

145kV 40kA 3상 GIS 모선의 온도상승 예측

김중경, 이지연, 정상용, 한성진
 동아대학교 전기공학과

Temperature Rise Prediction of 145kV 40kA Three-phase GIS Bus Bar

Joong-Kyoung Kim, Ji-Yeon Lee, Sang-Yong Jung, Sung-Chin Hahn
 Dept. of Elec. Eng. Dong-A University

Abstract - Many works on the temperature prediction of power apparatus have usually done by coupled magneto-thermal analysis. However, this method can not consider the internal gas or oil flow in the power apparatus. This paper proposes a new coupled magneto-thermal-flow analysis considering Navier-Stokes equations. The convection heat transfer coefficient is calculated analytically and is applied to the boundary condition to the proposed method. Temperature distribution of 145kV 40kA three-phase GIS bus bar model is obtained by coupled magneto-thermal-flow analysis and shows good agreement with the experimental data.

1. 서 론

최근 들어 우리나라의 전력수요가 경제성장과 함께 매년 증가함에 따라 에너지 저감형 고효율 및 환경 친화적인 전력기기의 수요가 급격히 증대되고 있다[1]. 국가 에너지산업의 핵심 인프라를 차지하는 전력설비의 증대에 따라 전력기기의 대용량화, 고효율화, 친환경화 등으로의 기술발전이 진행되고 있으며, 기술 후발국인 우리나라에서는 세계 선진국을 중심으로 발 빠르게 진행되고 있는 핵심 원천기술 확보, 범국가적 기술표준화, 시장 과점화 등에 대응하고자 독자적인 연구개발능력을 바탕으로 한 기술자립을 적극적으로 추진하고 있다. GIS 모선의 경우 기초 설계 파라미터들을 결정하는데 있어서 열적 제한 요소가 큰 영향을 미치므로 모선의 내부 및 외부탱크의 온도상승을 정확히 예측하는 것이 매우 중요하다[2]. 이전의 온도상승을 예측하는 방법에는 GIS 모선 모델을 제작 후 통전시험을 통하여 온도규격의 통과여부를 판단하는 방법, 대수적인 방정식을 이용하여 GIS 모선 모델을 해석하는 방법 등의 고전적인 방법을 이용하였으나, 최근에는 GIS 모선 모델의 각 부분 온도분포 예측 및 설계 파라미터들의 최적설계를 위하여 수치해석적 방법을 주로 이용하고 있다. 특히 이전 논문에서 GIS 모선의 온도상승을 예측하기 위해 전자계-열계 결합해석기법을 이용하였으나, 전자계-열계 결합해석은 GIS 모선 내부의 SF6 가스 유동이 온도상승에 미치는 영향을 고려하기 어렵다.

본 논문에서는 GIS 모선의 온도상승 뿐만 아니라 내부의 SF6 가스 유동을 예측하기 위한 전자계-열계-유동계 결합해석 기법을 제시하였다. 유한요소해석을 통하여 GIS 모선 모델의 도체 및 탱크의 손실을 계산하고, 이와 함께 동점성 계수, 열전도도, 밀도, 비열과 같은 유체의 물성치, 유체의 이동방법, 해석 모델의 형상 및 위치 등을 고려한 Nusselt number를 이용하여 열전달계수를 해석적으로 계산한다. 이를 다시 열계-유동계 지배방정식인 Navier-Stokes 방정식과 결합하여 145kV 40kA 3상 GIS 모선 모델의 온도상승 및 내부 가스유동을 예측하였다. 예측한 온도분포와 실제 145kV 40kA 3상 GIS 모선 모델의 통전시험을 통해 얻은 측정값을 비교함으로써 온도상승 예측기법의 타당성을 검증하였다.

2. 자계-열계-유동계 결합해석

2.1 자계 지배방정식

GIS 모선의 온도상승을 일으키는 전력손실은 자계해석을 통해 계산한다. GIS 모선의 주도체에 정상 교류전류가 흐를 때 자계 지배방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} (\nabla \times \vec{A}) = \vec{J}_s + \vec{J}_e = \vec{J}_s - \sigma_e \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (1)$$

여기서, \vec{J}_s 는 전원전류이고, \vec{J}_e 는 와전류이다.

이때 단위 길이당 주도체와 탱크의 전력손실은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P = \int \frac{J^2}{\sigma} dS \quad (2)$$

2.2 열계-유동계 지배방정식

GIS 모선에서 발생한 열은 전도, 복사, 대류에 의해 전달되지만 이중에서 내부의 SF6 가스와 탱크 외부의 공기 순환에 의한 자연대류가 가장 큰 비중을 차지한다. GIS 모선의 온도분포 및 내부의 SF6 가스 유동을 파악하기 위한 열계-유동계 지배방정식은 연속방정식, 운동방정식, 에너지평형방정식으로 구성된 Navier-Stokes 방정식을 동시에 풀어야한다.

2.2.1 연속방정식

질량보존법칙에 의한 GIS 모선 내부의 SF6 가스에 대한 연속방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (3)$$

여기서, ρ 는 밀도, \vec{V} 는 속도이다.

2.2.2 운동방정식

GIS 모선 내부의 SF6 가스의 내부 순환에 의한 운동방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = \rho \vec{g} - \nabla p + \mu \nabla^2 \vec{V} \quad (4)$$

여기서, \vec{g} 는 중력, p 는 압력, μ 는 점성계수이다.

2.2.3 에너지평형방정식

GIS 모선에서 발생한 열의 전도, 복사, 대류에 의해 전달될 때 에너지 평형방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\rho c_p \frac{DT}{Dt} = \nabla^2 (k T) + \mu \Phi + q' \quad (5)$$

여기서, c_p 는 정압비열, k 는 열전도도, Φ 는 소산함수, q' 는 단위체적당 발생 에너지이다.

2.3 대류 열전달계수

대류 열전달계수 h 는 고체 표면과 유체 사이에 단위 표면적당, 단위 온도차에 대한 열전달율로 정의되며, 일반적으로 대류 열전달계수는 유체의 흐름에 따라 변화한다. 본 논문에서는 동점성 계수, 열전도도, 밀도, 비열과 같은 유체의 물성치, 유체의 이동방법, 해석 모델의 형상 및 위치 등을 고려한 Nusselt number라는 무차원수를 이용하여 대류 열전달계수를 해석적으로 구한다.

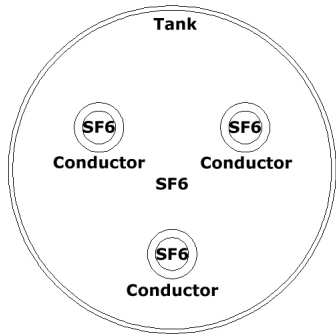
$$h = \frac{k}{L} N = 0.386 \frac{k}{L} \left(\frac{\text{Pr}}{0.861 + \text{Pr}} \right)^{1/4} (\text{Ra}_L)^{1/4} \quad (6)$$

여기서, L 은 특성길이이다. Prandtl number Pr 은 속도경계층 두께와 열경계층 두께의 비로 속도 및 열경계층의 상대적인 증가율을 나타내는 무차원수이다. Rayleigh number Ra_L 은 Grashof number와 Prandtl

number의 곱으로 경계층의 상태를 나타내는 무차원수이다.

3. 145kV 40kA 3상 GIS 모선 모델

본 논문에서 다룬 GIS 모선 모델은 145kV 40kA 3상 GIS 모선 모델로서 그림 1과 표 1에 모선 모델의 단면과 상세사양을 각각 나타내었다.



〈그림 1〉 145kV 40kA 3상 GIS 모선의 단면

〈표 1〉 145kV 40kA 3상 GIS 모선의 사양

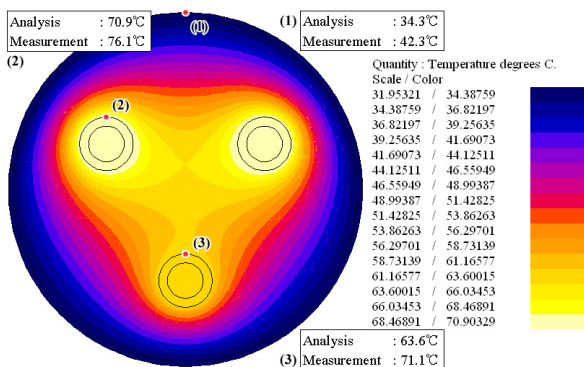
Classification	Material	Inner Diameter [mm]	Outer Diameter [mm]
Conductor	Aluminum	60	90
Tank	Aluminum	580	596

4. 결과 및 고찰

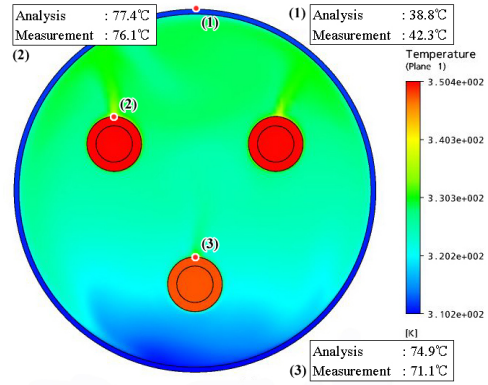
145kV 40kA 3상 GIS 모선 모델의 경우 주도체가 위쪽에 두 개, 아래쪽에 하나가 배열되어 있고 각 도체에서 발생한 열로 인하여 모선 내부의 SF6 가스가 모선 위쪽으로 상승하게 되고 이는 다시 탱크 내표면을 통해 아래쪽으로 하강한다.

그림 2는 이전 논문에서 제시한 전자계-열계 결합해석기법에 의한 GIS 모선 모델의 온도분포이며, 그림 3은 본 논문에서 제시한 모선 내부의 SF6 가스 유동이 온도상승에 미치는 영향을 고려한 전자계-열계-유동계 결합해석기법에 의한 GIS 모선 모델의 온도분포를 나타내고 있다. 이전에 제시한 전자계-열계 결합해석기법에 의한 온도분포 예측에서는 탱크의 온도가 위쪽과 아래쪽이 동일한 34.3[°C]의 분포를 가졌지만, 그림 3에서 보듯이 본 논문에서 제시한 전자계-열계-유동계 결합해석기법에 의한 온도분포 예측에서는 GIS 모선 모델의 주도체 배치에 따른 내부 SF6 가스의 유동으로 외부탱크의 경우 위쪽이 38.8[°C], 아래쪽이 37[°C]로써 위쪽과 아래쪽이 약 2[°C] 정도 온도차를 가짐을 알 수 있다.

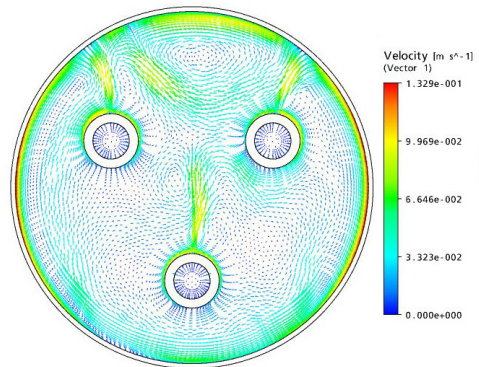
또한 그림 4는 GIS 모선 모델의 내부 SF6 가스의 속도분포를 나타내고 있다. GIS 모선 모델 위쪽에 두 개의 주도체가 배치되어 내부 SF6 가스가 모선 위쪽으로 상승하여 다시 탱크 내표면을 따라 아래쪽으로 하강함으로써 내부 SF6 가스의 속도가 탱크 양쪽 측면에서 가장 빠른 유속을 가짐을 알 수 있다.



〈그림 2〉 145kV 40kA 3상 GIS 모선의 온도분포



〈그림 3〉 145kV 40kA 3상 GIS 모선의 온도분포



〈그림 4〉 145kV 40kA 3상 GIS 모선의 속도분포

5. 결 론

본 논문에서는 GIS 모선의 온도상승 뿐만 아니라 내부의 SF6 가스 유동을 예측하기 위한 전자계-열계-유동계 결합해석 기법을 제시하였다. GIS 모선의 온도상승을 일으키는 열원인 전력손실은 각 도체의 줄손과 탱크의 와류손이 있으며, 이를 자체해석을 통해 계산하였다. 계산된 손실, 동점성계수, 열전도도, 밀도, 비열과 같은 유체의 물성치, 유체의 이동 방법, 해석 모델의 형상 및 위치 등의 입력값과 함께 Nusselt number를 이용하여 열전달계수를 해석적으로 계산하고 이를 경계조건으로 이용하였다. 이를 다시 열계-유동계 지배방정식인 Navier-Stokes 방정식과 결합함으로써 GIS 모선의 온도상승 뿐만 아니라 내부의 SF6 가스 유동을 예측하였다. 또한 145kV 40kA 3150A 3상 GIS 모선 모델에 본 논문에서 제시한 기법을 적용한 결과, 온도분포 특성이 실제 측정값과 거의 일치함으로써 온도상승 예측기법의 타당성을 검증하였다.

〈참 고 문 헌〉

- [1] H. Sadakuni, K. Sasamori, H. Hama, K. Inami, "Insulation and current carrying design for GIS", JIEE, pp.33~42, SP-96-12, 1996.
- [2] 한국전기연구원, "초고압 전력기기 기술개발을 위한 연구 계획", 통상산업부, 1997.
- [3] 이경행, "초고압 전력기기의 기술 동향", 전기학회지, 제46권 제8호, pp.23-30, 10월 1997.
- [4] W. Z Black, B. A. Bush, R. T. Coneybeer, "Steady-state and Transient Ampacity of Busbar", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 9, No. 4, pp1822-1829, October 1994.
- [5] J. K. Kim, S. C. Hahn, "Temperature Rise Prediction of EHV GIS Bus Bar by Coupled Magneto-Thermal Finite Element Method", IEEE Trans. Magnetics, Vol. 41, No. 5, pp.1636~1639, May, 2005.

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원 (R-2007-2-060) 주관으로 수행된 과제임.