چهارمین کنفرانس
شبکه‌های توزیع نیرو

بررسی شرط ابقاء پایداری حرارتی درکابلها واهمیت آن بویژه درمناطق گرم

سید محسن دیان
دانشکده صنعت آب و برق (شهید عباسپور)

چکیده:

عامل محدود کننده جریان نامی درجه حرارتی است که نزدیکترین لایه عایق به هادی میتواند بدون خراب شدن کسب کند تجاوز نکردن دما از درجه حرارت مجاز اهمیت حیاتی دارد. زیرا تلفات عایقی ازدرجه حرارت معینی بالاتر خیلی سریع افزایش مییابد که مقدار آن بستگی به عایق و نوع کابل دارد. بطوریکه در کابل روغنی و کاغذی ضریب توان در ۴۵ درجهٔ سانتیگراد حداقل ۰/۰۰۲ خواهد بود. وقتی درجه حرارت افزایش یافت این ضریب توان (زاویه تلفات عایقی) مجددا" بالا میرود و مربوط به تلفات RI^2 است. نتیجه میشود که شرایطی را میتوان بدست آورد که افزایش بیشتر درجه حرارت باعث تولید حرارت بیشتر از مقداری شود که انتقال مییابد. افزایش درجه حرارت کابل آنقدر ادامه می یابد تا شکست احتمالی رخ دهد. این پدیده بنام ناپایداری حرارتی معروف است.

" بررسی شرط ابقاء پایداری حرارتی در کابلها واهمیت آن بویژه در مناطق گرم "

شرح مقاله :

افزایش درجه حرارت کابل در شرایط کار بستگی به عوامل زیر دارد :

۱ ـ ایجاد حرارت در سطح خارجی کابل

۲ ـ انتقال حرارت به محیط خارج کابل یعنی تا مرز محیط اطراف

۳ ـ انتقال حرارت در این محیط یعنی دور شدن از کابل

۴ ـ روش قراردادن و نصب کابل یا کابلها

۵ ـ نوع بار یعنی بار مداوم یا بار نوبتی

در کابلها سه منبع حرارت موجود است ، تلفات RI^2 در هادی ، تلفات در عایق و تلفات در غلافهای فلزی و استحکام بخش که البته تلفات عایق فقط در کابلهای فشار خیلی قوی اهمیت دارد و تلفات غلاف فلزی که در کابل سه سیمه وجود دارد عامل تعیین کننده ای در کابل یک سیمه حاصل جریان متناوب میباشند. در کابلهای سه سیمه با مقطع بزرگ تلفات غلاف فلزی باید کمتر از ۵٪ تلفات مس باشد و اثر حرارتی آن قابل صرفنظر کردن است .

ـ ظرفیت حرارتی هادیها :

در مرحله نخست ظرفیت حرارتی هادی از طریق حداکثر درجه حرارت مجاز هادی و شرایط محیطی تعیین میگردد . شرایط محیط عوامل تعیین کننده مقدار انتشار حرارت میباشند . درجه حرارت زیاد و غیر مجاز هادی و اختلاف زیاد درجه حرارت میان هادی و محیط اطراف موجب پوسیدگی و پیری زود رس کابل میشود .

ظرفیت حرارتی هادیهای فشار قوی را باید با دقت خاصی محاسبه کرد . تلفات قدرت در سیمهای کابل باعث گرم شدن کابل میشود . چنانچه کابل با جریان متناوب (a.c) کار کند پوشش فلزی آن نیز گرم میشود مقدار حرارت تلف شده برابر است با مجموع تمام تلفات انرژی ایجاد شده در کابل . عبور حرارت از سیم تا سطح کابل از طریق هدایت و در صورتیکه کابل در هوای آزاد نصب شده باشد عبور حرارت تا هوای محیط از طریق انتقال و تشعشع صورت میگیرد . در صورتیکه کابل زیر زمین نصب شده باشد حرارت تولید شده در آن از طریق هدایت حرارتی از سطح کابل تا داخل زمین و از آنجا تا سطح زمین عبور کرده سپس به فضای اطراف میرود .

روش محاسبه مقادیر نامی کابل بر اساس قانون اهم با استفاده از واحدهای حرارتی بجای الکتریکی میباشد. این عمل امکان پذیر است . زیرا میدانهای الکتریکی و حرارتی مشابهند . خطوط هم دما و جریان حرارتی

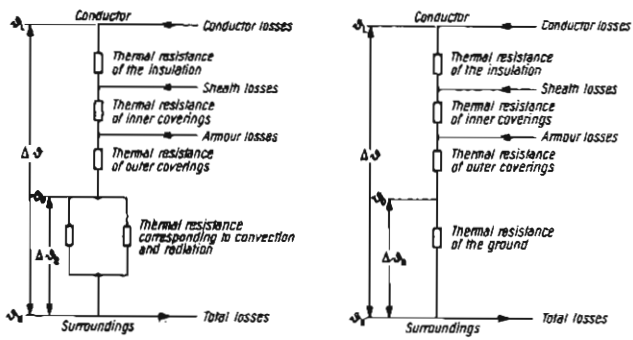
مشابه خطوط هم پتانسیل و خطوط شار در میدان الکتریکی است . باین ترتیب شکل حرارتی قانون اهم انتقال حرارت را در وسط یک لایه که در دو سطح متقابل آن اختلاف درجه حرارت موجود است بدست میدهد :

$$\text{جریان حرارتی برحسب وات حرارتی} = \frac{\text{اختلاف درجه حرارت C}}{\text{مقاومت حرارتی به اهم حرارتی}}$$

ویا

$$V = RI \qquad \text{مطابق است با} \qquad \Delta\theta = V\sum S \qquad (1)$$

جریان حرارتی در واقع عبارت است از مجموع تلفات انرژی تولید شده در کابل که این جریان برای رسیدن به هوای محیط از نقطه منبع آن باید بر مقاومت حرارتی کابل S_k و برمقاومت حرارتی هادی S_L یا برمقاومت حرارتی زمین S_E غلبه کند تا اینکه حرارت بتواند از سطح کابل عبور کرده و به محیط اطراف برسد . با توجه به تشابه موجود بین جریان حرارتی و جریان الکتریکی (معادله ۱) میتوان یک مدار معادل رسم کرده و در آن تلفات حرارتی ناشی از تولید حرارت بوسیله کابل و افزایش درجه حرارت ناشی از آنرا نشان داد .



Cable in Free Air — Cable in the Ground

Fig. 60 Equivalent Circuit Diagrams for the Heat Flow in a Cable

چنانچه کابل در هوای آزاد نصب شده باشد انتقال حرارت از طریق تشعشع و انتقال توسط دو مقاومت موازی نشان داده شده صورت میگیرد و مقاومت موازی مذکور بصورت سری با دیگر مقاومت های حرارتی باقیمانده کابل متصل شده اند تلفات حرارتی ناشی از عبور جریان (تلفات اهمی) در هادی ، غلاف فلزی ، و محافظ

تولید میشوند آنها توسط جریانهای الکتریکی که مدار را در نقاط مربوطه تغذیه میکنند نشان داده شده . درجه حرارت هادی $_L$ بعلت وجود تلفات حرارتی بمقدار افزایش می یابد . درجه حرارت سطح کابل $_o$ به مقدار a زیاد میشود مقادیر افزایش مذکور نسبت به درجه حرارت محیط $_u$ سنجیده میشوند . با در نظر گرفتن معادله تلفات اهمی زیر :

$$V = nI^2 R_w \cdot 10^{-3} \quad W/m$$

و بااستفاده از معادله ۱ ظرفیت حرارتی یک کابل نصب شده در هوای آزاد بدست میآید .

$$I = \sqrt{\frac{\Delta\theta \times 10^5}{nR_w (S_k + S_L)}}$$

که در آن :

$\Delta\theta$ = افزایش درجه حرارت سیم نسبت به محیط اطراف برحسب درجه سانتیگراد ($^\circ C$)

n = تعداد هادیهای حامل جریان

R = مقاومت موثر هادی در درجه حرارت کار بر حسب اهم در کیلومتر (Ω /Km)

S_k = مقاومت حرارتی موهومی کابل بر حسب $\left(\frac{^\circ C \cdot Cm}{W}\right)$

S_L = مقاومت حرارتی هوا بر حسب $\frac{^\circ C \cdot Cm}{W}$

برای بدست آوردن مقاومت موثر R از روش زیر استفاده میشود .

$$R_w = R + \Delta R \quad \Omega/Km$$

که R = مقاومت در جریان مستقیم d.c برای درجه حرارت کار و مقاومت اضافی برابر است با :

$$\Delta R = R\left[y + y_1 + (1 + y + y_1)(\lambda + \lambda_1)\right] \quad \Omega/Km$$

مقاومت اضافی عبارت است از افزایش مقاومت هادی ناشی از وجود تلفات وابسته به عبور جریان متناوب این تلفات در سیم مدار جریان متناوب ایجاد میشوند و علل وجود آنها بشرح زیر است :

۱ــ اثر پوستی (y) ۲ــ اثر همجواری (y_1) ۳ــ جریانهای القائی و دواردر غلاف فلزی (λ) .

۴ ـ جریانهای دوار و معکوس شدن جهت جریان در محافظ (λ_1) (armour)

بنابراین فرمول زیر برای افزایش درجه حرارت هادی بدست میآید .

$$\Delta\theta = nI^2R(1+y+y_1)\left\{S_{is}+(1+\lambda)S_{ci}+(1+\lambda+\lambda_1)(S_{ca}+S_L)\right\} \quad {}^{o}c$$

و برای مقاومت حرارتی کابل داریم :

$$S_k = S_{is} + S_{ci} + S_{ca} \qquad \frac{{}^{o}c \cdot cm}{W}$$

که در آن :

S_k = مقاومت حرارتی کابل

S_{is} = مقاومت حرارتی عایق

S_{ci} = مقاومت حرارتی پوشش محافظ داخلی

S_{ca} = مقاومت حرارتی پوشش محافظ خارجی

مقاومت حرارتی اجسام فلزی ناچیز و قابل اغماض است . و بااستفاده ازمعادله های فوق مقاومت حرارتی موهومی بشرح زیر بدست میآید :

$$S'_k = \frac{S_{is}+(1+\lambda)S_{ci}}{1+\lambda+\lambda_1} + S_{ca} \qquad \frac{{}^{o}c \cdot cm}{W}$$

و به همین ترتیب میتوان ظرفیت حرارتی هادی I_E برای کابل نصب شده در زمین و با نوشتن مقاومت حرارتی S_E بجای مقاومت حرارتی هوا S_L در فرمولهای فوق بدست آورد .

بطور کلی ظرفیت حرارتی کابل به عوامل زیر بستگی دارد :

ـ مقاومت هادی و تلفات ناشی از عبور جریان (تلفات اهمی)

ـ مقاومت حرارتی کابل

ـ درجه حرارت هادی و درجه حرارت محیط

ـ شرایط نصب کابل (در هوای آزاد یا در زمین)

عموما " کابلهای با کاغذ آغشته مقدار نامی جریان بزرگی دارند در ولتاژهای پائین تر کابلهای لاستیکی و پلاستیکی شرایط یکسانی دارند هرچند الزاما " با یک حدود مساوی بکار نمیروند . غلافهای خارجی عملا " اثر قابل ملاحظه ای بر ظرفیت حمل جریان کابل دارند . غلافهای محکم کننده اضافی و غلاف محافظ سربی کابل سه سیمه یا چهار سیمه ولتاژ کم برای کشیدن داخل مجراهائی در نظر گرفته شده تا جریان نامی آنرا حدود ۲۰٪ با تعبیه سطح تشعشع بزرگتر بالا برد . وقتی کابلها بطور مستقیم در زمین قرارداده شوندبزرگترین اختلاف در وضعیت رخ میدهد . حرارت که به سطح خارجی کابل میرسد باید از آن انتقال یابد . روش محاسبه انتقال حرارت مشابه تعیین حرارت داخلی کابل است . مقاومت حرارتی خاک در قسمتهای مختلف مسیر کابل را تعیین کرده و سپس مقادیر نامی کابل را در نقاط مختلف محاسبه مینمائیم . اگر قسمتهای معینی از خاک بطور طبیعی عایق حرارت باشد سطح مقطع هادی را در چنین نقاطی باید افزایش داد تا از تلفات ناشی از عبور جریان بوجود نیاید . این امر مخصوصا " در حالتی مهم است که کابلها با فشار خیلی قوی و گران بوده و نقشه برداری از مسیر پیشنهادی لازم میباشد .

زمین مرطوب بهترین شرایط را برای گذاشتن کابل فراهم میکند هرچند در موقع نصب و قراردادن کابلها با مشکل روبرو میشویم خاک خشک بدون گردش هوا بدترین شرایط را دارد . مانند مقاومت حرارتی درجه‌حرارت طبیعی خاک نیز باید در نظر گرفته شود . اندازه گیری درجه حرارت محیط در همه احوال امکان پذیر نیست . درجه حرارت را باید بارها اندازه گیری کرد . درجه حرارت فقط چندین روز در سال میتواند از درجه حرارت مورد استفاده در محاسبه تجاوز نماید یا ساعات کمی در یک روز .

شکل ۲ متوسط درجه حرارت زمین برای چند سال را نشان میدهد .

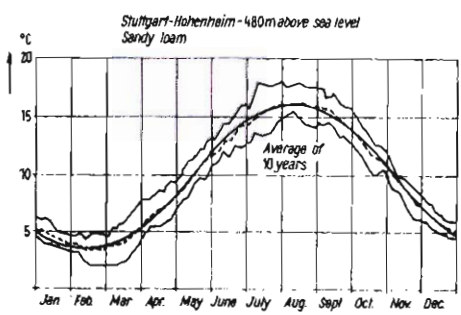


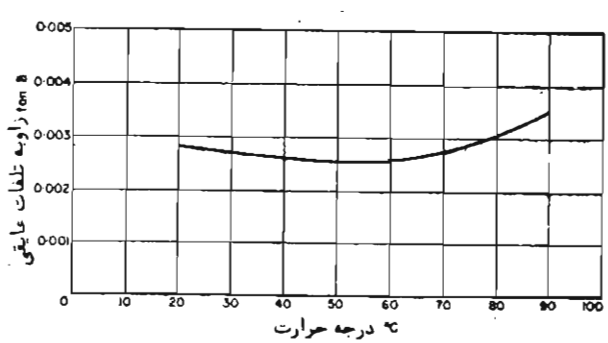
Fig. 61 Ground Temperature at a Depth of 1 m (Mean and Extreme Values)

تشابه تعدادی از کابلها اثر قابل ملاحظه ای بر مقادیر نامی آنها دارد . مقدار حرارت انتقال یافته متناسب با تعداد کابلهاست ولی تعداد مسیرهای آزادی که حرارت میتواند از طریق آنها به زمین یا هوا انتقال یابد کاهش می یابد . کابلهائی که بطور مستقیم کشیده شده یا داخل کانال قرار دارند و دائما " تحت بارند تمام محلهای مجاور احاطه کننده کابل درجه حرارت ثابتی که کمی بالاتر از حد عادی است کسب میکند . در نتیجه مقادیر نامی کابل تحت بار باید با این نکات تنظیم شود . تغییر در شرایط محیط مانند افزایش شبکه ها ، تغییر در شرایط محلی لازم میآید که کابل را با ظرفیت کمتر طرح کرد .

جائی که کابلها در هوای آزاد کشیده میشوند لازمست برای جلوگیری از تابش اشعه مستقیم خورشید بدون محدود شدن تهویه کابل به پوشش حفاظتی مجهز شود . اگر این امر ممکن نباشد درجه حرارت محیط را باید بالاتر فرض کرد .

وقتی اندازه کابل تنها با توجه به افت ولتاژ تعیین میشود در نظر گرفتن عوامل فوق لزوم کمتری دارد اما جائی که معیار تعیین سطح مقطع کابل جریان بار است هر یک از عوامل فوق را باید در نظر گرفت .

عوامل محدود کننده جریان نامی درجه حرارتی است که نزدیکترین لایه عایق به هادی میتواند بدون خراب شدن کسب کند . تجاوز نکردن دما از درجه حرارت مجاز اهمیت حیاتی دارد . زیرا تلفات عایقی ازدرجه حرارت معینی بالاتر خیلی سریع افزایش می‌یابد که مقدار آن بستگی به عایق و نوع کابل دارد . بطوریکه در کابل روغنی و کاغذی ضریب توان در ۴۵ درجه سانتیگراد حداقل 0.002 خواهد بود . وقتی درجه حرارت پائین رود ضریب توانی ($tg\delta$) قدری افزایش یافته و در ۱۵ درجهٔ سانتیگراد به 0.003 خواهد رسید . درجه حرارت با کاهش بار کم میشود و در نتیجه تلفات کل کابل پائین میآید .

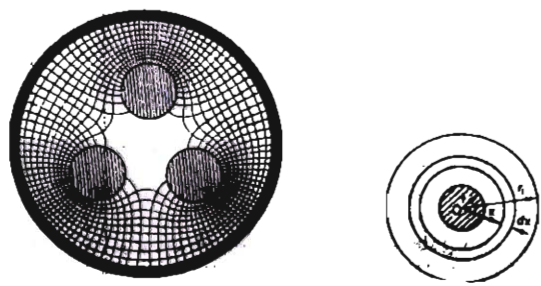


شکل (۳) مشخصه زاویه تلفات عایقی (ضریب توان) بر حسب درجه حرارت

وقتی درجه حرارت افزایش یافت ضریب توان مجددا " بالا میرود و در ۹۰ درجهٔ سانتیگراد به 0.004 میرسد . این چون مربوط به افزایش افت RI^2 است نتیجه میشود که شرایطی را میتوان بدست آورد کـــه افزایش بیشتر درجه حرارت باعث تولید حرارت بیشتر از مقداری شود که انتقال می یابد . افزایش درجـــه حرارت کابل سپس ادامه می یابد تا شکست احتمالی رخ دهد . این پدیده بنام ناپایداری حرارتی معـــروف است . بعنوان مثال مشخصه ضریب توان ــ درجه حرارت کابل سه سیمه آغشته تحت فشار ۱۳۲ کیلوولـــت در شکل فوق نشان داده شده است .

تعیین مقادیر نامی کابل یک سیمه

اگر در شکل (۴) r = شعاع هسته (هادی) و r_1 = شعـاع خـارجـــی عـــایـــــــق و g_1= مقاومت مخصوص حرارتی عایق باشد مقاومت حرارتی یک حلقه دایره ای به ضخامت d_x در شعـاع X



خطوط جریان حرارتی و خطوط هم پتانسیل در کابـل ســه فـاز با عایـق همگـــن

برابر است با : اهم حرارتی بر متر $= \frac{g_1 d_x}{2\pi x}$ بنابراین مقاومت کل حرارتی هر متر طول خواهد شد .

$$S_1 = \int_r^{r_1} \frac{g_1}{2\pi} \cdot \frac{d_x}{x} = \frac{g_1}{2\pi} \cdot \log_e \left(\frac{r_1}{r}\right) \qquad \text{اهم حرارتی / m}$$

کابل سه سیمه :

برای کابلـهای سه سیمه بعلت شکل میدان حرارتی محاسبات پیچیده تر است . برای کابل کمربندی فرمولی توسط سیمون از تجربه بدست آمده که نتایج نسبتا " دقیقی میدهد .

$$S_1 = \frac{g_1}{6\pi} \left\{ 0.85 + \frac{0.2t}{T} \right\} \log_e \left\{ \left(4.5 - \frac{1.1t}{T}\right) \left(\frac{T + t}{r}\right) + 1 \right\}$$

که در آن t = ضخامت عایق کمربندی

T = ضخامت عایق هادی و r شعاع هادی

پوشش محافظ :

چون این پوشش به شکل استوانه است فرمول محاسبه آن مشابه کابل یک سیمه است :

$$S_2 = \frac{g_2}{2\pi} \log_e \frac{r_3 + \frac{A}{2}}{r_2 + \frac{A}{2}}$$

m/ اهم حرارتی

که در آن r_3 = شعاع خارجی پوشش کابل و r_2: شعاع خارجی غلاف سربی و A = ضخامت زره

g_2 = مقاومت حرارتی غلاف داخلی و خارجی که معمولا " در حدود ۵ است .

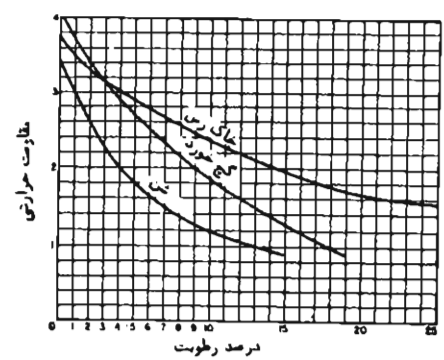
مقاومت حرارتی زمین :

مقاومت حرارتی خاک بستگی به نوع خاک و میزان رطوبت آن دارد که با منحنی زیر نشان داده شده است . مقاومت حرارتی با فرض اینکه سطح زمین صفحه هم دما بوده و زمین نیز همگن فرض شود با روشی مشابه محاسبه ظرفیت یک خط هوائی نسبت به زمین بدست میآید :

$$S_3 = \frac{g_3}{2\pi} \cdot \log_e \frac{2L}{r_3}$$

L = عمق محور کابل در زیر زمین است .

به تجربه مشاهده شده است که مقدار g_3 تعیین شده در آزمایشگاه بالاتر از اندازه گیری مستقیم بوده و بنابراین ترجیح داده میشود در صورت امکان در محل سنجش عملی g_3 را انجام داد .



شکل (۵) مقاومت حرارتی خاک بر حسب میزان رطوبت

نتیجه گیری :

وقتی مقاومت حرارتی معلوم باشد ، امکان محاسبه جریان که درجه حرارت عادی را تا مقدار حداکثر مجازش افزایش میدهدوجود دارد . این جریان مقدار نامی جریان کابل در شرایط معین و تحت بار دائمی است با مدت بارگیری کابل به اندازه ای است که شرایط حرارتی پایداری حاصل میشود . اگر از تلفات عایق صرفنظر کنیم عایق کابل حرارت ناشی از هادی را عبور میدهد در حالی که غلافهای داخلی و خارجی گرمای حاصله از تلفات پوشش ها را نیز باید عبور دهد . اثر تلفات عایقی در مورد ولتاژهای ۶۳ کیلوولت و بالاتر قابل اغماض نیست . تلفات عایقی تا زمانی که جریان عبوری باعث افزایش درجه حرارت عایق نشود مستقل از جریان بار میباشد .

شرط ابقاء پایداری حرارتی این است که گرمای اضافی ناشی از ازدیاد تلفات عایقی نباید با درجه حرارت سریعتر از حرارت انتقال یافته افزایش یابد . از این رو پایداری میزان قابل توجهی به مقاومت حرارتی خارجی بستگی دارد و برای کابلهای فشار خیلی قوی لازم است که مقدار مقاومت حرارتی زمین (S_3) را بطور تجربی در طول مسیر کابل تعیین کرد .

گرچه عوامل بسیاری را در طرح کابلها باید در نظر گرفت اما تنها یک عامل بحرانی مورد توجه میباشد این عامل بحرانی طرح برحسب حدود ولتاژ بترتیب زیر تعیین میگردد ، تا ۳۳ کیلوولت یونیزاسیون و از ۳۳ تا ۱۳۲ کیلو ولت استقامت در مقابل ضربه و برای بالاتر از ۱۳۲ کیلوولت پایداری حرارتی ، بنابراین در ولتاژ بالاتر از ۱۳۲ کیلو ولت ولتاژ ضربه ای که بطور آزمایشی میتوان اعمال کرد به ولتاژ کابل بستگی ندارد و برای این سطح ولتاژ طرح اقتصادی غیر ممکن است . در اینحالت ناپایداری حرارتی بعنوان معیار بکار میرود زیرا ضخامت عایق برای این امر کافی است .

مأخذ :

Power cables and their application

by Lother Heinhold