

## SF6 계기용 변압기의 권선간 절연특성해석

손주완\*, 한성진\*  
동아대학교\*

### Insulation Characteristic Analysis of SF6 Voltage Transformer between Windings

Ju-Wan Son\*, Sung-Chin Hahn\*  
Dong-A University\*

**Abstract** - GIS에 이상전압이 흐를 때, 이를 계측하여 전력기기의 손상 및 고장을 미연에 방지하기 위해 SF6 계기용 변압기를 사용한다. 이러한 계기용 변압기는 절연 파괴가 일어나지 않도록 설계하여야 한다. 특히, 절연은 권선 부분이 중요한 구성 요소로, 권선간의 전기적 절연특성해석을 통하여 전계강도를 완화할 수 있는 절연 설계를 수행하여야 한다. SF6 계기용 변압기는 SF6가스의 유전율이 절연물에 비해 적기 때문에 가스에서의 전계 집중 현상이 생기게 된다. 본 논문에서는 SF6 계기용 변압기의 권선간 절연특성해석을 수행하였다. 1차 권선과 2차 권선의 형상을 모델링하고 유한요소법을 사용하여 축대칭 2차원 전계해석을 수행한다. 이 때 발생하는 전계강도를 예측하고 최대전계강도가 발생하는 영역을 찾는다.

#### 1. 서 론

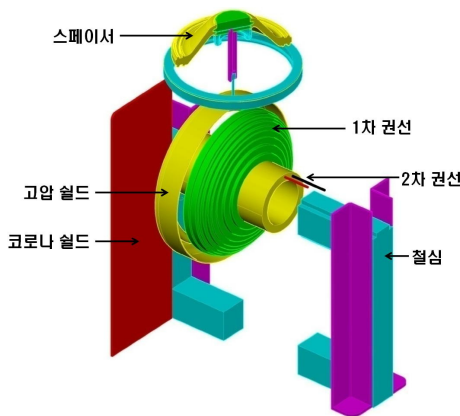
전력계통에 이상전압이 발생하면 전력기기는 손상 및 고장을 일으킬 수 있다. 이러한 사고를 미연에 예방하기 위해서는 SF6 계기용 변압기가 필요하다. SF6 계기용 변압기는 GIS에 흐르는 고전압을 저전압으로 강압하여 계측기 또는 보호계전기로 사용하는 기기이다. 이는 일반적인 전력용 변압기와 원리는 같으며, 특정 측정용 계기를 작동하기 위해 계기전용으로 설치하는 소용량 변압기이다 [1]. 국내 계기용 변압기 기술은 외국선진사에 비해 많이 뒤쳐져 있으며 특히, 초고압 계기용 변압기는 아직 국내개발 실적이 없어 전량수입에 의존하고 있다. 이에 따라 가격 및 기술중속 문제가 대두되고 있어, 외국선진사의 중속성을 탈피한 국산화와 생산 기술력 확보가 시급하다.

본 논문에서는 245kV급 SF6 계기용 변압기의 절연특성해석을 수행하였다 [2,3]. 권선간의 절연특성을 예측하기 위해 1차 권선과 2차 권선을 축대칭 2차원으로 모델링하고 유한요소법을 사용하여 전계해석을 수행하였다. 해석결과를 통해 전계강도분포를 확인하고 최대전계강도가 발생하는 영역을 찾는다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 SF6 계기용 변압기의 구조

SF6 계기용 변압기는 <그림 1>의 구조를 가지고 있으며 크게 스페이서, 철심, 고압 션드, 코로나 션드, 1차 권선, 2차 권선으로 구성되어 있고 외함내부는 절연을 위해 SF6가스로 채워져 있다. 1차 권선은 계단식 권선구조로 이루어져 있으며, 1차 권선과 2차 권선 사이는 고, 저압부의 전계완화를 위한 방전 션드가 위치해 있다.



<그림 1> SF6 계기용 변압기의 구조

##### 2.2 지배방정식

SF6 계기용 변압기의 전계해석을 위한 지배방정식은 다음의 맥스웰 방정식 및 보조방정식으로부터 유도된다 [4].

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (2)$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (3)$$

여기서  $\vec{E}$ 는 전계의 세기 [V/m],  $\vec{B}$ 는 자속밀도 [T],  $\vec{D}$ 는 전속밀도 [C/m<sup>2</sup>],  $\rho$ 는 전하밀도 [C/m<sup>3</sup>],  $\epsilon$ 은 유전율 [F/m]이다.

정전계의 경우 자계가 시간에 따라 변하지 않으므로 식 (1)은

$$\nabla \times \vec{E} = 0 \quad (4)$$

이되어 전계는 보존장이 됨을 알 수 있다.

위 식을 통해 다음의 정전계 지배방정식을 얻을 수 있다.

$$\nabla \cdot \epsilon \nabla V = -\rho_v \quad (5)$$

해석 영역의 경계조건은 전계의 지배방정식의 해를 구하기 위하여 다음의 식으로 주어진다.

$$V_s = V_1 \quad (10)$$

$$\frac{\partial V}{\partial n} = 0 \quad (11)$$

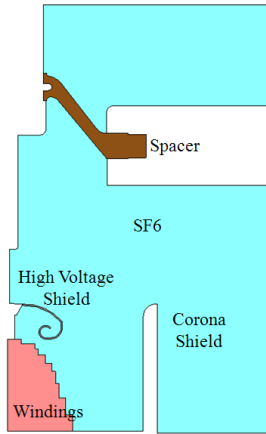
여기서 식 (10)은 강제 경계 조건이며,  $V_1$ 는 전위 또는 접지 전위를 갖는 값이다. 식 (11)은 자연 경계 조건이며,  $n$ 은 경계의 법선방향을 나타낸다. 주어진 경계조건에서 해를 구하면 전위  $V$ 를 얻을 수 있으며 전계의 세기는 다음의 식으로 구할 수 있다.

$$E_r = -\frac{\partial V}{\partial r} \quad (7)$$

$$E_z = \frac{1}{r} \frac{\partial(r V_\theta)}{\partial z} = \frac{V_\theta}{r} + \frac{\partial V_\theta}{\partial r} \quad (8)$$

##### 2.3 절연특성해석

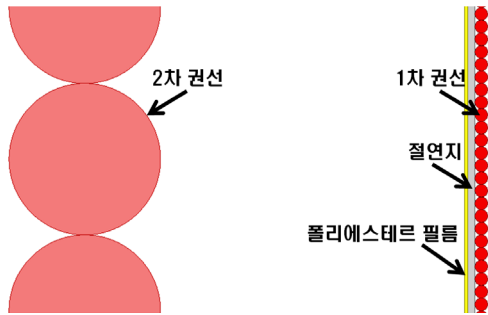
SF6 계기용 변압기의 권선간 전계해석을 위해 우선 모델링을 수행한다. 전계해석에서 재료의 유전율은 해석결과에 큰 영향을 미치므로 각 구성요소의 재질 값을 정확히 부여한다. 다음으로 경계조건을 부여하고 전계해석을 수행하게 된다 [5]. 해석 모델은 245kV급 스위치기어용 단상 계기용 변압기를 선정하였다. <그림 2>는 SF6 계기용 변압기의 기본 프레임 모델을 나타낸다. 여기서 권선부는 고압 션드로 둘러싸여 있다. 고압 션드와 권선은 탱크부와 다르게 x축대칭 형상을 가지고 있다. 따라서 권선에서의 전계해석은 Full 모델 해석으로 결과를 얻을 수 없으며, 권선의 상세 모델링을 위하여 권선 영역을 따로 해석하여야 한다. 권선간 모델링은 3차원 해석을 하여야 정확한 전계해석이 가능하나 3차원 해석은 계산용량의 과다 및 시간의 과다소요로 다소 비효율적인 해석 방법이 될 수 있다. 계기용 변압기 권선은 원통형 구조로 전계분포가 축대칭으로 형성되므로 2차원 축대칭으로 해석이 가능하다.



<그림 2> SF6 계기용 변압기 2차원 축대칭 모델

**2.3.1 전계해석**

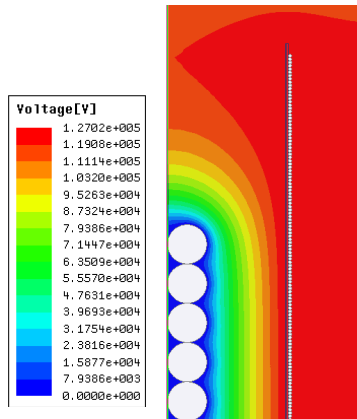
본 논문에서는 권선간 절연특성을 해석하기 위하여 1차 권선과 2차 권선을 모델링하였다. 1차 권선은 총 88,200 [turn]으로 많은 권수를 가지고 있으며 계단식 구조로 되어 있다. 1차 권선 층과 층 사이는 절연을 위하여 절연지와 폴리에스테르 필름으로 덮여 있다. 여기서 절연지의 비유전율은 4.2 [F/m]이며 폴리에스테르 필름은 3.2 [F/m]이다. 2차 권선은 36턴으로 1차 권선보다 큰 지름의 코일로 감겨져 있다. 1차 권선끼리는 등전위를 가지므로 해석의 효율을 위하여 최하부 layer의 권선과 2차 권선을 모델링하였으며 이는 <그림 3>에 나타내었다.



<그림 3> SF6 계기용 변압기 권선 구조

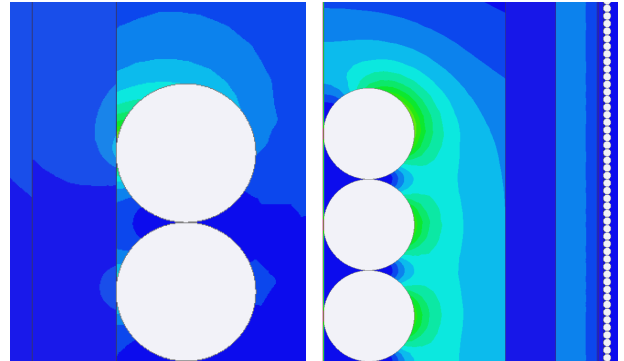
**2.3.2 해석결과**

SF6 계기용 변압기의 전계해석을 위하여 모델의 1차 권선에  $220000/\sqrt{3}$  [V], 2차 권선에  $110/\sqrt{3}$  [V]의 전압이 걸릴 때의 전계를 유한요소법을 이용하여 해석을 수행하였다. 1차 권선과 2차 권선 사이의 등전위분포는 <그림 4>에 나타내고 있다. 전계는 1차 권선에  $220000/\sqrt{3}$  [V]의 전압이 절연지를 통과하여 2차 권선  $110/\sqrt{3}$  [V]으로 급격히 전위가 떨어지는 것을 알 수 있다.



<그림 4> 권선간 등전위분포

전계강도는 1차 권선과 2차 권선 표면에 분포하였으며 특히, 권선 양단 끝에 전계강도가 집중 분포하였다. <그림 5>는 1차 권선과 2차 권선 양단 끝의 전계강도 분포를 나타낸다. 1차 권선과 2차 권선 주변으로 전계가 분포되고 있으며 권선 양단 끝에서 최대전계강도가 발생함을 알 수 있다. 이 때 집중된 전계강도는 1차 권선은 63.53 [kV/mm]이고 2차 권선은 38.12[kV/mm]이다. 이를 통해 1차 권선에서 최대전계강도가 발생함을 알 수 있었다.



(a) 1차 권선 전계 분포 (b) 2차 권선 전계분포

<그림 5> 권선간 전계해석

**3. 결 론**

본 논문은 SF6 계기용 변압기의 절연특성해석을 수행하였다. 245kV 급 SF6 계기용 변압기를 모델로 선정하여 초고압 변압기에서 절연이 중요한 요소인 권선간의 전계강도 분포를 알아보았다. 1차 권선은 88,200 [turn]의 많은 권수를 가지고 있어 효율적인 해석을 위하여 최하부 layer의 권선부와 2차 권선을 모델링 하였으며 축대칭 2차원 모델링으로 유한요소법을 사용하여 전계해석을 수행하였다. 전위는 1차 권선의 절연지를 지나 2차 권선으로 급격히 떨어짐을 알 수 있다. 전계강도는 권선의 양단 끝에 집중 분포 하였으며, 최대전계강도는 1차 권선에서 발생하였다. 이때의 최대전계강도는 63.53 [kV/mm]으로 2차 권선의 최대 전계강도 38.12 [kV/mm]보다 높게 나오는 것을 확인할 수 있었다. 이를 통하여 245kV급 SF6 계기용 변압기 권선에서의 절연특성은 1차 권선 양단 끝에서 최대전계강도가 발생하는 것을 알 수 있었으며, 최대전계강도 완화대책으로 절연지, 절연필름의 사용과 절연내력을 이길 수 있도록 절연설계기술을 개발하여야 할 것이다.

본 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP) (No. 2009H100100164)과 한국전기연구원(KERI)의 지원을 받아 기본연구사업으로 수행한 연구결과입니다.

**[참 고 문 헌]**

- [1] Y.-C. Kang, T.-Y. Zheng, S.-W. Choi, Y.-H. Kim, Y.-G. Kim, S.-L. Jang, S.-H. Kang, "Design and evaluation of a compensating algorithm for the secondary voltage of a coupling capacitor transformer in the time domain", Generation, Transmission & Distribution, IET, Vol.3, No.9, pp.793-800, September 2009.
- [2] 조성훈, 정의환, 윤재훈, 임기조, "친환경 절연물을 이용한 CT 및 PT 제작 및 특성 분석", 대한전기학회 하계학술대회, pp.1466-1467, July 2010.
- [3] Xiaoming Liu, Yundong Cao, Li Lei, Yuxia Shi, "Computation and insulation analysis of 3-D electric field of high voltage SF6 current transformer", ICEMS 2005, Proceedings of the Eighth International Conference on, pp.2144-2147, September 2005.
- [4] Raju, Gorur G., "Dielectric in Electric Fields", Marcel Dekker, New York, 2003.
- [5] Khaligh, A., Vakilian, M., "Power Transformers Internal Insulation Design Improvements Using Electric Field Analysis Through Finite-Element Methods", Magnetics, IEEE Trans., Vol.44, No.2, pp.273-278, February 2008.