

MVDC QAB 컨버터용 통합 변압기 설계 연구

나수인, 이은수
 한양대학교 ERICA 전자공학부

Integrated Transformer Design for MVDC QAB Converters

Suin Na, Eunsoo Lee
 Hanyang University ERICA, Electrical Engineering

ABSTRACT

본 논문에서는 MVDC(Medium Voltage Direct Current)에 적용될 수 있는 QAB(Quadruple Active Bridge) 컨버터용 통합 변압기의 최적 설계 기법을 제안하였다. 기존 QAB 컨버터에 적용되는 자성체의 경우, 1개의 변압기와 1개의 최소한의 추가 인덕터가 필요하며, 각 H-브리지의 추가되는 인덕턴스가 다를 경우 H-브리지로부터 공급되는 입력전력이 불균등화될 수 있는 단점이 있다. 본 논문에서는 QAB 컨버터에서 고전력 밀도화를 위해 QAB에 적용되는 고주파 변압기의 누설 인덕턴스를 최적 설계함으로써, 추가적인 인덕터가 없이 변압기 1대만으로 QAB 구동 가능한 변압기 설계 방법론을 제안하였다. 코어 타입 형상 변압기의 길이를 최적 조절함으로써 QAB 구동에 필요한 누설 인덕턴스를 확보하였으며, 이를 회로 및 유한요소 시뮬레이션을 통해 성능을 검증하였다.

1. 서론

기존 AC 대비 DC 전력계통은 전력설비 용량 증대, AC 무손실, 100% 유효전력 등의 장점으로 인해 전세계적으로 HVDC부터 시작하여 MVDC으로 확장해 나가는 등 LVDC 등 DC 그리드 전력화가 진행중이다. MVDC 시스템의 핵심 구성요소인 양방향 절연형 DC/DC 컨버터는 일반적으로 1차측 및 2차측 간 위상차를 고려한 Dual Active Bridge (DAB)가 널리 사용되며, 입출력 전압 레벨 및 연결 구조에 따라 Triple Active Bridge (TAB) 컨버터, 또는 Quadruple Active Bridge (QAB) 컨버터가 적용될 수 있다^[1]. 그 중 효율&손실, 가격, 사이즈 비교시 상대적으로 우위인 QAB를 적용할 수 있으나, 일반적으로 QAB에 적용되는 자성체의 경우 한 개의 변압기와 최소 1개의 추가적인 인덕터가 필요하다^[2]. 특히 2:2 또는 1:3 과 같이 입출력에 동일한 H-브리지가 적용되는 QAB 특성상, 다른 직렬 인덕턴스가 연결되는 경우 각 H-브리지로부터 공급되는 전력이 불균등하게 될 수 있는 단점이 있다.

본 논문에서는 추가적인 인덕터를 사용하지 않고 변압기 자체의 누설 인덕턴스만을 사용하는 QAB용 통합 변압기를 제안하였다. 제안하는 변압기를 사용하여 QAB 컨버터의 고전력밀도화가 가능하며, 코어 타입 변압기의 1차↔2차 권선간 적절한 코어 길이 및 센터레그를 추가함으로써 원하는 누설 인덕턴스를 확보할 수 있으며 이를 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

2. 제안하는 MVDC QAB 토폴로지

제안하는 MVDC용 QAB 토폴로지는 그림 1과 같이 MVDC 입력 20kV를 LVDC 1.5kV 출력으로 연결되는 DC 그리드 계

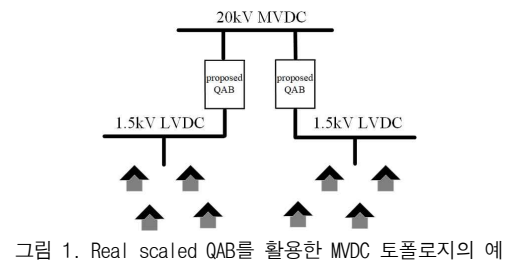


그림 1. Real scaled QAB를 활용한 MVDC 토폴로지의 예

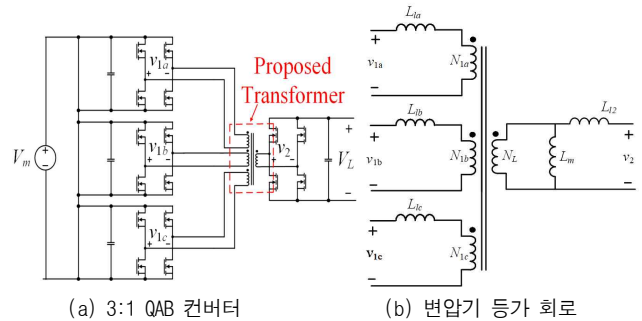


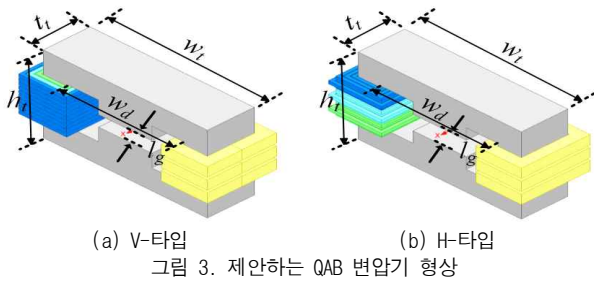
그림 2. 제안하는 QAB 컨버터 회로도

표 1. Small-scaled prototype QAB 요구조건

Input Voltage V_m	2.0 kV
Output Voltage V_L	150 V
Load power P_L	10 kW
Switching frequency f_s	20 kHz
Turn ratio $N_m:N_L$	10:3, 13:4

통에 적용될 수 있다. 본 논문에서는 추후 실험의 용이성을 위해 small-scaled로 진행하였으며, 입력 전압 $V_m = 2kV$, 출력 전압 $V_L = 150V$, 출력 전압 $P_L = 10kW$ 로 scaled-down하였고 이를 표 1에 정리하였다. MVDC-to-LVDC로 전압을 강압하기 위해, V_m 은 입력측 3개의 H-브리지가 직렬로, 나머지 1개의 H-브리지가 출력으로 연결되도록 그림 2(a)와 같이 구성할 수 있다. MVDC용 컨버터의 동작 주파수는 SiC 전력용량 및 성능을 고려하여 20kHz로 선정하였으며, 고주파 변압기 턴 비 ($n=N_m:N_L$)는 ZVS 영역을 고려하여 10:3 또는 13:4로 선정하였다. 제안하는 변압기의 등가회로는 그림 2(b)과 같으며 표 1에 제시된 요구조건을 만족하기 위한 등가 직렬인덕턴스를 아래 식을 통해 계산할 수 있다.

$$P_L = \frac{V_m V_L \phi_v (\pi - \phi_v)}{2n\pi^2 L_{\mu} f_s} \quad (\because 0 < \phi_v \leq \pi), \quad (1)$$



(a) V-타입 (b) H-타입
그림 3. 제안하는 QAB 변압기 형상

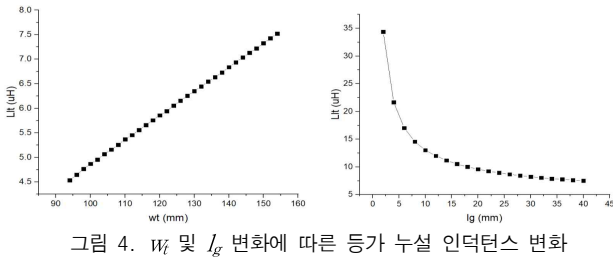


그림 4. w_f 및 l_g 변화에 따른 등가 누설 인덕턴스 변화

표 2. $L_{2m} = 12\mu\text{H}$ 를 만족하는 변압기 파라미터 선정 결과

	V-타입 (10T:3T)	V-타입 (13T:4T)	H-타입 (10T:3T)	H-타입 (13T:4T)
L_{2m} [μH]	1,306	2,262	1,309	2,451
w_f [mm]	154	139	154	127
l_g [mm]	12	40	16	40

이때, ϕ_v 는 1차측 및 2차측 전압의 위상차, f_s 는 동작 주파수이다. 본 논문에서 목표로 한 출력 전력 10kW을 위한 위상차 $\phi_v = 60$ 도를 가정할 경우, 고주파 변압기의 2차측 등가 누설 인덕턴스는 12 μH 임을 수식 (1)을 통해 알 수 있다.

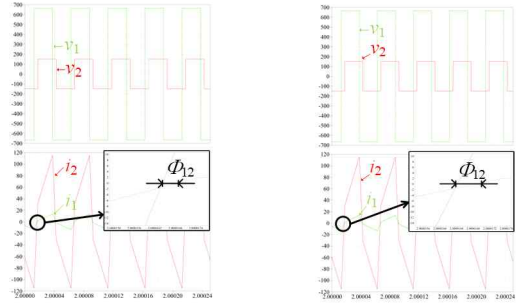
3. 제안하는 변압기 설계 및 특성 분석

본 논문에서 목표로 하는 등가 누설 인덕턴스를 12 μH 로 설계하기 위해 그림 3과 같이 FEM 시뮬레이션으로 모델링하였다. 코어 형상은 TODAISU社의 UU84 타입 코어를 선정하였으며, 누설 인덕턴스를 최적 설계하는 방법을 검증하기 1차측 3개 권선의 감는 타입에 따라 H-타입 (Horizontal)과, V-타입 (Vertical) 경우로 나누었으며, 각각 턴 비 10T:3T, 13T:4T에 대하여 모델링하였다. 그림 3의 모델을 시뮬레이션한 결과, 그림 4와 같이 등가 누설 인덕턴스는 1차측&2차측 간격인 w_f 과 코어 센터 레그의 air-gap에 의해 조절될 수 있음을 알 수 있다. 시뮬레이션 결과 1차측 자기인덕턴스, L_{1a} , L_{1b} , L_{1c} , 2차측 자기인덕턴스 L_2 , Magnetic coupling coefficient k, 턴비 n를 추출할 수 있고, 1차측 3개 권선이 대칭적으로 설계되었다고 가정할 경우, 아래 식을 이용하여 변압기의 2차측 자화 인덕턴스 L_{2m} 와, 2차측에서 바라본 등가 누설 인덕턴스 L_{2l} 를 도출할 수 있다.

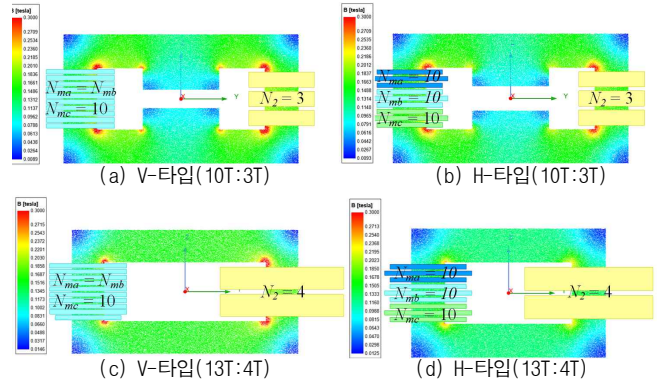
$$L_{2l} = n^2(L_{1a} + L_{1b} + L_{1c}) + L_{22} \quad \because L_{1a} \approx L_{1b} \approx L_{1c} \quad (2a)$$

$$L_{2m} = kn\sqrt{L_{1a}L_2}, \quad L_{1a} = \frac{1}{n^2}L_{2m} + L_{11}, \quad L_{22} = L_2 - L_{2m} \quad (2b)$$

그림 4와 같이 w_f 와 l_g 를 조절한 결과, 13T:4T 모델은 w_f 조절만으로도 목표로 하는 12 μH 를 확보한 반면, 10T:3T 모델은 w_f 증가(최대 $w_f = 154\text{mm}$ 가정) 만으로는 누설 인덕턴스 확보가 어려워 center-leg를 추가하였다. 시뮬레이션 결과, 13T:4T이 10T:3T 대비 자화인덕턴스가 크며, V-타입과 H-타입 중 누설 인덕턴스 확보 차원에서 H-타입이 근소하게 우수한 것을 확인할 수 있다.



(a) V-타입 (b) H-타입
그림 5. PLECS 회로 시뮬레이션 결과



(a) V-타입(10T:3T) (b) H-타입(10T:3T)
(c) V-타입(13T:4T) (d) H-타입(13T:4T)
그림 6. 제안하는 QAB 고주파 변압기 FEM 시뮬레이션 결과

표 3. 제안하는 변압기의 시뮬레이션 결과 및 성능 비교

구분	V-타입 (10T:3T)	V-타입 (13T:4T)	H-타입 (10T:3T)	H-타입 (13T:4T)
B_{avg} [T]	0.139	0.134	0.151	0.116
$i_{1,rms}$ [A]	7.4	7.4	7.8	7.8
$i_{2,rms}$ [A]	74.0	74.0	76.7	76.1
ϕ_{12} [degree]	3.2	2.9	2.3	1.5

4. 시뮬레이션을 통한 성능 평가

시뮬레이션을 통해 도출된 L_{2m} , L_{2l} 을 통해 회로 & FEM 시뮬레이션을 사용하여 변압기 성능을 검증하였다. 표2의 자화 인덕턴스 및 누설 인덕턴스를 통한 회로 시뮬레이션 결과를 그림 5에 제시하였으며, L_{2m} 에 따라 1차측 및 2차측 전류의 위상이 변화함을 알 수 있다. 회로 시뮬레이션을 통해 도출된 1차측 및 2차측 전류, 위상차 ϕ_{12} 를 다시 FEM 시뮬레이션에 대입하여 도출된 자속 분포를 그림 6에 제시하였다. 시뮬레이션 결과, 코어 내부 평균 자기장 B_{avg} 은 모두 포화자속인 0.3T 미만임을 확인하였고, 4개 모델중 13T:4T H-타입이 손실이 가장 적음을 확인하였다.

5. 결론

본 논문에서는 기존 QAB에 요구되는 추가 인덕터의 인덕턴스를 변압기의 누설 인덕턴스로 대신하여 설계하는 변압기 설계 방법을 제안하였다. 변압기 코어의 1차&2차간 거리, center-leg 추가하는 방법으로 목표로 하는 누설 인덕턴스를 확보하였으며, 이를 통해 추가적인 인덕터를 제거하여 컨버터의 고전력밀도화가 가능하다.

참고 문헌

- [1] 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.
- [2] 표기현 외 2명, "MVDC 절연형 컨버터 토폴로지 선정 연구," 2023년 하계 전력전자학회 논문지, 2023년 7월, pp. 401-402.