

Determining Acceptable Region for Thermal Capacity of Overhead Transmission Lines by Data-Driven Method

Ali Beiranvand¹, Reza SoltanAli², Hamid Safaee Sharif³

¹ PhD Student, Bakhtar Regional Electricity Company, Arak, Iran
beiran87@gmail.com

² MSc, Bakhtar Regional Electricity Company, Arak, Iran
r.soltanali56@gmail.com

³ MSc, Bakhtar Regional Electricity Company, Arak, Iran
hamid_safaee@hahoo.com

Abstract:

In recent years, due to the increasing demand for electricity, the transfer of this energy from the production points to the consumption centers must be carried out through transmission lines as the vital arteries of the electricity industry. Transmission lines have limited transmission capacities. One of the limitations of energy transmission by such equipment is their thermal capacity, which is a function of various environmental factors and the number and type of conductors used. In order to prevent premature wear of conductors, it is necessary to accurately determine the acceptable range of loading of transmission line conductors for different ambient temperatures. In this paper, in a data-driven manner, the acceptable area related to the thermal capacity of lines is determined by identifying active boundaries, and it is shown that the activated boundary in this region, which is in the form of a line equation, can be a very good approximation for determining the thermal capacity with respect to different ambient temperatures. The results obtained from the simulations show that by using a proposed heuristic algorithm, the heat capacity of each typical conductor can be obtained with a very good approximation using a linear relationship based on ambient temperature. It is also shown that the results obtained from the proposed method have a very small error compared to the exact values, and by using this method, there is no need to perform very complex calculations in the exact method.

Keywords: Overhead transmission lines, thermal capacity, heuristic algorithm, acceptable region.

Article Type: Research

Received: 28. 08. 2024

Revised: 27. 07. 2025

Accepted: 16. 08. 2025

Corresponding author: A. Beiranvand

Corresponding author's address: Imam Khomeini Square–Imam Ali Highway, Bakhtar Regional Electricity Company, Arak, Iran



1. Motivation of the work

Today, with the increasing use of clean electric energy and the growth of large industries in recent decades, the demand for electricity production, transmission, and consumption has increased sharply. Due to the limited capacity of energy transmission lines, this energy transmission has sometimes faced problems, referred to as congestion, which must be managed. For this purpose, it is necessary to determine the acceptable area for the thermal capacity of the lines.

2. Contributions

In past research, attempts have been made to accurately determine the capacity of overhead transmission lines based on existing methods and standards. Given the high complexity of the equations in these methods, it would be difficult to quickly determine and estimate the thermal capacity of lines without using a computer. In this paper, an innovative method using a data-driven approach has been employed to determine the acceptable region of thermal capacity and also to obtain a linear relationship between ambient temperature and thermal capacity.

3. Procedures

In this paper, the following two objectives are pursued using sample data.

1-To determine the acceptable area for the thermal capacity of lines based on ambient temperature changes.

2-Using sample data, a linear relationship is obtained between the power or thermal capacity changes of lines and the ambient temperature changes relative to the base values (temperature and capacity). In other words, using sample data, the relationship between ambient temperature and the thermal capacity of lines is defined using a linear equation.

In this paper, the thermal capacity of transmission lines is first defined, and then, based on authoritative references such as IEEE 738, the thermal capacity of conductors is modeled and determined. A heuristic algorithm is presented to determine the acceptable area for the thermal capacity of lines, and finally, using a numerical example, a comparison between the exact method and the method proposed in this paper will be made.

4. Findings

In this paper, using a heuristic algorithm and sample data, a linear relationship between ambient temperature and the thermal capacity of a typical conductor (ACSR CANARY) was obtained, which has an error percentage of about 0.42% compared to its exact value, indicating the very good accuracy of the proposed algorithm for determining the linear relationship between thermal capacity and ambient temperature.

5. Conclusion

In this paper, using a proposed heuristic algorithm and observed data Points (ODPs), in addition to obtaining a linear relationship between changes in the thermal capacity of lines and changes in ambient temperature, the

acceptable region related to the thermal capacity of the relevant line was also determined. It was shown that the linear relationship obtained between changes in thermal capacity and ambient temperature is the same active boundary for the acceptable region. The proposed method, due to the high accuracy of its results and the simplicity of performing calculations, can be very useful for power system operators and transmission line engineers to monitor the instantaneous capacity of lines and the power passing through them, and to control the load flowing through the lines during peak network times according to their instantaneous capacity.

تعیین ناحیه قابل قبول برای ظرفیت حرارتی خطوط انتقال هوایی برق به صورت داده محور

علی بیرانوند^۱، رضا سلطانی^۲، حمید صفایی شریف^۳

۱- دانشجوی دکتری - شرکت برق منطقه‌ای باختر، اراک-ایران

beiran87@gmail.com

۲- کارشناسی ارشد - شرکت برق منطقه‌ای باختر، اراک-ایران

r.soltanali56@gmail.com

۳- کارشناسی ارشد - شرکت برق منطقه‌ای باختر، اراک-ایران

hamid_safae@yahoo.com

چکیده: در سال‌های اخیر به دلیل افزایش تقاضا برای مصرف برق، انتقال این انرژی از سمت نقاط تولید به سمت مراکز مصرف بایستی از طریق خطوط انتقال به عنوان شریان‌های حیاتی صنعت برق انجام شود. خطوط انتقال دارای ظرفیت‌های انتقال محدودی هستند. یکی از محدودیت‌های انتقال انرژی توسط این گونه تجهیزات، ظرفیت حرارتی آنها است که تابع عوامل مختلف محیطی و تعداد و نوع هادی‌های مورد استفاده در آن است. به منظور جلوگیری از فرسودگی زود هنگام هادی‌ها لازم است محدوده قابل قبول بارگذاری هادی‌های خطوط انتقال به ازای دماهای مختلف محیط به صورت دقیق تعیین شود. در این مقاله، به صورت داده-محور، ناحیه قابل قبول مربوط به ظرفیت حرارتی خطوط با تعیین مرزهای فعال برای آن تعیین شده و نشان داده می‌شود که مرز فعال شده در این ناحیه که به صورت معادله یک خط است می‌تواند تقریب بسیار خوبی برای تعیین ظرفیت حرارتی برحسب دماهای مختلف محیط باشد. نتایج به دست آمده حاصل از شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که با استفاده از یک الگوریتم ابتکاری پیشنهادی، می‌توان ظرفیت حرارتی هر هادی نوعی را با تقریب بسیار خوبی با استفاده از یک رابطه خطی برحسب دمای محیط به دست آورد و همچنین، نشان داده می‌شود که نتایج حاصل از روش پیشنهادی دارای خطای بسیار جزئی نسبت به مقادیر دقیق است و با استفاده از این روش، نیازی به انجام محاسبات بسیار پیچیده در روش دقیق نیست.

کلمات کلیدی: خطوط انتقال هوایی، ظرفیت حرارتی، الگوریتم ابتکاری تعیین مرز فعال، تعیین ناحیه قابل قبول مربوطه به ظرفیت حرارتی

نوع مقاله: پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۰۷

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۵/۰۵

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۲۵

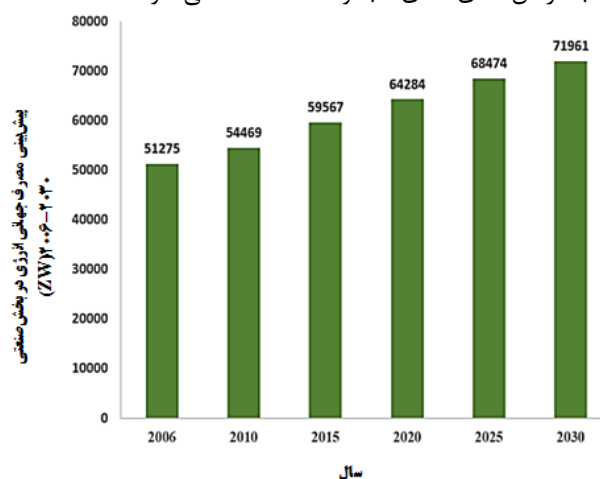
نام نویسنده‌ی مسئول: علی بیرانوند

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - اراک - میدان امام خمینی (ره) - بزرگراه امام علی (ع) - جنب پل راه‌آهن - شرکت برق منطقه‌ای باختر

۱- مقدمه

خطوط انتقال نیروی برق، یکی از اجزای اصلی شبکه‌های برق هستند که وظیفه اصلی آنها انتقال انرژی الکتریکی از سمت مراکز تولید به سمت نقاط مصرف است. با فراگیر شدن استفاده از انرژی پاک الکتریکی و همچنین رشد روزافزون صنایع بزرگ در دهه‌های اخیر، تقاضا برای تولید، انتقال و مصرف برق به شدت افزایش یافته است. به دلیل دور بودن مراکز تولید برق (نیروگاه‌ها) از مراکز مصرف، این انرژی بایستی از طریق خطوط انتقال جابجا شود. از آنجا که در برخی از نقاط جهان، سرمایه‌گذاری در بخش صنعت برق همگام با رشد مصرف نبوده است (به خصوص در بخش انتقال و تولید)، به دلیل محدودیت ظرفیت انتقال انرژی مربوط به خطوط، گاهی این انتقال انرژی با مشکلاتی روبرو بوده است که از آن به عنوان پرشدگی یا تراکم^۱ یاد می‌شود و بایستی مدیریت شود [۱].

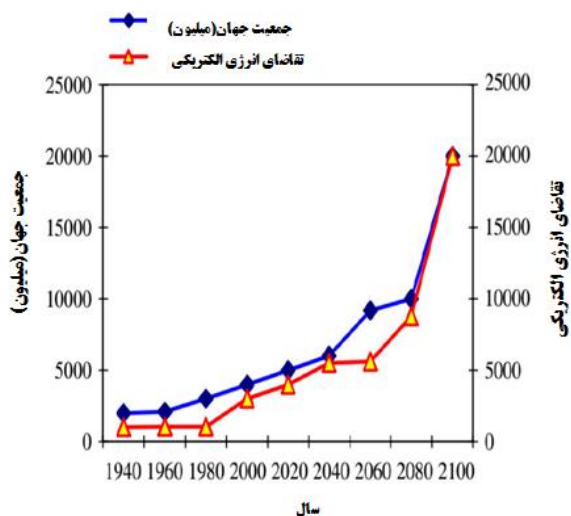
مطابق [۲]، میزان رشد جمعیت جهان و میزان رشد مصرف انرژی الکتریکی در بخش صنایع به صورت شکل (۱) و شکل (۲) است و نشان‌دهنده رشد سریع تقاضا برای انرژی الکتریکی است و این مواجهه با رشد و تقاضا نیازمند آن است که خطوط انتقال هوایی دارای قابلیت بیشتری جهت انتقال انرژی باشند. البته یادآور می‌شود که این محدودیت‌ها صرفاً به خاطر پایین بودن ظرفیت انتقال اتفاق نمی‌افتد. این موضوع می‌تواند به دلیل وقوع پیشامدی در شبکه همانند خروج ناخواسته خط (یا خطوطی) و یا منابع تولید اتفاق بیفتد. هر کدام از این دلایل می‌تواند باعث بالا رفتن توان عبوری از خطوط و به دنبال آن، بالا رفتن دمای هادی‌ها به واسطه تلفات اهمی شود.



شکل (۱): تخمین تقاضای انرژی در بخش صنعت [۲]

مطابق [۳-۴]، امروزه نیاز کلی در جهان برای استفاده حداکثری از زیرساخت‌های صنعت برق وجود دارد که به آنها اجازه می‌دهد به منظور افزایش حداکثر توان انتقالی، در دماها و جریان‌های بالاتری بهره‌برداری شوند. در خطوطی که به صورت حد حرارتی محدود شده‌اند، حداکثر توانی که می‌تواند انتقال یابد به وسیله‌ی دمای مجاز نهایی و قابل قبول هادی محدود می‌شود که نباید از آن تخطی نماید زیرا تخطی از این دما باعث ایجاد تغییرات اساسی در فواصل مجاز هادی تا عوارض در زیر و حریم خطوط

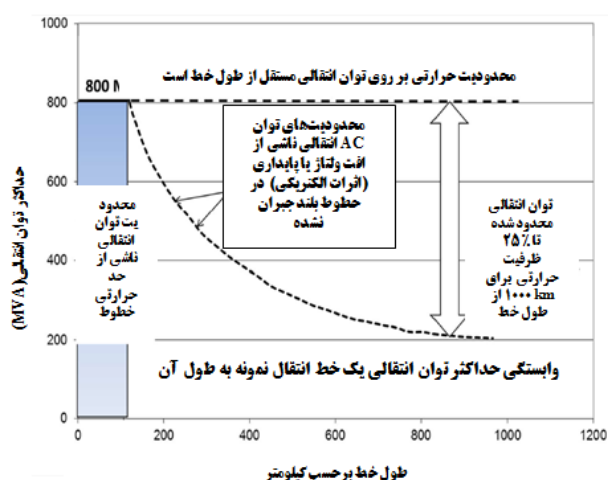
خواهد شد و همچنین احتمال ایجاد آسیب‌های حرارتی به هادی و یراق آلات وابسته به آن در دماهای بالاتر وجود خواهد داشت.



شکل (۲): رشد جمعیت در مقابل تقاضای انرژی الکتریکی [۲]

تحقیقات انجام شده توسط [۵] نشان می‌دهد که اکثر شرکت‌های برق تحت فشار برای افزایش نرخ یا ظرفیت خطوط هستند. پاسخ آنها به یک نظرسنجی نشان می‌دهد که برای افزایش ظرفیت خطوط راهکارهایی مانند افزایش دمای حداکثر خطوط موجود، تغییر در پارامترهای جوی فرض شده جهت محاسبه ظرفیت خطوط و دیگر روش‌های افزایش ظرفیت خطوط را اتخاذ کرده‌اند.

مطابق [۶]، خطوط انتقال کوتاه (تا طول ۱۰۰ کیلومتر) به وسیله ظرفیت حرارتی هادی‌های مورد استفاده در آنها دارای محدودیت انتقال انرژی هستند و این محدودیت در ظرفیت می‌تواند متاثر از نوع هادی به کار رفته در آن، نوع و وضعیت اتصالات استفاده شده در آن و فواصل مجاز الکتریکی و شرایط محیطی باشد. نوع محدودیت انتقال انرژی خطوط در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل (۳): محدودیت‌های انتقال توان خطوط هوایی [۶]

با توجه به مطالب ارائه شده، توجه ویژه به ظرفیت حرارتی خطوط و جلوگیری از آثار مخرب اضافه‌بار و به دنبال آن افزایش دمای هادی‌ها می‌تواند به بالا بردن عمر مفید این گونه تاسیسات و مدیریت هر چه بهتر دارایی‌ها کمک نماید. در حال حاضر، تعیین ظرفیت حرارتی خطوط و نحوه محاسبه آن

شده است، اجازه عبور داده می‌شود. در همین مرجع، از آمپردهی به عنوان ظرفیت حرارتی ماندگار نیز یاد شده است. در مقاله حاضر، منظور از ظرفیت حرارتی، از حاصل ضرب جریان مجاز عبوری از هادی در شرایط محیطی و ولتاژ آن به دست می‌آید و برحسب MVA تعریف می‌شود.

۳- مدل سازی و محاسبه ظرفیت حرارتی خطوط انتقال

همانطور که اشاره شد ظرفیت حرارتی یک خط تابعی از آمپردهی هادی‌های آن است. اندازه ظرفیت حرارتی به صورت زیر تعریف می‌شود [۸].

$$S_{Th} = \frac{\sqrt{3} V_{L-L} I_{Th}}{1000} \quad MVA \quad (1)$$

که در آن، I_{Th} آمپردهی مجاز هادی یا خط و برحسب آمپر، V_{L-L} ولتاژ نامی فاز به فاز خط و برحسب کیلوولت و S_{Th} ظرفیت حرارتی خط و برحسب مگاوات-آمپر است.

به منظور محاسبه آمپردهی (و به دنبال آن ظرفیت حرارتی خطوط) مراجع معتبری از جمله استاندارد IEEE 738 [۷] و Cigre601 [۳] وجود دارد. مطابق بررسی‌های انجام شده توسط [۱۲]، جواب‌های به دست آمده برای آمپردهی هادی‌ها از هر دو مرجع فوق تقریباً با هم مشابه است. بنابراین، در این مقاله، از روش ارائه شده در استاندارد IEEE 738 استفاده می‌شود و تنها به مطالعات کلی تعیین ظرفیت حرارتی پرداخته می‌شود و جزئیات دقیق آن در مرجع مذکور ارائه شده است. در حالت کلی، ظرفیت حرارتی یک هادی یا آمپردهی آن از تعادل حرارتی در اطراف آن و به صورت زیر تعیین می‌شود [۷].

$$q_c + q_r = q_s + q_j \quad (2)$$

که در آن q_r تلفات حرارتی ناشی از تشعشع هادی و برحسب وات بر متر، q_c تلفات حرارتی همرفتی هادی و برحسب وات بر متر، q_s گرمای جذب شده توسط هادی از خورشید و برحسب وات بر متر و q_j گرمای ایجاد شده در هادی در اثر تلفات اهمی و برحسب وات بر متر است. تلفات اهمی ایجاد شده در یک هادی به صورت زیر است [۷].

$$q_j = I^2 R_{ac}(T_{ave}) \quad (3)$$

که در آن، $R_{ac}(T_{ave})$ مقاومت AC هادی در دمای T_{ave} و بر حسب اهم بر متر و I جریان عبوری از هادی و برحسب آمپر است. دمای T_{ave} مربوط به میانگین دمای رشته‌های هادی است که به منظور تعیین ظرفیت حرارتی، معمولاً برابر دمای مجاز نهایی هادی در نظر گرفته می‌شود. با جایگذاری معادله (۳) در معادله (۲) می‌توان جریان عبوری از یک هادی را به صورت زیر تعیین کرد [۷].

$$I = \sqrt{\frac{q_c + q_r - q_s}{R_{ac}(T_{ave})}} \quad (4)$$

در ادامه معادلات کلی مربوط به چگونگی محاسبه پارامترهای q_s و q_r و از ذکر جزئیات آن خودداری می‌شود و این

توسط مراجع معتبری مانند [۳] و [۷] انجام می‌شود. در این مراجع، ظرفیت حرارتی به صورت تابعی غیرخطی از مولفه‌های محیطی و دیگر عوامل غیرمحیطی تعریف شده است. در این مقاله سعی می‌شود با استفاده از داده‌های نمونه دو هدف زیر دنبال شود.

۱- ناحیه قابل قبول برای ظرفیت حرارتی خطوط براساس تغییرات دمای محیط تعیین شود.

۲- با استفاده از داده‌های نمونه، یک رابطه خطی بین تغییرات توان و یا ظرفیت حرارتی خطوط و تغییرات دمای محیط نسبت به مقادیر پایه (دما و ظرفیت) به دست آید. به عبارت دیگر، با استفاده از داده‌های نمونه، رابطه بین دمای محیط و ظرفیت حرارتی خطوط با استفاده از یک معادله خط تعریف شود.

در این مقاله، ابتدا به تعریف ظرفیت حرارتی خطوط انتقال پرداخته می‌شود و سپس براساس مراجع معتبر همانند استاندارد IEEE 738 [۷]، نسبت به مدل سازی و تعیین ظرفیت حرارتی هادی‌ها اقدام می‌شود. یک الگوریتم ابتکاری به منظور تعیین ناحیه قابل قبول برای ظرفیت حرارتی خطوط ارائه می‌شود و در نهایت با استفاده از یک مثال عددی، مقایسه‌ای بین روش دقیق و روش پیشنهادی در این مقاله انجام خواهد شد.

۲- تعریف ظرفیت حرارتی خطوط انتقال هوایی

مطابق مرجع [۸]، ظرفیت یک خط انتقال برابر میزان توان انتقالی از آن و برحسب MVA تعریف می‌شود. در خطوط با طول کوتاه (مطابق شکل (۳)، توان انتقالی از یک خط به وسیله ظرفیت حرارتی آن محدود می‌شود. ظرفیت حرارتی هر خط از حاصل ضرب جریان عبوری از هادی‌ها در ولتاژ آن به دست می‌آید. با توجه به عدم وابستگی ولتاژ خط نسبت به شرایط محیطی، ظرفیت حرارتی یک خط تنها به تغییرات جریان مجاز عبوری از هادی‌های آن وابسته است. به عبارت دیگر، ظرفیت حرارتی یک خط تنها به میزان آمپردهی آن بستگی دارد. مطابق [۹]، آمپردهی یک خط برحسب آمپر است و برابر با میزان ظرفیت هر هادی در آن خط می‌باشد که می‌تواند این میزان جریان را به مدت نامحدود و تحت شرایط محیطی اطراف آن تحمل نماید و هیچ گونه قید و محدودیتی نیز نقض نشود.

در ادامه تشریح خواهد شد که آمپردهی هر هادی به شرایط محیطی (مانند دمای محیط، سرعت باد، میزان تابش خورشید و ...) و همچنین به دمای نهایی قابل تحمل هادی بستگی دارد و به وسیله چنین پارامترهایی محدود می‌شود. در حال حاضر، حدود ۸۰ تا ۹۰ درصد از هادی‌های مورد استفاده در خطوط انتقال هوایی از نوع هادی‌های آلومینیومی تقویت شده با فولاد (ACSR^۳) است. این نوع هادی‌ها به دلیل استفاده از فلز آلومینیوم به منظور هدایت الکتریکی، دارای دمای مجاز نهایی در محدوده ۹۰ تا ۹۳ درجه سانتیگراد هستند [۵] و [۱۰-۱۳]. بارگیری از این نوع هادی‌ها بایستی به گونه‌ای باشد که دمای کارکردی هادی از محدوده فوق فراتر نرود زیرا در صورت تخطی دمای هادی از محدوده دمایی فوق، استحکام مکانیکی آن به تدریج کاهش یافته و چنانچه استقامت مکانیکی آن به حدود ۹۰ درصد از استقامت نامی هادی یا کمتر برسد بایستی نسبت به تعویض آن اقدام شود [۷].

مطابق [۱۴] آمپردهی یک هادی برابر حداکثر جریان ثابتی است که براساس معیارهای ایمنی، امنیت و طراحی خطی که این هادی در آن استفاده

تمامی معادلات فوق به دست آید و این مورد در بخش بعدی توضیح داده خواهد شد.

۴- ارائه الگوریتم پیشنهادی تعیین ظرفیت حرارتی و ناحیه قابل قبول برای آن

نحوه تعیین ظرفیت حرارتی هادی‌ها در بخش قبل تشریح شد و ملاحظه شد که تمامی معادلات تعیین این ظرفیت به صورت غیرخطی هستند و عملاً امکان استفاده از روش‌های دستی و ذهنی وجود ندارد. بنابراین، در این مقاله یک روش پیشنهادی به منظور تقریب تمامی معادلات فوق با یک معادله خط راست ارائه می‌شود. برای انجام تقریب خط راست و ارائه الگوریتم، ابتدا فرضیات زیر در نظر گرفته می‌شوند.

۱- فرض می‌شود که به جز دمای محیط که دارای تغییرات محسوس در طی شبانه روز است، سایر پارامترها به صورت ثابت و یا دارای محدوده تغییرات ناچیز باشند. این فرض بسیار نزدیک به فرض انجام شده به هنگام تعیین ظرفیت حرارتی استاتیکی خط است.

۲- از آنجا که گذشت ساعت از روز می‌تواند تا حدود ۸/۵ درصد بر روی ظرفیت حرارتی خطوط موثر باشد می‌توان الگوریتم پیشنهادی را به ازای ساعت‌های مختلف شبانه‌روز مورد استفاده قرار داد تا دقت محاسبات آن حفظ شود.

۳- فرض بر این است که تعدادی نقطه قابل مشاهده از ظرفیت حرارتی یک هادی در دسترس باشد. این نقاط می‌توانند به صورت نقاط یا داده‌های واقعی باشند و یا به صورت داده‌های تولید شده در نظر گرفته شوند. نقاط مذکور نشان‌دهنده میزان تغییرات دمای محیط و ظرفیت حرارتی خط نسبت به مقادیر متناظر آنها در حالت پایه باشند. هر چه تعداد این نقاط بیشتر باشد، دقت الگوریتم پیشنهادی در یافتن رابطه خطی برای ظرفیت حرارتی بیشتر خواهد بود. روش داده محور در بسیاری از مراجع از جمله [۱۵] مورد استفاده قرار گرفته است.

الگوریتم پیشنهادی تعیین ناحیه قابل قبول برای ظرفیت حرارتی خطوط

- ۱- در یک ساعت معین از شبانه‌روز، ظرفیت حرارتی به ازای یک دمای خاص محیط و دیگر شرایط محاسبه می‌شود. این ظرفیت و دمای محیط به عنوان مقادیر پایه در نظر گرفته می‌شوند (T_{a0} ، S_{Th-Ta0}).
- ۲- داده‌های مشاهده شده ($ODPs^4$) که به صورت تغییرات جزیی نسبت به مقادیر پایه یعنی دمای محیط و ظرفیت حرارتی هستند ($\Delta S_{Th,k}$ ، $\Delta T_{a,k}$) در نظر گرفته می‌شوند. به طور مثال، اگر داده $ODPs$ به صورت (۵ و ۱۰-) باشد به این معنی است که به ازای ۵ درجه افزایش در دمای محیط، ظرفیت آن در این حالت (یعنی در دمای جدید $T_{a0}+5$) برابر $S_{Th-Ta0}-10$ مگاوات-آمپر خواهد شد.
- ۳- به ازای تمامی داده‌های $ODPs$ و استفاده از بند ۲ این الگوریتم و معادلات مربوط به تعیین ظرفیت حرارتی، ابتدا جریان هادی به صورت زیر تعیین می‌شود.

$$I'_{Th,k} = \frac{1000 \times (S_{Th-T_{a0}} + \Delta S_{Th,k})}{\sqrt{3} V_{L-L}} A \quad (11)$$

سپس دمای نهایی هادی به ازای این جریان با استفاده از روش‌های مبتنی بر

جزئیات در مرجع [۷] ذکر شده‌اند.

تلفات همرفتی موجود در اطراف هادی، به دو صورت همرفت طبیعی و همرفت اجباری انجام می‌شود. در همرفت طبیعی، سرعت وزش باد به هادی برابر صفر است و همرفت به صورت بالا رفتن هوای گرم اطراف هادی و جایگزین شدن آن با هوای خنک‌تر است و به این صورت هادی خنک‌تر می‌شود. در روش همرفت اجباری سرعت باد غیرصفر بوده و این جابجایی از طریق وزش باد به سطح هادی انجام می‌شود و تاثیر خنک‌سازی هادی در این حالت بسیار بیشتر از همرفت طبیعی است. بنابراین، تلفات همرفت اجباری (q_{e1}, q_{e2}) و طبیعی (q_{en}) به صورت زیر محاسبه می‌شود [۷].

$$q_{e1} = K_{angle} \left[1/0.1 + 1/35 N_{Re}^{0.75} \right] K_f (T_s - T_a) \quad (5)$$

$$q_{e2} = K_{angle} \times 0.754 N_{Re}^{1/4} \times K_f (T_s - T_a) \quad (6)$$

$$q_{en} = 3/645 \rho_f^{1/5} \times D_o^{1/75} (T_s - T_a)^{1/25} \quad (7)$$

که در آن، T_s و T_a به ترتیب دمای نهایی هادی و دمای محیط و بر حسب درجه سانتیگراد هستند. سایر پارامترها در مرجع [۷] تشریح شده است. تلفات حرارتی ناشی از همرفت هادی به صورت زیر محاسبه می‌شود [۷].

$$q_e = \text{Max} (q_{e1}, q_{e2}, q_{en}) \quad (8)$$

یکی دیگر از تلفات حرارتی در اطراف هادی، تلفات تشعشی است که به دلیل اختلاف دمای سطح هادی و محیط پیرامون آن ایجاد می‌شود. هر چه هادی نسبت به هوای محیط پیرامون آن داغ‌تر باشد، میزان تلفات تشعشی نیز بیشتر خواهد بود و بالعکس. مقدار تلفات تشعشی اطراف هادی به صورت زیر محاسبه می‌شود [۷].

$$q_r = 17/18 D_o \varepsilon \left[\left(\frac{T_s + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_a + 273}{100} \right)^4 \right] \quad (9)$$

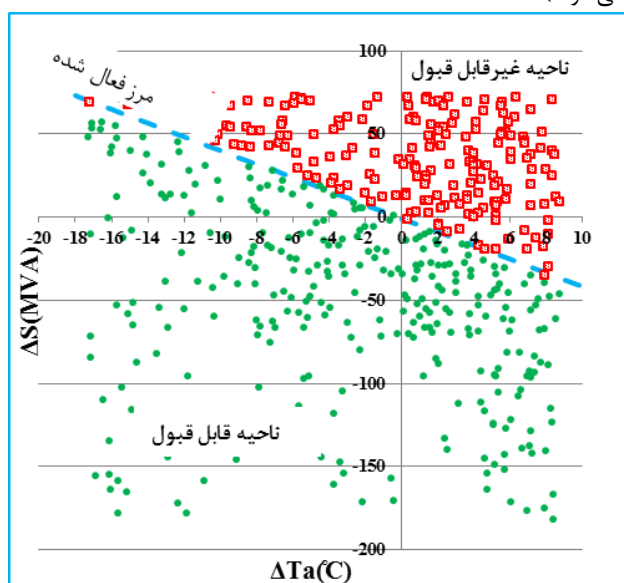
که در آن، D_o قطر بیرونی هادی و بر حسب متر و ε ضریب تشعشع گرمایی هادی است. میزان انرژی گرمایی جذب شده از خورشید به وسیله هادی به صورت زیر تعیین می‌شود [۷].

$$q_s = \alpha \times Q_{se} \sin(\theta) A' \quad (10)$$

که در آن، α ضریب جذب انرژی خورشید، Q_{se} کل شدت گرمای انتشار یافته از خورشید با لحاظ نمودن ضریب تصحیح ارتفاع و بر حسب وات بر مترمربع، θ زاویه موثر تابش خورشید و بر حسب درجه و A' برابر سطح موثر هادی است که در معرض تابش آفتاب قرار می‌گیرد و معمولاً برابر قطر آن در نظر گرفته می‌شود.

با توجه به معادلات تعیین ظرفیت حرارتی هادی‌ها و خطوط ارائه شده می‌توان دریافت که با داشتن و دانستن ظرفیت حرارتی آن در یک شرایط خاص، تعیین مجدد آن برای دیگر شرایط نیازمند انجام محاسبات پیچیده است و امکان محاسبه به صورت دستی یا ذهنی وجود ندارد. در این مقاله، با در نظر گرفتن فرضیات مختلف، سعی بر آن است که که با داشتن ظرفیت حرارتی هادی در یک دمای محیطی خاص، ظرفیت آن برای دیگر دماها به صورت دستی و بدون حل مجدد

داده‌های مشاهده شده (ODPs) به صورت اعداد جفت شامل تغییرات دمای محیط و تغییرات ظرفیت حرارتی نسبت به مقادیر حالت پایه فرض می‌شوند. برای تعیین ناحیه قابل قبول مربوطه ظرفیت حرارتی، ۵۰۰ نقطه در نظر گرفته شده است و با اجرای الگوریتم پیشنهادی در این مقاله، ناحیه قابل قبول برای ظرفیت حرارتی براساس نسبت تغییرات دمای محیط ΔT_a و تغییرات ظرفیت حرارتی ΔS_{Th} به صورت شکل (۴) به وسیله یک مرز فعال مشخص شده است. مرز فعال شده در بین دو ناحیه به صورت معادله یک خط راست و دارای معادله $\Delta S_{Th} = -4/0.81 \Delta T_a - 0.7276$ است. تعداد نقاط خارج از ناحیه قابل قبول برای ظرفیت حرارتی برابر ۱۹۷ نقطه است (نقاط نشان داده با مربع به عنوان ناحیه غیرقابل قبول و نقاط نشان داده شده با دایره پرنسنگ به عنوان ناحیه قابل مربوطه ظرفیت حرارتی محسوب می‌شوند).



شکل (۴): ناحیه قابل قبول به دست آمده مربوط به ظرفیت حرارتی

یک هادی نمونه با مرز جدا شده به صورت یک خط راست

با تامل در شکل (۴) می‌توان دریافت که مرز فعال شده در اینجا همان رابطه بین ΔT_a و ΔS_{Th} است که در آن دمای نهایی هادی به ازای نقاط بر روی آن برابر یا کوچکتر از T_s شده است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که رابطه بین ظرفیت حرارتی و دمای محیط در هر شرایطی غیر از شرایط پایه را می‌توان به صورت زیر بیان کرد.

$$\begin{cases} S_{Th-T_a} = S_{Th-T_{ao}} + \Delta S_{Th-T_a} \\ \Delta S_{Th-T_a} = m \cdot \Delta T_a + b \end{cases} \rightarrow \quad (12)$$

$$S_{Th-T_a} = S_{Th-T_{ao}} + m \cdot \Delta T_a + b$$

که در آن، S_{Th-T_a} ظرفیت حرارتی خط در دمای محیط T_a (دمای مطلوب یا مورد نظر)، m شیب خط یا مرز فعال شده، b عرض از مبدا مرز فعال شده و ΔT_a میزان انحراف دمای محیط (مطلوب) نسبت به حالت پایه است. به عنوان مثال، اگر در شرایط داده شده موجود در جدول (۱)، دمای اولیه محیط برابر ۳۰ درجه باشد (T_{a0})، ظرفیت حرارتی به ازای این دمای محیط مطابق آنچه قبلاً گفته شد برابر

تکرار به دست می‌آید (T'_s). اگر مقدار T'_s از مقدار T_{s0} (دمای قابل قبول هادی) کمتر باشد در آن صورت، نقطه مذکور در داخل ناحیه قابل قبول قرار می‌گیرد در غیر این صورت، هادی مذکور نقطه ODPs مورد نظر را تحمل نکرده و این نقطه خارج از ناحیه قرار می‌گیرد.

۴- با مشخص شدن نقاط داخل و خارج از ناحیه و تفکیک آنها می‌توان ناحیه قابل قبول برای ظرفیت حرارتی را تعیین کرد.

۵- با توجه به ثابت فرض نمودن تمامی پارامترهای موثر در تعیین ظرفیت حرارتی هادی‌ها (به جز دمای محیط)، رابطه بین $\Delta S_{Th,k}$ (تغییرات ظرفیت حرارتی) و $\Delta T_{a,k}$ (تغییرات دمای محیط) به صورت یک خط راست تعریف خواهد شد.

۶- به منظور به دست آوردن معادله خط راست تعیین کننده رابطه بین تغییرات ظرفیت حرارتی و دمای محیط یا خط تعیین کننده مرز ناحیه قابل قبول تغییرات ظرفیت حرارتی، می‌توان دو نقطه نزدیک به مرز را انتخاب نمود و با استفاده از معادله تعیین خط راست با استفاده از دو نقطه، مرز مربوطه را به دست آورد.

۵- نتایج عددی و بررسی عملکرد الگوریتم پیشنهادی تعیین ناحیه قابل قبول ظرفیت حرارتی خطوط

به منظور بررسی عملکرد الگوریتم پیشنهادی، هادی CANARY از نوع ACSR انتخاب شده است که معمولاً در خطوط انتقال ۲۳۰ کیلوولت استفاده می‌شود. تمامی شرایط محیطی و پارامترهای مورد استفاده در این بررسی در جدول (۱) لیست شده است.

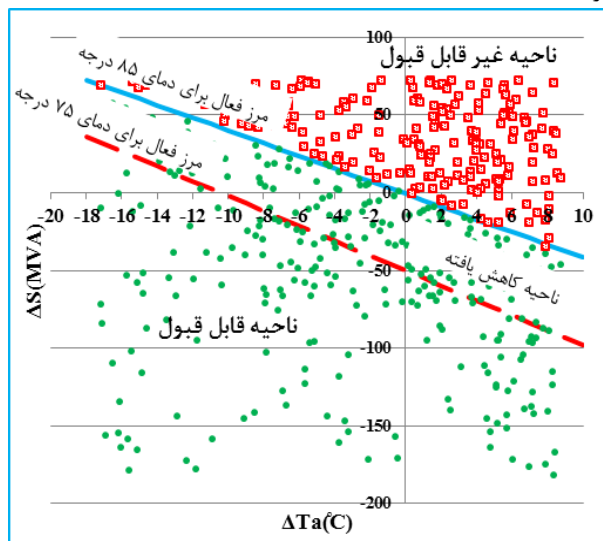
جدول (۱): پارامترهای نمونه‌ای مورد استفاده جهت تعیین ظرفیت

حرارتی خطوط

عنوان	نماد	واحد	مقدار
ارتفاع از سطح دریا	He	متر	۱۰۰۰
آزیموت خط	Z_l	درجه	۹۰
عرض جغرافیایی	Lat	درجه	۳۲
ضریب انتشار حرارت	ε	-	۰/۸
ضریب جذب انرژی خورشید	α	-	۰/۸
ساعت	h	-	۱۲
زاویه ساعت نسبت به ظهر	ω	درجه	۰
شرایط جوی (پاک-صنعتی)	-	-	پاک
دمای مجاز سطح هادی	T_s	درجه	۸۵
N امین روز سال	N	-	۸۲
مقاومت AC هادی در دمای ۷۵ درجه	R ₇₅	اهم بر متر	۰/۰۰۰۸۱۴۱
مقاومت AC هادی در دمای ۲۵ درجه	R ₂₅	اهم بر متر	۰/۰۰۰۶۷۹۸
دمای هوای محیط	T_a	درجه	۳۰
قطر بیرونی هادی	D ₀	متر	۰/۰۲۹۵۲
سرعت باد وزیده شده به هادی	V _w	متر بر ثانیه	۰/۶۱

با استفاده از معادلات مربوط به تعیین ظرفیت حرارتی خطوط در دمای محیطی پایه ۳۰ درجه سانتیگراد، جریان هادی برابر ۹۷۱/۲۶۲۶ آمپر و ظرفیت حرارتی آن برابر ۳۸۶/۹۲۳۵ مگا-ولت-آمپر به دست می‌آید. این مقادیر به عنوان مقادیر پایه در نظر گرفته می‌شوند. نقاط یا

خطوط استفاده کرد. این روش بیشتر می‌تواند برای بهره‌برداران سیستم قدرت که نیاز به دانستن و محاسبه سریع ظرفیت حرارتی خطوط در شرایطی که ظرفیت آن را در یک دمای معین در اختیار دارند، مفید باشد.



شکل (۵): مقایسه ناحیه قابل قبول به دست آمده مربوط به ظرفیت حرارتی خط نمونه در دو حالت $T_s = 85$ و $T_s = 75$ درجه

۶- نتیجه‌گیری

تعیین ظرفیت حرارتی خطوط انتقال هوایی در شرایط مختلف جوی، جغرافیایی و محیطی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. روابط و معادلات مربوط به محاسبات ظرفیت حرارتی خطوط براساس مراجع معتبر دارای پیچیدگی زیادی است و همگی این معادلات به صورت غیرخطی هستند و در صورت معلوم بودن ظرفیت حرارتی در یک شرایط معین، محاسبه آن برای شرایط جدید با دمای محیط متفاوت نسبت به شرایط پایه بدون استفاده از کامپیوتر و به صورت دستی بسیار زمان‌بر و سخت خواهد بود.

در این مقاله، با استفاده از یک الگوریتم ابتکاری پیشنهادی و با بکارگیری داده‌های مشاهده شده (ODPs)، ضمن به دست آوردن یک رابطه خطی بین تغییرات ظرفیت حرارتی خطوط و تغییرات دمای محیط، ناحیه قابل قبول مربوط به ظرفیت حرارتی خط مربوطه نیز تعیین شد و نشان داده شد که رابطه خطی به دست آمده بین تغییرات ظرفیت حرارتی و دمای محیط همان مرز فعال برای ناحیه قابل قبول است. به منظور صحت‌سنجی و بررسی دقت روش پیشنهادی، ظرفیت حرارتی به دست آمده از روش ابتکاری پیشنهادی با مقدار متناظر محاسبه شده از روش دقیق مقایسه شد و مشاهده گردید که روش پیشنهادی دارای دقت بسیار بالایی بوده و خطای آن بسیار ناچیز و قابل صرف نظر است. روش پیشنهادی با توجه به دقت بالای نتایج آن و همچنین سادگی انجام محاسبات می‌تواند برای اپراتورهای سیستم قدرت و مهندسين بهره‌بردار خطوط انتقال به منظور پایش لحظه‌ای ظرفیت خطوط و توان عبوری از آنها بسیار مفید واقع شود و در

حالت اگر مطلوب، تعیین ظرفیت حرارتی خط به ازای دمای محیط برابر ۳۵ درجه باشد، آنگاه می‌توان ظرفیت جدید را به صورت زیر محاسبه کرد.

$$m = -4/0.801, b = -0/7276, T_{ao} = 30, S_{Th-T_{ao}} = 386/9235$$

$$\rightarrow \begin{cases} \Delta T_a = 35 - 30 = 5 \\ S_{Th-T_a} = S_{Th-T_{ao}} + m \Delta T_a + b \end{cases}$$

$$S_{Th-T_a} = 386/9235 - 4/0.801 \times 5 - 0/7276 = 365/7955$$

مشاهده می‌شود که با داشتن معادله خط یا مرز فعال مربوط به ناحیه قابل قبول برای ظرفیت حرارتی یک خط انتقال، می‌توان ظرفیت حرارتی آن را بدون نیاز به انجام محاسبات پیچیده اشاره شده تعیین کرد.

اکنون می‌توان عملکرد روش و الگوریتم ابتکاری پیشنهادی در این مقاله را در نقطه اشاره شده با انجام محاسبات مربوط به ظرفیت حرارتی خط انتقال با استفاده از روش دقیق مقایسه نمود. چنانچه ظرفیت حرارتی خط در دمای ۳۵ درجه با اعمال روش دقیق محاسبه شود، مقدار آن برابر ۳۶۴/۲۸۱۶ مگاوات-آمپر خواهد شد و درصد خطای روش تقریبی پیشنهادی این مقاله نسبت به روش دقیق حدود ۰/۴۲ درصد است و این نشان دهنده دقت بسیار خوب الگوریتم پیشنهادی برای تعیین رابطه خطی بین ظرفیت حرارتی و دمای محیط است.

نکته‌ی دیگری که در اینجا می‌توان به آن اشاره کرد این است که دمای نهایی هادی تاثیر بسیار زیادی بر روی میزان بزرگی و یا وسعت محدوده ناحیه قابل قبول برای ظرفیت حرارتی یک خط ایفا می‌کند به گونه‌ای که هر چه دمای نهایی (T_s) مربوط به هادی عدد بزرگتری باشد، ناحیه مذکور بزرگتر بوده و هر چه دمای نهایی هادی کمتر باشد، این ناحیه کوچکتر خواهد بود. معمولاً در طراحی خطوط انتقال، بیشینه دمای هادی بین ۷۵ تا ۸۵ درجه اختیار می‌شود. شکل (۵) ناحیه قابل قبول مربوط به ظرفیت حرارتی هادی نمونه را به ازای دمای محیط و برای دو حالت $T_s = 85$ و $T_s = 75$ درجه نشان می‌دهد. تعداد نقاط خارج از ناحیه قابل قبول مربوط به ظرفیت حرارتی در دماهای T_s داده شده به ترتیب برابر ۱۹۷ و ۳۴۳ نقطه است. مرز جدید ایجاد شده با دمای نهایی ۷۵ درجه به صورت $\Delta S_{Th} = -4/7988 \Delta T_a - 50/0848$ است. ملاحظه می‌شود که به ازای هر گونه تغییر در شرایط اولیه خط، معادله مرز فعال مربوط به ناحیه قابل قبول برای ظرفیت خطوط انتقال هوایی به راحتی قابل محاسبه و استفاده است.

بنابراین، با توجه به ثابت ماندن برخی از شرایط محیطی و جغرافیایی، به منظور داشتن یک رابطه خطی بین ظرفیت حرارتی و دمای محیط می‌توان از داده‌های کمکی استفاده کرد و مرز فعال و ناحیه قابل قبول برای تغییرات این ظرفیت نسبت به تغییرات دمای محیط به راحتی تعیین و از جهت جلوگیری از بارگیری بیش از حد

زیر نویس ها

زمان های پیک شبکه نسبت به کنترل بار عبوری از خطوط با توجه به ظرفیت لحظه ای آنها اقدام نمایند.

مراجع

¹ Congestion

² Ampacity

³ Aluminum Conductor Steel Reinforced

⁴ Observed Data Points

- [1] Hosseini S E, Khajehzadeh A, Eslami M. "Financial and Environmental Investigation of the Effects of the Demand Response Programs on the Network-Constrained Unit Commitment". Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers 2023; 20 (4):133-145.
- [2] N. Mohd Zainuddin et al., "Review of Thermal Stress and Condition Monitoring Technologies for Overhead Transmission Lines: Issues and Challenges", IEEE Access, vol. 8, pp. 120053-120081, 2020.
- [3] CIGRE, Working Group B2.43 (2014) Guide for thermal rating calculation of overhead lines, Technical Brochure 601.
- [4] I. Hathout, K. Callery, J. Trac, and T. Hathout, "Impact of thermal stresses on the end of life of overhead transmission conductors", in Proc. IEEE Power Energy Soc. Gen. Meeting (PESGM), Portland, OR, USA, Aug. 2018, pp. 1_5.
- [5] CIGRE Conductors for the Uprating of Existing Overhead Lines, CIGRE, Paris, France, 2019, Technical Brochure 244.
- [6] CIGRE Working Group B2.55, "Conductors for the Uprating of Existing Overhead Lines", CIGRE, Paris, France, 2020, Reference: Technical Brochure 763
- [7] IEEE standard 738-2023: "IEEE standard for calculating the current temperature relationship of bare overhead conductors".
- [8] CIGRE Working Group B2/C1.19, "Increasing Capacity of Overhead Transmission Lines - Needs and Solutions", CIGRE Technical Brochure 425, 2010.
- [9] M. Kanálik, A. Margitová, and L. Beňa, "Temperature calculation of overhead power line conductors based on CIGRE Technical Brochure 601 in Slovakia", Electrical Engineering, vol. 101, no. 3, pp. 921-933, Sep. 2019, doi: 10.1007/s00202-019-00831-8.
- [10] N. Mohd Zainuddin et al., "Review of Thermal Stress and Condition Monitoring Technologies for Overhead Transmission Lines": Issues and Challenges", IEEE Access, vol. 8, pp. 120053-120081, 2020.
- [11] Meyberg, R.A.; Absi Salas, F.M.; Domingues, L.A.M.; Sens, M.A.; Correia de Barros, M.T.; Lima, A.C., "Magnetic properties of an ACSR conductor steel core at temperatures up to 230°C and their impact on the transformer effect". IET Sci. Meas. Technol. 2021, 15, 143-153.
- [12] Riba, J.R.R.; Liu, Y.; Moreno-Eguilaz, M.; Sanllehi, J. "On-Line Core Losses Determination in ACSR Conductors for DLR Applications". Materials 2022, 15, 6143.
- [13] IEEE Guide for Determining the Effects of High-Temperature Operation on Conductors, Connectors, and Accessories, IEEE standard 1283, 2013.
- [14] CIGRE Working Group B2.12, "Guide for Selection of Weather Parameters for Bare Overhead Conductor Ratings". Technical Brochure 299, Aug. 2006.
- [15] verij kazemi M, gholamian A, sadati J. "Adaptive Frequency Control with Doubly-Fed Induction Generator Using Data-Driven Method". Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers 2019; 16 (3):73-86.