

ULOGA HTLS VODIČA U SIGURNOSTI POGONA EES-a (NA PRIMJERU ELEKTROENERGETSKOG PODSUSTAVA ISTRE)

Priselac, Filip

Master's thesis / Diplomski rad

2023

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:380073>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-23**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij elektrotehnike

Diplomski rad

**ULOGA HTLS VODIČA U SIGURNOSTI POGONA EES-a (NA
PRIMJERU ELEKTROENERGETSKOG PODSUSTAVA ISTRE)**

Rijeka, ožujak 2023.

Filip Priselac
0069071712

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Diplomski sveučilišni studij elektrotehnike

Diplomski rad

**ULOGA HTLS VODIČA U SIGURNOSTI POGONA EES-a (NA
PRIMJERU ELEKTROENERGETSKOG PODSUSTAVA ISTRE)**

Mentor: Prof. dr. sc. Alfredo Višković

Rijeka, ožujak 2023.

Filip Priselac
0069071712

Rijeka, 21. ožujka 2022.

Zavod: **Zavod za elektroenergetiku**
Predmet: **Elektroenergetski sustavi**
Grana: **2.03.01 elektroenergetika**

ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnik: **Filip Priselac (0069071712)**
Studij: **Diplomski sveučilišni studij elektrotehnike**
Modul: **Elektroenergetika**

Zadatak: **Uloga HTLS vodiča u sigurnosti pogona EES-a (na primjeru elektroenergetskog podsustava Istre) / The role of HTLS conductors in the safety of power plant operation (on the example of the Istrian power subsystem)**

Opis zadatka:

Jedno od mogućih rješenja povećanja sigurnosti pogona elektroenergetskog sustava u tranziciji jest ugradnja tzv. temperaturnih vodiča s malim provjesom (eng. High Temperature Low Sag, skraćeno HTLS). Mogućnost njihove ugradnje u postojeće dalekovode omogućilo bi povećanje njihove prijenosne moći. Zadatak diplomskog rada je istražiti tehničke, ekonomske i ekološke čimbenike HTLS vodiča. Nadalje, na stvarnom modelu elektroenergetskog podsustava Istre potrebno je na osnovu simulacija u nekom od softverskih alata (npr. Siemens PSS) odrediti moguće pozicije ugradnje HTLS vodiča. Rezultati simulacija moraju pokazati opravdanost ugradnje HTLS vodiča na osnovu analize sigurnosti po kriteriju N-1.

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



Zadatak uručen pristupniku: 21. ožujka 2022.

Mentor:


Prof. dr. sc. Alfredo Višković

Predsjednik povjerenstva za
diplomski ispit:



Prof. dr. sc. Viktor Sučić

IZJAVA

Sukladno s člankom 8. Pravilnika o diplomskom radu, diplomskom ispitu i završetku diplomskih sveučilišnih studija Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Rijeci, od siječnja 2020. godine, izjavljujem da sam samostalno izradio diplomski rad pod naslovom „Uloga HTLS vodiča u sigurnosti pogona EES-a (na primjeru elektroenergetskog podsustava Istre)“ uz izvještavanja te pomoću konzultacija s mentorom prof. dr. sc. Alfredom Viškovićem i asistentom dr.sc. Vladimirom Valentićem.

Rijeka, ožujak 2023.

Filip Priselac

ZAHVALA

Uvelike se zahvaljujem mentoru i profesoru prof. dr. sc. Alfredu Viškoviću te asistentu dr.sc. Vladimiru Valentiću na stručnom mentorstvu i savjetovanju tijekom izrade diplomskog rada. Također se zahvaljujem ostalim profesorima, asistentima i osoblju fakulteta na prenesenom znanju i vještinama stečenim za vrijeme studiranja. Za kraj, neizmjernu zahvalu dajem svojoj obitelji, prijateljima i kolegama s fakulteta za podršku tijekom diplomskog studija.

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. ZNAČAJKE VODIČA	2
2.1. Aluminijski vodiči ojačani čelikom (ACSR vodiči)	3
2.2. Visokotemperaturni vodiči malog provjesa (HTLS vodiči)	6
2.2.1. HTLS vodič tipa TACSR (eng. <i>Thermal Resistant Aluminum Alloy Conductors Steel Reinforced</i>)	7
2.2.2. HTLS vodič tipa GTACSR (eng. <i>Gap-Type Aluminum Conductor Steel Reinforced</i>)	9
2.2.3. HTLS vodič tipa ZTACIR/XTACIR (eng. <i>Super Thermal Aluminum Conductor Invar Reinforced/Extra Thermal Aluminum Conductor Invar Reinforced</i>)	13
2.2.4. HTLS vodič tipa ACSS/TW (eng. <i>Aluminum Conductor Steel Supported/Trapezoidal wire</i>)	17
2.2.5. HTLS vodič tipa ACCC/TW (eng. <i>Aluminum Conductor Composite Core/Trapezoidal Wire</i>) .	20
2.3. Tehno-ekološka analiza uporabe HTLS vodiča	23
2.3.1. Visoko-toplinska procjena HTLS vodiča	23
2.3.2. Niže linearno toplinsko širenje HTLS vodiča	25
2.3.3. Temperatura koljena.....	26
2.3.4. Analiza troškova.....	29
2.3.5. Utjecaj na okoliš.....	30
3. ZNAČAJKE ELEKTROENERGETSKOG PODSUSTAVA ISTRE	38
3.1. Integracija OIE	42
3.2. Analiza sigurnosti po N-1 kriteriju	43
3.3. Frekvencijska stabilnost	44
3.4. Naponska stabilnost	45
4. ANALIZA SIMULACIJA KARAKTERISTIČNIH SCENARIJA	46
4.1. Povećanje prijenosne moći DV 110 kV Buje – Kopar i 110 kV poteza Plomin – Lovran – Matulji visokotemperaturnim vodičima malog provjesa	48
4.1.1. Simulacija karakterističnog scenarija klasičnim vodičima.....	49
4.1.2. Simulacija karakterističnog scenarija HTLS vodičima	51
4.2. Analiza ostalih tehničkih rješenja za poboljšanje pogonske sigurnosti Istre	53
4.2.1. Izgradnja novog DV 110 kV Matulji – Buzet	54
4.2.2. Izgradnja novog DV 110 kV Buzet – Vranja te 110 kV Vranja – Lovran	55
4.2.3. Izgradnja novog DV 110 kV Buzet – Vranja, KB 110 kV Vranja – Lovran te DV 110 kV Lovran – Pehlin.....	56
4.2.4. Izgradnja novog DV 110 kV Tupljak – Vranja te KB 110 kV Vranja – Lovran	57

4.2.5. Izgradnja novog DV 110 kV Tupljak – Vranja, KB 110 kV Vranja – Lovran te DV 110 kV Lovran – Pehlin	58
4.2.6. Izgradnja novog DV/KB 110 kV Medulin – Lošinj	59
4.2.7. Izgradnja novog DV/KB 110 kV Medulin – Lošinj, te KB 110 kV Lošinj – Novalja	60
4.2.8. Izgradnja novog DV/KB 110 kV Medulin – Cres	61
4.2.9. Izgradnja novog DV/KB 110 kV Medulin – Cres, te KB 110 kV Cres – Rab	62
4.2.10. Izgradnja novog DV/KB 110 kV Raša – Cres	63
4.2.11. Izgradnja novog KB 220 kV Plomin – TE Rijeka	64
4.2.12. Izgradnja novog DV 220 kV Vodnjan – Divača	65
4.2.13. Izgradnja novog DV 400 kV Melina – Tupljak – Divača	66
5. ZAKLJUČAK	68
6. LITERATURA	70
7. POPIS OZNAKA I KRATICA	73
8. SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI	74
9. ABSTRACT AND KEYWORDS	75

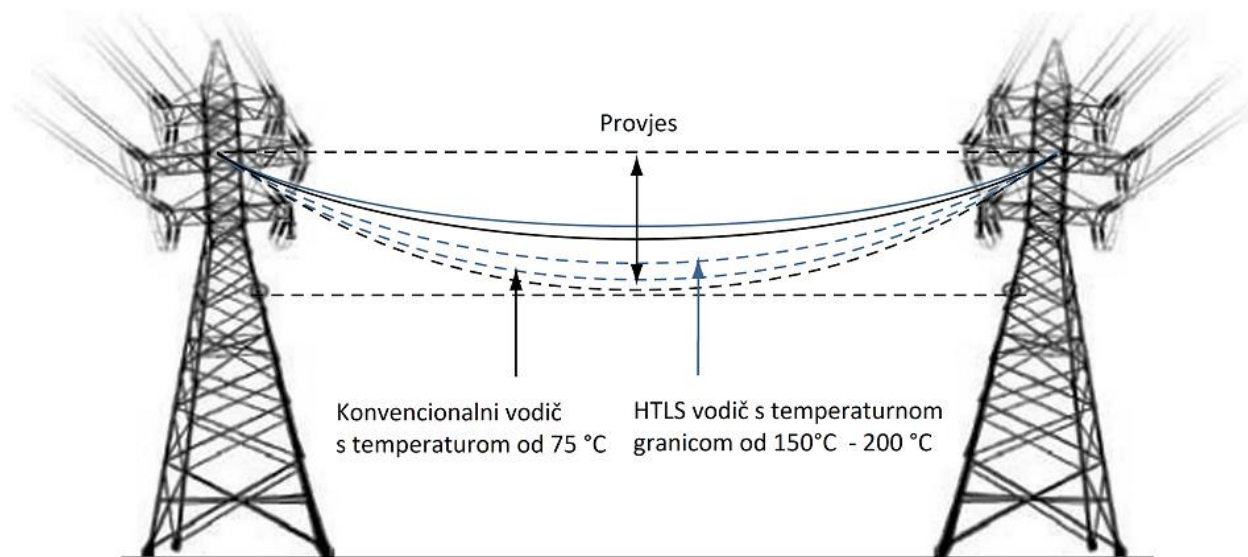
1. UVOD

Kako hrvatski EES čine proizvodni objekti i postrojenja, te prijenosna i distribucijska mreža zajedno s kupcima električne energije na području Republike Hrvatske, u svrhu sigurne i kvalitetne opskrbe kupaca električnom energijom te radi razmjene električne energije, hrvatski EES povezan je s EES-ovima susjednih država i ostalim sustavima članica ENTSO-E (eng. *European Network of Transmission System Operators for Electricity*) [1]. Cijeli taj ujedinjeni sustav tvori sinkronu mrežu kontinentalne Europe. Kupci u Republici Hrvatskoj opskrbljuju se električnom energijom iz elektrana s područja Hrvatske te nabavom električne energije iz inozemstva. Pomoću prijenosne mreže električna se energija transportira od centara proizvodnje (elektrana) do centara potrošnje (gradova, regija). To rezultira visokim tokovima snage u hrvatskoj prijenosnoj mreži. Uz prijenosne postoje također i distribucijske mreže kojima se električna energija unutar centara potrošnje dovodi sve do krajnjih kupaca. Distribucijske mreže koriste niže napone i pokrivaju manje udaljenosti. Za prijenos električne energije koriste se visokonaponski vodovi i kabeli, transformatori i druga oprema. U Republici Hrvatskoj se za prijenos električne energije koriste naponske razine od 110, 220 i 400 kV. Svojom veličinom hrvatski EES spada u manje sustave u Europi, a zbog svojeg specifičnog geografskog položaja i rasporeda proizvodnih objekata, većim dijelom godine tokovi snaga kreću se u pravcu zapada Republici Sloveniji i Republici Italiji.

Republika Hrvatska doživljava značajne promjene vezane za elektroenergetsku mrežu u dnevnim i sezonskim opterećenjima. Takve promjene su posljedica utjecaja faktora poput mikrolokacijskog razvoja turizma, urbanističkog razvoja, razvoja industrije, te proizvođača i distributera električne energije. Na temelju ovih promjena, potrebno je istražiti nova tehnološka rješenja kako bi se zadovoljila povećana sezonska i dnevna potražnja za energijom, a jedno od tih rješenja je upravo zamjena konvencionalnih vodiča s modernijim visokotemperaturnim vodičima malog provjesa o kojima će biti riječ u ovom radu.

2. ZNAČAJKE VODIČA

Zbog utjecaja mnogobrojnih čimbenika, operatori prijenosnog sustava imaju želju i potrebu povećati snagu postojećih dalekovoda, pogotovo onih tranzitnih dionica. Dakle, kako bi se omogućio protok velike snage kroz vodič, imamo dva parametra koja se mogu kontrolirati; prvi je napon a drugi struja. Ako povećamo napon, razmak između vodiča mora biti povećan, što zahtijeva veće prijenosne stupove. Također, velika razlika udaljenosti između stupova rezultira provjesom, što je opet jedna značajka o kojoj je potrebno voditi računa. Druga opcija je povećanje struje u vodiču bez povećanja gubitaka u velikoj mjeri. U današnjici se za prijenos električne energije u velikoj mjeri koriste aluminijski vodiči ojačani čelikom, tj. ACSR (eng. *Aluminium cored steel reinforced*) vodiči. Kako bi posjedovali malu težinu, ACSR vodiči sastoje se od čelične jezgre okarakterizirane visokom mehaničkom čvrstoćom, te vanjskih slojeva različitih aluminijskih žica spiralno namotanih na jezgru. Takvi vodiči mogu podnijeti temperaturu do 85°C. ACSR je prikladan za upotrebu u svim praktičnim rasponima na drvenim stupovima, dalekovodnim stupovima i drugim strukturama zbog svoje pouzdanosti te omjera snage i težine [2,3]. Slika 2.1. prikazuje usporedbu provjesa klasičnog ACSR vodiča i visokotemperaturnog vodiča malog provjesa.

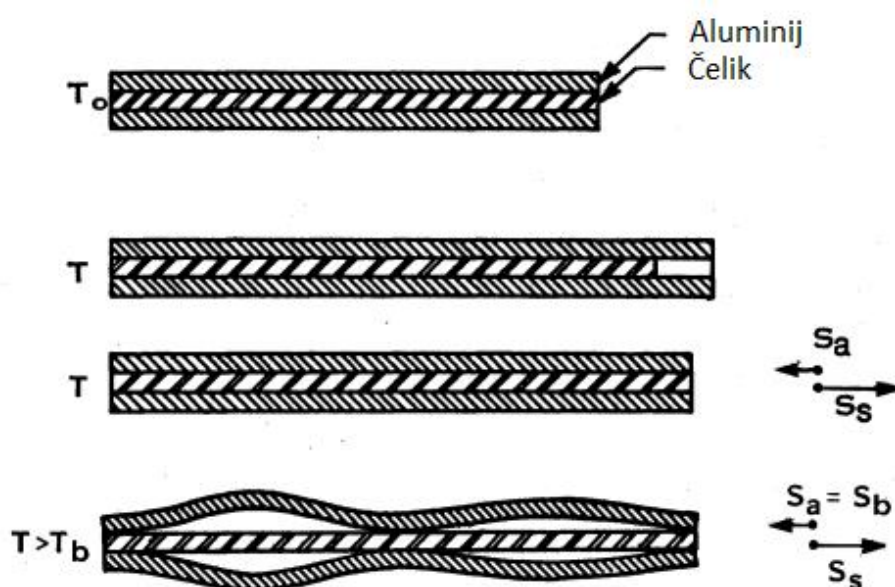


Slika 2.1. Usporedba provjesa uz temperaturnu granicu konvencionalnog ACSR te HTLS vodiča [9]

Sa slike 2.1. može se uočiti značajno manji provjes HTLS vodiča, iako on radi na mnogo višim temperaturama u odnosu na ACSR vodič.

2.1. Aluminijski vodiči ojačani čelikom (ACSR vodiči)

Ponašanje jednostavnog modela prikazanog na slici 2.2. ilustrira toplinske učinke ACSR vodiča na višim radnim temperaturama.



Slika 2.2. Jednostavni temperaturni model ACSR vodiča [4]

Gornja skica pokazuje vodič na sobnoj temperaturi gdje je nenapregnuta duljina aluminijskih i čeličnih elemenata jednaka. Druga skica prikazuje slobodno toplinsko širenje nenapregnutog vodiča gdje dvije komponente imaju različite dužine. Treća skica prikazuje stanje u kojem su dva elementa prisiljena zauzeti istu duljinu što rezultira većim produljenjem čelične jezgre nego što je to slučaj kod slobodnog širenja. Ovaj učinak nastaje zbog tlačnog opterećenja u aluminiju koji mora biti uravnotežen jednakim vlačnim opterećenjem u čeličnoj jezgri. Ako aluminijske niti nisu u mogućnosti poduprijeti tlačno opterećenje, duljina vodiča bila bi jednaka duljini čelične jezgre kako je prikazano na drugoj skici. Donja skica ilustrira niti s efektom „birdcage“ s konstantnim tlačnim naprežanjem s_b na aluminiju iznad temperature pri kojoj nastaje „birdcage“ efekt. Navedenim efektom nastaje deformacija u upletenoj žici gdje su se niti u ogoljenom dijelu između omotača izolirane žice i zalemljene veze (ili pokositrenog vodiča) odvojile od normalnog rasporeda niti, tvoreći oblik nalik kavezu za ptice. Temperatura provjesa, toplinsko istežanje i ispitivanja deformacijskog naprežanja su pokazala da tlačno naprežanje doseže graničnu vrijednost na temperaturi „birdcage“ efekta.

Vrijednosti s_s i s_a na slici 2.2. označavaju radijalno naprezanje čelika (s_s) i aluminijske niti (s_a) izraženo u megapaskalima pri određenim temperaturama (T) i temperaturi „birdcage“ efekta (T_b).

Tlačno opterećenje aluminijske niti može se prikazati i pri sobnoj temperaturi. Tijekom ispitivanja naprezanja nastaju velika trajna istezanja u aluminijskoj niti zbog nastanka efekta puzanja. Kada je napetost prekinuta, prekomjerno produljenje aluminijskih niti uzrokuje slično radijalno kretanje niti i tlačno opterećenje kao što uzrokuje i zagrijavanje vodiča. Ako su vanjske aluminijske niti tada prerezane dolazi do njihovog povlačenja, dopuštajući tako unutarnjim nitima da se pomiču radijalno prema van, a kao rezultat toga vodič se skraćuje. Skraćivanje je obično 0,02% do 0,04%, što odgovara iznosu od oko 6 MPa do 12 MPa tlačnog opterećenja na aluminijsku nit. To bi rezultiralo s otprilike 0,3 m do 0,6 m dodatnog provjesa u tipičnom rasponu od 300 m. Vanjska ispitivanja ovisnosti temperature i provjesa pokazala su prekomjerni nastanak provjesa koji ima iznos veći nego četiri ove vrijednosti jer pod radijalnim toplinskim gradijenatom tlačno opterećenje na aluminijsku nit je mnogo veće.

Tlačno opterećenje aluminijskih niti može se sagledati uzimajući u obzir radijalna kretanja različitih aluminijskih slojeva. Na nekoj povišenoj temperaturi nakon što se aluminijske niti rašire i postanu nenapregnute, počinju se radijalno odmicati od čelične jezgre kako bi se prilagodile prekomjernom toplinskom istezanju. Jednadžba ispod (2.1) povezuje promjenu u polumjeru sloja na promjenu osnog izduženja. Prema ovoj jednadžbi unutarnji slojevi u većoj se mjeri kreću prema van od vanjskih slojeva. Rezultat toga je međusobno vezanje slojeva i podržavanje aksijalnog tlačnog opterećenja. Tlačna opterećenja povećavaju se na višim temperaturama jer su vanjski slojevi aluminijske niti hladniji od unutarnjih i to povećava njihovu sposobnost obuzdavanja radijalnih sila [4].

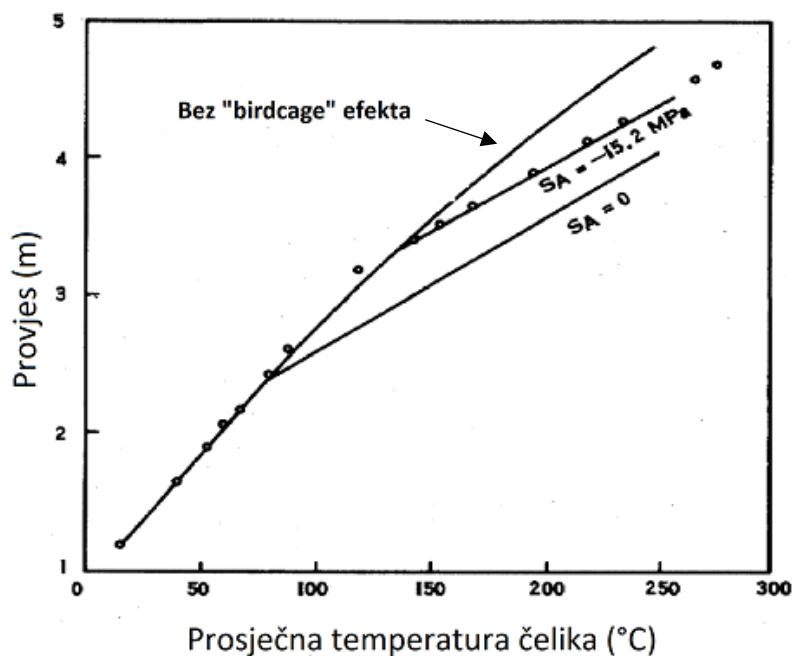
Jednadžba gdje je promjena aksijalne deformacije sloja aluminijske niti u ACSR vodiču povezana s promjenom radijusa sloja vodiča:

$$\delta c_a = -\frac{\delta R}{R} \tan^2 \theta \quad (2.1)$$

U gore navedenoj jednadžbi (2.1) oznake predstavljaju sljedeće:

- δR je radijalni pomak sloja vodiča mjeren u metrima,
- R je radijus sloja vodiča mjeren u metrima i
- θ je kut upletenog sloja žice.

Slika 2.3. prikazuje povećani provjes na vanjskom ispitnom rasponu od 122 m zbog tlačnog napreznja u aluminiju iznad temperature efekta „birdcage“. Za ovaj testni vodič, izračunato je tlačno napreznje u iznosu od 15,2 MPa. Pri tipičnom rasponu od 300 m, povećanje provjesa zbog tlačnog napreznja bilo bi približno 1 metar.



Slika 2.3. Prikaz progiba ovisno o temperaturi na testnom ACSR vodiču [4]

Ispitivanja napreznja i toplinskog istežanja vodiča pokazala su da aluminijske niti ACSR vodiča mogu podnijeti tlačna napreznja u rasponu od 6 MPa do 12 MPa. Dokazano je da testovi povezani sa provjesom i temperaturom na otvorenom pokazuju da radijalni toplinski gradijenti u vodiču, uzrokovani vjetrom, mogu povećati granično tlačno napreznje do 18 MPa ili više. Ovo može biti uzrok prekomjernog provjesa na visokim temperaturama od otprilike 1.5 m pri tipičnom rasponu vodiča od 300 m.

2.2. Visokotemperaturni vodiči malog provjesa (HTLS vodiči)

Povećana potrošnja energije razvojem industrije dovela je u prijenosnim i distribucijskim mrežama značajno povećanje opterećenja mreže. Kako bi se zadovoljila rastuća potražnja električne energije potrošača, što i uzrokuje rastuće opterećenje dalekovoda, potrebno je povećati i prijenosnu moć dalekovoda. Rezultat ovog problema bio je razvoj novih tehnologija za prijenos električne energije, a samim time i razvoj nadzemnih vodiča što je dovelo do nastanka visoko-temperaturnih vodiča malog provjesa, tj. HTLS vodiča koji su u stanju podnositi veća opterećenja i naprezanja pri prijenosu većeg iznosa snage naspram konvencionalnih ACSR vodiča. Dakle, dva su glavna načina za povećanje prijenosne moći linije; korištenje visoko-temperaturnih vodiča s malim provjesom (HTLS vodiča), te izgradnja novih prijenosnih dalekovoda. Drugi način nosi nekoliko poteškoća sa sobom. Prva od njih je prostranost zemlje i nepreglednost terena, što stvara bitne neprilike za postavljanje novih nadzemnih vodova. Također, vremensko razdoblje od prvog trenutka kada nastane potreba za novom linijom sve do trenutka dok se ta linija konačno ne postavi čine veliki vremenski period u kojem može proći desetljeće ili čak i više. Drugi problem je što novi nadzemni vod stvara utjecaj na okoliš te na izgled samog krajolika [4,5]. Ove činjenice su važan društveni čimbenik zbog kojih se instalacija novih nadzemnih vodova ne provodi ukoliko to nije posve potrebno. Uzimajući u obzir poteškoće s instalacijom novih nadzemnih linija, bolja opcija je poboljšati postojeće. Jedna od radnji koja najviše obećava je zamjena tradicionalnih vodiča novima koji će biti u stanju raditi na višoj temperaturi bez povećanja provjesa. Instalacija ovih, visoko-temperaturnih vodiča malog provjesa ne nosi kompleksne zahtjeve jer se operacija može smatrati kao održavanje linije. Također, ovi HTLS vodiči nemaju povećanu vizualnu promjenu niti povećani promjenjivi utjecaj na okoliš jer su izgledom vrlo slični tradicionalnim vodičima. Dakle, pošto izgradnja novog dalekovoda također predstavlja i veliku zapreku s ekonomskog stajališta, zbog potreba za velikim kapitalnim ulaganjima, zamjena ACSR vodiča novo-razvijenim HTLS vodičem je vrlo praktičan način da se poveća moć prijenosa i zadovolji današnja rastuća potražnja električne energije [3,6].

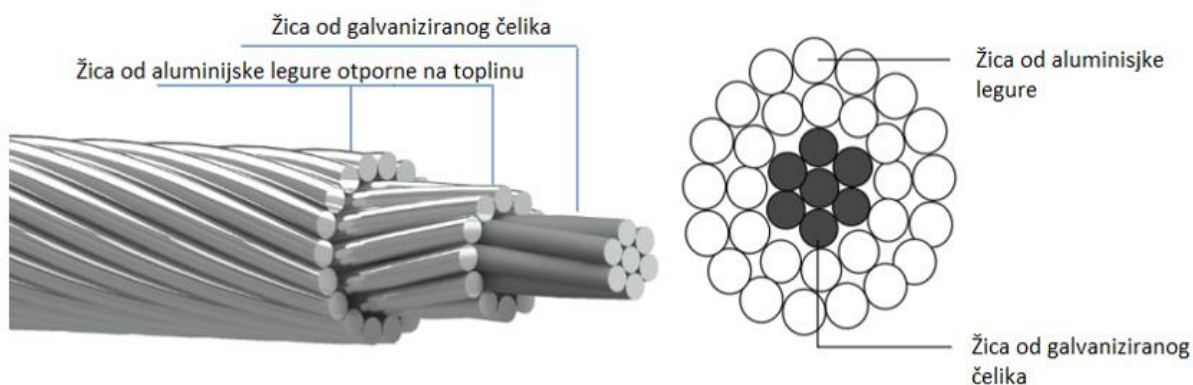
Sloj aluminijske žice i konfiguracija HTLS vodiča ostaje ista kao kod ACSR vodiča. Razlika leži u tome da aluminij koji se obrađuje posjeduje veliku toplinsku otpornost zbog koje može izdržati visoke temperature tijekom svog životnog vijeka bez pogoršanja električnih i mehaničkih svojstava. Materijal jezgre okarakteriziran je vrlo niskim koeficijentom širenja, čime se ne dopušta povećanje provjesa vodiča unatoč dugotrajnoj kontinuiranoj višoj radnoj temperaturi. Na elektromehaničko, toplinsko, te mehaničko ponašanje vodiča nije utjecano, niti se ono mijenja

nakon dugotrajne uporabe uz stalnu visoku temperaturu pri udvostručenoj snazi prijenosa u usporedbi sa sadašnjim ACSR vodičem [3,7,8].

Glavni vrste HTLS vodiča su sljedeće: TACSR, GTASCR, ZTACIR, ACSS i ACCC [8]. Navedeni vodiči mogu raditi na temperaturama između 150°C i 250°C bez promjene mehaničkih i kemijskih svojstava [9]. Za navedene vrste vodiča u ovom poglavlju biti će opisane njihove strukture, svojstva te ponašanja na određenim temperaturama.

2.2.1. HTLS vodič tipa TACSR (eng. *Thermal Resistant Aluminum Alloy Conductors Steel Reinforced*)

Ovi vodiči su po konstrukciji vrlo slični konvencionalnim ACSR vodičima (slika 2.4.), gdje su aluminijske žice ACSR vodiča zamijenjene tvrdo vučenim aluminijskim žicama od legure aluminija otporne na toplinu (općenito poznate kao TAL) [10]. TACSR može sigurno raditi na kontinuiranoj temperaturi iznad 150°C što omogućuje veći prijenos struje kroz vodič. Toplinska rastezljivost TACSR vodiča je ista onoj kod Al/Fe vodiča, međutim razlika leži u tome da pri većim temperaturama ne dolazi do povećanja provjesa. Mjesta na kojima postoji potreba za većim prijenosom energije, ali postoje ograničenja za dobivanje odobrenja za nove strujne koridore, različite vrste TAL vodiča jedno su od najboljih kreativnih rješenja za uporabu.



Slika 2.4. Prikaz konstrukcije i presjeka TACSR vodiča [9]

Cirkonij dodan u aluminijsku leguru ((Z)TACSR) osigurava plaštu ovog vodiča otpornost na promjene električnih i mehaničkih svojstava na temperaturama i do 210°C [11]. Zbog svoje iznimne otpornosti na toplinu (Z)TACSR vodiči se upotrebljavaju za povećanje prijenosne moći na mjestima potrebne dodatne sigurnosti udaljenosti i visine, te ih čini vrlo isplativim rješenjem za obnovu postojećih linija s povećanim prijenosom.

Značajke ove vrste vodiča su mogućnost velikog prijenosa struje te stabilnost na povišenim temperaturama (mogu raditi do 150°C uz specificirani gubitak čvrstoće). Uz to dobrim mehaničkim svojstvima mogu nositi 50%-60% više struje od ACSR vodiča iste veličine, dok maksimalni provjes i maksimalna radna napetost ostaju gotovo isti kao kod ACSR vodiča. Najprikladniji su za povećanje prijenosne moći postojećeg voda gdje dodatni koridori napajanja nisu izvedivi, dok za postojeće vodove nisu potrebne modifikacije ili pojačanje postojećih stupova [12].

U tablici 2.1. prikazane su specifikacije za određene veličine TACSR vodiča.

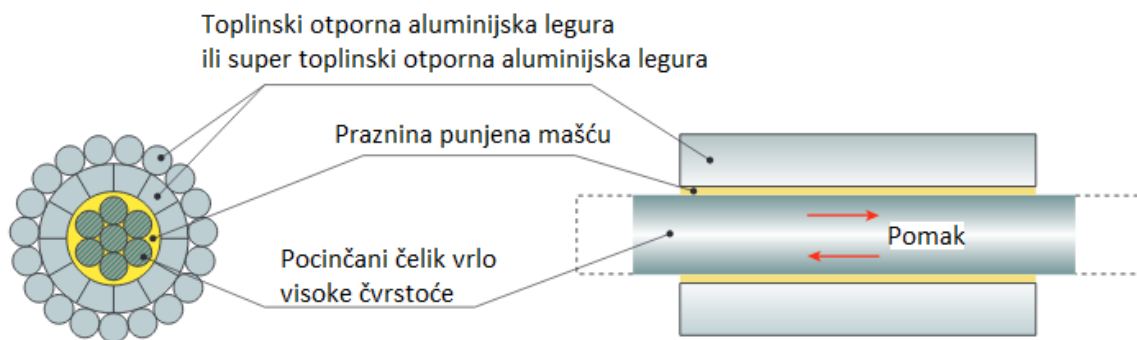
Tablica 2.1. Specifikacije TACSR vodiča [12]

Veličina vodiča (mm ²)	Broj žica vodiča		Promjer vodiča		Površina presjeka			Promjer cijelog vodiča (mm)	Težina			Regularna čvrstoća vodiča (KN)	Otpor pri 20°C (za DC) (Ω/km)	Nazivna struja	
	TAL	Čelik	TAL (mm)	Čelik (mm)	TAL (mm ²)	Čelik (mm ²)	Ukupno (mm ²)		TAL (Kg/Km)	Čelik (Kg/Km)	Ukupno (Kg/Km)			Pri 150 °C (A)	Pri 85°C (A)
58	6	1	3.50	3.50	57.73	9.62	67.35	10.50	158.42	74.84	233.26	21.28	0.5053	197	325
95	6	1	4.50	4.50	95.43	15.90	111.33	13.50	261.87	123.70	385.57	33.78	0.3057	267	448
100	15	4	2.90	2.90	99.08	26.42	125.50	14.50	272.63	209.25	481.88	50.26	0.2952	276	465
160	30	7	2.60	2.60	159.28	37.17	196.45	18.20	439.32	290.43	729.75	74.50	0.1841	393	672
200	30	7	2.90	2.90	198.16	46.24	244.40	20.30	546.55	361.29	907.84	92.08	0.1480	448	773
330	26	7	4.00	3.10	326.73	52.83	379.56	25.30	902.23	412.78	1315.01	117.46	0.0898	601	1056
410	26	7	4.50	3.50	413.51	67.35	480.86	28.50	1141.86	526.24	1668.10	149.26	0.0710	691	1230
520	54	7	3.50	3.50	519.54	67.35	586.89	31.50	1437.04	526.24	1963.28	167.68	0.0566	778	1398

610	54	7	3.80	3.80	612.4 2	79.3 9	691.8 1	34.2 0	1693. 94	620. 31	2314. 25	192. 10	0.04 80	857	1553
800	54	19	4.34	2.61	798.8 5	101. 65	900.5 0	39.0 9	2209. 60	796. 93	3006. 53	257. 13	0.03 68	999	1840
1120	72	19	4.45	1.78	1119. 81	47.2 8	1167. 09	44.5 0	3097. 07	370. 67	3467. 74	239. 99	0.02 63	510	951
1520	84	7	4.80	4.80	1520. 03	126. 67	1646. 70	52.8 0	4207. 25	989. 73	5196. 98	379. 25	0.01 94	875	1668

2.2.2. HTLS vodič tipa GTACSR (eng. *Gap-Type Aluminum Conductor Steel Reinforced*)

GTACSR je toplinski aluminijski vodič ojačan čelikom s prazninama. Ovaj tip vodiča koristi sloj aluminija otpornog na toplinu koji prekiva čeličnu jezgru. Mali prstenasti razmak održava se između čelične jezgre visoke čvrstoće i prvog sloja niti aluminijske legure (slika 2.5.) [13,14].



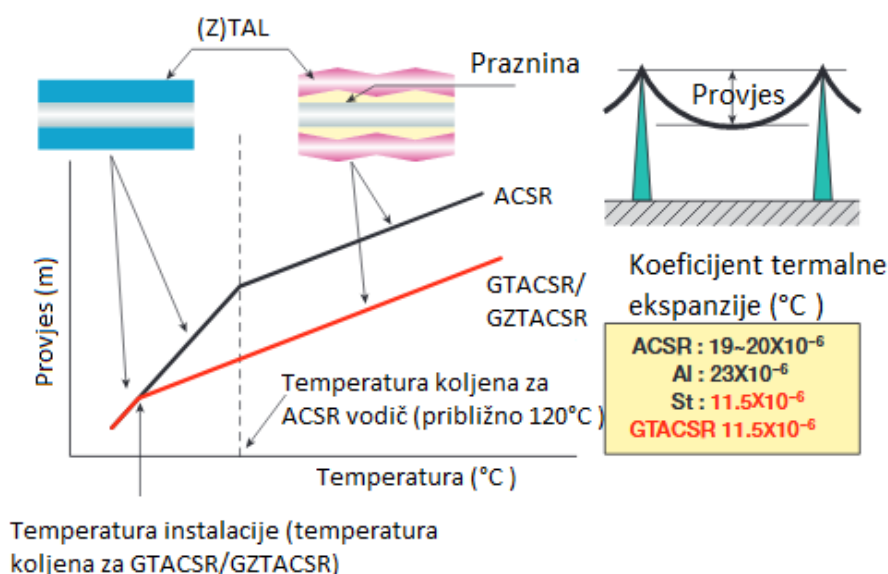
Slika 2.5. Prikaz presjeka gap-type vodiča [8]

Razmak između prvog sloja aluminijskih niti trapezoidnog oblika i čelične jezgre ispunjen je mašču visoke toplinske otpornosti kako bi se smanjilo trenje između jezgre i vanjskih slojeva te kako bi se spriječilo prodiranje vode. Ovo također služi kako bi se naprezanje prenijelo samo na čelik. Vanjske niti načinjene su od aluminija visoke čistoće, odabrane zbog svoje dobre vodljivosti, male težine, niske cijene, otpornosti na koroziju i dobre mehaničke otpornosti [11].

Smanjenje trenja omogućuje da se GTACSR vodiči mogu zatezati samo pomoću čelične jezgre, ostavljajući tako aluminijske slojeve rastegnutima. Ova činjenica znači da produljenje ove vrste vodiča ovisi samo o karakteristikama čelične jezgre, a samim time i povećanje provjesa kada se

temperatura poveća. Posljedično rastom temperature poveća se i električna energija koju prenosi GTACSR vodič bez neproporcionalnog povećanja provjesa [14].

U trenutku stvaranja provjesa, sva napetost je primijenjena na čeličnu jezgru zbog posebne metode vezivanja. Kao rezultat toga, toplinsko širenje GTACSR/GZTACSR vodiča je ono na čeličnoj jezgri, a niže toplinsko širenje čelične jezgre održava mali provjes pri visokim temperatura. Koeficijent toplinskog širenja čelične jezgre je $11,5 \times 10^{-6} / (^{\circ}\text{C})$ što je otprilike polovica onog kod uobičajenog ACSR vodiča gdje iznosi oko $20 \times 10^{-6} / (^{\circ}\text{C})$ (slika 2.6.). Upravo zbog toga, bolja toplinska karakteristika ekspanzije GTACSR/GZTACSR vodiča naspram one konvencionalnog ACSR vodiča omogućuje manji provjes pri uvjetima visoke temperature. Na slici 2.6. također se može primijetiti mnogo niža temperatura koljena GTACSR/GZTACSR vodiča u odnosu na klasične ACSR vodiče.

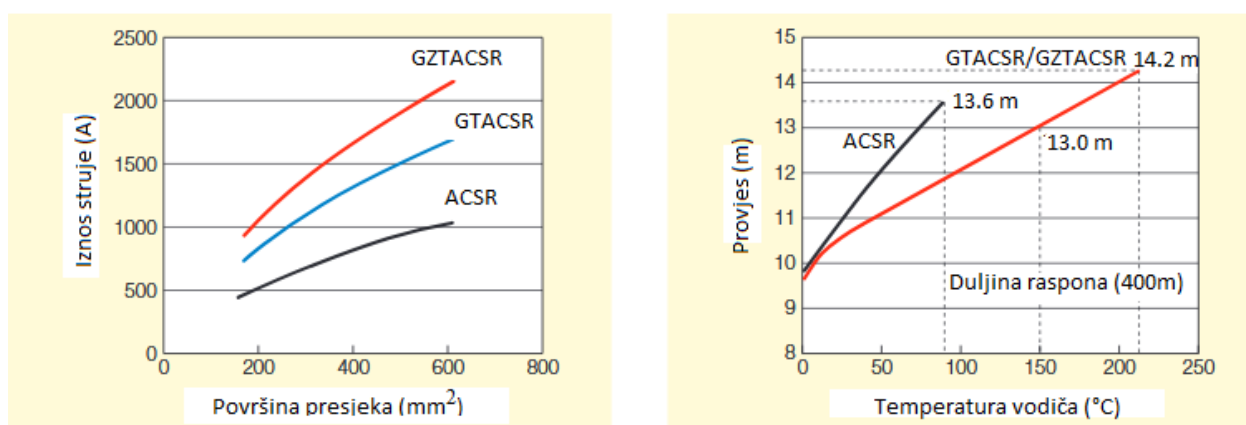


Slika 2.6. Karakteristika provjesa ovisno o temperaturi za ACSR i GTACSR/GZTACSR vodiče [8]

Premda su „gap-type“ poprilično jeftiniji od ostalih visoko-temperaturnih vodiča, ovakav tip vodiča ima vrlo kompleksan način razvlačenja i montiranja. Kompleksnost se odnosi na to da se dio procesa montaže mora odraditi na samom stupu što predstavlja dodatne sigurnosne probleme zbog montaže vodiča na visini. Jedan od glavnih nedostataka prilikom montaže vodiča na nosivi

stup je izvođenje „nosivo-zateznog“ zavješnja koje se mora izvoditi svakih pet do najviše šest raspona u zateznom polju. Usprkos kompliciranoj montaži, u Velikoj Britaniji ovaj tip vodiča se postavlja često zbog svoje pristupačne cijene [11,14]. Za ovaj top vodiča nisu potrebne modifikacije niti potpuno pojačanje za postojeće stupove, stoga je idealno za ponovno vođene projekte. Mogu se postaviti u postojeće strukture smanjujući tako pritisak na strukture, produljujući im tako vijek trajanja. Također, njihovom primjenom može se koristiti udvostručeni prijenos struje za vodič iste veličine [13].

Prednosti GTACSR vrste vodiča su mogućnost prijenosa do 1,6 puta veće struje od ACSR vodiča ekvivalentne veličine, dok se uporabom GZTACSR (GTACSR sa dodanim cirkonijem) vodiča može prenositi 2 puta veća struja od ACSR-a ekvivalentne veličine što je i prikazano na karakteristici slike 2.7. (lijevo). Vidljivo je da uz iste površine presjeka ACSR vodiči mogu prenositi struju do iznosa nešto više od 1 kA dok za „gap-type“ vodiče taj iznos doseže 1.7 kA te 2.2 kA.



Slika 2.7. Usporedba provjesa ACSR vodiča s GTACSR/GZTACSR vodičem [8]

Desna karakteristika slike 2.7. prikazuje da uz kontinuiranu radnu temperaturu do 150°C/210°C GTACSR/GZTACSR vodiči održavaju mehaničku čvrstoću uz mali provjes dok se iste veličine provjesa kod ACSR vodiča dosežu već pri temperaturi od oko 100°C. Toplinska točka koljena koju posjeduju je niska, a pošto ne zahtijevaju skupe materijale pridonose smanjenju troškova što ih čini vrlo isplativim rješenjem za povećanje prijenosa električne energije postojećih vodova [13].

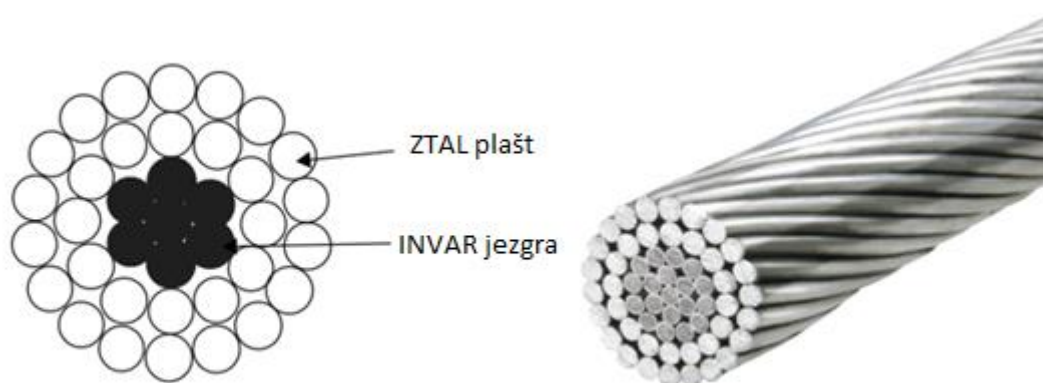
U tablici 2.2. prikazane su specifikacije karakterističnih „gap-type“ vodiča.

Tablica 2.2. Specifikacije GTACSR vodiča [14]

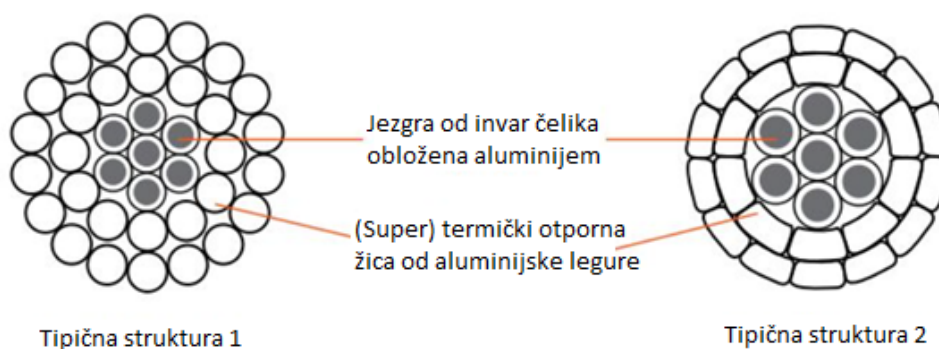
Veličina vodiča (mm ²)	Broj žica vodiča		Promjer vodiča		Površina presjeka			Promjer cijelog vodiča (mm)	Težina			Otpor pri 20°C (za DC) (Ω/km)	Nazivna struja		
	TAL	Čelik	TAL (mm)	Čelik (mm)	TAL (mm ²)	Čelik (mm ²)	Ukupno (mm ²)		TAL (Kg/Km)	Čelik (Kg/Km)	Ukupno (Kg/Km)		Pri 85°C (A)	Pri 150°C (A)	Pri 210°C (A)
175	8/12	7	3.35 (TW)	2.10	176.20	24.25	200.45	17.50	486.98	189.44	691.42	0.1668	409	698	859
218	18/12	7	2.78(R)2.94(TW)	2.25	190.50	27.83	218.33	19.10	526.51	217.47	759.98	0.1542	433	744	917
248	12/8	7	3.71(TW)	2.40	216.12	31.67	247.79	19.40	597.32	247.43	862.75	0.1360	463	796	981
287	18/12	7	3.15(R)3.43(TW)	2.55	251.00	35.75	286.75	21.77	693.72	279.33	993.04	0.1171	510	886	1096
310	16/12	7	3.90(R)3.69(TW)	2.80	319.40	43.10	362.50	24.40	882.76	336.78	1241.54	0.0920	589	1033	1281
400	18/12	7	3.90(R)4.45(TW)	2.80	401.40	43.10	444.50	26.90	1109.40	336.78	1468.18	0.0732	673	1190	1480
462	14/12	7	4.90(R)3.99(TW)	2.95	414.30	47.84	462.14	27.60	1145.05	373.83	1542.88	0.0709	687	1219	1516
540	24/14/10	7	3.55(R)3.98(TW)	3.10	536.20	52.83	589.03	31.30	1483.12	412.81	1920.93	0.0548	799	1436	1793
620	16/12/12	7	74.80(TW)4.75(TW)3.47(TW)	3.20	615.70	56.30	672.00	31.50	1703.01	439.88	2168.89	0.0478	856	1539	1922

2.2.3. HTLS vodič tipa ZTACIR/XTACIR (eng. *Super Thermal Aluminum Conductor Invar Reinforced/Extra Thermal Aluminum Conductor Invar Reinforced*)

Super toplinski aluminijски vodič ojačan invarom koristi kombinaciju invara obloženog aluminijem (posebne legure Fe-Ni) za jezgru, što mu je i glavna razlika u odnosu na konvencionalne vodiče, te super toplinski otporne legure Al-Zr za vodljivi sloj (slika 2.8.). Ne pokazuje fenomen žarenja do 210°C. INVAR je vrsta legure sačinjena od željeza i 36% do 38% nikla, a njegovo najvažnije svojstvo je koeficijent linearne ekspanzije koji je praktički nepromjenjiv s toplinom [15].

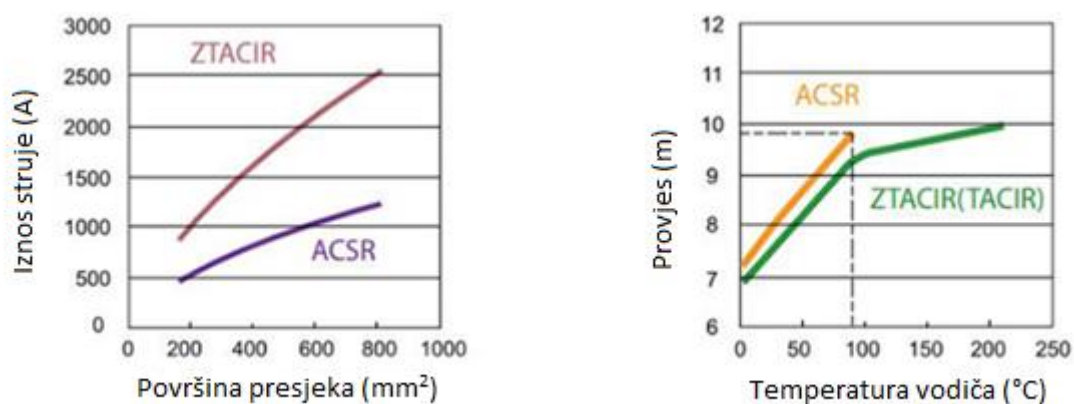


Slika 2.8. Prikaz presjeka i konstrukcije ZTACIR vodiča [9]



Slika 2.9. Dvije tipične strukture INVAR vodiča: žica okruglog vodiča (struktura 1), žica trapezoidnog oblika (struktura 2) [27]

Ovi vodiči mogu biti u trajnom pogonu na temperaturama od 230 °C. INVAR vodiče karakterizira prijelazna temperatura koja iznosi između 85°C i 100°C (vidljivo na slici 2.10), nakon koje svu mehaničku čvrstoću vodiča preuzima njegova INVAR jezgra.



Slika 2.10. Karakteristike ovisnosti poprečnog presjeka o kapacitetu (lijevo) i provjesa o temperaturi vodiča (desno) za ACSR i (Z)TACIR vodiče [27]

Konvencionalni ACSR vodič je po svojim karakteristikama vrlo sličan je ZTCAIR vodiču do prijelazne temperature, nakon čijeg prijelaza u više temperature prednosti ZTCAIR vodiča postaju očite [11,16] (desna karakteristika na slici 2.10). ACSR dostiže svoj maksimum kod iznosa temperature nešto manje od 100°C dok vodič ojačan invarom nastavlja rad na većim temperaturama sa malim povećanjem provjesa te omogućuje veći prijenos struje koji doseže iznos od 2.5 kA naspram onog od 1.2 kA kod ACSR vodiča (lijeva karakteristika slike 2.10.).

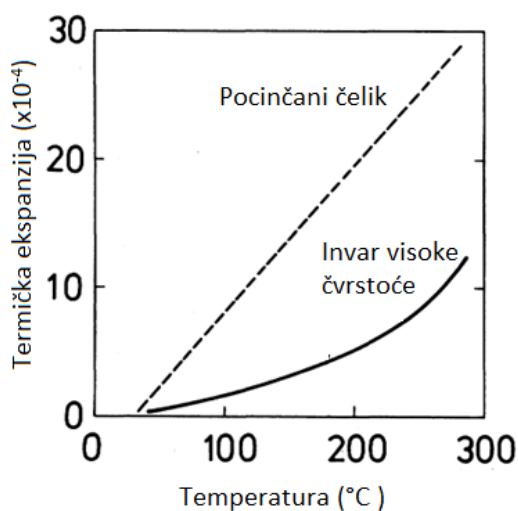
XTACIR (eng. *Extra Thermal Aluminum Conductor Invar Reinforced*) može nositi dvostruko veći iznos struje od tradicionalnog ACSR-a pod istim uvjetima provjesa bez ponovne izgradnje ili povećanja visine nosivih stupova. Potreban je bio razvitak dva nova materijala za nastanak ovih vodiča: aluminijске legure vrlo otporne na toplinu te invar legure visoke čvrstoće, čije je ponašanje na visokim temperaturama prikazano na slici 2.11. Njihova svojstva su; XTAL (eng. *Extra Thermal Resistant Aluminum Alloy*) koji omogućuje kontinuiranu radnu temperaturu od 230°C te radnu temperaturu u nuždi (na temelju 400 sati rada u nuždi tijekom 36 godina uporabe) koja iznosi 310°C. Drugo svojstvo je ono od invar legure visoke čvrstoće koja omogućuje da toplinski koeficijent širenja jezgre bude jedna trećina onog kod galvaniziranog čelika ili jedna četvrtina onog kod čeličnih žica obloženih aluminijem. Ovime se poboljšava vlačna čvrstoća koja postaje jednaka onoj od čelika, a primjer toga prikazan je u tablici 2.3.

Tablica 2.3. Tipične karakteristike invar legure visoke čvrstoće u usporedbi s onima kod tradicionalnih čeličnih žica [17]

Žica vodiča	Svojstva			
	Promjer (mm)	Vlačna čvrstoća (Min. MPa)	Youngov modul (MPa x10 ⁵)	Koeficijent termalne ekspanzije (x10 ⁻⁶ /°C)
Pocinčani čelik	3,2	1270	2,05	11,5
	4,2	1220	2,05	11,5
Aluminijem obloženi čelik	3,2	1340	1,61	13,00
	4,2	1190	1,61	13,00
Aluminijem obloženi invarom visoke čvrstoće	3,2	1170	1,61	3,3
	4,2	1070	1,61	3,3

XTACIR ima svojstva izrazito malog povećanja provjesa, zbog male termičke ekspanzije (prikazano slikom 2.11.), što je rezultat načina projektiranja ovog vodiča. To znači da se dvostruki iznos struje može dobiti postavljanjem XTACIR vodiča na postojeće čelične stupove te da toplinski vrlo otporna aluminijska legura može omogućiti zamjenu snopa vodiča sa samo jednim vodičem [17].

Slikom 2.11. prikazana je termička ekspanzija vodiča ojačanog invarom, koja je puno manja uz porast temperature u odnosu one kod vodiča sa pocinčanim čelikom.



Slika 2.11. Karakteristike temperaturne ekspanzije invar legure visoke čvrstoće i galvaniziranog čelika [17]

Značajno je da TACIR vrsta vodiča ima niski koeficijent toplinskog širenja vodiča koji ograničava povećanje provjesa s porastom temperature, dok posjeduju mehanička svojstva (promjer, čvrstoća, težina) vrlo slična ACSR vodičima. Održavaju mehaničku čvrstoću uz trajnu radnu temperaturu do 210°C, a uz to imaju i visoku otpornost jezgre na koroziju zahvaljujući upotrebi ACI (jezgra od invara obložena aluminijem). Invar vodiči su posebno prikladni za zamjenu ACSR vodiča u kratkim i srednjim rasponima u svim orografskim uvjetima (ravnice, brda ili planine) te zbog jednostavne instalacije, korištenjem iste metode kao i kod ugradnje standardnih ACSR vodiča [15].

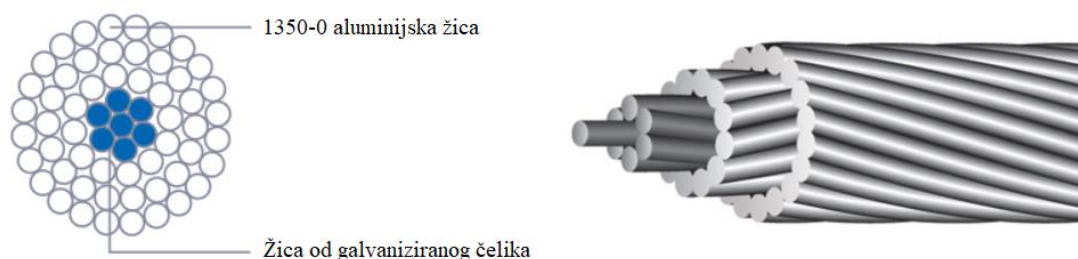
Karakteristični parametri TACIR i ZTACIR prikazani su u tablici 2.4.

Tablica 2.4. Tipični parametri TACIR i ZTACIR vodiče okrugle strukture [27]

Kod vodiča	Broj žica/ Širina žica (mm)		Površina presjeka (mm ²)	Promjer vodiča (mm)	Čvrstoća (kN)	Otpor pri 20°C (za DC) (Ω/km)	Težina (kg/km)	Nazivna struja (A)	
	Aluminij	Čelik						TACIR	ZTACIR
135/30	30/2.38	7/2.38	164.61	16.66	53.97	0.2117	600	698	866
160/35	30/2.60	7/2.60	196.44	18.20	64.41	0.1774	716	784	974
210/40	28/3.07	7/2.7	207.26	20.38	73.78	0.1386	870	910	1135
200/45	30/2.90	7/2.90	244.39	20.30	78.81	0.1441	891	910	1135
230/45	28/3.24	7/2.85	275.51	21.51	82.19	0.1245	969	986	1231
255/40	26/3.54	7/2.75	297.48	22.41	82.83	0.1116	1015	1055	1318
240/55	30/3.20	7/3.20	297.57	22.40	93.82	0.1171	1085	1030	1165
220/55	30/3.05	7/3.05	270.33	21.35	85.23	0.1303	985	962	1088
290/55	28/3.64	7/3.20	347.67	24.16	101.53	0.0976	1226	1155	1447
300/50	26/3.85	7/3.00	352.16	24.40	95.55	0.0944	1203	1179	1476
340/65	28/3.92	7/3.45	403.36	26.03	117.90	0.0842	1423	1274	1599
345/55	26/4.11	7/3.20	401.24	26.04	108.80	0.0828	1370	1285	1612

2.2.4. HTLS vodič tipa ACSS/TW (eng. *Aluminum Conductor Steel Supported/Trapezoidal wire*)

Ovaj tip vodiča je aluminijski vodič podržan čelikom. Vodič čine čelične žice u jezgri i aluminijske žice u vanjskim slojevima podvrgnute procesu žarenja. ACSS kompozitni je koncentrični višezilni vodič s jednim ili više slojeva tvrdo vučenih i žarenih 1350-0 aluminijskih žica na središnjoj čeličnoj jezgri (prikazano na slici 2.12.).

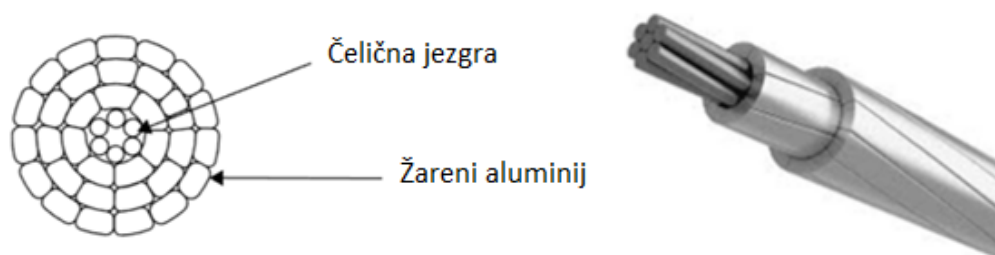


Slika 2.12. Prikaz presjeka i konstrukcije ACSS vodiča [9]

Pri zagrijavanju ACSS vodiča iznad temperature koljena, aluminijske žice plašta se znatno više izduže od čeličnih žica jezgre zbog čega se ukupno opterećenje prenosi na čeličnu jezgru, što je i glavna razlika u odnosu na ACSR vodiče. Ovim fenomenom vodič je u mogućnosti u velikoj mjeri iskoristiti svojstva čvrstoće čelične jezgre, te mali iznos neelastičnog izduženja i niski koeficijent linearnog istezanja. U radnim uvjetima, koeficijent širenja vodiča biti će približno vrijednosti koju daje čelična jezgra, reda veličine $10\text{-}13 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$. Ova vrijednost, u usporedbi s konvencionalnim ACSR vodičem, koja iznosi $18\text{-}22 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$, pridonosi smanjenju provjesa, te posljedično, povećanje udaljenosti između vodiča i tla [16]. Žice s čeličnom jezgrom štite se od korozije odabirom odgovarajućeg premaza žice kao što je pocinčavanje, presvlačenje legurom mischmetala ili oblaganje aluminijem. Vrsta premaza odabire se tako da odgovara okolini kojoj je vodič izložen i radnoj temperaturi vodiča.

Zamjena okrugle žice sa žicama trapezoidnog oblika (slika 2.13.) stvara veću kompaktnost kod ovog vodiča koji ima manji ukupni promjer što ostavlja manje nepopunjenog prostora u nitima vodiča. Manji promjer vodiča smanjuje njegovo opterećenje izazvano ledom i vjetrom. Ovako

oblikovani vodič ima niži koeficijent razvlačenja, povećanu otpornost na vibracije te poboljšanu otpornost na zamor. Takva konstrukcija ima jednake promjere onima od konvencionalnih višezilnih vodiča, ali s povećanjem površine metala od 20%. Dizajn jednakog promjera osigurava vodiču prednosti koje imaju i drugi vodiči istih promjera, ali uz povećanu površinu aluminija. Uz povećanje težine koje je neznatno, ova vrsta vodiča pokazuje smanjen otpor, povećan iznos prijenosa struje i povećanu čvrstoću [18,19].



Slika 2.13. Prikaz presjeka i konstrukcije ACSS/TW vodiča (žica trapezoidnog oblika) [9]

ACSS se koristi za nadzemne distribucijske i prijenosne vodove, a dizajniran je za kontinuirani rad na povišenim temperaturama do 250°C bez gubitka čvrstoće. Manjeg je provjesa od usporednog ACSR-a pod električnim opterećenjem, a uz to je i samoprigušujući ako je prethodno rastegnut tijekom postavljanja, te na njegove konačne ugibe ne utječe dugotrajno puzanje aluminija. Prednosti čine ACSS posebno korisnim pri upotrebama ponovnog provođenja koje zahtijevaju povećanu struju s postojećim napetostima i razmacima [20].

Ovaj tip vodiča posjeduje sposobnost poboljšane vodljivosti, tj. velika nosivost struje te bolje svojstvo samoprigušenja. Ima vrlo malo propadanje vodiča pri visokoj temperaturi. Izvrсна otpornost na zamor od vibracija i dugotrajno puzanje aluminija koje ne utječe na konačan provjes još su neke od prednosti ovih vodiča. ACSS vodič je jedan od najjeftinijih HTLS vodiča čija je cijena veća od konvencionalnih Al/Fe vodiča za oko 1,5 puta. Pri izradi ovih vodiča koriste se približno identični materijali kao i kod izrade Al/Fe vodiča zbog čega je ovaj vodič najčešći odabir za njihovu zamjenu.

U tablici 2.5. prikazane su specifikacije karakterističnih ACSS vodiča.

Tablica 2.5. Specifikacije karakterističnih ACSS vodiča [14]

Kodni naziv	Većina vodiča (mm ²)	Broj žica vodiča		Promjer vodiča		Promjer cijelog vodiča (mm)	Težina			Čvrstoća vodiča		Otpor pri 20°C (za DC) (Ω/km)	Nazivna struja		
		Alumin	Čelik	Alumin (mm)	Čelik (mm)		Alumin (kg/K)	Čelik (kg/K)	Ukupno (kg/K)	Regulirna čvrstoća	Ultra visoka čvrstoća		Pri 85°C	Pri 200 °C (A)	Pri 250 °C (A)
Partridge/ACSS	135	26	7	2.57	2.00	16.31	374.00	171.78	545.78	39.66	50.98	0.2031	365	740	836
Linnet/ACSS	170	26	7	2.89	2.25	18.29	471.40	217.40	688.80	50.18	64.51	0.1611	420	860	974
Flicker/ACSS	242	24	7	3.58	2.39	21.49	668.60	245.30	913.90	58.19	73.58	0.1142	515	1072	1217
Peacock/ACSS	307	24	7	4.03	2.69	24.21	848.00	310.75	1158.75	73.73	80.89	0.0899	595	1254	1426
Starling/ACSS	363	26	7	4.21	3.28	26.70	1002.90	462.01	1464.91	104.25	130.86	0.0758	660	1407	1603
Drake/ACSS	403	26	7	4.44	3.45	28.12	1114.30	511.14	1625.44	115.45	144.90	0.0686	701	1503	1714
Cardinal/ACSS	483	54	7	3.38	3.38	30.38	1337.30	490.61	1827.91	116.47	144.73	0.0571	768	1664	1900
Bluejay/ACSS	564	45	7	4.00	2.66	31.95	1560.00	303.85	1863.85	87.42	106.48	0.0492	834	1819	2079
Martin/ACSS	685	54	19	4.02	2.41	36.17	1902.90	678.35	2581.25	161.69	204.16	0.0404	941	2087	2391
Parrot/ACSS	765	54	19	4.25	2.55	38.23	2126.90	759.46	2886.36	180.94	228.49	0.0361	1004	2244	2574
Chukar/ACSS	902	84	19	3.70	2.22	40.67	2507.10	575.61	3082.71	158.66	196.54	0.0308	1106	2503	2876
Bluebird/ACSS	1092	84	19	4.07	2.44	44.75	3036.70	695.35	3732.05	188.22	231.75	0.0256	1225	2819	3248
Joree/ACSS	1274	76	19	4.62	2.16	47.75	3542.40	544.92	4087.32	174.34	210.19	0.0220	1321	3086	3563

2.2.5. HTLS vodič tipa ACCC/TW (eng. Aluminum Conductor Composite Core/Trapezoidal Wire)

Vodič se sastoji od okrugle ili trapezoidne kaljene aluminijske žice spiralno omotane oko hibridne stakleno/uglične kompozitne jezgre proizvedene pultruzijom (slika 2.14.). Središnja jezgra od karbonskih vlakana sastoji se od desetaka tisuća jednosmjernih karbonskih vlakana visoke čvrstoće, visokog modula koja su okružena zaštitnim slojem staklenih vlakana. Vanjska staklena vlakna poboljšavaju žilavost i fleksibilnost dok također pružaju galvansku barijeru za sprječavanje korozije s vodljivim aluminijskim nitima. Također, oblik žice geometrijski osim što je proizveden trapezoidnog oblika može se naći i u nekom drugom obliku koji maksimizira količinu aluminija pri minimalnom promjeru vodiča. Takvom izvedbom postiže se niži otpor što omogućuje veći protok struje dalekovoda. Budući da je aluminij užaren, njegov obujam neće se mijenjati tijekom rada na višoj temperaturi, niti će utjecati na ulegnuće dalekovoda. Jezgra ACCC vodiča također posjeduje vrlo nizak koeficijent toplinskog rastezanja koji uzima maksimalno opterećenje vodiča bez značajnog pogoršanja svojstava nakon dugotrajnog rada na visokoj temperaturi i sprječava postizanje velikog ulegnuća dalekovoda [21].

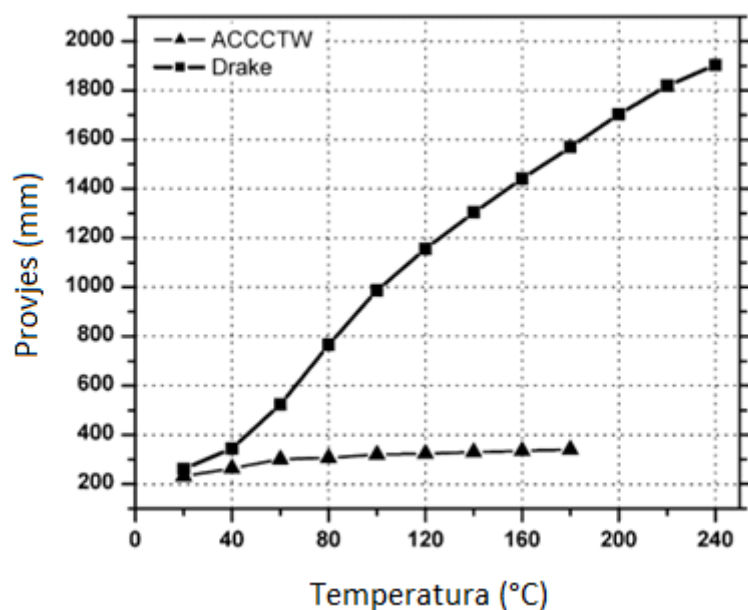


Slika 2.14. Visokotemperaturni ACCC vodiči s kompozitnim jezgrama: okrugla struktura (lijevo), trapezoidna struktura (desno) [22]

Manja težina omogućuje ACCC vodiču bilo koje veličine da iskoristi i do 28% više aluminija bez promjena u težini ili promjeru. Kompaktne trapezoidne niti i kompozitna jezgra s glatkom

površinom djeluju usklađeno na raspršivanju vibracija izazvanih vjetrom, dok su aluminijske niti potpuno žarene, nudeći tako najviši stupanj vodljivosti za bilo koji aluminij koji je danas dostupan. Kompozitna jezgra pruža vodiču otprilike deset puta manji koeficijent toplinske ekspanzije od čelika.

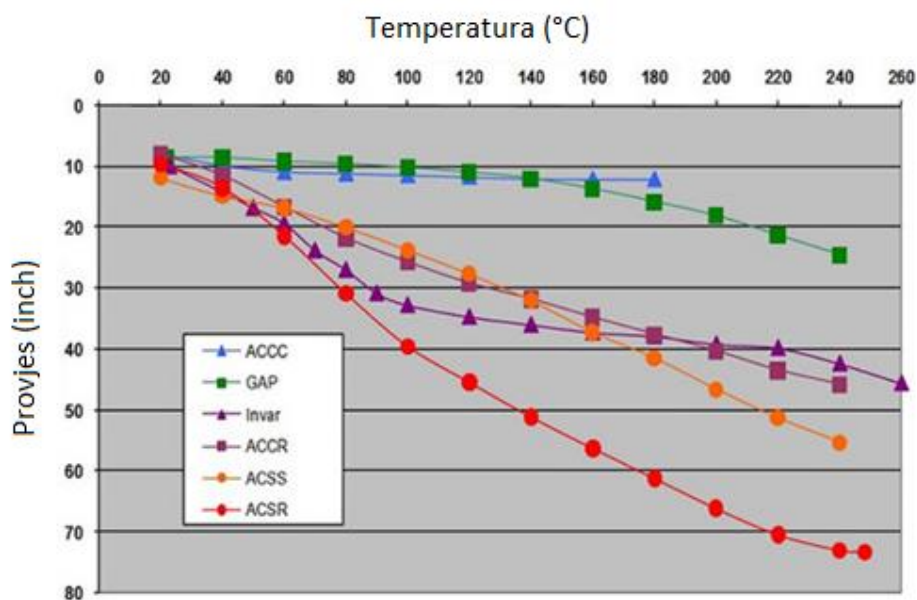
ACCC radi učinkovitije od bilo koje druge vrste vodiča istog promjera i težine (slika 2.16). Gubici u liniji korištenjem ovog vodiča smanjeni su u svim radnim uvjetima, oslobađajući tako proizvodni kapacitet koji služi pri rastućoj potražnji energije uz smanjenje emisija. Hibridna jezgra od karbonskih vlakana nudi dvostruko veću čvrstoću od konvencionalnih vodiča ojačanih čelikom uz djelić njegove težine, a smanjena težina kompozitne jezgre i niži koeficijent toplinske ekspanzije omogućuju prijenos i do dva puta veće struje od konvencionalnih vodiča. ACCC vodiči pokazuju 25 do 40 posto manje gubitke u liniji u bilo kojem radnom stanju, dok pri nižim radnim temperaturama (od 60°C do 80°C) odražavaju znatno poboljšanje učinkovitosti (slika 2.15.) [22].



Slika 2.15. Usporedba provjesa kod ACSR (Drake izvedba) i ACCC/TW vodiča [28]

Slika 2.16. prikazuje veličine provjesa za navedene HTLS vrste vodiča zajedno s klasičnim ACSR vodičem gdje je vidljiva prednost ACCC i vodič s prazninama („gap-type“) koji već pri nižim radnim temperaturama do 100°C imaju znatno manji rast provjesa u odnosu na ostale vodiče.

Vodiči ojačani invarom, ACCR (eng. *Aluminum Conductor Composite Reinforced*) te ACSS vodiči imaju nešto veće povećanje provjesa koje se nakon 100°C smanjuje dok ACSR vodiči i dalje nakon te temperature nastavljaju sa povećanim rastom provjesa.



Slika 2.16. Usporedba provjesa više vrsta HTLS vodiča ovisno o temperaturi rada [22]

Specifikacije za karakteristične izvedbe ACCC vodiča nalaze se u tablici 2.6.

Tablica 2.6. Specifikacije karakterističnih ACCC vodiča [14]

Naziv vodiča	Površina presjeka			Promjer vodiča		Težina			Čvrstoća		Otpor pri 20°C (za DC) (Ω/km)	Nazivna struja		
	Aluminij (mm ²)	Ježgra (mm ²)	Ukupno (mm ²)	Ukupno (mm)	Ježgra (mm)	Aluminij (Kg/Km)	Ježgra (Kg/Km)	Ukupno (Kg/Km)	Ježgra (KN)	Vodič (KN)		Pri 85°C (A)	Pri 120°C (A)	Pri 180°C (A)
SILVASS A	122.70	28.00	150.70	14.35	5.97	338.00	54.00	392.00	59.60	66.50	0.2286	335	479	632
ZADAR	177.40	39.70	217.10	17.09	7.11	488.00	76.00	564.00	85.00	95.00	0.1576	419	604	802
ROVINJ	187.80	28.00	215.80	17.09	5.97	521.00	54.00	575.00	59.60	70.20	0.1487	431	622	825
GLASGOW	236.70	47.10	283.80	19.53	7.75	657.00	86.00	743.00	101.00	114.30	0.1184	497	722	962
OSLO	313.80	60.30	374.10	22.40	8.76	868.00	113.00	981.00	129.00	146.70	0.0893	588	861	1154
LEIPZIG	406.40	71.30	477.70	25.15	9.53	1126.00	132.00	1258.00	151.70	174.60	0.0690	684	1010	1358

WARSAW	507.50	60.3 0	567.80	27.7 1	8.76	1406.0 0	113.0 0	1519.0 0	129.0 0	157.6 0	0.055 3	778	115 6	156 1
MILAN	567.70	60.3 0	628.00	29.1 1	8.76	1573.0 0	113.0 0	1686.0 0	129.0 0	160.9 0	0.049 4	830	123 8	167 5
MUMBAI	685.40	71.3 0	756.70	31.7 8	9.53	1904.0 0	132.0 0	2036.0 0	151.7 0	190.3 0	0.041 0	924	138 8	188 6
LONDON	759.00	75.1 0	834.10	33.4 0	9.78	2102.0 0	143.0 0	2245.0 0	160.1 0	202.8 0	0.037 0	980	147 9	201 3
BERLIN	1006.5 0	87.3 0	1093.8 0	38.2 0	10.5 4	2784.0 0	164.0 0	2948.0 0	185.9 0	242.5 0	0.027 8	114 8	175 5	240 7
ATHENS	1409.7 0	87.3 0	1497.0 0	44.7 5	10.5 4	3900.0 0	164.0 0	4064.0 0	185.9 0	265.2 0	0.019 9	136 4	212 5	294 9

2.3. Tehno-ekološka analiza uporabe HTLS vodiča

HTLS vodiči uvode se s namjerom ublažavanja nekih nedostataka konvencionalnih nadzemnih vodiča. U usporedbi s konvencionalnim vodičima, HTLS vodiči imaju bolje električne i mehaničke karakteristike te njihovim korištenjem u nadzemnim dalekovodima, mogla bi se riješiti neka od složenih pitanja vezanih za prijenos električne energije. Međutim, još uvijek postoji nedoumica oko korištenja visokotemperaturnih umjesto konvencionalnih nadzemnih vodiča koji su pružili hvalevrijednu uslugu tijekom razdoblja od približno jednog stoljeća. Te nedoumice postoje zbog nedostatka iskustva u njihovoj uporabi kao i zbog novog dizajna vodiča. Veliki dio prijenosnog sustava sastoji se od nadzemnih vodova izgrađenih korištenjem konvencionalnih ACSR vodiča. Upravo zbog svojih noviteta koje nose, nema mnogo znanja o HTLS vodičima i također postoji vrlo malo iskustva u njihovom korištenju. Ovaj rad raspravlja o mogućnosti usvajanja HTLS tehnologije vodiča u elektroenergetskom podsustavu Istre. Također, raspravit će se problemi i izazovi vezani uz primjenu HTLS vodiča [23].

2.3.1. Visoko-toplinska procjena HTLS vodiča

Kao što je već spomenuto, HTLS vodiči mogu raditi na povišenim temperaturama, a njihova vodljivost struje veća je od one koju posjeduju konvencionalni vodiči slične veličine. Njihova provodljivost struje može se pronaći koristeći IEEE 738-2006 ili IEC 61597 standarde. Kako bi se ta provodljivost izmjerila, treba iskoristiti izraze dane u jednadžbi 2.2 toplinske ravnoteže:

$$I_{MAX} = \sqrt{\frac{P_{Rad} + P_{Conv} - P_{Sol}}{R_T}}, \quad (2.2)$$

gdje su:

- R_T - jedinica otpora pri danoj temperaturi (Ω),
- P_{Sol} - dobitak solarne topline od strane vodiča (W),
- P_{Rad} - gubitak topline zračenjem (W) i
- P_{Conv} - gubitak topline konvekcijom (W).

HTLS vodiči su tako proizvedeni da je njihov AC otpor manji od otpora ACSR vodiča slične veličine (promjera) pri bilo kojoj danoj temperaturi. To se obično postiže promjenom toplinske obrade njihovih aluminijskih vanjskih slojeva (tipovi prikazani u tablici 2.7.) i povećanjem faktora punjenja pomoću trapezoidnih vanjskih niti [23].

Tablica 2.7. Vanjski sloj aluminijskog vodiča [23]

Tip		Postotak IACS-a (%)	Maksimalna radna temperatura (°C)
Tvrdo vučen	1350-H19	61.2	90
Potpuno žaren	1350-O	63	250
Termički otporan	TAL	60	150
Ultra-termički otporan	ZTAL	58	200

U tablici 2.7. IACS (International Annealed Copper Standards) označava vrijednost pri kojoj se 100% odnosi na vodljivost od $5,8 \times 10^7$ Siemens po metru.

Tablica 2.7. prikazuje metode toplinske obrade raznih vrsta vanjskih slojeva izrađenih od aluminijske legure koji se koriste za gole nadzemne vodiče. Vanjski sloj ACSR vodiča izrađen je od tvrdo vučenog aluminijske legure i stoga takvi vodiči ne mogu raditi na temperaturama koje prelaze 90°C. Međutim, HTLS vodiči napravljeni su od druge vrste aluminijske legure ili korištenjem alternativnih metoda toplinske obrade te stoga mogu podnositi više temperature.

2.3.2. Niže linearno toplinsko širenje HTLS vodiča

Provjes vodiča ovisit će o njegovoj linearnoj ekspanziji. Način na koji se provjes računa prikazan je u jednadžbi 2.2:

$$D = \frac{WS^2}{8T} \quad (2.2)$$

gdje je:

- D - provjes vodiča (m),
- W - jedinična težina vodiča (N/m),
- T - napetost vodiča na nekoj danoj temperaturi (N) i
- S – raspon (m).

Napetost vodiča (T) pri određenoj danoj temperaturi ovisit će o nekoliko faktora. Obično je izračunata korištenjem jednadžbe stanja koju daje:

$$H_2^2 \left[H_2 - H_1 + \frac{E \cdot A \cdot (S \cdot m_{c1} \cdot g)^2}{24H_1^2} + E \cdot A \cdot \alpha(t_2 - t_1) \right] = \frac{E \cdot A \cdot (Sm_{c2} \cdot g)^2}{24} \quad (2.3)$$

Prikazane veličine iz jednadžbe 2.3 označavaju sljedeće:

- H_2 - naprezanje pri određenoj temperaturi (N/mm²),
- H_1 - početno naprezanje (N/mm²),
- E - modul elastičnosti (N/mm²),
- A - poprečni presjek vodiča (N/mm²),
- m_{c1} - početna jedinična masa (kg/m),
- m_{c2} - jedinična masa pri zadanoj temperaturi (kg/m),
- g - gravitacijska konstanta (ms⁻²),
- α - koeficijent termalne ekspanzije (°C⁻¹),
- t_1 - početna temperatura (°C),
- t_2 - radna temperatura (°C) i
- S - duljina raspona (m).

Napetost vodiča (T) se može izračunati množenjem naprezanja presjekom vodiča. Povećanjem temperature, napetost vodiča će se smanjiti, tj. doći će do njegova izduženja. Međutim, prema jednadžbi danoj iznad (2.3), kada je toplinsko širenje smanjeno, smanjenje napetosti također može biti spušteno i prema jednadžbi (2.2) provjes se tada neće povećati zbog čega je ova pojava korištena u HTLS vodičima na jedinstven način [23].

2.3.3. Temperatura koljena

Temperatura koljena (eng. „*knee point temperature*“) je temperatura na kojoj je napetost vodiča potpuno zauzeta jezgrom vodiča. Obično se vodiči sastoje od dva sloja koji su poznati kao unutarnji i vanjski sloj. Vanjski sloj je uglavnom odgovoran za provođenje strujnog toka dok je unutarnji sloj odgovoran za preuzimanje mehaničke napetosti vodiča.

Obično tijekom početne faze, napetost vodiča se dijeli između vanjske i unutarnje jezgre. Kada se temperatura vodiča poveća, količina napetosti koju preuzima svaka jezgra će se promijeniti zbog razlike koeficijenta širenja u te dvije jezgre. Pošto čelik ima niži koeficijent toplinskog širenja, doći će do veće napetosti u čeličnoj jezgri i vanjski, aluminijski sloj počet će se sabijati.

U ACSR vodičima, ukupna napetost ne može biti preuzeta čeličnom jezgrom pošto temperatura ne može prijeći određenu granicu. Međutim, HTLS vodiči su formirani kako bi omogućili materijalu jezgre da preuzme cjelokupnu napetost iznad određene temperature, poznate kao temperatura koljena. Stoga, prilikom pronalaska napetosti HTLS vodiča pri temperaturi većoj od temperature koljena, jednadžba stanja (jednadžba 2.3) se mora koristiti dva puta, prvo za napetost podijeljenu između vanjskog i unutarnjeg sloja, kada temperatura ima vrijednost između početne (minimalne) temperature i temperature koljena. Nakon toga, jednadžba stanja se koristi drugi puta samo za unutarnji sloj kada se temperatura nalazi između temperature koljena i konačne radne temperature.

Vrijednost modula elastičnosti u jednadžbi (2.3) mora biti odabrana ovisno o tome je li temperatura manja ili veća od temperature koljena.

$$E_{AS} = E_{AL} \frac{A_{AL}}{A_{TOTAL}} + E_{ST} \frac{A_{ST}}{A_{TOTAL}} \quad (2.4)$$

Prikazane veličine iz jednadžbe 2.4 označavaju sljedeće:

- E_{AS} – elastičnost aluminijskih i čeličnih niti (GPa),
- E_{AL} – elastičnost aluminijskih niti (GPa),
- E_{ST} – elastičnost čeličnih niti (GPa),
- A_{TOTAL} – ukupna površina presjeka (mm^2),
- A_{AL} – površina aluminijskih niti (mm^2) i
- A_{ST} – površina čeličnih niti (mm^2).

U jednadžbi (2.3), koeficijent termičke ekspanzije (α) će također biti odabran na temelju temperature zbog ovisnosti efektivnog širenja o količini podijeljene napetosti između jezgre i vanjskog sloja.

$$\alpha_{AS} = \alpha_{AL} \cdot \left(\frac{A_{AL}}{A_{TOTAL}} \right) \cdot \left(\frac{E_{AL}}{E_{AS}} \right) + \alpha_{ST} \cdot \left(\frac{A_{ST}}{A_{TOTAL}} \right) \cdot \left(\frac{E_{ST}}{E_{AS}} \right) \quad (2.5)$$

Veličine prikazane u jednadžbi 2.5 označavaju sljedeće:

- α_{AS} – koeficijent toplinskog širenja aluminijskih i čeličnih niti,
- α_{ST} – koeficijent toplinskog širenja čeličnih niti i
- α_{AL} – koeficijent toplinskog širenja aluminijskih niti.

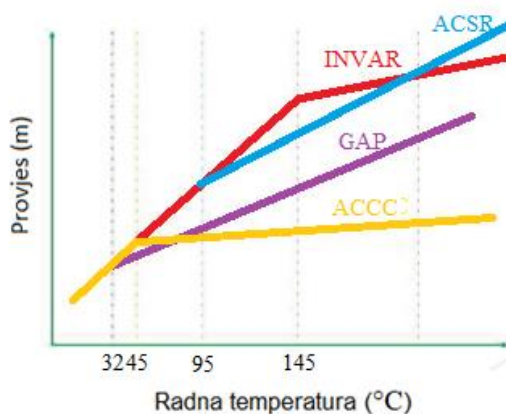
Obično je jezgra vodiča izrađena od materijala koji ima manji koeficijent toplinskog širenja.

Tablica 2.7. pokazuje vrijednosti koeficijenta širenja različitih materijala vodiča.

Tablica 2.7. Vrijednosti koeficijenta širenja različitih materijala vodiča [23]

Opis	Modul elastičnosti (GPa)	Vlačna snaga (N/mm ²)	Koeficijent širenja (x10 ⁻⁶ /°C)
HS čelik	200	1379-1488	11.50
EHS čelik	200	1517	11.50
Aluminijem obloženo	162	1103-1344	13.00
Ugljični hibridni epoksid	110-150	2275-2585	1.60
Legura invara	160	1034-1069	3.00

Za razliku od ACSR vodiča, svi HTLS vodiči postižu svoje temperature koljena unutar svog radnog raspona. Međutim, različiti HTLS vodiči imaju različite temperature koljena, ovisno o materijalu vodiča, formiranju vodiča itd. Uvijek je bolje imati manju vrijednost temperature koljena, tako da se mogu postići svojstva malog provjesa. Slika 2.17. sažima temperature koljena različitih vrste HTLS vodiča.



Slika 2.17: Temperature koljena različitih HTLS vodiča [23]

Iz slike 2.17. može se vidjeti da je temperatura koljena ACSR vodiča (95°C) viša od njegove maksimalne radne temperature. ACCC (označeno žutom bojom) i GTACSR (označeno

ljubičastom bojom) imaju niže temperature koljena, stoga počinju pokazivati manje provjese na niskim radnim temperaturama.

2.3.4. Analiza troškova

Ulaganja u dalekovode zahtijevaju intenzivan priljev kapitala. Kako imaju korisni životni vijek od oko 40 godina, investicijske odluke imaju dugoročni utjecaj na elektroenergetski sustav. Različiti čimbenici kao što su životni vijek imovine, predviđanje rasta opterećenja, horizont planiranja, vrijednost kapitala ili analiza troškova i koristi između ostalog imaju dubok utjecaj na povećanje iskoristivosti postojećeg nadzemnog voda. Vrsta vodiča je također varijabla ključna za odluke. Prema različitim referencama, pri proširenju dalekovoda korištenjem HTLS vodiča omogućuje profit u troškovima ulaganja i smanjenje vremena ulaganja. Rekonstrukcija postojećih dalekovoda HTLS vodičima omogućuje smanjenje operativnih troškova, jer mogu ponuditi poboljšanu prijenosnu moć i manje gubitke u prijenosu, osobito kada rade u području ispod maksimalnog prijenosa struje. Međutim, velika primjena HTLS vodiča može biti otežana zbog relativno viših troškova takvih vodiča u usporedbi s konvencionalnom ACSR alternativom. Troškovi kupnje HTLS vodiča iznose oko 30% kapitalnih ulaganja potrebnih za dalekovod. HTLS vodiči također posjeduju i neke nedostatke, uključujući veći pad napona ili povećane gubitke snage zbog rada na višoj temperaturi, stoga su ograničeni na kratke vodove ili za pružanje povećane fleksibilnosti za prihvaćanje vršne proizvodnje obnovljivih izvora. Međutim, kada nominalni rad linija ne zahtijeva dodatnu nadogradnju vodljivosti HTLS vodiča, gubici prijenosa neće se povećati. Ova strategija je često primijenjena u Sjevernoj Americi, gdje je veća prijenosna moć HTLS vodiča korištena samo u hitnim slučajevima [24].

Tablica 2.7. prikazuje relativnu cijenu HTLS vodiča, uključujući instalaciju i pribor u usporedbi s ACSR-om.

Tablica 2.7. Relativna cijena ACSR vodiča usporedno s HTLS vrstom vodiča [24]

Vodič	ACSR	GZTACSR	ZTACIR	ACSS	ACCC
Relativna cijena	1	2	3.5	1.1-1.5	5-7

Nadogradnja za jednosnopni, dvokružni, 230 kV dalekovod od 11,5 km je procijenjen u referenci [25], u kojem se očekivalo da će se prijenos električne energije udvostručiti. Plan je bio izgraditi nove tornjeve pomoću ACSR vodiča sa dvostrukim snopom. HTLS vodiči mogu koristiti postojeće stupove iako se ovjesna struktura mora promijeniti. Prema referenci [25], rušenje, izgradnja i troškovi ugradnje ACSR vodiča su u rasponu od 25–33% ukupnih troškova, dok u slučaju nadogradnje s HTLS vodičima (analiziraju se različite vrste), a takvi su troškovi gotovo zanemarivi. Troškovi povezani s konvencionalnim ACSR vodičima iznose oko 9% ukupnih troškova projekta, dok troškovi povezani s HTLS vodičima ovise o tipu vodiča, koji varira između 5,3% i 12,5%. Ova studija zaključuje da su troškovi povezani s gubicima snage najvažniji, iznoseći oko 67,4% u slučaju ACSR vodiča i kreću se između 86,4% i 93,5% pri korištenju HTLS vodiča. Tablica 2.8. prikazuje relativni trošak nadogradnje 230 kV dalekovoda. Dodatni gubitak energije HTLS vodiča u usporedbi s ACSR vodičem prikazanih u tablici 2.8. pripisuje se višoj temperaturi rada HTLS vodiča.

Tablica 2.8. Relativna cijena nadogradnje 230 kV prijenosne linije [24]

Vrsta vodiča	Postotak cijene			
	Rušenje	Izgradnja i instalacija	Vodič	Gubitak energije
ACSR	1.1%	22.5%	9%	67.4%
HTLS (ACSS, GTZACSR, ZTACIR, ACCR, ACCC)	0.4-0.7%	0.7-1.2%	5.3-12.5%	86.4-93.5%

2.3.5. Utjecaj na okoliš

Ekonomska i ekološka ograničenja ključni su čimbenici za primjenu metoda poboljšanja pri planiranju novih dalekovoda. Europska energetska i klimatska strategija uključuje niz mjera za smanjenje emisije stakleničkih plinova putem kojih će se voditi borba protiv klimatskih promjena, kao i minimiziranje ovisnosti o uvozu energije. Dakle obnovljivi izvori energije ključni su za postizanje ovih ciljeva. Razmatrajući projekte poboljšanja novih dalekovoda, napravljena je studija o utjecajima dalekovoda na okoliš. Analizirajući tako kvalitetu zraka i zvučni okoliš; geologiju i vodne resurse; krajolik i vizualni utjecaj; floru i zaštitni koridor linija; morfologiju tla; materijala i otpada, studija u referenci [26] zaključuje da za tri slučaja, koji uključuju korištenje

ACSR i ACCC (vrstu HTLS vodiča) za sve utjecajne kategorije ekološki je povoljnije nadogradnja ACCC vodičima.

HTLS vodiči imaju sposobnost smanjiti gubitke u liniji, posebice pri niskom faktoru opterećenja zbog poboljšane električne vodljivosti žarenog aluminijskog često korištenog u takvim vodičima. Uporaba HTLS vodiča zauzvrat smanjuje potrošnju goriva i emisija stakleničkih plinova, čime se promiče dostava čiste energije. Kako je većina zemalja odobrila inicijative za smanjenje stakleničkih plinova smatrajući ih temama visoke vrijednosti, ovo je važna prednost HTLS tehnologije. HTLS tehnologija vodiča također omogućuje glatkiji rad elektroenergetskog sustava, posebice u smislu prilagodbe kapaciteta zbog dodatne margine vodljivosti koju ova tehnologija nudi, čime se pruža povećana fleksibilnost u radu elektroenergetskog sustava. Prilagodba kapaciteta danas je važno pitanje, uglavnom zbog postupnog povećanja obnovljivih izvora energije u miksu proizvodnje električne energije kao ilustrirano u tablici 2.9.

Tablica 2.9. Miks proizvodnje energije navedenih država za godinu 2018. [24]

Država	Ukupna energija (TWh)	Kruta goriva (%)	Nafta (%)	Prirodni plin (%)	Nuklearna energija (%)	Ostali obnovljivi izvori (%)	Hidroenergija (%)	Vjetroenergija (%)	Solarna energija (%)	Ostali OIE (%)
Austrija	68.4	5.3	1.0	14.5	0.0	1.0	60.1	8.8	2.1	7.2
Belgija	74.4	3.1	0.2	32.1	38.3	1.8	1.8	10.0	5.2	7.3
Njemačka	639.9	37.2	0.8	13.0	11.8	1.1	3.8	17.1	7.1	8.0
Danska	30.3	21.6	0.9	6.8	0.0	2.3	0.0	45.8	3.1	19.4
Grčka	53.1	32.3	10.4	26.4	0.0	0.5	10.8	11.8	7.1	0.6
Španjolska	273.6	14.1	5.3	21.1	20.3	0.4	13.4	18.6	2.9	3.9
Finska	69.8	14.4	0.4	6.0	32.6	0.7	19.0	8.3	0.1	18.4
Francuska	579.8	1.8	1.0	5.3	71.0	0.4	12.1	4.9	1.8	1.5
Irska	31.1	13.6	0.4	51.4	0.0	1.0	3.0	27.8	0.1	2.7
Italija	288.4	10.7	3.8	44.5	0.0	0.8	17.5	6.1	7.8	8.7
Luksemburg	2.2	0.0	0.0	8.9	0.0	3.5	60.7	11.6	5.4	9.9
Norveška	146	0.1	0.0	1.8	0.0	0.1	95.2	2.6	0.0	0.1
Portugal	59.5	20.1	1.9	26.2	0.0	0.4	22.9	21.2	1.7	5.7
Švedska	163.0	0.9	0.2	0.2	42.0	1.0	38.1	10.2	0.2	7.3
Ujedinjeno Kraljevstvo	329.9	5.3	0.3	39.8	19.7	1.5	2.4	17.2	3.9	9.9
SAD	4209.1	27.2	0.6	34.9	19.2	0.5	7.0	6.5	2.3	1.8

Mnoge zemlje imaju ambiciozne ciljeve u pogledu obnovljive energije u nadolazećim godinama. Takav ambiciozan cilj zahtijevat će više razine fleksibilnosti upravljanja električnom energijom, gdje HTLS vodiči mogu biti prikladan izbor obzirom na njihove adaptivne sposobnosti.

Karakterizacija okoliša koji je pogođen projektom implementacije HTLS vodiča je osnova za ispravnu identifikaciju i predviđanje utjecaja na taj okoliš. Analiza utjecaja na okoliš odgovara proučavanju sljedećih faktora [26]:

1. kvaliteta zraka i zvučno okruženje,
2. geologija i vodni resursi,
3. krajolik i vizualni utjecaj,
4. biljni i linijski zaštitni koridor,
5. morfologija tla te
6. materijali i otpad.

Kvaliteta zraka i zvučno okruženje: korištenje strojne opreme za izgradnju elektroenergetskih vodova odgovoran je za tri vrste ekoloških problema:

- potrošnja fosilnih goriva i emisije ugljičnog dioksida (CO₂),
- onečišćenje atmosfere štetnim plinovima i česticama i
- povećano zagađenje bukom.

Ispušni plinovi iz radne opreme sadrže ugljikov dioksid, staklenički plin koji je odgovoran za globalno zagrijavanje. Štetni ispušni plinovi iz mehaničke opreme sadrže molekule opasne po ljudsko zdravlje, kao što je ugljikov monoksid, oksidi sumpora i oksidi dušika. CO₂ emisija iz goriva može ovisiti o radnim satima strojarske opreme. Tablica 2.10. predstavlja količinu dizelskog goriva potrošenog za svaki projekt i alternativu. Alternativa za nadogradnju ACCC-om ima značajno smanjenje u izgaranju ovog fosilnog goriva i posljedično tome, smanjenje emisija stakleničkog plina CO₂ [26].

Projekti uzeti za tablice koje slijede u ovom podpoglavlju iz reference [26] čine:

- Projekt 1 (60 kV Fafe (REN) – Fafe)
 - Postavljanje visokonaponskog dalekovoda između Felgueirasa i Fafe trafostanica. Potrebna je zamjena dalekovoda u cilju povećanja prijenosne moći. U ovoj situaciji

proučavane su dvije mogućnosti povećanja prijenosne moći dalekovoda: 2x3xACSR326 te 1x3xACCC380.

- Projekt 2: LN 60 kV Areias – Vale do Tejo
 - Cilj ovog projekta je bio uspostaviti novu trafostanicu (Areias) te korištenje postojećih visokonaponskih vodova za njeno napajanje. Za ovaj prijedlog, kako bismo povećala prijenosna moć dalekovoda, proučene su dvije alternative: 2x3xACSR326 te 1x3xACCC380.

- 3 Projekt 3: LN 60 kV Alfena – Águas do Lever/Vermoin (REN)
 - Kako bi postojao dvostruki dovod do trafostanice Alfena, ovaj projekt je proučavao dvije alternative. Prva alternativa bila je konstruirati paralelni dalekovod s ACSR vodičima na onaj postojeći (2x3xACSR326 + 2x3xACSR326) te druga alternativa bila je korištenje postojećih stupova i zamjena vodiča sa 2x3xACCC380 vodičima.

Tablica 2.10. Količina dizelskog goriva potrošenog za svaki projekt i alternativu [26]

	Alternativa 1 - ACSR			Alternativa 2 - ACCC		
	Projekt 1	Projekt 2	Projekt 3	Projekt 1	Projekt 2	Projekt 3
Dizelsko gorivo (l)	6810	6602	3412	1052	840	662
Dizelsko gorivo (kg CO₂)	18 182	17 626	9110	2810	2244	1769
Mehanička oprema (h)	451	771	803	96	111	137

Radna oprema korištena u izgradnji dalekovoda, izvor buke, uzrok je stresa kod radnika i populacije koja živi u blizini. Buka mehaničke opreme može biti zastrašujuća životinjama, tjerajući ih tako da bježe iz svojih prirodnih staništa. Iako je zagađenje bukom kod ove vrste rada obično nisko i kontrolirano, ACCC-ova alternativa nadogradnje linije predstavlja alternativu manjeg štetnog utjecaja, zbog manje količine potrebne bučne mehaničke opreme (tablica 2.10.).

Geologija i vodni resursi: beton korišten za temelje električnih stupova glavni je uzrok potrošnje vode u izgradnji dalekovoda. U betonarama, potrošnja vode iznosi oko 170 l/m³. Proizvodnja betona višestruko utječe na okoliš. Koristi velike količine šljunka i pijeska, te proces proizvodnje

oslobađa velike količine CO₂. Za alternativu povećanja naponske razine dalekovoda ACCC-om, upotreba novog betona je nepostojeća, jer nema potrebe za postavljanjem novih električnih stupova. Potrošnja betona i vode u svakom projektu je prikazana u tablici 2.11. [26].

Tablica 2.11. Potrošnja betona i vode u svakom projektu [26]

	Alternativa 1 - ACSR			Alternativa 2 - ACCC		
	Projekt 1	Projekt 2	Projekt 3	Projekt 1	Projekt 2	Projekt 3
Beton (m³)	75	171	58	0	0	0
Voda (l)	12716	28992	9897	0	0	0

Krajolik i vizualni utjecaj: Za procjenu vizualnog utjecaja važno je proučavati vidljivost koja može biti učinjena identificiranjem područja na koje je vizualno utjecano, kao i kvalitetu vidljivosti krajolika i sposobnost vizualne apsorpcije. Magnituda utjecaja može biti visoka, srednja, niska ili nula. Za projekte 1 i 2 (postavljanje visokonaponskih vodova), u obje alternative vizualnog utjecaja nema, jer električna infrastruktura već postoji, a fizičke izmjene dalekovoda ne mijenjaju trenutni izgled. Isti rezultat također vrijedi i za projekt 3 (ACCC alternativa). U projektu 3, ACSR alternativnom metodom, vizualni utjecaj nove strukture biti će nizak, zbog postojanja infrastruktura koja može biti korištena.

Koridor za zaštitu flore i dalekovoda: Da bi se zajamčio siguran rad dalekovoda, za dalekovode, primjerice 60 kV, ovaj koridor mora imati minimalnu širinu od 25 m, pri čemu je potrebno rezati ili odvajati sva stabla unutar koridora, osiguravajući minimalnu sigurnosnu udaljenost. U projektu 3, ACSR alternativa bila je konstruiranje novog dalekovoda, paralelnog s postojećim, što bi podrazumijevalo krčenje šume na tom koridoru. Tablica 2.12. prikazuje alternativu ACCC-om koji omogućuje održavanje cjelokupne postojeće flore u tom koridoru.

Tablica 2.12: Alternativa ACCC vodičem [26]

	Alternativa 1 - ACSR			Alternativa 2 - ACCC		
	Projekt 1	Projekt 2	Projekt 3	Projekt 1	Projekt 2	Projekt 3
Udaljenost zaštite stabala (m²)	0	0	0	7500	0	0

Morfologija tla: Potreba za mehaničkom opremom kod transporta električnih stupova, temelje i betoniranje, prinuđuju za uspostavu novih pristupa. Ovo predstavlja utjecaj na faunu i postojeću floru, te mogući utjecaj na prvi sloj tla. Odabir alternative može dovesti do fragmentacije šume, problemi stabilizacije tla i promjene strukture ekosustava, krajolika i morfologije tla. Izbor alternative ACCC-a predstavljat će veliko smanjenje na utjecaj flore i faune. U ovoj alternativi, nije potrebno uspostavljanje novih pristupa. U Tablici 2.13. možemo provjeriti kubni metar tla korištenog za temelje, kao i duljina pristupa u svakom projektu, odnosno alternativi.

Tablica 2.13: Utjecaj tla za određeni projekt [26]

	Alternativa 1 - ACSR			Alternativa 2 - ACCC		
	Projekt 1	Projekt 2	Projekt 3	Projekt 1	Projekt 2	Projekt 3
Tlo potrebno za iskop (m³)	323	373	251	0	0	0
Duljina ceste potrebne za iskop (m)	108	84	33	0	0	0

Materijali i otpad: Glavni željezni i ne-željezni metali koji se koriste u električnim stupovima i vodičima su željezo, čelik i aluminij. Proizvodnja ova dva temeljna elementa je također odgovorna za utjecaj na okoliš. Ekstrakcija sirovog materijala iz prirode uzrokuje velike promjene u krajoliku, a proizvodnja podrazumijeva ogromne izdatke primarne energije i emisije CO₂. Korištenje ACCC alternative omogućuje sanacija električnih stupova, čime se postižu bolji pokazatelji okoliša od alternative ACSR-a. Tablica 2.14 kvantificira količinu novih materijala i recikliranje otpada nastalog u različitim projektima i alternativama.

Tablica 2.1: Količina metala korištena u dva projekta za određenu vrstu vodiča [26]

	Alternativa 1 - ACSR			Alternativa 2 - ACCC		
	Projekt 1	Projekt 2	Projekt 3	Projekt 1	Projekt 2	Projekt 3
Metalni stupovi ili tornjevi (kg)	59180	37490	32160	0	0	0
Kabel vodiča (m)	12984	10134	4620	6492	5076	3876
Otpadno željezo (kg)	45610	40855	0	0	0	0
Otpadni vodiči (m)	8660	6760	0	6490	5070	3816

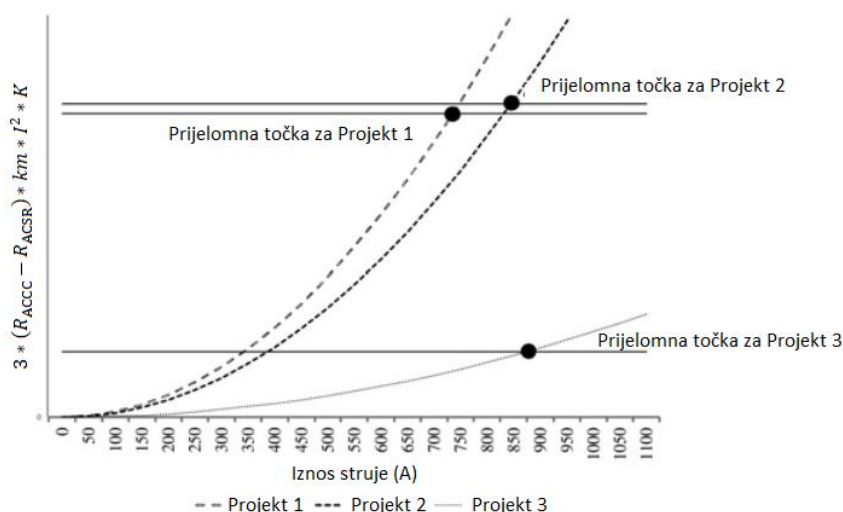
Tablica 2.11. prikazuje varijaciju ukupnih troškova između alternativnih rješenja ACCC i ACSR vodičima u svakom projektu. Alternativa za revitalizaciju ACCC vodičem manje je zahtjevna od one ACSR vodičem. Da bismo odredili koji vodič trebamo odabrati u revitalizaciji dijela mreže, možemo promatrati sljedeću formulu (2.6) te sliku 2.18. koja uspoređuje ulaganja i naponske gubitke u mreže.

$$3 * (R_{ACCC} - R_{ACSR}) * km * I^2 * K |\Delta U_{\text{loženo}}| \quad (2.6)$$

U jednadžbi 2.6 vrijede oznake za sljedeće:

- R_{ACCC} i R_{ACSR} – iznosi otpora vodiča na temperaturi od 75°C ,
- km – duljina prijenosnog voda,
- I – iznos struje,
- K – gubici linije vodiča za vrijeme ciklusa života i
- $\Delta U_{\text{loženo}}$ – predstavlja razliku ukupnog uloženog kapitala koristeći ACCC i ACSR vodič.

Na slici 2.18. može se usporedno uočiti razlika varijacija ukupnih troškova između alternative ACCC vodičem i alternative novim ACSR vodičem za svaki od spomenutih projekata.



Slika 2.18. Veza između razlike u iznosu investicija te gubitaka mreže (za povećanje prijenosne moći dijela mreže ACCC i ACSR vodičima) [26]

Tablicom 2.15. prikazana je usporedba potrošenog kapitala u navedenim projektima za odabrana rješenja povećanja prijenosne moći dalekovoda. Vidljivo je da je u svakom od tri projekta ekonomski isplativija alternativa korištenjem ACCC vodiča (visokotemperaturnog vodiča malog provjesa) čime se postiže znatna ušteda kapitalnih sredstava.

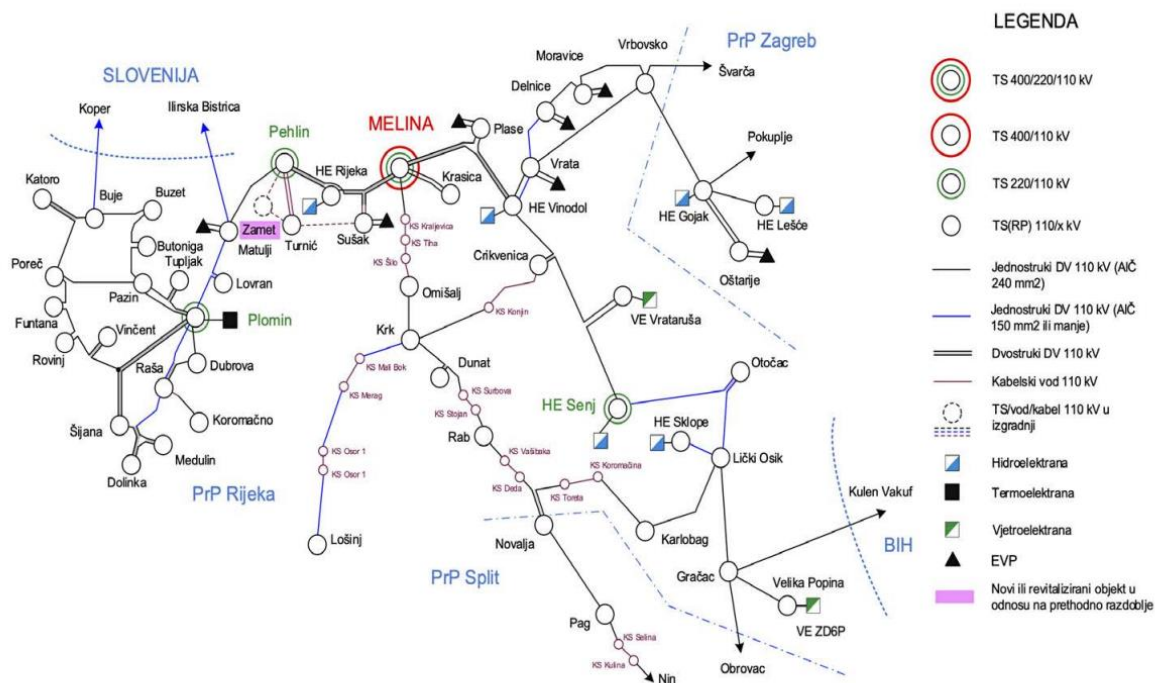
Tablica 2.15. Ekonomska usporedba alternativnih rješenja ACCC i ACSR vodičem [26]

	Projekt 1	Projekt 2	Projekt 3
Ukupni razlika troškova ACCC i ACSR vodiča	-25,9%	-43,8%	-16,3%

U ovoj studiji prikazana je usporedba korištenja ACCC vodiča u odnosu sa ACSR vodičem u revitalizaciji dalekovoda. U tri projekta, imamo ekonomsku prednost u korištenju ACCC vodiča, iako oni uzrokuju veće naponske gubitke. ACCC vodič ima nekoliko pozitivnih ekoloških pokazatelja koji su važni za konačnu odluku odabira proučavanih alternativnih rješenja revitalizacije. Uzimajući u obzir ukupne iznose investicija, naponske gubitke te naravno koristi za okoliš utjecalo je na odabir alternativnog rješenja.

3. ZNAČAJKE ELEKTROENERGETSKOG PODSUSTAVA ISTRE

Elektroenergetski podsustav Istre odnosi se na mrežu objekata za proizvodnju, prijenos i distribuciju električne energije na području istarske regije u Hrvatskoj. Podsustav je odgovoran za opskrbu električnom energijom za stanovnike i poduzeća u tom području. Podsustav se može sastojati od kombinacije konvencionalnih elektrana, obnovljivih izvora energije kao što su energija vjetra i sunca te dalekovoda visokog napona koji prenose električnu energiju od proizvodnih objekata do distribucijskih podstanica. Specifične komponente elektroenergetskog podsustava Istre mogu varirati ovisno o energetsom miks i infrastrukturi regije.



Slika 2.18. Mreža 110 kV PrP Rijeka 2020. godine

Slika 3.1. Prikaz EE podsustava Istre [29]

Pogonska sigurnost Istre ovisi o mnogobrojnim čimbenicima a tri najvažnija za izdvojiti su:

- raspoloživost proizvodnog objekta TE Plomin 2:
 - za vožnju TE Plomin 2 utječu mnogobrojni čimbenici kao primjerice cijene goriva, cijene emisijskih dozvola, temperatura rashlade koja definira radnu točku elektrane, remont, kvaliteta goriva i dr.,

Trend konstantnog povećanja konzuma Istre predstavlja izazov sa stajališta sigurnosti pogona prijenosne mreže što se odražava na sljedeća dva čimbenika:

- zadovoljenje konzuma:
 - dobavom snage putem dalekovoda, što nije uvijek moguće bez proizvodnje TE Plomin 2.
- zadovoljenje naponskih prilika:
 - u slučaju neraspodivnosti proizvodnog objekta TE Plomin 2 moguć je naponski slom na mjestima najvećeg konzuma Istre, a to su zapadna obala i jug Istre.

Iznosi konzuma Istre morali bi ubrajati i konzum TS Lovran (u sagledavanje sigurnosti pogona Istre potrebno je promatrati tokove snaga, a ne administrativne granice).

Radi održavanja, te povećanja pogonske sigurnosti elektroenergetskog podsustava Istre, predstavljen je desetogodišnji plan razvoja prijenosne mreže od strane HOPS-a. Desetogodišnji plan razvoja za razdoblje 2022. – 2031. godine, rezultat je najnovijih događanja u elektroenergetskom sektoru Republike Hrvatske i spoznaja o faktorima koji utječu na očekivani pogon i razvoj prijenosne mreže. Navedeni plan napravljen je imajući u vidu sigurnost opskrbe kupaca, potrebe tržišnih sudionika, zahtjeve za priključak novih korisnika mreže i povećanja priključne snage postojećih korisnika [31].

Navedeni plan razvoja prijenosne mreže usklađen je sa strategijom Republike Hrvatske koja predviđa umjerenu tranziciju ka nisko-ugljičnim energetskim izvorima te obnovljivim izvorima energije. Također je važno napomenuti cilj smanjenja emisija stakleničkih plinova pomoću provedbi mjera energetske učinkovitosti te smanjenje ovisnosti o uvozu energije. Plan razvoja hrvatske prijenosne mreže obuhvaća izgradnju novih objekata prijenosne mreže te neophodnu rekonstrukciju i revitalizaciju postojećih. Najvažniji objekti su istraženi na razini studije predizvodljivosti, a prije donošenja konačnih investicijskih odluka za pojedine objekte će se provesti dodatna istraživanja njihove tehno-ekonomske opravdanosti izgradnje. te. Potrebno je voditi računa o tehničkim ocjenama projekta, troškovima izvedbe projekta, mogućnosti izgradnje s obzirom na prostorna, okolišna i druga ograničenja, sigurnosti opskrbe sukladno uvjetima

kvalitete opskrbe. Također je razmatrana održivost projekta, tj. smanjenje gubitaka prijenosa i minimiziranje emisija CO₂, te integracija OiE i dr.

Osnovni principi koje je potrebno zadovoljiti prilikom određivanja optimalnog razvoja prijenosne mreže su:

- postizanje zadovoljavajuće sigurnosti opskrbe kupaca na teritoriju RH,
- postizanje zadovoljavajuće raspoloživosti i dostatnosti hrvatske prijenosne mreže za nesmetano odvijanje aktivnosti svih sudionika na tržištu električne energije koje čine proizvođači, trgovci i opskrbljivači, te drugi subjekti,
- omogućavanje priključka novih korisnika na prijenosnu mrežu pod jednakim, transparentnim i nediskriminirajućim uvjetima,
- integracija obnovljivih izvora energije u prijenosni sustav u cilju ispunjenja obaveza koje je RH preuzela ulaskom u EU,
- definiranje konfiguracije prijenosne mreže u budućim vremenskim presjecima koja će biti dovoljno fleksibilna i elastična da omogući ispunjenje prethodno navedenih zahtjeva u što većem rasponu kretanja nesigurnih utjecajnih faktora i
- ispunjenje ciljeva strategije energetskeg razvoja Republike Hrvatske [31].

Prethodno nabrojani principi tj. strateške odrednice ispunit će se provođenjem nekoliko aktivnosti, a jedna od njih, koja će biti opisana u nastavku ovoga rada je primjena modernih tehnologija u prijenosu električne energije, točnije primjena visokotemperaturnih vodiča malog provjesa u revitalizaciji i povećanju prijenosne moći postojećih dalekovoda. Nove je tehnologije u izgradnji prijenosne mreže poželjno primijeniti zbog poboljšanja tehničkih karakteristika mreže, ukoliko naravno za istu postoji ekonomska opravdanost. U pojedinim slučajevima radi prostornih ograničenja i problema u pronalasku novih trasa za vodove biti će potrebna primjena i skupljih rješenja, što je slučaj kod nepremostivih poteškoća vezanih primjerice za okoliš.

Uvođenje novih tehnologija vezanih za primjenu visokotemperaturnih vodiča malog provjesa, tj. HTLS vodiča u svrhu revitalizacije i povećanje prijenosne moći postojećih dalekovoda je već provedeno u praksi. Primjer toga su zamjena vodiča na DV 110 kV Sinj – Dugopolje – Meterize 2016. godine te DV 110 kV Meterize – Dujmovača – Vrboran 2018. godine. Uz spomenute

izvršene primjere, postoje i primjeri koji su u fazi planiranja razvoja (desetak dalekovoda nazivnog napona 110 kV i 220 kV u narednih 5 godina), pri čemu se za svaki planirani zahvat provela odgovarajuća tehno-ekonomska analiza (primjerice za zamjenu vodiča s povećanjem prijenosne moći na DV 220 kV Senj-Melina i DV 220 kV Konjsko - Krš Pađene - Brinje) koja je dokazala željeni konačni efekt, a to je povećanje prijenosne moći koridora uz ekonomsku opravdanost primjene (s aspekta investicijskih troškova i gubitaka), te osiguranja (n-1) kriterija u pogonu prijenosne mreže.

3.1. Integracija OIE

Kretnjom energetske tranzicije prema ekološki prihvatljivijoj, zelenoj električnoj energiji, energetski se sustav drastično mijenja. Uporaba OIE poput vjetroelektrana ili solarnih elektrana, dovodi do vremenski promjenjive proizvodnje električne energije koja je nestabilna i ovisna o atmosferskim prilikama. Modernizacijom kroz godine, energetski sustav postaje sve kompleksniji. Sastoji se od mnogobrojnih uzročnika narušenja stabilnosti i sigurnosti sustava kao što su povećani broj korisnika, povećanje snage potrošnje, neujednačenost potrošnje, povećani broj električnih vozila te povećani broj distribuiranih izvora s nestalnom proizvodnjom. Primjenom visokotemperaturnih vodiča malog provjesa u prijenosnoj mreži i elektroenergetskom sustavu, ostvaruju se brojne prednosti i mogućnosti koje pridonose povećanju fleksibilnosti, pouzdanosti i sigurnosti prijenosne mreže i elektroenergetskog sustava.

Integracija obnovljivih izvora energije, primjerice solarnih elektrana i vjetroelektrana doprinosi smanjenju emisija CO₂ i ostalih stakleničkih plinova. Rezultat integracije OIE je usporeni učinak globalnog zatopljenja te proizvodnja ekološki prihvatljive električne energije. Veliki nedostatak obnovljivih izvora energije jest neravnomjerna i nestalna proizvodnja električne energije, upravo zbog ovisnosti takvih izvora o atmosferskim prilikama. Solarne elektrane ovise o količini sunčevog zračenja, dok vjetroelektrane ovise o brzini vjetra koja mora biti unutar definiranog raspona za kojeg je vjetroelektrana projektirana. Izostankom nužnih uvjeta, smanjuju se snaga i količina proizvedene električne energije. Nadalje, drugi navedeni problem je nestalna proizvodnja električne energije, čime se ponajviše podrazumijeva potpuni prestanak proizvodnje električne energije. Kod solarnih elektrana to je period tijekom noćnih sati (ili tijekom vrlo oblačnih dana), a kod vjetroelektrana, to je period tijekom vremenski nepovoljnih prilika (nepresutnost vjetra). Promjenjiva i nestalna proizvodnja može predstavljati značajan problem pri vođenju

elektroenergetskog sustava što potencijalno ugrožava njegovu stabilnost i sigurnost. Također, pogreška između predviđene i proizvedene količine energije predstavlja značajno manju zaradu ukoliko se energija prodaje na burzi (dan-unaprijed tržište). Implementacijom i korištenjem HTLS vodiča navedeni problemi se mogu eliminirati ili barem umanjiti.

Kako bi se smanjila ograničenja u isporuci snage s posebnim osvrtom na onu proizvedenu putem OIE te kako bi se poboljšala nepredvidljivost određivanja cijene električne energije na tržištu, preporučena je uporaba HTLS vodiča. Dokazano je da korištenje ovih vodiča na linijama koje pokazuju probleme s preopterećenjem, dopušta povećanje izvoza djelatne snage [31]. Potrebno je izvršiti izbor vrste HTLS vodiča vrlo pažljivo, kako bi se ocijenila očekivana tehnička i ekonomska dobrobit. Ovi su aspekti biti će analizirani i predloženi u daljnjoj analizi ovoga rada. Ukratko, korištenje HTLS vodiča će povećati izvoz djelatne energije kako bi se osigurala veća sigurnost električnog prijenosa sustava.

3.2. Analiza sigurnosti po N-1 kriteriju

N-1 kriterij sigurnosti je osnovni kriterij korišten kod pogona i planiranja, te razvoja elektroenergetskog sustava (prijenosne mreže), koji je sukladan s hrvatskim i europskim tehničkim regulativama. Prema N-1 kriteriju, operator prijenosnog sustava mora konfiguracijom elektroenergetskog sustava osiguravati da u svim pogonskim uvjetima jednostruki ispad bilo koje jedinice prijenosne mreže (transformatora, vodova, jedinice za kompenzaciju jalove snage i dr.) ili proizvodne jedinice ne dovede do pogonskih ograničenja u vlastitom i/ili susjednim regulacijskim područjima (prekoračenje vrijednosti struja, napona i dr.). Operator prijenosnog sustava može povremeno odstupiti od kriterija N-1 ukoliko je to potrebno zbog radova na održavanju i modificiranju prijenosne mreže, ali uz pravodobno prethodno obavještanje operatora distribucijskog sustava i korisnika prijenosne mreže na kojeg to utječe. Uvažavanjem i analizom N-1 kriterija ostvaruje se stabilnost, sigurnost i pouzdanost elektroenergetske mreže i opskrbe električnom energijom. U slučaju da N-1 kriterij nije ispunjen tijekom pogona, operator prijenosnog sustava mora korektivno djelovati i vratiti sustav u normalno pogonsko stanje [30].

3.3. Frekvencijska stabilnost

Frekvencijska se stabilnost odnosi na konstantno održavanje vrijednosti frekvencije unutar određenog raspona. Nazivna frekvencija u Hrvatskoj iznosi 50 Hz. Prema Mrežnim pravilima prijenosnog sustava, donesenim od strane Hrvatskog operatora prijenosnog sustava (HOPS) uz prethodnu suglasnost Hrvatske energetske regulatorne agencije (HERA) od 20. lipnja 2022. godine, na 20-toj sjednici Uprave održanoj 20. srpnja 2022. godine, određena su osnovna pravila o vrijednosti frekvencije u prijenosnom sustavu.

Članak 21. mrežnih pravila prijenosnog sustava navodi slijedeće [30]:

- nazivna vrijednost frekvencije u hrvatskom elektroenergetskom sustavu iznosi 50,00 Hz,
- U razdobljima korekcije sinkronog vremena, prema nalogu operatora koordinacijskog centra ili operatora prijenosnog sustava frekvencija se podešava na zadanih 49,99 Hz ili 50,01 Hz,
- niti u jednom trenutku odstupanje frekvencije od nazivne vrijednosti ne smije premašiti ± 800 mHz,
- maksimalno odstupanje frekvencije od zadane vrijednosti, u privremenom stacionarnom stanju, u interkonekcijskom radu, ne smije premašiti iznos od ± 200 mHz,
- odstupanja frekvencije od zadane vrijednosti za više od ± 20 mHz ispravljaju se djelovanjem primarne regulacije,
- kod pogona u interkonekciji, operator prijenosnog sustava u odnosu na održavanje frekvencije mora poštivati zahtjeve ENTSO-E-a. U slučaju poremećaja, u održavanju frekvencije mu svojim kapacitetima primarne regulacije solidarno pomažu ostala regulacijska područja interkonekcije i
- podfrekvencijsko rasterećenje kao mjera za održavanje frekvencije aktivira se ako je frekvencija niža od 49,20 Hz isključenjem reverzibilnih elektrana koje preuzimaju energiju iz mreže, odnosno ako je frekvencija niža od 49,00 Hz daljnjim isključenjem krajnjih kupaca u skladu s tablicom iz članka 46. ovih Mrežnih pravila.

Odstupanje proizvodnje od potrošnje električne energije dovodi do odstupanja frekvencije od nazivne vrijednosti. U slučajevima kada snaga proizvodnje premašuje iznos snage potrošnje električne energije, dolazi do rasta frekvencije, dok za suprotni slučaj vrijedi obratno. Poveznica snage proizvodnje i frekvencije je brzina rotacije sinkronih strojeva, tj. generatora. Pri smanjenju

opterećenja dolazi do porasta brzine generatora i posljedično time do rasta frekvencije generiranog napona.

3.4. Naponska stabilnost

Naponsku stabilnost označava konstantno održavanje vrijednosti napona unutar određenog raspona za određenu naponsku razinu (za vrijeme normalnog pogona te nakon poremećaja). To se konkretno odnosi na razine napona u pogonskim čvorovima mreže. Rasponi dozvoljenih vrijednosti napona određeni su mrežnim pravilima prijenosnog sustava, člankom 25 koji definiraju propisane granice za pojedine naponske razine. Definirane razine nazivnih napona prijenosne mreže u Hrvatskoj su 110 kV, 220 kV i 400 kV. Tablica 3.1. prikazuje granice dozvoljenih napona prijenosne mreže [30].

Tablica 3.1. Naponske granice prijenosne mreže [30]

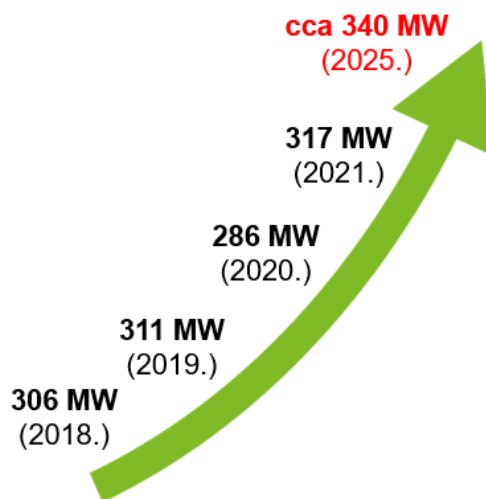
Nazivni napon	Normalni pogonski uvjeti		Poremećeni pogonski uvjeti	
	Postotne granice	Granice napona	Postotne granice	Granice napona
400 kV	- 10% +5%	360-420 kV	±15%	340-460 kV
220 kV	- 10%+11,8%	198-246 kV	±15%	187-253 kV
110 kV	- 10%+11,8%	99-123 kV	±15%	94-127 kV

4. ANALIZA SIMULACIJA KARAKTERISTIČNIH SCENARIJA

Jedno od potencijalnih tehničkih rješenja za karakteristične scenarije o kojima će biti riječi u ovom poglavlju jest ugradnja HTLS vodiča kako bi se povećala prijenosna moć 110 kV dalekovoda Buje – Koper , te poteza Plomin – Lovran – Matulji u svrhu razvoja istarske mreže i osiguravanja sigurnosti njenog napajanja u uvjetima visokog, tj. maksimalnog ljetnog opterećenja (>250 MW). Analiza će se također provoditi uz neraspoloživost lokalne 220 kV mreže (najčešće prouzrokovane munjama, požarima itd.), odnosno neraspoloživost proizvodnog bloka TE Plomin 2 te uz ispad dvosustavnog dalekovoda DV 220 kV Pehlin – Plomin i Melina – Plomin. DV 220 kV dalekovod Melina – Pehlin – Plomin je dvosustavni dalekovod kod kojeg je u TS Pehlin uvedena jedna trojka po principu „ulaz-izlaz“ čija je prijenosna moć 360 MVA. Ispadi navedenog dalekovoda najčešće su posljedica atmosferskih pražnjenja, tj. udara munje u zaštitno uže ili stup, ili izravnog udara munje manjih amplituda u fazne vodiče i to posebice u periodu ljetnih mjeseci. Još jedan razlog isključenja ovog dvosustavnog dalekovoda uz atmosferska pražnjenja su požari u blizini trase [32].

Istra je povezana s ostatkom hrvatskog EES-a 220 kV dvosustavnim dalekovodima Pehlin – Plomin i Melina – Plomin, DV 110 kV dalekovodima Plomin – Lovran – Matulji – Pehlin te 110 kV vezom Buje – Koper i Matulji – Ilirska Bistrica prema EES-u Slovenije. Napajanje Istre dolazi preko 110 kV pojnih točaka smještenih u Plominu i Divači koje su transformatorima 220/110 kV i 400/110 kV povezane sa mrežom u interkonekciji. Obzirom na izgrađenost mreže od 110 kV smještene u susjednoj Sloveniji, DV 110 kV dalekovod Buje – Koper ima veći značaj za EES RH budući da je područje Kopra vrlo snažno povezano pomoću TS-a 400/220/110 kV Divača u Sloveniji s prijenosnom moći dalekovoda od 89 MVA.

Tijekom ljetnih mjeseci, konzum Istre često prelazi 250 MW, što je dodatno pogoršano trendom povećanja konzuma istarskog područja (prikazano na slici 3.1.), zbog čega je maksimalno opterećenje tog vremenskog perioda posebno potrebno razmotriti pri izvršenju ove analize.



Slika 3.1. Trend povećanja konzuma Istre [29]

U scenarijima visokog ljetnog opterećenja konzuma za vrijeme kada TE Plomin 2 (raspoloživi blok B) nije na mreži, svaki dvostruki ispad 220 kV dalekovoda koji je na istim stupovima (posebice na dionici Pehlin – Plomin) može imati za posljedicu gubitak konzuma Istre u jeku turističke sezone što bi bilo vrlo neugodno za cjelokupni EES RH. Takav ispad također ugrožava sigurnost opskrbe Istre zbog preopterećenja DV 110 kV dalekovoda Buje – Koper i 110 kV dalekovoda na potezu Pehlin – Matulji – Lovran – Plomin. U takvim uvjetima postoji mogućnost naponskog sloma zbog pada napona na potezu Poreč – Funtana – Rovinj – Vinčent – Šijana – Dolinka – Medulin – Raša (naponi van granica poremećenog pogona su u iznosima od 93-98 kV).

Najozbiljniji složeni događaj do kojeg može doći u okolnostima kada su TE Plomin 1 (blok A) i TE Plomin 2 (blok B) trajno izvan pogona, moguć je istodobni prisilni zastoj dvosistenskog DV 220 kV Melina – Plomin i Plomin – Pehlin, koji može nastati, primjerice kao posljedica nevremena duž trase voda od Plomina do Pehlina, požara na trasi, rušenja jednog dvosustavnog dalekovodnog stupa i sl., za vrijeme kada može doći do visokih preopterećenja na DV 110 kV vodu Buje – Koper i 110 kV vezi između Pehlina i Plomina preko veze Matulja i Lovrana, te kada bi isključenje navedenih vodova djelovanjem nadstrujne zaštite dovelo do lokalnog raspada podsustava Istre.

4.1. Povećanje prijenosne moći DV 110 kV Buje – Kopar i 110 kV poteza Plomin – Lovran – Matulji visokotemperaturnim vodičima malog provjesa

DV 110 kV Buje – Kopar ukupne je duljine 16,32 km, od kojih je 4,1 km na području Republike Hrvatske, dok je preostalih 12,2 km na području Republike Slovenije. Prijenosna moć dalekovoda iznosi 89 MVA. Procesom klasične revitalizacije vodiča, mogla bi mu se povećati prijenosna moć do 120 MVA, zbog čega je i razmatrana mogućnost revitalizacije upotrebom viskokotemperaturnih vodiča niskog provjesa, primjerice uporabom ACCC Rovinj ili slično (ovisno o stanju stupova). Uporabom viskokotemperaturnih vodiča niskog provjesa prijenosna moć bi se mogla znatno povećati do 160 MVA, što bi približno odgovaralo ugradnji ACCC vodiča Rovinj tipa kao što je već izvedeno na 110 kV vodu Meterize – Dugopolje – Sinj. Uz dalekovod koji povezuje Buje i Kopar, prijenosna moć će se također povećati na DV 110 kV Plomin – Lovran te DV 110 kV Lovran – Matulji čija je prijenosna moć 90 MVA. Duljina dalekovodnog vodiča između Plomina i Lovrana iznose 23,5 km, a onog između Lovrana i Matulja 8,74 km. Navedenim projektom bi se utjecalo na tokove snaga u istarskoj mreži (u slučaju gubitka lokalne 220 kV mreže) na način da bi se znatno smanjila mogućnost preopterećenja DV 110 kV Buje – Kopar.

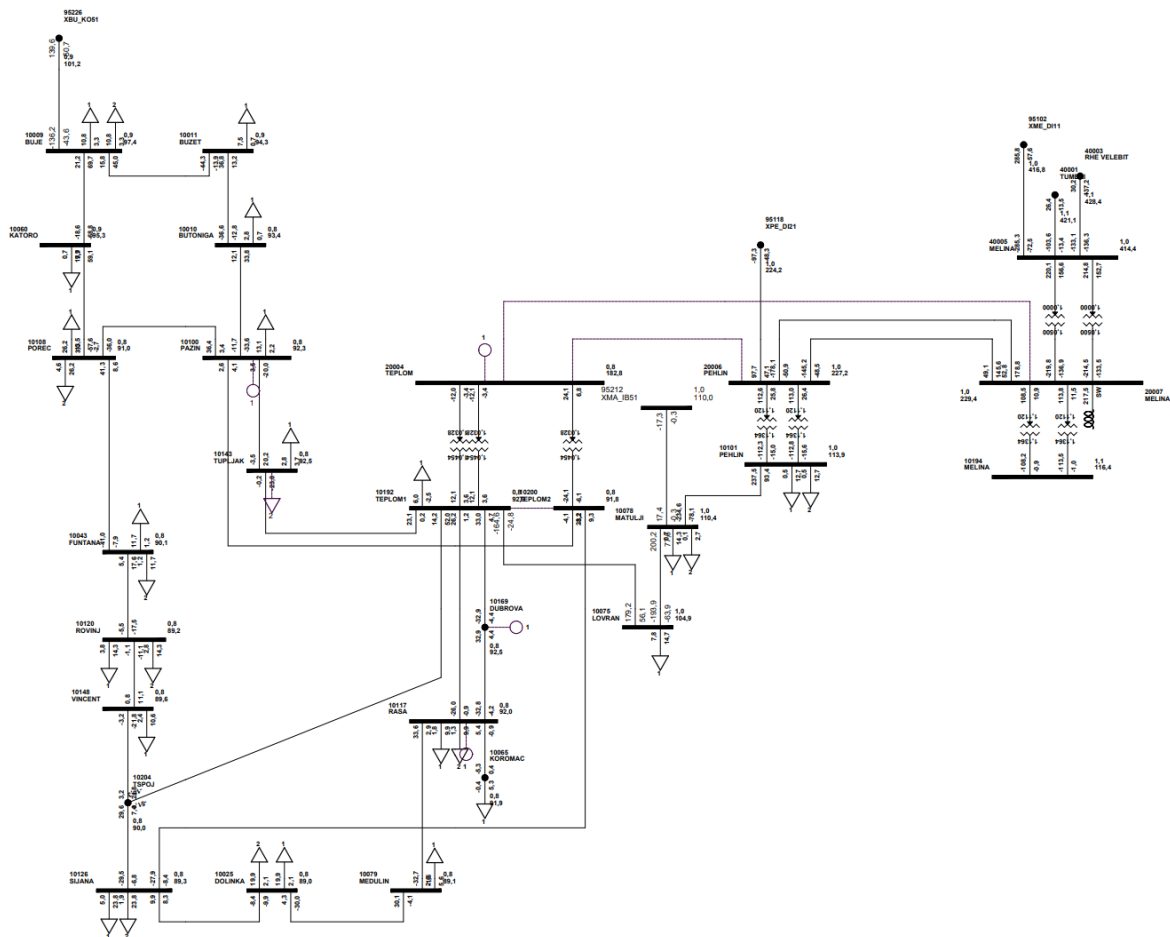
Primjer primjene viskokotemperaturnih vodiča niskog provjesa u prijenosnoj mreži može se na praktičan način provesti putem računalne simulacije. U ovom slučaju prikazana je analiza primjene viskokotemperaturnih vodiča niskog provjesa u simulacijskom modelu elektroenergetskog podsustava Istre. Simulacijom je provedena analiza od nekoliko scenarija čija se problematika može riješiti na nekoliko načina, od kojih je jedan upravo primjena ovih vodiča. Povećanjem sigurnosti pogona, te osiguravanjem pouzdanosti opskrbe električnom energijom u elektroenergetskom sustavu u tranziciji, ugradnja HTLS vodiča smatra se opravdanom. Iz tog razloga razumljivo je provesti tipične scenarije koji mogu ugroziti sigurnost i pouzdanost opskrbe sustava. Važna napomena je da se navedeni zahtjevi za održavanje sigurnosti podsustava Istre mogu zadovoljiti uz povećanje prijenosne moći DV 110 kV Buje – Kopar ugradnjom HTLS vodiča i primjenom drugih načina, primjerice ugradnjom kondenzatorskih baterija (baterije ukupne snage do cca 50 Mvar u 110/x kV u TS Vinčent, uz moguću ugradnju u TS Rovinj, TS Funtana ili TS Poreč), izgradnjom novog jednostrukog DV 110 kV Matulji – Buzet (osiguravajući tako dodatni pravac napajanja 110 kV mreže i obilazak vodova snižene prijenosne moći Matulji – Lovran – Plomin), izgradnjom novog jednostrukog DV 220 kV Melina – Pehlin – Plomin te izgradnjom novog DV/KB 110 kV Plomin – Lošinj, Medulin – Lošinj ili Raša – Lošinj. Dodatna navedena

tehnička rješenja zahtijevaju zasebnu analizu i potrebno istraživanje zbog svojih različitih karakteristika implementacije.

4.1.1. Simulacija karakterističnog scenarija klasičnim vodičima

Simulaciju se provela pomoću računalnog programa PSS®E (eng. *Power Transmission System Planning Software*) razvijenog u njemačkoj tvrtki Siemens. Model korišten za simulaciju predstavlja model istarskog podsustava, gdje su provedeni potencijalni scenariji unutar podsustava u kojima se dotiču rješavanja problema ukoliko dođe do uvjeta neraspoloživosti lokalne 220 kV mreže u Istri s ciljem da se operatoru prijenosnog sustava omogući pravovremeno upravljanje podsustavom radi sprječavanja prekida opskrbe istarskog podsustava i u cjelokupnom hrvatskom elektroenergetskom sustavu. Proizvodna jedinica TE Plomin 1 (blok A) nije uključena u simulacijsku analizu jer trenutno nije aktivna.

Elektroenergetska mreža modelirana u softverskim alatom PSS Siemens prikazana je na slici 4.2. Transformatorske stanice TS 110/x prikazane su pomoću sabirnica na koje su priključeni tereti koji odgovaraju opterećenju pripadajućeg područja. Prijenosna mreža je karakterizirana nazivnim naponom iznosa 110 kV te se unutar mreže također pojavljuje jedno čvorište s nazivnim naponom 220 kV (čvorište TE Plomin) i jedno 440 kV čvorište (čvorište Melina).



Slika 4.2. Model elektroenergetskog podsustava Istre u programu PSS Siemens (klasični vodiči)

Pretpostavke uzete u obzir pri analizi modela prijenosne mreže sa slike 4.2. su:

- kao početni scenarij uzet je ljetni maksimum s konzumom Istre od 312 MW (uključujući konzum TS Lovran),
- nerasplošivost dvosustavnog DV 220 kV Plomin – Pehlin – Melina,
- gubitak proizvodnje TE Plomin 2 (blok B) priključenog na mrežu 220 kV, uz nerasplošivost TE Plomin 1 (blok A) koji je priključen na 110 kV mrežu.

Na slici 4.3. prikazana je mreža s povećanom prijenosnom moći visokotemperaturnim vodičima malog provjesa na potezu Plomin – Lovran – Matulji te na DV 110 kV Buje – Kopar. Vod DV 110 kV Buje – Kopar sada je uz nazivnu snagu prijenosa od 160 MVA opterećen sa 140 MVA što daje opterećenost voda od 87%. U ovom scenariju neće doći do ispada voda na potezu Buje – Kopar iz mreže. DV 110 kV Plomin – Lovran u ovom scenariju opterećen je snagom od 185 MVA. Uz svoju nazivnu snagu od 160 MVA spomenuti vod dolazi do preopterećenja koje iznosi 115%. Uz povećanje prijenosne moći na 160 MVA, DV 110 kV Lovran – Matulji ima opterećenje od 201 MVA što iznosi 126% opterećenosti ovog voda.

Usporedbom rezultata možemo uočiti da pri povećanju prijenosne moći navedenih dionica ugradnjom visokotemperaturnih vodiča malog provjesa znatno se smanjuje mogućnost preopterećenja dalekovoda DV 110 kV Buje – Kopar. Opterećenje na DV 110 kV Plomin – Lovran i Lovran – Matulji također je znatno smanjeno ali u nedovoljnim granicama što ih opet dovodi u stanje preopterećenosti.

Tablica 4.1. Naponske prilike elemenata prijenosne mreže podsustava Istre

TS		Isključena proizvodnja TE Plomin 2, te isključenje 220 kV DV Melina – Plomin i Pehlin – Plomin/Povećana prijenosna moć DV 110 kV Buje – Kopar i DV 110 kV Plomin – Lovran – Matulji	Isključena proizvodnja TE Plomin 2, te isključenje 220 kV DV Melina – Plomin i Pehlin – Plomin	ΔU
		Naponske prilike [kV]		
BUJE	110	99,6	97,4	2,2
BUZET	110	96,8	94,3	2,5
DOLINKA	110	92	89	3
LOVRAN	110	105,9	104,9	1
MATULJI	110	110,7	110,4	0,3
PAZIN	110	95	92,3	2,7
PEHLIN	110	114,2	113,9	0,3
PEHLIN	220	227,5	227,2	0,3
POREČ	110	93,7	91	2,7
RAŠA	110	95	92	3
ROVINJ	110	92,1	89,2	2,9
ŠIJANA	110	92,3	89,3	3
PLOMIN	110	94,7	91,8	2,9
PLOMIN	220	188,4	182,8	5,6
DUBROVA	110	95,4	92,5	2,9

VINČENT	110	92,5	89,6	2,9
KOROMAČ	110	94,8	91,9	2,9
TUPLJAK	110	95,3	92,5	2,8
FUNTANA	110	92,9	90,1	2,8
BUTONIGA	110	96	93,4	2,6
MEDULIN	110	92,1	89,1	3

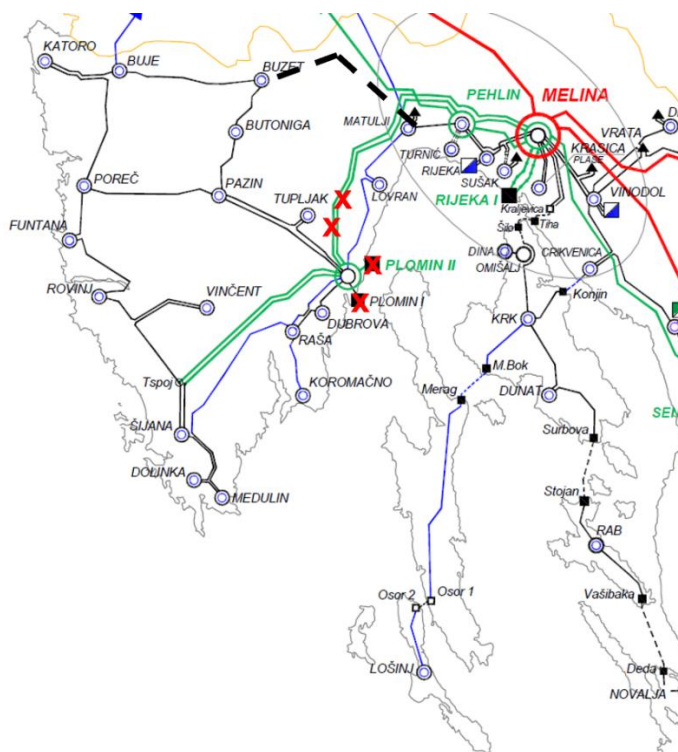
Uz spomenuto, prikazan tablicom 4.1., vidljivo je da se zanemarivo utječe na poboljšanje naponskih prilika. Najveća razlika napona je na sabirnici TE Plomin (TEPLOM) i iznosi 5,6 kV što je poboljšanje za 2,5%. Od ostalih 110 kV čvorišta najveći porast napona iznosi 2,9 kV (Rovinj, Dubrova, Vincent, Koromač) što čini poboljšanje od 2.6%, te porast od 3 kV (Dolinka, Raša i Medulin), tj. porast 2,7%. Zbog ovako malog utjecaja dobavnih pravaca povećane prijenosne moći na naponske prilike, tj. problem preniskog napona moguć je naponski slom u jeku turističke sezone pri visokom ljetnom konzumu i neraspoloživosti lokalne 220 kV mreže. Prednost predstavljenog tehničkog rješenja je u kratkom vremenu realizacije i prihvatljivim troškovima investicije, dok bi se u svrhu poboljšanja pogonske sigurnosti elektroenergetskog podsustava Istre trebalo okrenuti drugim mogućim rješenjima za kvalitetnije rezultate.

4.2. Analiza ostalih tehničkih rješenja za poboljšanje pogonske sigurnosti Istre

U ovome potpoglavlju, iz literature [31], analizirana su ostala moguća tehnička rješenja za scenarije maksimalnog konzuma Istre koji iznosi 312 MVA uz neraspoloživost dvosustavnog DV 220 kV Plomin – Pehlin – Melina te gubitak proizvodnje TE Plomin 2 (blok B) priključenog na mrežu 220 kV, uz neraspoloživost TE Plomin 1 (blok A) koji je priključen na 110 kV mrežu. Uz navedeno također su uzeti u obzir DV 110 kV Buje – Kopar te DV 110 kV Plomin – Lovran – Matulji sa svojom povećanom prijenosnom moći snage 160 MVA.

4.2.1. Izgradnja novog DV 110 kV Matulji – Buzet

Karakteristike navedenog voda prikazanog slikom 4.4. su iznos snage od 123 MVA i dužina od 35 km.



Slika 4.4. Elektroenergetski podsustav Istre u zadanim uvjetima s novim DV 110 kV Matulji – Buzet

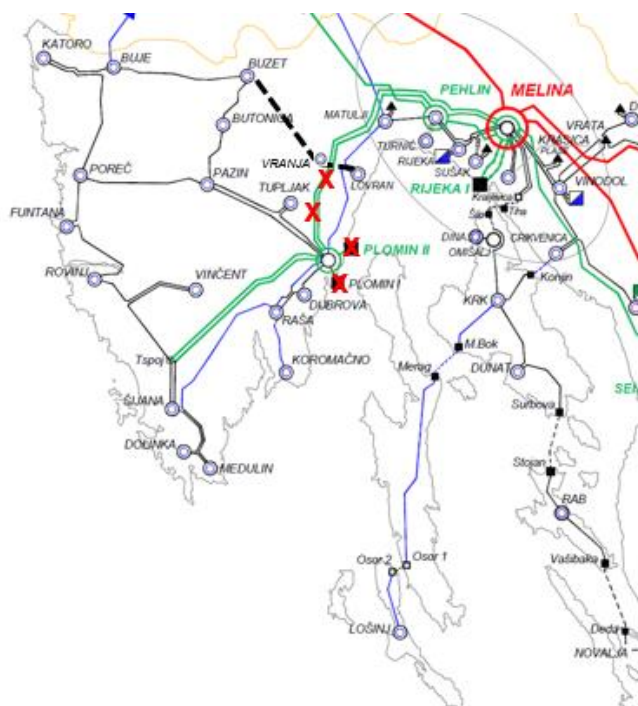
Tablica 4.2. Rezultati proračuna tokova snaga za izgrađeni novi DV 110 kV Matulji – Buzet

Naziv voda	Opterećenje (postotak; snaga)
DV 110 kV Matulji – Buzet	73%; 80 MW
DV 110 kV Buje – Kopar	48%; 55 MW
DV 110 kV Matulji – Lovran	116%; 189 MW
DV 110 kV Pehlin – Matulji	222%; 317 MW
DV 110 kV Matulji – I. Bistrica	23 MW

Navedenim rješenjem, prema tablici 4.2., dalekovodi DV 110 kV Matulji – Buzet, DV 110 kV Buje – Kopar te DV 110 kV Matulji – I. Bistrica su sigurni od preopterećenja, dok ostala dva voda (DV 110 kV Matulji – Lovran i DV 110 kV Pehlin – Matulji) ulaze u područje preopterećenosti čime dolazi do njihovog ispada iz mreže.

4.2.2. Izgradnja novog DV 110 kV Buzet – Vranja te 110 kV Vranja – Lovran

Karakteristike ovog scenarija (slika 4.5.) su iznos snage od 123 MVA i dužina od 20 km za DV 110 kV Buzet – Vranja, dok su karakteristike za KB 110 kV Vranja – Lovran iznos snage od 136 MVA i dužina od 10 km.



Slika 4.5. Elektroenergetski podsustav Istre u zadanim uvjetima s novim DV 110 kV Buzet – Vranja te 110 kV Vranja – Lovran

Tablica 4.3. Rezultati proračuna tokova snaga za izgrađeni novi DV 110 kV Buzet – Vranja te 110 kV Vranja – Lovran

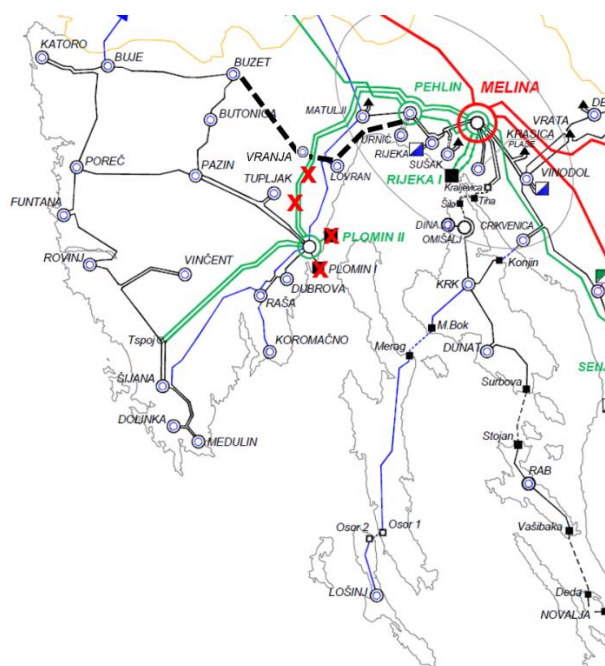
Naziv voda	Opterećenje (postotak;snaga)
DV/KB 110 kV Buzet – Lovran	66%; 72 MW
DV 110 kV Buje – Kopar	53%; 62 MW
DV 110 kV Matulji – Lovran	163%; 266 MW
DV 110 kV Pehlin – Matulji	221%; 316 MW
DV 110 kV Matulji – I. Bistrica	25 MW

Navedenim rješenjem, prema tablici 4.3., dalekovodi DV/KB 110 kV Buzet – Lovran, DV 110 kV Buje – Kopar te DV 110 kV Matulji – I. Bistrica su sigurni od preopterećenja, dok ostala dva voda

(DV 110 kV Matulji – Lovran i DV 110 kV Pehlin – Matulji) ulaze u područje preopterećenosti čime dolazi do njihovog ispada iz mreže.

4.2.3. Izgradnja novog DV 110 kV Buzet – Vranja, KB 110 kV Vranja – Lovran te DV 110 kV Lovran – Pehlin

Karakteristike za DV 110 kV Lovran – Pehlin (slika 4.6.) su iznos snage od 123 MVA i dužina od 17 km.



Slika 4.6. Elektroenergetski podsustav Istre u zadanim uvjetima s novim DV 110 kV Buzet – Vranja, KB 110 kV Vranja – Lovran te DV 110 kV Lovran – Pehlin

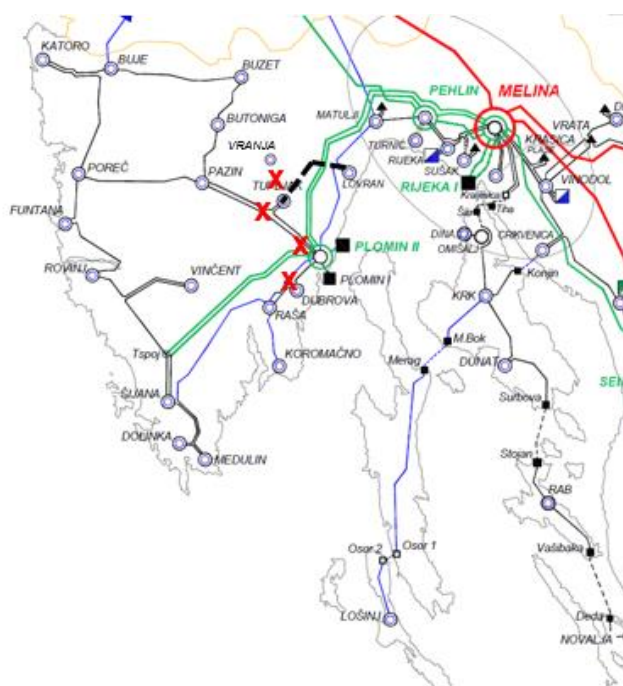
Tablica 4.4. Rezultati proračuna tokova snaga za izgrađeni novi DV 110 kV Buzet – Vranja, KB 110 kV Vranja – Lovran te DV 110 kV Lovran – Pehlin

Naziv voda	Opterećenje (postotak; snaga)
DV/KB 110 kV Buzet – Lovran	72%; 82 MW
DV 110 kV Lovran – Pehlin	117%; 138 MW
DV 110 kV Buje – Kopar	41%; 42 MW
DV 110 kV Matulji – Lovran	86%; 143 MW
DV 110 kV Pehlin – Matulji	133%; 195 MW
DV 110 kV Matulji – I. Bistrica	30 MW

Navedenim rješenjem, vidljivo je iz tablice 4.4., da dalekovodi DV/KB 110 kV Buzet – Lovran, DV 110 kV Buje – Kopar, DV 110 kV Matulji – Lovran te DV 110 kV Matulji – I. Bistrica su sigurni od preopterećenja, dok ostala dva voda (DV 110 kV Lovran – Pehlin i DV 110 kV Pehlin – Matulji) ulaze u područje preopterećenosti čime dolazi do njihovog ispada iz mreže.

4.2.4. Izgradnja novog DV 110 kV Tupljak – Vranja te KB 110 kV Vranja – Lovran

Karakteristike za DV 110 kV Tupljak – Vranja (slika 4.7.) su iznos snage od 123 MVA i dužina od 15,5 km, dok su karakteristike za KB 110 kV Vranja – Lovran iznos snage od 136 MVA i dužina od 10 km.



Slika 4.7. Elektroenergetski podsustav Istre u zadanim uvjetima s novim DV 110 kV Tupljak – Vranja te KB 110 kV Vranja – Lovran

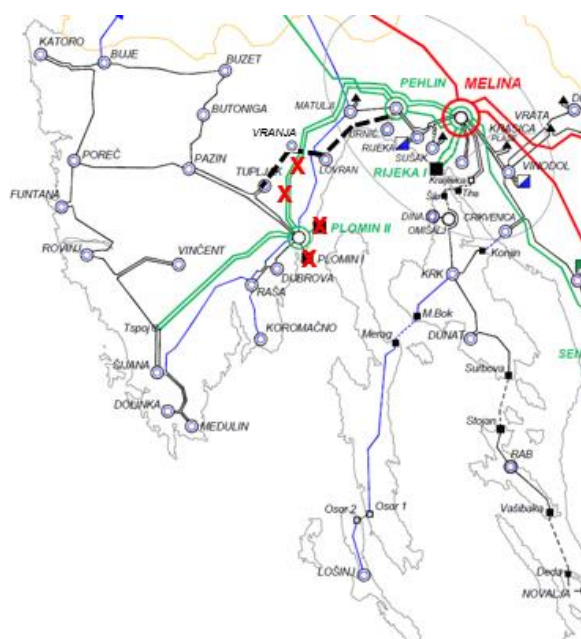
Tablica 4.5. Rezultati proračuna tokova snaga za izgrađeni novi DV 110 kV Tupljak – Vranja te KB 110 kV Vranja – Lovran

Naziv voda	Opterećenje (postotak;snaga)
DV/KB 110 kV Tupljak – Lovran	78%; 90 MW
DV 110 kV Buje – Kopar	47%; 67 MW
DV 110 kV Matulji – Lovran	149%; 254 MW
DV 110 kV Pehlin – Matulji	207%; 307 MW
DV 110 kV Matulji – I. Bistrica	29 MW

Navedenim rješenjem, vidljivo je iz tablice 4.5., da su dalekovodi DV/KB 110 kV Tupljak – Lovran, DV 110 kV Buje – Kopar i DV 110 kV Matulji – I. Bistrica sigurni od preopterećenja, dok ostala dva voda (DV 110 kV Matulji – Lovran i DV 110 kV Pehlin – Matulji) ulaze u područje preopterećenosti čime dolazi do njihovog ispada iz mreže.

4.2.5. Izgradnja novog DV 110 kV Tupljak – Vranja, KB 110 kV Vranja – Lovran te DV 110 kV Lovran – Pehlin

Karakteristike za DV 110 kV Lovran – Pehlin (slika 4.8.) su iznos snage od 123 MVA i dužina od 17 km.



Slika 4.8. Elektroenergetski podsustav Istre u zadanim uvjetima s novim Izgradnja novog DV 110 kV Tupljak – Vranja, KB 110 kV Vranja – Lovran te DV 110 kV Lovran – Pehlin

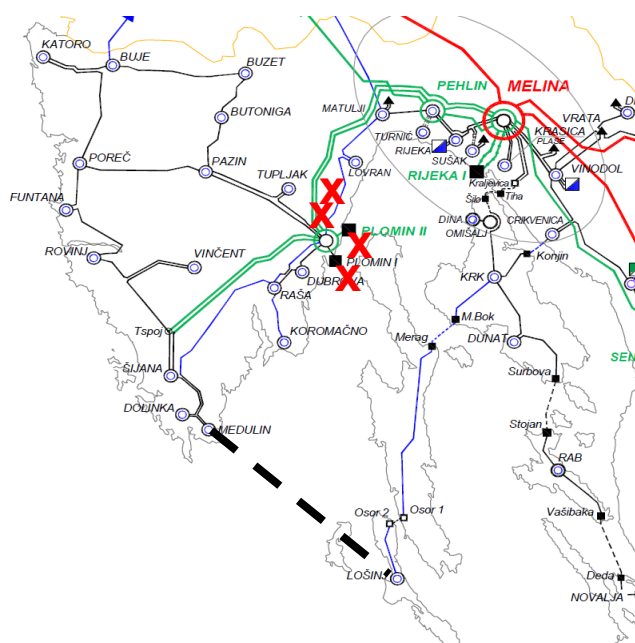
Tablica 4.6. Rezultati proračuna tokova snaga za izgrađeni novi Izgradnja novog DV 110 kV Tupljak – Vranja, KB 110 kV Vranja – Lovran te DV 110 kV Lovran – Pehlin

Naziv voda	Opterećenje (postotak;snaga)
DV/KB 110 kV Tupljak – Lovran	85%; 95 MW
DV 110 kV Lovran – Pehlin	112%; 133 MW
DV 110 kV Buje – Kopar	44%; 54 MW
DV 110 kV Matulji – Lovran	81%; 135 MW
DV 110 kV Pehlin – Matulji	129%; 190 MW
DV 110 kV Matulji – I. Bistrica	33 MW

Navedenim rješenjem, vidljivo je iz tablice 4.6., da su dalekovodi DV/KB 110 kV Tupljak – Lovran, DV 110 kV Buje – Kopar, DV 110 kV Matulji – Lovran i DV 110 kV Matulji – I. Bistrica sigurni od preopterećenja, dok ostala dva voda (DV 110 kV Lovran – Pehlin i DV 110 kV Pehlin – Matulji) ulaze u područje preopterećenosti čime dolazi do njihovog ispada iz mreže.

4.2.6. Izgradnja novog DV/KB 110 kV Medulin – Lošinj

Karakteristike za DV/KB 110 kV Medulin – Lošinj (slika 4.9.) su iznos snage od 123 MVA te dužina DV od 20 km i KB od 41 km.



Slika 4.9. Elektroenergetski podsustav Istre u zadanim uvjetima s novim DV/KB 110 kV Medulin – Lošinj

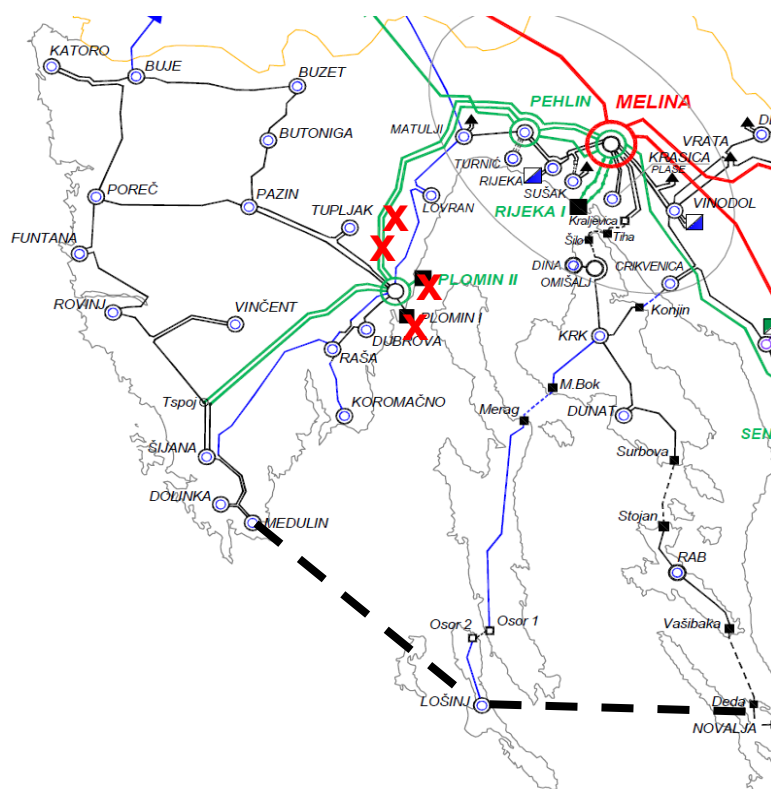
Tablica 4.7. Rezultati proračuna tokova snaga za izgrađeni novi DV/KB 110 kV Medulin – Lošinj

Naziv voda	Opterećenje (postotak; snaga)
DV/KB 110 kV Medulin – Lošinj	56%; 53 MW
DV 110 kV Buje – Kopar	50%; 68 MW
DV 110 kV Matulji – Lovran	116%; 198 MW
DV 110 kV Pehlin – Matulji	172%; 255 MW
DV 110 kV Matulji – I. Bistrica	35 MW

Navedenim rješenjem, vidljivo je iz tablice 4.7., da su dalekovodi DV/KB 110 kV Medulin – Lošinj, DV 110 kV Buje – Kopar te DV 110 kV Matulji – I. Bistrica sigurni od preopterećenja, dok ostala dva voda (DV 110 kV Matulji – Lovran i DV 110 kV Pehlin – Matulji) ulaze u područje preopterećenosti čime dolazi do njihovog ispada iz mreže.

4.2.7. Izgradnja novog DV/KB 110 kV Medulin – Lošinj, te KB 110 kV Lošinj – Novalja

Karakteristike za KB 110 kV Lošinj – Novalja (slika 4.10.) su iznos snage od 123 MVA te dužina KB od 50 km.



Slika 4.10. Elektroenergetski podsustav Istre u zadanim uvjetima s novim DV/KB 110 kV Medulin – Lošinj, te KB 110 kV Lošinj – Novalja

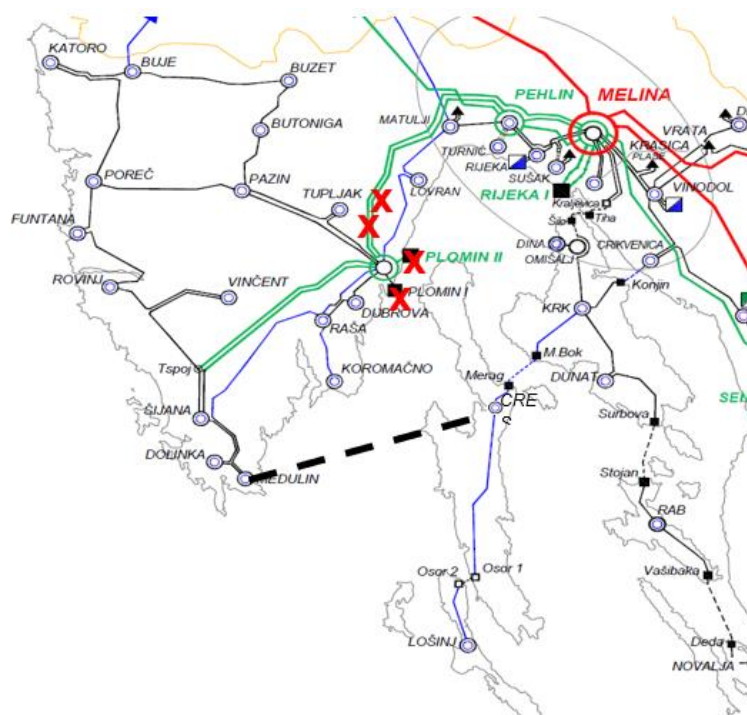
Tablica 4.8. Rezultati proračuna tokova snaga za izgrađeni novi DV/KB 110 kV Medulin – Lošinj, te KB 110 kV Lošinj – Novalja

Naziv voda	Opterećenje (postotak; snaga)
DV/KB 110 kV Medulin – Lošinj	96%; 105 MW
KB 110 kV Lošinj – Novalja	87%; 107 MW
DV 110 kV Buje – Kopar	37%; 49 MW
DV 110 kV Matulji – Lovran	91%; 159 MW
DV 110 kV Pehlin – Matulji	144%; 219 MW
DV 110 kV Matulji – I. Bistrica	38 MW

Navedenim rješenjem, vidljivo je iz tablice 4.8., da su dalekovodi DV/KB 110 kV Medulin – Lošinj, KB 110 kV Lošinj – Novalja, DV 110 kV Buje – Kopar, DV 110 kV Matulji – Lovran te DV 110 kV Matulji – I. Bistrica sigurni od preopterećenja, dok je vod DV 110 kV Pehlin – Matulji u opasnosti od preopterećenja što bi ga dovelo do ispada iz mreže.

4.2.8. Izgradnja novog DV/KB 110 kV Medulin – Cres

Karakteristike za DV/KB 110 kV Medulin – Cres (slika 4.11.) su iznos snage od 123 MVA te dužina DV od 20 km i dužina KB od 36 km. Uz to postavljena je i nova TS Cres.



Slika 4.11. Elektroenergetski podsustav Istre u zadanim uvjetima s novim DV/KB 110 kV Medulin – Cres

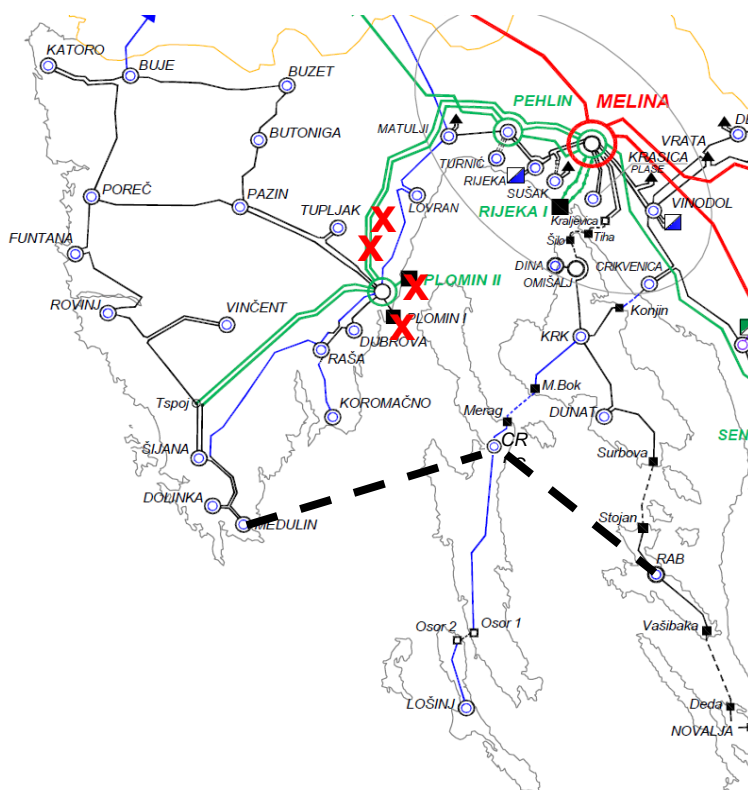
Tablica 4.9. Rezultati proračuna tokova snaga za izgrađeni novi DV/KB 110 kV Medulin – Cres

Naziv voda	Opterećenje (postotak;snaga)
DV/KB 110 kV Medulin – Cres	82%; 87 MW
DV 110 kV Buje – Kopar	43%; 57 MW
DV 110 kV Matulji – Lovran	99%; 171 MW
DV 110 kV Pehlin – Matulji	153%; 228 MW
DV 110 kV Matulji – I. Bistrica	36 MW

Navedenim rješenjem, vidljivo je iz tablice 4.9., da su dalekovodi DV/KB 110 kV Medulin – Cres, DV 110 kV Buje – Kopar, DV 110 kV Matulji – Lovran i DV 110 kV Matulji – I. Bistrica sigurni od preopterećenja, dok je vod DV 110 kV Pehlin – Matulji u opasnosti od preopterećenja što bi ga dovelo do ispada iz mreže.

4.2.9. Izgradnja novog DV/KB 110 kV Medulin – Cres, te KB 110 kV Cres – Rab

Karakteristike za KB 110 kV Cres – Rab (slika 4.12.) su iznos snage od 120 MVA te dužina KB od 41 km.



Slika 4.12. Elektroenergetski podsustav Istre u zadanim uvjetima s novim DV/KB 110 kV Medulin – Cres, te KB 110 kV Cres – Rab

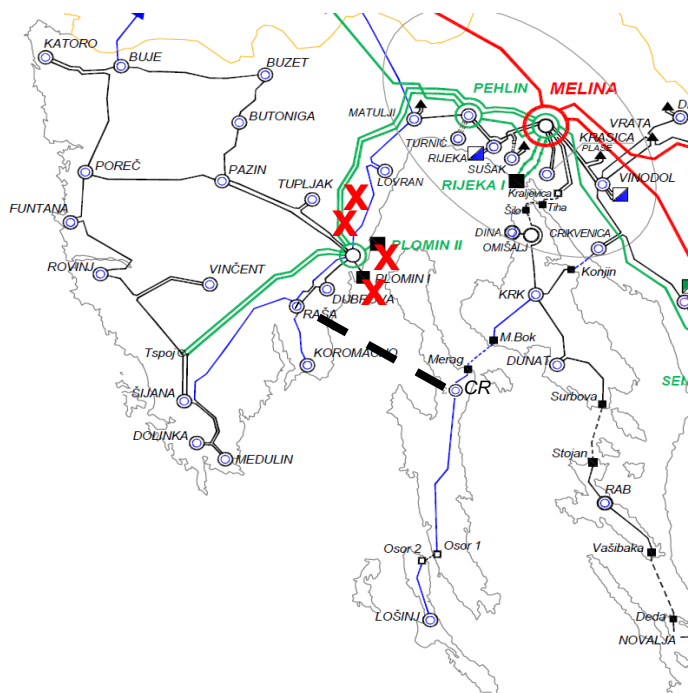
Tablica 4.10. Rezultati proračuna tokova snaga za izgrađeni novi DV/KB 110 kV Medulin – Cres, te KB 110 kV Cres – Rab

Naziv voda	Opterećenje (postotak;snaga)
DV/KB 110 kV Medulin – Cres	95%; 104 MW
KB 110 kV Cres – Rab	58%; 72 MW
DV 110 kV Buje – Kopar	38%; 51 MW
DV 110 kV Matulji – Lovran	91%; 159 MW
DV 110 kV Pehlin – Matulji	144%; 218 MW
DV 110 kV Matulji – I. Bistrica	37 MW

Navedenim rješenjem, vidljivo je iz tablice 4.10., da su dalekovodi DV/KB 110 kV Medulin – Cres, KB 110 kV Cres – Rab, DV 110 kV Buje – Kopar, DV 110 kV Matulji – Lovran i DV 110 kV Matulji – I. Bistrica sigurni od preopterećenja, dok je vod DV 110 kV Pehlin – Matulji u opasnosti od preopterećenja što bi ga dovelo do ispada iz mreže.

4.2.10. Izgradnja novog DV/KB 110 kV Raša – Cres

Karakteristike za DV/KB 110 kV Raša – Cres (slika 4.13) su iznos snage od 123 MVA, dužina DV 31 km te dužina KB od 20 km. Uz to postavlja se i nova TS Cres.



Slika 4.13. Elektroenergetski podsustav Istre u zadanim uvjetima s novim DV/KB 110 kV Raša – Cres

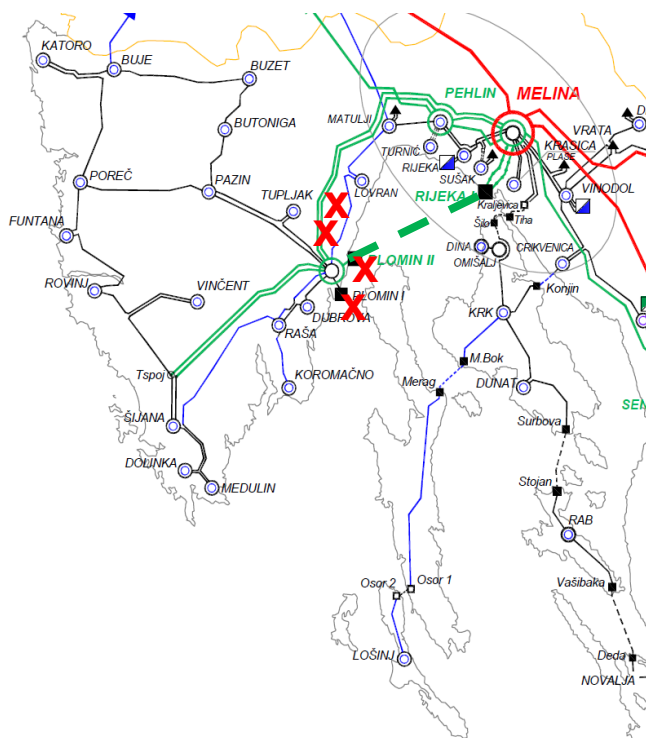
Tablica 4.11. Rezultati proračuna tokova snaga za izgrađeni novi DV/KB 110 kV Raša – Cres

Naziv voda	Opterećenje (postotak; snaga)
DV/KB 110 kV Raša – Cres	72%; 77 MW
DV 110 kV Buje – Kopar	49%; 62 MW
DV 110 kV Matulji – Lovran	105%; 178 MW
DV 110 kV Pehlin – Matulji	160%; 235 MW
DV 110 kV Matulji – I. Bistrica	35 MW

Navedenim rješenjem, vidljivo je iz tablice 4.11., da su dalekovodi DV/KB 110 kV Raša – Cres, DV 110 kV Buje – Kopar i DV 110 kV Matulji – I. Bistrica sigurni od preopterećenja, dok su vodovi DV 110 kV Matulji – Lovran i DV 110 kV Pehlin – Matulji u opasnosti od preopterećenja što znači da postoji mogućnost od ova dva voda ispada iz mreže.

4.2.11. Izgradnja novog KB 220 kV Plomin – TE Rijeka

Karakteristike za KB 220 kV Plomin – TE Rijeka (slika 4.14.) su iznos snage od 274 MVA te dužina KB od 45 km (trožilni 1000 mm²).



Slika 4.14. Elektroenergetski podsustav Istre u zadanim uvjetima s novim KB 220 kV Plomin – TE Rijeka

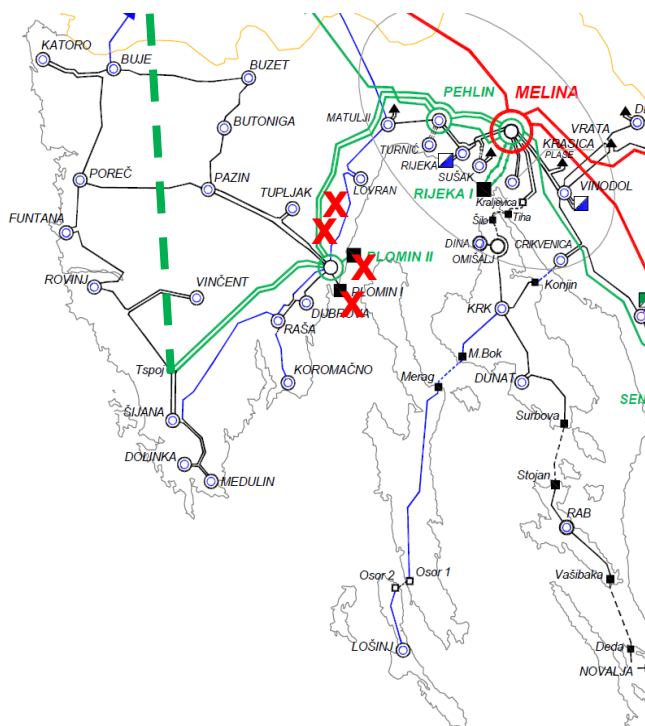
Tablica 4.12. Rezultati proračuna tokova snaga za izgrađeni novi KB 220 kV Plomin – TE Rijeka

Naziv voda	Opterećenje (postotak;snaga)
DV/KB 110 kV Zamet – Buzet	106%; 296 MW
DV 110 kV Buje – Kopar	12%; 22 MW
DV 110 kV Matulji – Lovran	32%; 19 MW
DV 110 kV Pehlin – Matulji	67%; 87 MW
DV 110 kV Matulji – I. Bistrica	40 MW

Navedenim rješenjem, vidljivo je iz tablice 4.12., da su dalekovodi DV 110 kV Buje – Kopar, DV 110 kV Matulji – Lovran, DV 110 kV Pehlin – Matulji i DV 110 kV Matulji – I. Bistrica sigurni od preopterećenja, dok je vod DV/KB 110 kV Zamet – Buzet u opasnosti od preopterećenja što znači da postoji mogućnost od njegova ispada iz mreže.

4.2.12. Izgradnja novog DV 220 kV Vodnjan – Divača

Karakteristike za DV 220 kV Vodnjan – Divača (slika 4.15.) su iznos snage od 350 MVA te dužina DV od 95 km. Uz to postavlja se i nova TS Vodnjan.



Slika 4.15. Elektroenergetski podsustav Istre u zadanim uvjetima s novim DV 220 kV Vodnjan – Divača

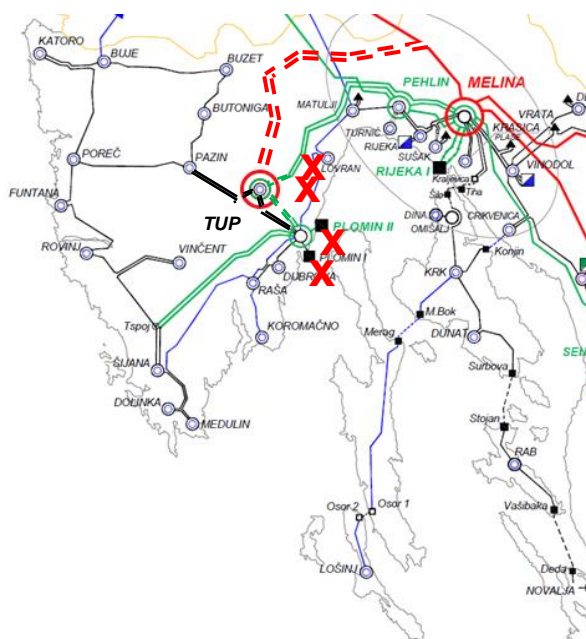
Tablica 4.13. Rezultati proračuna tokova snaga za izgrađeni novi DV 220 kV Vodnjan – Divača

Naziv voda	Opterećenje (postotak; snaga)
DV/KB 110 kV Zamet – Buzet	34%; 109 MW
DV 110 kV Buje – Kopar	36%; 45 MW
DV 110 kV Matulji – Lovran	93%; 161 MW
DV 110 kV Pehlin – Matulji	149%; 222 MW
DV 110 kV Matulji – I. Bistrica	40 MW

Navedenim rješenjem, vidljivo je iz tablice 4.13., da su dalekovodi DV/KB 110 kV Zamet – Buzet, DV 110 kV Buje – Kopar, DV 110 kV Matulji – Lovran i DV 110 kV Matulji – I. Bistrica sigurni od preopterećenja, dok je vod DV 110 kV Pehlin – Matulji u opasnosti od preopterećenja što znači da postoji mogućnost od njegova ispada iz mreže.

4.2.13. Izgradnja novog DV 400 kV Melina – Tupljak – Divača

Karakteristike za DV 400 kV Tupljak – Melina (slika 4.16.) su iznos snage od 1330 MVA te dužina DV od 57 km, te DV 400 kV Tupljak – Divača sa iznosom snage od 1330 MVA te dužina DV od 67 km.



Slika 4.16. Elektroenergetski podsustav Istre u zadanim uvjetima s novim DV 400 kV Melina – Tupljak – Divača

Tablica 4.14. Rezultati proračuna tokova snaga za izgrađeni novi DV 400 kV Melina – Tupljak – Divača

Naziv voda	Opterećenje (postotak;snaga)
DV 400 kV Melina – Tupljak	18%; 240 MW
DV 400 kV Tupljak – Divača:	8%; 90 MW
DV 110 kV Buje – Kopar	19%; -28 MW
DV 110 kV Matulji – Lovran	23%; -12 MW
DV 110 kV Pehlin – Matulji	66%; 79 MW
DV 110 kV Matulji – I. Bistrica	50 MW

Navedenim rješenjem, vidljivo je iz tablice 4.14., da su svi navedeni dalekovodi bez opasnosti od preopterećenja čime nema mogućnosti njihovog ispada iz mreže.

Sigurnost pogona elektroenergetskog podsustava Istre tijekom svih 8760 sati godišnje u ovom trenutku nije moguće osigurati bez raspoloživog proizvodnog objekta TE Plomin 2.

5. ZAKLJUČAK

Značajne promjene, tj. porast opterećenja elektroenergetskog sustava Hrvatske povećanom potrošnjom energije na dnevnim i godišnjim bazama u proteklim godinama, te godinama koje slijede, suočili su operatore prijenosnog sustava sa potrebom povećanja snage postojećih dalekovoda. Od nekoliko načina povećanja prijenosne moći dalekovoda, ističe se uporaba vodiča nove generacije, visokotemperaturnih vodiča malog provjesa. Prednost korištenja ovih vodiča je mogućnost povećanog prijenosa snage bez većih napora vezanih za njihovo postavljanje. Kako za sobom ne vuku potrebu za konstrukciju novih prijenosnih koridora mogu se jednostavno instalirati na već postojeće prijenosne stupove ili druge konstrukcije, što nije slučaj za konvencionalne ACSR vodiče. Izgradnja novih prijenosnih koridora, novih prijenosnih stupova te uz sav materijal koji nije potreban za instalaciju, za sobom nosi velike prednosti uporabe visokotemperaturnih vodiča malog provjesa sa ekonomskog stajališta. Smanjena potreba dodatnih radova na infrastrukturi ima značajan utjecaj na ekološke čimbenike smanjenjem emisija stakleničkih plinova. Uz to HTLS vodiči imaju i veliku prednost sa vremenskog stajališta gdje zbog svoje jednostavnosti instalacije i manjka potrebe za izgradnjom novih prijenosnih koridora omogućuju mnogo bržu realizaciju projekta u kojem je povećanje prijenosne moći neke dionice potrebno.

Ugrožena sigurnost elektroenergetskog podsustava Istre za vrijeme ljetnih mjeseci kada dolazi do velikih opterećenja, dovela je do istraživanja raznih tehničkih rješenja u svrhu suzbijanja naponskog sloma. Simulacijama na modelu prijenosne mreže, istražene su mogućnosti uporabe HTLS vodiča. Uz HTLS vodiče analizirana je i ugradnja kondenzatorskih baterija te izgradnja novih dobavnih pravaca jednostrukim DV 110 kV vodovima. HTLS vodiči analizirani su u scenarijima visokog ljetnog maksimuma. Uz njih, nastavljeno je sa ispitivanjem ostalih mogućih tehničkih rješenja za isti scenarij. Obzirom na značajno povećanje konzuma Istre, HTLS vodiči na dva pravca, DV 110 kV Buje – Kopar te DV 110 kV Plomin – Lovran i DV 110 kV Lovran – Matulji, nisu bili dovoljna rješenja, pogotovo tijekom ljetnih mjeseci. Ugradnjom se značajno povećala pogonska sigurnost.

Ova vrsta vodiča u današnje doba povećane potrošnje električne energije koja dovodi do veliki opterećenja dalekovoda pruža velike mogućnosti. Uz veću prijenosnu moć u odnosu na konvencionalne vodiče iste veličine, pružaju manji provjes čak i pri većim radnim temperaturama

zbog čega se mogu instalirati na većim udaljenostima. Zbog toga, HTLS vodiči imati će značajnu ulogu u srednjeročnom razvoju EES-a u sljedećih 10-20 godina i potpune tranzicije sustava.

6. LITERATURA

- [1] Internetska stranica (pristupljeno 20.10.2022.): <https://www.entsoe.eu/about/inside-entsoe/objectives/>
- [2] Internetska stranica (pristupljeno 20.10.2022.): <https://ieeexplore.ieee.org/document/7755241>
- [3] Kenge A.V.;Dusane S.V.; Sarkar J.: "Statistical Analysis & Comparison of HTLS Conductor with Conventional ACSR Conductor"
- [4] Nigol O.; Barrett J.S.: „Characteristics of ACSR conductors at high temperatures and stresses“
- [5] Mazón A. J i dr.: „Gap - type Conductors: Influence of high temperature in the Compression Clamp Systems“
- [6] Internetska stranica (pristupljeno 25.10.2022.): https://www.qingzhou-cable.com/products/overhead_bare_conductor/tacsr.html
- [7] Internetska stranica (pristupljeno 26.10.2022.): „Dicabs Conductor Technical Catalog“
<https://www.dicabs.com/>
- [8] Internetska stranica (pristupljeno 30.10.2022.):
https://www.jpowers.co.jp/english/product/pdf/gap_c1.pdf
- [9] Internetska stranica (pristupljeno 3.11.2022.):
<https://www.hindawi.com/journals/jece/2018/2073187/>
- [10] Internetska stranica (pristupljeno 3.11.2022.): [https://www.midalcable.com/tacsr-thermal-resistant-aluminum-alloy-conductors-steel-reinforced#:~:text=Circular%20Solid%20Conductors-,TACSR%20\(Thermal%20Resistant%20Aluminum%20Alloy%20Conductors%20Steel%20Reinforced\),\(generally%20known%20as%20TAL%20\)%20](https://www.midalcable.com/tacsr-thermal-resistant-aluminum-alloy-conductors-steel-reinforced#:~:text=Circular%20Solid%20Conductors-,TACSR%20(Thermal%20Resistant%20Aluminum%20Alloy%20Conductors%20Steel%20Reinforced),(generally%20known%20as%20TAL%20)%20)
- [11] Engineering Transmission Lines with High Capacity Low Sag ACCC® Conductors, CTC Global, s Interneta, www.ctcglobal.com (pristupljeno 10.11.2022.))
- [12] Internetska stranica (pristupljeno 7.11.2022.): <https://apar.com/wp-content/uploads/2021/02/2a.-Thermal-resistant-alloy.pdf>
- [13] Internetska stranica (pristupljeno 10.01.2023.): <https://www.sterlitepower.com/wp-content/uploads/2021/12/GAP-Conductor.pdf>

- [14] Internetska stranica (pristupljeno 26.10.2022.): <https://apar.com/wp-content/uploads/2021/02/6.-GAP-type-thermal-resistant-aluminium-alloy-conductor.pdf>
- [15] Internetska stranica (pristupljeno 26.10.2022.): https://wiretec.eu/epconinv_invar_conductor.htm
- [16] Filippone G. i dr.: „On the roadmap to Supergrid in Sicily: LIDAR technology and HTLS conductors for uprating the 150 kV lines“
- [17] Sakabe S. i dr.: „DEVELOPMENT OF XTREMELY-LOW-SAG INVAR REINFORCED ACSR (XTACIR)“
- [18] Thrash F. R.: „ACSS/TW - An Improved High Temperature Conductor for Upgrading Existing Lines or New Construction“
- [19] Internetska stranica (pristupljeno 15.11.2022.): <https://www.midalcable.com/acss-aluminium-conductor-steel-supported>
- [20] Internetska stranica (pristupljeno 16.11.2022.): http://www.tddlcable.com/products/bare-conductor/acss.html?gclid=CjwKCAiAyfybBhBKEiwAgtB7fmMPkZ_rlgYplqbGuxaEjbcvwI5xAlZkU3pMm474yp4wrxBtXILbKhoCyRwQAvD_BwE
- [21] Internetska stranica (pristupljeno 28.10.2022.): <https://ctcglobal.com/accc-conductor/>
- [22] Internetska stranica (pristupljeno 28.10.2022.): <https://ctcglobal.com/accc-comparison/>
- [23] Yasaranga H.B.D.; Wijayapala W.D.A.S.; Hemapala K.T.M.U.: „Techno Economic Analysis of the Use of High Temperature Low Sag (HTLS) Conductors in the Sri Lanka’s Transmission System“
- [24] Riba J.R.; Bogarra S.; Gomez-Pau A.; Moreno-Eguilaz M.: „Uprating of transmission lines by means of HTLS conductors for a sustainable growth: Challenges, opportunities, and research needs“
- [25] Nuchprayoon S.; Chaichana A.: „Cost Evaluation of Current Uprating of Overhead Transmission Lines Using ACSR and HTLS“
- [26] Moreira L.; Lopes A.: „Use of high-temperature conductors in existing lines: economic and environmental benefits“

[27] Internetska stranica (pristupljeno 10.02.2023.): <https://www.gl-fibercable.com/Products-invar-conductor/514.html>

[28] Alawar A. i dr.: „A Composite Core Conductor for Low Sag at High Temperatures“

[29] Internetska stranica (pristupljeno 15.02.2023.): <https://www.hops.hr/page-file/bsAQ9AhqCaU33Auv0GyGe5/92136ad3-dfa8-4674-b6aa-3c7a0d41654c/HOPS%2010G%20plan%20razvoja%202022%20-%202031%20web.pdf>

[30] Internetska stranica (pristupljeno 20.02.2023.): https://www.hops.hr/post-file/ILnEByI7agD3nTTfW8D2V7/poziv-na-javno-savjetovanje-vezano-uz-prijedlog-mreznopravila-prjenosnog-sustava/MPPS_prijedlog_15_7_2022.pdf#page=22&zoom=100,93,150

[31] Analiza podsustava istarske prijenosne elektroenergetske mreže, HOPS

7. POPIS OZNAKA I KRATICA

EES	Elektroenergetski podsustav
ENTSO	eng. (<i>European Network of Transmission System Operators for Electricity</i>)
HTLS vodič	Visokotemperaturni vodič malog provjesa (eng. <i>High Temperature Low Sag</i>)
ACSR vodič	Aluminijski vodič ojačan čelikom (eng. <i>Aluminium Cored Steel Reinforced</i>)
TACSR vodič	Visokotemperaturni vodič pojačan TAL-om (eng. <i>Thermal Resistant Aluminum Alloy Conductors Steel Reinforced</i>)
TAL	Legura aluminija otporna na toplinu (eng. <i>Thermal resistant aluminum alloy</i>)
(Z)TACSR vodič	Visokotemperaturni vodič pojačan TAL-om i dodanim cirkonijem
GTACSR/GZTACSR vodič	Visokotemperaturni vodič malog provjesa ojačan čelikom s prazninama (eng. <i>Gap-Type Aluminum Conductor Steel Reinforced</i>)
ZTACIR/XTACIR vodič	Super toplinski aluminijski vodič ojačan invarom (eng. <i>Super Thermal Aluminum Conductor Invar Reinforced/Extra Thermal Aluminum Conductor Invar Reinforced</i>)
INVAR	Posebna legura željeza i nikala
ACSS/TW vodič	Visokotemperaturni vodič tipa podržan čelikom (eng. <i>Aluminum Conductor Steel Supported/Trapezoidal wire</i>)
ACCC/TW vodič	Visokotemperaturni aluminijski vodič s kompozitnom jezgrom (eng. <i>Aluminum Conductor Composite Core/Trapezoidal wire</i>)

8. SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI

Porast opterećenja elektroenergetskog sustava javlja se usporedno s povećanjem potražnje električne energije. Javljanjem ovog trenda javila se potreba za povećanjem snage prijenosa na dalekovodima prijenosne mreže. Jedno od kvalitetnijih i praktičnih rješenja ovog problema su upotreba visokotemperaturnih vodiča malog provjesa. U ovome radu opisane su vrste visokotemperaturnih (HTLS) vodiča s njihovim navedenim karakteristikama i prednostima usporedno s konvencionalnim ACSR vodičima koji se uvelike koriste u današnjici. Navedene karakteristike obuhvaćaju veličine te izvedbe vodiča, moguće radne temperature, moguću prijenosnu moć, podnošljivi teret i dr. Na simulacijskom modelu mreže podsustava Istre analizirana su dva dobavna pravca na kojima je moguća instalacija visokotemperaturnih vodiča. Nakon analize na istom modelu analizirana su i ostala tehnička rješenja za održavanje sigurnosti podsustava Istre u scenariju visokog ljetnog maksimuma konzuma.

Ključne riječi: vodiči, visokotemperaturni vodiči malog provjesa, tehno-ekološka analiza, obnovljivi izvori energije, elektroenergetski podsustav Istre, održavanje sigurnosti pogona.

9. ABSTRACT AND KEYWORDS

The increase of load in power system occurs as a result of increased demand for electricity. With the emergence of this trend, a need for increase of capacity of transmission lines was created. Use of high-temperature low-sag conductors turned out to be one of the most practical and high-quality solutions. This paper describes the types of high-temperature low-sag conductors with their stated characteristics and advantages compared to the conventional ACSR conductors that are widely used today. Mentioned characteristics, described in paper, include the size and performance of conductors, possible operating temperatures, possible transmission capacity, tolerable load, etc. On the simulation model of the network of the subsystem of Istria, two supply lines were analysed on which the installation of high-temperature conductors is possible. After the analysis, on the same model, other technical solutions for maintaining the safety of the subsystem of Istria in the scenario of high summer maximum consumption were tested.

Keywords : conductors, high-temperature low-sag conductors, techno-economic analysis, renewable energy sources, power subsystem of Istria, safety maintenance of a drive system.