

DOI: [10.46793/CIGRE37.C1.05](https://doi.org/10.46793/CIGRE37.C1.05)**C1.05****KONCEPCIJA PRIKLJUČNIH POSTROJENJA ZA SPECIFIČNE PROIZVOĐAČE
(NUKLEARNE ELEKRANE)****CONCEPT OF CONNECTION SWITCHGEAR FOR SPECIFIC PRODUCES (NUCLEAR
POWER PLANTS)****Branko Peruničić, Nebojša Vučinić, Goran Pernić, Željko Torlak***

Kratak sadržaj: Energetska tranzija koja se ogleda u integraciji velikog broja varijabilnih izvora električne energije za posledicu ima potrebe za uvođenje novih izvora za pokrivanje bazne proizvodnje kao što su nuklearne elektrane. Uvođenje nuklearnih proizvođača u energetski miks zahteva izmenu postojećih propisa i tehničkih regulativa. Posebna pažnja treba da se posveti na promenu koncepcije priključnih postrojenja u pogledu njihove sigurnosti i pouzdanosti na ispade i neraspoloživost. Ovim radom dato je sagledavanje sličnih priključnih objekata drugih operatora prenosnih sistema, opšte postavke, proračuni pokazatelja pouzdanosti različitih šema, višekriterijumska optimazija priključnih postrojenja sa tehno ekonomskom analizom kao i izbora opreme.

Ključne reči: koncepcije priključna postrojenja, nuklearne elektrane, tehno ekonomske analize

Abstract: The energy transition, which is reflected in the integration of a large number of variable sources of electricity, has resulted in the need to introduce new sources to cover baseload production, such as nuclear power plants. The introduction of nuclear producers into the energy mix requires changes to existing regulations and technical regulations. Special attention should be paid to changing the concept of connection facilities in terms of their safety and reliability in the event of outages. This paper provides an overview of similar connection facilities of other transmission system operators, general settings, calculations of reliability indicators of different SLD, multi-criteria optimization of connection switchgear with techno-economic analysis, as well as equipment selection.

Key words: concepts of connecting switchgear, nuclear power plants, techno-economic analyse

* Branko Peruničić, JSC EMS, branko80@yahoo.com
Nebojša Vučinić, Elektromreža Srbije, nebojsa.vucinic@ems.rs
Goran Pernić, EMS AD, goran.pernic@ems.rs
Željko Torlak, JSC EMS, zeljko.torlak@ems.rs

1 UVOD

Razvodna postrojenja, trafostanice i dalekovodi su elementi prenosnog sistema koji se koriste za povezivanje proizvodnih kapaciteta, konvencionalnih i varijabilnih proizvodnih kapaciteta sa jedne i sve zahtevnijeg konzuma sa druge strane. Generatorski kapaciteti obično zahtevaju blok transformatore za podizanje napona i povezivanje na prenosni sistem, zato što naponski nivoi generatorskih jedinica ne odgovaraju naponskim nivoima na prenosnoj mreži. Izabrani naponski nivo i konfiguracija razvodnog postrojenja zavisili su od vremenskog okvira i lokacija na kojoj je razvodno postrojenje projektovano i izgrađeno. Proizvodnja i potrošnja su vremenom, fizički bili sve više dislocirani, a rastojanja i zahtevi za prenosom električne energije sve veći i zahtevniji.

Za pokazatelje pouzdanosti napajanja potrošača, koriste se dva parametra, učestanost i vreme trajanja kvara elementa opreme. Ovi parametri dovode do većih troškova koji su uzrokovani prekidom isporuke električne energije i koji zavise kako od pouzdanosti visokonaponskih transformatorskih stanica i razvodnih postrojenja, od usvojene konceptualne konfiguracije, tako i od pouzdanosti ugrađene visokonaponske opreme. Kako bi se troškovi smanjili, a koji su uslovljeni sa sve većom cenom električne energije kao i troškovima za neisporučenu električnu energiju, a koji će biti definisani regulatornim odnosima, kao i sa promenama odnosa između elektroenergetskih subjekata u našem elektroenergetskom sistemu, sve se više teži povećanju pouzdanosti visokonaponskih i srednjenaponskih postrojenja i ugrađene opreme. U budućnosti će se sve više javljati, izazovi na koje će prenosna mreža morati odgovoriti, kako na zahtevima za priključenje sve većeg broja varijabilnih (nepredvidljivih) izvora, tako i izgradnjom, nuklearnih kapaciteta (NE elektrana).

U radu želimo da damo neke polazne osnove u izboru konceptualnih rešenja postrojenja od prostih do složenih, koji su već zastupljena u prenosnim sistemima kod nas i svetu. Za tu priliku izabrali smo realno primenljiva konceptualna rešenja, koja su već implemetarena u zemljama severne Amerike, a koja je izabrana kako zbog velikog broja već instalisanih nuklearnih i varijabilnih, proizvodnih kapaciteta, tako i zbog složenosti prenosne mreže i bogatog višedecenijskog primenjenog iskustva.

Za proračun pouzdanosti visokonaponskih postrojenja razvijene su različite metode, a pokazatelji pouzdanosti opreme postrojenja prikupljaju se, na svetskom nivou i koje su prezentovane kroz brojne ENTSO-E publikacije.

2 KONFIGURACIJA RAZVODNIH POSTROJENJA

2.1 Uvod

Opšti koraci, za izbor konceptualnog rešenja (dizajna), a kasnije u samom projektovanju novog razvodnog postrojenja ili prilikom rekonstrukcije postojećeg razvodnog postrojenja, u suštini su slični. Proces inženjerskog dizajna postrojenja, može brzo postati veoma složen i zahtevan, a u zavisnosti od izabranog naponskog nivoa, usvojenog rešenja (prikadno zahtevima konzuma ili vrednosti tokova snage), broja priključnih vodova, tipa proizvodnih kapaciteta ili sve većeg zahteva za ugradnjom FACTS uređaja (šant reaktora, kondenzatorskih baterija, SVC, STATCOM i sl.).

Polazna tačka rešenja, je izbor konceptualnog rešenja i urađena jedonopolna šema, a koja je od velike pomoći prilikom dizajna i projektovanja, visokonaponskih razvodnih postrojenja. Takav pristup omogućava sagledavanje i budućih aktivnosti u vezi eksploatacije i budućih

održavanja, u sagledavanju pojavljivanje pojedinih događaja i pojava, uključujući pojave prenapona, visokonaponskih prilika ili isključenja na samoj prenosnoj mreži. Ovde dajemo opštu podelu razvodnih postrojenja u zavisnosti od funkcije i mesta u elektroenergetskom sistemu, jedne zemlje. Visokonaponska razvodna postrojenja se mogu klasifikovati na osnovu funkcije koje imaju u sistemu i to na:

- Priključno razvodna postrojenja (Step Up blok postrojenja) – povezana sa generatorskim jedinicama kod kojih se srednjenaponski nivo prilagođava naponskom nivou prenosne mreže,
- Transformatorske stanice ili razvodna postrojenja prenosne mreže – locirana na odgovarajućoj tački opterećenja duž prenosnih dalekovoda ili tačkama interkonekcija za povezivanja sa susednim prenosnim mrežama,
- Distributivne trafostanice – nalaze se na mestu gde se napon prenosne mreže, Step Down transformacijom, spušta do naponskog nivoa distributivne mreže,
- Industrijske podstanice ili EVP postrojenja za snabdevanje – distributivne podstanice, kreirane posebno za svaki tip potrošača ili elektrovučna postrojenja.

Opšti zaključak je da se prenosne mreže i proizvodni kapaciteti tokom vremena menjaju, a usvojene konfiguracije priključnih razvodnih postrojenja ostaju nepromenjena. Mnoge stvari mogu da utiču na izbor konfiguracije postrojenja ili na usvojen, sistem prenosa električne energije, uključujući:

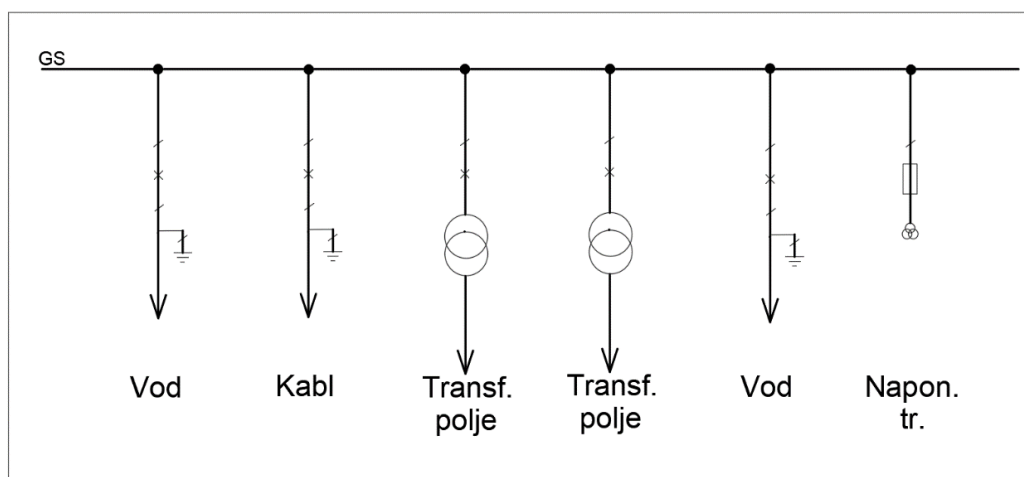
- Promene regionalnih zahteva za električnom energijom,
- Promenom dobavljača električne energije uključujući povećanje sve većeg broja nezavisnih proizvođača električne energije,
- Sve veće nametnute obaveze i težnja da se proizvodne jedinice starije generacije, sve više uklanjaju iz upotrebe zbog ekoloških troškova i održavanja, starenja...
- Sve veći broj obnovljivih izvora energije iz fotonaponskih, biogasnih, vetroelektrana i nuklearnih elektrana.

Kao što napon prenosnog sistema, za priključna polja za elektrane, (nuklearne elektrane) imaju veliku raznolikost, konfiguracije za razvodna postrojenja su takođe prilično raznovrsne. Postoji određena korelacija između izabranog naponskog nivoa i usvojene konfiguracije postrojenja, koja čini da cena postrojenja bude veća, a zbog cene opreme koja se ugrađuje u postrojenje i koja je projektovana da radi na višim naponskim nivoima. Najčešće konfiguracije uključuju postrojenja sa jednostrukim, dvostrukim sistemom glavnih sabirnica ili u novije vreme konfiguracije sa glavnim sabirnicama u vidu prstena. Broj sabirnica, raspored rastavljača i prekidača ili drugih sklopnih uređaja određuju fizičku konfiguraciju.

Od usvojene glavne šeme postrojenja očekuje se, da obezbedi:

- Pouzdan rad postrojenja,
- Elastičnost u smislu postizanja više uklopnih stanja,
- Ekonomičnost (da šema ne bude preopterećena skupim elementima),
- Jednostavnost i preglednost što olakšava eksploataciju, a kasnije i samo održavanje.

Dovode i odvode (polja) čine elementi postrojenja koji se vezuju na sabirnice radi dovodenja i odvođenja električne energije. Ovde dajemo neke od najvažnijih i najčešće korišćenih varijanti: Šema povezivanja sa **jednostrukim sistemom glavnih sabirnica** (slika 1).

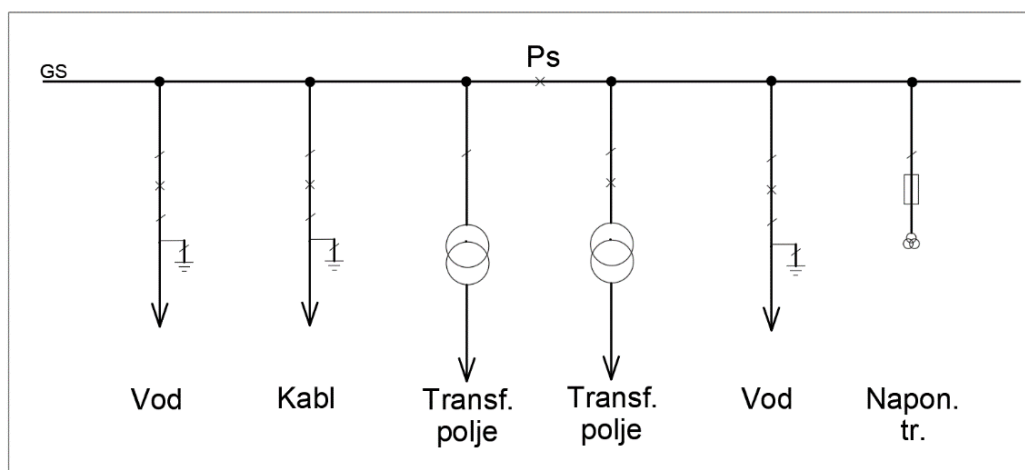


Slika 1: Jednostruki sistem glavnih sabirnica

2.2 Glavne osobine razvodnih postrojenja sa jednostrukim sabirnicama

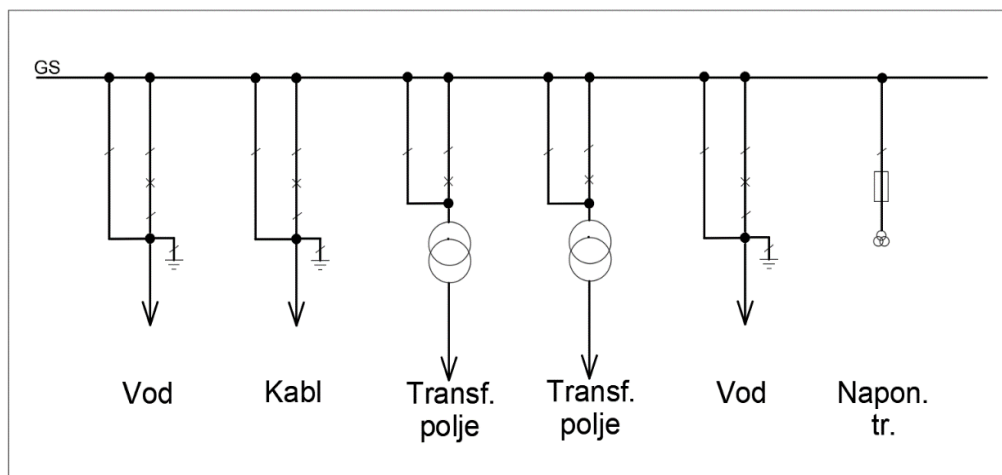
Jednostavna konfiguracija, koja je jeftinija i preglednija za manipulaciju, kvar na sabirnicama dovodi do ispada celog razvodnog postrojenja. Ova konfiguracija postrojenja se primenjuje, kad zastoji u napajanju ne izazivaju velike štete kod potrošača, kao što su industrijska postrojenja. U cilju poboljšanja i ublažavanja negativnih osobina postrojenja sa jednostrukim sabirnicama u praksi se često koriste hibridna rešenja kao što su:

- Konfiguracije sa jednostrukim sabirnicama sa podužnim, sekcionim rastavljačem ili prekidačem (slika 2),



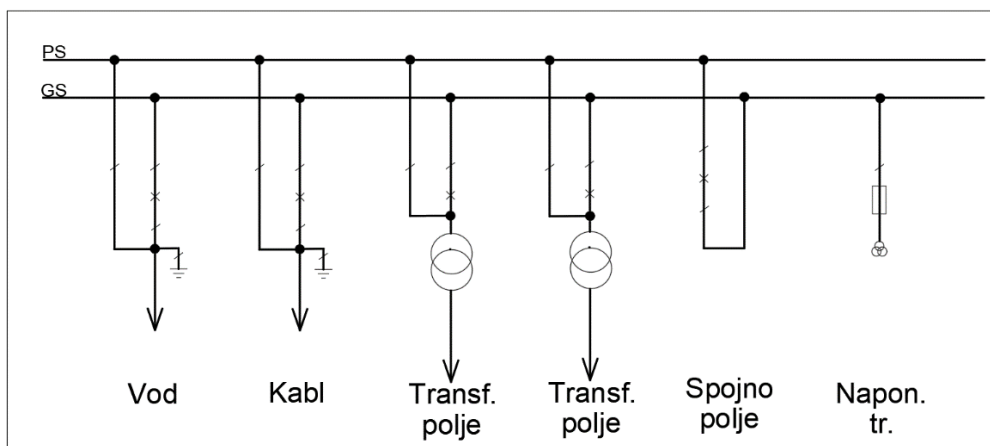
Slika 2: Jednostruki sistem glavnih i ugrađenim sekcionim rastavljačem ili prekidačem

- Konfiguracije sa jednostrukim glavnim sabirnicama i sa podužnim rastavljačima dalekovodnim poljima (slika 3),



Slika 3: Jednostruki sistem glavnih sabirnica, sa ugrađenim podužnim rastavljačima u dalekovodnim poljima

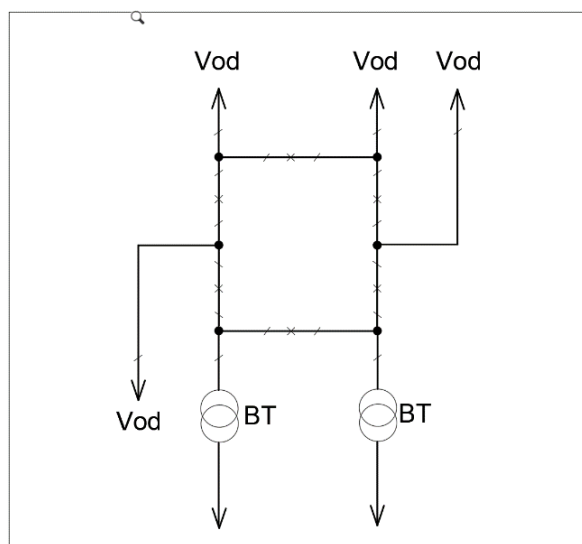
- Konfiguracije sa jednostrukim glavnim sabirnicama i sistemom pomoćnih sabirnica (slika 4),



Slika 4: Jednostruki sistem glavnih sabirnica, (GS) i ugrađenim sistemom pomoćnih sabirnica (PS)

- **Konfiguracija sa jednostrukim glavnim sabirnicama i prekidačima u prstenu** (najčešće primenjena u novije vreme) koristi se kod visokonaponskih transformatorskih stanica naponskog nivoa $\geq 110\text{kV}$. Zbog specifičnosti konfiguracije, imamo da svaki prekidač pripada susednom polju što omogućava:
 - da kvar na sabirnicama izbacuje samo deo postrojenja pogođen kvarom, a ostatak pogona ostaje pod napajanjem (samo jedan dovod ispada iz pogona),
 - prilikom kvara ili remonta prekidača ni jedan vod ne ispada iz pogona.

Mana ove konfiguracije postrojenja, je manja preglednost prilikom manipulacija sa opremom, veća investiciona vrednost postrojenja i to što se prilikom isključenja/uključenja voda mora manipulirati sa dva prekidača, kao na slici 5.

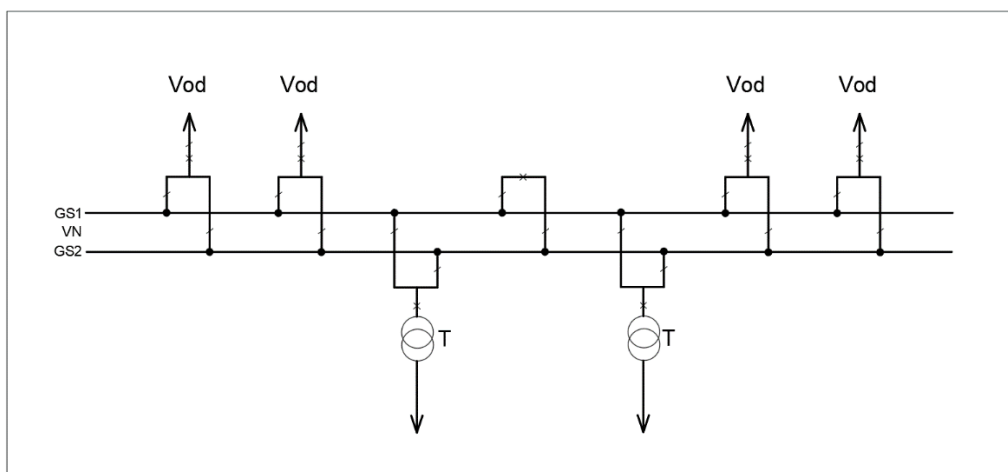


Slika 5: Jednostruki sistem glavnih sabirnica, sa ugrađenim prekidačima u prstenu, „američka“ varijant

2.3 Glavne osobine razvodnih postrojenja sa dvostrukim sistemom sabirnica

Šeme povezivanja sa dvostrukim sistemom sabirnica - „Evropska“ varijanta

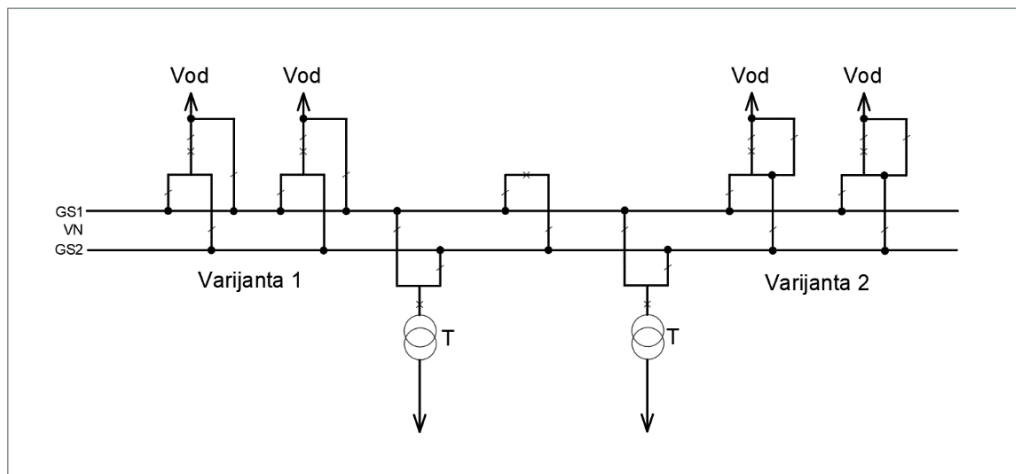
Prednost ove konfiguracije postrojenja da se izvodi dovoda/odvoda prebacuju sa jednog na drugi sistem sabirnica, gde je moguće formirati jedan čvor ili dva električno odvojena čvorišta, što ovu konfiguraciju čini veoma elastičnom u radu (manipulacije u postrojenju su moguće bez prekida napajanja), slika 6.



Slika 6: Dvostruki sistem glavnih sabirnica (GS), „Evropska“ varijanta

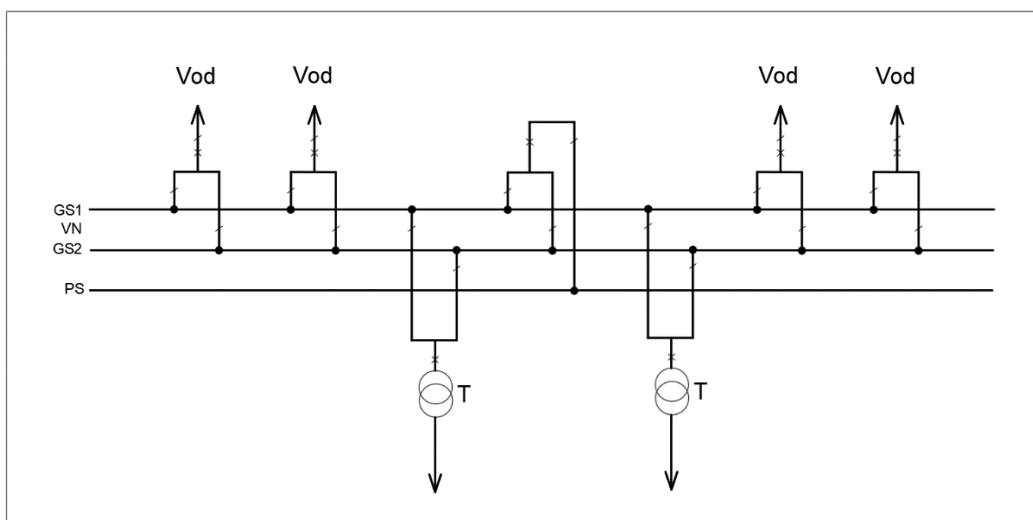
Nedostaci se ogledaju u složenijoj konfiguraciji, u većoj ceni postrojenja i većom površinom za instalaciju opreme. Kod ove konfiguracije kvar na prekidaču u polju izaziva ispad priključnog voda (prevazilazi se dodavanjem pomoćnog sistema sabirnica), dok kvar na sabirnicama, rastavljačima jednog sistema sabirnica dovodi do ispada dela postrojenja pogođenim kvarom. U cilju smanjivanja navedenih nedostaka usvojene konfiguracije pribegava se hibridnim rešenjima i to:

- Ugradnjom podužnog rastavljača, za privremeno premošćenje prekidača koji se remontuje, a ulogu prekidača preuzima prekidač u spojnom polju. Ovaj tip konfiguracije pogodan je u manjim i važnim priključnim postrojenjima, slika 7.



Slika 7: Dvostruki sistem glavnih sabirnica (GS), „Evropska“ varijanta sa ugrađenim podužnim rastavljačem (Varijanta 1 i 2)

- Kod velikih postrojenja sa velikim brojem polja (preko 10), koristi se rešenje sa dvostrukim sistemom glavnih sabirnica i pomoćnim sistemom sabirnica. Kod remonta na prekidačima, dovod pogođen kvarom se prebacuje na pomoćne sabirnice, pomoću spojnog polja (PS), slika 8.

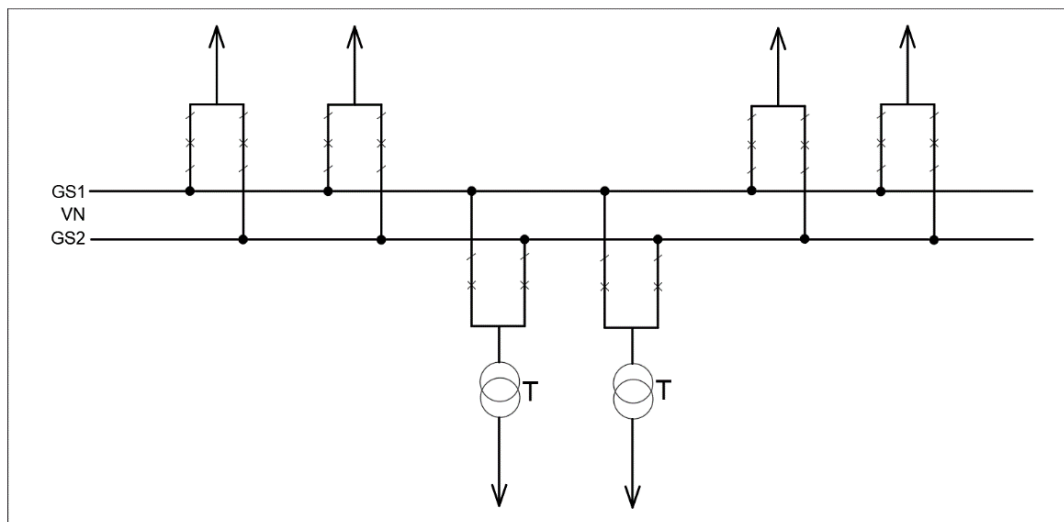


Slika 8: Dvostruki sistem glavnih sabirnica (GS), „Evropska“ varijanta sa ugrađenim sistemom pomoćnih sabirnica

„Evropska“ šema dvostrukih sistema glavnih sabirnica (GS), sa ugrađenim sistemom pomoćnih sabirnica odgovara šemi postrojenja koja je bila zastupljena u prenosnoj mreži Srbije (npr. RP 400kV Mladost) za pitna čvorišta u kojima se nalaze veliki proizvodni objekti.

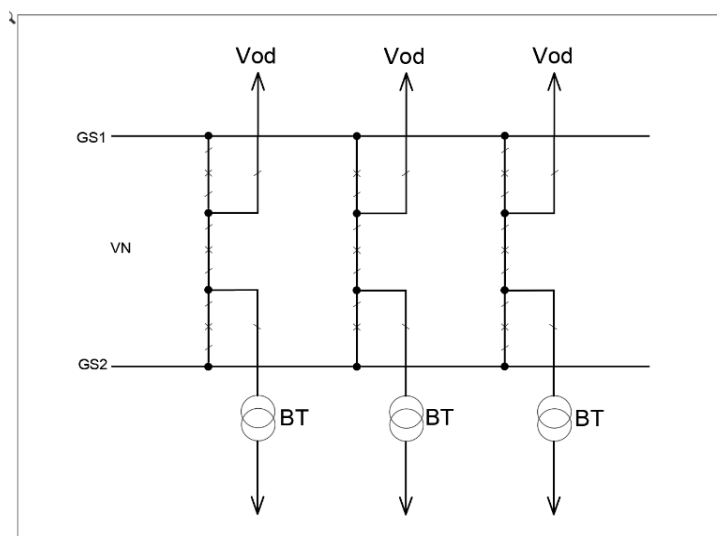
2.4 Šeme povezivanja sa dvostrukim sistemom sabirnica - „Američka“ varijanta

Šema povezivanja koja se najviše primenjuje u Americi je konfiguracija sistema sa dvostrukim sistemom sabirnicama gde se u svakom polju, ugrađuju po dva prekidača. Nedostatak ove konfiguracije je veća investiciona vrednost i veća površina za instalaciju opreme. Ova konfiguracija je veoma elastična i remont prekidača ne dovodi do prekida napajanja potrošača i kod ove konfiguracije nije potrebna ugradnja spojnog polja, slika 9.



Slika 9: Dvostruki sistem glavnih sabirnica (GS), „Američka“ varijanta

Kao hibridno rešenje između ove dve varijante postrojenja, sve više se primenjuje varijanta sa dvostrukim sistemom sabirnica i „1,5 prekidačem u polju“. Prednosti ove konfiguracije su elastičnost u radu, prekidač koji se remontuje se brzo premošćuje. Kod ove varijante imamo ugradnju manjeg broja prekidača od varijante postrojenja sa „američkom“ šemom. Mana je veća investiciona vrednost, a isključenje bilo kog elementa sistema (rastavljača, prekidača) u polju, zahteva isključenje dva prekidača, slika 10.



Slika 10: Sistem sa dvostrukim glavnim sabirnicama (GS) i „1,5 prekidačem u polju“, „Američka“ varijanta

U narednoj tabeli data je uporedna analiza konfiguracija postrojenja koje su predmet rada, gde su predstavljeni zahtevi za raspoloživim prostorom kao i relativni troškovi koji se moraju uzeti u obzir, kako bi se postigla željena pouzdanost postrojenja (tabela 1.)

Tabela 1: Uporedna analiza prezentovanih konfiguracija postrojenja

Konfiguracija	Pouzdanost	Faktor troškova	Relativni Troškovi	Fizički prostor
Jednostruke sabirnice	Najmanje pouzdani - pojedinačni ispad može da izazove potpuni ispad postrojenja	Najmanj trošak, Po jedan prekidač po polju	100%	Mala oblast –manje elemenata postrojenja
Jednostruke sabirnice sa prekidačima u prstenu	Visoka pouzdanost - pojedinačni ispad izoluje kvar	Umereni troškovi, više elemenata u sistemu	114-156%	Veća oblast sa povećanjem, broja polja
Dvostruke sabirnice „Evropski“ tip postrojenja	Visoka pouzdanost u slučaju kvara, jednog polja ili remonta prekidača	Visoki toškovi, prekidač polju	180%	Veća oblast više elemenata po polju
Dvostruke sabirnice „Američki“ tip postrojenja	Visoka pouzdanost u slučaju kvara, jednog polja ili remonta prekidača, kod ove varijante nije potrebno spoljno polje	Visoki toškovi, dva prekidača po polju	214%	Veća oblast više elemenata po polju
Dvostruke sabirnice Sa „1,5“ prekidačem po polju	Visoka pouzdanost u slučaju kvara, broj prekidača veći nego u „Evropskoj“ šemi, a manji nego u „Američkoj“	Umereni troškovi, više komponentati, 1,5 prekidača po polju	158%	Veća oblast više elemenata po polju

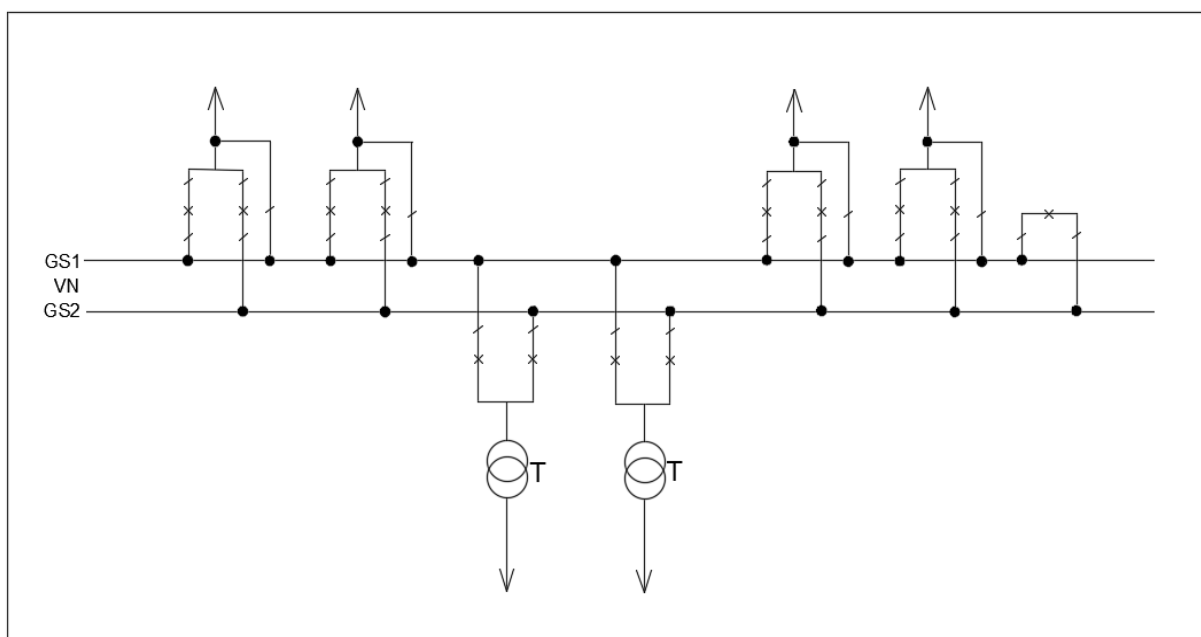
3 ODABIR KONFIGURACIJE RAZVODNOG POSTROJENJA ZA SPECIFIČNOG PROIZVOĐAČA

Polazeći od CIGRE upitnika u kojem je navedena učestalost ispada opreme postrojenja (tabela 2.) može se zaključiti da je prekidač najosetljiviji element postrojenja sa stanovišta ispada (12 puta veća frekvencija ispada od rastavljača).

Tabela 2: Izvod iz CIGRE upitnika

Equipment	Third CIGRE survey in 2004-2007			Fourth CIGRE survey in 2014-2017		
	Populations	Major failures	Frequency	Populations	Major failures	Frequency
CB	278,480 CB-year	828	0.2973 %	597,990 CB-year	2,850	0.4766 %
DS	706,003 DS-year	1,624	0.2300 %	1,878,778 DS-year	735	0.0391 %
ES	218,356 ES-year	335	0.1534 %	246,492 ES-year	72	0.0292 %
IT	1,288,695 IT-year	686	0.0532 %	935,439 IT-year	1,325	0.1416 %
GIS	88,948 CB bay-year	326	0.3665 %	236,578 CB bay-year	191	0.0807 %
MOSA	---		---	564,469 SA-year	466	0.0826 %
VCB	---		---	2,538,436 CB-year	374	0.0147 %
GCB	---		---	2,306 CB-year	4	0.1734 %

Zbog toga je odabrano rešenje sa dva sistema sabirnica, Američke varijante konfiguracije. Prednosti ove varijante je i to što nepostoji spojno polje. Kao dalja razrada ove varijante postoji mogućnost, u zavisnosti od broja priključnih vodova i ugroženosti od plasmata energije pri neraspoloživosti nekog dalekovoda, da se dodaju i podužni (obilazni) rastavljači, sa spojnim poljem sistema glavnih sabirnica, slika 11, a kako bi se neraspoloživost polja svela na minimum. Mana ove konfiguracije je njena investiciona vrednost kao i raspoloživi prostor.



Slika 11: Dvostruki sistem glavnih sabirnica (GS), „Američka“ varijanta sa ugrađenim podužnim rastavljačem i spojnim poljem

U ovoj varijanti podužni rastavljači umesto u dalekovodnim poljima mogu biti i u transformatorskim poljima a u zavisnosti od instalisanih snaga transformatora i elektrane a uvažavajući kriterijum N-1 u broju raspoloživih transformatora.

Za proračun pouzdanosti odabranih varijanti šema postrojenja može se koristiti metoda selektivnog pretraživanja, koja predstavlja prilagođenu metodu minimalnih preseka. Primena metode obuhvata definisanje potreba razvodnog postrojenja u pogledu prekida transformacije, nepotpunog tranzita električne energije kao i plasmana električne energije. Elementi šeme postrojenja bi se podelili u blokove gde bi se za svaki blok izračunao pokazatelj pouzdanosti svih elemenata, koji sačinjavaju taj blok. Pregledom šeme postrojenja utvrdio bi se ispad blok koji dovodi do prekida razmatrane funkcije. Proračun uvaževa učestanost pojave aktivnih kvarova opreme, u koje spada i otkaz delovanja prekidača.

Učestanost f , neraspoloživost u i trajanje kvarova r blokova izračunava se pomoću izraza (sumom po k obuhvaćeni su svi elementi opreme bloka):

$$f = \sum_k f_k \quad u = \sum_k f_k * r_k \quad r = \frac{\sum_k f_k * r_k}{f} = \frac{u}{f}$$

U navedenoj formuli za učestanost bloka moraju se uzeti svi pojedinačni elementi kao što su: rastavljači, prekidači, merni transformatori kao i odvodnici prenapona.

4 ZAKLJUČAK

Pouzdanost opreme i razvodnih postrojenja, u elektroenergetskim sistemima je od velikog značaja, za siguran, pouzdan i kvalitetan prenos električne energije kroz prenosni sistem. Može doći do velikih kvarova opreme, razvodnih postrojenja i do značajnih prekida u isporuci električne energije. Loša pouzdanost doprinosi većim troškovima rada i održavanja sistema od strane operatora prenosnog sistema, a takođe utiče i na povećanje troškova za klijente koji se priključuju na prenosni sistem.

Takođe, ovakve analize mogu da ukažu projektantima na početni izbor konfiguracije postrojenja pri pruključenju specifičnih proizvođača. Konačno, sama analiza stvara prostor za dalja istraživanja i buduće radove, gde bi se moralo uzeti celokupni pokazatelji koji sadrže: učestanost kvarova, dužinu trajanja kvaraova, tehno ekonomski pokazatelj obima i značaja postrojenja. S obzirom da se u prenosnoj mreži Srbije mogu očekivati mali broj specifičnih proizvođača u odabiru šeme postrojenja odabran je predlog šeme postrojenja sa dvostrukim sistemom glavnih sabirnica (GS), „Američka“ varijanta i sa ugrađenim podužnim rastavljačem i spojnim poljem, koje sa stanovišta sigurnosti predstavlja najbolje rešenje.

5 LITERATURA

- [1] CIGRE fourth reliability survey on switching equipment- Hiroki Ito, Frank Richter, Robert le Roux, Wayne Pepper On behalf of CIGRE WG A3.48
- [2] Nuclear maintenance Applications Center: Switchyard Equipment Application and Maintenance Guide, 2012