

온도변화에 따른 저항값을 고려한 전력기기의 열해석

김승욱, 한성진, 김중경  
 동아대학교 전기공학과

Thermal Analysis of Power Apparatus Considering Resistance on Temperature Variation

S. W. Kim, S. C. Hahn, J. K. Kim  
 Dept. of Elec. Eng. Dong-A Univ.

**Abstract** - 최근 초고압 전력기기에 대한 많은 연구가 활발히 진행되고 있음에도 불구하고 통전용량에 크게 영향을 미치는 열해석에 대한 연구가 많이 부족한 실정이다. 본 논문에서는 초고압전력기기인 GIS(Gas Insulated Switchgear)의 모선에 대한 열해석을 다루었다. 해석방법은 유한요소법을 이용하여 온도상승을 예측하였다. 유한요소법은 3각형 등의 임의의 형상을 요소로서 채용할 수 있으므로 3상 모선과 같이 복잡한 형상도 표현할 수 있다. 열전달계수는 형상, 유동조건, 유체의 종류를 고려한 상관식을 이용하여 해석적으로 정확히 계산하였다. 열해석에 있어 자체해석을 통한 도체 및 탱크의 손실값 산정이 선행되어야 하는데, 이 손실값이 온도상승의 원인이 되므로 정확히 계산하여야 한다. 손실의 원인이 되는 도체 및 탱크의 저항은 온도가 상승함에 따라 비선형으로 변화하는데, 이것을 고려하여 반복적으로 계산함으로써 해석의 정확성을 높이고자 하였다. 실제 모델에 대한 온도상승 실험치와 본 논문에서 제시한 방법으로 해석한 계산치와의 비교를 통해 타당성을 입증하였다.

과 열 전달분이 열 평형상태에 있어, 일정한 온도상승값을 나타낸다.

$Q_1$ 은  $I^2R$ 로 나타내는 줄손실이고  $Q_2$ 는 와전류 및 유도 전류에 의해 발생하는 손실이다. 한편, 대류에 의한 열전달은 모선의 치수, 형상, 가스의 특성, 온도차에 등에 의해 결정되고, 복사는 모선의 치수, 형상, 방사율, 온도차에 의해 결정된다.

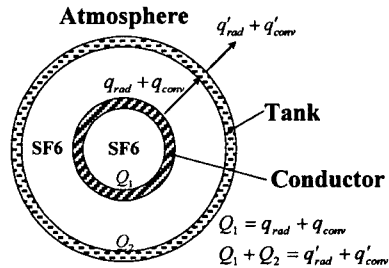


그림 1 GIS 모선의 온도상승 메카니즘

1. 서론

전력기기의 통전 용량은 온도에 의해 제한을 받으므로, 전력기기의 설계시 상승온도를 정확히 예측하는 것은 매우 중요하다[1][2]. 초고압 GIS 모선의 경우, 주요 발열원인은 주도체에서의 줄손실과 금속 탱크에서의 순환 전류 및 와전류에 의한 손실이다. 자체해석을 통해 계산된 손실값들은 열해석을 위한 입력값으로 이용된다. 도체에서 발생된 열은 대류 및 복사에 의해 탱크로 전달되며, 이 열은 다시 탱크에서의 발열분과 함께 대기로 이동하게 된다. 이때, 열해석을 위한 각 경계에서의 열전달계수를 산정해야 하며, 이 열전달 계수를 결정하는 Nusselt number는 형상, 유체의 종류 및 유동조건 등에 따라 달라지게 된다. 본 논문에서는 전력기기의 형상, 입력전류 및 온도의 변화, 물질의 변화에 따라 열전달 계수를 계산하는 프로그램을 개발하였으며, 해석적으로 구한 열전달 계수와 유한요소법의 결합기법을 이용하였다. 실제 초고압 GIS 모선에 적용한 결과 해석적 방법만을 이용했을 경우보다 실험치와 더욱 일치하였으며 전력기기의 온도상승을 예측하는 새로운 기법으로 제안한다.

2. 열해석 이론

2.1 초고압 GIS 모선의 온도상승 메카니즘

초고압 GIS와 같이 통전부가 밀폐된 상태에서의 온도상승 메카니즘은 그림 1과 같다. 도체의 발생 손실(줄손실  $Q_1$ )은 방사( $q_{rad}$ ), 및 대류( $q_{conv}$ )에 의해 금속 용기에 열이 전달되며 금속 용기에서는 위의 도체에서의 열전달분( $q_{rad} + q_{conv}$ )과 금속 용기 자신의 발생 손실( $Q_2$ )가 대기중에 방사( $q_{rad}'$ ) 및 대류( $q_{conv}'$ )에 의해 열전달된다. 연속 통전시는 이들의 발생 손실분

2.2 기본 이론 (3)

2.2.1 열전달 이론 및 에너지 평형 방정식

온도상승 해석시, 대류 열유속은

$$\bar{q} = h(T_s - T_\infty) \tag{1}$$

과 같고, 복사의 경우는

$$\bar{q} = \epsilon\sigma(T_s^4 - T_\infty^4) \tag{2}$$

와 같다. 또한, 경계에서 전달되는 총열유속은

$$\bar{q} = \bar{q}_{conv} + \bar{q}_{rad} \tag{3}$$

의 관계가 있으며, 에너지 평형방정식은

$$\nabla \cdot \bar{q} = Q - \rho C \frac{\partial T}{\partial t} \tag{4}$$

로 주어지며 온도해석시 지배방정식이 된다. 한편, 식 (4)는 체적에 대해서 다음 식과 같이 표현된다.

$$\rho CV \frac{\partial T}{\partial t} = I^2 R(T) - hA_s(T_s - T_\infty) - \epsilon\sigma A_s(T_s^4 - T_\infty^4) \tag{5}$$

따라서, 식(5)로부터 정상상태에서의 통전 전류  $I$  는

$$I = \left\{ \frac{hA_s(T_s - T_\infty) + \epsilon\sigma A_s(T_s^4 - T_\infty^4)}{R(T)} \right\}^{1/2} \quad (6)$$

와 같이 된다.

한편, 식(6)에서 전기저항은 온도의 함수로

$$R(T) = \rho_e L \left[ \frac{1 + \alpha_e(T-20)}{A_x} \right] \quad (7)$$

과 같다.

### 2.2.2 밀폐된 공간내의 대류열전달

대류 열전달은 고체인 도체 표면과 냉매인 SF<sub>6</sub> 가스 사이의 경계에서 발생한다. 실제 초고압 GIS 모선의 내부 손실에 의한 열에너지는 주로 대류 열전달에 의하여 방출된다. 대류에 의해 냉각되는 표면온도를 산출해야 하는데 Raithby와 Hollands가 제안한 원통형 실린더의 열전달을 식은 다음과 같다(4).

$$Q_{co} = \frac{2\pi K_{eff} H}{\ln(D_o/D_i)} (T_c - T_s) \quad (8-a)$$

여기서  $K_{eff}$  는 유효열전달로서 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$\frac{K_{eff}}{k} = 0.386 \left( \frac{Pr}{0.861 + Pr} \right)^{1/4} (Ra_{cyl}^*)^{1/4} \quad (8-b)$$

그리고 수평원통에 대한 레이리수(Rayleigh number)  $Ra_{cyl}^*$  는

$$Ra_{cyl}^* = \frac{\ln(D_o/D_i)}{\delta^{3/4} (D_i^{-3/5} + D_o^{-3/5})^{5/4}} Ra_{\delta}^{1/4} \quad (8-c)$$

$$Ra_{\delta} = \frac{g\beta(T_i - T_o)\delta^3}{\nu^2} Pr \quad (8-d)$$

$$\delta = \frac{1}{2}(D_o - D_i) \quad (8-e)$$

여기서  $10^2 < Ra_{cyl}^* < 10^7$  의 관계를 가진다.

### 2.2.3 도체와 탱크 사이의 복사(5)

GIS 모선은 내부 도체와 외부 탱크로 구성되며, 이들 사이에는 복사 열전달이 발생한다. 도체와 탱크의 표면을  $A_1, A_2$ , 온도를  $T_1, T_2$ , 방사율을  $\epsilon_1, \epsilon_2$ 라고 할 때, 내부에서의 복사 열전달은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Q_r = \sigma(T_1^4 - T_2^4)A_1 \left[ \frac{1}{\epsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} \left( \frac{1}{\epsilon_2} - 1 \right) \right]^{-1} \quad (9)$$

### 2.2.4 열전달 계수

GIS 모선의 경우 대류 및 복사에 의해 탱크에서 대기로 열전달이 발생하게 된다. 하지만 경계면에서의 대류열전달 계수는 열해석 파라미터중에서 접근하기가 가장 어려운 부분인데, 그 이유는 이 계수가 매우 다양한 변수를 가진 실험상수이기 때문이다. 본 논문에서는 물질상수,

해석모델의 형상 등을 고려한 Nusselt Number를 이용하여 초고압 GIS 모선을 원통으로 단순화할 때, 수평 원통에 대해 Churchill과 Chu가 제안한 자연대류의 식은 다음과 같다(6).

$$\overline{N_D} = \left\{ 0.60 + \frac{0.387 Ra_D^{1/6}}{[1 + (0.559/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \quad (10)$$

단,  $(10^{-5} < Ra_D < 10^{12})$

이식에서 Rayleigh수는 다음과 같이 정의된다.

$$Ra_D = Gr_D Pr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)D^3}{\nu^2} Pr \quad (11)$$

따라서 대류 열전달계수는

$$\overline{h_s} = \frac{k}{D} \overline{N_D} \quad (12)$$

이다.

열전달계수의 계산과정은 그림2와 같다. 그림2을 보면 우선 우측의 자체해석을 통해 도체와 탱크부의 손실을 구한 다음 좌측의 열전달계수 계산의 발열량으로 입력된다. 이 입력된 파라미터를 가지고 온도를  $\Delta t$  만큼 증가시켜 에너지평형 방정식인 식(6)에 만족할때까지 반복하게 된다. 그리고 보정값은 식(8-a)과 식(9)을 이용하여 도체부에서 탱크부까지의 열전달량의 변화량에 따라서 결정하였다. 이 과정에서 탱크부와 도체부에서의 열전달계수가 결정된다.

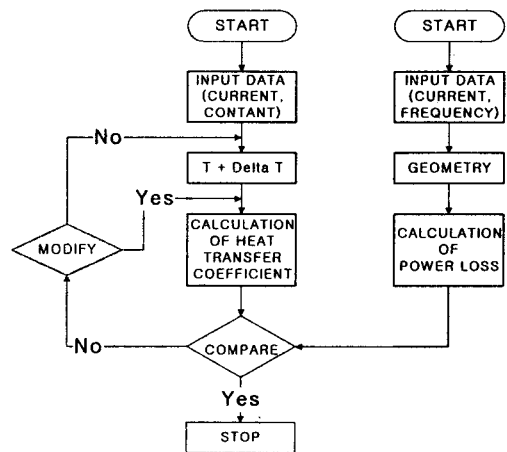


그림 2 열전달계수의 계산 과정

## 3. 해석 결과 및 검토

### 3.1 단상모선의 열해석

본 연구에서 다룬 삼상 모선은 중공(中空)도체이며 SF<sub>6</sub> 가스로 채워져 있다. 모델의 사양 및 냉각 매체의 특성 값을 표 1과 표 2에 각각 나타내었다. 표 1에서 보는바와 같이 도체는 Al 재질을 사용하였으며, 탱크는 STS를 사용하였다. 단상모선의 교류전류는 실효치 4000[A]이며, 입력주파수는 [60Hz]이다. 열해석시 열원이 되는 도체 및 탱크의 손실은 자체해석을 통해 구하였으며, 경계에서의 열전달 계수 값은 2.2.4절에서 제시한 방법으로 구하였다.

표 1. 단상모선의 사양

부품	물질	내경 [mm]	외경 [mm]	정격전류 [A]
도체	AL	85	120	4,000
탱크	STS	496	508	

표 2. 냉각매체의 특성치

	SF6	AIR
밀도 [Kg/m <sup>3</sup> ]	13.5	1.026
동점성 계수 [m <sup>2</sup> /s]	1.31E-6	19.6E-6
열전도율 [W/m·℃]	0.0153	0.0287

표 3. 손실 및 열전달 계수

부품	손실 [W/m]	열전달 계수 [W/m <sup>2</sup> ·℃]	정격전류 [A]
도체	119.8	7.5	4,000
탱크	37.1	3.2	

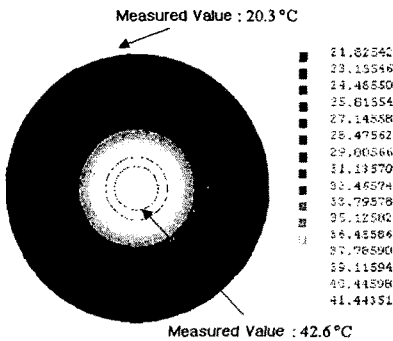


그림 3 단상모선의 온도 분포도

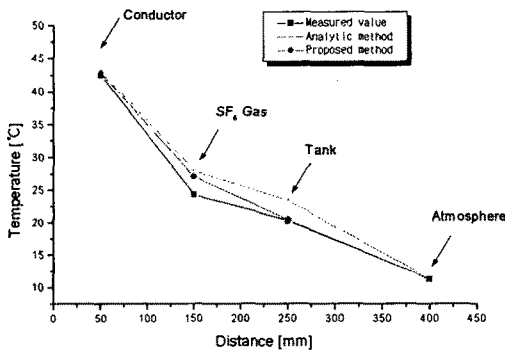


그림 4 온도 변화

그림 3은 열전달 계수를 해석적으로 구하여 유한요소법에 적용했을 때의 단상 GIS모선의 온도 분포도이다. 그림 4는 에너지 평형상태에 도달했을 때의 측정값 및 해석에 의한 각 위치에서의 온도이다. 이 결과는 열전달 계수를 해석적으로 구하여 유한요소법에 적용한 값이 식

(6)만 이용해서 구한값보다 측정값과 더욱 일치하는 것을 보여준다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 초고압 GIS 모선에서의 온도상승을 예측하기 위한 유한요소법과 해석적 방법을 결합한 기법을 이용하였다. 열전달계수 산정시, 온도에 따라 보정을 함으로써 정확성을 높였다. 열전달 계수를 산정하고 유한요소법과 결합한 방법을 실제 단상 모선에 적용한 결과 측정값과 거의 일치하는 것을 확인할 수 있었다. 제안된 온도 상승예측 방법은 온도에 의해 제약을 받는 초고압 전력기기의 온도 상승 예측기법으로 이용될 것이다.

#### [참고 문헌]

- (1)M.Khalifaed, High Voltage Engineering, Chap10, Marcel Dekker, Inc. 1990, New York
- (2)H.Sadakuni, K.Sasamori, H.Hama, K.Inami, Insulation and current carrying design for GIS, JIEE, pp.33-42 SP-96-12(1996).
- M.Necati ozisik, Heat Transfer A Basic Appr McGraw-Hill Publishing Company, 1990.
- (3)W.Z Black, B.A.Bush, Robert T. Coneybeer, Steady-state and Transient ampacity of busbar, IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 9, No.4, pp1822-1829, October 1994.
- (4)Raithby, G.D., and K. G. T. Hollands: A General Method of Obtaining Approximate Solutions to Laminar and Tubulent Free Convection Problems, in T. F. Irvine and J. P. Hartnett(eds.), Advanced in Heat Transfer, vol.11. Academic, New York, 1975, pp.265-315
- (5)Koshi Itaka, Tomoo Araki, Takushi Hara, Heat Transfer Characteristics of Gas Spacer Cables, IEEE Trans. P.A., Vol. PAS-97, No. 5, Sept/Oct 1987.
- (6)Churchill, S. W., and H. H. S. Chu, Correlating Equations for Laminar and Tubulent Free Convection from a Horizontal Cylinder, Int. J. Heat Mass Transfer, 18, 1049, 1975