

지능형 반도체 변압기용 고압 절연 내력을 갖는 고주파 변압기 설계

박시호*, 조영표**, 차헌녕*
경북대학교*, 한국전력공사 전력연구원(KEPRI)**

High-voltage and High-frequency Transformer design for Solid-state Transformer

Siho Park*, Youngpyo Jo**, Honnyong Cha*
School of Energy Engineering, Kyungpook National University*
Korea Electric Power Research Institute (KEPRI)**

ABSTRACT

본 논문은 지능형 반도체 변압기용 고압 절연 내력을 갖는 고주파 변압기의 설계 순서와 방안을 제안하고 시제품을 제작하여 동작 검증 및 절연 시험을 완료한 결과를 서술한다. 제작된 변압기는 10 kHz의 스위칭 주파수 하에 정격은 15 kW이며, 3권선 방식을 이용하였다. SST의 입력 전압인 13.2 kV_{rms} 및 출력단의 전압 플로팅 현상을 고려하여, polycarbonate를 이용한 내부 보빈과 teflon PTFE를 이용한 외부 보빈 및 가드를 제작해, 30 kV의 절연이 가능하도록 설계되었다. 또한, 정전 유도 현상으로 인해 고려해야 하는 코어와 권선 간의 고압 절연을 최소화하는 방안을 적용하였으며, 근접 효과와 표피 효과를 최소화하는 구조로 설계되었다. 시제품 제작 후 15 kW의 정격 하에 동작 검증을 완료하였고, 내전압 시험을 이용하여 30 kV의 절연 내력을 검증하였다.

1. 서론

최근, 지능형 반도체 변압기인 Solid-State Transformer (SST)를 이용하여 대규모 그리드 통합을 구상하는 방안이 이슈로 떠오르고 있다. SST는 기존의 저주파 철심 변압기가 갖고 있는 고정된 변압비와 전압 및 전류 왜곡 등의 문제를 해결할 수 있으며, 소형화 및 경량화, 주파수의 변경이 가능함과 동시에 교류 전압과 직류 전압 모두 가변이 가능한 특징을 지니고 있어, 차세대 그리드를 구성함에 있어 핵심적인 요소로 손꼽히고 있다. 이 때, 그리드원에 연결되어 사용되는 SST는 일반적으로 10 kV를 초과하는 고전압이 입력 전압으로 인가되며, SST 내부 고주파 변압기 양단에 이 입력 전압 수준의 고전위차가 형성되는 문제가 발생한다. 따라서 변압기는 안정적인 절연 수준을 확보하기 위해 최대 전위차의 약 1.5배 이상의 절연 내력을 가지도록 설계 되어야 한다. 변압기 설계 시, 고압 절연을 만족하면서 누설 인덕턴스를 줄이고 손실을 최소화하기 위해서는, 권선의 종류와 권선 방법 선정, 코어 물질과 모양의 선택, 절연체의 종류와 배치에 따른 보빈의 설계 등에 신중을 기할 필요가 있다. 따라서, 본 논문에서는 지능형 반도체 변압기용 고압 절연 내력을 갖는 고주파 변압기의 설계 순서와 방안을 제안하고 시제품을 제작하여 동작 검증 및 절연 시험을 완료한 결과를 서술한다.

2. 고압 절연 고주파 변압기 설계 방안

2.1 설계 방안 및 순서

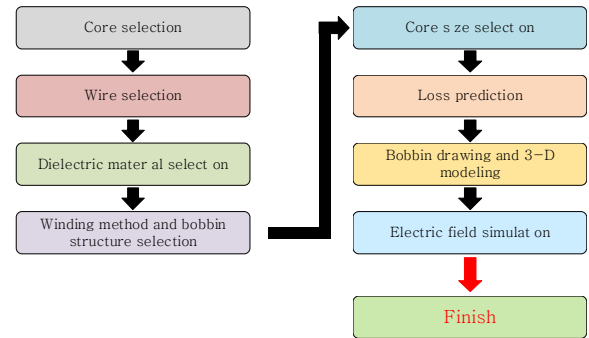


그림 1. 변압기 설계 순서도

변압기를 제작하기 위해서는 일반적인 디자인 요소에 고압 절연 요소를 추가로 고려해야 하므로, 기존의 변압기 설계 순서 및 방법과는 차이가 있다. 그림 1은 본 논문에서 제시하는 변압기의 설계 순서로, 총 9단계로 이루어져 있다.

2.2 코어 물질 및 코어 게열 선정

제작되는 변압기의 부피와 손실은 코어 물질에 따라 다른 특성을 지닌다. 따라서 동작 환경에 알맞은 코어 물질을 선정하는 과정이 우선시된다. 이후 누설 인덕턴스의 크기와 창면적의 크기, 누설 자속의 발산 양상을 고려하여, 코어의 형상을 선택하는 과정이 필요하다.

2.3 권선 선정

고주파의 전류로 인한 표피 효과를 줄이기 위해서는 litz wire를 사용하는 것이 바람직하다. 이 때, skin depth보다 충분히 얇은 두께의 에나멜선을 사용하여 추가적으로 일어날 수 있는 근접 효과와 표피 효과를 완전히 줄이는 것이 좋으며, 중간 절연을 고려하기 위해 단선 에나멜선의 절연 내력을 확인 할 필요가 있다.

2.4 절연 재료 선정

변압기의 부피를 최소화하면서 절연을 확보하기 위해서는 고압 절연 보빈을 이용하는 것이 바람직하다. 이때, 절연 내

력, 절연 저항, 유전율, 내열성, 내수성, 내후성, 기계적 특성, 내유성 등 종합적인 특성을 고려하여 절연 물질을 선정할 필요가 있다. 특히 절연 내력과 절연 저항, 유전율은 절연체의 두께를 결정하는 데 있어 매우 중요한 역할을 하므로, 우수한 특성을 지닌 절연체를 선정하여 창면적을 효율적으로 사용하는 것이 바람직하다.

2.5 보빈 디자인 및 권선 방법 선정

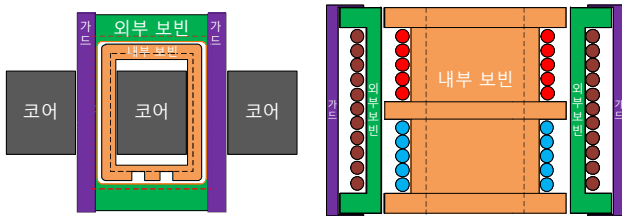


그림 2. 보빈의 배치 및 변압기 내부 구조

보빈을 제작할 때에는 권선 간의 절연뿐만 아니라, 권선과 코어간의 절연 또한 고려할 필요가 있다. 이 때, 권선과 코어간의 고압 절연을 줄이기 위해, 코어의 표면과 2차단 권선을 이어 코어의 전압을 고정시키면, 고려할 고압 절연 요소가 줄어들 수 있다. 따라서 그림 2와 같은 구조의 보빈을 고려할 수 있다. 이 구조는 1차 권선과 코어 및 2·3차 권선 간의 고압 절연을 위해 외부 보빈과 가드에 Teflon PTFE를 이용하며, 2·3차 권선과 코어 간의 저압 절연을 위해 내부 보빈에 Polycarbonate(PC)를 이용한다. 권선이 만들어내는 자기력선이 서로 감싸는 평행 구도와 동시에 고전압과 저전압을 분리하여 감는 구조이기 때문에 누설 인덕턴스와 근접 효과가 최소화될 수 있으며, 절연 또한 수월한 장점을 지닌다.

2.6 코어 크기 선정

코어의 크기를 선정하기 위해서는 변압기의 동작 조건에 따른 코어 유효 단면적의 크기와 창면적에 대한 고려가 필요하다. 이 때, 창면적은 변압기의 총 권선 수 및 보빈의 두께와 관련되므로, 유효 단면적과 최대 자속 밀도를 우선적으로 결정하여 권선 수를 도출해낸 뒤, 권선의 총 면적과 보빈의 총 면적을 합산하여 조건에 알맞은 크기의 코어를 결정하는 것이 바람직하다.

2.7 손실률 예측

일반적으로, 변압기의 손실은 코어 손실과 와인딩 손실로 분류할 수 있으며, 코어 손실의 경우, 데이터 시트 및 Steinmetz equation을 통해 구할 수 있다. 와인딩 손실의 경우, litz wire를 이용하였다면 표피효과에 따른 손실은 무시할 수 있으므로, DC 와인딩 손실과 근접 효과에 따른 손실을 예측하여 최종적으로 변압기의 총 손실을 구할 수 있다.

2.8 보빈 도면 및 3-D 모델링

절연체의 절연 내력은 전계의 세기와 관련된다. 따라서, 보빈의 두께를 정확히 결정하기 위해서는 시뮬레이션을 통해 전기장 분포와 세기를 확인할 필요가 있다. 이 때, 정확한 전계 해석을 위해 보빈의 도면을 작성하고, 3-D 모델링한 후 시뮬레이션으로 전계를 해석하는 것이 바람직하다.

2.9 전기장 시뮬레이션 분석

앞서 3-D 모델링한 자료를 통해 전계 분포와 최대 전계 세기를 분석하는 과정이 필요하다. 이때, 절연 내력이 최대 전계 세기에 비해 충분하다면 적정 수준의 디자인임을 확인할 수 있다.

3. 제작 결과

표 1 제작된 변압기 사양

턴 수	27 : 10 : 10	전류밀도(1차)	2.45 A/mm ²
턴 비	0.3704	전류밀도(2·3차)	2.58 A/mm ²
정 격	15 kW	코어 손실	60 W
스위칭 주파수	10 kHz	권선 손실	23 W
코 어	Ferrite EE-118	절연 내력(Teflon)	24 kV/mm
코어 개수	3 조	유전율 (Teflon)	2.01
$\Delta \lambda$	0.05 Wb	절연 내력(PC)	27 kV/mm
ΔB	0.498 T	유전율 (PC)	3
1차 권선	0.25mm 150가닥	최대 전계 세기	21 kV/mm
2·3차 권선	0.25mm 190가닥	자화 인덕턴스	14.4 mH
권선 절연 내력	1600 V/mm	누설 인덕턴스	34.3 μ H

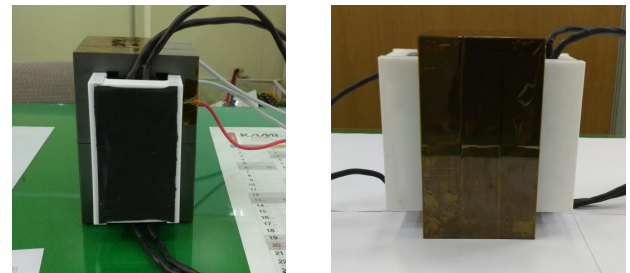


그림 3. 제작된 변압기의 모습

그림 3은 제작된 변압기의 사진으로, 동작 검증을 완료하고 내전압 시험을 통해 30 kV의 절연 내력을 확인하였다.

3. 결론

본 논문에서는 지능형 반도체 변압기용 고압 절연 내력을 갖는 고주파 변압기의 설계 순서와 방안을 제시하였다. 제작된 변압기는 내부 보빈과 외부 보빈, 가드를 이용하여 절연을 확보하였으며, 코어와 2·3차 간의 절연 및 근접 효과와 표피 효과를 최소화하였다. 또한 시제품을 제작하여 동작 검증과 30 kV의 절연 시험을 완료하였다.

본 연구는 한국전력공사 전력연구원(KEPRI)의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

- [1] J. S. Lai, W. H. Lai, S. R. Moon, Z. Lanhua, A. Maitra, "A 15-kV class intelligent universal transformer for utility applications," Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2016 IEEE, pp. 1974-1981, Mar. 2016.