

가스절연 송전선로의 허용전류에 대하여

남석현*, 심성익*, 안미경*, 박신우*, 장태인**
 LS 전선(주)*, 한국전력공사 전력연구원**

Calculation of Rating Current of Gas Insulated Transmission Line

S.H. Nam*, S.I. Sim*, M.K. Ahn*, S.W. Park*, T.I. Jang**
 LS Cable, Ltd.*, Korea Electric Power Research Institute**

Abstract - 본 논문에서는 345kV 가스절연 송전선로(GIL)의 도체, 외함 및 절연가스에 대한 열전달 특성을 검토하여 목표 허용전류를 충족하는 GIL 규격 설정 및 이의 제품 설계에 반영한 결과를 보고한다.

가 105°C이므로 도체의 상시허용온도는 이 온도로 제한된다. 또한 전력구 내에 포설된 GIL의 외함의 경우, 순시 및 점점의 안전을 위하여 IEC 규격 등에서 70°C 이하로 제한하고 있으며, 지상 설치 GIL의 경우는 80°C 이하로 제한하고 있다.

1. 서 론

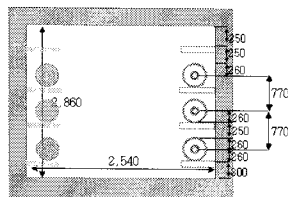
최근 북미, 유럽 등에서는 주 절연매질인 절연가스를 SF6, N2 혼합 절연 가스로 적용하여 친환경적 특성과 비용 절감을 동시에 달성하는 가스절연 송전선로에 대한 연구가 증가하고 있으며, 2000년대 초반부터는 실선로에 적용되는 추세이다. 국내에서는 아직 혼합 절연가스 및 가스절연 송전선로에 대한 연구가 미약하나, 가공송전선과 일대일 매칭이 가능한 대용량 제품인 점과 자동 재폐로가 가능한 점 등으로 인하여 연구가 시작되고 있다.

본 연구에서는 345kV 친환경 가스절연 송전선로의 허용전류를 검토하여 목표 허용전류를 충족하는 도체, 외함 및 혼합절연가스의 규격을 설정하여 연구개발에 반영하고자 한다.

2. 본 론

2.1 GIL 열모델링

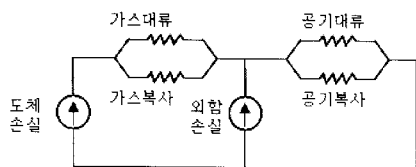
본 연구에서 검토한 GIL은 전력구 포설 345kV 4000A급 단상 GIL로서 절연가스는 SF6 20%, N2 80%의 친환경 절연가스를 사용한다. 내부 도체는 대전류가 흐를 때 표피효과에 의한 열손실을 최소화하고 무게가 가벼운 튜브 형태의 고전도성 알루미늄 합금이며, 외함은 도체와 동심원을 형성하며 도체를 둘러싼 튜브 형태의 알루미늄 합금이다. 그림 1에 본 연구에서 검토한 GIL 및 전력구 단면을 나타내었다.



〈그림 1〉 GIL 및 전력구 구조

GIL의 외함은 유기전압을 억제하기 위하여 양단접지 방식이 주로 적용되며 외함의 순환전류가 커 허용전류를 감소시키는 단점이 있는 반면, 이 순환전류로 인하여 외부로 방출되는 자계를 거의 0으로 줄여 친환경적 선로를 구성할 수 있는 장점이 있다.

GIL에서 발생하는 열손실은 도체에 흐르는 대전류로 인한 줄 손실과 외함에 흐르는 순환전류에 의한 줄 손실로 크게 나뉜다. GIL의 절연체 발열은 전력케이블과는 달리 혼합 절연 가스의 유전정접(tanδ)이 작아 무시할 수 있다. 절연 가스에서의 주된 열전달 메커니즘은 대류와 복사이며 전도 특성은 매우 작다. 또한 외함과 전력구 사이의 열전달 역시 대류와 복사이기 때문에 GIL의 온도 특성에 밀접한 관련이 있다. 그림 2에 전력구 포설 GIL의 정상상태 열 모델을 표시하였다.



〈그림 2〉 전력구 포설 GIL의 열모델

GIL의 허용전류는 도체온도와 외함온도의 한계치에 의하여 제한된다. GIL의 도체는 에폭시 절연물로 지지되며, 고내열 에폭시의 경우 내열온도

2.2 GIL 상시허용전류의 계산 수식^{[1][2][3][4]}

GIL의 상시허용전류의 계산은 전력케이블의 경우와 동일한 방식으로 식 (1)과 같이 계산된다.

$$I = \sqrt{\frac{\Delta\theta}{R_{ac}[T_1 + (1 + \lambda_1)T_4]}} \quad \dots \text{식 (1)}$$

R_{ac} : 최고 도체온도에서의 교류 도체저항 [Ω/m]

T_1 : 절연가스의 열저항 [$K \cdot m/W$]

T_4 : 전력구 공기층 열저항 [$K \cdot m/W$]

$\Delta\theta$: 주변온도 대비 도체온도 상승분 [K]

λ_1 : 도체 손실 대비 외함 손실률

2.2.1 열손실의 계산

식(1) 중 열손실과 관련 있는 파라미터는 도체교류저항 R_{ac} 과 외함 손실률 λ_1 이 있으며, 이 중 도체교류저항은 식(2)와 같이 계산된다.

$$R_{ac} = R_o[1 + a_c(\theta_e - 20)](1 + y_c) \quad \dots \text{식 (2)}$$

R_o : 20°C에서의 직류도체저항 [Ω/m]

a_c : 20°C에서의 도체 저항온도계수 [K^{-1}]

θ_e : 도체 최고 온도 [$^{\circ}C$]

y_c : 도체의 표피효과와 근접효과 계수

한편 외함 손실률 λ_1 은 각 상의 수직배열 및 양단접지 방식을 고려하여 각 상마다 아래의 수식들과 같이 계산되며 각 상의 손실률 중 가장 온도가 높은 상의 값을 적용한다.

$$\lambda_{11}' = \frac{R_S}{R_{ac}} \left[\frac{0.75P^2}{R_S^2 + P^2} + \frac{0.25Q^2}{R_S^2 + Q^2} + \frac{2R_S PQX_M}{\sqrt{3}(R_S^2 + P^2)(R_S^2 + Q^2)} \right]$$

$$\lambda_{12}' = \frac{R_S}{R_{ac}} \left[\frac{0.75P^2}{R_S^2 + P^2} + \frac{0.25Q^2}{R_S^2 + Q^2} - \frac{2R_S PQX_M}{\sqrt{3}(R_S^2 + P^2)(R_S^2 + Q^2)} \right]$$

$$\lambda_M' = \frac{R_S}{R_{ac}} \frac{Q^2}{R_S^2 + Q^2}$$

$$R_S = R_{oe}[1 + a_e(\theta_e - 20)](1 + y_e)$$

$$P = X + X_m$$

$$Q = X - X_m/3$$

λ_{11}' : Lagging phase GIL의 외함 손실률

λ_{12}' : Leading phase GIL의 외함 손실률

λ_M' : 중간 상 GIL의 외함 손실률

R_S : 외함 최고 온도에서의 교류 저항 [Ω/m]

X : 단위 길이 당 GIL의 리액턴스 [Ω/m]

X_m : 단위 길이 당 GIL의 상호 리액턴스 [Ω/m]

2.2.2 열저항의 계산

혼합절연가스의 열저항은 대류 열저항과 복사 열저항의 병렬저항으로 계산되며, 각각의 열저항은 아래와 같다.

$$T_1' = \frac{(\theta_c - \theta_e) \left[\frac{1}{\varepsilon_c} + \frac{d_c}{d_w} \left(\frac{1}{\varepsilon_e} - 1 \right) \right]}{5.67 \pi d_c \left[\left(\frac{\theta_c + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{\theta_e + 273}{100} \right)^4 \right]}$$

$$T_1'' = \frac{(\theta_c - \theta_e) \ln \left(\frac{d_w}{d_c} \right)}{K_0 \left[p \cdot (\theta_c - \theta_e) \right]^2 d_c \left[1 - \frac{d_c}{d_w} \right]^{2.167}}$$

T_1', T_1'' : 각각 혼합가스의 복사 및 대류 열저항 [Ω/m]

d_c, d_w : 각각 도체 외경, 외함 내경 [m]

$\varepsilon_c, \varepsilon_e$: 각각 도체 및 외함 내표면 열 방산율

p : 혼합가스의 절대압력 [bar abs]

$$K_0 = (V_{SF6})^{0.75} \cdot K_1 + (1 - V_{SF6})^{0.75} \cdot K_2$$

K_0, K_1, K_2 : 각각 혼합가스, SF6, N2의 대류계수

V_{SF6} : SF6 가스의 성분비

한편, 전력구의 열저항 역시 대류 열저항과 복사 열저항의 병렬저항으로 아래와 같이 계산된다.

$$T_4' = \frac{(\theta_e - \theta_{amb})}{5.67 \pi d_e f \varepsilon_3 \left[\left(\frac{\theta_e + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{\theta_{amb} + 273}{100} \right)^4 \right]}$$

$$T_4'' = \frac{1}{K_3 d_e^{0.75} (\theta_e - \theta_{amb})^{0.25}}$$

T_4', T_4'' : 각각 전력구 공기의 복사 및 대류 열저항 [Ω/m]

d_e : 외함 외경 [m] f : 열방산 저감률

ε_3 : 외함의 외표면 열 방산율

K_3 : 외함-전력구 간 대류계수

2.3 GIL 상시허용전류의 계산 방법

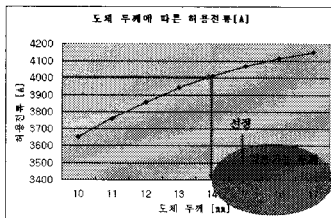
2.2절의 상시허용전류 계산 수식을 살펴보면 모든 파라메타가 도체와 외함의 온도에 의존성을 띄고 있음을 알 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 1차 계산 시 도체 및 외함의 최고 허용온도인 105°C와 70°C를 입력하여 상시허용전류를 구하고, 이 전류를 <그림 2>의 열모델에 적용하여 도체온도 및 외함 온도를 역산하였다. 2차 계산 시에는 이 역산된 온도를 바탕으로 다시 각 파라메타의 값을 구한 후 상시허용전류를 구하고, 이를 다시 <그림 2>의 열모델에 적용하여 도체 및 외함 온도를 역산하였다. 이 과정을 반복하여 이전 차수의 도체 및 외함 온도와 이후 차수의 도체 및 외함 온도의 차이가 0.001°C 이내의 오차가 생길 때 까지 반복 계산하여 상시허용전류 및 도체온도, 외함 온도를 산출할 수 있었다.

2.4 GIL 설계에의 적용

GIL 도체 외경 및 외함 내경과 혼합절연가스의 성분비 및 압력은 혼합절연가스와 예폭시 절연물의 절연 특성 및 GIL의 열신축에 따라 발생하는 이물의 거동을 억제할 수 있는 전계 범위 이내에서 설계된다.

외함의 두께는 고압력의 혼합가스의 후프 스트레스를 견딜 수 있을 정도로 충분히 두꺼워야 하며, 지락 등의 아크 발생 시 외함의 burn through가 일어나지 않는 두께 등을 추가로 고려하여야 한다. 하지만, 도체의 두께는 본 연구의 상시허용전류에 따라 결정될 수 있으며, 외함의 두께는 상시허용전류와 밀접한 관련을 갖는다. 본 연구에서는 혼합가스 및 예폭시 절연물의 절연특성과 발생 이물의 거동을 억제할 수 있는 전기적 특성 및 기타 외함과 관련된 기계적 특성을 고려하여 도체 외경은 180mm, 외함 내경은 500mm로 결정하였다. 이후 상시허용전류 4000A를 만족하는 도체 두께를 결정하기 위하여 도체 두께를 변경시키며 상시허용전류를 구한 결과를 그림 3에 표시한다.

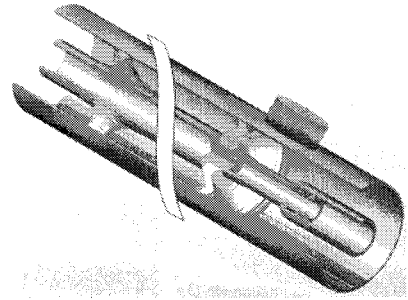


<그림 3> 도체 두께에 따른 허용전류

그림 3에서와 같이 GIL 도체의 두께는 14mm부터 4000A의 허용전류를 확보할 수 있었다. 하지만, 안전율을 적용하여 본 연구에서는 도체의 두께를 15mm로 선정하였다. 이 때의 외함의 두께는 10mm 이었다.

2.5 GIL 설계 결과

본 연구에서 도출한 GIL 설계 결과를 그림 4와 표 1에 각각 표시하였다. 그림 4는 3D 도면이며 표 1은 설계 결과를 요약한 것이다.



<그림 4> 설계된 GIL의 3D 도면

<표 1. GIL 설계 결과 요약>

설계전압	허용전류	포설환경	가스혼합비	가스압력
420kV	4065A	전력구	SF6 20%	7 bar
도체 외경	도체 두께	외함 외경	외함 두께	
180mm	15mm	520mm	10mm	

3. 결 론

본 연구를 통하여 GIL의 상시허용전류의 계산과 이를 설계에 응용하는 프로세스를 정립할 수 있었다. GIL 내부 및 외부의 열전달은 고체와는 달리 대류 및 복사에 의존하며, 이는 도체 및 외함의 온도와 밀접한 관련이 있음을 알 수 있었다. 따라서, GIL 허용전류 계산에 있어 반복 계산을 통한 이전 계산 온도와 이후 계산 온도의 오차가 최소가 되도록 하여야 함을 알 수 있었다.

본 연구를 통하여 향후 국내 도입이 가능한 345kV 4000A 급 GIL 설계를 성공적으로 수행할 수 있었다.

[참 고 문 헌]

- [1] "Calculation of the continuous rating of single core, rigid type, compressed gas insulated cables in still air with no solar radiation", Electra No.100, May 1995
- [2] Itaka, K. Tomoo, A. Takushi, "Heat transfer characteristics of gas spacer cables", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol PAS-97, No. 5, 1978
- [3] Minaguchi et al, "Heat transfer characteristics of gas-insulated transmission lines", IEEE/PES Summer Meeting, Vancouver, B.C., Canada, Jul. 1985
- [4] IEC 287, "Calculation of the continuous rating of cables(100% load factor)" First Edition, 1994