

Analiza uticaja priključenja većeg broja malih hidroelektrana na struje kratkih spojeva i rad sistema relejne zaštite distributivne mreže

Nikola Sučević¹, Željko Đurišić²

¹ Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički institut Nikola Tesla, Koste Glavinića 8a, 11000 Beograd, Srbija

nikola.sucevic@ieent.org

² Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet

Kratak sadržaj: U fokusu ovog rada nalazi se analiza uticaja planiranog ulaska u pogon većeg broja malih hidroelektrana na intenzitete struja kratkih spojeva i rad sistema relejne zaštite jedne realne distributivne mreže u Republici Srbiji. U radu su prikazana potrebna prepodešenja postojećih zaštitnih funkcija, kao i implementacija novih zaštitnih funkcija koje se u trenutnom konceptu zaštite distributivnih mreža ne koriste. Modelovanje mreže i analize vršene su u softverskom paketu DlgSILENT PowerFactory.

Ključne reči: male hidroelektrane, distributivna mreža, struje kratkih spojeva, relejna zaštita

1. Uvod

Većina analiza koje se rade pri proveru mogućnosti priključenja malih elektrana na distributivnu mrežu koncentrisane su na proveru uticaja priključenja samo jedne posmatrane elektrane na postojeću mrežu. Proračuni padova napona, tokova snaga, promene gubitaka energije, procena eventualnog uticaja na rad automatike i zaštite, kvalitet električne energije itd., fokus zadržavaju samo na proceni uticaja jednog posmatranog izvora, tj. male elektrane koja se priključuje na mrežu i najčešće se ograničavajući na uticaje u neposrednoj blizini mesta priključenja. Povezivanje većeg broja malih elektrana na veći broj lokacija u distributivnoj mreži i njihov zbirni uticaj na rad mreže uglavnom nisu predmet analiza koje se rutinski rade. Upravo je ovakav kumulativni uticaj u fokusu ovog rada.

U radu je analizirano da li je moguće primeniti postojeće koncepte sistema relejne zaštite distributivnih mreža u Republici Srbiji u slučaju integracije većeg broja malih elektrana na više lokacija u jednoj 35 kV distributivnoj mreži.

U radu je dat osvrt na postojeći koncept rada mreže i postojeću praksu podešavanja zaštitnih uređaja u 35 kV distributivnoj mreži. Potom je analiziran rad sistema zaštite pri priključenju većeg broja malih elektrana na mrežu, pri čemu su uzeti u obzir kritični radni režimi i kvarovi. Na osnovu analiza, dati su predlozi za nova podešenja postojećih zaštitnih funkcija i predlozi za aktiviranje zaštitnih funkcija koje se ne koriste u trenutnom konceptu zaštite distributivnih mreža.

Podaci o konfiguraciji mreže, parametrima elemenata, potrošnji, kao i snazi i mestu priključenja perspektivnih distribuiranih izvora energije, tj. malih hidroelektrana odgovaraju jednoj realnoj distributivnoj mreži u Republici Srbiji.

2. Analizirana 35 kV distributivna mreža

Distributivna mreža naponskog nivoa 35 kV koja je predmet analize u trenutnom stanju funkcioniše kao pasivna radijalna mreža sa otvorenim petljama, prikazana je na slici 1.

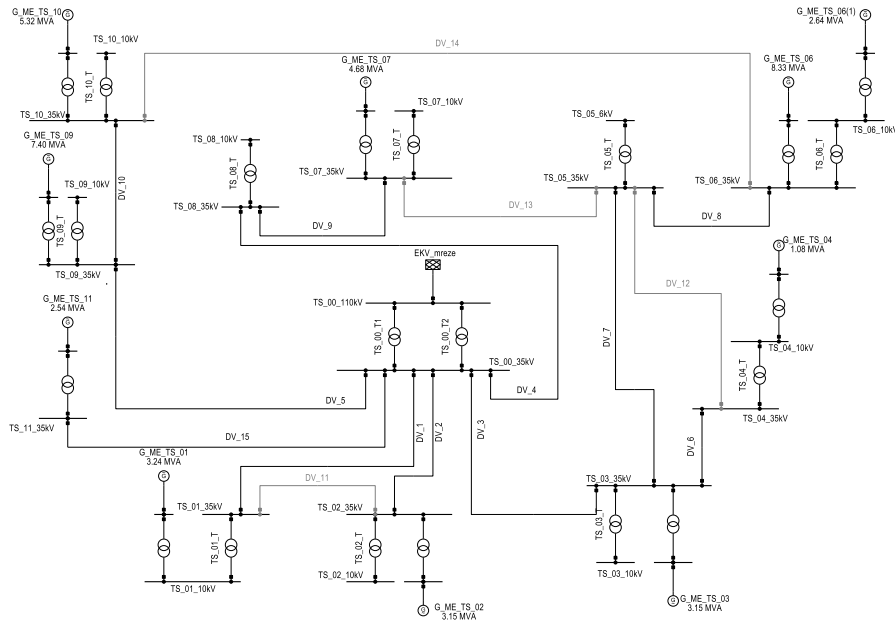
U mreži se ne nalaze distribuirani izvori energije, a celokupan konzum se napaja iz prenosne mreže, preko transformacije 110/35 kV.

Perspektivno stanje mreže predviđa visoku penetraciju distribuiranih izvora energije (ukupna planirana snaga iznosi 41,5 MW) koji će se priključivati na mrežu na 35 kV i na 10 kV naponskom nivou, na različitim pozicijama u mreži. Svi perspektivni izvori energije su male hidroelektrane snaga između 0,315 MW i 3,243 MW.

Tabela 1 daje spisak odobrenih snaga za priključenje, mesto i naponski nivo tačke priključenja:

Tabela 1: Podaci o perspektivnim distribuiranim izvorima energije

Mesto priključenja	Naponski nivo priključenja	Ukupna odobrena snaga za priključenje S_n [MW]
TS_01	10 kV	3,243
TS_02	35 kV	3,15
TS_03	35 kV	3,15
TS_04	10 kV	1,076
TS_06	35 kV	8,327
TS_06	10 kV	2,636
TS_07	35 kV	4,684
TS_09	35 kV	7,4
TS_10	35 kV	5,325
TS_11	35 kV	2,54



Slika 1: Jednopolna šema analizirane mreže

Može se očekivati da će priključenje velikog broja distribuiranih izvora energije značajno uticati na tokove snaga i naponske prilike u samoj distributivnoj mreži, a s obzirom na ukupnu snagu distribuiranih izvora i ukupni konzum na posmatranom području (uvažavajući i prognozu porasta potrošnje), a može se očekivati i da će u pojedinim trenutcima tok aktivne snage biti iz distributivne u prenosnu mrežu.

Veliki broj priključenih distribuiranih izvora utičaće i na porast struja kratkih spojeva, kako na samom mestu priključenja, tako i u celoj distributivnoj mreži, a pojava novih izvora struje kvara u mreži će prouzrokovati značajnu preraspodelu tokova struje kvara. Ova pojava može imati uticaj na rad zaštite distributivnih dalekovoda koja radi sa podešenjima prema važećim tehničkim preporukama, a koja su data za stanje mreže bez uvažavanja uticaja distribuiranih izvora.

S obzirom na navedeno, potrebno je proveriti rad sistema relejne zaštite u različitim uklopnim stanjima mreže, uz uvažavanje efekata prouzrokovanih priključenjem distribuiranih izvora.

Modelovanje distributivne mreže sa distribuiranim izvorima za potrebne proračuna struja kratkih spojeva i modelovanje sistema zaštite urađeno je primenom softverskog paketa *DigSILENT PowerFactory* [1].

3. Analiza promena struja kratkih spojeva u distributivnoj mreži

Pri proračunu struja kratkih spojeva, analizirane su dve konfiguracije posmatrane distributivne mreže:

- I. Scenario I - radijalna distributivna mreža, bez priključenih malih hidroelektrana (postojeće stanje) i
- II. Scenario II - radijalna distributivna mreža sa priključenim malim hidroelektranama (perspektivno stanje).

S obzirom na to da je 35 kV mreža uzemljena preko impedanse koja ograničava struju jednofaznog zemljospoja na vrednost manju od 300 A, maksimalne struje kvarova se javljaju pri trofaznim kratkim spojevima, te su upravo te struje merodavne za podešavanje prekostrujnih i kratkospojnih zaštita dalekovoda. U cilju analize osetljivosti zaštita potrebno je proračunati i minimalne struje i to dvofaznih kratkih spojeva. U posmatranoj mreži proračunate su:

1. Maksimalne struje trofaznih kratkih spojeva ($I_{k3,MAX}$) i
2. Minimalne struje dvofaznih kratkih spojeva ($I_{k2,min}$).

Proračun struja kratkih spojeva urađen je u skladu sa relevantnim standardom IEC 60909 [2].

U tabeli 2 prikazane su proračunate vrednosti struja kratkih spojeva na 35 kV, 10 kV i 6 kV sabirnicama mreže, za oba analizirana scenarija:

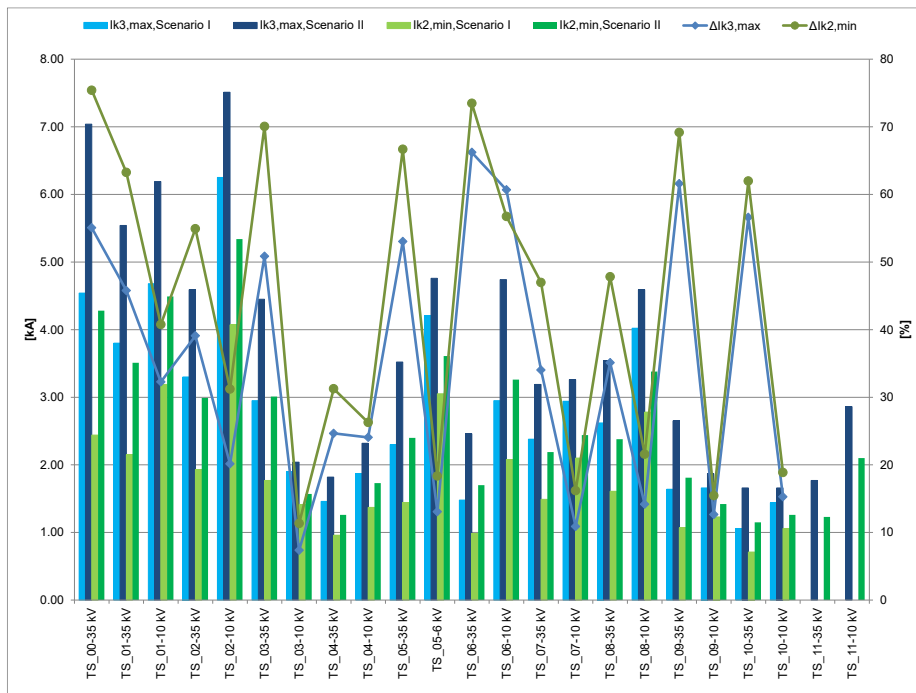
Tabela 2: Struje kratkih spojeva na karakterističnim pozicijama u mreži

Mesto kvara	Naponski nivo	Scenario I		Scenario II	
		$I_{k3,MAX}$ [kA]	$I_{k2,min}$ [kA]	$I_{k3,MAX}$ [kA]	$I_{k2,min}$ [kA]
TS_00	35 kV	4,54	2,44	7,11	4,28
TS_01	35 kV	3,80	2,15	5,54	3,51
	10 kV	4,68	3,19	6,19	4,49
TS_02	35 kV	3,30	1,93	4,59	2,99
	10 kV	6,25	4,07	7,51	5,34
TS_03	35 kV	2,95	1,77	4,45	3,01
	10 kV	1,90	1,41	2,04	1,57
TS_04	35 kV	1,46	0,96	1,82	1,26
	10 kV	1,87	1,37	2,32	1,73
TS_05	35 kV	2,30	1,44	3,52	2,4
	6 kV	4,21	3,05	4,76	3,61
TS_06	35 kV	1,48	0,98	2,46	1,7
	10 kV	2,95	2,08	4,74	3,26
TS_07	35 kV	2,38	1,49	3,19	2,19
	10 kV	2,94	2,10	3,26	2,44
TS_08	35 kV	2,62	1,61	3,54	2,38
	10 kV	4,02	2,78	4,59	3,38

Tabela 2: Struje kratkih spojeva na karakterističnim pozicijama u mreži

Mesto kvara	Naponski nivo	Scenario I		Scenario II	
		$I_{k3,MAX}$ [kA]	$I_{k2,min}$ [kA]	$I_{k3,MAX}$ [kA]	$I_{k2,min}$ [kA]
TS_09	35 kV	1,64	1,07	2,65	1,81
	10 kV	1,66	1,23	1,87	1,42
TS_10	35 kV	1,06	0,71	1,66	1,15
	10 kV	1,44	1,06	1,66	1,26
TS_11 (nova TS)	35 kV	/	/	1,77	1,23
	10 kV	/	/	2,86	2,1

Grafički prikaz maksimalnih struja trofaznih i minimalnih struja dvofaznih kratkih spojeva u oba scenarija („bar“ dijagrami, na koje se odnosi leva y-osa), kao i procentualne promene (linijski dijagrami, na koje se odnosi desna y-osa) za posmatrane pozicije u mreži prikazan je na slici 2:



Slika 2: Maksimalne struje trofaznih i minimalne struje dvofaznih kratkih spojeva

Na osnovu rezultata proračuna struja kratkih spojeva, uočava se da priključenje malih hidroelektrana značajno povećava i maksimalne struje i minimalne struje međufaznih kratkih spojeva na svim pozicijama u mreži. Intenziteti promena generalno su najveći u tačkama priključenja najvećih distribuiranih izvora. Takođe, porast struja je veći u 35 kV mreži nego u 10 kV mreži, usled činjenice da se većina novih elektrana priključuje upravo na 35 kV naponski nivo.

4. Analiza rada sistema relejne zaštite

4.1. Trenutni koncept zaštite

U distributivnim mrežama u Republici Srbiji uređaji relejne zaštite se najčešće podešavaju prema tehničkim preporukama Elektroprivrede Srbije [3], [4] i [5]. Način šticećenja vodova se izvodi u zavisnosti od položaja u mreži. Osnovne zaštite vodova od međufaznih kratkih spojeva su kratkospojna ($I_{>>}$), usmerene kratkospojna ($I_{>>->}$) ili podužna kratkospojna zaštita (PKZ).

Kratkospojna zaštita ($I_{>>}$) se izvodi tako da bude selektivna sa zaštitama u TS 35/10 kV. Ova zaštita se izvodi ako nije izvedena podužna kratkospojna zaštita kablovskog voda, a strujno se podešava da ne reaguje za kvarove na 10 kV sabirnicama u TS 35/10 kV. Vremensko podešenje ($t-I_{>>}$) potrebno je postaviti na vrednost (≤ 1 s). Ukoliko posmatrani vod napaja TS koja ima mogućnost dvostranog napajanja, tada je prorada ove zaštite uslovljena pobodom usmerenog člana prekostrujne zaštite. Za koordinacioni interval između zaštitnih funkcija, preporučuje se vreme od 0,5 s.

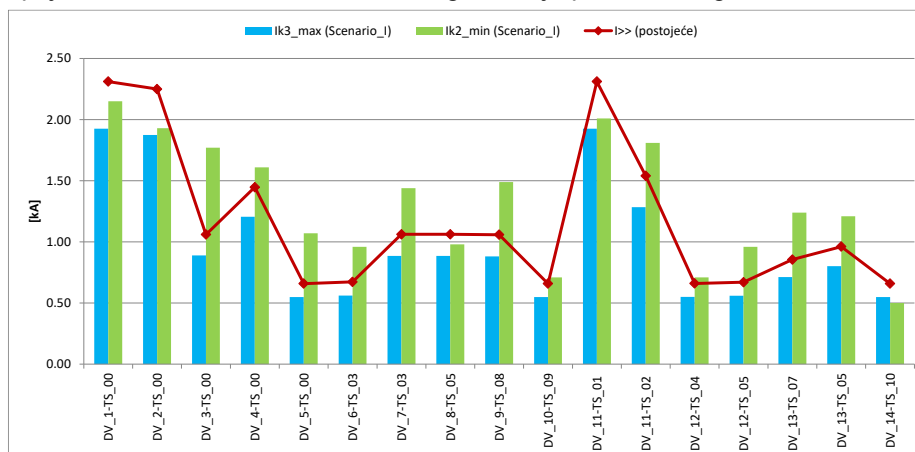
Podešenja kratkospojnih zaštita 35 kV vodova u trenutnom stanju mreže (scenario I) data prema [3] i strujama kratkih spojeva iz tabele 2, prikazana su u tabeli 3:

Tabela 3: Podešenja zaštita 35 kV dalekovoda i struje kratkih spojeva (Scenario I)

DV	Pozicija zaštitnog uređaja	$I_{k3,MAX,10kV_{sv}}$ [kA]	$I_{k2,min}$ [kA]	$I_{>>}$ [kA]	$t-I_{>>}$ [s]
DV_1	TS_00	1,93	2,15	2,31	0,5
DV_2	TS_00	1,88	1,93	2,25	0,5
DV_3	TS_00	0,89	1,06	1,45	1
DV_4	TS_00	1,21	1,61	1,45	1
DV_5	TS_00	0,55	1,07	0,66	1
DV_6	TS_03	0,56	0,96	0,67	0
DV_7	TS_03	0,89	1,44	1,06	0,5
DV_8	TS_05	0,89	0,98	1,06	0
DV_9	TS_08	0,88	1,49	1,06	0,5
DV_10	TS_09	0,55	0,71	0,66	0,5
DV_11 ¹	TS_01	1,93	2,01	2,31	0
	TS_02	1,28	1,81	1,54	0
DV_12 ¹	TS_04	0,55	0,71	0,66	0
	TS_05	0,56	0,96	0,67	0
DV_13 ¹	TS_07	0,71	1,24	0,86	0
	TS_05	0,80	1,21	0,96	0
DV_14	TS_10	0,55	0,5	0,66	0

¹ Kratkospojne zaštite su usmerene tako da reaguju za kvarove na vodu.

Slika 3 prikazuje podešenja kratkospojnih zaštita dalekovoda, maksimalne struje trofaznih kratkih spojeva na 10 kV sabirnicama (svedene na 35 kV naponski nivo), pri čemu se u obzir uzimaju sve sabirnice koje se napajaju preko posmatranog dalekovoda, kao i minimalne struje dvopolnih kratkih spojeva na 35 kV sabirnicama na drugom kraju posmatranog dalekovoda:



Slika 3: Zaštite dalekovoda i karakteristične struje kratkih spojeva (Scenario I)

Analizirajući veličine prikazane na slici 3 uočava se da su podešenja kratkospojnih zaštita svih dalekovoda veća od maksimalnih struja koju rele meri pri kvaru na 10 kV sabirnicama, te je primenom preporuka iz [3] ostvarena koordinisanost zaštita na 35 kV i 10 kV naponskim nivoima. Takođe, primećuje se da je minimalna struja dvopolnog kratkog spoja na 35 kV sabirnicama nekih TS manja od podešenog praga prorade kratkospojnih zaštita dalekovoda koji ih napaja. Ovakvo stanje ima za posledicu to da u minimalnim režimima rada mreže (u pogledu intenziteta struja kratkih spojeva), kratkospojne zaštite dalekovoda ne štite ceo vod od kratkih spojeva, te će određeni kvarovi biti eliminisani od strane rezervnih zaštita tj. prekostrujne zaštite dalekovoda ($I>$), pa će trajanje kvara biti duže, a samim tim i naprezanje opreme i propadi napona u ostatku mreže.

Ova podešenja predstavljaju početno stanje i dalja analiza se fokusira se na ocenu adekvatnosti ovih podešenja u slučaju planirane integracije distribuiranih izvora u mrežu.

4.2. Novi koncepti zaštite

Pri integracije obnovljivih izvora energije u distributivne mreže usled brojnih promena u strukturi i konceptu mreže neminovno se javljaju i problemi u radu sistema relejne zaštite. U samoj distributivnoj mreži može doći do povećanja struje kratkog spoja iznad dozvoljenih granica, u zavisnosti od tipa generatora i instalisane snage i lokacije distribuiranog generisanja. Ukoliko su generatori sinhrona mašine doprinos struji kratkog spoja će biti (relativno)

dugog trajanja i pratiće odgovarajuću vremensku zavisnost, dok će u slučaju da su generatori asinhronne mašine njihov uticaj iščeznuti za 1-2 ciklusa. U slučaju da su DG-i povezani na distributivnu mrežu preko energetskih pretvarača, njihov uticaj na struju kratkog spoja je vrlo ograničen i dominantno zavisi od kontrolnog algoritma implementiranog u samom pretvaraču [6].

Zadržavanjem postojećeg koncepta i logike podešavanja zaštitnih uređaja u distributivnoj mreži, može doći do nepravilnog rada sistema relejne zaštite. Ovo se ogleda u narušavanju selektivnosti između zaštitnih uređaja, narušavanju koordinacije između reklozera i osigurača, neosetljivosti zaštite za kvarove koji treba da se nalaze u zoni reagovanja zaštitnog uređaja, neuspešnog automatskog ponovnog uključanja (APU), itd. [6].

Kako bi se izbegli pomenuti problemi u radu sistema relejne zaštite koji se javljaju pri integraciji obnovljivih izvora energije u distributivne mreže potrebno je izvršiti određene promene u samom konceptu sistema relejne zaštite. Ukoliko je udeo distribuiranog generisanja u distributivnoj mreži relativno mali, pomenuti problemi, ukoliko postoje, mogu se prevazići jednostavnim prepodešavanjima zaštitnih funkcija, tj. promenom struje reagovanja i/ili vremenskog odlaganja. Međutim, sa porastom instalisanih kapaciteta distributivnog generisanja u distributivnoj mreži postaje nemoguće prevazići pomenute nedostatke u radu sistema zaštite jednostavnim prepodešavanjima, već je potrebno izvršiti promene u samom konceptu sistema zaštite i implementaciji novih zaštitnih mikroprocesorskih uređaja, uz aktiviranje zaštitnih funkcija koje se do sada nisu koristile u distributivnim mrežama i primenu komunikacionih šema.

Neki od najčešće korišćenih metoda za prevazilaženje pomenutih potencijalnih problema u distributivnim mrežama su [7]:

1. Primena usmerene prekostrujne zaštite,
2. Primena distantne zaštite,
3. Primena adaptivnih podešenja,
4. Primena komunikacije u sistemu zaštite.

U ovom radu fokus na rešavanju pomenutih potencijalnih problema je stavljen na njihovo otklanjanje primenom postojećih važećih tehničkih preporuka za zaštitu distributivnih mreža, uz neophodne modifikacije i opcione primene novih koncepata zaštite.

4.3. Analiza rada zaštite sa trenutnim podešenjima pri priključenju malih elektrana

Pri analizi adekvatnosti postojećih podešenja kratkopojnih zaštita, potrebno je uzeti u obzir uklopno stanje mreže koje rezultuje maksimalnom strujom kvara koju meri zaštita dalekovoda, pri najkritičnijem kvaru na 10 kV sabirnicama transformatora 35/10 kV, što najčešće nije stanje sa maksimalnim ukupnim strujama kvara, što je ilustrovno na sledećem primeru. Na slici 4 prikazano je uklopno stanje sa maksimalnom ukupnom strujom kvara na

Na osnovu navedenog primera, zaključuje se da je pri odabiru novih podešenja kratkospojnih zaštita dalekovoda posebnu pažnju potrebno posvetiti izboru najkritičnijeg uklopnog stanja za posmatranu poziciju zaštite.

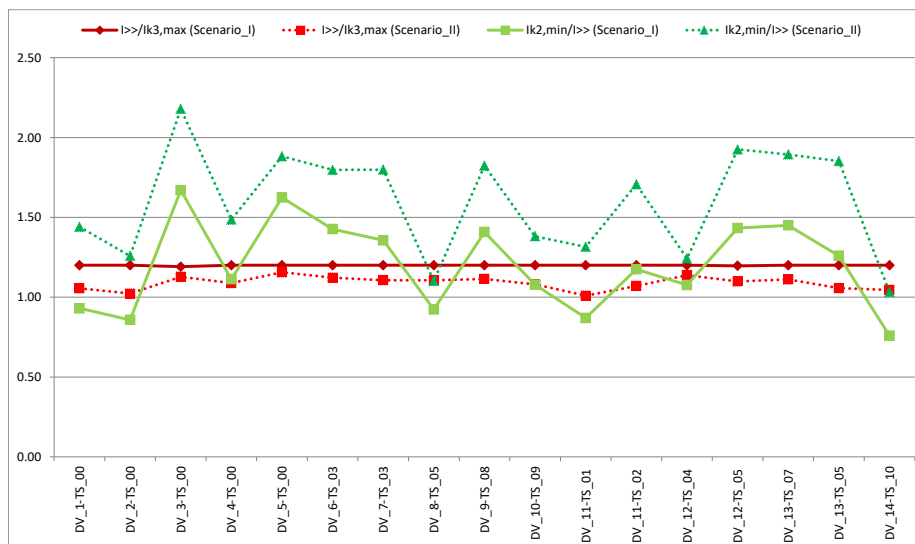
U tabeli 4 prikazana su podešenja kratkospojnih zaštita u mreži bez malih elektrana (scenario I), kao i maksimalne struje koje releji mere pri kvaru na 10 kV sabirnicama (svedene na 35 kV naponski nivo), uz uvažavanje najkritičnijeg uklopnog stanja za posmatranu poziciju zaštitnog uređaja pri priključenju malih elektrana (scenario II), kao i minimalne struje dvofaznih kratkih spojeva pri kvaru na drugom kraju šticeenog dalekovoda u slučaju kada su sve male elektrane povezane na mrežu:

Tabela 4: Podešenja zaštita 35 kV dalekovoda i struje kratkih spojeva (Scenario II)

DV	Pozicija z. u.	$I_{>>}$ [kA]	$I_{k3,MAX,10kV,sv}$ [kA]	$I_{>>} / I_{k3,MAX,10kV,sv}$	$I_{k2,min}$ [kA]	$I_{k2,min} / I_{>>}$
DV_1	TS_00	2,31	2,19	1,06	3,33	1,44
DV_2	TS_00	2,25	2,20	1,02	2,83	1,26
DV_3	TS_00	1,06	0,94	1,13	3,01	2,18
DV_4	TS_00	1,45	1,33	1,09	2,15	1,49
DV_5	TS_00	0,66	0,57	1,16	1,24	1,88
DV_6	TS_03	0,67	0,60	1,12	1,21	1,80
DV_7	TS_03	1,06	0,96	1,11	1,91	1,80
DV_8	TS_05	1,06	0,96	1,11	1,17	1,10
DV_9	TS_08	1,06	0,95	1,11	1,93	1,82
DV_10	TS_09	0,66	0,61	1,08	1,15	1,38
DV_11	TS_01	2,31	2,29	1,01	3,04	1,32
	TS_02	1,54	1,44	1,07	2,63	1,71
DV_12	TS_04	0,66	0,58	1,14	0,82	1,24
	TS_05	0,67	0,61	1,11	1,29	1,93
DV_13	TS_07	0,86	0,77	1,11	1,62	1,89
	TS_05	0,96	0,91	1,06	1,78	1,85
DV_14	TS_10	0,66	0,63	1,05	0,68	1,03

Na osnovu vrednosti iz tabele 4, uočava se da su odnosi podešenja kratkospojnih zaštita dalekovoda (u postojećem stanju) i maksimalnih struja kratkih spojeva za kritične kvarove (po priključenju malih elektrana), manji od 1,2, što predstavlja izabrani faktor sigurnosti za podešavanja zaštita. Ovo je karakteristično za sve pozicije u mreži, a efekat je posebno izražen kod zaštita dalekovoda DV_2 i DV_11 u TS_01, gde vrednosti struja kvara koju meri zaštita dalekovoda pri kvarovima na 10 kV sabirnicama dostižu vrednosti podešenja zaštita, te je pogrešna prorada kratkospojnih zaštita ovih 35kV dalekovoda pri kvarovima na 10 kV naponskom nivou vrlo verovatna.

Odnosi podešenja kratkospojnih zaštita dalekovoda i karakterističnih minimalnih i maksimalnih struja kratkih spojeva, sa i bez povezanih malih elektrana ilustrovani su na slici 6:



Slika 6: Odnosi podešenja kratkospojnih zaštita dalekovoda i karakterističnih maksimalnih i minimalnih struja kratkih spojeva

Na osnovu vrednosti odnosa minimalnih struja dvopolnih kratkih spojeva na drugim sabirnicama šticenog dalekovoda i vrednosti podešenja zaštita, može se zaključiti da priključenje malih hidroelektrana na mrežu ima pozitivan efekat u pogledu povećanja osetljivosti kratkospojnih zaštita, jer dolazi do porasta i minimalnih struja kratkih spojeva koje rele vidi pri kvaru na 35 kV sabirnicama na drugom kraju šticenog dalekovoda. Ovaj efekat je najizraženiji pri kvaru na 35 kV sabirnicama TS_01, jer zaštita DV_1 postaje osetljiva za sve kvarove na posmatranom vodu ukoliko je veći broj malih elektrana povezan na mrežu. Slično važi i za zaštite dalekovoda DV_2, DV_11 i DV_14.

4.4. Predlozi prepodešenja zaštita

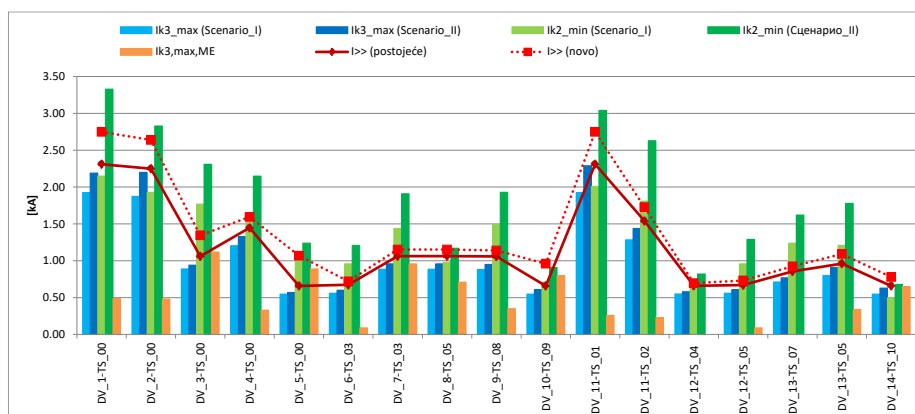
Imajući u vidu prethodno navedeno, moguće je izvršiti određena prepodešavanja kratkospojnih zaštita vodova u cilju postizanja selektivnosti. Novim podešenjima je potrebno obezbediti da ne dolazi do narušavanja selektivnosti zaštita na 35 kV i 10 kV naponskim nivoima u svim uslovima rada mreže, odnosno nezavisno od prisustva malih elektrana na mreži. Takođe, poželjno je da zaštite budu osetljive i za minimalne struje dvofaznih kratkih spojeva na drugom kraju šticenog voda, kao i da ne dolazi do pobude zaštita pri kvarovima „iza“ zone šticeanja posmatrane zaštite. Drugim rečima, potrebno je obezbediti da i kada su sve elektrane na mreži i u uslovima kada nijedna nije priključena na distributivnu mrežu postoji selektivnost i koordinisanost zaštita. Naravno, potrebno je ostvariti koordinisanost zaštita dalekovoda i zaštita priključaka malih elektrana.

Tabela 5 prikazuje maksimalne struje kvara od distribuiranih izvora pri kvaru „iza“ zone šticejnja posmatrane zaštite, koje su merodavne za analizu podešenja kratkospojne zaštite vodova, maksimalne struje na 10 kV naponskom nivou (svedene na 35 kV), minimalne struje kvara na drugom kraju šticejnog voda i nova (predložena) podešenja kratkospojnih zaštita:

Tabela 5: Predlog podešenja zaštita i karakteristične struje kratkih spojeva

DV	Pozicija zašt. ur.	$I_{k3,MAX,ME}$ [kA]	$I_{k3,MAX,10kV,sv}$ (Scenario II) [kA]	$I_{k2,min}$ (Scenario II) [kA]	$I_{>>}$ (novo) [kA]	$t_{>>}$ (novo) [s]
DV_1	TS_00	0,49	2,19	3,33	2,75	1,0
DV_2	TS_00	0,48	2,20	2,83	2,64	0,5
DV_3	TS_00	1,12	0,94	2,31	1,34	1,5
DV_4	TS_00	0,33	1,33	2,15	1,60	1,0
DV_5	TS_00	0,89	0,57	1,24	1,07	1,5
DV_6	TS_03	0,09	0,60	1,21	0,72	0,0
DV_7	TS_03	0,96	0,96	1,91	1,15	1,0
DV_8	TS_05	0,71	0,96	1,17	1,15	0,5
DV_9	TS_08	0,35	0,95	1,93	1,14	0,5
DV_10	TS_09	0,8	0,61	0,91	0,96	1,0
DV_11	TS_01	0,26	2,29	3,04	2,75	0,5
	TS_02	0,23	1,44	2,63	1,73	0,0
DV_12	TS_04	0	0,58	0,82	0,70	0,0
	TS_05	0,09	0,61	1,29	0,73	0,0
DV_13	TS_07	0	0,77	1,62	0,92	0,0
	TS_05	0,34	0,91	1,78	1,09	0,5
DV_14	TS_10	0,65	0,63	0,68	0,78	0,5

Slika 7 prikazuje karakteristične struje kratkih spojeva i podešenja kratkospojnih zaštita dalekovoda (vrednosti iz tabela 4 i 5):



Slika 7: Postojeća i predložena podešenja kratkospojnih zaštita dalekovoda i karakteristične struje kratkih spojeva

Na osnovu vrednosti minimalnih struja dvofaznih kratkih spojeva na drugom kraju dalekovoda koje meri zaštita na posmatranom vodu, uočavamo pozitivne efekte priključenja malih elektrana usled povećanja minimalnih struja kvara, jer zaštite dalekovoda postaju osetljivije za kvarove na drugom kraju voda. Povećanje osetljivosti osnovne zaštite dalekovoda od kratkih spojeva je važan pozitivan efekat priključenja distribuiranih izvora na mrežu. Kvantitet povećanja osetljivosti zavisi pre svega od broja malih elektrana koje su u trenutku kvara povezane na mrežu.

4.5. Primena usmerene prekostrujne zaštite

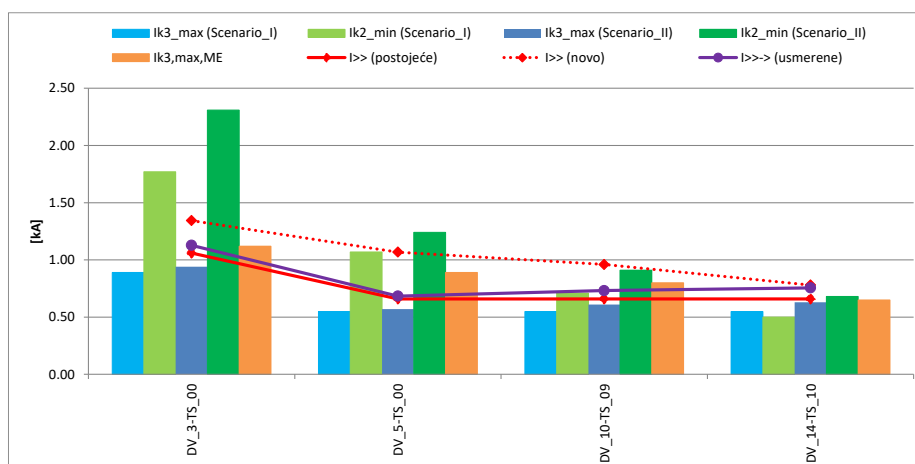
U određenim slučajevima pri kratkim spojevima u mreži, doprinos struji kvara malih elektrana može biti kriterijum za podešenje zaštite vodova. Naime, pri pojavi kvara „iza“ posmatrane zaštite, struja kvara od malih elektrana koje se napajaju sa posmatranog dalekovoda, date u tabeli 5, mogu biti veće od maksimalnih struja kvara na 10 kV naponskom nivou. Tada doprinosi od malih elektrana postaju kritične veličine na osnovu kojih se određue podešenje zaštite. Alternativno, kako se zaštita ne bi pobuđivala za kvarove van zone štice, moguće je zadržati podešenja prema maksimalnim strujama kvara na 10 kV naponskom nivou, ali uz uvođenje usmerenja kratkospojnih zaštita. Prednost ovakvog rešenja je veća osetljivost zaštite, a mana je nešto komplikovanija izvedba iste i veći zahtevi prema zaštitnom uređaju, koji moraju posedovati i naponske ulaze. S obzirom da većina zaštitnih uređaja nove generacije poseduje naponske ulaze (ili razlika u ceni uređaja sa i bez naponskih ulaza nije značajna), ovakvo rešenje bi bilo najprihvatljivije kod zaštite dalekovoda DV_10 u TS_09, jer se takvim podešenjem ostvaruje osetljivost zaštite i za minimalne struje dvopolnih kratkih spojeva na drugom kraju posmatranog dalekovoda.

Tabela 6 prikazuje alternativna podešenja za zaštite dalekovoda DV_3, DV_5, DV_10 i DV_14 koja podrazumevaju usmeravanje kratkospojnih zaštita.

Tabela 6: Podešenja usmerenih kratkospojnih zaštita 35 kV dalekovoda

DV	Pozicija zaštitnog uređaja	Scenario I	Scenario II	Usmerene zaštite	$I_{k3,MAX,ME}$ [kA]
		$I_{>>}$ [kA]	$I_{>>}$ [kA]	$I_{>>->}$ [kA]	
DV_3	TS_00	1,06	1,34	1,13	1,12
DV_5	TS_00	0,66	1,07	0,68	0,89
DV_10	TS_09	0,66	0,96	0,73	0,80
DV_14	TS_10	0,66	0,78	0,76	0,65

Slika 8 prikazuje karakteristične struje kvara (vrednosti iz tabela 3 i 5), maksimalne doprinose malih elektrana struji kvara i podešenja za zaštite dalekovoda DV_3, DV_5, DV_10 i DV_14 u postojećem stanju, sa i bez usmeravanja zaštita.



Slika 8: Primena usmerenih kratkospojnih zaštita na DV_3, DV_5, DV_10 i DV_14

Na osnovu navedenog, može se zaključiti da implementacija usmerenih zaštita može da pozitivno utiče na osetljivost zaštite za minimalne međufazne kvarove u 35 kV mreži, a u posmatranoj mreži implementacija ovog rešenja smisljena je na navedene četiri pozicije.

4.6. Primena distantne zaštite

Prema važećim preporukama [3], u 35 kV mreži se ne predviđa korišćenje distantne zaštite. Distantna zaštita u distributivnim mrežama predviđa se za mreže napona 110 kV, prema [8].

Analizama u poglavlju 4.4 utvrđeno da je u cilju ostvarivanja selektivnosti zaštita vremensko odlaganje reagovanja zaštite DV_5 potrebno podesiti na vreme 1,5 s. Primenom distantne zaštite i logike podešavanja iz [8], može se ostvariti efikasnija zaštita dalekovoda.

Pri podešavanju dosega distantnih zaštita, potrebno je obezbediti selektivnost svih zaštita u koordinacionom nizu i dovoljnu osetljivost zaštita. Dodatno, potrebno je obezbediti da ne dolazi do pobude zaštite za kvarove na 10 kV naponskom nivou i pri ekstremnim opterećenjima.

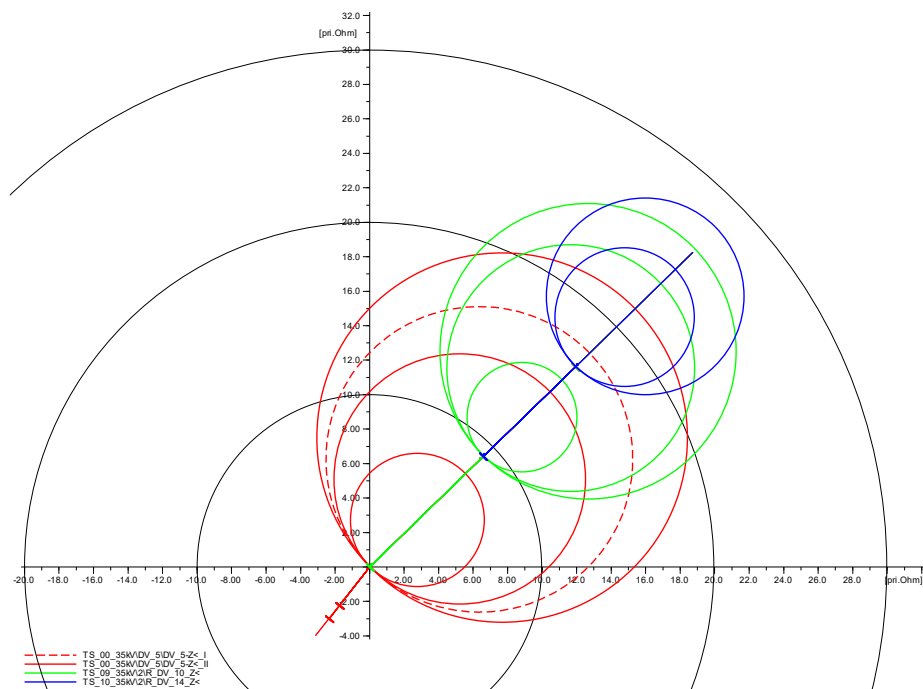
Primenom navedene logike podešavanja, prvi stepen distanthe zaštite DV_5 detektuje kvarove samo na pomenutom vodu, te je stoga njegovo vreme reagovanja moguće postaviti na 0 s, što rezultuje značajnim skraćanjem vremena izolovanja međufaznih kratkih spojeva na dalekovodu u odnosu na slučaj da se koristi prekostrujna zaštita koja bi, prema ranije navedenim razmatranjima reagovala sa vremenom odlaganja od 1,5 s. Ovim se ostvaruje brza i selektivna zaštita dalekovoda.

U slučaju implementacije distantne zaštite na dalekovodu DV_5 i zadržavanju kratkospojnih zaštita dalekovoda DV_10 i DV_14, dovoljno je koristiti jedan ili dva stepena podimpedantne zaštite, jer je vreme reagovanja

drugog stepena potrebno koordinisati sa vremenom reagovanja kratkospojne zaštite DV_10, i postaviti na 1,5 s.

U slučaju da se i na dalekovodima DV_10 i DV_14 implementira distantna zaštita mogu se koristiti sva tri stepena.

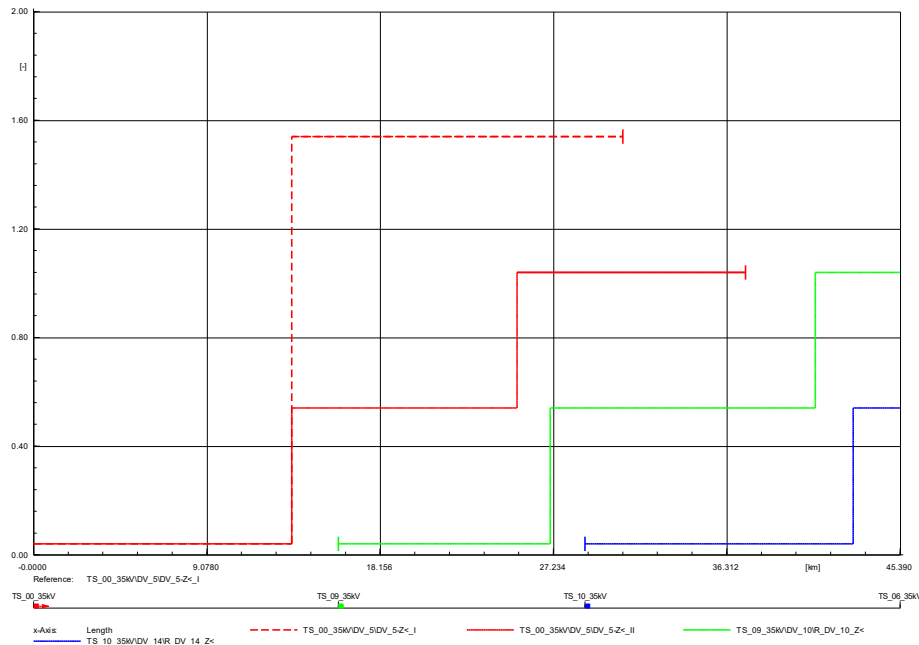
Grafički prikaz podešenja distantnih zaštita u impedantnoj ravni dat je na slici 9. Punom crvenom linijom su prikazana podešenja zaštite DV_5 u slučaju implementacije distantne zaštite na DV_10 i DV_14, dok je isprekidanom linijom prikazan doseg druge zone u slučaju da na DV_10 i DV_14 nisu implementirane distantne zaštite (treća zona se ne koristi). Doseg prve zone zaštite DV_5 je identičan u oba slučaja.



Slika 9: Podešenja distantnih zaštita dalekovoda DV_5, DV_10 i DV_14 (R-X Plot)

Primenom distantne zaštite na dalekovodima DV_10 i DV_14 se ostvaruje da se međufazni kratki spojevi na većem delu štice vodova eliminišu bez vremenske zadržke, dok je u slučaju korišćenja kratkospojnih zaštita vreme otklanjanja kvara 1 s i 0,5 s, respektivno. Takođe, u slučaju otkazivanja glavne zaštite kvarovi su otklonjeni od strane rezervnih zaštita na susednom dalekovodu sa manjim vremenom odlaganja nego u slučaju da se koristi kratkospojna zaštita.

Slika 10 prikazuje pokrivenost dalekovoda distantnim zaštitama. Na x-osi se je prikazana dužina dalekovoda u kilometrima (moguć je i prikaz u Ω), a na y-osi je prikazano vreme reagovanja odgovarajućeg stepena distantne zaštite:



Slika 10: Koordinacija distantnih zaštita dalekovoda DV_5, DV_10 i DV_14
(Time-distance diagram)

Na osnovu navedenog može se zaključiti da se primenom distantne zaštite umesto prekostrujne kao osnovne zaštite dalekovoda od međufaznih kratkih spojeva, mogu uspešno prevazići nastali problemi ostvarivanja efikasne zaštite, uz generalno poboljšanje performansi sistema zaštite, usled smanjenja vremena isključenja kvara i povećane osetljivosti zaštite.

5. Zaključci

U ovom radu analiziran je rad sistema relejne zaštite koncipiran na važećim tehničkim preporukama za podešavanje zaštite distributivnih mreža. Analizirana mreža predstavlja jednu distributivnu mrežu u Republici Srbiji sa velikim brojem malih hidroelektrana.

U radu je pokazano da povezivanje perspektivnih distribuiranih izvora na mrežu izaziva značajan porast struja kratkih spojeva, kao i promenu smera i raspodele struje kvara usled pojave novih izvora.

U radu su prikazana podešenja zaštita 35 kV dalekovoda prema važećim tehničkim preporukama i postojećem stanju mreže u kojoj nisu prisutni distribuirani izvori.

Potom je analiziran rad sistema zaštite sa postojećim podešenjima u slučaju da se sve planirane male hidroelektrane priključe na distributivnu mrežu. Zaključeno je da su na svim pozicijama potrebna prepodešenja

kratkospojne zaštite dalekovoda kako se ne bi pobuđivale pri kvarovima na 10 kV naponskom nivou, odnosno usled porasta struja kvara koju mere dalekovodne zaštite pri kvarovima na 10 kV sabirnicama, potrebno je povećati struju prorade kratkospojnih stepena.

Takođe, utvrđeno je da priključenje distribuiranih izvora ima pozitivan efekat na osetljivost kratkospojnih zaštita dalekovoda, jer usled porasta struja kratkih spojeva u 35 kV mreži zaštite pojedinih dalekovoda postaju osetljivije za međufazne kratke spojeve na drugom kraju štice vodova sa minimalnim strujama kvara, nego u slučaju kada male elektrane nisu povezane na mrežu.

Kako pojava novih izvora struja kvara u distributivnoj mreži može da izazove pogrešnu proradu neusmerenih kratkospojnih zaštita dalekovoda, prikazana je mogućnost usmeravanja tih zaštita uz smanjenje struje prorade i održavanje selektivnosti sa zaštitama na 10 kV naponskom nivou.

Utvrđeno je da je na određenim pozicijama u mreži, u cilju održavanja koordinisanosti zaštita dalekovoda i zaštita priključnog mesta male elektrane, potrebno povećati vreme reagovanja zaštita dalekovoda. Prikazane su mogućnosti prevazilaženja ovog nedostatka primenom distantne zaštite dalekovoda.

Na osnovu sprovedene analize, može se zaključiti da iako integracija velikog broja malih elektrana na 35 kV distributivnu mrežu može da izazove nepravilnosti u radu sistema zaštite, pomenuti problemi se u analiziranoj mreži u velikoj meri mogu prevazići pravilnim podešavanjima postojećih zaštitnih uređaja. Stoga, postojeće tehničke preporuke sa kratkospojnim zaštitama kao osnovnim zaštitama dalekovoda, mogu se koristiti kao dobra osnova podešavanje zaštite distributivnih vodova i u slučaju mreža sa velikim brojem distribuiranih izvora, uz pažljivo razmatranje faktora relevantnih za podešenje zaštite.

Međutim na određenim pozicijama u mreži prikazane su prednosti redefinisavanja izbora i podešenja zaštitnih funkcija, što je ilustrovano primenom distantne zaštite.

Integracija velikog broja distribuiranih izvora energije svakako će zahtevati nova rešenja u pogledu koncepta i podešenja sistema relejne zaštite distributivnih mreža. Povećanje osetljivosti, pouzdanosti i fleksibilnosti sistema relejne zaštite u mnogome će doprineti ukupnom povećanju performansi rada savremenih distributivnih mreža.

Literatura

- [1] DIgSILENT PowerFactory 2017 SP3 (x64), DIgSILENT GmbH, Germany, www.digsilent.com
- [2] IEC 60909, Short-circuit currents in three-phase a.c. systems, Part 0: Calculation of currents, First edition 2001-07

- [3] Tehnička preporuka br.4a1, Zaštita elektrodistributivnih vodova 10 kV, 20 kV i 35 kV, IV izdanje, maj 2001, JP Elektroprivreda Srbije, Beograd
- [4] Tehnička preporuka br.4b, Zaštita distributivnih transformatora u TS 35/10(20) kV i TS 110/X kV, IV izdanje, maj 2001, EPS – Direkcija za distribuciju električne energije, Beograd
- [5] Tehnička preporuka br.16, Osnovni tehnički zahtevi za priključenje malih elektrana na mrežu elektrodistribucije Srbije, JP Elektroprivreda Srbije, Beograd
- [6] Math Bollen, Fainan Hassan, *Integration od Distributed Generation in the Power System*, Wiley-IEEE Press, August 2011.
- [7] *The Impact of Renewable Energy Sources and Distributed Generation on Substation Protection and Automation*, CIGRE Technical Brochure 421, Working Group B5.34, August 2010.
- [8] Tehnička preporuka br.4a2, Zaštita elektrodistributivnih vodova 110 kV, I izdanje, maj 2001, EPS – Direkcija za distribuciju električne energije, Beograd

Abstract: In this paper the influence of a large number of small hydro power plants on the short-circuit currents is analysed, as well as the operation of the relay protection system within the real distribution network in Serbia. The necessary modification of the existing protection functions, as well as the implementation of the new proposed protection functions, are presented and discussed. Network modeling and analysis are performed using the program tool DIgSILENT PowerFactory.

Keywords: small hydropower plants, distribution network, short-circuit currents, relay protection system

Analysis of the Impact of Connecting a Larger Number of Small Hydroelectric Power Plants to the Short-circuit Currents Values and Relay Protection System of Distribution Network

Nikola Sučević, Željko Đurišić

Rad primljen u uredništvo: 31.10.2017. godine.

Rad prihvaćen: 10.11.2017. godine.