

Velimir Ravlić, dipl. ing. el.  
RAVEL d.o.o.  
[velimir.ravlic@ravel.hr](mailto:velimir.ravlic@ravel.hr)

mr. Stjepan Harča, dipl. ing. el.  
KONČAR - Sklopna postrojenja d.d.  
[stjepan.harca@koncarsp.hr](mailto:stjepan.harca@koncarsp.hr)

Željko Radošević, dipl. ing. el.  
RAVEL d.o.o.  
[zeljko.radosevic@ravel.hr](mailto:zeljko.radosevic@ravel.hr)

## POVEZIVANJE ENERGETSKIH TRANSFORMATORA I POSTROJENJA SREDNJEG NAPONA U TS 110/X kV

### SAŽETAK

Suvremene izvedbe sklopnih postrojenja srednjeg napona imaju visoku pouzdanost te osiguravaju dobru sigurnost osoblju. Slična situacija je i s energetske transformatorima. Ista svojstva moraju imati i spojevi energetskih transformatora i sklopnih postrojenja srednjeg napona jer bi inače pouzdanost cjelokupnog sustava bila upitna.

Spajanje energetskih transformatora i sklopnih postrojenja može se izvesti: kabelima, sabirnicama s krutom izolacijom i sabirnicama s plinskom izolacijom.

**Ključne riječi:** kabeli, izolirane sabirnice, sklopna postrojenja srednjeg napona, energetski transformatori

## CONNECTING OF A POWER TRANSFORMER TO A MV SWITCHGEAR IN S/S 110/x kV

### SUMMARY

Up-to-date design of MV switchgears ensures high reliability during operation, as well as high degree of protection for engaged personnel. Connections of power transformers and MV switchgear are designed in the same manner, too. Otherwise, the reliability of the entire system would be put into question.

Connecting of a power transformer to a MV switchgear may be executed either by means of cables or busbars insulated with rigid insulation, but also using gas insulated busbars.

**Key words:** cables, insulated busbars, medium voltage switchgears, power transformers

## 1. JEDNOPOLNE SCHEME TS 110/X kV

Trenutno se u Hrvatskoj najčešće koriste jednopolne sheme s dva energetska transformatora 2x20(40) MVA s energetsom mogućnošću ugradnje energetskih transformatora nazivne snage 63 MVA i (rjeđe) jednopolne sheme s tri energetska transformatora 3x40(63) MVA pri čemu se treći energetski transformator planira ugraditi nakon prelaska s 10 kV na 20 kV napon (takav je npr. slučaj TS 110/10(20) kV DOBRI).

Kod planiranja izgradnje SN postrojenja treba izvršiti tehničko-ekonomsku usporedbu navedenih tehničkih rješenja sklopnih blokova sa zračnom izolacijom i izvlačivim prekidačima te sklopnih blokova sa SF<sub>6</sub> izolacijom.

Sva novija rješenja SN postrojenja izvode se s jednim sustavom sabirnica koji se najčešće izvodi u obliku prstena koji je uvijek otvoren na dva mjesta kod rada oba energetska transformatora. Svaki energetski transformator napaja po jednu sekciju koja se dijeli na dvije polusekcije koje su svaka za sebe direktno povezane preko transformatorskih polja na energetski transformator. Sekcije između dva energetska transformatora međusobno su povezane spojnim poljima. Dvostruka transformatorska polja i spojna polja omogućavaju veliku fleksibilnost u radu ovako koncipiranog postrojenja.

Opremljenost polja izvlačivim prekidačima (tj. prekidačima na izvlačivim kolicima) daje veliku sigurnost u pogonu jer nije potrebna ugradnja još jednog sklopnog aparata (rastavljača) u slučaju primjene sklopnih blokova sa zračnom izolacijom. Samo na poseban zahtjev postoji mogućnost ugradnje zemljospojnika u transformatorska polja, ali to nije rješenje koje se često koristi zbog moguće opasnosti od pogrešnih pogonskih manipulacija u slučaju neraspoloživosti sustava blokada.

U slučaju sklopnih blokova izoliranih plinom SF<sub>6</sub> vrlo često se koristi zemljospojnik, ali i sabirnički rastavljač (sklopni blokovi kao tip KSMA) ili tropoložajna rastavna sklopka (sklopni blokovi kao tip KSMV).

Mjerno polje se obično spaja direktno na transformatorsko polje što znači sigurnu informaciju o naponskom stanju (posebno je to bitno za krugove regulacije napona energetskog transformatora), ali se u slučaju većeg broja vodnih polja vrlo često izvodi i posebno mjerno polje.

Ova shema je našla primjenu i u jednopolnoj shemi TIPSKE TS 110/x kV za sredjenaponsko postrojenje.

U većim urbanim cjelinama najčešće se 10(20) kV postrojenje sastoji od 44 sklopna bloka smještena u dva niza na katu zgrade s rasporedom polja koji odgovara jednopolnoj shemi.

U slučaju manjih TS 110/x kV ili u slučaju zamjene postojećih sklopnih ćelija "monjerki" s novim sklopnim blokovima najčešće se radi o 24 sklopna bloka (TS SISCIA, TS OSIJEK 4, TS KRK GABONJIN). Ponekad se koristi rješenje sa sklopnim blokovima 10(20) kV s kabelskim ormarićima u kabelskom prostoru pri čemu je u kabelskom ormariću rastavno mjesto za naponsko odvajanje kabela kod ispitivanja kabela istosmjernim naponom. Navedeno rješenje se sve manje koristi zbog odličnih tehničkih karakteristika kabelskih završetaka suvremene izvedbe kao i izvanrednih mogućnosti suvremenih terminala polja koji omogućuju dobivanje velikog broja informacija.

U svakom slučaju kabelski prostor dovoljne visine omogućuje i izvedbu rezervnih kabelskih petlji ("šlingi") na podu kabelskog prostora kao i izradu novih kabelskih završetaka u slučaju kvarova kabela unutar kabelskog prostora, što je od izuzetnog značaja za funkciju održavanja postrojenja.

## 2. SPOJEVI ENERGETSKIH TRANSFORMATORA I POSTROJENJA SREDNJEG NAPONA U TS 110/X kV

Spajanje sklopnog postrojenja srednjeg napona u zgradi i energetskih transformatora ostvaruje se:

- kabelima;
- sabirnicama s krutom izolacijom;
- sabirnicama s plinskom izolacijom.

Vrlo rijetko, a najčešće u slučaju postojećih starijih SN sklopnih postrojenja, još uvijek postoje tehnička rješenja sa spojevima izvedenim užetima koja su zavješena preko izolatorskih lanaca na zgradu.

Kabeli, sabirnice i njihovi završeci moraju zadovoljiti sljedeće osnovne zahtjeve:

- otpornost na udare,
- otpornost na utjecaje okoline i
- smanjene zahtjeve na održavanje.

Spojna zona, tj. kabelski (priključni) odjeljak, treba osigurati zaštitu od udara ne samo u normalnim pogonskim uvjetima već i pri radovima u postrojenju.

To se može ostvariti na više načina:

- osiguravanje sigurnog odvajanja od napona pri zatvorenim vratima sklopnog bloka;
- vrata kablenskog odjeljka trebaju biti uključena u sustav unutarnjih blokada;
- zaštita od djelovanja električnog luka treba djelovati i na isklon 110 kV strane (napojne strane) energetskog transformatora;
- trebaju postojati pregrade prema susjednim odjeljcima;
- poželjna je ugradnja naponskih transformatora u SN transformatorskom polju kako bi se osigurala sigurna i pouzdana informacija o naponskom stanju SN spojnog voda energetski transformator – SN sklopno postrojenje.

Za indikaciju napona treba koristiti kapacitivne pokazne sustave koji su spojeni na kapacitivne djelitelje potpornih izolatora.

U slučaju izgradnje novih zgrada TS 110/x kV najbolje je tehničko rješenje u korištenju kablenskog prostora u prizemlju zgrade SN postrojenja za ugradnju kablenskih ormara u koje se može ugraditi naponske transformatore i kablenske završetke SN kabela i ostalu opremu (npr. potporni izolatori i plosnati bakar za spajanje dijelova postrojenja).

Ovakvo rješenje je pouzdano jer su zaštićeni dijelovi SN sklopnih blokova u slučaju havarija strujnih ili naponskih transformatora u dovodnim transformatorskim poljima. Inače, dosadašnja je praksa pokazala da su najčešći kvarovi bili na strujnim ili naponskim transformatorima u transformatorskim poljima. To je i logično jer se radi o opremi koja je termički najviše opterećena u normalnom pogonu.

U svakom slučaju spoj od kablenskog ormara do SN sklopnog bloka transformatorskog polja može se izvesti na dva načina:

- a) krutim vodičima, tj. bakrenim profilima izoliranim toploskupljajućom izolacijom (koriste se uvodnice na provodnoj ploči između kablenskog ormara u prizemlju i priključnog odjeljka sklopnog bloka);
- b) provodnim izolatorima koji osiguravaju potpunu neovisnost dva različita požarna sektora.

Drugo rješenje je skuplje, ali znatno kvalitetnije i trajnije. U slučaju priključka pomoću krutih vodiča s toploskupljajućom izolacijom treba paziti na razmake od metalnih masa kako se ne bi pojavile plošne struje i djelomična pražnjenja.

### 3. IZBOR TEHNIČKOG RJEŠENJA SPOJA ENERGETSKI TRANSFORMATOR – SN SKLOPNO POSTROJENJE

Može se zaključiti da su prostorni uvjeti u TS 110/x kV odlučujući u svezi odabira tehničkog rješenja. U većini slučajeva primjenjuje se tablica I:

Tablica I: Uporaba kabela i sabirnica za spoj energetskih transformatora - SN sklopno postrojenje

Nazivna struja	Kratke udaljenosti	Dulje udaljenosti
do 1250 A	kabeli	kabeli
preko 1250 A	sabirnice	paralelni kabeli

Najčešća je granica za kratke udaljenosti do 50 m jer granična duljina za izbor kabela ili sabirnica ovisi i o drugim utjecajnim čimbenicima (npr. ekonomski uvjeti, blizina druge opreme, itd.).

#### 3.1. Kabeli

Jednostruki kabeli se koriste za nazivne struje do 1250 A.

Prednosti primjene kabela su:

- fleksibilnost;
- potrebne su samo dva elementa završetaka (priključnica ili kablenski završetak kod energetskih transformatora i kablenski završetak kod SN sklopnih blokova);
- jednostavni su za transport i montažu;
- "plug-in" priključnice omogućuju relativno jednostavnu zamjenu u slučaju kvara.

Fleksibilnost kabela omogućava prilagođenje trasi kao i lakše ispravljanje svih netočnosti u izvedbi (posebno građevinskih netočnosti u izvedbi). Kabeli ne zahtijevaju pravocrtne spojeve kao sabirnice.

Nazivne struje iznad 1250 A mogu se prenositi preko paralelnih kabela. Ovo se rješenje ne preporučuje na kratkim udaljenostima jer povećava:

- troškove za priključnice;
- prostor za spajanje;
- rizik od kvarova.

Broj mogućih kvarova raste s brojem paralelnih kabela. Također i paralelno polaganje SN kabela vodi do smanjenja sposobnosti vođenja struje u normalnom pogonu zbog porasta temperature, pa je zbog toga potrebno koristiti veće nazivne presjeke kabela.

Treba istaknuti često korištenje kabelskih spojeva i za kraće udaljenosti od 50 m u slučaju nazivnih struja ispod 1250 A zbog navedenih prednosti tehničkog rješenja s kabelskim spojevima.

U slučaju teških uvjeta okoline (posolice, zagađenje zraka, itd.) znatno je povoljnije rješenje s "plug-in" priključnicom nego s konvencionalnim rješenjem spoja provodni izolator energetskog transformatora – odvodnik prenapona – kabelski završetak SN kabela koji se izvodi plosnatim bakrom.

Jasno je da u slučaju izrade novih SN spojeva kod postojećih elemenata (energetski transformator – SN sklopni blok) nema mogućnosti ugradnje novih "plug-in" priključnica pa treba koristiti konvencionalno rješenje s toploskupljajućom izolacijom.

U slučaju "plug-in" priključnica olakšana je ugradnja odvodnika prenapona, također "plug-in" izvedbe, u predviđeno mjesto unutar "plug-in" priključnice.

### **3.2. Sabirnice**

Kruto izolirane sabirnice sa zrakom ili plinom izolirane sabirnice se obično koriste za struje iznad 1250 A. Pri tome se koriste najčešće sabirnice za nazivne struje 2500 A u TS 110/x kV. U generatorskim postrojenjima nazivne struje mogu biti i preko 2500 A za spojeve SN postrojenja.

Sabirnice imaju:

- veliku toplinsku i dinamičku snagu;
- zaštitu od udara;
- smanjenu potrebu za prostorom;
- jednostavnost i preglednost rješenja;
- jednostavnu montažu (tipski element).

Sposobnost vođenja velikih struja postiže se jedino odgovarajućim dimenzijama.

Podnošenje kvarova ovisi o prostoru, a on je veći nego kod kabela. Malo kutno zakrivljenje uvjetuje rutu koja je točno prilagođena zgradi dok kabeli imaju veću mogućnost zakrivljenja koja odgovara njihovom presjeku i promjeru.

Plinom izolirane sabirnice trebaju znatno manje prostora od zrakom izoliranih sabirnica. Često se koriste strujni transformatori obuhvatnog tipa koji su znatno jeftiniji od strujnih transformatora potporne izvedbe, ali imaju i manje nazivne snage te se mogu koristiti ukoliko je sekundarna oprema relativno blizu tako da su potrošnje spojnih vodova male.

Za kratke udaljenosti s velikim nazivnim strujama, sabirnice za spoj energetskog transformatora i sklopnog postrojenja srednjeg napona su najbolje rješenje.

## **4. TOPLINSKI PRORAČUNI**

Gubici energije uzrokuju zagrijavanje elemenata postrojenja. Najveći dio topline potječe od Joulovih gubitaka zbog:

- a) trajnog opterećenja do razine nazivne struje,
- b) kraćih preopterećenja većih od nazivne struje,
- c) trenutnih opterećenja strujom kratkog spoja.

#### 4.1. Zagrijavanje vodiča u trajnom radu

Ako kroz vodič teče struja konstantne efektivne vrijednosti, temperatura vodiča se mijenja po izrazu:

$$\vartheta = \vartheta_0 + (\vartheta_\infty - \vartheta_0) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) \quad (1)$$

gdje su:

$$\vartheta = \vartheta_0 + \frac{I^2 \cdot R}{K \cdot A} \quad (2)$$

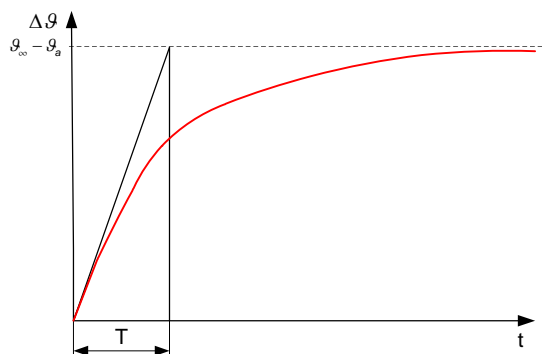
$$T = \frac{m \cdot c}{K \cdot A} \quad (3)$$

Oznake u gornjim izrazima imaju sljedeća značenja:

- $\vartheta_0$  - temperatura okoline;
- $\vartheta_\infty$  - stacionarna temperatura vodiča pri trajnom vođenju struje  $I$ ;
- $t$  - vremenska konstanta zagrijavanja;
- $R$  - električni otpor vodiča;
- $K$  - ekvivalentni koeficijent hlađenja;
- $A$  - površina hlađenja;
- $m$  - masa vodiča;
- $c$  - specifična toplota materijala vodiča.

Izraz (1) je izveden uz pretpostavku da je vodič u trenutku  $t = 0$  bio u hladnom stanju, odnosno da je imao temperaturu okoline.

Po isteku vremena  $t \geq 3 \cdot T$  eksponencijalni članu u izrazu (1) ima zanemarivo malu vrijednost tako da temperatura dostiže svoju stacionarnu vrijednost  $\vartheta_\infty$ . Na slici 1. prikazan je vremenski tok nadtemperature  $\Delta\vartheta = \vartheta - \vartheta_0$ .



Slika 1. Vremenska promjena nadtemperature elementa pri zagrijavanju

Trajno dozvoljena temperatura kroz vodič određuje se iz izraza:

$$I_{\text{doz}} = \sqrt{\frac{K \cdot A}{R}} \cdot \sqrt{\vartheta_{\text{doz}} - \vartheta_0} \quad (4)$$

gdje je s  $\vartheta_{\text{doz}}$  označena trajno dozvoljena temperatura. Ona je za gole vodiče u zraku reda  $60^\circ\text{C} - 70^\circ\text{C}$ .

Za proračun struje  $I_{\text{doz}}$  može se koristiti izraz koji točnije obuhvaća proces hlađenja:

$$I_{\text{doz}} = \sqrt{\frac{P_a}{R_{20} \cdot [1 + \lambda (\vartheta_{\text{doz}} - 20)]}} \quad (5)$$

U gornjem izrazu su:

- $P_a$  - brzina odvođenja topline hlađenjem (snaga hlađenja);
- $R_{20}$  - električni otpor vodiča pri protjecanju izmjenične struje kod 20°C;
- $\lambda$  - temperaturni koeficijent otpora vodiča.

Na osnovu izraza (4) izvodi se formula za određivanje graničnog dozvoljenog opterećenja vodiča u slučaju kada se uvjeti rada postrojenja razlikuju od onih koje je proizvođač predvidio i naveo u svojim tehničkim podacima.

Struja u različitim uvjetima rada postrojenja određuje se pomoću izraza:

$$I_{td} = I_{tdT} \cdot \sqrt{\frac{\mathcal{G}_{td} - \mathcal{G}_a}{\mathcal{G}_{tdT} - \mathcal{G}_{at}}} \quad (6)$$

Indeksom  $T$  označene su veličine iz tvorničkih tehničkih podataka, a bez indeksa su veličine u uvjetima rada postrojenja koje se razlikuju od referentnih vrijednosti. Navedeni izraz omogućava da se na osnovu tabličnih vrijednosti odnosno podataka proizvođača izračunaju dozvoljene vrijednosti struja za izmijenjene uvjete pogona.

## 4.2. Cikličko opterećenje

Ako se vodič strujno opterećuje ciklički, tako da između dva perioda opterećenja postoji prazni hod dovoljno dug da se vodič ohladi, dozvoljeno strujno opterećenje možemo izračunati pomoću izraza:

$$I_{\tau} = \frac{I_{td}}{\sqrt{1 - e^{-\frac{t}{\tau}}}} \quad (7)$$

U izrazu (7) oznakom  $\tau$  označeno je trajanje strujnog opterećenja, a s  $T$  vremenska konstanta zagrijavanja i hlađenja za koje je pretpostavljeno da su približno iste.

Prazni hod između dva uzastopna radna režima treba trajati barem  $3 \cdot T$  kako bi se vodič ohladio od prethodnog opterećenja.

Iz izraza (7) je vidljivo da vrijedi:

$$I_{\tau} > I_{td} \text{ za } \tau < 3 \cdot T \quad (8)$$

## 4.3. Zagrijavanje u kratkom spoju

Ako se pretpostavi da je zagrijavanje u kratkom spoju adijabatsko, zbog brzine odvijanja procesa, toplinski impuls koji može vodič podnijeti iznosi:

$$A_d = \frac{m \cdot c}{\alpha \cdot R_{20}} \cdot \ln \frac{1 + \alpha \cdot (\mathcal{G}_{kd} - 20)}{1 + \alpha \cdot (\mathcal{G}_{td} - 20)} \quad (9)$$

U izrazu oznaka  $kd$  označava kratkotrajno dozvoljenu temperaturu. Pri izvođenju izraza (9) polazi se od pretpostavke da je u režimu koji je prethodio kvaru vodič imao maksimalnu, trajno dozvoljenu temperaturu. Ako to nije slučaj, u (9) umjesto  $\mathcal{G}_{td}$  treba uvrstiti temperaturu vodiča u trenutku nastanka kvara.

Dozvoljena termička struja iznosi:

$$I_{\tau} = \sqrt{\frac{A_d}{\tau}} \quad (10)$$

gdje je s  $\tau$  označeno trajanje kratkog spoja.

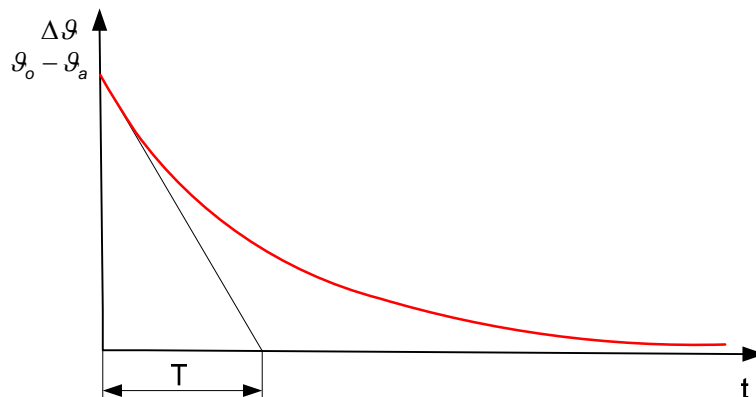
#### 4.4. Hlađenje

Ukoliko se pretpostavi da je vodič u trenutku  $t = 0$  imao temperaturu  $\vartheta_o$  i da je poslije toga neopterećen, tada je vremenska promjena temperature vodiča:

$$\vartheta = \vartheta_o + (\vartheta_o - \vartheta_a) \cdot e^{-\frac{t}{T}} \quad (11)$$

Vremenska promjena nadtemperature  $\Delta\vartheta = \vartheta - \vartheta_a$  pri hlađenju prikazana je na slici 2.

Kao što je vidljivo iz (11) i slike 2, vodič će se potpuno ohladiti nakon isteka vremena  $t \geq 3 \cdot T$  kada se njegova temperatura praktično izjednačava s temperaturom okoline.



Slika 2. Vremenska promjena nadtemperature pri hlađenju vodiča

Tako npr. uz temperaturu okoline  $\vartheta_{a1} = 25^\circ\text{C}$  trajno dozvoljena struja aluminijskog vodiča  $100 \times 10$  mm iznosi  $I_{td1} = 1835$  A.

Treba odrediti trajno dozvoljenu struju u slučaju kada je temperatura okoline  $\vartheta_{a2} = 40^\circ\text{C}$ . Trajno dozvoljena temperatura Al vodiča iznosi  $\vartheta_{td} = 70^\circ\text{C}$ .

Na osnovu izraza (4) iznosi trajno dozvoljena temperatura vodiča pri različitim temperaturama okoline:

$$I_{td1} = \sqrt{\frac{K \cdot A}{R}} \cdot \sqrt{\vartheta_{td} - \vartheta_{a1}}$$

$$I_{td2} = \sqrt{\frac{K \cdot A}{R}} \cdot \sqrt{\vartheta_{td} - \vartheta_{a2}}$$

Dijeljenjem gornjih izraza dobijemo:

$$I_{td2} = I_{td1} \cdot \sqrt{\frac{\vartheta_{td} - \vartheta_{a2}}{\vartheta_{td} - \vartheta_{a1}}}$$

$$I_{td2} = 1835 \cdot \sqrt{\frac{70 - 40}{70 - 25}}$$

$$I_{td2} = 1498,27 \text{ A}$$

## 5. TERMIČKA NAPREZANJA U KRATKOM SPOJU

Mjerodavna struja za vrijeme trajanja kratkog spoja  $T_k$  proizvodi jednaku količinu topline kao vremenski promjenjiva struja tropolnog kratkog spoja.

$$I_{ekv} = I''_{k3, pol} \cdot \sqrt{m+n} \text{ u kA} \quad (12)$$

i traje  $T_k$  s.

$T_k$  je trajanje kratkog spoja u s od početka prorade zaštite, uključivo kašnjenja, do prekida struje, a koeficijent  $m$  i  $n$  se mogu očitati iz [6]. Najmanji presjek  $A_{min}$  vodova i kabela da ne prekorače graničnu temperaturu  $\vartheta_g$  na kraju kratkog spoja je:

$$A_{min} > \frac{10^3 \cdot I_{ekv} \cdot \sqrt{T_k}}{S_t} \quad (13)$$

pri čemu su  $I_{ekv}$  u kA,  $T_k$  u s i  $S_t$  u  $\frac{A}{mm^2}$ . Nazivne kratkotrajne gustoće struje  $S_t$  mogu se očitati iz [6]:

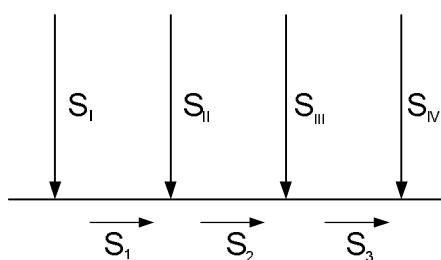
$$A_{min} > C_1 \cdot I_{ekv} \cdot \sqrt{T_k} \text{ u mm}^2 \quad (14)$$

Za maksimalne pogonske temperature  $\vartheta_1 = 65^\circ\text{C}$  i graničnu temperaturu  $T_g = 180^\circ\text{C}$  (za aluminij) i  $200^\circ\text{C}$  (za bakar) iznose faktori  $C_1 = 7,4$  za bakar i  $C_1 = 12,0$  za aluminij.

Za kabele izolirane umreženim polietilenom (XHE) iznose maksimalne pogonske temperature  $90^\circ\text{C}$  i granične temperature  $250^\circ\text{C}$  te su pripadajući faktori  $C_1 = 7,2$  za bakar te  $C_1 = 10,9$  za aluminij.

## 6. RASPODJELA STRUJNOG OPTEREĆENJA VODIČA

Na sabirnice srednjeg napona može biti priključeno više odvoda i dovoda (transformatori, generatori, vodna polja, polja kućnih transformatora, itd.).



Slika 3. Raspodjela snage po dionicama sabirnica

Smjer snage pojedinih polja, kao što su energetske transformatori, nadzemni vodovi, kabelski vodovi, može biti različit. Pored navedenog, mogu se razlikovati i postotni udjeli aktivne i reaktivne komponente. Zbog jednostavnosti u praktičnim proračunima se razlike u faktorima snage zanemaruju i radi se sa prividnim snagama koje teku po vodovima i sabirnicama kao da su skalarne veličine.

Na osnovi slike 3. može se zaključiti da je snaga koja teče na dionici k sabirnica jednaka:

$$S_K = S_{K-1} + S_K \quad (15)$$

gdje je sa  $S_K$  označena snaga koja teče po K-tom dijelu sabirnica. Sabirnice se termički dimenzioniraju prema najvećoj od snaga  $S_K$  za najkritičniju kombinaciju smjerova snaga priključnih polja i njihovog rasporeda na sabirnicama.

Da bi se odredila najveća snaga  $S_K$  (označeno je s  $S_{max}$ ), obično treba analizirati nekoliko kombinacija. Pri tome treba biti ispunjeno za svaku kombinaciju osnovno načelo definirano prvim Kirchhoffovim zakonom:



$$\sum_K S_K = 0 \quad (16)$$

Ako je priključak generatorskih jedinica, snaga  $S_K$  ima smjer prema sabirnicama i njena maksimalna vrijednost je jednaka nazivnoj snazi generatora. U slučaju da se predviđa kratkotrajni pogon s povećanom snagom (tzv. forsirani pogon) generatora i energetskih transformatora tada to treba uzeti u obzir. Naime, takvi pogoni su trajni za vodiče sabirnica zbog velikih razlika u vremenskim konstantama zagrijavanja.

Na osnovu podataka za  $S_{max}$ , određuje se maksimalna pogonska struja sabirnica:

$$I_{max} = \frac{S_{max}}{\sqrt{3} \cdot U_n} \quad (17)$$

Ovdje je s  $U_n$  označen linijski (međufazni) napon sabirnica. Da bi bili zadovoljeni uvjeti zagrijavanja u normalnom pogonu, treba biti:

$$I_{tdT} \geq \frac{I_{max}}{k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot k_5} \quad (18)$$

što znači da iz tablice dozvoljenih trajnih struja uz referentne uvjete za izabranu vrstu vodiča, treba izabrati najmanji presjek koji zadovoljava izraz (18).

Pri tome treba uzeti u obzir korekcijske faktore prema DIN 43670 i DIN 43671:

$k_1$  - faktor za odstupanje vodljivosti;

$k_2$  - faktor koji uzima u obzir odstupanja temperature zraka od 35 °C i temperature vodiča  $\vartheta_2$  od 65 °C;

$k_3$  - faktor odvođenja topline za veći broj vodiča po fazi;

$k_4$  - faktor dodatnog potiskivanja izmjenične struje do 60 Hz kod malog razmaka, a između faza, ovisno o omjeru širine i visine vodiča te razmaku između vodiča;

$k_5$  - faktor za nadmorske visine iznad 1000 m.

Iz navedenih činjenica je očito da treba težiti što nižim temperaturama u normalnom pogonu kako bi postigli optimalno rješenje.

To se može postići simetrijom protjecanja struje kroz sabirnice odnosno treba izvore (u slučaju TS 110/x kV to su transformatorska polja) spojiti približno na sredinu sekcije SN sabirnica kako bi vodna polja bila simetrično raspoređena lijevo i desno od SN transformatorskog polja. Na opisani način se ukupna struja dovoda energetskog transformatora grana na dvije strane i imamo znatno manje zagrijavanje sabirnica nego u slučaju da je transformatorsko polje spojeno na početak sekcije SN postrojenja.

## 7. ZAKLJUČAK

Simetrijom protjecanja struje kroz sabirnice srednjenaponskog postrojenja te priključkom dovodnih (transformatorskih) polja približno na središnji dio sekcije SN postrojenja dobivaju se sljedeće prednosti:

1. Manje zagrijavanje sabirnica.
2. Manje iznose elektromagnetskih polja kod pojedinih sklopnih blokova (manji iznosi struja zbog grananja struja).
3. Manji iznosi parcijalnih izbijanja u pojedinim sklopnim poljima.
4. Treba izbjegavati paralelni spoj dva izolirana vodiča (ili kabela) za SN sabirnice zbog nejednolike raspodjele struja u pojedinim sastavnim dijelovima jedne faze. Naime, nikada nemaju takvi izolirani vodiči potpuno jednake geometrijske i fizičke karakteristike, ali im i udaljenosti prema drugim dijelovima sklopnog postrojenja nisu jednake što ima za posljedicu različita strujna opterećenja pojedinih vodiča.
5. U slučaju luka unutar sklopnog postrojenja, on se vrlo brzo rasprostire do kraja sabirnica sve dok se ne prekine dovod energije. U slučaju dovoda na početku postrojenja, luk se širi čitavom sekcijom postrojenja do kraja, a u slučaju napojnog voda u sredini luk se grana na obje strane. Korištenje lukootpornih sklopnih blokova otpornih na unutarnji luk ograničava se luk. Luk gori na mjestu nastanka dok se ne otklone uzroci nastajanja. U slučaju smanjenja energije luka zbog grananja luka i pripadajuće štete su manje.

## 8. LITERATURA

- [1] H. Požar, "Visokonaponska rasklopna postrojenja", Zagreb, 1990.
- [2] V. Ravlić, S. Harča, "Uzroci, posljedice i zaštita od lučnih kvarova u sklopnim blokovima srednjeg napona", IV CIGRE, Cavtat, listopad 1999.
- [3] SIEMENS, "Power Engineering Guide, Transmission and Distribution", 4<sup>th</sup> Edition, Erlangen, 1999.
- [4] ABB, "Switchgear Manual", 10<sup>th</sup> edition, Mannheim, 2001.
- [5] Projektna dokumentacija za TS 110/10(20) kV DOBRI, TS 110/10(20) kV TURNIĆ, TS 110/35 kV BUJE, TS 110/35/10(20) kV GRAČAC, TS 110/35/10(20) kV VARAŽDIN 1, TS 110/10(20) kV OSIJEK 4, TS 110/10(20) kV SISCIA, TS 110/20 kV KRK GABONJIN, TS 110/10(20) kV SUŠAK, TS 110/35 kV OŠTARIJE, TS 220/35 kV BRINJE, TS 110/35/10(20) kV OBROVAC, TS 110/20 kV KRAPINA BOBOVJE, TS 110/30 kV RESNIK, TS 110/35(20) kV RAKITJE
- [6] KONČAR, "Tehnički priručnik", peto izdanje, Zagreb, 1991.