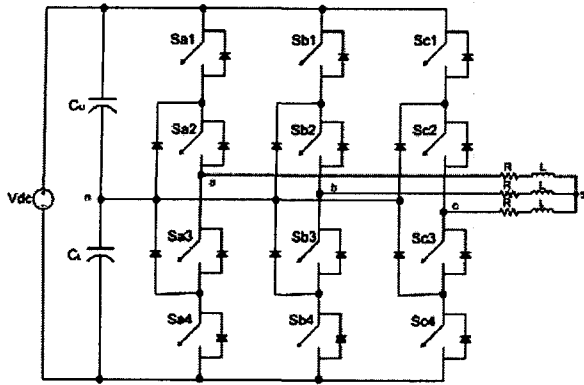


그림 1 3-레벨 인버터의 구성  
Fig. 1 Configuration of the 3-level inverter

표 1 스위칭 상태와 폴 전압.  
Table 1 Switching state and pole voltage.

Switching state	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$V_n$
$P$	ON	ON	OFF	OFF	$+V_{dc}/2$
$O$	OFF	ON	ON	OFF	$0$
$N$	OFF	OFF	ON	ON	$-V_{dc}/2$

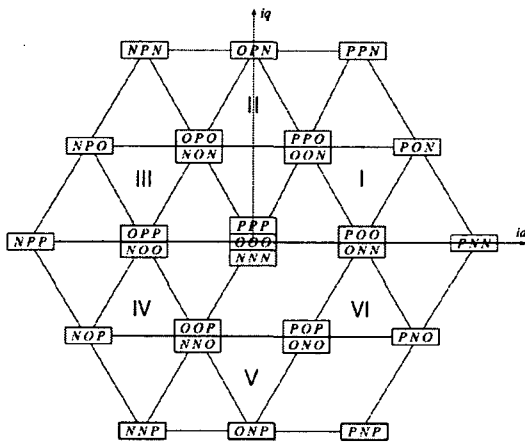


그림 2 XY 평면에서 공간 벡터도  
Fig. 2 Space vector diagram in XY plane

이 공간 벡터도상의 모든 전압벡터는 출력 상전압의 크기에 따라 큰 벡터( $PNN, PPN, NPN, NPP, NNP, PNP$ ), 중간 벡터( $PON, OPN, NPO, NOP, ONP, PNO$ ), 작은 벡터( $POO, PPO, OPO, OPP, OOP, POP, ONN, OON, NON, NOO, NNO, ONO$ ) 그리고 영 벡터( $PPP, OOO, NNN$ )의 4가지의 그룹으로 분류할 수 있다 [8].

2.2 SVPWM 방법

SVPWM 방법에서 정지 좌표계의 기준 전압  $V_d$ 와  $V_q$ 는 식 (1)으로 주어지는  $abc/dq$ 축 변환 식에 의해서 가상 상전압  $V_a, V_b, V_c$ 로 변환된다.

$$\begin{aligned}
 V_a &= V_d \\
 V_b &= -\frac{1}{2}V_d + \frac{\sqrt{3}}{2}V_q \\
 V_c &= -\frac{1}{2}V_d - \frac{\sqrt{3}}{2}V_q
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

위의 가상 상전압에 식 (2)로 주어지는 오프셋 전압을 더하게 되며 여기서 얻어지는 전압을 유효 상전압( $V_x$ )이라 정의하며 식 (3)처럼 주어진다 [9].

$$V_{offset} = \frac{V_{dc} - V_{max} - V_{min}}{2}
 \tag{2}$$

여기서  $V_{mix}$ 와  $V_{min}$ 은 가상 상전압 중에서 최대값과 최소값을 나타낸다.

$$V_x' = V_x + V_{offset}(x = a, b, c)
 \tag{3}$$

이 유효 상전압과 2개의 캐리어 웨이브와 비교하여 게이트 신호가 발생된다.

3. 3-레벨 인버터의 고장 진단 방법

3-레벨 인버터의 정상 운전시 부하 상전압  $V_x$  ( $x=a,b,c$ )와 부하 상전류  $i_x$  ( $x=a,b,c$ )는 식(4), (5)와 같다.

$$V_x = V_m \cdot mi \cdot \cos(\theta)
 \tag{4}$$

$$i_x = I_m \cdot \cos(\theta - \phi)
 \tag{5}$$

여기서  $I_m$ 는 부하 상전류의 최대값이고,  $\phi$ 는 부하 상전압과 상전류의 위상차로 부하 역률각(load power factor angle)을 나타낸다. 그리고  $mi$ 는 변조 지수(modulation index)이다. 그러나 3-레벨 인버터의 고장 발생시에는 서로 다른 부하 상전압과 부하 상전류가 존재한다.

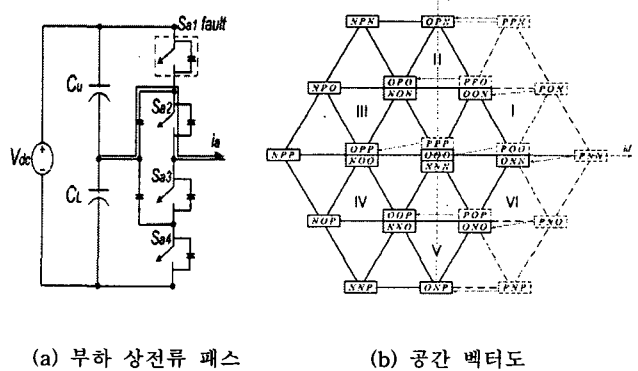


그림 3  $S_{a1}$  스위치 고장시 부하 상전류 패스 및 공간 벡터도  
Fig. 3 Load phase current and space vector diagram under the  $S_{a1}$  switch fault

표 2 Sa1 스위치 고장(개방)시 공간전압 벡터와 부하 상전압과의 관계. (Ia>0을 가정시)

Table 2 Relation of space voltage vector and load phase voltage under the Sa1 switch fault.

정상시		고장시	
공간전압벡터(I.VI)	Van	공간전압벡터(I.VI)	Van
PNN	2Vdc/3	ONN	Vdc/3
PON	Vdc/2	OON	Vdc/6
PPN	Vdc/3	OPN	0
POO	Vdc/3	OOO	0
ONN	Vdc/3	ONN	Vdc/3
PPO	Vdc/6	OPO	-Vdc/6
OON	Vdc/6	OON	Vdc/6
PNO	Vdc/2	ONO	Vdc/6
PNP	Vdc/3	ONP	0
POP	Vdc/6	OOP	-Vdc/6
ONO	Vdc/6	ONO	Vdc/6

그림 3은 Sa1 스위치 고장시 부하 상전류 패스 및 공간전압 벡터도이다. 표 II는 Sa1 스위치 고장(개방)시 공간전압 벡터와 부하 상전압과의 관계 (Ia>0을 가정시)이다. Sa1 스위치 고장일 경우에는 P 상태에서 Sa2 스위치를 통해서 전류 패스가 생기기 때문에 P 상태 대신에 O 상태의 전압 벡터가 존재한다. Sa2 스위치 고장일 경우에는 P 상태와 O 상태의 전압 벡터가 존재하지 않고 0 전압 만이 존재한다. 그리고 Sa3 스위치 고장일 경우에는 N 상태와 O 상태의 전압 벡터가 존재하지 않는다. 그리고 Sa4 스위치 고장일 경우에는 N 상태에서 Sa3 스위치를 통해서 전류 패스가 생기기 때문에 N 상태 대신에 O 상태의 전압 벡터가 존재한다. 따라서 각 스위치의 고장 발생시 부하 상전류는 식 (6) ~ (9)와 같다.

1) S1 스위치 고장일 경우

$$i_{x\_fault} = k \cdot i_{x_{\theta=0\sim\pi}} + i_{x_{\theta=\pi\sim2\pi}} \quad (6)$$

2) S2 스위치 고장일 경우

$$i_{x\_fault} = 0_{\theta=0\sim\pi} + i_{x_{\theta=\pi\sim2\pi}} \quad (7)$$

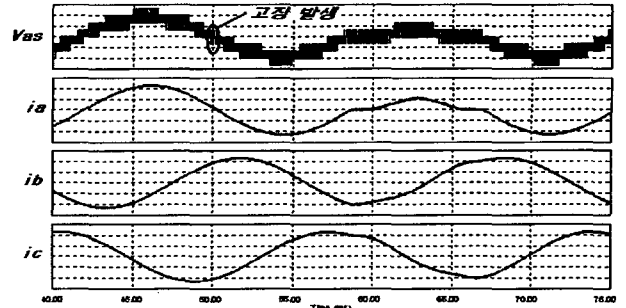
3) S3 스위치 고장일 경우

$$i_{x\_fault} = i_{x_{\theta=0\sim\pi}} + 0_{\theta=\pi\sim2\pi} \quad (8)$$

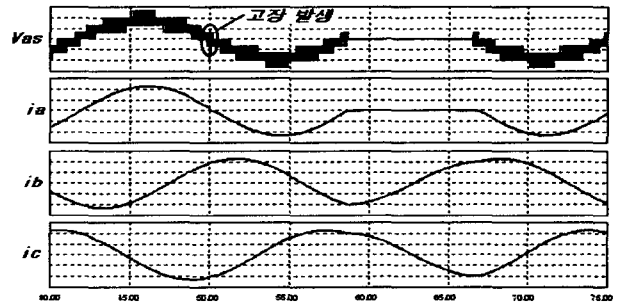
4) S4 스위치 고장일 경우

$$i_{x\_fault} = i_{x_{\theta=0\sim\pi}} + k \cdot i_{x_{\theta=\pi\sim2\pi}} \quad (9)$$

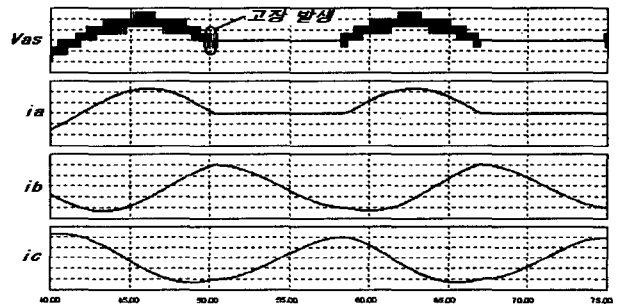
여기서 k는 스위치의 고장에 따른 전류의 변화값이다. 그림 4는 mi=0.8일 경우 3-레벨 인버터의 각 스위치 고장 발생시 부하 상전압과 상전류 파형이다.



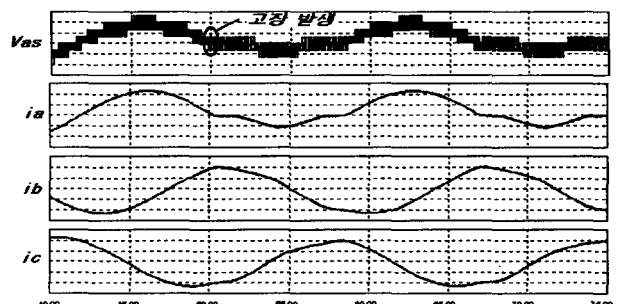
(a) Sa1 스위치 고장일 경우



(b) Sa2 스위치 고장일 경우



(c) Sa3 스위치 고장일 경우



(d) Sa4 스위치 고장일 경우

그림 4 a 상에서 스위치 고장에 따른 부하 상전압 및 상전류 파형 (mi=0.8)  
Fig. 4 Load phase voltage and phase current waveform under the switch faults in the a-phase (mi=0.8)

위 결과로부터 3상 부하 전류(ia, ib, ic)를 abc/dq축 변환식에 의해 고장 발생에 따른 2상 전류(id\_fault, iq\_fault)로 변환하게 되면 식 (10), 식 (11)과 같다.

$$i_{d\_fault} = i_{a\_fault} \quad (10)$$

$$i_{q\_fault} = \frac{1}{\sqrt{3}}(i_{b\_fault} - i_{c\_fault}) \quad (11)$$

이러한 고장 발생시  $i_{d\_fault}$ ,  $i_{q\_fault}$  전류 파형을 공간 벡터 도 상에 나타내면 각 스위치의 고장 발생에 따라서 서로 다른 형태의 모양이 나타난다. 그림 5는 3-레벨 인버터의 정상 운전시 전류 벡터 패턴이고, 그림 6은 3-레벨 인버터의 고장 운전중 스위치의 개방 상태시 전류 벡터 패턴이다. 위 결과에서 상단과 하단 스위치는 서로 180도의 위상차를 가지며 서로 대칭이다. 그리고  $a, b, c$  상은 서로 120도의 위상차를 가지며 시계방향으로 회전한다. 따라서 정상 운전시 전류 벡터 패턴과 고장 운전시 전류 벡터 패턴을 서로 비교하면 각 스위치의 고장 발생을 쉽게 확인할 수 있다.

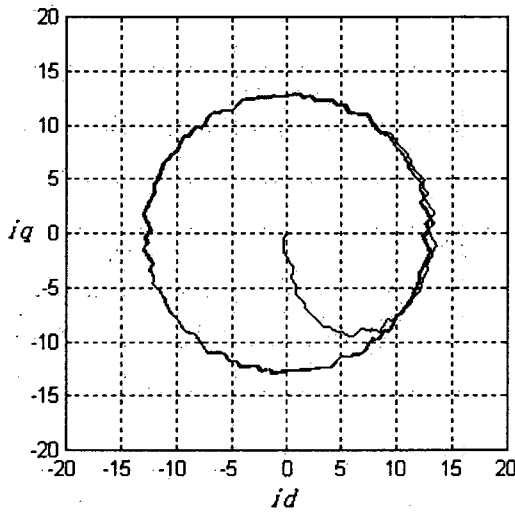


그림 5 정상 운전에서 전류 벡터 패턴  
Fig. 5 Current-vector pattern in the normal operation

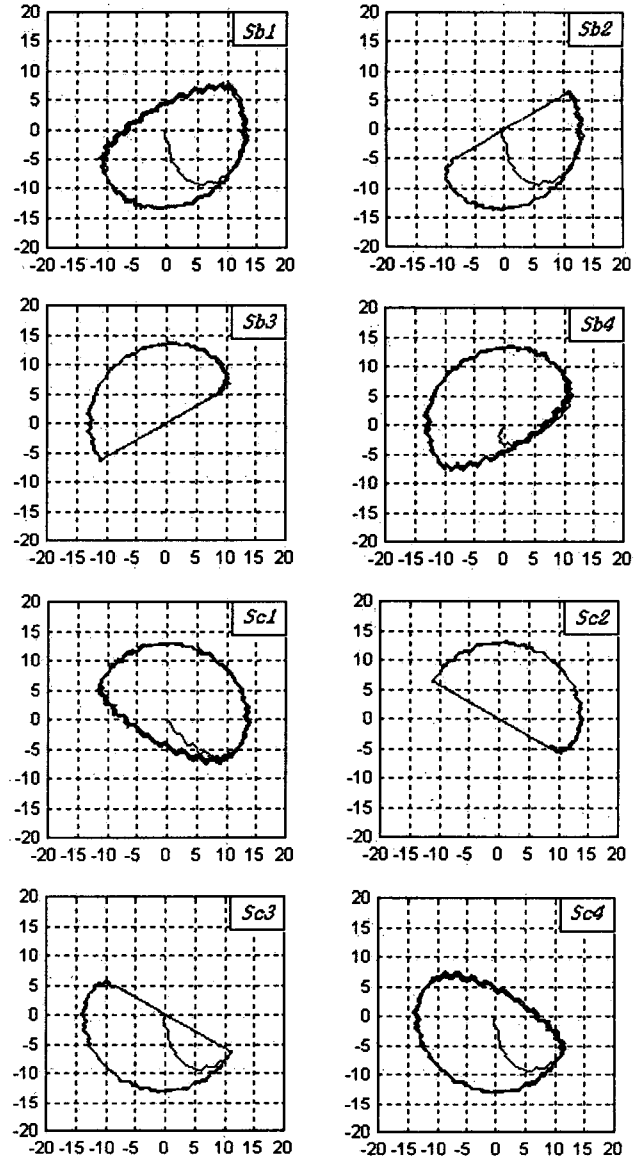


그림 6 고장 운전에서 전류 벡터 패턴  
Fig. 6 Current-vector pattern in the fault operation

#### 4. 3-레벨 인버터의 고장 발생시 중성점 불평형 전압

이 절에서는 3레벨 인버터의 각 스위치 고장 발생시 중성점 불평형 전압으로 인해 스위치의 연계 파괴로부터 시스템을 안전하게 보호할 수 있는 방법에 대해 자세히 설명한다. 3-레벨 인버터의 고장 발생시 중성점에는 불평형 전압이 발생하는데 상단 스위치( $S_1, S_2$ ) 고장일 경우에는 하단 커패시터의 방전이 증가하고, 하단 스위치( $S_3, S_4$ ) 고장일 경우에는 상단 커패시터의 방전이 증가한다. 이러한 커패시터의 충/방전의 변화는 기존의 지령전압에 오프셋 전압을 추가하여 제어할 수 있다. 그림 7은 오프셋 전압에 따른 커패시터의 충/방전의 변화를 보여주고 있다. 여기서 (a)는 오프셋 전압이 없는 경우이고, (b)는 양의 오프셋 전압을 준 경우로써 PPO의 전압 벡터는 늘어나고, OON의 전압 벡터는 줄어들기 때문에 상단 커패시터의 방전이 증가한다.

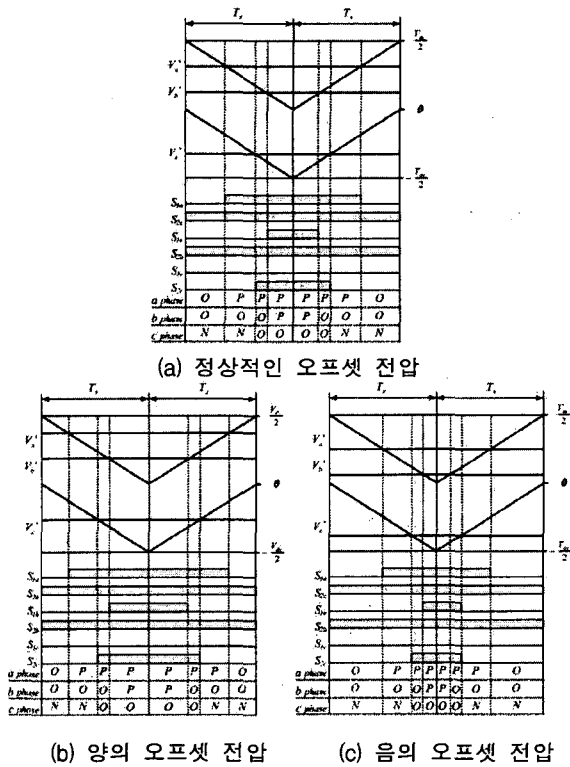


그림 7 오프셋 전압에 따른 커패시터 충·방전의 변화  
 Fig. 7 Variation of the charging/discharging of the capacitor according to voltage offset

그리고 (c)는 음의 오프셋 전압을 준 경우로써 PPO의 전압 벡터는 줄어들고, OON의 전압 벡터는 늘어나기 때문에 하단 커패시터의 방전이 증가하게 된다. 따라서 3-레벨 인버터의 상단 스위치( $S_1, S_2$ )고장일 경우에는 각 스위치에 따른 음(-)의 오프셋 전압을 가하고, 하단 스위치( $S_3, S_4$ ) 고장일 경우에는 각 스위치에 따른 양(+)의 오프셋 전압을 추가한다. 그림 8은 인버터의 각 스위치 고장 발생시 중성점 불평형 전압 제어의 동작 순서를 보여주고 있다.

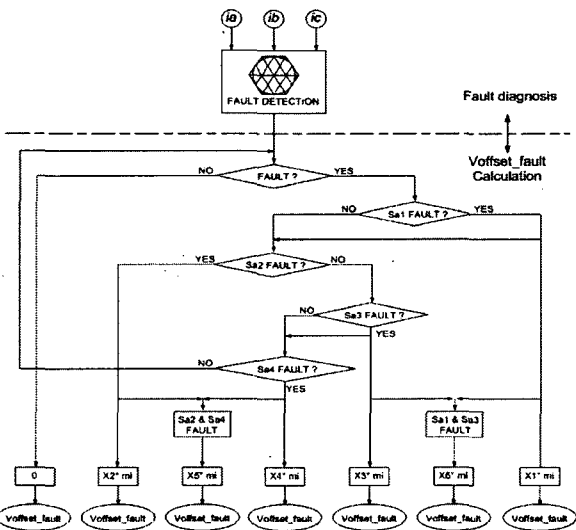


그림 8 중성점 전압 제어의 흐름도  
 Fig. 8 Flow chart of the neutral-point voltage control

여기서 각 스위치의 고장 검출은 앞 절에서 다룬 고장 진단 방법을 이용하여 한주기동안 정상 운전시 전류의 평균과 고장 운전시 전류의 평균을 비교하면 각 스위치의 고장을 검출할 수 있다. 이렇게 검출된 신호를 이용하여 각 스위치 고장에 따른 오프셋 전압( $V_{offset\_fault}$ )은 식 (12)와 같다.

$$V_{offset\_fault} = X_n \cdot m_i (n = 1, 2, 3, 4, 5, 6) \quad (12)$$

여기서,  $X_n$ 은 각 스위치 고장에 따라서 중성점 전압이 최소가 되는 상수 값이다.

식 (3)에 식 (12)를 추가하여 새로운 유효 상전압( $V_x''$ )을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$V_x'' = V_x' + V_{offset\_fault} (x = a, b, c) \quad (13)$$

따라서, 각 스위치의 고장에 따른 오프셋 전압을 기존의 SVPWM에 추가한 새로운 유효 상전압은 3-레벨 인버터의 각 스위치 고장시 발생하는 중성점 불평형 전압을 제어하게 된다.

### 5. 실험 결과

제안된 방법의 이론적인 타당성 검증을 위해 축소 모델 시제품(laboratory prototype)을 제작하였으며, TMS320C31 DSP 콘트롤러 보드를 이용하였다. 실험 조건은 다음과 같다:  $V_{dc}=200[V]$ ,  $C_U=C_L=1000[\mu F]$ ,  $T_s=125[\mu s]$ ,  $R=8[\Omega]$ ,  $L=2[mH]$ 이다. 그림 9는 a 상 스위치의 고장 발생시 부하 상전류 파형이다. 그림 10은 3-레벨 인버터의 고장 운전중 스위치의 개방 상태시 전류 벡터 패턴을 보여준다.

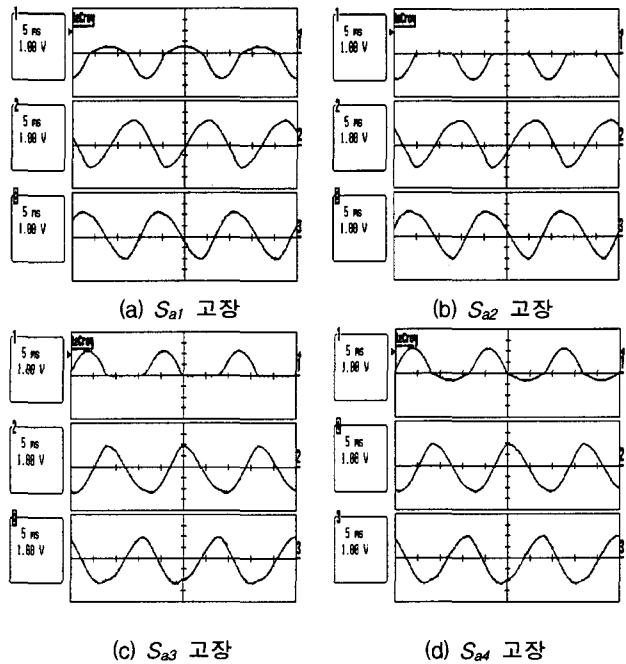


그림 9 a상 스위치의 고장 발생시 부하 전류 파형의 실험 결과(4A/div)  
 Fig. 9 Experimental result of the a-phase load current waveforms under the switch faults

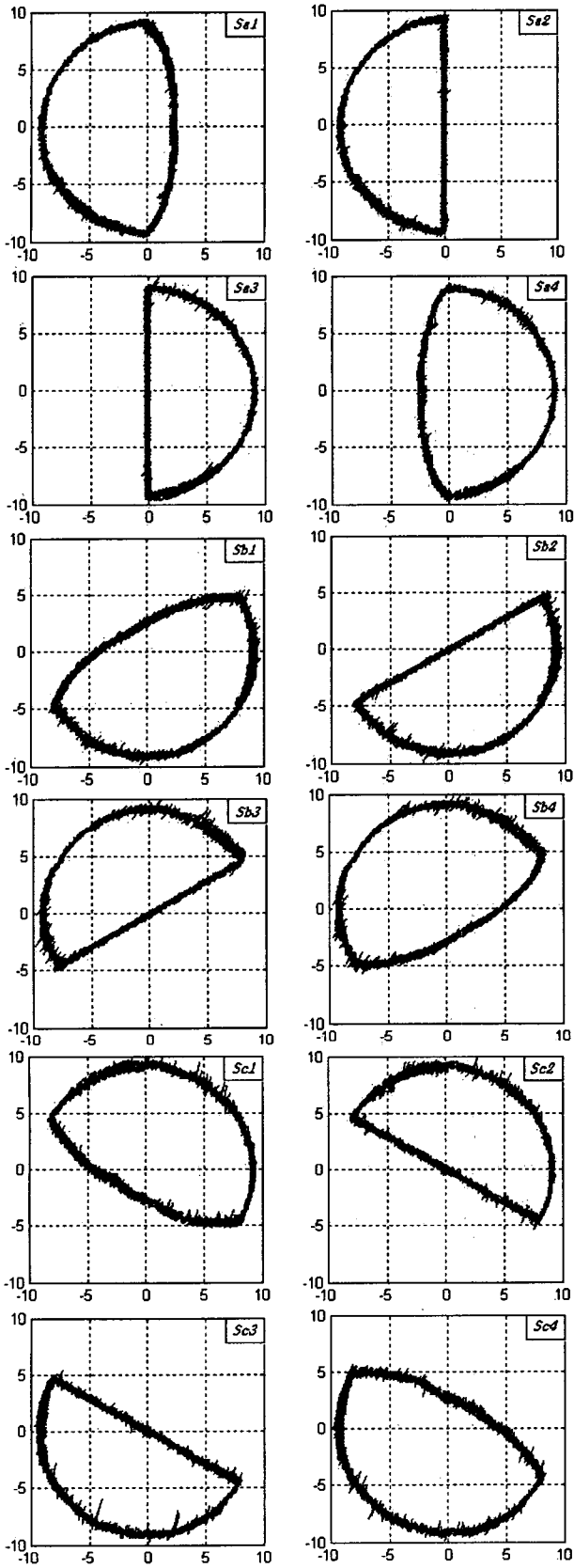
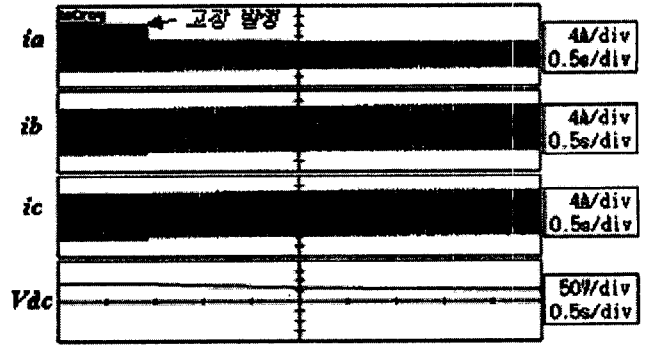
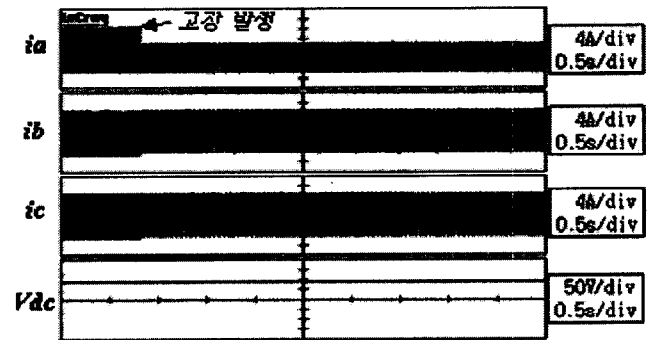


그림 10 고장 운전에서 전류 벡터 패턴의 실험 결과 (개방 상태)  
 Fig. 10 Experimental result of the current-vector patterns in the fault operation(open states)

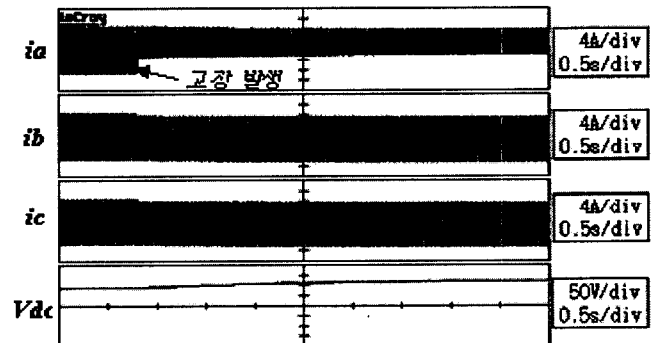


(a) 중성점 전압 제어를 하지 않은 경우

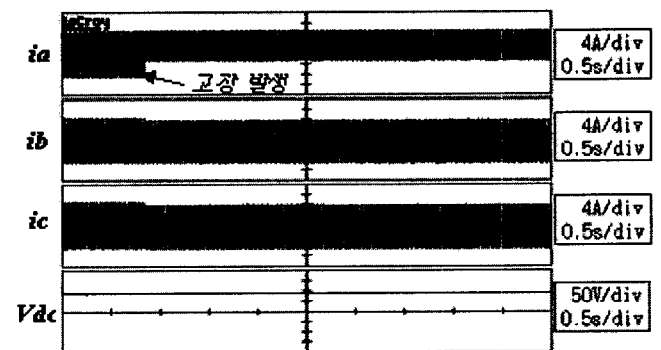


(b) 중성점 전압 제어를 한 경우

그림 11  $S_{a1}$  스위치 고장 운전의 실험 결과  
 Fig. 11 Experimental results under the  $S_{a1}$  fault operation



(a) 중성점 전압 제어를 하지 않은 경우



(b) 중성점 전압 제어를 한 경우

그림 12  $S_{a4}$  스위치 고장 운전의 실험 결과  
 Fig. 12 Experimental results under the  $S_{a4}$  fault operation

그림 11, 12은 중성점 불평형 전압 제어의 실험 결과이다. 그림 11은  $S_{\alpha}$  스위치 고장 운전시 3상 부하 상전류와 중성점 전압이고, 그림 12은  $S_{\alpha}$  스위치 고장 운전시 3상 부하 상전류와 중성점 전압이다. 그림 11, 12의 (a)는 중성점 전압 제어를 하지 않을 때 출력 파형이고, (b)는 중성점 전압 제어를 했을 때 출력 파형이다. 따라서 그림 11, 12에서 3-레벨 인버터의 정상 운전중 각 스위치의 고장이 발생하더라도 제안한 제어 방법을 사용할 경우 중성점의 전압 불평형은 발생하지 않고 제어가 잘 되는 것을 알 수 있다.

### 6. 결 론

본 논문에서는 3-레벨 인버터의 스위치 고장 발생이 간단한 고장 진단 방법과 고장 발생에 따른 시스템의 연계 파괴를 피하기 위해 중성점 불평형 전압 제어 방법을 제안하였다. 이 제안된 방법은 다음과 같은 장점들을 가지고 있다. 1) 고장 진단 방법은 시스템을 분해하지 않고 각 스위치들의 고장 검출 및 확인이 쉽기 때문에 보전 시간의 단축이 가능하다. 2) 중성점 불평형 전압 제어 방법은 부가적인 하드웨어 장치를 추가하지 않고도 중성점 불평형 전압을 쉽게 제어하므로 고장이 발생하더라도 시스템 및 소자를 안전하게 보호할 수 있다. 더욱이 제안된 고장 진단 방법과 중성점 불평형 전압 제어 방법은 실제적 시스템에서의 적용이 가능하다.

### 참 고 문 헌

[1] A. Nabae, I. Takahashi and H. Akagi, "A New Neutral-Point-Clamped PWM Inverter," *IEEE Trans. on Ind. Appl.*, vol. 17, no. 5, pp. 518-523 1981.

[2] Robert Rojas, Tokuo Ohnishi and Takayuki Suzuki, "Neutral-Point Clamped Inverter With Improved Voltage Waveform and Control Range," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 42, no. 6, pp. 587-594 Dec. 1995.

[3] Bum-Seok Suh and Dong-Seok Hyun, "A New N-Level High Voltage Inversion System," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 44, no. 1, pp. 107-115, Feb. 1997.

[4] C. Newton and M. Sumner, "Neutral point control for multi-level inverters: theory, design and operational limitations," *Industry Applications Conference, 1997. Thirty-Second IAS Annual Meeting, IAS '97, Conference Record of the 1997 IEEE*, vol. 2 pp. 1336-1343, Oct. 1997

[5] Cardoso, A.J.M. and Mendes, A.M.S., "Converter fault diagnosis in Variable speed DC drives, by Parks Vector Approach," *IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Guimaraes, Portugal*, vol. 2, pp. 497-500, 1996

[6] Mendes, A.M.S., Cardoso, A.J.M. and Saraiva, E.S., "Power Electronics and Variable Speed Drives," *Seventh International Conference on Industrial Electronics*, pp. 538-543, Sept. 1998

[7] Eui-Cheol Nho, "High-speed output short-circuit protection method for multilevel PWM AC/DC converter" *Electronics Letters*, vol: 37 Issue: 4, 15 Feb 2001, pp.

205 -206

[8] Yo-Han. Lee, Bum-Seok Suh and Dong-Seok Hyun, "A Novel PWM Scheme for a Three-Level Voltage Source Inverter with GTO Thyristors System," *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 32, no. 2, pp. 260-268, March/April. 1996.

[9] Y. H. Lee, R. Y. Kim and D. s. Hyun, "A Novel SVPWM Strategy for a Multi-level Voltage Inverter," *IEEE APEC Conf. Rec.*, pp. 509-514, 1999.

### 저 자 소 개



#### 손 호 인(孫虎仁)

1975년 4월 19일생. 2001년 울산대 제어계측공학과 졸업. 2005년 한양대 전기공학과 졸업(석사). 현재 LG이노텍(주) POWER 연구실 연구원.



#### 김 태 진(金兌珍)

1974년 8월 31일생. 2000년 대전대 전기공학과 졸업. 2002년 한양대 전기공학과 졸업(석사). 2002년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.



#### 강 대 옥(姜岱旭)

1970년 6월 4일생. 1998년 한양대 전기공학과 졸업. 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2004년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 현재 한국전기연구원 산업전기연구단 메카트로닉스연구그룹 선임연구원.



#### 현 동 석(玄東石)

1950년 4월 8일생. 1973년 한양대 전기공학과 졸업. 1978년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1986년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1984년~1985년 미국 토레도대학 교환교수. 1988년~1989년 원혜공과대학 교환교수. 현재 한양대 전기공학과 교수. 당 학회 회장 역임.