

3상 4선식 인버터의 선간 단락 사고 발생 시 새로운 3D SVM 기법

안창균*, 최봉연*, 강경민*, 이훈*, 김미나*, 원충연*
성균관대학교*

A New 3-D Space Vector PWM under Line-to-Line Fault in Three-Phase Four-Wire Inverter

Chang-Gyun An*, Bong-Yeon Choi*, Kyung-Min Kang*, Hoon-Lee*,
Mi-na Kim*, Chung-Yuen Won*
Sungkyunkwan University*

ABSTRACT

In this paper, we propose a new three-dimension space vector pulse width modulation for three-phase four-wire inverter under line-to-line fault. In order to this method, the processes of selecting of the output voltage vectors and synthesizing the reference voltage vector are discussed. In addition, we deal with the calculation of the duty cycles for each sector. The experiments are provided to validate the effectiveness of the proposed method.

1. 서론

최근 AC/DC 하이브리드 배전망 운용에 대한 관심이 높아짐에 따라 마이크로그리드의 고장 검출 및 허용제어에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 일반적으로 풍수해, 뇌격 등에 의한 단락 사고가 발생할 경우, 마이크로그리드는 자동 재폐로, 차단기 및 선로용 퓨즈를 이용하여 사고 지점을 탈락시켜 배전 선로로 고장이 과급되는 것을 방지하는 보호협조를 수행하게 된다. 이러한 기존의 기법은 배전 망 내 추가적인 설비를 요하며 일부 시설에 정전과 같은 불필요한 손실이 발생할 수 있다. 특히 수용가용 소규모 마이크로그리드는 3상 AC 배전망의 각 상전압을 사용하므로 각 상에 통신을 통한 제어가 가능한 차단 회로를 설치해야 하는 부담이 존재한다. 따라서, 본 논문에서는 선간 단락 사고 발생 시 사고 지점을 분리하기 위한 새로운 SVPWM 기법을 제안한다. 제안하는 기법을 검증하기 위하여 사고 시 전압 벡터 평면에 대해 분석하였고, 제안하는 스위칭 기법의 지령 전압 합성 과정을 수학적으로 해석하였다. 제안하는 기법은 실험을 통해 검증하였다.

2. 제안하는 공간벡터변조 기법

2.1 적용된 스위칭 벡터 선택

기존의 3상 4선식 인버터의 출력 가능한 전압 벡터와 스위칭 상태를 나타내면 표 1과 같다. 이를 참고하여 선간 단락 사고 발생 시 사고가 발생한 두 상의 스위칭 상태가 같은 벡터를 선택하면 고장 선간에 영전압을 인가할 수 있다. 각 선간 단락 사고 발생 시 스위칭 벡터의 선택을 나타내면 다음과 같다.

$$U-V \text{ 선간} : \vec{V}_1, \vec{V}_2, \vec{V}_7, \vec{V}_8, \vec{V}_9, \vec{V}_{10}, \vec{V}_{15}, \vec{V}_{16}$$

$$U-W \text{ 선간} : \vec{V}_1, \vec{V}_3, \vec{V}_6, \vec{V}_8, \vec{V}_9, \vec{V}_{11}, \vec{V}_{14}, \vec{V}_{16}$$

$$V-W \text{ 선간} : \vec{V}_1, \vec{V}_4, \vec{V}_5, \vec{V}_8, \vec{V}_9, \vec{V}_{12}, \vec{V}_{13}, \vec{V}_{16}$$

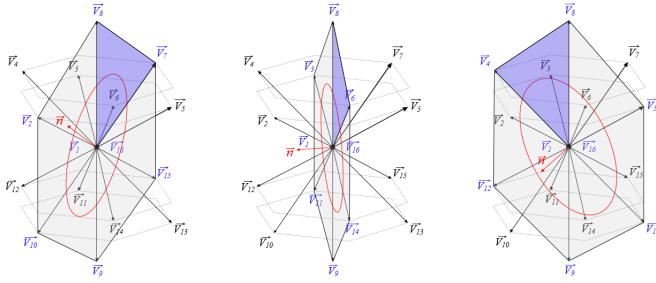
표 1 3상 4선식 인버터의 출력 가능한 전압 벡터와 스위칭 상태
Table 1 Available Voltage Vectors and Switching State of SVPWM

	$S_U S_V S_W S_N$	V_{UN}	V_{VN}	V_{WN}	V_α	V_β	V_o
\vec{V}_1	0000	0	0	0	0	0	0
\vec{V}_2	0010	0	0	1	$-\frac{1}{\sqrt{6}}$	$-\frac{1}{\sqrt{2}}$	$\frac{1}{\sqrt{3}}$
\vec{V}_3	0100	0	1	0	$-\frac{1}{\sqrt{6}}$	$\frac{1}{\sqrt{2}}$	$\frac{1}{\sqrt{3}}$
\vec{V}_4	0110	0	1	1	$-\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}$	0	$\frac{2}{\sqrt{3}}$
\vec{V}_5	1000	1	0	0	$\frac{2}{\sqrt{3}}$	0	$\frac{1}{\sqrt{3}}$
\vec{V}_6	1010	1	0	1	$\frac{1}{\sqrt{6}}$	$-\frac{1}{\sqrt{2}}$	$\frac{2}{\sqrt{3}}$
\vec{V}_7	1100	1	1	0	$\frac{1}{\sqrt{6}}$	$\frac{1}{\sqrt{2}}$	$\frac{2}{\sqrt{3}}$
\vec{V}_8	1110	1	1	1	0	0	$\sqrt{3}$
\vec{V}_9	0001	0	0	0	0	0	$-\sqrt{3}$
\vec{V}_{10}	0011	0	0	0	$-\frac{1}{\sqrt{6}}$	$-\frac{1}{\sqrt{2}}$	$-\frac{2}{\sqrt{3}}$
\vec{V}_{11}	0101	0	1	0	$-\frac{1}{\sqrt{6}}$	$\frac{1}{\sqrt{2}}$	$-\frac{2}{\sqrt{3}}$
\vec{V}_{12}	0111	0	1	1	$-\frac{2}{\sqrt{3}}$	0	$-\frac{1}{\sqrt{3}}$
\vec{V}_{13}	1001	1	0	0	$\frac{2}{\sqrt{3}}$	0	$-\frac{2}{\sqrt{3}}$
\vec{V}_{14}	1011	1	0	1	$\frac{1}{\sqrt{6}}$	$-\frac{1}{\sqrt{2}}$	$-\frac{1}{\sqrt{3}}$
\vec{V}_{15}	1101	1	1	0	$\frac{1}{\sqrt{6}}$	$\frac{1}{\sqrt{2}}$	$-\frac{1}{\sqrt{3}}$
\vec{V}_{16}	1111	1	1	1	0	0	0

위와 같은 원리를 이용하여 선택된 벡터들의 조합은 3차원 공간에서 나타나고 그림 1과 같이 왜곡된 평면을 가지게 된다. 따라서, 왜곡된 평면에서 지령전압 벡터를 합성하고 스위칭 인가 시간을 계산하기 위해서는 새로운 스위칭 기법이 필요하다.

2.2 선간 단락 사고 발생 시 스위칭 적용 시간 계산

왜곡된 평면으로 나타난 각 선간 단락 시 전압 평면 중 U-V 선간 단락 사고 발생 시 지령 전압 벡터를 합성하기 위하여 각 섹터 별로 나타내면 그림 3과 같다. 각 섹터 별로 지령 전압을 합성하여 스위칭 적용 시간을 계산하면 식(1), 식(2) 그리고 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.



(a) U상 사고 (b) V상 사고 (c) W상 사고

그림 1 선간 단락 사고 발생 시 선택된 전압 벡터 평면
Fig. 1 Switching Vectors for 3D SVM Method under Line to Line Fault

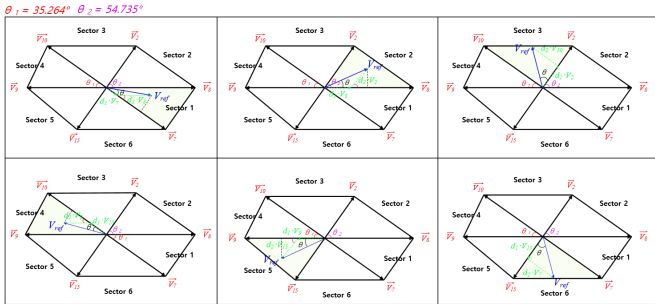


그림 2 U-V 선간 단락 사고 시 각 섹터별 지령 전압 합성
Fig. 2 Synthesis of Voltage Reference for Each Sector under U-V Line to Line Fault

$$d_1 = \frac{1}{|V_{s1}|} [V_d (\cos \theta + \sqrt{2} \sin \theta) + V_q (\sin \theta - \sqrt{2} \cos \theta)]$$

$$d_2 = \frac{\sqrt{3}}{|V_{s1}|} [V_q \cos \theta - V_d \sin \theta] \quad (\text{if Sector 1, 4}) \quad (1)$$

$$d_1 = \frac{1}{|V_{s1}|} [V_d (\cos \theta + \frac{1}{\sqrt{2}} \sin \theta) + V_q (\sin \theta - \frac{1}{\sqrt{2}} \cos \theta)]$$

$$d_2 = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2} |V_{s1}|} [V_q \cos \theta - V_d \sin \theta] \quad (\text{if Sector 2, 5}) \quad (2)$$

$$d_1 = \frac{1}{|V_{s1}|} [V_d \cos \theta + V_q \sin \theta] \quad (3)$$

$$d_2 = \frac{1}{|V_{s1}|} [V_q \cos \theta - V_d \sin \theta] \quad (\text{if Sector 3, 6})$$

본 절에서는 선간 단락 사고 발생 시 고장 상에 영전압을 인가하기 위한 스위칭 벡터를 선택하였고, 이에 따라 왜곡된 평면에서 지령 전압 추종 과정을 통해 공간 벡터 내 존재하는 섹터 1~6 영역에서 지령 전압 추종을 위한 시비율을 계산하였다.

3. 시뮬레이션 및 실험

제안하는 기법의 타당성을 검증하기 위하여 그림 3과 같은 회로를 구성하여 실험을 진행하였다. 실험 시 파라미터로 입력 전압은 $V_{DC} = 380V$, 출력 상전압은 $V_{out} = 128V$ 를 생성하도록 제작하였다. 스위칭 주파수 $f_{PWM} = 20kHz$, 필터 단 $L_{converter} = 1500\mu H$, $L_{grid} = 100\mu H$, $C = 10\mu F$ 와 부하 전력 $P = 900W$ 를 적용하였다. 그림 4는 U-V 선간 단락 사고 발생 시 제안하는 기법이 적용된 실험 파형으로 각각 스위칭 시비율과 상전압, 상전류를 나타낸다. 제안하는 기법은 U-V 선간 단락 발생이므로 U상과 V상의 스위칭 시비율이 동일하게 나타남을 확인할 수 있다. 또한, U, V상의 전압의 크기가 동일

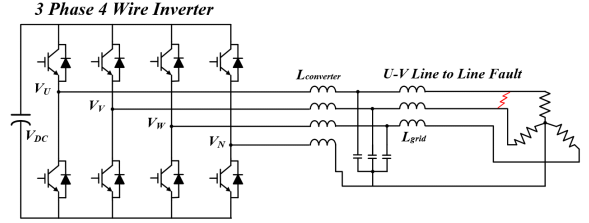
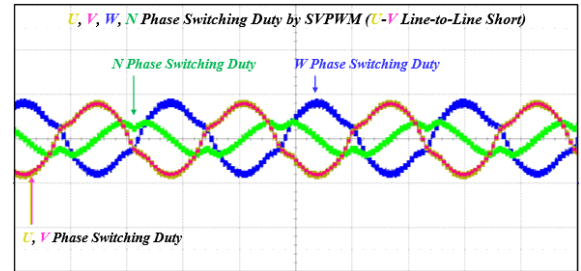
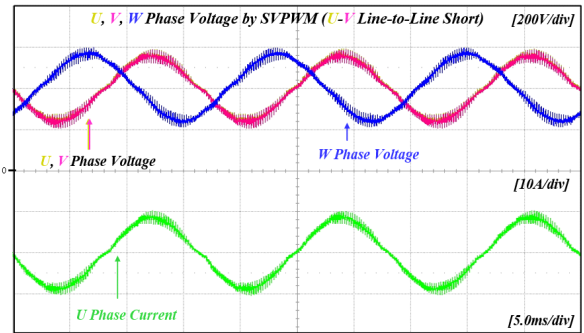


그림 3 선간 단락 사고 시 3상 4선식 인버터
Fig. 3 Three Phase Four Wire Inverter under Line-to-Line Fault



(a) U-V 선간 단락 발생 시 스위칭 시비율



(b) U-V 선간 단락 발생 시 상전압과 상전류

그림 4 각 선간 단락 발생 시 제안하는 기법 적용 시 실험 파형
Fig. 4 Experiment Waveforms for 3D SVM Method under Line to Line Fault

하게 출력됨에 따라 선간 전압에 영전압이 공급됨을 확인할 수 있다. 또한, U상의 전류가 공급됨을 확인하여 제안하는 기법이 적용됨을 검증하였다. 본 논문에서는 선간 단락 사고 발생 시 U-V 선간 단락의 경우만 실험을 진행하였다. 동일한 기법을 활용하여 다른 상의 사고 발생 시에도 적용이 가능하다.

4. 결론

본 논문에서는 3상 4선식 인버터의 선간 단락 사고 발생 시 적용이 가능한 새로운 3D SVM 기법을 제안하였다. 제안하는 기법 적용을 위해 스위칭 벡터를 선택하고 지령 전압 합성 과정을 수학적으로 분석하였다. 또한, 3상 4선식 인버터의 실험 모형을 제작하여 제안하는 기법 적용 시 선간 단락 발생 시에도 상전압 및 상전류를 정상적으로 공급할 수 있음을 보였다.

참고 문헌

[1] J. I. Y. Ota, M. G. Villalva, F. Sato and E. Ruppert, "3-D Space Vector PWM implementation for Four-Leg Voltage Source Inverter," XI Brazilian Power Electronics Conference, Praiamar, 2011, pp. 79-86.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.
(No. 2019381010001B)