

Mario Jurković, mag. ing. el.  
Končar - Distributivni i specijalni transformatori d.d.  
[mario.jurkovic@koncar-dst.hr](mailto:mario.jurkovic@koncar-dst.hr)

Saša Grdinić, mag. ing. mech.  
Končar - Distributivni i specijalni transformatori d.d.  
[sasa.grdanic@koncar-dst.hr](mailto:sasa.grdanic@koncar-dst.hr)

## KOMPENZACIJSKA PRIGUŠNICA S FUNKCIJOM PETERSENOVE PRIGUŠNICE

### SAŽETAK

U zajedničkom kotlu nalaze se aktivni dijelovi triju jednofaznih prigušnica spojenih u spoj zvijezda i zajedno čine trofaznu prigušnicu. Na poklopcu trofazne prigušnice nalaze se tri provodnika za spoj na fazne vodove te jedan provodnik za uzemljenje zvjezdišta. U normalnom pogonu uređaj se ponaša kao kompenzacijska prigušnica, a u slučaju kvara uređaj se ponaša kao Petersenova prigušnica.

U ovom radu opisane su karakteristike i specifičnosti ovakvog proizvoda te namjena u elektroenergetskom sustavu.

**Ključne riječi:** kompenzacijska prigušnica, Petersenova prigušnica, prigušnica za gašenje luka

## SHUNT REACTOR WITH PETERSEN COIL FUNCTIONALITY

### SUMMARY

Three active parts of single-phase reactors are located in the same tank, coupled in wye connection, and together make three-phase reactor. Three bushings for connection to the phase lines and one bushing for the neutral earthing are located on the tank lid. During normal operation the reactor behaves as a shunt reactor and during earth fault it behaves as a Petersen reactor.

This paper describes the characteristics and specifics of this product and its purpose in the electric power system.

**Key words:** shunt reactor, Petersen reactor, Petersen coil, arc suppression coil, arc suppression reactor

## 1. UVOD

Na efikasnost elektroenergetske mreže značajno utječe količina kapacitivne jalove energije koja se generira u mreži te koja se prenosi mrežom. Zbog toga je poželjno smanjiti količinu kapacitivne jalove energije u mreži, a jedan od načina na koji se to može postići je ugradnja kompenzacijske prigušnice. Nadalje, na kvalitetu opskrbe električnom energijom značajno utječe struktura mreže, odnosno duljina i tip mreže (kabelska, nadzemna ili mješovita mreža), način uzemljenja zvjezdišta, učestalost i tip kvarova, odnosno smetnji te ugrađena relejna zaštita. Način uzemljenja nultočke je važan faktor koji utječe na uvjete rada mreže, na vrstu i cijenu opreme koju je potrebno ugraditi te vrstu zaštite i upravljanja mrežom. Različita iskustva dovodila su do raznih načina uzemljenja mreže. Ovisno o načinu uzemljenja nultočke mreža može biti:

- 1) izolirana mreža
- 2) mreža s kompenzacijom struje jednofaznog zemnog spoja
- 3) uzemljena mreža preko male impedancije
- 4) direktno uzemljena mreža

Petersenova prigušnica ugrađuje se u mreže s kompenzacijom struje jednofaznog zemnog spoja (rezonantno uzemljenje), gdje je struja tolikog iznosa da je vjerojatnost samogašenja prolaznih zemnih spojeva znatno smanjena u odnosu na npr. izolirane mreže. Zbog toga prolazni zemni spojevi postaju trajan kvar koji se mora otkloniti isključivanjem. U tom slučaju izolirana mreža gubi svoju glavnu karakteristiku. Pretežno kapacitivna struja kvara može se smanjiti superponiranjem induktivne struje koja se postiže priključivanjem prigušnice u nultočku. Prikladnim podešenjem postižu se uvjeti za samogašenje zemnih spojeva [1] - [3].

Osnovni razlog za ugradnju Petersenovih prigušnica za rezonantno uzemljenje jest povećanje kvalitete opskrbe električnom energijom s gledišta pouzdanosti napajanja, jer se omogućava otklanjanje prolaznih zemnih spojeva bez prekida napajanja. K tome, prigušnicom se kompenzira kapacitivna struja mreže, što je bitno, jer se kapacitivna struja mreže stalno povećava zbog izgradnje kabelske mreže i prelaska na više naponske razine [1].

Kompenzacijska prigušnica s funkcijom Petersenove prigušnice u normalnom pogonu ponaša se kao kompenzacijska prigušnica za kompenzaciju kapacitivne jalove snage, a u slučaju zemljospoja ponaša se kao Petersenova prigušnica koja kompenzira kapacitivnu struju zemljospoja. Ideja jednog uređaja za dvije različite namjene, ovisno o stanju u mreži, potekla je od strane elektrodistribucija u Finskoj koje se susreću s problemima kapacitivne jalove snage i kvarovima u izrazito kabelskim mrežama u kojima dolazi do zemljospoja. Na ovaj način postignuto je kompaktno rješenje s ciljem smanjenja cijene te dimenzija i mase, što je često ključan faktor kod kupaca zbog ograničenja na mjestu ugradnje.

## 2. KOMPENZACIJSKA PRIGUŠNICA

Na dugim visokonaponskim prijenosnim vodovima te u podzemnim kabelima može se proizvesti značajna količina kapacitivne jalove snage koju je potrebno kompenzirati. Ta kompenzacija vrši se kompenzacijskim prigušnicama koje se spajaju na vodove ili kabele. Induktivna jalova snaga prigušnice može biti fiksna ili se može podešavati upravljanjem kutom preko elektronike, DC magnetiziranjem jezgre ili otcjepima u namotu [2], [4].

### 2.1. Karakteristični parametri kompenzacijske prigušnice

Karakteristični parametri kompenzacijske prigušnice su [2]:

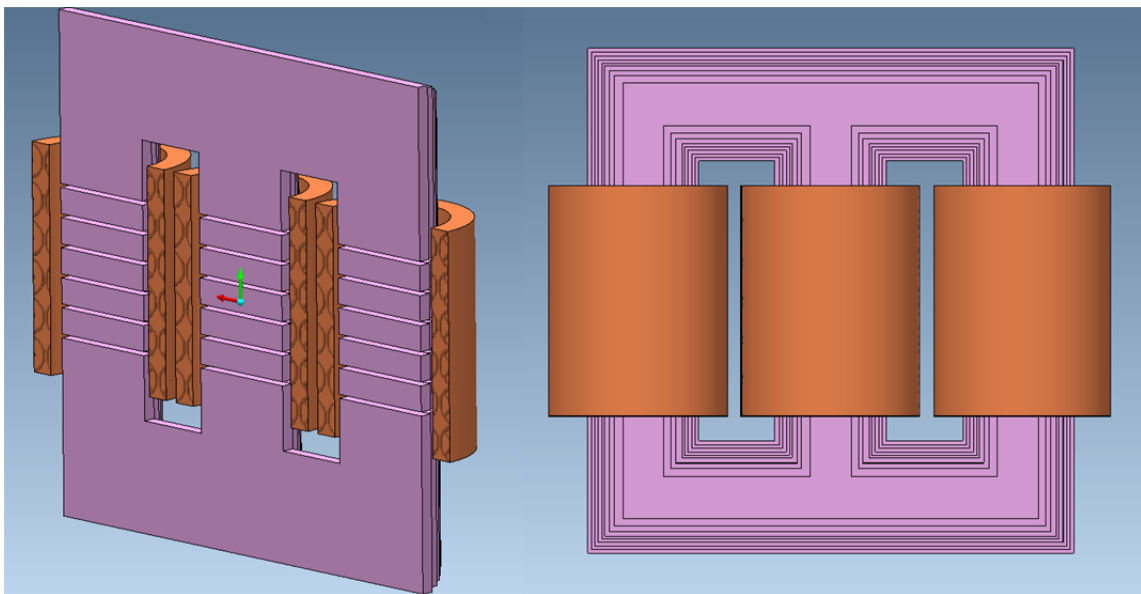
- nazivni napon – napon pri nazivnoj frekvenciji koji se može pojaviti između linijskih priključaka trofazne prigušnice ili između priključaka jednofazne prigušnice
- nazivna snaga – jalova snaga kompenzacijske prigušnice specificirana za rad na nazivnom naponu i nazivnoj frekvenciji
- nazivna struja – linijska struja određena nazivnom snagom i nazivnim naponom
- nazivna reaktancija – reaktancija specificirana na nazivnom naponu i nazivnoj frekvenciji u omima po fazi. Određena je nazivnom snagom i nazivnim naponom
- nulta reaktancija trofazne prigušnice spojene u zvijezdu – reaktancija po fazi pri nazivnoj frekvenciji jednaka trostrukoj reaktanciji mjerenoj između kratkospojenih

faznih priključaka i nultog priključka (omjer nulte i nazivne reaktancije ovisi o izvedbi prigušnice, odnosno jezgre prigušnice)

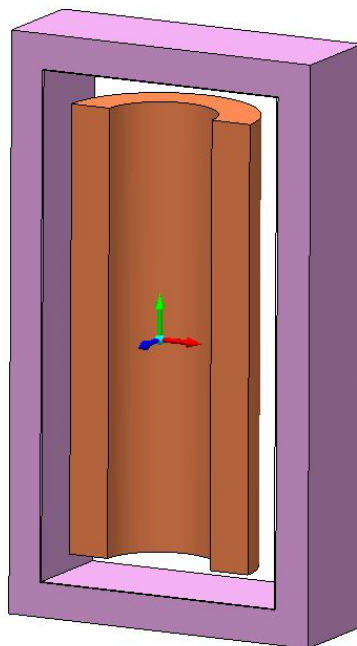
## 2.2. Izvedba

Kompenzacijske prigušnice obično su uljne i prirodno hladjene, za unutarnju ili vanjsku upotrebu. Mogu biti i suhe, a u tom slučaju su samo za unutarnju montažu. Kompenzacijske prigušnice obično imaju induktivitet podesiv u koracima čime se postiže regulacija jalove snage. Prigušnica treba biti projektirana tako da je na svom opsegu regulacije linearna, kako je propisano u [2], točka 7.4.7.

Kompenzacijske prigušnice mogu biti zračne, tj. bez jezgre, mogu imati jezgru s rasporima što je najčešći slučaj te mogu imati magnetski štiti, odnosno okvir, oko namota. Slika 1 prikazuje presjek jezgre i namota trofazne prigušnice koja ima jezgru s rasporima u stupu gdje se svaki od namota koji predstavljaju jednu fazu nalazi na jednom stupu. Slika 2 prikazuje presjek jezgre, odnosno okvira i namota jednofazne prigušnice koja ima magnetski štiti, odnosno okvir unutar kojeg se nalazi namot.



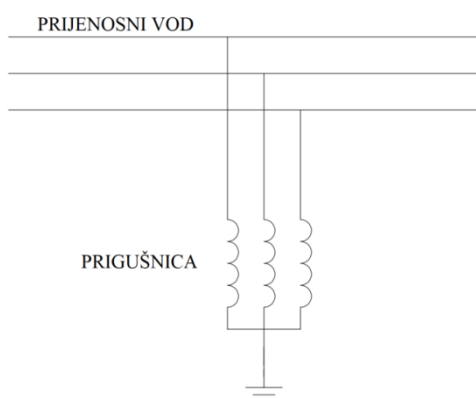
Slika 1. Presjek trofazne prigušnice s jezgrom s rasporima u stupu



Slika 2. Presjek jednofazne okvirne prigušnice

### 2.3. Princip rada

Slika 3 prikazuje trofaznu kompenzacijsku prigušnicu spojenu na prijenosni vod. Prigušnica je spojena u zvijezdu i kroz namote teče struja određena naponom prijenosnog voda i impedancijom prigušnice. S obzirom na to da je impedancija prigušnice dominantno induktivnog karaktera onda je i struja, odnosno jalova snaga induktivnog karaktera. U slučaju kada je prijenosni vod neopterećen raste napon na kraju voda zbog Ferrantijevog efekta te kapacitivna jalova snaga. Induktivna jalova snaga poništava, odnosno kompenzira kapacitivnu jalovu snagu.



Slika 3. Trofazna kompenzacijska prigušnica spojena na prijenosni vod

### 3. PETERSENOVA PRIGUŠNICA

Prigušnice za gašenje luka ili Petersenove prigušnice su jednofazne prigušnice koje se koriste za kompenzaciju kapacitivnih struja koje se javljaju u elektroenergetskom sustavu u slučaju zemljospoja, odnosno kratkog spoja između voda i zemlje. Spajaju se između zvjezdista, energetskog transformatora ili uzemljivačkog transformatora, i zemlje u trofaznom elektroenergetskom sustavu [2].

### 3.1. Karakteristični parametri Petersenove prigušnice

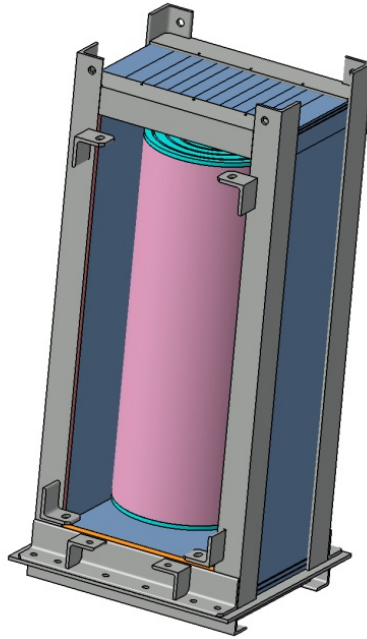
Karakteristični parametri Petersenove prigušnice su [2]:

- nazivni napon – napon koji specificira kupac i mora biti najmanje jednak najvišem naponu koji se može pojaviti između zvjezdišta energetskog transformatora ili uzemljivačkog transformatora i zemlje, tijekom zemljospoja
- maksimalni trajni napon – napon koji specificira kupac i ne smije biti manji od napona koji se može pojaviti u zvjezdištu zbog nesimetrije elektroenergetskog sustava u normalnim pogonskim uvjetima, osim ako je ova vrijednost manja od 10% nazivnog napona, a ako maksimalni trajni napon nije specificiran uzima se da je 10% nazivnog napona
- nazivna struja – struja koju specificira kupac i ne smije biti manja od najveće vrijednosti struje u uvjetima zemljospoja; prigušnica treba biti projektirana da trajno provodi ovu struju, ili za vrijeme trajanja nazivne struje ako je specificirano
- trajanje nazivne struje – vrijeme koje specificira kupac i ne smije biti manje od očekivanog maksimalnog trajanja zemljospoja, osim ako je trajanje nazivne struje trajno
- opseg regulacije – struja koja odgovara nazivnom naponu i frekvenciji može se podešavati tako da se dodaju ili oduzimaju zavoji glavnog namota, mehaničkim mijenjanjem duljine zračnog raspora magnetskog kruga ili uključivanjem/isključivanjem pojedinih namota u paralelni spoj
- pomoćni namot – ako je kupcu potreban pomoćni namot moraju biti specificirani struja, napon i tolerancije na ove vrijednosti; tipične vrijednosti pomoćnog namota su 100 V i 1 A
- sekundarni namot – ako je kupcu potreban sekundarni namot moraju biti specificirani struja, napon i tolerancije na ove vrijednosti; tipične vrijednosti sekundarnog namota su 500 V i 100 A

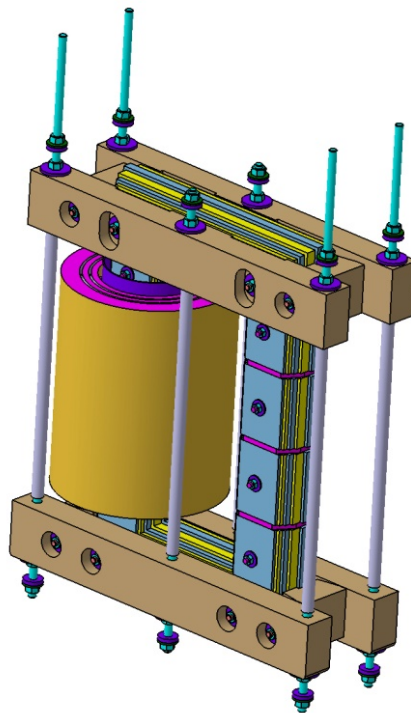
### 3.2. Izvedba

Petersenove prigušnice su, kao i kompenzacijske, najčešće uljne i prirodno hladene, za unutarnju ili vanjsku upotrebu. Petersenove prigušnice obično imaju podesiv induktivitet, u koracima ili kontinuirano, na određenom opsegu, da bi se omogućilo ugađanje prema kapacitetu mreže. Prigušnica treba biti projektirana tako da je na svom opsegu regulacije linearna, kako je propisano u [2], točka 11.4.8. Petersenove prigušnice mogu imati pomoćni namot u svrhu mjerenja i/ili sekundarni namot za spajanje otpornika [2].

Jezgra Petersenove prigušnice izvedena je u obliku okvira koji se slaže od transformatorskog lima. Namot je umetnut u jezgru koja ga zatvara s četiri strane. Konstrukcija je kompleksna jer ima međusobno nepovezane sustave za tlačenje namota i tlačenje limova jezgre. Slika 4 prikazuje aktivni dio okvirne Petersenove prigušnice. Osim jezgre s okvirom, kod Petersenove prigušnice se još koriste i dvostupne jezgre s rasporima u stupovima gdje se na dva stupa nalaze serijski povezani namoti (Slika 5).



Slika 4. Aktivni dio okvirne Petersenove prigušnice



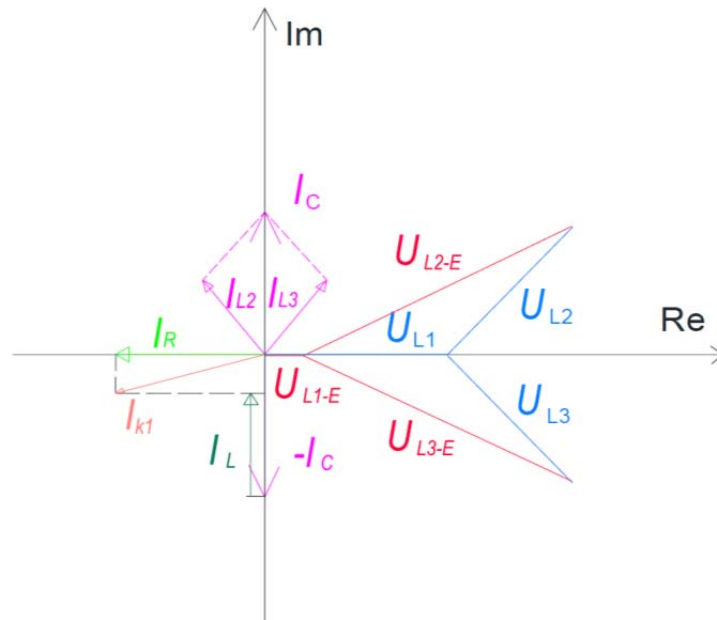
Slika 5. Aktivni dio Petersenove prigušnice s dvostupnom jezgrom s rasporima

### 3.3. Princip rada

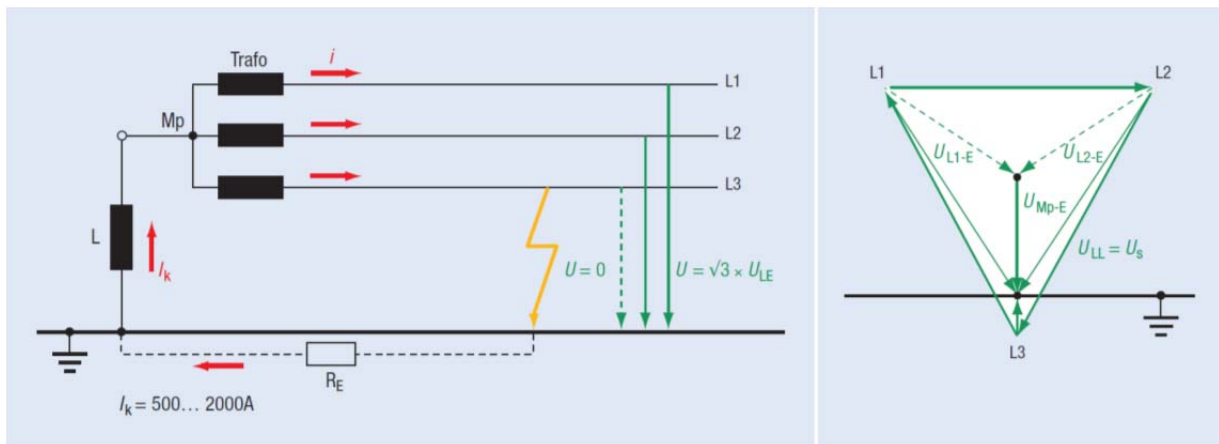
U slučaju zemljospoja jedne faze, ukupni kapacitet mreže ( $C_e$ ) prema zemlji i induktivitet prigušnice ( $L_{prig}$ ) stvaraju jedan rezonantni krug čija je impedancija teoretski beskonačna. U ovoj situaciji reaktivna struja na mjestu kvara, neovisno o prijelaznom otporu između faze i zemlje, se poništava. Petersenove prigušnice vezane su sa zvjezdastima transformatora, te tako stvaraju paralelni krug s kapacitetima mreže. Regulacijom induktiviteta prigušnice podešava se strujni krug na vrijednost nulte admitancije mreže, pa je vrijednost preostale struje mala. Preostalu struju sačinjava i mala vrijednost radne struje zbog omskog otpora prigušnice te se to koristi za selektivno djelovanje zaštitnih uređaja.

Struja kvara svodi se na nekoliko ampera, što omogućava luku da se sam ugasi. Najveći problem rezonantnog uzemljenja leži u činjenici da se radi o jako malim strujama i da je teško detektirati kvar [1].

Slika 6 prikazuje prilike u mreži za vrijeme kvara u slučaju kad je mreža uzemljena pomoću paralelno spojenog otpornika i ručno podesive prigušnice. Slika 7 prikazuje prilike u mreži uzemljenoj pomoću paralelno spojene ručno podesive Petersenove prigušnice i malooskog otpornika za slučaj jednofaznog kratkog spoja [1].



Slika 6. Prilike u mreži za vrijeme kvara za slučaj uzemljenja pomoću paralelno spojenog otpornika i ručno podesive prigušnice [1]



Slika 7. Prilike u mreži uzemljenoj preko paralelno spojene ručno podesive Petersenove prigušnice i malooskog otpornika za slučaj jednofaznog kratkog spoja [1]

#### 4. PRIMJENA U ELEKTROENERGETSKOM SUSTAVU I ZAHTJEVI TRŽIŠTA

U principu se i kompenzacijska prigušnica i Petersenova prigušnica primjenjuju za kompenzaciju. Kompenzacijska prigušnica primjenjuje za kompenzaciju kapacitivne jalove energije prijenosnog voda čime se povećava učinkovitost prijenosa energije te se postiže regulacija napona i jalove snage. Petersenova prigušnica primjenjuje se za kompenzaciju kapacitivne struje dozemnih kapaciteta zdravih faza tijekom zemljospoja.

Primjena Petersenove prigušnice predstavlja izazov i korak naprijed u smanjenju prekida isporuke električne energije, u poboljšanju sigurnosti u svezi napona dodira i smanjenju troškova izgradnje elektroenergetskih objekata. U današnje vrijeme zbog osjetljivosti potrošača i vrlo kratka pauza prije brzog automatskog ponovnog uključanja se smatra prekidom isporuke električne energije. S Petersenovom prigušnicom smanjuje se struja jednofaznog zemljospoja, a time i prolazni kvarovi sa zemljom koji uzrokuju kratkotrajne prekide. Istodobno smanjuju se i vrijednosti potencijala, a dopuštene vrijednosti otpora uzemljenja u elektroenergetskim objektima povećavaju se zbog manjih struja kvara. Sve to znači smanjenje troškova prilikom izvođenja sustava za uzemljenje. Navedene prednosti dolaze do izražaja u onim objektima koji napajaju zračnu mrežu, gdje su struje zemljospoja relativno velike i gdje je zvjezdište uzemljeno preko maloomskog otpornika [1].

Prednosti Petersenove prigušnice [1]:

- smanjena opasnost od previsokih potencijala
- zahvaljujući maloj struji kvara omogućeno je samogašenje kvarova, te stoga svaki kvar ne uzrokuje ispad voda u usporedbi s maloomskim uzemljenjem, što pridonosi povećanju kvalitete opskrbe električnom energijom
- prilikom gašenja električnog luka povratni napon sporije raste nego za slučaj ostalih načina uzemljenja te je stoga prag samogašenja povećan; iz istog se razloga manji broj jednopolnih kvarova razvija u višepolne kvarove pa je i s tog aspekta broj kvarova manji za slučaj rezonantnog uzemljenja nego pri izoliranom zvjezdištu (pri jednakim uvjetima)
- omogućava se ispravno djelovanje vatmetarske zaštite

Mane Petersenove prigušnice [1]:

- slaba osjetljivost na visokoomske kvarove (eventualna potreba za sofisticiranijom zaštitom)
- kompenzacijska prigušnica s opremom predstavlja dodatni investicijski trošak

Ovakva rješenja uzemljenja preko Petersenove prigušnice najčešće su tražena na sjevernim tržištima, u zemljama kao što su Švedska i Finska. Razlog tome leži u činjenici da na tim tržištima postoji velik udio kableske mreže te su problemi s kapacitivnim strujama u takvim mrežama izraženi. Još jedan razlog su i pravila na tržištu električne energije gdje su propisani penali u slučaju prekida napajanja dužem od određenog vremenskog razdoblja, a i kvaliteta opskrbe električne energije utječe na poziciju na tržištu.

Za kompenzacijsku prigušnicu se u pravilu uvijek traži trajni rad, a za Petersenovu prigušnicu najčešći zahtjevi kupaca su da prigušnica mora izdržati struju kvara 5 do 15 minuta, a ponekad i 2 sata ili trajno. To ovisi o mjestu ugradnje i zaštitnoj opremi na mjestu ugradnje. U slučaju da je to mjesto izolirano potrebno je određeno vrijeme za odrediti točnu lokaciju kvara pa ovisno o tome može biti zahtjev da je prigušnica projektirana za 2 sata ili trajnu struju kvara. Što je zahtjev za trajanjem veći, prigušnica je veća i skuplja. Još neki od zahtjeva kupaca, za obje vrste prigušnica, su da promjena nulte impedancije u ovisnosti o naponu ne smije biti veća od 2% te da omjer radne i reaktivne komponente nulte impedancije ne smije biti veći od 2 do 3%.

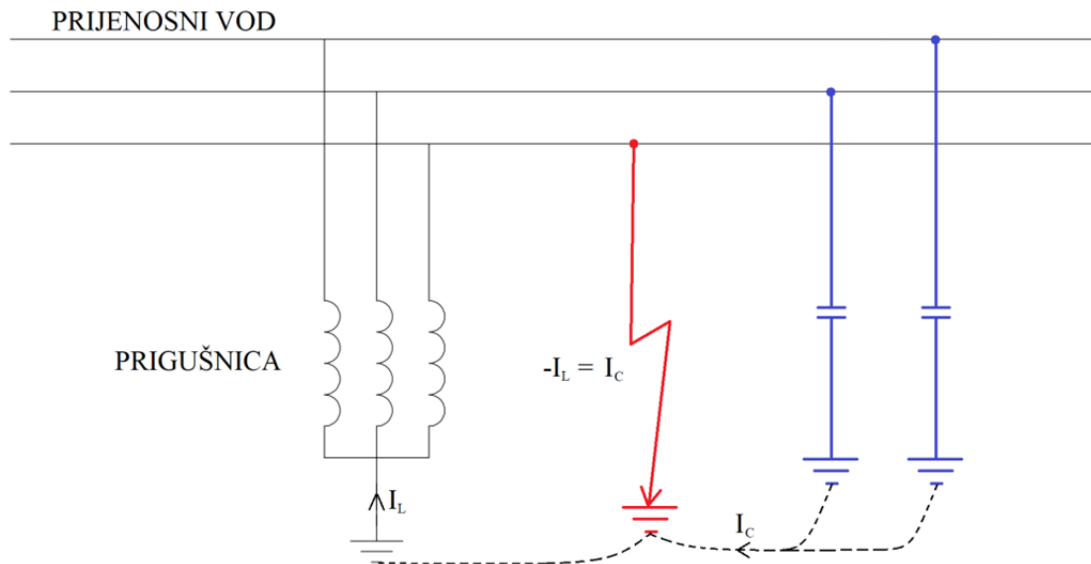
## **5. PRIGUŠNICA ZA KOMPENZACIJU JALOVE SNAGE I STRUJE ZEMLJOSPOJA**

Prigušnica za kompenzaciju kapacitivne jalove snage u normalnom pogonu te kompenzaciju kapacitivne struje kvara u zemljospoju izvedena je s vanjske strane kao uobičajena trofazna kompenzacijska prigušnica, s jezgrom s raspoređivanjem u stupu, spojena na prijenosni vod. Dok uobičajena kompenzacijska prigušnica ne mora biti uzemljena, ova prigušnica za dvije namjene, tj. za kompenzaciju jalove snage i struje zemljospoja, obavezno mora biti uzemljena da kroz nju može teći struja u slučaju zemljospoja. Osim toga, prema zahtjevima kupca, direktna i nulta impedancija moraju biti jednake, dok su kod uobičajene kompenzacijske prigušnice nulta i direktna impedancija u pravilu različite zbog trostupne jezgre kod koje se dio nultih tokova zatvara kroz zrak. Zbog toga je potrebno napraviti izvedbu kod koje će uvjet jednakosti direktne i nulte komponente impedancije biti zadovoljen.



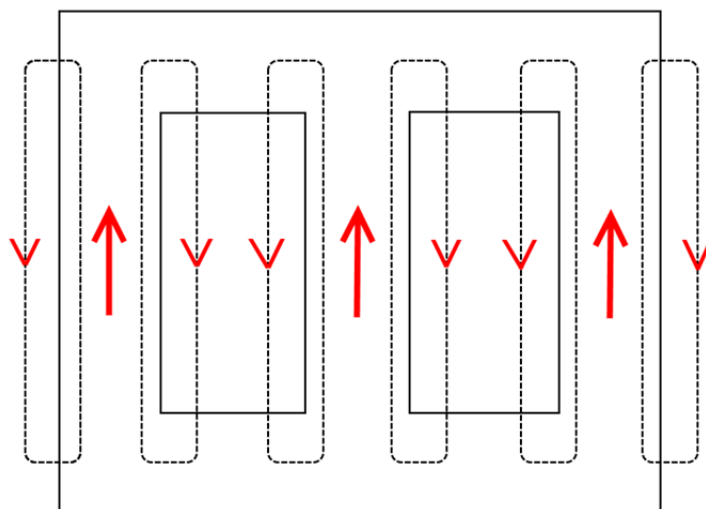
## 5.1. Utjecaj tipa jezgre na nultu impedanciju

U normalnom pogonu (Slika 3) kroz namote prigušnice teku struje trofaznog sustava fazno pomaknute za  $120^\circ$  koje su određene direktnom impedancijom prigušnice. U slučaju zemljospoja (Slika 8) kroz namote prigušnice teku istofazne, odnosno nulte struje koje su određene nultom impedancijom prigušnice.



Slika 8. Trofazna kompenzacijska prigušnica u slučaju zemljospoja

Nulta impedancija prigušnice ovisi o tipu jezgre i putovima kojima se zatvaraju nulti tokovi. Slika 9 prikazuje nulte tokove kroz trostepnu jezgru gdje se vidi da tokovi nemaju drugog puta osim kroz zrak, i za ovakav tip jezgre nulta impedancija iznosi oko 70% iznosa direktne reaktancije [2]. Zbog toga je potrebno odabrati tip jezgre kod kojeg će se nulti tokovi moći zatvoriti kroz željezo, a to je moguće kod peterostupne jezgre ili kod tri odvojena magnetska kruga. U ovom slučaju je odabrana druga opcija, odnosno tri odvojene jednofazne prigušnice koje se nalaze na dvostupnim jezgrama

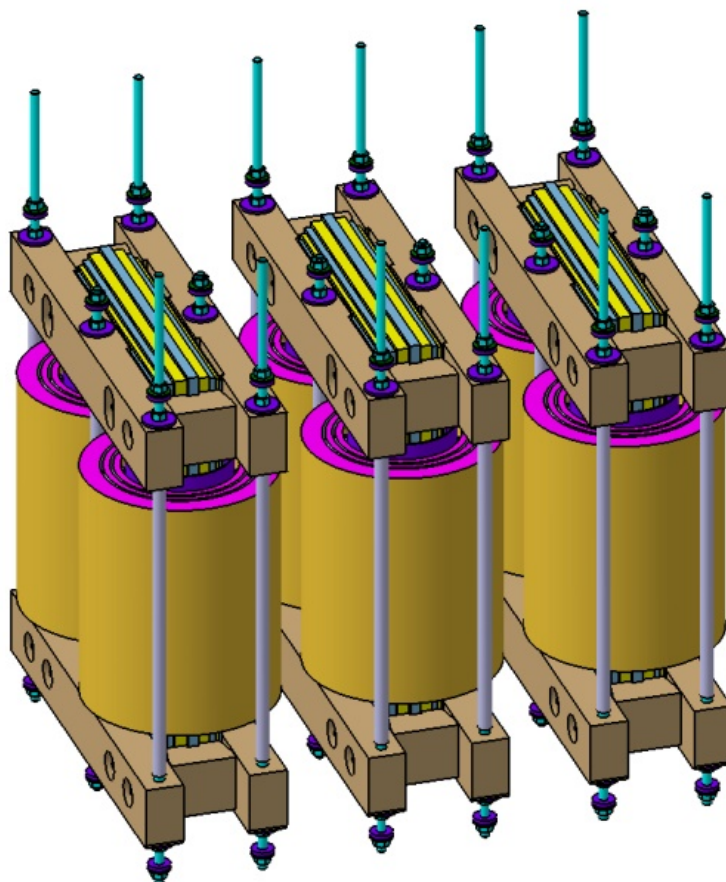


Slika 9. Nulti tokovi kroz trostepnu jezgru

## 5.2. Konstrukcijsko rješenje

Slika 10 prikazuje aktivni dio kompenzacijske prigušnice s funkcijom Petersen prigušnice koja je izvedena kao tri jednofazne prigušnice spojene u zvijezda spoj. Jednofazna prigušnica sastoji se od

dvostupne jezgre s rasporima u stupovima te dva serijski spojena namota koji se nalaze na stupovima. Ovakvom izvedbom je magnetsko međudjelovanje susjednih jednofaznih prigušnica zanemarivo te se tokovi u nultom i direktnom sustavu zatvaraju kroz isti put, pa su nulta i direktna impedancija jednake.



Slika 10. Aktivni dio trofazne kompenzacijske prigušnice s funkcijom Petersen prigušnice

Sila u stupu jezgre titra dvostrukom frekvencijom mreže i iako je manjeg iznosa u odnosu na silu u stupu bez raspora kod transformatora, zbog manje magnetske indukcije, predstavlja veći problem jer se sustav jezgre sastoji od više dijelova između kojih se nalaze raspori. Naprezanja i vibracije koje se javljaju u vertikalnom smjeru su dominantni i obično su im iznosi 8 do 10 puta veći nego u horizontalnom smjeru. Kako je krutost cijele jezgre kompromitirana korištenjem zračnih raspora u stupovima, potrebno je dodatnim mjerama učvrstiti sustav jezgre kako bi amplituda pomaka uslijed pojave vibracija u sustavu bila što manja.

Kao posljedica vibracija unutar aktivnog dijela, moguće je slabljenje spojeva između pojedinih komponenti što može uzrokovati neispravan rad prigušnice, a na kraju i kvar. Također, bitno je napomenuti da je kod prigušnica manjih dimenzija ekonomski isplativije koristiti kotao sa valovitom stranicom. Konstrukcijski gledano, to je nepovoljnije, jer takva izvedba kotla bolje prenosi vibracije na metalnu konstrukciju, što uzrokuje povećanu razinu buke u okolini takvog uređaja. Kako bi se razina buke zadržala na dopuštenoj razini, potrebno je oslonce aktivnih dijelova izraditi od elemenata koji prigušuju vibracije. Nadalje, krutost dna kotla treba biti veća u odnosu na standardnu izvedbu, jer je dno kotla kritično mjesto preko kojeg će se prenositi vibracije na ostale metalne dijelove.

## 6. ZAKLJUČAK

S obzirom na potrebu kompenzacije jalove snage i regulacije napona te na porast udijela kablskih mreža, strožu regulaciju tržišta električne energije te sve više tvrtki koje se bave distribucijom

električne energije, raste i potreba za proizvodima koji će omogućiti kvalitetno uzemljenje te povećati učinkovitost elektroenergetskog sustava. Proizvod prezentiran u ovom referatu omogućuje kompenzaciju jalove snage te kompenzaciju kapacitivne struje zemljospoja, bez potrebe za ugradnjom dva različita uređaja u mrežu, što smanjuje potreban prostor za ugradnju i cijenu uređaja. Proizvođači transformatora i prigušnica stalno moraju biti u trendu sa zahtjevima tržišta te konstantno razvijati svoje proizvode, nuditi kvalitetna i ekonomski isplativa rješenja.

## **7. LITERATURA**

- [1] S. Ravlić, "Prepoznavanje visokoomskih kvarova u mrežama srednjega napona uzemljenima preko transformatora za uzemljenje zvjezdišta", doktorski rad, Zagreb, 2016.
- [2] IEC 60076-6 Power transformers - part 6 Reactors, prosinac 2007.
- [3] M. Jurković, V. Učović, "Transformator za uzemljenje s Petersenovom prigušnicom u zajedničkom kotlu", 6. (12.) savjetovanje HO CIRED, Zbornik radova, Opatija, Hrvatska, svibanj 2018., SO1-03
- [4] Areva T&D, "Power Transformers vol. 2 Expertise ", prvo izdanje, Areva T&D, kolovoz 2008.