

NPC 3-레벨 PWM 인버터에서 고장 발생에 따른 고장 진단과 중성점 전압 제어

손호인, 김태진, 강대욱, 현동석
한양대학교 전기공학과

Fault Diagnosis and Neutral Point Voltage Control according to Faults for a Three-level Neutral-Point-Clamped PWM Inverter

Ho-In Son, Tae-Jin Kim, Dae-Wook Kang, and Dong-Seok Hyun
Dept. of Electrical Engineering, Hanyang Univ.

ABSTRACT

The 3-level converter/inverter system is very efficient in the ac motor drives of high voltage and high power application. This paper proposed a simple method to diagnose faults using change of current vector pattern in space vector diagram when the faults occurrence in the 3-level inverter and a control method that can protect system from unbalance of the neutral point voltage according to faults. The validity of the proposed method is demonstrated by the simulation results.

1. 서 론

2-레벨 인버터에서 반도체 소자는 제한된 정격 전압 문제로 인해서 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 컨버터/인버터는 구조적으로 상단과 하단 직류 커패시터 사이에 불평형 전압이 발생한다. 이를 해결하기 위해 직류 커패시터 불평형 전압에 관한 다양한 해석과 대책이 보고되어져서, ^{[2]-[4]} 이들은 모두 정상적인 스위칭 상태만을 고려한 것으로써 고장이 발생할 때에는 여전히 직류 커패시터 사이에 전압 불평형이 발생한다. 이러한 불평형 전압은 스위칭 차단 전압의 증가로 인해 시스템의 안전성 및 신뢰성에 상당한 문제를 초래한다. 시스템의 고장에 대한 이전 연구를 보면 DC 드라이브에서 컨버터의 고장 진단,^[5] 가변속도 AC 드라이브에서 2-레벨 인버터의 고장 진단,^[6] 멀티 레벨 컨버터의 부하단락 사고 발생에 따른 단락 전류로부

터 컨버터와 부하를 보호하는 기법^[7]이 제안되어졌다. 본 논문에서는 정상 상태와 고장 발생에 따른 전류 벡터 패턴의 변화를 공간 벡터도상에서 비교하여 3-레벨 인버터의 각 스위치 고장을 검출하는 간단한 고장 진단 방법과, 고장이 발생 할 때 중성점 불평형 전압으로부터 시스템을 보호할 수 있는 방법을 제안한다. 여기서 고장 발생에 따른 중성점 불평형 전압 제어는 고장 진단 방법을 이용하여 각 스위치의 고장에 따른 오프셋 전압($V_{offset-fault}$)을 기존의 컨버터 지령 전압에 추가하여 불평형 전압을 제어한다. 그리고 본 논문에서는 각 스위치의 고장 상태를 개방인 경우만을 고려하고, 제안된 방법의 타당성은 시뮬레이션으로 증명한다.

2. 3-레벨 인버터의 구성 및 SVPWM 방법

2.1 3-레벨 인버터의 구성

그림 1에 3-레벨 컨버터/인버터의 구성도를 나타내었다.

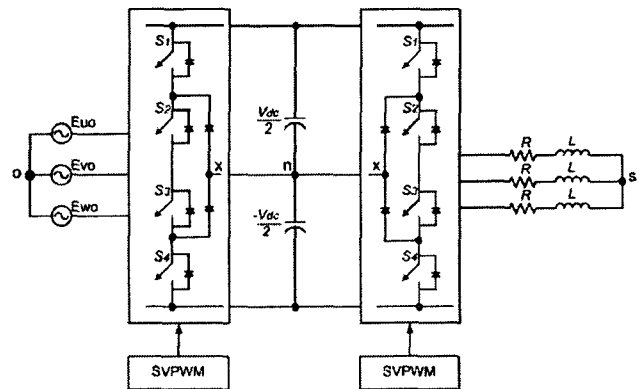


그림 1 3-레벨 컨버터/인버터의 구성
Fig. 1 Configuration of the 3-level inverter/converter

스위치 상태와 출력 전압과의 관계는 표 1과 같다.

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	$-V_{dc}/2$

표 1에서 스위치 상태를 살펴보면 상단 2개의 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 레그에는 세 가지 출력 상태를 가지므로 3-레벨 컨버터/인버터의 스위치 상태를 나타낼 수 있으며 모두 $27(3^3)$ 가지가 된다. 이들 상태를 출력 상전압 기준으로 생각하면 그림 2와 같이 공간 벡터도로 나타낼 수 있다.[8]

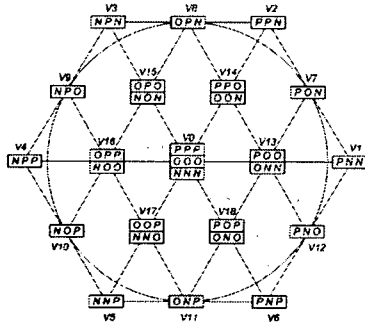


그림 2 XY 평면에서 공간 벡터도
Fig. 2 Space vector diagram in XY plane

공간 벡터도상의 모든 전압벡터는 출력 상전압의 크기에 따라 큰벡터($PNN, PPN, NPN, NPP, NNP, PNP$), 중간벡터($PON, OPN, NPO, NOP, ONP, PNO$), 작은벡터($POO, PPO, OPO, OPP, OOP, POP, ONN, OON, NON, NOO, NNO, ONO$) 그리고 영벡터(PPP, OOO, NNN)의 4가지 그룹으로 분류할 수 있다.

2.2 SVPWM 방법

SVPWM 방법[9]에서 정지 좌표계의 기준 전압 V_d 와 V_q 는 dq/abc 축 변환 식에 의해서 식 (1)과 같이 가상 상전압 V_a, V_b, V_c 로 변환된다.

$$V_a = V_d$$

$$V_b = -\frac{1}{2}V_d + \frac{\sqrt{3}}{2}V_q \quad (1)$$

$$V_c = -\frac{1}{2}V_d - \frac{\sqrt{3}}{2}V_q$$

위의 가상 상전압에 식 (2)를 이용하여 구해진 오프셋 전압을 더한다. 여기서 얻어지는 전압을 유효 상전압(V_x')라 정의하며 식 (3)처럼 주어진다.

$$V_{offset} = \frac{V_{dc} - V_{max} - V_{min}}{2} \quad (2)$$

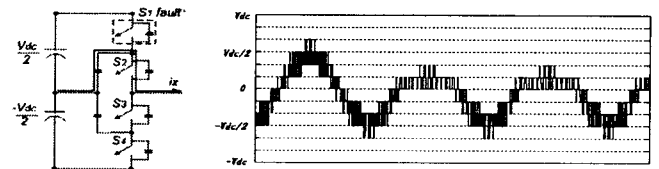
여기서 V_{max} 와 V_{min} 은 가상 상전압 중에서 최대값과 최소값을 나타낸다.

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

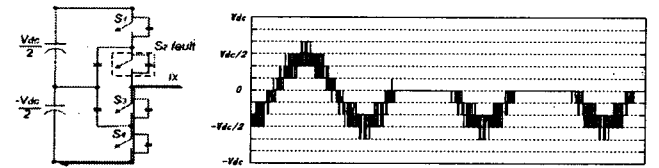
이 유효 상전압과 2개의 캐리어 웨이브와 비교하여 게이트 신호를 발생한다.

3. 3-레벨 인버터의 고장 진단 방법

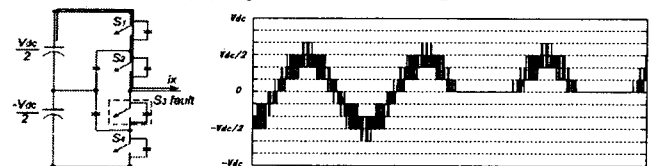
3-레벨 인버터에서 각 스위치의 고장 발생시 스위치 상태에 따른 전류 패스와 상전압 파형의 변화는 그림 3과 같다. 그림 3(a)는 S_1 스위치 고장이 발생할 경우로써 P 상태에서는 S_2 스위치를 통해서만 패스가 생기기 때문에 출력 상전압은 $V_{dc}/3, V_{dc}/6, 0, -V_{dc}/6, -V_{dc}/3, -V_{dc}/2, -2V_{dc}/3$ 전압이 존재하고, 그림 3(b)는 S_2 스위치 고장이 발생할 경우로써 P 상태에서는 전류 패스가 생기지 않기 때문에 출력 상전압은 $0, -V_{dc}/6, -V_{dc}/3, -V_{dc}/2, -2V_{dc}/3$ 전압이 존재하고, 그림 3(c)는 S_3 스위치 고장이 발생할 경우로써 N 상태에서는 전류 패스가 생기지 않기 때문에 $2V_{dc}/3, V_{dc}/2, V_{dc}/3, V_{dc}/6, 0$ 전압이 존재한다.



(a) S_1 스위치 고장일 경우



(b) S_2 스위치 고장일 경우



(c) S_3 스위치 고장일 경우



(d) S_4 스위치 고장일 경우

그림 3 스위치 고장에 따른 상전류 패스와 상전압 파형
Fig. 3 Phase-current pass and phase-voltage waveform according to switch fault

그리고 그림 3(d)는 S_4 스위치 고장이 발생할 경우로써 N 상태에서는 S_3 스위치를 통해서만 전류 패스가 생기기 때문에 $2V_{dc}/3, V_{dc}/2, V_{dc}/3, V_{dc}/6, 0, -V_{dc}/6, -V_{dc}/3$, 전압이 존재한다. 이와 같이 각 상에 흐르는 부하 상전류 $i_x(x=a,b,c)$ 는 다음과 같다.

$$i_x = I_m \cdot m_i \cdot \cos(\theta - \Phi) \quad (4)$$

여기서 I_m 는 부하 상전류의 최대값이고 Φ 는 부하에 따른 상전압과 상전류의 위상차로 역률각(load factor angle)을 나타낸다. 그리고 m_i 는 변조 지수(modulation index)이다. 식 (4)를 이용하여 각 스위치의 고장 발생에 따른 부하 상전류는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

1) S_1 스위치 고장일 경우

$$i_{x_fault} = k \cdot i_{x_{\theta=0-\pi}} + i_{x_{\theta=\pi-2\pi}} \quad (5)$$

2) S_2 스위치 고장일 경우

$$i_{x_fault} = 0_{\theta=0-\pi} + i_{x_{\theta=\pi-2\pi}} \quad (6)$$

3) S_3 스위치 고장일 경우

$$i_{x_fault} = i_{x_{\theta=0-\pi}} + 0_{\theta=\pi-2\pi} \quad (7)$$

4) S_4 스위치 고장일 경우

$$i_{x_fault} = i_{x_{\theta=0-\pi}} + k \cdot i_{x_{\theta=\pi-2\pi}} \quad (8)$$

여기서 k 는 스위치 고장 발생에 따른 상전류 크기이다. 위 결과를 이용하여 3-레벨 인버터에서 각 스위치 고장을 확인하기 위해 3상 부하 상전류($i_{a_fault}, i_{b_fault}, i_{c_fault}$)를 abc/dq 축 변환 식에 의해 2상 전류(i_d, i_q)로 변환하게 되면 식 (9), (10)와 같다.

$$i_d = i_{a_fault} \quad (9)$$

$$i_q = \frac{1}{\sqrt{3}}(i_{b_fault} - i_{c_fault}) \quad (10)$$

위 수식으로부터 정상 상태와 고장 발생에 따른 i_d, i_q 전류 파형을 비교하면 각 스위치의 고장에 따른 전류의 변화를 비교할 수 있다.

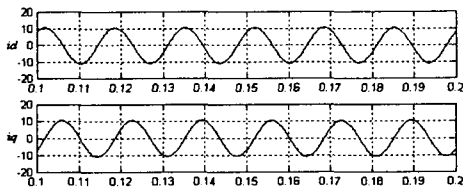
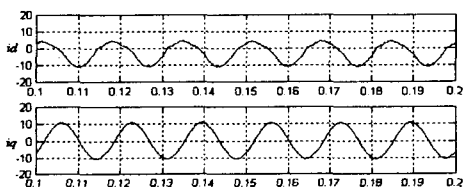
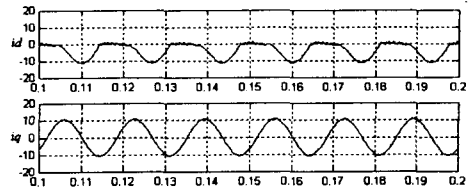


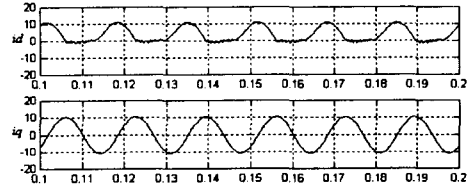
그림 4 정상 운전에서 i_d, i_q 전류 파형
Fig. 4 The i_d, i_q current waveform in the normal operation.



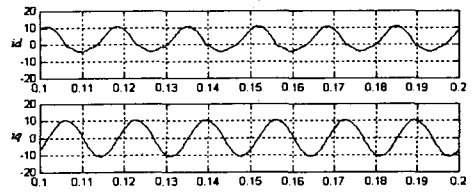
(a) S_1 스위치 고장



(b) S_2 스위치 고장



(c) S_3 스위치 고장



(d) S_4 스위치 고장

그림 5 고장 운전에서 a 상 i_d, i_q 전류 파형
Fig. 5 The i_d, i_q current waveform in the fault operation.

그림 4는 정상 운전에서 i_d, i_q 전류 파형이고, 그림 5는 a 상에서 각 스위치의 고장 발생시 i_d, i_q 전류 파형이다. 그림 4와 그림 5에서 인버터의 정상 운전에서 i_d 전류의 직류 성분은 영이 되나, 고장이 발생한 경우 i_d 전류의 직류 성분은 영이 되지 않는다.

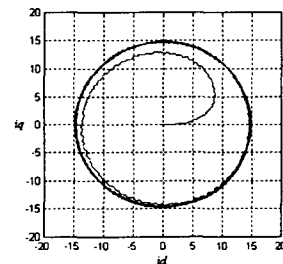
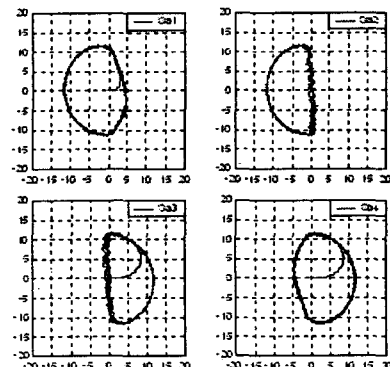
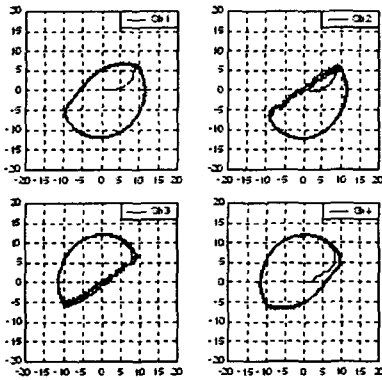


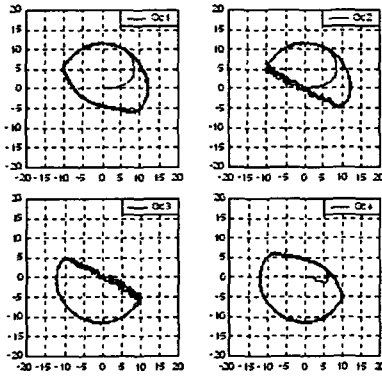
그림 6 정상 운전에서 전류 벡터 패턴
Fig. 6 Current-vector pattern in the normal operation



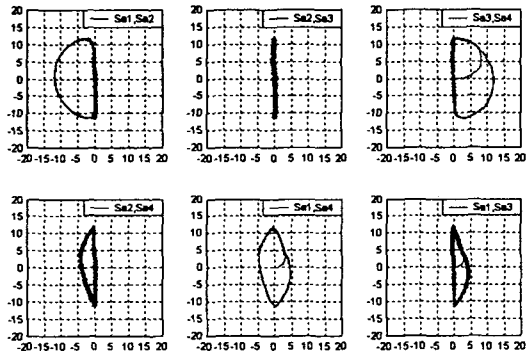
(a) a 상 스위치 고장



(b) b상 스위치 고장



(c) c상 스위치 고장



(d) a상의 2개 스위치 고장

그림 7 고장 운전에서 전류 벡터 패턴
Fig. 7 Current-vector pattern in the fault operation

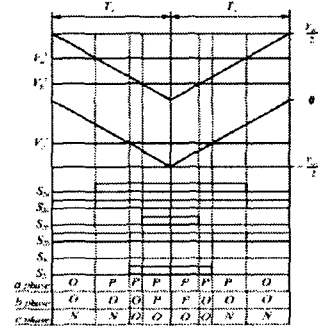
이러한 3-레벨 인버터에서 각 스위치의 고장 발생에 따른 i_d, i_q 전류 파형을 공간 벡터도상에서 전류 벡터 패턴을 비교하면 다음과 같다. 그림 6은 3-레벨 인버터의 정상 운전에서 전류 벡터 패턴이고, 그림 7은 3-레벨 인버터의 고장 운전에서 전류 벡터 패턴이다. 그림 7의 (a)~(c)는 a, b, c 상에서 각 스위치의 고장에 따른 전류 벡터 패턴이고, (d)는 a 상에서 2개 스위치의 고장에 따른 전류 벡터 패턴을 보여준다. 상단과 하단 스위치는 서로 180도의 위상차를 가지며 서로 대칭이다. 그리고 a, b, c 상은 서로 120도의 위상차를 가지며 반 시계방향으로 회전

한다. 따라서 그림 6과 그림 7의 전류 벡터 패턴을 서로 비교하면 각 스위치의 고장 발생을 쉽게 확인할 수 있다.

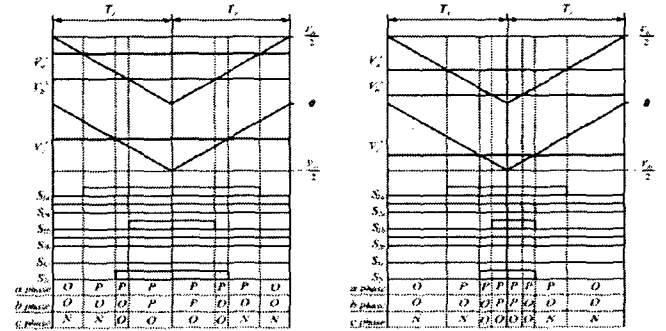
4. 고장 발생시 중성점 불평형 전압 제어

4.1 중성점 불평형 전압 제어

이 절에서는 3-레벨 인버터의 각 스위치 고장발생에 따른 중성점 불평형 전압으로부터 시스템을 안전하게 보호할 수 있는 방법에 대해 자세히 설명한다.



(a) 정상적인 오프셋 전압



(b) 양의 오프셋 전압

(c) 음의 오프셋 전압

그림 8 오프셋 전압에 따른 커패시터 충·방전의 변화
Fig. 8 Variation of the charging/discharging of the capacitor according to voltage offset

그림 3과 같이 고장이 발생 할 때 중성점에 흐르는 전류로 인해 상단과 하단 커패시터의 충·방전 변화에 영향을 준다. 상단 스위치(S_1, S_2) 고장일 경우에는 하단 커패시터의 충전이 증가하고, 하단 스위치(S_3, S_4) 고장일 경우에는 상단 커패시터의 충전이 증가한다. 이러한 커패시터 충·방전 변화는 기존의 컨버터 지령 전압에 오프셋 전압을 추가하여 제어할 수 있는데, 그림 8은 오프셋 전압에 따라서 커패시터의 충·방전의 변화를 보여주고 있다. 그림 8(a)는 오프셋 전압이 없는 경우이고, 그림 8(b)는 양의 오프셋 전압을 준 경우로써 상단 커패시터의 방전이 늘어나고, 그림 8(c)는 음의 오프셋 전압을 준 경우로써 하단 커패시터의 방전이 늘어나게 된

다. 따라서 3-레벨 인버터의 상단 스위치 고장일 경우에는 각 스위치에 따른 음(-)의 오프셋 전압을 추가하고, 하단 스위치 고장일 경우에는 각 스위치에 따른 양(+)의 오프셋 전압을 추가한다. 그림 9는 인버터의 각 스위치 고장 발생시 중성점 불평형 전압 제어기의 동작 순서를 보여주고 있다.

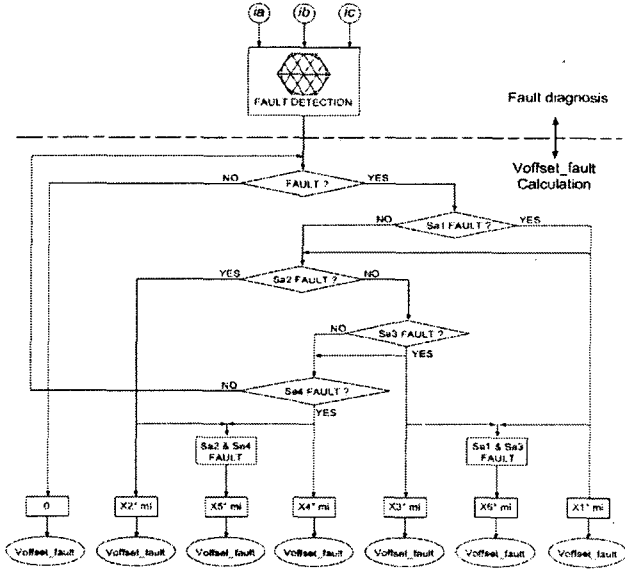


그림 9 중성점 전압 제어의 흐름도
Fig. 9 Flow chart of mid-point voltage control

여기서, 각 스위치의 고장 검출은 앞 절에서 다른 고장 진단 방법을 이용하여 정상 운전과 고장 운전에서의 전류 벡터 패턴을 비교하여 검출한다. 식 (11)~(16)은 각 스위치의 고장에 따른 전류 흐름 변화를 나타내고 있다.

1) S_1 스위치 고장일 경우

$$\begin{aligned} i_{a_fault} &= k \cdot i_{a_{\theta=0-\pi}} + i_{a_{\theta=\pi-2\pi}} \\ i_{b_fault} &= k \cdot i_{b_{\theta=0-\pi}} + i_{b_{\theta=\pi-2\pi}} \\ i_{c_fault} &= k \cdot i_{c_{\theta=0-\pi}} + i_{c_{\theta=\pi-2\pi}} \end{aligned} \quad (11)$$

2) S_2 또는 S_1 과 S_2 스위치 고장일 경우

$$\begin{aligned} i_{a_fault} &= i_{a_{\theta=\pi-2\pi}} \\ i_{b_fault} &= i_{b_{\theta=\pi-2\pi}} \\ i_{c_fault} &= i_{c_{\theta=\pi-2\pi}} \end{aligned} \quad (12)$$

3) S_3 또는 S_3 과 S_4 스위치 고장일 경우

$$\begin{aligned} i_{a_fault} &= i_{a_{\theta=0-\pi}} \\ i_{b_fault} &= i_{b_{\theta=0-\pi}} \\ i_{c_fault} &= i_{c_{\theta=0-\pi}} \end{aligned} \quad (13)$$

4) S_4 스위치 고장일 경우

$$\begin{aligned} i_{a_fault} &= i_{a_{\theta=0-\pi}} + k \cdot i_{a_{\theta=\pi-2\pi}} \\ i_{b_fault} &= i_{b_{\theta=0-\pi}} + k \cdot i_{b_{\theta=\pi-2\pi}} \\ i_{c_fault} &= i_{c_{\theta=0-\pi}} + k \cdot i_{c_{\theta=\pi-2\pi}} \end{aligned} \quad (14)$$

5) S_1 과 S_3 스위치 고장일 경우

$$\begin{aligned} i_{a_fault} &= k \cdot i_{a_{\theta=0-\pi}} \\ i_{b_fault} &= k \cdot i_{b_{\theta=0-\pi}} \\ i_{c_fault} &= k \cdot i_{c_{\theta=0-\pi}} \end{aligned} \quad (15)$$

6) S_2 와 S_4 스위치 고장일 경우

$$\begin{aligned} i_{a_fault} &= k \cdot i_{a_{\theta=\pi-2\pi}} \\ i_{b_fault} &= k \cdot i_{b_{\theta=\pi-2\pi}} \\ i_{c_fault} &= k \cdot i_{c_{\theta=\pi-2\pi}} \end{aligned} \quad (16)$$

위 식들에 의해서 구해진 검출 신호를 이용하여 각 스위치 고장에 따른 오프셋 전압(V_{offset_fault})은 식 (17)과 같다.

$$V_{offset_fault} = X_n \cdot mi (n = 1, 2, 3, 4, 5, 6) \quad (17)$$

여기서, X_n 은 각 스위치 고장에 따라서 중성점 전압이 최소가 되는 상수 값이다. 식 (3)에 식 (17)을 추가하여 새로운 유효 상전압 (V_x'')을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$V_x'' = V_x' + V_{offset_fault} (x = a, b, c) \quad (18)$$

각 스위치의 고장에 따른 오프셋 전압을 기존의 SVPWM에 추가한 새로운 유효 상전압은 3-레벨 인버터에서 각 스위치 고장에 따른 중성점 불평형 전압을 제어하게 된다.

4.2 시뮬레이션 결과

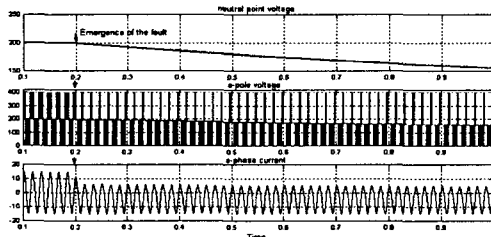
시뮬레이션은 Matlab/Simulink을 이용하였다. 조건은 다음과 같다: $V_{dc}=400[V]$, $C_U=C_L=750[\mu F]$, $T_s=250[\mu s]$, $R=10[\Omega]$, $L=20[mH]$, 고장 발생 시간 $=0.2[s]$. 표 2는 각 스위치 고장 발생에 따른 오프셋 전압 값이다.

표 2 스위칭 고장 상태에 따른 오프셋 전압
Table 2 Voltage offset according to switching fault states

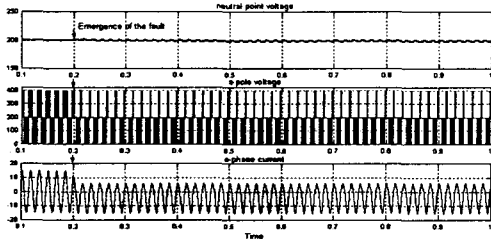
Switching fault state	$V_{offset_fault}[V]$					
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6
S_1	-13	0	0	0	0	0
S_2 또는 S_1, S_2	0	-1	0	0	0	0
S_3 또는 S_3, S_4	0	0	1	0	0	0
S_4	0	0	0	13	0	0
S_1, S_3	0	0	0	0	-17	0
S_2, S_4	0	0	0	0	0	17

그림 10~12은 R-L부하 인버터의 시뮬레이션 결과

이다. 그림 10은 S_{a1} 스위치 고장 운전에서 (a)는 중성점 전압 제어를 하지 않을 때 출력 파형이고, (b)는 중성점 전압 제어를 했을 때 출력 파형이다. 그림 11는 S_{a4} 스위치 고장 운전에서 (a)는 중성점 전압 제어를 하지 않을 때 출력 파형이고, (b)는 중성점 전압 제어를 했을 때 출력 파형이다. 그림 12는 S_{a1} , S_{a3} 스위치 고장 운전에서 (a)는 중성점 전압 제어를 하지 않을 때 출력 파형이고, (b)는 중성점 전압 제어를 했을 때 출력 파형이다. 따라서 그림 10~12와 같이 정상 운전에서 고장이 발생해도 중성점의 전압 불평형이 발생하지 않고 제어가 잘 되는 것을 알 수 있다.

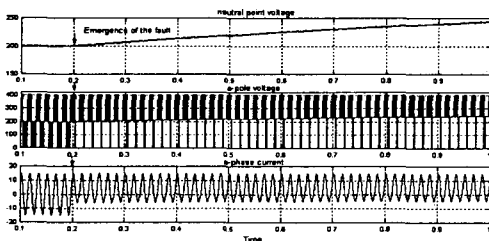


(a) 중성점 전압 제어를 하지 않은 경우

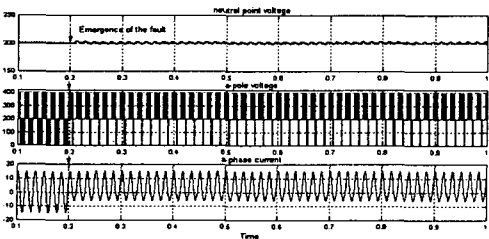


(b) 중성점 전압 제어를 한 경우

그림 10 S_{a1} 스위치 고장 운전의 시뮬레이션 결과
Fig. 10 Simulation results of the S_{a1} fault operation.



(a) 중성점 전압 제어를 하지 않은 경우



(b) 중성점 전압 제어를 한 경우

그림 11 S_{a4} 스위치 고장 운전의 시뮬레이션 결과
Fig. 11 Simulation results of the S_{a4} fault operation.

5. 결론

본 논문에서는 3-레벨 인버터에서 고장이 발생할 때 간단한 고장 진단 방법과 고장 발생에 따른 중성점 불평형 전압 제어 방법을 제안하였다. 이 제안된 방법은 다음과 같은 장점들을 가지고 있다. 1) 고장 진단 방법은 시스템을 분해하지 않고도 각 스위치들의 고장 검출 및 확인이 쉽다. 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 시스템에 적용이 가능하다.

참고 문헌

- [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] Roberto 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] 노의철, "고전압 PWM 컨버터 출력단락보호를 위한 고속 출력스위칭 기법," 전력전자학회 논문지, 제5권, 6호, pp. 530-536, 2000.
- [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," in IEEE APEC Conf. Rec., pp. 509-514, 1999.