

25.8kV 25kA 3상 GIS 모선의 온도상승 예측

김중경, 한성진, 오연호*, 박경엽*
 동아대학교 전기공학과, 한국전기연구원 신전력기기그룹*

Temperature Rise Prediction of 25.8kV 25kA Three-phase GIS Bus Bar

Joong Kyoung Kim, Sung Chin Hahn, Yeon Ho Oh*, Kyong Yop Park*
 Dept. of Elec. Eng. Dong-A Univ., Advanced Power Apparatus Group KERI*

Abstract - This paper presents coupled analysis between finite element method and analytic technique for predicting temperature rise of 25.8kV 25kA three-phase GIS bus bar. The power losses and temperature distribution of three-phase GIS bus bar model are analyzed by magneto-thermal finite element method. The heat transfer coefficients on the boundaries are analytically calculated by applying Nusselt number considering material constant and model geometry for the natural convection. And these are used as the input data to predict the temperature rise of three-phase GIS bus bar model by coupled magneto-thermal F.E.A. The predicted temperature of 25.8kV 25kA three-phase GIS bus bar model shows good agreement with the experimental data.

1. 서 론

산업사회의 고도화에 따른 전력수요가 최근 증가함에 따라 전력기기 에 대한 수요와 용량이 급격히 증대되고 있다. 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. 이에 초고압 GIS의 경우 차단부와 CT를 동일 용기 내에 넣거나, 차단기, 단로기, 모선 등을 3상 일괄하는 방법에 의해 소형·축소화를 시키고 있다. 또한 GIS 모선의 경우 기초설계 파라메타들을 결정하는데 있어서 열적 제한 요소가 큰 영향을 미치므로 모선의 내부 및 외부탱크의 온도상승을 정확히 예측하는 것이 매우 중요하다. 이전의 온도상승을 예측하는 방법에는 GIS 모선 모델을 제작 후 통전시험을 통하여 온도구간의 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 파라메타들의 최적설계를 위하여 수치해석적 방법을 주로 이용하고 있다.

본 논문에서는 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 유한요소해석과 결합함으로써 25.8kV 25kA 3상 GIS 모선 모델의 온도상승을 예측하였다. 예측된 온도분포와 실제 3상 GIS 모선 모델의 통전시험을 통해 얻은 측정값을 비교함으로써 온도상승 예측기법의 타당성을 검증하였다.

2. 온도분포 해석이론

2.1 정자계 지배방정식과 발생손실

3상 GIS 모선에 정상 교류전류가 통전시 지배방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

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

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

단위 길이당 도체와 탱크의 발생손실은 다음과 같이 표현할 수 있다.

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

2.2 에너지 평형방정식

열해석시 대류 열유속 \dot{q}_{conv} 과 복사 열유속 \dot{q}_{rad} 은 각각 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{q}_{conv} = h(T_s - T_\infty), \quad \dot{q}_{rad} = \epsilon \sigma (T_s^4 - T_\infty^4) \quad (3)$$

도체 및 탱크의 각 경계에서 전달되는 총 열유속 \dot{q} 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{q} = \dot{q}_{conv} + \dot{q}_{rad} = h(T_s - T_\infty) + \epsilon \sigma (T_s^4 - T_\infty^4) \quad (4)$$

여기서, 열유속 \dot{q} 는 단위면적당, 단위시간당 전달되는 열에너지로 정의되며 단위는 W/m^2 이다.

그러므로 열계 지배방정식인 에너지 평형방정식은

$$\nabla \cdot q = Q - \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (5)$$

이 된다.

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.

$$h = \frac{k}{L} Nu = 0.386 \frac{k}{L} \left(\frac{Pr}{0.861 + Pr} \right)^{1/4} (Ra_L)^{1/4} \quad (5)$$

여기서, k 는 유체 열전도도, 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. 결과 및 고찰

3.1 25.8kV 25kA 3상 GIS 모선 모델

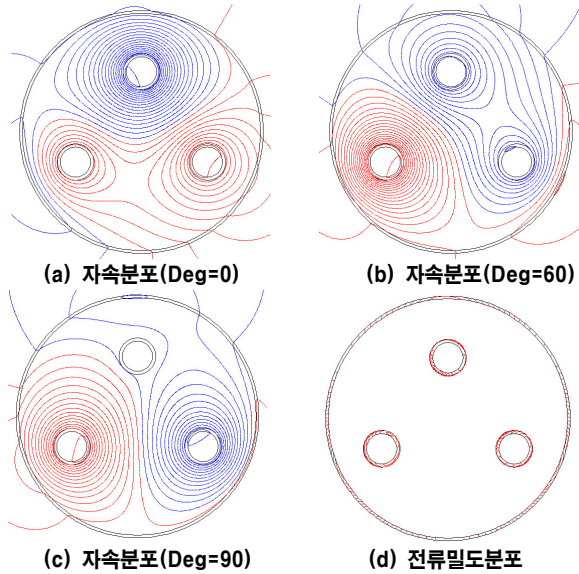
본 논문의 3상 GIS 모선은 25.8kV 25kA 2000A 3상 GIS 모선 모델로서 상세 사양은 표 1과 같다. 표에서 보듯이와 같이 도체의 재질은 알루미늄을 사용하였고 탱크의 재질은 스테인레스스틸을 사용하였다. 모선 내부의 도체는 정삼각형 배열을 하고 있다.

<표 1> 3상 GIS 모선 모델의 사양

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

3.2 25.8kV 25kA 3상 GIS 모선 자계해석

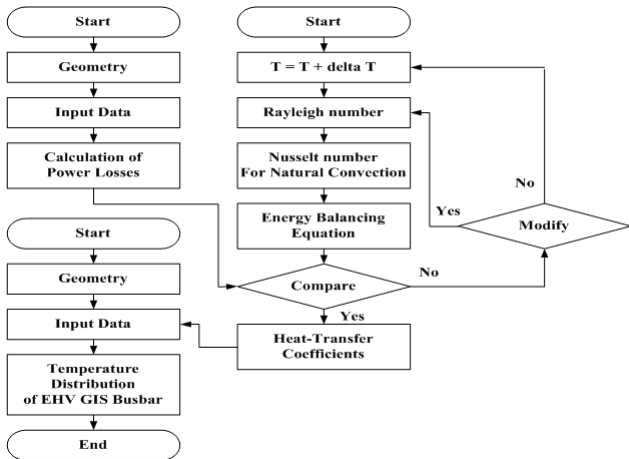
3상 GIS 모선의 도체에 정격통전전류 2000A가 흐를 때 3상 GIS 모선의 자속분포 및 전류밀도를 그림 1에 나타내었다. 그림에서 보듯이 통전전류의 위상변화에 따라 자속의 중심축이 이동하는 것을 알 수 있으며, 각 상에서 발생한 자속이 탱크의 중심에 대해 편심하여 발생하고 탱크면과 쇠교함으로써 모선의 탱크면에 와전류를 야기한다.



〈그림 1〉 3상 GIS 모선 모델의 자속분포 및 전류밀도분포

3.3 대류 열전달계수의 산정

3상 GIS 모선 모델의 온도상승을 정확히 예측하기 위하여 열해석을 할 때 모선 모델의 각 경계면(도체면, 탱크면)에 대류 열전달계수 h 를 정확히 적용해야 한다. 그림 2는 3상 GIS 모선의 온도상승을 예측하기 위한 알고리즘으로서 우선 자계해석을 통해 도체와 탱크의 손실을 구하고 식 (5)의 에너지 평형방정식을 만족할 때까지 반복하여 대류 열전달계수를 산정한다. 계산된 대류 열전달계수는 열해석시 경계면에 적용되며 유한요소법과 결합하여 3상 GIS 모선 모델의 온도분포를 예측한다.



〈그림 2〉 3상 GIS 모선의 온도상승 예측 알고리즘

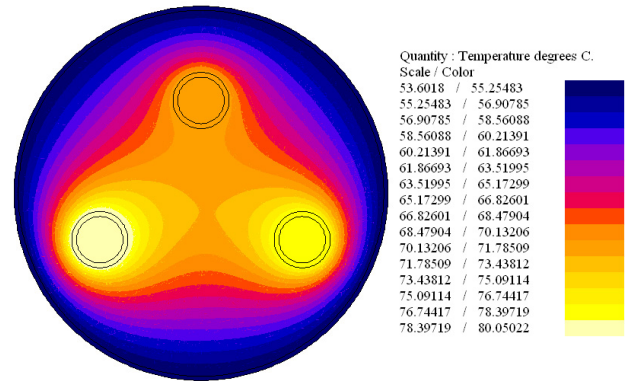
표 2는 3상 GIS 모선 모델의 발생손실과 해석적 기법을 이용하여 계산한 대류 열전달계수를 나타내었다.

〈표 2〉 3상 GIS 모선 모델의 발생손실과 대류 열전달계수

Classification	Conductor			Tank
	Phase A	Phase B	Phase C	
Power Losses [W/m]	88.54	90.41	82.81	116.65
Heat Transfer Coefficient [W/m ² °C]	5.89	7.39	5.81	3.82

3.4 25.8kV 25kA 3상 GIS 모선 열해석

25.8kV 25kA 3상 GIS 모선 모델의 경우 열원이 되는 도체가 위쪽에 하나, 아래쪽에 두개가 배열되어 있기 때문에 아래쪽의 도체에서 발생한 열로 인하여 모선 내부의 가스가 위쪽으로 상승하게 되고 이는 다시 위쪽에서 냉각되어 아래쪽으로 하강한다. 이에 본 논문에서는 표 2와 같이 각 도체 경계면에서의 대류 열전달계수를 다르게 산정하였다. 표 2의 각 도체와 탱크의 손실, 산정된 대류 열전달계수를 입력 데이터로 하여 유한요소법과 결합한 열해석을 함으로써 3상 GIS 모선 모델의 온도분포를 예측하였다. 25.8kV 25kA 2000A 3상 GIS 모선 모델의 정상상태 온도분포를 그림 3에 나타내었다. 모선 모델의 최고 온도는 도체 C상에서 80.05°C이었으며, 최저 온도는 탱크 표면에서 53.6°C로 예측되었다. 각 도체와 탱크에서 시험을 통해 실제 측정된 온도와 에너지 평형방정식을 이용해 대수적 방법으로 구한 온도와 본 논문에서 제시한 기법을 이용해 예측한 온도를 표 3에서 비교하였다. 표 3의 예측 온도를 살펴보면 본 논문에서 제시한 기법이 실제 측정 온도와 거의 일치함으로써 온도상승을 예측하기 위한 해석방법의 타당성을 검증하였다.



〈그림 3〉 3상 GIS 모선 모델의 온도분포

〈표 3〉 3상 GIS 모선 모델의 예측온도(대기온도=23.7°C)

Classification	Conductor			Tank
	Phase A	Phase B	Phase C	
Analytic Method	92.68	86.33	90.27	47.33
Coupled F.E.M	78.26	71.12	80.05	53.6
Measurement	82.9	87.1	82.6	52.4

4. 결 론

본 논문에서는 3상 GIS 모선의 온도상승을 야기시키는 열원이 되는 각 도체의 줄손과 탱크의 와류손을 자계해석을 통해 계산하였다. 계산된 손실과 동점성계수, 열전도도, 밀도, 비열과 같은 유체의 물성치, 유체의 이동 방법, 해석 모델의 형상 및 위치 등을 입력 데이터로 하여 에너지 평형방정식을 풀어 대류 열전달계수를 산정하였다. 이를 유한요소법과 결합하여 열해석을 함으로써 3상 GIS 모선의 온도상승 예측기법을 제시하였다. 또한 25.8kV 25kA 2000A 3상 GIS 모선 모델에 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] S. W. Kim, H. H. Kim, S. C. Hahn, "Coupled Finite-Element Analytic Technique for Prediction of Temperature Rise in Power Apparatus", IEEE Trans. Magnetics, Vol. 38, No. 2, pp.921~924, March, 2002.
 [3] 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.