



**UNIVERZITET CRNE GORE
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET PODGORICA**

BSc Aleksandra Zeković

**ANALIZA PRENOSNIH KAPACITETA NADZEMNIH
VISOKONAPONSKIH DALEKOVODA U REALNIM
EKSPLOATACIONIM USLOVIMA**

MASTER RAD

Podgorica, 2025.

PODACI I INFORMACIJE O MAGISTRANDU

Ime i prezime: Aleksandra Zeković

Datum i mjesto rođenja: 25.03.1999. godine, Nikšić, Crna Gora

Naziv završenog osnovnog studijskog programa i godina diplomiranja: Energetika i automatika, 2021.

INFORMACIJE O MASTER RADU

Elektrotehnički fakultet Podgorica

Postdiplomske master akademske studije

Smjer: Elektroenergetski sistemi

Naslov rada: *Analiza prenosnih kapaciteta nadzemnih visokonaponskih dalekovoda u realnim eksploatacionim uslovima*

OCJENA I ODBRANA MASTER RADA

Datum prijave master rada: 20.03.2025.

Datum sjednice Vijeća univerzitetske jedinice na kojoj je prihvaćena tema: 16.06.2025.

Komisija za ocjenu/odbranu rada:

Prof. dr Vladan Radulović, predsjednik

Univerzitet Crne Gore,
Elektrotehnički fakultet Podgorica

Doc. dr Vladan Durković, mentor

Univerzitet Crne Gore,
Elektrotehnički fakultet Podgorica

Doc. dr Snežana Vujošević, član

Univerzitet Crne Gore,
Elektrotehnički fakultet Podgorica

Datum odbrane: 28.10.2025.

Izjava o autorstvu

Potpisana Aleksandra Zeković

Broj indeksa/upisa 06/21

Izjavljujem

da je master rad pod nazivom

"Analiza prenosnih kapaciteta nadzemnih visokonaponskih dalekovoda u realnim eksploatacionim uslovima"

- rezultat sopstvenog istraživačkog rada,
- da predloženi master rad ni u cjelini ni u djelovima nije bio predložen za dobijanje bilo koje diplome prema studijskim programima drugih ustanova visokog obrazovanja,
- da su rezultati korektno navedeni, i
- da nijesam povrijedio/la autorska i druga prava intelektualne svojine koja pripadaju trećim licima.

U Podgorici, 09.09.2025. godine

Potpis magistranda



ZAHVALNICA

Zahvaljujem se mentoru doc.dr Vladanu Durkoviću za pomoć prilikom definisanja teme, kao i na mnogobrojnim stručnim savjetima i sugestijama koji su mi bili od velikog značaja prilikom izrade master rada.

Ovaj rad posvećujem svojim roditeljima, uz neizmjernu zahvalnost za svu ljubav, podršku i razumijevanje koju su mi pružili tokom mog školovanja i života. Vaša vjera u mene i podrška bili su oslonac tokom cijelog ovog puta.

Aleksandra Zeković

APSTRAKT

Nadzemni visokonaponski dalekovod je elektroenergetski infrastrukturni element koji služi za prenos električne snage između elektroenergetskih objekata na velikim udaljenostima. Određivanje prenosnog kapaciteta dalekovoda ključno je za unaprijeđenje efikasnosti upravljanja elektroenergetskim sistemom.

U ovom radu se upoređuju dvije metode određivanja prenosnog kapaciteta nadzemnih dalekovoda 400 kV, 220 kV i 110 kV naponskog nivoa sa ACSR provodnikom: statičku i dinamičku. Statička metoda uzima u obzir najnepovoljnije vremenske uslove, pružajući konzervativnu procjenu maksimalne dozvoljene struje, a time i prenosnog kapaciteta dalekovoda, što često dovodi do potcjenjivanja stvarne prenosne moći dalekovoda. Vremenski uslovi koji se uzimaju u obzir prilikom ovoga proračuna brzina vjetrova, smjer vjetrova u odnosu na osu provodnika, ambijentalna temperatura i sunčeva insolacija su često povoljniji od uslova pretpostavljenih statičkom metodom. U skladu sa tim, dinamička metoda uzima u obzir trenutne meteorološke uslove i na osnovu njih vrši se proračun maksimalne dozvoljene struje i prenosnog kapaciteta dalekovoda. Cilj primjene dinamičke metode je dobiti vrijednost prenosnog kapaciteta kojim se kratkotrajno može opteretiti dalekovod, a da se ne naruše termičke granice tj. maksimalna dozvoljena temperatura provodnika. DLR (*en. Dynamic Line Rating*) je sistem od više uređaja postavljenih na dalekovodu ili u njegovoj neposrednoj okolini koji služe za prikupljanje podataka potrebnih za primjenu proračuna dinamičke metode. Ovaj pristup omogućava bolju iskorišćenost dalekovoda u povoljnim vremenskim uslovima.

U ovom master radu biće primijenjena Runge-Kutta četvrtog reda kao metoda rješavanja diferencijalne jednačine promjene temperature provodnika u vremenu, modelovana u obliku algoritma u programskom jeziku *Matlab*, kao dinamički pristup određivanju prenosne moći dalekovoda. Rezultati dobijeni primjenom statičke i dinamičke metode biće analizirani i upoređeni. Uz to analiziraće se pojedinačni uticaj vremenskih parametara na vrijednost struje visokonaponskih dalekovoda.

Ključne riječi: prenosni kapacitet dalekovoda, vremenski uslovi, statička metoda, dinamička Runge-Kutta metoda

ABSTRACT

An overhead high-voltage transmission line is a key element of the power system infrastructure used for transmitting electric power between power facilities over long distances. Determining the transmission capacity of a transmission line is essential for improving the efficiency of power system management.

This thesis compares two methods for determining the transmission capacity of overhead transmission lines at voltage levels of 400 kV, 220 kV, and 110 kV using ACSR conductors: the static and the dynamic method. The static method is based on the most unfavorable weather conditions, providing a conservative estimate of the maximum allowable current and, consequently, the transmission capacity of the line. This often results in an underestimation of the actual transmission potential. In reality, weather conditions such as wind speed, wind direction relative to the conductor axis, ambient temperature, and solar radiation are frequently more favorable than those assumed by the static method. Accordingly, the dynamic method takes into account real-time meteorological conditions to calculate the maximum allowable current and transmission capacity of the line. The goal of applying the dynamic method is to determine the transmission capacity that can be temporarily utilized without exceeding the thermal limits, i.e., the maximum permissible conductor temperature. Dynamic Line Rating (DLR) is a system composed of multiple devices installed on or near the transmission line, used to collect the data necessary for applying the dynamic calculation method. This approach enables better utilization of transmission lines under favorable weather conditions.

In this master thesis, the fourth-order Runge-Kutta method is applied to solve the differential equation that models the time-dependent change in conductor temperature, implemented as an algorithm in the Matlab programming environment, representing a dynamic approach to determining the transmission capacity. The results obtained from the static and dynamic methods are analyzed and compared. Additionally, the individual influence of weather parameters on the current-carrying capacity of high-voltage transmission lines is examined.

Key words: transmission capacity of the line, weather conditions, static method, the fourth-order Runge-Kutta dynamic method

Sadržaj

1. UVOD.....	2
2. PREGLED POSTOJEĆIH RADOVA U OBLASTI PRIMJENE STATIČKIH I DINAMIČKIH METODA U ANALIZI PRENOSNIH KAPACITETA DALEKOVODA	5
2.1. DLR uređaji.....	16
3. ANALIZA PRENOSNIH KAPACITETA NADZEMNIH VISOKONAPONSKIH DALEKOVODA U REALNIM EKSPLOATACIONIM USLOVIMA	22
3.1. STATIČKA METODA	22
3.1.1. Snaga odvođenja toplote usljed konvekcije P_c	23
3.1.2. Snaga odvođenja toplote usljed radijacije P_r	26
3.1.3. Snaga dovođenja toplote usljed sunčevog zračenja P_s	27
3.1.4. Vrijednost naizmjeničnog otpora $R(T_{avg})$	30
3.2. DINAMIČKA METODA	31
3.2.1. Runge-Kutta metoda četvrtog reda	32
4. IMPLEMENTACIJA METODA ZA ODREĐIVANJE PRENOSNOG KAPACITETA U CRNOGORSKOJ PRENOSNOJ MREŽI	34
4.1. Meteorološki uslovi upotrebljeni u statičkoj metodi.....	40
4.2. Meteorološki uslovi upotrebljeni u dinamičkoj metodi	40
4.3. Rezultati dobijeni upotrebom statičke metode	58
4.4. Rezultati dobijeni upotrebom dinamičkog modela, riješenog Runge - Kutta četvrtog reda metodom.....	59
4.4.1. 400 kV dalekovod Podgorica 2 - Ribarevine.....	59
4.4.2. 220 kV dalekovod Podgorica 1 - Perućica.....	63
4.4.3. 110 kV dalekovod Krnovo - Brezna	67
4.5. Uticaj meteoroloških parametara na vrijednost struje kroz dalekovod.....	71
4.5.1. Uticaj brzine vjetera i temperature okoline na struju kroz dalekovod.....	72
4.5.2. Uticaj temperature okoline i sunčeve insolacije na struju kroz dalekovod.....	76
4.5.3. Uticaj ugla smjera vjetera u odnosu na osu dalekovoda.....	79
5. ZAKLJUČAK.....	83
6. LITERATURA	85

1. UVOD

Elektroenergetski sistem predstavlja složen i dinamički sistem čija je funkcija da sigurno, pouzdano, kvalitetno i ekonomično snadbijeva potrošače dovoljnim količinama kvalitetne električne energije. Dijeli se na četiri podsistema: proizvodnju, prenos, distribuciju i potrošački podsistem. Prenosni sistem predstavlja proces transporta sa mjesta proizvodnje do distributivnog čvorišta, gdje se dalje električna energija distribuira do potrošača. Ovaj proces se vrši pomoću nadzemnih dalekovoda visokog ili vrlo visokog napona i kablova. Uz nadzemne i podzemne visokonaponske dalekovode, prenosni sistem čine i rasklopna postrojenja, energetska transformatori kao i sistem zaštite, upravljanja i nadzora.

Prenosni kapacitet dalekovoda predstavlja ključnu karakteristiku prenosnog sistema, jer od njega direktno zavisi kolika količina električne energije može da se prenese od elektrana do distributivnih centara. Kako se broj proizvodnih jedinica povećava, posebno obnovljivih izvora električne energije (OIE) kao i kontinuirani porast potrošnje, povećava se i potreba za većim prenosnim snagama elektroenergetskih dalekovoda. Rješenje se nalazi u izgradnji novih infrastruktura ili u povećanju prenosnih kapaciteta postojećih dalekovoda. Iz prostornih, ekonomskih i ekoloških razloga sve veći akcenat se stavlja na razvoju metodologija za povećanje prenosnih snaga već izgrađenih dalekovoda. Termičko ograničenje prenosne moći dalekovoda predstavlja dominantan faktor pri ograničenju prenosne moći i u crnogorskoj praksi se definiše pri temperaturi provodnika od 80 °C, uz konzervativne vremenske uslove. Dopusšteno termičko opterećenje (DTO) zavisno je od vremenskih uslova, što dalje uzrokuje da je prenosni kapacitet promjenjiv u vremenu. Kapacitet dalekovoda zavisan je od otpora provodnika, tehničkih parametara provodnika, strujne opteretivosti, napona te vremenski - promjenjivih uslova: ambijentalne temperature, brzine vjetra, smjera vjetra u odnosu na osu provodnika i sunčeve insolacije.

U ovom master radu analiziraće se dvije metode za proračun maksimalne termičke struje 400 kV, 220 kV i 110 kV dalekovoda i termičkog kapaciteta. Statička metoda prilikom proračuna uzima u obzir najnepovoljnije vremenske uslove, te kao rezultat daje konzervativna rješenja. U okviru statičke metode pretpostavljaju se najgori vremenski uslovi poput: mala brzina vjetra, velika ambijentalna temperatura i velika sunčeva insolacija. Ipak, stvarni vremenski uslovi najčešće su povoljniji. Iz tih razloga, dinamičkom metodom obuhvaćeni su realni vremenski uslovi. Iskorišćenjem realnih prenosnih mogućnosti

dalekovoda, olakšava se upravljanje elektroenergetskim sistemom, smanjuju se zagušenja u mreži i omogućava stabilniji i pouzdaniji rad mreže. Analiza realnih prenosnih kapaciteta dalekovoda doprinosi boljem iskorišćenju postojećih dalekovoda u mreži, što potencijalno može smanjiti potrebu za građenjem novih dalekovoda u elektroenergetskoj mreži. Na ovaj način doprinosi se većoj integraciji obnovljivih izvora energije u elektroenergetski sistem. U povoljnim vremenskim uslovima, dalekovodi bi omogućili prenos veće količine energije iz obnovljivih izvora. Fleksibilniji pristup u upravljanju kapacitetima ne samo da povećava efikasnost sistema, već i stvara povoljnije uslove za tržište električne energije. Slobodni prenosni kapacitet dalekovoda, koji je u određenim trenucima veći nego što to pokazuju proračuni zasnovani na statičkim metodama, omogućava bolje prilagođavanje promjenama u ponudi i potražnji na tržištu, što je sa ekonomske tačke gledišta izuzetno značajno.

Master rad sastoji se od 6 poglavlja uključujući uvod, zaključak i literaturu. U uvodnom dijelu definiše se predmet i cilj istraživanja i izlaže se važnost primjene dinamičke metode na proračun prenosne moći. U drugom poglavlju vrši se pregled postojećih rješenja u oblasti dosadašnje primjene statičkog i dinamičkog modela. Poseban akcenat je na integraciji energije iz vjetroelektrana putem nadzemnih dalekovoda sa i bez DLR sistema. Razmatran je uticaj samo temperature okoline, samo jačine vjetra i njihov zajednički uticaj kroz primjenu dinamičke metode na prenosni kapacitet dalekovoda na neisporučenu energiju iz vjetroelektrana. Sprovedena analiza upoređena je sa statičkim modelom. Primijenjene metode komentarisane su sa ekonomskog aspekta, uz kratku analizu ekonomskog uticaja na integraciju energije iz vjetroelektrana. U drugom dijelu ovog poglavlja opisan je DLR sistem uz pomoć kojeg je dinamička metoda primjenjiva na dalekovodima. Sistem čini skup uređaja i senzora, postavljenih na provodniku, stubu ili u neposrednoj okolini dalekovoda. U trećem poglavlju opisane su matematičkim relacijama obje metode. Statička metoda zasnovana je na rješavanju jednačine toplotne ravnoteže, gdje je snaga dovođenja toplote jednaka snazi odvođenja toplote sa provodnika dalekovoda. Snage dovođenja toplote čine Džulovi gubici i snaga usljed sunčevog zračenja, dok snage odvođenja toplote predstavljaju snaga usljed konvekcije i snaga usljed radijacije. Kako ova, tako i dinamička metoda zasnovana je na IEEE 738-2012 standardu, *IEEE Standard for Calculating the Current-Temperature Relationship of Bare Overhead Conductors* [1], koji predstavlja opšteprihvaćeni standard za određivanje strujnog opterećenja nadzemnih provodnika u zavisnosti od termičkih uslova. Za razliku od statičke metode, gdje je temperatura provodnika konstantna, rješenje dinamičkom metodom dobija se rješavanjem diferencijalne jednačine promjene temperature provodnika u

vremenu, u zavisnosti od početne struje provodnika i promjenjivih vremenskih uslova. Rješenje pomenute jednačine dobijeno je *Runge-Kutte metodom četvrtog reda*, modelovanom u obliku algoritma u programskom jeziku *Matlab*. Četvrto poglavlje predstavlja prikaz rezultata primjenom obje metode na dalekovodima 400 kV, 220 kV i 110 kV naponskog nivoa sa alučeličnim provodnikom (ASCR) crnogorskog elektroprenosnog sistema. Dinamički pristup primijenjen je na dva 24-časovna perioda, kako bi se istakao uticaj različitih vremenskih uslova. Rezultati su detaljno analizirani i upoređeni, takođe prikazan je pojedinačni i zajednički uticaj razmatranih vremenskih parametara na vrijednost struje kroz dalekovode navedenih naponskih nivoa. U zaključnom poglavlju rada, dat je osvrt na cjelokupni rad sa konkretnim komentarima o prednosti dinamičkom pristupu pri proračunu prenosnog kapaciteta dalekovoda različitih naponskih nivoa sa predlozima za buduća istraživanja.

2. PREGLED POSTOJEĆIH RADOVA U OBLASTI PRIMJENE STATIČKIH I DINAMIČKIH METODA U ANALIZI PRENOSNIH KAPACITETA DALEKOVODA

Povećanje prenosnog kapaciteta dalekovoda od velikog je značaja u elektroprenosnim mrežama, u kojima se sve više priključuju novi korisnici, proizvođači i potrošači [2], [3]. Razvoj OIE, zahtjevi tržišta i povećanje konzuma neki su od razloga potrebe većih transporta snage po dalekovodima [4]. Najčešće ograničenje maksimalne snage iz OIE predstavlja ograničenje limita prenosnih kapaciteta [5]. Ta snaga koja se može prenijeti nadzemnih prenosnim vodom je ograničena maksimalnom dozvoljenom temperaturom provodnika koja se ne smije prekoračiti zbog očuvanja sigurnosnih visina i samog oštećenja provodnika [5]. Povećanje prenosne moći dalekovoda moguće je dodavanjem dodatnog provodnika po fazi, što predstavlja značajni ekonomski trošak kao i složen proces, jer dodavanje novog provodnika zahtjeva demontiranje stubova i već postojeće opreme. Kako ovaj proces, tako i izgradnja novog dalekovoda predstavlja složen proces i veliku investiciju, za koju je potrebno izračunati vrijeme povrata investicije [6]. Mogućnosti izgradnje novih dalekovoda su iz prostornih i ekoloških razloga ograničene, pa se sve veća pažnja posvećuje dinamičkim metodama za proračun prenosnog kapaciteta u realnim meteorološkim uslovima u cilju iskorišćenja već postojeće mreže [3].

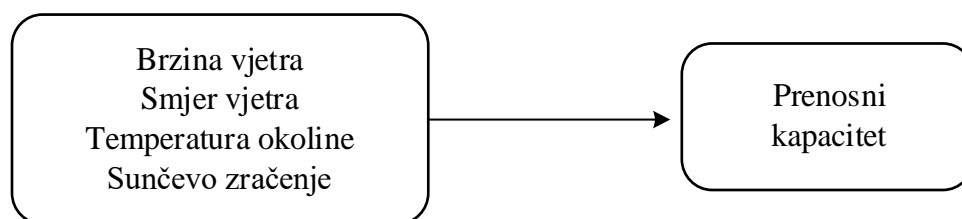
Prilikom računanja maksimalnog dopuštenog dinamičkog termičkog opterećenja (*eng. Dynamic Thermal Rating, DTR*) u obzir se uzimaju tehničke karakteristike provodnika kao što je strujna opteretivost i ambijentalni faktora koji utiču na prenosni kapacitet dalekovoda. Meteorološki parametri, kao što je temperatura ambijenta, smjer i brzina vjetera, sunčevo zračenje su stohastički parametri koji direktno utiču na prenosne mogućnosti dalekovoda [1], [7]. Sa druge strane, kao posljedica bilansa tokova snaga u mreži, strujna opteretivost dalekovoda u značajnoj mjeri se mijenja [1]. Uzimanjem u obzir navedenih meteoroloških uslova i strujne opteretivosti kao direktnog tehničkog parametra, potrebno je istražiti realne prenosne mogućnosti analiziranih dalekovoda.

Postoje dva pristupa određivanja maksimalne dozvoljene struje i prenosnog kapaciteta dalekovoda:

1. Statički model [8], [3]
2. Dinamički model [7], [3]

Za statičko određivanje prenosnog kapaciteta dalekovoda primjenjuju se dva pristupa [8]: deterministički i statistički pristup. Deterministički pristup je zasnovan na najgorim vremenskim uslovima, a to su visoka temperatura, mala brzina vjetra i veliko sunčevo zračenje. Obično, granice dalekovoda se na ovaj način određuju pod pretpostavkom nepovoljnih vremenskih uslova, a to su mala brzina vjetra od 0.6 m/s, veliko sunčevo zračenje od 1000 W/m² i velika temperatura ambijenta od 40 °C [9]. Ovakav način određivanja prenosne moći dalekovoda predstavlja konzervativan način računanja, jer je prenosna moć dalekovoda izračunata na ovaj način gotovo uvijek manja od realne [10]. S druge strane, statističko određivanje maksimalnog dozvoljenog termičkog opterećenja provodnika podrazumijeva poznavanje istorijskih meteoroloških parametara duž trase dalekovoda, pri čemu se koristi kumulativna raspodela ili funkcija raspodjele slučajne promenljive. Autori u [11] smatraju da je za praktične primjene neophodan algoritam koji uzima u obzir istorijske vrijednosti dinamičkog toplotnog opterećenja, kako bi se odredio DTR koji će važiti za duži vremenski period u budućnosti, uz prihvatljiv rizik da se ne premaši maksimalna dozvoljena temperatura provodnika.

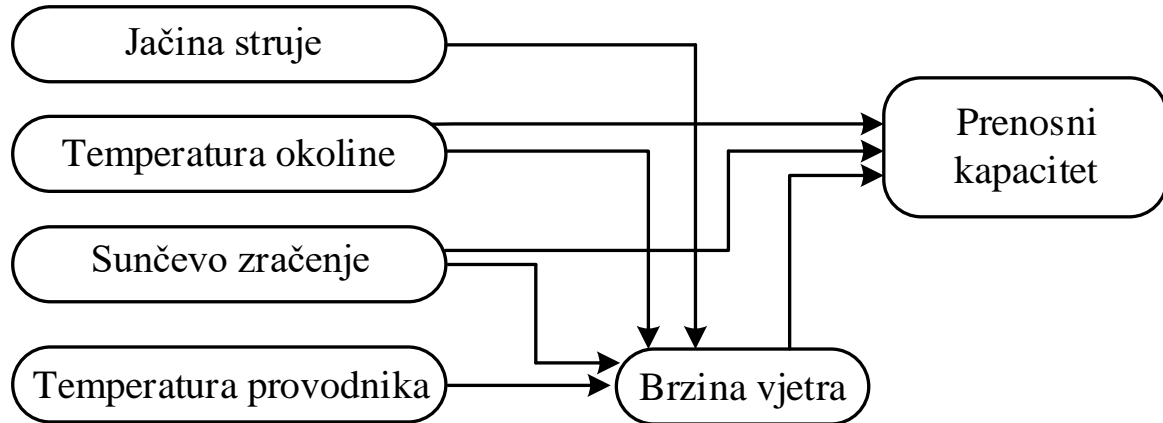
Uglavnom, vremenski uslovi su drugačiji i omogućavaju hlađenje provodnika, samim tim veći prenosni kapacitet što je osnova za dinamički model proračuna prenosne granice dalekovoda. DLR sistemi mogu se klasifikovati prema veličinama koje prate [9]. Promjenjive koje se prate da bi se izračunao stvarni prenosni kapacitet dalekovoda su vremenske promjenjive: brzina i smjer vjetra, temperatura okoline i sunčevo zračenje, kako je prikazano na slici 2.1.



Slika 2.1. Vremenske promjenjive koje utiču na prenosni kapacitet dalekovoda [9]

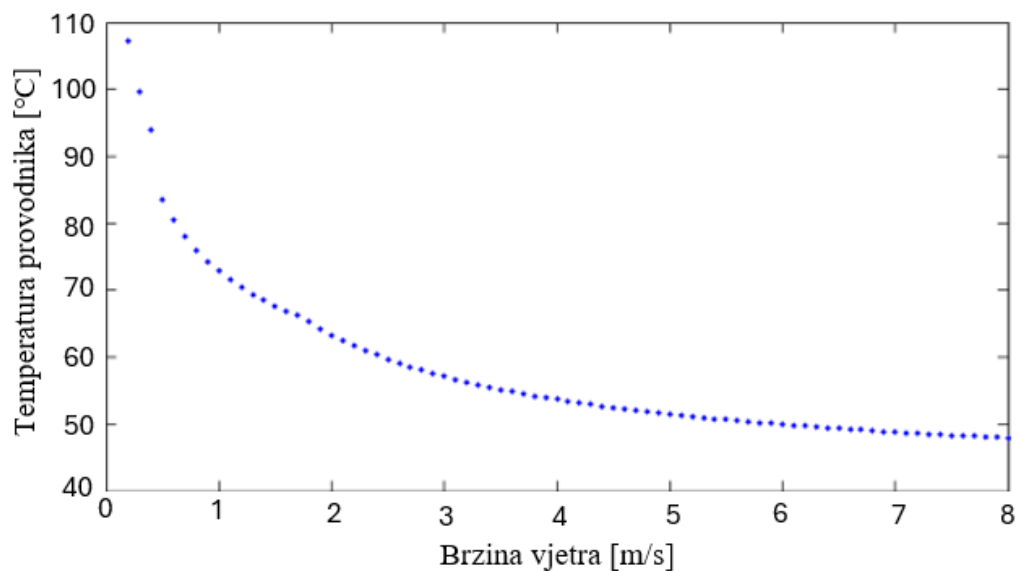
Zbog neizvjesnosti koje su povezane sa mjerenjem brzine vjetra, mnogi DLR sistemi direktno mjere temperaturu nadzemnog provodnika. Ova veličina koristi se za izračunavanje efektivne brzine vjetra koja hladi provodnik. Npr. sistem *ThermalRate* je sistem koji računa brzinu vjetra umjesto da je mjeri. Efektivna brzina vjetra je ona brzina koja, pri poznatim vrijednostima izmjerene struje, temperature okoline i sunčevog zračenja, rezultira izmjerenom temperaturom provodnika. Smatra se da je smjer vjetra normalan u odnosu na

provodnik. Na kraju, prenosna sposobnost određuje se na osnovu izračunate efektivne brzine vjetra (koja je normalna na provodnik), kao i izmjerenih vrijednosti temperature okoline i sunčevog zračenja [9]. Opisani postupak računanja prikazan je šemom na slici 2.2.



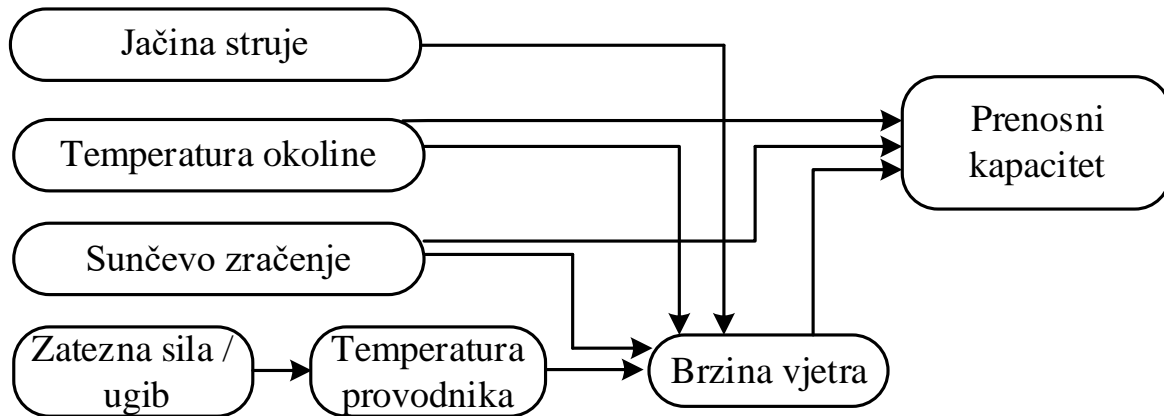
Slika 2.2. Temperatura provodnika i meteorološke promjenjive koje utiču na prenosni kapacitet dalekovoda [9]

Sa slike 2.3. može se primijetiti da je temperatura provodnika osjetljivija na promjene pri manjim brzinama vjetra tj. male promjene brzine vjetra uzrokuju velike promjene temperature provodnika. Dok već od 3 m/s pa nadalje promjene u temperaturi provodnika su manje izražene [9].



Slika 2.3. Grafik zavisnosti temperature provodnika od brzine vjetra [9]

Drugi DLR sistemi mjere zateznu silu ili ugib nadzemnog dalekovoda. U tom slučaju potreban je dodatni korak pri čemu se temperatura provodnika izvodi iz tih veličina, kako je prikazano na slici 2.4. Za povezivanje zatezne sile ili ugiba provodnika sa njegovom temperaturom koristi se mehanički model nadzemnog dalekovoda. Kada se temperatura provodnika poveća, dolazi do povećanja ugiba i smanjenja zatezne sile i obrnuto. Nakon što se dobije temperatura provodnika, primjenjuje se postupak prikazan na slici 2.2., kako bi se dobila prenosna sposobnost dalekovoda.

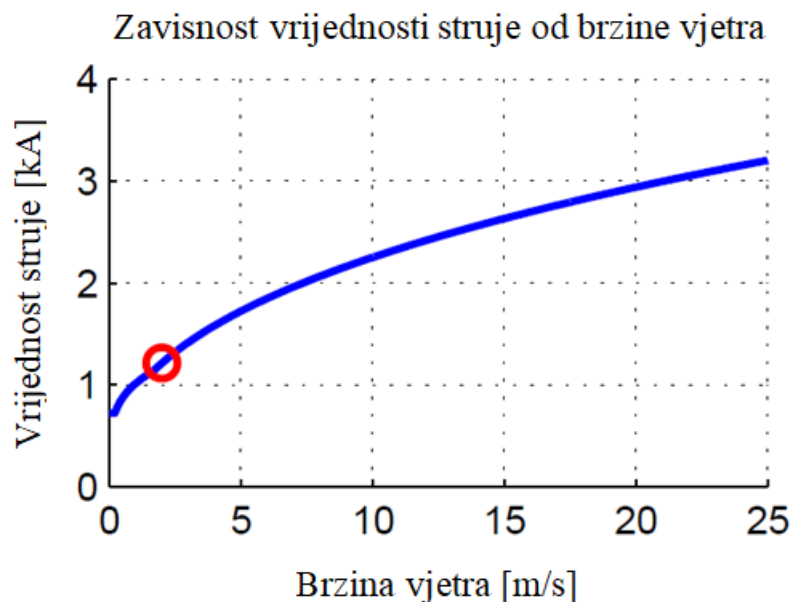


Slika 2.4. Ugib/zatezna sila i meteorološki parametri od kojih zavisi prenosni kapacitet dalekovoda [9]

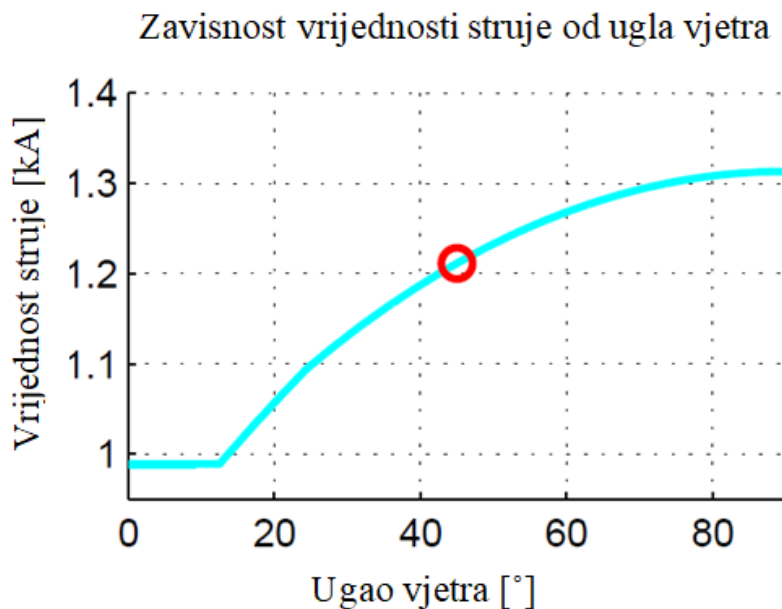
Autori u [12] zaključuju da je ocjenjivanje prenosne sposobnosti linije dalekovoda nekom od dinamičkih metoda, tj. uz prisustvo DLR sistema često manje konzervativan način od primjene statičke metode. U njihovom radu predstavljene su i analizirane potencijalne koristi od DLR sistema u mrežama sa povećanom energijom iz obnovljivih izvora električne energije kao što su vjetroelektrane i fotonaponske elektrane. Mnoge zemlje su podstakle povećanje proizvodnje iz obnovljivih izvora električne energije, podstaknute izazovom smanjenja zagađenja i emisije CO₂. Integracija veće količine čiste energije u energetska mrežu nameće potrebu za povećanjem prenosnih kapaciteta. Ograničenje prenosnog kapaciteta dalekovoda, predstavlja ograničenje proizvodnje energije iz pomenutih elektrana [12].

Grafici (2.5.-2.8.) predstavljaju vrijednost struje u zavisnosti od vremenskih promjenjivih, dok krugovi na graficima predstavljaju referentne vrijednosti ovih veličina. Na osnovu izvedenih simulacija zaključuje se da brzina vjetra ima najveći uticaj na struju koja protiče dalekovodom [12]. Iz prikazanog se vidi da za vrijednost od 0 m/s struja iznosi 700 A, dok za brzinu vjetra od 25 m/s iznosi 3300 A (slika 2.5.). Pored brzine vjetra, ugao smjera vjetra takođe ima značajan uticaj na vrijednost struje kroz dalekovod samim tim i prenosni

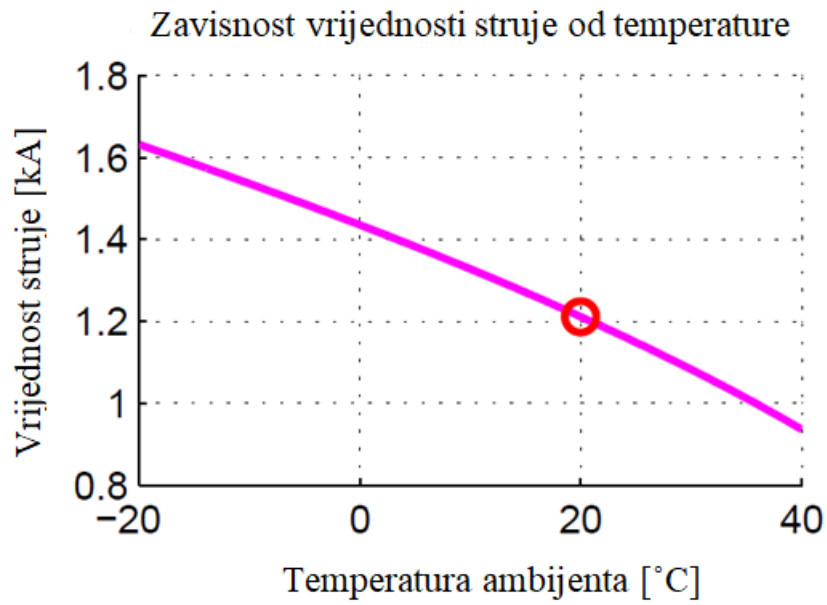
kapacitet, i dovodi do njenog povećanja do 35 % (slika 2.6.). Povećanje temperature okoline može da izazove smanjenje maksimalne dozvoljene vrijednosti struje do 41 % (slika 2.7.). Za razliku od uticaja ovih veličina na struju kroz dalekovod, sunčevo zračenje ima značajno manji uticaj. Za velike vrijednosti sunčevog zračenja, struja se u izvedenim simulacijama smanjila do 5 % (slika 2.8.).



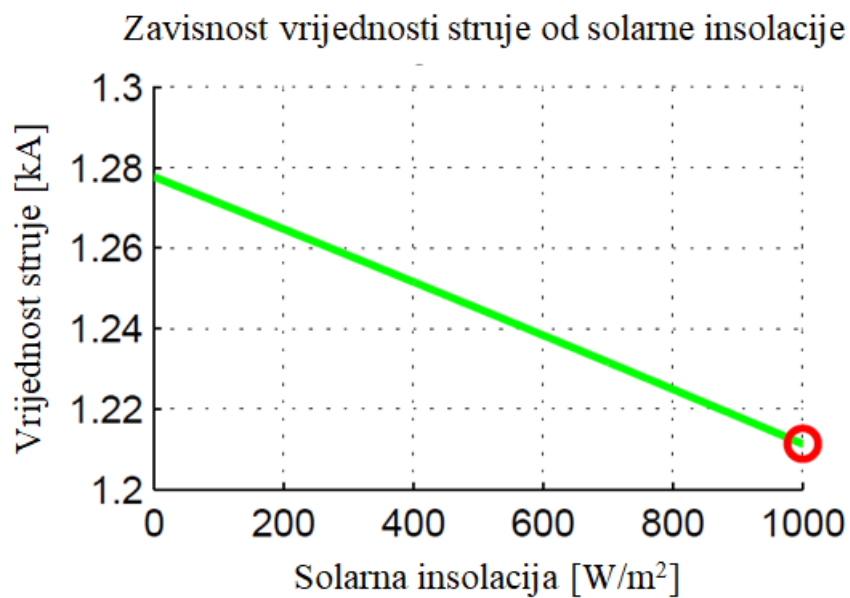
Slika 2.5. Zavisnost vrijednosti struje od brzine vjetra [12]



Slika 2.6. Zavisnost vrijednosti struje od ugla pravca vjetra [12]



Slika 2.7. Zavisnost vrijednosti struje od temperature ambijenta [12]



Slika 2.8. Zavisnost vrijednosti struje od solarne insolacije [12]

Tabela 2.1. Uticaj vremenskih parametara na vrijednosti prenosnog kapaciteta [12]

Meteorološki parametar	Opseg vrijednosti	Apsolutna promjena veličine	Procenat promjene kapaciteta	Relativni uticaj
Brzina vjetra	V [0; 25] m/s	+1 m/s	+11.1% na +1 m/s	300×
Temperatura okoline	T [-20; 40] °C	-1 °C	0.14% na -1 °C	7×
Sunčeva insolacija	S [0; 1000] W/m ²	+100 W/m ²	-0.14% na +100 W/m ²	1×

Tabela 2.1. daje sažet prikaz uticaja meteoroloških parametara na prenosne kapacitete dalekovoda, dobijene primjenom metode dinamičkog ocjenjivanja kapaciteta. Prikazani rezultati predstavljaju aproksimacije izvedene na osnovu linearizovanog modela koji povezuje DLR s proizvodnjom i potrošnjom u elektroenergetskoj mreži, uz pretpostavljeni fiksni ugao vjetra od 45°. U drugoj koloni tabele naveden je opseg vrijednosti pojedinih meteoroloških veličina koje direktno utiču na prenosni kapacitet. Treća kolona prikazuje korak promjene tih veličina. Konkretno, brzina vjetra varira za 1 m/s, temperatura se smanjuje za 1°C, a sunčeva insolacija raste za 100 W/m². Kolona pod nazivom „Procenat promjene kapaciteta“ označava relativnu promjenu prenosnog kapaciteta dalekovoda u procentima, usljed date apsolutne promjene posmatrane veličine. Na primjer, porast brzine vjetra za 1 m/s dovodi do povećanja kapaciteta za 11,1%, dok pad spoljne temperature za 1°C povećava kapacitet za približno 0,14%. Nasuprot tome, porast sunčeve insolacije za 100 W/m² dovodi do smanjenja prenosnog kapaciteta za 0,14%. Posljednja kolona prikazuje relativni značaj svakog parametra u poređenju s ostalima. Brzina vjetra pokazuje uticaj koji je oko 300 puta izraženiji u odnosu na uticaj insolacije, dok temperatura ima približno 7 puta veći uticaj. Insolacija je uzeta kao referentna vrijednost (1×) radi poređenja [12].

Kako u [13] navode tehnologija i mjerenje kojima se DLR sistemi realizuju u postojećim mrežama jedno je od ključnih područja u razvoju pametnih mreža. Iako se DR (*eng. Dynamic Rating*) model najviše vezuje za prenosnu sposobnost dalekovoda, nalaze primjenu i kod drugih komponenti elektroenergetskog sistema, koji mogu djelovati kao uska grla prenosa energije. Koncept dinamičke ocjene nalazi svoju primjenu i kod energetskih transformatora [14]. Ipak, uvođenje DR-a mora biti ekonomski opravdano kako bi se osigurala njegova održivost i efikasnost [15].

Autori u [13] u izvedenim simulacijama predstavljaju sljedeće varijante računanja prenosnog kapaciteta dalekovoda:

- Prenosni kapacitet dalekovoda dobijen statičkom metodom (*eng. Static Line Rating, SLR*), označen kao SLR 1, koji se temelji na konzervativnoj metodi proračuna uzimajući u obzir najgore vremenske uslove.
- Prenosni kapacitet dalekovoda označen kao SLR 2, koji predstavlja isto što i SLR 1 uz izgradnju novog dalekovoda, za olakšani prenos energije obnovljivih izvora električne energije do potrošača.
- Prenosni kapacitet dalekovoda dobijen dinamičkom metodom, uzimanjem u obzir uticaja samo temperature, označen kao DLR 1.
- Prenosni kapacitet dalekovoda, uzimanjem u obzir samo uticaja vjetra, označen kao DLR 2.
- Prenosni kapacitet dalekovoda, uzimanjem u obzir ukupnog uticaja temperature i vjetra, označen kao DLR 3.

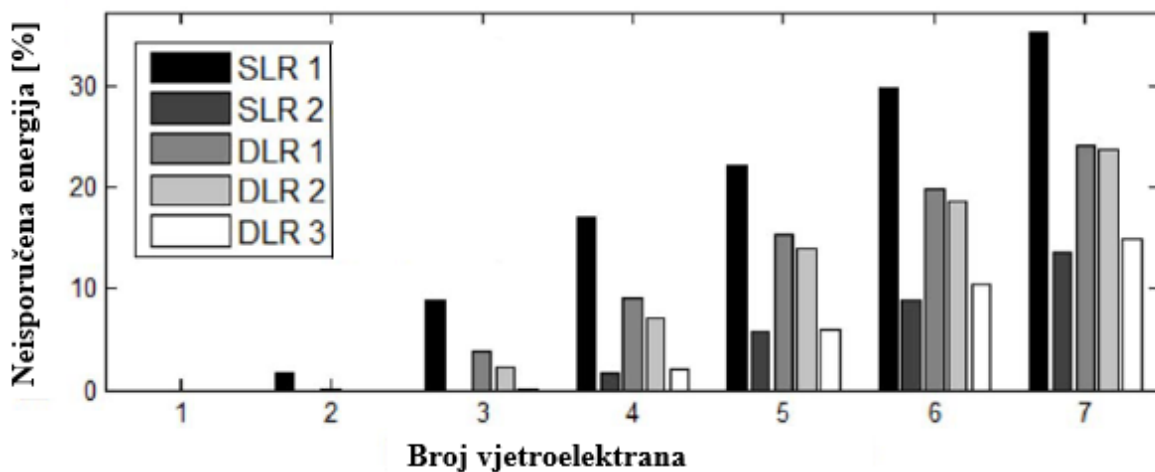
Na grafiku sa slike 2.9. Y osa predstavlja energiju iz vjetroelektrana koja se ne može isporučiti zbog ograničenja dalekovoda, koja će se u daljem tekstu tretirati kao neisporučena energija [13]. Na X osi predstavljen je broj vjetroelektrana, od 1 do 7. SLR 1, SLR 2, DLR 1, DLR 2 i DLR 3 predstavljaju gore objašnjene metode kojima je dobijen prenosni kapacitet dalekovoda. Dakle, grafik predstavlja kolika je neisporučena energija iz vjetroelektrana u zavisnosti od broja tih vjetroelektrana i metode kojom se računao prenosni kapacitet linija kojima se ta energija prenosi do potrošača.

Rezultati ukazuju da tradicionalni pristup sa statičkom ocjenom linije (SLR 1) dovodi do značajnog gubitka proizvedene energije, naročito kada se broj vjetroelektrana poveća. Tako, već pri četiri instalirane elektrane, procenat isključene energije prelazi 15 %, a kod sedam elektrana dostiže i preko 35 %. Uvođenjem dodatne linije (SLR 2) smanjuju se procenti neisporučene energije, ali ova metoda podrazumijeva dodatna ulaganja u infrastrukturu, bez povećanja fleksibilnosti u realnom vremenu.

S druge strane, dinamičke metode DLR 1 i DLR 2 koje uzimaju u obzir samo temperaturu odnosno samo brzinu vjetra, pokazuju poboljšanje u odnosu na statički pristup. Npr. za 4 vjetroelektrane, neisporučena energija kod DLR 1 slučaja smanjuje se na 9 %, dok se kod DLR 2 slučaja smanjuje na 8 %, što je manje nego kod SLR 1 slučaja. Međutim, optimalni rezultati se postižu kada se u proračun uključe oba meteorološka faktora,

temperatura i vjetar što prikazuje model DLR 3. Ovaj model konstantno ostvaruje najniži procenat u donosu na druga dva dinamička modela DLR1 i DLR 2 [13].

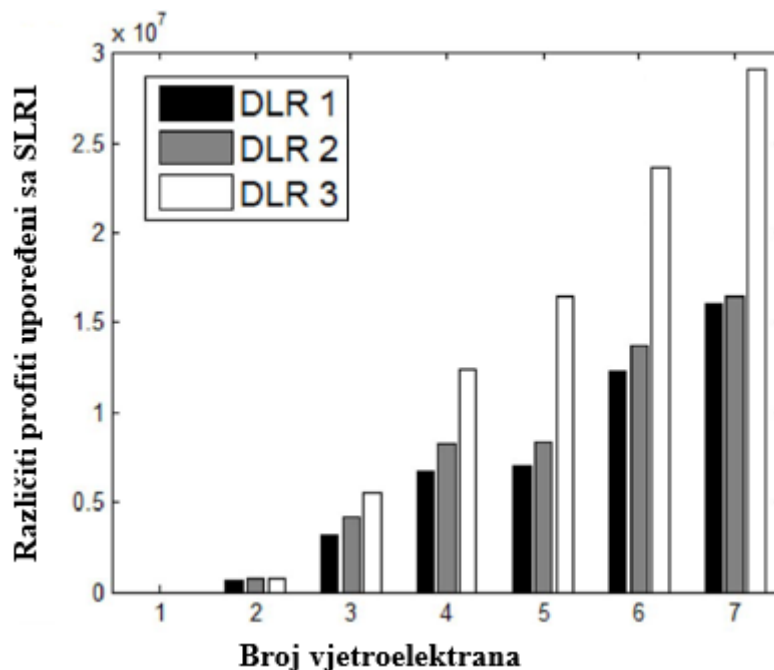
Iako se na prvi pogled čini da metoda SLR 2, koja podrazumijeva izgradnju dodatnog dalekovoda, daje najbolje rezultate u pogledu najmanjeg procenta neisporučene energije iz vjetroelektrana, razlika u odnosu na model DLR 3 nije drastična. DLR 3, koji koristi kombinovani uticaj temperature i brzine vjetra za dinamičko određivanje kapaciteta linije, omogućava gotovo jednako efikasan prenos električne energije, ali bez potrebe za dodatnim infrastrukturnim ulaganjima. Važno je istaći da je realizacija SLR 2 rješenja uslovljena visokim investicionim troškovima i dugim rokom implementacije, te mora biti ekonomski opravdana. Nasuprot tome, DLR 3 predstavlja optimalniji pristup jer se zasniva na maksimalnom iskorišćenju postojeće mreže, uz minimalne dodatne troškove.



Slika 2.9. Neisporučena energija vjetroelektrana u zavisnosti od primijenjene metode i broja vjetroelektrana [13]

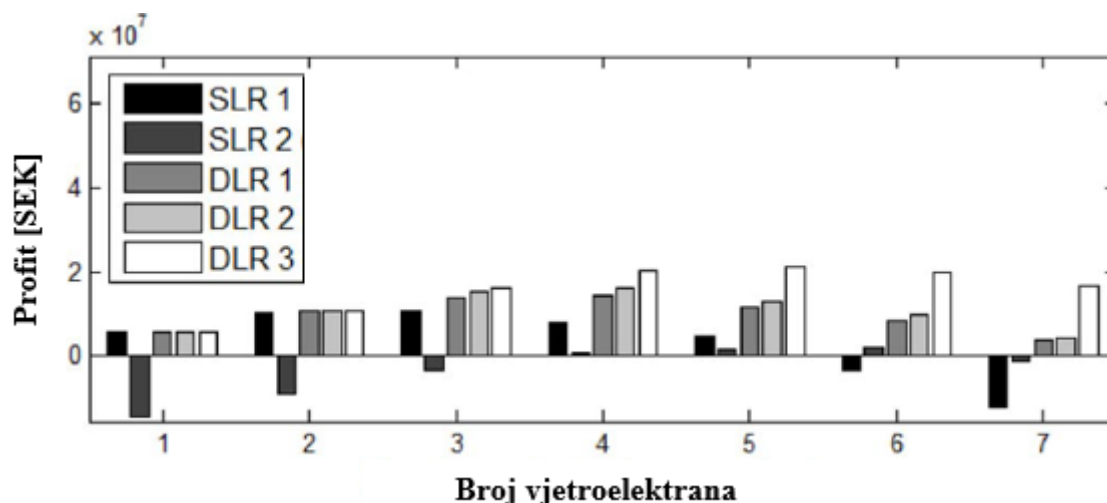
Na slici 2.10. predstavljen je grafik ostvarenih profita vjetroelektrana primjenom dinamičkih metoda DLR 1, DLR 2, DLR 3 proračuna prenosnog kapaciteta dalekovoda koji ih povezuju sa ostatkom mreže u odnosu na primjenu SLR 1 metode. Y osa grafika predstavlja ostvarene profite u odnosu na SLR 1, dok X osa predstavlja broj vjetroelektrana. Na osnovu prikazanih rezultata, jasno je da svi DLR modeli ostvaruju veći profit u poređenju sa tradicionalnim pristupom SLR 1. Razlika u profitu postaje sve izraženija kako se broj vjetroelektrana povećava, čime se potvrđuje važnost primjene dinamičkog ocjenjivanja u scenarijima visoke penetracije obnovljivih izvora energije. Posebno se ističe model DLR 3, koji uzima u obzir i temperaturu i brzinu vjetra, ostvarujući najveću dobit u svim analiziranim slučajevima. Konkretno, pri priključenju sedam vjetroelektrana, razlika u profitu u odnosu na SLR 1 dostiže gotovo 30 miliona švedskih kruna, što jasno opravdava njegovu primjenu u

praksi. DLR 1 i DLR 2 takođe ostvaruju značajne ekonomske prednosti, ali je njihova efikasnost niža u odnosu na DLR 3.



Slika 2.10. Ostvareni profiti vjetroelektrana primjenom dinamičkih metoda u odnosu na primjenu SLR1 [13]

Na prikazanom grafikonu 2.11. predstavljeni su ukupni profiti ostvareni primjenom različitih metoda određivanja kapaciteta prenosne mreže, u zavisnosti od broja priključenih vjetroelektrana. Jasno dinamička ocjena linija, a naročito model DLR 3, ostvaruje najviši profit u svim analiziranim slučajevima. Modeli DLR 1 i DLR 2, iako pojednostavljeni i bazirani samo na jednom meteorološkom parametru, i dalje donose stabilne i pozitivne finansijske rezultate, te mogu predstavljati prihvatljivu alternativu u slučajevima gdje potpuna implementacija DLR 3 nije moguća [13]. S druge strane, model SLR 1 pokazuje ograničene mogućnosti u poređenju sa DLR metodama ostvaruje znatno niže profite, dok kod priključenja 6 i 7 vjetroelektrana bilježi čak i negativan finansijski ishod, što ukazuje na neefikasnost ovog pristupa u uslovima visokog opterećenja mreže. Model SLR 2, koji podrazumijeva izgradnju dodatne prenosne linije, pokazuje određeni nivo isplativosti, ali tek od trenutka kada se priključe četiri ili više vjetroelektrana. U slučaju kada su priključene 1, 2 ili 3 elektrane, ova investicija se, prema prikazanim podacima, ne može smatrati ekonomski opravdanom.



Slika 2.11. Ostvareni profiti primjenom različitih metoda u zavisnosti od broja priključenih vjetroelektrana [13]

Na osnovu sprovedene analize i prikazanih rezultata jasno se potvrđuje da izbor metode za određivanje kapaciteta prenosne mreže značajno utiče kako na tehničke performanse, tako i na ekonomsku isplativost integracije vjetroelektrana. Tradicionalni pristupi poput SLR 1, iako jednostavni za primjenu, pokazuju ozbiljna ograničenja naročito pri većem broju priključenih elektrana, gdje dolazi do značajnih energetske gubitaka i negativnog finansijskog efekta. SLR 2, kao unaprijeđena verzija kroz izgradnju dodatnog dalekovoda, nudi bolje tehničke rezultate, ali opravdanost njegove realizacije je prisutna tek kod većeg broja priključenih izvora, a zahtijeva i znatna infrastrukturna ulaganja i dugo trajanje vremena realizacije. Nasuprot tome, svi modeli dinamičkog ocjenjivanja linija posebno DLR 3, koji istovremeno uzima u obzir i temperaturu okoline i brzinu vjetra pružaju znatno precizniju procjenu kapaciteta linije, što omogućava optimalnije iskorišćenje postojeće infrastrukture. Rezultati pokazuju da DLR 3 ostvaruje najveći profit i najmanju količinu neisporučene energije, čime se potvrđuje njegova tehnička i ekonomska superiornost. Uprkos ovim benefitima, implementacija DLR zahtijeva instalaciju dodatne opreme (senzora) i razvijene mehanizme za upravljanje podacima u realnom vremenu. Mogući izazovi, poput kompleksnosti obrade podataka, mogu se ublažiti korišćenjem pojednostavljenih, ali dovoljno preciznih DLR modela [13].

2.1. DLR uređaji

Primjena dinamičke metode za precizno određivanje prenosnog kapaciteta nadzemnih vodova u realnim vremenskim uslovima zahtijeva odgovarajuću prpratnu opremu, kojom se omogućava nadgledanje i prikupljanje ključnih parametara sa dalekovoda. Navedeni parametri se prikupljaju pomoću različitih tipova senzora, koji se mogu nalaziti na samom provodniku, na tornju ili u neposrednoj blizini dalekovoda. Prikupljeni podaci se zatim putem GSM/GPRS mreže automatski šalju u nadzorni centar, gdje se vrši njihova analiza i određivanje trenutnog kapaciteta linije [16], [17].

Senzori predstavljaju ključni element bez kojeg se koncept DLR sistema ne može primijeniti za pouzdanu procjenu prenosnog kapaciteta dalekovoda. Njihovo postavljanje, visoki troškovi nabavke i održavanja, kao i potreba za prikupljanjem podataka u realnom vremenu, u kombinaciji sa primjenom odgovarajuće metode za proračun kapaciteta, predstavljaju složen i zahtjevan zadatak. Sam proces instalacije i podešavanja senzora je tehnički kompleksan, te zahtijeva visok stepen preciznosti. Od suštinske je važnosti da se podaci očitani sa senzora pravilno obrade i iskoriste kao ulazne veličine za odabranu metodologiju, kako bi se dobili pouzdani i tačni rezultati.

Meteorološki senzori predstavljaju najjednostavniji tip kojima se realizuju najjednostavniji DLR sistemi. Mogu se nalaziti u trafostanicama ili u sklopu meteoroloških stanica koje se nalaze na samim stubovima dalekovoda. Takva meteorološka stanica (slika 2.1.1.), koja se nalazi na čelično-rešetkastom stubu, prikuplja podatke o brzini i smjeru vjetra, temperaturi okoline, relativnoj vlažnosti vazduha, pritisku vazduha i sunčevom zračenju [2]. Mimo toga, podaci o meteorološkim parametrima mogu se dobiti sa zvaničnih stranica Zavoda za hidrometeorologiju i seizmologiju meteoroloških stanica koje se nalaze u blizini razmatranog dalekovoda. Pored vremenskih senzora, za postavljanje DLR sistema bitni su uređaji za mjerenje temperature provodnika i njegovog ugiba.



Slika 2.1.1. Meterološka stanica postavljena na zateznom stubu [2]

Za mjerenje temperature provodnika dostupno je nekoliko komercijalnih sistema. Temperaturu provodnika na njegovoj površini prati senzor koji je direktno ugrađen u provodnik (slika 2.1.2.). Neki od sistema za mjerenje temperature provodnika su:

- Power Donut [18], [19] je prvi komercijalni sistem za praćenje temperature provodnika razvijen početkom osamdesetih godina prošlog vijeka. Pored temperature, mjeri i jačinu struje kao i ugao nagiba provodnika. Uređaj ima oblik torusa i postavlja se direktno na provodnik. On se sam napaja naponom, energiju crpi iz indukovanog magnetnog polja kojeg stvara struja provodnika. Minimalna struja za aktivaciju iznosi 70 A. Interna baterija omogućava do jedan sat rada kada je struja ispod tog praga. Može mjeriti temperaturu do 150 °C.
- SMT (*eng. The Temperature Monitoring System*) je sistem za nadzor temperature [9]. Funkcionalno je sličan Power Donutu. Osim temperature, nadzire i strujnu jačinu, a takođe je samonaponski sa minimalnom aktivacijom od 100 A. Može mjeriti temperature do 250 °C.
- FMC-T6 je uređaj koji mjeri temperaturu provodnika i struju [9], dio je sistema za inteligentno nadgledanje prenosne linije Multilin kompanije General Electric. Samonaponski je i mjeri temperature do 85 °C.
- OTLM (*eng. Overhead Transmission Line Monitoring*) [20], [21] je takođe sličan Power Donut-u, mjeri i temperaturu i jačinu struje. Samonaponski je, sa

minimalnom strujom aktivacije od 65 A. Maksimalna mjerena temperatura iznosi 125 °C. Uređaj postavljen na dalekovodu je prikazan na slici 2.1.3.

- TLM (*eng. Transmission Line Monitor*) [9] napredniji uređaj koji pored temperature prati i ugib provodnika. Ugib se određuje pomoću LIDAR tehnologije koja mjeri visinu provodnika iznad dna. Takođe registruje nagib i uvrtnje provodnika pomoću dvoosnog akcelerometra. Samonaponski je, uz minimalnu aktivaciju na 100 A i može mjeriti temperaturu do 250 °C.
- EMO uređaj [9] je jednostavan sistem koji mjeri isključivo temperaturu provodnika. Za razliku od prethodnih, napaja se pomoću baterije. Standardna verzija mjeri do 85 °C, dok visoko-temperaturna verzija dostiže 210 °C.
- Ritherm [9] je uređaj koji koristi tehnologiju površinskog akustičnog talasa, SAW (*eng. Surface Acoustic Wave*) [22]. Sistem se sastoji od radara koji šalje i prima elektromagnetne talase visoke frekvencije i pasivnog SAW senzora postavljenog na provodnik. SAW senzor je piezoelektrični kristal koji se deformiše pod uticajem talasa, čime se generišu novi elektromagnetni talasi koji se vraćaju radaru. Na osnovu položaja elemenata u kristalu i brzine talasa, koja takođe zavisi od temperature, moguće je odrediti temperaturu provodnika. Sistem omogućava mjerenje do 150 °C sa preciznošću od $\pm 0,5$ °C. Senzor se montira na provodnik pomoću spiralnih učvršćenja.



Slika 2.1.2. Uređaji za mjerenje temperature provodnika [9]



Slika 2.1.3. OTLM uređaj postavljen na dalekovodu [2]

Uređaj koji se koristi za mjerenje sile zatezanja je CAT-1 [9], slika 2.1.4. Budući da postoji direktna zavisnost između sile zatezanja i ugiba, praćenje zatezanja predstavlja pouzdan pokazatelj stanja dalekovoda, posebno u slučajevima kada je cilj kontrola ugiba. Vrijednost ugiba se računa na osnovu izmjerene sile zatezanja, dužine raspona i mase provodnika po metru dužine. Za razliku od mjerenja temperature provodnika, koja je lokalnog karaktera, mjerenje zatezanja predstavlja prosječno stanje svih raspona između dva zatezna stuba. CAT-1 sistem se kalibriše, kako bi povezoao vrijednost temperature provodnika i sile zatezanja. Kada se kalibracija izvrši, temperatura se može odrediti na osnovu sile zatezanja. Uz to, posjeduje poseban sistem koji služi za indirektno mjerenje vremenskih parametara.



Slika 2.1.4. CAT-1 [9]

Ugib se mjeri pomoću uređaja koji se naziva Sagometar [23], slika 2.1.5. Uređaj radi na principu obrade slike. Naime, postavljena je meta sa provodnikom na sredini raspona, a kamera prati kretanje mete. Sistem zatim obrađuje sliku i proračunava ugib.



Slika 2.1.5. Sagometar, [9]

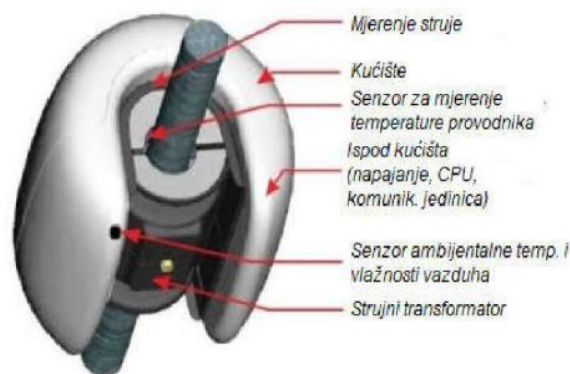
Još jedan od načina mjerenja ugiba provodnika je dosta osjetljiv uređaj, Ampacimon [24], slika 2.1.6. Radi na principu mjerenja vibracija provodnika, a sastoji se od monitora postavljenih na vodu koji mjere mehanička kretanja provodnika.



Slika 2.1.6. Ampacimon, [9]

Sistem za nadzor dalekovoda u realnom vremenu, pod nazivom RT-TLMS (*eng. Real-Time Transmission Line Monitoring System*) je beskontaktni senzorski sistem, namijenjen za praćenje visokonaponskih nadzemnih vodova u realnom vremenu [9]. Sistem koristi kalibrisane senzore magnetnog polja, koji se postavljaju otprilike ispod faznih provodnika, i koji omogućavaju precizno i pouzdano mjerenje trofaznih AC magnetnih polja. Nakon instalacije u koridor dalekovoda i izvršene kalibracije, sistem pruža podatke o trofaznim strujama, udaljenosti provodnika od tla, kao i maksimalnoj temperaturi provodnika.

Osim prikupljanja podataka sa pojedinačnih senzora, DLR sistem može se sastojati od jedne senzorske jedinice i meteorološke stanice, kako je to prikazano u [25]. Senzorska jedinica (slika 2.1.7.) omogućava mjerenje struje, nagiba i temperature provodnika. Nagib se mjeri zbog određivanja ugiba i identifikacije dodatnog tereta leda na provodniku. Podaci sakupljeni sa senzorske jedinice i meteorološke stanice, šalju se u nadzorni dispečerski centar u 15-minutnom intervalu odakle se dalje obrađuju i analiziraju. Ovaj sistem prikazan je na 2.1.8. slici.



Slika 2.1.7. Senzorska jedinica DLR sistema, [25]



- 1 – senzorska jedinica
- 2 – meteorološka stanica

Slika 2.1.8. Sistem DLR postavljen na dalekovodu, [25]

3. ANALIZA PRENOSNIH KAPACITETA NADZEMNIH VISOKONAPONSKIH DALEKOVODA U REALNIM EKSPLOATAACIONIM USLOVIMA

U ovom poglavlju biće detaljno predstavljene metode korišćene za proračun dopuštenog termičkog opterećenja nadzemnih dalekovoda. Proračun se zasniva na preporukama i smjernicama iz **standarda IEEE 738-2012** [1], koji predstavlja referentni dokument za određivanje strujnog opterećenja nadzemnih provodnika u zavisnosti od termičkih uslova okoline.

Ovaj standard omogućava preciznu analizu ravnoteže između toplote koju provodnik apsorbira i toplote koju oslobađa u okolinu, pri čemu se uzimaju u obzir ključni faktori kao što su meteorološki uslovi (temperatura vazduha, brzina i pravac vjetera, sunčevo zračenje), fizičke karakteristike samog provodnika (materijal, prečnik) kao i vrijednost električne struje koja kroz njega protiče.

Primjenom ove metodologije moguće je na pouzdan način utvrditi maksimalno dopušteno strujno opterećenje koje dalekovod može podnijeti bez prekoračenja temperaturnih ograničenja, čime se obezbjeđuje bezbjedan rad elektroenergetskog sistema.

3.1. STATIČKA METODA

Statička metoda određivanja maksimalne dozvoljene struje, odnosno prenosnog kapaciteta dalekovoda zasniva se na rješavanju jednačine toplotne ravnoteže [1].

$$I^2 \cdot R_{ac} + P_s - P_c - P_r = 0 \quad (1)$$

Gdje su: I je struja kroz dalekovod [A], R_{ac} je naizmjenični električni otpor po jedinici dužine [Ω/m], dok je P_s snaga dovođenja toplote po jedinici dužine usljed sunčevog zračenja [W/m], P_c snaga odvođenja toplote po jedinici dužine usljed konvekcije [W/m] i P_r je snaga odvođenja toplote po jedinici dužine usljed radijacije [W/m].

Na osnovu jednačine (1), dobija se struja u obliku:

$$I = \sqrt{\frac{P_r + P_c - P_s}{R_{ac}}} \quad (2)$$

Stacionarno-ravnotežno termičko stanje nadzemnog provodnika nastaje onda kada je ukupna količina toplote koja se dovodi provodniku jednaka količini toplote koja se iz njega odvodi u okolinu. Dovođenje toplote u provodnik uglavnom potiče iz dva izvora: Džulovih gubitaka i apsorpcije sunčevog zračenja. Džulovi gubici predstavljaju toplotu koja nastaje usljed prolaska električne struje kroz provodnik, pri čemu se električna energija pretvara u toplotnu zbog otpora materijala. S druge strane, sunčevo zračenje dodatno zagrijava površinu provodnika.

Odvođenje toplote iz provodnika realizuje se primarno kroz konvekciju i radijaciju. Konvekcija [26] podrazumijeva prenos toplote sa površine provodnika na okolni vazduh, a zavisi od brzine vjeta i njegovog smjera, temperature vazduha i svojstava vazduha kao i orijentacije provodnika. Radijacija predstavlja emisiju toplotnog zračenja sa površine provodnika u okolni prostor, i zavisi od njegove temperature, emisivnosti materijala i temperature okoline.

Ukoliko nije uspostavljena ravnoteža između dovedene i odvedene toplote, temperatura provodnika se počinje mijenjati, povećavati ako je dovedena energija veća, odnosno smanjivati ako je odvedena energija dominantna. Tada se provodnik nalazi u nestacionarnom, odnosno dinamičkom termičkom stanju, koje traje sve dok se ponovo ne uspostavi termička ravnoteža.

3.1.1. Snaga odvođenja toplote usljed konvekcije P_c

Gubici toplote usljed konvekcije dijele se na: prirodne i prisilne. Prirodna konvekcija predstavlja hlađenje provodnika u uslovima mirnog vazduha u kontinuiranom procesu. Vazduh koji okružuje provodnik se vremenom zagrijava i diže, te biva zamijenjen hladnim okolnim vazduhom. To se dešava kada temperatura površine provodnika postane viša od temperature okoline što uslovljava strujanje vazduha, i samo hlađenje provodnika. Za razliku od prirodne konvekcije, prisilna nastaje kada se usljed vjeta provodnik hladi. Prirodna konvekcija ima manju snagu hlađenja u odnosu na prisilnu, a dominantna je kada je brzina

vjetra približno jednaka 0 m/s. Ipak, standard IEEE 738-2012 [1] (u daljem tekstu IEEE 738) koji se oslanja na teoriju opisanu u [26] preporučuje da se izračunaju vrijednosti obje konvekcije, te u daljem proračunu koristi veća od njih.

Prirodna konvekcija P_{cn} se dobija na sljedeći način:

$$P_{cn} = 3.645 \cdot \rho_f^{0.5} \cdot D_0^{0.75} \cdot (T_s - T_a)^{1.25} \quad (3)$$

gdje su: ρ gustina vazduha [kg/m^3], D_0 prečnik provodnika [m], T_s temperatura površine provodnika [$^{\circ}\text{C}$] i T_a ambijentalna temperatura [$^{\circ}\text{C}$].

Prisilna konvekcija P_{c1} i P_{c2} prema ovome standardu [1] može se dobiti korišćenjem sljedeće dvije relacije, a kao konačna vrijednost za prisilnu konvekciju koristi se veća od njih:

$$P_{c1} = K_{angle} \cdot [1.01 + 1.35 \cdot N_{re}^{0.52}] \cdot k_f \cdot (T_s - T_a) \quad (4)$$

$$P_{c2} = K_{angle} \cdot 0.754 \cdot N_{re}^{0.6} \cdot k_f \cdot (T_s - T_a) \quad (5)$$

gdje su: K_{angle} faktor smjera vjetra, N_{re} Reynoldsov broj i k_f toplotna provodljivost vazduha [$\text{W}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$].

Prisilna konvekcija funkcija je bezdimenzionog Reynoldsovog broja, jednačina (6), koji je proporcijalan prečniku provodnika D_0 , gustini vazduha ρ_f , brzini vjetra V_w [m/s] i obrnuto proporcijalan dinamičkoj viskoznosti vazduha μ_f [kg/m-s].

$$N_{re} = \frac{D_0 \cdot \rho_f \cdot V_w}{\mu_f} \quad (6)$$

Jednačina (4) predstavlja prilagođavanje krivoj kojoj odgovaraju niski Reynoldsovi brojevi, dok (5) odgovaraju visoki Reynoldsovi brojevi. Kao posljedica toga, jednačina (4) daje tačne rezultate pri slabim brzinama vjetra, dok potcjenjuje prisilnu konvekciju pri velikim brzinama vjetra. Suprotno tome, jednačina (5) daje tačne rezultate pri visokim brzinama vjetra, a potcjenjuje prisilnu konvekciju pri slabim vjetrovima. Standard IEEE 738 preporučuje da se, pri bilo kojoj brzini vetra, gubitak toplote prisilnom konvekcijom izračuna pomoću obje jednačine, a da se zatim za konačnu vrijednost koristi veća od dobijene dvije vrijednosti.

Faktor smjera vjetra K_{angle} se definiše na sljedeći način:

$$K_{angle} = 1.194 - \cos \varnothing + 0.194 \cdot \cos 2\varnothing + 0.368 \cdot \sin 2\varnothing \quad (7)$$

$$K_{angle} = 1.194 - \sin \beta - 0.194 \cdot \cos 2\beta + 0.368 \cdot \sin 2\beta \quad (8)$$

gdje u (7) \varnothing predstavlja ugao smjera vjetra i ose provodnika. Alternativno, faktor smjera vjetra može se izraziti kao funkcija ugla β , kako je predstavljeno u (8). Ugao β predstavlja ugao između pravca vjetra i pravca normalnog na osu provodnika.

Dinamička viskoznost vazduha μ_f ocjenjuje svojstvo vazduha, a definisana je kao:

$$\mu_f = \frac{1.458 \cdot 10^{-6} \cdot (T_{film} + 273)^{1.5}}{T_{film} + 383.4} \quad (9)$$

Gustina vazduha ρ_f je:

$$\rho_f = \frac{1.293 - 1.525 \cdot 10^{-4} \cdot H_e + 6.379 \cdot 10^{-9} \cdot H_e^2}{1 + 0.00367 \cdot T_{film}} \quad (10)$$

gdje je H_e [mnv] najveća nadmorska visina na kojoj se provodnik nalazi.

Toplotna provodljivost vazduha k_f dobija se po formuli:

$$k_f = 2.424 \cdot 10^{-2} + 7.477 \cdot 10^{-5} \cdot T_{film} - 4.407 \cdot 10^{-9} \cdot T_{film}^2 \quad (11)$$

Kao što se iz priloženih jednačina (9 - 11) vidi, svojstva vazduha ocjenjuju se na temperaturi T_{film} :

$$T_{film} = \frac{T_s + T_a}{2} \quad (12)$$

T_{film} predstavlja temperaturu graničnog sloja, odnosno srednju temperaturu između ambijentalne temperature okoline i površinske temperature provodnika.

3.1.2. Snaga odvođenja toplote usljed radijacije P_r

Snaga radijacije nastaje kao posljedica prenosa toplote zračenjem. Predstavlja količinu toplote koja se sa provodnika prenosi u okolni prostor. Vrijednost P_r zavisi od temperaturne razlike između površine provodnika i okoline, pri čemu se pretpostavlja da je ona na ambijentalnoj temperaturi, i prečnika provodnika. Takođe, zavisi i od stanja provodnika, koji se manifestuje kroz koeficijent emisivosti, ε . Stariji provodnici imaju veću vrijednost koeficijenta, a noviji manju vrijednost koeficijenta.

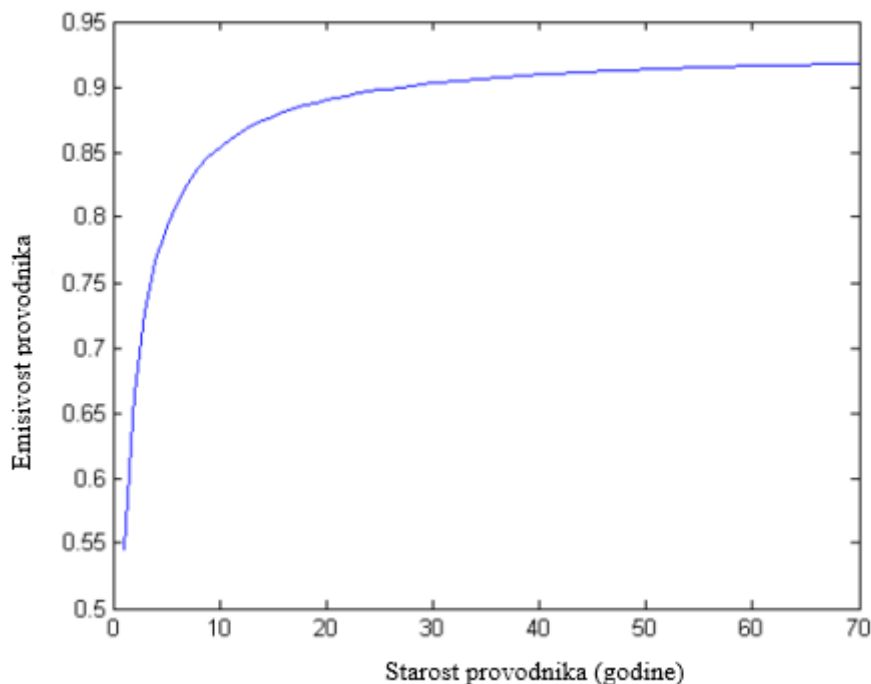
Toplotno zračenje opisuje Stefan–Boltzmannov zakon, jednačina (13), koji povezuje količinu energije prenesene zračenjem sa razlikom između temperature površine provodnika i temperature okoline, izraženih u apsolutnim (Kelvinovim) jedinicama [1].

$$P_r = 17.8 \cdot D_0 \cdot \varepsilon \cdot \left[\left(\frac{T_s + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_a + 273}{100} \right)^4 \right] \quad (13)$$

gdje je ε koeficijent emisivosti.

Emisivnost tijela predstavlja odnos između emitovane energije i energije koju bi emitovalo crno tijelo na istoj temperaturi [27]. Emisivnost zavisi od materijala površine, temperature, stanja površine i raspodele talasnih dužina emitovane energije. Emisivnost provodnika raste sa starošću provodnika. Empirijska istraživanja na ACSR provodnicima pokazala su da novoinstalirani provodnici mogu imati emisivnost od 0,23, dok stari provodnici mogu imati emisivnost od 0,95. Zavisnost emisivnosti od starosti kod ACSR provodnika može se opisati pomoću [28]:

$$\varepsilon = 0.23 + \frac{0.7 \cdot godina}{1.22 + godina} \quad (14)$$



Slika 3.1.2.1. Zavisnost koeficijenta emisivosti ε od starosti provodnika [27]

3.1.3. Snaga dovođenja toplote usljed sunčevog zračenja P_s

Usljed sunčevog zračenja dolazi do zagrijavanja provodnika, samim tim toplota provodnika se povećava što se u jednačini (1) prikazuje kroz P_s . Količina sunčeve toplote koja se prenosi na provodnik zavisi od položaja sunca na nebu, Sunčevog fluksa (količine energije po m^2 izvan Zemljine atmosfere), količine te energije koja se prenosi kroz Zemljinu atmosferu do provodnika, orijentacije provodnika i stanja njegove površine [1]. Stanje površine provodnika se izražava preko koeficijenta apsorpcije α . Noviji, sjajni provodnici apsorbuju manju količini energije, dok crni, zaprljani imaju veći koeficijent apsorpcije.

$$P_s = \alpha \cdot Q_{se} \cdot \sin \theta \cdot A' \quad (14)$$

gdje su: α koeficijent apsorpcije, Q_{se} ukupni intezitet toplotnog zračenja sunca i neba korigovan za nadmorsku visinu [W/m^2], θ efektivni ugao upada sunčevih zraka [$^\circ$] i A' površina provodnika [m^2].

Koeficijenti emisivosti provodnika i apsorpcije su usko povezani. Po Kirhofovom zakonu zračenja ova dva koeficijenta su jednaka, $\alpha = \varepsilon$. Dolazno sunčevo zračenje uglavnom

se nalazi u spektru kratkih talasnih dužina, dok se zračenje koje emituje provodnik uglavnom nalazi u infracrvenom spektru [27] .

$$\theta = \cos^{-1}[\cos H_c \cdot \cos(Z_c - Z_l)] \quad (15)$$

gdje su: H_c visina sunca [°], Z_c azimut sunca [°] i Z_l azimut linije [°].

$$H_c = \sin^{-1}[\cos(Lat) \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega + \sin(Lat) \cdot \sin \delta] \quad (16)$$

gdje su: Lat geografska širina [°], δ solarni deklinacioni ugao [°] i ω satni ugao u odnosu na podne [°].

Ugaona udaljenost od podneva, ω , predstavlja broj sati u odnosu na podne, pomnožen sa 15 stepeni (Npr. 10 časova ujutru je -30° , 14 časova popodne je $+30^\circ$).

$$\delta = 23.46 \cdot \sin \left[\frac{284 + N}{365} \cdot 360 \right] \quad (16)$$

Gdje je N dan u godini.

Vrijednosti za solarni deklinacioni ugao se nalaze u opsegu od -23.45° do $+23.45^\circ$. Jednačina (16) važi za sve geografske širine, bilo da se radi o sjevernoj ili južnoj hemisferi.

$$Z_c = C + \tan^{-1}(X) \quad (17)$$

Gdje je C [°] konstanta solarnog azimuta.

Tabela 3.1.3.1. Vrijednost C

Satni ugao, ω [°]	C, ako je $X \geq 0^\circ$	C, ako je $X < 0^\circ$
$-180 \leq \omega < 0$	0	180
$0 \leq \omega < 180$	180	360

$$X = \frac{\sin \omega}{\sin(Lat) \cdot \cos \omega - \cos(Lat) \cdot \tan \delta} \quad (18)$$

Gdje su X solarni azimutni promjenjivi faktor i Q_s [W/m²] ukupni intenzitet toplotnog zračenja sunca i neba.

$$Q_s = A + B \cdot H_c + C \cdot H_c^2 + D \cdot H_c^3 + E \cdot H_c^4 + F \cdot H_c^5 + G \cdot H_c^6 \quad (18)$$

Gdje su A, B, C, D, E, F i G koeficijenti polinoma koji su tabelarne vrijednosti zavisne od stanja atmosfere: čista i industrijska.

$$Q_{se} = Q_s \cdot K_{solar} \quad (19)$$

K_{solar} je korektivni faktor visine sunca.

$$K_{solar} = A + B \cdot H_e + C \cdot H_e \quad (20)$$

Tabela 3.1.3.2. Koeficijenti za korekciju visine

	SI
A	1
B	$1.148 \cdot 10^{-4}$
C	$-1.108 \cdot 10^{-8}$

Sunčev spektar može se podijeliti na kratkovalni i dugovalni dio. Kratkovalni dio odnosi se na kratke talasne dužine, koje dolaze direktno od sunca. Dugovalni dio koje ima duže talasne dužine i Zemlja ili drugi objekti ga emituju nazad u atmosferu. Dugovalni dio izaziva dodatno zagrijavanje koje je zbog malog doprinosa obično zanemareno, dok se kratkovalni dio dijeli na direktnu, difuzionu i reflektovanu komponentu. Jednačina (14) uzima u obzir samo direktnu komponentu.

“*Guide for thermal rating calculations of overhead lines*“, Cigre 601 standard [7] proračun ovog elementa provodi primjenom dviju metodologija. Prva je metodologija bazirana na direktnom difuzionom i reflektovanom zračenju, a druga predstavlja pojednostavljeni postupak u kojem se ovaj element računa na bazi globalnog intenziteta Sunčevog zračenja.

Snaga dovođenja toplote usljed sunčevog zračenja na bazi globalnog intenziteta:

$$P_s = \alpha \cdot D_0 \cdot S \quad (21)$$

Gdje je S globalni intenzitet sunčevog zračenja [W/m^2].

U praksi, za snaga dovođenja toplote usljed sunčevog zračenja najčešće se koristi relacija (21), što je opravdana primjena zbog postojanja relativno jeftinih i tačnih senzora

piranometara, koji služe u svrhu mjerenja globalnog intenziteta [3]. Samim tim relacija (21) će se koristiti u ovom master radu za dalji proračun.

3.1.4. Vrijednost naizmjeničnog otpora $R(T_{avg})$

Električni otpor golog nadzemnog provodnika $R(T_{avg})$ zavisi od frekvencije, električne struje, geometrije, svojstava materijala i temperature. Prema IEEE 738 [1], otpor se linearno prilagođava u zavisnosti od temperature površine provodnika. Otpornost provodnika na visokoj temperaturi T_{high} , po ovom standardu 75 °C i na niskoj temperaturi T_{low} od 25 °C date su u tabelarnim vrijednostima ili od samog proizvođača. Pretpostavlja se da te vrijednosti imaju već uvažene skin efekat i magnetne efekte. Vrijednost otpora na bilo kojoj drugoj temperaturi T_{avg} , dobija se po sljedećoj relaciji:

$$R(T_{avg}) = \left[\frac{R(T_{high}) - R(T_{low})}{T_{high} - T_{low}} \right] * (T_{avg} - T_{low}) + R(T_{low}) \quad (22)$$

Temperatura T_{high} treba da bude veća ili jednaka od temperature provodnika koja se pretpostavlja u proračunima dozvoljenih strujnih opterećenja.

Važno je napomenuti da će u proračunima biti zanemarene aksijalna i radijalna promjena temperature provodnika. Radijalna promjena temperature provodnika kod ASCR provodnika odnosi se na razliku između njegove temperature jezgra i površine. Razumno je pretpostaviti da je temperatura jezgra provodnika veća od temperature njegove površine. Veličina radijalne temperaturne razlike zavisi od: oblika žice provodnika i broja slojeva aluminijumskih žica, jačine električne struje u slojevima aluminijuma, električnog otpora slojeva aluminijumske niti, stanja provodnika i kontaktne površine. Bez obzira na konstrukciju provodnika, radijalna temperaturna razlika obično je manja od 5 °C kada je gustina struje manja od 1 A/mm². To obično odgovara ocjenama s maksimalnom površinskom temperaturom provodnika manjom od 100 °C, pa radijalna temperaturna razlika može zanemariti. Radijalna temperaturna razlika može iznositi vrijednost od 10 °C do čak 25 °C pri većim gustinama struje [1]. Aksijalna promjena temperature provodnika zavisi od spoljašnjih vremenskih uslova. Naime, brzina i smjer vjetrova, temperatura okoline, sunčevo zračenje obično nijesu isti duž cijele trase dalekovoda. Uzimanje u obzir aksijalne distribucije temperature zahtjeva postavljanje mjerene opreme na više tačaka dalekovoda, što najčešće nije izvodljivo. Umjesto toga vrši se

identifikacija tačke odnosno zateznog polja sa najnepovoljnijim vremenskim uslovima i najvećim rizikom prekoračenja sigurnosne visine.

3.2. DINAMIČKA METODA

Kada se mijenja opterećenje i/ili klimatski uslovi duž dalekovoda, tada nastupa dinamičko termičko, odnosno nestacionarno stanje dalekovoda. Dolazi do promjene temperature provodnika, usljed njegovog hlađenja odnosno zagrijavanja. Posljedično, toplotna ravnoteža nije upostavljena. Ukoliko je snaga dovođenja veća od snage odvođenja toplote, dolazi do zagrijavanja provodnika, u drugom slučaju do njegovog hlađenja. Prema IEEE 738 standardu [1], dinamičko stanje je opisano sljedećom relacijom:

$$P_c + P_r + m \cdot C_p \cdot \frac{dT_{avg}}{dt} = P_s + I^2 \cdot R(T_{avg}) \quad (23)$$

$$\frac{dT_{avg}}{dt} = \frac{1}{m \cdot C_p} [I^2 \cdot R(T_{avg}) + P_s - P_r - P_c] \quad (24)$$

Gdje su: m uzdužna masa provodnika [kg/m] i C_p specifični toplotni kapacitet provodnika [J/kg·°C].

$$m \cdot C_p = m_a \cdot c_a + m_s \cdot c_s = y_a \cdot A_a \cdot c_a + y_s \cdot A_s \cdot c_s \quad (25)$$

$$c_a = c_{a20} \cdot \left(1 + \beta_a \cdot (T_{avg} - 20)\right) \quad (26)$$

$$c_s = c_{s20} \cdot \left(1 + \beta_s \cdot (T_j - 20)\right) \quad (27)$$

Gdje su: m_a , m_s uzdužna masa aluminijumskog, odnosno čeličnog dijela ACSR provodnika [kg/m]; c_a , c_s specifični toplotni kapacitet aluminijumskog, odnosno čeličnog dijela ACSR provodnika [J/kg·°C]; c_{a20} i c_{s20} specifični toplotni kapacitet aluminijumskog, odnosno čeličnog dijela ACSR provodnika pri 20°C [J/kg·°C]; A_a , A_s površina aluminijumskog, odnosno čeličnog dijela ACSR provodnika [m²]; y_a i y_s gustina aluminijumskog odnosno čeličnog dijela ACSR provodnika [kg/m³]; β_a , β_s su temperaturni koeficijenti promjene specifičnog toplotnog kapaciteta aluminijumskog, odnosno čeličnog dijela ACSR provodnika [1/°C] i T_j je temperatura jezgra provodnika [°C].

Dok se P_s , P_c , P_r , $R(T_{avg})$ računaju na identičan način kao u gore navedenim relacijama, pri stacionarnom stanju.

Tabela 3.2.1. Karakteristike materijala provodnika

Materijal provodnika	γ [kg/m ³]	β_a, β_s [1/°C]	c_{a20}, c_{s20} [J/kg·°C]
Aluminijum	2703	$3.8 \cdot 10^{-4}$	897
Galvanizovano željezo(čelik)	7780	$1.0 \cdot 10^{-4}$	481

Vrijednost dinamičkog DTO-a može se odrediti pomoću senzora koji se postavljaju duž dalekovoda i prikupljaju podatke o vremenskim uslovima. Direktnim korišćenjem tih parametara moguće je odrediti trenutnu vrijednost dinamičkog DTO-a, čime se dalekovod može kratkotrajno opteretiti. Ova metoda omogućava real-time prilagođavanje prenosnog kapaciteta prema stvarnom stanju u sistemu. Međutim, zahtjeva veliki broj senzora i njihovo redovno održavanje, što predstavlja značajnu investiciju.

Drugi pristup je empirijska metoda, koja se zasniva na prethodno izračunatim ili eksperimentalno izmjerenim vrijednostima. Na osnovu različitih kombinacija vremenskih uslova, ova metoda daje odgovarajuću vrijednost dozvoljene struje. Njena glavna mana je što nije pogodna za nepredviđene vremenske uslove.

Numeričke metode predstavljaju još jedan način proračuna dinamičkog DTO-a. Ove metode koriste računarske modele i simulacije za rješavanje diferencijalne jednačine koja opisuje termičko stanje provodnika. Cilj je odrediti struju pri kojoj temperatura provodnika dostiže dozvoljenu maksimalnu vrijednost. Postoji više numeričkih postupaka rješavanja, a u ovom radu će biti predstavljena i primjenjena u obliku algoritma *Runge-Kutta metoda četvrtog reda*. Runge-Kutta metoda četvrtog reda se smatra referentnom metodom za ove svrhe, zbog jednostavnosti i tačnosti rezultata. Mogu se koristiti i druge metode za rješavanje diferencijalne jednačine.

3.2.1. Runge-Kutta metoda četvrtog reda

Runge-Kutta metoda četvrtog reda je numerička iterativna metoda kojom se rješava diferencijalna jednačina (24). Promjena temperature u jednačini (24) izražava se kao funkcija dovodne i odvedene temperature provodnika, struje kroz njega i električnog otpora.

Rješenje se dobija tako što se za svaki vremenski korak Δt (za zadati vremenski interval od 0 do t_f) računaju sljedeći koeficijenti Runge-Kutta četvrtog reda:

$$g = \frac{dT_{avg}}{dt} = \frac{1}{m \cdot C_p} [I^2 \cdot R(T_{avg}) + P_s - P_r - P_c] \quad (28)$$

$$k_1 = g(t^{it}, T_{avg}^{it}) \cdot \Delta t \quad (29)$$

$$k_2 = g\left(t^{it} + \frac{\Delta t}{2}, T_{avg}^{it} + \frac{1}{2} \cdot k_1 \cdot \Delta t\right) \cdot \Delta t \quad (30)$$

$$k_3 = g\left(t^{it} + \frac{\Delta t}{2}, T_{avg}^{it} + \frac{1}{2} \cdot k_2 \cdot \Delta t\right) \cdot \Delta t \quad (31)$$

$$k_4 = g(t^{it} + \Delta t, T_{avg}^{it} + k_3 \cdot \Delta t) \cdot \Delta t \quad (32)$$

Gdje su: g funkcija promjene temperature provodnika; k_1, k_2, k_3, k_4 koeficijenti Runge-Kutta metode četvrtog reda [$^{\circ}\text{C/s}$]; Δt je korak vremena [s] u vremenskom intervalu od 0 do t_f ; t^{it} je vrijednost vremena u i -toj iteraciji [s] i T_{avg}^{it} je prosječna vrijednost temperature provodnika u i -toj iteraciji [$^{\circ}\text{C}$].

Ažuriranje temperature provodnika se dobija na sljedeći način:

$$T_{avg}^{it+1} = T_{avg}^{it} + 1/6(k_1 + 2 * k_2 + 2 * k_3 + k_4) \quad (33)$$

Dakle, svakoj sljedećoj iteraciji se koristi vrijednost temperature iz prethodne iteracije i upoređuje sa maksimalnom temperaturom od 80°C . Algoritam se izvršava sve dok je ta razlika veća od već definisane err od 0.1.

Problematika navedene metode leži u određivanju početnih uslova. Potrebno je pretpostaviti početnu vrijednost temperature provodnika T_{cin} . Ona se može izračunati uz pomoć senzora koji mjere temperaturu provodnika ili pretpostaviti da je jednaka ambijentalnoj temperaturi. Početna vrijednost struje se uzima tako da se pretpostavi da je ona jednaka vrijednosti stacionarnog DTO-a, uz uzimanje kombinacije najgorih vremenskih uslova. Struju je potrebno u svakoj iteraciji povećavati odnosno smanjivati kako bi se dobila njena konačna vrijednost. U mnogim istraživanjima je pokazano da je to povećanje odnosno smanjenje zavisno od razlike između T_{max} i najveće određene temperature na intervalu od 0 do t_f [29], [30].

U praksi, vrijednost struje u novoj iteraciji računa se na sljedeći način:

$$I_{novo} = I_{staro} + k_d * \Delta T \quad (34)$$

Gdje su: k_d je koeficijent uvećanja [$A/^\circ C$], ΔT je temperaturna razlika između T_{max} i najveće ostvarene na interval od 0 do t_f [$^\circ C$].

Iskustveno se pokazalo da su optimalne vrijednosti za k_d između 5 i 20. Tokom samog proračuna moguće je mijenjati ovu vrijednost, što dovodi do sigurnijeg i tačnijeg rezultata. Od odabira vrijednosti za k_d zavisna je brzina dobijanja rezultata, odnosno broj iteracija koji se izvrši kako bi se dobilo konačno rješenje. Međutim, kako u [3] navodi nije potrebno mijenjati vrijednost za k_d ukoliko se uzmu vrijednosti između 5 i 20.

Uprkost problematike biranja početnih uslova i odabira koeficijenta smanjenja odnosno povećanja struje, ova metoda daje visoku tačnost rezultata, s obzirom da je zasnovana na praktičnim i teorijskim osnovama [23], [31], [18].

4. IMPLEMENTACIJA METODA ZA ODREĐIVANJE PRENOSNOG KAPACITETA U CRNOGORSKOJ PRENOSNOJ MREŽI

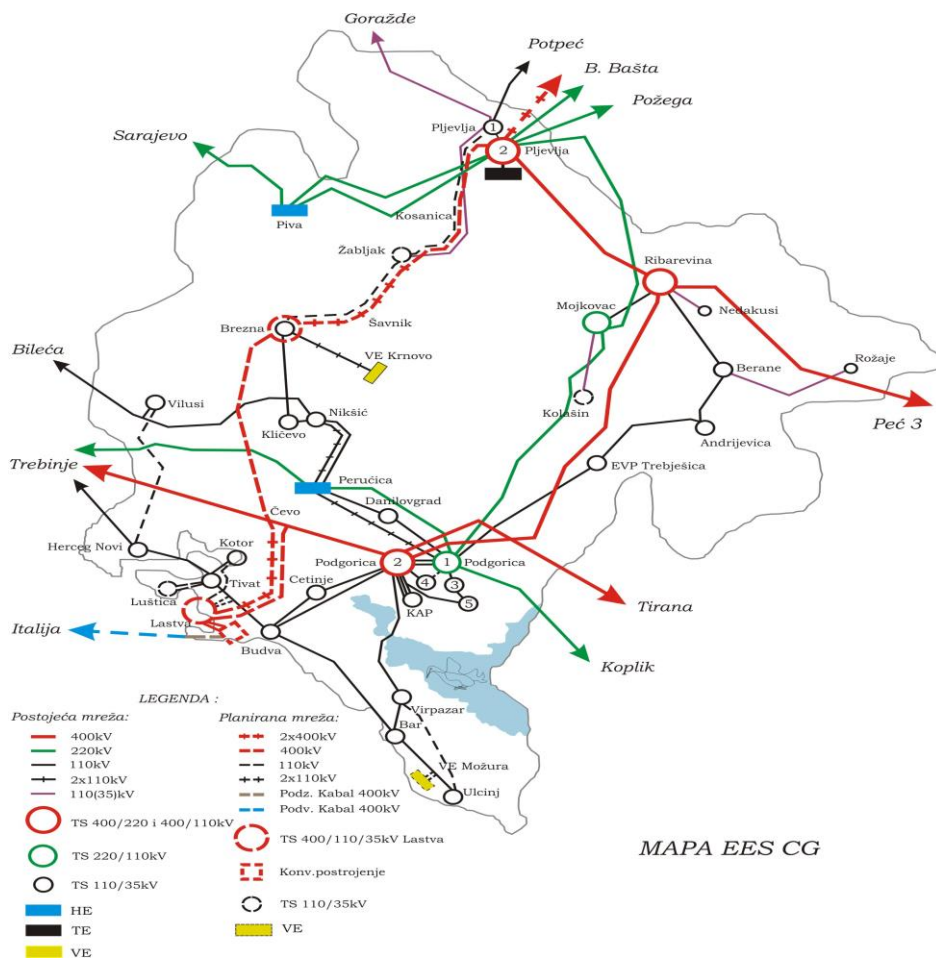
Crnogorski elektroprenosni sistem (CGES) čine 1549 km dalekovoda i 34 trafostanica naponskih nivoa 400 kV, 220 kV i 110 kV, slika 4.1. CGES posjeduje 62 dalekovoda od kojih su:

- Šest dalekovoda 400 kV
- Deset 220 kV dalekovoda
- Četrdeset dva 110 kV dalekovoda
- Dva kabla 110 kV
- Jedan 110 kV mješoviti vod
- HVDC kabal sa Italijom

Crnogorski elektroprenosni sistem povezan je sa Srbijom preko 220 kV dalekovoda Bajina Bašta i Bistrica i jednim 110kV dalekovodom povezanim sa trafostanicom Potpeć. Sa Bosnom je povezan preko čak četiri dalekovoda od kojih su tri veza sa trafostanicom Trebinjem i jedan 110 kV dalekovod Bileća. Sa istočne strane nalaze se Albanija i Kosovo. Interkonektivni dalekovodi sa Albanijom su 220 kV Koplík i 400 kV dalekovod

Tirana 2, dok je veza sa Kosovom ostvorena preko 400 kV dalekovoda Peć 3. Sa Italijom je ostavarena veza preko upravljivog jednosmjernog HVDC kabela.

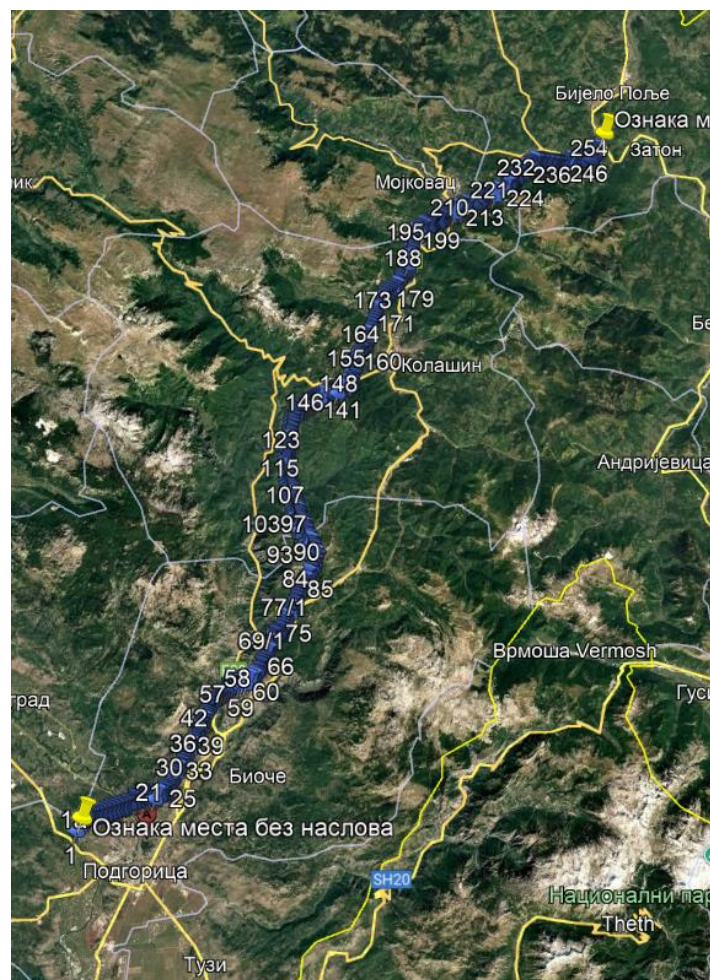
U okviru ovog master rada primijenice se metodologija proračuna najveće dopuštene struje i prenosnog kapaciteta na 400 kV dalekovodu Podgorica 2 - Ribarevine, 220 kV dalekovodu Podgorica 1 - Perućica i 110 kV dalekovodu Krnovo - Brezna. Cilj je prikazati rezultate dobijene statičkom i dinamičkom metodom, prikazanih u poglavlju 3 ovog rada, primijenjene na navedenim dalekovodima, uz zaključke o njihovim prednostima i nedostacima. U okviru ovog rada prikazaće se opravdanost upotrebe dinamičke metode na navedenim naponskim nivoima. Međutim, mjesto postavljanja uređaja kojima se DLR sistemi realizuju na dalekovodima, kao i identifikacije kritičnog zateznog polja sa najnepovoljnijim klimatskim uslovima i najvećim rizikom prekoračenja sigurnosne visine nijesu predmet istraživanja ovog rada. Izračunati prenosni kapacitet dobijen dinamičkom metodom u realnosti trebao bi se skalirati za vrijednost tog kritičnog raspona i njega koristiti kao konačni rezultat dobijen dinamičkom metodom za određene vremenske uslove u određenom trenutku.



Slika 4.1. Šema elektroprenosnog sistema Crne Gore

Trasa dalekovoda 400kV Podgorica 2 - Ribarevine (slika 4.2.) je ucrtana preko aplikacije “GooglePro Earth”, u cilju određenja maksimalne nadmorske visine na kojoj se dalekovod nalazi, H_e . Ucertani su stubovi koji povezuju ove dvije trafostanice. Dobijena vrijednost za H_e je 1500 mnv.

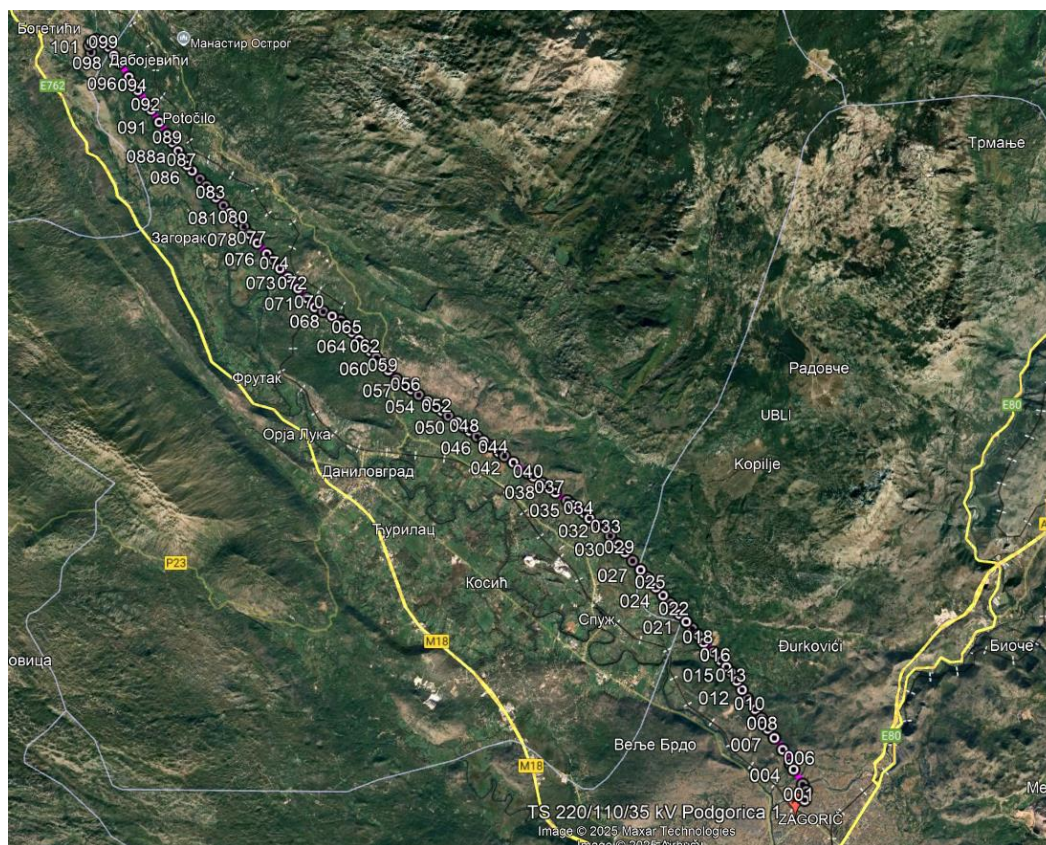
Različiti tokovi snaga često dovode do povećane snage na navedenom dalekovodu, posebno u smjeru istok - zapad, odnosno tokom tranzita električne energije iz pravca Albanije i Kosova. S obzirom na to da je prenosni sistem Crne Gore u značajnoj mjeri tranzitnog karaktera, ovakvi prekogranični tokovi dodatno opterećuju ključne nadzemne vodove i smanjuju raspoložive rezerve prenosnog kapaciteta. Primjena dinamičke metode određivanja strujne opteretivosti, uz povoljne vremenske uslove hlađenja provodnika, mogla bi ublažiti istaknuti problem i omogućiti sigurnije i efikasnije upravljanje povećanim opterećenjima tokom perioda intenzivnih tranzitnih tokova.



Slika 4.2. Trasa 400 kV dalekovoda Podgorica 2 - Ribarevine

Najveća nadmorska visina trase dalekovoda Podgorica 1 - Perućica iznosi oko 220 metara nadmorske visine. Ova 220 kV linija direktno povezuje hidroelektranu Perućica sa trafostanicom Podgorica 1 (slika 4.3.), koja predstavlja snažno čvorište u centralnom dijelu elektroenergetskog sistema Crne Gore. Trafostanica Podgorica 1 je najvažniji naponski čvor iz kojeg se napaja glavni grad i široko gradsko područje, čime ova linija dobija ključnu ulogu u stabilnosti i pouzdanosti napajanja. Pored toga, hidroelektrana Perućica je na 220 kV nivou povezana i sa trafostanicom Trebinje, čime je omogućen interkonektivni prenos električne energije prema susjednim sistemima.

Opravdanost primjene dinamičke metode određivanja strujne opteretivosti na predmetnom dalekovodu proizlazi prije svega iz proizvodne uloge hidroelektrane Perućica. Povećanjem prenosnog kapaciteta omogućilo bi se efikasnije aktiviranje sekundarne i tercijarne rezerve snage, što je od posebnog značaja u režimima balansiranja i podrške sistemu tokom poremećaja. Dodatno, česti su izraženi tokovi snaga u oba smjera, kako zapad - istok, tako i istok - zapad, uslovljeni tranzitnim karakterom crnogorskog prenosnog sistema i potrebom za prekograničnom razmjenom energije. Svi ovi faktori zajedno čine ovaj dalekovod pogodnim kandidatom za implementaciju dinamičkog određivanja opteretivosti provodnika, sa ciljem povećanja iskorišćenja prenosnih kapaciteta.



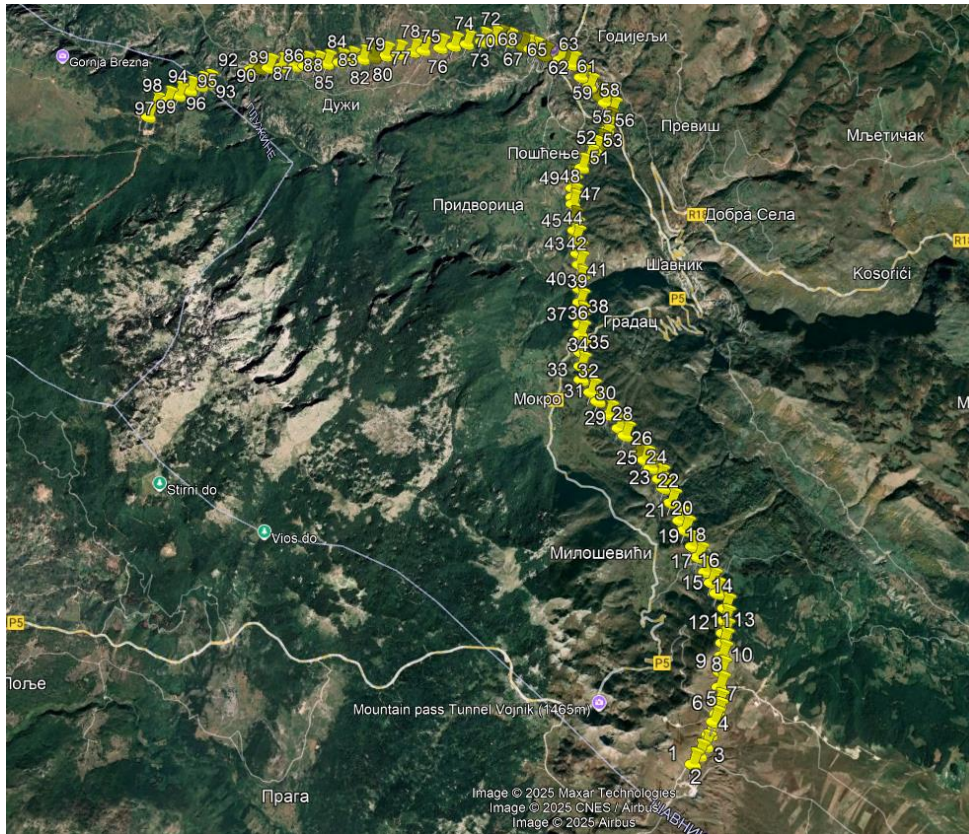
Slika 4.3. Trasa 220 kV dalekovoda Podgorica 1 - Perućica

Za primjenu dinamičke metode određivanja strujne opteretivosti na 110 kV naponskom nivou izabran je dalekovod koji povezuje vjetroelektranu Krnovo sa trafostanicom 110/35 kV Brezna. Kao što je već navedeno, motivacija za razvojem primjene DLR sistema prvenstveno leži u globalnom trendu povećanja proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora. Za razliku od baznih termoelektrana i velikih hidroelektrana, proizvodnja vjetroelektrana karakteriše se značajnom promjenjivošću i manjom predvidljivošću, što otežava planiranje i raspodjelu snage u elektroenergetskom sistemu.

Vjetroelektrane, kao i solarne elektrane, imaju fluktuirajuću proizvodnju zavisno od meteoroloških uslova. Zbog toga je od ključnog značaja da prenosna moć dalekovoda koji ih povezuju s mrežom bude dovoljna i u svakom trenutku prilagođena trenutnom nivou proizvodnje, kako bi proizvedena energija mogla biti plasirana do krajnjih potrošača bez ograničenja. Dinamičko određivanje opteretivosti omogućava da se u realnom vremenu, u zavisnosti od stvarnih meteoroloških uslova, poveća iskorišćenje kapaciteta provodnika u odnosu na konzervativne statičke vrijednosti.

Veći prenosni kapacitet poveznog dalekovoda vjetroelektrane sa trafostanicom značajno smanjuje, a u određenim uslovima može i u potpunosti eliminisati pojavu neisporučene električne energije, čime se postiže bolje iskorišćenje kapaciteta postrojenja i doprinosi održivosti i efikasnosti energetskeg sistema.

Kao što je slučaj kod prethodnih naponskih nivoa, razmatrani 110 kV dalekovod sa svojim stubnim mjestima je preko aplikacije “*GooglePro Earth*” ucrtan duž cijele trase, kako je prikazano na slici 4.4., u cilju određivanja najveće nadmorske visine na kojoj se nalazi. Najveća nadmorska visina duž prostiranja ovoga dalekovoda iznosi 1550 mnv.



Slika 4.4. Trasa 110 kV dalekovoda Krnovo - Brezna

Tabela 4.1. Tehnički podaci provodnika različitih poprečnih presjeka

Parametri	240/40mm	360/57mm	490/65mm
Naponski nivo [kV]	110	220	400
Najveća nadmorska visina [mnv]	1550	220	1500
Presjek provodnika [m]	$21.9 \cdot 10^{-3}$	$26.6 \cdot 10^{-3}$	$30.6 \cdot 10^{-3}$
Presjek aluminijskog dijela [m ²]	$243.1 \cdot 10^{-6}$	$360.22 \cdot 10^{-6}$	$490.28 \cdot 10^{-6}$
Presjek čeličnog dijela [m ²]	$39.5 \cdot 10^{-6}$	$57.33 \cdot 10^{-6}$	$63.55 \cdot 10^{-6}$
Gustina aluminijuma [kg/m ³]	2703	2703	2703
Gustina čelika [kg/m ³]	7780	7780	7780
Specifični toplotni kapacitet aluminijskog dijela ACSR provodnika pri 20°C [J/kg·°C]	897	897	897

Specifični toplotni kapacitet čeličnog dijela ACSR provodnika pri 20 °C [J/kg·°C]	481	481	481
Temperaturni koeficijent promjene specifičnog toplotnog kapaciteta aluminijskog dijela provodnika ACSR [1/ °C]	$3.8 \cdot 10^{-4}$	$3.8 \cdot 10^{-4}$	$3.8 \cdot 10^{-4}$
Temperaturni koeficijent promjene specifičnog toplotnog kapaciteta čeličnog dijela provodnika ACSR [1/ °C]	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$
R_{ac75} [Ω/m]	$1.4633 \cdot 10^{-4}$	$1.0178 \cdot 10^{-4}$	$7.6745 \cdot 10^{-5}$
R_{ac25} [Ω/m]	$1.2216 \cdot 10^{-4}$	$8.4963 \cdot 10^{-5}$	$6.4076 \cdot 10^{-5}$
R_{ac} pri T_{max} [Ω/m]	$1.4875 \cdot 10^{-4}$	$1.0346 \cdot 10^{-4}$	$7.8012 \cdot 10^{-5}$
Koeficijent apsorpcije	0.9	0.9	0.9
Koeficijent emisivosti	0.9	0.9	0.9
Maksimalna temperatura provodnika T_{max} [°C]	80	80	80

4.1. Meteorološki uslovi upotrebljeni u statičkoj metodi

Prema IEEE 738 preporuka je da se prenosni kapacitet dalekovoda određuje uzimanjem u obzir najgorih vremenskih uslova. Preporučuje se da se pretpostavi za ambijentalnu temperaturu 40 °C, brzinu vjetra 0.6 m/s, sunčevu insolaciju od 1000 W/m² pri temperaturi provodnika do 100 °C [1] i ugao smjera vjetra 90 °, odnosno normalan na pravac pružanja dalekovoda. Ti podaci su konstanti prilikom proračuna prenosnog kapaciteta.

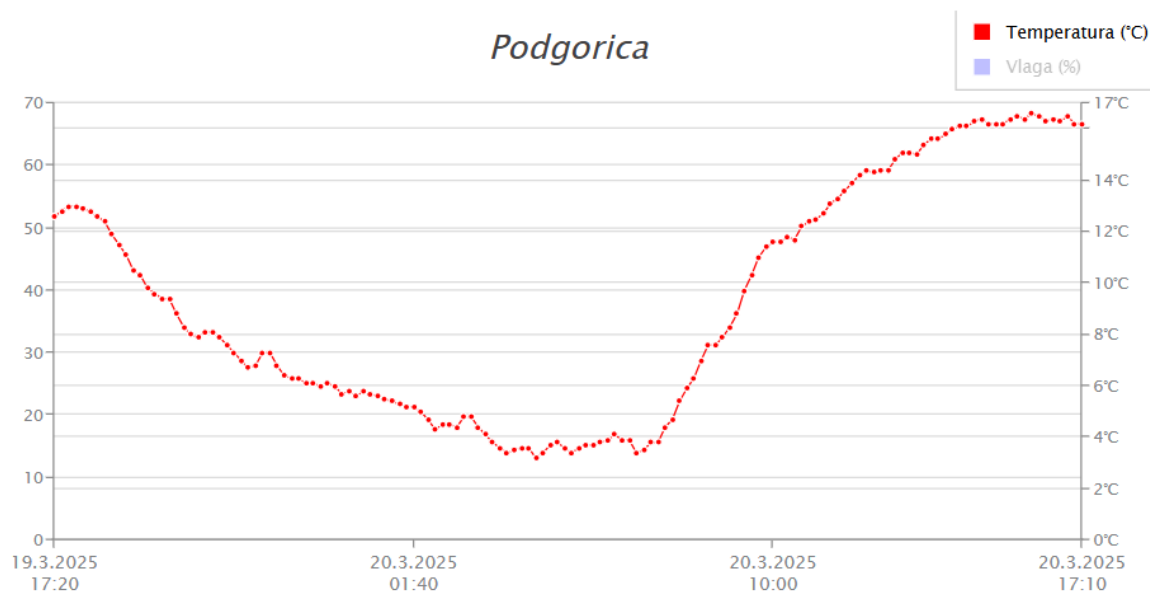
4.2. Meteorološki uslovi upotrebljeni u dinamičkoj metodi

U okviru metodologije dinamičkog određivanja kapaciteta primenjuje se pristup koji koristi realne meteorološke podatke prikupljene sa Zavoda za hidrometeorologiju i seizmologiju Crne Gore (ZHMS). Konkretno, koriste se podaci sa meteoroloških stanica koje su geografski najbliže krajnjim tačkama nadzemnog voda, tj. trafostanicama koje vod

povezuje. Na osnovu tako prikupljenih lokalizovanih meteoroloških podataka (temperatura okoline, brzina i smjera vjetra i intenziteta sunčevog zračenja) nezavisno se računaju maksimalno dozvoljene struje za svaku stranu voda. Kao konačna trenutna vrijednost dozvoljene struje uzima se manja od ove dvije, čime se ide na stranu sigurnosti. Meteorološki podaci biće prikazani za 24-časovni period za dva dana. Cilj je prikazati rezultate i njihove varijacije u odnosu na različite vremenske uslove.

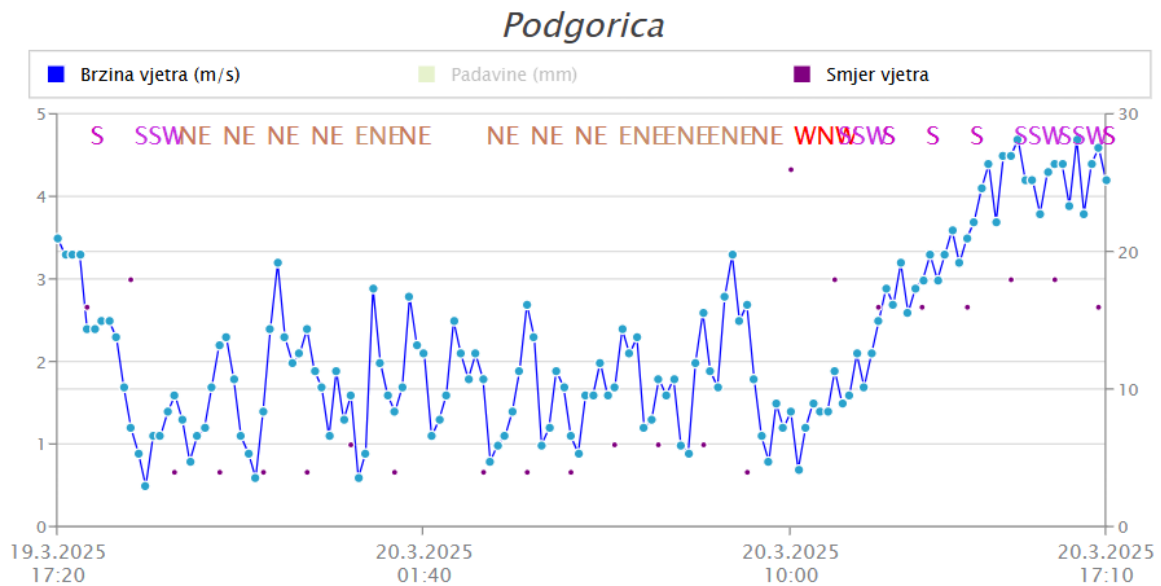
Za dalekovod 400 kV Podgorica 2 - Ribarevine korišćeni su podaci iz meteoroloških stanica Podgorica i Bijelo Polje za 2025. godinu.

Na slici 4.2.1. prikazana je dnevna temperatura za jedan proljećni dan 19.-20.03.2025.godine. Sa slike se može uočiti očekivano promjena dnevne temperatura od 17.20 h dana 19.03 do 17.10 h dana 20.03. Maksimalna temperatura za ovaj period je zabilježena u 17.10 h dana 20.03. u iznosu od 17 °C, a minimalna 3 °C oko 3 h dana 20.03.



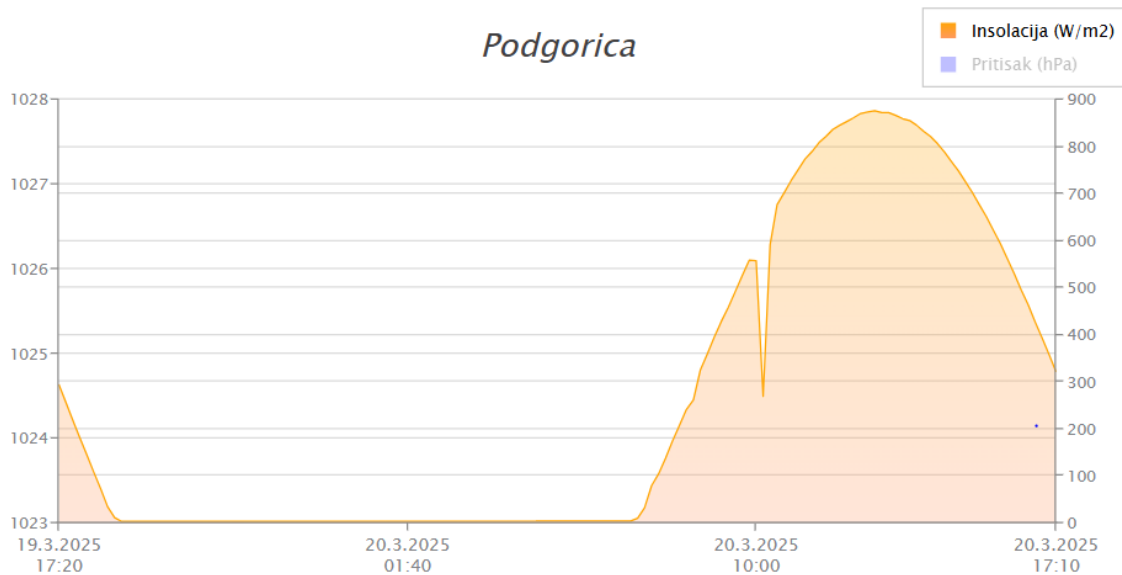
Slika 4.2.1. Meteorološka stanica Podgorica, temperatura za 19.03. - 20.03.

Na slici 4.2.2. za isti vremenski period kao za prethodnu sliku, predstavljena je brzina vjetra za meteorološku stanicu Podgorica. Najveća brzina vjetra zabilježena je u 17 h 20.03., a najmanja vrijednost dan ranije oko 19 h.



Slika 4.2.2. Meteorološka stanica Podgorica, brzina vjetra za 19.03. - 20.03.

Slika 4.2.3. je slikovni prikaz globalne sunčeve insolacije u Podgorici u periodu od 19.03.2025. - 20.03.2025.godine. Maksimalna vrijednost u ovom vremenskom intervalu iznosi 873 W/m^2 .

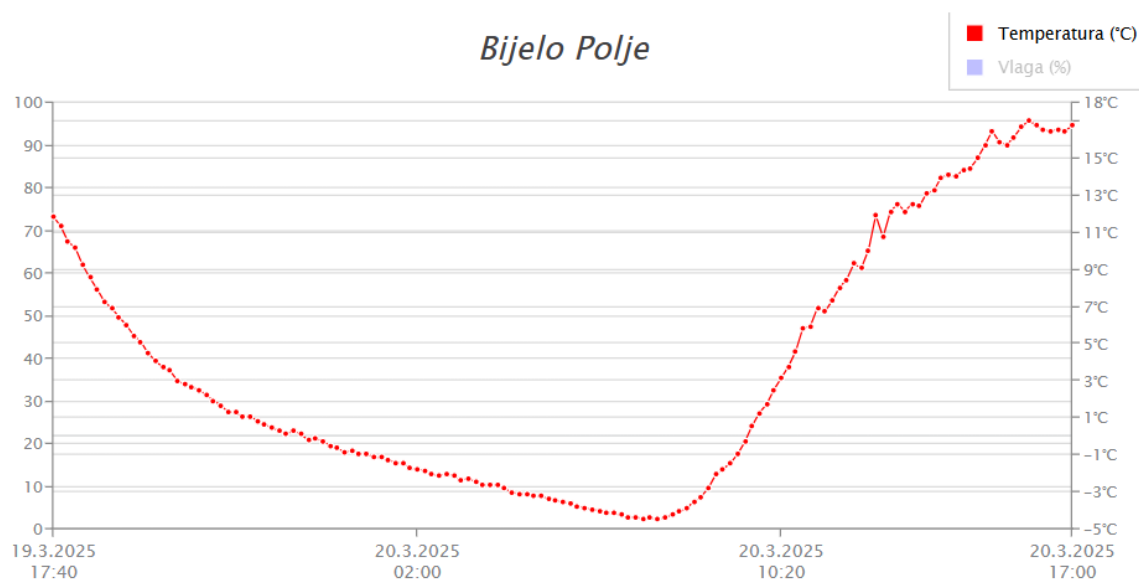


Slika 4.2.3. Meteorološka stanica Podgorica, sunčeva insolacija za 19.03. - 20.03.

Tabela 4.2.1. Meteorološki podaci za Podgoricu za 19.03. - 20.03.

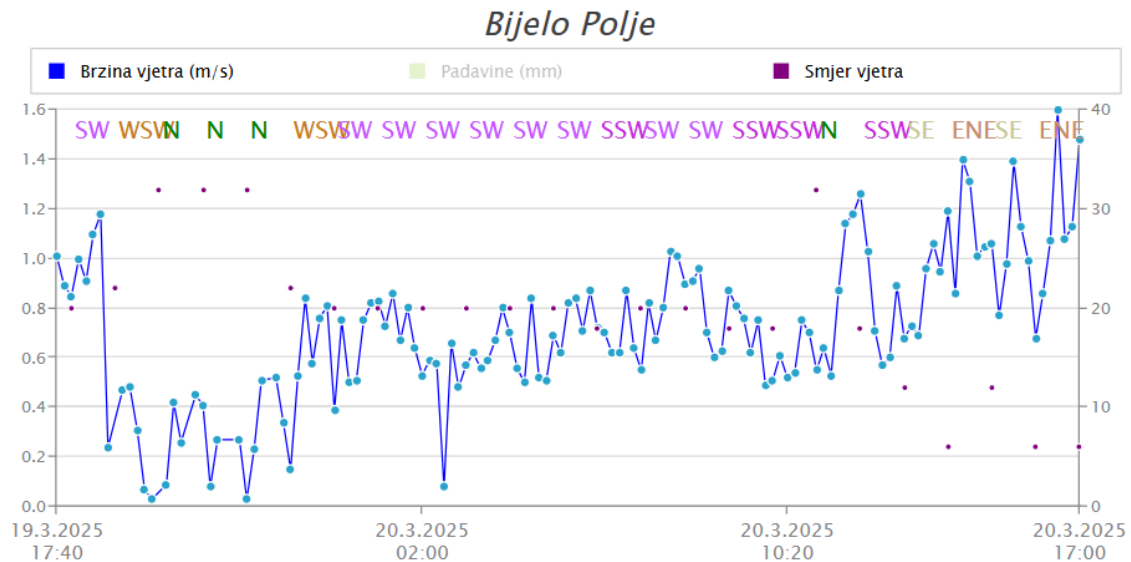
Sat[h]	Temperatura[°C]	Vjetar[m/s]	Insolacija[W/m2]
18	11.1	2.4	146
19	9.4	1.2	0
20	8.1	1.6	0
21	6.8	2.2	0
22	6.8	1.4	0
23	6.3	2.4	0
0	5.7	1.6	0
1	5.5	1.4	0
2	4.7	1.3	0
3	4.8	1.8	0
4	3.5	2.7	0
5	3.8	1.1	0
6	3.8	1.7	0
7	3.5	1.8	0
8	5.9	2.6	175
9	8.3	2.7	396
10	11.6	1.4	558
11	12.5	1.9	751
12	14.2	2.5	846
13	15.1	3	873
14	15.8	3.5	833
15	16.2	4.5	726
16	16.2	4.4	563
17	15.8	4.6	359

Na slici 4.2.4. predstavljena je temperatura za prvi razmatrani vremenski period za meteorološku stanicu Bijelo Polje, samim tim i trafostanicu Ribarevine. Sa slike se može primijetiti velika oscilacija u temperaturi, od minimalne zabilježene od oko -4 °C do 17 °C.



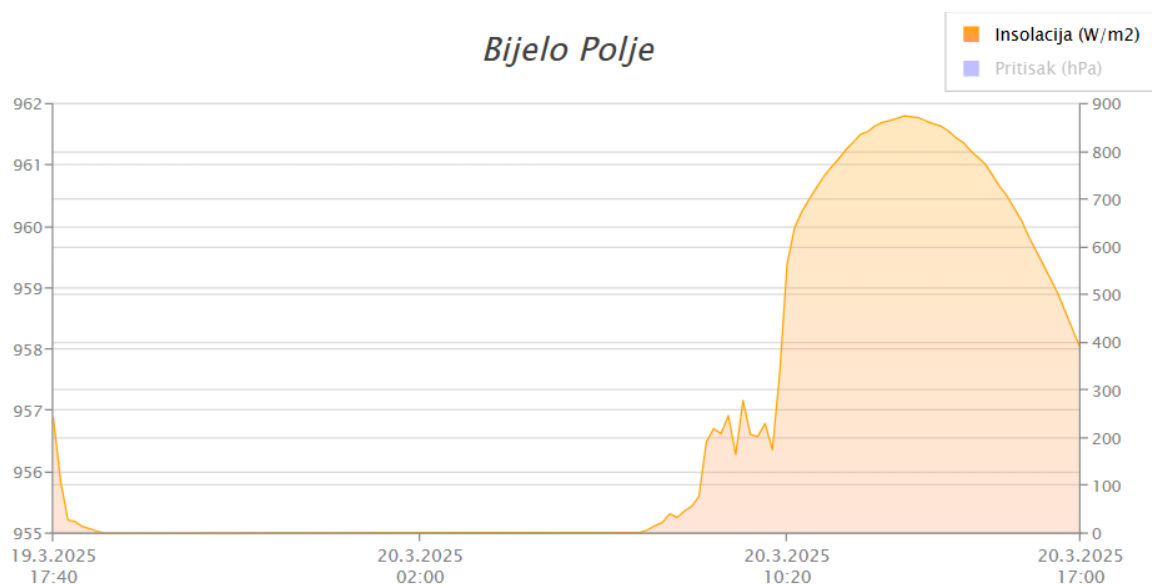
Slika 4.2.4. Meteorološka stanica Bijelo Polje (TS Ribarevine), temperatura za 19.03. - 20.03.

Slika 4.2.5. odnosi se takođe na meteorološku stanicu Bijelo Polje i predstavlja vrijednosti za svaki sat ostvarenih brzina vjetra u periodu od 19.03. do 20.03.2025.godine. Za razliku od temperature u ovom periodu, oscilacija vjetra je manja i nalazi se u opsegu od 0 m/s do 1.6 m/s.



Slika 4.2.5. Meteorološka stanica Bijelo Polje, brzina vjetra za 19.03.-20.03.

Sunčeva insolacija za prvi posmatrani vremenski period u Bijelom Polju ima opseg vrijednosti od 0 W/m² do vrijednosti od skoro 900 W/m², slika 4.2.6.



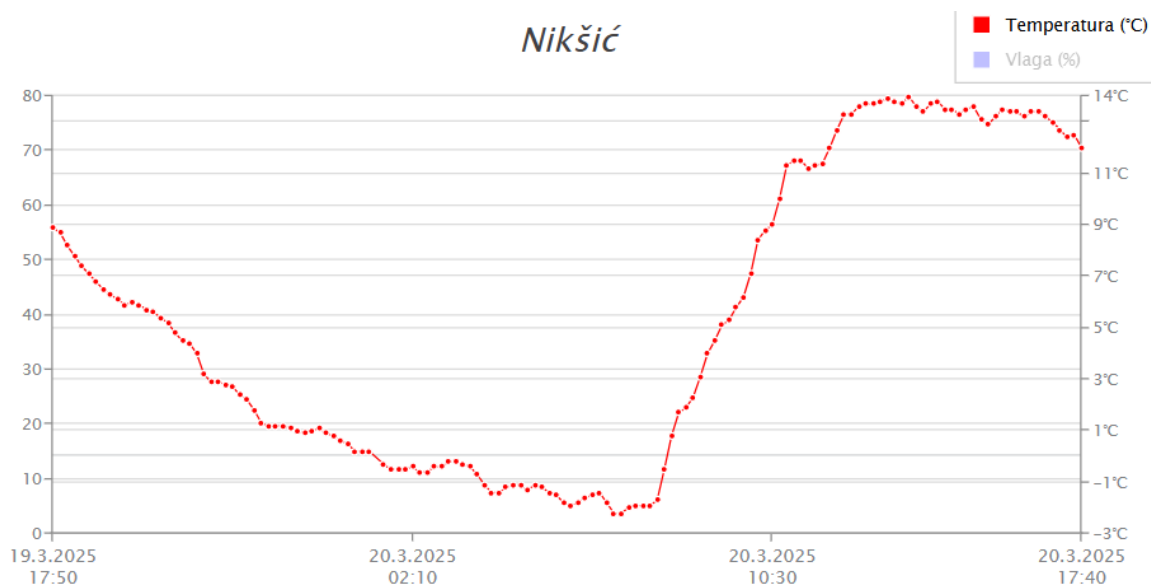
Slika 4.2.6. Meteorološka stanica Bijelo Polje, sunčeva insolacija 19.03. - 20.03.

Tabela 4.2.2. Meteorološki podaci za Bijelo Polje za 19.03. - 20.03.

Sat[h]	Temperatura[°C]	Vjetar[m/s]	Insolacija[W/m2]
18	15.81	1.31	30
19	6.93	0.5	0
20	4.1	0	0
21	2.54	0.4	0
22	1.06	0	0
23	0.16	0.15	0
0	-0.5	0.4	0
1	-1.1	0.8	0
2	-1.75	0.5	0
3	-2.33	0.57	0
4	-2.77	0.7	0
5	-3.34	0.69	0
6	-3.92	0.72	0
7	-4.32	0.55	0
8	-4.04	0.9	48
9	-1.73	0.9	247
10	1.75	0.5	176
11	5.95	0.55	725
12	9.33	1.26	837
13	12.57	0.68	876
14	14	1.19	845
15	15.73	1.06	751
16	17.05	0.68	590
17	16.5	1.48	390

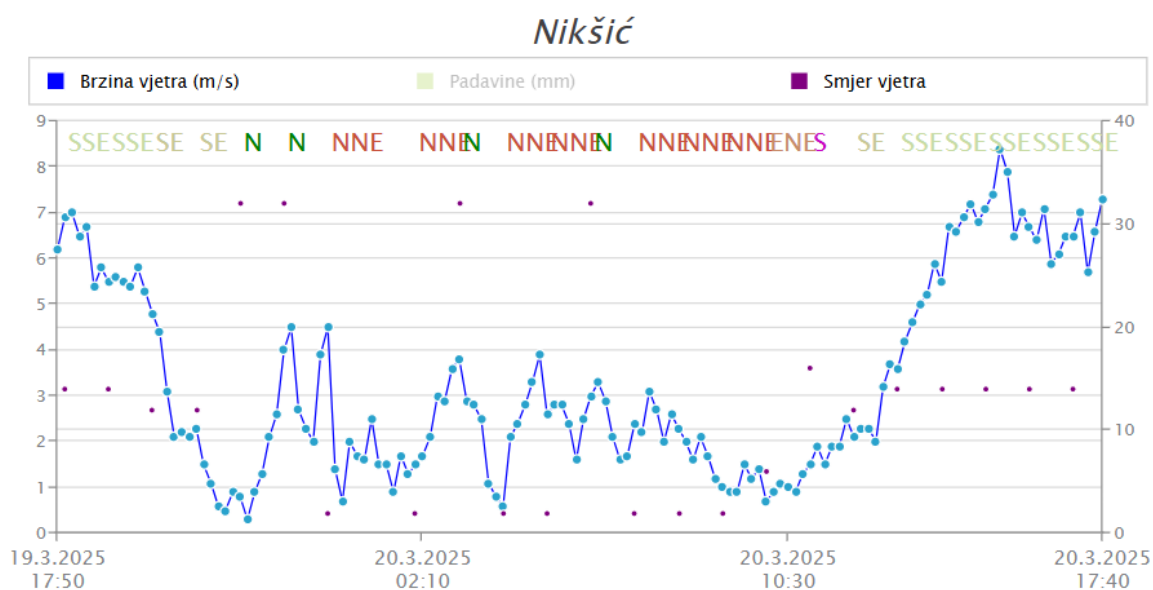
Za analizu prenosnog kapaciteta 220 kV dalekovoda Podgorica 1 - Perućica korišćeni su podaci iz meteoroloških stanica Podgorica i Nikšić.

Slikovni prikaz vrijednosti temperature za vremenski period 19.-20.03.2025.godine za meteorološku stanicu Nikšić odnosno trafostanicu Perućica prikazan je na slici 4.2.7. Minimalna vrijednost ostvarena je u 7 h 20.03. u iznosu od -2.2.°C, a istog dana i maksimalna vrijednost u 13 h u iznosu od 13.8 °C.



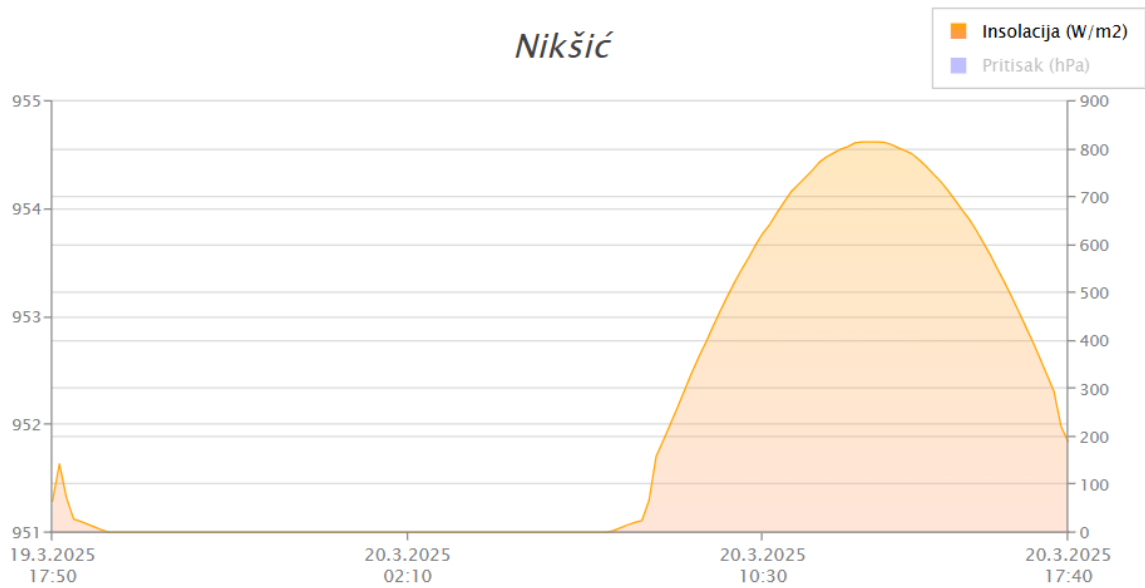
Slika 4.2.7. Meteorološka stanica Nikšić (TS Perućica), temperatura za 19.03. - 20.03.

Varijacija vjetra na teritoriji Nikšića za prvi analizirani period je velika. Kreće se od 0.6 m/s do čak 8.1 m/s. Slikovni prikaz dat je na slici 4.2.8.



Slika 4.2.8. Meteorološka stanica Nikšić, brzina vjetra za 19.03. - 20.03.

Sunčeva insolacija za 19.03.-20.03. u Nikšiću se kreće od 0 W/m² do 816 W/m² koliko je ostvareno u 13 h 20.03., slika 4.2.9.

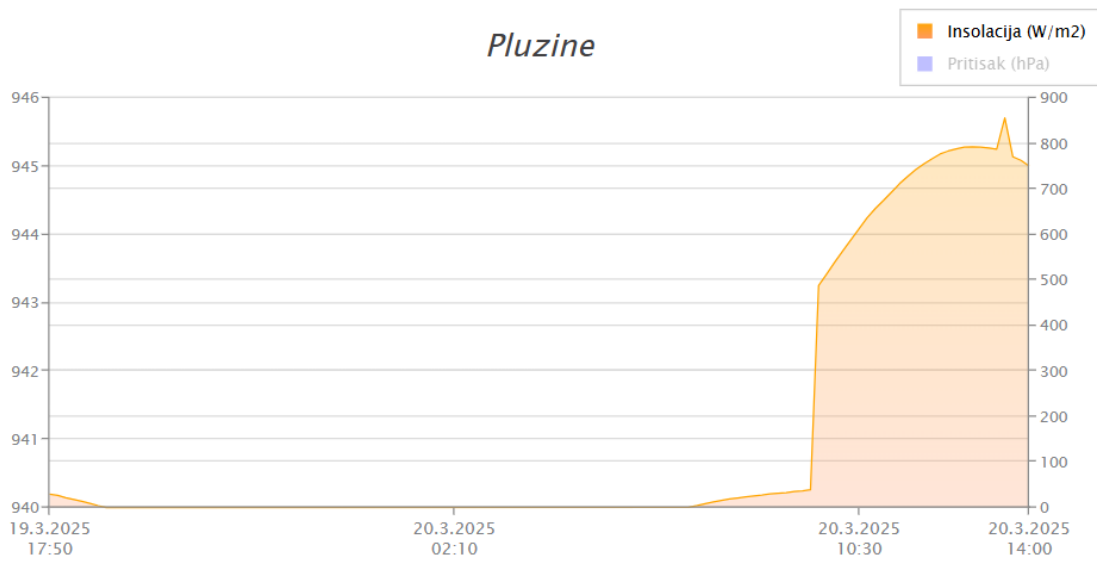


Slika 4.2.9. Meterološka stanica Nikšić, sunčeva insolacija za 19.03. - 20.03.

Tabela 4.2.3. Meteorološki podaci za Nikšić za 19.03. - 20.03.

Sat[h]	Temperatura[°C]	Vjetar[m/s]	Insolacija[W/m2]
18	11.6	6.2	0
19	9.4	5	0
20	5.3	4.8	0
21	4.4	2.3	0
22	2.7	0.8	0
23	1.2	4	0
0	1.1	4.5	0
1	0.2	2.5	0
2	-0.5	1.5	0
3	-0.2	3.8	0
4	-1.4	0.6	0
5	-1.1	2.6	0
6	-1.8	3	0
7	-2.2	2.4	0
8	-0.5	2.3	160
9	4	1	357
10	7.1	0.7	549
11	11.5	1.5	690
12	12.7	2.1	785
13	13.8	3.6	816
14	13.4	5.5	791
15	13.5	7.1	696
16	13.4	6.7	365
17	13	6.5	172

Sunčeva insolacija tokom prvog analiziranog vremenskog perioda u Plužinama data je na slici 4.2.12.



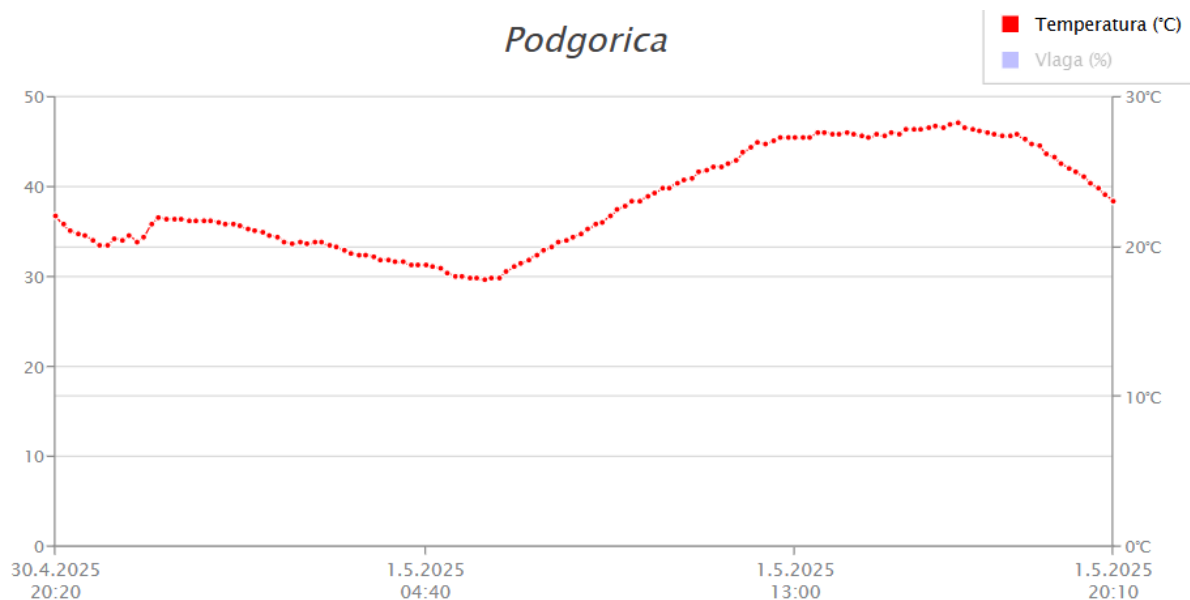
Slika 4.2.12. Meterološka stanica Plužine, sunčeva insolacija za 19.03. - 20.03.

Tabela 4.2.4. Meteorološki podaci za Plužine za 19.03.-20.03.

Sat[h]	Temperatura[°C]	Vjetar[m/s]	Insolacija[W/m2]
18	13.51	2.13	0
19	11.85	1.24	0
20	6.33	2.67	0
21	3.9	0.74	0
22	2.24	0.54	0
23	1.31	0.51	0
0	0	0.61	0
1	0	0.18	0
2	0	0.46	0
3	-1.37	0.42	0
4	-1.7	0.57	0
5	-1.95	0.51	0
6	-2.7	0.4	0
7	-2.8	0.32	0
8	-2.7	0.47	22
9	-2	0.72	33
10	2.4	0.55	539
11	5	0.79	674
12	8	0.22	792
13	10.4	1.63	750
14	12.75	1.23	750
15	14.94	1.94	652
16	15.74	1.57	505
17	14.61	1.81	41

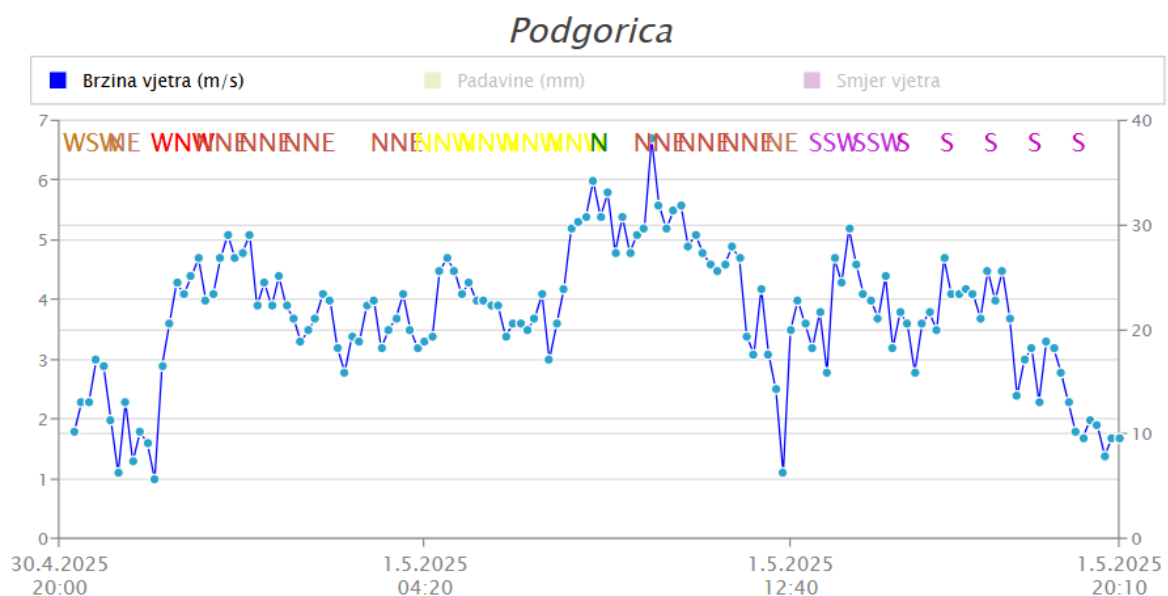
Za primjenu dinamičke metode na drugi dan izabran je topliji 24-časovni period, 30.04. - 01.05.2025.godine.

Drugi analizirani vremenski period u Podgorici karakterišu veće vrijednosti ambijentalne temperature u odnosu na prvi. Kako se na slici 4.2.13. može vidjeti temperatura dostiže vrijednost od 28 °C.



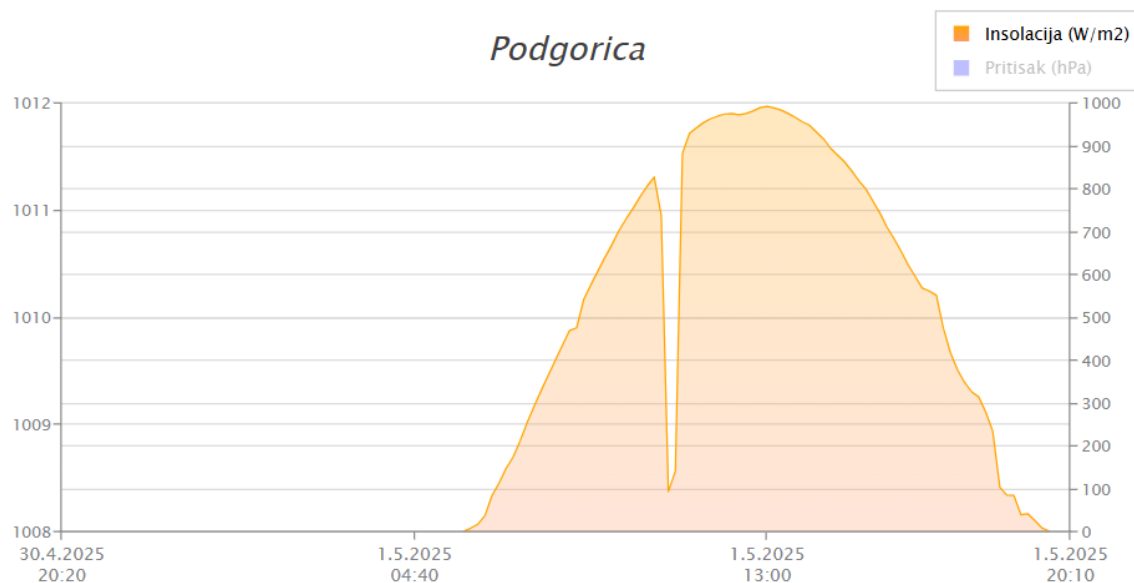
Slika 4.2.13. Meteorološka stanica Podgorica, temperatura za 30.04.-01.05.

Iako je drugi period topliji, ipak ne znači da nije vjetrovit kako se i vidi na slici 4.2.14. U Podgorici od 30.04. u 20 h do 01.05.2025. u 20:10 h vrijednost brzine vjetra varira od 1 m/s do 6.5 m/s.



Slika 4.2.14. Meteorološka stanica Podgorica, brzina vjetra za 30.04. - 01.05.

Slika 4.2.15. predstavlja vrijednosti sunčeve insolacije u Podgorici od 30.04. do 01.05.2025. Dostiže maksimalnu vrijednost od skoro 1000 W/m² u 13 h. Takođe može se primijetiti i trenutak oblačnog vremena oko 11 h.

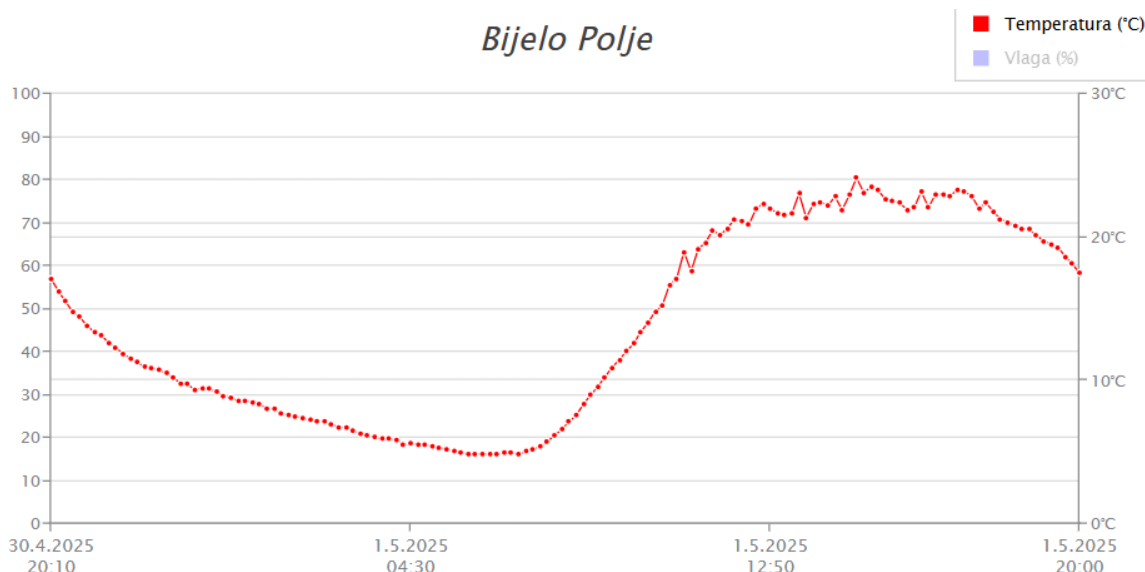


Slika 4.2.15. Meteorološka stanica Podgorica, sunčeva insolacija za 30.04. - 01.05.

Tabela 4.2.5. Meteorološki podaci za Podgoricu za 30.04. - 01.05.

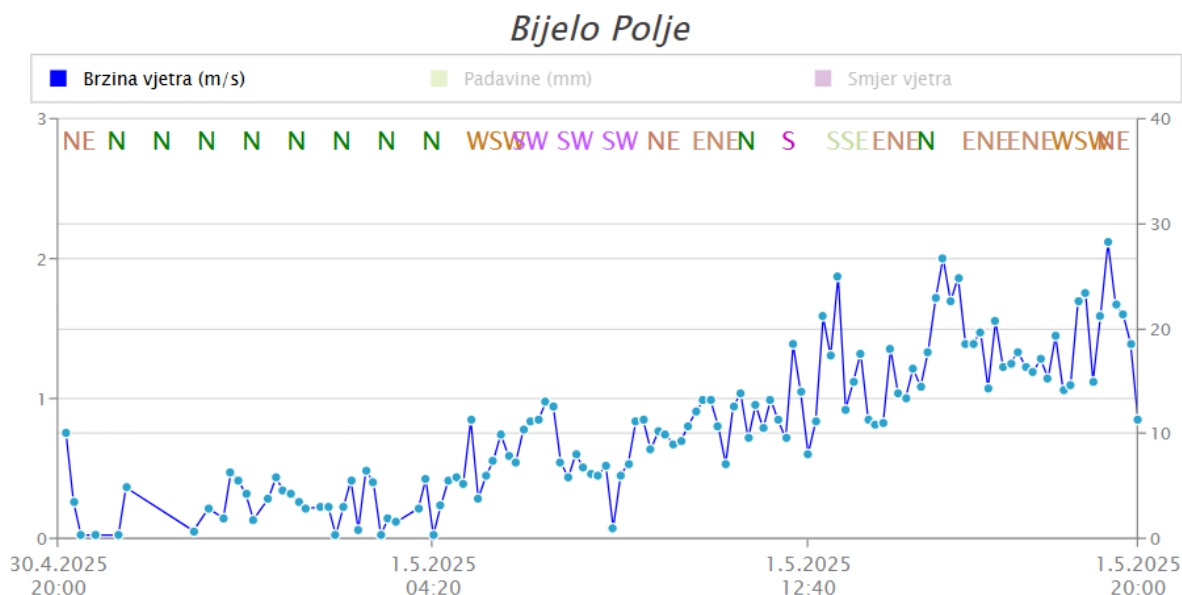
Sat[h]	Temperatura[°C]	Vjetar[m/s]	Insolacija[W/m2]
21	20.3	2.9	0
22	20.8	1.6	0
23	21.9	4.4	0
0	21.7	4.7	0
1	21	4.4	0
2	20.2	4.1	0
3	19.6	3.9	0
4	19	3.5	0
5	18.6	4.5	0
6	17.8	3.9	10
7	19.2	4.1	176
8	20.7	5.4	402
9	22.5	4.8	609
10	23.9	5.5	783
11	25.1	4.5	884
12	26.7	4.2	976
13	27.3	3.6	994
14	27.6	5.2	950
15	27.4	3.2	843
16	28	3.5	685
17	27.9	3.7	553
18	27.5	3	316
19	25.6	2.3	41
20	23.5	1.7	0

Na slici 4.2.16. predstavljena je temperatura za topliji prolječni dan u Bijelom Polju. Dok za isti dan maksimalna temperatura u Podgorici iznosi 28 °C, u Bijelom Polju je 23 °C.



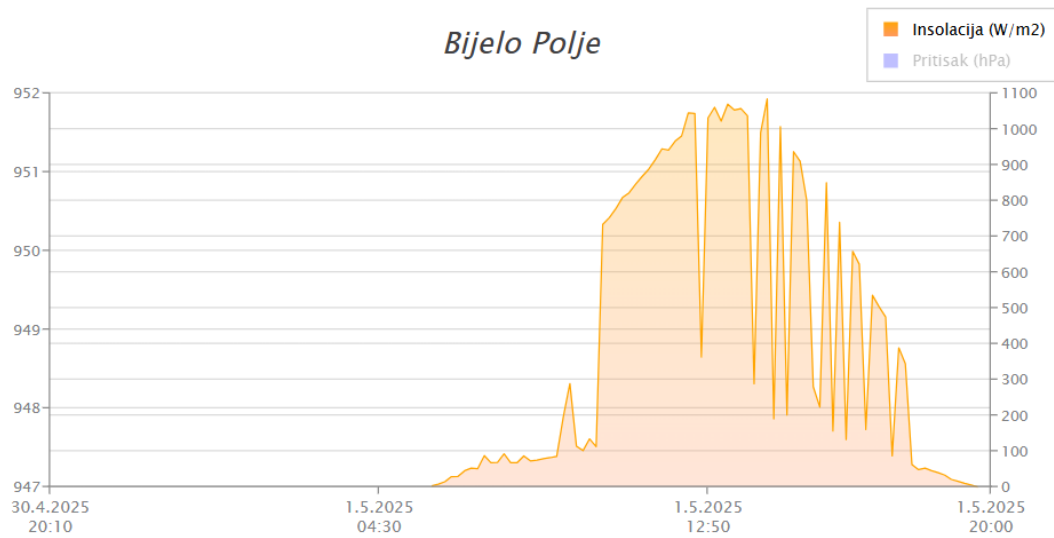
Slika 4.2.16. Meterološka stanica Bijelo Polje, temperatura za 30.04.-01.05.

Za razliku od uslova u Podgorici za prolječni dan 30.04.-01.05. u Bijelom Polju oscilacija vjetra nije velika. Vrijednost brzine vjetra se mijenja od uslova mirnog vazduha do 2 m/s (slika 4.2.17.).



Slika 4.2.17. Meterološka stanica Bijelo Polje, brzina vjetra 30.04. - 01.05.

Sa slike 4.2.18. primijetno je promjenjivo i oblačno vrijeme tokom 01.05.2025. dana u Bijelom Polju.

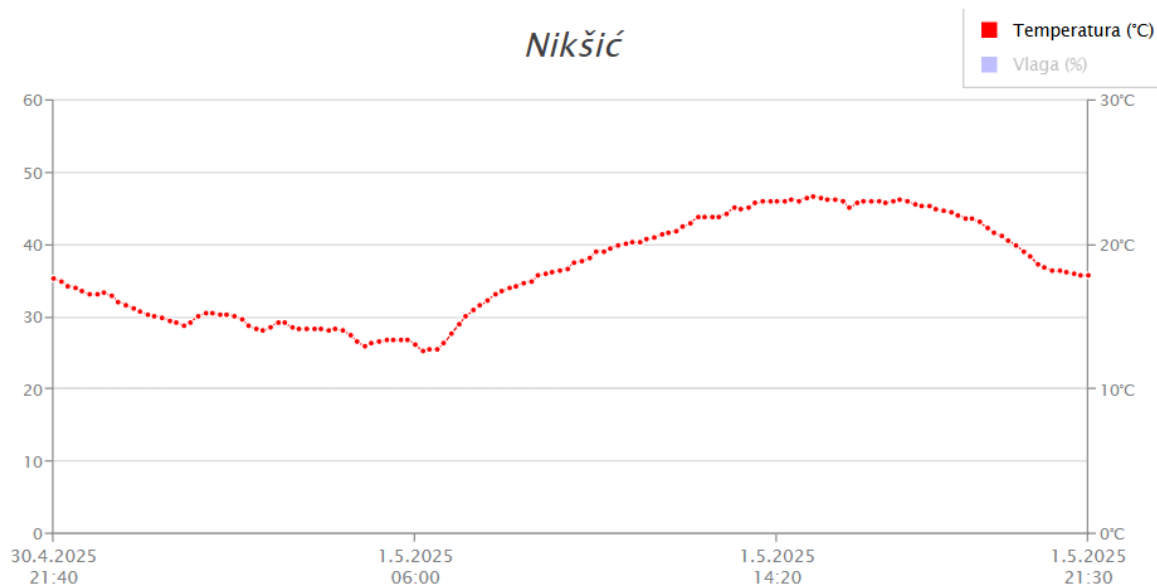


Slika 4.2.18. Meterološka stanica Bijelo Polje, sunčeva insolacija za 30.04. - 01.05.

Tabela 4.2.6. Meteorološki podaci za Bijelo Polje za 30.04. - 01.05.

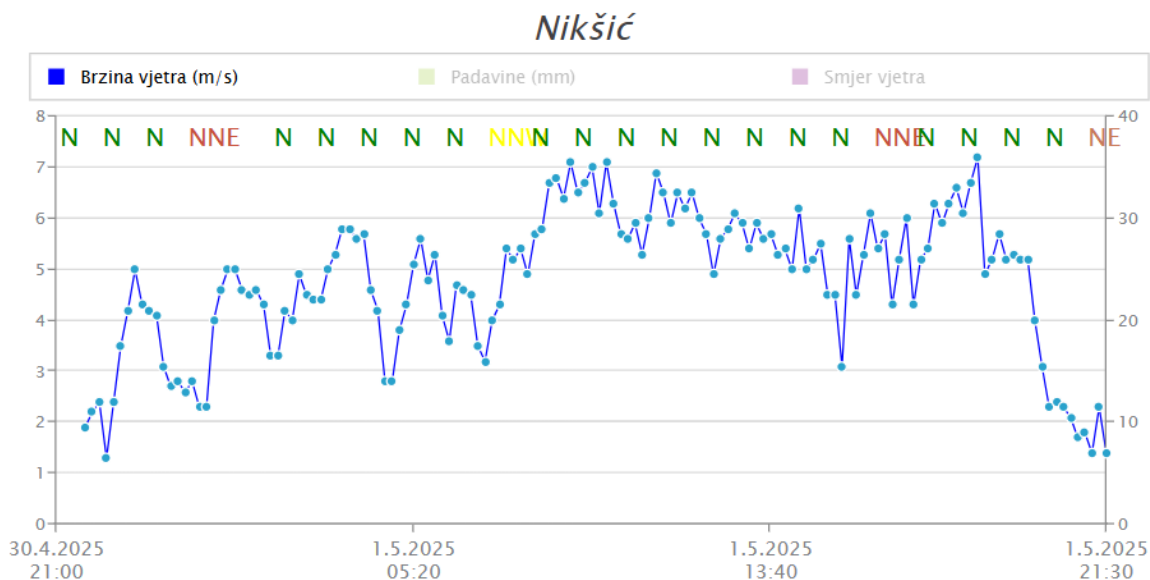
Sat[h]	Temperatura[°C]	Vjetar[m/s]	Insolacija[W/m2]
21	13.81	0.03	0
22	11.55	0.37	0
23	10.22	0.06	0
0	9.24	0.42	0
1	8.33	0.35	0
2	7.36	0.23	0
3	6.71	0.41	0
4	5.92	0.22	0
5	5.42	0.4	0
6	4.9	0.6	8.44
7	4.84	0.95	51.9
8	6.57	0.45	68.65
9	10.25	0.85	86.31
10	14.03	0.81	113
11	17.64	0.95	847
12	21.22	0.85	866.93
13	21.72	1.59	1061
14	22.48	0.86	289.12
15	23.12	1.22	937.63
16	21.93	1.87	157.09
17	22.86	1.23	536.3
18	21.8	1.15	63.09
19	20.15	1.13	0
20	17.49	0.85	0

Ostvarene temperature vazduha u Nikšiću dana 30.04.-01.05.2025.godine date su na slici 4.2.19. Minimalna temperatura ostvarena je oko 6h 01.05. i iznosi 13 °C, a maksimalna u popodnevnim časovima i iznosi 23.3 °C.



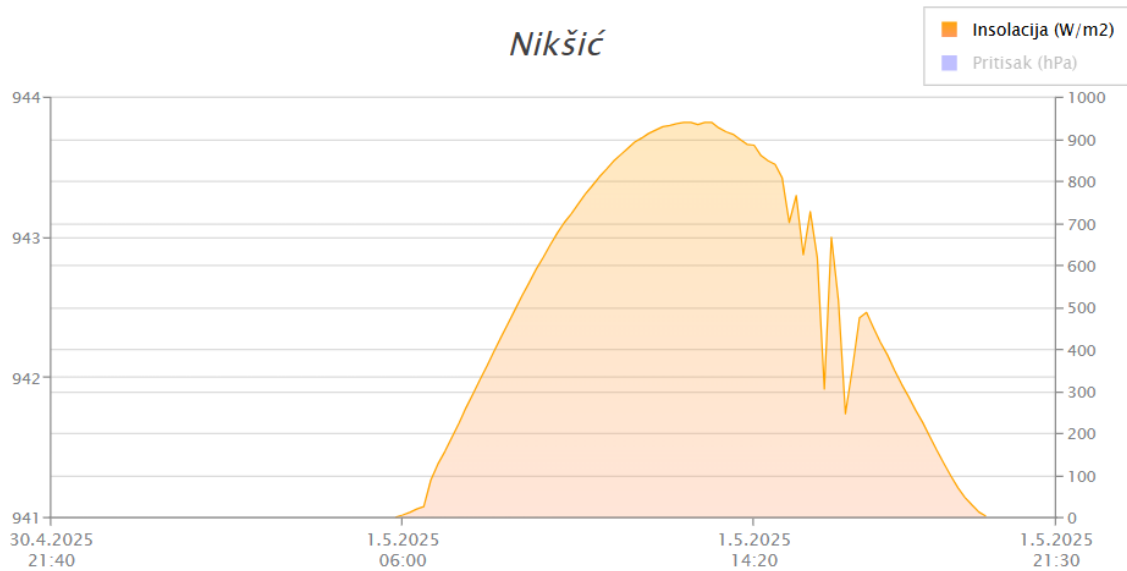
Slika 4.2.19. Meteorološka stanica Nikšić, temperatura za 30.04.-01.05.

Vjetroviti karakter teritorije Nikšića potvrđuje slika 4.2.20. gdje se može vidjeti da brzina vjetra prelazi 7 m/s u jednom dijelu dana.



Slika 4.2.20. Meteorološka stanica Nikšić, brzina vjetra za 30.04. - 01.05.

Sunčeva insolacija za grad Nikšić od 30.04. do 01.05. se kreće od noćnih vrijednosti od 0 W/m² do maksimalne dnevne vrijednosti od 937 W/m² (slika 4.2.21.).

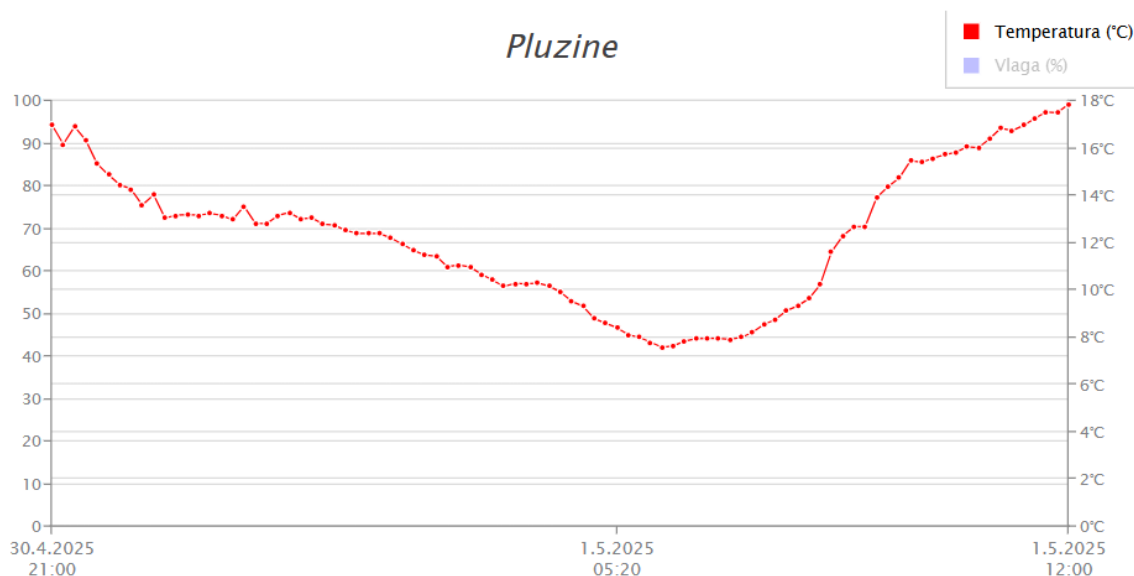


Slika 4.2.21. Meteorološka stanica Nikšić, sunčeva insolacija za 30.04. - 01.05.

Tabela 4.2.7. Meteorološki podaci za Nikšić za 30.04. - 01.05.

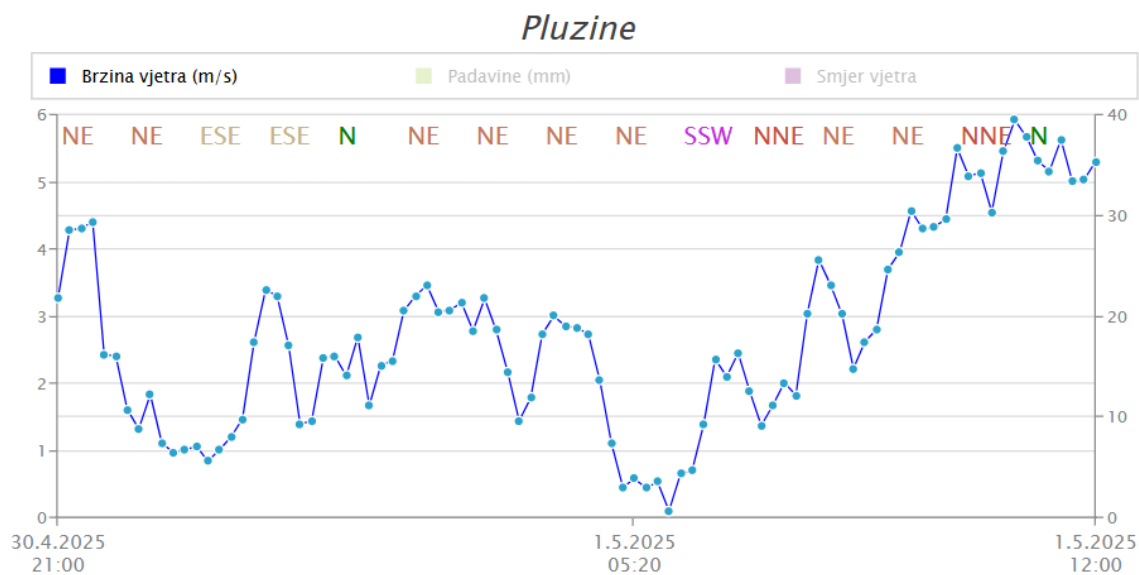
Sat[h]	Temperatura[°C]	Vjetar[m/s]	Insolacija[W/m2]
21	18.1	1.8	0
22	17.2	2.4	0
23	16.5	4.3	0
0	15.1	2.6	0
1	15.1	5	0
2	14.9	3.3	0
3	14.6	4.4	0
4	14.1	5.6	0
5	13.2	3.8	0
6	13.1	4.1	0
7	14.5	3.2	159
8	16.8	4.9	363
9	18	7.1	561
10	19.1	6.3	725
11	20.2	6.9	850
12	21	6	924
13	22	5.9	937
14	23	5.4	902
15	23.3	4.5	810
16	22.6	6.1	308
17	23.1	4.3	490
18	22.5	6.6	289
19	21.6	5.7	101
20	19.6	3.1	0

Prolječni dan 30.04. na 01.05.2025.godine u Plužinama karakteriše vrijednost temperature vazduha od 7 °C do maksimalne temperature od 18 °C.



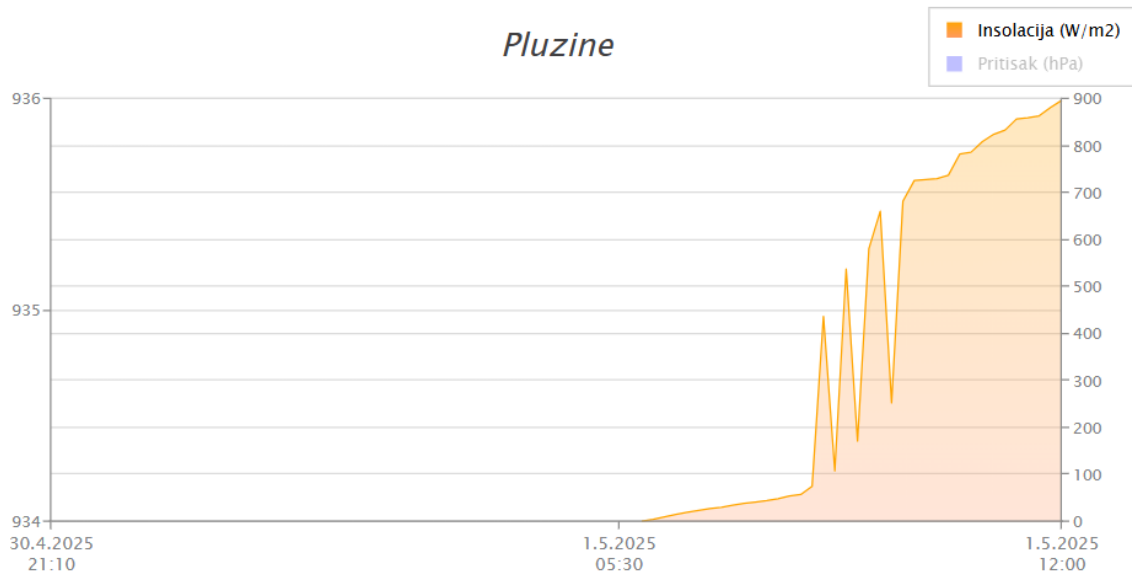
Slika 4.2.22. Meteorološka stanica Plužine, temperatura za 30.04. - 01.05.

U 6h dana 01.05. brzina vjetra u Plužinama je bila 0.66 m/s, dok je za isti dan u 19 h iznosila 6.11 m/s (slika 4.2.23.).



Slika 4.2.23. Meteorološka stanica Plužine, brzina vjetra 30.04. - 01.05.

Globalna sunčeva insolacija za opštinu Plužine u periodu od 30.04. do 01.05.2025. predstavljena je slikom 4.2.24.



Slika 4.2.24. Meteorološka stanica Plužine, sunčeva insolacija za 30.04. - 01.05.

Tabela 4.2.8. Meteorološki podaci za Plužine za 30.04. - 01.05.

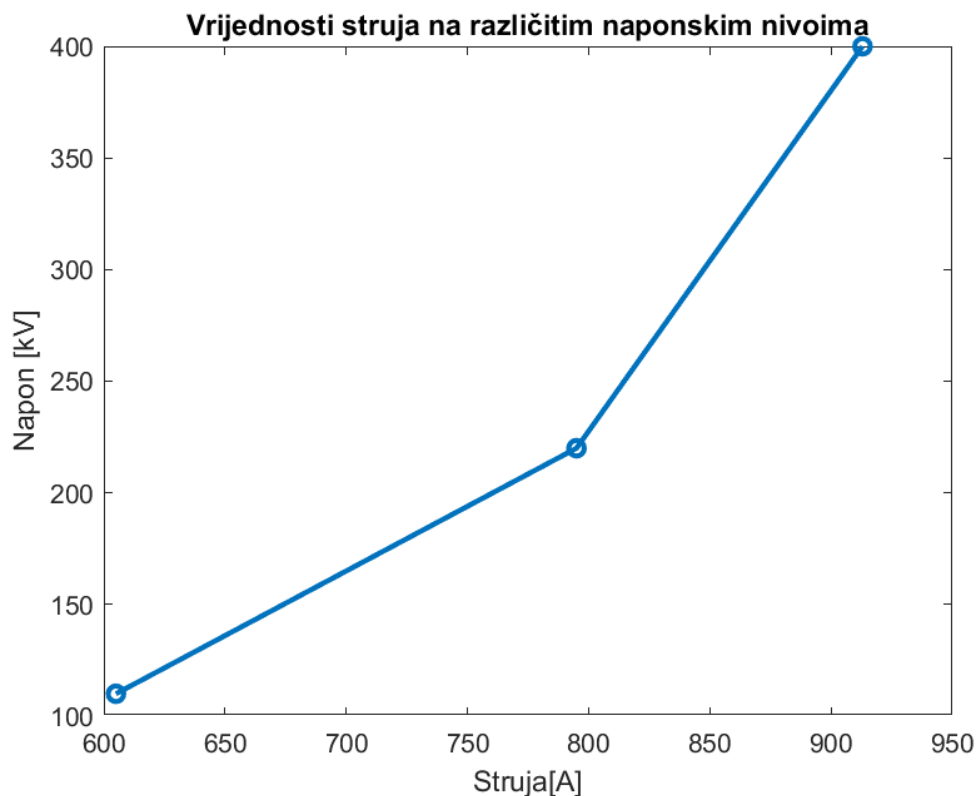
Sat[h]	Temperatura[°C]	Vjetar[m/s]	Insolacija[W/m2]
21	16.64	2.53	0
22	15.27	0.58	0
23	14.23	0.95	0
0	12.84	3.4	0
1	12.8	2.42	0
2	12.21	3.09	0
3	11.07	2.79	0
4	10.31	2.74	0
5	8.8	1.12	0
6	7.56	0.66	0
7	7.93	1.89	31.05
8	9.34	3.85	55.11
9	12.71	3.71	172.14
10	15.59	5.51	729.04
11	16.86	5.68	825.26
12	17.87	5.31	897.64
13	18.88	4.99	913.45
14	20.1	5.78	852.05
15	20.91	4.76	770.58
16	21.6	3.7	636.47
17	21.14	5.19	485.21
18	20.7	4.66	262.16
19	19.88	6.11	83.13
20	17.94	4.1	0

4.3. Rezultati dobijeni upotrebom statičke metode

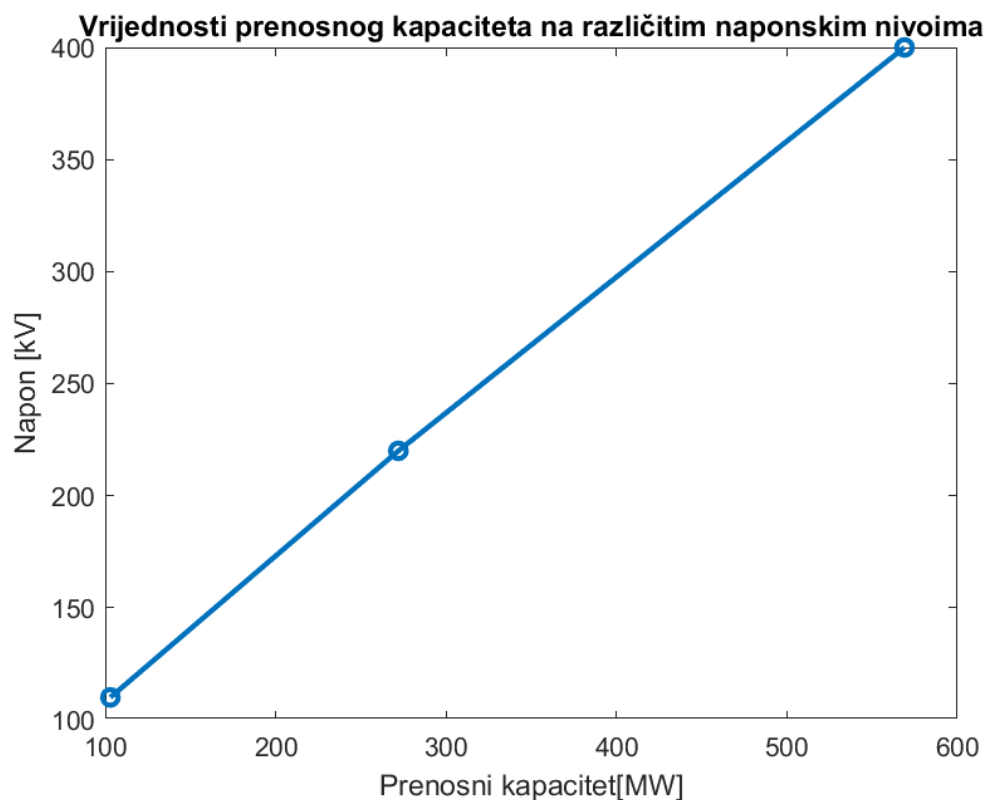
Korišćenjem gore navedenih konstantnih meteoroloških uslova i primjenom proračuna statičkog modela prikazani su rezultati dobijenih struja (slika 4.3.1.) odnosno prenosnih kapaciteta (slika 4.3.2.) analiziranih dalekovoda 400 kV, 220 kV i 110 kV naponskog nivoa.

Tabela 4.3.1. Rezultati dobijeni statičkim modelom

Vrijednosti struje i prenosnog kapaciteta upotrebom statičke metode	400 kV	220 kV	110 kV
[A]	913	795	605
[MW]	569	272	103



Slika 4.3.1. Vrijednosti struja dobijenih statičkom metodom za određeni naponski nivo



Slika 4.3.2. Prenosni kapacitet dobijen statičkom metodom

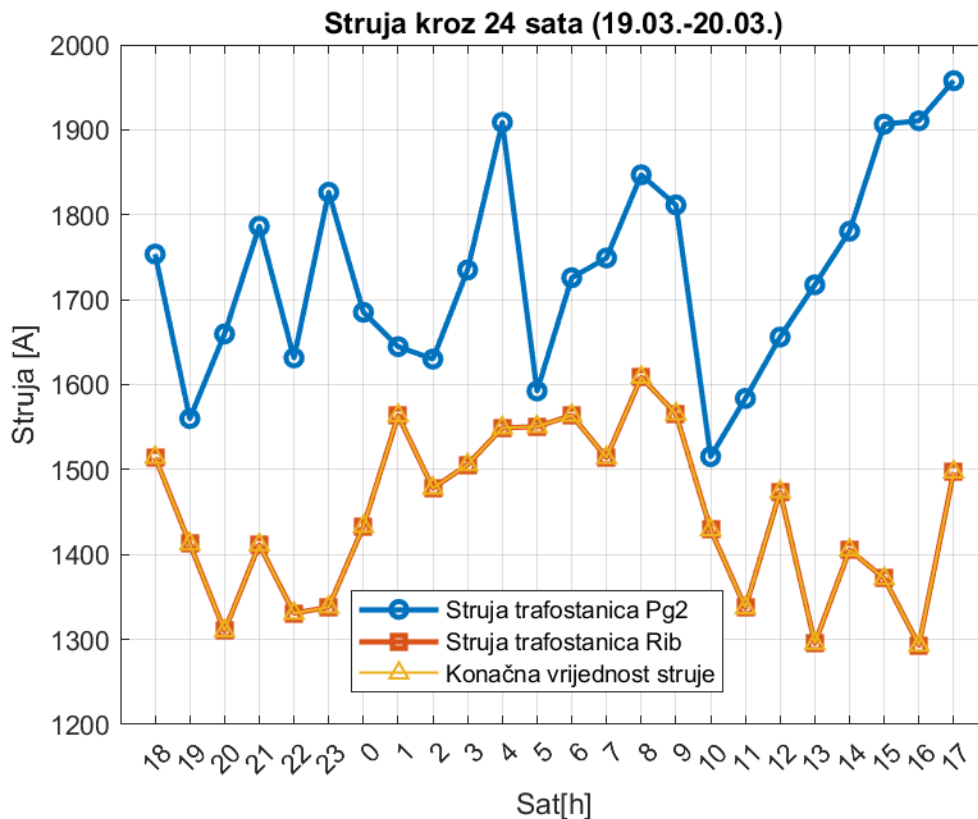
4.4. Rezultati dobijeni upotrebom dinamičkog modela, riješenog Runge - Kutta četvrtog reda metodom

Dinamička metoda je primijenjena za meteorološke parametre za periode 19.03. - 20.03. i 30.04. - 01.05. koji su već prikazani. Dobijeni su rezultati za vrijednost ugla brzine vjetra u odnosu na osu provodnika od 90° , dok će njegov uticaj na struju kroz dalekovod biti prikazan u nekom od sljedećih potpoglavlja.

4.4.1. 400 kV dalekovod Podgorica 2 – Ribarevine

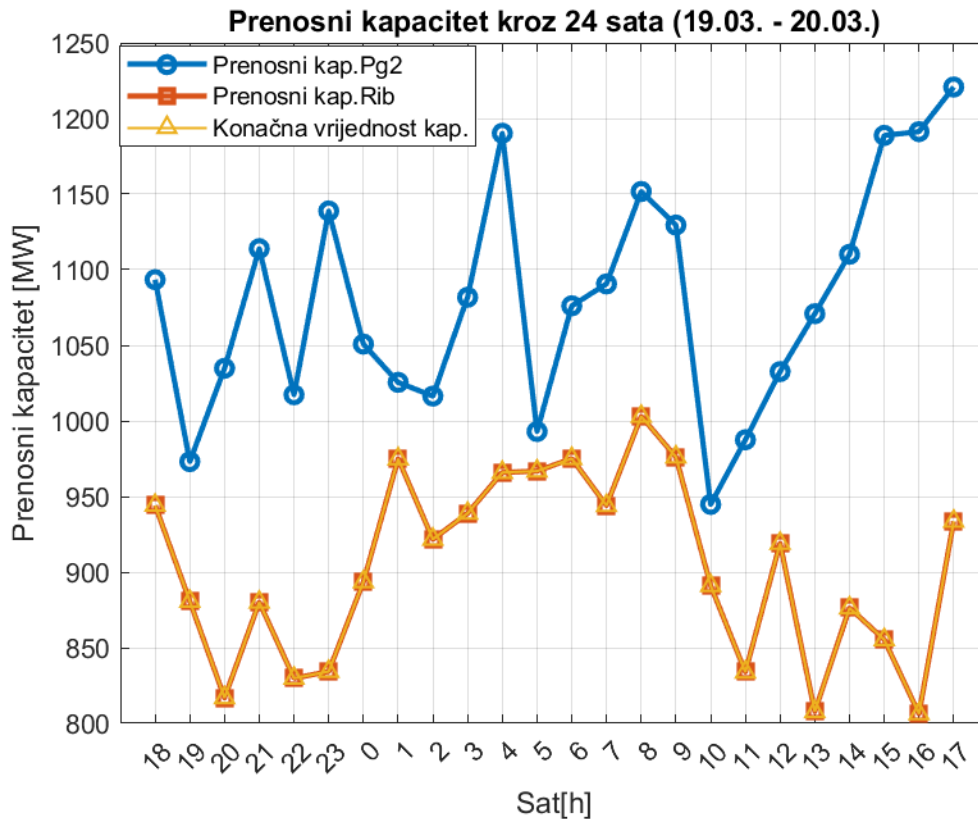
Na slici 4.4.1.1. prikazane su vrijednosti struja za trafostanicu Podgorica 2 plavom bojom, crvenom bojom vrijednost struje dalekovoda Podgorica 2 – Ribarevine u tački trafostanice Ribarevine. Konačna vrijednost struje je manja i prikazana je žutom bojom, što se u ovom slučaju u potpunosti podudara sa vrijednosti struje u Ribarevinama. Za navedeni analizirani period, struja u Podgorici 2 varira u opsegu od 1500 A do 1950 A, što je 65 % do čak 113 % veće od vrijednosti dobijene statičkom metodom, koja iznosi 913 A. Međutim,

konačna vrijednost struje nalazi se u opsegu od 1300 A do 1600A, a to je povećanje u odnosu na konstantnu vrijednost od 42 % do 75 %. Na grafiku može se primijetiti znatna razlika između struja mjerenih u dvije tačke dalekovoda, a s obzirom da su poprečni presjek dalekovoda kao i svi drugi parametri provodnika identični razlika je uzrokovana isključivo različitim vremenskim uslovima duž dalekovoda. Konkretno, u 17.satu struja izračunata za Podgoricu 2 je čak 450 A veća, a razlog tome je veća brzina vjetra za 3.12 m/s, dok su temperatura ambijenta i sunčeva insolacija približnih vrijednosti.



Slika 4.4.1.1. Struja po 400 kV dalekovodu Podgorica 2 - Ribarevine, 19.03. - 20.03.

Za analizirani period konačna vrijednost prenosnog kapaciteta se nalazi u opsegu od 800 MW kako je izračunato u 13. i 16.satu i 1000 MW izračunatih u 8.satu, kako je prikazano na slici 4.4.1.2. Koristeći proračun zasnovan na statičkoj metodi, ta vrijednost iznosi 569 MW. Ovo je značajno povećanje, koje procentualno iznosi 40 % do čak 75 %. Razlika od 200 MW između minimalne i maksimalne vrijednosti prenosnog kapaciteta uslovljena je različitim vremenskim uslovima. U ovom slučaju, u 13. satu ambijentalna temperatura iznosi 12.57 °C, brzina vjetra 0.68 m/s i sunčeva insolacija 876 W/m², a u 8.satu te vrijednosti su - 4.04 °C, 0.9 m/s i 48 W/m², respektivno. Dakle u 8.satu temperatura okoline i sunčeva insolacija su manje, a brzina vjetra veća što su razlozi ovakvih rezultata.



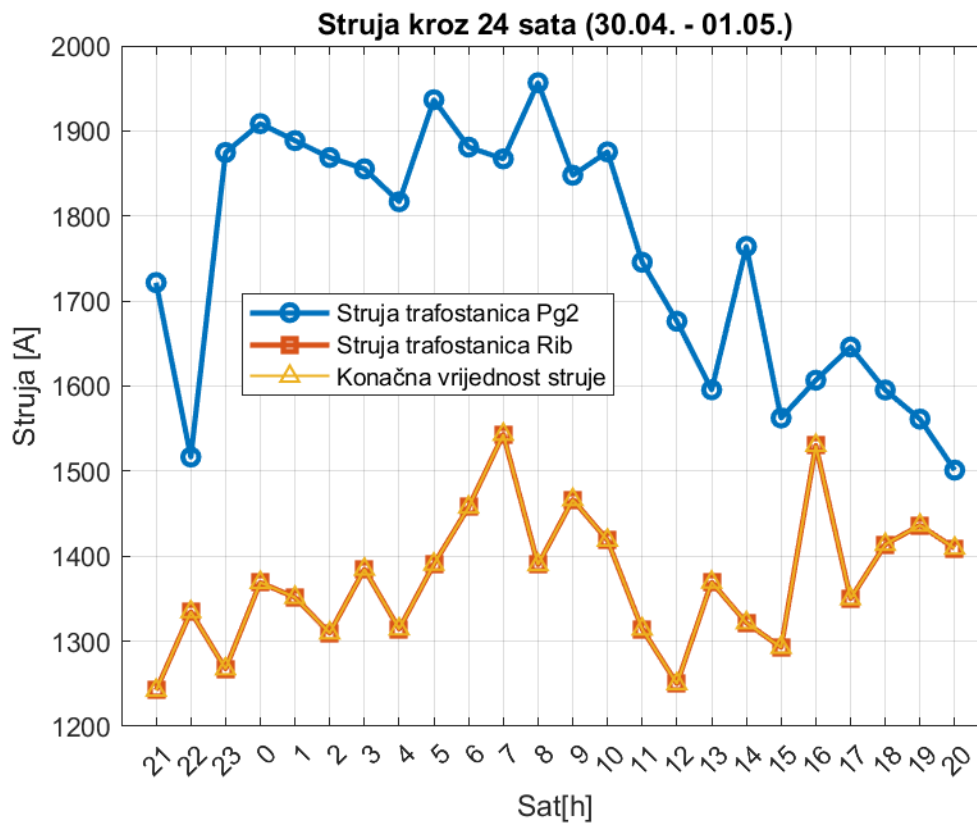
Slika 4.4.1.2. Prenosni kapacitet 400 kV dalekovoda Podgorica 2 - Ribarevine, 19.03.-20.03.

Na slikama 4.4.1.3. i 4.4.1.4. prikazani su rezultati proračuna struje i prenosnog kapaciteta za 400 kV dalekovod za drugi vremenski period od 30.04. - 01.05.2025. Može se primijetiti da su oscilacije struje velike. Preciznije, u Podgorici 2 se vrijednosti kreću od 1500 A do 1950 A. Rezultati za Podgoricu 2 su slični kao u prvom posmatranom vremenskom periodu, međutim vremenski uslovi su različiti. U poglavlju 4.2. na prikazanim slikama meteoroloških uslova vidljivo je da je drugi posmatrani period topliji, ali ujedno i vjetrovitiji od prvog. Na primjer, vrijednosti struja od 1500 A u prvom vremenskom periodu karakterišu sljedeći meteorološki parametri: temperatura okoline 11.6 °C, brzina vjetra 1.4 m/s i sunčeva insolacija od 558 W/m² (10.sat), a u drugom 23.5 °C, 1.7 m/s i 0 W/m² (20.sat) respektivno. Dakle, različita kombinacija vremenskih uslova može rezultirati istim vrijednostima struje.

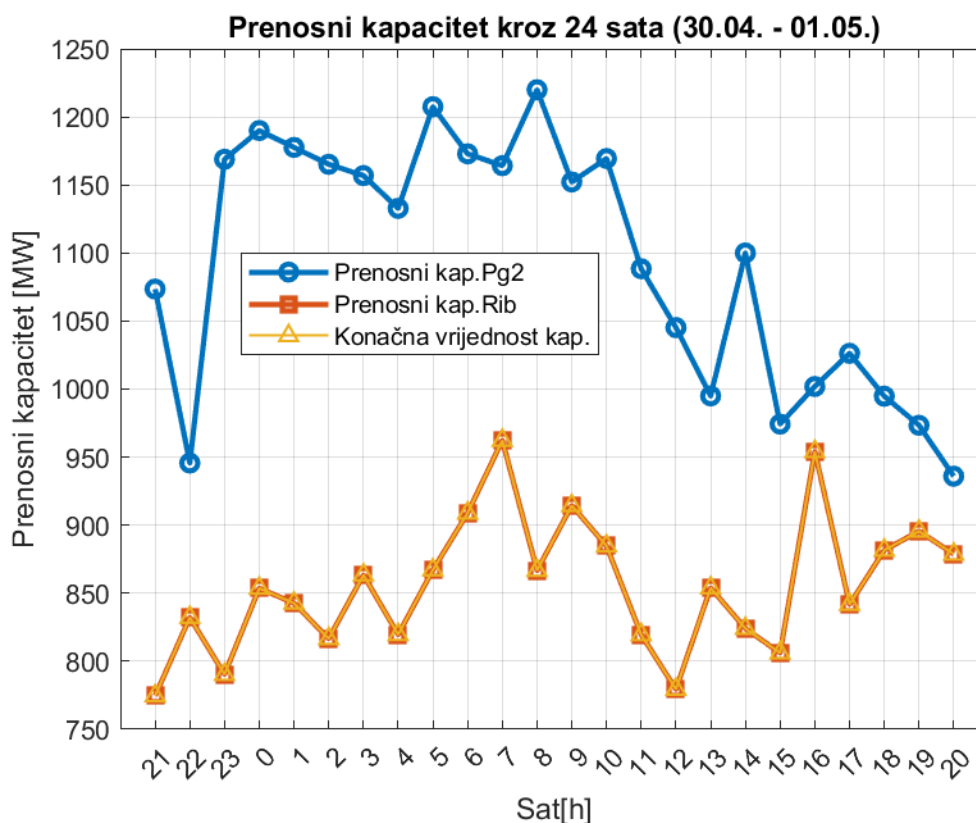
Najmanja vrijednost struje iznosi 1220 A, a najveća 1550 A, dok je opseg prenosnog kapaciteta prepoznatog kao konačnog od 780 MW do 960 MW. Upoređujući sa prethodnim analiziranim datumom, nešto je manji ali opet do čak 68 % veći od vrijednosti dobijene primjenom statičke metode.

U 7.satu ostvaruju se najveće konačne vrijednost struje i prenosnog kapaciteta pri temperaturi vazduha od 4.84 °C, brzini vjetra od 0.95 m/s i sunčevoj insolaciji od 51.9 W/m².

Minimalne vrijednosti ostvaruju se u 12.satu pri 21.22 °C, 0.85 m/s i 866.93 W/m². Iz priloženog, može se zaključiti da su temperatura i sunčeva insolacija znatno veće pri minimalnim vrijednostima, što je i uslovilo ovakve rezultate.



Slika 4.4.1.3. Struja po 400 kV dalekovodu Podgorica 2 - Ribarevine, 30.04. - 01.05.



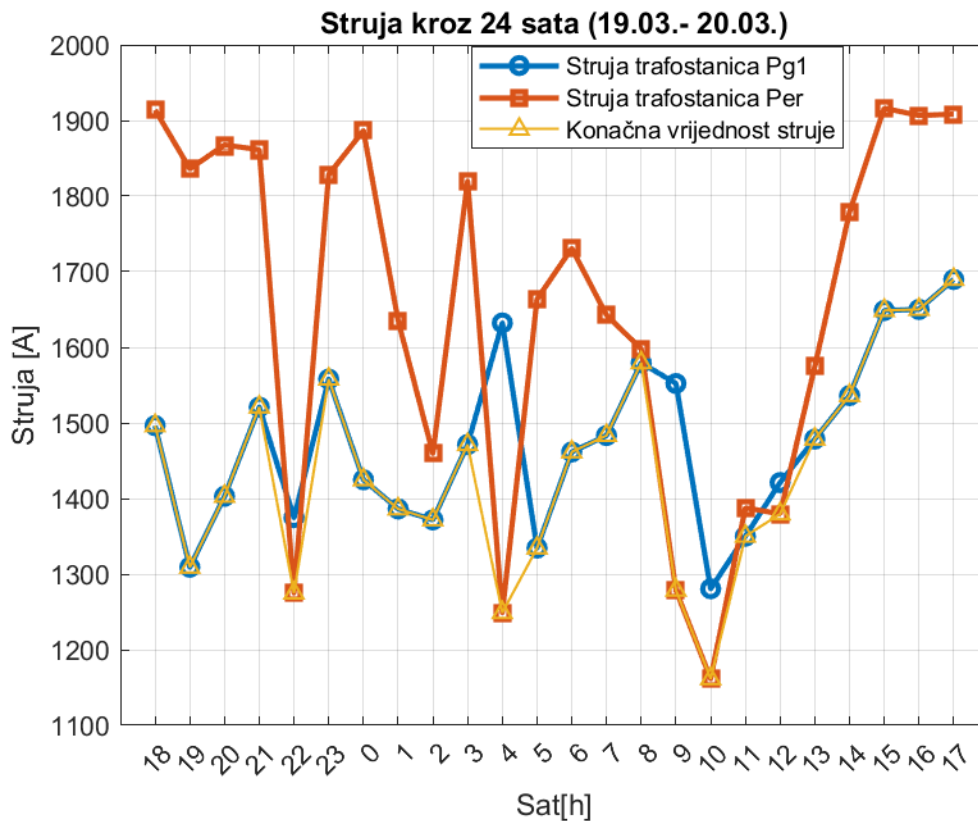
Slika 4.4.1.4. Prenosni kapacitet 400 kV dalekovoda Podgorica 2 - Ribarevine, 30.04. - 01.05.

Rezultati dobijeni dinamičkom metodom za dva analizirana 24-časovna perioda međusobno se razlikuju isključivo zbog razlike u vremenskim uslovima. Pored toga, klimatski uslovi duž trase dalekovoda značajno variraju. Posmatrani dalekovod dug je 84,66 km i povezuje centralni deo zemlje sa sjevernim regionom, gdje vremenske prilike nijesu iste. Razlike u klimatskim uslovima jasno su vidljive na slikama 4.4.1.1. i 4.4.1.3., s obzirom na to da je struja u Podgorici 2 tokom oba analizirana perioda, u svih 24 časa, veća od struje u Ribarevinama.

4.4.2. 220 kV dalekovod Podgorica 1 - Perućica

Sprovedena analiza pokazuje da za 220 kV dalekovod Podgorica 1 - Perućica konačna vrijednost struje varira od 1150 A do 1700 A (slika 4.4.2.1.), dok je statičkom metodom utvrđena konstantna vrijednost od 795 A. U 17.satu prepoznata je najveća vrijednost struje od 1700 A, tada je brzina vjetra 4.6 m/s, dok je temperatura 15.8 °C, a sunčeva insolacija 359 W/m². U poređenju sa 10.satom kada je dobijena najmanja vrijednost struje, brzina vjetra je 0.7 m/s, temperatura 7.1 °C i sunčeva insolacija 549 W/m². Dakle, brzina vjetra je za 3.9 m/s

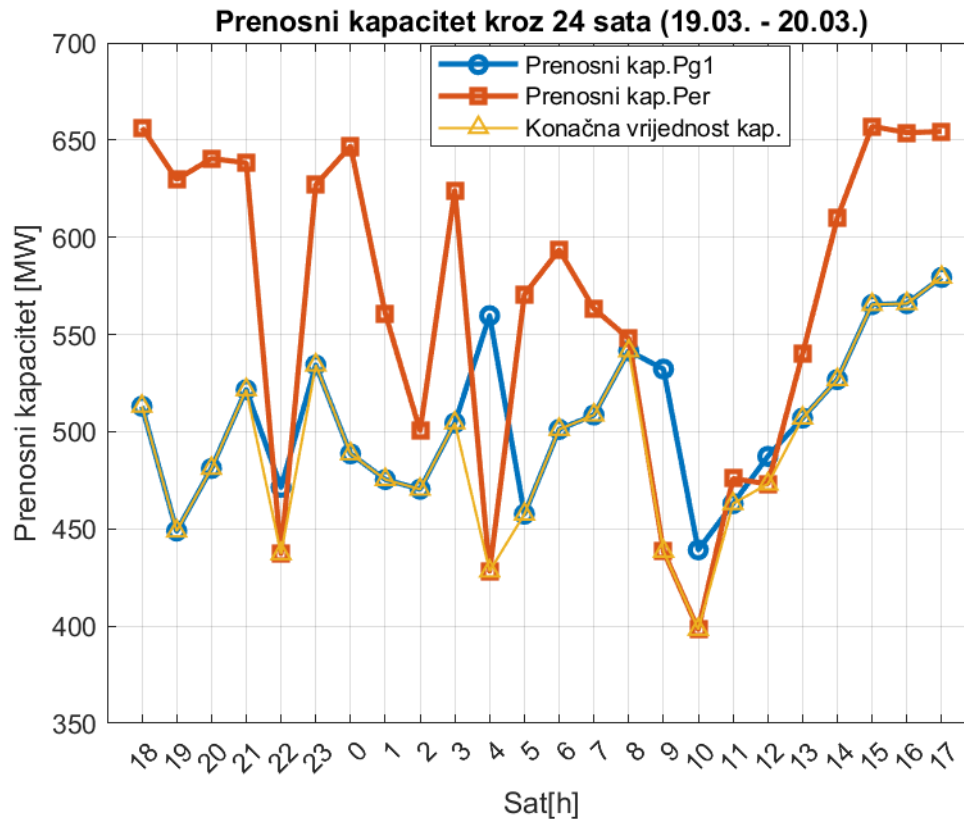
veća u 17. satu, a sunčeva insolacija za 190 W/m^2 manja što kao rezultat daje razliku u vrijednosti struje od 550 A.



Slika 4.4.2.1. Struja po 220 kV dalekovodu Podgorica 1 - Perućica, 19.03. - 20.03.

Poređenja radi, u istom analiziranom vremenskom periodu, konačna vrijednost struje za 400 kV razmatrani dalekovod je od 1300 A do 1600 A. Dakle, maksimalna vrijednost struje je u tom slučaju za 100 A manja od maksimalne vrijednosti dobijene za niži 220 kV naponski nivo. Provodnik 400 kV dalekovoda ima prečnik 30.6 m^3 , dok 220kV ima 26.6 m^3 . Logično, veći prečnik provodnika može da prenese i veću količinu snage. Međutim ovako dobijen rezultat posljedica je isključivo pozicije provodnika i uticaja vremenskih uslova na isti.

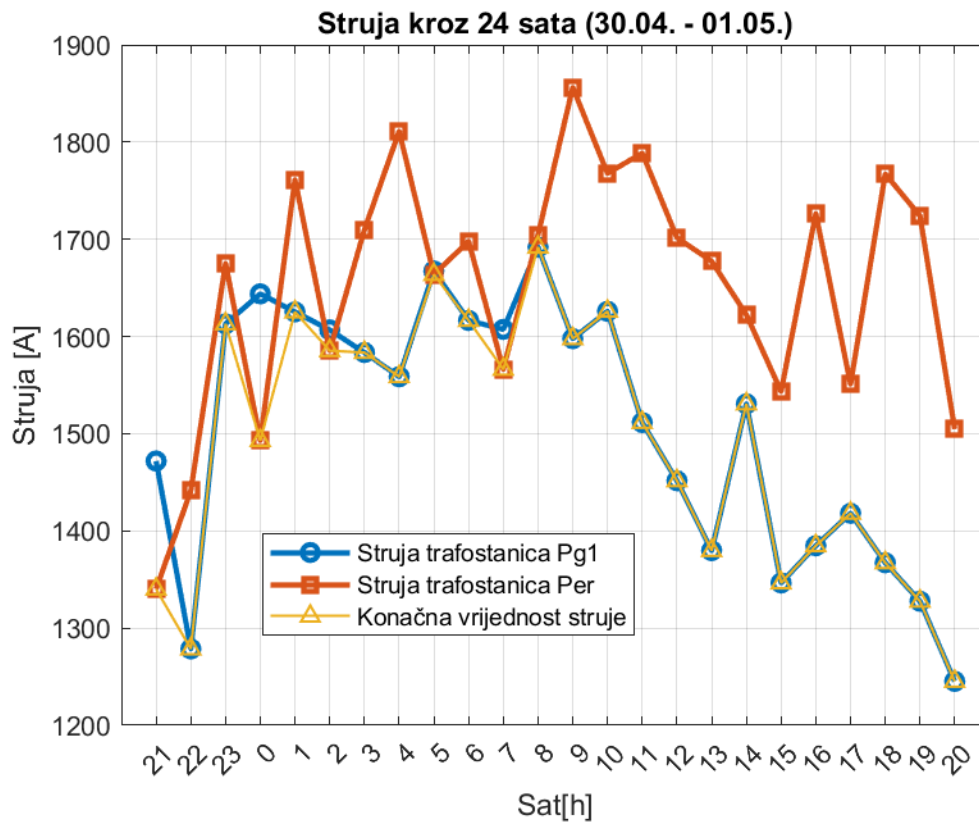
Posmatrajući prenosni kapacitet u tački dalekovoda Podgorica 1, opseg u kojem se nalazi je 400 MW do 660 MW, slika 4.4.2.2. Varijacija od 260 MW je velika i predstavlja skoro vrijednost dobijenu statičkom metodom. Ta razlika uslovljena je razlikom brzine vjetera od 2.1 m/s kao najuticajnijeg parametra, dok su preostala dva vremenska parametra veća u 14. nego u 10.satu. Prenosni kapacitet dobijen dinamičkom metodom ima vrijednosti od 400 MW do 580 MW, kako je prikazano na grafiku 4.4.2.2. što je od 47 % do čak 113 % veće u odnosu na fiksnu vrijednost od 272 MW.



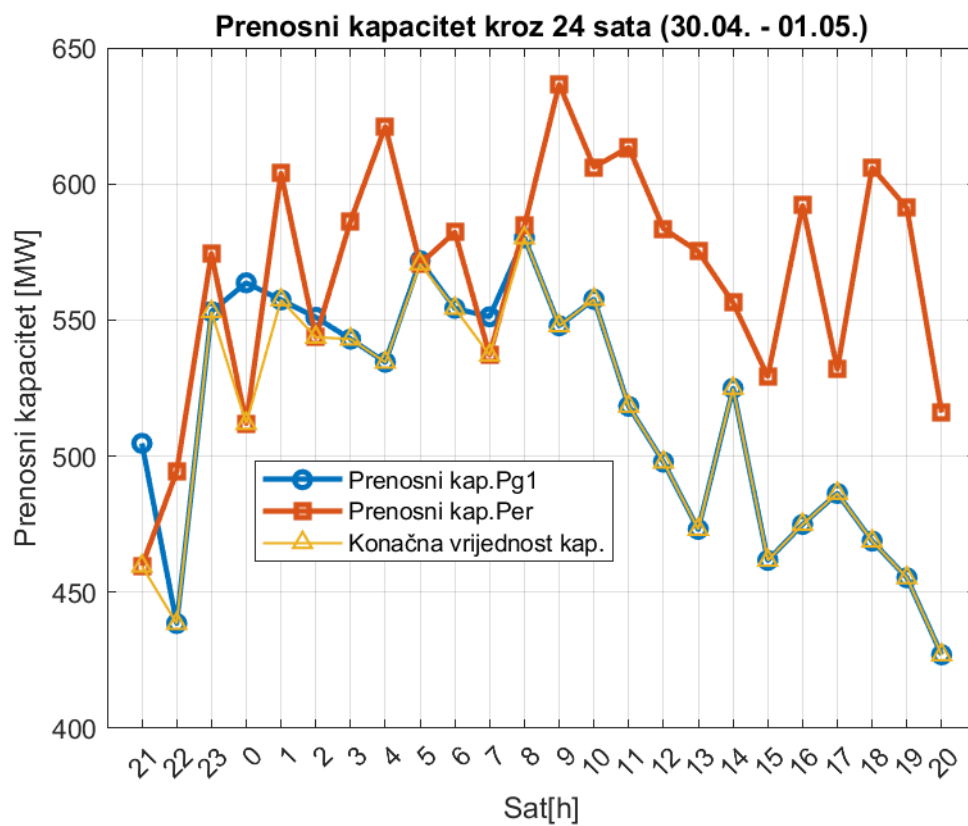
Slika 4.4.2.2. Prenosni kapacitet 220 kV dalekovoda Podgorica 1 - Perućica, 19.03. - 20.03.

Za drugi analizirani period na 220 kV dalekovodu, dinamičkim proračunom dobijene su vrednosti struje u rasponu od minimalnih 1200 A u 20. satu, do maksimalnih 1700 A u 8. satu (slika 4.4.2.3.). Prenosni kapacitet u tom periodu kreće se između 430 MW i 575 MW (slika 4.4.2.4.). U poređenju sa statičkom metodom, ovakvi rezultati predstavljaju povećanje struje do 113% i prenosnog kapaciteta do 111%.

Za period od 19.03. - 20.03. najveća vrijednost struje od 1700 A zabilježena je pri brzini vjetra od 4.6 m/s, temperaturi 15.8 °C i sunčevoj insolaciji od 359 W/m², dok je za drugi period zabilježena ista najveća vrijednost struje pri 5.4 m/s, 20.7°C i 402W/m², respektivno. Može se zaključiti da su vremenski uslovi dosta slični. Dok za prvi period minimalna vrijednost struje iznosi 1150 A pri brzini vjetra od 0.7 m/s, temperaturi 7.1 °C i sunčeva insolacija 549 W/m², a za drugi posmatrani dan 1200 A pri 1.7m/s, 23.5°C i 0 W/m² sunčeve insolacije. Dakle, brzina vjetra je za drugi period (30.04. – 01.05.) veća, a sunčeva insolacija manja te se dobija i veća dozvoljena struja.



Slika 4.4.2.3. Struja po 220 kV dalekovodu Podgorica 1 - Perućica, 30.04. - 01.05.



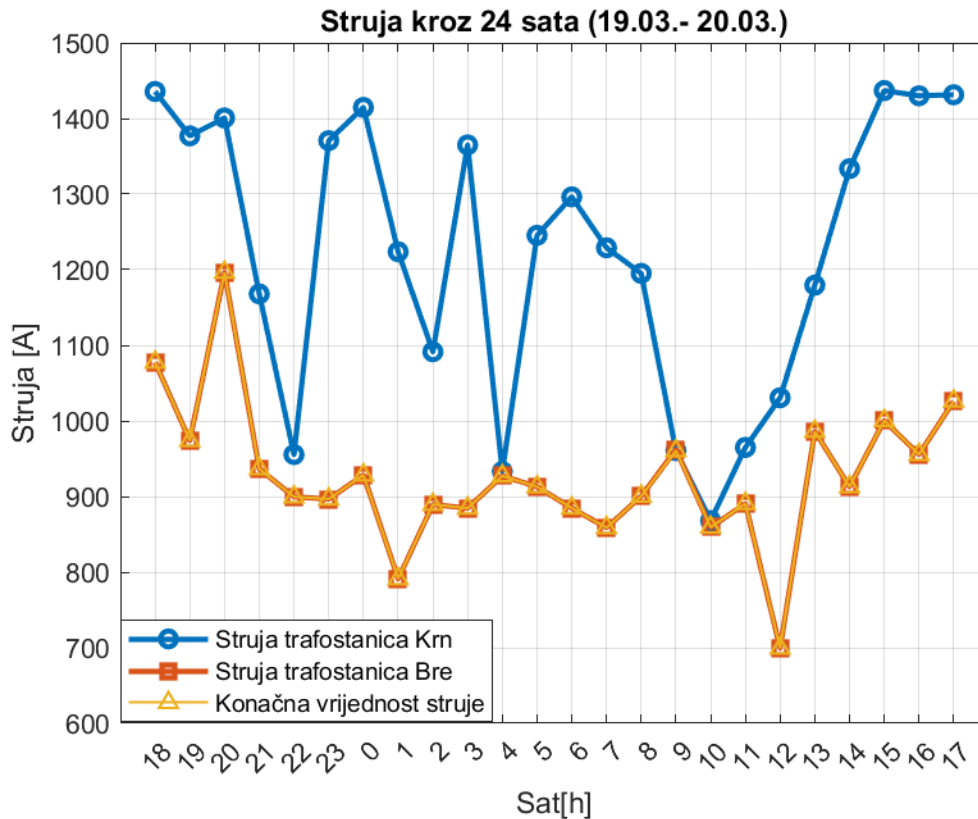
Slika 4.4.2.4. Prenosni kapacitet 220 kV dalekovoda Podgorica1 - Perućica, 30.04. - 01.05.

Kao što je primijećeno i kod prethodno prikazanog naponskog nivoa, rezultati duž trase dalekovoda značajno variraju usljed različitih vremenskih uslova duž njegove dužine od 34,061 km. Ipak, analiza pokazuje da je opseg maksimalno dozvoljene termičke struje i prenosnog kapaciteta dobijenih dinamičkom analizom u oba analizirana perioda veći od rezultata prikazanih statičkom metodom, a da se pritom ne prekorače termička ograničenja dalekovoda.

4.4.3. 110 kV dalekovod Krnovo – Brezna

Dalekovod naponskog nivoa 110 kV, koji povezuje vjetroelektranu Krnovo sa trafostanicom Brezna, dug je približno 20 km. Vremenski uslovi u ove dvije tačke značajno se razlikuju. Očekivano, područje oko vjetroelektrane i trafostanice Krnovo je vjetrovitije, imajući u vidu nadmorsku visinu od 1550 metara. U tački Krnovo zabilježene vrijednosti struje kreću se od 880 A do 1420 A, što predstavlja povećanje od 275 A do 815 A u odnosu na referentnu vrijednost od 605 A. Ovakvi rezultati su očekivani zbog specifičnih klimatskih uslova.

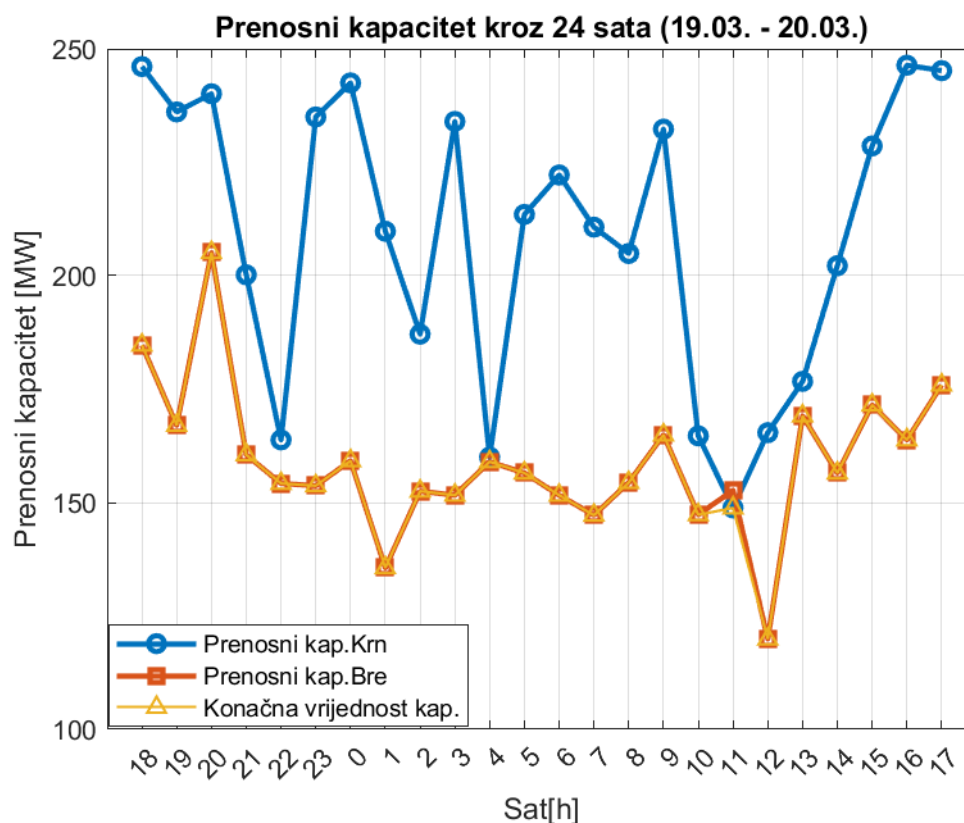
Međutim, za određivanje konačne vrijednosti prenosnog kapaciteta uzima se niža vrijednost struje, pa se posmatrani opseg smanjuje na 700 A do 1200 A (slika 4.4.3.1.). To odgovara povećanju od 95 A do 595 A u odnosu na referentnu struju.



Slika 4.4.3.1. Struja po 110 kV dalekovodu Krnovo - Brezna, 19.03. - 20.03.

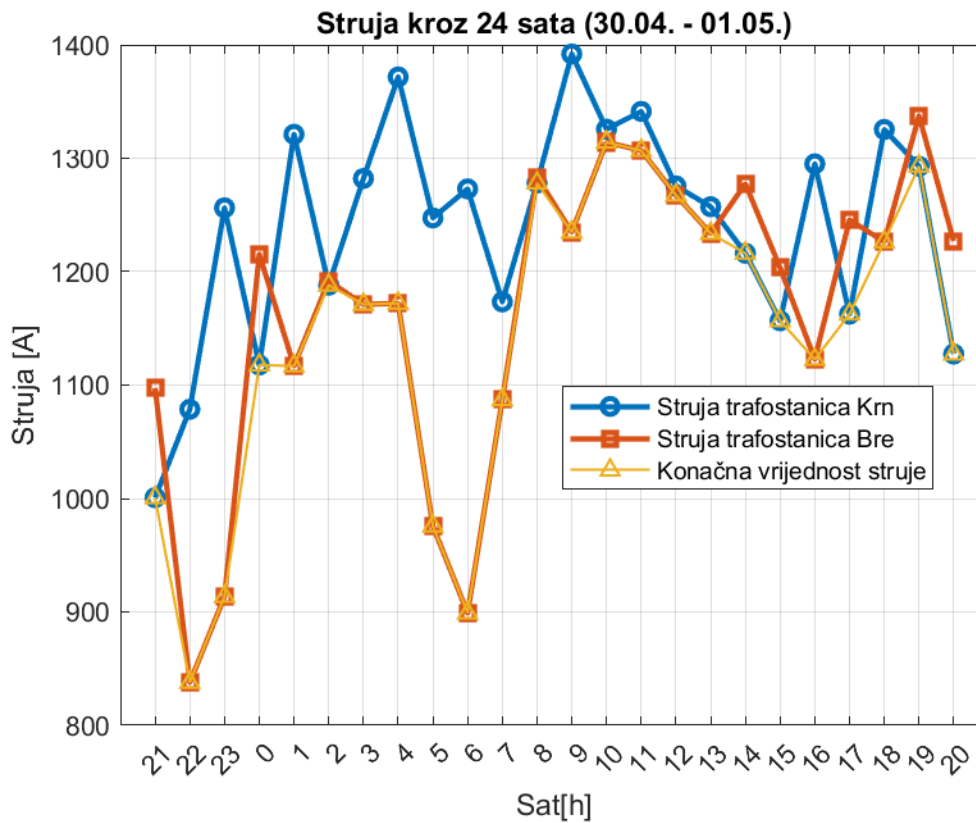
Vremenski uslovi koji su zabilježeni prilikom minimalne vrijednosti struje u ovom intervalu bili su: brzina vjetra 0,22 m/s, ambijentalna temperatura 8 °C i sunčevo zračenje 792 W/m². Maksimalnoj vrijednosti struje odgovarali su uslovi brzine vjetra 2,67 m/s, temperature 6.33 °C i sunčeve insolacije od 0 W/m².

Prenosni kapacitet za prvi analizirani vremenski period na lokaciji Krnovo kreće se u rasponu od 150 MW do 250 MW, dok se konačna vrijednost nalazi u opsegu od 120 MW do 210 MW. Slikovni prikaz dobijenih rezultata prikazan je na slici 4.4.3.2. U odnosu na konzervativnu metodu, to je povećanje od 16 % do čak 103 %. Ovakvi rezultati ukazuju na to da vremenski uslovi duž trase dalekovoda mogu značajno uticati na mogućnost prenosa električne energije. Varijabilnost meteoroloških faktora na ovom području posebno dolazi do izražaja zbog specifične geografske lokacije i nadmorske visine, što je razlog za širok raspon zabilježenih vrijednosti.

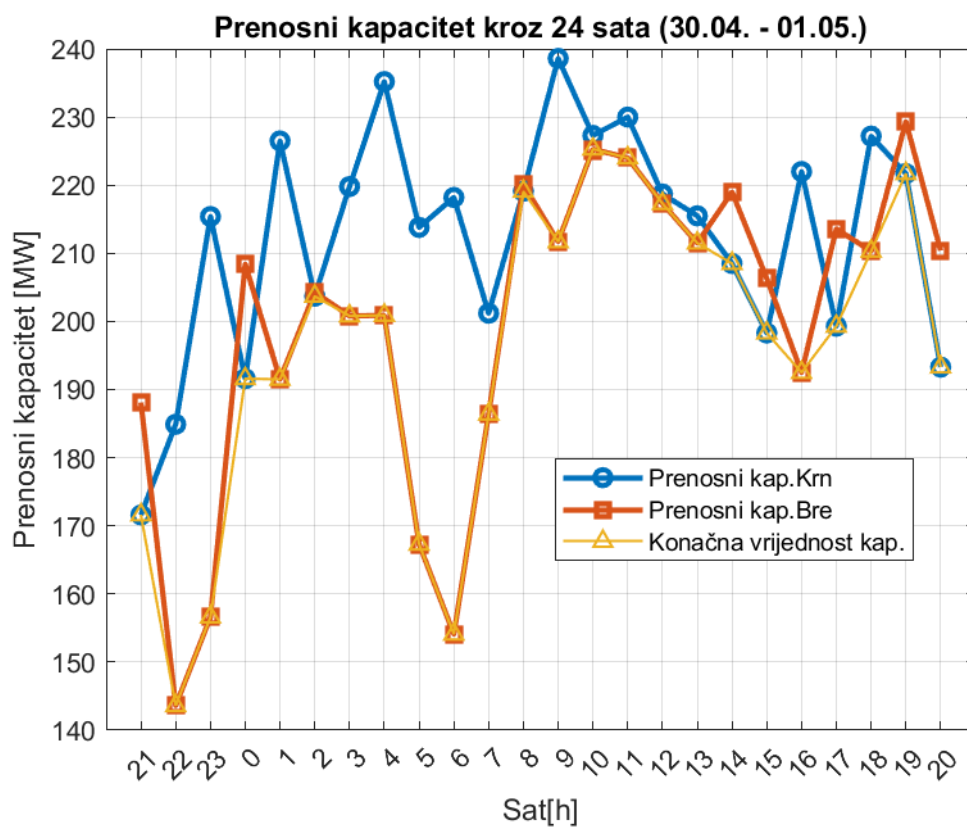


Slika 4.4.3.2. Prenosni kapacitet 110 kV dalekovoda Krno - Brezna, 19.03. - 20.03.

Sa slika 4.4.3.3. i 4.4.3.4. može se primijetiti da su vremenski uslovi za druge analizirane datume približnijih vrijednosti u dvije tačke dalekovoda s obzirom na prikazanu struju i prenosnu moć dalekovoda u odnosu na prethodni slučaj. Minimalna i maksimalna vrijednosti struje i prenosne moći poklapaju se sa strujama u tački sa strane Brezana u 22. i 10. satu respektivno. U 22.satu vrijednost struje je oko 820 A, što je veće nego za prethodni slučaj, a u 10.satu iznosi oko 1300 A, što je opet veće nego u prethodnom slučaju za 100 A. Prenosna moć razmatranog dalekovoda za ove sate iznosi od 140 MW do 225 MW.



Slika 4.4.3.3. Struja po 110 kV dalekovodu Krnovo - Brezna, 30.04. - 01.05.



Slika 4.4.3.4. Prenosni kapacitet 110 kV dalekovoda Krnovo - Brezna, 30.04. - 01.05.

Sprovedena analiza primjene statičke i dinamičke metodologije na dalekovodima naponskih nivoa 400 kV, 220 kV i 110 kV pokazuje da primjena dinamičkog modela dovodi do povećanja maksimalno dozvoljene termičke struje i prenosne moći u odnosu na tradicionalni statički proračun. Na osnovu prikazanih slučajeva može se zaključiti da se u svim analiziranim periodima ostvaruje rast ovih veličina u poređenju sa rezultatima dobijenim konzervativnom metodom.

Procenat povećanja zavisi prije svega od konkretne kombinacije vremenskih faktora, kao što su temperatura ambijenta, brzina vjetra i stepen sunčeve insolacije. U pojedinim slučajevima to povećanje je relativno umjereno, dok su u određenim vremenskim uslovima zabilježena značajna odstupanja koja dostižu i više od 100 % u odnosu na statičku metodu.

Posebno je interesantno istaći da je u jednom slučaju prikazano kako se na 220 kV dalekovodu, čiji provodnik ima manji poprečni presjek od onoga na 400 kV dalekovodu, a samim tim i manju nominalnu prenosnu moć, ostvaruje veći prenosni kapacitet nego na 400 kV dalekovodu u istom razmatranom vremenskom periodu. Ovaj rezultat je isključivo posljedica povoljnijih vremenskih uslova duž trase 220 kV dalekovoda, što dodatno potvrđuje koliko značajan uticaj klimatski faktori imaju na kapacitet prenosa energije.

Ovakvi rezultati jasno ukazuju na prednosti primjene dinamičke metode za realnije i efikasnije iskorišćenje prenosnih kapaciteta elektroenergetskih sistema, posebno na dionicama gdje meteorološki uslovi variraju u širokom rasponu tokom dana i godine. Dinamički pristup omogućava bolje prilagođavanje u realnom vremenu, optimizaciju prenosa energije i potencijalno smanjenje potreba za ograničenjem opterećenja, čime se povećava iskoristivost energije iz OIE.

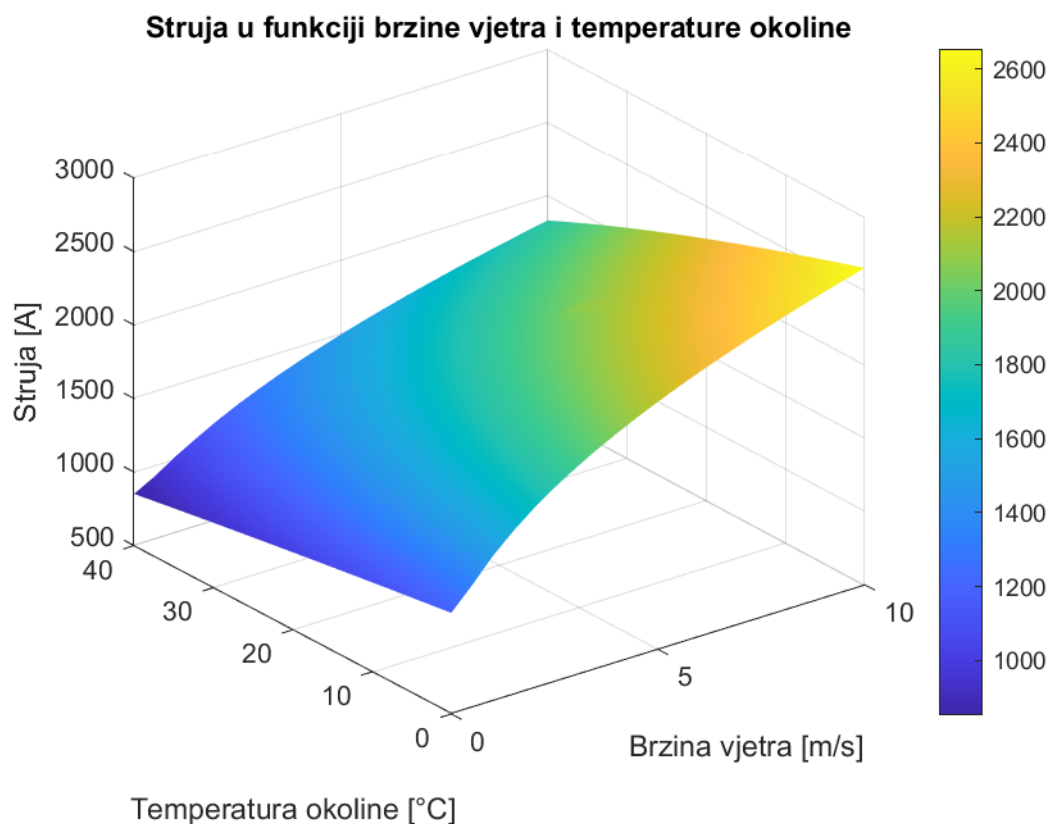
4.5. Uticaj meteoroloških parametara na vrijednost struje kroz dalekovod

U sljedećim potpoglavljima prikazan je i analiziran uticaj meteoroloških faktora na vrijednost struje kroz već pomenute i razmatrane dalekovode. Uticaj brzine vjetra i ambijentalne temperature prikazan je kroz jedan grafik za sve naponske nivoe, zatim uticaj ambijentalne temperature i sunčeve insolacije i na kraju konačno uticaj ugla smjera vjetra u odnosu na osu provodnika dalekovoda.

4.5.1. Uticaj brzine vjetra i temperature okoline na struju kroz dalekovod

U izvedenim simulacijama vrijednost brzine duvanja vjetra mijenjala se od 0 m/s do 10 m/s sa korakom 0.5 m/s, a temperatura od 0 °C do 40 °C s korakom 2 °C. Dok su druge vrijednosti meteoroloških parametara ostale fiksne, ugao smjera vjetra u odnosu na osu provodnika na 90 °, a sunčeva insolacija na 1000 W/m².

Pri konstantnoj brzini vjetra, povećanje ambijentalne temperature dovodi do značajnog smanjenja strujne opteretivosti dalekovoda. Na primjer, kada je brzina vjetra 3 m/s, a pri povećanju ambijentalne temperature sa 0 °C na 40 °C, vrijednost struje opada sa 1900 A na 1300 A, dok pri 5 m/s opada sa 2100 A na 1500 A (slika 4.5.1.1.). Ova pojava se može objasniti smanjenjem efikasnosti hlađenja pri višim temperaturama. Dok, pri konstantnoj ambijentalnoj temperaturi, povećanjem brzine vjetra dolazi do porasta strujne opteretivosti dalekovoda. Na nižim temperaturama (npr. 0 °C), efekat brzine vjetra je posebno izražen. Strujna opteretivosti dalekovoda raste sa oko 1200 A na 2650 A kada brzina vjetra poraste sa 0 na 10 m/s.



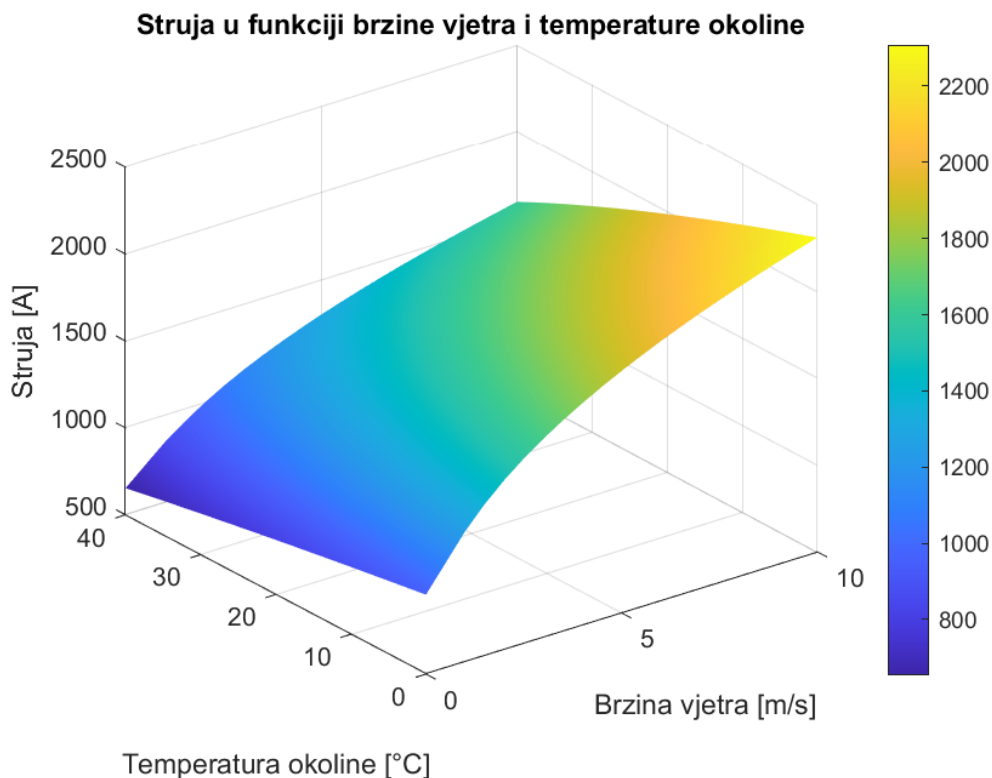
Slika 4.5.1.1. Uticaj brzine vjetra i temperature okoline na struju kroz 400 kV dalekovod

Slika 4.5.1.1. jasno ukazuje da je ipak značajno veća promjena strujne opteretivosti sa promjenom brzine vjetra nego sa promjenom ambijentalne temperature. Sa druge strane, mjesto ugradnje DLR senzora je značajno osjetljivije na djelovanje vjetra nego na temperaturu ambijenta. Naime, procjena brzine vjetra i smjer vjetra (ruža vjetrova) se značajno mijenja sa geografskim koordinatama jer meteorološki uslovi mikrolokacije značajno utiču na karakteristike vjetra. Procjena temperature ambijenta je mnogo lakši zadatak jer je temperatura manje podložna promjenama u odnosu na geografsku lokaciju. Takođe važi činjenica da korišćenjem “internet stvari” (*en: IoT*) temperatura ambijenta se može procijeniti sa visokom tačnošću.

Na slici 4.5.1.2. prikazana je trodimenzionalna zavisnost struje na 220 kV naponskom nivou u funkciji brzine vjetra i temperature okoline, dok su ugao smjera vjetra i sunčeva insolacija uzeti kao konstantni parametri. Kada je brzina vjetra jednaka nuli, promjena temperature okoline od 0 °C do 40 °C dovodi do primijetnog pada struje. Na grafiku se vidi da je struja u ovom opsegu od približno 950 A (za 0 °C) do oko 650 A (za 40 °C). To znači da povišena temperatura značajno smanjuje kapacitet prenosa zbog smanjenog temperaturnog gradijenta između provodnika i okoline, čime se otežava disipacija toplote. Pri brzini vjetra od 3 m/s očigledan je efekat hlađenja usled prisustva strujanja vazduha. Na najnižoj temperaturi (0 °C), struja dostiže oko 1650 A, dok se pri porastu temperature na 40 °C smanjuje na približno 1100 A. I dalje je vidljivo opadanje, ali je ukupna vrijednost struje značajno viša u odnosu na slučaj bez vjetra. Za brzinu vjetra od 7 m/s efekat hlađenja se dodatno naglašava. Maksimalna vrijednost struje doseže oko 2100 A (pri 0 °C), dok minimalna vrijednost na 40 °C iznosi približno 1400 A. Ovaj rezultat jasno pokazuje da dodatno povećanje brzine vjetra podiže cijeli opseg dozvoljene struje. Na najvećoj analiziranoj brzini vjetra (10 m/s), struja dostiže maksimum od oko 2300 A pri 0 °C. Sa porastom temperature, vrijednost opada, ali ostaje viša od 1500 A čak i na 40 °C. Ovaj rezultat potvrđuje izrazito snažan efekat hlađenja pri velikim brzinama vjetra.

Pri niskoj temperaturi, uticaj brzine vjetra je naročito izražen. Struja raste od približno 950 A (0 m/s) do oko 2300 A (10 m/s), što predstavlja dvostruko povećanje. To jasno pokazuje da hlađenje provodnika dominira nad ostalim faktorima. Na 20 °C, struja se kreće od približno 900 A (0 m/s) do oko 1950 A (10 m/s). I dalje je evidentan značajan rast s povećanjem brzine vjetra, premda su apsolutne vrijednosti nešto niže zbog povišene temperature. Konačno, pri 40 °C brzina vjetra i dalje ima dominantan uticaj: struja se povećava sa 650 A (0 m/s) na približno 1600 A (10 m/s). Iako je temperatura visoka, efekat

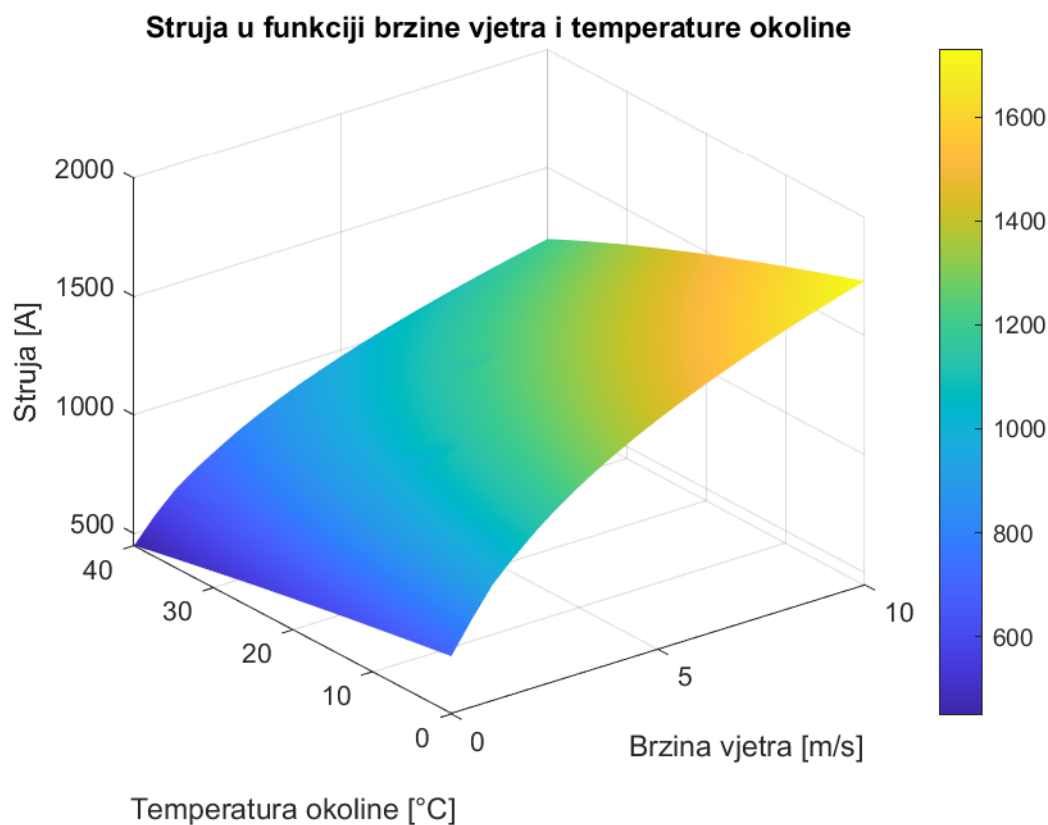
vjetra je dvostruku veći kada se uporedi slučaj 0 m/s odnosno miran vazduh sa 10 m/s, izraženim vjetrom.



Slika 4.5.1.2. Uticaj V_w i T_a na struju kroz 220 kV dalekovod

Analizom prezentovanog grafikona može se zaključiti da brzina vjetra ima znatno veći uticaj na dozvoljenu struju kroz provodnik nego temperatura okoline. Dok promjena temperature od 0 °C do 40 °C dovodi do primijetnog pada struje, povećanje brzine vjetra od 0 m/s do 10 m/s rezultuje gotovo dvostruko većim vrijednostima struje u svim temperaturnim uslovima. Ovaj rezultat jasno potvrđuje dominantnu ulogu hlađenja vjetrom u termičkom režimu prenosa električne energije i naglašava značaj praćenja meteoroloških uslova u realnom vremenu radi optimizacije kapaciteta prenosa.

Prikazana trodimenzionalna površina na slici 4.5.1.3. ilustruje zavisnost maksimalne dozvoljene struje na 110 kV naponskom nivou u funkciji brzine vjetra i temperature okoline. Ovakva analiza je ključna u procjeni kapaciteta prenosa i upravljanju rizicima preopterećenja provodnika.



Slika 4.5.1.3. Uticaj V_w i T_a na struju kroz 110 kV dalekovod

Kod potpuno mirnih uslova (0 m/s), temperatura okoline ima izražen negativan uticaj na prenosnu sposobnost. Na najnižoj temperaturi (0 °C) struja dostiže vrijednost oko 700 A, dok se pri porastu temperature na 40 °C spušta na približno 450 A. Ovaj pad gotovo za polovinu potvrđuje da u uslovima bez hlađenja vjetrom dominira efekat ambijentalnog zagrijavanja. Kada je prisutna umjerena brzina vjetra od 4 m/s, kapacitet prenosa se značajno poboljšava. Struja pri 0 °C iznosi približno 1350 A, dok pri 40 °C opada na oko 900 A. Vidljivo je da efekat vjetra ublažava negativan uticaj temperature, ali ga ne eliminiše. Pri intenzivnijem strujanju vazduha (8 m/s), vrijednosti struje dodatno rastu. Na najnižoj temperaturi, struja dostiže približno 1600 A, dok na 40 °C pada na oko 1100 A. Ovaj scenario najbolje pokazuje koliko značajan doprinos ima hlađenje vjetrom u odnosu na puko smanjenje temperature.

Kada se posmatra isključivo uticaj brzine vjetra na fiksnoj niskoj temperaturi, uočava se kontinuiran rast dozvoljene struje od oko 700 A (0 m/s) do vrijednosti iznad 1700 A (10 m/s). To praktično znači da već i umjereni vjetar može gotovo udvostručiti kapacitet prenosa. Na srednjoj temperaturi (20 °C), struja raste sa približno 600 A pri bezvjetrici do oko 1400 A pri maksimalnoj brzini vjetra. Iako je ukupni kapacitet nešto manji nego u hladnijim uslovima, i dalje je vidljiv snažan pozitivan efekat strujanja vazduha. Pri najvišoj temperaturi

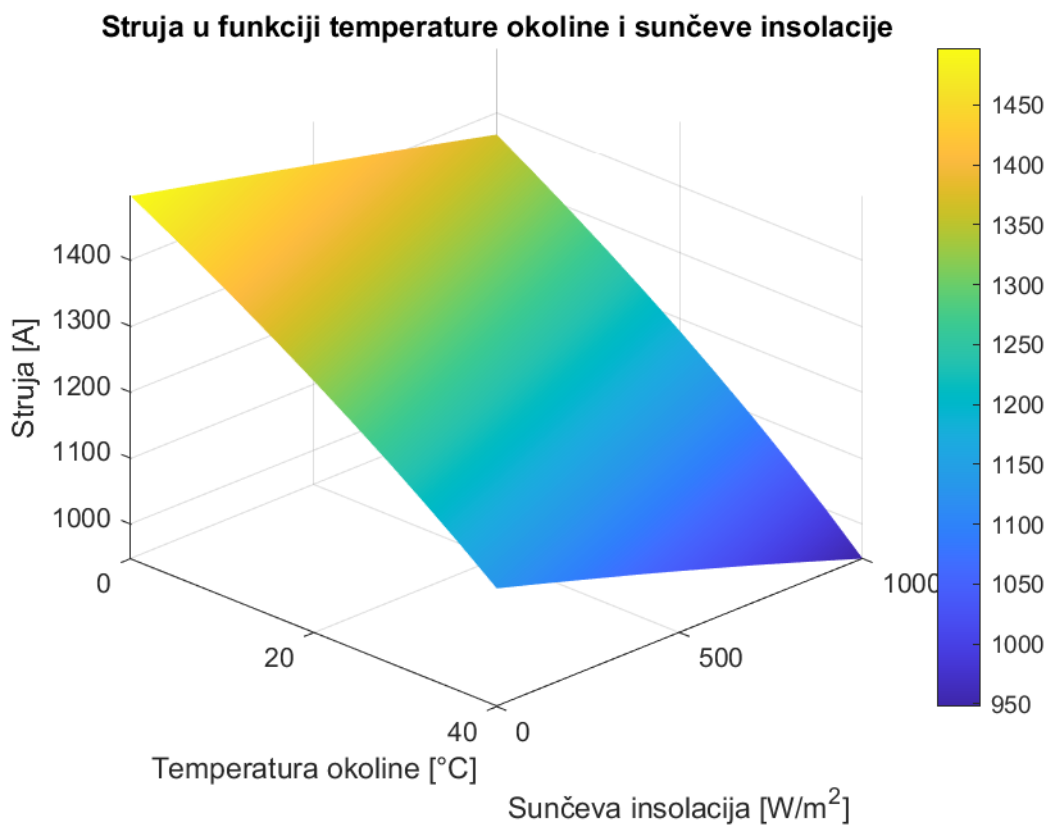
(40 °C), bez vjetra struja iznosi oko 450 A, dok se uz maksimalnu brzinu vjetra penje na približno 1200 A. Ova razlika od skoro tri puta jasno ističe dominantan značaj hlađenja pri visokim temperaturama.

Na osnovu prikazanog grafikona za 110 kV nivo, može se zaključiti da brzina vjetra ima izrazito snažniji uticaj na maksimalnu dozvoljenu struju u odnosu na promjene temperature okoline. Iako rast temperature očekivano smanjuje kapacitet provodnika, povećanje brzine vjetra omogućava njegovo značajno povećanje čak i u nepovoljnim termičkim uslovima.

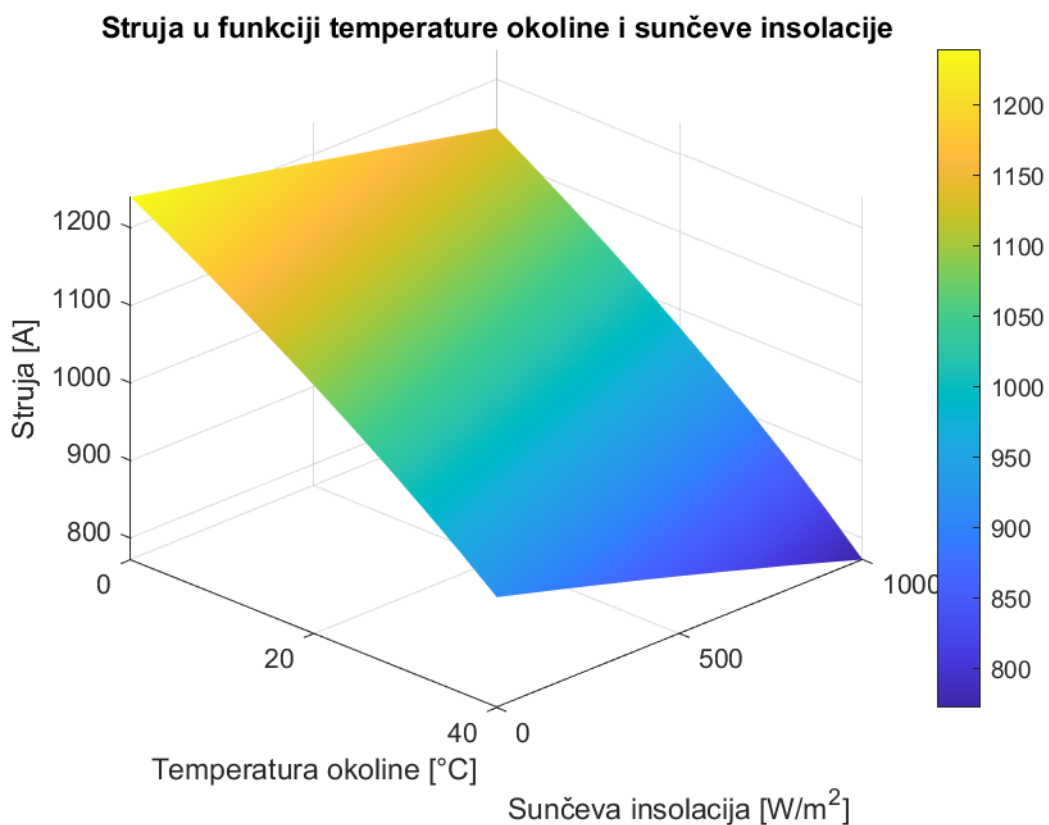
4.5.2. Uticaj temperature okoline i sunčeve insolacije na struju kroz dalekovod

Grafici sa sljedećih slika (4.5.2.1. - 4.5.2.3.) su dobijeni za fiksnu vrijednost vjetra od 0.6 m/s, ugao smjera vjetra od 90 °, dok se temperatura okoline mijenjala od 0 °C do 40 °C s korakom 4 °C, a globalna sunčeva insolacija od 0 W/m² do 1000 W/m² s korakom 100 W/m². Navedeni grafici predstavljaju zavisnost maksimalno dozvoljene struje kroz dalekovode 400 kV, 220 kV i 110 kV naponskog nivoa respektivno u zavisnosti isključivo od temperature okoline i sunčeve insolacije.

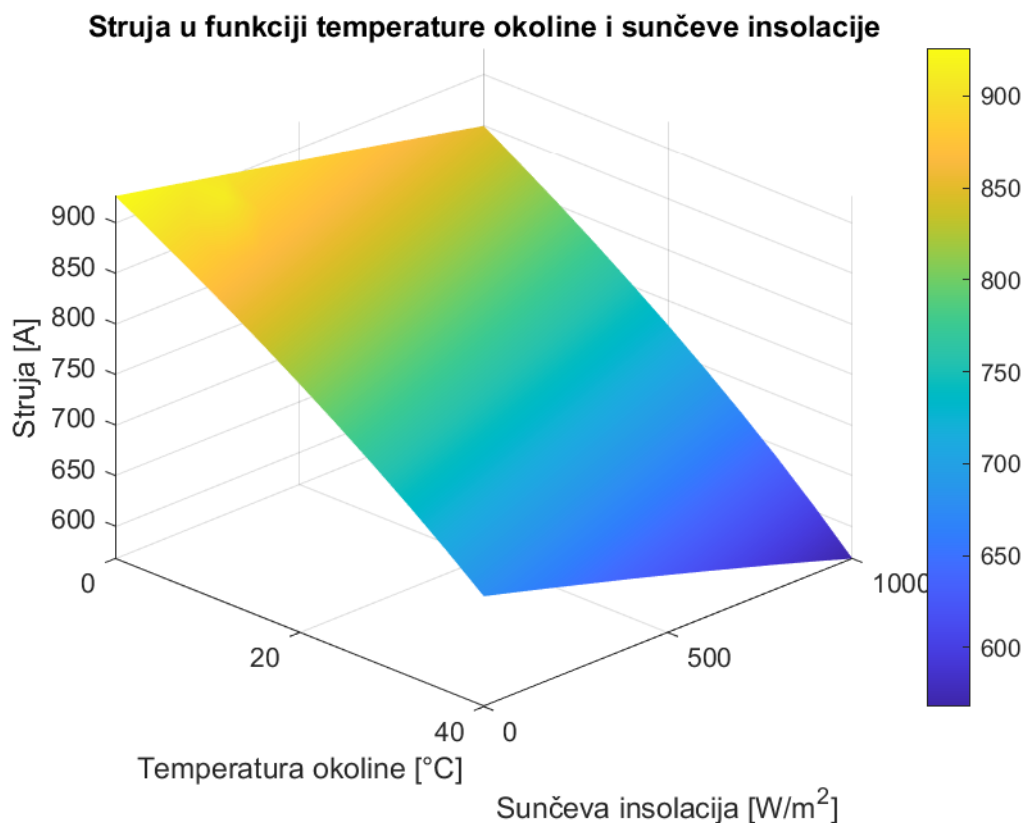
Za razliku od prethodno analiziranog slučaja, uticaj temperature okoline i sunčeve insolacije na strujnu opteretivost dalekovoda je sličan. Odnosno, povećanje temperature kao i sunčeve insolacije utiču na smanjenje struje koja protiče dalekovodom, i obratno. Razlog toga jeste zagrijavanje provodnika samim tim veća otpornosti $R(T_{avg})$, veća snaga P_s kao i ugib provodnika usljed visokih temperatura.



Slika 4.5.2.1. Uticaj temperature okoline i sunčeve insolacije na struju kroz 400 kV dalekovod



Slika 4.5.2.2. Uticaj T_a i S na struju kroz 220 kV dalekovod



Slika 4.5.2.3. Uticaj T_a i S na struju kroz 110 kV dalekovod

U uslovima niske temperature okoline od npr. 10 °C i odsustva sunčeve insolacije (0 W/m²), dozvoljena struja dostiže maksimalne vrijednosti, koje se za naponski nivo od 400 kV kreću oko 1450 - 1500 A, za 220 kV približno 1200 A, dok kod 110 kV dostižu oko 900 A. Kada je sunčeva insolacija umjerena, približno 400 - 500 W/m², što odgovara oblačnim uslovima, dozvoljena struja se smanjuje za oko 5% u odnosu na noćne uslove, te na 400 kV iznosi oko 1380 A, na 220 kV oko 1140 A, dok na 110 kV opada na približno 850 A. Pri maksimalnoj sunčevoj insolaciji od 1000 W/m² i temperaturi okoline od 10 °C, vrijednosti struje se dodatno smanjuju, te na 400 kV opadaju do približno 1280 A, na 220 kV na oko 1100 A, dok na 110 kV iznose oko 800 A. Ovaj scenario odražava tipične uslove vedrog, sunčanog dana.

U slučaju visoke temperature okoline od 40 °C i odsustva insolacije, dozvoljena struja se smanjuje usljed manjeg temperaturnog gradijenta, pa na 400 kV opada na oko 1100 A, na 220 kV na približno 900 A, dok na 110 kV iznosi oko 700 A. Najnepovoljniji uslovi nastupaju kada su temperatura okoline 40 °C i insolacija maksimalna, 1000 W/m², što dovodi do minimalnih vrijednosti dozvoljene struje, koje kod 400 kV iznose oko 950 - 1000 A, kod 220 kV oko 750 A, dok kod 110 kV ne prelaze 600 A.

Dakle, temperatura okoline i sunčeva insolacija imaju negativan uticaj na dozvoljenu struju provodnika, smanjujući kapacitet prenosa. Uticaj temperature je nešto izraženiji, povišenje temperature sa 0 °C na 40 °C dovodi do smanjenja dozvoljene struje i preko 30 %. Sunčeva insolacija dodatno pogoršava uslove, razlika između noćnih i maksimalnih dnevnih vrijednosti insolacije dostiže dodatnih 10 - 15 % smanjenja struje.

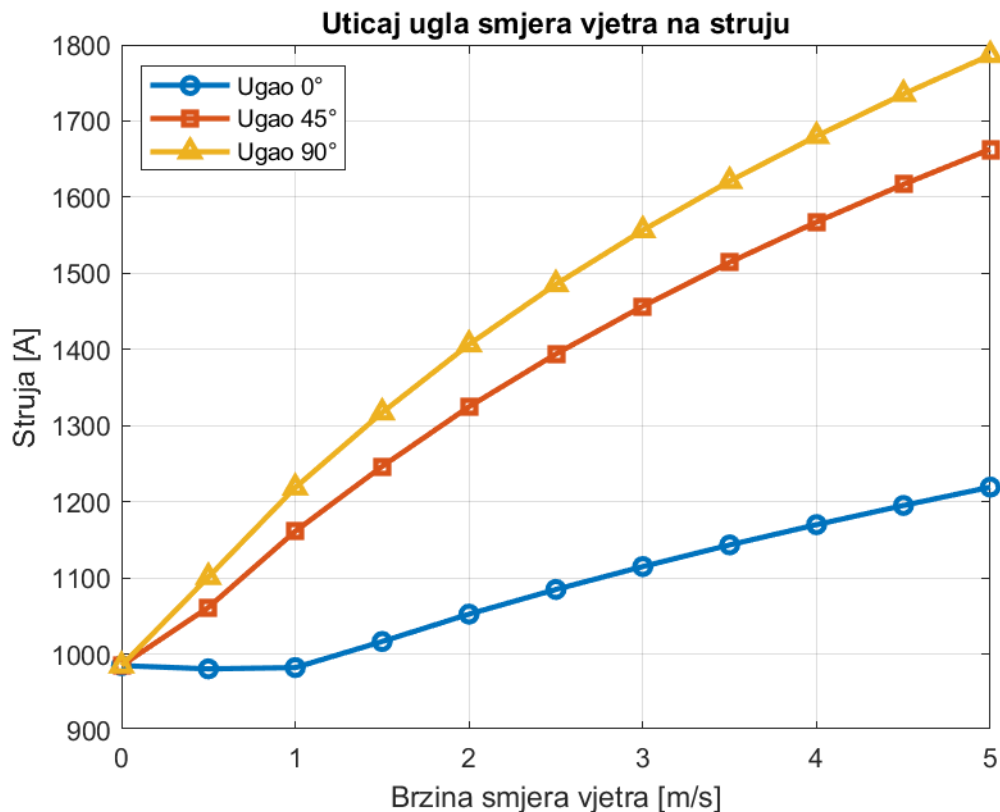
Ovi rezultati jasno potvrđuju da je za pouzdano upravljanje prenosnim sistemima neophodno u realnom vremenu pratiti kako temperaturu okoline, tako i sunčevo zračenje, naročito u periodima ljetnih maksimalnih opterećenja.

4.5.3. Uticaj ugla smjera vjetra u odnosu na osu dalekovoda

U ovom potpoglavlju prikazan je uticaj smjera vjetra u odnosu na osu provodnika za već razmatrane 400 kV, 220 kV i 110 kV dalekovode. Pri fiksnim vrijednostima od 25 °C temperature okoline i 1000 W/m² sunčeve insolacije, brzina vjetra se mijenjala od 0 do 5 m/s s korakom 0.5 m/s za ugao smjera vjetra od:

- 0 °
- 45 °
- 90 °

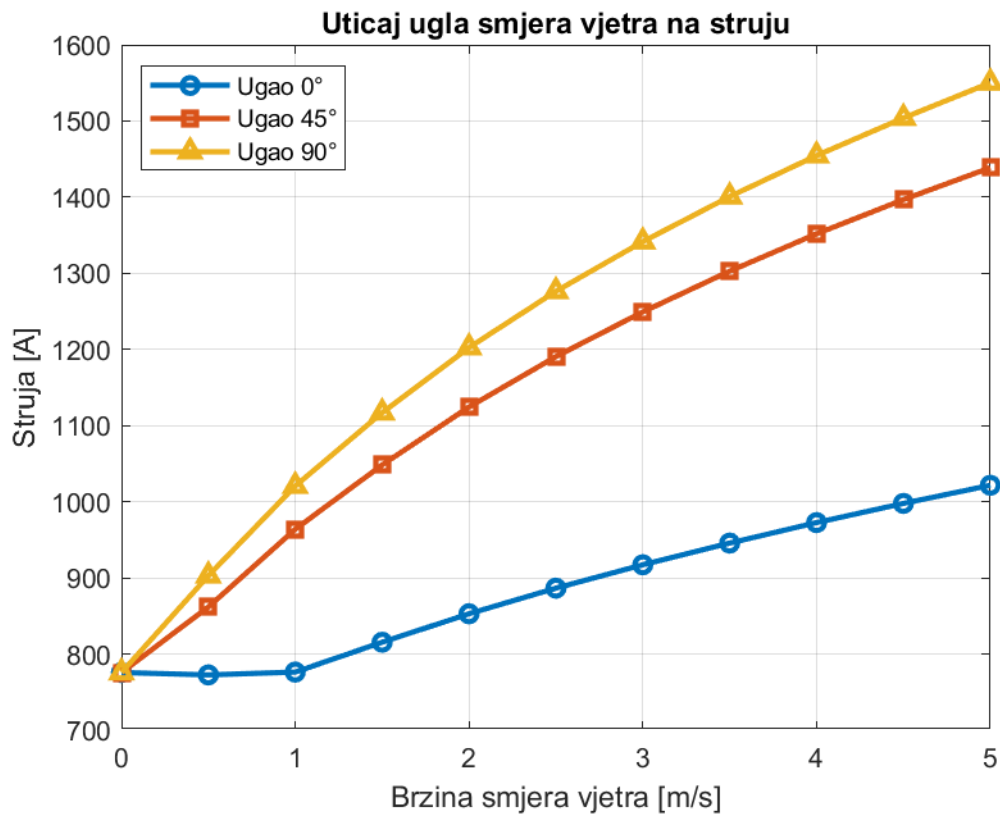
Kako se sa slike 4.5.3.1. primijećuje vrijednost struje je najmanja kada je ugao smjera vjetra u odnosu na osu provodnika 0 °, tj. kada vjetar duva paralelno pravcu dalekovoda. Najveće vrijednosti struje se ostvaruju pri uglu od 90 ° kada je hlađenje najveće, jer je vjetar normalan na osu provodnika. Pri brzini vjetra od 1 m/s vrijednost struje se poveća za 24 % ukoliko vjetar duva normalno na provodnike u odnosu na slučaj kada vjetar duva paralelno provodnicima. Ukoliko je brzina vjetra veća, na primjer 3 m/s to uvećanje iznosi 36 %, a pri 5 m/s iznosi čak 46 %. Sa grafika se može primijetiti značajno povećanje strujne opteretivosti dalekovoda sa povećanjem brzine vjetra. Konkretno, za krivu koja odgovara smjeru vjetra od 0 ° povećanje strujne opteretivosti u odnosu na brzinu vjetra iznosi 46 A/(m/s), za 45 ° to povećanje iznosi 135 A/(m/s) i konačno za 90 ° iznosi 160 A/(m/s).



Slika 4.5.3.1. Uticaj smjera vjetra na struju 400 kV dalekovoda

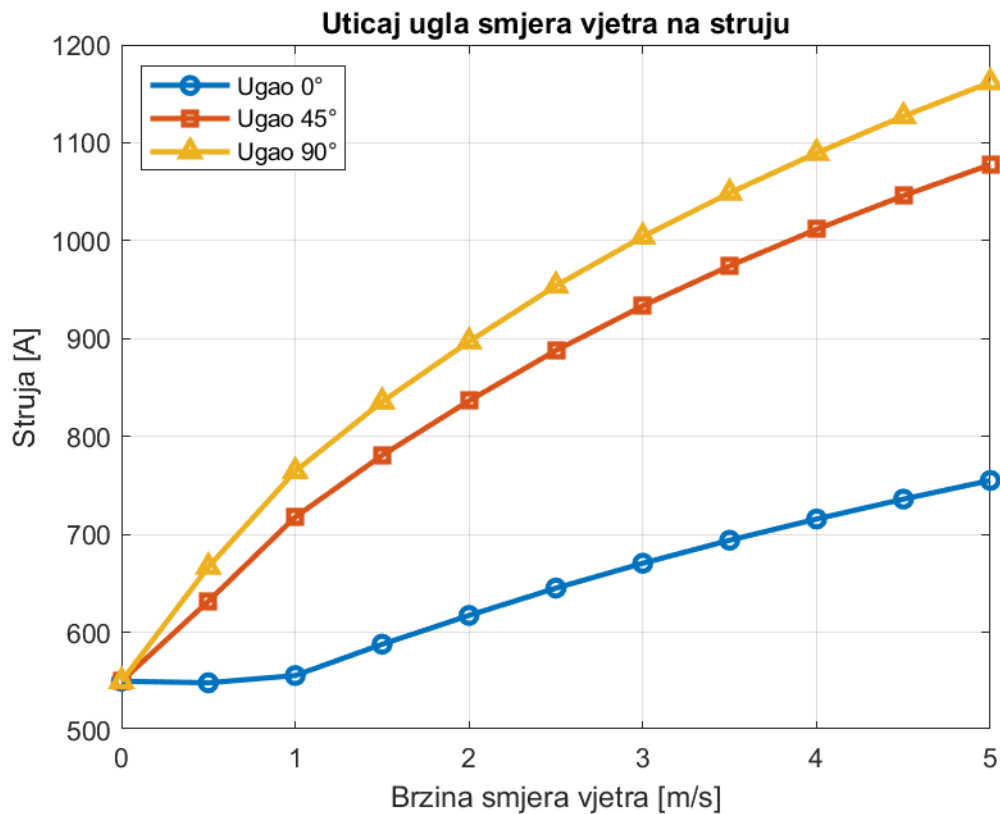
Kriva prikazana plavom bojom na slici 4.5.3.2. odgovara uglu smjera vjetra od 0° za struju na naponskom nivou od 220 kV. U opsegu brzine vjetra od 0 m/s do 1 m/s uočava se gotovo konstantna vrijednost struje, uz tek minimalno povećanje uprkos porastu brzine vjetra. Razlog za ovakvo ponašanje je ograničena sposobnost odvođenja toplote konvekcijom pri malim brzinama vjetra. Naime, za brzinu od 0 m/s u proračunu se uzima prirodna konvekcija kao dominantan mehanizam hlađenja, jer daje veće vrijednosti u odnosu na prisilnu konvekciju. Pri brzini od 1 m/s vrijednosti snage odvođenja toplote za prirodnu i prisilnu konvekciju postaju približno jednake, što rezultuje samo blagim povećanjem dozvoljene struje. Ovaj trend je prisutan i kod ostalih analiziranih naponskih nivoa.

Povećanje strujne opteretivosti za ugao od 0° na intervalu od 0 m/s do 5 m/s je ubjedljivo najmanje i iznosi 44 A/(m/s), za 45° iznosi 129 A/(m/s) i za ugao od 90° ostvareno je povećanje od čak 152 A/(m/s). Razlika između minimalnog i maksimalnog povećanja struje po jedinici brzine vjetra iznosi gotovo 3,5 puta, što dodatno potvrđuje bitan uticaj ugla smjera vjetra na ukupnu termičku sposobnost prenosa električne energije.



Slika 4.5.3.2. Uticaj smjera vjetra na struju 220 kV dalekovoda

Kao i za prethodno prikazana dva naponska nivoa, uticaj ugla smjera vjetra na struju kroz dalekovod 110 kV naponskog nivoa poprečnog presjeka 240/40 mm je isti (slika 4.5.3.3.). Kod ovog naponskog nivoa, ostvaruje se povećanje od 37 % pri 1 m/s kada je vjetar normalan na osu provodnika u odnosu na to kada duva paralelno provodniku, zatim pri 3 m/s to povećanje iznosi 49 % i konačno pri 5 m/s 53 %.



Slika 4.5.3.3. Uticaj smjera vjetra na struju 110 kV dalekovoda

Primijetno je kod analiziranih naponskih nivoa, da povećanje struje nije linearno sa povećanjem brzine vjetra. Naime, pri manjim brzinama vjetra, malo povećanje V_w dovodi do većeg povećanja dozvoljene struje provodnika, a to je kroz grafike (4.5.3.1. – 4.5.3.3.) predstavljeno strmijom krivom. Kod većih brzina vjetra, rast struje postaje blaži, odnosno u prikazanim slučajevima nagib krivih se smanjuje.

5. ZAKLJUČAK

Savremeni izazovi sa kojima se suočava elektroenergetski sistem, poput sve veće integracije obnovljivih izvora energije OIE, čija je proizvodnja nestabilna i teško predvidljiva, kao i kontinuiran rast potrošnje električne energije, zahtijevaju povećanje prenosnih kapaciteta postojećih visokonaponskih nadzemnih dalekovoda. Kao jedno od efikasnijih i ekonomičnijih rješenja nameće se primjena sistema dinamičkog određivanja prenosne moći, koji omogućava bolje iskorišćenje postojećih prenosnih kapaciteta bez potrebe za skupim infrastrukturnim proširenjima.

U ovom radu predstavljeni su ključni elementi DLR sistema, počev od senzora koji se instaliraju na dalekovodima ili u njihovoj neposrednoj okolini, do pratećih dinamičkih metoda proračuna prenosne moći. Funkcionalnost ovih sistema zasniva se na preciznom i pouzdanom prikupljanju podataka u realnom vremenu, njihovoj obradi u nadzornim centrima i primjenu odgovarajuće metodologije kojom se dobijaju vrijednosti maksimalno dozvoljene struje i prenosne moći u aktuelnim eksploatacionim uslovima.

Istraživanje koje predstavlja primjenu statičke i dinamičke metode proračuna realnog prenosnog kapaciteta primijenjeno je na tri nadzemna dalekovoda crnogorskog elektroprenosnog sistema različitih naponskih nivoa: 400 kV Podgorica 2 - Ribarevine, 220 kV Podgorica 1 - Perućica i 110 kV Krnovo - Brezna. Rezultati su pokazali konzistentan trend. Naime, u svakom satu analiziranih vremenskih perioda, dinamička metoda daje veće vrijednosti prenosne moći u odnosu na statičku, koja uzima u obzir najnepovoljnije vremenske uslove. Vrijednosti prenosne moći i dozvoljene struje variraju u zavisnosti od trenutnih meteoroloških uslova, ali u svakom momentu premašuju konzervativne granice određene statičkim proračunom. Ovim se opravdava upotreba dinamičkog pristupa. Stepem povećanja zavisi od kombinacije konkretnih vremenskih uslova.

Analizom uticaja pojedinačnih meteoroloških faktora, pokazano je da vjetar ima najznačajniji pozitivan uticaj na povećanje prenosne moći, naročito kada duva okomito na provodnik, zahvaljujući efektu povećanog hlađenja. Suprotno tome, ambijentalna temperatura i sunčevo zračenje imaju negativan efekat, pri čemu je uticaj temperature znatno izraženiji i može dovesti do smanjenja prenosne moći i preko 30 % u ekstremnim uslovima.

Na osnovu postignutih rezultata, sprovedena analiza potvrđuje da je zamjena statičke metode dinamičkom opravdana na određenim dalekovodima, npr. na linijama koje povezuju proizvodnju sa drugim čvorom u sistemu. Iako DLR sistem podrazumijeva kompleksnu implementaciju i dodatnu opremu, njegova primjena je manje zahtjevna i znatno isplativija od rješenja poput dodavanja novih provodnika ili izgradnja dodatnih dalekovoda, što predstavlja dugotrajan i skup proces.

Kao što je već u radu naglašeno, mjesto postavljanja samih senzora nije predmet istraživanja ovog master rada. Naime, identifikacija raspona predmetnog dalekovoda sa najkritičnijim vremenskim uslovima i najvećim rizikom prekoračenja sigurnosne visine usljed otezanja provodnika dalekovoda predstavljaju komplikovan zadatak i predlog za buduća istraživanja koja se mogu nadovezati na obrađenu temu. Takođe, sistem zaštita od preopterećenja na dalekovodima podešen je na vrijednost koja odgovara ljetnjem ili zimskom režimu određenom konzerzativnom metodom. Kako je i dokazano prikazom rezultata u radu, vrijednosti dobijene dinamičkom metodom su dosta veće od već izračunatih što bi dovelo do reagovanja zaštite od preopterećenja u povoljnijim meteorološkim uslovima. U tom slučaju, logika podešenja zaštite na dalekovodima bi trebala više scenarija uzeti u obzir. Takođe, implementacija DLR metode u realnom vremenu otvara mogućnosti za dinamičko upravljanje slobodnim prenosnim kapacitetom ATC (*eng. Available Transmission Capacity*), što može imati značajan uticaj na tržište električne energije, jer ATC više ne bio fiksna vrijednost, već bi zavisio od aktuelnih vremenskih uslova. Ovo rješenje bi bilo značajno za sistem tranzitnog karaktera kakav je elektroprenosni sistem Crne Gore.

Ovaj master rad predstavlja doprinos u pogledu primjene DLR metoda u crnogorskom prenosnom sistemu, ali ne obuhvata tehnička i logistička pitanja vezana za konkretno pozicioniranje senzora na terenu. Uprkos tome, rad ukazuje na veliki potencijal cjelokupnog koncepta DLR sistema za buduću primjenu u mrežama sa velikim razmjenama snage.

6. LITERATURA

- [1] I. W. Group, „IEEE 738-2012 Standard for Calculating the Current-Temperature of Bare Overhead Conductors,“ *Revision of IEEE Std 738-2006*, 2013.
- [2] T. Šterc, B. Franc, B. Filipović-Grčić / K. Mesić, „Pregled i verifikacija postojećih metodologija za proračun dinamičkog termičkog opterećenja nadzemnih vodova u prijenosnoj elektroenergetskoj mreži,“ u *Hrvatski ogranak međunarodnog vijeća za velike elektroenergetske sustave – CIGRE*, Cavtat, 2022.
- [3] A. Pavlinić, „Proračun dinamičkoga dopuštenoga termičkog opterećenja nadzemnih vodova,“ 2020.
- [4] A. A. P., D. Tholomier / S. H. Richards, „Distance protection and dynamic loading of transmission lines,“ u *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 2004.
- [5] K. Džodić, D. Todorović, M. Žerajić / Ž. Đurišić, „Analiza realnih kapaciteta nadzemnih vodova za priključenje vetroelektrana i solarnih elektrana velike snage,“ u 35. *Savetovanje Srpskog nacionalnog komiteta Međunarodnog saveta za velike električne mreže*, 2023.
- [6] A. Ravlić, „Tehničke karakteristike prijenosnih nadzemnih vodova s vodičima u snopu,“ Zagreb, 2016.
- [7] I. W. Group, „Guide for Thermal Rating Calculation of Overhead Lines,“ 2014.
- [8] J. Heckenbergerova, P. Musilek / K. Filimonenkov, „Assessment of seasonal static thermal ratings of overhead transmission conductors,“ *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 2011.
- [9] E. Fernandez, I. Albizu, M. T. Bedialauneta, A. J. Mazon / P. T. Leite, „Review of dynamic line rating systems for wind power integration,“ u *MIPRO*, 2017.
- [10] D. A. Douglass / e. al, „A Review of Dynamic Thermal Line Rating Methods With Forecasting,“ *IEEE Transactions on Power Delivery*, pp. 2100-2109, 2019.
- [11] S. Foss / R. Maraio, „Evaluation of an overhead line forecast rating algorithm,“ *IEEE Transactions on Power Delivery*, t. 7, br. 3, pp. 1618-1627, 1992.
- [12] B. Xu, A. Ulbig / G. Andersson, „Impacts of Dynamic Line Rating on Power Dispatch Performance and Grid Integration of Renewable Energy Sources,“ u *ResearchGate*, 2013.
- [13] C. J. Wallnerstrom, Y. Huang / L. Soder, „Impact from Dynamic Line Rating on Wind Power Integration,“ *IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID*, t. 6, br. 1, pp. 343-350,

2015.

- [14] F. Josue, „Transformer hot-spot temperature estimation for shorttime dynamic loading,“ u *CMD*, Bali, Indonesia, 2012.
- [15] D. Douglass, „Dynamic Rating of Overhead Lines,“ 2011.
- [16] S. C. E. Jupe, D. Kadar, G. Murphy, M. G. Bartlett / K. T. Jackson, „Application of a dynamic thermal rating system to a 132kV distribution network,“ u *2nd IEEE PES International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies*, 2011.
- [17] V. Lovrenčić, N. Gubelj / J. Lodrant, „Iskustva uvođenja dinamičkog monitoringa opterećenja slovenskih prijenosnih vodova,“ u *MIPRO 2017/HEP*, 2017.
- [18] S. Foss, S. Lin, H. Stillwell / R. Fernandes, „Dynamic thermal line ratings,“ u *IEEE Trans. Power Appl. Syst.*.
- [19] J. Engelhardt / S. Basu, „Design, installation and field experience with an overhead transmission dynamic line rating system,“ u *IEEE Pes Transmission and Distribution Conference*, Los Angeles.
- [20] M. Gabrovšek / V. Lovrenčić, „Temperature monitoring of overhead lines (OHL) is Smart Grid solution for power grid,“ 2010.
- [21] M. Gabrovšek, M. Kovac, V. Lovrencic, J. Kosmac, G. L. Jericek / A. Souvent, „Dynamic Thermal Line Rating in Slovenia,“ u *International Conference on Condition Monitoring, Diagnosis and Maintenance*, 2011.
- [22] C. Bernauer, H. Bohme / S. Grossmann, „Temperature measurement on overhead transmission lines (OHTL) utilizing surface acoustic wave (SAW) sensors,“ u *Proc. Int. Conf. on Electricity Distribution CIGRE*, Vienna, 2007.
- [23] B. Forbes, D. Bradshaw / F. Campbell, „Finding hidden capacity in transmission lines,“ 2002.
- [24] E. Cloet, J. Lilien / P. Ferrieres, „Experience of the Belgian and French TSOs using the "Ampicimon" real-time,“ u *The CIGRE Biennial Session C2_104_2010*, Paris, 2010.
- [25] N. Đoković, D. Jankelić / J. Todorović, „Analiza rada i efekta ugradnje sistema za daljinski nadzor temperature provodnika i prognozu dozvoljene struje dalekovoda u realnom vremenu na DV 110 KV Banja Luka 1-Banja Luka 6/1 nakon pet godina eksploatacije,“ u *CIGRE*, 2025.
- [26] W. H. McAdams, „Heat Transmission,“ 1954.

- [27] E. Lindberg, „The Overhead Line Sag Dependence on Weather Parameters and Line Current“.
- [28] W. Black / R. Rehberg, „Simplified model for steady state and realtime ampacity of overhead conductors,“ u *IEEE transactions on power apparatus and systems*.
- [29] T. Krontiris, A. Wasserrab / G. Balzer, „Weather-based loading of overhead lines - Consideration of conductors heat capacity,“ Wroclaw, 2010.
- [30] D. S. Tasić, „Termički aspekti strujne opteretljivosti provodnika nadzemnih elektroenergetskih vodova,“ Niš, 2002.
- [31] I. W. Group, Cigre Technical Brochure No 207 "Thermal behaviour of overhead conductors", 2002.
- [32] V. Lovrenčić, M. Kovač / M. Krevelj, „Dinamički temperaturni monitoring nadzemnih vodova prijenosnog sustava,“ u *10. simpozij o sustavu vođenja EES-a*, Opatija, 2012.
- [33] T. Sterc, B. Filipovic-Grcic, B. Franc / K. Mesic, „Methods for Estimation of OHL conductor temperature based on ANN and regression analysis,“ *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2023.

Izjava o istovjetnosti štampane i elektronske verzije master rada

Ime i prezime autora Aleksandra Zeković
Broj indeksa/upisa 6/21
Studijski program Elektroenergetski sistemi
Naslov rada "Analiza prenosnih kapaciteta nadzemnih visokonaponskih dalekovoda u realnim eksploatacionim uslovima"
Mentor Doc.dr Vladan Durković

Potpisana Aleksandra Zeković

Izjavljujem

da je štampana verzija mog master rada istovjetna elektronskoj verziji koju sam predala za objavljivanje u Digitalni arhiv Univerziteta Crne Gore.

Istovremeno izjavljujem da dozvoljavam objavljivanje mojih ličnih podataka u vezi sa dobijanjem akademskog naziva master nauka, kao što su ime i prezime, godina i mjesto rođenja, naslov master rada i datum odbrane rada.

U Podgorici, 09.09.2025.godine

Potpis magistranda



IZJAVA O KORIŠĆENJU

Ovlašćujem Univerzitetku biblioteku da u Digitalnom arhivu Univerziteta Crne Gore pohrani moj master rad pod nazivom:

"Analiza prenosnih kapaciteta nadzemnih visokonaponskih dalekovoda u realnim eksploatacionim uslovima"

koji je moje autorsko djelo.

Master rad sa svim priložima predala sam u elektronskom formatu pogodnom za trajno arhiviranje.

Moj master rad pohranjen u Digitalnom arhivu Univerziteta Crne Gore mogu da koriste svi koji poštuju odredbe sadržane u odabranom tipu licence Kreativne zajednice (*Creative Commons*) za koju sam se odlučila.

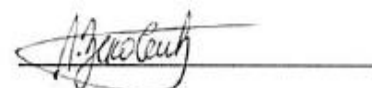
1. Autorstvo
2. Autorstvo – nekomercijalno
3. Autorstvo – nekomercijalno – bez prerade
4. Autorstvo – nekomercijalno – dijeliti pod istim uslovima
5. Autorstvo – bez prerade
6. Autorstvo – dijeliti pod istim uslovima

(Molimo da zaokružite samo jednu od šest ponuđenih licenci, kratak opis licenci dat je na poleđini lista).

U Podgorici, 09.09.2025. godine

magistranda

Potpis



1. Autorstvo - Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje djela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence, čak i u komercijalne svrhe. Ovo je najslobodnija od svih licenci.
2. Autorstvo - nekomercijalno. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje djela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu djela.
3. Autorstvo - nekomercijalno - bez prerade. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje djela, bez promjena, preoblikovanja ili upotrebe djela u svom djelu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu djela. U odnosu na sve ostale licence, ovom licencom se ograničava najveći obim prava korišćenja djela.
4. Autorstvo - nekomercijalno - dijeliti pod istim uslovima. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje djela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu djela i prerade.
5. Autorstvo - bez prerade. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje djela, bez promjena, preoblikovanja ili upotrebe djela u svom djelu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu djela.

Autorstvo - dijeliti pod istim uslovima. Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje djela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu djela i prerada. Slična je softverskim licencama, odnosno licencama otvorenog koda