

모듈형 멀티레벨 컨버터를 이용한 특고압 직류 배전용 지능형 변압기의 제어 기법

김석민*, 백주원**, 김주용***, 이교범*
아주대학교*, 한국전기연구원**, 한전전력연구원***

Control Method of Modular Multilevel Converter Based Smart Transformer for Medium Voltage DC Distribution

Seok Min Kim*, Ju Won Baek**, Juyong Kim***, and Kyo Beum Lee*
Ajou University*, KERI**, KEPRI***

ABSTRACT

본 논문은 모듈형 멀티레벨 컨버터를 이용한 특고압 직류 배전용 지능형 변압기의 운용을 위한 제어 기법을 제안한다. 기존의 저주파 변압기는 부피와 무게가 매우 크며 효율이 낮다는 단점을 갖는다. 이에 반해 다수의 IGBT를 사용하는 지능형 변압기는 시스템의 부피를 저감할 수 있으며 고효율 운영이 가능하다. 또한, 직류 배전 계통의 단락 사고가 발생하였을 때 직류 차단기의 역할이 가능하다. 본 논문에서는 지능형 변압기의 토폴로지, 변조 방법을 제시하고, 스위칭 및 출력 특성을 분석한다. 시뮬레이션을 통해 제안하는 지능형 변압기 운용 제어 기법의 타당성을 확인한다.

1. 서론

특고압(MVDC) 직류 배전 계통은 현대 직류 계통에서 초특고압(HVDC) 송전 계통과 저압 직류(LVDC) 분산 전원을 연결하는 중요한 전력 시스템이다^[1]. MVDC 시스템에서 절연형 DC/DC 변환기로 구성되는 직류 변압기는 직류 전력을 변환하고 전달하는 전력전자 기반의 핵심 구성 요소이다. 직류 변압기는 양방향 전력 전달의 능동적인 제어가 가능하며 최근에는 다양한 제어 능력과 통신 기술을 접목한 지능형 변압기에 대한 연구가 진행 중이다. 지능형 변압기의 다양한 회로 중 모듈형 멀티레벨 컨버터 컨셉은 DC link를 구성할 수 있어 다양한 직류 발전원 및 에너지 저장장치와의 연계가 용이하다^[2]. 본 논문은 모듈형 멀티레벨 컨버터(MMC)를 기반으로 하는 지능형 변압기의 운용을 위한 제어 기법을 제안하며 시뮬레이션을 통해 제안하는 기법의 성능을 검증한다.

2. MMC 기반의 지능형 변압기

2.1 토폴로지 및 변조 기법

그림 1은 MMC 기반의 지능형 변압기 토폴로지를 나타낸다. 단상 MMC를 사용하는 MVDC 측과 고주파 변압기, Full bridge (FB)를 사용하는 LVDC 측으로 구성된다. MVDC 측은 n 개의 서브모듈과 고주파 인덕터를 갖는 단상 MMC로 구성되며 LVDC 측 또한 n 개의 FB로 구성된다^[3].

그림 2는 단상 MMC와 Full bridge의 변조 방법을 나타낸다. 각 서브모듈과 FB는 50%의 듀티비를 갖는 구형파를 출력하며 인접한 모듈 간에는 π/n 의 위상차를 두어 변압기 1, 2차

측 전압은 삼각형의 모양을 갖는다. 모듈간의 위상차가 0인 구형파 출력 전압에 비해 순환 전류를 억제하여 무효 전력을 저감할 수 있다. 추가적으로 서브모듈과 FB는 각 모듈간의 커패시터 전압을 균등하게 유지하기 위해 삼각반송파의 위상을 주기적으로 교대한다. 삼각반송파를 교대함으로써 스위칭 한 주기 내에서 모든 모듈은 평균적으로 동일한 전력을 전달하기 때문에 커패시터 전압을 균등하게 유지할 수 있다.

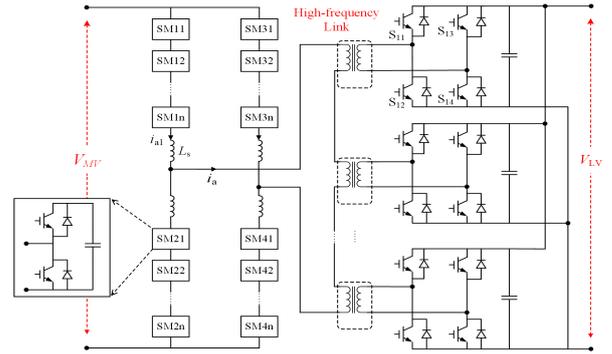


그림 1 MMC 기반의 지능형 직류 변압기 토폴로지
Fig. 1 Topology of smart DC transformer based on MMC

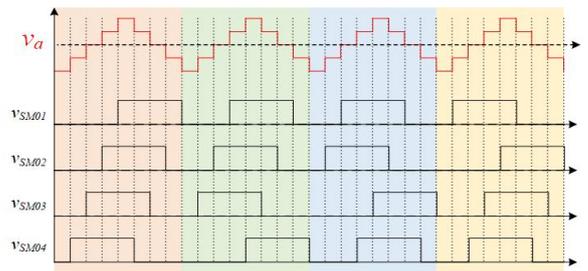


그림 2 지능형 직류 변압기의 변조 방법
Fig. 2 Modulation method for smart DC transformer

2.2 추가적인 모듈 커패시터 전압 균형 제어

변압기의 1차 측은 직렬로 연결되며 권선비가 동일하기 때문에 모든 FB로 동일한 전류가 흐르며 커패시터 전압 또한 균등하게 유지된다. 하지만 MMC 내의 서브모듈 간에는 위상차가 있기 때문에 같은 Arm 내의 서브모듈 간에는 서로 다른 전류가 흐른다. MMC 측의 전압 균형 유지를 확실하게 하기 위해 추가적인 제어기를 사용한다. 그림 3은 추가적인 서브모듈

전압 균형 제어기를 나타낸다. 각 서브모듈 커패시터 전압은 제어주기마다 측정되어 평균 전압과 비교한다. 비교를 통해 구해진 오차를 비례 제어기를 통해 기본 듀티비에 더해질 오프셋을 출력한다. 이 오프셋은 Arm 전류의 방향에 따라 기본 50% 듀티에 가감된다.

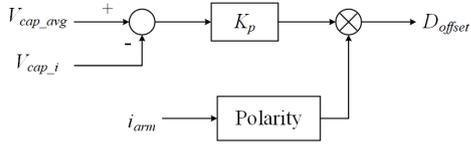


그림 3 추가적인 서브모듈 전압 균형 제어기
Fig. 3 Additional controller for submodule voltage balancing

3. 시뮬레이션

제안하는 지능형 직류 변압기의 제어 기법의 성능을 검증하기 위해 표 1의 환경에서 시뮬레이션을 진행하였다. 그림 4는 전력 급변 제어 결과 파형과 정상 상태의 고주파 변압기 양단 전압 및 1차 측 전류를 나타낸다. 변압기 양단 5 레벨 전압의 위상차에 의해 고주파 교류 전류가 발생하여 전력이 전달된다. LVDC 측 부하 전류가 +10 A에서 -10 A로 급변하여도 짧은 과도구간을 지나 정상상태에 도달하는 것을 확인할 수 있다.

표 1 시뮬레이션 환경 변수
Table 1 Simulation parameter

모듈 수	4 ea	스위칭 주파수	10 kHz
MVDC 전압	800 V	LVDC 전압	400 V
Arm 인덕터	0.1 mH	자화 인덕턴스	4 mH

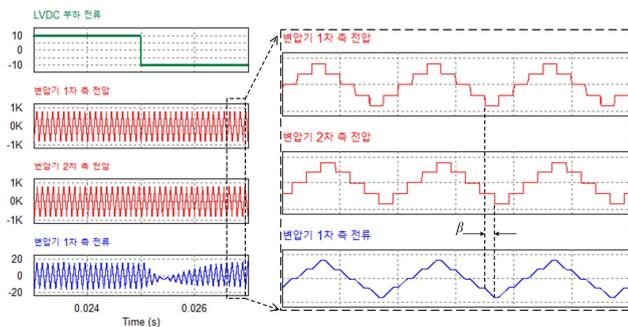


그림 4 고주파 변압기 양단 전압 및 전류
Fig. 4 Voltage and current of high frequency transformer

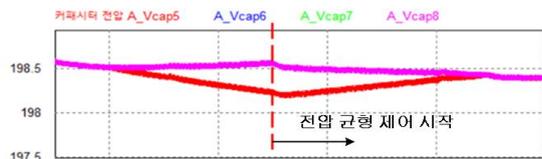


그림 5 서브모듈 전압 균형 제어 결과
Fig. 5 Submodule voltages with balancing control

그림 5는 추가적인 서브모듈 전압 균형 제어기 적용 전 후의 커패시터 전압을 나타낸다. 특정 서브모듈 커패시터에 저항

을 연결하여 불균형을 모의하였다. 커패시터 전압 불균형 발생 후, 전압 균형 제어기를 적용하여 모든 서브모듈이 평균 전압으로 수렴하는 것을 확인할 수 있다.

그림 6은 변조 기법에 따른 유/무효 전력의 차이를 나타낸다. 삼각파 변조 방식과 구형파 변조 방식 모두 변압기 양단 전압의 위상차가 π 일 때가 가장 큰 유효 전력을 전달한다. 삼각파 변조 방식은 전달할 수 있는 최대 유효 전력이 구형파 변조 방식 보다 적지만 시스템의 손실로 나타나는 무효 전력이 저감됨을 알 수 있다.

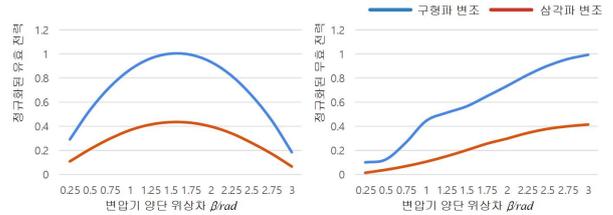


그림 6 변조 기법에 따른 유/무효 전력 비교 결과
Fig. 6 Comparison result of active/reactive power for different modulation schemes

4. 결론

본 논문은 모듈형 멀티레벨 컨버터 기반의 지능형 직류 변압기의 운용 제어 기법을 제안하였다. 모듈형 구조를 이용한 삼각파 전압 변조 기법은 사인파에 가까운 전압을 출력하여 무효 전력을 저감할 수 있다. 또한, 삼각반송파 교대 기법과 추가적인 전압 균형 제어를 통해 서브모듈 커패시터 전압을 일정하게 유지함으로써 높은 품질의 고주파 전압을 출력할 수 있다. 제안하는 지능형 변압기 토폴로지의 능동적인 양방향 전력 전달 제어 능력과 출력 특성을 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

이 논문은 한국전력공사 전력연구원에서 수행중인 "저압 직류배전망 독립성 실증 연구" 과제의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다.(D3080)

참고 문헌

- [1] M. Liserre, G. Buticchi, M. Andresen, G. D. Carne, L. F. Costa, and Z. X. Zou, "The Smart Transformer: Impact on the Electric Grid and Technology Challenges," *IEEE Ind. Electron. Mag.*, vol. 10, no. 2, pp. 46–58, Jun. 2016.
- [2] M. Liserre, M. Andresen, L. F. Costa, and G. Buticchi, "Power Routing in Modular Smart Transformers: Active Thermal Control Through Uneven Loading of Cells," *IEEE Ind. Electron. Mag.*, vol. 10, no. 3, pp. 43–53, Sept. 2016.
- [3] B. Zhao, Q. Song, J. Li, Y. Wang, and W. Liu, "Modular Multilevel High Frequency Link DC Transformer Based on Dual Active Phase Shift Principle for Medium Voltage Dc Power Distribution Application," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 32, no. 3, pp. 1779–1791, Mar. 2017.