Зборник радова Факултета техничких наука, Нови Сад

УДК: 621.38

ДОИ: https://doi.org/10.24867/34BE34Pajic

ТЕРМИЧКИ АСПЕКТИ СТРУЈНЕ ОПТЕРЕТИВОСТИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТСКИХ КАБЛОВА

THERMAL ASPECTS OF THE CURRENT-CARRYING CAPACITY OF POWER CABLES

Милош Пајић, *Факултет техничких наука*, Нови Сад

Студијски програм – ЕЛЕКТРОТЕХНИКА И РАЧУНАРСТВО

Кратак садржај – *У овом раду је приказан прорачун термички трајно дозвољене струје електроенергетских каблова. При томе је анализиран утицај различитих фактора на вредност термички трајно дозвољене струје, међу којима су конструкција и начин полагања каблова, температура и термички отпор земљишта у које се каблови полажу, утицај исушивања земљишта и променљивог дијаграма оптерећења. Добијене вредности термички трајно дозвољене струје су упоређене са вредностима које се користе у домаћој електропривреди.*

Кључне речи: *електроенергетски каблови, термички трајно дозвољена струја, температура земљишта, термички отпор земљишта, променљиви дијаграм оптерећења*

Abstract – *This paper presents calculation of the current-carrying capacity of power cables. Also, it is analyzed how different factors affect the current-carrying capacity of power cables, including construction of the cables, soil temperature, soil thermal resistivity, soil drying and the influence of time-varying load. The results of current-carrying capacity obtained in this paper are compared with the values that are used in power utilities in Serbia.*

Keywords: *power cables, current-carrying capacity, soil temperature, soil thermal resistivity, time-varying load*

1. УВОД

Електроенергетски каблови су кључна компонента система за пренос и дистрибуцију електричне енергије, посебно у урбаним индустријским и просторно ограниченим срединама. Један од најважнијих параметара у њиховој експлоатацији је термички трајно дозвољена струја, односно максимална струја коју кабл може дуготрајно да преноси без прегревања.

Називна струја кабла је она трајна струја која при основној (називној) температури околине и основним условима хлађења, загреје кабл до граничне температуре, односно изазове гранично повишење температуре кабла у односу на околину. Струја којом се може оптеретити кабл тако да, у зависности од тренутних услова, загревање кабла буде максимално, односно повишење температуре кабла у односу на околину буде максимално, јесте термички трајно дозвољена струја кабла.

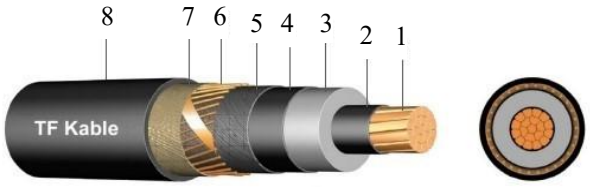
Циљ овог рада је да се, кроз анализу конкретних случајева, прикаже утицај различитих услова на термички дозвољену струју кабла.

НАПОМЕНА:

Овај рад проистекао је из мастер рада чији ментор је био доцент др Невен Ковачки

2. КОНСТРУКЦИЈА ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТСКИХ КАБЛОВА

У овом раду анализира се кабл ознаке XHE 49 1×95/16 mm², 20/35 kV који је приказан на слици 1. XHE 49 је једножилни кабл са бакарним проводником пресека 95 mm² и електричном заштитом пресека 16 mm², која је изведена у виду омота или оплета од бакарних жица и трака. Ознака 49 означава да је електрична заштита постављена око сваке жиле посебно, у виду омота или оплета од металних жица, односно омота од металних трака, као и да кабл поседује заштиту од продора влаге. Напонска ознака 20/35 kV означава да је 20 kV фазни напон, а 35 kV линијски напон између фаза [1].



Слика 1. Конструкција и попречни пресек кабла

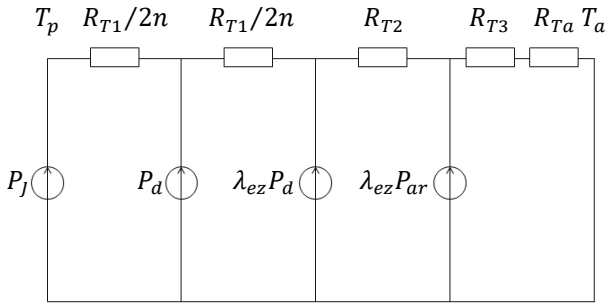
На слици 1 бројевима од 1 до 8 означени су поједини конструктивни елементи кабла [2]:

1) Вишежични проводник израђен од бакра,
2) Екран проводника (слабопроводни слој),
3) Изолација, умрежени полиетилен (XPE),
4) Екран изолације, слабопроводни слој на изолацији. Екрани служе за обликовање електричног поља испуњавањем неравнина између проводника и изолације, односно изолације и електричне заштите
5) Сепаратор, бубрива полуводљива трака. Њихова улога је да спрече продор воде у кабл
6) Електрична заштита – метални екран, бакарне жице и контраспирала од бакарне траке,
7) Сепаратор, бубрива полуводљива трака,

8) Спољашњи плашт од полиетилена (PE).

3. ОСНОВНИ ПРОРАЧУН ТЕРМИЧКИ ТРАЈНО ДОЗВОЉЕНЕ СТРУЈЕ

Прорачун термички трајно дозвољене струје кабла заснива се на еквивалентној шеми на слици 2.



Слика 2. Еквивалентна шема за термички прорачун кабла [3]

У еквивалентној шеми се појављују следеће термичке отпорности:

- Термичка отпорност између проводника и електричне заштите:

$$R_{T1} = \frac{\rho_{tPE}}{2\pi} \cdot \ln \frac{d_i}{d_p} \quad (1)$$

- Термичка отпорност између електричне заштите и кабла:

$$R_{T2} = \frac{\rho_{tPE}}{2\pi} \cdot \ln \frac{d_k}{d_{ez}} \quad (2)$$

- Термичка отпорност омотача механичке заштите:

$$R_{T3} = 0 \quad (3)$$

- Термичка отпорност земље (амбијента):

$$R_{Ta} = R_{Tz} = \frac{\rho_{tz}}{2\pi} \cdot (\ln k + \ln k_a) \quad (4)$$

Геометријски фактори који утичу на термичке отпорности израчунавају се по следећим релацијама:

- Фактор геометрије кабла

$$k = \frac{2h}{d_k} + \sqrt{\left(\frac{2h}{d_k}\right)^2 - 1} \quad (5)$$

- Фактор утицаја суседних каблова

$$k_a = \sqrt{1 + \left(\frac{2h}{a}\right)^2} \quad (6)$$

Температуре потребне за прорачун узимају се као:

- Максимална температура проводника

$$\mathrm{T}_p = \mathrm{T}_{max} = 90^0 C \quad (7)$$

- Температура референтне земље

$$\mathrm{T}_a = \mathrm{T}_0 = 20^0 C \quad (8)$$

Губици у проводнику и електричној заштити дати су изразима:

- Џулови губици

$$P_J = n \cdot R_{90^oC} \cdot I_{max}^2 \quad (9)$$

- Диелектрични губици

$$P_d \approx 0 \quad (10)$$

- Губици у електричној заштити

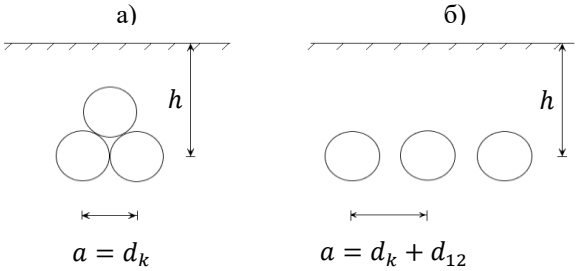
$$P_{ez} = \lambda_{ez} P_J \quad (11)$$

- Губици у механичкој заштити

$$\lambda_{ar} P_J = 0 \quad (12)$$

У наставку су посебно приказани резултати за случајеве када су разматрани једножилни каблови положени у снопу и у равни, како је приказано на слици 3. У горњим релацијама су коришћене следеће вредности [4]:

- ρ_{tPE} – специфична термичка отпорност изолације од умреженог полиетилена $\rho_{tPE} = 3{,}5\ Km/W$,
- ρ_{tz} – специфична термичка отпорност земљишта чија вредност зависи од типа и карактеристика земљишта, неисушено земљиште $\rho_{tz} = 1\,Km/W$, исушено земљиште $\rho_{tiz} = 2{,}5\,Km/W$,
- d_p – пречник проводника,
- d_i – пречник сепаратора преко изолације,
- d_{ez} – пречник електричне заштите,
- d_k – пречник кабла,
- h – дубина полагања кабла,
- a – растојање између оса каблова,
- d_{12} – растојању између суседних каблова када се поставе у равни, $d_{12} = 7\ cm$
- n – број жила проводника,
- R_{90^oC} – електрични отпор проводника при температури од 90°C,
- I_{max} – максимална струја оптерећења кабла,
- λ_{ez} – фактор губитака у електричној заштити, када су три кабла постављена у снопу $\lambda_{ez} = 0{,}0135$, а када постављена у равни $\lambda_{ez} = 0{,}054$



Слика 3. Три једножилна кабла положена у а) снопу; б) равни

3.1. Прорачун за каблове положене у снопу

Уколико се три једножилна кабла полажу у снопу у земљу на дубину 0,7 m применом горе наведених формула добијају се конкретне вредности термичких отпорности:

- $R_{T1} = 0{,}586\,Km/W$
- $R_{T2} = 0{,}092\ Km/W$
- $R_{Tz} = 1{,}8047\,Km/W$

На основу тих вредности, дозвољена струја се рачуна из израза:

$$I_{max} = \sqrt{\frac{T_{max} - T_0}{R_{90^oC} \cdot \left(R_{T1} + R_{T2} + R_{Tz} + \lambda_{ez} \cdot (R_{T2} + R_{Tz})\right)}} \quad (13)$$

Резултат прорачуна:

- $I_{max} = 337\ A$

Према вредностима које се користе у домаћој електропривреди максимално дозвољена трајна струја износи 350 А, што представља одступање од свега 3–4% у односу на прорачунату вредност [5].

3.2. Прорачун за каблове положене у равни

Уколико се три једножилна кабла полажу у равни у земљу на дубину 0,7 m само се вредност термичког отпора земље мења због промене геометрије и она износи:

- $R_{Tz} = 1{,}482\,Km/W$

Рачуном по истој формули добија се:

- $I_{max} = 356{,}23\ A$

У домаћој електропривреди максимално дозвољена трајна струја износи $370\,A$, што такође представља разлику од 3-4%, потврђујући тачност методологије [5]. Каблови у равни, у већем броју случајева, могу се више оптеретити због мањег утицаја загревања међусобно. Ипак, када се каблови полажу у равни, повећава се фактор губитака електричне заштите, што треба узети у обзир.

4. УТИЦАЈ ИСУШИВАЊА ЗЕМЉИШТА

Када је кабл положен у земљу, током експлоатације долази до ослобађања топлоте услед оптерећења. Ова топлота доводи до исушивања околног земљишта, што директно утиче на смањење његове способности одвођења топлоте. Последично, повећава се температура кабла, што захтева смањење струје оптерећења да би температура остала у дозвољеним границама. Због тога је максимално дозвољена струја у исушеном земљишту нижа него у нормалним условима. Термичке отпорности, као и корекциони фактори, рачунају се као у поглављу 3. Отпорност исушеног слоја земљишта добија се следећом релацијом:

$$R_{tiz} = \frac{\rho_{tiz}}{2\pi} \cdot (\ln k + \ln k_a) = \frac{\rho_{tiz}}{\rho_{tz}} \cdot R_{tz} \qquad (14)$$

Пошто важи претпоставка као и у претходном поглављу, да је оптерећење константно, може се узети да је пад температуре у неисушеном слоју земљишта $\triangle\theta_{\mathrm{xz}} = 15^0 C$ [4].

Термички трајно дозвољена струја се рачуна као:

$$I_{max} = \sqrt{\frac{T_{max} - T_0 + \frac{\rho_{tiz} - \rho_{tz}}{\rho_{tz}} \cdot \triangle\theta_{\mathrm{xz}}}{X}} \qquad (15)$$

$$X = R_{90^oC} \cdot \left(R_{T1} + R_{T2} + R_{Tiz} + \lambda_{ez} \cdot (R_{T2} + R_{Tiz})\right)$$

- Фактор геометрије слоја земљишта који се исушује:

$$k_x = \exp\left(\frac{2\pi \cdot \triangle\theta_{xz}}{3 \cdot \rho_{tz} \cdot \mathrm{P}}\right) \qquad (16)$$

Где је:

- Снага губитака у једном каблу $P = R' \cdot \mathrm{I}^2_{\mathrm{max}}$ (17)
- Фиктивна електрична отпорност проводника кабла $R' = R_{90^oC} \cdot (1 + \lambda_{\mathrm{ez}})$ (18)

Након израчунавања струје, проверава се валидност претпоставке о исушености земљишта. Услов који мора бити испуњен је:

$$d_x > 2a \qquad (19)$$

- d_x – пречник исушене зоне земљишта

Уколико је услов испуњен, резултат је валидан и треба уважити утицај исушивања земљишта. У супротном, примењују се вредности прорачуна без утицаја исушености [3].

4.1. Прорачун за каблове положене у снопу

За полагање три кабла у снопу на дубини од h = 0,7 m, термичке отпорности, геометријски параметри и максимално дозвољена струја су (из погл. 3):

- $a = d_k = 40{,}26\,mm$
- $I_{max} = 337\,A$

Прорачунати параметри:

- $R' = 0{,}249 \cdot 10^{-3}\,\Omega/m$
- $P = 28{,}28\ W/m$
- $k_x = 3{,}037$
- $d_x = 0{,}260\,m$

Пошто је услов да долази до исушења, $d_x > 2a$ испуњен, претпоставка о исушивању је валидна. Термичка отпорност исушене земље и максимална дозвољена струја износе:

$$R_{tiz} = 4{,}51175\,Km/W$$
$$I_{max} = 267{,}74\ \mathrm{A}$$

Треба проверити да ли је при овој струји испуњен услов $d_x > 2a$ што у овом случају јесте јер је:

$$d_x = 0{,}497\,m$$

Према вредностима које се користе у домаћој електропривреди максимално дозвољена трајна струја при карактеристици потпуно исушеног земљишта и на референтној температури износи $237{,}65\,A$ [5].

4.2. Прорачун за каблове положене у равни

За полагање три кабла у равни на дубини од h = 0,7 m, термичке отпорности, геометријски параметри и максимално дозвољена струја су (из погл. 3):

- $a = d_k + d_{12} = 110{,}26\,mm$
- $I_{max} = 356{,}23\,A$

Прорачунати параметри:

- $R' = 0{,}259 \cdot 10^{-3}\,\Omega/m$
- $P = 32{,}87\ W/m$
- $k_x = 2{,}6$
- $d_x = 1{,}264\,m$

Пошто је услов да долази до исушења, $d_x > 2a$ испуњен, претпоставка о исушивању је валидна.

Максимална струја којом се кабл може оптеретити уважавајући исушење износи:

$$I_{max} = 286{,}39\ \mathrm{A}$$

Према вредностима које се користе у домаћој електропривреди, максимално дозвољена трајна струја износи $251{,}23\,A$ [5].

Иако су прорачуном добијене нешто више вредности струје у односу на вредности које се уобичајено користе у домаћој електроенергетској пракси, разлика се може приписати различитим моделским претпоставкама. Вредности које се примењују у пракси засноване су на условима потпуно исушеног земљишта са фиксном термичком отпорношћу, док спроведени прорачун узима у обзир постепену промену термичких карактеристика тла у зависности од оптерећења кабла. У домаћим препорукама се при израчунавању дозвољене струје полази од основних вредности које се затим коригују редукционим фактором, како би се уважавао утицај различите термичке отпорности земљишта.

5. УТИЦАЈ ПРОМЕНЉИВОГ ДИЈАГРАМА ОПТЕРЕЋЕЊА

У реалним условима рада електроенергетских каблова, оптерећење није константно већ варира у току дана. Ове варијације зависе од карактеристика потрошачког подручја, доба дана, као и навика

корисника. Као последица променљивог оптерећења, варира и снага губитака, што директно утиче на загревање кабла и околног тла. Код променљивог оптерећења, у земљишту се формира уски слој тла око кабла који „прати“ температурне осцилације услед промена струјног оптерећења. Димензије овог слоја зависе од облика и учестаности дијаграма оптерећења. Унутар овог слоја земљиште се загрева под утицајем максималне снаге губитака, док се остатак земљишта загрева у складу са средњом вредношћу оптерећења. Промена оптерећења у прорачуну се уважава преко фактора оптерећења m, који представља однос између стварног оптерећења кабла и његовог максималног дозвољеног оптерећења током одређеног периода. Вредност фактора m зависи од облика дијаграма оптерећења и времена трајања појединих интервала. На основу њега се коригује израчуната термички дозвољена струја, тако да вредности дозвољене струје при променљивом оптерећењу буду нешто више него код константног оптерећења, јер током дана постоје периоди нижег оптерећења који омогућавају спорије загревање кабла [3].

У табели 1 су приказане прорачунате вредности термички трајно дозвољене струје за константно и променљиво оптерећење. Добијени резултати показују да се у случају променљивог оптерећења кабл може оптеретити већим струјама.

Табела 1. Поређење максимално дозвољене струје

Начин полагања	Константо оптерећење	Променљиво оптерећење
У снопу	337 A	378 A
У равни	356 A	408 A

6. УТИЦАЈ ТЕМПЕРАТУРЕ ЗЕМЉИШТА

Термички дозвољена струја којом се кабл може дугорочно оптеретити зависи од услова околине, пре свега од температуре амбијента и стања земљишта у коме је кабл положен. У досадашњим прорачунима коришћена је референтна температура земље од 20°C, али у реалним условима температура варира у зависности од годишњег доба, што директно утиче на капацитет оптерећења каблова [5].

Табела 2. Поређење максимално дозвољене струје када су каблови у снопу

Температура	Прорачуната вредност	Вредност из праксе
30^0C	312 A	322 A
20^0C	337 A	350 A
5^0C	371 A	385 A

Табела 3. Поређење максимално дозвољене струје када су каблови у равни

Температура	Прорачуната вредност	Вредност из праксе
30^0C	330 A	340 A
20^0C	356 A	370 A
5^0C	393 A	407 A

7. ЗАКЉУЧАК

У овом раду извршена је анализа термички трајно дозвољене струје електроенергетских каблова, са циљем бољег разумевања утицаја различитих фактора на струјно оптерећење и безбедан рад кабловских система. Кроз прорачун и разматрање конструктивних и спољашњих параметара, изведени су закључци који имају директну примену у пројектовању и експлоатацији електроенергетских мрежа. Добијени резултати показују да конструкција каблова, термичке карактеристике земљишта (температура и влажност), као и облик дијаграма оптерећења, представљају кључне факторе у одређивању термички дозвољене струје каблова.

8. ЛИТЕРАТУРА

[1] Конструкција XHE 49 кабла и попречни пресек

https://www.fkz.rs/katalozi/FKZSPDF.pdf

приступљено 14.11.2024.

[2] Електроенергетски каблови

https://www.ucg.ac.me/skladiste/blog_4397/objava_67323/fajlovi/!!Pr%20EEK%202018.pdf

приступљено 10.11.2024.

[3] Драган Тасић, „*Основи електроенергетске кабловске технике“*, Електронски факултет у Нишу, Ниш 2001.

[4] Никола Рајаковић, Драган Тасић, Гојко Савановић „*Дистрибутивне и индустријске мреже“*, Београд 2004

[5] Кончар, „*Каталог Технички прорачуни“*, Електроиндустрија д.д., Загреб 2023

Кратка биографија



Милош Пајић је рођен 1997. године у Лозници. Завршио је средњу „Техничку школу“ у Лозници. Дипломски рад на факултету техничких наука из области електротехнике и рачунарства – Електроенергетски системи одбранио је 2020. godine.

Контакт: milospajic1712@gmail.com