

Univerza *v Ljubljani*
Fakulteta *za elektrotehniko*



Segrevanje vodnikov

Seminarska naloga pri predmetu **Razdelilna in industrijska omrežja**

Žiga Žerjav

Mentor: prof. dr. Grega Bizjak

Študijsko leto **2016/17**

Povzetek

Glavna tema te seminarske naloge je gretje vodnikov, torej elementov, ki prenašajo električno energijo tako suspendirani v zraku (prostozračni vod) ali pod zemljo (kablovod). Prekomerno segrevanje vodnikov je za elektroenergetski sistem in njegove elemente škodljivo, saj imajo materiali pri visokih temperaturah drugačne fizikalne lastnosti kot pri nižjih; npr. poveča se upornost in pomanjša mehanska trdnost. Elektroenergetski sistem je projektiran za določeno okno teh lastnosti; če preidemo ven iz tega delovnega območja, se lahko posamezen element deformira ali celo mehansko popusti.

Ključne besede: vodniki, prevajanje toplote, količnik oddane toplote, električna moč

Kazalo

| | | |
|-------|---|----|
| 1. | Uvod | 7 |
| 2. | Fizikalne osnove | 8 |
| 2.1 | Upornost ter toplotna moč | 8 |
| 2.2 | Prenos toplote | 9 |
| 2.2.1 | Kondukcija | 10 |
| 2.2.2 | Toplotna radiacija | 10 |
| 2.2.3 | Konvekcija | 10 |
| 2.3 | Raztezanje | 11 |
| 3. | Prostozračni vodnik | 12 |
| 3.1 | Viri in ponori toplote vodnika v zraku v ustaljenem delovanju | 12 |
| 3.1.1 | Sevanje Sonca, okolice ter vodnika | 12 |
| 3.1.2 | Konvekcija | 13 |
| 3.1.3 | Električno segrevanje | 14 |
| 3.2 | Enačbe za obravnavo prostozračnih vodnikov | 15 |
| 3.2.1 | Količnik oddane toplote | 15 |
| 3.2.2 | Časovno segrevanje vodnika | 15 |
| 4. | Kablovod | 17 |
| 4.1 | Toplotna upornost zemlje | 17 |
| 4.2 | Faktor obremenitve | 18 |
| 4.3 | Maksimalni dovoljeni trajni tok | 19 |
| 5. | Naloga | 21 |
| 6. | Vprašanja | 22 |
| 7. | Zaključki | 23 |
| 8. | Viri | 24 |
| | Slika 1: odvisnost ρ od $T_{[2]}$ | 9 |
| | Slika 2: temperatura kot delež maksimalne temperature glede na št. σ | 16 |
| | Slika 3: specifična toplotna upornost peska glede na vlago _[5] | 17 |
| | Slika 4: dnevni diagram porabe _[5] | 18 |

1. Uvod

Idealni energetske sistemi stalno obratujejo z enako količino energije v sistemu, praksa pa nas prisili v delovanje v realnem svetu. Kot velja za vse realne energetske sisteme s pretvorbami in prenosi energij, srečamo razne izgube tudi v elektroenergetskem sistemu. V tej seminarski nalogi se bom posvetil gretju vodnikov, kar je manifestacija termičnih izgub pri prenosu in distribuciji električne energije. Vodnike si lahko za razumevanje termičnih izgub predstavljamo kot ogromne električne grelce. Tudi električni grelci morajo biti projektirani tako, da med delovanjem ne pride do stalitve prevodnih delov ali ohišja naprave ter ostalih mehanskih odpovedi; za elektroenergetske vodnike pa je pomembno še to, da minimiziramo njihov »grelni« karakter. Za grelec je segrevanje koristno in zaželeno, za vodnike pa v velikem delu nezaželeno in škodljivo.

2. Fizikalne osnove

Preden se lotimo termalnih značajev vodnikov je pomembno razumeti fizikalne osnove, ki se tičejo naše teme.

2.1 Upornost ter toplotna moč

Ena od pglavitnih električnih lastnosti materiala je upornost. Vsak material ima svojo specifično upornost ρ pri čemer je A presek ter l dolžina prevodnega elementa. Če je U oznaka za napetost in I za tok, potem je osnovna enačba za upornost R :

$$\rho = R \frac{A}{l} [\Omega\text{m}]$$
$$R = \frac{U}{I} = \rho \frac{l}{A} [\Omega]$$

Druga enačba za nas razkrije pomembni dejstvi, da je upornost obratno odvisna od velikosti preseka ter linearno odvisna od dolžine prevodnega materiala. Neskončno dolg in neskončno ozek prevodnik bo torej imel neskončno upornost. Torej bi lahko rekli, da je ρ snovna, R pa snovno-geometrijska lastnost. Nadaljnje nas zanimata Ohmov zakon ter enačba za toplotno moč prevodnika P , po katerem teče tok.

$$I = \frac{U}{R} [\text{A}]$$
$$P = UI [\text{W}]$$
$$P = \frac{U^2}{R} = RI^2 [\text{W}]$$

Ta toplotna moč je kriva za segrevanje vodnika in posledično njegove okolice. Čeprav sem tu uporabil enosmerno notacijo, veljajo iste enačbe tudi za izmeničen tok, ki se pojavlja v elektroenergetskem sistemu. Jasno je razvidno tudi, da je toplotna moč odvisna od kvadrata toka in linearno od upornosti. Manjšamo jo lahko z večanjem napetosti pri isti preneseni moči ter z manjšanjem upornosti vodnika. Vodniki so v elektroenergetskem omrežju večinoma jekleni (Fe) ali aluminijasti (Al), upornost pa je posledica izbire profila vodnika.

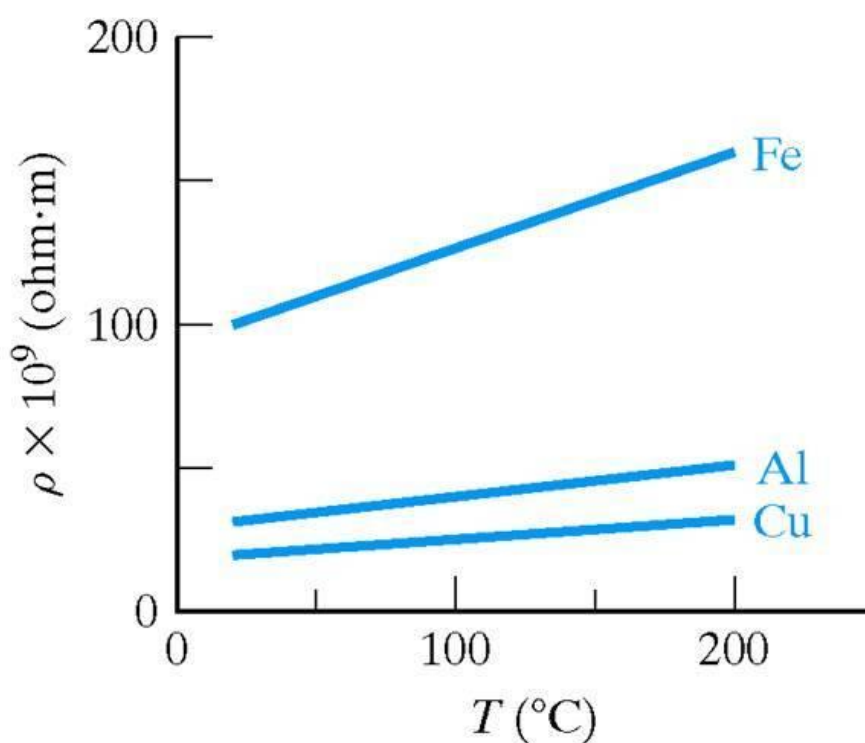
Če toplote, ki jo vodnik generira, ne odvajamo sproti, se material začne segrevati. S tem se začne spreminjati tudi njegova prevodnost. V sledeči enačbi je α temperaturni koeficient upornosti, kar je lastnost specifičnega materiala.

$$\rho = \rho_{\text{referenčna}}(1 + \alpha(T - T_{\text{referenčna}}))$$

Če smatramo geometrijo vodnika kot nespremenljivo, potem velja sledeča enačba.

$$R = R_{referenčna}(1 + \alpha(T - T_{referenčna}))$$

Vidimo, da je upornost linearno odvisna od temperature^[1], kar lahko privede do temperaturnega pobega, če ga ne hladimo primerno: vodnik se segreva; s tem se mu večja upornost, kar potem privede do hitrejšega segrevanja in verjetno do odpovedi.



Slika 1: odvisnost ρ od T ^[2]

2.2 Prenos toplote

Toplotna energija, ki se generira v nekem predmetu, se bo širila v okolico v kombinaciji treh fundamentalnih načinov prenosa toplote: s kondukcijo, radiacijo in konvekcijo. Pri vseh treh nas zanima tok oziroma fluks toplote $\frac{dQ}{dt}$ iz telesa v okolico, kar za nas pomeni, kako hitro se telo hladi. Ponavadi se pri vseh temah, ki se tičejo toplote, gibljemo na Kelvinovi skali.

2.2.1 Kondukcija

Kondukcija je prenos notranje energije oz. toplote z mikroskopskimi trki delcev ter gibanjem elektronov. Vsak material ima svojo toplotno prevodnost k z enoto $\frac{W}{mK}$. Krožni integral po površini telesa nam da konvekcijski toplotni fluks:

$$\frac{dQ}{dt} = -k \oiint \nabla T \cdot dS$$

pri čemer je ∇T toplotni gradient z enoto $\frac{K}{m}$. Sledi, da je kondukcija med dvema telesoma v stiku odvisna od razlike temperature med njima. Hladnejši zrak bo torej hladil hitreje kot topel zrak; vodnik v Sibiriji bo lažje pasivno hladiti kot v Egiptu.

2.2.2 Toplotna radiacija

Toplotna radiacija je infrardeči spekter elektromagnetnega valovanja. Vsa telesa stalno radiirajo energijo. Do izraza pride predvsem v vesolju, kjer je vakuum in je to edini možen način hlajenja. Moč sevanja je definiriral Jožef Stefan; natančneje je definiriral gostoto energijskega toka črnega telesa φ :

$$\varphi = \sigma \cdot T^4$$

Tu je σ Stefan-Boltzmannova konstanta $5.67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$, T pa temperatura v Kelvinih. Gostota po celotni površini telesa bo enaka moči sevanja. Za naše izračune bomo smatrali, da je celotna površina vodnika na isti temperaturi.

2.2.3 Konvekcija

Konvekcija je gibanje in mešanje skupin molekul in atomov pri tekočinah, torej plinih in kapljevinah. Telo s prevajanjem toplote oziroma kondukcijo segreje tekočino. Ker se ji tako poveča prostornina in pomanjša gostota, se dvigne stran od toplega telesa, na njeno mesto pa priteče hladnejša tekočina. Ta efekt lahko izrazito pospešimo z ventilacijo ali pomočjo vetra. V sledeči enačbi je h Nusseltov koeficient prenosa z enoto $\frac{W}{K \cdot m^2}$, A pa je površina telesa v stiku s tekočino.

$$\frac{dQ}{dt} = hA(T_{\text{površine telesa}} - T_{\text{tekočine}})$$

Ker je fluks toplote odvisen od površine telesa v stiku, ni težko razumeti, zakaj imajo radiatorji pri vseh tipih naprav tako veliko in razvejano površino. Tudi iz te enačbe je

jasno razvidno, da večja razlika temperature med hlajenim telesom in hladilom vrača hitrejše hlajenje.

2.3 Raztezanje

Vsa trdna telesa s spreminjanjem temperature spreminjajo svoje dimenzije. Raztezanje v realnem svetu je tridimenzionalno, ker pa je dolžina vodnika veliko večja od njegovega premera, lahko brez večjih napak tak raztezek smatramo kot enodimenzionalen ter linearen v smeri dolžine. Raztezek kot ulomek celotne dolžine je torej linearno odvisen od spremembe temperature in faktorja raztezka.

$$\frac{\Delta l}{l} = \alpha_l \Delta T$$

Če se material ne more raztezati, ima sila raztezka prijemališče v točkah vpetja. To lahko doprinese do nateznih napetosti ter mehanskih deformacij drugje v sistemu. Problem predstavljajo tudi strižne napetosti med jedrom in srajco pletenih vodnikov iz kombinacij Al/Fe/Cu; daljnovidni vodnik pa se lahko zaradi previsoke temperature povesi ter povzroči kratek stik. Več o temu v seminarski nalogi kolega Bevca^[3].

3. Prostozačni vodnik

Daljnovodi imajo vodnike v zraku, zato se le-ti lahko hladijo s kondukcijo oziroma prevajanjem ter s konvekcijo. Seveda tudi toplotno radiirajo, vendar je ta delež zanemarljiv. Na hlajenje še najbolj vpliva temperaturna razlika med vodnikom in okoliškim zrakom. Najprej bi rad predstavil na primeru približne medsebojne velikosti različnih vrst prenosa toplote na vodnik, nato pa bi se osredotočil na enačbe, s katerimi si lahko pomagamo pri izračunu termalnih lastnosti prostoračnega vodnika.

3.1 Viri in ponori toplote vodnika v zraku v ustaljenem delovanju

Ustaljeno delovanje vodnika pomeni, da je dosegel neko določeno temperaturo, kjer je vsota generirane in prejete toplotne energije vodnika enaka oddani. Viri toplotne energije so sevanje sonca, sevanje okolice ter električne izgube; ponori pa so sevanje vodnika ter hlajenje zraka^[4].

3.1.1 Sevanje Sonca, okolice ter vodnika

Vodnik od Sonca ter od okolice prejema energijo; nekaj pa je izseva. Sonce zmeraj »vidi« vodnik kot njegov vzdolžni prerez. Za skupno moč sevanja za ustaljeno obratovanje velja:

sevanje sonca + sevanje okolice = sevanje vodnika

$$\varphi_{sonca} \cdot A_p + \sigma \cdot T_0^4 \cdot S_v = \sigma \cdot T_v^4 \cdot S_v$$

Tu so:

| | |
|-------------------|--|
| φ_{sonca} | Gostota energijskega toka sonca $1000 \frac{W}{m^2}$ |
| A_p | Vzdolžni prerez vodnika |
| σ | Stefan-Boltzmannova konstanta |
| T_0 | Temperatura obdajajočega zraka |
| T_v | Temperatura površine vodnika |
| S_v | Površina vodnika |

Da se odmaknemo od teorije, lahko enačbo preizkusimo na realnem primeru v realnih okoliščinah. Naš Al/Fe 490/65 mm² vodnik v zraku 20°C dolžine 1 m, ki ne prevaja toka, se bo ustalil na 65°C. Vodniki so standardizirani, zato poznamo $S_v = 0.096 \text{ m}^2$ in

$A_p = 0.0306 \text{ m}^2$. Posamezne komponente toplotnih prenosov med vodnikom ter okolico so:

$$\text{sevanje sonca } 1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot 0.0306 \text{ m}^2 = 30 \text{ W}$$

$$\text{sevanje okolice } 5.67 \cdot 10^{-8} \cdot 293^4 \cdot 0.096 = 40 \text{ W}$$

$$\text{sevanje vodnika } 5.67 \cdot 10^{-8} \cdot 338^4 \cdot 0.096 = 70 \text{ W}$$

Zgornja enačba torej velja.

3.1.2 Konvekcija

Zanima nas konvekcija cevi, saj je to najbližje konvekciji okroglega vodnika. Empirično je potrebno ugotoviti faktor h :

$$h_h = 3.26 \cdot \sqrt[4]{T_0 - T_v} \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \quad \text{Horizontalna površina}$$

$$h_v = 2.566 \sqrt[4]{T_0 - T_v} \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \quad \text{Vertikalna površina}$$

$$h_h = 1.4 \cdot \sqrt{\frac{T_0 - T_v}{d}} \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \quad \text{Vodoravna cev; } d \text{ je premer v m}$$

$$\varphi = h_c(T_0 - T_v) = \frac{1.4}{\sqrt[4]{d}} (T_0 - T_v)^{1.25} \quad \text{Gostota toplotnega toka za cev}$$

Zaradi dodanega konveksijskega hlajenja ima isti vodnik toplotno ravnovesje na nižji temperaturi 43°C . Sedaj mora veljati:

sevanje sonca + sevanje okolice = sevanje vodnika + konvekcija

$$\varphi_{\text{sonca}} \cdot A_p + \sigma \cdot T_0^4 \cdot S_v = \sigma \cdot T_v^4 \cdot S_v + \varphi \cdot S_v$$

$$\text{sevanje sonca } 1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot 0.0306 \text{ m}^2 = 30 \text{ W}$$

$$\text{sevanje okolice } 5.67 \cdot 10^{-8} \cdot 293^4 \cdot 0.096 = 40 \text{ W}$$

$$\text{sevanje vodnika } 5.67 \cdot 10^{-8} \cdot 309^4 \cdot 0.096 = 54 \text{ W}$$

$$\text{konvekcija } \frac{1.4}{0.0306^{0.25}} \cdot (309 - 293)^{1.25} \cdot 0.096 = 16 \text{ W}$$

3.1.3 Električno segrevanje

Električno segrevanje je enako električni moči toka in upora vodnika. Vzemimo za naš enometrski Al/Fe vodnik tok 960 A; upornost pa je $75\mu\Omega$. Posledično je električna moč 70 W. Sedaj mora veljati:

sevanje sonca + sevanje okolice + električna moč = sevanje vodnika + konvekcija

$$\varphi_{sonca} \cdot A_p + \sigma \cdot T_0^4 \cdot S_v + I^2 R = \sigma \cdot T_v^4 \cdot S_v + \varphi \cdot S_v$$

Ustaljena temperatura bo 81°C .

$$\text{sevanje sonca } 1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot 0.0306 \text{ m}^2 = 30 \text{ W}$$

$$\text{sevanje okolice } 5.67 \cdot 10^{-8} \cdot 293^4 \cdot 0.096 = 40 \text{ W}$$

$$\text{električna moč } 960^2 \cdot 75 \cdot 10^{-6} = 70 \text{ W}$$

$$\text{sevanje vodnika } 5.67 \cdot 10^{-8} \cdot 354^4 \cdot 0.096 = 85 \text{ W}$$

$$\text{konvekcija } \frac{1.4}{0.0306^{0.25}} \cdot (354 - 293)^{1.25} \cdot 0.096 = 55 \text{ W}$$

Sedaj, ko smo na primeru informativno izračunali velikosti posameznih načinov prenosa toplote, lahko iščemo kakšno bolj simplificirano in generalizirano računsko rešitev.

3.2 Enačbe za obravnavo prostozračnih vodnikov

Če bi želeli vsakič upoštevati in računati vložke vsakega tipa toplotnega prenosa glede na vodnik in njegovo okolico, izračun lahko postane nekoliko časovno potratna naloga. Zato je lažje in hitreje računati preko abstrahiranih vrednosti, ki pa temeljijo na realni fiziki.

3.2.1 Količnik oddane toplote

Količnik oddane toplote nam pove, koliko toplote Q lahko vodnik odda po svoji celotni površini. Ta količnik je analogen kondukciji toplote po površini telesa v okoliški zrak v prejšnjem poglavju. Enačba zanj se glasi:

$$K = \frac{g_n^2 \rho d}{4 \cdot T_{40}} \left[\frac{W}{m^2 K} \right]$$

g_n je nazivna tokovna gostota $\frac{I_n}{A}$.

ρ je specifična upornost, torej snovna lastnost materiala.

d je premer vodnika. Ker imamo ponavadi za neke tokovne obremenitve podane predlagane delovne prereze vodnika, je d potrebno preračunati glede na faktor polnenja.

T_{40} je nadtemperatura pri nazivnem toku, kar je za slovenske razmere $T_{dovoljena} - T_{okolice} = 70^\circ\text{C} - 30^\circ\text{C} = 40^\circ\text{C}$. $T_{dovoljena}$ je za vode istih tipov enaka povsod po svetu, $T_{okolice}$ pa geografsko variira v odvisnosti od geografske širine ter podnebja. Dovoljene nadtemperature ne smemo trajno preiti.

3.2.2 Časovno segrevanje vodnika

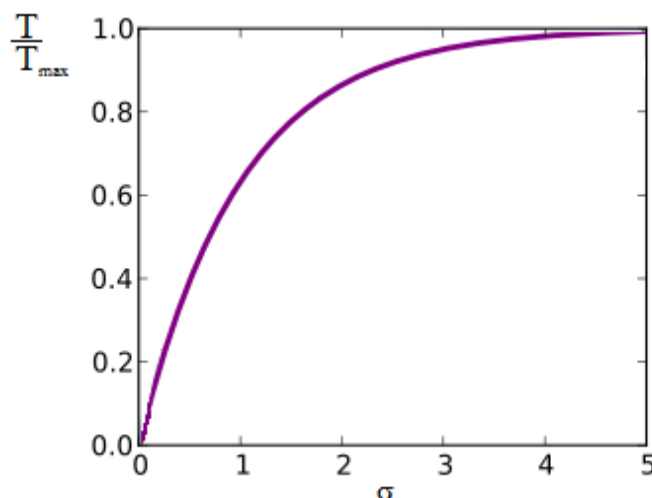
Temperatura je posledica akumulirane toplotne energije v nekem telesu; ker živimo v realnem svetu se nobena od njiju ne more spreminjati nezvezno. S segrevanjem vodnika se večja temperaturna razlika med vodnikom in zrakom, s čimer se poveča hlajenje. Zato se vodnik segreva pri istem toku čedalje počasneje, dokler se ne bo ustalil na neki temperaturi, kjer je hlajenje enako segrevanju. Vodnik se bo do neke maksimalne temperature T_{max} segreval po sledeči enačbi:

$$T = T_{max} (1 - e^{-\frac{t}{\sigma}})$$

Pri čemer je T trenutna temperatura in t čas. Znak σ je časovna konstanta in ima enoto sekunda. Izračunamo jo s pomočjo K iz prejšnje točke:

$$\sigma = \frac{\gamma c d}{4 \cdot K}$$

Gama (γ) je tu specifična gostota in c je specifična toplota vodnika, d pa je njegov premer. V 4 časovnih konstantah pridemo na 98.2% vrednosti T_{\max} .



Slika 2: temperatura kot delež maksimalne temperature glede na št. σ

Lahko tudi izračunamo potreben čas, da se vodnik segreje na neko temperaturo.

$$t = \sigma \ln\left(1 - \frac{T}{T_{\max}}\right)$$

Vse enačbe do sedaj so upoštevale, da skozi vodnik teče nazivni tok. Če pa skozi vodnik teče drugačen tok, velja korelacija $\frac{T_{\max \text{ novi}}}{T_{\max \text{ stari}}} = \left(\frac{I_{\text{novi}}}{I_{\text{nazivni}}}\right)^2$.

Pri nekem toku, drugačnem od nazivnega, bo veljalo:

$$T_{\max \text{ novi}} = \left(\frac{I_{\text{novi}}}{I_{\text{nazivni}}}\right)^2 \cdot T_{\max \text{ nazivni}}$$

Pozor, T_{\max} ni najvišja dovoljena nadtemperatura vodnika, temveč najvišja temperatura, ki jo bo vodnik dosegel, ko se ustali v toplotno ravnovesje. V primeru da preveč povečamo tok, lahko presežemo največjo dovoljeno nadtemperaturo vodnika.

Če pa nas zanima največji dovoljen tok pri neki temperaturni omejitvi, računamo sledeče:

$$I_{\text{nazivni}} \sqrt{\frac{T_{\text{dovoljeni}}}{T_{\max \text{ nazivni}}}} = I_{\max}$$

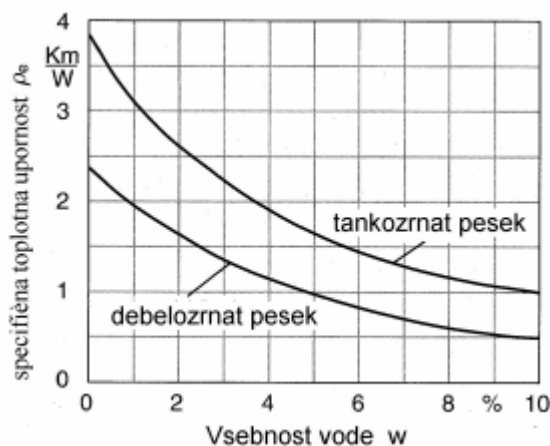
Te enačbe lahko obračamo po želji, da pridemo do katere koli željene veličine.

4. Kablovod

Poleg prostožračnih vodov del elektroenergetskega prenosnega sistema predstavljajo tudi kablovodi. Kablovod je vkopan v zemljo; zaradi tega lahko toploto odvajamo samo s kondukcijo in sevanjem, saj se zemlja ne more mešati kot zrak. Kovinski del kabla čez izolacijo prevaja toploto v okoliško zemljo, ki nato naprej prevaja in odvaja toploto v bolj odstranjeno prst. Zagotoviti je potrebno, da se odvede dovolj toplote, da v katerem koli trenutku obstaja ravnovesje med generirano toploto kablovoda ter odvedeno toploto v okolico; ne sme priti do kopičenja toplote v kablu in v njegovi neposredni bližini^[5]. Če nas pri daljnovodnih vodnikih omejujejo mehanske lastnosti vodnikov kot posledica segrevanja, smo pri kabelskih vodih omejeni z toplotno vzdržljivostjo izolacije.

4.1 Toplotna upornost zemlje

Če obstaja toplotna prevodnost, obstaja tudi njen inverz: toplotna upornost. Spособnost odvajanja toplote je odvisna od notranje toplotne upornosti kablovoda ter zunanje toplotne upornosti zemlje^[5]. Notranja upornost je posledica vseh nekovinskih elementov kablovoda. Zunanja upornost je odvisna od lastnosti zemlje (npr. njene vlažnosti). S sušenjem se ji upornost večja.



Slika 3: specifična toplotna upornost peska glede na vlago^[5]

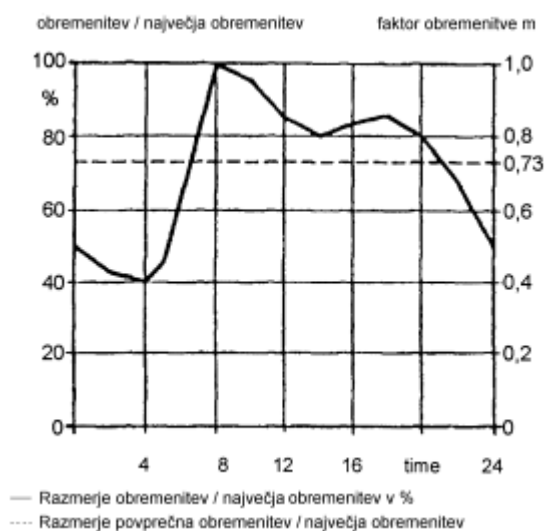
Smatra se, da se zemlja zaradi segrevanja v neposredni okolici kabla suši na $w = 0\%$; dalj od vira toplote do sušenja ne pride.

4.2 Faktor obremenitve

Odvajanje toplote je odvisno tudi od časovne porazdelitve obremenitve dnevno, tedensko in letno. Povprečno obremenitev se računa glede na dnevni diagram obremenitve. Zanima nas faktor obremenitve m glede na najvišjo vrednost toka v tem dnevu I_{max} :

$$m = \frac{1}{I_{max} \cdot 24h \int_0^{24h} I(t)dt}$$

Standardni faktor m je v bil leta 2005 v praksi 0.7, s tendenco naraščanja proti 1^[5]. Zaradi tega se nove kablovode projektira s faktorjem 1. Na podlagi izračuna tega faktorja se nato tabelarično izbira prerez vodnika kablovoda; izbere se manjši prerez, kot bi bil potreben pri konstantni obremenitvi^[5].



Slika 4: dnevni diagram porabe^[5]

4.3 Maksimalni dovoljeni trajni tok

Maksimalni dovoljeni trajni tok (ang. ampacity_[1]) vodnika je količina, ki nam pomaga pri dimenzioniranju kablovoda. Če si izberemo neko število, npr. 480 A, to ne pomeni, da se bo vodnik stopil pri 480.1 A. Velja le, da ne želimo preseči te vrednosti med normalnih obratovanjem. Ta tok je odvisen od vrste kabla in njegove konstrukcije: prereza, debeline in vrste izolacije; pa tudi od ostalih delov kabla, ki določajo njegovo toplotno upornost. Prav tako zavisi od geometrije oziroma načina polaganja kablov: kako razmaknjeni so fazni vodniki med seboj, ali jih zračimo in hladimo in tako dalje. Zadnji vpliv na največji dovoljeni tok so okoliški vplivi, to so temperatura okolice (tuji viri toplote) ter toplotna upornost snovi (zemlje), v kateri je kablovod. Najbolj omejujoči faktor je izolacija kabla; če jo pregrevamo, se ji zmanjša življenjska doba. Na primer polietilenski kabli naj bi obratovali pri največ 90°C.

Maksimalni dovoljeni tok računamo na sledeč način: temperatura prevodnika je funkcija toplote, ki jo generira električni tok v vodniku ter odvedene toplote stran od vodnika. Manj toplotno prevodne (bolj toplotno uporne) prsti »ujamejo« več toplote in povzročijo višje nadtemperature. Tok mora biti dovolj majhen, da količina proizvedene toplote v kablu ne presega odvedene.

S toplotnim ekvivalentom Ohmovega zakona (analogija toplota-tok, temperatura-napetost, toplotna upornost-električna upornost) lahko zapišemo enačbo za nadtemperaturo:

$$\Delta T = T_c - T_a = R_{th} Q = R_{th} (I^2 R)$$

Kjer so T_c temperatura prevodnika; T_a temperatura okolice; R_{th} skupna toplotna upornost med kablom in zrakom; Q toplota, ki jo generira vodnik; I tok v vodniku; R električna upornost prevodnika. Toplotno upornost elementa računamo kot:

$$R_{th} = 0.0012 \rho_{th} \log_{10} \left(\frac{D}{d} \right)$$

Kjer je D zunanji in d notranji premer elementa, ρ_{th} pa je v tem primeru specifična toplotna upornost materiala. Voda ima $\rho_{th} = 160 \frac{Kcm}{W}$, zemlja okoli 90, beton 85, PVC pa okoli 500.

Zmnožek toplote, proizvedene v vodniku $Q = I_{max}^2 R$ in toplotne upornosti elementa mora biti enaka dovoljeni nadtemperaturi; še vedno pa je treba biti pozoren na temperaturo okolice, ko izbiramo izolacijo. Kot sem omenil prej, je to glavna omejitev pri dimenzioniranju kablovodov.

Dovoljene tokovne obremenitve za posamezne kabelske konstrukcije so podane tabelarično v standardih v odvisnosti od obratovalnih pogojev in načina polaganja^[5].

Kable lahko sicer hladimo; obstajata indirektni način, kjer hladimo zemljo okoli kabla, ter direktni način, kjer hladimo kabel neposredno.

5. Naloga

Izračunajte količnik oddane toplote za gol bakren prostozračen vod prereza 10 mm^2 , če je temperatura okolice 30°C . Premer takšnega vodnika je 4.8 mm , njegov nazivni tok pa je 80 A . V kolikšnem času se segreje takšen vodnik za 15°C , če je obremenjen z $80\% I_n$?

specifična upornost bakra $0.0172 \cdot 10^{-6} \frac{\Omega}{m}$

specifična gostota bakra $8900 \frac{kg}{m^3}$

specifična toplota bakra $386.4 \frac{J}{kgK}$

$$g_n = \frac{I_n}{S} = 8 \frac{A}{mm^2} \quad K_n = \frac{g_n^2 \rho d}{4 \cdot T_{40}} = 27.86 \frac{W}{^\circ\text{Cmm}^2} \quad \sigma = \frac{\gamma \rho d}{4K_n} = 125 \text{ s}$$

$$\frac{T_{\max\text{novi}}}{T_{\max\text{stari}}} = \left(\frac{I_{\text{novi}}}{I_n}\right)^2 = 0.64 \quad T_{\max\text{novi}} = 0.64 \cdot 70^\circ\text{C} = 45^\circ\text{C}$$

70°C je dovoljena temperatura za vodnik pri I_n . Spremenijo se tudi g , k in σ :

$$g = 0.8 \frac{I_n}{S} = 6.4 \frac{A}{mm^2} \quad K = \frac{g^2 \rho d}{4 \cdot T_{40}} = 0.64 \cdot 27.86 \frac{W}{^\circ\text{Cmm}^2} = 17.83 \frac{W}{^\circ\text{Cmm}^2}$$

$$\sigma = \frac{\gamma \rho d}{4K} = 195 \text{ s}$$

$$T = T_{\max}(1 - e^{-\frac{t}{\sigma}}) \quad t = -\sigma \ln\left(1 - \frac{T}{T_{\max\text{novi}}}\right) = -195 \text{ s} \cdot \ln\left(1 - \frac{30^\circ\text{C}}{45^\circ\text{C}}\right) =$$

214 s

6. Vprašanja

1. Katere načine prenosa toplote poznamo?

Konvekcija, sevanje, kondukcija.

2. Kako je upornost odvisna od preseka vodnika? Kako od dolžine?

Večja dolžina, manjši obseg: večja upornost. Krajša dolžina, večji obseg: manjša upornost.

3. Kaj je količnik oddane toplote? Kaj nam pove? Kako ga izračunamo?

Količnik oddane toplote nam pove, koliko toplote oddaja vodnik po svoji celotni dolžini.

$$K = \frac{g_n^2 \rho d}{4 \cdot T_{40}}$$

g_n je nazivna tokovna gostota $\frac{I_n}{A}$.

ρ je specifična upornost, torej snovna lastnost materiala.

d je premer vodnika.

T_{40} je dovoljena nadtemperatura pri nazivnem toku, kar je za slovenske razmere 40°C .

4. Kaj je glavna omejitev pri segrevanju podzemnih kablov?

Izolacija kablovoda; če se pregreva, lahko popusti.

5. Katera prst lažje prevaja/odvaja toploto, mokra ali suha?

Mokra.

7. Zaključki

Projektiranje daljnovodov ter kablovodov je zelo enako pomembno kot dimenzioniranje transformatorjev ter ostalih naprav ter njihovih zaščit. Jasno je, da lahko sistem propade zaradi odpovedi katerega koli elementa. Pri vseh gre za isti problem: nakopičene toplotne energije ni mogoče odvesti trenutno, zaradi česar lahko hitro pride do finančne, okoljevarstvene ter celo zdravstvene škode. Projektant je zatorej zavezan primerno izbrati in skonstruirati vse elemente vključno z vodniki, da lahko uporabniku varno in dosledno dobavlja električno energijo.

8. Viri

- [1] T. A. Short: Electric Power Distribution Handbook, CRC Press, 2004
- [2] ENGN 45 Material Science for Engineers, W. Kaufmyn,
https://fog.ccsf.edu/~wkaufmyn/ENGN45/Course%20Handouts/15_ElectricalProps/05_TemperatureConductivityConductor.html, dostop 30.3.2017
- [3] J. Bevc, IZRAČUN MEHANSKIH PARAMETROV NADZEMNEGA VODA, UL FE, 2017 http://rf.fe.uni-lj.si/e_rio/Seminarij1617/IzracunMehanskihParametrov.pdf, dostop 30.3.2017
- [4] Ž. Voršič, J. Pihler, R. Maruša: Segrevanje vodnikov v ustaljenem stanju, Komunalna energetika, <http://ke.powerlab.um.si/arhiv/dokument.aspx?id=209>, 2015
- [5] M. Janša: Obremenljivost visokonapetostnih kablov in možnosti za povečanje njihovih prenosnih moči, Elektroinštitut Milan Vidmar, 2005
- [6] M.B. Kobav, Interno gradivo pri predmetu Razdelilna in industrijska omrežja
- [7] Wikipedia, dostop 30.3.2017, razni avtorji:
Thermal expansion, https://en.wikipedia.org/wiki/Thermal_expansion
Heat transfer coefficient, https://en.wikipedia.org/wiki/Heat_transfer_coefficient
Convective heat transfer, https://en.wikipedia.org/wiki/Convective_heat_transfer