

선박 DC 배전용 3레벨 ANPC AC/DC 컨버터의 특성 분석

한동우*, 신수철*, 이희준*, 정용채**, 고영상*, 원충연*
 성균관대학교, 남서울대학교

3-Level ANPC AC/DC Converter Analysis for DC Distribution of Vessel

Dong Woo Han*, Soo Cheol Shin*, Hee Jun Lee*, Yong Chae Jung**, Young Sang Ko*,
 Chung Yuen Won*
 Sungkyunkwan University*, Namseoul University**

ABSTRACT

본 논문에서는 선박의 DC 배전시스템과 같은 고압 대용량 전력변환시스템에 적합한 멀티레벨 시스템을 분석한다. 3레벨 NPC(Neutral Point Clamped) 구조의 멀티레벨 컨버터는 입력 전류의 고조파를 줄일 수 있고 시스템의 용량을 증가시킬 수 있다는 장점 때문에 고전압이 필요한 응용분야에 가장 많이 사용되고 있다. 하지만 이 구조는 각 전력 반도체 스위칭 소자의 전력 손실이 불균일한 단점이 있다. 따라서 이러한 단점을 제거하기 위해 ANPC(Active NPC) 구조의 컨버터가 제안되었다. ANPC 방식은 각 소자의 손실 분포를 균일하게 하여 효율적으로 개선할 수 있다. 본 논문에서는 ANPC 컨버터를 구성하는 각 스위칭 소자의 손실을 분석하고 시뮬레이션을 통하여 검증하였다.

1. 서론

최근 선박에 적용되는 DC배전 시스템에 대한 많은 연구가 되고 있다. 선박에 DC배전 시스템을 적용할 경우 연료 사용량 및 배기가스를 배출을 줄일 수 있고, 기기들의 무게와 부피 또한 줄일 수 있다는 장점이 있다. 이러한 DC배전 시스템은 발전기로부터 DC전압을 출력하는 대용량의 AC/DC 컨버터가 필요하다.^[1] 이러한 대용량 전력변환장치로 멀티레벨 컨버터가 많이 이용되고 있다. 멀티레벨 컨버터는 선박과 같이 제한된 공간에 높은 전력밀도와 신뢰성을 요구하는 시스템에 적합하다. 멀티레벨 컨버터 중 NPC 구조는 가장 널리 쓰이고 있지만 각 소자간의 불균일한 전력 손실로 온도의 차이가 생기게 되고 전체 시스템 용량이 특정 소자에 의해 제한되는 단점이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 ANPC 컨버터가 제안되었다.

본 논문에서는 3 Level ANPC 컨버터의 기본 동작을 설명하고 각 소자에서 발생하는 전력 손실을 분석하였다. 시뮬레이션을 통해 3 Level NPC 컨버터와 3 Level ANPC 컨버터의 각 소자 온도를 비교하였고, NPC 컨버터보다 ANPC 컨버터에서 손실 분배가 효율적으로 이루어지는 것을 확인하였다.^[2]

2. 선박용 3레벨 ANPC AC/DC 컨버터

2.1 3레벨 ANPC AC/DC 컨버터의 기본 동작

그림 1은 선박에 적용되는 DC 배전으로 발전기로부터 출력되는 AC 전압을 DC로 변환하는 3레벨 ANPC AC/DC 컨버터

가 포함되어 있다. DC BUS는 각종 모터부하의 DC Link 전압이 되며 이를 통하여 전력변환의 단계를 줄일 수 있다. 기존의 NPC형 AC/DC 컨버터의 구조는 각 상당 4개의 전력 반도체 스위칭 소자와 2개의 클램핑 다이오드로 구성되어 있는데 비해 ANPC형 AC/DC 컨버터의 구조는 각 상당 6개의 전력 반도체 스위칭 소자로 구성되어 있다.

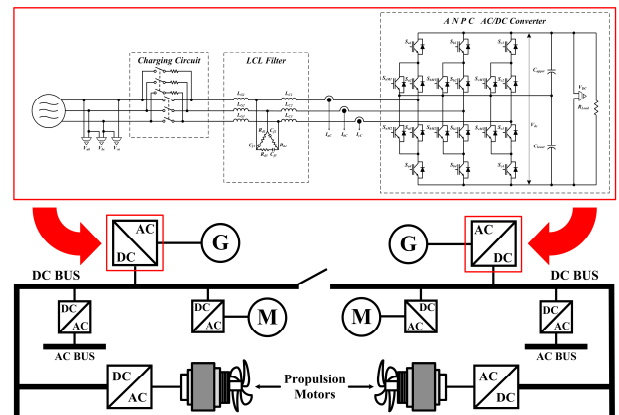


그림 1 선박 DC배전용 3-레벨 ANPC AC/DC 컨버터의 구조
 Fig. 1 Structure of three-phase multi-level AC/DC converter for DC distribution of Vessel

표 1은 ANPC형 AC/DC 컨버터의 스위칭 상태를 나타낸다. ANPC형 AC/DC 컨버터는 NPC형 AC/DC 컨버터와 다르게 4개의 Zero State OU1, OU2, OL1, OL2가 존재한다. 이 4가지의 Zero State를 적절하게 사용함으로써 소자 간 발생하는 손실의 차이를 줄일 수 있다.

표 1 3-레벨 ANPC AC/DC 컨버터의 스위칭 상태
 Table 1 Switch state of the three-Level ANPC AC/DC converter

	S_{x1}	S_{x2}	S_{x3}	S_{x4}	S_{xM1}	S_{xM2}
+ State	1	1	0	0	0	1
OU1 State	0	1	0	0	1	0
OU2 State	0	1	0	1	1	0
OL1 State	1	0	1	0	0	1
OL2 State	0	0	1	0	0	1
State	0	0	1	1	1	0

2.2 3-레벨 ANPC AC/DC 컨버터의 손실 배분

표 2는 상전류를 고려한 “+”, “-” 상태와 Zero 상태 사이에서 변조되는 방식에 따라 손실이 발생하는 전력 반도체 스위칭 소자를 나타낸 표이다. ANPC형 전력변환장치는 각 소자의 온도를 실시간으로 감지하여 비교적 온도가 높은 소자의 손실을 온도가 낮은 소자가 분담하도록 제어한다. 이러한 PWM 방식을 사용하게 되면 각 전력 반도체 소자에서 도통 경로를 제어함으로써 기존의 NPC형 전력변환장치에 비해 균등한 열 분포를 이룰 수 있다.

표 2 상전류를 고려한 변조에 따른 손실 소자
Table 2 Loss device according to modulation considering phase current

Modulation Phase Current	Turn On Loss		Turn Off Loss	
	Positive	Negative	Positive	Negative
+ → 0U1	S ₅	D ₅	D ₁	S ₁
+ → 0U2	S ₅	D ₅	D ₁	S ₁
+ → 0L1	S ₃	D ₃	D ₂	S ₂
+ → 0L2	S ₃	D ₃	D ₁	S ₁
- → 0U1	D ₂	S ₂	S ₃	D ₄
- → 0U2	D ₂	S ₂	S ₄	D ₃
- → 0L1	D ₆	S ₆	S ₄	D ₄
- → 0L2	D ₆	S ₆	S ₄	D ₄

3. 시뮬레이션

본 논문에서는 PSIM의 Thermal module을 이용하여 전력 반도체 스위칭 소자에서 발생하는 열을 실시간으로 분석하였고 이를 비교하여 만든 테이블에 의해 스위칭을 하였다. 시스템의 용량은 50[kW]이며 스위칭 주파수는 10[kHz]이다.

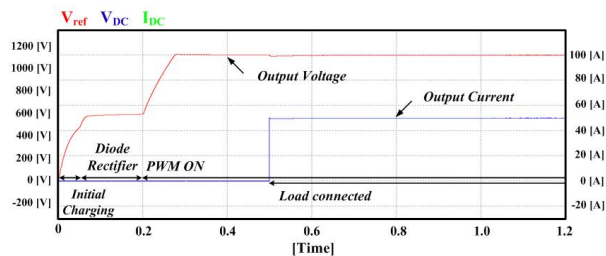


그림 2 AC/DC 컨버터의 출력 파형
Fig. 2 Output waveform of the AC/DC converter

그림 2는 AC/DC 컨버터의 출력 파형이다. 다이오드 정류를 통하여 교류전원이 정류가 되고 그 후 PWM을 하여 선박의 DC Grid 전압인 1000[V_{dc}]로 제어가 된다. 부하가 연결된 후에도 1000[V_{dc}]로 제어되는 것을 확인할 수 있다. 이 출력 파형은 NPC형 AC/DC 컨버터와 ANPC형 AC/DC 컨버터 모두 동일하게 제어된다.

표 3 구조에 따른 입력전류 THD 분석
Table 3 Input current THD according to the structure

	2Level	NPC	ANPC
I _{a,Grid}	4.7921	2.1382	2.0757
I _{b,Grid}	4.8609	2.1724	2.1132
I _{c,Grid}	4.7585	2.1421	2.1579

표 3은 AC/DC 컨버터 구조에 따른 입력전류의 THD이다. NPC 구조와 ANPC 구조는 2 Level 구조에 비해 THD가 1/2 이하로 저감된 것을 확인할 수 있다. NPC와 ANPC 두 구조의 출력은 동일하므로 거의 동일한 THD를 갖게 된다. 이러한 THD 감소는 발전기의 수명을 늘릴 수 있다.

그림 3은 NPC형과 ANPC형 AC/DC 컨버터의 각 전력 반도체 소자에서 발생하는 열을 나타내고 있다. NPC형은 각 상의 2번, 3번스위치에서 발생하는 열이 다른 소자에서 발생하고 있는 열에 비해 크게 발생하고 있는데 비해 ANPC형은 각 소자들이 열을 분담하도록 스위칭을 하기 때문에 NPC형 보다 낮은 열이 발생하고 있는 것을 확인할 수 있다. 가장 높은 열이 발생하는 소자를 기준으로 소자가 선정되므로 ANPC방식을 이용하면 NPC방식보다 더 큰 용량으로 설계할 수 있다.

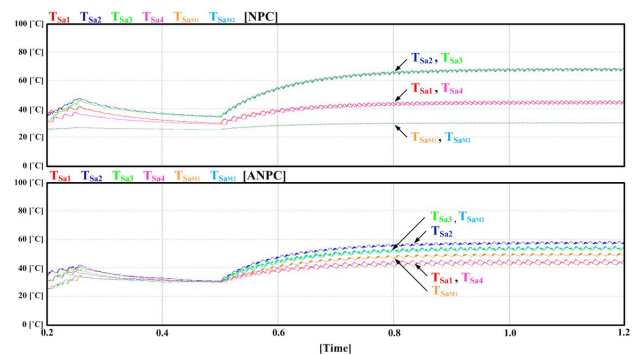


그림 3 NPC형과 ANPC형 AC/DC 컨버터의 스위칭 소자 온도 파형
Fig. 3 Each element temperature waveform of NPC type and ANPC AC/DC converter

4. 결론

본 논문에서는 선박의 DC BUS 전압을 제공하는데 적합한 ANPC형 AC/DC 컨버터를 분석하였다. ANPC 구조는 NPC 구조와 THD가 동일하고 2 Level 구조보다 2배 이상의 입력 전류 THD 저감 효과가 있다. 또한 ANPC구조에서는 각 소자에서 발생하는 열을 실시간으로 분석 하고 이를 이용하여 스위칭 패턴을 결정했다. 이로써 NPC구조보다 각 소자들에서 발생하는 손실과 열을 균등하게 나눠 분담할 수 있었고 그 결과 NPC형보다 더 큰 용량으로 시스템을 설계할 수 있음을 확인하였다.

본 연구는 2012년도 지식경제부의 재원으로 삼성중공업 (2012T00100064)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.

참고 문헌

[1] Jan Fredrik Hansen, "Onboard DC Grid for enhanced DP operation in ships", DYNAMIC POSITIONING CONFERENCE, 2011, October.
[2] Bruckner, T., "The Active NPC Converter and Its Loss Balancing Control", Industrial Electronics, IEEE Transactions on, Vol. 52, No. 3, pp. 855-868, 2005, June.