

Velimir Ravlić, dipl. ing. el.
Ravel d.o.o.
velimir.ravlic@ravel.hr

Ante Ravlić, mag. ing. el.
Ravel d.o.o.
ante.ravlic@ravel.hr

Josip Pavleka, dipl. ing. el.
HEP ODS d.o.o.
josip.pavleka@gmail.com

Povećanje nazivne struje sabirnica u visokonaponskim postrojenjima primjenom termootpornih vodiča iz aluminijskih legura

SAŽETAK

Kontinuirani porast opterećenja zahtjeva rekonstrukciju i dogradnju visokonaponskih postrojenja i nadzemnih vodova zbog povećanja nazivnih struja. Primjenom termootpornih vodiča iz aluminijskih legura moguće je u visokonaponskim postrojenjima izvesti radove s vrlo kratkim vremenom bez napona i s manjim troškovima jer u većini slučajeva nije potrebno izvršiti zamjenu nosivih čeličnih konstrukcija kao i zamjenu ili adaptaciju armirano betonskih temelja. U članku je opisano rješenje zamjene 220 kV sabirnice sa svrhom povećanja nazivne struje sabirnica s 2500 A na 4000 A.

Ključne riječi: visokonaponsko postrojenje, nazivna struja, termootporni vodiči iz aluminijskih legura

Uprating of existing substations by the use of thermo-resistant aluminium alloy conductors

SUMMARY

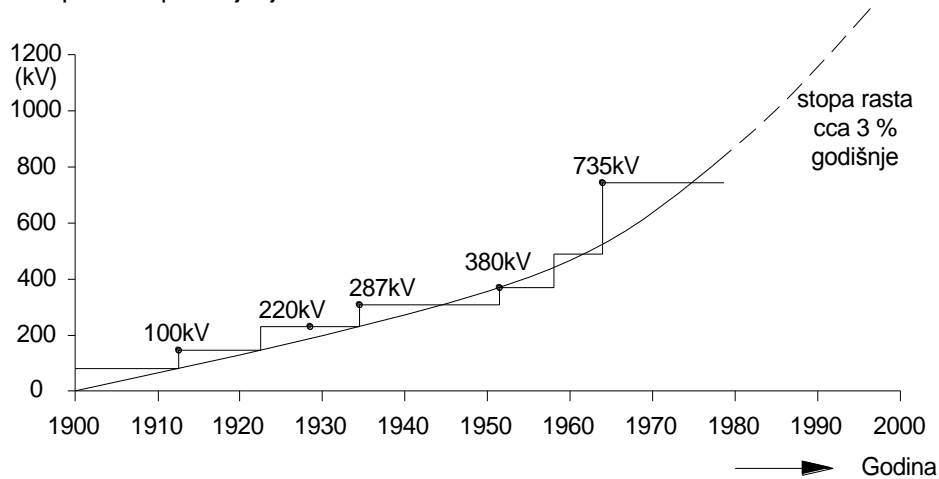
The continuous rate of rise of electricity consumption requires the adaptation of overhead lines and substations to higher rated currents. By the use of the thermo-resistant aluminium alloy conductors the uprating of substations can be managed in a very short out-of-service time and with relatively low cost because in most cases no reinforcement of the supporting steel constructions and foundations is necessary. On example of the first Austrian substation equipped with such a conductor material the technical and commercial consequences are given and compared with previous methods.

Key words: high voltage switchgear, rated current, thermo-resistant aluminium alloy conductors

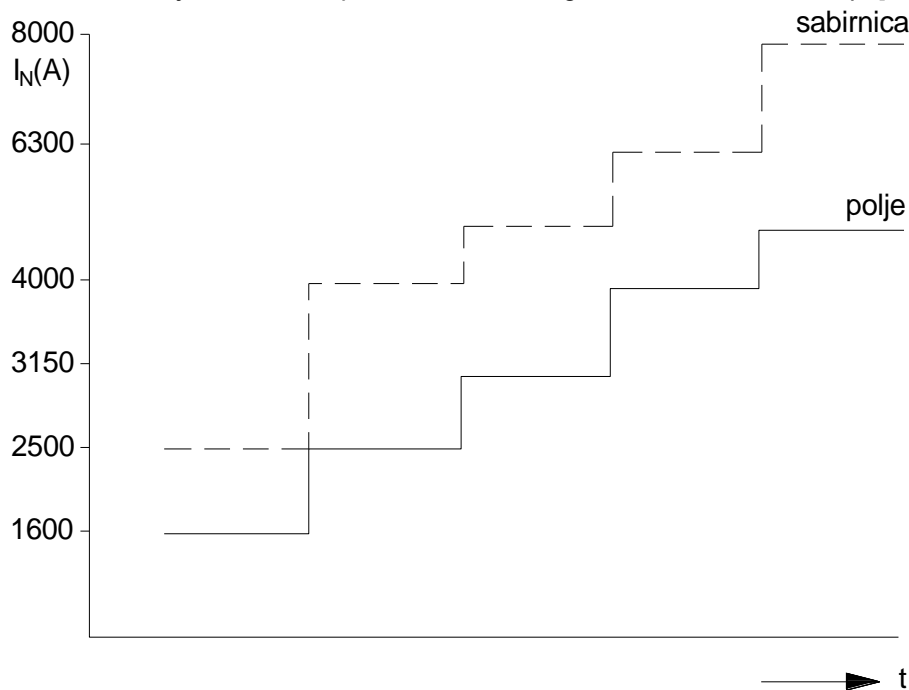
1. UVOD

Značajan porast potrošnje električne energije zahtijevao je kontinuirani porast nazivnih napona i struja te potrebu za dogradnjom, zamjenom ili adaptacijom postojećih dijelova elektroenergetskog sustava.

Na slici 1. je prikazan porast najviših naponskih razina. U središnjoj Europi se nije podizalo nazivne napone iznad 420 kV zbog relativno malih udaljenosti između proizvodnih objekata i središta potrošnje, kao i zbog utjecaja na okoliš, što je značilo i kontinuirani porast nazivnih struja (slika 2). Dodatno je zahtjev pouzdanosti rada, čak i u slučajevima kvarova, da su sve stroži zahtjevi kod projektiranja nadzemnih vodova i visokonaponskih postrojenja.



Slika 1 Povećanje nazivnih napona u elektroenergetskom sustavu u Europi [1, 2]



Slika 2 Povećanje nazivnih struja u visokonaponskim postrojenjima u Europi [1, 2]

Zbog toga se koriste vodiči sa sve većim presjecima te se primjenjuju vodiči u snopu. Zbog toga su se, relativno često, trebale povećavati nazivne struje sabirnica i nekih polja u visokonaponskim postrojenjima. U većini slučajeva su takve rekonstrukcije, dogradnje ili adaptacije u visokonaponskim postrojenjima povezane sa zamjenom vodiča što zahtjeva povećano naprezanje na izolatore, nosive čelične konstrukcije i temelje. Svi navedeni zahvati su skupi, ali zahtijevaju i duži period barem dijela postrojenja izvan pogona jer se zbog sigurnosti ljudi većina potrebnih radova ne može izvesti bez isključenja sabirnica i/ili nekih polja. U slučaju važnih transformatorskih stanica to može rezultirati značajnim smanjenjem pouzdanosti rada čitavog elektroenergetskog sustava.

U zadnjih tridesetak godina koriste se vodiči iz termootpornih aluminijskih legura (engl. Thermo Resistant Aluminium Alloy Conductors - TAL) i za nadzemne vodove i za visokonaponska postrojenja. Takvi vodiči omogućuju više radne temperature u odnosu na konvencionalne aluminijske vodiče što rezultira većim nazivnim strujama. Pri tome je potrebno posebnu pažnju posvetiti spojnomo priboru. Tehničke i ekonomske značajke primjene termootpornih vodiča iz aluminijskih legura razmatrane su na primjeru povećanja nazivne struje 220 kV sabirnica u jednoj TS 220/110 kV u Austriji [3, 4, 5, 6, 14].

U odnosu na vodiče nadzemnih vodova, užetni vodiči u transformatorskim stanicama i postrojenjima visokog napona imaju sljedeće razlike:

- potrebno je održavati sigurnosne razmake u postrojenjima i u slučaju najnepovoljnijih uvjeta;
- gubici energije zbog protjecanja struje $I^2 \cdot R$ su zanemarivi zbog relativno malog otpora (relativno male dužine), relativno kratkih trajanja vršnih opterećenja u normalnom pogonu i kratkotrajnih kratkospojnih naprezanja što treba detaljno analizirati u slučaju vodiča nadzemnih vodova;
- dok su vodiči nadzemnih vodova opterećeni s maksimalnim radnim vlačnim naprezanjem od 80-100 N/mm², užetni vodiči u transformatorskim stanicama su zategnuti na takav način da su naprezanja jednaka ili manja od 40 N/mm².

2. KARAKTERISTIKE TERMOOTPORNIH VODIČA IZ ALUMINIJSKIH LEGURA

Već je tijekom šezdesetih godina 20. stoljeća uočeno da se karakteristike aluminijskih vodiča mogu značajno poboljšati dodavanjem male količine cirkonija i nekih drugih elemenata. Maksimalna dopuštena stalna radna temperatura je tada oko 150 °C umjesto 80 °C za konvencionalne aluminijske vodiče, pri čemu se ostale mehaničke i električke karakteristike praktično ne mijenjaju (prema Tablici 1).

Tablica 1. Karakteristike Al i TAL vodiča

	Al	TAL
Točka taljenja (°C)	660	660
Koeficijent toplinskog istezanja (1/°C)	$2,3 \cdot 10^{-5}$	$2,3 \cdot 10^{-5}$
Specifična gustoća (g/cm ³)	2,7	2,7
Vlačna čvrstoća (kg/mm ²)	16-19	16-19
Električna vodljivost kod 20 °C (S·m/mm ²)	34,80	35,38
Toplinski koeficijent električnog otpora (1/°C)	$4 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$
Maksimalna trajna radna temperatura (°C)	80	150
Maksimalna kratkotrajna radna temperatura (°C)	200	260

Nabrojene prednosti TAL vodiča omogućuju približno 50% do 60% više maksimalne trajne radne struje i daju odličnu mogućnost primjene ovakvih vodiča i to posebno u transformatorskim stanicama u kojima gubici vodiča nisu osnovni kriterij prilikom izbora vodiča. Za nadzemne vodove su veći gubici i veći provjesi kod povišenih temperatura te se njihova primjena treba u svakom slučaju detaljno analizirati. Alučelični vodiči (engl. aluminium conductors steel reinforced – ACSR) konvencionalne izvedbe koji su se do osamdesetih godina 20. stoljeća primjenjivali u visokonaponskim postrojenjima u Austriji su prikazani u Tablici 2.

Tablica 2. AlČ vodiči koji su se primjenjivali u visokonaponskim postrojenjima u Austriji

Nazivna struja (A)	Presjek aluminija/čelika (mm ²)
1250	1 x 800/76
2500	2 x 800/76
3150	2 x 1000/97
4000	4 x 573/63

Zbog značajnog porasta nazivnih struja u važnijim postrojenjima visokog napona u Austriji tijekom zadnjih četrdesetak godina, bilo je potrebno u mnogo slučajeva povećati promjer vodiča. To je imalo za posljedice povećano naprezanje izolatora, nosivih čeličnih konstrukcija i temelja što je često zahtijevalo vrlo komplicirane i skupe aktivnosti tijekom izvođenja radova. Zbog znatno većeg dopuštenog strujnog opterećenja TAL vodiča, analizirala se primjena takvih vodiča kako zbog tehničkih tako i ekonomskih prednosti. Odlučilo se na temelju detaljnih analiza izvršiti ispitivanja vodiča koji se sastoje od TAL kao vodljivog dijela i ACS (čelik presvučen aluminijem, engl. aluminium clad steel) dijelova vodiča kao nosivog materijala [7, 8, 9, 10, 11, 13, 14].

Tablica 3. Usporedbe maksimalnog radnog trajnog strujnog opterećenja ACSR i TAL/ACS vodiča

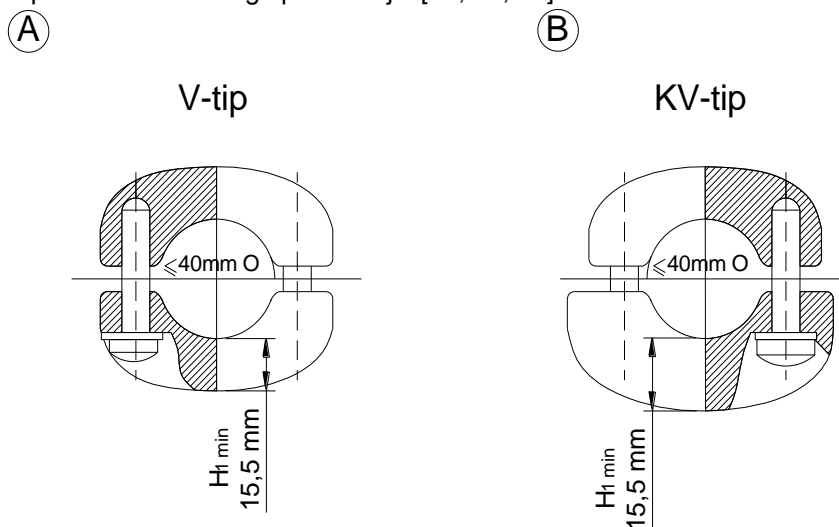
Presjek (mm ²)	Tip	Otpor (Ω/km pri 20 °C)	Maksimalno trajno strujno opterećenje - tipične vrijednosti (A)
573/63	ACSR	0,0503	1057
	TAL/ACS	0,0495	1750
800/76	ACSR	0,0367	1350
	TAL/ACS	0,0363	2140
1000/97	ACSR	0,0352	1500
	TAL/ACS	0,0346	2510

3. ISPITIVANJA IZVEDENA S TAL/ACS VODIČIMA

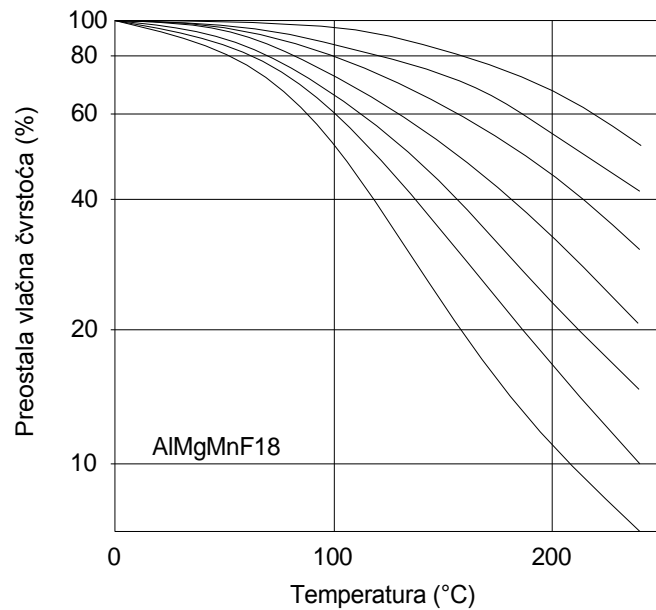
Već prije izvedena ispitivanja TAL vodiča raznih japanskih proizvođača pokazala su mogućnost primjene takvih vodiča za nadzemne vodove i za visokonaponska postrojenja.

Svakako treba uzeti u obzir utjecaj smanjenja mehaničke čvrstoće i oksidacije koja uzrokuje povećanje otpora spojnog pribora (spojni materijal, stezaljke, itd.) kod trajne temperature vodiča od 150 °C. Ispitivanja sa spojnim priborom su pokazala da se standardna izvedba spojnog pribora može koristiti čak i u slučaju kada je trajna temperatura vodiča do 150 °C što olakšava izvođenje i rezervne dijelove. Samo u slučaju dijelova standardnog spojnog pribora koji ne mogu podnijeti temperature vodiča od 150 °C, treba izvršiti poboljšanje izvedbe spojnog materijala.

Kao materijal stezaljki koristi se najčešće legura AlMgMnF18. Prema DIN normi za maksimalnu temperaturu stezaljki 80 °C, stezaljka prikazana na slici 3A se preporučuje za ACSR vodiče 800/76 (V-tip). Zbog korona izbijanja je austrijska elektroprivreda odlučila koristiti pojačanu izvedbu stezaljki za 220 kV i 380 kV postrojenja (slika 3B). Te su stezaljke tipa KV, koje imaju veći modul otpora za 1,66 puta u odnosu na stezaljke V tipa. Na slici 4. prikazana je prekidna čvrstoća legure AlMgMnF18 kao funkcija vremena kod različitih radnih temperatura. Vidljivo je da za temperaturu 80 °C i vrijeme rada 10⁵ sati iznosi prekidna čvrstoća 215 N/mm². Smanjenje prekidne čvrstoće na 130 N/mm² kod 120 °C može se dobro kompenzirati povećavajući presjek stezaljke tipa KV. Zbog toga je temperatura stezaljke od 120 °C preporučena trajna radna temperatura proizvođača takvog tipa stezaljki [12, 14, 15].



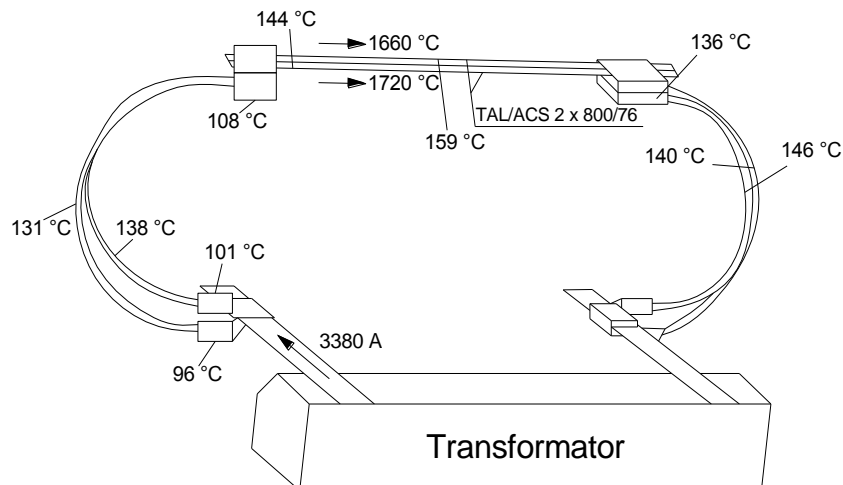
Slika 3 a) Tipična izvedba stezaljke za ACSR vodič 800/76 (V-tip)
b) Pojačana izvedba stezaljke (KV tip)



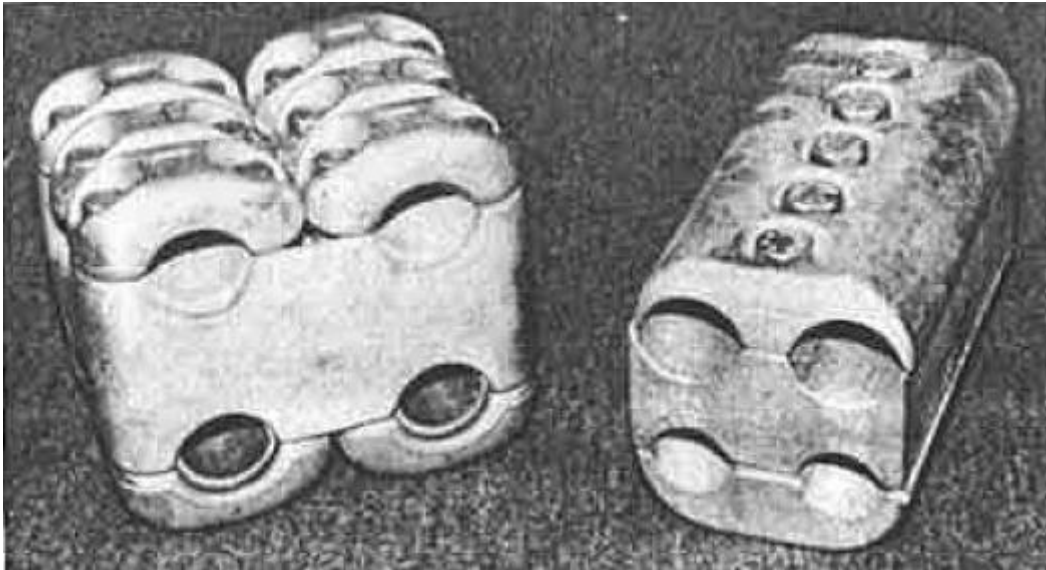
Slika 4 Tipične karakteristike odžarivanja aluminijske legure AlMgMnF18

3.1 Ispitivanje različite temperature

Na slici 5 prikazan je ispitni krug za mjerenje razdiobe temperature stezaljki na više mjesta uz temperaturu vodiča 150 °C. Pri tome su korištene dvije izvedbe spojeva pomoću stezaljki različite izvedbe (prema slici 6). Vidljivo je da stezaljka s većom vanjskom površinom (izvedba na slici 6a) koja se može nazvati stezaljka s pojedinačnim poklopcem (gornjim dijelom) ima izmjerene temperature ispod 120 °C [12, 14]. Izvedba stezaljke sa zajedničkim poklopcem (gornjim dijelom) nije prihvatljiva za primjenu kod vodiča s temperaturama vodiča 150 °C jer su izmjerene temperature stezaljke bile 136 °C. Na isti način su sve ostale stezaljke i spojni pribor ispitane i dobili su se slični rezultati [14].



Slika 5 Ispitni krug za ispitivanje (mjerenje) razdiobe temperature [14]



Slika 6 Stezaljka za spoj dva vodiča sa zajedničkim poklopcem (lijevo) i s pojedinačnim poklopcem (desno)

3.2 Ispitivanje temperature kod kratkog spoja

U slučaju kratkih spojeva maksimalna dopuštena temperatura stezaljke je 200 °C. Kod primjene TAL vodiča temperature u slučaju kratkih spojeva do 260 °C su podnosive. Rezultati provedenih ispitivanja pokazuju da čak i kod temperatura od 300 °C u slučaju kratkospojnih ispitivanja vodiča, iznose maksimalne temperature stezaljki ispod 100 °C zbog odgovarajućeg toplinskog kapaciteta stezaljki. Zbog toga porast temperature stezaljke u slučaju kratkih spojeva nije odlučujući kod projektiranja i konstruiranja stezaljke.

3.3 Mjerenje električnog otpora

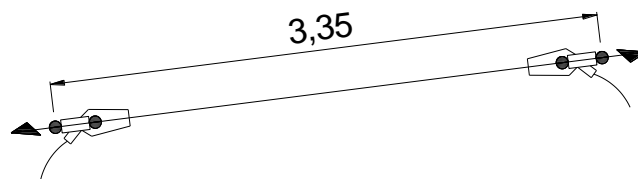
Mjerenja pada napona se vrše prije, za vrijeme i nakon ispitivanja zagrijavanja. Potrebno je zapaziti ima li pogoršanja karakteristika.

3.4 Mjerenja momenata pritezanja

Moment zatvaranja vijaka je bio 46 Nm. Mjerenje momenta otvaranja nakon zagrijavanja pokazuje vrijednosti između 20 Nm i 30 Nm. Vijci su stegnuti nakon ispitivanja. Iduća ispitivanja trebaju pokazati da nema značajnijeg smanjenja momenata otvaranja.

3.5 Ispitivanje zatezanja s klinastim zateznim stezaljkama

Ispitivanje zatezanja s klinastim zateznim stezaljkama su analizirala u vezi dopuštenih naprezanja kod temperature vodiča 150 °C (slika 7). Ne smije biti uočeno smanjenje čvrstoće stezaljki za vrijeme i nakon izvođenja ispitivanja kod temperature stezaljki ispod 100 °C.



Slika 7 Način ispitivanja zatezanja [14]

3.6 Zaključno o ispitivanjima

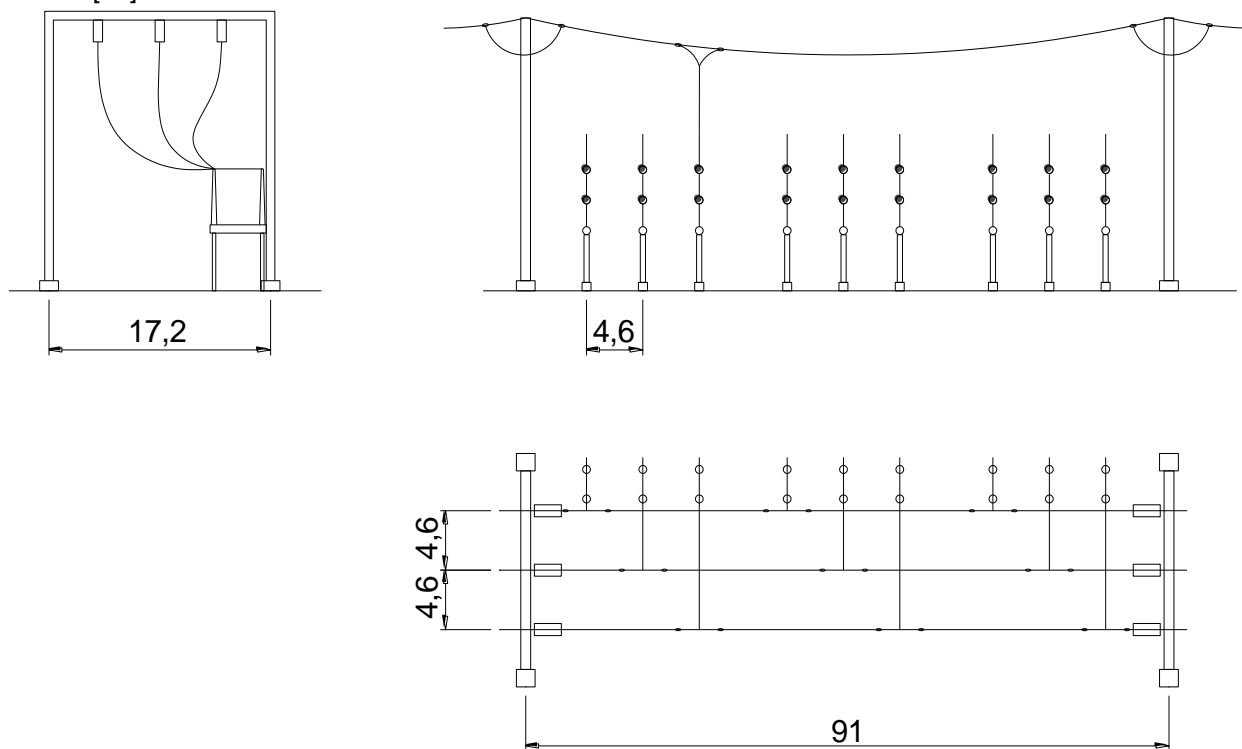
Može se zaključiti da se većina stezaljki standardne izvedbe može koristiti kod temperature vodiča do 150 °C bez promjene konstrukcijskih rješenja, pri čemu je temperatura vodiča smanjena zbog površine stezaljki.

Vrlo bitna karakteristika izvedbe stezaljki za TAL vodiče je relativno velika vanjska površina stezaljke zbog disipacije topline te stezaljke s pojedinačnim poklopcem mogu znatno bolje podnijeti više temperature vodiča od kompaktne izvedbe stezaljki sa zajedničkim poklopcem. Rezultati ispitivanja su pokazali da je u blizini stezaljki temperatura vodiča smanjena na ispod 120 °C čak i u slučaju trajne temperature vodiča 150 °C izvan područja stezaljke [14].

4. ZAMJENA 220 kV SABIRNICE U TRANSFORMATORSKOJ STANICI ST. PETER U AUSTRIJI

4.1 Postojeće stanje

Na slici 8 prikazan je jedan od tri sabirnička raspona u 220 kV postrojenju u transformatorskoj stanici ST. PETER u Austriji, pri čemu su postojeće sabirnice bile izvedene s dva užeta u snopu 2 x 800/76 mm² ACSR. Nazivna struja postojećih sabirnica je oko 2500 A. Zbog spoja dodatnih 220 kV nadzemnih vodova i elektrana te 380/220 kV transformatora bilo je potrebno izvesti novi sabirnički sustav nazivne struje 4000 A [14].



Slika 8 Prikaz postojećeg sabirničkog sustava u 220 kV postrojenju u transformatorskoj stanici St. Peter

4.2 Konvencionalno rješenje

Do sredine osamdesetih godina 20. stoljeća podizanje nazivne struje sabirnice s 2500 A na 4000 A izvodilo se zamjenom vodiča u snopu 2 x 800/76 ACSR s vodičima 4 x 573/63 ACSR. Prema rezultatima proračuna, teži vodiči zahtijevaju povećanje maksimalne sile zatezanja od 3000 N na 4812 N (tablica 4). Pri tome treba predvidjeti nove stezaljke i ostali spojni pribor za vodiče 4 x 573/63, nove nosive čelične konstrukcije kao i nove temelje (odnosno adaptaciju i proširenje postojećih temelja). Proračunu su pokazali da je potrebno dodati oko 5000 kg za svaki čelični stup i izvršiti povećanje njegovih temelja s 3,0 x 2,3 x 2,2 m na 4,0 x 2,3 x 2,2 m [14].

Dakle, ukupno je trebalo oko 4 000 000 tadašnjih austrijskih šilinga (AS) za podizanje nazivne struje sabirnice s 2500 A na 4000 A [14].

Za zamjenu vodiča i spojnog pribora bilo je predviđeno 2 tjedna po sekciji sabirničkog sustava.

Dodatna 3 tjedna po sekciji sabirničkog sustava su bila potrebna za adaptaciju temelja i montažu nosive čelične konstrukcije. To je sve rezultiralo ukupnim vremenom izvan pogona od cca 5 tjedana po sekciji sabirničkog sustava. Zbog posebne važnosti transformatorske stanice St. Peter tako dugi period izvan pogona doveo bi do značajnog smanjenja pouzdanosti rada elektroenergetskog sustava Austrije.

Za ukupno 8 sekcija 220 kV sabirničkog sustava bilo bi potrebno cca 40 tjedana, ali zbog zahtjeva vođenja nije moguće isključiti više od jedne sekcije 220 kV sabirničkog sustava u isto vrijeme.

Tablica 4 Sile zatezanja i provjesi 220 kV sabirničkih sekcija [14]

Sekcija (raspon) 51 m
 Broj sekcija 8
 Broj polja po sekciji 3

Temperature (°C)	Sile zatezanja (N · 10 ³)		Provjes u sredini raspona sekcije (m)
	4 x 573/63 ACSR	2 x 800/76 TAL/ACS	4 x 573/63 ACSR (2 x 800/76 TAL/ACS)
-20	24,6	17,6	2,38
0	24,0	17,1	2,45
+20	23,4	16,7	2,51
+40	22,8	16,3	2,57
+60	22,3	15,9	2,63
-5 i opterećenje zbog leda	48,1	30,0	2,58...(2,53)

Uzimajući u obzir sljedeće parametre: cijena vodiča, cijena spojnog materijala, montaža vodiča i spojnog materijala, dobava i montaža čeličnih konstrukcija, radovi na armirano betonskim temeljima, zaključili su da je tehničko rješenje zamjena sabirničkog sustava s primjenom TAL/ACS 2 x 800/76 mm² bilo samo 15 % cijene tehničkog rješenja s primjenom ACSR 4 x 573/63 mm² [14]. Pri tome nije razmatrana činjenica da je vrijeme izvođenja radova kod izvođenja radova prema tehničkom rješenju s primjenom TAL/ACS 2 x 800/76 mm² značajno kraće, kao i cijena kapitala.

4.2 Tehničko rješenje uz primjenu TAL vodiča

Za zahtijevano nazivno strujno opterećenje sabirnica 4000 A dovoljno je primijeniti TAL/ACS 2 x 800/76 mm² vodiče. To znači da su i zatezne sile približno iste kao i u slučaju postojećih vodiča ACSR 2 x 800/76 mm². Pri tome nije potrebno mijenjati postojeće nosive čelične konstrukcije i armirano betonske konstrukcije. Kompletan sabirnički sustav je bio zamijenjen za 24 dana uz primjenu TAL/ACS vodiča i postignuta je nazivna struja 4000 A. Pri tome je vrlo bitan elaborat etapnosti izvođenja radova i vođenje pogona za vrijeme izvođenja radova.

5. Zaključak

Primjenom termootpornih vodiča (engl. thermo - resistant Aluminium alloy conductors) kada se želi podići nazivna struja sabirnica u visokonaponskim postrojenjima i maksimalno smanjiti period bez naponskog stanja (engl. shut-down period) u većini slučajeva moguće je izbjeći zamjenu nosivih čeličnih konstrukcija i adaptaciju ili čak zamjenu armirano betonskih temelja. Rezultati ispitivanja su pokazali da stezaljke s pojedinačnim poklopcem mogu podnijeti više temperature vodiča zbog bolje disipacije topline s površine stezaljke te je izmjerena temperatura površine stezaljke bila ispod 120 °C čak u slučaju temperature vodiča 150 °C na području dalje od stezaljke. Ukupni troškovi kod izvedbe zamjene sabirnica s TAL vodičima, osim značajnih tehničkih prednosti prvenstveno sa stanovišta vođenja pogona, imaju i značajne ekonomske prednosti, pri čemu veći gubici zbog većeg opterećenja vodiča kada se koriste TAL vodiči umjesto ACSR vodiča s većim promjerom vodiča nisu značajni u slučaju visokonaponskih postrojenja. U slučaju nadzemnih vodova gubitke zbog opterećenja i povećanja provjesa kod viših temperatura kod primjene TAL vodiča treba detaljno analizirati.

Literatura

1. Thomas, Y., Pigeot, P., Beristan, G., Kupiec, M., Cosak, J.P., Roussel, P., Guillot, J.: Influence of an increase in short-circuit currents on design of 400 kV installation of the Electricite de France, CIGRE, 1976.
2. Deter, O., Terhorst A., Stein, N., Lehmann, W.: Influence of the prospective very load and short-circuit currents on outdoor substation design for the highest system voltage of the German interconnected grid, CIGRE, 1976.
3. Asea Brown Boveri Pocket Book: ABB Switchgear Manual, 10th revised edition, Berlin, 1999.
4. ABB AG: ABB Switchgear Manual, 11th edition, Manheim, 2006.
5. Mirošević, G., Vidaković, F.: Projektiranje, građenje i održavanje dalekovoda, Kigen, Zagreb, 2008.
6. Morgan, V.T.: The loss of tensile strength of hard-drawn conductors by annealing in service, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS 98, 1979.
7. Katalog: Ovjesna i spojna oprema, DALEKOVOD, Zagreb, 1999.
8. Katalog: Spojna oprema za transformatorske stanice i rasklopna postrojenja do 500 kV, DALEKOVOD, Zagreb, 1999.
9. House, H.E., Tuttle, P.D.: Current carrying of ACSR, AIEE Trans. Vol. 77, Part 3, 1959.
10. Morgan, V.T.: Effect of Elevated Temperature Operation on the Tensile Strength of Overhead Conductors, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 1, 1996.
11. Morgan, V.T.: Thermal Behavior of Electrical Conductors, Research Studies Press Ltd, Taunton, Somerset, England, 1991.
12. Tehnička dokumentacija te prospekti i kataloški materijali proizvođača opreme: NGK, BURNDY, SEFAG, KARL PFISTERER, SEDIVER, MOSDORFER, LORÜNSER
13. V. Ravlić: Užetne sabirnice u visokonaponskim postrojenjima, RAVEL/Školska knjiga, Zagreb, 2017.
14. Morow, G., Hofbauer, F.: Uprating of existing substations by the use of thermo – resisant aluminium alloy conductors, CIGRE Symposium, Brussels, 1985.
15. Aluminium Electrical Conductor Handbook, The Aluminium Association, Second Edition, 1982.