

MVDC와 LVDC를 연계하는 MW급 컨버터 설계 시 전력회로 토폴로지의 고찰

박영호, 박영민, 이승용, 이승호, 김지홍, 이찬주
HD현대일렉트릭

Study of the power circuit topology of the MW-scale MVDC-LVDC converter

Youngho Park, Young-Min Park, Seong-Yong Lee, Seung-Ho Lee, Jihong Kim, Chan-Joo Lee
HD Hyundai Electric Co., Ltd.

ABSTRACT

친환경 에너지전환을 위해 고효율·고품질의 배전망이 요구되며 미래형 전력망 기술로 MVDC 기술 수요가 증가하고 있다. 직류배전이 보급 및 확산되면 전력망은 AC/DC Hybrid 배전 네트워크 구조를 갖게 되고, 혼용망 내 서로 다른 특고압 및 저압 그리드를 연계하면서 양방향 전력제어를 비롯한 다양한 기능을 수행하는 다수의 컨버터 스테이션이 필요하다. 본 논문은 LVDC 직류 수용가에 MVDC 배전망의 전력을 수전하여 사용할 수 있도록 하며, LVDC 분산전원의 발전전력을 MVDC 배전망에 공급할 수 있는 절연형/양방향 MW급 대용량 MVDC-LVDC 컨버터 설계 시 검토해야 할 전력회로 토폴로지에 대한 연구 결과를 제시하였다. MV급 대용량 전력변환장치에는 매우 다양한 방식의 토폴로지를 설계할 수 있으며, 본 논문은 제작 및 시험을 위한 선행 연구로 적용 가능한 토폴로지 중 다양한 측면의 장/단점 검토를 거쳐 최적 방식을 분석하였다.

1. 서 론

배전망에 연계되는 재생에너지 분산전원의 보급이 확대되고 있으며, 부하 밀집지역 내 전기차 급속충전 설비와 데이터 센터의 접속 등으로 전력수요는 더욱 집중되고 있다. 이로 인해 계통 운영이 어렵고 배전망의 용량이 포화되어 열적 한계에 직면하고 있으나, 신규 선로 증설은 주민 수용성 문제로 어려운 형편이다. 최근, 이와 같은 배전 환경의 변화에 능동적으로 대응할 수 있는 MVDC(Medium Voltage Direct Current) 기술이 미래형 전력망 기술로 주목받고 있다.

MVDC는 기존 배전선로의 사용률을 증대시켜 신규 배전 인프라 확충 부담을 완화시키며 신재생 전원과 전기차 급속 충전소를 도심지에 대용량으로 연계할 수 있는 전력 플랫폼이다. 또한, 직류부하 증가 추세를 고려했을 때 전력변환 손실이 감소하여 배전 효율화의 이점이 있고 재생에너지 접속 증가 시 발전량과 수요량 차이에 의한 역조류 제어 등 계통 안정화 역할을 수행할 수 있다. 이러한 장점으로 MVDC는 기존 AC망과 더불어 미래 배전망의 한 축을 담당할 것으로 예상된다.

본 논문은 시제품 제작 및 시험을 위한 선행 연구로 입력과 출력 전압의 변환 비율이 매우 큰 MW급 절연형 MVDC-LVDC 컨버터 설계 시 검토해야 하는 전력회로 토폴로지에 대한 연구 결과를 제시하였다. 고압 대용량 전력변환장치에는 매우 다양한 방식의 토폴로지 적용이 가능하므로 다양한 각도의 장/단점 검토를 거쳐 최적 방식을 분석하였다.

2. MVDC-LVDC 컨버터 기본설계

2.1 절 AC/DC Hybrid 배전 네트워크 구조

MVDC 선로 구축의 시작은 기존 교류 Grid에서 직류로 변환하는 Converter Station(변환소)이며, 연계점 위치는 손실 저감을 위해 유사한 크기를 갖는 $22.9V_{AC}$ MVAC가 유리하다. MVDC 컨버터는 직류 출력 터미널이 1:N의 멀티터미널 구조로 확산 및 통합되어 네트워크 구성이 가능하기 위해 VSC(Voltage Source Converter) 방식이 적절하다. 그림 1은 AC/DC Hybrid 배전망의 구성의 예시를 나타낸다.

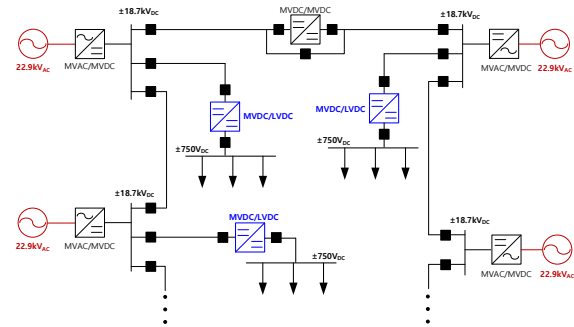


그림 1 AC/DC 하이브리드 배전 네트워크 구성도

AC/DC 혼용망은 MVDC to MV/LVAC, MVDC to MV/LVDC 등 서로 다른 Grid를 연계하는 다수의 컨버터가 필요하다. 이러한 컨버터는 유기적인 시스템 운용을 위해 양방향 전력 제어를 수행해야 한다. 가령, MVDC-LVDC 컨버터의 경우 MVDC 배전망의 전력을 LV급 수용가에서 수전하여 사용할 수 있도록 하고, LVDC에 연계된 분산전원의 발전전력은 반대로 상위 MVDC 배전망으로 공급할 수 있는 기능 및 역할이 요구된다. 또한, MVDC망 내의 조류제어 등 안정도 향상을 위한 능동적인 역할을 수행하는 MVDC-MVDC 컨버터의 설치 및 운용도 상정할 수 있다.

2.2 절 MVDC-LVDC 컨버터 사양

출력전압은 IEC 규정인 $1.5kV_{DC}$ 이하 LVDC 범위 중 장거리 간선 전압으로 사용하기에 적합하도록 배전용량이 크고 손실 및 최대 송전거리에서 유리한 바이폴 $\pm 750V_{DC}$ 로 선정하였다. 바이폴 방식은 기설 기자재 활용도 및 전송 용량을 고려했을 때 표준 방식이 미정인 MVDC 배전망에도 적합하며, 중성선

케이블을 포함한 3선식 구조이면 한쪽 극성이 사고로 차단되어도, 다른 극성으로 단전 없이 전력을 공급할 수 있다. 전압은 22.9V_{AC} MVAC와의 연계성을 고려하여 최적 레벨은 별도 검토가 요구되나 ±20kV_{DC}급 정도가 적절한 수준이며, 본 논문에서는 ±18.7kV_{DC}로 상정하였다.

표 1 MVDC-LVDC 컨버터 사양

구 분	내 용
입력전압	37.4kV _{DC} (±18.7kV _{DC})
출력전압	1.5kV _{DC} (±750V _{DC})
정격 용량	2 MW
효율	96.5% 이상

2.3 절 전력 토폴로지 고려사항

본 컨버터의 사양은 입력과 출력 전압의 변환비가 약 25배에 이르는 특징이 있고 각각 MV급과 LV급인 입/출력 사이에 전기적 절연을 확보해야 한다. 입력과 출력이 모두 직류이므로 절연은 컨버터 내부에서 높은 수준의 절연 특성을 만족하는 MFT(Medium Frequency Transformer)를 활용해야 한다. 이러한 고전압 대용량 전력변환장치는 모듈형 컨버터의 직/병렬 연결 구조를 채택해야 향후 입출력 전압과 용량의 변화에 유연하게 대응할 수 있는 확장성을 갖는다.

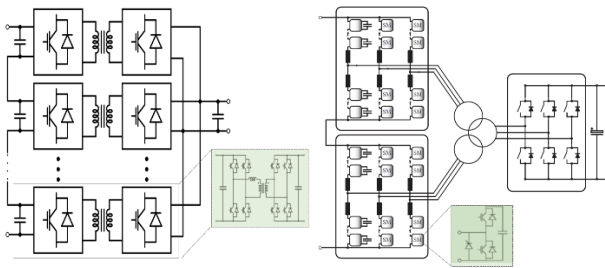


그림 2 MAB와 MMC 방식의 전력회로 토폴로지

이를 위한 전력 토폴로지는 그림 2와 같이 MAB(Multiple Active Bridge)와 MMC(Modular Multi-level Converter) 방식을 고려할 수 있다. MMC의 경우 사양 변경 시 그에 따른 특화된 MFT의 재설계 및 제작이 요구되고 MFT 이후의 AC/DC 컨버터는 모듈화가 되지 않는 단점이 있으나, MAB 방식은 ISOP(Input Series Output Parallel) 구조를 통해 전압과 용량의 확장성을 확보할 수 있고, 동일한 모듈로 전체 시스템을 구성할 수 있는 장점이 있다^[1].

2.4 절 단위 모듈 컨버터의 토폴로지

컨버터의 출력인 LVDC는 바이폴 구조이므로 상·하단 부하 불평형 조건에 대응할 수 있는 제어 및 전력회로를 갖춰야 한다. 이를 위해 모듈형 컨버터의 단위 모듈은 2차측에 2개의 Port를 가져야 하며, 입력은 직렬로 쌓는 구조이므로 1개 Port를 갖는 구조와 2개 Port를 갖는 구조 모두 적용 가능하다. 즉, TAB(Triple Active Bridge)과 QAB(Quadruple Active Bridge)를 단위 모듈의 전력 토폴로지 검토할 수 있다.

전력반도체의 정격 전압을 높게 하면, 적은 수의 모듈 적층으로 스위칭 소자의 개수가 줄어드나, 컨버터의 고효율 달성을 위해 SiC 전력반도체와 같은 WBG(Wide Band Gap) 소자를 적용 시 1,700V를 초과하는 제품을 다량으로 확보하기

어렵고 가격 매력도 또한 매우 떨어진다. 이에 따라 복잡성을 증가시키는 단점에도 불구하고 1,700V 이하 소자로 모듈을 구성하고 고속통신 기반의 제어시스템으로 다수의 모듈을 제어하는 시스템을 고려하였다.

표 2 TAB과 QAB의 비교

구 분	TAB(2레벨)	QAB(2레벨)
입/출력 전압	입력 1,100Vdc 출력 ± 750Vdc	입력 1,500Vdc 출력 ± 750Vdc
PEBB 용량	60kW	80kW
모듈 직렬수	34 ea	25 ea
전력 반도체	1,700V * 64 ea 1,200V * 128 ea	1,200V * 200 ea
양산성	보통	좋음

TAB 사용 시, MFT의 고압 권선이 1개이므로 사이즈는 줄일 수 있으나, 제작 측면에서 1,700V 및 1,200V 전력반도체를 혼용하고 DC 커패시터 또한 1,100V 및 750V급으로 혼용해야 하는 단점이 있으며 입출력 전압비가 정수비가 아니다. 반면, QAB는 MFT의 고압 권선이 2개이므로 고압 권선간의 절연 확보를 위해 MFT 사이즈가 TAB보다 커지나, 단일 1,200V 전력반도체와 750V DC 커패시터 적용으로 충분하여 양산 관리에 매우 유리하다. 또한 입출력 1,500Vdc 단일 전압으로 시험검증이 가능한 장점도 있고 TAB에 비하여 MFT 제작도 용이하므로 QAB를 단위 모듈로 선정하였다.

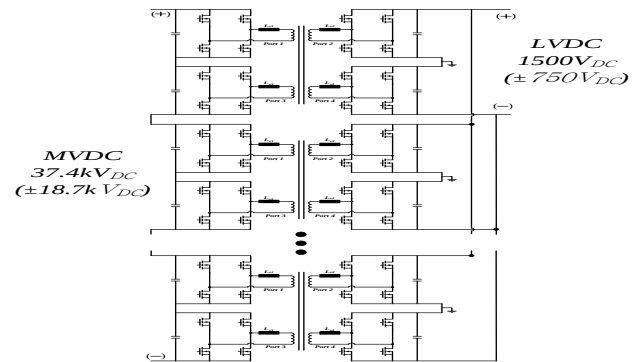


그림 3 QAB를 단위 모듈로 하는 MVDC-LVDC 컨버터 전력 토폴로지

3. 결 론

본 논문에서는 특고압 직류 수전용 MVDC-LVDC 컨버터 스테이션에 적용 가능한 여러 옵션의 전력회로 토폴로지 가능성을 검토하고 사양 및 역할에 적합한 고전압 대용량 전력변환장치의 토폴로지를 전력반도체, MFT 및 절연 요구사항의 측면에서 비교·분석하고 최적 방식을 검토하였다.

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. [No. 20225500000100]

참 고 문 헌

- [1] 이승호, 박영민, 박영호, 김명호, 백주원, “직류배전을 위한 TAB 기반의 DC-DC 컨버터 설계 및 제어”, 전력전자학회 학술대회 논문집, 469-470, 2022