높은 절연전압을 갖는 고주파 변압기 설계 방법에 관한 연구

강경필, 김호성[1], 조진태[2], 조영훈
건국대학교 전력전자연구실, 한국전기연구원[1], 한전 전력연구원[2]

A study on design method for high frequency transformer with high inulation voltage

Kyoung Pil Kang, Ho Sung Kim[1], Jintae Cho[2], Younghoon Cho
Power Electronics Lab. Konkuk Univ. KERI[1], KEPRI[2]

ABSTRACT

In this paper, design method for a high frequency transformer with high insulation is presented. The insulation performance of the high frequency transformer is determined by the distance between primary and secondary windings, and the characteristics of dielectric material. For the voltage strength safty, a high frequency transformer model is designed. By using computer simulation, the transformer model is evaluated.

1. 서론

최근 분산전원, 직류배전시스템 연계와 더불어 스마트 그리드에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 전력용 반도체 소자를 이용한 반도체 변압기(SST, solid state transformer)는 변화하는 전력시스템에서 핵심요소 기술로써 국내외에서 활발하게 연구가 이루어지고 있다. 반도체 변압기는 무겁고 부피가 큰 전통적인 배전용 변압기 대비 전력 품질관리, 고효율 달성과 무게감소 등의 장점이 있다.

반도체 변압기는 일반적으로 중전압 및 고전압을 정류하는 AFE(active front end)정류기 모듈과 정류된 전압 절연시켜주는 절연형 컨버터, 출력에 따른 출력회로로 구성된 모듈을 직렬 연결하여 멀티모듈로 높은 입력전압에 대응한다. 반도체 변압기를 구성하는 요소 중, 절연형 컨버터는 중전압 및 고전압의 전압범위에서 동작해야하는 반도체 변압기의 특성상 입력부와 출력부가 절연이 되는 회로구조가 필요하다. 반도체 변압기를 구성하는 절연형 컨버터로는 DAB(dual active bridge)컨버터와 공진형 컨버터가 주로 사용되고 있으며, 이들 회로는 고주파 변압기를 사용하여 절연을 달성한다.[1] 또한 반도체 변압기에 사용되는 고주파 변압기는 모듈과 모듈 사이에 발생하는 전위차에 대한 절연을 고려해야 하기 때문에 높은 절연 전압을 갖도록 고주파 변압기의 설계가 필요하다.

본 연구에서는 반도체 변압기를 구성하는 요소 중, 절연형 DC/DC 컨버터 변압기의 설계에 대하여 다루었다. 공기 중의 절연내력을 기준으로 60kV의 절연내력을 가지도록 변압기의 1,2차 측 권선 사이의 최소 공간거리를 계산하고, 변압기의 코어를 선정하였다. 선정한 코어를 사용하여 컴퓨터 시뮬레이션 모델을 작성하고 변압기의 1,2차 측 권선사이에 형성된 전계강도를 분석하였다.

2. 전압별 절연거리 및 연면거리

고주파 변압기의 절연은 변압기의 1,2차 권선 사이의 절연물질과 거리에 의하여 결정된다. 변압기의 절연을 위해 주로 사용되는 절연물은 공기, 실리콘, 에폭시이며, 이 절연물들의 절연내력은 각각 3.0kV/mm, 19.8kV/mm, 40kV/mm이다.[2]

국제규격 IEC61010 1는 산업용 공정 및 교육용 전기기에 대한 일반적인 안전요구사항에 관한 규정이다. 이 규정 중 부속사항 D는 절연내력 시험에 대한 공간거리(clearance) 및 연면거리(creepage distance)에 관한 규정을 나타낸다. 여기에서 공간거리는 두 도체 사이의 최단거리를 의미하며, 연면거리는 두 도체 사이의 절연물질 표면을 따라 측정한 최단거리를 의미한다.[3] 표 1은 동작전압에 따른 최소 공간거리와 연면거리를 요약한 내용이며 규정에서는 전압 범위별 공간거리 및 연면거리에 대하여 보간법이 적용될 수 있음을 명시하였다. 오염이 없는 공간에서 동작전압 60kV에 대한 최소 공간거리 $L_{dear,60kV}$와 연면거리$L_{creep,60kV}$를 계산하면 다음과 같다.

$$L_{dear,60kV} = \frac{(199-154)}{(70.7-56.6)k}(60-56.6)k+154 = 165(mm) \quad (1)$$

$$L_{creep,60kV} = \frac{(250-200)}{(63-50)k}(60-50)k+200 = 238(mm) \quad (2)$$

표 1 전압별 최소 공간거리
Table 1 Minimum distance for insulation

동작전압(kV)	공간거리(mm)	연면거리(mm)
6.18	8.3	24
13.7	22	54
30.5	56	120
70.7	150	280

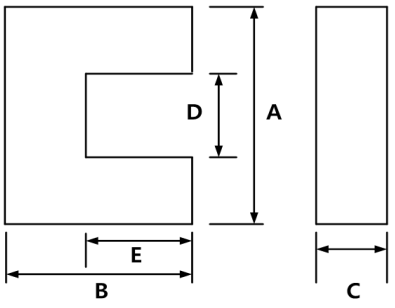

그림 1 내철형 변압기용 U코어 형상
Fig. 1 Core shape for core type transformer

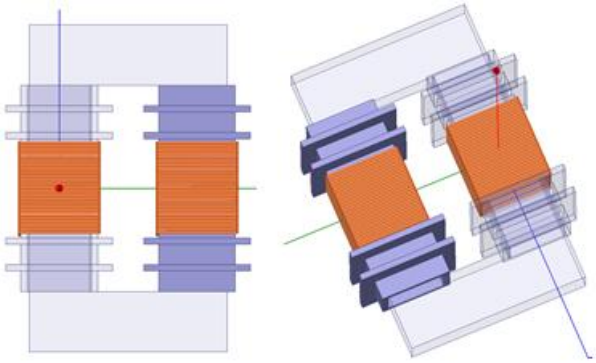

그림 2 전계해석을 위한 변압기 모델
Fig. 2 A transformer model for voltage strength analysis

3. 절연 변압기 모델

변압기의 전기적인 절연을 위하여 변압기의 두 권선이 서로 분리된 내철형 변압기를 모델로 선정하였다. 그림 1은 내철형 변압기를 구성하는 U코어형상을 나타낸 것으로 그림 1의 A,B,C,D,E는 각각 코어의 길이를 의미한다. 이 중 D는 변압기 두 권선 사이의 거리를 나타낸다. 그리고 변압기의 내부표면을 따라 형성된 경로 E는 1,2차 권선의 연면거리에 해당한다. 이 두 가지 길이는 변압기의 절연 성능에 직접적인 영향을 미치는 요인이다. 따라서 절연거리를 고려한 변압기의 최소 절연거리를 계산하여 변압기 코어를 선정해야 한다.

공기 중에서의 절연내력은 3kV/mm이므로 변압기의 두 권선간 전위차가 60kV라고 할 때, 최소 절연거리는 20mm이다. 여기에 권선의 직경과 권선사이의 공간을 고려하여 여유거리를 5mm로 선정하고 실제코어를 선정하였다. 선정한 코어는 코아전기社의 UU Core PM7 95이며, 이 코어는 앞서 계산한 1,2차 권선의 최소 절연거리인 25mm 보다 큰 30mm의 길이 D를 갖는 코어이다. 선정한 코어 두 개와 보빈을 그림 2과 같이 결합한 형태로 변압기 모델을 작성하였다.

4. 모의실험

작성한 변압기 모델을 사용하여 변압기 1,2차 권선 사이의 전계강도 분포를 확인하고자 전계해석 모의실험을 실시하였다. 모의실험은 전계해석 프로그램인 ANSYS社의 MAXWELL 15..0을 사용하여 실시하였으며, 모의실험의 조건은 변압기 1,2차 권선 사이의 전위차를 60kV로 인가하고, 변압기 체적의 2배의 닫힌 공간에서 실시하였다.

그림 3은 제작한 변압기 모델의 전계해석 모의실험 결과이다. 모의실험결과 변압기의 1,2차 권선사이에 형성된 전계의 세기는 약 20kV/cm로 공기 중의 절연파괴 전압인 30kV/cm보다 낮게 형성되어 변압기 1,2차의 절연거리를 따라 절연파괴가 발생하지 않았으며, 변압기 내부의 표면을 따라 형성된 전계의 세기는 10kV/cm 이하로써 절연거리와 마찬가지로 절연파괴가 발생하지 않았다. 이는 보빈으로 인한 연면거리의 증가로 변압기 내부 표면을 따라서 절연파괴가 일어나지 않음을 알 수 있다. 추가적으로 두 개의 보빈으로 인하여 줄어든 공간거리에서의 전계의 세기는 16kV/cm로 줄어든 공간거리가 변압기 1,2차 측 권선 사이의 절연에 영향을 미치지 않음을 확인하였다.

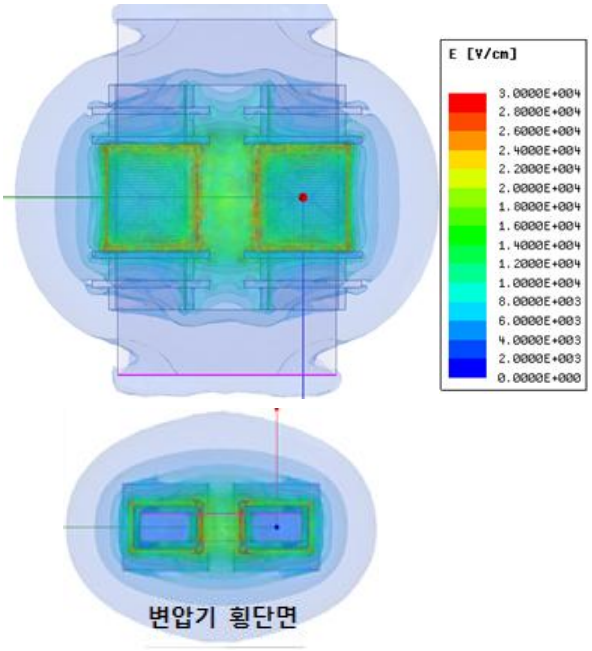

그림 3 변압기 모의 전계해석 실험 결과
Fig. 3 Simulation result of voltage strength analysis

5. 결과 및 검토

본 논문에서는 변압기의 절연을 위한 절연강화 방법을 연구하였다. 변압기의 1,2차 측 권선사이의 절연 강화를 위해 내철형의 코어구조를 선택하였고, 연면거리 증가를 위한 보빈 모델을 작성하여 변압기의 전계해석을 실시하였다. 모의실험 결과 입력전압 60kV 조건에서 제작한 변압기의 1,2차 측 권선 사이에 20kV의 전계가 형성되나 공기 중으로 절연파괴가 발생하지 않음을 확인하였다.

이 논문은 한국전력공사의 재원으로 기초전력연구원의 2015년 선정 기초연구개발과제의 지원 받아 수행된 것임. [과제번호 R15XA03 34]

본 연구는 한국전력공사 전력연구원에서 수행중인 “저압 직류배전망 독립섬 실증 연구” 과제의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다. (D3080)

참 고 문 헌

[1] Gabriel Ortiz, M. G. Leivl, J. E. Huber and J. W. Kolar, "Design and Experimental Testing of a Resonant DC DC Converter for Solid State Transformers," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 32, no. 10, pp. 7534 7542, Oct. 2017.

[2] L. I Berger, "Dielectric Strength of Insulating Materials," CRC Handbook of Chemistry and Physics, Taylor & Francis, Boca Raton, 2009.

[3] IEC61010 1, "측정, 제어 및 연구실용 전기기기의 안전요구사항 제 1부 : 일반요구사항," 산업기술시험원, 1995.