

UTICAJ SOLARNIH PANELA NA PODEŠENJE ZAŠTITE NA IZVODU IMPACT OF SOLAR GENERATORS ON FEEDER PROTECTION SETTING

Filip Surla, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad*

Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO

Kratak sadržaj – U radu je razmatran problem relejne zaštite sa injektiranim solarnim panelima po potrošačkim područjima. Iznete su teorijske osnove iz aspekta relejne zaštite izvoda, model konzuma i solarnog panela. Potom je izvršena analiza rada zaštite u inicijalnom stanju i u stanju sa injektiranim strujama solarnih izvora.

Ključne reči: *Relejna zaštita, zaštita izvoda, solarni paneli*

Abstract – *This paper discusses the problem of relay protection with injected solar panels in consumer areas. Theoretical bases from the aspect of relay protection of the outlet, model of consumption and solar panels are laid out. Then, it was analyzed relay protection operation in the initial state and in the state with the injected currents from solar sources.*

Keywords: *Relay protection, feeder protection, solar generators*

1. UVOD

U ovom radu obradiće se tema uticaja solarnih panela instaliranih na individualna domaćinstva na prepodešenje relejne zaštite na izvodu. Izneće se teorijske osnove o zaštiti izvoda, solarnih panela i adekvatan matematički model sa verifikacijom. U glavi broj dva definiše se teorijske osnove o kvarovima u elektroenergetskim sistemima sa akcentom na distributivne mreže. U glavi broj tri definišu se osnovni zadaci relejne zaštite kao i vrste releja koji se koriste. U glavi broj četiri biće reči o solarnim panelima, kako se modeluju, koje su sve veličine koje figurišu pri odabiru i proračunu solarnog panela, zatim će se navesti kako se solarni paneli štite od eventualnih kvarova. U glavi broj pet predstaviće se svi pozitivni i negativni aspekti instalisanja distribuiranih izvora energije iz aspekta relejne zaštite. U glavi broj šest je izvršio se proračun pojedinačnog konzuma, inicijalno podešenje zaštite kao i maksimalan broj domaćinstava po konzumu sa solarnim panelima bez uticaja na relejnu zaštitu. U glavi broj sedam je donet zaključak na osnovu svega gore navedenog.

2. KVAROVI U DISTRIBUTIVNIM MREŽAMA

Kratak spoj je slučajna ili nameran spoj provodnika, preko malog otpora ili impedanse, između dve ili više tačaka, koje su na različitim potencijalima [1].

NAPOMENA:

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je dr Duško Bekut, red. prof.

Karakteristike uređaja koji obavljaju tu funkciju zavise od veličine struja koje prekidaju, odnosno od vremenskog trenutka u kome isključuju kvar. Zato je poznavanje odvijanja prelazne pojave i veličine struje kvara koja se prekida od iznimnog značaja za podešavanje zaštitnih releja i izbor parametara prekidača i druge rasklopne opreme, odnosno rezultati proračuna krakih spojeva se koriste kako pri projektovanju tako i pri eksploataciji i planiranju elektroenergetskog sistema. U distributivnim mrežama, kao i u elektroenergetskim sistemima uopšte, analiziraju se sledeće vrste kvarova: jednopolni kratki spoj, dvopolni kratki spoj bez zemlje, dvopolni kratki spoj sa zemljom i troploni kratak spoj sa i bez zemlje.

3. ZAŠTITA RADIJALNIH MREŽA

Električne mreže predstavljaju deo elektroenergetskog sistema koji služi za prenos električne energije. Pod pojmom mreže se prvenstveno misli na vodove (kablovske i vazdušne) [2]. Za zaštitu vodova se koriste sledeće vrste zaštite:

- prekostrujna,
- distantna,
- diferencijalna i
- zaštita osiguračima.

Izbor za zaštitu radijalnih mreža jeste prekostrujna zaštita sa nekim svojim izvedbama a to su:

- trenutna prekostrujna zaštita $J \gg$ (tzv. kratkospojna zaštita),
- prekostrujna zaštita $J > i$
- zaštita sa relejom nulte komponente – zemljospojna zaštita $J_0 >$.

Primenom gore navedenih zaštita vrši se obezbeđenje od međufaznih kratkih spojeva i od zemljospojeva kojih ima procentualno i najviše u distributivnim mrežama. Zaštita je pozicionirana na početku izvoda, odnosno u samom izvodnom polju transformatorske stanice 110/x/y kV/kV/kV. U američkim mrežama koristi se drugi pristup, odnosno, zaštite se pozicioniraju i u dubini mreže zbog veće selektivnosti.

3.1 PREKOSTRUJNA ZAŠTITA

Prekostrujni releji sa strujno nezavisnom karakteristikom se stavljaju u stanje pobude kada struja premaši podešenu vrednost, ali njihovo delovanje nije trenutno, već dolazi posle određenog vremenskog perioda. Konstrukcija trenutnih prekostrujnih releja (često se nazivaju i kratkospojni) je dosta jednostavnija u odnosu na obične prekostrujne releje, jer ne sadrže vremenski član.

Strujno podešenje releja se bira na osnovu izraza (1):

$$I_p = \frac{k_{sigurnosti} \cdot k_{spoja} \cdot I_{pogonsko,max}}{a \cdot p_i}, \quad (1)$$

gde je:

$k_{sigurnosti}$ – koeficijent sigurnosti koji uzima vrednosti 1.1 ili 1.2,

k_{spoja} – koeficijent spoja koji je za spoj na fazne struje jednak jedinici a kod spoja razlika struja,

p_i – prenosni odnos strunog transformatora.

3.2 ZEMLJOSPOJNA ZAŠTITA

Zemljospojna zaštita se realizuje preko releja nulte komponente. Ovi releji se koriste i u slučaju kada je po intezitetu struje teško razlikovati normalno radno stanje ili stanje kvara. Nulta komponenta se dobija pomoću sumarnog spoja strujnih mernih transformatora. Ovakav spoj se naziva i Holmgrin spoj.

Princip rada se zasniva na detektovanju sume struja koja je različita od nule. U normalnom pogonu, suma tri fazne struje bi trebala da bude nula ili veoma bliska nuli. Ovakvo razmatranje se odnosi na trofazne uravnotežene mreže. U slučaju kvara (zemljospoja), nesimetrija postaje znakovitija, pa je i suma struja različita od nule, te relej detektuje takvo stanje.

3.3 DISTANTNA ZAŠTITA VODOVA

U ovom radu nije stavljen akcenat na podešenje i impelenciju distante zaštite. Distantna zaštita se prevashodno koristi na nivoima 110 kV i više ali neretko se nalazi i na nivou distribucije. Smisao uvođenja distatne zaštite jeste da se ne traži struja kvara ili napon na mestu kvara već impedansa kvara od mesta ugradnje releja do mesta kvara i na takav način dolazi se do reagovanja zaštite.

4. MODEL SOLARNIH PANELA

Solarni paneli predstavljaju skup više solarnih ćelija vezanih u celinu i mogu se za potrebe matematičkog modelovanja prikazati šematski električnim veličinama. Modeluje se kao idealni strujni generator sa dodatim otpornostima R_p i R_s koje se u grublim aproksimacijama mogu zanemariti.

HDKR model (Hay, Davies, Klucher, Reindl) je jedan od najboljih modela za određivanje količine sunčevog zračenja koje dolazi na neku površinu koja je pozicionirana na površini zemlje.

Ukupna količina Sunčevog zračenja koje pada na solarni panel računa se kao:

$$G_{Tt} = (G_{bt} + G_{dt} \cdot A_i) \cdot R_b + G_{dt} \cdot (1 - A_i) \cdot \left(\frac{1 + \cos\beta}{2} \right) \cdot \left[1 + f \sin \frac{\beta^3}{2} \right] + G_t \cdot \rho_g \cdot \left(\frac{1 - \cos\beta}{2} \right), \quad (2)$$

gde je:

G_{Tt} – ukupno ekstraterističko horizontalno zračenje [kW/m^2],

G_{bt} – direktno ekstraterističko horizontalno zračenje [kW/m^2],

G_{dt} – rasuto ekstraterističko horizontalno zračenje [kW/m^2],

R_b – odnos direktne komponente zračenja na nagnutnu površinu u odnosu na horizontalu,

A_i – indeks anizotropije koji je mera propusnosti direktnog zračenja kroz atmosferu,

f – indeks kojim se uzima u obzir da je svetlost koja dolazi sa horizonta više rasuta,

ρ_g – refleksija okoline i

β – nagib površine generator [$^\circ$].

Izlazna snaga solarnog panela se definiše kao:

$$P_{PV} = Y_{PV} \cdot f_{PV} \cdot \left(\frac{G_{Tt}}{G_{Tt,STCt}} \right) \cdot [1 + \alpha_p \cdot (T_C - T_{C,STC})] \quad (3)$$

gde je:

Y_{PV} – snaga koju daje solarni panel pri standardnim uslovima [kW],

f_{PV} – faktor redukcije [%],

$G_{T,STCt}$ – količina radijacije pri standardnim uslovima testiranja [kW/m^2],

α_p – temperaturni koeficijent snage [%/ $^\circ\text{C}$],

T_C – temperatura solarnog panela za dati vremenski korak [$^\circ\text{C}$] i

$T_{C,STC}$ – temperatura solarnog panela pri standardnim uslovima testiranja [$^\circ\text{C}$].

4.2 ZAŠTITA SOLARNIH PANELA

Zaštita od kratkih spojeva se izvodi pomoću prekostrujnih okidača prekidača (na niskonaponskoj strani). Takođe ovakav uređaj služi i za zaštitu od preopterećenja. Ugrađuje se u razvodnim ormanima niskog napona.

5. UTICAJ SOLARNIH PANELA NA ZAŠTITU IZVODA

USN-mrežama koje sadrže uglavnom nadzemne vodove većinakvarova su privremene prirode, pa prvozahteva zaštitne strategije radijalnog sistema odnosno uklanjanje svih grešaka. U praksi se ističe nekoliko problema pri povezivanju DG na radijalne izvode, a iz aspekta relejene zaštite: povećanje struje kratkog spoja, zaslepljivanje zaštite inehsinhronizirani rad uređaja distributivne automatike [3].

5.1 POVEĆANJE STRUJE KVARA

Doprinos ukupnoj struji kvara od jednog malog distributivnog generatora nije veliki. Ipak, kada se razmatra skup više malih jedinica, njihov doprinos može značajno uticati na povećanje struje kratkog spoja, a time na greške u koordinaciji između zaštitne opreme, što dalje dovodi do ugrožavanja sigurnosti i pouzdanosti distributivnih sistema. Distribuirani generatori koji su povezani na distributivnu mrežu menjaju intenzitet ismer struje kvara kroz distributivne vodove, i nakon priključenja mogu dovesti do poremećaja koordinacije postojeće zaštite.

5.2 ZASLEPLJIVANJE ZAŠTITE

Ovaj problem najviše utiče na rad relejne zaštite. Kao što je gore navedeno, struja kvara u radijalnim mrežama se povećava ako su u mreži dodatni distribuirani izvori električne energije. Takođe je poznato da je relejna zaštita pozicionirana na glavi fidera odnosno da se prekostrujna zaštita nalazi na prekidaču u izvodnom polju.

Struja kvara jednaka je zbiru struja koju vidi relej (struja iz mreže) i struje koju daje distributivni generator. Što znači da kroz relej teče struja:

$$I_R = I_F - I_{DG}, \quad (4)$$

gde je:

I_R – struja kvara koju vidi relej [A],

I_F – stvarna struja kvara [A] i

I_{DG} – struja kvara koju doprinosi DG [A].

Zaključuje se da će relej videti manju struju od stvarne te da postoji mogućnost da neselektivno deluje.

5.3. NESINHRONIZOVANI RAD UREĐAJA DISTRIBUTIVNE AUTOMATIKE

U srednjenaponskim i niskonaponskim radijalnim distributivnim mrežama, zbog jednostavnosti i niske cene, često se mogu sresti sistemi zaštite bazirani na "reklozerima" i osiguračima. Ovaj koncept može ostvariti dovoljno dobru selektivnost, osetljivost i pouzdanost sistema zaštite jedne distributivne mreže, bez velikih ekonomskih investicija u vidu srednjenaponskih prekidača i mikroprocesorskih releja.

U slučaju da se u mrežu doda distribuirani izvor energije, raspodela struja se može radikalno promeniti. U ovakvom slučaju struja kroz osigurač se povećava dok se struja kroz reklozer smanjuje.

Zavisno od toga koliko struje distribuirani izvor ubacuje u mrežu toliko će se koordinisanje reklozer-osigurača poremetiti.

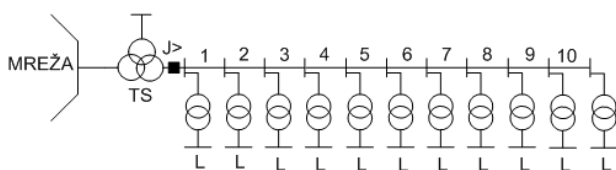
5.4. FAULT RIDE THROUGH

Većina razvijenih zemalja ima jasno definisana Pravila o pogonu prenosnih i distributivnih mreža. Između ostalih zahteva, u ovim pravilima su definisani i posebni zahtevi „Fault Ride Through – FRT“ (ili opštije – „Low Voltage Ride Through – LVRT“).

Ovi zahtevi se odnose na sposobnost DER da ostanu u pogonu pri sniženim naponima. Zahtevima FRT se jasno utvrđuje kako generatori zasnovani na uređajima energetske elektronike (DER tipa 3-4 u distributivnim mrežama) reaguju u slučaju smanjenih napona u čvorovima u kojima su oni priključeni na mrežu, koji su prouzrokovani kvarovima bilo gde u mreži [4].

6. PRIMER UTICAJA SOLARNIH PANELA NA RELEJNU ZAŠTITU

Primer uticaja solarnih panela na prepodešenje zaštite prikazaće se na jednom srednjenaponskom izvodu. Na šemi je uočena samo prekostrujna zaštita jer trenutna prekostrujna zaštita ne može da odreaguje na bilo koju promenu zbog FRT-a. Razmatra se 20 kV izvod prikazan na slici 6.1.



Slika 6.1 – Razmatrani srednjenaponski izvod

6.1. MODEL POTROŠAČKOG PODRUČJA

Potrošačko područje se napaja preko transformatora instalirane snage od 1000 kVA, samim tim se proračunava koliko se može opteretiti ovakav transformator. Iz ovakve transformatorske stanice izlazi ukupno osam izvoda, pa se opterećenje ravnomerno deli.

Za ovakvo područje usvajaju se sledeći parametri koji su neophodni za proračun opterećena distributivnog transformatora: $\cos\phi = 0.95$, $k=0.8$, $P_{\max,izvodu} = 95$ [kW], $j_{\infty} = 0.25$, $j = 0.6$, $P_{\text{dom}} = 11.25$ [kW] pa se ukupan broj domaćinstava po izvodu dobije 38 a na celom trafo području – 304 domaćinstava. Potrebno je još izračunati koliko aktivnu snagu odaje jedan solar postavljen na krov jednog domaćinstava. Na osnovu površine krova, faktora redukcije i unapred poznate snage koju prosečan solarni panel daje izračunava se maksimalna izlazna snaga, a samim tim i odata struja. Tako da za usvojenih $S_{\text{krova}} = 90$ m², $G_{z,kv} = 120$ [W/m²], $f_{\text{redukcije}} = 0.75$ dobija se $I_{\text{solara}} = 0.24$ [A] svedeno na srednjenaponski nivo.

6.2. PODEŠAVANJE RELEJNE ZAŠTITE BEZ SOLARNIH PANELA

Za razmatrani izvod prikazan na slici 6.1 vrši se podešavanje trenutne prekostruje zaštite, prekostrujne zaštite i kratkospojne zaštite. Inicijalno podešenje zaštite se vrši pomoću ukupne struje potrošnje koje ide kroz izvod. Strujna podešenja trenutne prekostruje, prekostruje i zemljospojne zaštite respektivno iznosi:

- $I_{\text{podešenja,kratkospojno,zaštite}} = 1732$ [A],
- $I_{\text{podešenja,prekostrujno,zaštite}} = 519.615$ [A] i
- $I_{\text{podešenja,zemljospojno,zaštite}} = 60$ [A].

Za prekostrujnu zaštitu treba izvršiti proračun koeficijenta osetljivosti, koji se definiše kao odnos struje dvopolnog kratkog spoja bez zemlje i struje podešenja prekostruje zaštite. Za izvod koji je prikazan na slici 6.1 proračunate su ekvivalente impedanse direktnog i inverznog redosleda, kao i adekvatna struja dvopolnog kratkog spoja I_{LL} , koji se simulira na kraju izvoda. Odnos struje dvopolnog kratkog spoja i struje podešenja prekostruje zaštite dobija se vrednost koeficijenta osetljivosti koja je u ovom slučaju 2.34, što je dovoljno da bi se održala selektivnost zaštite.

6.3. UTICAJ SOLARNIH PANELA NA OSETLJIVOST RELEJNE ZAŠTITE

Posle podešenja zaštite u inicijalnom stanju, i utvrđivanju koeficijenta osetljivosti za prekostrujnu zaštitu, u mrežu se dodaju solarni paneli koji su montirani na krovove individualnih potrošača (domaćinstava). Prvo treba definisati koliko uticaj ima jedan solarni panel sa svakog konzuma na struju koju vidi relej. Posle toga treba utvrditi iterativno koji je maksimalan broj domaćinstava sa solarnim panelima dozvoljen a da se ne ugrozi koeficijent osetljivosti zaštite. Svi solarni paneli u konzumu se modeluju kao idealni strujni generator koji može da uzme vrednost od 0 A do maksimalne struje koju odaju svi solarni paneli po konzumu. U čvor koji se injektira konzum, jasno je da struja kroz impedansu transformatora neće biti degradirana.

Struju dvopolnog kratkog spoja u ovakvom slučaju treba rešavati metodom superpozicije, odnosno rešavati dva kola, jedno sa naponskim generatorima, a drugo kolo sa strujim generatorima. Potrebno je proračunati kolika struja kvara, koja potiče od solarnih panela, prolazi sa strane releja, odnosno koliko ta struja degradira struju I_{LL} , i dovodi do zaslepljenja zaštite. Da bi se kompletirao uticaj svakog solarnog panela po konzumu, nevezano na koji je čvor priključen, potrebno je definisati dve promenljive – Z_{desno} i Z_{levo} . Pomoću ove dve impedanse za svaki čvor ponaosob se računa ekvivalentna impedansa levo i desno gledajući iz određenog čvora. Smisao uvođenja ove promenljive jeste određivanje struje koja ide levo, odnosno koja će uticati na smanjenje struje kroz relej. Problem je iskonvergirao sa sledećim rešenjima: broj domaćinstava – $n = 182$, struja solara injektirana u mrežu $-I_{solara} = 451$ [A], struja releja $-I_{releja,novo} = 812.43$ [A] i koeficijent osetljivosti – $k_{osetljivosti} = 1.5047$.

Što implicira tome da je 59.87% domaćinstava kritičan procenat gde se treba razmišljati o prepodešenju zaštite. Ovakav rezultat praktično nije moguć jer bi u tom slučaju od svakog konzuma tekla snaga 40% veća od nominalne snage transformatora. U slučaju kada bi se u svakoj transformatorskoj stanici instalisao još jedan transformator snage 1000 kVA i da rade u paraleli, ovakav rezultat bi imao smisla.

6.4 UTICAJ SOLARNIH PANELA NA POVEĆANJE STRUJE KVARA

Razmatra se srednjenaponski izvod kao sa slike 6.1. Po čvorovima su i dalje injektirani isti transformatori srednji na niski napon, ali je zato odata snaga solara smanjena na 5 kW i broj dodatih solarnih panela po konzumu je 15%, što predstavlja realnije stanje sistema nego kao u prethodnom testu. Simuliranjem trolnog kratkog spoja na kraju izvoda dobijeno je da je porasla struja kvara za 5% dok je koeficijent osetljivosti pao, što potvrđuje fenomen porasta struje kvara i pada osetljivosti releja.

6.5 UTICAJ SOLARNIH PANELA NA RAD REKLOSERI I OSIGURAČA

Za zadati problem, analiziraće se slučajevi: kada instalisani distributivni generatori imaju uticaj na osigurač koji štiti distributivni transformator SN/NN i kada se štiti srednjenaponska deonica. Pri nominalnom radu, kada nema priključenih solarnih generatora sa strane niskog napona, iz mreže dolazi po 28 A za svaki konzum. Predpostavlja se da je na 15% domaćinstava instalisan solarni panel, kao u poglavlju 6.4. Tada će kroz osigurač teći struja reda veličina 20 A.

Za ovakvo stanje u sistemu, birali bi se drugačiji osigurači. Međutim treba imati na umu da se ovakva proizvodnja po konzumima dešava u određenim terminima (leti i preko dana), tako da bi svako menjanje osigurača koji štite konzum bilo nepotrebno. Takođe ako se uključi DG u bilo koji čvor pre osigurača može doći do povećanja struje osigurača i smanjenje struje reklosera i ugroziti selektivnost.

6.6 POSLEDICE POSTOJANJA DODATIH SOLARNIH PANELA NA STANJE U MREŽI

Kroz gornja poglavlja analizirali su se uticaji instalisanih solarnih panela sa strane niskog napona na relejnu zaštitu pozicioniranu na izvodu. Kroz nekoliko testova zapaženo je sledeće: pri velikom broju dodatih solarnih panela po konzumima, duž celog izvoda, može se doći do gubitka selektivnosti zaštite na izvodu, da pri manjem broju dodatih solarnih panela po konzumu, dolazi do povećanja struje kvara, te se može dovesti u pitanje odabir prekidačke opreme, prilikom dodavanja solarnih panela sa strane niskog napona, tokovi snaga se drastično mogu promeniti te se u momentima najveće proizvodnje solarnih panela može doći do smanjenja struja koje tek kroz osigurače, čime se smanjuje njihova selektivnost i ako se neke deonice štite osiguračima i rekloserima u paru, prilikom dodavanja solarnih panela može narušiti koordinisanje.

7. ZAKLJUČAK

U ovom radu obrađena je tema uticaja solarnih panela instalisanih na individualna domaćinstva na prepodešenje relejne zaštite na izvodu. Iznete su teorijske osnove o zaštiti izvoda, solarnih panela i adekvatan matematički model sa verifikacijom gde je ustanovljeno da se po konzumu nalazi 304 domaćinstva sa srednjom instalisanom snagom, kao i da je maksimalan broj domaćinstava sa instalisanim solarnim panelima 182 bez uticaja na prepodešenje zaštite. Takođe, donet je zaključak da pri niskim instalisanim snagama solarnih panela po konzumima, dolazi do povećanja struje trolnog kratkog spoja i da se menja opterećenje osigurača koje štite konzume.

8. LITERATURA

- [1] Strahil Gušavac, *Osnovni principi projektovanja u mrežama srednjeg i niskog napona*, Fakultet Tehničkih Nauka Novi Sad, 2004.
- [2] Duško Bekut, *Relejna zaštita*, Fakultet Tehničkih Nauka Novi Sad, 2009.
- [3] E. Coster, J. Myrzik, W. Kling, *Effect of distributed generation on protection of medium voltage cable grids*, CIRED Vienna 2007
- [4] L. Strezoski, *Proračun kompleksnih katkih spojeva neuravnoteženih distributivnih mreža sa distribuiranim energetske resursima*, Doktorski rad, Fakultet tehničkih nauka Novi Sad, 2017

Kratka biografija:



Filip Surla rođen je u Novom Sadu 1994. godine. Master rad je odbranio 2018. godine na Fakultetu tehničkih nauka iz Elektrotehnike i računarstva – Elektroenergetski sistemi.