

Damir Karavidović, dipl. inž.
HEP – ODS d.o.o., Zagreb
Damir.Karavidovic@hep.hr

ZAŠTITA OD POREMEĆAJA I KVAROVA U SN MREŽI S DISTRIBUIRANIM IZVORIMA ELEKTRIČNE ENERGIJE

SAŽETAK

Priključenjem i paralelnim pogonom s mrežom većeg broja izvora električne energije, na različitim razinama distribucijske mreže i s vrlo različitim pogonskim značajkama, pogon distribucijske mreže biti će pred nadasve novim izazovima. Na sučeljima naponskih razina i unutar jedne mreže doći će do kritičnih okolnosti paralelnog pogona distribuiranih izvora s mrežom, a to je dvosmjerni tok energije potrošnje i energije kvara.

Do pojave distribuiranih izvora svi tokovi snage bili su s jednim smjerom: iz mreže prijenosa električne energije u distribucijsku mrežu, a u njoj s više na nižu naponsku razinu. To jednostavno stanje mogli su poremetiti tek tokovi jalove kapacitivne snage.

Značajke postojećeg sustava zaštite u distribucijskoj mreži naći će se u drukčijim, izazovnim pogonskim okolnostima jer se postojeći koncept šticećenja oslanja na jedan smjer energije kvara. S gledišta tokova snage u normalnom, poremećenom i kvarnom stanju mreže to znači dvosmjerne tokove snage i među napajanje unutar mreže.

Cilj rada je prikazati okolnosti u kojima će zaštita mreže, zaštita na sučelju mreže i elektrane i zaštita proizvodnih jedinica prepoznavati sve inačice pogonskih i kvarnih stanja i na njih imati pravodoban i djelotvoran odziv.

Ključne riječi: zaštita, distribuirani izvor, paralelni pogon, tokovi snage, odvajanje od mreže.

FAILURE PROTECTION OF MEDIUM VOLTAGE POWER NETWORK WITH DISTRIBUTED ELECTRIC POWER SOURCES

SUMMARY

With connection and parallel drive of the network with a number of electric power sources at different levels of distribution network and very different operating characteristics the plant's distribution network will be above the new challenges. At different voltage levels interface even within a single network will come to the critical circumstances of the parallel drive to a network of distributed resources which is two-way flow of consumption energy and failure energy.

Until the emergence of distributed power sources all power flows were from one direction: from the transmission power network to the distribution power network then within distribution power network from higher to lower voltage level. This simple situation could easily disrupt only the flow of capacitive reactive power.

Features of the existing protection system of the distribution power network will come to different, challenging operating conditions because the existing concept of protection relies on one way flow of failure energy. From the standpoint of power flows in normal, disturbed and failure state of network this means two-way of power flow and the power feeding within the network.

The aim of this paper is to show the circumstances in which the network protection, protection at the interface between network and power plant and protection of production units will recognize all variants of operational and failure situation and have on them a timely and effective response.

Keywords: protection, distributed power source, parallel operation, power flows, network isolation.

1. UVOD

1.1. Značajke distribucijske mreže danas i sutra

Električna energija je nezamjenjiv energent u životu Čovjeka na planeti što Zemlja zovemo, njegovoj rodnoj grudi. Podmirenje i jednog dijela čovjekovih potreba proizvodnjom električne energije iz primarne energije na bazi fosilnih goriva, štetno utječe na planetarnu klimu zbog emisije štetnih tvari (CO_2), a potonje ugrožava život na planeti.

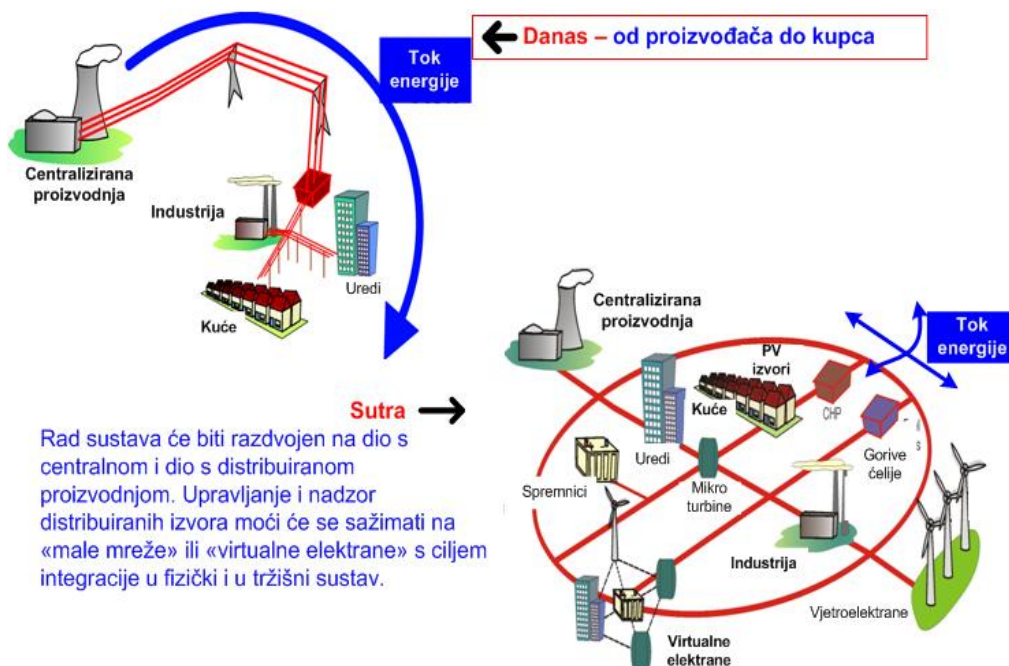
I dok se potrebe Čovjeka za električnom energijom povećavaju, zalihe fosilnih goriva se nezaustavljivo smanjuju, a klimatske promjene se vide i osjete. Svijet živi u energetske paradigmi, Čovjek traži izlaz, jer što će Čovjeku električna energija za danas ako se uništavaju uvjeti za sutrašnji život?

Čovjek današnjice odlučio je pronaći izlaz u smanjenju ukupne potrošnje, u učinkovitoj prijeko potrebnoj potrošnji, u zamjeni električne energije iz izvora sa štetnim emisijama (fosilna goriva) s energijom iz izvora čiju proizvodnju ne prati emisija tvari koje uzrokuju štetne klimatske promjene i k tome im je primarna energija obnovljiva. Veliki umovi čovječanstva predviđali su takvu budućnosti i izvore električne energije s obnovljivom primarnom energijom.

Na tragu takvog pristupa energetske budućnosti Čovjek svakodnevno stvara nove, ili unapređuje korištenje raspoloživih izvora električne energije, od onih najmanje snage, reda 1 kW, do izvora velike snage, reda stotina MW, a doskora će im se u značajnijem broju pridružiti i izvori s pohranom električne energije. Takvi izvori električne energije, priključuju se na prijenosnu i distribucijsku mrežu najčešće raspršeni sve u dilj tih mreža.

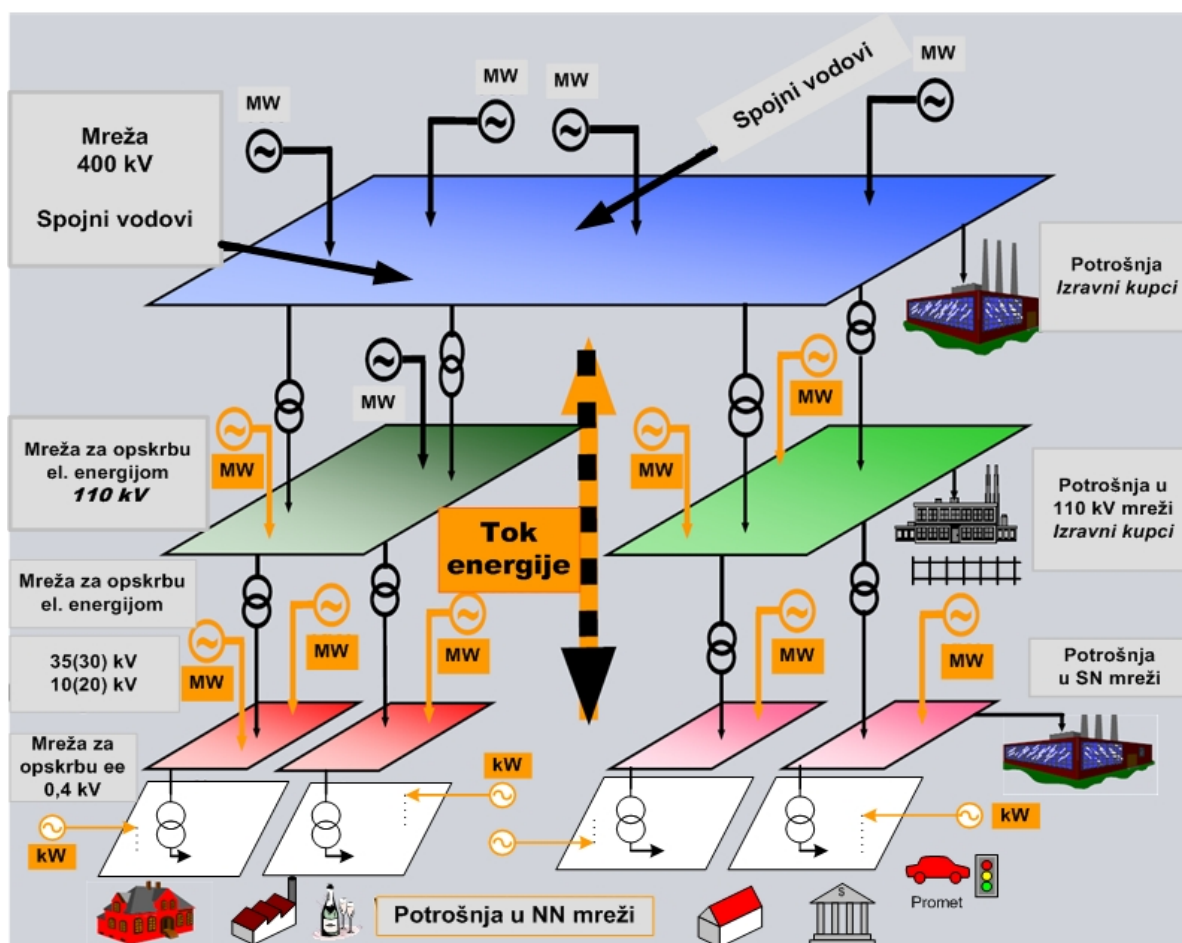
Govorimo o distribuiranim izvorima električne energije s obnovljivom ili neobnovljivom primarnom energijom. Umjesto centralizirane proizvodnje izvora ogromnih snaga, distribuiranu proizvodnju čini veliki broj izvora malih snaga koje su osmišljeno raspoređene po mreži (čim bliže kupcima).

Distribucijska mreža postaje mreža s aktivnim činiteljima, ona postaje distribucijski elektroenergetski sustav. Razlike između jučer, danas i sutra elektroenergetskog sustava, pa napose i distribucijske mreže postaju sve prepoznatljive (Slika 1.)



Slika 1. Jučer – danas – sutra distribucijske mreže

Uz složenije energetske-tehničke procese, pod utjecajem tržišnog elektroenergetskog gospodarstva, događaju se i energetske-komercijalni procesi koji su iznjedrili korisnika mreže (elektrane, kupci i trgovci) kao nezaobilaznog subjekta prema svakom motrištu na elektroenergetski sustav [1]. Uobičajena vertikalna struktura elektroenergetskog sustava se mijenja ponajviše priključenjem brojnih elektrana na prijenosnu mrežu napona 110 kV i distribucijsku mrežu svih naponskih razina (Slika 2.).



Slika 2. Tržišno elektroenergetsko gospodarstvo = mreža + korisnici mreže

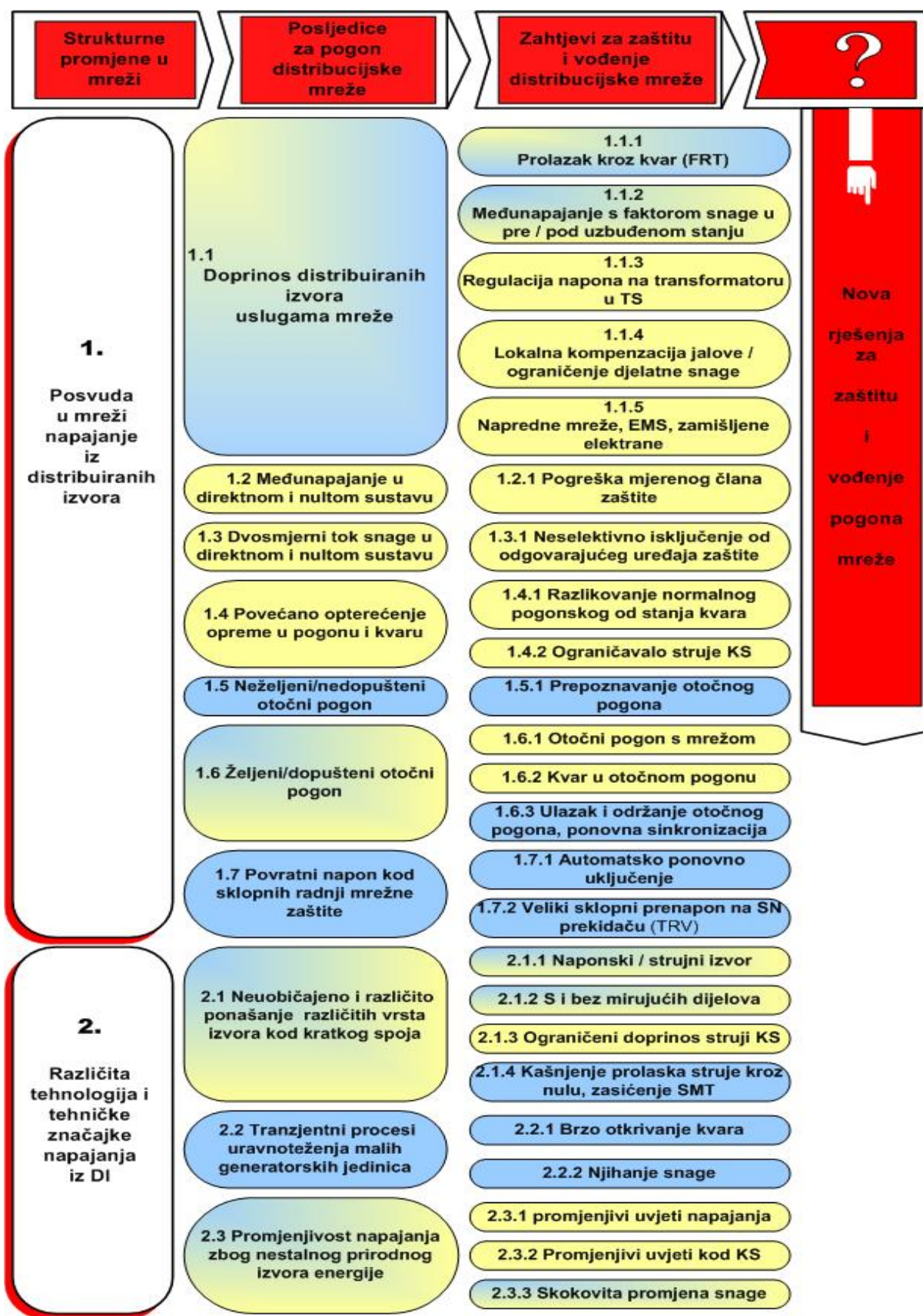
S distribuiranim izvorima i njihovim temeljnim pogonskim značajkama, značajno se mijenjaju okolnosti priključenja i pogona postrojenja korisnika mreže i distribucijske mreže u odnosu na sadašnje bez njih. Pred Operatorom distribucijskog sustava kao i pred korisnikom mreže brojni su izazovi, a među njima i izazovi s gledišta zaštite od poremećaja i kvarova.

1.2. Uvod i sistematizacija problema pred zaštitom od poremećaja i kvarova

U vrijeme priključenja i pogona različitih vrsta elektrana u distribucijskoj mreži, iskazuje se teza o novim zahtjevima koji se postavljaju pred zaštitu činitelja distribucijske mreže. Valja nam se upitati jesu li se uistinu promijenili temeljni zahtjevi koje, od pamtivijeka, postavljamo pred zaštitu? Odgovor je niječan, jer i danas, jednako kao i prije, od zaštite primjerice zahtijevamo:

- Selektivnost* u prepoznavanju i odvajanju činitelja distribucijske mreže koji je u kvaru,
- Brzinu* u prepoznavanju postojanja kvara u razredu milisekundi i odvajanju iz mreže činitelja distribucijske mreže s vremenom sukladno planu stupnjevanja osnovne i rezervne zaštite,
- Pouzdanost* u prepoznavanju poremećaja i kvara te potom u selektivnom djelovanju.

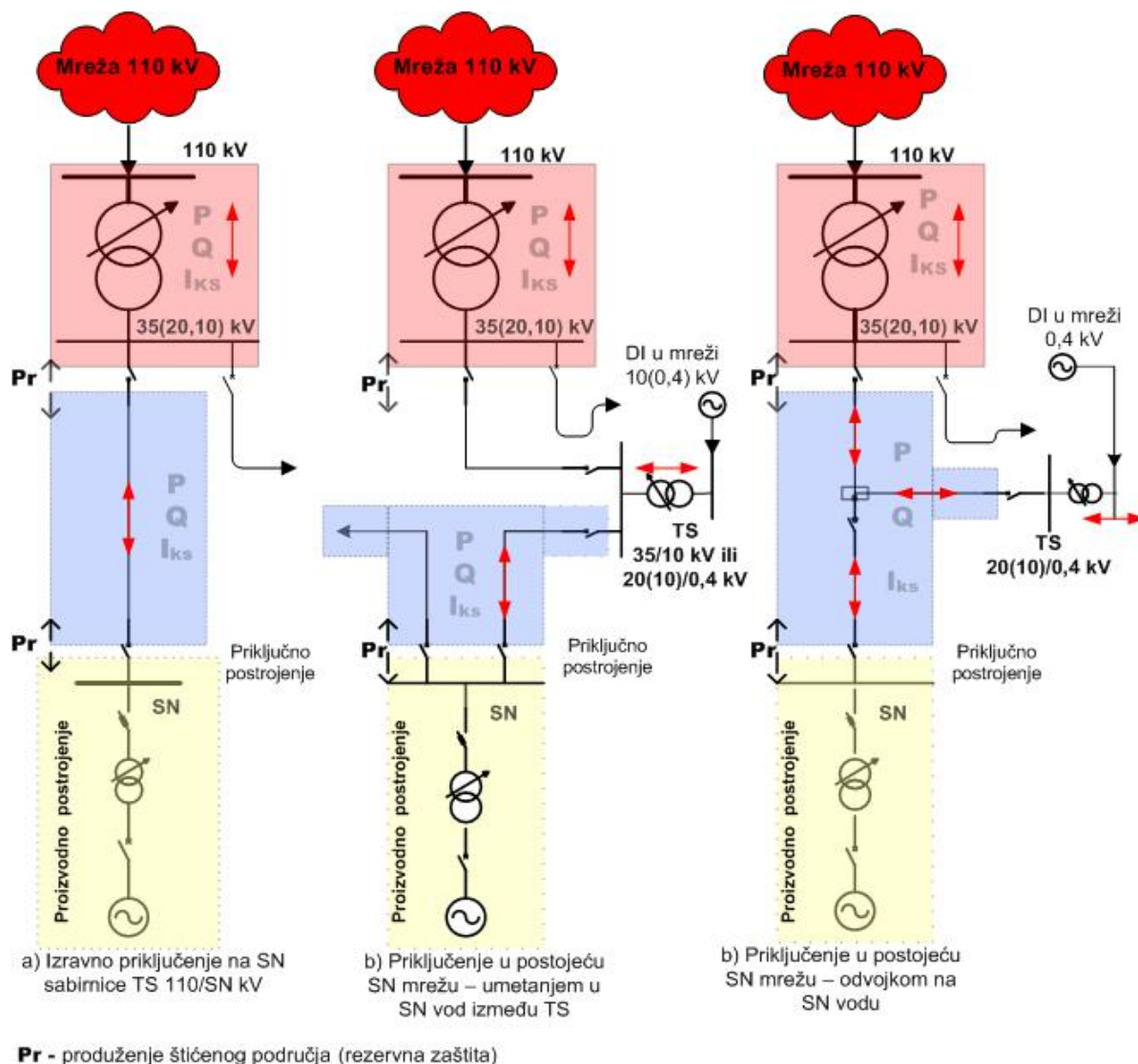
Dakle, zahtjevi koje postavljamo pred rad uređaja zaštite u mreži su i danas, s distribuiranim izvorima, isti onima bez distribuiranih izvora, no drukčiji su uvjeti za rad uređaja zaštite u mreži pa se mora primijeniti nova rješenja u šticanju distribucijske mreže kako bi se ovi zahtjevi ostvarili. Slika 3. je pokušaj cjelovitog sagledavanja uvjeta u kojima se nalazi zaštita distribucijske mreže, koja je s distribuiranim izvorima doživjela strukturne promjene. a potom i izraz pristupa traženju i primjeni novih rješenja.



Slika 3. Cjeloviti pristup pitanjima zaštite i vođenja pogona u prijelaznim (plava polja) i trajnim stanjima (žuta polja) distribucijske mreže s distribuiranim izvorima.

Prikaz pruža sveobuhvatan i pristup s različitih gledišta na uvjete za zaštitu i vođenje pogona kao i njihovu međusobnu isprepletenost. Primjerice, međunapajanje će se morati promatrati u skladu s podržavanjem naponske stabilnosti (1.1.2 utjecaj međunapajanja ovisan o faktoru snage za preuzbuđeno odnosno poduzbuđeno stanje). Ili, izmjenjivač u sunčanoj elektrani je zanimljiv sa strane mreže, a može ga se promatrati kao naponski ili strujni izvor (2.1.1.). Zatim, u željenom otočnom pogonu mreže (1.6.), međunapajanje ima potpuno drukčiji značaj nego li kod paralelnog pogona s mrežom (1.6.2.). Naime, u takvom otočnom pogonu blisko međunapajanje kvara je istodobno i jedino jer nema mrežnog izvora [2].

Osim što pogon distribuiranih izvora donosi promjenu bitnih značajki pogona mreže i time utječe na uvjete za rad zaštite, mjesto i način priključenja elektrana u mrežu također utječe na rješenja šticećenja činitelja distribucijske mreže u širem poimanju, a ne samo na sučelju elektrane s mrežom. Na slici 4. dajemo načelni prikaz uključenja elektrane, odnosno njenog proizvodnog postrojenja na SN mrežu s područjima šticećenja zaštita pojedinih činitelja tog dijela distribucijske mreže (sjenoviti dijelovi nacрта).



Slika 4. Primjeri utjecaja mjesta i načina priključenja elektrane u SN mrežu na područje šticećenja zaštite pojedinih činitelja u elektrani i u mreži.

S gledišta zaštite i vođenja pogona, okolnosti pri normalnom pogonu, poremećaju i kvaru u SN distribucijskoj mreži s distribuiranim izvorima potpuno povezuju mreže visokonaponske razine 110 kV s sredjenaponskom mrežom 35 (30) kV, a kod izravne transformacije i s mrežom 20(10) kV. Tome su nedvojbeno razlog mogući uzlazni tokovi, kroz energetski transformator VN/SN, kako struje potrošnje tako i struje kvara. Više nego li do sada, VN mreža 110 kV i SN mreža su mreže s međusobnim utjecajima. U mnogim europskim državama te mreže nose zajednički naziv, mreže za opskrbu

električnom energijom, a vrlo često njima gospodari isti operator mreže (pobjeda tehničke logike nad sujetom!). Dakako, nacrti sa slike 4. su načelni pa u praksi imaju više inačica, a koristiti ćemo ih za prikaz pristupa rješenjima zaštite.

2. SMJERNICE ZA KONCEPCIJSKA OPREDJELJENJA ZAŠTITE SN MREŽE S DISTRIBUIRANIM IZVORIMA

2.1. Novi pogonski uvjeti u SN mreži

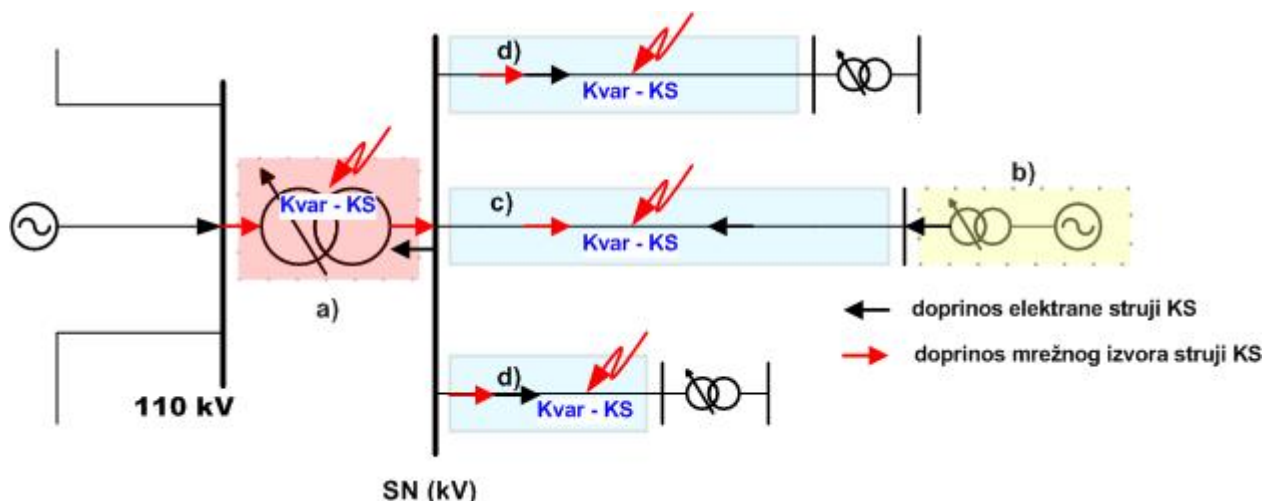
Ne tako davno, tamo do prvih godina ovog stoljeća, s pojačanom uključenjem distribuiranih izvora s obnovljivom energijom ili s kogeneracijom u distribucijsku mrežu, operatori mreže su bili nepodijeljeni u neumoljivom stavu: kod svakog kvara u mreži ili kod poremećaja u paralelnom pogonu elektrane s mrežom mora odmah uslijediti odvajanje elektrane od mreže. Utemeljen je pojam odvajanje elektrane od mreže. U takvom se pristupu željelo izbjeći sve probleme koje donose izvori zaštiti i vođenju pogona mreže, kao i opasnosti koje bi mreža mogla prouzročiti izvorima. Rekli bismo, jedan „ziheraški“ pristup.

Danas, kada se ovladalo vođenjem rada elektrane u kvarnim i poremećenim uvjetima, kad je raspoloživost energije iz obnovljivih izvora postao visoki cilj, postavljeni su slijedeći zahtjevi:

- Pogon elektrane s mrežom nastojati održati stabilnim u poremećenim i kvarnim stanjima mreže,
- U mreži selektivno izdvojiti činitelja mreže u kvaru, prije stvaranja potrebe za nezaobilaznim odvajanjem elektrane od mreže,
- Kada su uvjeti poremećenog pogona ili kvara takvi da je neodrživa stabilnost pogona elektrane i/ili mreže, poduzeti pothvate odvajanja generatora ili elektrane od mreže,
- Kada postoje mogućnosti održanja stabilnog pogona elektrane, ne isključiti mogućnost otočnog pogona elektrane s dijelom mreže.

Ostvarenju ovih zahtjeva, nezaobilaznu potporu mora dati osmišljen sustav šticećenja od poremećaja i kvarova. Kako bi se osmislio za SN mrežu, treba prepoznati značajke činitelja mreže, njihovu povezanost, vrste poremećaja i kvarova, područje šticećenja uobičajenih zaštita, Pojednostavljeni prikaz na slici 5. utvrđuje činitelje SN distribucijske mreže za polazna razmatranja. To su:

- mrežni izvor (TS VN/SN ili SN/SN),
- distribuirani izvor (elektrana ili skup elektrana priključen na isti mrežni izvor),
- vodovi koji povezuju mrežni izvor i distribuirani izvor (elektranu),
- vodovi koji povezuju mrežni izvor i potrošnju.

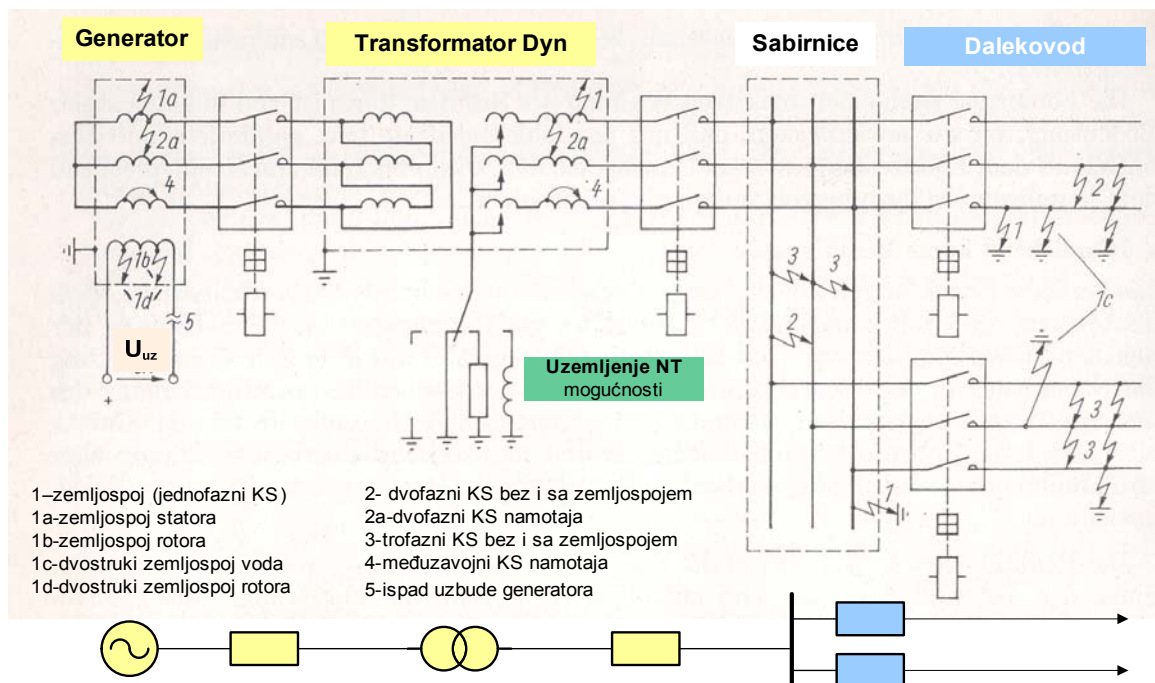


Slika 5. Činitelji SN mreže za polazna razmatranja mjesta i uloge zaštite

Unutar prikazane SN mreže, za svako mjesto kratkog spoja možemo pretpostaviti tok struje kratkog spoja iz mrežnog izvora i iz distribuiranog izvora.

2.2. Kvarovi i poremećaji u distribucijskoj mreži s distribuiranim izvorima

Električne prilike koje će označavati određenu vrstu kvara ovisiti će prije svega o značajkama generatora, blok transformatora, mjestu elektrane u mreži, uzemljenju neutralne točke mreže, impedanciji petlje kvara i otpora kvara. Moguća je pojava različitih vrsta kvarova, posebno kada se radi o sinkronom generatoru, kako u elektrani tako i na mjestu priključenja te u mreži (slika 6).

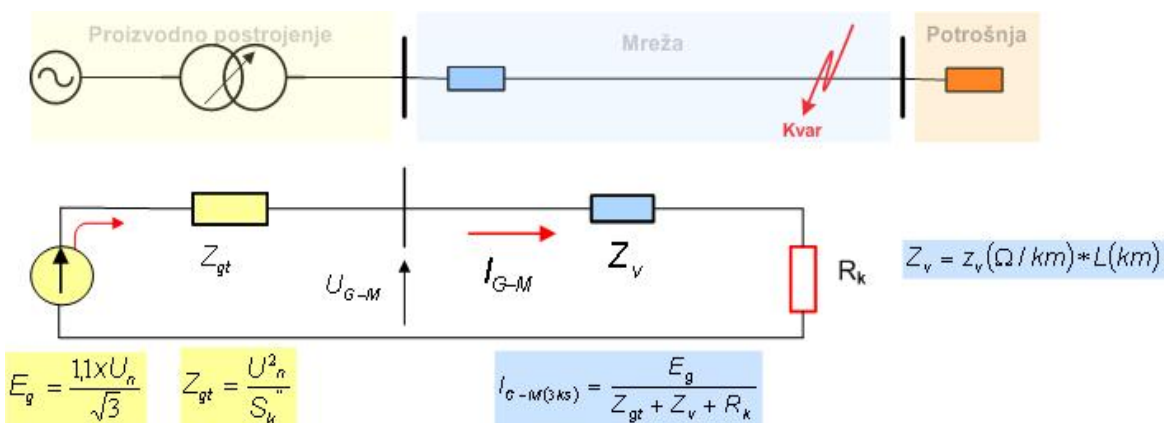


Slika 6. Kvarovi u elektrani (primjer sinkronog generatora), priključnom postrojenju i mreži [8].

I dok smo s doprinosom nadređene mreže struji kvara (kod višefaznog kratkog spojeva), kao i s doprinosom kapaciteta zdravih faza mreže u kojoj promatramo kvar (kod jednofaznog kvara) dobro upoznati, doprinos elektrane struji kvara kod različitih kvarova u mreži je ono što moramo od sada također dobro poznavati.

2.2.1. Značajke ponašanja različitih vrsta generatora kod kratkih spojeva u mreži

Doprinos elektrane struji trofaznog i dvofaznog kratkog spoja, kod kvara u mreži, može biti veoma različit, a ovisiti će bitno o značajkama generatora (vrsta, snaga i izlazni napon), blok transformatoru (napon kratkog spoja, grupa spoja), impedanciji mreže do mjesta kvara i otporu na mjestu kvara (slika 7.).



Slika 7. Načelni prikaz doprinosa elektrane struji tro- i dvofaznog kratkog spoja bez mrežnog izvora [8].

Nedvojbeno je kako se kod kvarova u mreži mijenjaju uvjeti kada su u nju uključeni distribuirani izvori, a razina utjecaja ovisi, među inima, i o vrsti generatora u elektrani i njegovom priključenju na mrežu. U tom smislu u SN mrežama promatramo slijedeće skupine:

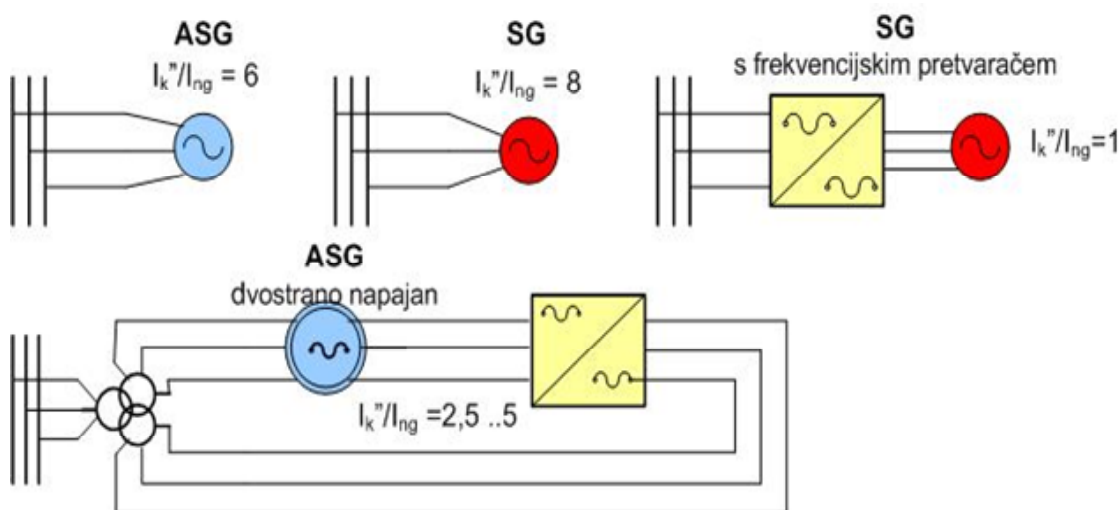
- sinkroni generator u blok spoju s transformatorom,
- asinkroni generator u blok spoju s transformatorom
- asinkroni generator s izmjenjivačem preko transformatora,
- istosmjerni izvor s izmjenjivačem.

Sinkroni generatori doprinose početnoj izmjeničnoj, udarnoj i rasklopnoj izmjeničnoj vrijednosti struje kvara (subtranzijentne i tranzijentne sastavnice vrijednosti struje kvara), a potonje su znakovito veće nego li je trajna struja kratkog spoja ili struja maksimalnog opterećenja. Izvjesni tipovi sinkronih generatora izgubit će tijekom trajanja kvara, pod određenim okolnostima, napon za svoju uzbudu, a time će se smanjiti i sposobnost generatora za doprinos struji kvara.

Asinkroni generatori doprinose početnoj izmjeničnoj, udarnoj i rasklopnoj izmjeničnoj vrijednosti struje kvara, a kod dvofaznih kvarova i trajnoj struji kratkog spoja. Struja kratkog spoja asinkronog generatora s vremenom obamire, ali to sporije što je veća snaga i broj polova generatora, a kod trolejnog kratkog spoja do niže trajne vrijednosti nego li kod dvofaznog kvara. U usporedbi sa sinkronim generatorom obamiranje vrijednosti struje kvara je bitno brže kod asinkronog generatora.

Izmjenjivači, oni vođeni mrežom ili samovođeni, vrlo se različito ponašaju glede doprinosa struji kratkog spoja. Kod izmjenjivača koji su vođeni mrežom, kod kratkog spoja izmjenjivač u mrežu daje istosmjernu struju koja podržava udarnu struju kratkog spoja, ali ukupno gledajući taj se učinak može zanemariti. Kod izmjenjivača koji su pak samovođeni, u mrežu pri kratkom spoju izmjenjivač daje izmjeničnu struju te time doprinosi iznosu kako početne izmjenične tako i udarne struje kratkog spoja. Pogon izmjenjivača se pri tome može promatrati kao pogon asinkronog motora sa smanjenom strujom zaleta (propisi preporučuju uzeti parametre motora u zaletu s kratko spojenim rotorom: $R/X=1$ i $I''_k/I_{nm}=1,5$ do 3).

Doprinos struji kratkog spoja elektrane ovisan od vrste generatora je istražen, pa se za grube provjere koristi karakterističan omjer (slika 8) početne izmjenične sastavnice struje trofaznog kratkog spoja (I_k'') i nazivne struje generatora (I_{ng}).



Slika 8. Doprinos generatora struji kratkog spoja na priključnicama ovisno o vrsti generatora

Kako će se doprinos određene vrste generatora prenijeti u doprinos elektrane struji kratkog spoja u mreži, ovisi o pojedinačnoj snazi i broju generatora u elektrani, njihovom izlaznom naponu, kao i značajkama blok transformatora (napon kratkog spoja i prienosni odnos). Može se uočiti kako će primjerice vjetroelektrana sa sinkronim generatorima i frekvencijskim pretvaračem imati doprinos na razini nazivne struje. Tako primjerice VE Orlice, sa snagom $S_n=9,6$ MVA, daje na svom sučelju prema mreži doprinos izmjenične sastavnice struje trofaznog kratkog spoja I_k'' , kod pune snage svih vjetroagregata, od samo približno 185 A, a taj se iznos kod mjesta kratkog spoja u mreži značajno smanji ako je mjesto kvara udaljeno od elektrane. Ove značajke dovode do problema s podešenjem praga uzbude nadstrujne zaštite (>1) na sučelju elektrane s mrežom i uporabe strujnog kriterija za djelovanje zaštite od kratkih spojeva u funkciji odvajanja mreže u kvaru od elektrane.

Kako kazuju podatci na slici 8, kod kvara u mreži doprinos struji kratkog spoja elektrane s klasičnim sinkronim generatorima (primjerice elektrana s termoelektranim postrojenjima na bioplin i sinkronim generatorom) je puno veći. Proizvođač generatora mora dokazati značajke generatora među kojima je i doprinos elektrane struji kratkog spoja (propisi IEC i VDN).

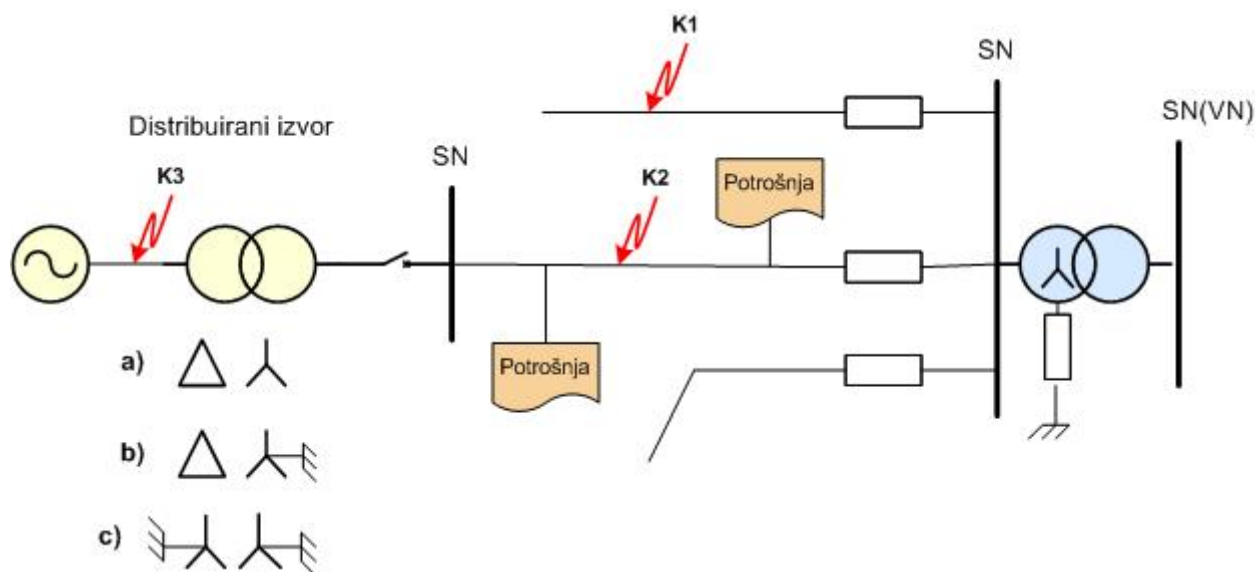
2.2.2. Značajke ponašanja distribuiranog izvora kod jednofaznih kratkih spojeva u mreži

Distribuirani izvori se na SN mrežu priključuju preko energetskog transformatora. Postoje rješenja s generatorskim prekidačem ili blok spoj s prekidačem na višenaponskoj strani transformatora, odnosno na mjestu sučelja izvora i mreže. U ovom referatu zagovaramo prepoznavanje značajki DI glede uzemljenja zvjezdista generatora, grupe spoja transformatora i uzemljenja zvjezdista transformatora. Sve to poradi prepoznavanja uvjeta pogona u stanjima s jednofaznim kvarom u mreži kao i u DI i uvjeta za rad zaštite.

S gledišta toka struje jednofaznog kvara imamo složene prilike. Doprinos elektrane struji jednofaznog kratkog spoja (zemljospoja) u mreži biti će značajno manji od udjela mreže, a ovisiti će bitno o značajkama generatora, grupi spoja blok transformatora, uzemljenosti zvjezdista generatora i transformatora te o otporu na mjestu kvara.

Važnu ulogu ima uzemljenje zvjezdista generatora, grupa spoja blok transformatora i uzemljenje njegovog zvjezdista (prema mreži i generatoru). Obilježje blok transformatora koje kaže kako je on svojevrsna galvanska barijera generatora prema mreži treba uzeti nadasve oprezno i ne bez pomne analize bitnih činitelja.

Operator distribucijske mreže mora imati utjecaj na izbor značajki blok transformatora povezanih s pogonom mreže, a one su način spajanja primarnog i sekundarnog namotaja i način uzemljenja zvjezdista. Utjecaj prirodno proistječe iz prava Operatora određivanja načina uzemljenja neutralne točke nadređene mreže, iz njegove odgovornosti za selektivan rad zaštite kod kvarova u mreži, kao i o obvezi zaštite pogona distribuiranog izvora od mogućih loših utjecaja iz mreže (slika 9.).



Slika 9 Primjer pristupa značajkama namotaja i zvjezdista blok transformatora ovisno o mjestu DI u mreži

Glede spoja namotaja blok transformatora [3] valja razmotriti tri skupine (označeno na slici s: a, b i c) i uz svaku koristi i nedostatke za pogon konkretne distribucijske mreže. U Tabeli I. navodimo predstavnike skupina sa slike i mišljenje o prednostima i nedostacima vezanim za pogon mreže prema slici 9, gdje je uzemljenost zvjezdista transformatora u napojnom postrojenju bitno polazno obilježje (za ovaj primjer odabrano je uzemljenje preko djelatnog otpora).

Tabela I. Prednosti i nedostaci izbora spoja namotaja blok transformatora u DI za određenu mrežu

Skupina	Namotaj u spoju		Prednost	Nedostatak
	Primar	Sekundar		
a)	Y	d	Zemljospoj u mreži ne može izazvati zemljospoj u DI. Mreža ne doprinosi struji zemljospoja u DI (K3).	Zemljospoj K1 se može napajati iz neuzemljenog izvora s malom I_c što izaziva prenapone.
b)	Y_n (uzemljeno)	d	Mreža ne doprinosi u struji zemljospoja u DI (K3). Nema prenapona za zemljospoj K1	Pojava struje zemljospoja kod kvara K1 i K2 i time problemi „usmjerenja“ zaštite u mreži.
c)	Y_n (uzemljeno)	Y_n (uzemljeno)	Nema prenapona kod K1 ako je zvjezdište generatora uzemljeno preko niskoomske impedancije.	Mreža doprinosi u struji zemljospoja u DI (K3).

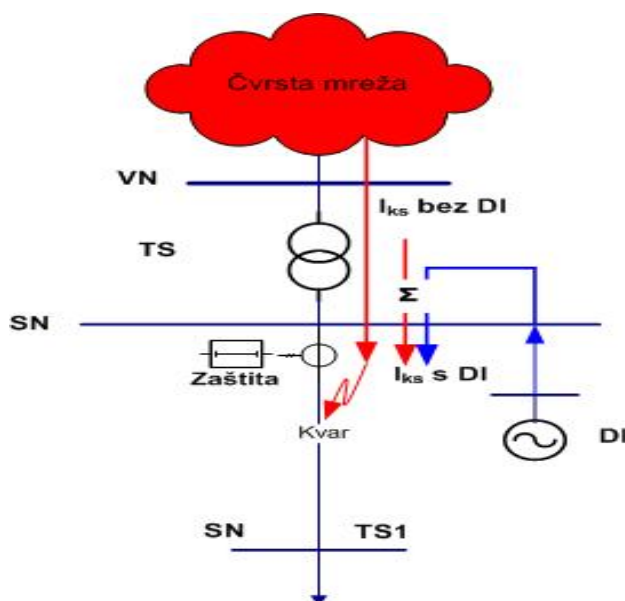
Uobičajeno je za rotacijske sinkrone generatore u razmatranim elektranama pretpostaviti kako će njihovo zvjezdište biti izolirano, a ako je uzemljeno tada preko otpora velikih vrijednosti. Izravno uzemljeno zvjezdište olakšava ostvarenje učinkovite zaštite od zemljospoja statora, ali su tada prisutne velike struje kvara opasne za željezo statora pa je potrebno kratko vrijeme djelovanja zaštite i postupak demagnetizacije. Od bitne je dakle važnosti usklađenost značajki zaštite od zemljospoja statora generatora s izabranim načinom uzemljenja zvjezdišta generatora, blok transformatora i mreže.

Operatora distribucijske mreže ne mora imati potpuni utjecaj u odlučivanju o uzemljenju zvjezdišta generatora, dok na spoj namota i uzemljenje zvjezdišta blok transformatora treba imati konačnu riječ jer se upravo preko njega usklađuje mreža s generatorom. Kada je tako, operator mora imati i zadnju na sadržaj i način šticećenja od zemljospoja u postrojenju DI, na sučelju Di s mrežom i u mreži.

2.3. Ključni utjecaji DI na odziv zaštite u mreži

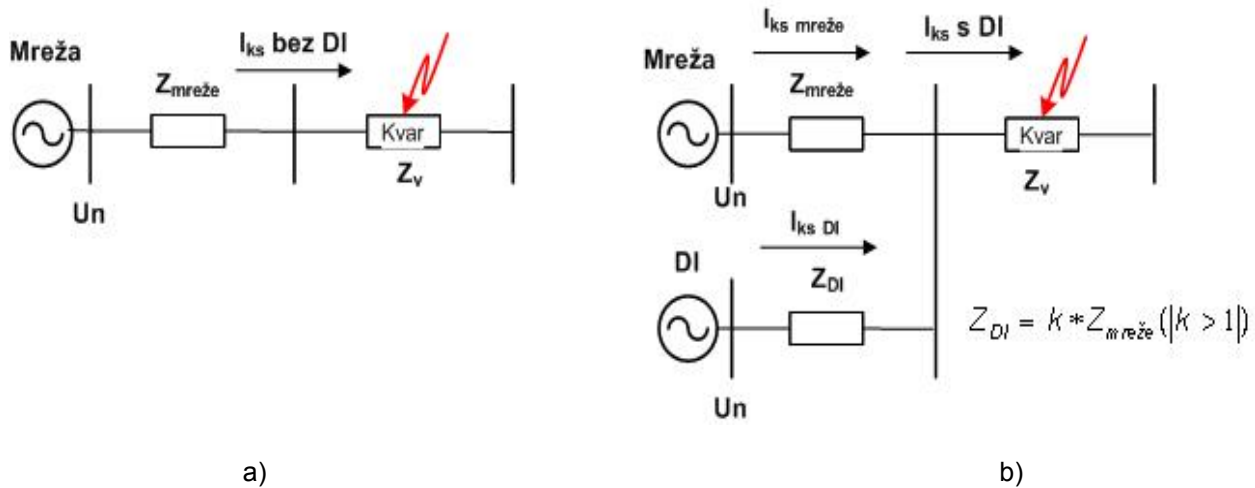
Izrazito važna motrišta u našem promišljanju o učinkovitom sustavu zaštite od poremećaja i kvarova u nekoj mreži su ona koja određuju temeljne utjecaje distribuiranih izvori na rad zaštite. Ključna posljedica utjecaja promjene tokova struje kvara na djelovanje zaštite, u uvjetima postojanja distribuiranih izvora na svim razinama distribucijske mreže, je selektivnost djelovanja zaštite. Ukazujemo na najvažnije utjecaje [4].

2.3.1. Povećanje struje kvara



Slika 10 Zamišljena mreža za potrebe objašnjenja fenomena povećanja struje kvara

Priključenjem distribuiranog izvora na sabirnice TS1 (slika 10), u slučaju kvara u mreži, povećat će se vrijednost struje kratkog spoja koja teče na mjesto kvara, u odnosu na vrijednost koja pri istom kvaru teče na mjesto kvara kada nije priključen distribuirani izvor (DI), a zbog smanjenja impedancije između mjesta kvara i izvora struje kvara. Za razumijevanje dva stanja valja se koristiti nadomjesnim nacrtima utjecajnih činitelja na struju kvara (slika 11a i b).



Slika 11 Nadomjesni nacrti za potrebe tumačenja fenomena povećanja struje kratkog spoja

U pravilu odgovarajuća impedancija DI je veća od istovjetne impedancije mreže (na izrazu uz sliku - faktor odnosa impedancija „k“). Izmjenična sastavnica struje kratkog spoja koju na mjesto kvara daje mreža bez prisutnosti DI ($I_{ks-bez DI}$) i izmjenična sastavnica struje kratkog spoja koja teče na mjesto kvara kada je mreža priključen DI, određene su izrazima (1) i (2):

$$I''_{ks-bezDI} = \frac{c * U_n}{\sqrt{3} * |Z_{mreže} + x * Z_{voda}|} \quad (1)$$

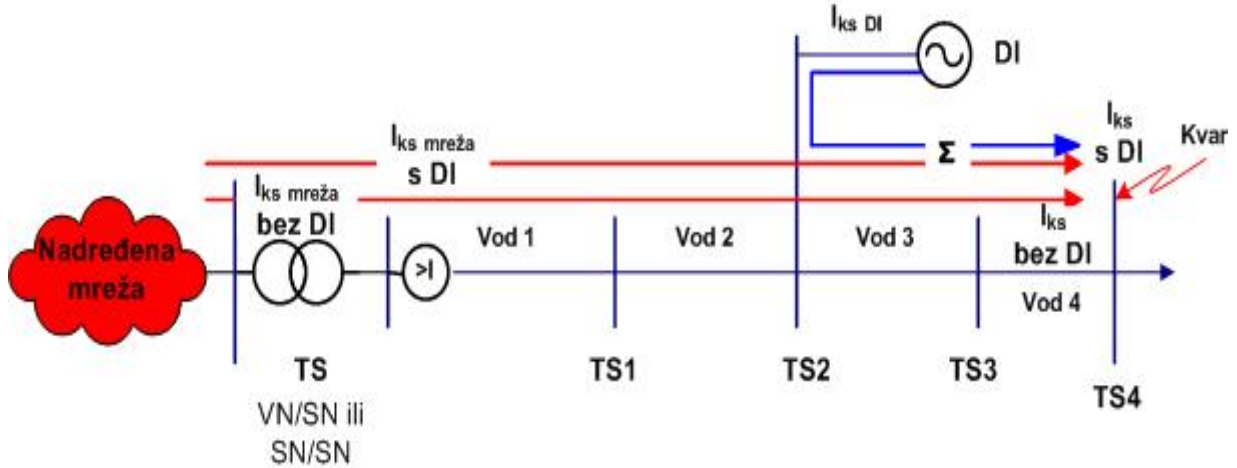
$$I''_{ks-sDI} = \frac{c * U_n}{\sqrt{3} * \left| \frac{Z_{mreže} * Z_{DI}}{Z_{mreže} + Z_{DI}} + x * Z_{voda} \right|} = \frac{c * U_n}{\sqrt{3} * \left| \frac{Z_{mreže} * k}{1 + k} + x * Z_{voda} \right|} \quad (2)$$

Uspoređujući dane izraze možemo uočiti kako se struje na mjestu kvara razlikuju za član „ $k/(1+k)$ “ u nazivniku izraza (2) koji je pak, uz $k > 1$, manji od „1“ [$k/(1+k) < 1$] i tako doprinosi povećanju struje kratkog spoja. To se može iskazati i kao postotno povećanje s koeficijentom povećanja struje kratkog spoja ($K_{p I_{ks}}$) pomoću snaga kratkog spoja (pozor: svedene na isti napon!):

$$K_{p I_{ks}} = \frac{I''_{ks-bezDI}}{I''_{ks-sDI}} * 100\% = \left| \frac{Z_{mreže} + Z_{DI}}{Z_{DI}} \right| * 100\% = \left| \frac{S''_{k-DI}}{S''_{k-mreža}} + 1 \right| * 100\% \quad (3)$$

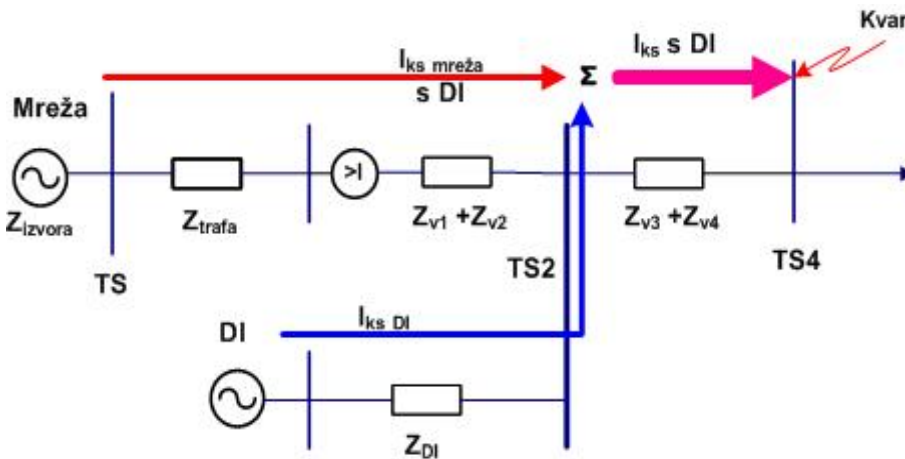
2.3.2. Smanjenje vrijednosti struje kvara iz nadređene mreže

Nakon priključenja elektrane (DI) na sabirnice TS2 (prema slici 12), kod kratkih spojeva u mreži koji budu iza TS2 (primjerice kod TS4), iz nadređene mreže će na mjesto kvara pritićati struja kvara ($I_{ks mreža s DI}$) manja nego li u slučaju bez priključene elektrane ($I_{ks mreža bez DI}$). Razlog je u tome što se priključenjem elektrane na prikazano mjesto, povećala impedancija gledajući od nadređene mreže do mjesta kvara. Ovaj utjecaj DI na tokove struje kvara donosi problem za podešenje razine uzbude zaštite od kratkih spojeva u TS i TS1. Ova posljedica nije prisutna kod kvarova ispred TS2.



Slika 12. Utjecaj DI na tokove struje kvara – smanjenje udjela u struji kvara iz nadređene mreže.

Ovaj utjecaj DI kod kratkih spojeva u mreži, kao i njegove učinke, možemo promotriti kroz sliku nadomjesnih impedancija (slika 13). Za potrebe ovog prikaza pretpostavljamo trofazni kratki spoj u postrojenju TS4, dakle iza mjesta priključenja elektrane na mrežu.



Slika 13 Nadomjesne impedancije u primjeru smanjenje udjela struje iz nadređene mreže u struji kvara.

Izračun tokova početne izmjenične struje kratkog spoja (I''_{ks}) počinjemo sa stanjem prije priključenja DI, kada je prema mjestu kvara tekla samo struja iz nadređene mreže [7]:

$$I''_{ks-bezDI} = I''_{ksmreže} = \frac{c * U_n}{\sqrt{3} * |Z_{mreže} + Z_{voda}|} = \frac{c * U_n}{\sqrt{3} * |Z_{KS-bezDI}|} \quad (4)$$

pri čemu je:

$$Z_{mreže} = Z_{izvora} + Z_{trafa} + (Z_{v1} + Z_{v2}) = Z_{izvora} + Z_{trafa} + Z_{v1-v2}$$

$$Z_{voda} = Z_{v3} + Z_{v4} = Z_{v3-v4}$$

$$Z_{KS-bezDI} = Z_{mreže} + Z_{voda}$$

Priključenjem DI, valja nam uvažiti činjenicu kako je impedancija DI veća od impedancije čvrste nadređene mreže, odnosno primjenjujemo i ovdje izraz:

$$Z_{DI} = k * Z_{mreže} (k > 1) \quad (5)$$

Distribuirani izvor ima doprinos struji kvara tako da na mjesto kvara od sabirnica TS2 teče ukupna vrijednost struje:

$$I''_{ks-sDI} = \frac{c * U_n}{\sqrt{3} * \left| \frac{Z_{mreže} * k}{1+k} + Z_{voda} \right|} \quad (6)$$

Sada, kada je prisutan i DI sa svojom impedancijom, nadređena mreža će prema mjestu kvara dati iznos struje ($I''_{ksmreža-sDI}$) određen slijedećim izrazom:

$$I''_{ksmreža-sDI} = I''_{ks-sDI} \frac{|Z_{mreže} * k|}{|Z_{mreža} + \langle Z_{mreža} * k \rangle|} = \frac{c * U_n}{\sqrt{3} * \left| \frac{Z_{mreže} * k}{1+k} + Z_{voda} \right|} * \left| \frac{k}{k+1} \right| \quad (7)$$

$$I''_{ksmreža-sDI} = \frac{c * U_n}{\sqrt{3} \left| Z_{mreže} + Z_{voda} + \frac{Z_{voda}}{k} \right|} = \frac{c * U_n}{\sqrt{3} \left| Z_{mreže} + Z_{voda} + \left(\frac{Z_{mreže} * Z_{voda}}{Z_{DI}} \right) \right|} \quad (8)$$

Iz izraza (8) se prepoznaje kako je nazivnik izraza (4) uvećan za član (Z_{voda}/k), što znači kako je impedancija od nadređene mreže do mjesta kvara povećana, a to ima za posljedicu manji iznos struje kvara što ga daje mreža. Kažemo kako DI utječe na slabljenje udjela mreže u struji kvara, a to obuhvaćamo koeficijentom struje kratkog spoja ($K_{s\ lks}$) izraženog u postotcima:

$$K_{s\ lks} = \frac{I''_{ksmreže-sDI}}{I''_{ksmreže-bezDI}} * 100\% = \frac{Z_{KS\ bez\ DI}}{Z_{KS\ bez\ DI} + \frac{Z_{mreže} * Z_{voda}}{Z_{DI}}} * 100\% \quad (9)$$

Kako bi se ovaj utjecaj „držao“ pod nadzorom, može se zadati dopušteno slabljenje mrežnog udjela struje kvara kod priključenog DI u odnosu na stanje prije priključenja, pa iz toga izračunati najveći dopušteni odnos impedancije DI u odnosu na istovjetnu impedanciju mreže (k):

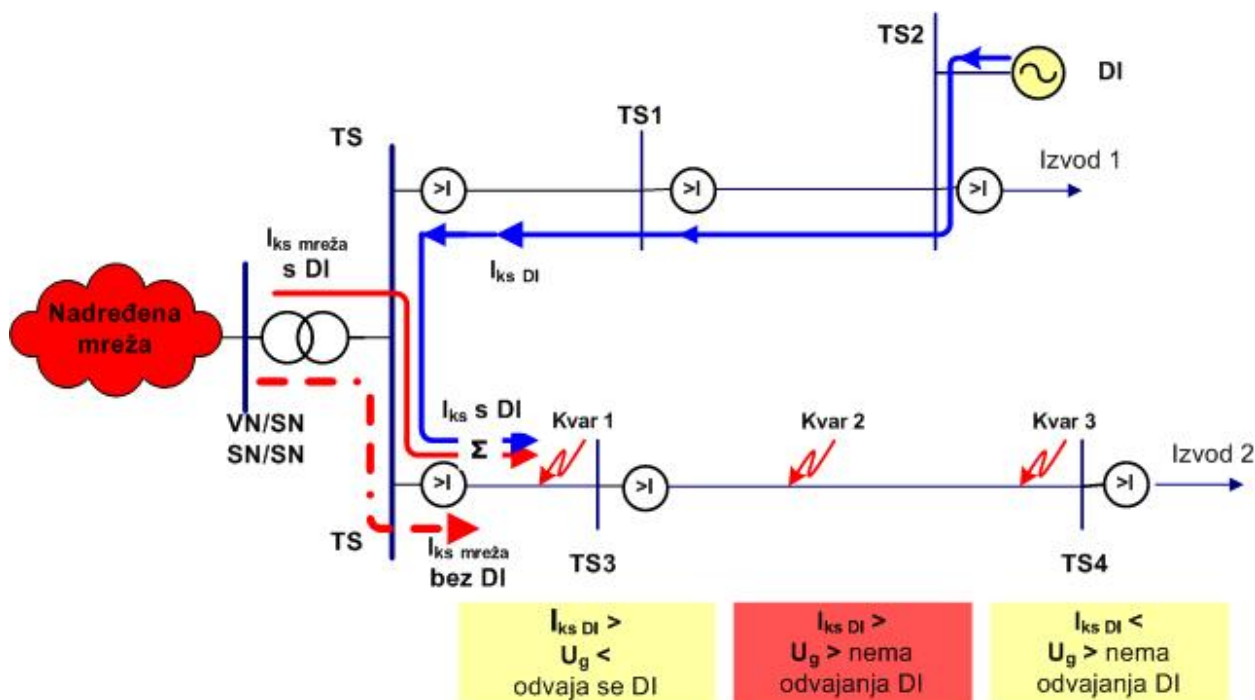
$$|k| = \frac{K_{s\ lks}(\%)}{[(100\% - K_{s\ lks}(\%))] * \left| 1 + \frac{Z_{mreže}}{Z_{voda}} \right|} \quad (10)$$

Ako je primjerice s gledišta pouzdane mogućnosti podešenja uzbude zaštite čime se održava selektivan rad zaštite, dopušteno slabljenje udjela struje kvara na 20% ($(K_{s\ lks} = 80\%)$), tada odnos impedancija smije biti:

$$|k| = \frac{4}{\left| 1 + \frac{Z_{mreže}}{Z_{voda}} \right|}$$

2.3.3. Suprotni smjer toka struje kvara kod kvara u mreži

Do pojave distribuiranih izvora, jedini smjer struje kvara bio je od nadređene čvrste mreže prema mjestu kvara ili takozvani „unidirekcionalni“ smjer. Tek u primjerima paralelnih vodova dogodilo bi se okretanje smjera, no tome je druga priroda utjecaja na rad zaštite. S priključenjem distribuiranih izvora pojavljuje se i suprotan smjer struje kvara čije značajke ovise od više činitelja: mjestu DI u mreži, oblika mreže, doprinosa DI struji kvara s gledišta vrste generatora. U takvim mrežama postoji dvostrani dotok struje na mjesto kvara ili takozvani „bidirekcionalni“ smjer. Utjecaj ove pojave prikazati ćemo na primjeru mreže i mjesta kvara sa slike 14.



Slika 14 Suprotni smjer toka struje kvara i njegov utjecaj na selektivnost djelovanja zaštite.

Uobičajeno je u SN mreži s jednim smjerom struje kratkog spoja koristiti neusmjerenu nadstrujnu zaštitu. Takva praksa u mrežama s DI donosi probleme koji se očituju u neselektivnim isključenjima kod kvarova u mreži ili na sabirnicama napojnog postrojenja (TS). Naime, ako je kod kvara na izvodu 2. doprinos DI struji kvara dovoljno velik, postoji mogućnost da se na izvodu 1. s DI pobude nadstrujne zaštite bez kriterija smjera i isključe vodove bez postojanja kvara na njima.

Održanje selektivnosti zaštite biti će manje ovisno o značajkama nadređene mreže, a izrazito ovisan od udaljenosti kvara na susjednom izvodu te doprinosa DI-a struji kratkog spoja glede vrste generatora (vidi točku 2.2.1. i sliku 8.). U narečenom smislu, mogući su slijedeći odzivi i djelovanja zaštite:

2.3.3.1. Kvar je blizu sabirnica napojne TS (K1)

DI napaja kvar sa strujom ($I_{ks\ DI}$) dovoljne vrijednosti za uzбудu zaštita na izvodu 1, prijeti neselektivno djelovanje ovih zaštita, kao i na izvodu 2 u TS. Vrijednost napona na stezaljkama generatora ($U_g <$) pak ima takav propad, da zaštita generatora trenutno ili s kratkom odgodom odvaja DI od mreže. Time nestaje tok struje kvara od DI prema kvaru K1 i nadstrujne zaštite na izvodu 1. više nemaju uzбудu i uvjete za neselektivno djelovanje.

2.3.3.2. Kvar je između mjesta s krajnjim utjecajima DI (primjerice kvar K2)

Kvar je dovoljno udaljen da ne izaziva veliki propad napona na stezaljkama generatora pa zaštita generatora ne odvaja DI od mreže, ali DI ima još uvijek dovoljan doprinos struji kvara da uzrokuje uzбудu i djelovanje nadstrujnih zaštita te neselektivno isključenje izvoda 1.

2.3.3.3. Kvar je udaljen u odnosu na sabirnice napojne TS (primjerice K3)

Vrijednost napona na stezaljkama generatora ima mali propad tako da zaštita generatora nema uvjete za djelovanje na odvajanju DI od mreže, a s druge strane DI nema doprinos struji kvara koji bi uzrokovao uzбудu zaštite izvoda 1. Zaštite na izvodu 2. mogu potpuno selektivno djelovati.

2.3.4. Problem nedostatne razine vrijednosti karakterističnih veličina kvara za pobudu zaštite

U prethodnoj točki smo vidjeli kako uključenje DI u mrežu može narušiti dotadašnji sustav selektivnog šticećenja činitelja mreže, ali i kako nedostatna razina karakterističnih veličina kvara ne

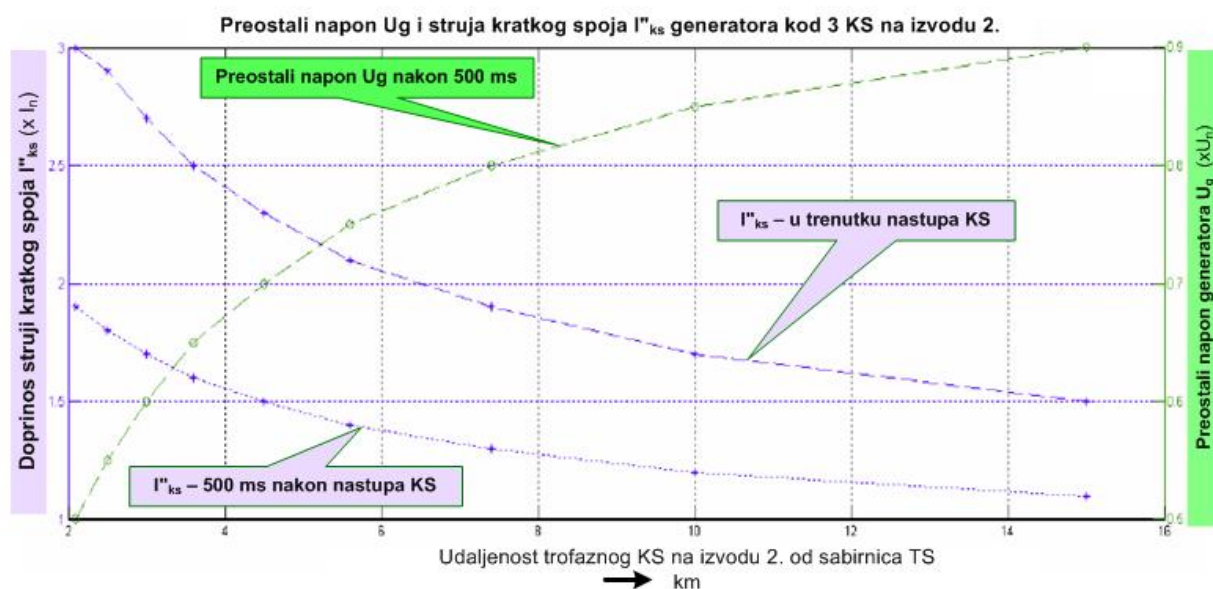
dovodeći do uzbude nekih uređaja zaštite, omogućava drugim selektivno djelovanje. Takvo stanje je oslonjeno na „sreću“, a ne na osmišljeni sustav zaštite.

Za svaku mrežu, za svako priključenje DI na SN mrežu, prijeko je potrebno provesti istraživanja tokova struja svih vrsta kvara, kao i ponašanje generatora glede napona na stezaljkama i napona neutralne točke, te doprinosa struji kvara upravo zbog postavljanja razine uzbude zaštite [4].

2.3.4.1. Ponašanje generatora od važnosti za uzbudu zaštite u mreži i na sučelju DI s mrežom

Ponašanje generatora u kvarnim stanjima je bitno ne samo zbog zaštite generatora već i zbog uvjeta šticećenja u mreži. Doprinosa struji kvara ima odraz na uzbudu zaštite prema i u mreži, a naponi na stezaljkama i zvjezdistu generatora su od bitne važnosti za uzbudu zaštite za odvajanje iz paralelnog pogona u neprimjerenim uvjetima i pri kvaru.

Vrsta generatora ima izravni utjecaj na preostali napon na pragu DI (stezaljkama generatora), a on pak na doprinosa struji kratkog spoja. Iz provedenih istraživanja za tipičnu distribucijsku mrežu [4], prepoznatljive su opće međusobne ovisnosti preostalog napon generatora, struje kratkog spoja i udaljenosti kvara (slika 15 – za napon mreže 20 kV, sinkroni generator snage 1,75 MVA, nadređena mreža 110 kV s $S_k=2$ GVA).

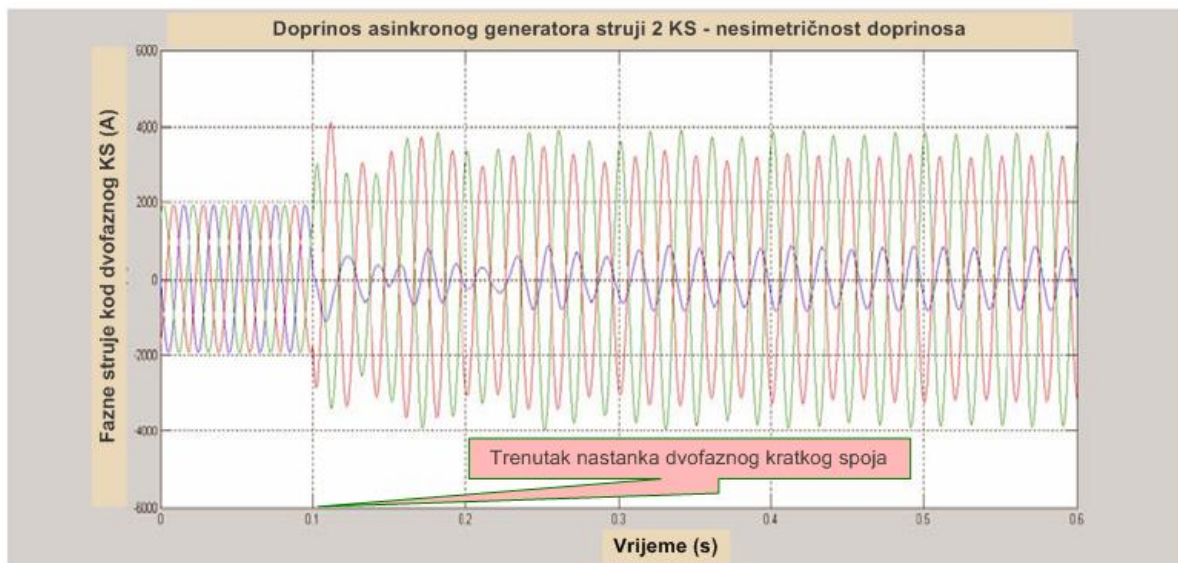


Slika 15 Međusobne ovisnosti preostalog napon generatora, struje kratkog spoja i udaljenosti kvara

Kada se za trofazni kratki spoj provedu sukladna istraživanja za asinkroni generator i izvrši usporedba sa sinkronim, može se zaključiti:

- preostali napon - istovjetni kratki spoj, na istom mjestu, promatran u istom trenutku u odnosu na nastanak, uzrokuje značajno veći propad napona (i do 30%),
- doprinosa struji kratkog spoja - istovjetni kratki spoj, na istom mjestu, promatran u istom trenutku u odnosu na nastanak, uzrokuje značajno veći doprinosa struji KS (i do 30%),
- simetričnost doprinosa struji kratkog spoja – kod nastanka trofaznog kratkog spoja, iznosi faznih struja se značajno razlikuju (posebno kod bliskih kvarova), kako bi se ujednačili tek nakon približno 500 ms.

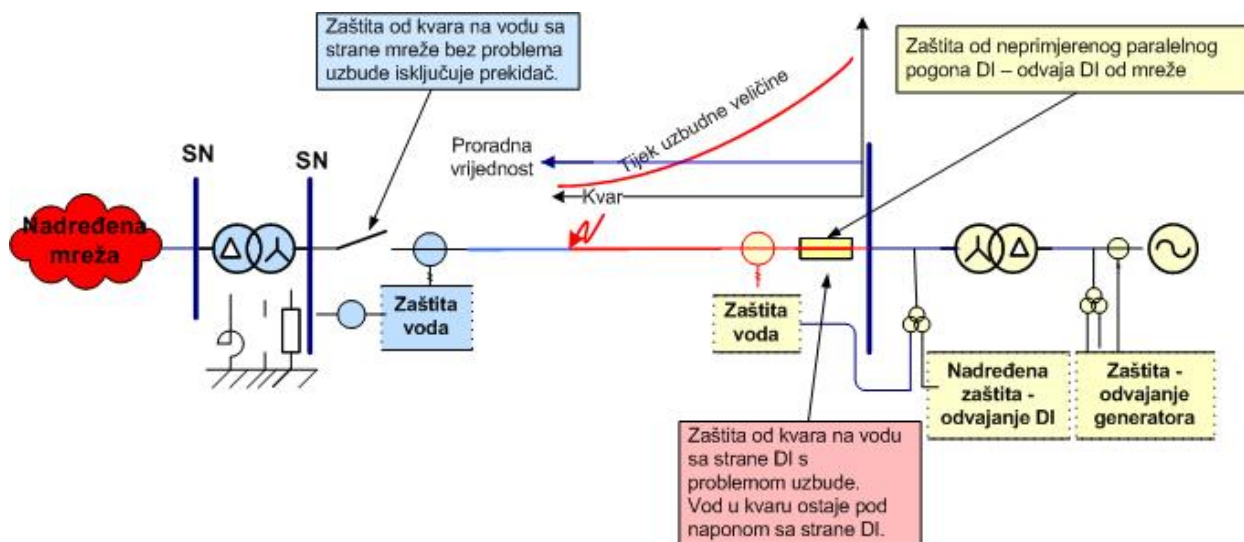
Značajke rada asinkronog generatora u uvjetima kratkog spoja, posebno su izražene kod dvofaznih kratkih spojeva (slika 16). Naglašavam problem nejednakog doprinosa faznim strujama kvara kako u trenutku nastanka kvara tako i nakon 500 ms. To može biti uzrok problema različite fazne uzbude mjernog člana zaštite kod simetričnih kvarova, pa otuda i zavođenje dispečera nakon neselektivnog isključenja i o vrsti kvara. Problem uzbude će uvjetovati da se kod starih nadstrujnih zaštita s povratnim odnosom oko 80% u mreži sa asinkronim generatorom podešenje prorade postavlja prema struji 2 KS, a kada se raspolaže s glede ove značajke zaštite boljim uređajem, prema struji 3 KS. Kada je u mreži elektrana sa sinkronim generatorom bolje je uvijek podešavati razinu uzbude nadstrujne zaštite prema vrijednostima struja 2 KS.



Slika 16 Različiti doprinosi faznim strujama kratkog spoja asinkronog generatora kod dvofaznog kvara.

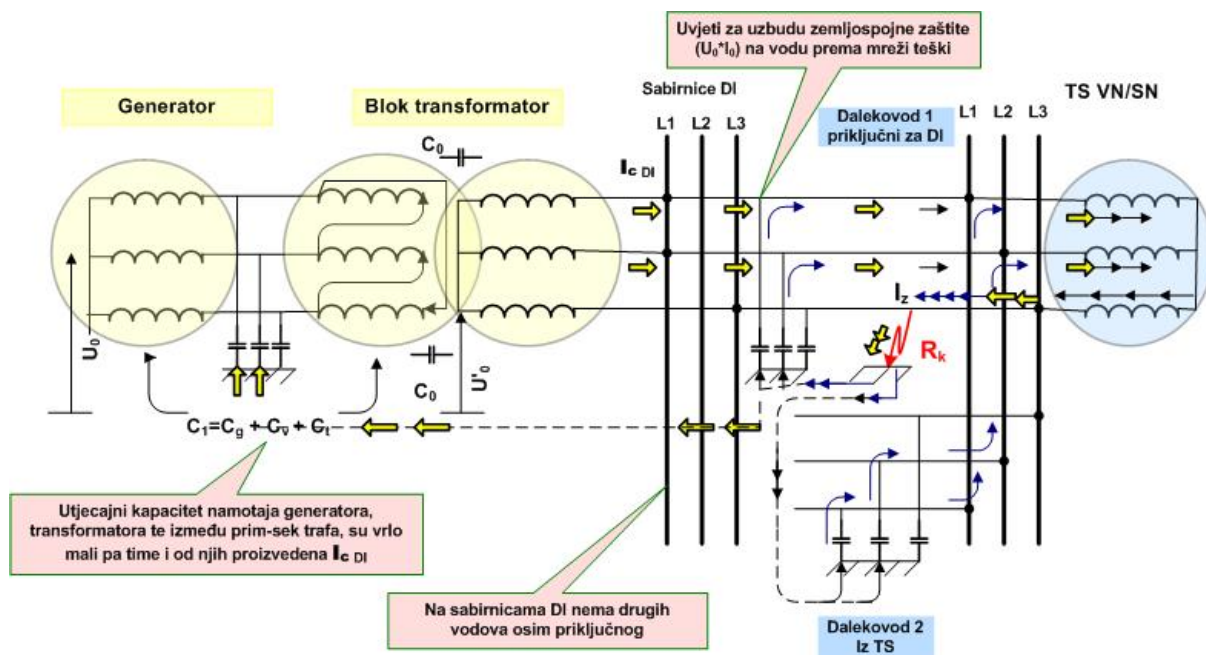
2.3.4.2. Pobuda zaštite u DI na sučelju prema mreži

Postoje utjecajni činitelji koji mogu stvoriti problem pobude zaštite koja mora selektivno odvojiti činitelja mreže kod kratkog spoja i zemljospoja napajanog iz DI. Problem znači izostanak pobude osnovne zaštite za određenu vrstu kvara na sučelju DI prema mreži ili u mreži prema mjestu kvara odnosno sabirnicama mrežnog izvora. Kada izostane odziv osnovne zaštite mora djelovati rezervna zaštita koja se svodi na odvajanje DI od mreže [6]. Ovaj problem načelno predstavlja slika 17.



Slika 17 Problem uzbude odgovarajuće zaštite na sučelju DI prema mreži kod kvara u mreži.

Probleme uzbude na kratki spoj je predvidiv, mjerljiv pa onda i savladiv kako kroz koncepciju šticećenja tako i kroz podešenje proradnih vrijednosti zaštite. Kod zemljospoja pak, uvjeti su složeniji, a utjecajne veličine manje predvidive. Promatrajući sustav DI – mreža s gledišta utjecaja uzemljenja zvjezdista, može se uvidjeti kako čak tri sastavnice promatranog sustava imaju značajan utjecaj. Kako bismo naglasili važnost poznavanja uvjeta pri zemljospoju, prikazujemo (slika 18) tokove struje zemljospoja u primjeru DI s izoliranim zvjezdištem generatora, mreže i blok transformatora, a potomji je sa spojem namotaja Yd [8].



Slika 19 Tokovi i utjecaji na iznos struje zemljospoja iz generatora kod kvara u mreži pri uvjetima izoliranog zvjezdišta u DI (generator-transformator) i neutralne točke mreže.

Uvažavajući polazište kako je DI na kraju jednog odvojka SN mreže i tokove kapacitivne struje zemljospoja za pretpostavljeno mjesto zemljospoja, kao kritičnim se drži postizanje uzbude usmjerene zemljospojne zaštite na priključnom vodu prema mreži, zaštite koja bi morala odvojiti DI od voda u kvaru. Razlog je u vrlo maloj struji zemljospoja koju generiraju kapaciteti statorskog namotaja generatora (C_g), spojnih vodova generator-transformator (C_v) i sekundarnog namotaja transformatora (C_t) preko kapaciteta među namotajima blok transformatora (C_0).

Istovrsna zaštita u napojnom postrojenju nema takav problem i ona će isključiti vod sa zemljospojem, ali će kvar ostati pod naponom sa strane DI.

Djelovanje zaštite na sučelju DI može se osloniti na funkciju zaštite statorskog namotaja generatora od zemljospoja kao rezervnu. Potonja se temelji na mjerenju nulte sastavnice (U_0) kao napona zvjezdišta generatora, a koji je izravno proporcionalan naponu zvjezdišta transformatora (U'_0) koji je pak pod utjecajem zemljospoja u mreži (promjenjiv duž namotaja trafo od nule do 100% $U_n/\sqrt{3}$):

$$U_0 = U'_0 \frac{C_0}{(C_0 + C_1)} \quad (11)$$

No time se može narušiti osjetljivost ove zaštite u osnovnoj funkciji (primjerice pokrivati će se manje od 80% namotaja statora), pa je najbolje rješenje ovog problema u uzemljenju zvjezdišta generatora preko otpora R ili uvođenju zaštite za odvajanje na strani DI prema mreži (nadređena istovjetnoj kod generatora). Ova se zaštita temelji na mjerenju propada i porasta vrijednosti svih faznih napona, kao i napona nulte sastavnice (U_0). Primjena ove zaštite ima utjecaj na nacrt i sadržaj postrojenja na sučelju DI i mreže prema slici 17 (naponski mjerni transformatori).

2.3.5. Problem automatskog ponovnog uključenja

Cilj automatskog ponovnog uključenja (APU) je onemogućiti utjecaj prolaznog uzroka kvara u mreži na nastanak trajnog kvara. Taj cilj se učinkovito ostvaruje na onim činiteljima mreže na kojima se može pojaviti prolazni uzrok kvara (prije svih nadzemni vodovi), a ostvaruje se kratkotrajnim isključenjem napona na štićenom objektu kao pretpostavkom ponovne uspostave dielektrične čvrstoće izolacije na mjestu s kvarom.

U mrežama u kojima su na vodove priključeni DI, pretpostavka za uspješno ostvarenje narečenog cilja uporabe APU-a, je u obostranom odvajanju mjesta kvara od napona, odnosno, kako sa strane mrežnog izvora tako i sa strane DI.

Kako se uobičajeno u distribucijskim mrežama, postupak APU-a pokreće s uzbudom zaštite, i potom odvija kroz ciklus brzog i sporog ponovnog uključanja, prijeko je potrebno postojanje pouzdane pobude i djelovanje zaštite i sa strane DI, kako bi se mjesto kvara dovelo u beznaponsko stanje. No vidjeli smo kako može izostati dostatna razina uzbuđene zaštite na sučelju DI s mrežom pa se opravdano pitamo koja je to najmanja struja kvara ili snaga izvora koja će ipak biti dostatno neizdašna i omogućiti samogašenje luka na mjestu kvara. Poznata Faustova formula kaže kako struja kvara ne smije biti veća od 1A na svaki kV nazivnog napona, a pokusi su dali i praktične vrijednosti (Tabela II).

Tabela II – Najmanja snaga izvor struje kvara u SN mreži kod koje je moguće samogašenje luka na mjestu kvara.

Nazivni napon mreže	Jakost struje na mjestu kvara	Snaga izvora napajanja
10 kV	10 A	170 kVA
20 kV	20 A	690 kVA

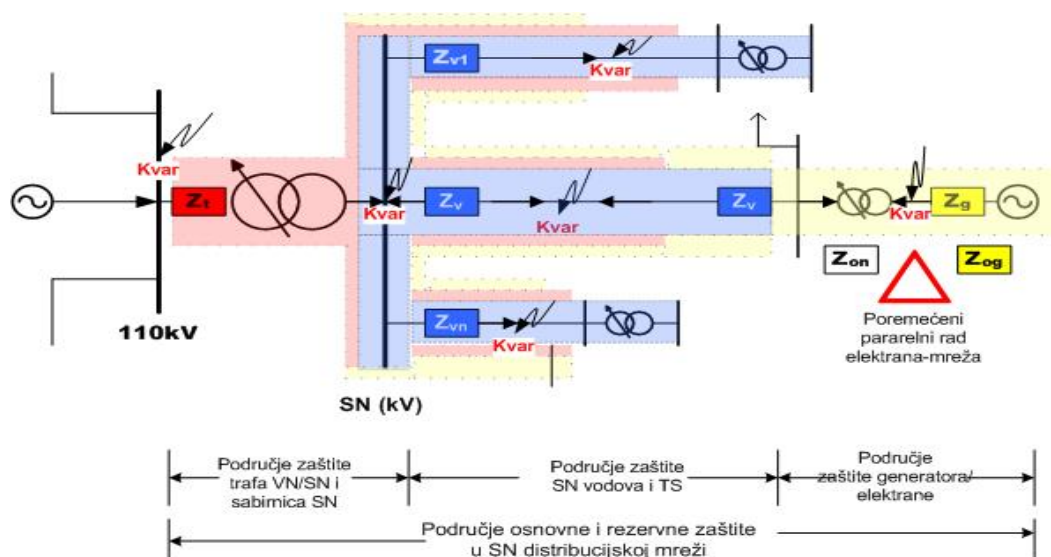
Također, u mrežama s primjenom automatskog ponovnog uključanja moguća je pojava problema ometanja sinkronizacije napona distribuiranih izvora s naponom mrežnog izvora i/ili s drugim izvorima jednakim sebi. O problemima i mogućim rješenjima vezanim za APU u SN mrežama potrebno se naširoko pozabaviti, što izlazi iz okvira ovog referata.

3. ZAKLJUČNA RAZMIŠLJANJA

Nema nikakve dvojbe kako priključenje i jednog jedinog distribuiranog izvora na srednjenaponsku mrežu donosi promjene tokova snage kako u normalnom pogonu za podmirenje potrošnje, tako i tokova snage u poremećenim i kvarnim stanjima promatranog dijela distribucijske mreže. Na razmjere utjecaja djeluju brojni utjecajni činitelji počam od značajki nadređene mreže, preko značajki distribucijske mreže, mjesta priključenja distribuiranog izvora sve do značajki svake pojedine elektrane.

Zaštita elektroenergetskog sustava je, zbog svoje mjerodavnosti u sigurnosti pogona i raspoloživosti opskrbe električnom energijom, bitan sastojak distribucijskih mreža čija se mjerodavnost za poremećena i kvarna stanja mreže mora vazda propitkivati. Priključenje distribuiranih izvora u razne točke mreže i njihove vrlo različite značajke pri poremećajima i kvarovima donijeli su tradicionalnim sustavima šticećenja i sposobnostima uređaja zaštite probleme i izazove u ostvarenju temeljnih zahtjeva koje pred njih postavljamo. Utjecaji koji su prikazani u ovom referatu pretežito ugrožavaju selektivno djelovanje zaštite.

Pristup kojim se problem selektivnog djelovanja zaštite u mreži rješava jednostavno brzim odvajanjem elektrane od mreže i dovođenjem distribucijske mreže s gledišta zaštite u „tradicionalno“ stanje više nije prihvatljiv. Kod kvara u mreži elektrana treba proći kroz kvarno stanje, održati stabilnost svog pogona s mrežom, a zaštite prema i u mreži moraju selektivno izdvojiti kvarni činitelj mreže, što zahtjeva utvrđivanje i podešenje zaštite u osnovnom i rezervnom djelovanju (slika 20).



Slika 20. Sustavan pristup obrascu osnovne i rezervne zaštite kod priključenja DI u dio mreže

Referat je nastojao proširiti naše spoznaje o pogonskim okolnostima, a u zaključcima predložiti pristup po kojem se kod svakog priključenja distribuiranog izvora na SN mrežu obvezno provodi postupak propitkivanja sposobnosti postojeće zaštite, ili otkrivanja njenih slabosti, u ostvarenju temeljnih, oduvijek postojećih zahtjeva. Propitkivati se treba ne samo zaštita na mjestu priključenja elektrane, već i zaštite u dubini mreže povezane s elektranom preko sabirnica napojnog postrojenja, a konačno i čitav obrazac šticeanja tog dijela distribucijske mreže.

Operator mreže, u svom zahtjevu prema investitoru distribuiranog izvora, za stvaranjem tehničkih uvjeta priključenja ne treba biti ograničen samo na neposredni priključak na mrežu i priključno postrojenje, već se moraju postavljati i opravdani zahtjevi prema zaštiti u mreži, a nju pak promatrati i u funkciji vođenja pogona.

Na temeljima navedenih propitkivanja, treba predložiti rješenja koja savladavaju konkretan problem, ali ona odmah moraju biti sukladna s našim budućim opredjeljenima uz zaštitu distribucijske mreže. Kako njih na razini propisa operatora mreže trenutno nema, moramo žurno pristupiti promišljanjima i njihovoj izradi. Mjesto ugradbe naših opredjeljenja su prije svega Mrežna pravila, kao i tehnički uvjeti za priključenje elektrana na distribucijsku mrežu.

Buduća opredjeljenja trebaju biti preteča rješenja koja će donijeti napredne mreže, ali ne takva da nisu ostvariva bez rješenja naprednih mreža.

Učinkovitoj zaštiti distribucijskog sustava s distribuiranim izvorima od poremećaja i kvarova, potrebni su osmišljeni obrasci šticeanja, uređaji zaštite prilagodljivih značajki i znanje inženjera o događajima u sustavu.

LITERATURA

- [1] M. Kalea, „Prijenos električne energije, što je to?“, knjiga, KIGEN, veljača, 2006 godina.
- [2] J. Jäger, T. Keil, T. Degner, N. Schafer, „Schutztechnik in DER Netzen“ Universität Erlangen-Nürnberg, publikacija, 13. Kassel symposium „Energie-Systemtechnik“ 2008.
- [3] WG D3 IEEE – Power System Relay Committee, „Impact of Distributed Resources on Distribution relay Protection“, PES IEEE, kolovoz 2004., stranica 24.
- [4] G. Oberlechner, „Schutzaspekte bei dezentralen netzgekoppelten Energieerzeugungsanlagen“ Diplomarbeit, TU Graz, travanj 2004., 98 stranica.
- [5] IEC 61850-3 Communication networks and systems in substations – part 3 General requirements, siječanj 2002.
- [6] K. Hinz, „Anforderungen an den Netzschutz beim Anschluss“, E.ON edis Demmin, Energietag Brandenburg, Cottbus, rujan 2005.
- [7] A. Shustov, „Netzschutz für elektrische Energiesystem mit hohem Anteil dezentraler Stromerzeugungsanlagen“ Dissertation, ISET, Universität Kassel, ožujak 2009, 188 stranica.
- [8] D. Karavidović, „Predavanja iz zaštite elektroenergetskog sustava“, ETF Osijek, Stručni studij, nastavna godina 2009/2010.