

지능형 반도체 변압기용 다권선 고주파 변압기 설계 방안

박시호*, 류명효**, 김호성**, 차헌녕*
경북대학교*, 한국전기연구원(KERI)**

Design Methodology of Multi-winding High-frequency Transformer for Solid-state Transformer

Siho Park*, Myunghyo Ryu**, Ho sung Kim**, Honnyong Cha*
School of Engineering, Kyungpook National University*
Korea Electrotechnology Research Institute (KERI)**

ABSTRACT

본 논문은 지능형 반도체 변압기 (Solid state transformer, SST)용 다권선 고주파 변압기의 최적 설계 방안을 제안한다. 설계된 변압기는 10 kHz의 스위칭 주파수를 운전 조건으로 하며, 60 kVA의 정격 용량을 가진다. 특히 13.2 kV의 중전압 계통에 적용하기 위해 30 kV 이상의 절연 내력으로 설계하였으며, SST 시스템의 부피가 커지는 것을 억제하기 위해 3 입력 1 출력으로 구성된 4 권선 방식으로 구성하였다. 절연 내력을 만족시키기 위해 teflon PTFE를 이용한 내부 보빈과 외부 보빈 및 가드를 제작하였으며, 누설 인덕턴스 최소화 및 근접 효과와 표피 효과로 인한 AC 손실을 최소화하기 위해 셸 타입으로 설계하였다. 시제품 제작 후 60 kVA의 정격 하에 동작 검증을 완료하였으며, 내전압 시험을 이용하여 30 kV급의 절연 내력을 검증하였다.

1. 서 론

최근, 고주파 스위칭 소자 기술의 발달로 직류배전에 대한 관심이 부상하면서, 지능형 반도체 변압기 (Solid state transformer, SST)의 기술 연구가 전 세계적으로 이루어지고 있다. SST는 고압의 교류 배전망과 연계되기 때문에, 스위칭 소자의 정격을 낮추기 위해 정류기와 DC DC 컨버터를 캐스케이드로 연결하는 방안이 주로 사용된다. 이때, DC DC 컨버터로 양방향 전력 전달 및 절연이 가능한 dual active bridge converter (DAB)가 주로 이용되며, 정류기와 DC DC 컨버터로 구성된 개별 모듈마다 교류 배전망급의 고압 절연이 가능한 변압기가 필요한 특징을 지닌다. 이는 시스템의 부피를 증가시키고 신뢰성을 감소시키기 때문에, quad active bridge converter (QAB)와 같이 다권선 변압기를 이용하는 토폴로지에서는 이러한 문제를 해결할 수 있다. 특히, 3 입력 1 출력으로 구성된 SST용 다권선 변압기는 입력단 간의 저압 절연과 입출력단 간의 고압 절연, 입출력단과 코어와의 중전압 절연을 동시에 만족해야 하며, 변압기의 손실 또한 최소화할 수 있도록 설계되어야 한다. 본 논문에서는 지능형 반도체 변압기용 다권선 변압기의 최적 설계 방안을 제안한다.

2. 고압 절연 다권선 변압기 설계

2.1 변압기 설계 고찰

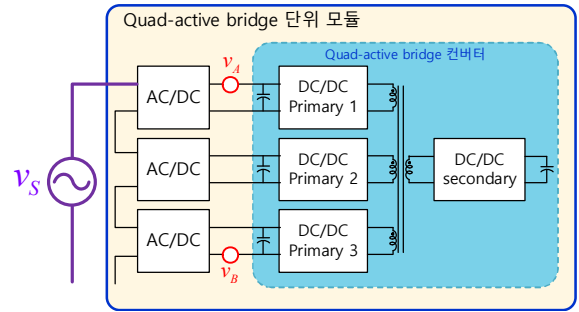


그림 1. SST의 QAB 단위 모듈 구성도
Fig 1. QAB unit module configuration diagram of SST

그림 1은 3 입력 1 출력으로 구성된 SST의 QAB 단위 모듈을 나타낸 것으로, AC DC로 구성된 정류기에 DC DC 1차 단 모듈이 개별 연결되어 있으며 2차단 모듈과는 4 권선 변압기를 통해 연결되어 있다. 변압기 1차 모듈 간에는 최대 V_{AB} 의 전위차가 발생하며, 1 2차단 간에는 계통 전압 수준의 전위차가 발생한다. 이 때 코어의 전압을 플로팅할 경우, 코어와 각 권선 간에도 중전압 수준의 절연이 필요하다. 따라서, 변압기의 설계 시 고려해야하는 절연 요소는 그림 2와 같다.

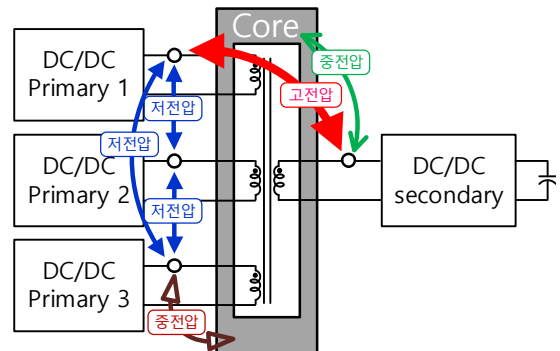


그림 2. 변압기 절연 고려 요소
Fig 2. Transformer insulation considerations

즉, 계통 수준의 절연을 달성하면서 전력 밀도를 최대화하기 위해서는 고압 절연 소재의 보빈 설계가 필요하며, 누설 인덕턴스를 줄이고 AC 손실을 최소화하기 위해 권선 방식을 고려할 필요가 있다.

2.2 변압기 설계 방안

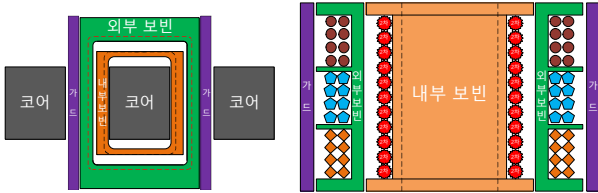


그림 3. 변압기 보빈 및 권선 배치도 (좌-윗면, 우-정면)
Fig 3. Bobbin and wire layout (left-top, right-front)

그림 3은 제안하는 변압기의 보빈 및 권선의 배치를 보여준다. 보빈은 유전율이 낮고 절연 내력이 높은 소재를 이용하며, 내부 보빈, 외부 보빈, 가드로 구성한다. 고전위차가 발생하는 1 2차 권선 간의 절연은, 1차 권선을 외부 보빈 위에 감고 2차 권선을 내부 보빈 위에 감아 확보한다. 1차 모듈들 간의 저압 절연은 외부 보빈에 얇은 날개를 만들고 각 구역에 권선을 감아 확보하며, 코어 바깥 다리와 1차 권선이 맞닿는 면의 중전압 절연은 가드를 배치하여 확보한다. 보빈의 두께를 줄이고 공기의 절연 파괴로 인한 연면 방전의 가능성을 제거하기 위하여 내부 보빈과 외부 보빈 내 영역을 소프트 실리콘을 이용하여 몰딩한다. 따라서, 2.1절에서 서술한 절연 조건을 모두 만족할 수 있으며, 쉘 타입으로 설계하였기 때문에 누설 인덕턴스를 줄여 전력 밀도를 높일 수 있다. 또한, 창 높이가 높은 코어를 사용하여 권선을 세로로 길게 배치할 경우, MMF를 줄여 근접효과에 의한 권선의 AC 손실 또한 줄일 수 있다.

2.3 변압기 예상 설계안 및 전계 시뮬레이션

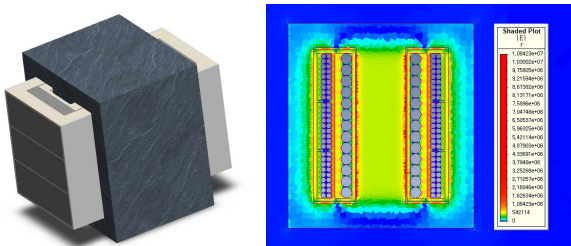


그림 4. 변압기 예상 3D 모델 및 전계 시뮬레이션 결과
Fig 4. 3D model and electric field simulation result

그림 4는 완성된 변압기의 예상도 및 전계 시뮬레이션 결과이다. 보빈은 유전율 2.01과 약 24 kV/mm의 절연 내력을 갖는 teflon PTFE를 이용하였으며, 날카로운 부분에 전하가 집중될 가능성을 낮추기 위하여 코너를 곡선으로 가공하였다. 보빈의 두께는 평등 전계 하에서의 최소 두께 이상으로 하되 실제 변압기는 불평등 전계를 이루므로, 전계 분포 및 최대 전계 세기를 찾아내기 위해 시뮬레이션을 이용하여 분석하였다. 따라서 약 3mm의 두께로 보빈을 제작할 경우, 1 2차 권선간 30 kV의 전위차가 발생하였을 때 최대 11 kV/mm 수준의 전계를 보이므로 안정적인 절연 확보가 가능함을 확인하였다.

3. 시제품 변압기

표 1. 변압기 제작 사양

Table 1. Transformer specification

턴 수	16 : 16 : 16 : 11	전류밀도(1차)	1.9 A/mm ²
스위칭주파수	10 kHz	전류밀도(2차)	1.7 A/mm ²
정격	60 kVA	코어 손실	125 W
코어	Ferrite UU-84	권선 손실	56 W
코어 개수	12 조	절연내력(Teflon)	24 kV/mm
ΔB	0.538 T	유전율(Teflon)	2.01
1차 권선	0.25mm 190심	권선 절연내력	1.6 kV/mm
2차 권선	0.25mm 950심	최대 전계 세기	11 kV/mm

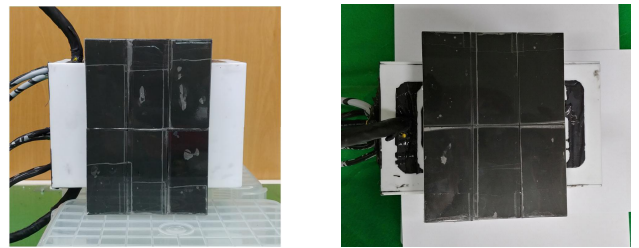


그림 5. 변압기 사진
Fig 5. Pictures of fabricated transformer

표 1과 그림 5는 시제품 변압기의 사양과 사진이다. 변압기는 동작 검증과 함께, 30 kV 수준의 내전압 시험을 통과하여 절연 검증을 완료하였다.

3. 결론

본 논문에서는 지능형 반도체 변압기용 다권선 고주파 변압기의 설계 방안을 제시하였다. 변압기의 누설 인덕턴스를 줄이고 변압기의 AC 손실을 최소화하기 위하여 쉘 타입으로 설계하였으며, 전력 밀도를 높이고 절연을 확보하기 위하여 teflon PTFE로 구성된 내부 보빈과 외부 보빈 및 가드를 이용하였다. 또한 시제품을 제작하여 30 kV 수준의 내전압 시험과 함께, 동작 검증을 완료하였다.

이 논문은 한국전기연구원(KERI)의 연구비 지원에 의하여 연구되었음

참고 문헌

- [1] L. F. Costa, G. Buticchi and M. Liserre, "Quad Active Bridge DC DC Converter as Cross Link for Medium Voltage Modular Inverters," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 53, No. 2, pp. 1243 1253, Mar/Apr, 2017.
- [2] M. A. Bahmani, T. Thiringer, M. Kharezy, "Design Methodology and Optimization of a Medium Frequency Transformer for High Power DC DC Applications," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 52, No. 5, pp. 4225 4233, Sep/Oct, 2016.