

50 kVrms 절연 내력을 갖는 반도체 변압기용 Quad-Active-Bridge 고주파 변압기

박시호*, 백주원*, 류명효*, 김호성*, 김명호*, 정동근*, 윤혁진*, 차헌녕**

한국전기연구원(KERI)*, 경북대학교**

Quad-Active-Bridge High-Frequency Transformer with 50 kVrms Insulation Capability for Solid-State Transformer

Siho Park*, Ju-won Baek*, Myunghyo Ryu*, Ho-sung Kim*, Myungho Kim*, Dong-keun Jeong*, Hyeok-jin Yun*, and Honnyong Cha**

Korea Electrotechnology Research Institute (KERI)*

School of Energy Engineering, Kyungpook National University**

ABSTRACT

본 논문은 반도체 변압기(solid-state transformer, SST) 기반의 22.9 kVrms 계통 연계용 1 MVA급 멀티채널 전기차 충전기를 위해 개발된 50kVrms 절연 내력을 갖는 quad-active-bridge (QAB) 고주파 변압기의 설계 방법과 그 결과를 제안한다. 제안하는 변압기는 공기와 고체 절연체를 함께 사용한 복합 절연 방식을 적용하여 절연 손실을 줄이고 보이드 방전 현상을 완화한다. 또한, 반도체 실드 기술을 적용하여 코로나 방전의 확률을 저감한다. 시제품 변압기를 제작하여 내전압 시험과 부분방전 시험을 통해 절연 성능을 검증하고, 부하 시험을 통해 동작 성능을 검증하였다.

1. 서 론

반도체 변압기 (solid-state transformer, SST)는 MV급 변압기를 대체하고 대용량 출력과 함께 양방향 전력 전달이 가능한 기술로, 차세대 전력망 및 전기차 충전기 시스템으로써 각광받고 있다. 주로 cascaded H-bridge 구조에 양방향 절연형 DC-DC 컨버터를 연결하는 구조를 통해 고압의 입력-저압의 출력을 확보하는 SST는, 배전망급의 전위차가 컨버터 양단에 발생하기 때문에 고압 절연 성능을 가진 고주파 변압기의 제작이 필요하다. 변압기는 기존에 절연을 위해 기름을 사용하는 방식이 많이 사용되었으나, 최근에는 친환경적이고 안정성이 뛰어난 고체 절연 방식이 주로 사용되고 있다. 그러나 제작 과정에서 진공 함침에도 불구하고 void가 발생할 경우, 부분방전을 유발하여 절연 수명을 낮추고 각종 노이즈를 발생시켜 전체 시스템의 신뢰성을 떨어뜨리는 문제가 있다^[1]. 따라서, 본 논문은 제안하는 구조를 통해 void 방전을 줄이고 코로나 방전을 저감하는 복합 절연 방식의 quad-active-bridge (QAB) 고주파 변압기의 설계를 제안한다. 제안하는 변압기는 국내 22.9kVrms의 배전망에 연계하기 위한 1MVA급 멀티채널 전기차 충전기용 3상 SST에 적용하기 위한 사양으로 설계되었다.

2. 변압기 설계

2.1 변압기 설계 조건

그림 1은 제안하는 고주파 변압기가 적용될 전기차 충전기

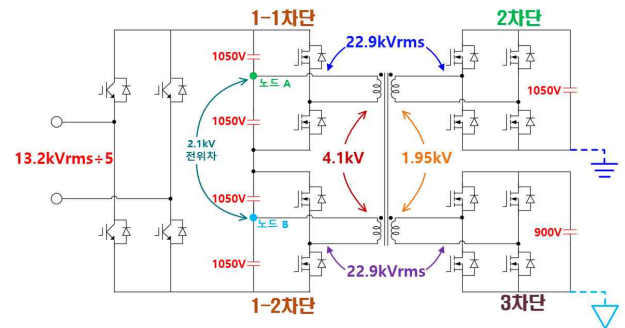


그림 1 SST 단위 모듈 구성도 및 전위차 분포

Fig. 1 SST unit module configuration and potential difference distribution

용 3상 SST의 단위 모듈을 나타낸다. 각 단위 모듈은 full-bridge 정류기와 2-입력 2-출력을 갖는 QAB 컨버터로 구성되며, half-bridge의 2개의 컨버터 입력단은 각각 2개의 직렬 연결된 DC링크 커패시터와 연결된 구조를, 2차 및 3차단은 접지를 달리하는 각 부하단으로 연결된 구조를 갖는다. 따라서, 변압기는 입출력단간 22.9 kVrms, 입력단 간 4.1 kVpp, 출력단 간 1.95 kVpp의 전기적 절연 목표를 형성하며, 입력단 간과 출력단 간은 고주파 스위칭 전위차 조건을, 입출력단 간은 60 Hz 성분에 고주파 성분이 포함된 전위차 조건을 포함한다. 정격은 2개의 입력단이 각 35 kW, 2차단이 70 kW, 3차단은 56 kW의 사양을 요구한다.

2.2 변압기 설계 방안

제안하는 변압기는 그림 2와 같이 입력단 권선부와 출력단 권선부를 각각 에폭시로 함침하고 고압과 저압 도체 사이에 넓은 공기층을 두는, 복합 절연 방식을 사용한 구조를 갖는다. 이 구조는 고체 절연체에 낮은 전계 스트레스를 형성하고 유전율이 낮은 공기층에 대부분의 전압 스트레스를 받게 하여 절연 손실을 최소화한다^[2]. 또한, 몰드 내부에 void가 발생하더라도 낮은 전계 세기가 형성되므로 보이드 방전 현상이 완화된다. 공기층을 통해 전체적으로 낮은 기생 커패시턴스가 형성되므로 유전체 순환 전류가 줄어들고 공기 순환 공간이 확보되므로 공랭식 방열 설계가 쉬운 이점을 갖는다.

그림 3은 제안하는 변압기의 정면 단면을 나타낸다. 입력단 몰드는 1-1차단 및 1-2차단 권선을 섹션 보빈으로 구역을 분

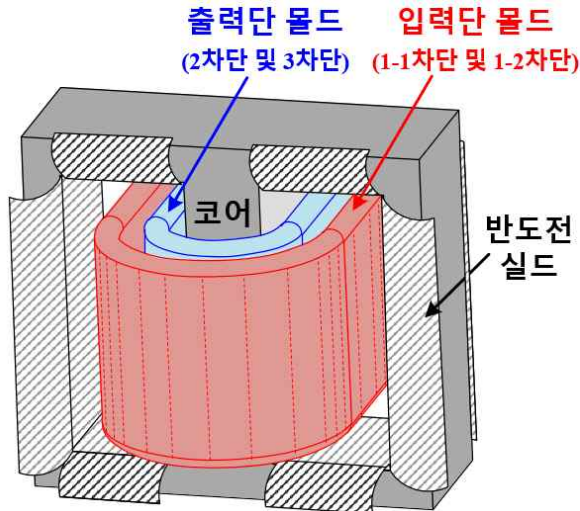


그림 2 제안하는 변압기의 구조
Fig. 2 Structure of proposed transformer

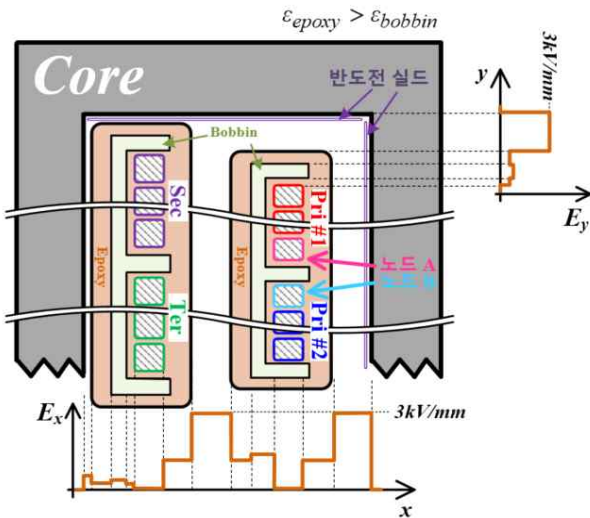


그림 3 변압기 정면 단면 및 전계 분포
Fig. 3 Schematic diagram of transformer with electric field distribution

리하여 감고, 에폭시로 함침한다. 출력단 몰드는 접지 전위에 가까운 2차 및 3차단 권선을 섹션 보빈의 각 구역에 감고 에폭시로 함침한다. 따라서, 두 몰드 모두 함침되는 구조를 통해 저압부와 고압부 권선간 직접 단락이 방지되며 고주파 스위칭에 의한 고주파 코로나 방전의 가능성이 차단된다.

입력단 몰드 섹션 보빈의 가운데 끝단은 노드 A와 B의 권선을 배치한다. 두 노드 간의 전위차는 스위칭 상태와 관계없이 일정하므로, 고주파 스위칭으로 인한 절연 파괴 가능성과 절연 손실을 저감할 수 있다. 권선은 MMF를 낮출 수 있도록 세로로 긴 배열을 가지며, 이는 근접 효과로 인한 AC 손실을 저감한다.

반도전체 실드는 코어 외측부에 반원 형태로 시작하여 코어 내측부를 관통하여 반대쪽 외측부까지 확장하는 형태로 구성한다. 이 때 실드는 코어와 등전위를 갖도록 한다. 따라서, 코어 적층으로 인해 발생하는 내부 침전극과, 코어 모서리에서 발생하는 외부 침전극이 실드와 고압 권선간의 평탄한 전극으로 대체되므로, 코로나 방전의 확률을 저감할 수 있다.

3. 시제품 변압기

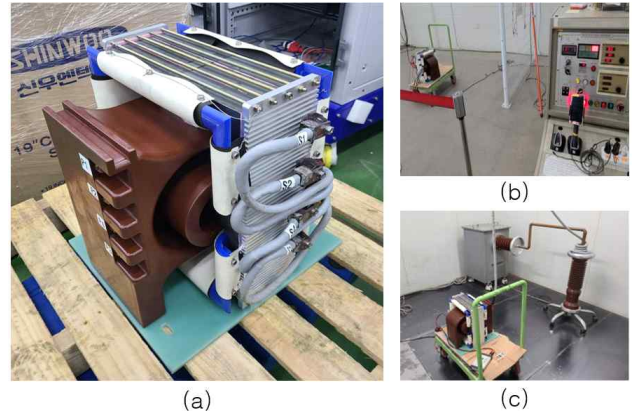


그림 4 변압기 사진 - (a) 시제품 변압기 (b) 내전압 시험 (c) 부분방전 시험

Fig. 4 Picture of fabricated transformer - (a) prototype transformer (b) withstand voltage test (c) partial discharge test

표 1 변압기 사양
Table 1 Transformer specification

No. port	4	Switching frequency	10 kHz
Max ambient temperature	40 °C	Cooling	Air natural cooling
Turns ratio	14 : 14 : : 14 : 12		
Rated voltage	1050 V(1-1차단), 1050 V(1-2차단) 1050 V(2차단), 900 V(3차단)		
Rated port power	35 kW(1-1차단), 35 kW(1-2차단) 70 kW(2차단), 56 kW(3차단)		
Core	Ferrite UU-177 6조		
Wire	Litz 0.12mm 1200심(1-1차, 1-2차) Litz 0.12mm 3600심(2차, 3차)		
Insulation material	MC Nylon (Bobbin), Epoxy (Mold) Semi-conductive crape paper(Shield)		
Volume	371 * 387 * 387 mm ³		

표 2 절연 시험과 결과
Table 2 Dielectric tests and results

	HV test		PD test	
Classification	Applied voltage (kVrms)		Prestress/Measure voltage(kVrms)	
[1-1, 1-2] to [2, 3, GND]	50	Pass	40/30	6 pC
[1-1] to [1-2]	10	Pass	5.5/4	7 pC
[2] to [3]	3	Pass	3/3	1.8 pC
[2,3] to [GND]	3	Pass	-	

제안하는 변압기를 검증하기 위해 그림 4(a)와 같이 시제품 변압기를 제작하고 절연 시험과 온도포화 시험을 수행하였다. 제작된 변압기의 사양은 표 1에 나타내었다. 절연 시험은 IEEE Std.C57.12.01에 준거한 내전압 시험과 C57.12.91에 준거한 부분방전 시험을 수행하였으며, 시험이 수행된 터미널과 인가 전압을 표 2에, 시험 환경은 그림 4(b)-(c)에 나타내었다. 시제품 변압기는 표에 기재된 모든 시험을 통과하였으며, 특히 입출력단간에 수행된 고압 부분방전 시험에서 약 6 pC의 부분방전량을 달성하여 제안된 구조의 절연 안정성을 확인하였다.

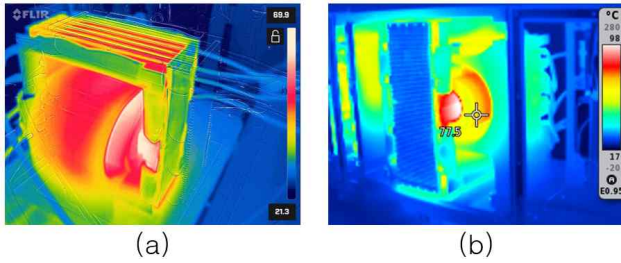


그림 5 온도 포화 시험 - (a) 스택 장착 전 (b) 장착 후
Fig. 5 Temperature saturation test - (a) before mount
in the stack (b) after mount

정격 부하 운전에 따른 온도 포화 시험은 SST 스택 장착 전과 후로 두 번에 걸쳐 수행되었다. 그림 5는 상온에서 각 시험에 대해 열화상 카메라로 측정된 포화 온도를 나타낸 것으로, 코어를 포함한 변압기의 모든 파트 온도가 최대 100도 이하로 관측됨으로써, 각 물질의 제한 온도를 넘지 않고 안정적인 수준으로 설계되었음을 확인하였다.

3. 결 론

본 논문에서는 22.9kVrms의 3상 SST에 적용하기 위한 QAB 변압기의 설계 방안을 제시하였다. 변압기는 공기와 고체 절연체를 함께 사용하는 복합 절연 방식으로 설계하여 보이드 방전을 저감하였다. 코어 모서리에서 발생할 수 있는 코로나 방전은 반도체를 사용한 실드를 구성하여 유도 가열 문제와 절연 손실 없이 저감하였다. 시제품 변압기는 내전압 시험과 부분방전 시험을 통과하여 절연 성능을 검증하였으며, SST 스택 장착 전후 정격 운전에 대한 온도 포화 시험에서 안정적인 온도를 기록함으로써 변압기의 동작 성능을 검증하였다.

이 논문은 한국전기연구원(KERI)의 연구비 지원에 의하여 연구되었습

참 고 문 헌

- [1] Kreuger, Frederik H. *Partial discharge detection in high-voltage equipment*. Butterworth-Heinemann, 1989.
- [2] Gradinger, Thomas B., Uwe Drofenik, and Silverio Alvarez. "Novel insulation concept for an MV dry-cast medium-frequency transformer." 2017 19th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'17 ECCE Europe). IEEE, 2017.
- [3] Parent, Guillaume, et al. "Determination of partial discharge inception voltage and location of partial discharges by means of paschen's theory and FEM." IEEE Transactions on Magnetics 55.6 (2019): 1-4.