

# MVDC 절연형 컨버터 토폴로지 선정 연구

표기현, 심원보, 이은수  
한양대학교 ERICA 전자공학과

## Research on the Selection of Isolation-type Converters for MVDC

Kihyun Pyo, Wonbo Sim, and Eunsoo Lee  
Hanyang University ERICA, Electrical Engineering

### ABSTRACT

본 논문에서는 MVDC (Medium Voltage Direce Current) 시스템에 적용될 수 있는 절연형 DC/DC 컨버터 토폴로지를 제안 및 비교 분석하였다. MVDC에 적용될 수 있는 대표적인 토폴로지로 Dual-Active-Bridge (DAB) 컨버터, Triple-Active-Bridge (TAB) 컨버터, Quadruple-Active-Bridge (QAB) 컨버터를 고려하였으며, 3개의 컨버터에 적용되는 파라미터를 동일한 전력 전달이 되도록 선정된 후 각 컨버터별 손실을 비교 분석하였다. 이를 통해 3개의 컨버터별 전력 변환 효율, 변압기 및 방열패드를 고려한 전체 사이즈, 컨버터 전체 가격 등 3개의 주요 결과 인자를 Figure-of-Merit (FoM) 정의를 통해 비교 함으로써 MVDC에 적용할 수 있는 최적 토폴로지를 도출하였다.

### 1. 서 론

기존 AC 대비 DC 전력계통은 전력설비 용량 증대, AC 무손실, 100% 유효전력 등의 장점으로 인해 전세계적으로 DC 전력 송배전화가 진행 중이다 [1]. HVDC부터 시작하여 MVDC 및 LVDC 등 대부분의 전력계통이 점점 DC 전력송배전화가 진행 중이며, 특히 DC 송배전화시 필요한 전력변환장치의 고효율 설계가 필수적이다. MVDC 시스템의 핵심 구성요소인 절연형 DC/DC 컨버터는 일반적으로 1차측 및 2차측간 위상차를 고려한 양방향 전력변환 토폴로지인 Dual-Active-Bridge (DAB)가 널리 사용되며, 전압레벨 및 입출력 구조에 따라 Triple-Active-Bridge (TAB) 컨버터, 또는 Quadruple-Active-Bridge (QAB) 컨버터도 사용될 수 있다. 그러므로 DC송배전 컨버터에 적용되는 전기적 조건이 주어지는 경우, 앞서 언급한 DAB, TAB, QAB 중 적절한 토폴로지 선정하는 것이 중요하다. 본 논문에서는 위 3가지 절연형 컨버터 토폴로지를 손실&효율, 사이즈, 가격으로 3가지 인자를 통해 그 성능을 비교 분석하였고 Figure of Merit (FoM) 관점에서의 MVDC용 컨버터 최적 선정 방법론을 도출하였다.

### 2. MVDC 절연형 컨버터 최적 선정

#### 2.1 컨버터 토폴로지 선정

MVDC의 출력전압은 입력전압 대비 낮게 선정, Small-scaled으로 제작 가정시 본 논문에서는 입력전압  $V_s$  3kV, 출력전압  $V_L$  1kV임을 가정하였다. 출력 전달전력은 60kW로 선정하였고 MVD C용 컨버터는 10kHz, 20kHz, 30kHz로 총 3가지 동작주파수로 동작함을 가정하였으며, 이를 표 1에 요약하였다. 표 1에 나타난 바와 같이 입력 3kV, 출력 1kV를 고려한 토폴로지 배치 및 토폴로지에 적용되는 SiC MOSFET 스위치를 그림 1 및 표 2에 나타내었다. 그림 1(a) DAB의 경우 입력 3 직렬 및 및 출력 3 병렬을 통해 현재 상용화된 1.7kV급 SiC 스위치를 사용한다고 가정할 수

Electrical Conditions	Selected value
Source Voltage $V_s$	3,000V
Load Voltage $V_L$	1,000V
Switching Frequency ( $f_s$ )	10kHz, 20kHz, 30kHz
Transferred load power	60kW

표 1. Small-scaled MVDC용 파라미터 선정의 예  
Table 1. Parameter Selection for Small-scaled MVDC

품명	전압 Rating	전류 Rating	개당 가격
BSM250D17P2E004	1.7kV	250A	165만원
BSM180D12P2C101	1.2kV	204A	75만원

표 2. Small-scaled MVDC 고려 선정된 SiC MOSFET 특성  
Table 2. Selected SiC MOSFET for small-scaled MVDC

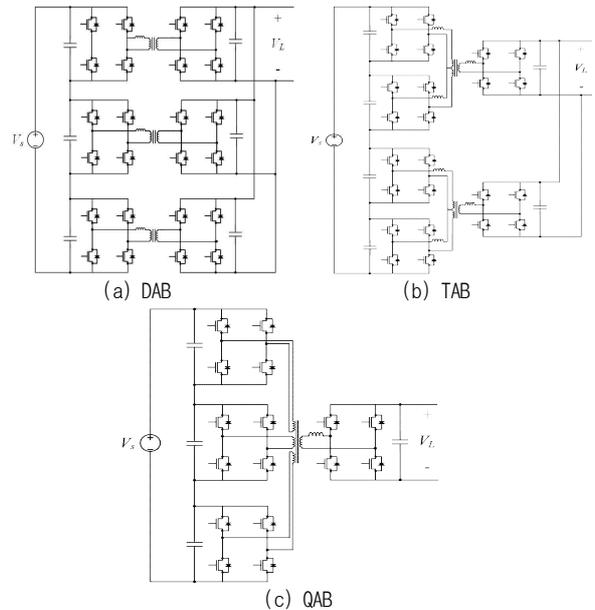


그림 1 MVDC용 컨버터 토폴로지 선정 결과  
Fig. 1 Converter topology selection for MVDC

있으며 이 경우 정격전압 대비 70%의 스위치 전압 여유율을 가진다고 볼 수 있다, 위와 동일한 원리로 입력 2개 및 출력 1개를 갖는 2개의 TAB를 선정할 수 있으며 이 경우 1.2kV SiC MOSFET 스위치 사용을 가정하였다. QAB는 DAB와 유사한 방식으로 토폴로지 선정이 가능하며 최종적으로 그림 1에 요약하였다.

#### 2.2 컨버터별 효율 및 손실 분석

그림 1에서 결정된 토폴로지를 이용하여 수행한 PLECS 시뮬레이션 결과 예시를 그림 2에 나타내었다. 스위치 모델은 표2에 제시된 SiC MOSFET 특성을 반영하였으며 동작점은 ZVS 확보 및 제어 성능을 고려하여 1차 및 2차측간 위상차  $\phi_d$ 는 약 40도로

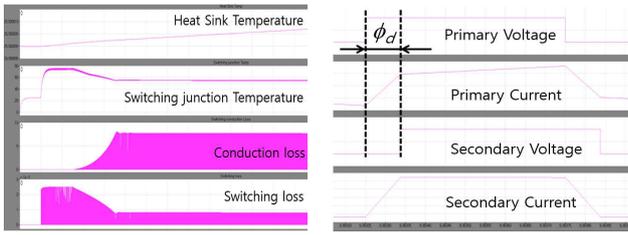


그림 2 컨버터 시뮬레이션 결과의 예  
Fig. 2 Example of the simulation waveform for the converters

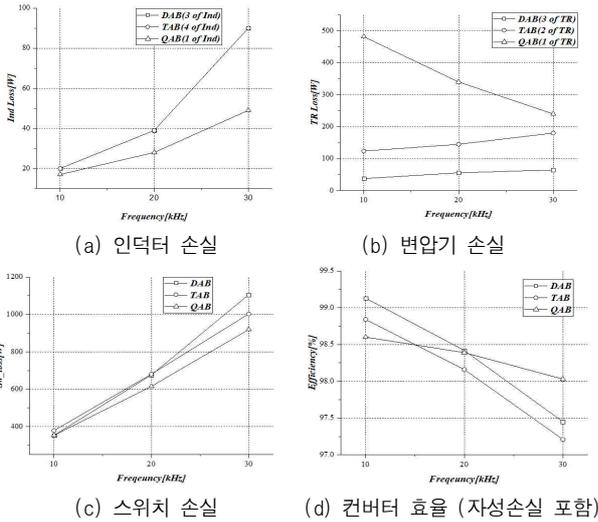


그림 3 DAB & TAB & QAB별 손실 및 효율 특성 분석  
Fig. 3 Loss & efficiency characteristics for DAB & TAB & QAB

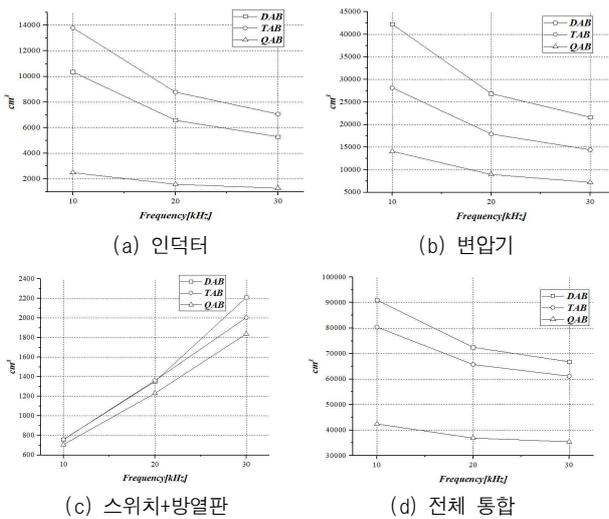


그림 4 DAB & TAB & QAB별 사이즈 분석  
Fig. 4 Size characteristics for DAB & TAB & QAB

선정하였다. DAB&TAB&QAB를 구동하는 인덕터는 전력 수식을 통하여 DAB&QAB는 10kHz, 20kHz, 30kHz별로 각각 360μH, 240μH, 120μH로 각각 선정하였고 1차측에 인덕터를 배치하였으며 QAB는 160μH, 100μH, 50μH으로 선정하고 2차측에 인덕터를 배치하였다 [2]-[3]. 변압기의 자화인덕턴스는 스위치 주파수 및 전압레벨을 고려하여 약 3mH 수준으로 선정하였으며, 인덕터 및 변압기 설계 및 손실은 FEM 시뮬레이션의 Steinmetz Equation에 기반하여 설계하였다 [2]-[3]. 시뮬레이션 결과 주파수가 증가

할수록 전체적으로 손실은 증가하며, DAB&TAB의 감소율 대비 QAB의 감소율이 상대적으로 완만함을 확인할 수 있다.

### 2.3 컨버터별 사이즈 및 가격 분석

컨버터를 구성하는 주요 구성요소는 스위치, 방열판, DC 링크 커패시터 및 스너버 커패시터, 자성체(변압기+인덕터)로 구성할 수 있다. 스위치의 경우 표2에 제시된 SiC MOSFET의 데이터시트를 참고할 수 있으며 방열판은 상용화된 컨버터의 수냉방식을 고려하여 손실대비 크기 비율을 2.0 cm<sup>3</sup>/W 적용함을 가정하였다. DC링크 커패시터 및 스너버 커패시터는 10kHz ~30kHz 동작주파수를 고려한 상용화된 필름 커패시터의 사이즈를 적용하였고, 인덕터 및 변압기는 각 동작주파수를 고려한 최적 설계법을 적용하여 그 크기를 도출하였다 [1]-[2]. 이를 모두 종합적으로 통합한 사이즈 분석 결과를 그림 4(d)에 나타내었다. 가격의 경우, 가장 큰 부분을 차지하는 스위치 및 커패시터만을 고려하였으며 각 토폴로지별 스위치 및 커패시터 개수를 고려하여 선정 가능하다.

### 2.4 FoM을 통한 컨버터 성능 평가

본 논문에서 분석한 효율, 사이즈, 가격 3가지 조건을 요약하고 해당 3가지 조건을 10kHz~30kHz에서 평균한 수치를 Normalization한 결과값을 표3에 요약하였다. 가격은 DAB가 상대적으로 높고 TAB와 QAB는 유사한 수준이며, 크기는 DAB > TAB > QAB이며, 효율은 TAB가 DAB&QAB에 비해 다소 열세인 것을 확인할 수 있다. 본 논문에서 제안된 FoM=(Norm Cost × Norm Size × (1-η) × 100)은 낮은 수치일수록 우수함을 나타내는 것이며 최종적으로 QAB > TAB > DAB 순서로 특성이 우수함을 본 논문을 통해 확인할 수 있다.

Classification	DAB	TAB	QAB
Normalized Cost	1.000	0.697	0.692
Normalized Size	1.000	0.902	0.502
Efficiency	0.9833	0.9807	0.9834
FoM	1.666	1.215	0.577

표 3. FoM 최종 결과지표 요약  
Table 3. Summary for FoM

## 3. 결론

본 논문에서는 MVDC 시스템에 적용 가능한 3가지 대표적인 절연형 컨버터 토폴로지들을 제안하였고, PLECS 및 FEM 시뮬레이션을 통해 효율&손실, 가격, 사이즈를 비교 분석하였다. 분석 결과, 본 논문에서 정의한 FoM 방식 적용시, QAB > TAB > DAB 순서로 특성이 우수함을 확인할 수 있었고, 본 논문에서 제안한 FoM은 다른 컨버터의 성능 비교 지표로도 다양하게 활용할 수 있을 것으로 예상된다.

## 참고 문헌

- [1] Stefan P. Engele *et al*, "Comparison of the Modular Multilevel DC Converter and the Dual-Active Bridge Converter for Power Conversion in HVDC and MVDC Grids," *IEEE Trans Power Electron*, vol. 30, no. 1, pp. 124-137, Jan. 2015.
- [2] Eun S. Lee, *et al*, "High Efficiency Integrated Transformer Design in DAB converters for Solid-State Transformers," *IEEE Trans Veh Techn*, vol. 71, no. 7, pp. 7147-7160, Jul. 2022.
- [3] Eun S. Lee *et al*, "High-Efficiency Module Design of Solid-State Transformers for Railway Vehicles," *IEEE Trans Transp. Electrification*, Vol 8, No. 1, pp. 98 - 120, March. 2022.