

František Margita, Ľubomír Beňa

Stanovenie ampacity vonkajších vedení v podmienkach elektrizačnej sústavy Slovenskej republiky

Tento príspevok sa zaoberá konceptom ampacity nadzemných vedení, skúmajúc jeho klasifikáciu a praktické použitie. Práca objasňuje metodické normy regulujúce ampacitu, spolu s výpočtami statickej a dynamickej ampacity pre najpoužívanejšie vodiče v Slovenskej elektrizačnej prenosovej sústave. Navyše, štúdiá rozširuje potenciál ampacity na určenie ustáleného dynamického princípu ampacity na konkrétnom prenosovom vedení, pričom sa zohľadnili jeho technické špecifikácie v reálnych meteorologických podmienkach na vybraný dátum.

Kľúčové slová: príspevok: ALFE, ampacita, CIGRE Technický Manuál 601, dynamické tepelné hodnotenie, nadzemné prenosové vedenie

This paper explores the concept of overhead line ampacity, examining its classification and practical application. The work clarifies the methodological standards regulating ampacity, along with calculations of static and dynamic ampacity for the most commonly used conductors in the electric power system of the Slovak Republic. Additionally, the study extends the potential of ampacity to determine a steady-state dynamic principle of ampacity for a specific transmission line, taking into account its technical specifications under real meteorological conditions on a selected date.

Keywords: ACSR, ampacity, CIGRE Technical Brochure 601, dynamic line rating, overhead power line

I. ÚVOD

Ampacita nadzemných prenosových vedení sa vzťahuje na maximálny elektrický prúd, ktorý môžu prenášať bez kompromitovania ich elektrickej a mechanickej integrity. Vodiče ALFe, kde hliník tvorí vodivú vrstvu, sa široko používajú pre tieto vedenia. Výrobcovia špecifikujú ich maximálnu prevádzkovú teplotu typicky medzi 90 až 110 °C. Dlhodobé vystavenie teplotám mimo tohto rozsahu môže viesť k zvýšenej krehkosti a skráteniu životnosti materiálu. Zvýšenie prenosovej schopnosti vedení je opakujúcou sa témou v mnohých štúdiách naprieč rôznymi disciplínami, často buď ako hlavný predmet záujmu alebo ako faktor obmedzujúci prenosovú kapacitu kvôli problémom vyplývajúcim z preťaženia prúdom [1–3].

Rovnako je dôležité predchádzať prekročeniu jeho predĺženia alebo maximálneho priehybu, pretože by to mohlo porušiť minimálne bezpečné vzdialenosti od zeme, objektov alebo iných vodičov pod nadzemnými vedeniami. Na ochranu pevnosti materiálu elektrických vodičov sa počas fázy návrhu pridelujú prenosovým vedeniam nominálne hodnoty, ktoré stanovujú hranice pre prenos výkonu. Normy stanovujú minimálnu bezpečnú výšku vodičov pre rôzne prostredia, pričom prioritu má odolnosť voči kritickým podmienkam [4].

II. TEPELNÉ HODNOTENIE NADZEMNÉHO ELEKTRICKÉHO VEDENIA

Proces určovania ampacity zahŕňa tepelné hodnotenie, ktoré možno klasifikovať do nasledujúcich kategórií [5]:

1. statická ampacita (s využitím pravdepodobnostného prístupu známeho ako statické tepelné hodnotenie – STH),
2. dynamická ampacita (pomocou deterministického prístupu nazývaného dynamické tepelné hodnotenie – DTH), ktorá zahŕňa priame aj nepriame metódy.

V prípade dlhých vedení je ampacita zvyčajne obmedzená limitmi stability alebo napäťovými obmedzeniami, zatiaľ čo pre krátke vedenia je určená teplotnými obmedzeniami [5].

STATICKE TEPELNÉ HODNOTENIE

V STH sú elektrické siete prevádzkované za predpokladu konzistentnej ampacity pre ich nadzemné prenosové vedenia, bez ohľadu na dennú dobu, deň v roku alebo ročné obdobie. Regióny sa považujú za oblasti so stabilnými meteorologickými podmienkami. Statický odhad poskytuje konzervatívnu aproximáciu, berúc do úvahy obmedzené chladenie konvekčným vetrom, zvýšené (letné) teploty vzduchu a snežné žiarenie. Výsledkom je, že výpočet kladie dôraz skôr na teoretickú než skutočnú ampacitu [6].

Výpočet STH zahŕňa použitie tepelného modelu odvodeného z tepelnej rovnováhy holého vodiča, berúc do úvahy nízke kolmé rýchlosti vetra, (napr. 0,5 m/s), sezónne teploty vzduchu blízke sa k najvyšším úrovňam (napr. 35 °C alebo vyššie v lete) a solárny ohrev (napr. 1000 W/m²), ako je uvedené v CIGRE Technical Brochure 299 alebo 601 [7].

Meteorologické parametre uvažované pre hodnotenie STH sa môžu líšiť v závislosti od prostredia regiónu a tolerancie rizika zo strany energetických spoločností. Každé prenosové vedenie môže byť regulované s rôznymi typmi STH, vrátane normálneho hodnotenia (alebo nepretržitého), dlhodobého núdzového hodnotenia a krátkodobého núdzového hodnotenia [8].

DYNAMICKÉ TEPELNÉ HODNOTENIE

DTH je schopnosť dynamicky upravovať ampacitu v reálnom čase ako reakciu na meniace sa podmienky prostredia. Cieľom je maximalizovať prúdové zaťaženie v každom časovom okamihu. Tepelná ampacita nadzemného vedenia môže byť ovplyvnená ohrevom aj chladením, čo má za následok kolísanie výkonu smerom nadol alebo nahor. Tepelná ampacita vedenia sa zvyšuje, keď je vodič ochladzovaný vetrom alebo keď sa teplota okolia zníži, čo umožňuje, aby sa vedením prenášal väčší výkon [4].

NERPIAME DYNAMICKÉ TEPELNÉ HODNOTENIE

Nepriame DTH uvažuje s tým, že ampacita prenosového vedenia sa dynamicky mení v závislosti od podmienok prostredia. Okolité podmienky predstavujú všetky klimatické podmienky prostredia, medzi ktoré patrí [1], [3], [5]:

- okolitá teplota,
- rýchlosť a smer prúdenia vetra,
- intenzita slnečného žiarenia,
- zrážky.

PRIAME DYNAMICKÉ TEPELNÉ HODNOTENIE

Priamy prístup k DTH zahŕňa priame meranie vlastností elektrického vedenia, vrátane [5]:

- teploty vodiča,
- mechanického napätia,
- priehybu.

Hodnotenie prúdovej kapacity vedenia zvyčajne zahŕňa doplnkové údaje zo systému monitorovania počasia. Súčasne bolo navrhnutých a prediskutovaných niekoľko metodológií na odhadovanie DTH v nadzemných prenosových vedeniach [5].

USTÁLENÉ DYNAMICKÉ TEPELNÉ HODNOTENIE

Teplota vodiča, ktorá dosiahne stabilnú hodnotu, definuje ustálenú dynamickú ampacitu. Tento výpočet predpokladá konštantné prevádzkové parametre, udržiavanie vodiča v tepelnej rovnováhe. V dôsledku toho rieši stabilnú teplotu vodiča pred alebo po prechodnej udalosti vyvolanej zmenami jedného alebo viacerých prevádzkových parametrov. Riešenie v ustálenom stave má za cieľ zistiť stabilnú teplotu vodiča pri konštantných klimatických podmienkach a známom prúde pretekajúcom vodičom [9].

PRECHODNÉ DYNAMICKÉ TEPELNÉ HODNOTENIE

Špecifikovaná tepelná kapacita vodiča môže byť použitá na krátkodobé prúdové preťaženie, pri čom sa dodrží to, aby teplota vodiča neprekročila jeho maximálny limit. Toto krátke obdobie prúdového preťaženia sa nazýva prechodná dynamická ampacita a vyznačuje sa obmedzeným trvaním. Táto výpočtová metóda zdôrazňuje zmeny teploty vodiča v priebehu času, pričom sa berú do úvahy zmeny konkrétnych prevádzkových faktorov, ako sú klimatické podmienky a prúd pretekajúci vodičom [9].

III. TEPELNÉ BILANCIE NADZEMNÉHO ELEKTRICKÉHO VEDENIA NAVRHNUTÉ ŠTANDARDMI

IEEE vytvorila normy IEEE-738 pre DTH a CIGRE vyvinula rôzne odporúčania a prístupy DTH, ako Technical Brochure 601. Obe techniky (CIGRE a IEEE) majú základ v tepelnej bilancií tepla získaného a strateného vo vodiči, a to podľa zaťaženia a faktorov prostredia [9].

Prvá CIGRE metóda vypočítava teplotu vodiča pomocou podmienok ustáleného stavu (1) [9]:

$$P_c + P_r = P_s + P_j + P_m \quad (1)$$

kde

- P_c je ochladzovanie v dôsledku konvekcie (W/m),
- P_r je ochladzovanie v dôsledku žiarenia do okolia (W/m),
- P_s je ohrievanie v dôsledku slnečného žiarenia (W/m),
- P_j je ohrievanie v dôsledku Joulovho efektu (W/m),
- P_m je ohrievanie v dôsledku magnetického efektu (W/m).

Druhá metóda odhaduje jeho teplotu pomocou dynamickej rovnováhy (2), ktorá berie do úvahy tepelnú zotrvačnosť vodiča. V podmienkach prechodného stavu je základná tepelná bilancia definovaná ako [10]:

$$m \cdot c \cdot \frac{dT_c}{dt} = P_s + P_j + P_m - P_c - P_r \quad (2)$$

kde

- m je hmotnosť na jednotku dĺžky vodiča (kg/m),
- c špecifická tepelná kapacita vodiča (J/(kg·K)),
- T_c teplota vodiča (°C).

Rovnica tepelnej rovnováhy v ustálenom stave uvedená v štandarde IEEE 738 je označená [11], [12]:

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

kde

- P_c je ochladzovanie v dôsledku konvekcie (W/m),
- P_r je ochladzovanie v dôsledku žiarenia do okolia (W/m),
- P_s je ohrievanie v dôsledku slnečného žiarenia (W/m),
- P_j je ohrievanie v dôsledku Joulovho efektu (W/m),

IV. AMPACITA ELEKTRICKÝCH PRENOSOVÝCH VEDENÍ V SLOVENSKEJ ELEKTRIZAČNEJ PRENOSOVEJ SÚSTAVE APLIKOVANÁ POMOCOU TECHNICKEJ PRÍRUČKY CIGRE 601

Pri praktickej aplikácii, ako je predpísané štandardom STN EN 50341-2-23, sa za určených podmienok používa maximálna prípustná prúdová hodnota stanovená pre najvyššiu konštrukčnú teplotu vodiča [13]:

- teplota okolia $T_a + 35$ °C,
- rýchlosť vetra $V 0.5$ m/s pod uhlom $\theta 45$ ° k osi vodiča,
- globálna intenzita slnečného žiarenia $I_T 1000$ W/m²,
- koeficient absorpcie $\alpha_s 0,5$,
- koeficient emisivity $\varepsilon_s 0,5$.

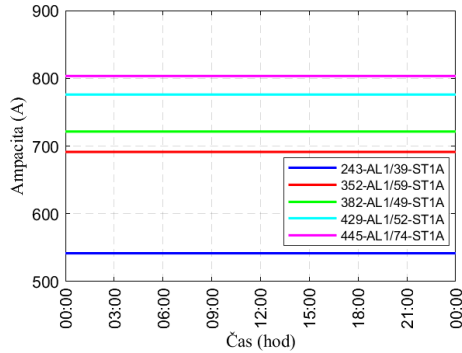
Medzi najpoužívanejšie typy vodičov v nadzemných prenosových vedeniach patria vodiče ALFe, ktoré sú usporiadané individuálne alebo vo zväzkoch v závislosti od úrovne napätia. Tabuľka I uvádza definované technické parametre vybraných vodičov ALFe požadovaných na analýzu výpočtu maximálnej prípustnej aktuálnej hodnoty ampacity v závislosti od klimatických podmienok. Pre túto analýzu maximálna povolená teplota vodiča $T_v = 80$ °C pri nadmorskej výške $y = 208$ m [14].

TABUĽKA I Technické parametre uvažovaných ALFe vodičov

Typ vodiča	243-AL1/39-ST1A	352-AL1/59-ST1A	445-AL1/74-ST1A	429-AL1/52-ST1A	382-AL1/49-ST1A
Priemer vodiča (mm)	21,75	26,5	29,7	28,7	27,0
Priemer hliníkového drôtu v hliníkovom vodiči (mm)	3,45	4,0	4,5	3,75	3,0
Elektrický odpor vodiča (Ω/km)	0,1181	0,0816	0,0650	0,0674	0,0758
Tepelný koeficient odporu (K ⁻¹)	4,03·10 ⁻³				
Absorpcia povrchu vodiča (-)	0,65				
Koeficient emisivity povrchu vodiča (-)	0,35				

STATICKÁ AMPACITA

Statická zaťažiteľnosť popísaných vodičov zahŕňa podmienky podľa uvedenej normy, ako už bolo povedané, ide o jednotnú hodnotu počas celého obdobia/roka. Pre jednoduchosť bola statická ampacita znázornená pre 24-hodinový interval (Obr. 1) [15].

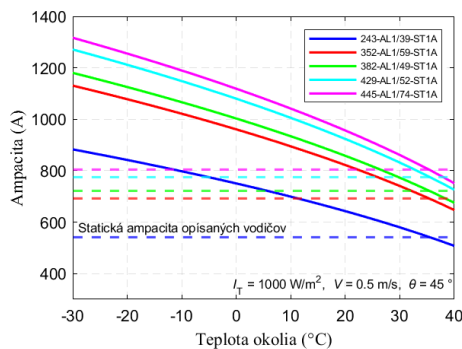


Obr. 1. Statická ampacita pre použité vodiče

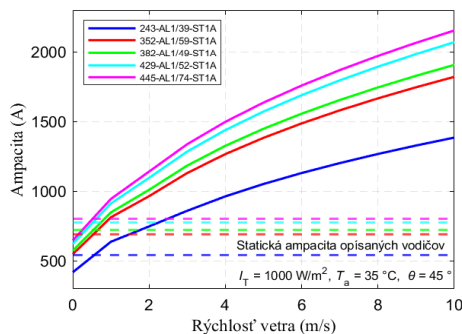
USTÁLENÁ DYNAMICKÁ AMPACITA

Následujúce grafické závislosti znázorňujú vplyv rôznych klimatických podmienok na maximálnu povolenú ampacitu vodiča. Každá závislosť sa zobrazuje alternatívne pre intenzitu slnečného žiarenia $S = 1000 \text{ W/m}^2$ [16].

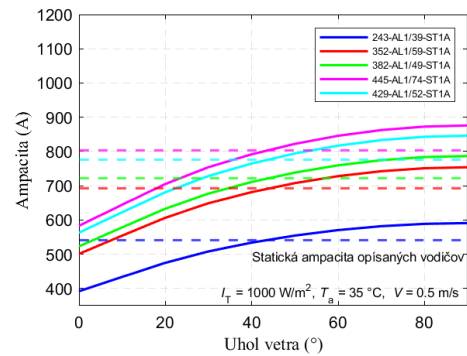
Z grafov znázornených na obrázkoch 2 až 5 vyplýva, že zvyšujúca sa intenzita slnečného žiarenia a okolitá teplota negatívne ovplyvňujú ampacitu, zatiaľ čo zvýšenie uhla vetra a rýchlosti vetra pozitívne ovplyvňuje prúdovú kapacitu [17].



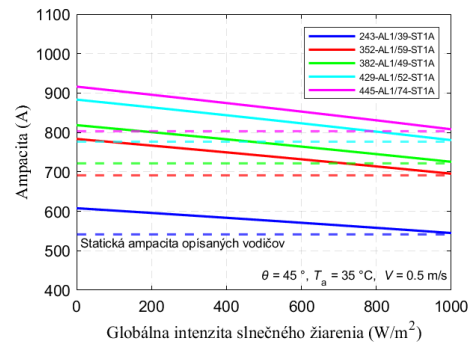
Obr. 2. Závislosť maximálnej akceptovateľnej hodnoty prúdu I_{\max} pre rôzne typy vodičov od teploty okolia T_a



Obr. 3. Závislosť maximálnej dovolenej hodnoty prúdu I_{\max} rôznych typov vodičov od rýchlosti vetra V



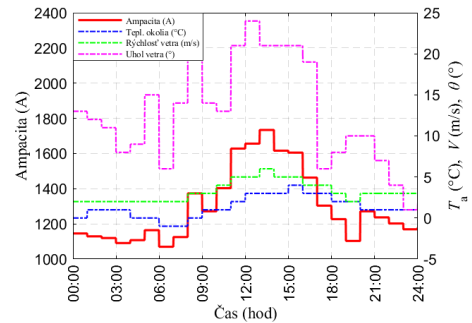
Obr. 4. Závislosť maximálnej dovolenej hodnoty prúdu I_{\max} rôznych typov vodičov od smeru vetra θ



Obr. 5. Závislosť maximálnej prípustnej hodnoty prúdu I_{\max} rôznych typov vodičov od intenzity slnečného žiarenia I_T

VYUŽITIE USTÁLENEJ DYNAMICKEJ AMPACITY PRE VEDENIE V427 RIMAVSKÁ SOBOTA – MOLDAVA

Dynamická ampacita v ustálenom stave bola aplikovaná na prenosovom vedení V427 Rimavská Sobota - Moldava. Toto vedenie využíva vodič 352-AL1/59-ST1A a údaje o počasi boli získané 25. novembra 2021. Obrázok 6 znázorňuje výslednú dynamickú ampacitu v ustálenom stave pre 24-hodinový interval, pričom graf zobrazuje aj okolité meteorologické podmienky [18].



Obr. 6. Aplikácia dynamickej ampacity v ustálenom stave I_{\max} na konkrétnom prenosovom vedení V427

V. DISKUSIA

Táto štúdia sa zaoberala konceptom ampacity a jej kategorizáciou spolu s jej praktickými aplikáciami, následne boli opísané metodické normy stanovenia ampacity. Súhlasne bola vypočítaná statická a ustáleno-dynamická ampacita pre najbežnejšie používané vodiče v prenosovej sústave Slovenskej republiky. Následne bola vypočítaná ustálená dynamická ampacita pre konkrétne vedenie s jeho technickými parametrami za reálnych meteorologických podmienok pre vybraný deň v roku.

POĎAKOVANIE

Túto prácu podporila Agentúra na podporu výskumu a vývoja na základe zmlúv č. APVV-19-0576 a APVV-21-0312.

LITERATÚRA

- [1] L. Beňa, M. Kolcun, D. Medved', M. Pavlík, Z. Čonka, and J. Király, "The influence of climatic conditions on the dynamic ampacity of external lines," *Elektroenergetika*, vol. 15, no. 2, 2022, pp. 47.
- [2] D. Kladar, "Dynamic Line Rating in the world - Overview," 2014.
- [3] P. Pijarski, P. Kacejko, "Elimination of Line Overloads in a Power System Saturated with Renewable Energy Sources," *Energies*, vol. 16, no. 9, 2023, pp. 3751, DOI: 10.3390/en16093751.
- [4] IRENA, "System Operation: Innovation Landscape Briefs," 2020, pp. 1-20.
- [5] S. Karimi, P. Musilek, and A. M. Knight, "Dynamic thermal rating of transmission lines: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 91, 2018, pp. 600-612, DOI: 10.1016/j.rser.2018.04.001.
- [6] M. Simms, L. Meegahapola, "Comparative analysis of dynamic line rating models and feasibility to minimise energy losses in wind rich power networks," *Energy Conversion and Management*, vol. 75, 2013, pp. 11-20, DOI: 10.1016/j.enconman.2013.06.003.
- [7] R. Alberdi, E. Fernandez, I. Albizu, M. T. Bedialauneta, and R. Fernandez, "Overhead line ampacity forecasting and a methodology for assessing risk and line capacity utilization," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 133, 2021, pp. 107305, DOI: 10.1016/j.ijepes.2021.107305.
- [8] D. A. Douglass, et al., "A Review of Dynamic Thermal Line Rating Methods With Forecasting," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 34, no. 6, 2019, pp. 2100-2109, DOI: 10.1109/TPWRD.2019.2932054.
- [9] A. Margitová, "Increasing the transmission capacity of external power lines by calculating the dynamic ampacity," PhD Thesis, TUKE, Košice, 2021.
- [10] A. Arroyo, P. Martinez Castro, R. Manana, M. Madrazo, A. Lecuna, and R. Gonzalez, "Comparison between IEEE and CIGRE Thermal Behaviour Standards and Measured Temperature on a 132-kV Overhead Power Line," *Energies*, vol. 8, no. 12, 2015, pp. 13660-13671, DOI: 10.3390/en81212391.
- [11] E. Karunarathne, A. Wijethunge, and J. Ekanayake, "Enhancing PV Hosting Capacity Using Voltage Control and Employing Dynamic Line Rating," *Energies*, vol. 15, 2022, pp. 134, DOI: 10.3390/en15010134.
- [12] J. Dzmura, J. Petráš, M. Kolcun, et al., "Separation of solid particles from flowing gases by AC high voltage," in *13th International Conference on Electrostatics (Electrostatics)*, Aug 2017, pp. 158-164.
- [13] B. Dolník, M. Rajňák, R. Cimbala, et al., "The Response of a Magnetic Fluid to Radio Frequency Electromagnetic Field," *Acta Physica Polonica A*, vol. 131, Apr. 2017, pp. 946-948, DOI: 10.12693/APhysPolA.131.946.
- [14] I. Kolcunova, J. Zbojovsky, M. Pavlík, et al., "Shielding Effectiveness of Electromagnetic Field by Specially Developed Shielding Coating," *Acta Physica Polonica A*, vol. 137, no. 5, pp. 711-713, May 2020, DOI: 10.12693/APhysPolA.137.711.
- [15] O. Shavolkin, I. Shvedchikova, M. Kolcun, D. Medved, "Improvement of the Grid-Tied Solar-Wind System with a Storage Battery for the Self-Consumption of a Local Object", In: *Energies*, Vol. 15, No. 14, ISSN 1996-1073, DOI: 10.3390/en15145114.
- [16] D. Medved, M. Klešč, "Modeling of electrical off-grid network in the simscape power systems", In: *Proceedings of the 9th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering, ELEKTROENERGETIKA 2017*, pp. 465-470, ISBN 978-805533195-9.
- [17] M. Ivancak, M. Kolcun, Z. Conka, D. Medved, "Modelling microgrid as the basis for creating a smart grid model", In: *Przeglad Elektrotechniczny*, Vol. 95, No. 8, pp. 41-43, ISSN 0033 2097, DOI: 10.15199/48.2019.08.11.
- [18] J. Kiraly, D. Medved, "Electromobility in smart grids - simulation of V2G charging influence on grids", In: *Przeglad Elektrotechniczny*, Vol. 99, No. 4, pp. 237 - 240, ISSN 0033-2097, DOI: 10.15199/48.2023.04.41.

ADRESY AUTOROV

František Margita, Technická Univerzita v Košiciach, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 042 10, Slovenská republika, frantisek.margita@tuke.sk
 doc. Ing. Lubomír Beňa, PhD., Technická Univerzita v Košiciach, Katedra elektroenergetiky, Mäsiarska 74, Košice, SK 042 10, Slovenská republika, lubomir.bena@tuke.sk