

Performance Analysis on a Bidirectional Operation of a Three-Level Hybrid ANPC Inverter

3-레벨 Hybrid ANPC 인버터의 양방향 운전 성능 분석

Bong Hyun Kwon · Sang-Hun Kim · Kyu-Chul Bae · Kyo-Beum Lee

권봉현* · 김상훈* · 배규철* · 이교범†

Abstract

This paper analyzes the performance of a three-level hybrid active neutral-point clamped (ANPC) inverter in a bidirectional operation. In the bidirectional operation where electrical energy flows from dc source to ac grid and vice versa, a weakness of neutral-point-clamped (NPC) inverter is an unequal loss distribution between four silicon (Si) switching devices. A leg of the hybrid ANPC inverter consists of the four Si insulated gate bipolar transistors (IGBTs) and two silicon carbide (SiC) active switches. Only two SiC metal oxide semiconductor field effect transistors (MOSFETs) take all the switching events using redundant switching states but the switching losses are reduced compared to that of NPC inverter. The hybrid ANPC topology has an advantage of almost the same power loss operating as a grid-connected inverter and rectifier. The validity of the power loss analysis in the bidirectional operation is verified by a PSIM simulation model and experiment in the grid-connected three-phase three-level voltage source inverter.

Key Words

Grid connected inverter system, Active Neutral-Point-Clamped (ANPC) inverter, Silicon Carbide (SiC) switches, Bidirectional operation, Performance analysis

1. 서론

최근 도서 지역 분산에 발전 시스템 도입과 산업체의 최대 수요 전력 증대에 따라, 에너지 저장 시스템(Energy Storage System, ESS)이 주목받고 있다. ESS는 효율적인 에너지 운용을 위해 배터리를 충전할 수 있고 필요에 따라 저장된 에너지를 부하에 공급하는 장치이며, 이와 관련된 전력변환장치(Power Conversion System, PCS)와 필터 설계, 신뢰성 분야 연구가 활발히 진행되고 있다[1]-[6]. ESS용 PCS는 양방향 전력 전달이 가능한 토폴로지를 사용하며, 적용 용량에 따라 단상 2-레벨 컨버터부터 3상 멀티-레벨 인버터까지 구조가 다양하다[7]-[8]. 멀티-레벨 인버터는 2-레벨보다 스위칭 소자의 개수가 많아 가격이 증가하고 구조가 복잡하지만, 출력 전압이 세분되어 출력 전류의 고조파 함유율이 낮으며, 필터 설계가 용이하다[9]-[10].

다양한 멀티-레벨 인버터 중에서 중성점 클램핑(Neutral-Point Clamped, NPC) 타입의 3-레벨 인버터가 대표적이다. NPC 인버터는 소자에 인가되는 전압 스트레스가 낮아

스위칭 손실(Switching loss)이 비교적 적고 PCS의 효율이 높다[11]. 하지만 실리콘(Silicon, Si) 기반 전력 반도체 소자를 사용한 NPC 인버터의 정방향(Power Factor (PF): 1) 또는 역방향(PF: -1) 운전 시 손실 특성이 같지 않으며, 각 레그(leg)에 존재하는 스위치의 전력 손실이 크다. 이는 각 패키지의 온도 불균형을 초래하며 할 수 있으며, 작게는 소자의 내열 설계에서 칩 면적을 증가시키고 크게는 PCS의 방열 설계에 단점으로 작용한다. 양방향 운전 시 손실 불균형과 온도 상승은 전력 반도체의 신뢰성 문제를 야기하며 전력 밀도를 감소시킨다[12].

이러한 문제를 해결하고자 Hybrid Active NPC (Hybrid ANPC) 인버터가 제시되었다[13]. Hybrid ANPC 인버터는 NPC 인버터의 중성점 다이오드 대신 Si IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)를 사용하며, 각 레그의 일부 스위칭 소자로 탄화규소(Silicon Carbide, SiC) 소자를 채택하였다. 일반적인 ANPC 인버터의 스위칭 소자는 양방향 운전 시 스위치별 손실 특성이 동일하지만, Si 소자로만 구성되어 특정 소자에서 스위칭 손실이 크게 발생한다. 이를 개선하기 위해 다양한 변

† Corresponding Author : Dept. of Electrical and Computer Engineering, Ajou University, Korea.

E-mail: kyl@ajou.ac.kr
<https://orcid.org/0000-0002-2125-9500>

* Dept. of Electrical and Computer Engineering, Ajou University, Korea.
<https://orcid.org/0000-0001-7569-0315>, ORCID ID : 0000-0003-4959-2097,
<https://orcid.org/0000-0003-0457-6472>

Received : June 18, 2019 Accepted : September 26, 2019

Copyright © The Korean Institute of Electrical Engineers

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

조 방식이 제안되었지만, 제어 복잡도가 증가한다는 단점이 있다[14]. Hybrid ANPC 인버터는 Si와 SiC 소자를 복합적으로 사용하여, 양방향 운전 시 손실 불균형 문제를 개선하고 PCS의 효율을 높일 수 있다.

본 논문에서는 3-레벨 Hybrid ANPC 인버터의 양방향 운전 시 성능을 분석하였다. Hybrid ANPC 인버터의 구조와 변조 방식을 설명하였으며, 양방향 운전 시 특성을 분석하였다. 3상 계통 연계형 시스템에서 양방향 전력 전달을 수행하였으며, Hybrid ANPC 스위치별 손실 분포를 확인하였다. 시뮬레이션과 실험 결과를 바탕으로 Hybrid ANPC 인버터의 양방향 운전 시 성능을 검증하였다.

2. Hybrid ANPC 인버터의 토폴로지와 변조 방법

2.1 NPC와 Active NPC 인버터

그림 1의 인버터 구조는 모두 3-레벨 인버터로서 기본적으로 직류 단 전압(V_{dc})을 이용하여 교류 전압($+V_{dc}/2$, 0 , $-V_{dc}/2$)을 출력할 수 있다. 그림 1(a)와 같이 NPC 인버터에서는 한 레그에 4개의 Si IGBT (Sw_1 , Sw_2 , Sw_3 , Sw_4)와 중성점 클램핑 다이오드 (D_1 , D_2)가 존재한다. NPC 인버터는 하나의 레그에서 P (Positive), O (Zero), N (Negative) 세 가지 스위칭 상태가 가능하며, 중성점에 다이오드가 연결되어 영 전압 (O 스위칭) 상태에서 수동적인 전류 흐름이 발생한다. NPC 토폴로지는 전력 전달 방향에 따라 소자별 손실 분포가 고르지 않아 PCS 설계 시 발열에 따른 소자 선정과 방열 설계가 큰 고려사항이다[12]. 그림 1(b)와 같이 ANPC 인버터에서는 NPC 인버터의 중성점 클램핑 다이오드를 Si IGBT (Sw_5 , Sw_6)로 변경하여 더욱 많은 스위칭 상태를 능동적으로 고려할 수 있다. ANPC 인버터는 NPC 인버터보다 더욱 다양한 많은 변조 방법을 적용할 수 있지만, NPC 인버터와 마찬가지로 스위칭 손실이 크고 양방향 운전에서 소자별 손실 분포가 균일하지 않다. 스위치별 손실을 균일하게 하기 위한 손실 추정 및 접합온도를 계산하여 각 소자에서 발생하는 열을 균일하게 분배하는 방법이 존재하지만, 제어가 복잡하다[15]-[17].

2.2 Hybrid ANPC 인버터

본 논문에서 분석하는 Hybrid ANPC 인버터는 그림 2와 같이 4개의 Si IGBT Sw_1 , Sw_4 , Sw_5 , Sw_6 와 2개의 SiC MOSFET (Sw_2 , Sw_3)로 하나의 레그를 구성한다. SiC MOSFET은 밴드 갭 에너지가 큰(Wide Band Gap, WBG) 소자로서 Si보다 고온 안정성이 높고 턴-온/오프 에너지가 낮아 높은 주파수로 스위칭 동작이 가능하다[18]-[20]. 모든 스위칭 소자가 Si IGBT로 구성된 기존의 ANPC 인버터와 달리 Hybrid ANPC는 Si IGBT

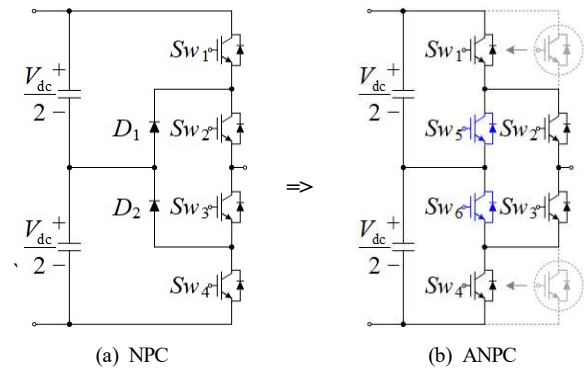


그림 1 중성점 클램핑 인버터의 종류와 구조 (a) NPC 인버터 (b) ANPC 인버터

Fig. 1 Type and structure of neutral-point-clamped inverters (a) NPC inverter (b) ANPC inverter

와 SiC MOSFET을 혼용하여 각 소자의 장점을 활용하는 토폴로지이다. 또한, 한 레그 내에 있는 Si IGBT와 SiC MOSFET은 각기 다른 지령 신호에 의해 스위칭 동작을 수행하여 출력 전압을 변조한다. 앞서 언급한 바와 같이 일반적인 Si IGBT 기반 ANPC 인버터는 스위칭 소자 간의 온도 분배를 위하여 IGBT의 접합온도 추정을 요구하는 복잡한 O 스위칭 상태 선택 기법을 사용한다. 그러나 Hybrid ANPC 인버터는 스위칭 손실이 매우 작은 SiC MOSFET을 사용하며 Si IGBT는 매우 낮은 주파수로 스위칭 동작을 수행하기 때문에 모든 스위칭 소자의 손실은 대부분 전도 손실로 이루어져 복잡한 O 스위칭 상태 선택 기법 없이 상대적으로 균등한 온도 분배가 가능하다.

전력변환장치에 SiC MOSFET을 적용하는 주된 이유는 높은 스위칭 주파수로 운전을 하여도 고효율, 고전력 밀도의 인버터를 설계할 수 있기 때문이다. 모든 스위치가 SiC MOSFET으로 구성된 Full SiC-ANPC 인버터 토폴로지도 존재하지만 현재까지 SiC MOSFET의 가격은 Si IGBT 대비 4~6배 높으며 소자의 용량이 증가함에 따라 두 소자의 가격 차이는 더욱 커진다. Hybrid ANPC 구조는 200 kW 용량 기준 Full SiC-ANPC 구조 대비 약 절반의 스위칭 소자 가격으로 거의 동일한 출력 품질과 효율을 갖는 인버터를 구성할 수 있다[13].

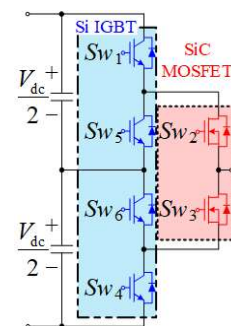


그림 2 Hybrid ANPC 인버터 구조
Fig. 2 Structure of Hybrid ANPC inverter

2.3 Hybrid ANPC 인버터의 변조 방법

Hybrid ANPC 인버터는 저속 스위칭 주파수(Low Frequency, LF)와 고속 스위칭 주파수(High Frequency, HF)를 혼합한 LF/HF 변조 방법을 사용한다. 그림 3과 같이 ANPC 인버터는 지령 상전압과 음셋 전압을 더하여 변조된 지령 전압 신호를 삼각 반송파와 비교하여 스위칭 신호를 생성한다[22]. 변조된 지령 전압이 삼각 반송파보다 클 경우 HF 신호는 턴-온 신호가 되고, 지령 전압이 삼각 반송파보다 작을 때 HF 신호는 턴-오프 신호로 발생한다. 삼각 반송파와 비교를 통해 생성된 HF 신호는 삼각 반송파와 동일한 주파수를 가지며, 게이트 드라이버(Gate Drive Unit, GDU)를 거쳐 SiC MOSFET의 게이트에 인가되어 매우 빠르게 스위치를 턴-온/오프 시킨다. 그림 3에 표시된 것과 같이 2개의 SiC MOSFET Sw_2 , Sw_3 는 HF 신호에 따라 상보적으로 동작한다. 지령 전압이 삼각 반송파보다 큰 값을 가지는 구간에서는 상단 스위치(Sw_2)가 턴-온되며, 반대로 지령 전압이 삼각파 보다 작은 값을 가지는 구간에서는 하단 스위치(Sw_3)가 턴-온 된다.

LF 신호는 삼각 반송파와 무관하며 변조된 지령 전압의 부호와 주파수에 따라 결정된다. 지령 전압이 양(+)의 값을 가지는 구간에서 LF 신호는 턴-온 신호가 되고, 지령 전압이 음(-)의 값을 가지는 구간에서 LF 신호는 턴-오프 신호가 된다. LF 신호는 지령 전압에 상응하는 주파수로 발생하며, HF 신호보다 비교적 느리게 Si IGBT를 턴-온/오프 시킨다. 4개의 Si IGBT 스위치 중에서 Sw_1 , Sw_6 스위치와 Sw_4 , Sw_5 스위치가 짝을 이루어 동작하며, Sw_4 , Sw_5 스위치가 턴-온 상태를 유지하는 동안 Sw_1 , Sw_6 스위치에서 턴-오프 상태가 지속된다. 나머지 반 주기 동안은 반대의 스위칭 상태를 가진다.

LF/HF 변조 방법을 사용하면 대부분의 스위칭 동작이 2개의 SiC MOSFET에 집중된다. 2개의 SiC MOSFET는 온도 변

화에 따른 턴-온/오프 에너지 변화가 작아서 고속 스위칭 주파수(HF)로 동작하더라도 스위칭 손실이 매우 적다. Si IGBT의 스위칭 주파수를 높이는 경우 큰 스위칭 손실이 발생하므로 4개의 스위치 Sw_1 , Sw_4 , Sw_5 , Sw_6 은 낮은 스위칭 주파수(LF)로 동작하여 스위칭 손실을 최소화한다. SiC MOSFET가 고속으로 스위칭하는 동안 Si IGBT가 통전 경로로만 사용되므로 Si IGBT에서 발생하는 전도 손실(Conduction loss)만을 고려하여 소자 선정이 가능하다. 고속 스위칭 주파수(HF)로 동작하는 스위치 Sw_2 , Sw_3 은 30kHz 이상으로 동작하여 인버터 등가 스위칭 주파수를 높이는 효과를 가진다. 이는 출력 전류의 전고조파 왜율(Total Harmonics Distortion, THD)을 개선하여 필터 인덕턴스의 감소, 인덕터의 물리적 크기 감소로 이어진다[23].

3. Hybrid ANPC 인버터의 양방향 운전 분석

3.1 정방향 운전 시 특성 분석

Hybrid ANPC 인버터는 표 1과 같이 각 레그의 스위치별 온-오프 상태에 따라 4가지 스위칭 상태가 존재하며, 3-레벨 인버터이므로 3가지 극 전압을 출력한다. Positive (P) 스위칭 상태에서 극 전압은 양의 값($+V_{dc}/2$)이며, Negative (N) 스위칭 상태에서 극 전압은 음의 값($-V_{dc}/2$)이다. 기존 NPC 인버터의 Zero (O) 상태는 한가지이지만, Hybrid ANPC 인버터는 영전압 생성을 위하여 두 가지의 Zero 스위칭 상태(O+, O-)를 가진다.

P와 O+ 스위칭 상태에서 Si IGBT Sw_1 과 Sw_6 스위치는 턴-온, Sw_4 와 Sw_5 스위치는 턴-오프 상태이며, 최종적으로 스위칭 상태는 SiC MOSFET의 상태에 의해 결정된다. 반대로 N과 O- 스위칭 상태에서 Sw_1 과 Sw_6 스위치는 턴-오프, Sw_4 와 Sw_5 스위치는 턴-온 상태이며, 마찬가지로 스위칭 상태는 SiC MOSFET에 의해 결정된다. 이는 앞서 설명한 것처럼 저속(LF)으로 동작하는 Si IGBT 대비 고속(HF)으로 동작하는 SiC MOSFET에서 더 많은 스위칭 동작과 스위칭 손실이 발생한다는 것을 의미한다.

각 스위칭 상태에 따른 스위치별 온-오프 상태와 도통 전류의 크기에 따라 수식 (1), (2)와 같이 전도 손실이 발생하며 수식 (3)과 같이 스위칭 손실이 발생한다[24]-[25]. V_{CE} 는 컬렉터-이미터 양단 전압 강하, I_C 는 컬렉터 전류, V_{DS} 는 드레인-소스 양단 전압 강하, I_D 는 드레인 전류이며, D_{IGBT} 와 D_{FET} 는 스위치의 듀티 비이다. IGBT와 MOSFET 스위칭 동작에서 발생하는 손실은 스위칭 주파수 f_{sw} , 턴-온/오프로 발생하는 에너지(E_{on} , E_{off})를 기반으로 수식 (3)과 같이 계산할 수 있다[26].

$$P_{IGBT,con} = V_{CE} \times I_C \times D_{IGBT} \quad (1)$$

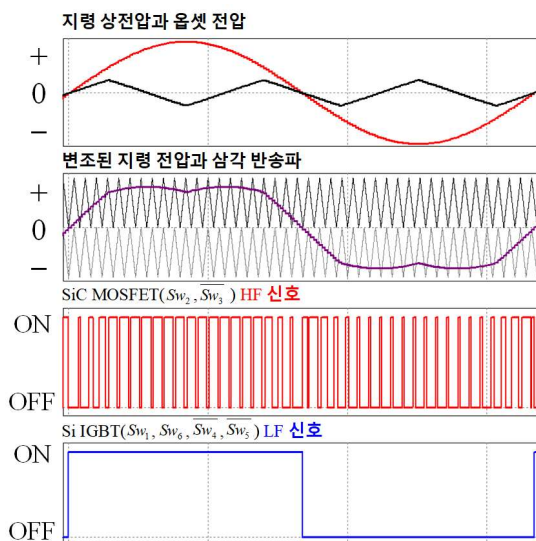


그림 3 Hybrid ANPC 인버터의 LF/HF 변조 방식
Fig. 3 LF/HF modulation method of Hybrid ANPC inverter

$$P_{MOSFET,con} = V_{DS} \times I_D \times D_{FET} = R_{ds(on)} \times I_D^2 \times D_{FET} \quad (2)$$

$$P_{transistor,sw} = f_{sw} \times (E_{on} + E_{off}) \quad (3)$$

출력 전류가 양의 값일 때, 스위칭 상태는 P와 O+ 상태를 반복한다. 이 구간 동안 Si IGBT Sw_1 , Sw_6 는 켜지며, SiC MOSFET Sw_2 , Sw_3 는 고속으로 켜지고 꺼진다. P 상태에서 Sw_1 , Sw_2 , Sw_6 스위치가 켜지며, O+ 상태에서 Sw_1 , Sw_3 , Sw_6 스위치가 켜진다. 정방향 운전 시 그림 4(a)와 같이 P 스위칭 상태에서 양의 전류가 Sw_1 , Sw_2 스위치로 도통된다. 그림 4(b)와 같이 Sw_2 스위치가 턴-오프, Sw_3 스위치가 턴-온되며 O+ 스위칭 상태로 전환되어 2개의 SiC MOSFET에서 스위칭 손실이 발생한다.

출력 전류가 음의 값일 때 스위칭 상태는 N과 O- 상태를 반복하며, Si IGBT Sw_4 , Sw_5 가 켜진 상태를 유지한다. 정방향 운전 시 그림 4(c)와 같이 N 스위칭 상태에서 음의 전류가 Sw_3 , Sw_4 스위치로 도통된다. 그림 4(d)와 같이 Sw_2 스위치가 턴-온, Sw_3 스위치가 턴-오프되며 O- 스위칭 상태로 전환되어 2개의 SiC MOSFET에서 스위칭 손실이 발생한다.

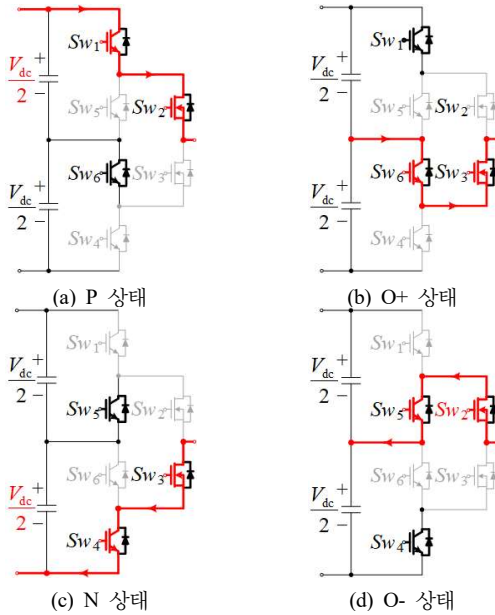


그림 4 Hybrid ANPC 인버터의 동작(PF: 1) (a) P (b) O+ (c) N (d) O- 상태

Fig. 4 Operation of Hybrid ANPC inverter(PF: 1) (a) P (b) O+ (c) N (d) O- state

표 1 Hybrid ANPC 인버터의 스위칭 상태와 극 전압

Table 1 Switching states and pole voltages in the Hybrid ANPC inverter

스위칭 상태	극 전압 [V]	스위치별 온-오프 상태 (1: 켜짐, 0: 꺼짐)					
		Sw_1	Sw_2	Sw_3	Sw_4	Sw_5	Sw_6
P	$+V_{dc}/2$	1	1	0	0	0	1
O+	0	1	0	1	0	0	1
O-	0	0	1	0	1	1	0
N	$-V_{dc}/2$	0	0	1	1	1	0

3.2 역방향 운전 시 특성 분석

역방향 운전 시 정방향과 반대로 전류가 음의 값을 가질 때, 스위칭 상태는 P와 O+ 상태를 반복한다. 이 구간 동안 정방향 운전 시와 마찬가지로 Si IGBT Sw_1 , Sw_6 는 켜지며, SiC MOSFET Sw_2 , Sw_3 는 상보적으로 켜지고 꺼지는 동작을 반복한다.

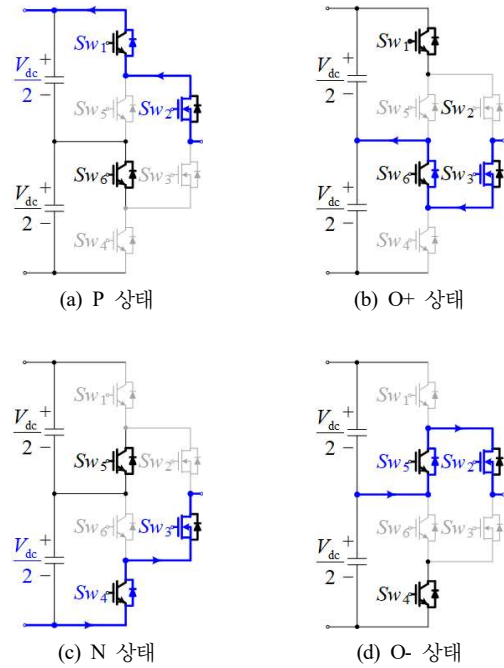


그림 5 Hybrid ANPC 인버터의 동작(PF: -1) (a) P (b) O+ (c) N (d) O- 상태

Fig. 5 Operation of Hybrid ANPC inverter(PF: -1) (a) P (b) O+ (c) N (d) O- state

P 상태에서 그림 5(a)와 같이 Sw_1 , Sw_2 , Sw_6 스위치가 켜지며, 전류는 스위치 Sw_1 , Sw_2 로 도통한다. 스위치 양단의 전압과 전류의 방향이 정방향 운전 시와 반대이므로 Sw_1 의 역병렬 다이오드를 통한 도통 손실이 발생하며, Sw_2 는 드레인-소스 전압에 따라 양방향으로 도통이 가능한 소자이므로 정방향 운전과 같은 도통 손실이 발생한다. O+ 상태에서는 그림 5(b)와 같이 Sw_1 , Sw_3 , Sw_6 스위치가 켜지며, Sw_6 의 역병렬 다이오드와, Sw_3 스위치를 통해 전류가 도통한다. 이때, 각 스위치의 전도 손실은 수식 (4)와 같이 계산할 수 있다. V_d 는 역병렬 다이오드의 순방향 전압 강하, I_F 는 순방향 도통 전류, D_{diode} 는 듀티 비를 의미한다. 반면 역병렬 다이오드의 스위칭 손실은 스위칭 주파수 f_{sw} , 역회복 에너지 E_{rr} 를 바탕으로 수식 (5)와 같이 계산된다.

$$P_{diode,con} = V_d \times I_F \times D_{diode} \quad (4)$$

$$P_{diode,sw} = f_{sw} \times E_{rr} \quad (5)$$

전류가 양의 값을 가질 때 스위칭 상태는 N과 O- 상태를 반복하며, Si IGBT Sw_4 , Sw_5 가 턴-온 상태를 유지한다. 그림 5(c)와 같이 N 스위칭 상태에서 양의 전류가 Sw_3 , Sw_4 스위치로 도통된다. Sw_2 스위치가 턴-온, Sw_3 스위치가 턴-오프되며 O- 스위칭 상태로 전환되어 2개의 SiC MOSFET에서 스위칭 손실이 발생한다. O- 상태에서는 O+ 상태와 비슷하게 Si IGBT의 역병렬 다이오드로 전류가 도통된다. 정리하면 역방향 운전 시 Si IGBT에서 발생하는 전력 손실은 대부분 전도 손실인 반면, 고속으로 스위칭하는 SiC MOSFET에서 스위칭 손실과 전도 손실이 함께 발생한다. 역방향 운전 시 SiC MOSFET 스위치를 통해 전류가 도통되지만, Si IGBT 스위치에서는 역병렬 다이오드를 통해 전류가 도통된다. 스위칭 손실은 양방향 운전 모두 SiC MOSFET에서만 발생한다.

3.3 양방향 운전 분석 결과

앞에서 분석한 바와 같이 Hybrid ANPC 인버터는 양방향 운전에서 동일한 전류 경로를 나타낸다. 따라서 정방향, 역방향 운전 모두에서 스위칭 소자의 손실이 거의 동일하게 발생하며 결과적으로 온도와 효율 모두 동일한 특성을 갖는다. 이와 같은 Hybrid ANPC 인버터의 양방향 운전 특성을 일반적인 NPC 인버터와 비교한 결과는 그림 6과 같다. 그림의 빨간색, 파란색 실선은 각각 양의 전류와 음의 전류가 흐를 때의 스위칭 상태가 변하는 경로를 나타낸다. 그림 6(a)의 정방향 운전(PF: 1) 시, P 스위칭 상태에서는 양의 전류가 Sw_1 을 통해 흐르며 O 스위칭 상태로 변경되면 D_5 를 통해 흐른다. 즉, Sw_1 과 D_5 에는 스위칭 손실(P_{sw})과 전도 손실(P_{con})이 함께 발생한다. Sw_2 는 계속 턴-온 상태이므로 전도 손실만 발생한다. 반면에 역방향 운전(PF: -1) 시, P 스위칭 상태에서는 음의 전류가 D_1 을 통해 흐르며 O 스위칭 상태로 변경되면 Sw_3 를 통해 흐른다. 즉, D_1 과 Sw_3 에는 스위칭 손실과 전도 손실이 함께 발생한다. D_6 에도 전류가 통전, 차단을 반복하지만 역전압이 걸리지 않기 때문에 스위칭 손실은 거의 발생하지 않는다. 따라서 전도 손실만 발생한다. 결과적으로 일반적인 NPC 인버터는 전력 전달 방향에 따라 각 소자마다 발생하는 전력 손실의 종류가 다르며 온도 분포 또한 상이하다.

Hybrid ANPC 인버터의 Si IGBT는 기본과 한 주기 동안 스위칭 상태가 한 번만 바뀌므로 역률에 관계없이 전도 손실만 발생한다. 교류 전압을 변조하기 위한 높은 주파수의 스위칭 동작은 SiC MOSFET에서만 이루어지므로 스위칭 손실은 모두 SiC MOSFET으로 집중된다. 하지만 스위칭 손실은 수식 (3)에서 언급한 바와 같이 턴-온 및 턴-오프 시의 스위칭 에너지(E_{on} , E_{off})에 비례하며 SiC MOSFET의 스위칭 에너지는 Si IGBT 대비 매우 작다. 동일한 1200V/60A 급 용량을 갖는 Infineon의 IKQ75N120CT2 (Si IGBT)와 Infineon의 IMW120R030M1H (SiC MOSFET)의 턴-온 스위칭 에너지는

각각 6.70 mJ, 0.36mJ로 약 18배의 차이를 갖는다. 따라서 SiC MOSFET에서 발생하는 전력 손실 또한 전도 손실이 지배적이다. 결과적으로 Hybrid ANPC 인버터는 양방향 동작 모두에서 동일한 손실 특성을 나타내므로 온도 분포 또한 변하지 않는다. 따라서 3-레벨 인버터 토폴로지 가운데, Hybrid ANPC 인버터는 양방향 운전을 요구하는 ESS를 위한 최적의 솔루션이며 일반적인 NPC 인버터 대비 한 레그의 모든 소자들이 비교적 균일한 수명을 가지기 때문에 전력변환장치의 신뢰성을 향상시킨다[26]-[29].

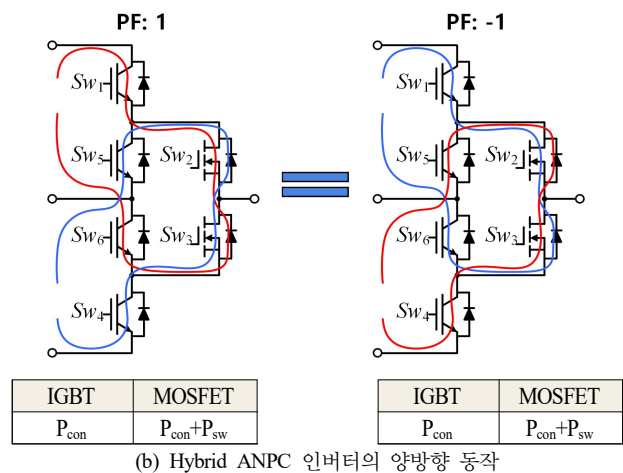
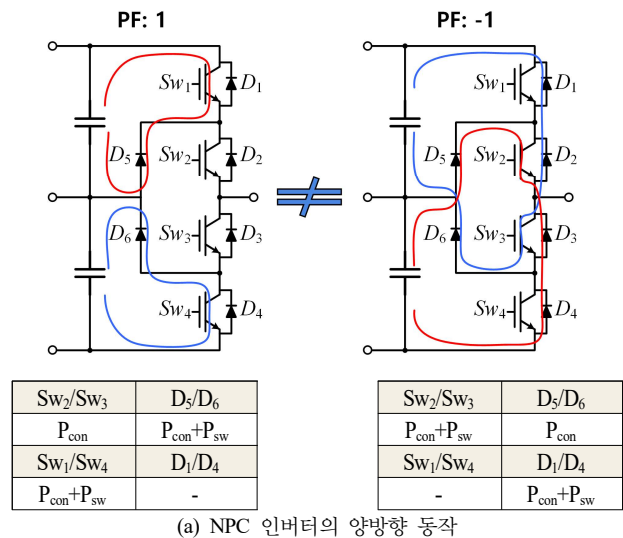


그림 6 NPC 인버터와 Hybrid ANPC 인버터의 양방향 동작(역률)에 따른 손실 발생 위치

Fig. 6 The power loss profiles of NPC inverter and Hybrid ANPC inverter versus power factor

4. 시뮬레이션 결과 분석

양방향 운전 시, Hybrid ANPC 인버터의 성능을 분석하기 위하여 PSIM software를 활용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 3-레벨 Hybrid ANPC 인버터의 출력단에 3상 계통 전압을 연결하

여 그림 7과 같이 계통 연계 시스템을 구성하였으며, 시스템의 파라미터는 표 2와 같다. [30]에서 이미 검증한 바와 같이 시뮬레이션을 통해 분석한 손실이 실제 모델을 이용하여 계산한 손실과 거의 유사하므로 PSIM Thermal Module을 통해 손실을 분석하였다.

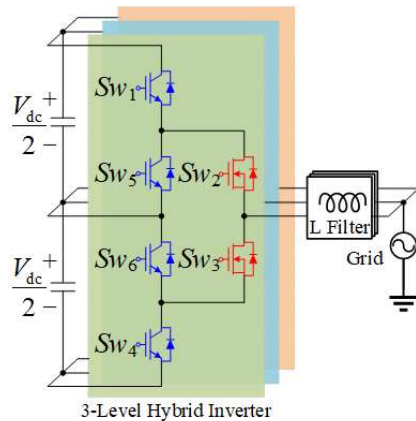


그림 7 계통 연계형 3-레벨 Hybrid ANPC 인버터의 구성도
Fig. 7 System configuration of grid-connected 3-level Hybrid ANPC inverter

표 2 시뮬레이션 파라미터
Table 2 Parameters of simulation

파라미터	값	단위
정격 전력	15	kW
스위칭 주파수(=HF)	30	kHz
직류단 전압	600	V
직류단 커패시턴스	1200	μF
3상 계통 선간 전압	380	V_{rms}
계통 주파수(=LF)	60	Hz
계통 임피던스	0.2	Ω
필터 인덕턴스	1	mH

일반적인 3레벨 NPC 인버터의 스위치별 손실 분포는 그림 8과 같다. Si IGBT Sw_1 , Sw_2 , Sw_3 , Sw_4 의 스위칭 주파수를 30kHz로 동작 시키고 나머지 조건은 표 2와 같은 조건에서 시뮬레이션을 수행하였다. 스위치 구성은 Infineon사의 IKQ75N120CT2 (Si IGBT)와 Powerex사의 CS240650 (Diode)를 사용하였다. 정방향 운전 시 NPC 인버터의 전체 손실은 455.7W(전도 손실 167.2W, 스위칭 손실 288.5W)이며, 역방향 운전 시 인버터의 전체 손실은 421.4W(전도 손실 183.7W, 스위칭 손실 237.7W)이다. 전력 손실은 각각 정격 전력의 3.04%, 2.81%이다. NPC 인버터는 정방향 운전 시 그림 8(a)와 같이 Sw_1 , Sw_4 스위치에 스위칭 손실이 집중되며, 역방향 운전 시 그림 8(b)와 같이 Sw_2 , Sw_3 스위치에서 스위칭 손실이 주로 발생한다. 중성점 다이오드인 D_1 과 D_2 는 정방향 운전 시 스위칭 동작을 수행하여 전도 손실과 스위칭 손실을 포함하지만, 역방향 운전 시에는 상시 턴-온 상태로 전도 손실만 갖는다. 정리하면 NPC 인버터는 역률에 따른 스위치별 손실

분포가 일정하지 않으며, 특정 소자에서 스위칭 손실이 크게 발생하는 것을 알 수 있다.

각 상의 모든 스위치로 Si IGBT를 사용한 일반적인 ANPC 인버터의 스위치별 전력 손실 분포는 그림 9와 같다. 스위치 구성은 모두 Infineon사의 IKQ75N120CT2 (Si IGBT)로 하였고, LF/HF 변조 방식을 적용하여 표 2의 조건에서 시뮬레이션 하였을 때, ANPC 인버터의 정방향과 역방향 운전 시 각 레그의 스위치별 손실을 나타낸다. 정방향 운전 시 ANPC 인버터의 전체 손실은 405.0W(전도 손실 168.5W, 스위칭 손실 236.5W)이며, 역방향 운전 시 인버터의 전체 손실은 438.8W(전도 손실 194.3W, 스위칭 손실 244.5W)이다. 전력 손실은 각각 정격 전력의 2.70%, 2.92%이다. 스위치별 전력 손실 분포를 보았을 때, ANPC 인버터의 손실 특성은 내측과 외측 스위치(Sw_1 , Sw_2 , Sw_3 , Sw_4)에서 전도 손실이 비교적 크게 발생하며, 트랜지스터와 역병렬 다이오드의 스위칭 손실이 내측 스위치(Sw_2 , Sw_3)에 집중된다. ANPC 인버터의 손실은 NPC 인버터와 달리, 양방향 운전에 관계없이 스위치별 손실 분포가 대칭적이지만 내측 스위치의 스위칭 손실이 큰 것이 특징이다.

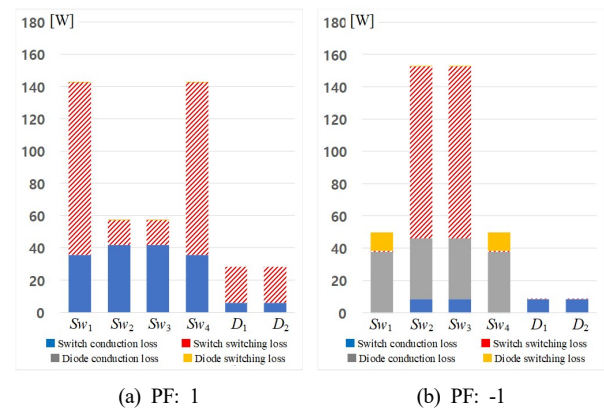


그림 8 NPC 인버터의 스위치별 전력 손실 분포 (a) PF: 1 (b) PF: -1
Fig. 8 Power loss distribution per each switches of NPC inverter (a) PF: 1 (b) PF: -1

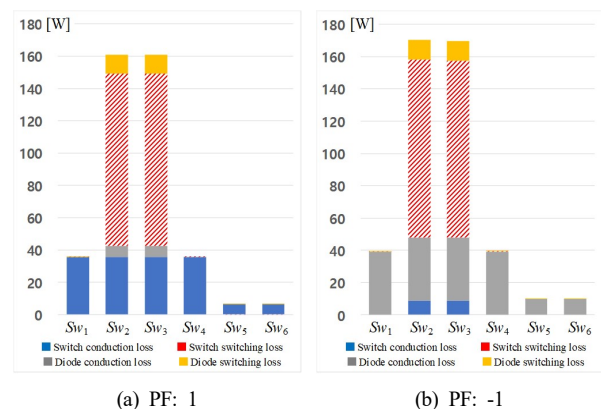


그림 9 ANPC 인버터의 스위치별 전력 손실 분포 (a) PF: 1 (b) PF: -1
Fig. 9 Power loss distribution per each switches of ANPC inverter (a) PF: 1 (b) PF: -1

계통 연계형 Hybrid ANPC 인버터의 정방향 운전(PF: 1)과 역방향 운전(PF: -1) 시 각 레그의 스위치별 손실은 그림 10과 같다. 시뮬레이션에서 적용한 소자는 앞서 설명과 같이 턴-온/오프 에너지가 작은 CREE 사의 C2M0040120D (SiC MOSFET)와 저속 스위칭 주파수 동작 시 전도 손실을 고려한 Infineon 사의 IKQ75N120CT2 (Si IGBT)이다. 손실 해석을 위한 반도체 소자의 파라미터는 소자의 데이터 시트에서 확인하였다.

그림 10(a)와 같이 정방향 운전 시 Hybrid ANPC 인버터의 전체 손실은 164.1W(전도 손실 144.9W, 스위칭 손실 19.28W)이며, 역방향 운전 시 그림 10(b)와 같이 인버터의 전체 손실은 175.5W(전도 손실 155.8W, 스위칭 손실 19.73W)이다. 전력 손실은 각각 정격 전력의 1.09%, 1.17%이며, 하나의 레그를 기준으로 6개의 모든 스위치에서 전도 손실이 발생하며, 2개의 SiC MOSFET에서 대부분의 스위칭 손실이 발생한다. 정방향과 역방향 운전에 관계없이 스위칭 손실은 SiC MOSFET에 집중되며, 내측 스위치(Sw_2 , Sw_3)에서 거의 동일한 양의 스위칭 손실과 전도 손실이 발생한다. 반면, 외측 스위치(Sw_1 , Sw_4)와 중성점 클램핑 스위치(Sw_5 , Sw_6)는 전도 손실이 발생한다. 3.2, 3.3절에서 설명한 바와 같이 역률에 따라 도통 경로가 트랜지스터 부분과 역병렬 다이오드 부분으로 나뉘며, 각 경우에서 소자에 인가되는 전압 강하의 차이로 인해 전도 손실에서 약간의 차이가 있음을 시뮬레이션 결과를 통하여 확인하였다.

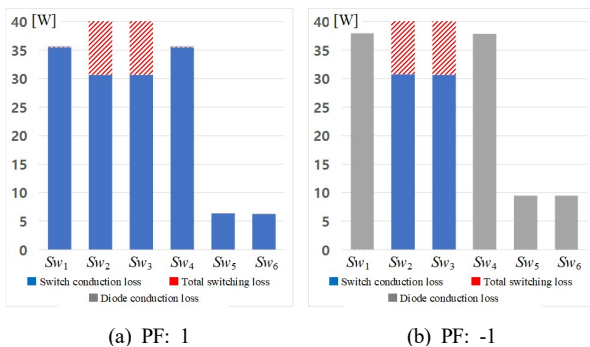


그림 10 Hybrid ANPC 인버터의 스위치별 전력 손실 분포 (a) PF: 1 (b) PF: -1
Fig. 10 Power loss distribution per each switches of Hybrid ANPC inverter (a) PF: 1 (b) PF: -1

그림 11은 Hybrid ANPC 인버터의 정방향 운전 시 스위칭 주파수(HF)별 전력 손실을 비교한 결과이다. Hybrid ANPC 인버터의 전체 스위칭 손실은 그림 10과 같이 대부분 SiC MOSFET에서만 발생하며, 크기는 전체 전도 손실보다 적은 편이다. 스위칭 주파수가 증가할수록 스위칭 주파수에 비례하여, 인버터 전체의 스위칭 손실이 증가하며, 효율이 감소한다. 하지만, Hybrid ANPC 인버터는 스위칭 특성이 우수한 SiC 소자를 사용하므로 30kHz 이상의 높은 스위칭 주파수로 동작하

더라도 정격 전력 대비 시스템 손실의 변화가 크지 않은 것을 확인하였다.



그림 11 Hybrid ANPC 인버터의 정방향 운전 시 스위칭 주파수별 전력 손실
Fig. 11 Power loss of Hybrid ANPC inverter under different switching frequency (PF: 1)

5. 실험 결과 분석

양방향 운전 시 Hybrid ANPC 인버터의 성능을 검증하기 위하여 그림 12와 같이 계통 연계형 3상 Hybrid ANPC 인버터 시스템을 구성하였으며, 시스템의 파라미터는 표 2와 같다. 입력 측의 직류단 전압 및 전류를 구성하기 위하여 REGATRON의 TopCon power supply (DC 소스)를 사용하였으며, 출력 측의 3상 계통 전압 및 전류를 형성하기 위하여 AMETEK의 MX30 (계통 시뮬레이터)을 사용하였다. 전력 변환을 위한 제어 보드는 TI의 TMS320F28335로 구성하였으며, 전력 효율 및 계통 측 전류의 THD를 분석하기 위하여 Yokogawa의 WT3000 (전력 분석기)을 사용하였다.

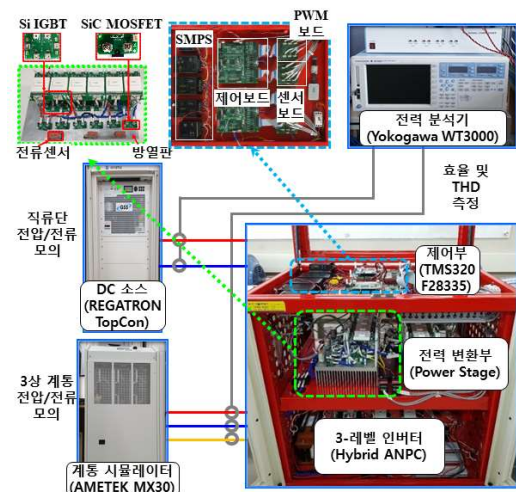


그림 12 계통 연계형 Hybrid ANPC 인버터의 실험 환경
Fig. 12 Experiment set of grid-connected Hybrid ANPC inverter

그림 13은 15kW 조건에서 계통 연계형 Hybrid ANPC 인버터를 동작한 결과이며, 양방향 전력 전달 실험 결과를 나타낸다. 그림 13(a)에서와 같이 계통 전압과 인버터 출력 전류의 위상이 같은 경우, 인버터는 정방향으로 동작하여 DC 전압원에서 3상 계통 측으로 전력 전달을 수행한다. 반대로 그림 13(b)와 같이 전압과 전류의 위상차가 180° 인 경우, 계통 측에서 DC 전압원 측으로 전력 전달이 이루어진다. 앞서 설명한 바와 같이, Hybrid ANPC 인버터는 SiC 소자를 활용한 고속 스위칭 동작을 수행할 수 있다. 그림 13의 FFT 분석 결과를 통하여 확인할 수 있듯 계통 연계 시 출력 전류에 포함된 저차 고조파가 전력 전달 방향에 관계없이 적은 특성을 나타낸다. 전력 분석기를 통해 측정한 효율은 정방향 운전 시 98.36%, 역방향 운전 시 98.27%이다.

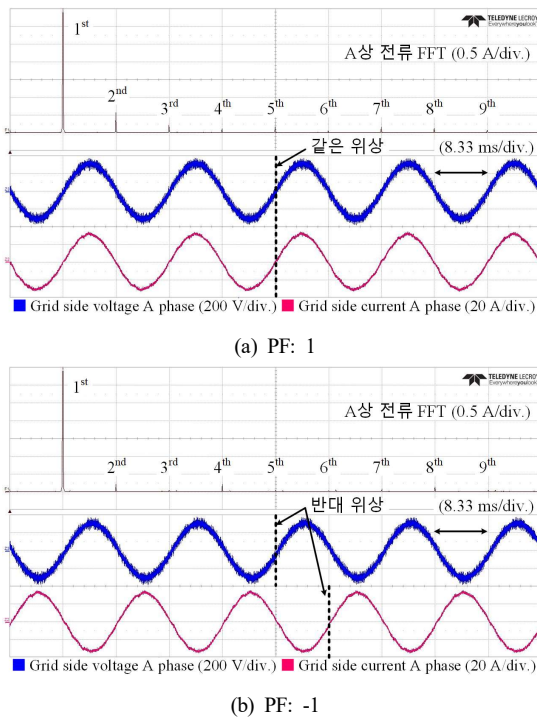


그림 13 Hybrid ANPC 인버터의 양방향 운전 시 전압, 전류 파형 및 전류 FFT (a) PF: 1 (b) PF: -1

Fig. 13 Voltage, current waveform and FFT of Hybrid ANPC inverter under different out power factor (a) PF: 1 (b) PF: -1

Hybrid ANPC 인버터의 양방향 운전 시 전력 구간별 효율은 그림 14와 같다. 계통 연계형 Hybrid ANPC 인버터의 출력 전력을 1kW부터 15kW까지 1kW씩 순차적으로 증가시키며 효율을 측정하였다. 정방향 운전과 역방향 운전 시 최대 효율은 8 kW 지점에서 측정되었으며, 각각 98.69%, 98.64%이다. 양방향 운전 시 최대 효율 지점을 중심으로 전력 변화에 따라 효율이 감소하는 등 구간별 효율 곡선의 전체적인 경향성은 동일하지만 역방향 운전 시 효율이 더 낮은 것을 확인하였다. 이는 앞선 시뮬레이션 결과처럼 역방향 운전 시 역병렬 다이오드의 전도 손실이 크기 때문이며, 이로 인해 인버터의 효율

이 감소한다. 정방향 운전과 역방향 운전을 수행할 때의 효율이 거의 유사하여, 앞서 분석한 양방향 운전의 손실 분포가 타당함을 검증하였다.

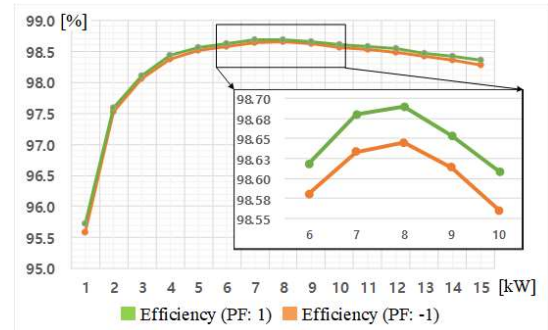


그림 14 Hybrid ANPC 인버터의 양방향 운전 시 전력 구간별 효율
Fig. 14 Efficiency of Hybrid ANPC inverter under different out power

그림 15는 계통 측 교류 전류의 THD를 측정한 결과이다. 앞서 효율 측정과 마찬가지로 출력 전력을 1kW씩 증가시키며 3상 전류의 THD를 측정하였다. 7kW 이상 구간부터 5% 이하 THD가 확인되었고, 최대 측정 전력인 15kW에서 정방향과 역방향 운전 시 각각 2.169%, 1.962%의 THD가 측정되었다.

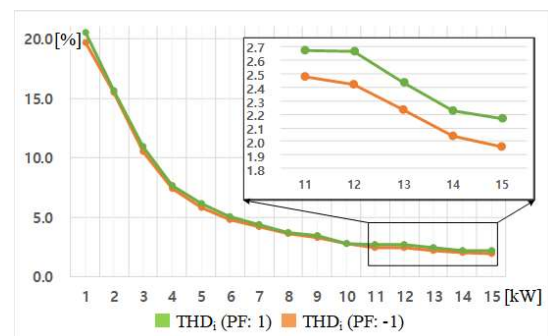


그림 15 Hybrid ANPC 인버터의 양방향 운전 시 전력 구간별 전류 THD
Fig. 15 Current THD of Hybrid ANPC inverter under different out power

6. 결 과

본 논문에서는 3-레벨 Hybrid ANPC 인버터의 양방향 운전 특성을 분석하였다. 기존의 NPC 인버터에서 양방향 전력 전달 과정에서 스위치별로 발생하는 손실이 균일하지 않았다. Si 소자 대신 동적 특성과 열적 내구성이 우수한 SiC 소자를 이용하여 Hybrid 타입 ANPC 인버터를 구성하였다. Hybrid ANPC 인버터는 스위칭 동작을 SiC MOSFET에 집중시켜 불균등한 손실 문제를 해결하고 양방향 운전 시 스위칭 손실을 줄였다. 시뮬레이션 결과에서 Hybrid ANPC의 전력 손실이 NPC 인버터보다 정방향과 역방향 동작 시 각각 36.01%,

41.65%로 감소되었다. 실험을 통하여 Hybrid ANPC 인버터의 양방향 운전 성능을 검증하였다. 추후 대전력 시스템의 적용을 위한 회로의 기생 성분에 의한 손실 및 스너버 설계 방안에 관한 연구가 필요하다. 또한 Hybrid ANPC 인버터에 적합한 계통 연계 필터 설계, 스위치 고장에 따른 허용 제어 기법과 신뢰성 향상을 위한 예상 수명 계산 등이 추가적으로 고려되어야 할 것이다.

Acknowledgements

본 연구는 2019년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 에너지인력양성사업과 2019년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단-미래선도기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 20194030202370, NRF-2018M3C1B9088457).

References

- [1] K.-B. Lee and J.-S. Lee, Reliability Improvement Technology for Power Converters. Springer, 2017, ISBN 978-981-10-4991-0.
- [2] W.-Y. Sung, H. M. Ahn, C.-Y. Oh, and B. K. Lee, "Design and Control of a Bidirectional Power Conversion System with 3-level T-type Inverter for Energy Storage Systems," J. Electr. Eng. Technol., vol. 13, no. 1, pp. 326-332, Jan. 2018.
- [3] U.-M. Choi and J.-S. Lee, "Condition Monitoring of Reliability-Critical Components in Power Electronic Systems," The Transactions of Korean Institute of Power Electronics, vol. 24, no. 4, pp. 244-258, Aug. 2019.
- [4] J.-W. Lee, J.-W. Kim, B.-G. Park, and E.-C. Nho, "Neutral-Point Voltage Balancing Control Scheme for Fault-Tolerant Operation of 3-Level ANPC Inverter," The Transactions of Korean Institute of Power Electronics, vol. 24, no. 4, pp. 244-258, Aug. 2019.
- [5] 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, Dec. 2018.
- [6] J.-S. Lee, R. Kwak, and K.-B. Lee, "Novel Discontinuous PWM Method for a Single-Phase Three-Level Neutral Point Clamped Inverter with Efficiency Improvement and Harmonic Reduction," IEEE Trans. Power Electron., vol. 33, no. 11, pp. 9253-9266, Nov. 2018.
- [7] J. Chen, S. Liao, and D. Sha, "A Bidirectional Single-Stage DC/AC Converter for Grid Connected Energy Storage Systems," J. Power Electron., vol. 15, no. 4, pp. 1026-1034, Jul. 2015.
- [8] S.-H. Han, H.-G. Kim, H. Cha, T.-W. Chun, and E.-C. Nho, "Bi-Directional Multi-Level Converter for an Energy Storage System," J. Power Electron., vol. 14, no. 3, pp. 499-506, May 2014.
- [9] J. Rodríguez, J.-S. Lai, and F. Z. Peng, "Multilevel Inverters: A Survey of Topologies, Controls, and Applications," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 49, no. 4, pp. 724-738, Aug. 2002.
- [10] S.-Z. Xu, C.-J. Wang, T.-C. Han, X.-P. Li, and X.-Y. Zhu, "Optimized Low-Switching-Loss PWM and Neutral-Point Balance Control Strategy of Three-Level NPC," J. Power Electron., vol. 18, no. 3, pp. 702-713, May 2018.
- [11] A. Nabae, I. Takahashi, and H. Akagi, "A New Neutral-Point-Clamped PWM Inverter," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. IA-17, no. 5, pp. 518-523, Sep./Oct. 1981.
- [12] M. Schweizer, T. Friedli, and J. W. Kolar, "Comparative Evaluation of Advanced Three-Phase Three-Level Inverter/Converter Topologies Against Two-Level Systems," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 60, no. 12, pp. 5515-5527, Dec. 2013.
- [13] Q.-X. Guan, C. Li, Y. Zhang, S. Wang, D.-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, Oct. 2018.
- [14] C. Hu, X. Yu, D. G. Holmes, W. Shen, Q. Wang, F. Luo, and N. Liu, "An Improved Virtual Space Vector Modulation Scheme for Three-Level Active Neutral-Point-Clamped Inverter," IEEE Trans. Power Electron., vol. 32, no. 10, pp. 7419-7434, Oct. 2017.
- [15] T. Brückner, S. Bernet, and H. Güldner, "The Active NPC Converter and Its Loss-Balancing Control," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 52, no. 3, pp. 855-868, Jun. 2005.
- [16] D.-W. Seo, J.-H. Lee, and K.-B. Lee, "Improved Model Predictive Control for Active NPC Grid-Connected Inverter System," in Proc. Int. Conf. Electr. Eng., 2018.
- [17] J. Li, A. Q. Huang, Z. Liang, and 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, Feb. 2012.
- [18] J. Millan, P. Godignon, X. Perpina, A. Perez-Tomas, and J. Rebollo, "A Survey of Wide Bandgap Power Semiconductor Devices," IEEE Trans. Power Electron., vol. 29, no. 5, pp. 2155-2163, May 2014.
- [19] Y. Liu, Z. Song, S. Yin, J. Peng, and H. Jiang, "Analytical and Experimental Validation of Parasitic Components Influence in SiC MOSFET Three-Phase Grid-connected Inverter," J. Power Electron., vol. 19, no. 2, pp. 591-601, Mar. 2019.
- [20] H. Qin, C. Ma, Z. Zhu, Y. Yan, "Influence of Parasitic Parameters on Switching Characteristics and Layout Design Considerations of SiC MOSFETs," J. Power Electron., vol. 18, no. 4, pp. 1255-1267, Jul. 2018.
- [21] X. Chen, S. Huang, D. Jiang, and B. Li, "Fast Voltage-Balancing Scheme for a Carrier-Based Modulation in Three-Phase and Single-Phase NPC," J. Electr. Eng. Technol., vol. 13, no. 5, pp. 1986-1995, Sep. 2018.
- [22] A. Anthon, Z. Zhang, M. A. E. Andersen, D. G. Holmes,

- B. McGrath, and C. A. Teixeira, "The Benefits of SiC MOSFETs in a T-Type Inverter for Grid-Tie Applications," IEEE Trans. Power Electron., vol. 32, no. 4, pp. 2808-2820, Apr. 2017.
- [23] J.-S. Lee, S. Yoo, and K.-B. Lee, "Novel Discontinuous PWM Method of a Three-Level Inverter for Neutral-Point Voltage Ripple Reduction," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 63, no. 6, pp. 3344-3354, Jun. 2016.
- [24] S.-M. Kim, M.-G. Jeong, J. Kim, and K.-B. Lee, "Hybrid Modulation Scheme for Switching Loss Reduction in a Modular Multilevel High-Voltage Direct Current Converter," IEEE Trans. Power Electron., vol. 34, no. 4, pp. 3178-3191, Apr. 2019.
- [25] S. A. S. Hasari, A. Salemnia, and M. Hamzeh, "Applicable Method for Average Switching Loss Calculation in Power Electronic Converters," J. Power Electron., vol. 17, no. 4, pp. 1097-1108, Jul. 2017.
- [26] L. Zhang, X. Yuan, X. Wu, C. Shi, J. Zhang, and Y. Zhang, "Performance Evaluation of High-Power SiC MOSFET Modules in Comparison to Si IGBT Modules," IEEE Trans. Power Electron., vol. 34, no. 2, pp. 1181-1196, Feb. 2019.
- [27] J. Rodriguez, S. Bernet, P. K. Steimer, and I. E. Lizama, "A Survey on Neutral-Point-Clamped Inverters," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 57, no. 7, pp. 2219-2230, Jul. 2010.
- [28] Y. Chen, X. Guo, J. Xue, and Y. Chen, "Hybrid PWM Modulation Technology Applied to Three-Level Topology-Based PMSMs," J. Power Electron., vol. 19, no. 1, pp. 146-157, Jan. 2019.
- [29] M. Abarzadeh and H. M. Kojabadi, "A Static Ground Power Unit Based on the Improved Hybrid Active Neutral-Point-Clamped Converter," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 63, no. 12, pp. 7792-7803, Dec. 2016.
- [30] D. J. Kim, J.-H. Park, and K.-B. Lee, "Power Loss Analysis of EV Fast Charger with Wide Charging Voltage Range for High Efficiency Operation," Trans. Korean Inst. Electr. Eng., vol. 63, no. 8, pp. 1055-1063, Aug. 2014.

저자소개



권봉현 (Bong Hyun Kwon)

He received the B.S. and M.S. degrees in Electrical Engineering from Hanyang University, Seoul, South Korea, in 1984 and 1994, respectively. He is currently working toward his Ph.D. degree in Electrical and Computer Engineering at Ajou University, Suwon, South Korea. Since 1984, he has been with the LS Industrial Systems Co. Anyang, Korea. His research interests include renewable power generations, energy storage system and distributed generation systems.
E-mail : imsiami@gmail.com



김상훈 (Sang-Hun Kim)

He received the B.S. degree in Electrical and Computer Engineering from Ajou University, Suwon, South Korea, in 2019. He is currently working toward his M.S. degree in Electrical and Computer Engineering from Ajou University, Suwon, South Korea. His research interests include grid-connected system and charging system for electric vehicle.
E-mail : sanhun1254@ajou.ac.kr



배규철 (Kyu-Chul Bae)

He received the B.S. degree in Electronics and Information Engineering from Kwangwoon University, Seoul, South Korea, in 2012, and the M.S. degree in Electrical Engineering from Korea University, Seoul, Korea, in 2014. He is currently working toward his Ph.D. degree in Electrical and Computer Engineering from Ajou University, Suwon, South Korea. His research interests include grid-connected system and multilevel inverters.
E-mail : kcbae@ajou.ac.kr



이교범 (Kyo-Beum Lee)

He received the B.S. and M.S. degrees in Electrical and Electronic Engineering from Ajou University, Suwon, Korea, in 1997 and 1999, respectively. He received Ph.D. degree in Electrical Engineering from Korea University, Seoul, Korea, in 2003. From 2003 to 2006, he was affiliated with the Institute of Energy Technology, Aalborg University, in Aalborg, Denmark. From 2006 to 2007, he was affiliated with the Division of Electronics and Information Engineering, Chonbuk National University, Jeonju, Korea. In 2007, he joined the School of Electrical and Computer Engineering, Ajou University, Suwon, Korea. He is an Associate Editor of the IEEE Transactions on Power Electronics, Journal of Power Electronics, and Journal of Electrical Engineering & Technology. His current research interests include electric machine drives, renewable power generation, and electric vehicle applications.
E-mail : kyl@ajou.ac.kr