

가공송전선로의 허용전류 계산 규격의 검토

정성환 남기영 이재덕 최상봉 류희석
한국전기연구원

The Standard Comparison of Calculating the Permissible Current Carrying Capability for Overhead Transmission Line

S. H. Jeong K. Y. Nam J. D. Lee S. B. Choi H. S. Ryoo
Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract - The IEEE std 738 and Cigre Electra documents are well known as the standard of calculating the ampacity of overhead conductors. Although these two standards use the same basic heat balance concept, they use different applicable methods to calculate ampacity ratings. This paper examines the concept of basic heat balance equation and the differences of each term of basic heat balance equation.

1. 서 론

가공송전선로의 허용전류는 풍속, 풍향, 주변온도, 태양광의 조사, 가공송전선로에 흐르는 부하전류에 의해 발생하는 열과의 열적 거동 상태를 나타내는 열균형방정식으로부터 아래와 같은 정적 상태 조건으로 하여 구해오고 있다.

$$\frac{dT_c}{dt} = \frac{1}{mC_p} [q_c(t) + I_L^2 R(T_c) - q_c(t, T_c, T_a, V_w, \theta) - q_r(t, T_c, T_a)] \quad (1)$$

여기서, $q_c = 0.283 \rho_f^{0.5} D^{0.75} (T_c - T_a)^{1.25}$, 풍속=0 일 때

$$q_c = K_{windangle} \left[1.01 + 0.371 \left(\frac{D \rho_f V_w}{\mu_f} \right)^{0.52} \right] k_f (T_c - T_a), \text{ 저풍속일 때}$$

$$q_c = K_{windangle} 0.1695 \left(\frac{D \rho_f V_w}{\mu_f} \right)^{0.6} k_f (T_c - T_a), \text{ 고풍속일 때}$$

$$q_r = 0.138 D \epsilon \left[\left(\frac{T_c + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_a + 273}{100} \right)^4 \right]$$

$$q_s = \alpha Q_s \sin \left(\left[\cos^{-1} (\cos(H_c) \cos(Z_c - Z_L)) \right] \right) A'$$

T_c = 도체온도 [°C]

T_a = 주변온도(ambient temperature) [°C]

V_w, θ = 풍속과 풍향 [m/s], [° (도, degree)]

q_c = 대류에 의한 열속(heat fluxes due to convection) [W/m]

q_r = 복사에 의한 열속(heat fluxes due to radiation) [W/m]

q_s = 태양열이득(solar heat gain) [W/m]

K_{dir} = 풍향인자(wind direction factor)

mC_p = 도체의 열용량 [W s/m °C]

I_L = 도체전류 [A]

R = 도체저항 [Ω/m]

ρ_f = 공기 밀도 [kg/m³]

μ_f = 공기 점도(粘度) [kg/mh]

k_f = 공기의 열전도 계수 [W/m]

D = 도체 직경(conductor diameter) [m]

ϵ = 방사율(率)의 계수(coefficiency of emissivity)

A' = 도체의 투영된 면적(projected area of conductor) [m²]

Z_c = 태양의 방위각(azimuth of the sun) [° (도, degree)]

Z_L = 선로의 방위각(azimuth of the line) [° (도, degree)]

α = 태양광의 흡수율(solar absorptivity)

Q_s = 전체 열속(total heat flux) [W/m²]

가공송전선로의 주변 조건, 기상조건 및 도체의 허용온도가 주어지면 허용전류는 다음 식과 같이 계산된다.

$$I_{max} = \sqrt{\frac{q_c(T_c, T_a, V_w, \theta) + q_r(T_c, T_a) - q_s}{R(T_c)}} \quad (2)$$

위 (2)의 방정식은 가공송전선로를 위한 정적 상태의 열적 정격(steady state thermal rating)을 계산하기 위한 최고허용도체온도(maximum allowable conductor temperature) $T_{c,max}$ 를 계산하는데 사용된다.

2. 본 론

가공송전선로의 허용전류를 계산하는 규격은 다음의 2가지이며, 이 규격이 일반적으로 통용되고 있다.

○ IEEE std 738, "Standard for Calculating the Current Temperature Relationship of Bare Overhead Conductors", 1993

○ CIGRE ELECTRA No. 144, "Thermal Behavior of Overhead Conductors", 1997

위 두 규격은 열역학의 기본 개념이 열균형방정식을 기본으로 하고 있으며, 열균형방정식을 구성하는 각 항을 계산하는 접근이 서로 다르게 적용하고 있다. 그 결과 각각의 방법으로 계산된 전류 용량은 고려되는 환경적인 조건에 따라 10%정도 차이나게 계산될 수 있는 것으로 알려져 있다. 따라서 각 규격이 개별 열균형방정식에서의 항목들이 전류용량에 미치는 영향과 입력의 변수에 대한 서로 다른 접근법이 미치는 영향을 알 필요가 있다.

2.1 가공송전선로의 열균형방정식

IEEE와 Cigre 두 규격의 기본은 도체에 입력되는 모든 열은 방산되는 열과 균형을 이룬다는 정상상태의 열균형방정식을 근거로 하고 있다. 이런 기본 개념을 표현하면 다음과 같다.

$$P_j + P_m + P_s + P_f = P_c + P_r + P_w \quad (3)$$

여기서, P_j = Joule Heating(주울열)

P_m = Magnetic Heating(자기적 발생열)

P_s = Solar Heating(태양 발생열)

P_f = Corona Heating(코로나 발생열)

P_c = Convective Cooling(대류 냉각)

P_r = Radiative Cooling(복사 냉각)

P_w = Evaporative Cooling(증산 냉각)

이때의 단위는 [Watts/단면적] 이다.

IEEE 규격은 전류용량을 결정하는데 영향이 적은 Magnetic Heating, Corona Heating 및 Evaporative Cooling의 3개 항을 제거한 열균형방정식을 사용하고, Cigre 규격은 Corona Heating과 Evaporative Cooling을 제거한 열균형방정식을 사용하고 있다. 단위의 경우 IEEE 규격은 [Watts/foot²]를 사용하고, Cigre의 경우는 SI 단위인 [Watts/m²]를 사용하고 있다.

2.2 태양광에 의한 발생열

2.2.1 태양의 위치

태양광에 의한 발생 열(Solar Heating)을 계산하는데 가장 큰 영향을 주는 것은 도체에 대한 태양의 위치이다. 태양의 위치는 Solar Declination(해의 기울기) 혹은 당해 연도의 일별 태양의 높이(고도), 일별 시간대에 대한 태양의 시작각(hour angle) 및 위도(latitude of the line)의 함수이다. IEEE 규격은 태양의 위치를 결정하기 위하여 고도(altitude)와 방위각(azimuth)을 나타내는 표를 제시하고 있다. IEEE 규격에서 제시하는 태양의 위치를 나타내는 표는 당해 연도의 특정한 날(6월 10일과 7월 3일)과 오전 10시에서 오후 2시사이의 북반구에 위치한다는 것을 기본으로 하고 있다. 그러나 Cigre 규격은 그 해의 어느 날과 어떤 위도(latitude)에도 적용할 수 있는 기본 수식을 제공하고 있다. 그러므로 태양의 위치를 계산하는 Cigre 방법이 IEEE보다 훨씬 더 유연성이 있다. 그러나 각각의 규격에 대하여 계산된 태양의 고도(altitude)와 방위각(azimuth)은 IEEE의 환경적 제한내에서는 거의 유사하다.

2.2.2 태양의 세기

태양의 세기를 계산할 때 IEEE 규격은 태양의 직접적인 조사(direct radiation)만을 고려하고 있다. 반대로 Cigre 규격은 직접적인 조사, 반사 조사(reflected radiation) 및 혼합 조사(defuse radiation)를 함께 고려하고 있다. IEEE 규격은 대기상태와 맑음 상태, 즉 대기의 질(industrial air quality)에 따라 변동하는 것을 반영한다. Cigre 규격은 대기의 질에 대한 조정은 하지 않지만 반사 복사(reflected radiation)를 계산하기 위한 항으로서 지표면의 형태에 대한 조정이 있다는 것이 IEEE 규격과 차이가 있다. 그래서 IEEE 규격은 태양의 세기를 결정할 수 있도록 태양의 세기를 나타내는 표를 사용하고, Cigre 규격은 이를 항을 계산할 수 있는 수식을 사용하고 있다.

이와 같이 태양광에 의한 발생 열에 대한 서로 다른 접근법이 전체적으로 미치는 영향은 일반적으로 Cigre 규격으로 계산된 태양광에 의한 발생 열(Solar Heating)이 IEEE 규격보다 다소 높게(약 10~15%)계산되는 것으로 알려져 있다. 만일 사용자에게 의해 같은 태양광에 의한 발생 열 값을 계산하여야 한다면 Cigre 규격의 경우 태양 반사에 조사 항(solar reflectance term)을 조절해야 한다.

두 규격은 해발 고도에 따라 태양광 세기를 증가시킨다. Cigre 규격은 동절기보다 하절기동안의 고도에 대하여 더 큰 세기 증분(increase)을 계산한다. 고도에 대한 IEEE 규격의 태양광 세기 증분(increase)은 계절적인 변동을 고려하지 않고 있다. 전체적인 영향은 Cigre 규격이 하절기의 경우 IEEE 규격보다 다소 높은 율로 태양광 세기를 증가시키지만 동절기의 경우 낮은 비율로 세기(intensity)를 증가시킨다.

2.3. 대류냉각방정식

대류냉각은 도체 주변의 공기 흐름에 의해 나타나는 냉각 효과이다. 두 규격 다 바람에 의해 강제된 공기의 흐름(forced air flow)과 바람이 없는 자연적인 대류(natural convection)를 계산할 수 있다. 이들 냉각 효과가 가장 큰 것이 열균형방정식에서 대류냉각 항을 위하여 사용된다. IEEE 규격은 공기의 점성(air viscosity), 공기 밀도 및 열전도율 값을 표로 제시하고 있다. 반면 Cigre 규격은 대류냉각을 계산하기 위하여 수식을 제공하고 있다. 풍속이 5fps이하인 경우 Cigre 규격이 IEEE 규격보다 대류냉각에 있어서 약간 높은 값으로 계산되고, 이보다 큰 풍속일 경우 IEEE 규격이 더 높은 값으로 계산되는 것으로 알려져 있다. 대류냉각에 대한 계산 결과는 모든 풍속에 있어서 약 4%정도 차이가 나는 것으로 알려져 있다.

한편, 지표면과 평행인 가상적인 평면에 대하여 가공전선에 입사되는 바람의 각, 즉 풍각(wind angle)에 따라 두 규격은 약간의 차이가 있다. 10도 이상 풍각에 대해서 Cigre 규격은 지속적으로 IEEE 규격보다 최대 7% 높게 계산된다. 가공선로와 거의 평행 또는 10도 이하의 풍각에서는 IEEE 규격이 Cigre규격보다 대류냉각 항에서 18% 높게 계산하는 것으로 알려져 있다.

2.3. 복사냉각방정식

복사에 의한 열 손실(radiation heat loss) 즉 도체로부터 직접적으로 뿜어내는 열은 대개 강제대류와 비교해서 전체 열손실에 있어서 일부분에 지나지 않는다. 두 규격 모두 복사에 의한 열 손실을 계산하기 위하여 수식을 사용하고 있으며 그 결과는 거의 일치한다.

2.4. 자화열과 주열열 방정식

비철금속(nonferrous)인 도체의 경우 Cigre 규격은 IEEE 규격과 같은 방법으로 주열 열, 즉 I^2R 을 계산하고 있다. 철금속인 도체의 경우 Cigre 규격은 자화 열(magnetic heating)과 표피효과를 고려할 수 있도록 주열 열 항을 조절하고 있다. 이런 조절 항은 Cigre 규격으로 하여금 자화 열과 표피 효과에 의한 열 발생을 계산하게 하기 때문에 철금속 도체의 전류용량을 전체적으로 0~3%정도 감소시키는 것으로 나타난다. 감소되는 양은 도체 층의 수와 평가될 전류정격에 따라 변한다.

2.5. 코로나 열 방정식

Cigre 규격은 비록 이론적이지만 열균형방정식에 코로나에 의한 열 발생 항을 고려하고 있다. 코로나에 의한 열 발생은 잘 설계된 선로에서 대개 높은 습도와 높은 바람이 있을 때만 발생하는 조건 즉 표면전압구배(surface voltage gradients)가 있는 곳에서만 심각하기 때문에 이때 발생하는 열은 같은 기상학상의 기간에서 대개 높은 대류 및 증발 냉각 항에 의한 offset보다 더하다. 그러므로 코로나에 의한 발생 열 항은 일반적으로 전류용량을 결정할 때 무시된다.

2.6. 증발냉각

두 규격 중 Cigre 규격만이 열균형방정식에서 증발 냉각을 고려하고 있다. 증발 냉각은 일반적으로 공기로부터 생성되는 수증기 혹은 도체 주변에 작은 방울의 흐름이 있을 때는 별 중요하지 않지만 도체가 전부 젖어 있을 때에는 중요할 수 있다. CIGRE는 일반적인 증발 냉각은 무시될 수 있다고 말한다. Cigre 규격은 또한 이 항을 계산하는 방법을 제공하지 않고 있다.

3. 결 론

아래와 같은 조건에서 795kcmil 26/7 ACSR(Drake) 가공송전선로에 대하여 앞에서 언급한 열균형방정식의 항에 대한 두 규격의 비교를 살펴보면 다음과 같다.

- 주변온도 : 40℃ / 풍속 : 2fps / 풍각 : 전선에 직각
- 위도 : 30도 / 도체의 방위각 : 90도 / 대기상태 : 쾌청
- 태양광 가열 : 있음 / 태양광 혼합조사 : 0(무시)
- 복사율 : 0.5 / 흡수율 : 0.5 / 고도 : 0 ft / 지표상태 : 도심
- 날짜 : 6월10일 / 시간 : 11:00 am / 도체허용온도 : 100℃

구분	IEEE	CIGRE	편차
태양 발생열	4.31W/ft	4.96W/ft	+13.2%
자화 발생열	N/A	Ignored	-
코로나 발생열	N/A	Ignored	-
대류 냉각	25.0W/ft	26.0W/ft	+3.9%
복사 냉각	7.5W/ft	7.5W/ft	0.0%
증발 냉각	N/A	Ignored	-
전류용량	992 Amps	998 Amps	+0.6%

[참 고 문 헌]

- [1] IEEE std 738, "Standard for Calculating the Current Temperature Relationship of Bare Overhead Conductors", 1993
- [2] CIGRE ELECTRA No. 144, "Thermal Behavior of Overhead Conductors", 1997