

여유턴 방식에 의한 가스변압기의 절연 설계에 관한 연구

論 文
50B-3-3

A Study of Insulation Design of a Gas Transformer Using Extra Turns.

許 遇 行* · 河 永 滉** · 洪 正 杓*** · 金 奎 卓§
(Woo-Heng Heo · Young-Sik Ha · Jung-Pyo Hong · Gyu-Tak Kim)

Abstract - This paper deals with the electrical insulation design of a gas insulated power transformer based on extra turns method satisfying the impulse test performed in the worst condition. The calculation of electrical strength in insulation structure was done by 2D finite element method. The gas insulated power transformer was manufactured by selecting the optimum arrangement among design results. The validity of the design result is verified by the impulse test of manufactured machine.

Key Words : SF₆ gas transformer, Transformer modeling, Electric strength, Extra turns design

1. 서 론

최근 대도시 전력수요의 급증으로 인한 옥내변전소건설의 증가로 방재형 변압기의 필요성이 대두되고 있으며, 기존 난연성 몰드 변압기의 경우 사용용량 및 전압의 제약으로 인해 이러한 수요를 충족시킬 수 있는 전력용 SF₆ 변압기 개발이 국내에서는 1990년대 말부터 시작되었다. 가스 절연 변압기는 기존 기름변압기와 철심 및 권선 구조는 동일하지만 SF₆ 가스로 절연 및 냉각을 하게 된다. 유입 변압기의 경우 1890년대에 사용하기 시작하여 현재까지 대부분의 전력용 변압기로서 사용되어 제작, 설계, 진단 등의 축적된 경험이 풍부하여 신뢰도가 높다. 그러나, 1930년경부터 연구되기 시작한 가스변압기의 국내 사용실적은 전무하다. 또한 SF₆ 가스를 이용한 GIS는 이미 800kV급까지 상용화에 성공하여 현재 한국전력공사에 의해 설치되고 있으나, 변압기의 경우 절연기술, 냉각기술, 부품개발, 제작 기술등이 동시에 이루어져야만 가능하여 아직 실용화는 되지 않고 있다. 그 중 절연 설계는 가장 기본이 되는 핵심기술이라 할 수 있다.

기존 유입변압기의 절연파괴특성은 Duct이론, Weak Link 이론에서 발전된 SOV(stressed oil volume)이론 등이 있으며, 전계의 분포, 절연구조에 따라 이들 이론들이 달리 적용되고 있다.[1,2] SF₆ 가스의 경우나 도체에 대한 절연 특성은 명확

하게 밝혀진 반면 절연지, 절연물이 가스와 함께 존재하는 가스변압기의 경우는 기체의 절연특성과 고체의 절연 특성이 파악되어야 설계가 가능하다. 권선의 표면을 둘러싸고 있는 절연지는 기밀도가 우수한 PET필름과 열적 내력이 우수한 아라미드계의 노멕스지가 주로 검토되고 있으나 본 연구에서는 열 및 전기적인 내력이 우수한 노멕스지를 선택하였다.

따라서, 본 연구에서는 가스 변압기의 주절연 구조를 2차원으로 모델링하여 유한요소법을 이용하여 전계강도를 계산하였다. 가스변압기 시험 중 가장 가혹하게 작용하는 임펄스 시험조건을 만족시키기 위하여 여유턴 배치 방식을 채택하여 절연 구조를 설계하였다. 여유턴 배치 방식에 의한 설계 데이터 중 최적의 배치방식을 채택하여 가스변압기를 제작한 다음, 임펄스 시험을 행한 결과 절연 설계에 이상이 없음을 확인할 수 있었다.

2. 변압기 구조 모델링

최대 전계 의존성이 높은 가스의 절연 파괴 특성으로 인하여 가스 변압기에서는 설계단계에서부터 정밀 전계 계산이 이루어져야 한다. 따라서, 변압기의 특성 해석에 앞서 철심과 권선 상부, 철심과 탭권선 사이의 전계 해석에 대한 2차원 해석의 가능성 및 좌표계에 대한 검토가 선행되어야 한다. 일반적으로 변압기 모델링은 고압 권선과 저압 권선 부위를 제외하면 3차원 해석을 행하여야만 정확한 전계 계산이 가능하다. 그러나 3차원 해석은 계산 용량의 과다 및 시간이 많이 걸리는 제약 때문에 다소 비효율적인 방법이다. 만약 변압기의 주절연 구조 해석이 2차원적으로 가능하다면 다양한 구조를 해석을 통해 검증이 가능하므로 3차원 해석보다 효율적인 설계가 가능하리라 사료된다.

* 正 會 員 : (株)曉星 重工業研究所 昌原分所 先任研究員

** 正 會 員 : (株)曉星 重工業研究所 昌原分所 首席研究員

*** 正 會 員 : 昌原大 工大 電氣工學科 助教授 · 工博

§ 正 會 員 : 昌原大 工大 電氣工學科 副教授 · 工博

接受日字 : 2000年 12月 20日

最終完了 : 2001年 3月 14日

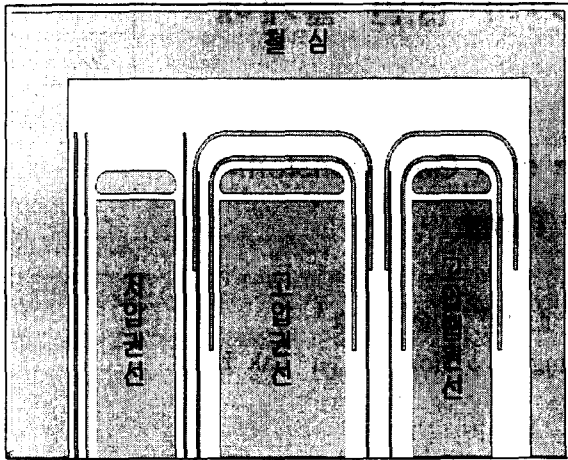


그림 1 변압기 주 절연구조
Fig. 1 Main insulation structure of transformer.

그림 1은 단상 3각 20[MVA], 154[kV] 가스변압기의 1/4구 조이다. 변압기 권선은 원형으로 감기므로 축대칭이 되지만, 철심은 축대칭이 아니므로 해석시 3차원 구조를 행하여야 정밀 해석이 가능하다. 그러나, 대부분의 초고압변압기는 권선의 크기가 절연거리에 비해 매우 크므로 전계는 평등 전계에 가깝다. 따라서, X-Y평면을 사용해도 3차원 해석과 큰 오차는 발생하지 않는다. 일례로, 154[kV]급 변압기에서 철심과 탭권선, 철심의 거리는 약 60[mm]이며 권선 반경은 약 750[mm]이다 이러한 크기의 전극구조에 대하여 직각 좌표계와 원통 좌표계의 계산치는 다음과 같다.

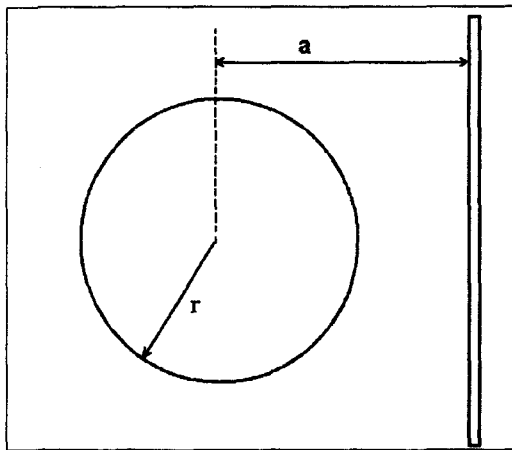


그림 2 원통 대 평면전극
Fig. 2 Cylinder to plan electrode

그림 2의 구조에 대하여 전극에 인가된 전압이 1[kV]라면 직각 좌표계에 의한 전계는 16.67[V/m]이다. 축대칭 좌표계에서의 전계는 식 (1)과 같이 두 원통 구조 사이의 최대 전계강도는 원통의 반경과 절연거리에 따라 변한다.

$$E_m = \frac{\sqrt{(a^2 - r^2)}}{r} \times \frac{V}{(d \times \ln a + \sqrt{(a^2 - r^2)})} \quad (1)$$

여기서

- a : 원통-평판간 거리, r : 원통의 반경
- V : 전위차, d = a - r

식 (1)에 의하여 축대칭 좌표계에서의 최대전계는 17.11[V/m]이다. 이 값은 직각 좌표계에서 계산된 전계값 16.67[V/m]에 대해 2.6[%]의 오차가 발생한다. 따라서 철심과 탭권선 사이의 전계 계산은 3차원 해석을 이용하지 않고 2차원 직각좌표계를 이용하여도 무방하다. 또한, 권선 상부와 철심간 절연거리도 약 60[mm]이므로 2차원 해석으로 전계계산이 가능하다. 한편, 도체 내부의 전계는 0이며 정격전압 154[kV]에서 권선간 임펄스전압 650[kV]에 대해 단간 전압차는 미약하므로 변압기 권선의 도체가 받는 전계 강도는 접지측과 도체외부에 가장 크게 걸리게 된다. 따라서 주절연 구조해석 시 내부도체는 모델링 하지 않아도 되며 절연파괴는 절연지와 같은 고체절연물보다 기체의 절연내력이 낮으므로 전계계산은 절연지 표면에서 계산된 전계의 세기를 이용하여 절연설계의 여유율을 결정하게 된다. 가스변압기의 섹션간 모델은 이미 시험 및 해석을 통하여 절연내력이 확인되었으며[3], 이때의 전계는 스페이스 썬기갭부위에 집중된다. 주 절연구조의 모델링은 2차원 모델을 사용하였으므로 V-Spacer는 해석대상에서 제외하였으며 다만 도체 썬기갭부분에서 절연파괴 강도는 약 27[kV/mm] 정도 되므로 주 절연 구조해석 시 각각 도체표면이 절연파괴 전계 27[kV/mm] 이하가 되도록 설계하면 된다[3]. 가스절연특성은 인가전압-인가시간 (v-t)특성에 의해 크게 좌우되므로 주어진 시험조건에 대하여 가장 가혹한 시험조건을 선택하여 설계에 적용하면 해석 횟수를 줄일 수 있는 장점이 있다. 유입 변압기의 경우 계통전압에 대한 AC시험과 임펄스시험조건이 거의 동등한 조건을 갖는 반면, 가스의 특성은 시험조건중 임펄스 시험조건이 가장 가혹한 조건으로 작용한다[4]. 가스변압기 절연시험은 한전규격 ESB140 및 ANSI규격에 의하여 실시되며 이는 다음과 같다[5,6].

표 1 절연시험항목 및 전압치
Table 1 Item of dielectric test and voltage

분류	시험 종류	전압 [kV]	인가파형
1. 임펄스	1. Full Wave	650	1.2×50[μ sec]
	2. Chopped Wave	750	1~3[μ sec]
	3. Switching Surge	540	100~1000[μ sec]
2. AC	1. 유도내전압	170	240[Hz], 30[sec]
	2. 상용주파내전압	140	60[Hz], 1[Min]

3. SF₆가스의 절연특성

전계해석에 앞서 각각의 시험조건에 대한 시험기준치가 검토되어야 하며 이를 바탕으로 해석 결과를 판단해야 한다. 일반적인 스트리머 이론에 의하면 SF₆가스의 절연내력은 다음과 같이 결정된다. SF₆가스 중에서 충돌전리에 의한 전자증배는 전리계수 α 가 부착계수 η 를 상회하는 영역에서 발생하며 평균 전자수 N 은 다음과 같다[7].

$$\ln N = \int_0^{X_c} (\alpha - \eta) dx \quad (2)$$

여기서, X_c : $\alpha = \eta$ 인 전극에서 최대전계점 지점까지 거리
 $\alpha - \eta$: 실효전리계수
 α : 방전계수, η : 부착계수

이다. SF₆의 전자증배는 $10^4 \sim 10^6$ 범위가 주로 사용된다. SF₆의 실효전리계수와 압력과의 관계는 다음과 같다[5].

$$\frac{\alpha - \eta}{P} = 27.7(E/P - 89) \quad (3)$$

여기서
 E : 전계의 세기[kV/cm]
 P : 가스압력[atm]

$\alpha < \eta$ 인 조건에서는 전자증배가 일어나지 않으므로 $E/P = 88.9$ [kV/cm · atm]을 극한 전계라 한다. 또한 $E = 89P$ [kV/cm]는 대기압 근처에서 SF₆가스의 방전개시전압의 척도이다. 전극간 거리가 d 인 평등전극구조에서 방전개시전압 V_d 에 대한 실험식은 대기압 근처까지 Pd 의 함수로 다음과 같이 표현된다.

$$V_d[kV] = 0.376 + 89.6Pd \quad (4)$$

실용상, 전극구조에 대한 전계 이용율을 구하고 최대 전계가 극한 전계와 같게되는 조건으로 방전 개시전압을 계산한다[7].

$$kV = 89 P d \mu \quad (5)$$

여기서, P : 가스압력[Bar], d : 절연거리[cm]
 μ : 전계이용율[$V/d \cdot E_{max}$]

이다. 고, 저압간 절연내력 또한 위의 식과 같은 형태로 주어지며 이는 다음과 같다[8].

$$kV = 46 P^{0.577} d \mu \quad (6)$$

AC절연내력과 임펄스 절연내력은 $v-t$ 특성에 의해 알 수 있으며 임펄스와 AC시험의 경우 AC 최대치의 1.1~1.3배의 전압이 임펄스전압과 동등한 절연내력이 되므로 임펄스 시험조건이 AC시험 조건보다 더 가혹하게 된다[9]. AC시험조건은 금속 이물질이 있는 경우, 이물질이 정전기력에 의해 기립 및 부상하여 절연과피강도는 감소하므로 제작조건으로써 청결을 유지해야한다[10].

4. 고 저압간 해석

전계의 세기를 계산하기 위한 미분방정식은 식 (7)과 같이 주어진다.

$$\nabla \cdot (\epsilon \nabla V) = \epsilon \nabla^2 V = -\rho_v \quad (7)$$

유전율이 상수인 등방성 매질은 포아송 방정식을 풀어 전위를 계산한다. 전하가 없는 경우 라플라스 방정식을 풀어 전위를 계산할 수 있다

$$\nabla^2 V = 0 \quad (8)$$

미분 방정식의 해는 알고있는 시험전압 650[kV] 대하여 $V = 650, 560, 480kV$ (고압권선), $V = 0kV$ (접지부위)의 경계조건을 적용하였으며, 자연경계조건을 이용하여 유전율이 다른 가스와 절연지, 절연물의 경계부위를 해석하였다.

$$E_{t1} = E_{t2},$$

$$D_{n1} = D_{n2} + \rho_v$$

여기서
 E_t : 전계의 접선성분
 D_n : 전속밀도의 법선성분

이다. 실제 시험조건은 전하가 축적되지 않고 주파수가 낮으므로 변위전류를 무시할 수 있으므로 변압기 시험 조건은 DC해석을 통하여 구하였다.

가스변압기 구조는 고압 권선 리드가 권선 중심에서 인출되는 구조이므로 권선중심에 대하여 상, 하 대칭구조로 해석을 해야한다. 임펄스 전압 인가시 초기전위분포가 가장 가혹하게 작용하므로 주 절연구조에서 권선 시작 부위의 섹션간 및 고압 권선과 저압 권선 사이의 전계강도를 완화시키기 위한 방법으로서 정전판을 주로 이용한다. 정전판을 사용하면 정전용량의 증가로 각 섹션의 전위분포가 균등하게 분포하나 가격이 고가로 되는 반면, 정전판을 사용하지 않는 경우에는 정전용량의 감소로 권선의 첫째 및 둘째 섹션 사이의 전위가 증가하는 단점이 있다. 본 연구에서는, 정전판이 없는 구조로 설계하고자 정전용량이 큰 고용량 권선 방법을 이용하였다. 또한, 정전판을 사용하지 않는 경우에는 도체의 빼기갭부위에 큰 전계가 걸리므로 전압이 크게 걸리는 권선시작 부위의 전계의 강도를 완화시키기 위하여 여유턴을 주고 설계하였다.

이러한 구조에 대해 그림 3과 같이 모델링하여 해석을 실시하였다. 그림 3과 같은 고, 저압 구조에서 4-5층 사이의 섹션의 도체 썬기갭부위인 A지점에 전계가 집중되고 있음을 알 수 있다. 또한 저압권선부위는 전계가 거의 균등하게 분포

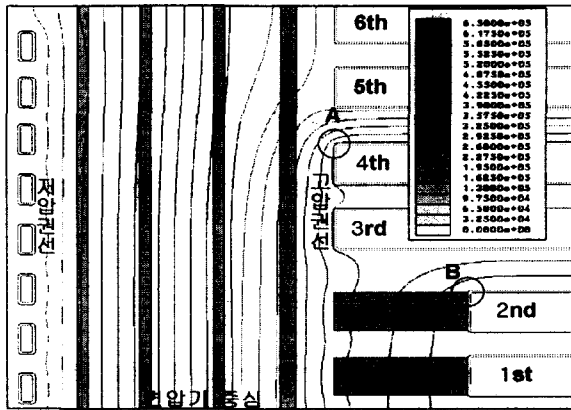


그림 3 고저압권선 사이의 전위분포
Fig. 3 Voltage distribution of HV between LV winding

하나 고압권선 부위는 여유턴에 의하여 등전위선이 크게 왜곡됨을 알 수 있다 따라서 전계강도를 완화시키기 위해서는 권선의 각 섹션들을 적절히 배치하여 고, 저압간 및 섹션간 전위가 균등한 분포를 하도록 설계 하여야 한다.

최대 전계 의존성이 있는 가스의 특성을 고려할 때 A 및 B부위에서의 정확한 전계 계산은 매우 중요하나 유한 요소법에 의한 해석시 침전극이나 3중점, 썬기갭 같은 유사 삼중점에서 전계값은 요소의 거리가 0에 가까워짐으로 요소분할 수 및 전계계산 위치가 매우 중요하게 된다. 이와 같은 유한요소법의 단점을 해결하기 위해 반경이 12.5[mm]인 구 전극 사이에 두께가 3[mm]인 절연물을 넣고 방전이 개시되기 시작하는 전압 50[kV]를 인가했을 경우의 전계계산을 실시하였다 [11]

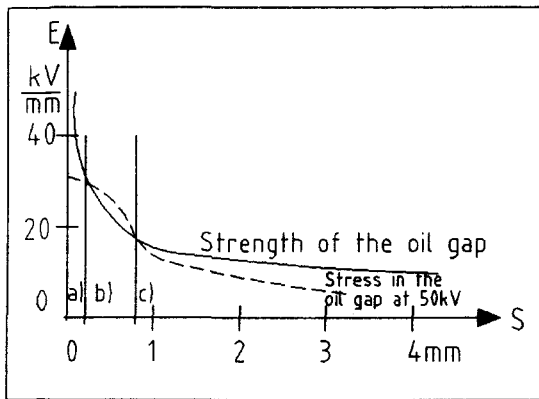


그림 4 썬기갭에서의 절연특성
Fig. 4 Dielectric characteristic of wedge shaped gap

위 그림에서

- a)영역은 방전이 일어나지 않는 영역
- b)영역은 부분방전 영역
- c)영역은 연면방전 및 절연물 관통과피 영역이다.

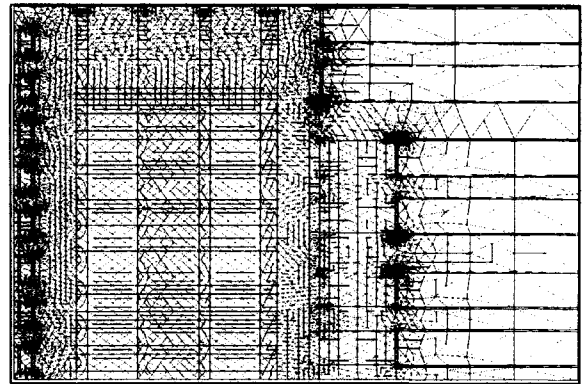


그림 5 요소분할도
Fig. 5 Drawing of mesh generation

충분히 작은 요소크기에 대해 a)영역은 전계강도는 절연내력을 넘어서게 되나 실제 방전은 일어나지 않는 구간이며 b)영역은 실제방전이 일어나는 구간이다.

그림 3에서의 B영역도 이와 유사한 3중점구조 및 침전극 구조이므로 이 부위의 전계 계산은 적절한 요소분할 갯수의 선택에 좌우된다. 그림 4에서와 같이 절연 전극에서 0.2~0.3[mm]근처에서 방전은 일어나지 않으므로 실제 제품 설계시 전계 계산이 필요하지 않는 영역이다. 가스변압기의 경우 B영역에서의 전계계산은 절연지 표면에서 0.2[mm]떨어진 가스공간에서 계산하였다.

A영역의 경우 절연지 표면 근처에서 등전위선은 원의 형태를 이루므로 도체근처에서 원의 형태를 띤 등전위선의 반경과 전압 및 도체까지 거리를 구하여 동축원통의 전계를 계산하는 방법을 이용하여 실제 절연지 표면의 전계를 계산하였다.

경계조건은 임펄스에 대한 초기 조건과 권선 중심을 대칭 경계로 하여 해석하였으며 섹션의 턴수를 조절하여 각각의 경우에 대한 해석결과 중 가장 전계 강도가 적게 되도록 설계하였다. 설계 가능한 각각의 절연구조에 대하여 전계해석을 실시하고 이때의 여유율을 계산하면 표2와 같다.

섹션간은 전계강도는 27[kV/mm], 고, 저압간 전계강도는 식 (6)을 이용하였으며 여유율 계산은 다음 식을 이용하였다.

$$\text{여유율} = \frac{\text{Strength} - \text{Stress}}{\text{Stress}} \times 100$$

표 2에서 보는바와 같이 전계의 세기는 2번 해석모델과 같이 권선 중심에서 4번째 섹션까지 매 섹션에 2턴의 여유턴을 주고 설계했을 경우 섹션간 및 고, 저압간 절연내력이 가장 큰 것을 알 수 있다. 또한 식 (6)은 방전개시전압이므로 실제 절연과피 전압에 비해 상당한 여유가 있음을 알 수 있다.

표 2 전계해석 결과
Table 2 FEA results

해석 모델	여유턴	Impulse				유도내압	
		섹션간		고저압간		섹션간	
		전계 (kV/mm)	여유율 (%)	내력 (kV)	여유율 (%)	전계 (kV/mm)	여유율 (%)
1	2-2-2-0	28.5	-4.6	745	14.6	4.5	73.6
2*	2-2-2-2	18.3	49.0	794	22.2	4.95	57.8
3	4-2-2-0	28.3	-3.9	794	22.1	6.2	26.0
4	4-2-2-2	19.8	37.3	770	18.5	4.2	86.0
5	4-4-2-0	27.7	-1.9	723	11.2	5.6	39.0
6	4-4-0-0	25.6	6.3	664	2.2	6.5	21.1

※ 여유턴 2-2-2-2는 154[kV]리드가 위치한 권선중심에서 첫째섹션에서 넷째섹션까지 여유턴이 각각 2개인 구조임

AC시험조건에서 가장 가혹한 유도 내압시험의 경우 어떠한 경우에도 임펄스시험 보다는 여유율이 많으므로 설계는 임펄스시험 조건이 가장 가혹한 조건으로 작용한다.

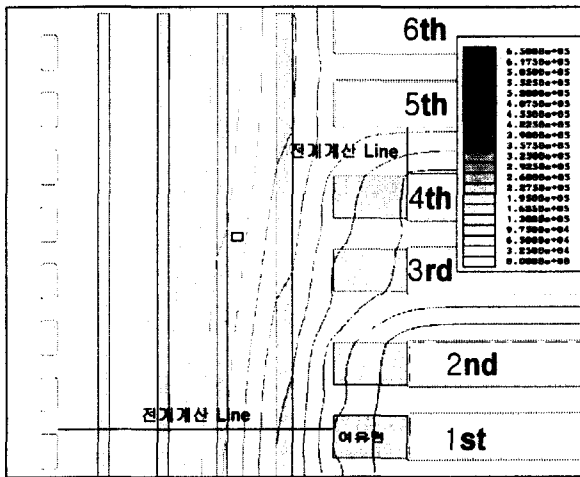


그림 6 고저압권선 사이의 최적 전위분포
Fig. 6 Optimum Voltage distribution of HV between LV winding

그림 6 은 최종 설계된 구조로 여유턴을 조절하여 4-5 번째 섹션 및 고저압간에 집중한 전계를 최대한 완화시켜 설계 여유율을 증가시킨 구조이다. 그림 7에서와 같이 여유턴을 조절하여 설계를 한 경우 전계강도는 25.8[kV/mm]에서 13.9 [kV/mm]로 감소한다.

고저압간 전계분포는 역시 여유턴을 조절함에 따라 전계의 세기가 14.8[kV/mm]에서 12.5[kV/mm]로 감소하였다. 또한, 그림 8에서 보는바와 같이 여유턴이 들어간 스페이스 표면에서 전계강도가 가장 크며 이 부위를 제외한 절연물 사이의

가스공간은 거의 평판전극에서의 전위분포와 동일하다. 그림 6에서 최대 전계는 12.5[kV/mm]이므로 식 6으로 계산한 절연 내력은 시험전압에 대해 설계여유가 있음을 확인할 수 있었다.

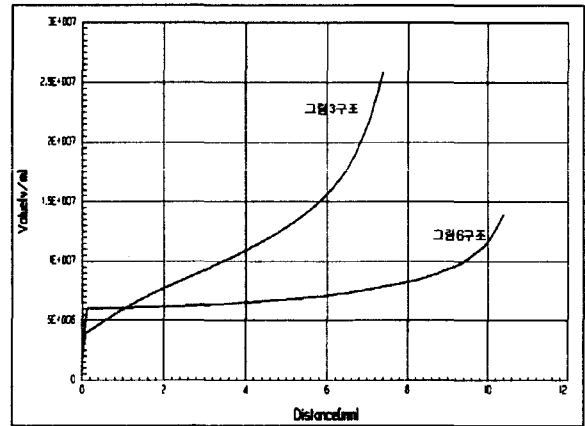


그림 7 4, 5번째 섹션사이의 전계의 세기
Fig. 7 Electrical Field stress between 4th and 5th section

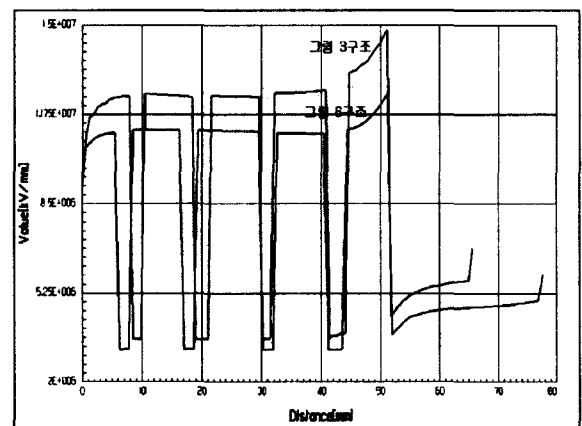


그림 8 고저압권선 사이의 전계분포
Fig. 8 Electric stress distribution of HV between LV winding

5. 시험결과

유한요소법을 이용하여 해석한 결과를 토대로 설계, 제작된 가스변압기 권선의 절연성능시험을 실시한 결과, 임펄스파형은 그림 9~11과 같다. 절연시험은 반파시험과 650[kV BIL]전파시험 파형이 일치해야 하며 2번의 750[kV]재단파 시험파형이 서로 일치해야한다.

그림 9에서 전파시험파형(상부)과 반파시험파형(하부)의 전압과 전류파형이 서로 일치하는 결과를 나타내고 있다.

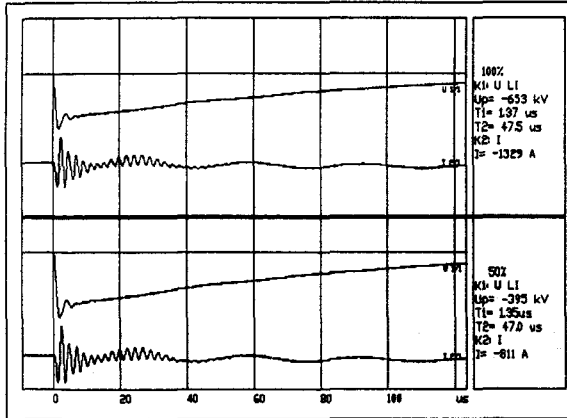


그림 9 고압권선 전파시험결과
Fig. 9 Full wave test result of HV winding

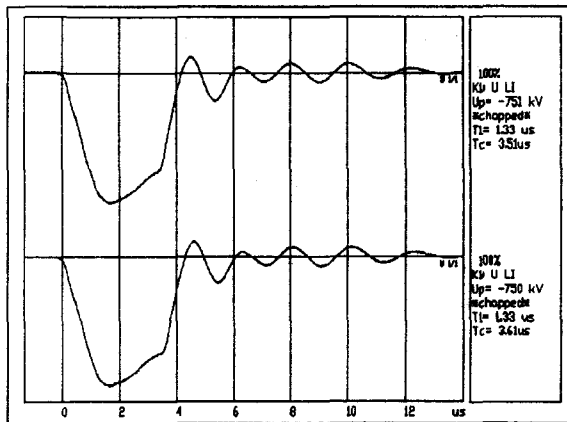


그림 10 고압권선 재단파 시험결과
Fig. 10 Chopped wave test result of HV winding

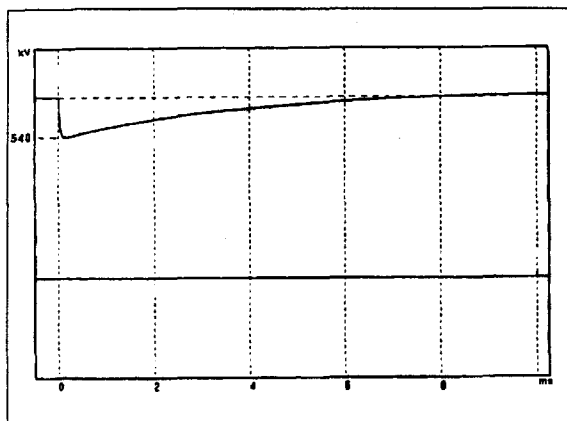


그림 11 고압권선 개폐서지 시험
Fig. 11 Switching Surge test result of HV winding

그림 10은 2회의 재단파 시험파형을 도시한 것으로 이들 파형 역시 서로 잘 일치하고 있다. 그림 9와 10에서 보듯이 임펄스 시험은 서로 일치하며 이는 변압기 내부의 회로정수가 각각의 시험에서 변하지 않은 것을 의미한다.

그림 11은 540[kV BSL]개폐서지 시험파형으로 전파시험보다 진행시간은 긴 반면 전압은 낮으며 또한, 서지 전압이 인가된 전 시간동안 파형이 왜곡되지 않음을 알 수 있다. 따라서, 고압권선의 절연설계에는 이상이 없음을 확인할 수 있다.

6. 결론

본 논문에서는 가스변압기 개발의 핵심기술인 절연설계 기술을 변압기 모델링, 기본절연특성파악, 최적구조해석, 설계 및 특성시험 등의 순으로 살펴보았으며 이를 요약하면 다음과 같다.

- 가. 초고압변압기 주 절연구조는 2차원 모델링이 가능하다.
- 나. 가스변압기 주 절연구조 설계는 여유턴 조절로 전계강도를 약 20[%] 줄일 수 있다.
- 다. 가스변압기 절연 특성은 임펄스 특성이 약 40[%] 가혹하게 작용하므로 절연설계시 임펄스 특성이 필히 고려되어야만 한다.
- 라. 가스변압기의 주 절연구조에 대한 절연설계를 모델링하여 유한요소법으로 해석한 후, 실 변압기의 시험을 통하여 절연의 이상 유무를 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 공업기반기술개발사업에 의하여 이루어진 것입니다.

참고 문헌

- [1] Michael A. Franchek, " Understanding high voltage insulation technology the subsystem at the heart of today's power transformer", EHV-Weidmann pp. 10~17, 1994.
- [2] J.Keith Nelson, "An assessment of the physical basis for the application of dielectric design criteria for transformers", IEEE Transactions on electrical insulation vol. 24, no. 5, pp 835~845, 1989
- [3] 허우행, 하영식, 홍정표, 김규탁, "가스변압기에서 권선의 섹션에 대한 절연내력연구", 대한전기학회 논문지, vol. 49B, no. 3, pp. 155~156, 2000.
- [4] 서길수, "SF₆ 가스 중 V-t절연과피특성", 대한전기학회 창립 50주년 하계학술 대회논문집, pp 1771~1772, 1997.
- [5] 한전구매시방서, "154kV 가스절연변압기", pp. 13~15, 1998.
- [6] ANSI Standard C57.12.91, "IEEE test code for dry-type distribution and Power Transformer", pp. 27~ 31, IEEE, 1980.

- [7] 이복희, "高電壓 大電流 工學", 청운각, pp.45~65, 1997.
- [8] EPRI final report RP-930-1, "Gas-Vapor project", pp. 4-1~26, 1979.
- [9] A. Inui, "Dielectric Characteristics of Static Shield for Coil-end of Gas-insulated Transformer", IEEE Trans.on Electrical Insulation vol. 27, no. 3, pp. 572~577, 1992.
- [10] 김재호, "SF6 GIS용 스페이서 표면에서의 파티클에 의한 절연파괴 특성연구", 94대한전기학회 하계학술대회논문집, pp. 1536~1539, 1994.
- [11] H.P. Moser, "Transformer board II" EHV-Weidmann, pp. 20~22, 1987.

저 자 소 개



허우행 (許遇行)
 1969년 12월 1일 생. 1995년 인하대 전자공학과 졸업, 현재 (주)효성 중공업연구소 창원분소 선임연구원
 Tel : 055-268-9914, Fax : 055-268-9926
 E-mail : anytime@pop3.hyosung.co.kr



하영식 (河永澁)
 1948년 3월 23일 생. 1975년 서울대 공과대학 공업교육과 졸업. 1998년 창원대 산업대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 (주)효성 중공업연구소 창원분소 수석연구원.
 Tel : 055-268-9910, Fax : 055-268-9926
 E-mail : hysik@pop3.hyosung.co.kr



홍정표 (洪正杓)
 1959년 4월 17일 생. 1983년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1985년~1990년 LG정밀(주) 중앙연구소 주임연구원. 1990년~1992년 삼성전기(주) 종합연구소 선임연구원. 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1996년~1996년 한양대 산업 과학연구소 선임연구원. 현재 창원대 공대 전기공학과 조교수
 Tel : 055-279-7517
 E-mail : jphong@sarim.changwon.ac.kr



김규탁 (金奎卓)
 1961년 11월 12일 생. 1982년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 현재 창원대 공대 전기공학과 부교수. 1996년~2000년 일본 早稻田大 客員研究員
 Tel : 055-279-7515
 E-mail : gtkim@sarim.changwon.ac.kr