

Tehnička rješenja za dinamički monitoring prijenosne moći dalekovoda

Islamović, Dino

Master's thesis / Diplomski rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:030324>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-02**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI
TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij elektrotehnike

Diplomski rad

**TEHNIČKA RJEŠENJA ZA DINAMIČKI MONITORING
PRIJENOSNE MOĆI DALEKOVODA**

Rijeka, studeni 2023.

Dino Islamović
0069082081

SVEUČILIŠTE U RIJECI
TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij elektrotehnike

Diplomski rad

**TEHNIČKA RJEŠENJA ZA DINAMIČKI MONITORING
PRIJENOSNE MOĆI DALEKOVODA**

Mentor: Prof. dr. sc. Vitomir Komen

Rijeka, studeni 2023.

Dino Islamović
0069082081

Rijeka, 15. ožujka 2023.

Zavod: **Zavod za elektroenergetiku**
Predmet: **Prijenos i distribucija električne energije**
Grana: **2.03.01 elektroenergetika**

ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnik: **Dino Islamović (0069082081)**
Studij: **Sveučilišni diplomski studij elektrotehnike**
Modul: **Elektroenergetika**

Zadatak: **TEHNIČKA RJEŠENJA ZA DINAMIČKI MONITORING PRIJENOSNE MOĆI
DALEKOVODA**

Opis zadatka:

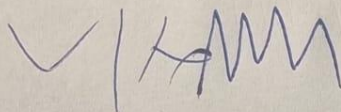
Tehničke mogućnosti povećanja prijenosne moći postojećih nadzemnih vodova. Proračun prijenosne moći i utvrđivanje utjecajnih parametara na prijenosnu moć vodova. Pregled i razrada tehničkih rješenja za dinamički monitoring prijenosne moći vodova. Mjerenje atmosferskih parametara za sustav dinamičkog monitoringa prijenosne moći vodova.

Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanje diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.

Dino Islamović

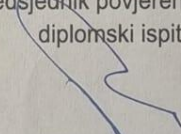
Zadatak uručen pristupniku: 20. ožujka 2023.

Mentor:



Prof. dr. sc. Vitomir Komen

Predsjednik povjerenstva za
diplomski ispit:



Prof. dr. sc. Dubravko Franković

IZJAVA

Sukladno članku 9. Pravilnika o diplomskom radu, diplomskom ispitu i završetku diplomskih sveučilišnih studija Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci izjavljujem da sam izradio ovaj diplomski rad samostalno, koristeći vlastito znanje i navedenu literaturu, u razdoblju od datuma zadavanja zadatka do datuma predaje.

Dino Islamović

Dino Islamović

ZAHVALA

Od srca sam zahvalan na potpori svojih roditelja, bake, brata i ostalih članova obitelji koji su vjerovali u mene tijekom cijelog školovanja. Zahvalan sam i prijateljima uz koje je vrijeme studiranja bilo lakše i ugodnije provesti.

Veliku zahvalnost upućujem mentoru prof. dr. sc. Vitomiru Komenu čiji su savjeti i upute uvelike pomogli prilikom izrade ovog rada.

Sadržaj

1. UVOD.....	1
2. MEHANIČKA I TOPLINSKA NAPREZANJA VODIČA NADZEMNIH VODOVA... 2	
2.1. Standardi za izračunavanje prijenosnog kapaciteta dalekovoda	2
2.2. Zagrijavanje vodiča i ostale opreme.....	6
2.2.1. Uzroci toplinskog naprezanja.....	6
2.2.2. Utjecaj vremenskih prilika na vodič	7
2.2.3. Posljedice toplinskog naprezanja.....	8
3. TOPLINSKO OCJENJIVANJE PRIJENOSNE MOĆI DALEKOVODA	10
3.1. Statičko toplinsko ocjenjivanje	10
3.1.1. Primjer za konzervativne uvjete	11
3.2. Sezonsko statičko toplinsko ocjenjivanje	12
3.3. Probabilistička toplinska ocjena	13
3.4. Dinamička toplinska ocjena.....	15
3.5. Ciljevi DTR-a.....	16
4. ODREĐIVANJE PRIJENOSNE MOĆI VODA KORISTEĆI SUSTAV DINAMIČKOG MONITORINGA U STVARNOM VREMENU	17
4.1. Temperatura vodiča i maksimalni provjes.....	21
4.1.1. Procjena temperature vodiča pomoću sustava ocjenjivanja u stvarnom vremenu (RTM)	21
4.1.2. Izračun temperature vodiča u određenom rasponu iz meteoroloških podataka.....	22
4.1.3. Izravno mjerenje temperature vodiča u određenom rasponu	24
4.1.4. Određivanje prosječne temperature vodiča u određenom zateznom polju voda	24
4.2. Određivanje prosječne temperature na temelju provjesa koristeći RTM sustave	25
4.2.1. Izračun provjesa i naprezanja	25
4.2.2. Mjerenja na terenu	29
4.2.3. Ocjena stanja voda pomoću podataka o vremenu.....	32
5. TEHNIČKA RJEŠENJA ZA DTR MONITORING	34
5.1. Mjerenje temperature vodiča	35
5.1.1. Izravno praćenje temperature vodiča temperaturnim senzorima	35
5.1.2. Izravno praćenje temperature vodiča infracrvenim kamerama.....	42
5.1.3. Izravno praćenje temperature vodiča optičkim vlaknima	43
5.1.4. Izravno praćenje temperature vodiča na temelju mjerenja naprezanja.....	46

5.1.5. Izravno praćenje temperature vodiča nadzemnog voda na temelju mjerenja provjesa	51
5.1.6. Izravno praćenje temperature vodiča na temelju fazorskih mjernih jedinica.....	57
6. IMPLEMENTACIJA DINAMIČKOG MONITORINGA U SVRHU POVEĆANJA PRIJENOSNE MOĆI DALEKOVODA NA PRIMJERU SLOVENIJE	58
6.1. Dinamički monitoring slovenske prijenosne mreže ELES.....	58
6.2. OTLM sustav monitoringa u ELES-u	59
6.2.1. Monitoring 110 kV dalekovoda Idrija – Ajdovščina	62
6.3. VALCAP sustav monitoringa u ELES-u.....	64
6.3.1. Monitoring 2x110 kV dalekovoda Dravograd – Slovenj Gradec	64
6.4. SUMO sustav monitoringa u ELES-u	65
6.4.1. Rezultati povećanja prijenosne moći elektroenergetskog sustava pomoću SUMO sustava.....	67
7. ZAKLJUČAK.....	70
LITERATURA	72
POPIS SLIKA	76
POPIS TABLICA	77
SAŽETAK	78
SUMMARY	79

1. UVOD

Rast električnog opterećenja i uz to proizvodnja obnovljive energije događaju se brzinom koja može nadmašiti razvoj prijenosa. Kao posljedica toga dalekovodi mogu postati preopterećeni. Kako bi se prilagodio rastu opterećenja ili priključnim vezama distribuirane proizvodnje, jedna od opcija je upravljanje postojećim prijenosnim vodovima do njihovog stvarnog fizičkog kapaciteta umjesto konzervativne procjene kapaciteta voda.

Kapacitet prijenosa snage dalekovoda prvenstveno je ograničen trima faktorima: stabilnošću, naponom i toplinskim granicama. Granice napona i stabilnosti zahtjevi su za pouzdanost. Toplinska ograničenja, međutim, definirana su ne samo zabrinutošću za pouzdanost već što je važnije, zabrinutošću za sigurnost. Oni izražavaju maksimalnu radnu temperaturu pri kojoj vod može raditi bez kršenja zahtjeva sigurnosti i pouzdanosti. Primarni problemi pri ograničavanju toplinskog kapaciteta dalekovoda su održavanje razmaka vodova i izbjegavanje žarenja vodiča. Stoga se toplinska vrijednost voda treba odrediti iz najgoreg slučaja između najveće dopuštene temperature i najvećeg dopuštenog provjesa.

Tipično, jačina struje dugih vodova je postavljena granicama stabilnosti ili napona, a strujna opteretivost kratkih vodova određena je toplinskim granicama. Kada se primjene toplinska ograničenja, metode ocjenjivanja dalekovoda klasificiraju se u dvije kategorije: statička ocjena vodova (SLR) i dinamička toplinska ocjena vodova (DTR). Tradicionalno, dalekovodi su radili na temelju SLR-a koji osigurava maksimalnu dopuštenu nosivost struje na temelju razumnih pretpostavki o uvjetima okoline. Statičke ocjene mogu se mijenjati dnevno, po satu ili češće na temelju temperature okolnog zraka. U posljednjem slučaju nazivaju se ocjenama prilagođenim ambijentu. DTR podrazumijeva da se kapacitet prijenosnih vodova dinamički mijenja prema okolišnim uvjetima. Ključni radni uvjeti koji se mogu mjeriti kako bi se odredio kapacitet vodova u stvarnom vremenu su: vremenski uvjeti (kao što su temperatura okoline, brzina vjetrova, smjer vjetrova, sunčevo zračenje i količina padalina), karakteristike voda (opterećenje voda, razmak od tla, provjes vodiča, naprezanje i temperatura vodiča).

DTR (eng. Dynamic thermal rating) ili dinamička toplinska ocjena stanja dalekovoda daje stvarni kapacitet prijenosa struje nadzemnih vodova na temelju radnih uvjeta u stvarnom vremenu.

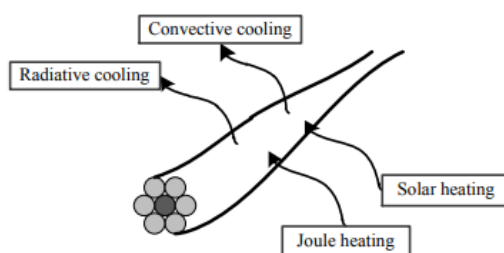
2. MEHANIČKA I TOPLINSKA NAPREZANJA VODIČA NADZEMNIH VODOVA

Vodiči, izolatori i ostali elementi dalekovoda uz svoje električne karakteristike trebaju imati i odgovarajuća mehanička i toplinska svojstva kako bi rad dalekovoda bio siguran i pouzdan. Navedeni elementi su izloženi neprestanim napreznjima, kako mehaničkim tako i toplinskim. Pod pojmom mehaničkih napreznja ubrajaju se ona napreznja koja su uzrok sila na vodič zbog različitih vremenskih uvjeta (utjecaj vjetra, snijega i leda), a toplinska napreznja su uzrok prolaska struje kroz vodič.

Ovisno o tome kojom temperaturom je izložen dalekovod tako će se mijenjati i toplinsko napreznje vodiča. Protjecanjem struje kroz vodič raste temperatura koja prelazi na ovjesnu opremu i izolator. Temperatura se povećava primarno zbog prolaska struje, a u neznatnoj mjeri zbog utjecaja vremenskih prilika.

2.1. Standardi za izračunavanje prijenosnog kapaciteta dalekovoda

Za izračunavanje prijenosnog kapaciteta dalekovoda u realnom vremenu mogu se koristiti tri standarda. Ova tri standarda donosi Međunarodno vijeće za velike električne sustave (eng. the International Council on Large Electric Systems (CIGRE)), Međunarodna elektrotehnička komisija (eng. International Electrotechnical Commission (IEC)) i Institut inženjera elektrotehnike i elektronike (eng. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)). S obzirom da je CIGRE standard široko prihvaćen diljem svijeta i da IEEE 738 standard koristi SAD, ova dva standarda treba pobliže objasniti [1, 2, 3].



Slika 2.1. Dijagram toplinske ravnoteže vodiča [14]

U oba standarda, parametri stanja zagrijavanja dalekovoda određeni su prema prvom zakonu termodinamike (Slika 2.1.) kako slijedi:

$$Q_j + Q_s = Q_c + Q_r \quad (2.1.)$$

Gdje je:

Q_j – Jouleovo zagrijavanje vodiča zbog protoka struje

Q_s – zagrijavanje sunčevim zračenjem

Q_c – konvekcijsko hlađenje uslijed puhanja vjetra

Q_r – radijacijsko hlađenje

Značajno je da IEEE standard 738 pruža vrlo detaljno modeliranje proračuna ocjene vodova na temelju vremenskih uvjeta. U standardu IEEE, konačna ocjena voda određena je konsolidacijom svih grijaćih i rashladnih elemenata kako slijedi:

$$I_{ac} = \sqrt{\frac{Q_c + Q_r - Q_s}{R(T_c)}} \quad (2.2.)$$

Gdje je:

I_{ac} – struja vodiča

T_c – radna temperatura vodiča

R – otpor vodiča

U CIGRE standardu, ovisno o tome je li vodič homogen ili tipa ACSR, vrijednosti vodova određuju se prema (2.3.) odnosno (2.4.):

$$I_{dc} = \sqrt{\frac{Q_c + Q_r - Q_s}{K_j R_{dc} [1 + \alpha_k (T_{av} - 20)]}} \quad (2.3.)$$

Gdje je:

I_{dc} – struja vodiča

K_j – faktor korekcije otpora zbog učinka kože

R_{dc} – DC otpor na 20 °C

α_k – temperaturni koeficijent otpora po kelvinu

T_{av} – glavna temperatura

$$I_{dc} = \sqrt{\frac{Q_c + Q_r - Q_s}{K_j R_{dc} [1 + \alpha_k (T_{av} - 20)]}} \quad (2.4.)$$

IEEE i CIGRE standardi razmatraju Jouleova zagrijavanje za homogene vodiče. Standard CIGRE također uzima u obzir ACSR vodič, dok IEEE standard ne (Tablica 1). U standardu CIGRE, skin efekti vodiča prilagođeni su za željezne vodiče, a to obično dovodi do smanjenja ukupne izračunate vrijednosti vodova za oko 0% -3%, ovisno o broju slojeva žice. Na zagrijavanje od sunčevog zračenja utječe položaj sunca. Tri glavne komponente koje definiraju položaj sunca su sunčeva deklinacija (visina sunca ovisno o danu u godini), satni kut (položaj sunca ovisno o dobu dana) i linijska širina. U originalnoj verziji standarda IEEE 738 nastalog prije 2007. solarno grijanje se određuje prema fiksnim tabličnim vrijednostima. Nasuprot tome, standard CIGRE nudi vrlo fleksibilan izračun solarnog grijanja jer koristi formule. Međutim, u revidiranoj verziji standarda IEEE 738, tablične vrijednosti također su zamijenjene formulama, a ovo ažuriranje čini izračune solarnog grijanja koje nudi standard IEEE jednako konkurentnim kao oni standarda CIGRE. IEEE standard uzima u obzir samo izravno sunčevo zračenje. Također se razmatraju dvije vrste atmosferskih uvjeta, a grupiraju se u industrijske ili čiste atmosfere. Uz izravno sunčevo zračenje, standard CIGRE također uzima u obzir reflektirano i difuzno zračenje, ali bez razlike za atmosferske uvjete. Jedinstvena značajka CIGRE standarda je da uzima u obzir različite tipove tla prilikom izračuna reflektiranog zračenja. Oba se standarda slažu da sunčev intenzitet treba povećavati kako se nadmorska visina povećava. Uzimajući u obzir sve čimbenike, solarno grijanje koje osigurava CIGRE standard općenito je 10%-15% veće od onog koje osigurava IEEE standard 738. Za konvekcijsko hlađenje, standardi IEEE i CIGRE imaju različite formule za prirodnu (zbog puhanja vjetra) i prisilnu (bez uvjeta vjetra) konvekciju. Izračun radijacijskog hlađenja je jednostavan, sa samo jednom formulom koja se koristi u oba standarda. S obzirom na izračun, ne

moгу se primijetiti značajne razlike u rashladnim elementima dva standarda. Tablica 2.1. prikazuje detalje ovih formula [14].

Elements	IEEE standard 738	CIGRE
Joule heating (Q_j)	$I_{ac}^2 R(T_c)$ where $R(T_c) = \left[\frac{R(T_{high}) - R(T_{low})}{T_{high} - T_{low}} \right] (T_c - T_{low}) + R(T_{low})$	Homogeneous conductor: $K_j I_{ac}^2 R_{dc} [1 + \alpha_k (T_{av} - 20)]$ where $I_{ac} = \frac{I_{dc}}{\sqrt{1.0123 + 2.319 \times 10^{-5} I_{dc}}}$ ACSR conductor: $I_{ac}^2 R_{dc} [1 + \alpha_k (T_{av} - 20)]$ where $I_{ac} = \frac{I_{dc}}{\sqrt{1.0045 + 0.09 \times 10^{-6} I_{dc}}}$
Solar heating (Q_s)	$\alpha Q_{se} \sin(\theta) A'$ where $Q_{se} = K_{solar} q_s$, such that: $q_s = A + BH_c + CH_c^2 + DH_c^3 + EH_c^4 + FH_c^5 + GH_c^6$ $H_c = \arcsin[\cos(Lat) \cos(\delta) \cos(\omega) + \sin(Lat) \sin(\delta)]$ $\delta = 23.4583 \sin \left[\frac{284 + N}{365} 360 \right]$ $\theta = \arccos[\cos(H_c) \cos(Z_c - Z_t)]$, such that: $Z_c = C + \arctan(\chi)$ $\chi = \frac{\sin(\omega)}{\sin(Lat) \cos(\omega) - \cos(Lat) \tan(\delta)}$	αSD
Convective cooling (Q_c)	If no wind $Q_{cn} = 0.0205 \rho_f^{0.5} D^{0.75} (T_c - T_a)^{1.25}$ else, maximum (Q_{c1}, Q_{c2}) where $Q_{c1} = \left[1.01 + 0.0372 \left(\frac{D \rho_f V_w}{\mu_f} \right)^{0.52} \right] k_f K_{angle} (T_c - T_a)$ $Q_{c2} = \left[0.0119 \left(\frac{D \rho_f V_w}{\mu_f} \right)^{0.6} k_f K_{angle} (T_c - T_a) \right]$ such that, $K_{angle} = 1.194 - \cos(\phi) + 0.194 \cos(2\phi) + 0.368 \sin(2\phi)$ or $K_{angle} = 1.194 - \sin(\beta) - 0.194 \cos(2\beta) + 0.368 \sin(2\beta)$	$\pi k_f (T_c - T_a) Nu$ If wind speed > 0.5 m/s $Nu_\delta = B_1 Re^n [A_1 + B_2 (\sin \delta)^{m_1}]$, such that $A_1 = 0.42, B_2 = 0.68$ and $m_1 = 1.08$ for $0^\circ < \delta < 24^\circ$ $A_1 = 0.42, B_2 = 0.58$ and $m_1 = 0.90$ for $24^\circ < \delta < 90^\circ$ else if no wind speed $Nu_0 = A_2 (Gr \cdot Pr)^{m_2}$ Else if wind speed < 0.5 m/s Maximum ($Nu_\delta, Nu_0, 0.55 B_1 Re^n$)
Radiative cooling (Q_r)	$Q_r = 0.0178 D \epsilon \left[\left(\frac{T_c + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_a + 273}{100} \right)^4 \right]$	$\pi D \epsilon \sigma_B [(T_c + 273)^4 - (T_a + 273)^4]$

Tablica 2.1. Usporedba jednadžbi između IEEE-a i CIGRE-a standarda [14]

2.2. Zagrijavanje vodiča i ostale opreme

Mnogo je uzroka koji utječu na rast temperature koja dalje utječe na razne komponente dalekovoda što na kraju rezultira neželjenim učincima na vodič. Ovo poglavlje će pobliže opisati neke od glavnih uzroka toplinskog naprezanja.

2.2.1. Uzroci toplinskog naprezanja

Zbog sigurnosti se ne smije prelaziti najviša dozvoljena radna temperatura vodiča koja je opisana karakteristikom materijala od kojih je vodič napravljen. Nedopušteno toplinsko naprezanje vodiča posljedica je kratkih spojeva, opterećenja u pogonu, prirodnih čimbenika (udari gromova, požari...) te atmosferskih prilika koji utječu na povećanje temperature duž trase dalekovoda (slika 2.2.).



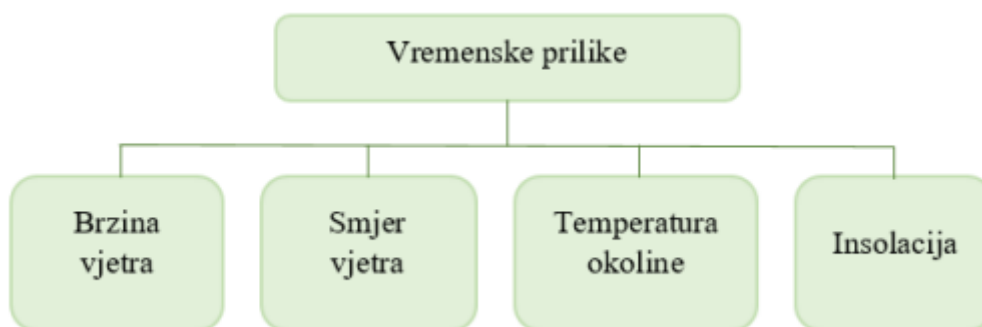
Slika 2.2. Uzroci toplinskog naprezanja [4]

Toplinska naprezanja navedena na slici 2.2. različito utječu na vodič. Udari gromova u sam vodič ili u mjesto vrlo blizu stupa kratke su pojave koje u nekim situacijama uzrokuju velika oštećenja na izolaciji, ovjesu i vodiču. Zbog različitih razloga, poput dodira faznih vodiča sa zemljom uslijed kvara na ovjesu, nenamjernog dodirivanja vodiča s uzemljenim objektima u okolini ili preskoka međufaza zbog utjecaja vremenskih prilika, dolazi do kratkog spoja u čijem vremenu se postižu veliki iznosi struja. Takve struje dostižu iznos od nekoliko kA koje su u tom trenutku uzrok porasta temperature vodiča. Trajanje kratkog spoja je od 0,1 do 0,3 sekunde. U ljetnom periodu raste vjerojatnost nastanka požara koji mogu prouzročiti jako velike iznose temperature u neposrednoj blizini dalekovoda. Temperature u nekim situacijama

mogu dostići od 1000 do 1200 stupnjeva celzijusa što značajno utječe na stup, ovjes i vodič dalekovoda.

2.2.2. Utjecaj vremenskih prilika na vodič

Kako bi se točno odredila temperatura vodiča od značaja je znati kojim vremenskim prilikama je izložen vodič. Vremenske prilike utječu na promjenu temperature (hlađenje i grijanje) što se vidi iz slike 2.3. Kako bi odredili temperaturu vodiča treba znati toplinsku jednadžbu, a veliki utjecaj u njoj imaju prikazane vremenske prilike.

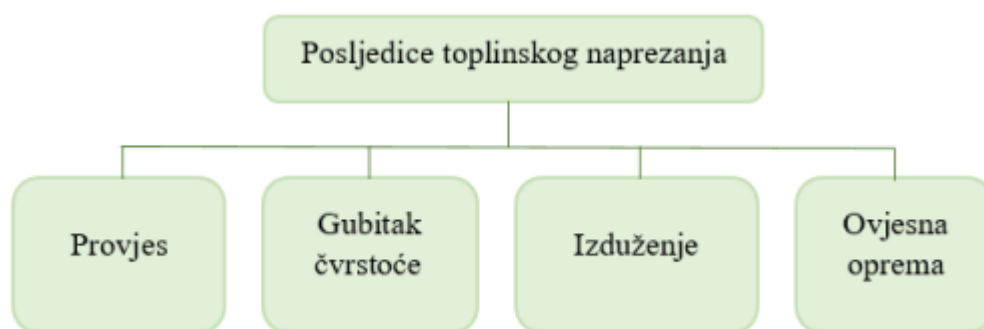


Slika 2.3. Vremenske prilike koje utječu na temperaturu vodiča [4]

Prema toplinskoj jednadžbi po IEC, CIGRE ili IEEE 738 metodi zaključuje se da je stvorena toplina u i na vodiču jednaka je toplini koja je predana okolnom zraku. Sukladno tome temperatura u okolini treba biti manja od temperature vodiča jer toplina prelazi s toplijeg na hladniji sustav. Temperatura ovisi o godišnjem dobu i o dobu dana što se preslikava na temperaturu vodiča. Također, vjetar svojom brzinom i smjerom odvodi toplinu vodiča pa je zato potrebno odrediti te veličine u stvarnom vremenu. Uz struju važno je napomenuti insolaciju koja povećava temperaturu vodiča tijekom njegove izloženosti suncu.

2.2.3. Posljedice toplinskog naprezanja

Kada je vodič pod utjecajem visokih temperatura dolazi do toplinskog naprezanja što rezultira znatnim smanjenjem mehaničkih karakteristika i negativnim utjecajem na materijal. Za siguran i pouzdan životni vijek tijekom pogona vodiči moraju sadržavati projektirane mehaničke karakteristike poput čvrstoće, elastičnosti, postojanosti i dr. Ove karakteristike pod snažnim su utjecajem temperature i tokom godina izloženosti njihova projektirana vrijednost se smanjuje. Slika 2.4. prikazuje posljedice toplinskog naprezanja vodiča



Slika 2.4. Posljedice toplinskog naprezanja [4]

Velika strujna opterećenja i lošije odvođenje topline rezultira znatnim utjecajem na provjes vodiča. Kako se povećava struja tako se povećava provjes vodiča te se narušavaju sigurnosne visine koje ovise o rasponu i težini vodiča [5]. Snažni udari vjetra također mogu pridonijeti povećanju provjesa što može rezultirati oštećenjem vodiča. Ako je osigurana minimalna udaljenost vodiča od tla tada su dozvoljeni provjesi u pogonu.

Velike vrijednosti temperatura kojima je izložen vodič uzrok su gubitka vlačne čvrstoće. U tom slučaju dolazi do smanjenja mehaničke čvrstoće u žičanom dijelu vodiča, a to se najviše osjeti ako se pređe dozvoljena radna temperatura. Gubitkom mehaničke čvrstoće dalekovodu se smanjuje naprezanje i povećava provjes. Tijekom radnog vijeka dolazi do širenja i izduženja vodiča, a rezultat toga je smanjenje električne vodljivosti i povećanje otpora. Ako vodič izgubi vlačnu čvrstoću tokom velikih temperatura to može smanjiti mehaničku čvrstoću vodiča što izaziva trajno izduženje vodiča. Zbog izduženja vodiča povećava se provjes te se zbog toga provode periodična održavanja zbog zahtjeva za minimalnim razmacima od tla i objekata koja okružuju dalekovod.

Povećane temperature također imaju značajan utjecaj na ovjesnu opremu čiji je zadatak spojiti vodič s izolatorskom opremom. Uslijed visokih temperatura veća su i toplinska naprezanja ovjesne opreme što ubrzava starenje i smanjuje mehanička svojstva opreme. Uz to, rad pri visokim temperaturama dovodi do povećanja otpora spojnica vodiča i smanjuje čvrstoću stezanja spojnice.

3. TOPLINSKO OCJENJIVANJE PRIJENOSNE MOĆI DALEKOVODA

U ovom poglavlju razradit će se tri vrste toplinskog ocjenjivanja: statičko toplinsko ocjenjivanje, probabilističko toplinsko ocjenjivanje i dinamičko toplinsko ocjenjivanje.

3.1. Statičko toplinsko ocjenjivanje

Statička (statistička) termalna ocjena (STR) označava termalnu ocjenu pod "najlošijim vremenskim uvjetima". To je fiksna "najniža" maksimalna radna struja za neizolirane nadzemne dalekovode (OHL). STR je temeljna vrijednost kada je riječ o termalnoj ocjeni i široko se koristi u industriji prijenosa električne energije. Sve promjene kapaciteta uspoređuju se s vrijednošću STR. Čak i kad su razvijeni koncepti probabilističke termalne ocjene i dinamičke termalne ocjene, statička termalna ocjena i dalje je najčešće korištena u industriji prijenosa električne energije.

Strogo govoreći, najlošiji vremenski uvjeti za prijenos električne energije trebali bi uključivati nultu brzinu vjetra, najvišu okolnu temperaturu i najveće solarno zračenje. Međutim, prilično je teško definirati najvišu okolnu temperaturu i najveće solarno zračenje. Istodobno, uporaba nulte brzine vjetra dramatično bi smanjila vrijednost termalne ocjene.

Iz navedenih razloga, priroda statičke termalne ocjene zapravo je termalna ocjena konzervativnih vremenskih uvjeta umjesto najgorih uvjeta. Konzervativni vremenski uvjeti obično se definiraju na temelju povijesnih podataka i statističke analize. Tipično, konzervativni vremenski uvjeti su lošiji od većine uvjeta, na primjer, lošiji od 97% svih uvjeta. Stoga STR nije uvijek primjenjiv za rad OHL-a. Međutim, tvrtke za prijenos električne energije radije su spremne prihvatiti određeni rizik kako bi dobile razumnu prijenosnu sposobnost i ekonomičniju strukturu OHL-a.

3.1.1. Primjer za konzervativne uvjete

Mnogi istraživači su pokušali razmotriti konzervativne uvjete za primjenu termalne ocjene. Na primjer, Institut za elektrotehniku i elektroniku (IEEE) nudi svoj konzervativni uvjet kako slijedi [6]:

- brzina vjetra (V_w) iznosi 0.61 m/s i okomit je na vodič;
- temperatura okolnog zraka iznosi 40 °C;
- stopa solarnog zračenja iznosi 1023 W/m².

Međunarodno vijeće za velike električne sustave (CIGRE) svoje konzervativne uvjete definira na slijedeći način [7]:

- brzina vjetra (V_w) iznosi 0.60 m/s i okomit je na vodič;
- temperatura okolnog zraka jednaka maksimalnoj godišnjoj temperaturi;
- stopa solarnog zračenja iznosi 1000 W/m².

U industriji, pretpostavka o konzervativnim uvjetima varira zbog razlika u vremenskim uvjetima na različitim lokacijama. Najprikladniji konzervativni uvjet trebao bi se temeljiti na povijesnom vremenskom zapisu. Budući da se vremenski uvjeti razlikuju ovisno o lokaciji, fiksni uvjeti ne mogu zadovoljiti zahtjeve za sve lokacije. Trebalo bi odabrati vremenske uvjete koji su lošiji od 97% svih uvjeta. Povremeno vremenski zapisi nisu dostupni pa se tada preporučuje primjena IEEE konzervativnih uvjeta jer predstavljaju srednje uvjete.

3.2. Sezonsko statičko toplinsko ocjenjivanje

Statička termalna ocjena je jednostavna i fiksna vrijednost. Međutim, determinističke statičke termalne ocjene zračnih dalekovoda obično su konzervativne, što rezultira nedovoljnim iskorištavanjem njihovog potencijalnog kapaciteta. Jedna strategija za prevladavanje ovog ograničenja, što dovodi do razvoja alternativnih ocjena, jest sezonska statička termalna ocjena koja koristi probabilistički pristup ocjeni s eksplicitnom obradom sezonskih učinaka na temperaturu vodiča. Razmatrajući razlike u vremenskim uvjetima tijekom različitih godišnjih doba, sezonska statička termalna ocjena može se primijeniti na otvorene zračne dalekovode.

Sezonske razlike u vremenskim uvjetima uobičajene su u mnogim zemljama, a Velika Britanija je tipičan primjer. Prema vremenskim zapisima britanskog meteorološkog ureda od siječnja 1910. do lipnja 2013., prosječna temperatura proljeća (ožujak - svibanj) iznosi 7.327°C, prosječna temperatura ljeta (lipanj - kolovoz) iznosi 13.90°C, prosječna temperatura jeseni (rujan - studeni) iznosi 9.05°C, a prosječna temperatura zime (prosinac - veljača) iznosi 3.42°C. Prosječna razlika u temperaturi između ljeta i zime iznosi otprilike 10°C. U normalnim uvjetima, ova razlika u okolnoj temperaturi rezultirat će razlikom od 73A u struji za standardnu OHL strukturu na 400 kV.

Centralni upravni odbor za električnu energiju (CEGB) preporučio je sljedeće sezonske temperature: ljeto (20°C), proljeće/jesen (9°C) i zima (2°C). Prema toj preporuci vremenski uvjeti na primjeru Velike Britanije su navedeni u tablici 3.1. [8]:

Tablica 3.1. Preporučeni vremenski uvjeti u Velikoj Britaniji

Godišnje doba	Ljeto	Proljeće/jesen	Zima
Temperatura (°C)	20	9	2
Brzina vjetra (m/s)	0,5	0,5	0,5

Tablica 3.2. prikazuje prosječnu mjesečnu temperaturu u državi New South Wales u Australiji koju je objavio Australijski zavod za meteorologiju [9]:

Tablica 3.2. Mjesečne temperature u New South Walesu u 2012. godini

Mjesec	Siječanj	Veljača	Ožujak	Travanj	Svibanj	Lipanj
Temperatura (°C)	24,1	22,9	22,7	19,4	16,7	13,7
Mjesec	Srpanj	Kolovoz	Rujan	Listopad	Studeni	Prosinac
Temperatura (°C)	13,3	14,6	17,2	18,5	20,5	22,3

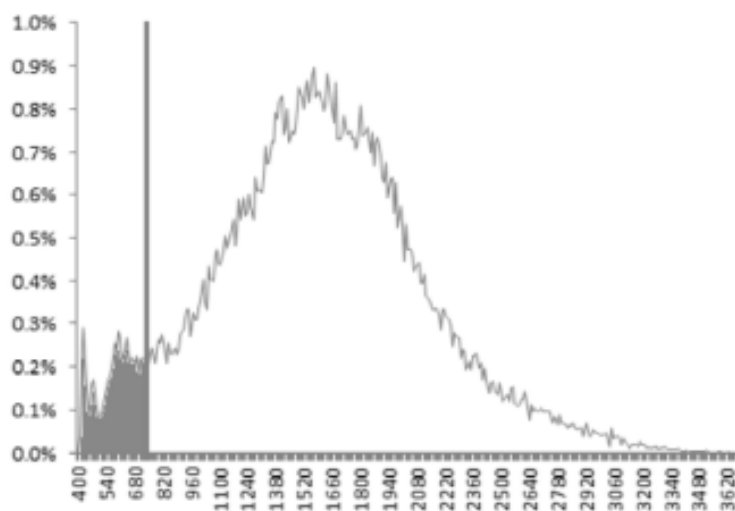
Iz Tablice 3.2. može se primijetiti da su najhladnija tri mjeseca lipanj, srpanj i kolovoz. Razlika u sezonskim temperaturama nije tako očita kao u Velikoj Britaniji. Stoga se sezonski konzervativni vremenski uvjeti moraju temeljiti na lokalnom meteorološkom zapisu. Ne postoji fiksna standardna metoda za sezonsku toplinsku ocjenu širom svijeta. Sezonska toplinska ocjena predstavlja statičku toplinsku ocjenu u jednom godišnjem dobu. U nekim uvjetima, vremenski uvjeti tijekom različitih godišnjih doba su različiti i sezonska toplinska ocjena omogućava bolje iskorištavanje kapaciteta zračnih dalekovoda.

3.3 Probabilistička toplinska ocjena

Probabilistička termalna ocjena je još jedna strategija za rješavanje problema nedovoljnog iskorištavanja potencijalnog kapaciteta. Prije nego što se uvede probabilistička toplinska ocjena, rizik statičke toplinske ocjene trebao bi biti dobro definiran. Rizik preopterećenja dalekovoda nije nula čak i kada su primijenjeni konzervativni vremenski uvjeti.

Za vrijednost radne struje postoji odgovarajuća vjerojatnost preopterećenja. Slika 3.1. koristi se za objašnjavanje značenja probabilističke toplinske ocjene. Na toj slici krivulja predstavlja vjerojatnu distribuciju stvarne termalne ocjene u stvarnom vremenu. Podaci su izvučeni iz Nacionalne mreže sustava praćenja dalekovoda u Tauntonu. Horizontalna os predstavlja radnu struju u amperima dok je okomita os vjerojatnost preopterećenja pod tom strujom. Vertikalna crta označava statičku termalnu ocjenu prema preporučenim pretpostavljenim konzervativnim

uvjetima. Tamni dio slike označava uvjete u kojima je stvarna radna struja veća od projektirane vrijednosti. Ukupna površina tamnog dijela krivulje predstavlja vjerojatnost preopterećenja [8, 9].



Slika 3.1. Probabilistička toplinska ocjena

Prema podacima o radu dalekovoda u Tauntonu, za različite pretpostavke o maksimalnoj temperaturi vodiča vjerojatnosti su različite, kako je prikazano u tablici 3.3.

Tablica 3.3. Pretpostavka o maksimalnoj temperaturi vodiča i rizik preopterećenja

Maksimalna temperatura vodiča (°C)	60	65	70	75	80	85	90
Rizik preopterećenja (%)	23,14	17,11	11,08	9,05	5,02	3,99	1,95

Probabilistička termalna ocjena predstavlja kombinaciju različitih fiksnih termalnih ocjena temeljenih na različitim konzervativnim uvjetima. Vjerojatnost rizika preopterećenja u ovom fiksnom termalnom ocjenjivanju može se izračunati kako je prikazano u [10].

3.4. Dinamička toplinska ocjena

Dynamic Thermal Rating (DTR), ili dinamička toplinska ocjena, odnosi se na koncept koji se koristi u električnim prijenosnim sustavima, posebno na dalekovodima, kako bi se bolje razumjela i upravljala njihova termalna opterećenja. Ovaj koncept omogućava da se trenutačno opterećenje vodova procjenjuje na temelju stvarnih uvjeta, uključujući temperaturu okoline, brzinu vjetra i druge faktore koji utječu na grijanje vodova. DTR koristi senzore za praćenje stvarnih uvjeta na dalekovodu, uključujući temperaturu voda, temperaturu okoline, brzinu vjetra, trenutačnu opterećenost i druge relevantne podatke. Na temelju tih podataka, DTR sustav može dinamički procijeniti koliko topline se generira u vodovima i kako to utječe na njihovu trenutačnu sposobnost prijenosa električne energije. Ovo omogućava operaterima električnih mreža da bolje iskoriste kapacitet vodova i smanje rizik od preopterećenja. Dinamička termalna ocjena je posebno korisna u uvjetima gdje se dalekovodi suočavaju s promjenjivim klimatskim uvjetima ili fluktuacijama u opterećenju električnom energijom tijekom dana. Omogućava optimizaciju kapaciteta i povećava sigurnost prijenosa električne energije u distribucijskim sustavima. DTR tehnologije uključuju tri primarne komponente: DTR uređaje koji prate različite radne uvjete, komunikacijske uređaje koji primaju i prenose izmjerene terenske podatke, i softver koji tumači podatke i kvantificira toplinski kapacitet voda. U svrhu primjene DTR-a, DTR uređaji mogu se odabrati uzimajući u obzir cijenu i jednostavnost instalacije i održavanja, točnost i radna ograničenja, trajnost, pouzdanost i performanse. Prilikom postavljanja DTR-a potrebno je provesti sveobuhvatnu analizu specifičnih razmatranja lokacije.

Izraz „ocjena“ (rating) u DTR sustavu odnosi se na najveću dopuštenu struju vodiča koja podiže temperaturu voda bez narušavanja razmaka od tla i uzrokuje gubitak vlažne čvrstoće vodiča zbog zagrijavanja. Kako je u uvodu rečeno STR (statička toplinska ocjena) podcjenjuje puni potencijal kapaciteta voda jer se izračunava na temelju vrlo konzervativnih vremenskih pretpostavki: niska brzina vjetra (0,6 m/s), puno sunčevo zračenje (1000 w/m²), i visoka temperatura okoline (40°C). Međutim, stvarni vremenski uvjeti neprestano fluktuiraju i obično su vrlo povoljni čime se omogućuje vodičima da dožive veće hlađenje od očekivanog. Stoga su stvarne ocjene vodova obično mnogo veće od STR-a, a trenutne vrijednosti dalekovoda mogu se značajno povećati. Uzimajući u obzir vremenske atmosfere uvjete, ocjene vodova variraju dinamički tijekom dana, od tuda i izraz DTR sustav. Zahvaljujući napretku senzora, komunikacijskih sustava i Internetu Stvari (eng. Internet of Things) u posljednja dva desetljeća DTR sustav sada može odrediti toplinske vrijednosti voda u stvarnom vremenu ili u određenim vremenskim intervalima.

3.5. Ciljevi DTR-a

Kako bi se odredila vrijednost strujnog opterećenja voda mora biti poznat odnos između položaja vodiča u prostoru i temperature vodiča. Iz tog „poznatog stanja“ može se odrediti struja koja odgovara dopuštenoj temperaturi vodiča ili najvećem dopuštenom provjesu (najgori slučaj).

Ciljevi ocjenjivanja u stvarnom vremenu sastoje se od:

1. Određivanja stvarnog provjesa u kritičnim rasponima i odgovarajuće srednje temperature vodiča (u jednom vodu postoji više kritičnih raspona).
2. Uspoređivanja stvarnog provjesa s najvećim dopuštenim provjesom ili maksimalnom dopuštenom temperaturom (najgori slučaj) u svakom od kritičnih raspona. Koristeći ove informacije, odrediti „sigurne međuspremnik“ za kritične raspone.
3. Pretvaranje „sigurnih spremnika“ u električna opterećenja (u MVA) za svaki kritični raspon.
4. Dodatnih informacija koje bi bilo poželjno priopćiti, a to su: varijacije prijenosne moći s vremenom (uključujući predviđanje) i histografiju pojavljivanja (jedan dan, jedan mjesec, jedna godina). Cilj ovih informacije je omogućiti pristup globalnom ponašanju voda.

Neki uređaji izravno mjere naprezanje u vodiču, temperaturu vodiča ili položaj vodiča. Za sve ove uređaje potrebna je primjena dobro dokazanih modela s podacima (npr. podaci o vodiču, topološki podaci, vremenski podaci, podaci o dizajnu vodova itd.) za određivanje provjesa ili temperature kako bi se ispunili ciljevi pod rednim brojem 1 i 2 navedeni iznad. Alternativno neki uređaji mogu izravno procijeniti provjes u kritičnim rasponima (bez ikakvih drugih potrebnih podataka) te, koristeći TSO maksimalni dopušteni provjes, te tako odrediti ciljeve 1 i 2.

Ciljevi 3 i 4 mogu se tada riješiti postupcima predviđanja koji se temelje na trenutnim trendovima pada uočenim u nedavnoj prošlosti voda ili sljedećim postupkom:

- Određivanje varijabli unosa topline (omski i magnetski gubici i solarno zračenje) i izlaza topline (konvekcijsko i radijacijsko hlađenje) u danom trenutku za dani dio voda.
- Primjena algoritma za određivanje koja se struja može primijeniti na vod neograničeno dugo pod pretpostavkom stalnih vremenskih uvjeta bez prekoračenja projektirane temperature voda ili najvećeg dopuštenog provjesa (najgori slučaj). Ova struja je vrijednost dionice linije u stvarnom vremenu.
- Izračunavanje dinamičkih ili prijelaznih vrijednosti koje mogu biti uzrokovane značajnim promjenama struje voda [11].

4. ODREĐIVANJE PRIJENOSNE MOĆI VODA KORISTEĆI SUSTAV DINAMIČKOG MONITORINGA U STVARNOM VREMENU

RTM sustavi (eng. Real-time systems) ili sustavi u stvarnom vremenu služe kako bi pratili uvjete u kojima se nalazi dalekovod u svakom trenutku vremena. Njihova zadaća je u svakom trenutku nadzirati i ograničiti struju koju vod prenosi kako se ne bi premašila projektirana temperatura voda.

Mehanički gledano, dalekovodi su projektirani i izgrađeni u "odsječcima vodova"- zateznim poljima koji se sastoje od višestrukih raspona, općenito orijentiranih u istom smjeru i završavaju na svakom kraju određenim napreznjima. Unutar svake dionice vodova vodiči su obično poduprti vodoravno fleksibilnim točkama ovjesa koje omogućuju gotovo slobodno kretanje točaka ovjesa u smjeru dionice voda. Namjera ove vrste konstrukcije je omogućiti izjednačavanje napreznja između "ovjesnih" raspona. Izjednačavanje napreznja smanjuje uzdužna vlačna opterećenja na strukturama ovjesa, smanjuje napreznje u jako opterećenim rasponima i smanjuje provjes u najtoplijim rasponima ovjesa tijekom razdoblja velikog protoka snage.

Električno gledano struja u faznim vodičima vrlo malo varira između raspona, ali varijacije u brzini i smjeru vjetra duž raspona dionice voda u istom dijelu voda vjerojatno će proizvesti relativno velike temperaturne razlike između raspona pa čak i unutar dugih raspona. Za razliku od svog mehaničkog ponašanja, vodiči dalekovoda vrlo su loši u izjednačavanju temperature, tj. postoji mala ili nikakva tendencija da hladni rasponi odvedu toplinu iz susjednih vrućih raspona. Stoga temperatura vodiča nadzemnih dalekovoda pri protoku velike snage ovisi o struji i lokalnim vremenskim uvjetima duž linije.

Dok temperatura zraka i solarno grijanje mogu biti prilično ujednačeni duž voda, brzina i smjer vjetra mogu varirati od raspona do raspona, a pri visokim vrijednostima struje vodiča temperatura vodiča može varirati od raspona do raspona duž odsječka linije. Međutim, snažna mehanička veza između raspona održava napreznje u svim rasponima gotovo istom. To je prikazano u tablici 4.1. koja prikazuje provjes, napreznje i varijaciju temperature raspona u dijelu voda koji se sastoji od deset raspona od 275 metara. Svaki od raspona ima istu temperaturu zraka (40°C), sunčevo grijanje (podne) i brzinu vjetra (0,61 m/s), ali smjer vjetra varira od paralelnog do okomitog [11].

Tablica 4.1. Prikaz naprezanja na različitim rasponima [11]

Raspon	Temperatura vodiča u rasponu [°C]	Naprezanje [kN]	Stvarni provjes [m]	Idealni provjes [m]
1	75	16,66	9,02	9,12
2	70	16,67	9,02	9,12
3	75	16,62	9,05	9,12
4	70	16,56	9,09	9,12
5	75	16,41	9,18	9,12
6	100	16,21	9,30	9,12
7	75	16,24	9,27	9,12
8	100	16,17	9,30	9,12
9	75	16,32	9,21	9,12
10	75	16,39	9,18	9,12
Prosjek	80	16,43	9,15	9,12

Iz tablice 4.1. može se primijetiti da mijenjanje smjera vjetra uzrokuje varijaciju temperature vodiča između 70°C i 100°C, ali da su sila naprezanja i provjes u svakom od raspona gotovo

jednaki zbog izjednačavanja napreznja između raspona ovjesa. Napreznje varira s prosječnom temperaturom dionice voda koja iznosi 80°C u ovom slučaju.

Važno je napomenuti razliku između praćenja raspona i praćenja zateznog polja. Praćenje zateznog polja pretpostavlja inherentno da su svi podaci o vodičima konstantni duž raspona i ekstrapolira globalnu vrijednost odjeljka (npr. napreznje na sidrenoj konstrukciji ili provjes u jednom rasponu) na svaki od raspona koristeći koncept vodećeg raspona i kalibraciju. Uređaji za praćenje raspona pružit će informacije o rasponima gdje su instalirani. Mogu ekstrapolirati svoj provjes (u tom slučaju) na druge raspone istog odjeljka koristeći koncept vodećeg raspona, ali lokalni podaci o rasponu su stvarni podaci neovisni o konceptu vodećeg raspona. Naravno, temperatura vodiča praćena u jednom rasponu ne može se ekstrapolirati na zatezno bez dodatnih mjerenja što je jasno prikazano tablicom 4.1.

Tablica prikazuje razliku u očekivanim varijacijama između direktnih monitora temperature vodova unutar pojedinih raspona (koji mjere temperaturu vodiča unutar jednog raspona) i direktnih monitora zateznog polja voda (koji mjere prosječne uvjete provjesa i napreznja za odjeljak voda).

Ako je osnovna zabrinutost u ograničavanju protoka snage održavanje razmaka pri visokoj temperaturi, tada direktno praćenje prosječne temperature zateznog polja voda ili sile napreznja omogućava korištenje samo jednog monitora, dok bi za određivanje prosječne temperature zateznog polja voda bilo potrebno više monitora temperature unutar pojedinih raspona. Ako je pak osnovna zabrinutost u ograničavanju protoka snage na liniji izbjegavanje ili ograničavanje žarenja aluminijskih ili bakrenih niti ili oštećenja konektora na temperaturama iznad 100°C, tada bi postavljanje monitora temperature unutar najtoplijeg raspona bilo učinkovito. Ako se najtopliji raspon mijenja s vremenskim uvjetima, tada je potrebno višestruko praćenje temperature unutar pojedinih raspona.

Temperatura vodiča nadzemnog voda može se odrediti na jedan od tri načina. Kako bi bila korisna, daljinska mjerenja moraju biti komunikacijski dostupna u stvarnom vremenu centru za kontrolu napajanja operatora prijenosnog sustava:

- Vremenski uvjeti na više točaka duž voda mogu se pratiti meteorološkim instrumentima (uključujući visokokvalitetni anemometar) i u kombinaciji sa strujom u vodu temperatura vodiča može se izračunati korištenjem formule ravnoteže prelazne topline.
- Temperatura vodiča može se izravno mjeriti na više raspona sensorima temperature vodiča.

- Provjes ili naprezanja se mogu pratiti u kritičnim dijelovima voda. Podaci o provjesu i naprezanju mogu se pretvoriti u prosječnu temperaturu vodiča voda primjenom jednadžbe promjene stanja.

Brzina vremenske promjene temperature vodiča ovisi o termalnoj vremenskoj konstanti vodiča koja je obično u rasponu od 5 do 20 minuta. Stoga se temperatura vodiča obično mjeri i izvještava u vremenskim intervalima od 5 do 20 minuta. Kraći intervali izvješćivanja vjerojatno neće značajno poboljšati točnost mjerenja. Prostorni interval monitora voda ovisi o vrsti monitora i tome je li ograničenje temperature voda namijenjeno ograničavanju degradacije konektora i žarenju aluminijskih niti ili održavanju adekvatnih električnih razmaka.

Važno je napomenuti da sva tri načina praćenja omogućuju operatoru sustava praćenje temperature i provjesa voda, ali nijedan ne pruža predviđanje temperature ili provjesa niti smjernice operatoru sustava o maksimalno dopuštenoj struji voda tijekom normalnih ili izvanrednih uvjeta. Ove smjernice, u obliku stvarnih termalnih ocjena u stvarnom vremenu, zahtijevaju dodatne podatke u stvarnom vremenu i offline i online iterativne izračune s jednadžbom toplinskog balansa.

Korištenje ocjenjivanja u stvarnom vremenu od strane operatora sustava u uvjetima normalnog rada sustava naišlo je na značajan otpor. Iako su toplinska ograničenja prijenosnih mreža uobičajena, vrlo je mali broj dalekovoda toplinski ograničeno u normalnim uvjetima. Češće se termalna ograničenja javljaju nakon gubitka velikih proizvodnih postrojenja ili vodova najvišeg napona u sustavu. Tek nakon takvih nepredviđenih slučajeva dovoljan protok snage prelazi na vodove nižeg napona gdje toplinske vrijednosti postaju operativno ograničenje. Upravljanje takvim (N-1) uvjetima zahtijeva i sposobnost određivanja vrijednosti voda pod relativno niskim strujama u vodu i softver za izračunavanje dinamičkih vrijednosti nakon značajnih promjena struje u vodu. Tipično, stvarne mreže u mnogim dijelovima svijeta su snažno isprepletene. „(N-1)“ nepredviđena situacija općenito dovodi do povećanja od 30% do 40% opterećenja u nekim vodovima koji se nalaze u blizini izgubljene komponente. Izazov je stoga informirati je li moguće povećati opterećenje iznad nazivnog opterećenja voda što je obično između 50% i 80% statičke ocjene.

Implementacija ocjena u stvarnom vremenu dodatno je ograničena nedostatkom učinkovitih metoda smanjenja opterećenja za rješavanje povremenih nepovoljnih ocjena tijekom razdoblja visokih temperatura okoline i niske konvekcije vjetera. Operatori ne mogu rasteretiti vod na temelju većinom viših ocjena u stvarnom vremenu, osim ako nemaju dostupne sheme popravnih radnji za

smanjenje struje voda kada ocjene u stvarnom vremenu povremeno padnu. Zbog toga svi sustavi za ocjenjivanje u stvarnom vremenu koriste konzervativne pristupe za ocjenjivanje voda.

Ocjene vodova u stvarnom vremenu izračunavaju se za razdoblje ocjenjivanja u neposrednoj budućnosti na temelju izravnih podataka monitora prijavljenih za neposrednu prošlost. Točnost ocjena vodova u stvarnom vremenu ovisi o točnosti kojom se trenutačno toplinsko stanje ili razmak vodiča mjeri izravnim monitorima, ali također i o točnosti vremenskih prilika korištenih u izračunu vrijednosti.

4.1. Temperatura vodiča i maksimalni provjes

Kako je već navedeno, ocjena voda je povezana s maksimalnom dopuštenom temperaturom ili maksimalnim dopuštenim provjesom. Sustavi koji koriste ocjenjivanje u stvarnom vremenu (RTM) orijentirani su prema jednoj od ove dvije varijable. Međutim, svi RTM sustavi koji se koriste za ocjenjivanje vodova moraju obraditi obje vrijednosti kako bi se odredio najgori slučaj.

4.1.1. Procjena temperature vodiča pomoću sustava ocjenjivanja u stvarnom vremenu (RTM)

Prilikom velikih vrijednost struja temperatura neizoliranih vodiča varira duž svakog voda uglavnom zbog različitog hlađenja vjetrom. To se postiže jednom od slijedećih metoda:

1. Praćenjem vremenskih uvjeta duž dalekovoda moguće je izračunati lokalnu temperaturu vodiča unutar raspona postavljanjem meteoroloških instrumenata (koji mjere temperaturu zraka, sunčevu toplinu i brzinu i smjer vjetra) duž dalekovoda i u blizini istoga.
2. moguće postaviti direktni monitori temperature unutar različitih razmaka kako bi se izravno mjerila lokalna temperatura vodiča, a ako se postave više monitora unutar zateznog polja, moguće je odrediti prosječnu temperaturu vodiča zateznog polja.
3. Monitori se mogu postaviti duž voda kako bi mjerili parametre kao što su naprezanje, provjes, razmak itd. Takvi parametri se mogu „pretvoriti“ u prosječnu temperaturu zateznog polja voda.

U bilo kojoj od navedenih metoda mjerene vrijednosti moraju biti očitane u stvarnom vremenu kako bi sustavi mogli ocijeniti temperaturu linije u stvarnom vremenu.

4.1.2. Izračun temperature vodiča u određenom rasponu iz meteoroloških podataka

Pretpostavlja se da meteorološka stanica mjeri temperaturu zraka, sunčevu toplinu, brzinu i smjer vjetra. Važno je da anemometar može točno mjeriti brzine vjetra ispod 1 m/s. Da bi se odredila temperatura vodiča također je potrebno poznavati struju voda.

Opća jednadžba ravnoteže topline prikazana je izrazom (4.1):

$$q_C (T_C - T_A) + q_R(T_C - T_A) + m \cdot C_p \frac{dT_C}{dt} = q_S + I^2 \cdot R(T_C) \quad (4.1)$$

Gdje je:

q_C – toplina odvedena konvekcijom po jedinici duljine (ovisi o kvadratnom korijenu promjera vodiča i brzine vjetra),

q_R – toplina odvedena radijacijom po jedinici duljine (ovisi o promjeru vodiča),

q_S – grijanje vodiča solarnim zračenjem po jedinici duljine,

$m \cdot C_p$ – kapacitet zagrijavanja po jedinici duljine,

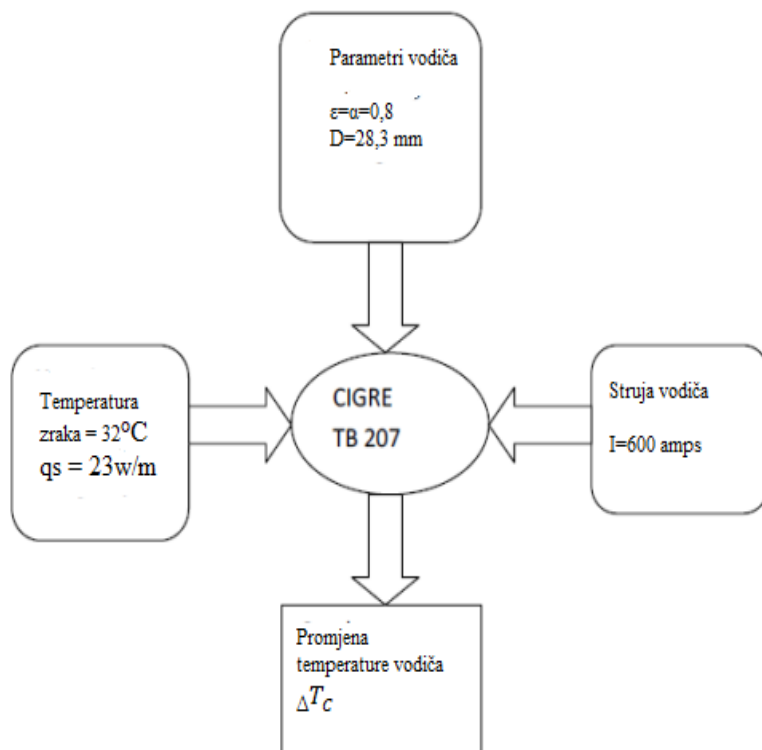
$R(T_C)$ – električni otpor vodiča po jedinici duljine,

I – struja voda.

Ako je vodič prvotno bio na temperaturi T_C (ti), promjena struje voda ili vremenskih uvjeta (sunčeva toplina, brzina ili smjer vjetra, temperatura zraka) proizvest će odgovarajuću promjenu temperature vodiča (ΔT_C) tijekom sljedećeg kratkog vremenskog intervala, Δt kako je prikazano izrazom (4.2):

$$\Delta T_C = \frac{1}{m \cdot C_p} [R(T_C) \cdot I^2 - q_C (T_C - T_A) - q_R(T_C - T_A) + q_S] \cdot \Delta t \quad (4.2)$$

Ponavljanjem primjene ove jednadžbe tijekom određenog perioda omogućava praćenje temperature vodiča tijekom tog perioda kako je prikazano na slici 4.1. Ovdje se može primijetiti da se brzina vjetra, smjer vjetra, temperatura zraka, sunčeva toplina i struja mijenjaju. Treba napomenuti da čak ni nagle promjene tih parametara ne uzrokuju jednako naglu promjenu temperature vodiča.



Slika 4.1. Ilustracija izračuna temperature vodiča tijekom vremena korištenjem metode prijenosa topline po CIGRE TB 207 standardu [12]

4.1.3. Izravno mjerenje temperature vodiča u određenom rasponu

"Lokalna", tj. temperatura vodiča unutar raspona može se mjeriti izravno bez potrebe za mjerenjem struje voda ili određivanjem vremenskih prilika. Prosječna temperatura zateznog polja voda može se samo procijeniti ako se temperatura vodiča mjeri u dovoljnom broju raspona unutar odjeljka voda kako bi se omogućio izračun prosječne temperature vodiča u određenom odjeljku. Postavljanje izravnog monitora temperature vodiča unutar raspona može utjecati na izmjerenu temperaturu. Masa monitora i smetnje vjetra koje može uzrokovati također mogu utjecati na izmjerenu temperaturu. Također treba napomenuti da temperatura varira duž raspona. Dakle, ako se koriste monitori temperature trebalo bi biti dovoljno monitora kako bi se uzelo u obzir ovo variranje duž raspona i odjeljka.

Trebalo bi napomenuti da konačni podaci koji će se provjeravati za ocjenu linije trebaju biti najgori slučaj između maksimalne temperature i maksimalnog provjesa. Vrlo često su stvarni uvjeti na terenu takvi da odnos između tih dviju vrijednosti kako je predviđen više nije valjan, stoga se temperatura vodiča mora povezati s vrijednošću provjesa / naprezanja.

4.1.4. Određivanje prosječne temperature vodiča u određenom zateznom polju voda

Prosječna temperatura vodiča u određenom zateznom polju voda ne može se nadzirati izravno. Mora se izračunati iz mjerenja naprezanja, provjesa ili razmaka u kombinaciji s "promjenom stanja" ili "kalibracijskom jednadžbom voda", koja je izvedena iz analitičkih i eksperimentalnih podataka koji su jedinstveni za nadzirani odjeljak voda. Monitori odjeljka voda imaju prednost što pružaju precizniju procjenu provjesa duž odjeljka voda, ali zahtijevaju analizu podataka na terenu kako bi se odredio eksperimentalni odnos između provjesa, naprezanja i prosječne temperature vodiča odjeljka voda.

4.2. Određivanje prosječne temperature na temelju provjesa koristeći RTM sustave

Provjes je povezan s razmacima i mora biti manji od maksimalne vrijednosti koja omogućava dovoljan razmak u bilo kojem trenutku između vodiča električnog voda i potencijalne prepreke ispod voda. RTM sustavi moraju mjeriti ili procijeniti iznos provjesa. RTM temeljen na temperaturi mora koristiti model za povratak na provjes pri čemu temperatura ovdje znači prosječnu temperaturu odjeljka voda budući da se model temelji na konceptu vladajućeg raspona. RTM temeljen na poziciji, naprezanju, razmaku ili pokretima uzrokovanim vjetrom (koji se koriste za dobivanje izravne vrijednosti provjesa) može se lako povezati s topološkim i kondukcijskim podacima kako bi se odredili razmaci. Temperatura vodiča zateznog polja voda tada se dobiva pomoću odnosa provjes-temperatura. To se postiže izvođenjem jednadžbi "promjene stanja" ili "kalibracije voda". Jednadžba promjene stanja (kalibracije voda) omogućuje preslikavanje naprezanja voda, provjesa ili razmaka u prosječnu temperaturu odjeljka voda. Jednadžba se može razlikovati za svaki dio voda.

4.2.1. Izračun provjesa i naprezanja

U svijetu se koriste mnoge metode proračuna provjesa i naprezanja. Svaki je donekle jedinstven i vjerojatno daje prihvatljive rezultate na temelju iskustva projektanta dalekovoda. U gotovo svakom slučaju takvi se izračuni rade numerički, ali se razlikuju u tome kako produljenje vodiča odgovara promjenama naprezanja, temperature i vremena. Različite metode proračuna uvelike se razlikuju u načinu na koji je produljenje vodiča predstavljeno. Predlaže se da se različiti pristupi mogu grupirati u jedan od tri modela produljenja vodiča:

- linearno produljenje,
- pojednostavljeno plastično produljenje,
- eksperimentalni plastični model produljenja.

Bez obzira na korišteni model produljenja, izračuni provjesa i naprezanja obično daju rezultate za provjese i njima odgovarajuće vrijednosti naprezanja za niz slučajeva opterećenja (opterećenje ledom i vjetrom te temperaturu vodiča) pod jednim ili više ograničenja naprezanja ili provjesa pri određenim uvjetima opterećenja. U većini proračunskih metoda koji pripadaju plastičnim

modelima produljenja vodiča izračuni provjesa i naprezanja izvode se za skup slučajeva opterećenja koji odgovaraju "početnom" stanju vodiča u vrijeme konstrukcije i jednom ili više "konačnih" stanja koja odgovaraju starosti voda od 10 godina ili više.

Kao primjer, koristeći eksperimentalni plastični model produljenja, izračuni provjesa i naprezanja prikazani su u tablici 4.2. kako ih je generirao program SAG10 koji se često koristi u Sjevernoj Americi. Razlika u provjesu i naprezanju kod različitih slučajeva opterećenja nastaje zbog razlika u temperaturi vodiča i težini po jedinici duljine. Razlika u početnom i konačnom naprezanju rezultat je plastičnog produljenja vodiča koji proizlazi iz projektiranog opterećenja naprezanja i metalurškog puzanja tijekom vremena. Može se primijetiti da su početne i završne vrijednosti provjesa i naprezanja jednake u prvom redu. To se događa jer se maksimalno plastično produljenje vodiča događa kao rezultat ovog stanja opterećenja, a ne kao rezultat metalurškog puzanja u svakodnevnim uvjetima.

Tablica 4.2. Rezultati naprezanja i provjesa u slučaju kada je trajno istežanje aluminijskih niti određeno opterećenjem uzrokovanim ledom i vjetrom [13]

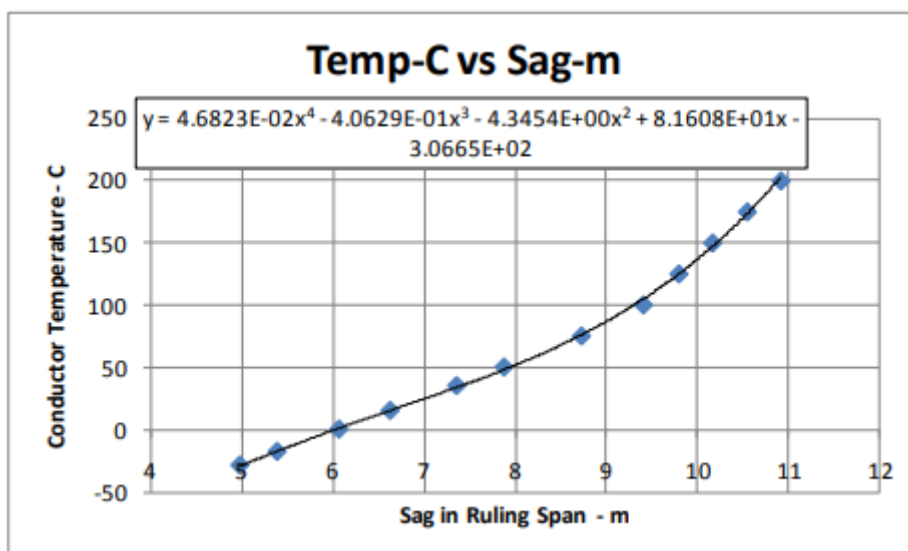
Vodič DRAKE 26/7 ACSR									
Površina = 468.6 mm ² . OD = 28.14 mm Bare Wt = 15.96 N/m									
Raspon = 300 m RTS = 140119 N									
Opterećenja				Konačne vrijednosti naprezanja i provjesa			Početne vrijednosti naprezanja i provjesa		
Temperatura [°C]	Led [mm]	Vjetar [N/m ²]	Težina [N/m]	Provjes [m]	Naprezanje [N]	RTS [%]	Provjes [m]	Naprezanje [N]	RTS [%]
-20	12,5	380	36,377	9,26	44386	31,7	9,26	44386	31,7
-40	0	0	15.966	7,25	24818	17,7	6,92	25996	18,6
0	0	0	15.966	8,61	20938	14,9	8,13	22146	15,8
15	0	0	15.966	9,08	19847	14,2	8,57	21018	15
25	0	0	15.966	9,39	19200	13,7	8,86	20340	14,5
50	0	0	15.966	10,13	17805	12,7	9,56	18864	13,5
75	0	0	15.966	16,62	17001	12,1	10,23	17636	12,6
100	0	0	15.966	10,99	16425	11,7	10,88	16601	11,8

Još jedan primjer tablice vrijednosti provjesa i naprezanja vodiča prikazan je tablicom 4.3. gdje je raspon vodiča procijenjen na 300 metara i naprezanje je limitirano na 25% od snage pucanja vodiča (33251 N) na -18 °C bez opterećenja [11].

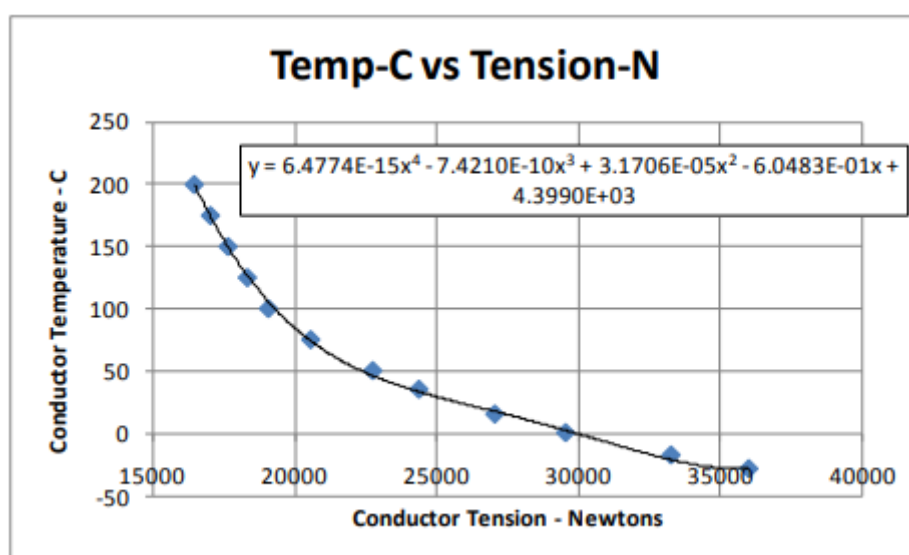
Tablica 4.3. Rezultati naprezanja i provjesa [11]

Opterećenja				Konačne vrijednosti naprezanja i provjesa		Početne vrijednosti naprezanja i provjesa	
Temperatura [°C]	Led [mm]	Vjetar [N/m ²]	Težina [N/m]	Provjes [m]	Naprezanje [N]	Provjes [m]	Naprezanje [N]
-18	0	0	31,325	6,84	50002	6,6	51822
-29	0	0	15,878	4,97	35987	4,38	40848
-18	0	0	15,878	5,38	33251	4,67	38304
0	0	0	15,878	6,06	29537	5,19	34485
15	0	0	15,878	6,62	27044	5,65	31669
35	0	0	15,878	7,35	24373	6,29	28441
50	0	0	15,878	7,87	22747	6,78	26389
75	0	0	15,878	9,72	20564	7,6	23568
100	0	0	15,878	9,4	19074	8,4	21344
125	0	0	15,878	9,79	18332	9,16	19567
150	0	0	15,878	10,16	17654	9,9	18122
175	0	0	15,878	10,54	17032	10,44	17196
200	0	0	15,878	10,91	16641	10,81	16617

Na temelju ove tablice može se izvesti jednadžba polinoma koja povezuje provjes ili naprezanje s temperaturom vodiča. U ovom slučaju, budući da bi se normalno instalirali takvi monitori na starije vodove, jednadžbe bi trebale povezati provjes i naprezanje s temperaturom vodiča. Sljedeći dijagrami prikazuju temperaturu vodiča kao funkciju izračunatog konačnog provjesa i naprezanja s odgovarajućim jednadžbama polinoma 4. reda. Na slici 4.2. i slici 4.3. prikazana je temperatura vodiča kao funkcija izračunate konačne vrijednosti provjesa i naprezanja s odgovarajućim jednadžbama polinoma 4. reda.



Slika 4.2. Grafički prikaz temperature vodiča kao funkcije provjesa u konačnim uvjetima [11]



Slika 4.3. Grafički prikaz temperature vodiča kao funkcije napreznja u konačnim uvjetima [11]

Može se primijetiti da krivulje prikazane na slikama pokazuju tri važne karakteristike:

- Pri niskim temperaturama vodiča brzina promjene vrijednosti provjesa s temperaturom je 0,36 metara na 10 °C.
- Pri visokim temperaturama vodiča brzina promjene provjesa s temperaturom je oko 0,15 metara na 10 °C.

- Temperatura točke koljena (točka gdje naprezanje aluminijske niti ide na nulu) je blizu 100 °C.

Izračuni provjesa i naprezanja, kako su navedeni ne mogu se smatrati točnima bez terenskih mjerenja iz dva razloga:

- Izmjereni provjes i naprezanje pod svakodnevnim uvjetima (npr. bez leda, bez vjetra na 15 °C) ne mora biti jednako izračunatom stanju zbog niza razloga uključujući povijest opterećenja i pogreške u konstrukciji.
- Ponašanje vodiča pri visokim temperaturama možda neće biti isto kao izračunate vrijednosti.

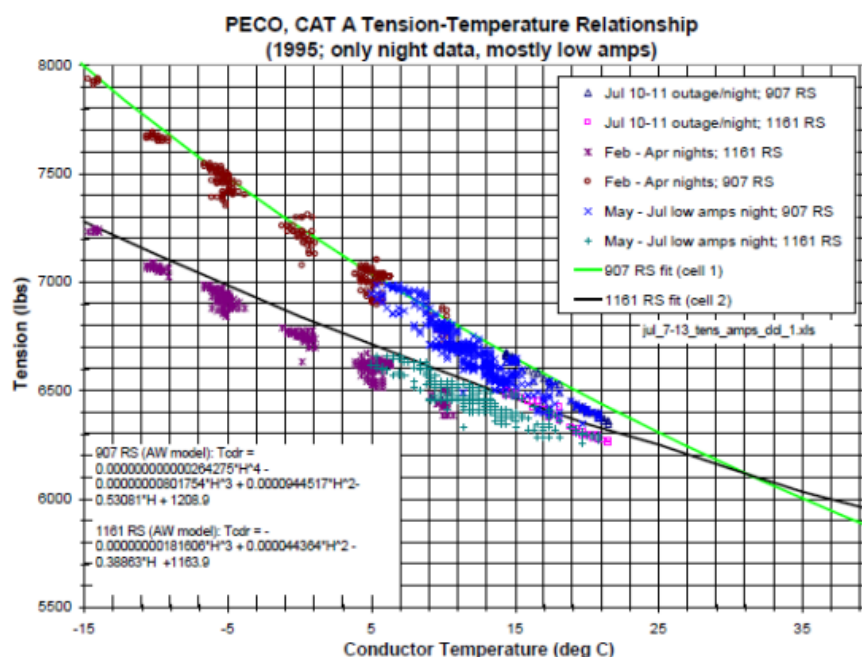
4.2.2. Mjerenja na terenu

U većini slučajeva ne preporučuje se postavljanje jednadžbi promjene stanja ili kalibracije voda samo na temelju izračunatih podataka o provjesu i naprezanju. Nekoliko glavnih zamjerki ovom jednostavnom postupku su:

- Konačne vrijednosti provjesa temelje se na proizvoljnom vremenskom razdoblju produljenja puzanja (obično 10 godina na 15 °C). Povijest opterećenja vodova može biti sasvim drugačija, što dovodi do pogrešaka u amplitudi provjesa i izračunatoj temperaturi točke koljena u konačnim uvjetima.
- Izračunate vrijednosti ovise o pretpostavci vladajućeg raspona da postoji savršeno izjednačavanje naprezanja na osloncima unutar dijela voda. Pomicanje nosača i nesavršeno izjednačavanje naprezanja zbog neravnog terena, izolatora stupova ili kratkih ovjesnih izolatora mogu učiniti pretpostavku vladajućeg raspona netočnom.
- Izračuni provjesa i naprezanja pretpostavljaju da je temperatura vodiča konstantna za sve raspone u dijelu vladajuće raspona voda. U stvarnosti, čak i ako je izjednačavanje naprezanja savršeno, temperatura vodiča može varirati između raspona ovisno o terenu.

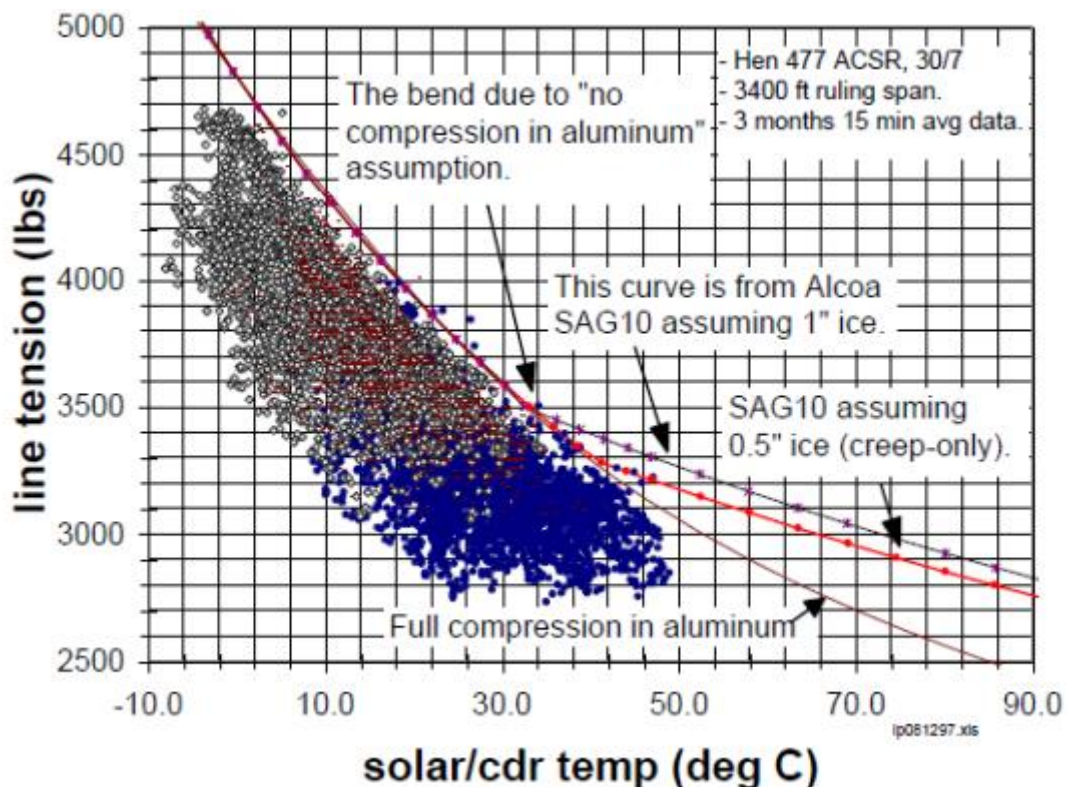
Preliminarni izračuni provjesa i napreznja mogu se poboljšati izvođenjem različitih mjerenja na terenu. Jedno od najosnovnijih mjerenja je provjera izračunatog provjesa i napreznja za uvjete niske vrijednosti struje, niskog solarnog grijanja gdje je temperatura vodiča gotovo jednaka temperaturi zraka. Na primjer, mjerenje napreznja može se provoditi noću u uvjetima slabog vjetrova gdje je temperatura zraka iznad 5°C. Pod takvim uvjetima, može se pretpostaviti da je temperatura vodiča jednaka temperaturi zraka, a preliminarni izračuni provjesa mogu se modificirati ako je potrebno. U idealnom slučaju, takva se mjerenja provode dok je vod izvan pogona (struja je na nuli). Niz takvih mjerenja s različitim temperaturama zraka tijekom mjeseci dat će niz kalibracijskih točaka koje potvrđuju i presjek i nagib kalibracijske krivulje promjene stanja voda, barem na umjerenim do niskih temperatura.

Prikazana su na slici 4.4. terenska mjerenja obavljena na istoku SAD-a tijekom razdoblja od gotovo godinu dana. Ova terenska mjerenja daju osnovu za provjes i napreznje na temperaturama između -15 °C i +22 °C, ali daju malo eksperimentalne potpore za nagib ili pomak krivulje kalibracije voda pri temperaturama vodiča iznad 30 °C. Podaci se uzimaju za dvije dionice istog nadzemnog voda. Vladajući rasponi (VR) dviju dionica voda su 275 m (907 VR) i 350 m (1161 VR). Podaci su morali biti prikupljeni tijekom cijele godine da bi se dobio ovaj raspon temperatura. U ekvatorijalnim područjima varijacije temperature zraka bile bi, naravno, manje. Važno je obratiti pažnju na regresijske polinome 4. reda za svaki odsječak voda koji povezuje prosječnu temperaturu vodiča na sekciji voda s napreznjem na vodi.



Slika 4.4. Odnos napreznja i temperature [11]

Razrađena eksperimentalna osnova za kalibraciju monitora ilustrirana je na slici 4.5. Ovdje je naprezanje vodiča ucrtano u odnosu na temperaturu vodiča za nultu struju voda uključujući ona vremena kada je prisutno solarno grijanje. Određeni sustavi za praćenje napreznja mjere naprezanje vodiča i neto temperaturu zračenja (eng. Net Radiation Temperature - NRT), koja se naziva i solarna temperatura. NRT se mjeri cilindričnim senzorom, približno istog promjera kao vodič i obojen tako da ima približno istu apsorpciju kao stvarni vodič. Kada je ovaj neto senzor zračenja (eng. Net Radiation Sensor - NRS) usmjeren u istom smjeru kao vod i montiran na približno istoj visini, njegova temperatura je jednaka temperaturi vodiča bez struje. Važno je znati da NRS „osjeća“ svo zračenje koje prima vodič, tj. izravno, difuzno i reflektirano zračenje. Sunčeva temperatura (nulta struja) u ovom dijagramu određena je "neto senzorom zračenja" (duljina aluminijske šipke koja ima promjer, emisivnost i orijentaciju dijela voda).



Slika 4.5. Odnos napreznja i solarne temperature

Povezivanje podatkovnih točaka sa solarnim grijanjem podiže gornji raspon temperatura vodiča na blizu 50 °C. Podatkovne točke pri minimalnom napreznju, pri svakoj solarnoj temperaturi, odgovaraju maksimalnim strujama u vodu i vremenskim uvjetima u najgorem slučaju. U ovim terenskim podacima, struja voda se približavala i povremeno premašivala statičku

toplinsku vrijednost voda. Druge provjere mogu se provesti usporedbom temperature vodiča na temelju naprezanja (ili provjesa ili razmaka) s temperaturom vodiča izračunatom s obzirom na vremenske podatke (temperatura zraka, solarno grijanje, brzina i smjer vjetra) i struje u vodu te usporedbom temperatura vodiča na temelju naprezanja za dvije susjedne dionice voda s usporedivim zaklonom i duljinom.

4.2.3. Ocjena stanja voda pomoću podataka o vremenu

Konvencionalni "statički" izračuni ocjene provode se s detaljnim jednadžbama za gubitak topline i za utjecaj solarnog zračenja, te uz pretpostavku da su struja u vodu i vremenski uvjeti konstantni tijekom cijelog razdoblja ocjenjivanja. Da bi bili konzervativni, pretpostavlja se da su vremenski uvjeti "najgori mogući" (mala brzina vjetra, visoka sezonska temperatura zraka).

Jedna uobičajena metoda koja se koristi u metodama ocjenjivanja u stvarnom vremenu je pretpostavka da će vremenski uvjeti ostati isti kao što su trenutno izmjereni. Ako prediktivno razdoblje prelazi jedan sat, ova jednostavna pretpostavka može postati prilično netočna neovisno o korištenoj vrsti monitora.

Na temelju analize vremenskih podataka dobivenih za povijesno razdoblje koje neposredno prethodi vremenu izračuna mogu se razviti složenije metode predviđanja vremenskih uvjeta za kratko vrijeme u budućnosti (jedan sat). Sustavi obično koriste neki oblik regresijske analize ili tehnike neuronske mreže za određivanje budućih očekivanih vremenskih uvjeta na temelju podataka o vremenu iz prethodnog razdoblja. Predviđeni podaci o vremenu koriste se za predviđanje ocjena za buduća razdoblja. Čak i ako su povijesni podaci o vremenu i struji voda poznati s velikom točnošću, točnost toplinske ocjene u stvarnom vremenu određena je prvenstveno predviđenim podacima.

Ako se vremenski uvjeti prate na različitim lokacijama duž trase dalekovoda i struja u liniji je poznata, temperatura vodiča u vodu može se izračunati ("pratiti") na svakoj lokaciji opetovanom primjenom jednadžbe prijelazne toplinske ravnoteže. Za duge dionice vodova, prosječna temperatura vodiča može se procijeniti iz prosjeka višestrukih mjesta praćenja.

Svaka ocjena voda je prediktivna. Na primjer, 15-minutna vrijednost vodova najveća je struja u vodu koju vodiči mogu nositi 15 minuta bez prekoračenja određene najveće dopuštene temperature vodiča (npr. 100 °C) ili određenog najvećeg dopuštenog provjesa (u najgorem slučaju)

pod vremenskim uvjetima predviđenih za sljedećih 15 minuta. Ako su stvarni vremenski uvjeti koji se javljaju tijekom ovog vremenskog razdoblja od 15 minuta gori (manja brzina vjetra, itd.) od predviđenih, tada će ocjena voda biti previsoka i maksimalna temperatura vodiča može biti prekoračena ako struja opterećenja doista dosegne predviđene jačine. RTM će o tome kontinuirano obavještavati kako bi se mogle poduzeti određene mjere u slučaju rizičnih situacija. Praćenje temperature vodiča ili maksimalnog provjesa je korisno, ali nije dovoljno za određivanje ocjena vodova koje sustavi trebaju kako bi se izbjeglo pregrijavanje vodova ili prekomjerni provjesi.

5. TEHNIČKA RJEŠENJA ZA DTR MONITORING

U ovom poglavlju obrađeni su neki primjeri tehničkih rješenja za monitoring dalekovoda u stvarnom vremenu. Treba napomenuti da se uređaji za DTR monitoring stalno nadograđuju i usavršavaju. Elektroprivrede su pod stalnim pritiskom da maksimalno iskoriste potencijale svojih objekata. Nadzemni visokonaponski prijenosni sustav sastavni je dio tih objekata. U svakom međusobno povezanom visokonaponskom prijenosnom sustavu postoji potreba za definiranjem, u kvantitativnom smislu, maksimalne količine snage koja se može prenijeti bez narušavanja sigurnosti sustava, ali i sigurnosti radnika te svih ostalih ljudi. Ocjene strujnih krugova dalekovoda u stvarnom vremenu važne su kako bi se maksimalno iskoristio kapacitet sustava. U većini slučajeva stvarna granica zbog fizičkog provjesa znatno je ispod toplinske granice. Iz tog razloga mjerenje provjesa vodiča i pogonske struje u stvarnom vremenu obećavaju poboljšanje sposobnosti prijenosa sustava.

Razvijene su mnoge tehnike za određivanje parametara nadzemnog vodiča (provjes, temperatura ili naprezanja) korištenjem izravnih i neizravnih metoda mjerenja, a razlika je u tome što izravne metode uključuju mjerenje najmanje jednog fizičkog parametra voda, kao što je naprezanje, temperatura, frekvencija vibracija ili razmak od tla, koji se zatim koristi za izvođenje parametara kao što su provjes, temperatura i naprezanje ako nisu izravno izmjereni. Kod neizravnih metoda obično se prvo mjere vremenski parametri, a zatim koriste u kombinaciji s električnim opterećenjem vodiča za izračunavanje temperature (a potom i provjesa i/ili naprezanje) vodiča. Vrijedno je napomenuti da sustavi za izravni nadzor obično koriste dodatne ulaze iz neizravnih mjerenja kako bi dodatno izračunali ocjenu strujnog kruga. Također je vrijedno napomenuti da gdje god se mjerenje (bilo izravno ili neizravno) koristi za izvođenje sekundarnih parametara, moraju se napraviti pretpostavke o ponašanju nadzemnog voda kao sustava. Međutim, u stvarnosti se dalekovodi rijetko ponašaju točno u skladu s matematičkim modelima razvijenim za potrebe dizajna, tako da za poboljšanje točnosti sustavi moraju proći proces kalibracije.

5.1. Mjerenje temperature vodiča

Za praćenje temperature vodiča nadzemnih vodova mogu se koristiti različite metode. Kako bi se metode pravilno razumjele, potrebno je razjasniti pojam temperature vodiča. Vrlo često (osobito u neizravnim metodama) pojam temperatura vodiča automatski smatra vodič izotermnim tijelom. Ova izjava nije sasvim točna jer se temperatura vodiča mijenja radijalno i aksijalno duž linije. Osobito pri velikim gustoćama struje (većim od 2 ili 3 A/mm²), nije preporučljivo zanemariti radijalnu i aksijalnu promjenu temperature vodiča. Različite metode za praćenje temperature vodiča omogućuju mjerenje temperature vodiča u određenim točkama ili longitudinalno mjerenje. Dodatno, u smislu radijalne distribucije temperature vodiča, može se mjeriti površinska temperatura vodiča, temperatura jezgre ili prosječna temperatura vodiča (koja u biti predstavlja prosjek temperature površine i jezgre). Primarna važnost nadzora temperature vodiča su otkrivanje i praćenje vrućih točaka duž voda, učinkovito određivanje snage voda, upravljanje u razdobljima preopterećenja i mogućnost povećanja prijenosnog kapaciteta postojećih vodova. Svi ovi razlozi mogli bi utjecati na troškovnu učinkovitost prijenosnog sustava.

Danas je razvijeno nekoliko potpuno različitih metoda za izravno praćenje temperature vodiča. U principu, izmjerena temperatura vodiča varira ovisno o načinu na koji se mjeri temperatura vodiča (uzdužno ili točkasto mjerenje) i principu koji se primjenjuje na mjerenje [15].

5.1.1. Izravno praćenje temperature vodiča temperaturnim sensorima

Temperatura vodiča može se mjeriti izravno pomoću temperaturnih senzora. U ovom slučaju izmjerena temperatura predstavlja temperaturu površine vodiča izmjerenu na jednom mjestu. Temperaturni senzori koji se koriste za nadzor temperature vodiča su konvencionalni kontaktni temperaturni senzori pričvršćeni na linijski vodič. Najčešće korišteni temperaturni senzori su otporni termometri, termistori i termoparovi.

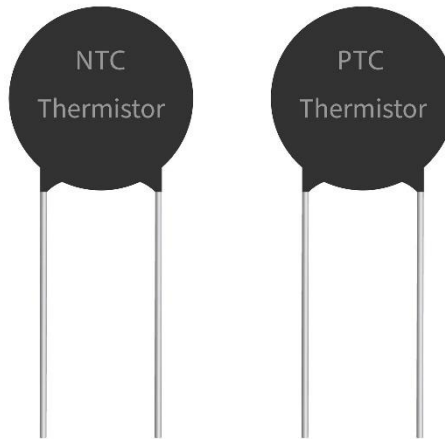
Otporni termometri temelje se na činjenici da se otpor materijala mijenja ovisno o temperaturi. Stoga se mjerenje vodiča dobiva iz mjerenja otpora. Otpor se mjeri kao omjer napona i struje pri čemu je struja koja prolazi kroz senzor niske vrijednosti (0,8 - 1 mA). Najčešći materijali za

otporne termometre su platina, nikal i bakar [15]. Sposobni su izmjeriti temperaturu s velikom točnošću i koriste se za mjerenje vrlo niskih temperatura [16].



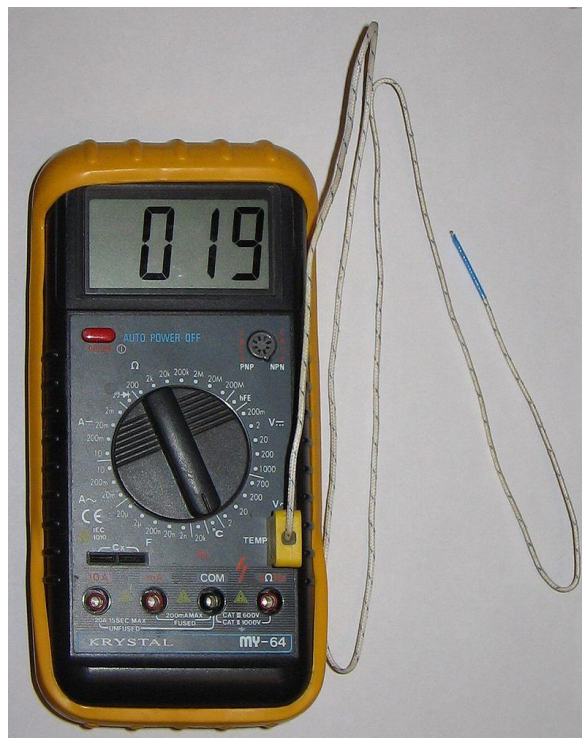
Slika 5.1. Otporni termometar [17]

Termistori su vrlo slični termometrima. Glavne razlike su poluvodički materijali od kojih su izrađeni i imaju li negativan ili pozitivan temperaturni koeficijent. U usporedbi s otpornim termometrima, oni imaju veću osjetljivost, brži odziv i nelinearni odnos temperature i otpora. Prvenstveno postoje dvije vrste termistora: NTC (eng. Negative Temperature Measure) i PTC (eng. Positive Temperature Measure). NTC termistori pokazuju pad električnog otpora kako temperatura raste. To pokazuje da njihov otpor naglo opada s porastom temperature. PTC termistori pokazuju povećanje električnog otpora kako temperatura raste. Za razliku od NTC termistora, otpor PTC termistora naglo raste na određenom temperaturnom pragu [18].



Slika 5.2. NTC i PTC termistori [18]

Termoparovi se temelje na Seebeckovom efektu koji kaže da se zbog temperaturnog gradijenta na spoju dva različita materijala pojavljuje toplinska elektromotorna sila. U ovom slučaju vrijednost temperature dobiva se iz izmjerene toplinske elektromotorne sile [15].



Slika 5.3. Termopar spojen na multimetar koji pokazuje temperaturu u °C [19]

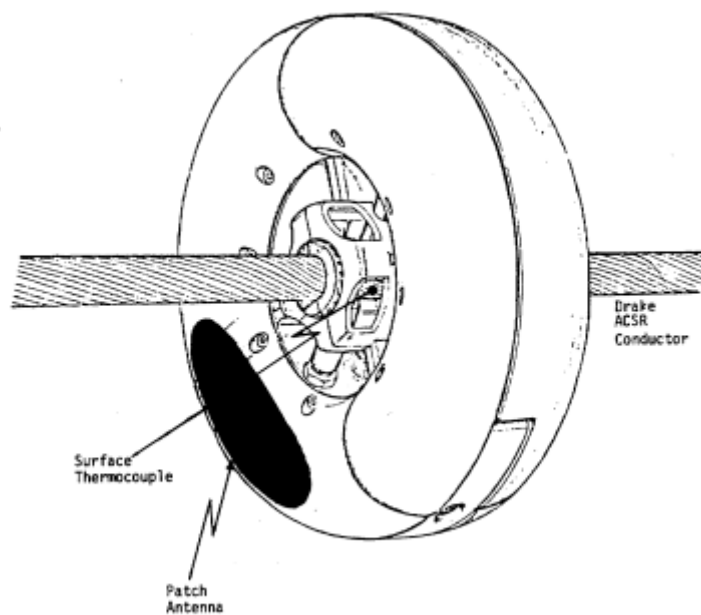
Glavne prednosti temperaturnih senzora su:

- Široka dostupnost dokazanih temperaturnih senzora.
- Uređaj je pričvršćen na vodič, stoga postoji ograničena pogreška u pogledu mjerenja temperature.
- Izravno mjerenje temperature vodiča prikladno za ograničenje gubitka čvrstoće vodiča pri visokim temperaturama [15].

Glavne mane temperaturnih senzora su:

- Mjerenje u jednoj točki nije pravi prikaz temperature vodiča u drugim točkama na liniji. Ako su potrebne varijacije temperature vodiča duž voda, od presudne je važnosti odrediti dovoljan broj i položaj senzora. U tu svrhu, preporučljivo je napraviti neka istraživanja o promjenama parametara okoliša i vremena voda (jer se, općenito, temperatura vodiča mijenja u istom dijelu od raspona do raspona ovisno o lokalnoj vegetaciji, orijentaciji prema vjetrovima itd.).
- Izmjerena temperatura predstavlja temperaturu površine vodiča. Dakle, radijalna promjena temperature vodiča nije uzeta u obzir. Međutim, temperatura jezgre je funkcija temperature površine vodiča i toplinskog unosa (Joule i solarno grijanje) i može se odrediti prema pojednostavljenoj formuli ako se mjeri struja voda i sunčevo zračenje. Štoviše, u nekim slučajevima, pretpostavlja se sunčevo zračenje što dovodi do pogreške u procjeni temperature jezgre.
- Nuspojave izravnog ili bliskog kontakta senzora temperature s vodičem pod naponom mogu biti mehaničke (abrazije, vibracije, lomovi), kemijske (oksidacije, galvanska djelovanja), dielektrične i elektromagnetske (vrtložne struje) i toplinske (samozagrijavanje). Međutim, svi ovi problemi mogu se riješiti pravilnim dizajnom i ugradnjom senzora.
- Instalacija senzora može zahtijevati prekid rada voda (ako rad pod naponom nije dopušten), a senzori zahtijevaju periodično održavanje.
- Visoki troškovi održavanja i nabave, iako na ovu činjenicu utječe broj korištenih senzora temperature [15].

Postoje mnogi sustavi za komercijalno praćenje temperature vodiča u stvarnom vremenu na temelju senzora temperature. Jedan od prvih komercijalnih sustava je Power Donut (Usi). Senzor se sam napaja pomoću magnetskog polja zahvaljujući struji u strujnom vodiču i internoj litijskoj bateriji. Nazivna niska struja za rad je 60 A, a radi na baterije približno 10 sati. Kada je mrežna struja iznad 120 A, baterija se ponovno puni. Može mjeriti temperaturu vodiča od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ s točnošću od $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ i rezolucijom od $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ [15]. Svrha ovog sustava je praćenje temperature površine vodiča, struje vodiča i temperature okolnog zraka. Podaci se prenose na daljinu putem GSM/GPRS tehnologije. Senzorski modul prototipa sadrži tri istosmjerna analogna toplinska senzora i jednu izmjeničnu analognu Rogovskijevu zavojnicu za mjerenje struje vodiča. Tri senzora uključuju dva senzora temperature površine vodiča koji su međusobno udaljeni približno 180° i temperaturni senzor za mjerenje temperature zraka [20].



Slika 5.4. Laboratorijski prototip modula senzora temperature vodiča [20]

Sličan sustav praćenja koji koristi Power Donut naziva se SMT (Arteche) [21]. U ovom slučaju, minimalna niska mrežna struja za rad je 100 A, a temperaturni raspon je od $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $250\text{ }^{\circ}\text{C}$. Osim temperature vodiča, mjeri samo mrežnu struju. Kao i u slučaju Power Donut-a, podaci se prenose na daljinu putem GSM/GPRS tehnologije.



Slika 5.5. SMT sustav [22]

Još jedan sustav je Emo sustav (micca) [22] koji koristi tri temperaturna senzora i referentni senzor. Raspon temperature je od $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $210\text{ }^{\circ}\text{C}$ s točnošću od $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Senzor se napaja samostalno pomoću baterije. U ovom slučaju podaci se prenose na daljinu putem TCP/IP tehnologije.



Slika 5.6. Emo sustav [22]

Proturin senzor dalekovoda mjeri temperaturu vodiča, temperaturu okoline i udaljenost od zemlje, a za komunikaciju koristi GPRS komunikacijsku tehnologiju (slika 5.7.). Opremljen je strujnim transformatorom i koristi magnetsko polje vodiča za napajanje kad god je struja u vodiču iznad 50A [22].



Slika 5.7. Proturin sustav [22]

Još jedna mogućnost je praćenje temperature uređajima koji se temelje na površinskim akustičnim valovima (eng. surface acoustic wave - SAW). Njemačka su sveučilišta razvila ovaj sustav. Sustav se sastoji od radara koji šalje i prima visokofrekventne elektromagnetske valove i pasivnog SAW senzora ugrađenog na vodič (slika 5.8.). SAW pasivni senzor je piezoelektrični kristal koji reagira krećući se s elektromagnetskim valom koji šalje radar. U kristalu neki elementi pretvaraju kretanje u elektromagnetske valove koje prima radar. Moguće je odrediti položaj elemenata. Položaj je funkcija istezanja povezanog s temperaturnom vrijednošću. Osim toga, brzina valova u kristalu ovisi o vrijednosti temperature. Ovim sustavom može se postići temperatura do 150 °C s nesigurnošću od 0,5 °C [22].



Slika 5.8. SAW sustav [22]

Treba naglasiti da različiti sustavi imaju različite temperaturne raspone, točnost mjerenja temperature, dimenzije senzora, nisku mrežnu struju za rad (za samoopskrbu), vrstu daljinskog prijenosa podataka i električne ili neelektrične parametre voda koji se mjere bez obzira na temperaturu vodiča. Sve ove parametre treba uzeti u obzir pri odabiru sustava za korištenje.

5.1.2. Izravno praćenje temperature vodiča infracrvenim kamerama

Razmatra se mogućnost korištenja infracrvenih kamera za nadzor temperature vodiča nadzemnih vodova. Ova tehnologija omogućuje praćenje temperature površine vodiča u malo većem polju u odnosu na kontaktne senzore temperature. Infracrvene kamere naširoko se koriste u postupcima održavanja za utvrđivanje loših veza i kvarova opreme na vodu. Iako primjena u nadzoru temperature vodiča nije dovoljno istražena i ne postoji potpuno razvijen sustav u stvarnom vremenu temeljen na ovoj metodi, neki sustavi u stvarnom vremenu za detekciju loših spojeva vodova se ipak istražuju [23, 24]. Infracrvene kamere detektiraju zračenu infracrvenu energiju i stvaraju sliku prostorne raspodjele temperature. Preslikavanjem boja na slici u odgovarajući temperaturni raspon, moguće je dobiti temperaturne vrijednosti na različitim mjestima na slici. Najvažniji parametri koji utječu na točnost mjerenja infracrvenim kamerama su [22]:

- 1) Određivanje koeficijenta emisije: prilikom mjerenja infracrvenom kamerom, neispravna postavka vrijednosti koeficijenta emisivnosti uzrokuje da se vrijednosti temperature prikazane infracrvenom kamerom razlikuju od stvarnih vrijednosti. Ova činjenica je osobito istinita ako koeficijent emisivnosti objekta ima nisku vrijednost. Ovaj se koeficijent također može dobiti s infracrvenom kamerom ako se drugi temperaturni senzor koristi kao referenca.
- 2) Reflektirana temperatura okoline: ovaj parametar kompenzira ambijentalne emisije koje utječu na objekt i reflektiraju se od njega do infracrvene kamere, kao i ambijentalne emisije između objekta i infracrvene kamere. Prilikom infracrvenog snimanja na otvorenom, ovaj parametar mora biti postavljen na tzv. temperaturu neba.
- 3) Udaljenost između objekta i infracrvene kamere: ovaj parametar je važan jer kompenzira atmosfersku apsorpciju emisija objekta.
- 4) Relativna vlažnost zraka: ovaj parametar kompenzira smanjenu propusnost atmosfere zbog povećane vlažnosti zraka.

Kod nadzora nadzemnih vodova posebnu pozornost pri odabiru kamere treba obratiti na koeficijent udaljenosti kamere (omjer udaljenosti i promjera mjerenog objekta) jer je mjereni objekt malen i udaljenost mjerenja ne može biti preblizu zbog ograničenja instalacije. Štoviše, refleksije u međuprostorima između kružnih žica vodiča nadzemnog voda ovise o korištenom kutu, što utječe na točnost mjerenja, iako su površine nadzemnih vodova gotovo 100 % reflektirajuće [22]. Osnovna prednost infracrvenih kamera u odnosu na kontaktne temperature senzore je u tome što se kamere mogu postaviti u blizini vodova, npr. na konstrukciji stupa. Ova činjenica također smanjuje troškove instalacije sustava. Osnovni problem ove tehnologije nije samo u tome što je potreban dodatni algoritam za analizu infracrvene slike za određivanje temperature vodiča (zanemarujući ostatak slike) već i to što je teško postići ispravne postavke parametara kamere za sve radne uvjete. Štoviše, utjecaj meteoroloških uvjeta (osobito sunca), refleksije, prisutnost prepreka, položaj kamere i vrijeme potrebno za obradu slike utječu na točnost i brzinu rekonstruirane temperature. Stoga je praćenje temperature vodiča u stvarnom vremenu ovom metodologijom teško moguće i infracrvene kamere se obično koriste samo u prisutnosti radnika koji detektiraju temperaturu vodiča.

5.1.3. Izravno praćenje temperature vodiča optičkim vlaknima

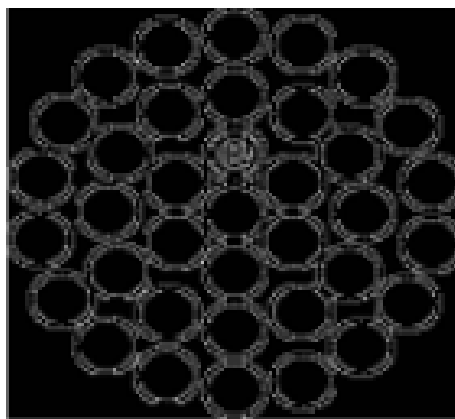
Ova metoda praćenja temperature vodiča omogućuje uzdužno mjerenje temperature vodiča na udaljenostima većim od 20 km i s rezolucijom mjerenja od obično 2 m (ovisno o usvojenom fizičkom principu). Posljedično, ova metoda uzima u obzir aksijalnu distribuciju temperature vodiča. S druge strane, kako su optička vlakna smještena u cijevi smještenoj u blizini čelične jezgre, izmjerena temperatura u biti predstavlja temperaturu jezgre. Za razliku od temperaturnih senzora i infracrvenih kamera koje mjere površinsku temperaturu, ova metoda omogućuje mjerenje radijalnog povećanja temperature jezgre. Ovo mjerenje je korisno u dinamičkoj ocjeni voda i izračunima provjesa [15].

U [25] provedeno je praktično terensko istraživanje uzdužnog i točkastog mjerenja temperature vodiča. Pokazalo se da temperaturni senzori postavljeni u područjima sa slabim vjetrom (zaklonjenim dolinama) detektiraju temperaturu za 6 - 10 °C u usporedbi s longitudinalnim mjerenjima. Stoga, u nekim primjenama (poput određivanja vrućih točaka), longitudinalno praćenje temperature vodiča možda nije najbolje rješenje.

Fizikalni principi na kojima se temelje uzdužna mjerenja temperature optičkim vlaknima su: Ramanovo raspršenje, Brillouinovo raspršenje i Rayleighovo raspršenje. Brillouinovo raspršenje daje najbolji raspon duljina, s najvećom osjetljivošću na temperaturu i relativno dobrim vremenom mjerenja i prostornom rezolucijom. Ova vrsta raspršivanja prikladna je za duge dalekovode. U izvedbama za praćenje temperature nadzemnih vodova koriste se Ramanovo i Brillouinovo raspršenje [26]. Obično se Ramanovo raspršenje koristi u reflektometriji optičke vremenske domene (eng. optical time domain reflectometry - OTDR) [27] i reflektometriji optičke frekvencijske domene (eng. optical frequency domain reflectometry - OFDR) [28], dok se Brillouinovo raspršenje koristi samo u OTDR-u [29].

Kod Ramanovog raspršenja optička vlakna izrađena su od dopiranog kvarcnog stakla, koje je oblika silicij II oksida (SiO_2). Sa svojom čvrstom amorfnom strukturom, svojstvo SiO_2 dopušta fluktuacije u kristalnim molekulama pod utjecajem topline. Kada svjetlost padne na toplinski inducirane oscilirajuće molekule, čestice svjetlosti (fotoni) u interakciji s molekulama rezultiraju raspršenjem svjetlosti, koje je poznato kao Ramanovo raspršenje. Povratno raspršenje svjetlosti koje nastaje zbog ovog procesa ima tri spektralne komponente. Jedna komponenta je Rayleighovo raspršenje s frekvencijom izvora svjetlosti (lasera), a druga i treća komponenta su Stokesova i anti-Stokesova komponenta s valnom duljinom većom i manjom od fotona koji su generirali efekt. Intenzitet anti-Stokesove komponente ovisi o temperaturi dok Stokesova komponenta ne ovisi o temperaturi. Na temelju odnosa Stokesovog i anti-Stokesovog intenziteta može se odrediti lokalna temperatura. Mjesto izmjerene temperature određuje se iz vremena povratka svjetlosti, slično kao i u slučaju radara ili sonara.

Brillouinovo raspršenje odnosi se na raspršenje svjetlosnog vala na akustičkom valu zbog neelastične interakcije s akustičnim fonosom medija i proizvodi Stokesove i anti-Stokesove svjetlosne komponente. Brillouinov pomak frekvencije varira linearno s deformacijom i temperaturom. Stoga se Brillouinovo raspršenje može koristiti za longitudinalno mjerenje deformacije ili temperature, ali ne za oboje istovremeno [30]. Optička vlakna su smještena u fazni vodič u cjevčici koja je smještena u jezgri [22].



Slika 5.9. Konstrukcija jedne faze vodiča [22]

Longitudinalni sustav mjerenja temperature sastoji se od spomenutih optičkih vlakana kao senzora i regulatora. U OTDR-u kontroler se sastoji od laserskog izvora, generatora impulsa za OTDR ili generatora koda za korelaciju koda ili modulatora, optičkog modula, prijemnika i mikroprocesorske jedinice. U OFDR-u kontroler se sastoji od laserskog izvora, visokofrekventnog miksera, optičkog modula, prijemnika i mikroprocesorske jedinice [28]. Pristup uzdužnog praćenja temperature vodiča pomoću optičkih vlakana ima visoku klasu točnosti od obično $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ili manje i uzima u obzir učinkovitost aksijalne promjene temperature. Senzori su otporni na udarce/vibracije i elektromagnetske smetnje. Štoviše, mjeri se temperatura jezgre, a distribuirani sustav senzora temperature eliminira potrebu za zasebnim komunikacijskim sustavom. Uzevši navedeno u obzir ova metoda se čini vrlo prihvatljivim rješenjem za praćenje temperature vodiča nadzemnih dalekovoda. Međutim, do sada ova tehnologija nije našla široku praktičnu primjenu. To je zbog nužnosti ugradnje optičkih vlakana u strujne vodiče i izuzetno visoke cijene sustava [15].

Postoji široki spektar sustava praćenja u stvarnom vremenu temeljenih na uporabi optičkih vlakana. Jedan od njih je VALCAP (nkt kabeli) [31]. Ovaj sustav se temelji na Ramanovom raspršenju u OFDR-u. Ima prostornu rezoluciju od 1 m, temperaturnu točnost od 1°C i omogućuje praćenje temperature vodiča na udaljenosti do 200 km. Temperatura se prati unutar jedinice za procjenu (gdje se nalazi regulator). Iz jedinice za procjenu podaci se mogu prenositi različitim metodama (GPRS, LAN veza, visokofrekventna komunikacija, serijski priključak, itd.). Dakle, mnogo opcija za daljinski i lokalni prikaz podataka.

Još jedan primjer sustava su senzori naprežanja i temperature distribuirani optičkim vlaknima (Oz optika) [32]. Ovaj sustav se temelji na Brillouinovom raspršenju u OTDR-u. Ima prostornu rezoluciju od 1 m (za instalaciju vlakana od 20 km), temperaturnu točnost od $0,3^{\circ}\text{C}$ i omogućuje

praćenje temperature vodiča na udaljenostima do 100 km. Podaci se mogu prenositi putem LAN mreže ili USB priključka.

5.1.4. Izravno praćenje temperature vodiča na temelju mjerenja napreznja

Sustav mjerenja napreznja mjeri prosječnu aksijalnu temperaturu vodiča unutar jedne dionice voda. Izmjerena temperatura je približno proporcionalna prosječnoj temperaturi poprečnog presjeka vodiča, a u slučaju visoko temperaturnog rada vodiča s čeličnom jezgrom jednaka je temperaturi materijala jezgre [33]. Terenske studije [34, 35, 36] s različitom mjernom opremom pokazale su da lokalna temperatura u određenom dijelu voda može biti 10-25% viša od aksijalnog prosjeka. Stoga ova metoda možda nije prikladna za mjerenja vrućih točaka i sprječavanje žarenja vodiča. Terenska studija provedena u [26] pokazala je male razlike u praktično izmjerenoj prosječnoj aksijalnoj temperaturi vodiča unutar zateznog polja dobivenoj ovom metodom i mjerenjima optičkim vlaknima. Ipak neke druge studije su pokazale da 90% mjerenja ima razliku od -3 °C do 7 °C što se smanjuje pri većim vrijednostima brzine vjetra.

U ovoj metodi temperatura vodiča izračunava se iz izmjerenog napreznja. Napreznje se mjeri mjernim ćelijama koje su montirane na odabrane dead-end konstrukcije duž dalekovoda. Kada se dvije mjerne ćelije koriste u dead-end konstrukciji, mogu se pratiti napreznje i temperatura vodiča oba dijela voda (u dva smjera). Mjerne ćelije koje se koriste u izvedbama za praćenje temperature vodiča rade na principu napreznja koje nastaje kada se materijal unutar mjerne ćelije rasteže i uzrokuje promjenu njegovog otpora. Na taj način, mjerenjem otpora materijala, moguće je izmjeriti napon djelovanja. Kao i u slučaju kontaktnih senzora temperature otpor se mjeri kao omjer napona i struje. Stoga ovi pretvarači zahtijevaju određenu snagu osiguranu iz baterije ili nekog drugog izvora [15].



Slika 5.10. Mjerenje naprezanja – mjerne ćelije postavljene na dead-end strukturama [11]

Kako bi se osigurao ispravan nadzor vodiča dalekovoda, mjerne ćelije trebaju biti postavljene u svaku dionicu voda. Međutim, budući da je praćenje svake dionice voda nepraktično i vrlo skupo, važno je nadzirati dovoljan broj dionica vodova, ovisno o primjeni. Za izvedbe s ocjenom voda, opća je preporuka nadzirati kritične dijelove jer dio s najnižom ocjenom određuje ocjenu cijelog voda. Osnovni kriterij za odabir kritičnih dionica vodova temelji se na onim dionicama koje su najviše ispunjene drvećem ili mjestima gdje teren „prisiljava“ vjetar da puše paralelno na vodič. Štoviše, treba uzeti u obzir i kritične dionice vodova s aspekta kršenja razmaka. [11, 33, 37].

Nakon dobivanja vrijednosti naprezanja, temperatura vodiča može se odrediti korištenjem jednadžbe promjene stanja vodiča za dionicu voda izražene na sljedeći način :

$$\frac{\bar{\sigma}_2}{E} - \frac{(g \cdot L_{id})^2}{24 \cdot \bar{\sigma}_2^2} + \alpha \cdot (T_{c2} - T_{c1}) + \Delta\varepsilon = \frac{\bar{\sigma}_1}{E} - \frac{(g \cdot L_{id})^2}{24 \cdot \bar{\sigma}_1^2} \quad (5.1)$$

Gdje je:

E – Youngov modul [N/mm²]

$\bar{\sigma}_1$ – ekvivalent naprezanja u stanju 1 [N/mm²]

$\bar{\sigma}_2$ – ekvivalent naprezanja u stanju 2 [N/mm²]

g – smanjena težina vodiča [N/mm² · m]

L_{id} – duljina idealnog raspona [m]

α – koeficijent linearnog rastezanja vodiča [°C⁻¹]

T_{c1} – temperatura vodiča u stanju 1 [°C]

T_{c2} – temperatura vodiča u stanju 2 [°C]

$\Delta\varepsilon$ – elastično rastezanje

Idealni raspon i ekvivalent naprezanja u stanju 2 mijenjaju se u slučaju ako je teren ravan ili neravan prema slijedećim izrazima:

Ravan teren:

$$L_{id} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n a_i^3}{\sum_{i=1}^n a_i^2}} \quad (5.2)$$

$$\bar{\sigma}_2 = \sigma_2 \quad (5.3)$$

Gdje je:

a_i – i-ta duljina raspon [m]

σ_2 – naprezanje u stanju 2 [N/mm²]

Neravan teren:

$$L_{id} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n a_i^3}{\sum_{i=1}^n a_i^2}} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n \frac{a_i'^3}{a_i^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{a_i'^2}{a_i}} \quad (5.4)$$

$$\bar{\sigma}_2 = \sigma_2 \cdot \frac{\sum_{i=1}^n \frac{a_i'^3}{a_i^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{a_i'^2}{a_i}} \quad (5.5)$$

Gdje je:

a_i' - i-ta udaljenost između točaka ovjesa [m]

Ovisnost naprezanja koje je izmjereno mjernom ćelijom i naprezanja u stanju 2 izražava se jednadžbom (5.6.):

$$F = \sqrt{F_h^2 + F_v^2} \approx \sigma_2 \cdot A + \frac{g^2 \cdot L_{id}^2 \cdot A}{8 \cdot \sigma_2} \quad (5.6)$$

Gdje je:

F – sila naprezanja na krajnjem osloncu [N]

F_h – horizontalna komponenta naprezanja na krajnjem osloncu [N]

F_v – vertikalna komponenta naprezanja na krajnjem osloncu [N]

A – presjek vodiča [m²]

U jednadžbi (5.1) temperatura vodiča u stanju 1 kao ekvivalentno naprezanje u stanju 1 poznati su parametri. Na temelju mjerenja sile naprezanja (F) moguće je odrediti naprezanje u stanju 2 (σ_2) rješavanjem kvadratne jednadžbe (5.6). Zatim se ekvivalentno naprezanje u stanju 2 izračunava pomoću jednadžbe (5.3) ili jednadžbe (5.5). Konačno, s ovim vrijednostima, iterativnim rješavanjem jednadžbe (5.1) prikladnom matematičkom metodom (poput Newton-Raphsonove metode) može se dobiti temperatura vodiča u stanju 2 (T_{c2}). Ova temperatura predstavlja temperaturu vodiča izmjerenu ovim sustavom.

Jednadžba stanja vodiča pretpostavlja da postoji savršeno izjednačavanje naprezanja na osloncima unutar odsječka voda i konstantna temperatura za sve raspone unutar odsječka voda. Međutim, temperatura vodiča varira duž raspona u zateznom polju, a dolazi do pomicanja dead-end oslonaca i nesavršenog izjednačavanja naprezanja zbog neravnog terena, izolatora stupova ili kratkih izolatora ovjesa. Zbog pojedinih parametara, poput puzanja ili težine g koja predstavlja samo težinu vodiča bez utjecaja leda ili jakog vjetra, jednadžba (5.1) nije pogodna za izračun temperature vodiča [15].

Alternativa korištenju jednadžbe (5.1.) je postaviti funkciju kalibracije. Kalibracijska funkcija predstavlja odnos između naprezanja i temperature vodiča. Kalibracijske funkcije se izračunavaju na temelju praktičnih mjerenja u promatranom dijelu voda. Prilikom postavljanja funkcije kalibracije, temperatura vodiča mora se izmjeriti drugom metodom. Vrijedno je naglasiti da se metode kalibracije razlikuju ovisno o korištenoj opremi. Proizvođači opreme za praćenje napetosti trebali bi osigurati upute o postupcima kalibracije, njihovoj točnosti i rezultirajućim

nesigurnostima. Štoviše, proizvođači bi trebali dati upute o periodičnim kalibracijama zbog promjena na vodu. Kako bi se postavila točna funkcija kalibracije, potrebno je provesti najveći mogući broj praktičnih mjerenja u različitim vremenskim uvjetima i uvjetima linije. Nakon dobivanja praktičnih mjerenja, kalibracijska funkcija se definira primjenom metoda prilagođavanja krivulje kao što je na primjer metoda najmanjih kvadrata. Generalni oblik kalibracijske funkcije prikazan je jednadžbom (5.7):

$$T_c = a + b \cdot F + c \cdot F^2 + d \cdot F^3 + e \cdot F^4 \quad (5.7)$$

Gdje su:

a, b, c, d, e – konstante kalibracijske funkcije.

Za postavljanje jednadžbe (5.7.) potrebno je minimalno pet mjerenja napreznja i temperature vodiča. Točnost koja se može postići ovom metodom je oko 1 °C s rezolucijom od 0,1 °C. Sustav praćenja temperature vodiča temeljen na mjerenju napreznja sastoji se od napajanja (obično solarnih panela i baterija), mjernih ćelija i zapisivača podataka prikupljenih mjerenjem i komunikacijskih uređaja [38, 39]. Također, neki sustavi za proces kalibracije sadrže senzore neto radijacije (eng. neto radiation sensors – NRS). Ovi senzori mjere temperaturu vodiča kada ne prolazi električna struja [15].

Glavne prednosti ove metode praćenja temperature vodiča nadzemnih vodova su:

- Izmjerena temperatura vodiča je prosječna temperatura svih raspona između dva zatezna tornja uz uračunati radijalni prirast.
- Visoka točnost za upotrebu u odsječku voda s višestrukim rasponima ovjesa koji imaju gotovo isto napreznje i duljinu.
- Za razliku od temperature vodiča, napreznje se mjeri izravno. Jednostavni izračuni iz mjerenja napreznja omogućuju određivanje provjesa i razmaka.

Glavni nedostaci opisane metode su:

- Senzori se ne napajaju sami.
- Postavljanje mjernih ćelija zahtijeva prekid rada voda.

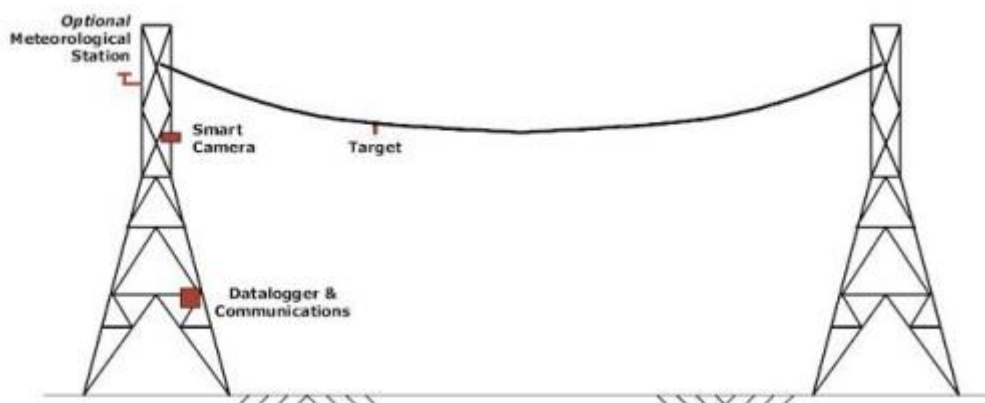
- Postavljanje funkcija kalibracije koje točno aproksimiraju sve radne uvjete je složeno i stoga može biti potrebno ponovno kalibriranje.
- Različite duljine raspona u dijelu naprezanja, masa mjerne ćelije, vremenski uvjeti, puzanje i pomaci izolatora i konstrukcija tornja utječu na točnost izmjerene temperature vodiča.
- Visoki troškovi kupnje, održavanja i instalacije. Na to utječe broj korištenih mjernih ćelija [15].

Komercijalni sustav praćenja naprezanja je CAT-1 (Nexas). Ovaj sustav je dizajniran za automatsko uspostavljanje odnosa između naprezanja i temperature vodiča. Za postupak kalibracije vrijednost temperature vodiča ne mjeri se izravno već se procjenjuje iz temperature izmjerene u NRS. Sustav je dizajniran za daljinski prijenos podataka putem GPRS-a [15].

5.1.5. Izravno praćenje temperature vodiča nadzemnog voda na temelju mjerenja provjesa

Ova metoda je ista kao i metoda izravnog praćenja temperature vodiča nadzemnog voda na temelju mjerenja naprezanja, ali u ovom slučaju potreban je dodatan model koji prikazuje odnos provjesa i naprezanja kako bi se odredila temperatura vodiča. U ovom slučaju temperatura vodiča određena je praćenjem provjesa. Postoji nekoliko različitih principa za mjerenje provjesa. Sve metode za mjerenje provjesa trebaju imati minimalnu rezoluciju koja je ekvivalentna promjeni provjesa uzrokovanoj promjenom temperature vodiča od 1 °C. Osnovni princip mjerenja provjesa vodiča je korištenje kamere, lasera, radara, tehnologije diferencijalnog sustava globalnog pozicioniranja (eng. differential global positioning system technology – DGPS) i senzora vibracija.

Prva metoda za mjerenje provjesa je video kamera montirana na stup voda. Za mjerenje provjesa na vodič se pričvrsti oznaka i kamera se kalibrira. Kamera ima sliku mete pohranjenu u memoriji koja se zatim uspoređuje sa slikom u stvarnom vremenu. Stvarni provjes određuje se brojanjem razlike u pikselima trenutne slike i one pohranjene u memoriji. Osim provjesa, algoritam također određuje udaljenost vodiča od tla. Prednost ove tehnologije je što se kamera montira na stup, a ne na vodič (kao kod mjernih ćelija). Međutim, ako rad pod naponom nije dopušten, postavljanje mete zahtijeva prekid rada voda. Tipična rezolucija mjerenja provjesa je 0,6 cm [15].

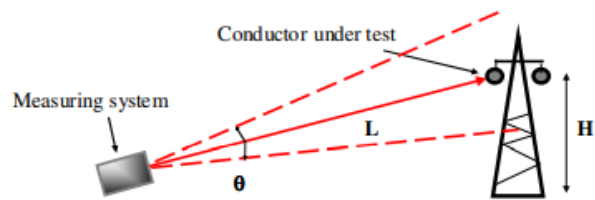


Slika 5.11. Shematski prikaz praćenja provjesa sustavom kamere i mete [11]

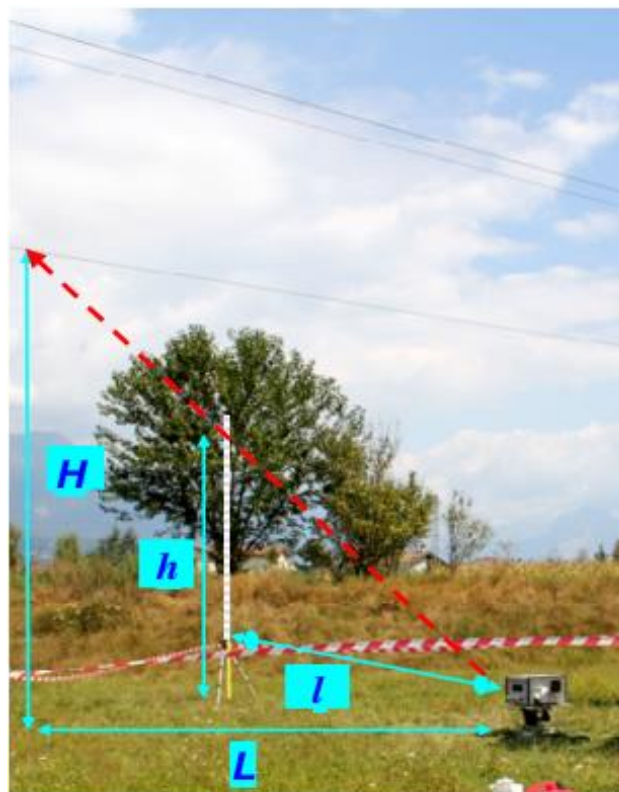


Slika 5.12. Prikaz kamere (lijevo) i mete na vodu (desno) [11]

Laserska tehnologija može biti jednako uspješna za mjerenje provjesa vodiča. Laser je postavljen na tlo otprilike 20 m od voda. U tim sustavima, ispravno usmjerena skenirajuća zraka „odbija“ se od promatranog vodiča i kao raspršeni signal ulazi u skener. Provjes se određuje iz relativnog vremenskog položaja povratno raspršenog signala u odnosu na pogonski signal skenera. Laboratorijska ispitivanja pokazuju da je točnost mjerenja oko 6 mm. Također, specijalni laseri imaju točnost u submilimetarskom području. Međutim, budući da se između lasera i voda mogu pojaviti neke prepreke (poput životinja) te je riječ o skupoj tehnologiji (mogućnost krađe), ova vrsta mjerenja nije prikladna bez prisutnosti osoblja. Slika 5.12. prikazuje princip mjerenja provjesa vodiča gdje je sustav mjerenja (eng. measuring system) usmjeren prema promatranom vodiču (eng. conductor under test).



Slika 5.12. Shematski prikaz laserske tehnologije za mjerenje provjesa vodiča. [40]



Slika 5.13. Stvarni prikaz mjerenja provjesa vodiča pomoću laserske tehnologije [40]

DGPS metoda je izravna metoda koja mjeri provjes vodiča iz informacija o nadmorskoj visini dobivenih pomoću uređaja za globalni sustav pozicioniranja (GPS). Kod ove metode, GPS uređaj s komunikacijskim modulom montira se na vodič na sredini raspona. Korištenje DGPS-a uvelike kompenzira pogreške uobičajene za sve lokalne GPS prijarnike. Sljedeće značajke objašnjavaju korištenje DGPS-a: precizno označavanje vremena nanosekundnog reda, točnost, kompaktnost, prenosivost, niska cijena i rad u svim vremenskim uvjetima bilo gdje na Zemlji. Terenska studija [41] pokazala je da metoda ima točnost od približno 2,54 cm za mjerenje provjesa.



Slika 5.14. Prikaz DGPS metode mjerenja provjesa [41]

Komercijalni sustav praćenja temperature vodiča u stvarnom vremenu temeljen na mjerenju provjesa je Span Sentry (EDM). Ovaj sustav se sastoji od video kamere, napajanja (solarni paneli i baterije) i sustava za pohranu podataka. Točnost mjerenja provjesa je 15 mm. Daljinski prenosi podatke putem GSM IP mreže, lokalnog radija ili optičkih konfiguracija [15].



Slika 5.15. Video kamera iz sustava Span Sentry (EDM)

Još jedno rješenje za praćenje provjesa vodiča je uporaba senzora vibracija. Ovi senzori pričvršćeni izravno na strujne vodiče mogu procijeniti provjes raspona u stvarnom vremenu bez ikakvih dodatnih podataka. Nakon što su izmjerene osnovne frekvencije vibracija, provjes se računa jednadžbom (5.8):

$$f_x = \frac{g_r}{32 \cdot f_0^2} \quad (5.8)$$

Gdje je:

f_x – provjes u promatranom rasponu [m]

g_r – gravitacijsko ubrzanje [m/s²]

F_0 – osnovna frekvencija vibracije vodiča [s⁻¹]

Svi vanjski uvjeti (puzanje, pokreti ovjesa, snijeg/led itd.) utječu na osnovnu frekvenciju, a time i na izmjereni provjes. Štoviše, senzori se mogu postaviti na bilo kojoj točki raspona jer vibracije putuju duž cijelog vodiča. Preciznost ovog sustava je 0,6% za procjenu pro vjesa bilo koje veličine. Terensko istraživanje [42] pokazalo je maksimalnu pogrešku od 20 cm za izmjereni provjes u rasponu od 0 do 25 m.

Na slici 5.15. prikazan je pametni senzor Ampacimon koji je postavljen na 400 kV vod. Ovaj sustav koristi samonapajajući senzor vibracija koji prenosi podatke putem GSM tehnologije. Ovaj uređaj također mjeri struju i brzinu vjetra. Brzina vjetra određena je na mjestu postavljanja iz analize frekvencije vibracija vodiča. Ova dodatna mjerenja korisna su u izvedbama za ocjenjivanje vodova.



Slika 5.16. Senzor Ampacimon postavljen na 400 kV vod [42]

Praćenje temperature vodiča na temelju mjerenja provjesa u principu ima sve prednosti kao i metoda praćenja naprezanja, ali uz niže troškove instalacije. Međutim, u ovom slučaju se mjeri provjes, a naprezanje kao i udaljenost od tla mogu se izračunati neizravno. Nedostaci sustava ovise o metodi usvojenoj za mjerenje provjesa. Iako se u svim metodama unosi pogreška zbog različitih duljina raspona u presjeku naprezanja, vremenskih uvjeta, puzanja i pomaka izolatora i konstrukcija tornja, problem postavljanja funkcije kalibracije je ipak prisutan [15].

5.1.6. Izravno praćenje temperature vodiča na temelju fazorskih mjernih jedinica

Temperatura vodiča može se pratiti izravno instaliranjem fazorskih mjernih jedinica (eng. phasor measurement units - PMU). Ovom se metodom određuje prosječna temperatura vodiča duž cijelog dalekovoda. Međutim, budući da je električni otpor ovisan o prosječnoj temperaturi vodiča, u smislu radijalnog aspekta, određena je nešto niža temperatura od temperature jezgre. Poput mjerenja provjesa i naprezanja, ova metoda možda nije prikladna za određivanje vrućih točaka.

Točnost ove metode također uvelike ovisi o točnosti odabranih naponskih i strujnih transformatora koji se koriste za mjerenja fazora. Pogreška naponskog transformatora je približno konstantna, dok za male struje voda strujni transformatori unose značajnu pogrešku u izmjereni otpor, a time i u procjenu temperature. Alternativno, sustav se može kalibrirati da kompenzira te probleme.

Uz sve nesigurnosti u mjerenju temperature vodiča pomoću PMU-a, ovo je jedina tehnika koja mjeri prosječnu temperaturu cijelog voda. Štoviše, praćenje se provodi u stvarnom vremenu s vremenskom rezolucijom od 1 s. Međutim, ukupni troškovi primjene PMU-a i njihove integracije u postojeće sustave vrlo su visoki. Stoga ova metoda ima ograničenu praktičnu primjenu [15].

6. IMPLEMENTACIJA DINAMIČKOG MONITORINGA U SVRHU POVEĆANJA PRIJENOSNE MOĆI DALEKOVODA NA PRIMJERU SLOVENIJE

U ovom poglavlju obrađeni su primjeri implementacije dinamičkog monitoringa u svrhu povećanja prijenosne moći postojećih nadzemnih dalekovoda na primjeru Slovenije. Objasnit će se strategija kojom Slovenija nastoji poboljšati i povećati prijenosni kapacitet dalekovoda, koja tehnološka rješenja koriste ili planiraju koristiti, rezultati provedenih istraživanja te prednosti i mane projekta.

6.1. Dinamički monitoring slovenske prijenosne mreže ELES

Implementacija novih tehnoloških rješenja sustavnim pristupom postaje uobičajena praksa za visokokvalificirane inženjere slovenskog operatora prijenosne mreže ELES. Relativno novi pristup korištenja novih tehnologija je korištenje modernih tehnika praćenja dinamičke toplinske ocjene (DTR) nadzemnih vodova što je jedno od rješenja za buduću pametnu prijenosnu mrežu. Povećanje kapaciteta postojećeg dalekovoda bez povećanja rizika od kvara opreme ili sustava zbog većeg opterećenja moguće je provesti samo ako se može mjeriti temperatura dalekovoda i uvjeti okoline (temperatura okoline, brzina i smjer vjetera te sunčevo zračenje) koji izravno utječu na provjes. Ako uzmemo u obzir da dalekovodi rade u dereguliranom okruženju, tada je pouzdanost i snaga dalekovoda najvažniji cilj svih elektroprivreda. Postojeći sustavi za nadzor temperature (točkasti ili uzdužni) sada se nadograđuju sustavom koji omogućuje postavljanje ograničenja rada mreže.

Zbog problema deregulacije elektroenergetskog sustava gdje dolazi do protoka električne energije preko granica te zbog sve većeg zahtjeva za električnom energijom, nametnulo se pitanje koliko dugo će prijenosna mreža moći izdržati takvo stanje. Rješenje jačanja mreže je unaprijediti trenutne prijenosne trase te izgradnja novih DV-a. Zbog narušavanja ekološkog stanja i izgleda krajolika pojedini gradovi i mjesta su protiv postavljanja dalekovoda. U Sloveniji su neki projekti bili zaustavljeni točnije rekonstrukcija starih 110 kV dalekovoda. Izgradnja novih 110 kV i 400 kV dalekovoda odužuje se zbog procesa dobivanja građevinskih dozvola što je dovelo do toga da

pojedine postojeće elektrane i elektrane koje su u fazi izgradnje ELES nije bio u mogućnosti priključiti na prijenosnu mrežu. Problem se produbljuje kada dođe do prirodnih nepogoda ili ako elementi mreže ispadnu iz rada te ako nije moguća održivost faktora sigurnosti. Sve su to razlozi koji su doveli do toga da se maksimalno iskoristi postojeća infrastruktura nadzemnih dalekovoda.

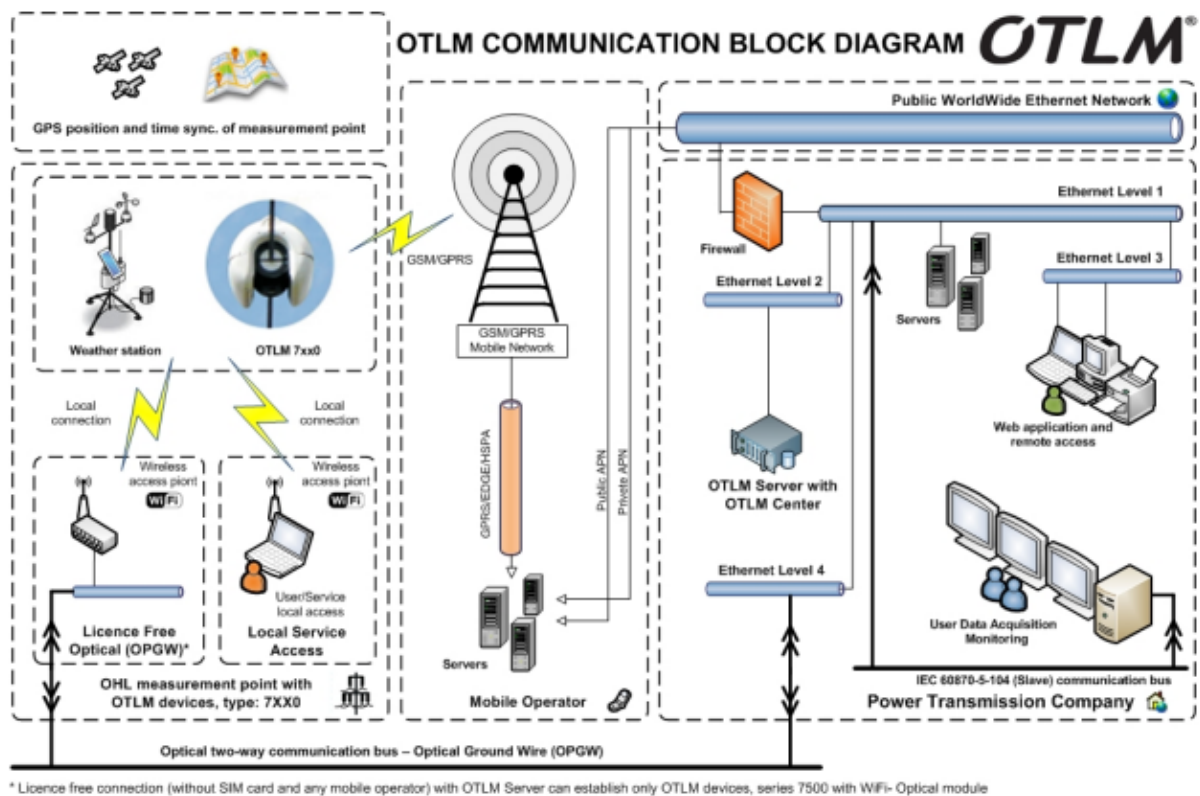
Kako je navedeno prijenosni kapacitet električne energije dalekovoda određen je s dva faktora: maksimalnom trajnom temperaturom opterećenja dalekovoda (najveća dozvoljena trajna temperatura vodiča) te minimalnom sigurnosnom visinom vodiča do objekata ispod njega.

Cilj napredne mreže je učinkovita iskoristivost energije uz što manje troškove i gubitke energije. Također, potrebno je povećati kvalitetu i pouzdanost prijenos električne energije [31].

6.2. OTLM sustav monitoringa u ELES-u

ELES dugi niz godina radi sa svojim klimatskim postajama DAMOS koje su izgrađene u svim 400 KV transformatorskim stanicama, a zadatak im je mjerenje osnovnih klimatskih parametara. Kako je već spomenuto temperatura vodiča se može mjeriti uzduž voda, kontinuirano i točkasto [31].

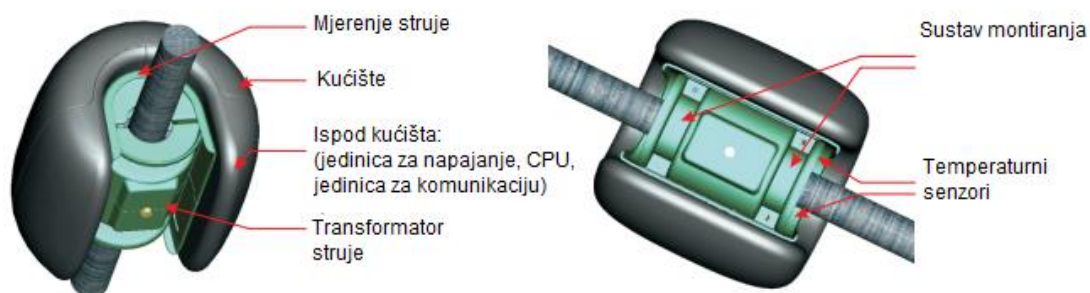
2007. godine ELES je počeo s projektom na dalekovodu 400 kV Beričevo – Podlog gdje je obavljano točkasto mjerenje temperature vodiča pomoću OTLM (eng. Overhead Transmission Line Monitoring) sustava. OTLM sustav čini OTLM uređaj i programski paket OTLM Center. OTLM uređaj koji je montiran na dalekovod prikupljene podatke šalje bežično putem GSM/GPRS (eng. Global System for Mobile communications/General Packet Radio Service) sustava komunikacije. Moguće je slanje podataka i optičkim vezama tj. putem OPGW (eng. Optical Power Ground Wire) kablova. Na lokalnom OTLM serveru skupljaju se podaci, a obrada podataka viši se na web aplikaciji OTLM Center koja putem protokola IEC (eng. International Electrotechnical Commission) 60870-5-104 (Slave) uspostavlja vezu do sustava za mjerenje, monitoring i kontrolu naziva SCADA (eng. Supervisory Control And Data Acquisition). Slika 6.1. prikazuje shematski prikaz opisanog OTLM sustava [44].



Slika 6.1. Shematski prikaz OTLM sustava [44]

OTLM uređaj mjeri temperaturu u dvjema točkama na krajevima kućišta čija je struktura otporna na utjecaj vatre i teške vremenske prilike. Istovremeno uređaj mjeri provjes i struju koja prolazi kroz vodič dalekovoda. Strujni transformator i jedinica za napajanje koje se nalaze u uređaju osiguravaju napajanje za rad bez ikakvog drugog vanjskog izvora napajanja. U slučaju kvara komunikacije podaci se pohranjuju lokalno u OTLM. LED svjetla na kućištu služe za lokalnu vizualnu kontrolu rada. Dizajn OTLM-a i pozicioniranje temperaturnih senzora neutralizira svaki mogući utjecaj okoline na preciznost mjerenja temperature vodiča. Montaža je jednostavna i brza [45]. Montaža uređaja se obično izvršava u neposrednoj blizini stupa iza antivibracijskih uređaja. Ako je teren, na prostoru gdje se dalekovod nalazi, nejednakog izgleda OTLM uređaj se montira u blizini većih uzvisina, šumskih prostora, u kotlinama itd. Razlog postavljanja na takvim mjestima je što se tako vodiči štite od utjecaja vjetra. Iz tog razloga OTLM uređaji se instaliraju na mjestima gdje prirodne, ali i druge prepreke smanjuju strujanje vjetra. Preporučeno je montirati od 3 do 4 uređaja na 50 km, a na ravnim terenima koji nisu prekriveni

šumom broj je smanjen na 2 uređaja na početku i kraju raspona [44]. Na slici 6.2. prikazani su elementi OTLM uređaja, a na slici 6.3. prikazana su dva OTLM uređaja montirana na dalekovodu.



Slika 6.2. Elementi OTLM uređaja [45]



Slika 6.3. OTLM uređaji montirani na dalekovodu [46]

U tablici 6.1. su prikazani tehnički podaci OTLM uređaja:

Tablica 6.1. Tehnički podaci OTLM uređaja [45]

Vanjski promjer	305 mm
Dužina	300 mm
Težina	Približno 9 kg
Promjer vodiča na koji se ugrađuje	Od 15 mm do 45 mm
Naponska razina rada	Od 110 kV do 400 kV
Minimalna radna struja	65 A
Frekvencija	50 Hz, 60Hz
Radna temperatura uređaja	Od -40 °C do +85 °C
Struja napajanja (strujni transformator)	Od 65 A
Opseg mjerenja temperature vodiča	Od -40 °C do +125 °C
Rezolucija mjerenja temperature vodiča	0,5 °C
Odstupanje u mjerenju temperature vodiča	±2 °C
Opseg mjerenja struje vodiča	Od 65 A
Rezolucija mjerenja struje vodiča	1 A

6.2.1. Monitoring 110 kV dalekovoda Idrija – Ajdovščina

Dalekovod Idrija – Ajdovščina ima 120 raspona čija ukupna dužina iznosi 28321 m. U njemu je ugrađen Al/Če (ACSR) vodič 240/40 mm². Na ovom dalekovodu je iskorišten OTLM uređaj kod kojeg je bilo potrebno pronaći najtopliju točku te raspon gdje je sigurnosna visina najbliža propisanoj. Cilj je bio mjeriti temperature vodiča u kritičnim točkama (nizine, kotline, šumovita područja). Pregledom svih raspona dalekovoda određene su točke gdje se pojavljuju najgori uvjeti pri temperaturi zraka od 40 °C ili -5 °C s normalnim dodatnim teretom bez utjecaja vjetra. S takvim parametrima određena je sigurnosna visina koja je kritična u takvim uvjetima. Parametri su podložni utjecaju vremenskih uvjeta, brzini i smjeru vjetra i dr.

Stručnjaci iz ELES-a su analizirajući podatke dobivene na dalekovodu Idrija – Ajdovščina dokazali da se mjerenjem temperature vodiča OTLM uređajima postigla kontrola opterećenja.

Kontrola je postignuta na razini statičkog kapaciteta gdje su OTLM uređaji pravilno raspoređeni duž kritičnog raspona. Time se postiglo da trenutno dalekovod može biti opterećen trajnom toplinskom strujom od 645 A, a dinamički može biti opterećen strujom od 731 A uz siguran rad i normalne temperature zraka i brzine vjetra. Nadzor i kontrola statičkog kapaciteta dalekovoda (alarmi OTLM) prikazan je na slici 6.4., a slikom 6.5. prikazan je odabir kritičnih parametara odsjeka dalekovoda. Kako bi se postigao dinamički temperaturni monitoring nadzemnog voda potrebno je ugraditi klimatske postaje na stupu neposredno do OTLM uređaja i koristiti neki stručni programski paket [31].



Slika 6.4. Alarmi u OTLM Center [31]



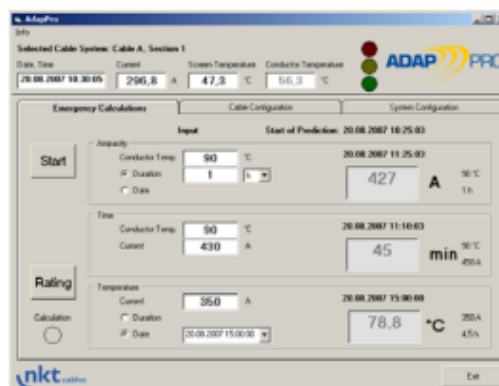
Slika 6.5. Odabir kritičnih parametara odsjeka dalekovoda [31]

6.3. VALCAP sustav monitoringa u ELES-u

VALCAP je sustav koji kontinuirano mjeri temperaturu vodiča, a uz odgovarajuću programsku opremu i podacima o opterećenju i klimatskim podacima može dati ocjenu dinamičkog opterećenja voda. Ovaj sustav prikazuje trenutno temperaturno stanje vodiča kao i struju vodiča te određuje maksimalnu toplinsku struju kod maksimalne dozvoljene temperature vodiča, vrijeme pod kojim je opterećen vodič željenom strujom ili predviđa temperaturu vodiča pod utjecajem željene struje i vrijeme pogona.

6.3.1. Monitoring 2x110 kV dalekovoda Dravograd – Slovenj Gradec

Inženjeri iz ELES-a su dalekovod 2x110 kV Dravograd – Slovenj Gradec rekonstruirali na način da je ugrađen sustav gdje je jedna faza izvedena s OPPC (eng. Optical Phase Conductor) vodičem. OPPC vodič je tip faznog vodiča s optičkom jezgrom koji se koristi za transport električne energije. Poslije rekonstrukcije ugrađen je DTR sustav naziva VALCAP čiji modul ADAPPRO po IEEE/CIGRE standardu računa potencijalno opterećenje dalekovoda. Na slici 6.6. prikazan je primjer kabela.



Slika 6.6. Prikaz podataka DTR-a (kabel) [31]

VALCAP, tj. ADAPPRO prikazuje podatke zahvaljujući OPPC vodiču čiji je zadatak omogućiti neprekidno mjerenje temperature vodiča te klimatskoj postaji koja je na ovom dalekovodu ARTES SEMART MP II. VALCAP je izveden na sustavu mjerenja temperature koji optičkim vlaknima (OPPC) neprekidno mjeri temperaturu duž dalekovoda s približnim korakom od 1 m. OPPC koristi Ramanovu metodu temperaturne ovisnosti promjene svjetlosnog spektra unutar vlakna. Kako se mijenja temperatura optičkog vlakna tako se mijenja i spektar svjetla. Slikom 6.7. prikazan je VALCAP sustav na dalekovodu s OPPC vodičem.



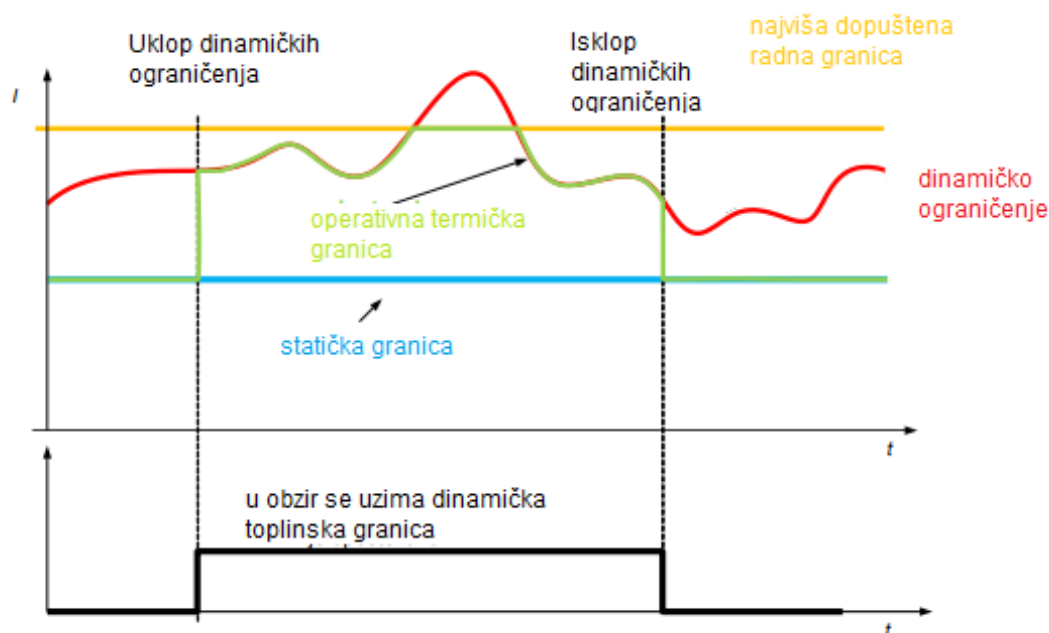
Slika 6.7. Prikaz VALCAP sustava [31]

6.4. SUMO sustav monitoringa u ELES-u

Sustav za određivanje pogonskih granica (slo. Sistem za ugotavljanje meja obratovanja - SUMO) je napredni sustav koji na temelju trenutnih vremenskih uvjeta i opterećenja pojedinog energetskog elementa u realnom vremenu utvrđuje njegov stvarni toplinski prijenosni kapacitet.

Prva četiri dalekovoda pilotski su uključena u SUMO 2013. i 2014. godine. Dvije godine kasnije skup dalekovoda opremljenih SUMO-om je povećan i danas uključuje ukupno 27 dalekovoda, jedan PST i dva energetska transformatora. Većina tih elemenata je još uvijek u promatračkom DTR modu i za njih se dinamička toplinska ograničenja još ne uzimaju u obzir u redovnom radu, ali krajem 2017. godine rezultati DTR-a također su korišteni u redovnom radu na četiri dalekovoda.

Promjena ograničenja rada zahtijevala je niz ažuriranja i prilagodbi, kao što su npr. određivanje kriterija za razmatranje ili blokiranje rezultata u SUMO-u, uređenje odgovarajuće razmjene podataka između SUMO-a i SCADA-e, ažuriranje operativnih uputa i uvođenje u mrežne modele. Jedna od najvažnijih inovacija u opisanom prijelazu između promatračkog i potpunog DTR načina bilo je uvođenje operativnog ograničenja, koje omogućuje da se u slučajevima kada se koriste dinamička ograničenja u radu mogu ograničiti i prema gore - bilo zbog ograničenja sekundarne opreme, preventivno zbog prevelikih vrijednosti dinamičkih struja ili iz bilo kojih drugih razloga. Koncept određivanja granice rada prikazan je na slici 6.8 [48].



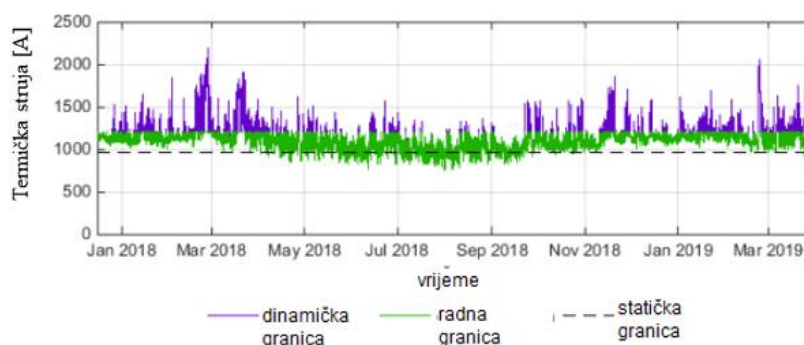
Slika 6.8. Prikaz određivanja radne granice [48]

6.4.1. Rezultati povećanja prijenosne moći elektroenergetskog sustava pomoću SUMO sustava

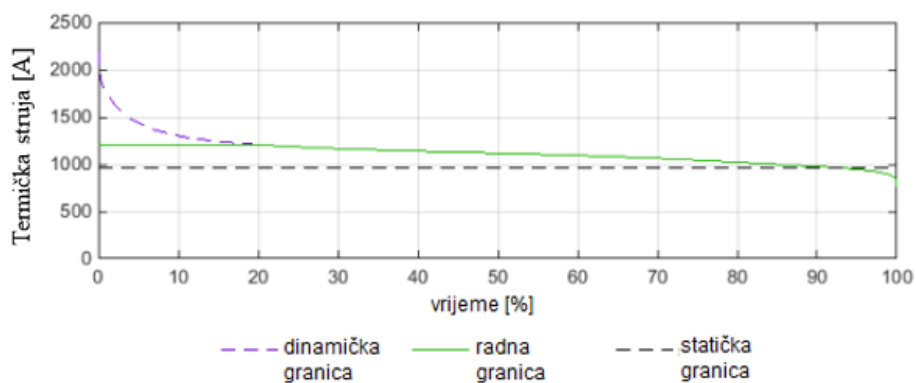
Dinamičke toplinske vrijednosti iz SUMO-a koriste se u redovnom radu od prosinca 2017. na sljedećim dalekovodima:

- DV 220 kV Obersielach – Podlog,
- DV 220 kV Kleče – Divača,
- DV 110 kV Pivka – Ilirska Bistrica i
- DV 110 kV Divača – Pivka.

Ulazni podaci za analizu za stanje N su izračunate vrijednosti prijenosnog kapaciteta, pogonskih granica i izmjerene vrijednosti stvarne struje u razdoblju od 16.12.2017. do 04.01.2019., odnosno za DV 220 kV Kleče - Divača. Podaci se dobivaju iz SUMO baze putem online servisa i imaju minutnu rezoluciju. Na slikama 6.9. i 6.10. prikazani su vremenski i uređeni dijagram ostvarenih dinamičkih i radnih granica. Statička granica također je dodana crnom isprekidanom linijom. Očito je da se operativno ograničenje općenito značajno povećalo nakon uvođenja dinamičkih ograničenja. Uzimajući u obzir gornju ograničenu vrijednost od 1200 A, koja je ograničena strujnim mjernim transformatorima, prosječna razlika između radnih i statičkih granica bila je 142 A, stoga je prijenosni kapacitet povećan za 15%. U 21% vremena visina radne granice bila je ograničena granicom od 1200 A, tijekom kojeg su izračunate dinamičke struje bile još veće. Može se primijetiti da se dinamička toplinska strujanja, koja su niža od statičke vrijednosti, javljaju osobito ljeti. Razlog tome je relativno veliki utjecaj vanjske temperature na prijenosni kapacitet. Promatrajući cijelo razdoblje, granica rada bila je niža od statičke u 7% vremena. Najniža vrijednost radne granice dogodila se 31. 7. 2018. i iznosila je 751 A. Pripadna vrijednost vanjske temperature iznosila je 31°C, a brzina vjetra 0,05 m/s [48].

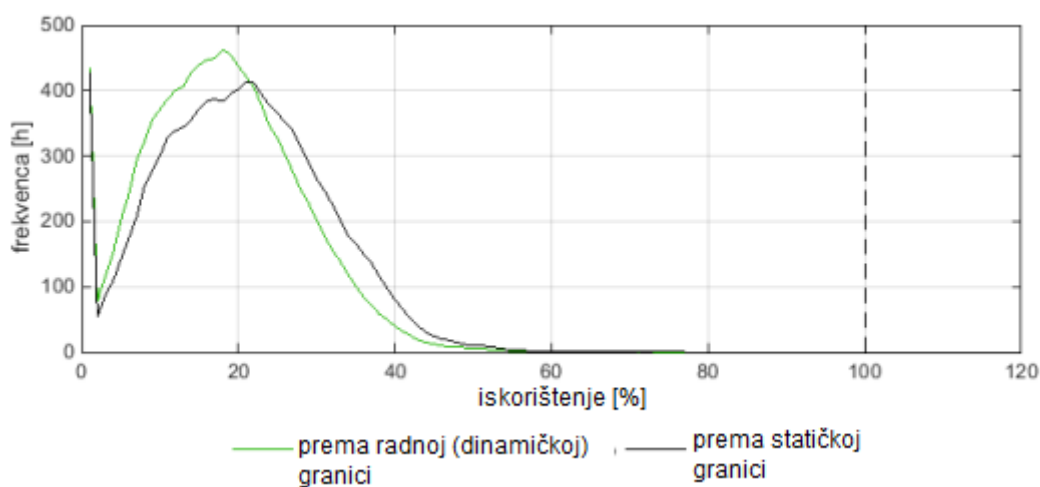


Slika 6.9. Vremenski dijagram dinamičke i radne granice [48]



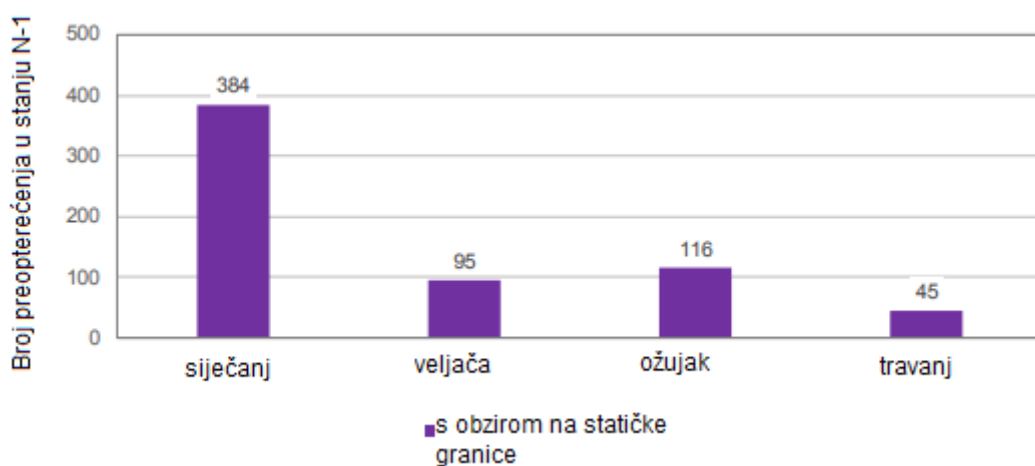
Slika 6.10. Uređeni dijagram dinamičke i radne granice [48]

Korištenje dalekovoda u promatranom razdoblju prikazano je na primjeru korištenja dinamičkih i statičkih ograničenja na slici 6.11. Iz položaja dijagrama vidljivo je da je opterećenje dalekovoda, uzimajući u obzir dinamička ograničenja, bilo manje nego što bi bilo da su se koristila statička ograničenja. Prosječna vrijednost razlike između prosječnih uporaba je 2%. Maksimalno iskorištenje u odnosu na statički limit iznosilo je 75% u promatranom razdoblju, a 71% u odnosu na dinamički limit. To znači da se u N stanju nikada nije dogodilo trenutno preopterećenje dalekovoda, niti bi se dogodilo u slučaju statičkih ograničenja.



Slika 6.11. Frekvencijski dijagram prema radnoj (dinamičkoj) ili statičkoj granici [48]

U dijelu analize za stanja N-1 studija [48] je fokusirana na rad 220kV dalekovoda Obersielach-Podlog u razdoblju od 1. siječnja do 3. travnja 2019. Podaci o opterećenju u stanju N-1 dobiveni su iz SCADA sustava i imaju petominutnu rezolucija. Slika 6.12. prikazuje broj preopterećenja u N-1 do kojih bi došlo u slučaju rada sa statičkim ograničenjima. Dogodilo bi se ukupno 640 takvih događaja, s maksimalnim preopterećenjem od 126%. Prosječna razina zagušenja bila bi 106%. Problemi zbog velikih opterećenja u ovom dijelu mreže najčešće se rješavaju topološkim promjenama, kao što je npr. priključak na RTP Podlog na način da dva sabirnička sustava rade odvojeno ili promjena PST razine u Divači. U izrazito nepovoljnim situacijama može se pokazati i potreba za smanjenjem prekograničnih prijenosnih kapaciteta.



Slika 6.12. Broj preopterećenja u N-1 s obzirom na statičko ograničenje za dalekovod 220 kV Obersielach-Podlogu 2018. [48]

7. ZAKLJUČAK

Preopterećenost dalekovoda uslijed rasta električnog opterećenja posljedica je kontinuiranog rasta potrošnje električne energije i velikih zahtjeva za priključenje obnovljivih izvora. Taj rast je rapidan te nadmašuje razvoj i izgradnju prijenosnog sustava. Jedno od rješenja je izgradnja novih dalekovoda i nadogradnja trenutne prijenosne mreže. Izgradnja novih dalekovoda predstavlja velike probleme jer se oni moraju pozicionirati u prostoru što narušava vizualne i ekološke aspekte. Operatori prijenosnog sustava imaju velikih problema zbog lokalnih zajednica koje se protive i blokiraju izgradnju novih dalekovoda. Zato stručnjaci moraju pristupiti drugom rješenju, a to je dinamički monitoring prijenosne moći postojećih dalekovoda. Svrha dinamičkog monitoringa je praćenje ključnih parametara poput temperature vodiča, provjesa vodiča, vremenskih i atmosferskih prilika te obrađivanje tih podataka kako bi se povećalo prijenosni kapacitet elektroenergetske mreže.

Potrebno je razumijevanje na koji način se mijenja prijenosni kapacitet dalekovoda. Protjecanjem struje kroz vodič raste i temperatura vodiča. Ta struja je glavni uzrok porasta temperature, ali ne i jedini. Postoje tri standarda za izračunavanje prijenosnog kapaciteta dalekovoda kojima je definirano i pojašnjeno kako temperatura utječe na vodič i koje su posljedice toplinskog naprezanja. Na osnovu tih jednadžbi počiva toplinsko ocjenjivanje prijenosne moći gdje je dinamičko termalno ocjenjivanje temelj dinamičkog monitoringa u stvarnom vremenu.

Danas postoji više komercijalnih rješenja za DTR monitoring nadzemnih dalekovoda. Glavni zadatak takve tehnologije je praćenje temperature vodiča, a izvedba ovisi o potrebi i financijskoj mogućnosti samog kupca. DTR sustavi se sastoje od meteorološke stanice koja prati vremenske prilike poput brzine i smjera vjetera te oborina i tehnologije koja prati temperaturu samog vodiča dalekovoda. Temperatura se može pratiti temperaturnim senzorima, infracrvenim kamerama, optičkim vlaknima, na temelju mjerenja naprezanja ili mjerenja provjesa. Naravno, to nisu jedine metode, a mora se uzeti u obzir da se ova tehnologija još razvija.

Na primjeru Slovenije prikazano je kako i na koji način se može pristupiti samoj implementaciji dinamičkog monitoringa u svrhu povećanja prijenosne moći dalekovoda. Objašnjeno je koju tehnologiju stručnjaci iz ELES-a primjenjuju te koje su prednosti i beneficije DTR sustava. Implementacijom OTLM sustava na dalekovodu Idrija – Ajdovščina te kasnije VALCAP sustava i SUMO sustava poboljšali su prijenosnu moć postojeće infrastrukture elektroenergetske mreže. Terenskim istraživanjima na dalekovodima Obersielach – Podlog, Kleče

– Divača, Pivka – Ilirska Bistria i Divača - Pivka potvrđeno je da se operativno ograničenje značajno povećalo nakon uvođenja dinamičkih ograničenja.

Ovaj rad je rezultat istraživanja različitih tehnologija koje postoje na tržištu, ali i onih koje su još u eksperimentalnoj fazi. Na primjeru je vidljivo značajno poboljšanje u smislu povećanja kapaciteta prijenosne moći dalekovoda, a samim napretkom i implementacijom obnovljivih izvora energije u budućnosti bi moglo biti i boljih rezultata.

LITERATURA

- [1] CIGRE: "CIGRE Guide for Thermal Rating Calculations of Overhead Lines", Paris, France, 2014.
- [2] IEEE Standard: "IEEE Standard for Calculating the Current-Temperature Relationship of Bare Overhead Conductors", 2013.
- [3] Staszewski L., Rebizant W.: "The Differences between IEEE and CIGRE Heat Balance Concepts for Line Ampacity Considerations", Modern Electric Power Systems, Wroclaw, Poland, 2010
- [4] Pavičić I.: „Povećanje kapaciteta prijenosne mreže kompaktiranjem nadzemnih vodova i visokotemperaturnih užadi s malim provjesom“, Zagreb, Hrvatska, 2022.
- [5] Rahim A. A., Abidin I. Z., Tarlochan F., Hashim M. F.: "Thermal rating monitoring of the TNB overhead transmission line using line ground clearance measurement and weather monitoring techniques", 2010.
- [6] IEEE: "IEEE Standard for Calculation of Bare Overhead Conductor Temperature and Ampacity Under Steady-State Conditions," 2006.
- [7] CIGRE: "Guide for the selection of weather parameters for bare overhead conductor ratings," 2006.
- [8] Xu F.: „Electrical Energy and Power Systems Group School of Electrical and Electronic Engineering“, 2013.
- [9] Wan H.: "Increasing thermal rating by risk analysis," 1999.
- [10] Seppa T. O.: "Accurate ampacity determination: temperature-sag model for operational real time ratings," 1995.
- [11] CIGRE: „Guide for Application of Direct RealTime Monitoring Systems“, 2012.
- [12] CIGRE: „Thermal behaviour of overhead conductors“, 2002.
- [13] CIGRE: „Sag-tension calculation methods for overhead lines“, 2007.
- [14] IEEE: „Prospects of the Dynamic Thermal Rating System for Reliable Power Systems: A Review“

- [15] Pavlinić A., Komen V.: „Direct monitoring methods of overhead line conductor temperature“, 2017.
- [16] Keyence: „Basics of Resistance Thermometers“, s Interneta, https://www.keyence.com/ss/products/daq/lab/thermometry/resistance_bulb.jsp, 1. studenog 2023.
- [17] WatElectronics: „What is Resistance Thermometer : Construction & Its Working“, s Interneta, <https://www.watelectronics.com/what-is-resistance-thermometer-construction-its-working/>, 1. studenog 2023.
- [18] Wattco: „What is a thermistor, how it works, and what does it do“, s Interneta, <https://www.wattco.com/2023/08/what-is-a-thermistor/>, 1. studenog 2023.
- [19] S Interneta, <https://en.wikipedia.org/wiki/Thermocouple>, 1. studenog 2023.
- [20] Foss, S. D., Lin, S. H., Stillwell, H. R.: Dynamic thermal line ratings. Part II. Conductor temperature sensor and laboratory field test evaluation, IEEE Trans. Power Appl. Syst., 102 (1983), 6, pp. 1865-1876.
- [21] „Smart SMT HV line temperature and current measuring sensor“, Artech Manual, 2011.
- [22] Fernandez, E., Albizu, I., Bedialauneta, M. T.: „Dynamic line rating systems for wind power integration“, 2012.
- [23] Ruicheng, L.: „The Application of the Real-time Temperature Monitoring System for Electric Transmission Lines“, Computer and Information Science, 2009.
- [24] Zheng, L., Yi, R.: Autonomous Inspection Robot for Power Transmission Lines Maintenance While Operating on the Overhead Ground Wires, International Journal of Advanced Robotic, 2010.
- [25] Lovrenčić V., Kozjek D., Gabrovšek M. i dr.: „Spot and longitudinal temperature measurements base for static and dynamic thermal rating of ohl 2x110 kv Slovenj Gradec – Dravograd“, 2013.
- [26] Jianbin L., Yanpeng H., Qing Y. i dr: „Development of Optical Fiber Sensors Based on Brillouin Scattering and FBG for On-Line Monitoring in Overhead Transmission Line, Journal of lightwave technology“, 2013.

- [27] Boot H. L. M., Wild F. H., Wey A. H. i dr.: „Overhead line local and distributed conductor temperature measurement techniques, models and experience at TZH“, Pariz, 2002.
- [28] Kosmač J., Vižintin S., Vertačnik B. i dr.: „Novell technologies for remote power line monitoring“, Kranjska Gora, 2009.
- [29] Bernini R., Minardo A., Persiano G. V. i dr.: „Dynamic loading of overhead lines by adaptive learning techniques and distributed temperature sensing“, 2007.
- [30] Abhisek U., Braendle H., Krippner P.: „ Distributed Temperature Sensing: Review of Technology and Applications“, 2011.
- [31] Lovrenčić V., Kovač M., Krevelj M.: „Dynamic thermal monitoring of overhead lines of transmission system“, Opatija, 2012.
- [32] „Fiber Optic Distributed Temperature Sensors“, Oz Optics manual, 2016.
- [33] CIGRE: „Guide for selection of weather parameters for bare overhead conductor ratings“, Cigre Technical Brochure (N° 601), 2006.
- [34] Bush R. A., Black W. Z., Champion T.Z. i dr.: „Experimental Verification of a Real-time program for the Determination of Temperature and Sag of Overhead Lines“, IEEE Power Engineering Review, 1983.
- [35] Seppa T. O., Cromer E. C., Whitlatch W. F.: „Summer Thermal Capabilities of Transmission Lines in Northern California Based on a Comprehensive Study of Wind Conditions“, IEEE Trans. Power Delivery, 1992.
- [36] Seppa T. O., Mohr R. D., Herve D. i dr.: „Variability of Conductor Temperature in a Two Span Test Line“, CIGRE, 2004.
- [37] Albizu I., Fernández E., Mazón A. J.: „Hardware and software architecture for overhead line rating monitoring“, PowerTech, Trondheim, 2011.
- [38] Bedialauneta M. T., Albizu I., Fernandez E. i dr.: „Monitoring the Tension and the Temperature in an Overhead Line“, 2012.
- [39] Fernandez E., Bedialauneta M. T., Albizu I. i dr.: „System for ampacity monitoring and low sag overhead conductor evaluation“, 2012.

- [40] Golinelli E., Musazzi S., Perini U. i dr.: „Conductors sag monitoring by means of a laser based scanning measuring system: experimental results“, Prag, 2009.
- [41] Mahajan M., Singareddy U. M.: „A Real-Time Conductor Sag Measurement System Using a Differential GPS“, 2012.
- [42] Cloet E., Lilien J-L.: „Upgrading Transmission Lines through the use of an innovative real-time monitoring system“, Rhode Island, 2011.
- [43] Fernandez E., Albizu I., Bedialauneta M. T.: „Review of dynamic line rating systems for wind power integration“, 2015.
- [44] Lovrenčić V., Gabrovšek M., Uhlík B.: „Povećanje prijenosnih kapaciteta dalekovoda korišćenjem sistema za monitoring temperature i provijesa provodinka“, Sarajevo, 2015.
- [45] S Interneta, http://www.c-g.si/wp-content/uploads/2016/08/30_OTLM-ANGLESKI.pdf, 7. studenog 2023.
- [46] S Interneta, <https://www.mosdorfer.com/en/produkte/line-management-otlm/>, 7. studenog 2023.
- [47] S Interneta, https://hr.wikipedia.org/wiki/Ramanova_spektroskopija, 8. studenog 2023.
- [48] Maver Š, Kosmač J., Kropec F.: „Increasing power system's capacity using DTR“, Laško, 2019.

POPIS SLIKA

Slika 2.1. Dijagram toplinske ravnoteže vodiča [14].....	2
Slika 2.2. Uzroci toplinskog naprezanja [4].....	6
Slika 2.3. Vremenske prilike koje utječu na temperaturu vodiča [4].....	7
Slika 2.4. Posljedice toplinskog naprezanja [4]	8
Slika 3.1. Probabilistička toplinska ocjena	14
Slika 4.1. Ilustracija izračuna temperature vodiča tijekom vremena korištenjem metode prijenosa topline po CIGRE TB 207 standardu [12].....	23
Slika 4.2. Grafički prikaz temperature vodiča kao funkcije provjesa u konačnim uvjetima [11].	28
Slika 4.3. Grafički prikaz temperature vodiča kao funkcije naprezanja u konačnim uvjetima [11]	28
Slika 4.4. Odnos naprezanja i temperature [11].....	30
Slika 4.5. Odnos naprezanja i solame temperature.....	31
Slika 5.1. Otporni termometar [17].....	36
Slika 5.2. NTC i PTC termistori [18].....	37
Slika 5.3. Termopar spojen na multimetar koji pokazuje temperaturu u °C [19].....	37
Slika 5.4. Laboratorijski prototip modula senzora temperature vodiča [20].....	39
Slika 5.5. SMT sustav [22].....	40
Slika 5.6. Emo sustav [22].....	40
Slika 5.7. Proturin sustav [22]	41
Slika 5.8. SAW sustav [22]	41
Slika 5.9. Konstrukcija jedne faze vodiča [22]	45
Slika 5.10. Mjerenje naprezanja – mjeme ćelije postavljene na dead-end strukturama [11].....	47
Slika 5.11. Shematski prikaz praćenja provjesa sustavom kamere i mete [11].....	52
Slika 5.12. Prikaz kamere (lijevo) i mete na vodu (desno) [11]	52
Slika 5.12. Shematski prikaz laserske tehnologije za mjerenje provjesa vodiča. [40].....	53
Slika 5.13. Stvarni prikaz mjerenja provjesa vodiča pomoću laserske tehnologije [40]	53
Slika 5.14. Prikaz DGPS metode mjerenja provjesa [41]	54
Slika 5.15. Video kamera iz sustava Span Sentry (EDM).....	55
Slika 5.16. Senzor Ampacimon postavljen na 400 kV vod [42].....	56
Slika 6.1. Shematski prikaz OTLM sustava [44].....	60
Slika 6.2. Elementi OTLM uređaja [45].....	61
Slika 6.3. OTLM uređaji montirani na dalekovodu [46].....	61
Slika 6.4. Alarmi u OTLM Center [31].....	63
Slika 6.5. Odabir kritičnih parametara odsjeka dalekovoda [31].....	63
Slika 6.6. Prikaz podataka DTR-a (kabel) [31].....	64
Slika 6.7. Prikaz VALCAP sustava [31]	65
Slika 6.8. Prikaz određivanja radne granice [48].....	66
Slika 6.9. Vremenski dijagram dinamičke i radne granice [48]	67
Slika 6.10. Uređeni dijagram dinamičke i radne granice [48].....	68
Slika 6.11. Frekvencijski dijagram prema radnoj (dinamičkoj) ili statičkoj granici [48]	68
Slika 6.12. Broj preopterećenja u N-1 s obzirom na statičko ograničenje za dalekovod 220 kV Obersielach-Podlogu 2018. [48].....	69

POPIS TABLICA

Tablica 2.1. Usporedba jednadžbi između IEEE-a i CIGRE-a standarda [14]	5
Tablica 3.1. Preporučeni vremenski uvjeti u Velikoj Britaniji	12
Tablica 3.2. Mjesečne temperature u New South Walesu u 2012. godini	13
Tablica 3.3. Pretpostavka o maksimalnoj temperaturi vodiča i rizik preopterećenja	14
Tablica 4.1. Prikaz naprezanja na različitim rasponima [11]	18
Tablica 4.2. Rezultati naprezanja i provjesa u slučaju kada je trajno istežanje aluminijskih niti određeno opterećenjem uzrokovanim ledom i vjetrom [13]	26
Tablica 4.3. Rezultati naprezanja i provjesa [11]	27
Tablica 6.1. Tehnički podaci OTLM uređaja [45].....	62

SAŽETAK

Prije samog pregleda i odabira tehničkih rješenja za dinamički monitoring prijenosne moći dalekovoda potrebno je poznavati same čimbenike zbog kojih se razvija navedena tehnologija kao što su zagrijavanje vodiča i ostale opreme dalekovoda, utjecaj i posljedice toplinskog napreznja na vodič te utjecaj vremenskih prilika na vodič. Razrađen su načini toplinskog ocjenjivanja prijenosne moći dalekovoda poput statičkog toplinskog ocjenjivanja (STR), probabilističkog toplinskog ocjenjivanja i na kraju dinamičkog toplinskog ocjenjivanja (DTR) koje je podloga za dinamički monitoring. Nakon toga razrađuje se sam princip određivanja prijenosne moći dalekovoda korištenjem dinamičkog monitoringa u stvarnom vremenu te pregled tehničkih rješenja i komercijalne ponude DTR monitoringa. Zaključno, na primjeru slovenskog operatera prijenosne mreže (ELES) prikazana je implementacija sustava dinamičkog monitoringa te prednosti i poboljšanja na prijenosni kapacitet cjelokupne elektroenergetske mreže.

Ključne riječi: Tehnička rješenja za dinamički monitoring prijenosne moći dalekovoda, toplinska napreznja, toplinska ocjenjivanja, statičko toplinsko ocjenjivanje (STR), dinamičko toplinsko ocjenjivanje (DTR), ELES

SUMMARY

Before the overview and selection of technical solutions for dynamic monitoring of transmission power of transmission lines, it is necessary to know the very factors that lead to the development of the aforementioned technology, such as the heating of conductors and other equipment of transmission lines, the influence and consequences of thermal stress on the conductor and the influence of weather conditions on the conductor. Methods of thermal evaluation of the transmission power of transmission lines have been elaborated, such as static thermal evaluation (STR), probabilistic thermal evaluation and finally dynamic thermal evaluation (DTR), which is the basis for dynamic monitoring. After that, the very principle of determining transmission power of transmission lines using real-time dynamic monitoring is elaborated, as well as an overview of technical solutions and commercial offers of DTR monitoring. In conclusion, on the example of the Slovenian transmission network operator, the implementation of the dynamic monitoring system and its advantages and improvements to the transmission capacity of the entire power network are presented.

Keywords: Technical solutions for dynamic monitoring of transmission power of transmission lines, thermal stresses, thermal ratings, static thermal rating (STR), dynamic thermal rating (DTR), ELES.