



Received: 2021/07/27
Revised: 2021/09/10
Accepted: 2021/09/22
Published: 2021/09/30

***Corresponding Author:**

Jung-Woo Park

Korea Electrotechnology Research Institute
12, Jeongiui-gil, Seongsan-gu, Changwon-si,
Gyeongsangnam-do, 51543 Korea
Tel: +82-55-280-1485
E-mail: jwpark@keri.re.kr

Abstract

전전기 함정용 통합전력시스템은 AC-전력계통인 경우는 4.16 kV 이하의 계통전압을 적용하는 통합전력시스템에서 13.8 kV_{AC}으로, 그리고 DC-전력계통인 경우는 12 kV_{DC}으로 고압화되는 추세로 진화하고 있다. 이런 배경에서 본 논문에서는 중전압 전력계통에서 사용할 수 있는 모듈러 멀티레벨 컨버터를 소개하고, 제어방법과 적용사례 결과를 제시하였다.

The integrated power system for all-electric ships is evolving toward a high voltage of 13.8 kV_{AC} in the integrated power system that applies a grid voltage of 4.16 kV or less in the case of an AC-power system, and 12 kV_{DC} in the case of a DC-power system. Against this background, in this paper, a modular multi-level converter that can be used in medium voltage power systems is introduced, and the control method and application case results are presented.

Keywords

전전기 선박(All Electric Vessel),
통합전력시스템(Integrated Power System),
모듈러 멀티레벨 컨버터(Modular Multi-level Converter),
고전압 직류(High-voltage Direct Current),
중전압 직류(Medium-voltage Direct Current)

Acknowledgement

이 연구는 방위산업기술지원센터로부터 연구비를 지원받아 수행되었음(계약번호 UC200011D).

This work was supported by Defense Industry Technology Center Foundation(Contract Number UC200011D).

이 논문은 2021년도 한국해군과학기술학회 하계학술대회 발표 논문임.

모듈러 멀티레벨 컨버터를 적용한 MVDC 계통전압 제어

MVDC-grid Voltage Control Using Modular Multi-level Converter

박정우^{1*}, 박병건¹, 김지원¹, 최성², 정현원²

¹한국전기연구원 전기응용연구부 책임연구원

²대우조선해양 특수성능연구소 책임연구원

Jung Woo Park^{1*}, Byoung Gun Park¹, Ji Won Kim¹, Sung Choi², Hyun Won Jeong²

¹Principal Researcher, Industry Applications Research Division, Korea Electrotechnology Research Institute

²Principal Researcher, Special Purpose Performance Research Center, Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering

1. 서론

함정에 소요되는 모든 동력을 전기에 의존하는 전-전기 선박은 저압 교류계통으로 구성하는 방식에서 중전압 교류계통과 중전압 직류계통으로 구성하는 방식으로 발전하고 있다. 그 중에서도 중전압 직류계통을 적용하는 방식에 대해 많은 연구가 진행되고 있으며 모듈러 멀티레벨 컨버터 기술을 적용, 중전 기술의 장벽을 극복하는 방향으로 발전하고 있다.

모듈러 멀티레벨 컨버터는 고압직류 송전시스템 개발 분야에서 먼저 실용화되었으며[1-2], 계통주파수 보다 훨씬 낮은 “0” Hz 근방의 운전주파수에서도 컨버터 내부 전압을 안정적으로 유지시킬 수 있는 기술이 개발[3-5]되면서 수십 MW급 대용량 추진전동기를 제어하는 인버터 개발 분야, 수십 MW급 에너지저장장치 개발 분야, 수십 MW급 AFE 컨버터(active front-end converter) 개발 분야에서 새롭게 주목받는 컨버터로 부상되고 있다.

모듈러 멀티레벨 컨버터는 10 kV_{AC} 또는 10 kV_{DC}처럼 매우 높은 전압을 변압기 없이 바로 컨버터에서 받을 수 있기 때문에, 정해진 전력에 대해, 저압 컨버터보다 상대적으로 매우 낮은 전류를 이용하여 제어성을 가지도록 개발하는 것이 가능하다. 이는 저-전압을 입력전압으로 받을 수밖에 없었던 저전압 컨버터의 한계를 해결하면서도 저전압 컨버터 분야에서 발전되어 온 가변속제어 기술, AC-DC-AC 기술, DC-AC-DC 기술을 그대로 적용할 수 있음을 의미한다.

전전기 함정에서 요구하는 전력부하는 함정의 크기와 운전 사양에 의거하여 기본적으로 결정되지만 전자기 무장부하의 탑재 용량을 미리 고려하여 산정하는 방식으로 결정되며 40 MW에서 120 MW 범위 내에서 대응량화되고 있다. 그리고 전력계통 전압은 4 kV_{AC} 이하 계통전압에서 13 kV_{AC}, 혹은 12 kV_{DC} 전압으로 고압화되는 방향으로 발전되고 있으며, AC-전력계통을 DC-전력계통으로 대체하는 경향으로 발전되고 있다.

이러한 기술 발전에 모듈러 멀티레벨 컨버터에 대한 기술이 크게 기여하고 있어, 모듈러 멀티레벨 컨버터를 제어하는 방법과 적용 사례를 제시하여 전전기 함정용 통합 전력시스템에 적용될 수 있음을 보이고자 한다.

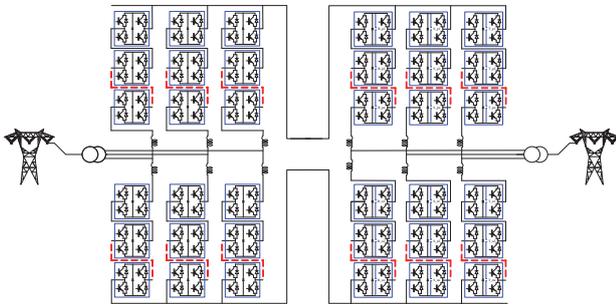


Fig. 1. MMC for HVDC transmission system

계통측 컨버터는 가변 전류원으로 제어하고, 전동기측 컨버터는 가변 전압형으로 제어하는 방법을 통해, MMC를 적용하여 전영역 속도에서 가변속 제어 특성을 가지는 기술이 되었다[4].

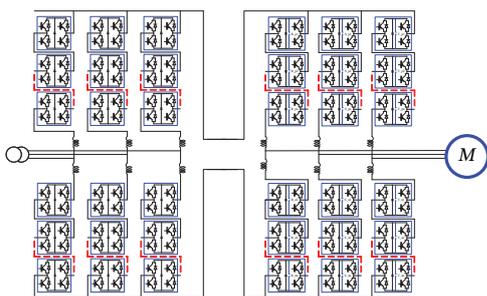


Fig. 2. A method of driving a motor by controlling the grid-side MMC as a controlled current source

또한, 5상 전동기를 대상으로 벡터제어를 수행하며, d3-q3 좌표계에서 커먼 모드 전압과 커먼 모드 전류를 주입하여 서브모듈 전압을 안정화할 수 있음을 검증함으로써 MMC를 이용하여 가변속 제어장치를 개발할 수 있게 되었다[5].

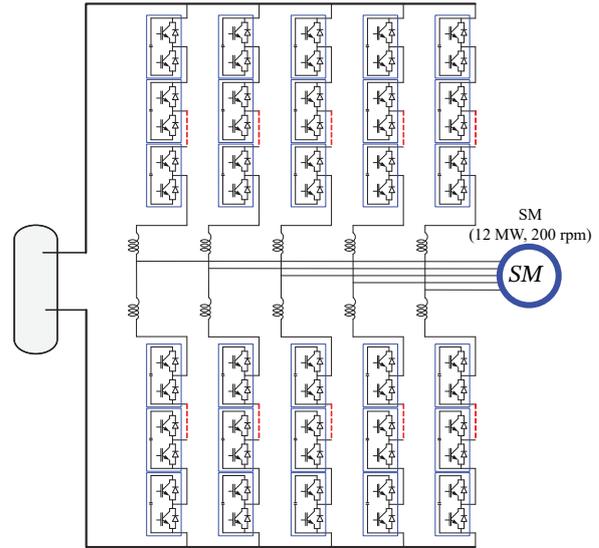


Fig. 3. A method of controlling a motor by injecting a common mode signals in the d3-q3 frame of a 5-phase motor

2. 모듈러 멀티레벨 컨버터 제어방법

모듈러 멀티레벨 컨버터는 서브모듈이라고 불리는 단위 컨버터를 직렬로 연결함으로써 고압에 견딜 수 있도록 내압화된 구조를 가지는 것이 가장 큰 특징이며[1], 6 kV 이상 되는 전압에 연계되어 사용되는 컨버터와 인버터, 에너지저장장치 개발에 적용할 수 있는 전력변환장치이다.

각각의 서브모듈은 IGBT 2개와 커패시터 1개로 구성되는 하프 브릿지 형태의 서브모듈, 또는 IGBT 4개와 커패시터 1개로 구성되는 풀 브릿지 형태의 서브모듈이 주로 사용되며 서브모듈 전압을 일정하게 유지하기 위해 별도의 변압기와 정전압 공급용 컨버터를 가지지 않는 것이 특징이다.

풀 브릿지 형태의 서브모듈을 가지는 모듈러 멀티레벨 컨버터를 가스 터빈 엔진과 동기발전기로 구성되는 Genset 출력단에 적용하여 직류계통 전압을 생성하는 컨버터로 사용한 예제를 Fig. 4에 제시하였다.

MMC 컨버터의 상단-암에 흐르는 전류를 i_{pj} , 하단-암에 흐르는 전류를 i_{nj} , 상단-암에서 생성하는 전압을 u_{pj} , 하단-암에서 생성하는 전압을 u_{nj} , DC계통 전압을 v_{dc} , 그리고 3상 계통전압을 v_{sj} 라고 할 때 상단-암과 하단-암으로 구성되는 페루프로부터 식 (1)과 식 (2)를 얻을 수 있다[1-2].

$$u_{pj} + R_s i_{pj} + L_s \frac{di_{pj}}{dt} + v_{sj} - \frac{V_{dc}}{2} = 0 \quad (1)$$

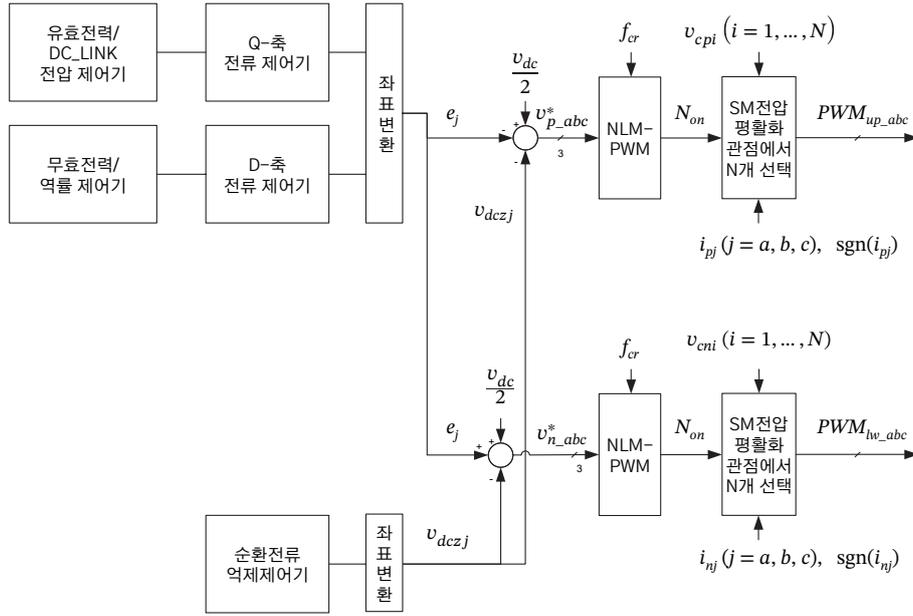


Fig. 4. Control block diagram of the MMC

$$u_{nj} + R_s i_{nj} + L_s \frac{di_{nj}}{dt} - \frac{V_{dc}}{2} - v_{sj} = 0 \quad (2)$$

식 (1)과 식 (2)로부터 식 (3)과 식 (4)를 얻을 수 있으며, 순환전류를 식 (5)와 식 (6)을 이용하여 억제할 수 있다고 할 때, 상단-암과 하단-암의 전압 기준치는 식 (7) 및 식 (8)과 같이 결정된다.

$$e_j = \frac{u_{nj} - u_{pj}}{2} \quad (3)$$

$$v_{dczj} = \frac{V_{dc} - (u_{pj} + u_{nj})}{2} \quad (4)$$

$$v_{diff_pj}^* = PI(i_{pj}^* - i_{pj}) \quad (5)$$

$$v_{diff_nj}^* = PI(i_{nj}^* - i_{nj}) \quad (6)$$

$$u_{pj} = -e_j + \frac{V_{dc}}{2} - v_{diff_pj}^* \quad (7)$$

$$u_{nj} = +e_j + \frac{V_{dc}}{2} - v_{diff_nj}^* \quad (8)$$

여기서 e_j 는 컨버터 생성전압, v_{dczj} 는 순환전류에 의한 전압, $v_{diff_pj}^*$ 는 j 상의 상단-암 순환전류 억제전압 기준치, $v_{diff_nj}^*$ 는 j 상의 하단-암 순환전류 억제전압 기준치이다.

정수 개의 서브모듈 전압을 이용하여 생성전압기준치

를 근사적으로 생성하는 NLM(nearest level modulation) 방법을 적용하고, 서브모듈전압이 한정된 변동 영역 내에서 유지될 수 있도록 서브모듈 전압 평활화 방법을 적용하여 on/off 되어야 하는 서브모듈을 선정함으로써 모듈러 멀티레벨 컨버터를 제어할 수 있다. Fig. 4에 전체 제어방법을 제시하였다.

3. 모듈러 멀티레벨 컨버터를 적용한 MVDC 계통 전압 제어특성

Genset의 동기발전기 출력전압이 6.9 kV_AC_II일 때 모듈러 멀티레벨 컨버터를 적용하여 12 kV_DC 직류계통 전압을 생성하는 컨버터로 사용될 수 있음을 보이기 위해 Fig. 5 시스템에 대해 시뮬레이션을 수행하였다.

Genset을 전압원으로 대체하고, 동기발전기의 출력전압에 상응하는 6.9 kV/60 Hz 전압을 출력하도록, Fig. 6와 같이, 전압원으로 등가화하여 설정하였다.

모듈러 멀티레벨 컨버터는상단-암과하단-암 각각에 서브모듈을 10개를 가지도록 설계하였고, 축소 용량으로 설계된 커패시턴스와 인덕턴스 값을 Table 1에 제시하였다.

6.9 kV 전압을 입력전압으로 받는 모듈러 멀티레벨 컨버터는 제어 목표값인 12 kV_DC값을 생성할 수 있어 MVDC 계통전압을 형성할 수 있으며, MVDC 계통에 부하전력을 인가하여 스트레스를 가해도 안정적으로 유지할 수 있음을 Fig. 7과 Fig. 8을 통해 알 수 있다.

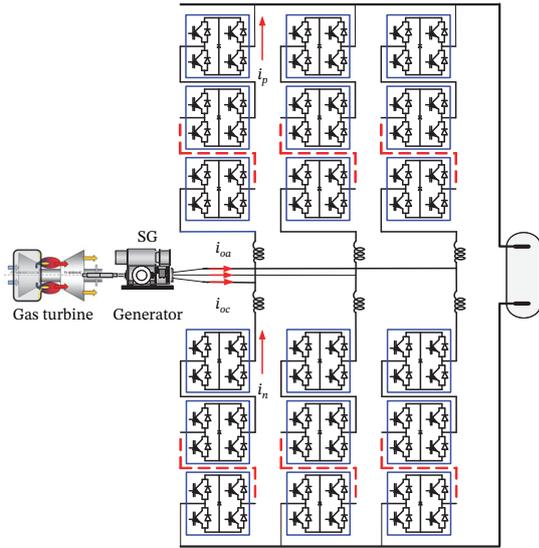


Fig. 5. MMC for converting AC voltage of synchronous generator to DC voltage

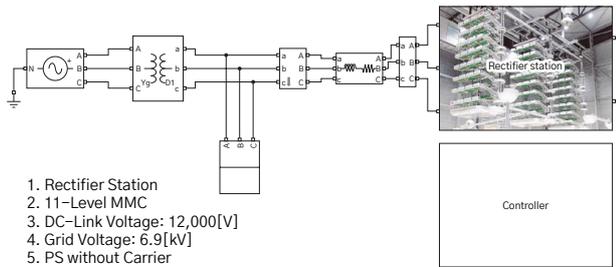


Fig. 6. Simulation system to verify MMC function

Table 1. Parameters of the MMC

Parameter	Value
SM no. per Arm (No/Arm)	10
SM capacitance [F]	1.1e-3
Arm inductance [H]	30e-3
AC-grid-side cable resistance [Ohm]	0
AC-grid-side cable inductance [H]	20e-3
AC-grid voltage [V_{AC_LL}]	6,900
MVDC-grid voltage reference [V_{DC}]	12,000

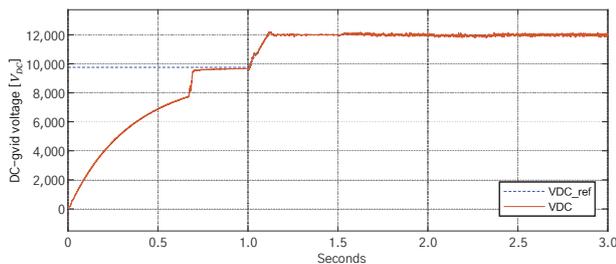


Fig. 7. Constant voltage control characteristics of MVDC system

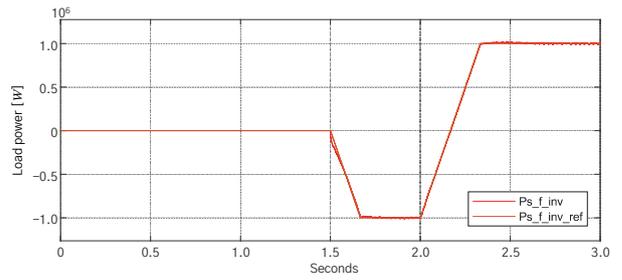


Fig. 8. Load scenarios for MVDC grids

a, b, c 상단-암에서 생성하는 전압 파형은 120도 위상차를 가지도록 생성된다는 것을 Fig. 9에서 알 수 있다.

임의의 어느 한 상에서 가지는 상단-암과 하단-암에서 생성되는 전압은 위상차가 180도를 가지면서 합성전압은 직류계통 전압과 같도록 생성한다. 이로써 상단-암과 하단-암에서 on 상태가 되는 서브모듈 수 합계는 언제나 N 개가 되는 것을 보장하게 되어, N 개의 서브모듈이 직류계통 전압을 $1/N$ 만큼 분담할 수 있도록 동작하게 하는 상하단-암 전압 파형을 Fig. 10에 제시하였다.

모듈러 멀티레벨 컨버터에 있는 각각의 서브모듈 전압은 직류계통 전압의 $1/N$ ($N=10$)에 해당하는 1.2 kV 평균 전압을 안정적으로 유지한다는 것을 Fig. 11과 Fig. 12를 통해 알 수 있다.

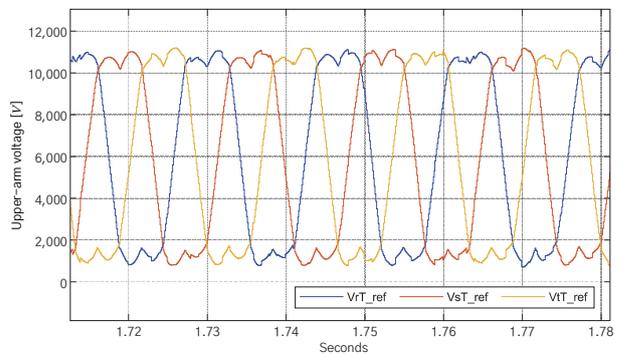


Fig. 9. Upper-arm voltages

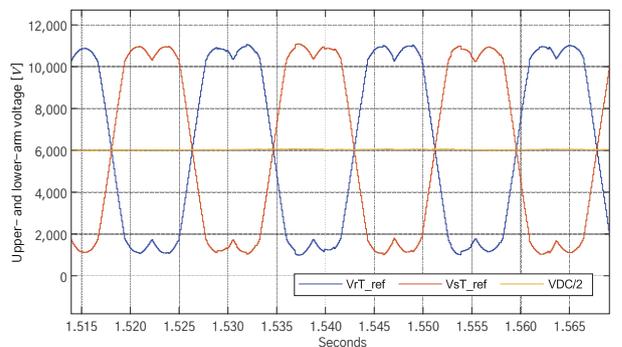


Fig. 10. Upper- and lower-arm voltages

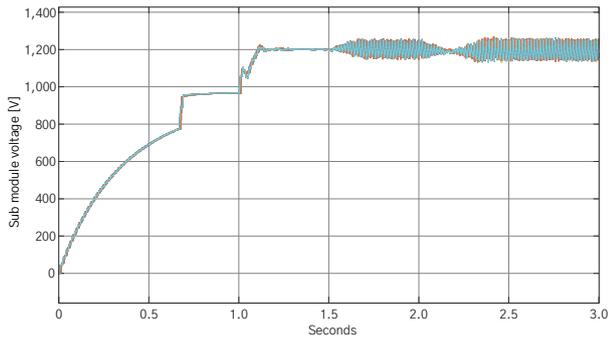


Fig. 11. Sub-module voltages

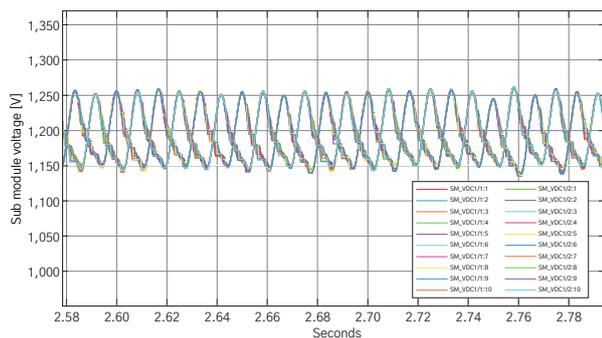


Fig. 12. Zoom-in sub-module voltages

4. 결론

4.16 kV 이하의 전압을 이용하는 통합전력시스템에서 13.8 kV_AC(또는 12 kV_DC) 전압영역을 이용하는 통합 전력시스템으로 발전되고 있는 기술 흐름에 맞추어, 이에 적용할 수 있는 모듈러 멀티레벨 컨버터와 제어방법을 제

시하였으며, Genset 출력단 전압을 이용하여 직류계통 전압을 생성하는 컨버터에 적용될 수 있음을 시뮬레이션 결과를 이용하여 검증하였다.

향후 수십 MW급 합정용 통합전력시스템을 상용화하기 위해 발전기 출력단 전압 제어용 컨버터뿐만 아니라, 추진전동기 제어용 인버터 개발과 에너지저장장치를 개발하는데 모듈러 멀티레벨 컨버터를 적용하여 상용화할 수 있음을 보이는 연구를 제시할 계획이다.

참고문헌

- [1] A. Lesnicar and R. Marquardt, "A new modular voltage source inverter topology," presented at the 10th Eur. Conf. Power Electron. Appl., Toulouse, France, 2003.
- [2] Qingrui Tu, Zheng Xu, Yong Chang and Li Guan, "Suppressing DC Voltage Ripples of MMC-HVDC Under Unbalanced Grid Conditions," IEEE Trans. on. Power Delivery, Vol. 27, 2012, pp. 1332 – 1338.
- [3] Makoto Hagiwara, Hirifumi Agaki, "start-up and low speed operation of an electric motor driven by a modular multilevel cascade inverter," IEEE trans. on industry applications, 2013, pp. 1556–1565.
- [4] Yerraguntla Shasi Kumar, "Control of Medium-Voltage AC Motor Drive for Wide Speed Range Using Modular Multilevel Converter," IEEE Trans. on Industrial Electronics, 2017, pp. 2742–2749.
- [5] Mohamed I. Daoud, "Zero-/Low-Speed Operation of Multiphase Drive Systems With Modular Multilevel Converters," IEEE Access 2019.