ISSN : 1226-7244 (Print)
ISSN : 2288-243X (Online)
논문번호 20-01-23
170

j.inst.Korean.electr.electron.eng.Vol.24,No.1,170~177,March 2020
http://dx.doi.org/10.7471/ikeee.2020.24.1.170

HF/LF 변조를 적용한 Active NPC 인버터의 개방 고장 허용 제어

Open Switch Fault Tolerance Control of Active NPC Inverters With HF/LF Modulation

정 원 석*, 김 예 지*, 김 석 민*, 이 교 범*★

Won Seok Jung*, Ye-Ji Kim*, Seok-Min Kim*, Kyo-Beum Lee*★

Abstract

This paper presents an open-fault tolerance control method for active neutral point clamped (ANPC) inverter with high frequency/low frequency (HF/LF) modulation. By applying the ANPC inverter with SiC MOSFETs and Si IGBTs, the system efficiency and performance can be improved compared to a Si-based inverter. HF/LF modulation is used for a megawatt-scale inverter to minimize the commutation loop. The open-switch failure in megawatt-scale inverter causes severe damage to load and huge expenses when the inverter has been shut-down. The proposed tolerance control of open-switch failure provides continuous operation and improved reliability to the ANPC inverter. The effectiveness of the proposed fault tolerance control is verified by simulation results.

요 약

본 논문은 HF/LF 변조 방법을 적용한 ANPC (active neutral point clamped) 인버터의 스위치 개방 고장에 대응하기 위한 허용 제어 방법을 제안한다. 기존 Si 기반 인버터에 비해 SiC MOSFET과 Si IGBT로 구성된 ANPC 인버터는 시스템의 효율이 높고 출력 품질이 우수하다. HF/LF 변조는 커뮤테이션 루프를 줄일 수 있어 MW 급 대용량 인버터를 위해 사용되는 변조 기법이다. MW 급 인버터의 스위치 개방 고장은 부하에 심각한 손상을 입히며, 인버터가 동작을 멈출 경우 막대한 경제적 손실을 야기한다. 제안하는 스위치 개방 고장의 허용 제어 기술은 ANPC 인버터의 지속적인 운전을 가능하게 하며 신뢰성을 향상 시킨다. 제안하는 기법의 성능은 시뮬레이션 결과를 통해 검증한다.

Key words : Open-switch fault, Fault tolerance control, Silicon carbide (Si), Active neutral point clmaped (ANPC), reliability

* Dept. of Electrical and Computer Engineering, Ajou University
★ Corresponding author
E-mail : kyl@ajou.ac.kr, Tel : +82-31-219-2376

※ Acknowledgment
This work was supported by "Human Resources Program in Energy Technology" of the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP), granted financial resource from the Ministry of Trade, Industry & Energy, Republic of Korea. (No. 20194030202370)
Manuscript received Mar. 6, 2020; revised Mar. 17, 2020; accepted Mar. 18, 2020.
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Ⅰ. 서론

3-레벨 인버터는 태양광 발전 시스템, 풍력 발전 시스템, 전기 자동차 배터리 충전 시스템, 에너지 저장 장치(energy storage system, ESS)와 같은 다양한 전력 범위의 응용 분야에서 널리 사용되고 있다 [1-5]. 대표적인 3-레벨 인버터 토폴로지인 neutral point clamped(NPC) 인버터는 한 레그(leg)에 네 개의 스위치 소자와 두 개의 클램핑 다이오드로 구성된다. NPC 인버터의 주요한 단점인 스위치 소자 간 손실 불균형 문제는 특정 스위치 소자의 접합 온도를 증가시키고, 인버터의 스위칭 주파수를 제

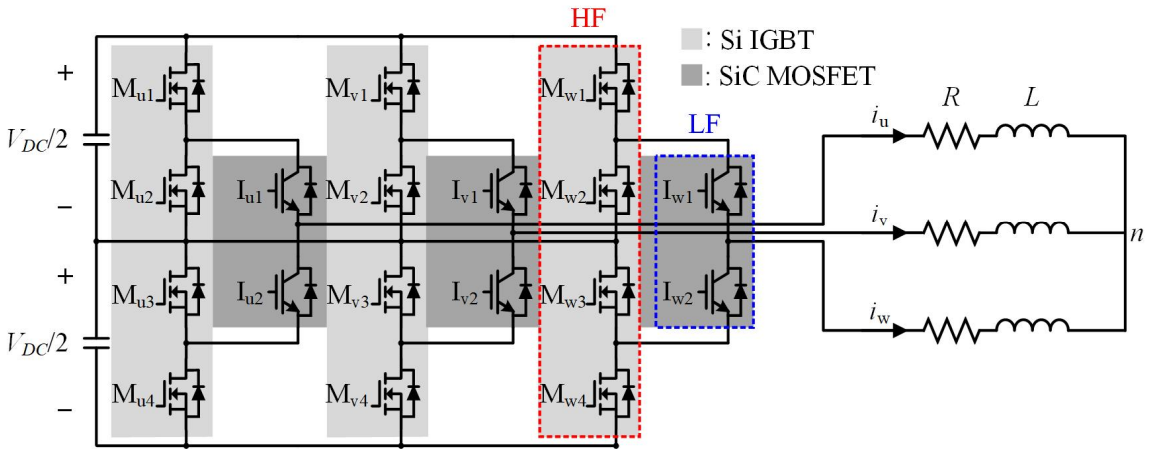


Fig. 1. Configuration of a 3-level ANPC inverter with SiC MOSFETs and Si IGBTs.
그림 1. SiC MOSFET과 Si IGBT을 사용한 3-레벨 ANPC 인버터

한시킨다. 이전의 많은 연구에서 접합 온도 상승이 스위치 소자의 수명에 큰 영향을 미친다는 사실이 알려져 있으며[6], 인버터의 신뢰성을 향상시키기 위해 스위치 소자 간 손실 불균형 문제를 해결해야 한다. NPC 인버터의 손실 불균형 문제의 해결을 위해 active NPC(ANPC) 인버터가 제안되었다. ANPC 인버터는 NPC 인버터에서 사용되던 클램핑 다이오드를 능동(active) 스위치로 대체한 토폴로지이며, 전류 경로를 다양하게 설정할 수 있기 때문에 스위치 간 손실을 분배할 수 있다[7], [8]. 그러나 스위치 소자의 손실을 분배하기 위해 복잡한 계산이나 제어가 필요하게 되므로 실제 적용에 어려움이 있다.

최근 wide-band gap 소자의 일종인 실리콘 카바이드(silicon carbide, SiC)를 적용한 전력변환장치 연구가 많이 진행되고 있다[6-8]. SiC 스위치 소자는 현재까지 널리 사용되던 실리콘(silicon, Si) 스위치 소자보다 매우 낮은 스위칭 손실 특성을 제공한다. 그러나 SiC 소자의 가격이 Si 소자보다 3~5배 높기 때문에 ANPC의 모든 스위치를 SiC 소자로 사용하면 구성비용의 부담이 증가한다. 따라서 인버터의 가격 대비 성능과 효율을 full SiC NPC 인버터와 동일하게 제공하기 위해 ANPC 인버터에 사용되는 스위치 소자를 Si IGBT와 SiC MOSFET의 두 가지 종류로 함께 사용하는 토폴로지가 제안되었다[9]. SiC 소자는 물질적 특성에 의해 높은 스위칭 주파수로 동작하여도 Si IGBT가 같은 주파수로 동작하는 경우에 비해 손실이 매우 낮다. 두 가지 종류의 스위치를 사용하는 ANPC 인버터를 위한 변조 기법 가운데 HF/LF(High frequency/low frequency) 변조는 SiC MOSFET의 스위칭 주파수는 높게 설정하고, Si IGBT의 스위칭 주파수는 낮게 설정한 방법으로 스위칭 손실을 최소화 하면서도 Commutation loop가 짧게 구성되어 대용량 인버터를 위한 최적의 변조 기법이다. MOSFET의 고주파수 스위칭 동작은 우수한 전류 품질을 제공하며 Si IGBT는 50/60 Hz의 낮은 주파수로 동작하여 출력 전압의 레벨을 형성하는 역할만을 한다. 결과적으로 Si IGBT는 스위칭 손실이 0에 가깝기 때문에 고효율, 고성능의 인버터를 구현할 수 있다.

전력변환장치의 고장 요소 가운데 전력반도체 스위치 소자에 의한 고장은 전체의 21%를 차지할 만큼 주요한 원인이다[10]. 스위치 고장의 유형 가운데 개방성 고장은 출력 전류의 왜곡, 다른 정상 레그의 과도한 전류 증가, 중성점 전압의 불균형을 초래한다[11]. 또한, 대용량 시스템이 스위치 고장에 의해 정지할 경우, 시간 당 막대한 손해비용이 발생한다. 그러므로 스위치 소자의 고장 발생 시, 허용 제어를 통해 최대한 정상 운전 상태와 유사한 동작을 지속할 수 있다면 전체 시스템의 신뢰성을 향상시킬 수 있다. 본 논문에서는 ANPC 인버터의 스위치 개방 고장을 대응하기 위한 허용 제어 방법을 제안한다. 본 기법은 예비의 스위칭 레그나 추가적인 센서를 요구하지 않기 때문에 허용 운전을 위한 추가적인 비용 발생 없이 소프트웨어 프로그래밍만으로 구현이 가능하다. 본 논문의 고장 허용 제어 방법은 시뮬레이션 결과를 통해 타당성을 검증한다.

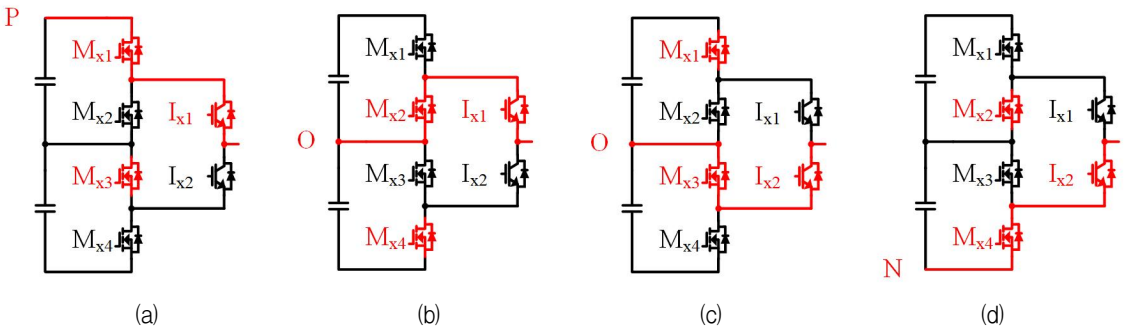


Fig. 2. Switching states for 3-level ANPC inverter with SiC MOSFETs and Si IGBTs (a) P state, (b) O+ state, (c) O− state, (d) N state.

그림 2. SiC MOSFET과 Si IGBT을 사용한 3-레벨 ANPC 인버터의 스위칭 상태 (a) P 상태, (b) O+ 상태, (c) O− 상태, (d) N 상태

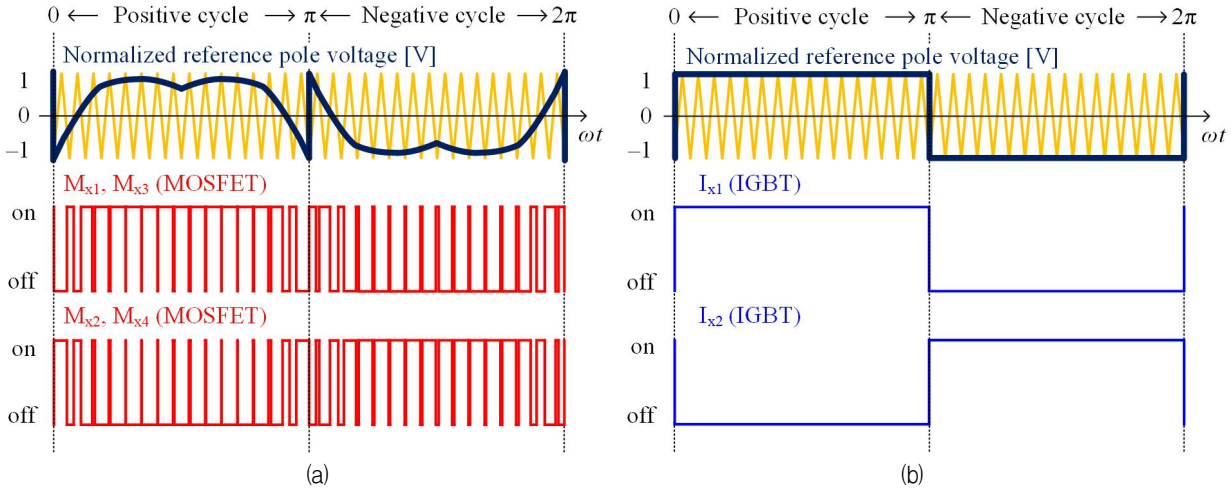


Fig. 3. Gating signal patterns by the HF/LF modulation (a) HF (MOSFET), (b) LF (IGBT).

그림 3. HF/LF 변조에 따른 게이트 신호 패턴 (a) HF (MOSFET), (b) LF (IGBT)

II. ANPC 인버터의 동작 원리 및 HF/LF 변조

본 절에서는 ANPC 인버터의 동작 원리 및 HF/LF 변조에 대해 설명한다. 본 논문의 ANPC 인버터는 그림 1과 같이 한 레그에 네 개의 SiC MOSFET과 두 개의 Si IGBT로 구성된다. M_{x1}, M_{x2}, M_{x3}, M_{x4} (x=u, v, w)는 SiC MOSFET이고, I_{x1}, I_{x2}는 Si IGBT이다. 그림 2는 ANPC의 네 가지 스위칭 상태를 나타낸다. 각 스위치의 온오프 상태에 따라 P 상태, O+ 상태, O− 상태, N 상태가 결정되며, 출력과 연결되어 극전압이 출력된다. 그림 2와 같이 ANPC에서는 O 상태가 O+와 O− 상태의 두 가지로 나눠지므로, 네 종류의 스위칭 상태를 가진다. 그림 3은 HF/LF 변조에서의 극전압 지령(reference pole voltage)과 각 스위치 소자의 게이트 신호를 나타낸다. 본 논문에서는 옵셋(offset) 전압을 이용한 공간벡터변조(space vector PWM, SVPWM)를 적용하여 선형 변조 가능한 최대 전압 변조 지수는 1.15가 된다. SVPWM의 구현을 위해 사용되는 옵셋 전압 V_{offset}은 다음과 같은 식으로 계산된다.

$$V_{offset} = \frac{-(V^*_{\max} + V^*_{\min})}{2} \tag{1}$$

여기서 $V^*_{\max}$와 $V^*_{\min}$는 상전압 지령 V^*_u, V^*_v, V^*_w 중 순시적인 최대, 최소의 값이다. 계산한 옵셋 전압 V_{offset}과 사인파 형태의 상전압 지령 V^*_u, V^*_v, V^*_w을 더하면 그림 3(a)의 상단 그림과 같은 극전압 지령이 생성되고, 이를 이용하여 전압을 변조한다. 그림 3(b)는 Si IGBT의 극전압 지령을 나타내며, SiC MOSFET의 극전압 지령이 양의 사이클(positive cycle)에서 음의 사이클(negative cycle)로 바뀌거나 음의 사이클에서 양의 사이클로 바뀔 때마다 온・오프 상태가 변한다. 한 레그 내에 왼쪽에 있는 네 개의 직렬연결 SiC MOSFET M_{x1},

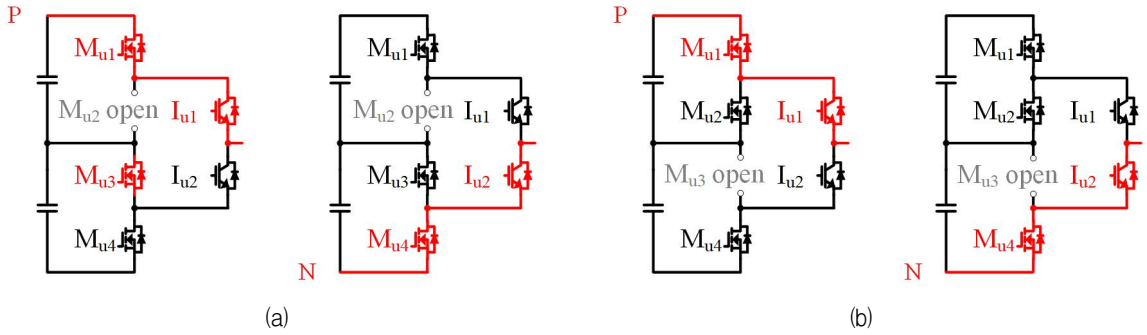


Fig. 4. Proposed fault tolerance control (a) M_{u2} open fault, (b) M_{u3} open fault.
그림 4. 제안하는 고장 허용 제어 (a) M_{u2} 개방 고장, M_{u3} 개방 고장

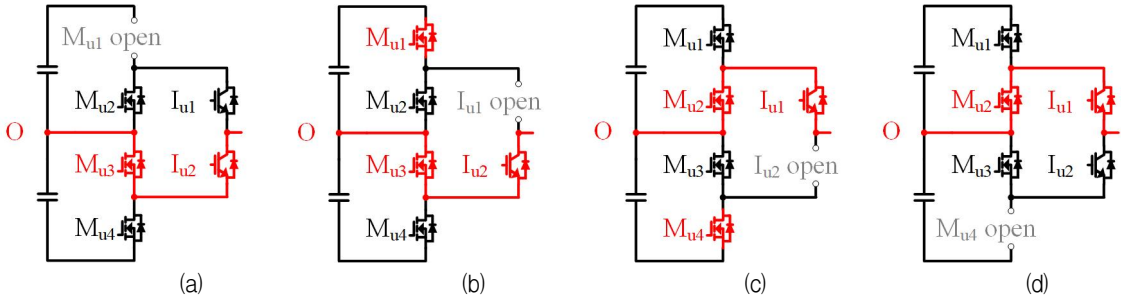


Fig. 5. Proposed fault tolerance control (a) M_{u1} open fault, (b) I_{u1} open fault, (c) I_{u2} open fault, (d) M_{u4} open fault.
그림 5. 제안하는 고장 허용 제어 (a) M_{u1} 개방 고장, (b) I_{u1} 개방 고장, (c) I_{u2} 개방 고장, (d) M_{u4} 개방 고장

M_{x2}, M_{x3}, M_{x4}는 높은 스위칭 주파수(HF)로 동작하고 오른쪽에 있는 두 개의 직렬연결 Si IGBT I_{x1}, I_{x2}는 낮은 스위칭 주파수(LF)로 동작하므로 이러한 변조 방법을 HF/LF 변조라고 한다. MOSFET 스위치 [M_{x1}, M_{x3}]는 동일한 지령 신호에 의해 동일한 스위칭 동작을 수행하며, [M_{x2}, M_{x4}]는 [M_{x1}, M_{x3}]에 인가한 신호의 상보 신호를 인가한다. I_{x1}과 I_{x2}는 서로 상보 동작한다. 극전압 지령이 양의 사이클인 경우에는 I_{x1}이 계속 켜진 상태에서 [M_{x1}, M_{x3}]과 [M_{x2}, M_{x4}]가 상보 동작하면서 P와 O+ 상태를 반복한다. 극전압 지령이 음의 사이클인 경우에는 I_{x2}가 계속 켜진 상태에서 [M_{x1}, M_{x3}]과 [M_{x2}, M_{x4}]가 상보 동작하면서 N과 O- 상태를 반복한다. 이러한 변조 방법으로 인해 출력되는 스위칭 상태는 SiC MOSFET의 스위칭에 따라 결정된다. HF/LF 변조에서는 SiC MOSFET이 높은 스위칭 주파수로 동작하므로 스위칭 손실이 SiC MOSFET에 집중되지만, SiC 소자의 특성으로 인해 Si IGBT가 같은 스위칭 주파수로 동작하는 것보다 손실이 매우 작다. Si IGBT는 지령 전압의 기본파 주파수로 동작하므로 스위칭 손실이 거의 0에 가깝게 발생한다. 결론적으로 출력의 스위칭 주파수는 기존 Si IGBT 기반 NPC 인버터에 비해 증가시키고, 전체 손실은 감소시킬 수 있어 고효율 및 고성능 인버터를 구현할 수 있다.

III. 제안하는 개방 고장 허용 제어 방법

ANPC 인버터는 한 레그에 여섯 개의 스위치 소자로 구성된다. 본 논문에서는 한 레그에 한 스위치 소자가 고장인 경우만을 가정하여 고장 허용 제어 방법을 제안한다. 3상 인버터의 u상의 고장을 예시로 설명하고, 다른 상의 고장은 동일한 방법으로 허용 제어 방법을 적용할 수 있다. 제안하는 허용 제어는 간단하게 M_{u2} 또는 M_{u3}이 개방 고장인 경우와 M_{u1}, I_{u1}, I_{u2}, M_{u4} 중 하나가 개방 고장인 경우로 구분된다.

1. M_{u2} 또는 M_{u3}의 개방 고장인 경우

허용제어의 목적은 부하에 3상 평형을 이루는 전류를 공급하는 것이다. M_{u2} 또는 M_{u3}가 고장인 경우에는 ANPC 인버터에서 O 상태를 정상적으로 출력할 수 없다. 그러므로 그림 4와 같이 P 상태와 N 상태만을 이용하여 전압을 변조한다. 그림 4(a)

와 4(b)는 각각 M_{u2}가 개방 고장인 경우와 M_{u3}가 개방 고장인 경우의 허용 제어 방법을 나타낸다. 두 가지 경우 동일한 방법으로 허용 제어가 가능하다. 그러나 이 방법에서 I_{u1}와 I_{u2}는 Si IGBT이지만 기존에 SiC MOSFET이 동작하던 스위칭 주파수로 동작해야한다. 따라서, Si IGBT에 발생하는 손실을 고려하여 스위칭 주파수를 적절한 값으로 감소시켜 운전하게 한다.

2. M_{u1}, I_{u1}, I_{u2}, M_{u4}의 개방 고장인 경우

M_{u1} 또는 I_{u1}의 개방 고장인 경우 P 상태를 출력할 수 없고, I_{u2} 또는 M_{u4}의 개방 고장인 경우 N 상태를 출력할 수 없다. 그러므로 u상의 출력 극전압을 O 상태로 고정시키고 나머지 상을 이용하여 120 °의 위상차를 갖는 3상 전류를 만들기 위해 선간 전압의 기본파가 120 °의 위상차를 이루도록 만들어야 한다[12]. 인버터의 정상 운전 상태에서 상전압 지령은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} V_u^* &= V^* \sin(\omega t) \\ V_v^* &= V^* \sin(\omega t - 2\pi/3) \\ V_w^* &= V^* \sin(\omega t + 2\pi/3) \end{aligned} \tag{2}$$

여기서 V^*_u, V^*_v, V^*_w는 각 상의 상전압 지령이고, V^*는 정상 운전 상태인 경우의 지령 전압의 크기다. 정상 운전 상태에서의 각 상 사이의 선간 전압을 계산하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} V_{uv} &= \sqrt{3}\, V^* \sin(\omega t + \pi/6) \\ V_{vw} &= -\sqrt{3}\, V^* \sin(\omega t + \pi/2) \\ V_{wu} &= \sqrt{3}\, V^* \sin(\omega t + 5\pi/6) \end{aligned} \tag{3}$$

V_u = 0인 상태에서 식 (3)의 평형된 3상 선간전압을 유지하기 위한 상전압 지령을 계산하면 다음의 식과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} V_u^* &= 0 \\ V_v^* &= -\sqrt{3}\, V^* \sin(\omega t + \pi/6) \\ V_w^* &= \sqrt{3}\, V^* \sin(\omega t + 5\pi/6) \end{aligned} \tag{4}$$

위의 상전압 지령을 이용하여 옵셋 전압 V_{offset}을 결정할 경우 V^*_u는 항상 0이므로 원하는 SVPWM의 성능을 발휘할 수 없다. 따라서 허용 제어 시에는 V_{offset} = 0인 즉, 상전압 지령과 극전압 지령이 동일한 SPWM으로 전환하여 사용한다. 이러한 허용 제어 기법을 통해 3상 선간전압과 전류는 평형

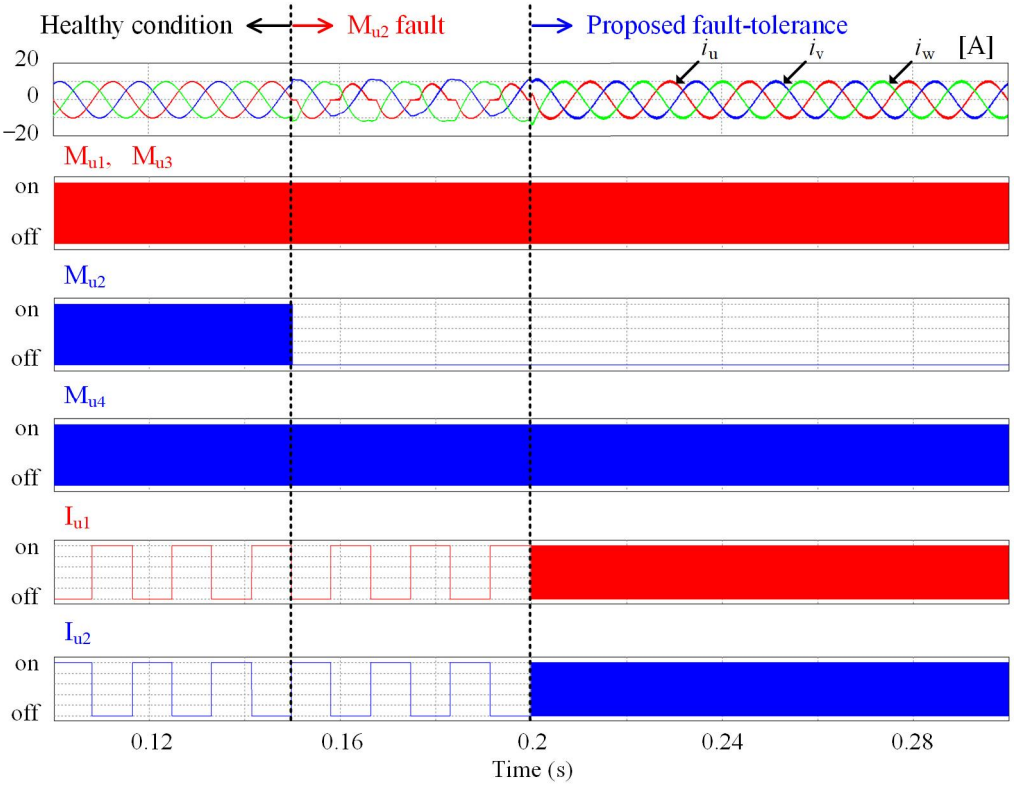


Fig. 6. Simulation results of fault tolerance control method in M_{u2} fault condition.
그림 6. M_{u2}가 고장인 조건에서의 고장 허용 제어 시뮬레이션 결과

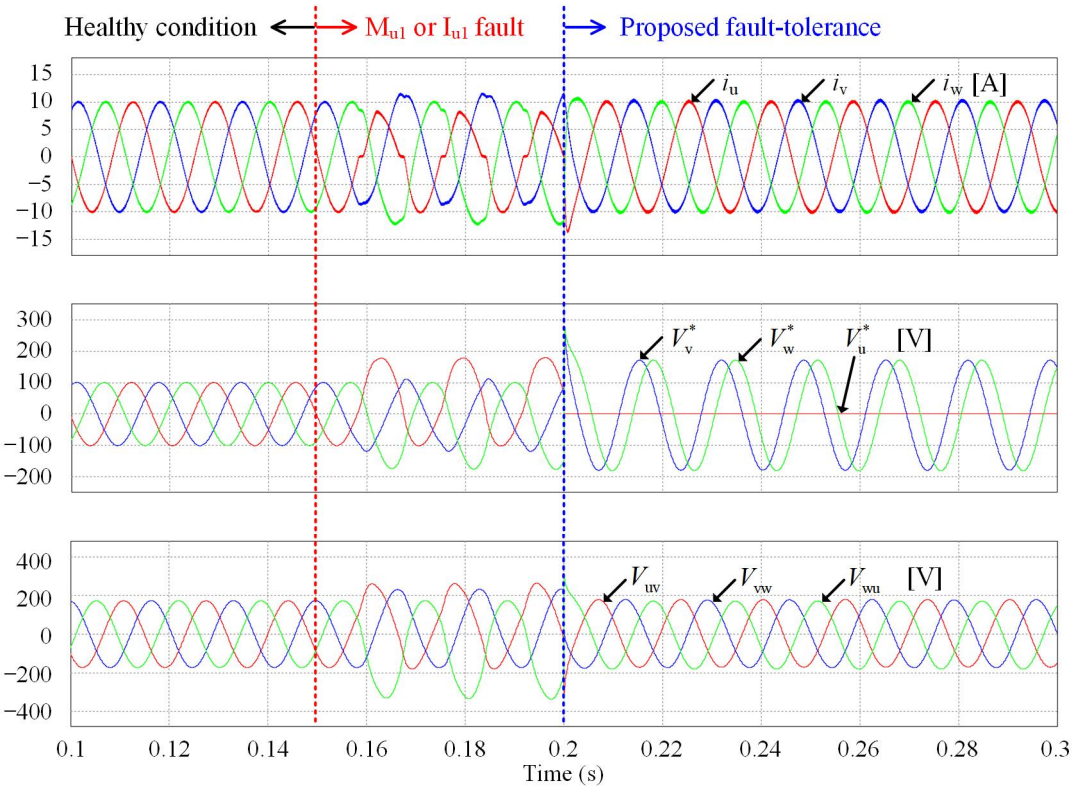


Fig. 7. Simulation results of fault tolerance control method in M_{u1} or I_{u1} fault condition.
그림 7. M_{u1} 또는 I_{u1}이 고장인 조건에서의 고장 허용 제어 시뮬레이션 결과

을 이룰 수 있다. 단, 이 방법을 사용하는 경우 상전압 지령이 $\sqrt{3}$배의 크기로 증가하므로 최대 변조 가능한 전압 변조 지수는 SPWM의 최대치인 1에서 $1/\sqrt{3}$으로 제한된다.

Ⅳ. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션을 위한 회로는 그림 1과 동일하며, PSIM을 이용한 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 파라미터는 표 1과 같이 설정하였고, d-q축 전류 제어기를 이용하여 출력 전류를 10 A로 제어하였다. 제안하는 방법에 대한 시뮬레이션 결과는 M_{u1}, M_{u2}, I_{u1}의 경우만 확인하며, 나머지 스위치의 고장은 동일한 방법으로 허용 제어가 가능하다.

그림 6은 M_{u2}이 고장인 상황과 고장 허용 제어를 적용한 시뮬레이션 결과이다. 스위치 소자들은 스위칭 주파수에 비례하여 발생하는 손실이 증가하는데, 제안하는 허용 제어 방법에서는 Si IGBT도 30 kHz의 높은 스위칭 주파수로 동작하여 과도한 열이 발생할 수 있다. 따라서, Si IGBT의 후속적인 파손을 방지하기 위해 스위칭 주파수를 10 kHz로 변경한다. 그러므로 출력 전류의 전고조파왜율(total harmonic distortion, THD)는 정상 운전 상태인 경우 1.10 %에서 허용 제어를 적용 후 3.78 %로 계산된다. M_{u3}이 고장인 경우도 마찬가지로 동일한 방법으로 허용 제어를 수행할 수 있다. 그림 7은 M_{u1} 또는 I_{u1}가 고장인 경우의 고장 허용 제어 시뮬레이션 결과이다. 상전압 지령이 $\sqrt{3}$배의 크기로 증가하였으며, 허용 제어 수행 시 선간 전압과 전류가 120°의 위상차를 가지며 평형을 이룬다. 출력 전류의 THD는 정상 상태에서 1.10 %였으며, 이 경우 스위칭 주파수를 30 kHz로 유지하므로 허용 제어 방법을 적용한 경우에도 THD는 1.84 %이다. 본

Table 1. Simulation parameters.
표 1. 시뮬레이션 파라미터

Parameters	Value
DC-link voltage	600 V
Switching frequency	30 kHz
Output frequency	60 Hz
Load resistance, R	10 Ω
Load inductance, L	3 mH

논문에서 제안하는 허용 제어 방법을 통해 모든 스위치의 단일 개방 고장에 대한 허용 제어를 수행할 수 있음을 시뮬레이션 결과를 통해 확인하였다.

Ⅴ. 결론

본 논문에서는 SiC MOSFET과 Si IGBT를 혼합한 ANPC 인버터의 기본 동작 방법을 설명하고, 제안하는 개방 허용 고장 방법을 설명하였다. SiC MOSFET은 빠른 스위칭 속도로 동작시키고 Si IGBT는 느린 스위칭 속도로 동작시키는 HF/LF 변조를 사용하여 스위칭 손실을 줄이고, 출력 전압의 등가 운전 주파수는 증가시켜 고효율 및 고성능 인버터를 구현하였다. HF/LF 변조기법이 사용되는 대용량 ANPC 인버터의 신뢰성 향상을 위해 스위치 개방 고장을 대응하기 위한 허용 제어 기술을 소개하였다. 제안하는 허용 제어 기술은 3상 선간 전압의 평형을 이루도록 3상 지령 전압을 재구성하여 변조를 수행한다. 개방성 스위치 고장이 발생한 경우에도 추가적인 스위칭 레그나 센서의 도움 없이 제안하는 허용 제어 기법을 통해 부하에 3상 평형을 이룬 선간전압과 전류를 공급할 수 있음을 시뮬레이션 결과를 통해 검증하였다. 본 허용제어 방법은 SiC와 Si 소자가 혼용된 새로운 NPC 인버터 토폴로지의 스위치 고장 상황을 대응하기 위한 기법으로, HF/LF 변조를 기반으로 하는 MW 급 대용량 ANPC 인버터의 신뢰성을 향상시킨다.

References

[1] K.-B. Lee and J.-S. Lee, *Reliability Improvement Technology for Power Converters*, Springer, 2017. DOI: 10.1007/978-981-10-4992-7.

[2] S.-M. Kim, I. J. Won, J. Kim, and K.-B. Lee, “DC-link Ripple Current Reduction Method for Three-level Inverters with Optimal Switching Pattern,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol.65, No.12, pp.9204-9214, 2018.
DOI: 10.1109/TIE.2018.2823662

[3] U.-M. Choi, F. Blaabjerg, and K.-B. Lee, “Reliability Improvement of a T-Type Three-Level Inverter With Fault-Tolerant Control Strategy,” *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol.30, No.5, pp.2660-2673, 2015.
DOI: 10.1109/TPEL.2014.2325891

[4] J.-S. Lee and K.-B. Lee, “Open-Circuit Fault Tolerant Control for Outer Switches of Three-Level Rectifiers in Wind Turbine Systems,” *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol.31, No.5, pp. 3806-3815, 2016. DOI: 10.1109/TPEL.2015.2464803

[5] R. Katebi, J. He, and N. Weise, “An Advanced Three-Level Active Neutral-Point-Clamped Converter With Improved Fault-Tolerant Capabilities,” *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol.33, No.8, pp.6897-6909, 2018. DOI: 10.1109/TPEL.2017.2759760

[6] S.-R. Jo, S.-M. Kim, S. Cho, and K.-B. Lee, “Development of a Hardware Simulator for Reliable Design of Modular Multilevel Converters Based on Junction-Temperature of IGBT Modules,” *Electronics*, Vol.8, No.1127, pp.1-15, 2019.
DOI: 10.3390/electronics8101127

[7] T. Bruckner, S. Bernet, and H. Guldner, “The Active NPC Converter and Its Loss-Balancing Control,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol.52, No.3, pp.855-868, 2005. DOI: 10.1109/TIE.2005.847586

[8] T. Bruckner, S. Bernet, and P. K. Steimer, “Feedforward Loss Control of Three-Level Active NPC Converters,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol.43, No.6, pp.1588-1596, 2007.
DOI: 10.1109/TIA.2007.908164

[9] Q.-X. Guan, C. Li, Y. Zhang, S. Wang, D. Xu, W. Li, and H. Ma, “An Extremely High Efficient Three-Level Active Neutral-Point-Clamped Converter Comprising SiC and Si Hybrid Power Stages,” *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol.33, No.10, pp. 8341-8352, 2018. DOI: 10.1109/TPEL.2017.2784821

[10] S. Yang, D. Xiang, A. Bryant, P. Mawby L. Ran, and P. Trvner, “Condition Monitoring for Device Reliability in Power Electronic Converters: A Review,” *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol.25, No.11, pp.2734-2752, 2010.
DOI: 10.1109/TPEL.2010.2049377

[11] B. H. Kwon, S.-H. Kim, S.-M. Kim, and K.-B. Lee, “Fault Diagnosis of Open-Switch Failure in a Grid-Connected Three-Level Si/SiC Hybrid ANPC Inverter,” *Electronics*, Vol.9, No.399, pp.1-18, 2020.

DOI: 10.3390/electronics9030399
[12] J. Li, A. Q. Huang, Z. Liang, S. Bhattacharya, "Analysis and Design of Active NPC (ANPC) Inverters for Fault-Tolerant Operation of High-Power Electrical Drives," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol.27, No.2, pp.519-533, 2012.
DOI: 10.1109/TPEL.2011.2143430

BIOGRAPHY

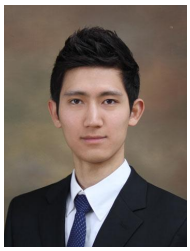
Won Seok Jung (Member)

2008 : BS degree in Electrical Engineering, Credit Bank System.
2016 : MS degree in Electrical and Computer Engineering, Ajou University.
2016~present : PhD student in Electrical and Computer Engineering, Ajou University.

Ye-Ji Kim (Member)

2019 : BS degree in Electrical and Computer Engineering, Ajou University.
2019~present : MS student in Electrical and Computer Engineering, Ajou University.

Seok-Min Kim (Member)



2013 : BS degree in Electronic Engineering, Sejong University.
2016 : MS degree in Space Survey Information Technology, Ajou University.
2020 : PhD degree in Electrical and Computer Engineering, Ajou University.
2020~present : Research Associate in Electrical and Computer Engineering, Ajou University.

Kyo-Beum Lee (Member)

1997 : BS degree in Electrical and Electronic Engineering, Ajou University.
1999 : MS degree in Electrical and Electronic Engineering, Ajou University.
2003 : PhD degree in Electrical Engineering, Korea University.
2003~2006 : Research Associate, Institute of Energy Technology, Aalborg University.
2006~2007 : Assistant Professor, Chonbuk National University.
2007~present : Professor, Dept. of Electrical and Computer Engineering, Ajou University.