

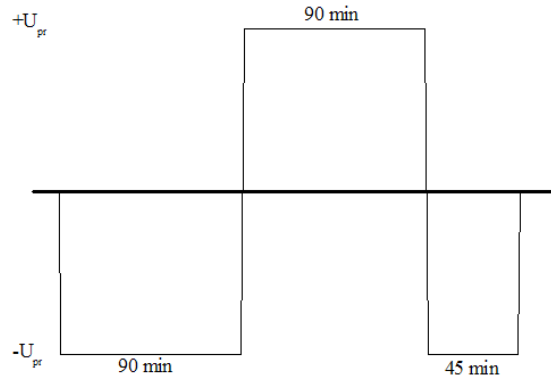
DC 전압이 유입변압기 절연시스템에 미치는 영향에 관한 연구

장효재*, 김용한*, 석복렬*
현대중공업(주) 기계전기연구소*

Study on the effect of DC voltage in oil-immersed transformer insulation system

Hyojae Jang*, Yong-Han Kim*, Bok-Yeol Seok*
Electro-Mechanical Research Institute, Hyundai Heavy Industries,

Abstract - The HVDC transformer which is one of the main equipments for HVDC(High Voltage Direct Current) electric power transmission systems is exposed to not only AC voltage but also the inflowing DC voltage which comes from the DC-AC converter systems. Therefore, the HVDC transformer insulation system is required to withstand the electric field stress under AC, DC and DC polarity reversal conditions. However the electric field distributions under those conditions are different because the AC electric field and DC electric field are governed by permittivity and conductivity, respectively. In this study, the changes of electric potential and electric field of conventional AC transformer insulation system under DC polarity reversal test condition were analyzed by FEM(Finite Element Method). The DC electric field stress was concentrated in the solid insulators while the AC electric field stress was concentrated in the mineral oil. In addition, the electric stress under that condition which is affected by the surface charge accumulation at the interfaces between insulators was evaluated. The stress in some parts could be higher than that of AC and DC condition, during polarity reversal test. The result of this study would be helpful for the HVDC transformer insulation system design.



〈그림 2〉 IEC 61378에 규정된 DC 극반전 시험 전압 파형

명시되어 있으며, 이 중 DC 극반전 시험에 사용되는 전압 파형을 그림 2에 나타내었다. 본 연구에서는 이 DC 극반전 시험 조건에서의 전계분포와 전위를 유한요소법으로 분석하고 그 특성을 분석하였다.

1. 서 론

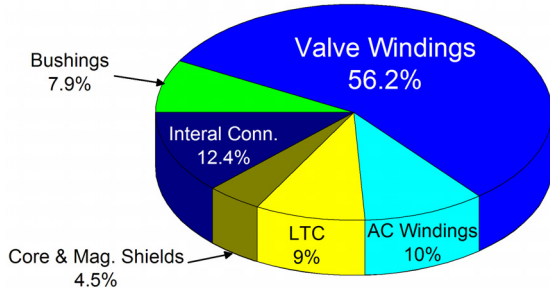
고전압 직류(HVDC) 송전방식은 기존의 교류(AC) 송전방식에 비하여, 장거리 송전 시의 경제성과 효율성이 우수하고 사고 발생 시 계통분리가 가능하며 선로 중 보상설비의 설치가 불필요하다는 장점을 가지고 있어 최근 많은 관심을 받고 있다. 그러나 이 송전시스템에 전력을 공급하고, 송전된 전력을 사용하기 위해서는 결국 AC방식을 사용할 수밖에 없으며 이에 따라 송전시스템 양단에 사용된 전력변환장치에는 변압기가 설치된다.

이 HVDC 송전시스템용 변압기에는 전력변환장치의 동작으로 인하여 발생하는 DC전압, 고조파 등이 유입될 수 있기 때문에 이러한 경우에도 절연적 안전성이 확보되어야만 한다. 그러나 AC전압만 인가되는 경우와 DC전압이 유입되는 경우는 동일한 크기의 전압이 인가되었다 하더라도 형성되는 전계분포가 서로 상이하며, 이를 모두 고려하지 않으면 절연사고로 이어질 가능성이 높다. 그림 1[1]에 CIGRE에서 1991년부터 2009년까지 발생한 HVDC용 변압기의 절연사고 발생위치를 조사한 결과를 나타내었는데, 전력변환장치와 연결되어 있어 DC전압 등이 직접 유입되는 부위인 Valve Winding에서 절연사고가 발생한 경우가 전체의 사고의 절반 이상인 56.2%를 차지하고 있음을 알 수 있다. 따라서 이러한 성분의 유입에 따른 전계분포 변화를 분석하고 이를 고려한 절연설계를 하는 것이 매우 중요하다고 할 수 있다. 이러한 사고를 줄이고자 IEC 61378에는 DC 내전압 시험과 DC 극반전 시험의 수행이

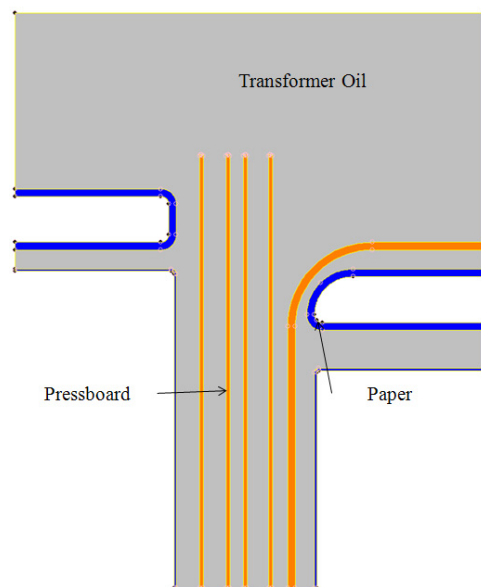
2. DC전압 인가 시 전계분포의 변화

2.1 전계해석에 사용된 모델

본 연구에서 AC, DC 및 DC 극반전 절연해석을 위하여 사용된 모델을 그림 3에 나타내었다. 이 모델은 변압기 고압권선과 저압권선간 절연시스템이며, 일반적인 유입변압기에서 자주 사용되는 절연지-절연유-프레스보드 절연이 이용되었다.



〈그림 1〉 1991년~2009년간 HVDC용 변압기에서 발생한 절연사고 발생 위치



〈그림 3〉 DC전압 유입에 따른 영향 분석을 위하여 사용된 고압-저압간 절연해석 모델

2.2 전계해석 방법

DC 극반전 경우와 같이 과도적으로 변화하는 DC전압이 인가되는 경우의 전기장과 전류는 다음과 같은 Maxwell 방정식, Ohm의 법칙, 그리고 시간의 변화에 영향을 받는 연속방정식에 의하여 결정된다[2].

$$\rho = \nabla \cdot D$$

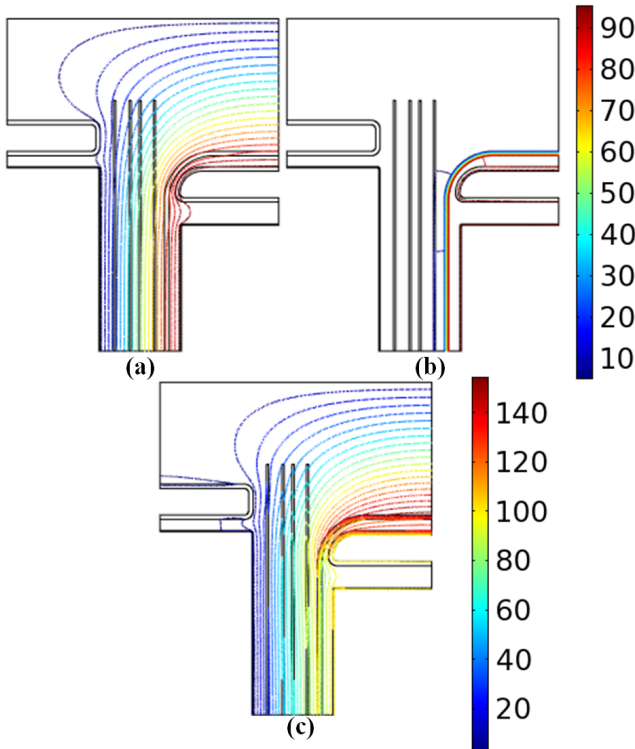
$$j = \sigma E$$

$$\nabla \cdot j + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$$

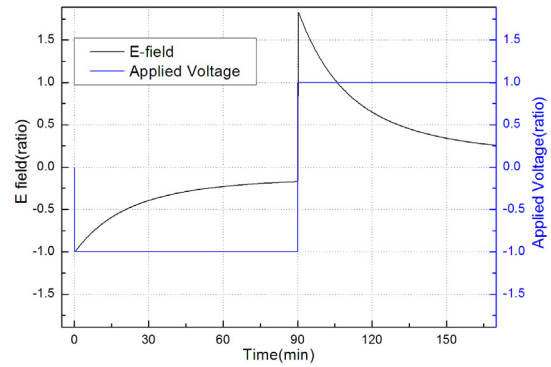
여기에서 ρ 는 전하밀도, ϵ 는 유전율, E 는 전기장, j 는 전류밀도, σ 는 전기전도율이다. 이 방정식들의 해를 구하면 DC전압이나 AC전압, 또는 DC 과도전압이 절연시스템에 인가되었을 경우의 전계와 전위 분포를 계산할 수 있다. 본 연구에서는 이 계산을 유한요소법(Finite Element Method)기반의 COMSOL Multiphysics를 사용하여 수행하였다. 이를 통하여 DC 극반전이 발생하였을 경우의 시간의 변화에 따른 전위를 구하고 그 특성을 분석하였다.

2.3 전계해석 결과 및 분석

전술된 방법을 통하여 DC 극반전 시험 파형이 절연해석 모델에 인가된 경우의 전위를 계산하고 이 결과를 그림 4에 나타내었다. 전위는 인가전압을 기준으로 %단위로 나타내었다. DC 시험전압 인가 초기인 그림 4(a)경우는 AC 전압 인가 경우에 나타나는, 전계가 절연유에 집중되는 용량성 분포(capacitive distribution)를 가지며 DC 시험전압이 인가되고 어느 정도의 시간이 지난 후인 그림 4(b)경우는 DC 정전압 인가 경우에 나타나는, 전계가 프레스보드와 절연지 등의 고체절연물에 집중되는 저항성 분포(resistive distribution)를 가진다. 이것은 다음과 같은 이유로 설명되어질 수 있다. 프레스보드, 절연유, 절연지 등의 절연물들은 모두 고유의 도전율과 유전율을 가지며 이에 따라 저항성 특성과 용량성 특성을 모두 가지게 되어, 일반적인 R-C회로의 경우와 유사하게 절연물의 경계면에 전하가 축, 방전되는 현상이 발생한다. 이 현상은 시간상수(time constant) 특성을 가지게 되므로 정상상태(steady state)가 되기 위해서는 일정 시간이 소요되어야 한다. 따라서 DC전압이 인가되었다 하더라도 즉시 DC 정전압 정상상태 경우의 전계분포를 가지게 되는 것이 아니라 초기에는 AC 정전압 정상상태 경우의



〈그림 4〉 DC극반전 시험 동안의 전위분포(인가전압 100V)
 (a) 시험전압 인가 초기($t=1\text{min}$)
 (b) 첫 번째 극반전 직전($t=90\text{min}$)
 (c) 첫 번째 극반전 직후



〈그림 5〉 특정 지점에서의 시간의 변화에 따른 전계값

전계분포를 가지다가 일정 시간이 지난 후 그러한 전계분포로 변화하게 된다. 이 시간은 고전압 부싱의 경우 10^4 초 이상이 소요되기도 하는 것으로 보고되었다[3].

또한 극반전 중의 해석 결과인 그림 4(c)는 앞의 두 상태와는 다른 특성을 가진다. 부분적으로 인가전압보다 더 높은 전위값을 가지는 부분도 존재하였으며 전계분포 형태도 중간적인 형태에 가까웠다. 이러한 현상은 DC 정상상태에서 절연물의 경계면에 축적된 전하들이 인가전압의 극성이 변화하였더라도 즉시 변화하지 못하고 시간상수 특성에 따라 어느 정도 잔존하게 되어 이것이 부유전위(floating potential)로 작용하였기 때문으로 보인다. 또한 이 축적된 전하의 양은 시간에 따라서 변화하므로 부유전위의 크기와 전계분포도 변화하게 된다. 따라서 DC 극반전 경우에서의 절연설계를 위해서는 정상상태에서의 전계해석 뿐만 아니라 과도상태에서의 전계해석도 수행하는 것이 필요하다. 그림 5에 이 절연시스템에서 전계가 강하게 집중되는 부분 중 한 점에서의 시간에 따른 전계변화를 나타내었다. 시간에 따라 전계의 세기가 변화하며, 극반전이 일어났을 경우 AC 정상상태($t \approx 0$)나 DC 정상상태($t \approx 90\text{min}$)의 경우보다 더 큰 전계값을 가지게 됨을 알 수 있다.

결과적으로 HVDC용 변압기는 고체절연물에 인가되는 전계의 세기를 고려한 형상 및 두께 설계와 과도전압 인가 시의 전계를 고려하는 것이 중요할 것으로 판단된다. 실제로 그림 4(b)의 경우 전계가 고압권선 측 최측근의 프레스보드에 대부분 집중되어 있으며, 이에 따라 절연유에서가 아닌, 프레스보드에서의 절연파괴 및 절연물 손상이 주 절연사고 원인이 될 것으로 예상된다.

3. 결 론

본 연구에서는 DC 극반전 시험조건 등과 같이, DC전압이 인가되는 경우의 변압기 절연시스템 절연특성을 분석하기 위하여 유한요소법을 이용하여 절연유-절연지-프레스보드 절연시스템에 DC 과도전압이 인가되는 경우의 시간의 변화에 따른 전위의 변화를 분석하였다. 분석 결과, 시험전압 인가 초기에는 용량성 분포 형태의, AC전압 인가 경우와 유사한 전위분포를 가지나, 시간이 경과함에 따라 DC전압 인가 경우에 나타나는 저항성 분포 형태로 변화함을 알 수 있었다. 또한 극반전이 발생한 경우에는 절연물들 간의 경계면에 존재하는 전하로 인하여 국부적으로 인가전압보다 높은 전위가 유도되고 이에 따라 AC전압이나 DC전압이 인가된 경우보다 높은 전계를 가지는 부분이 존재한다는 사실을 확인할 수 있었다. 따라서 DC전압 유입에 의한 유입변압기에서의 절연파괴를 방지하기 위해서는 절연시스템 설계 시에 기존의 AC 절연시스템 설계 시 사용하던, 얇은 고체 절연물을 적절한 위치에 설치하는 방법만이 아니라 고체절연물의 형상 및 두께와 극반전 시 인가되는 강한 전계에 대한 고려도 필요한 것으로 판단된다. 이러한 연구결과는 향후 개발될, HVDC용 변압기 절연설계에 유용하게 사용될 것으로 기대된다.

【참 고 문 헌】

- [1] JWG A2/B4-28 Report, "HVDC Transformers Design Review, Test Procedures, Ageing Evaluation and Reliability in Service", No 406, February 2010.
- [2] F.H. Kreuger, "Industrial High DC Voltage", Delft University Press, 1995.
- [3] X. Chen, P.H.F. Morshuis, J.J. Smit, G. Marquezin, A. Girodet, "Electrical Properties Calculation of HVDC Bushing", IEEE Annual Report CEIDP, pp978-981, 2010