

3상 4선식 인터링킹 컨버터의 1선 지락 사고 발생 시 3D SVM 기법

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

A New 3D SVM Method under Single-Line-to-Ground Fault in Three Phase Four Wire Interlinking Converter

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

ABSTRACT

This paper propose a new 3D SVM method for three-phase four wire inverter for fault isolation at a single line ground fault. The available switching combination for isolation of a single line ground fault was analyzed. Using this method, voltage vector diagrams according to each switching combination were classified according to various ground fault situations, and 3D SVM method was performed by generating command for fault isolation. The proposed methods are mathematically analyzed and verified by PSIM simulation.

1. 서 론

전력계통에 설치되어 운용되는 전기설비의 절연이 파괴되면 이로 인해 단락 고장이 발생할 수 있다. 이와 같은 단락 사고 발생 시 계통 보호를 위해서는 차단기 및 계전기를 통해 고장 지역을 신속하게 계통으로부터 제거할 수 있다. 하지만 기존의 계통 보호와 같이 1선 지락 사고 발생 시 연결된 일부 지역의 계통을 모두 차단하게 되면 국소 지역에 정전과 같은 불필요한 손실이 발생할 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 그림 1의 독립형 DC-AC 마이크로 그리드에서 AC 계통의 1선 지락 사고와 같은 단락 사고 발생 시에도 고장난 상 이외에 다른 상에 원활히 전력을 공급하기 위해 AC 계통 전압을 제어하는 3상 4선식 인버터의 새로운 PWM 기법이 요구된다.

본 논문에서는 지락 사고 발생시 고장 지점을 분리하기 위해 고장이 발생한 상에 영 전압을 인가하고, 나머지 상에는 정상적인 전압 벡터를 인가하도록 하는 스위칭 조합을 분석하였다. 스위칭 조합으로 나타나는 3차원 전압 벡터 평면에서 SVM을 위한 섹터 판별과정과 각각의 섹터에서 인버터 각 상의 스위칭을 결정하는 과정을 수학적으로 해석하였으며 PSIM 시뮬레이션을 통하여 검증하였다.

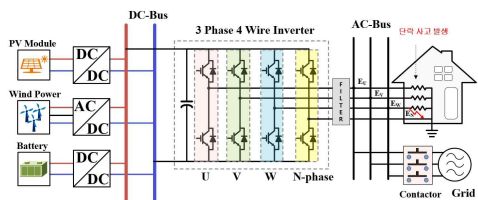


그림 1 3상 4선식 인버터를 이용한 DC-AC 마이크로 그리드
Fig. 1 DC-AC microgrid using the 3 phase 4 leg inverter

2. 본 론

2.1 1선 지락 사고 발생 시 전압 벡터도 분석

기존의 3상 4선식 인터링킹 컨버터의 SVM 적용 시 출력 가능한 전압 벡터와 스위칭 상태를 나타내면 표 1과 같다. 이 중 1선 지락 사고 시 고장난 상에 영 전압을 인가하고, 나머지 상에는 정상적인 전압 벡터를 인가하도록 하기 위하여 고장난 상과 N상의 상태가 같은 경우만을 선택한다. 각상 별 고장의 경우, 선택된 전압 벡터를 평면으로 나타내면 그림 2와 같다. 이를 통해 선택된 벡터로 3상의 지령 전압을 복소수 공간에서 하나의 공간 벡터로 표현할 수 있다.

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

	$S_1 S_2 S_3 S_4$	V_{UN}	V_{VN}	V_{WN}	V_α	V_β	V_o	m
\vec{V}_1	0000	0	0	0	0	0	0	0
\vec{V}_2	0010	0	0	1	$-\frac{1}{\sqrt{6}}$	$-\frac{1}{\sqrt{2}}$	$\frac{1}{\sqrt{3}}$	1
\vec{V}_3	0100	0	1	0	$-\frac{1}{\sqrt{6}}$	$\frac{1}{\sqrt{2}}$	$\frac{1}{\sqrt{3}}$	1
\vec{V}_4	0110	0	1	1	$-\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}$	0	$\frac{2}{\sqrt{3}}$	$\sqrt{2}$
\vec{V}_5	1000	1	0	0	$\frac{2}{\sqrt{3}}$	0	$\frac{1}{\sqrt{3}}$	1
\vec{V}_6	1010	1	0	1	$\frac{1}{\sqrt{6}}$	$-\frac{1}{\sqrt{2}}$	$\frac{2}{\sqrt{3}}$	$\sqrt{2}$
\vec{V}_7	1100	1	1	0	$\frac{1}{\sqrt{6}}$	$\frac{1}{\sqrt{2}}$	$\frac{2}{\sqrt{3}}$	$\sqrt{2}$
\vec{V}_8	1110	1	1	1	0	0	$\sqrt{3}$	$\sqrt{3}$
\vec{V}_9	0001	0	0	0	0	0	$-\sqrt{3}$	$\sqrt{3}$
\vec{V}_{10}	0011	0	0	0	$-\frac{1}{\sqrt{6}}$	$-\frac{1}{\sqrt{2}}$	$-\frac{2}{\sqrt{3}}$	$\sqrt{2}$
\vec{V}_{11}	0101	0	1	0	$-\frac{1}{\sqrt{6}}$	$\frac{1}{\sqrt{2}}$	$-\frac{2}{\sqrt{3}}$	$\sqrt{2}$
\vec{V}_{12}	0111	0	1	1	$-\frac{2}{\sqrt{3}}$	0	$-\frac{1}{\sqrt{3}}$	1
\vec{V}_{13}	1001	1	0	0	$\frac{2}{\sqrt{3}}$	0	$-\frac{2}{\sqrt{3}}$	$\sqrt{2}$
\vec{V}_{14}	1011	1	0	1	$\frac{1}{\sqrt{6}}$	$-\frac{1}{\sqrt{2}}$	$-\frac{1}{\sqrt{3}}$	1
\vec{V}_{15}	1101	1	1	0	$\frac{1}{\sqrt{6}}$	$\frac{1}{\sqrt{2}}$	$-\frac{1}{\sqrt{3}}$	1
\vec{V}_{16}	1111	1	1	1	0	0	0	0

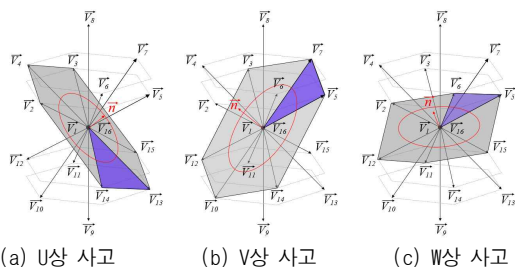


그림 2 1선 지락 사고 발생 시 선택된 전압 벡터 평면
Fig. 2 Switching Vectors for 3D SVM method under Single Line to Ground Fault

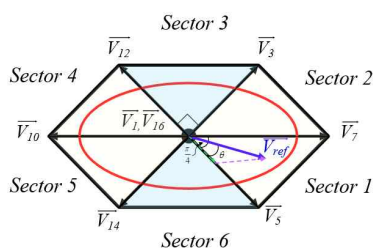
이렇게 나타난 지락 고장 시 선택된 전압 벡터들을 통해 SVM 적용을 하기 위해서는 스위칭 벡터들이 동일 평면 내에 존재해야 한다. 따라서, 식 (1)과 같이, V_{13} 와 V_{14} 의 법선 벡터를 구한다. 법선 벡터로 표현된 \vec{n} 는 앞선 두 벡터의 수직축을 의미한다. 식 (2)를 통해 법선 벡터와 V_{15} 임을 확인하여 U상의 지락 사고 시 선택된 모든 벡터들이 동일 평면에 존재함을 확인할 수 있다. V상과 W상에도 동일한 원리로 적용이 가능하다.

$$\vec{n} = \vec{V}_{14} \times \vec{V}_{13} = \left(\frac{1}{\sqrt{6}}, -\frac{1}{\sqrt{2}}, -\frac{1}{\sqrt{3}}\right) \times \left(\frac{\sqrt{2}}{3}, 0, -\frac{2}{\sqrt{3}}\right) = \left(\frac{\sqrt{2}}{3}, 0, \frac{1}{\sqrt{3}}\right) \quad (1)$$

$$\vec{n} \cdot \vec{V}_{15} = \left(\frac{\sqrt{2}}{3}, 0, \frac{1}{\sqrt{3}}\right) \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{6}}, \frac{1}{\sqrt{2}}, -\frac{1}{\sqrt{3}}\right) = 0 \quad (2)$$

2.2 1선 지락 사고 발생 시 지령 전압 합성

선택된 전압 벡터를 통해 나타난 전압 벡터 평면은 그림 3과 같이 섹터 1, 2, 4, 5와 3, 6의 영역으로 크기가 다른 두 구간으로 나타난다. 따라서, 지령 전압은 섹터 별 영역에 따라 다음 식과 같이 구할 수 있다. 이때 $|V_A|$ 와 $|V_B|$ 는 섹터별 정방향 회전 시 선택된 벡터의 크기 값으로 표 1의 m에 나타내었다.



(a) 전압 벡터 평면(정방향 회전)

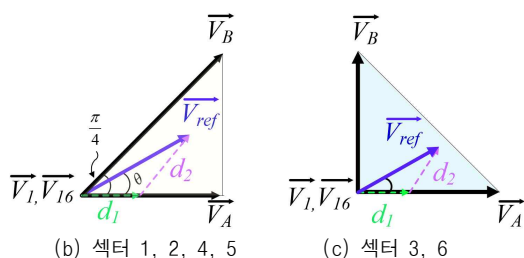


그림 3 1선 지락 사고 발생 시 섹터 별 지령 전압 합성
Fig. 3 Reference Voltage Synthesis under SLG Fault

$$\vec{V}_{ref} = d_1 \vec{V}_A + d_2 \vec{V}_B + (1 - d_1 - d_2) \vec{V}_{0,16} \quad (3)$$

$$d_1 = \begin{cases} \frac{|V_{ref}|}{|V_A|} (\cos\theta - \sin\theta) & \text{if Sector}=1,2,4,5 \\ \frac{|V_{ref}|}{|V_A|} \cos\theta & \text{if Sector}=3,6 \end{cases} \quad (4)$$

$$d_2 = \begin{cases} \frac{|V_{ref}| \cdot \sqrt{2} \sin\theta}{|V_B|} & \text{if Sector}=1,2,4,5 \\ \frac{|V_{ref}|}{|V_B|} \sin\theta & \text{if Sector}=3,6 \end{cases} \quad (5)$$

2.3 1선 지락 사고 발생 시 전압 벡터 인가 순서

합성된 지령 전압을 구한 뒤 벡터를 인가하는 순서를 정하기 위하여 본 논문에서는 고조파 특성에 가장 유리한 것으로 알려져있는 대칭 공간 벡터 전압 변조 방식을 적용하여 그림 4와 같은 스위칭 동작을 적용하였다. 그림 4는 U 상 고장 시 스위칭 동작을 나타낸다.

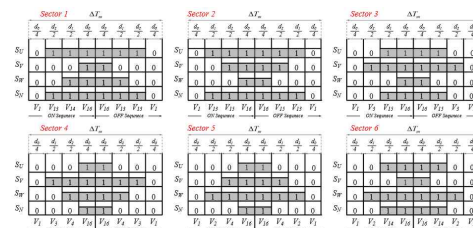
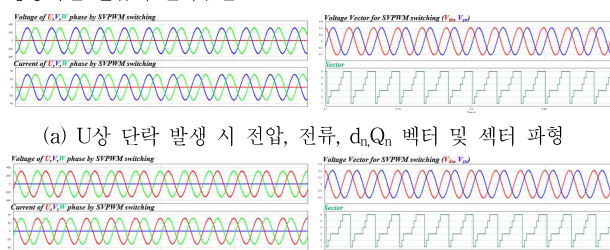


그림 4 U상 지락 사고 발생 시 스위칭 동작
Fig. 4 Symmetrical sequence switching under U phase SLG fault

3. 시뮬레이션

제한하는 1선 지락 발생 시 3D SVPWM 기법의 타당성을 검증하기 위하여 PSIM 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이션 파라미터는 입력 전압 $V_{DC} = 750V$, 출력 상전압 $V_{out} = 220V$, 스위칭 주파수 $f_{PWM} = 20kHz$, 필터 단 $L_{converter} = 1500\mu H$, $L_{grid} = 100\mu H$, $C = 10\mu F$ 와 부하 전력 $P = 10kW$ 를 적용하였다. 그림 5는 제안하는 SVM 기법을 각각 U, V 상 고장에 적용한 시뮬레이션 파형을 나타낸다. U, V 상 고장 시 고장난 상에 영 전압이 인가되며 다른 상에 정상적인 전압이 인가됨을 확인하였다.



(a) U상 단락 발생 시 전압, 전류, d_n, Q_n 벡터 및 섹터 파형

(b) V상 단락 발생 시 전압, 전류, d_n, Q_n 벡터 및 섹터 파형

그림 5 1선 지락 시 제안하는 SVM 시뮬레이션 파형
Fig. 3 Proposed SVM Method Simulations under SLG Fault

4. 결론

본 논문은 3상 4선식 인터링킹 컨버터의 1선 지락 사고 발생 시 적용 가능한 새로운 3D SVM 기법을 제안하였다. 이를 위해 조합 가능한 스위칭 벡터를 분석하였으며 제안하는 기법을 PSIM 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

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.