

UTICAJ PARAMETARA DISTRIBUTIVNE MREŽE I DISTRIBUIRANOG GENERATORA NA VREDNOST DIFERENCIJALNE STRUJE PARALELNIH VODOVA**IMPACT OF DISTRIBUTION NETWORK PARAMETERS AND DISTRIBUTED GENERATOR ON THE VALUE OF PARALLEL LINE DIFFERENTIAL CURRENT**Marko Čančar, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad***Oblast - ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO**

Kratak sadržaj – U ovom radu predmet razmatranja jeste analiza uticaja parametara distributivne mreže i distributivnog generatora na vrednost diferencijalne struje paralelnih vodova. Cilj rada jeste da se proceni koliko značajno promene tipa voda (vazdušni/kablovski), nejednakost dužina paralelnih voda i postojanje distributivnog generatora na sabirnicama paralelnih vodova utiču na vrednost diferencijalne struje paralelnih vodova.

Ključne reči – Diferencijalna struja, Parametri mreže, Distributivni generator

Abstract – In this paper, the subject of consideration is the analysis of the influence of parameters of the distribution network and distribution generator on the value of the differential current of parallel lines. The aim of the paper is to assess how significant changes in the type of line (overhead/cable), the inequality of parallel line lengths and the existence of a distribution generator on parallel line bus bars affect the value of the differential current of parallel lines.

Keywords – Differential current, Network parameters, Distribution Generator

1. UVOD

Povećanje potreba za energijom, povećanje prisustva distributivnog generatora (DG) i povećanje potreba za prenosom energije u distributivnoj mreži dovode do povećanja broja elemenata mreže i do paralelnog rada elemenata. Za zaštitu paralelnih vodova distributivne mreže se koriste poprečne diferencijalne zaštite [1,2]. Te zaštite nisu predmet razmatranja u ovom radu nego su to struje koje se pri kvaru pojavljuju na paralelnim vodovima – preciznije razlika struja po paralelnim vodovima. Postojanje diferencijalne struje ukazuje na pojavu kvara. Upravo predmet razmatranja ovog rada je analiza kako promene elemenata i parametara distributivne mreže kao i (dodavanje) novog DG utiču na diferencijalne struje na paralelnim vodovima.

U glavi 2 je vrlo kratko objašnjena poprečna diferencijalna zaštita samo da bi se mogao steći kontekst zbog čega se obrađuje ova problematika diferencijalnih struja u ovom radu.

U glavi 3, opisan je matematički model za proračune na test mreži sa uključenim DG. Ovaj model je iskorišćen za proračun diferencijalnih struja na paralelnim vodovima.

U glavi 4 je data analiza tipa (vazdušni/kablovski) tip voda i promene dužine paralelnih vodova i DG na vrednost diferencijalne struje paralelnih vodova. Cilj je bio da se dobije uvid koliko varijacije parametara vodova – a izabrana je analiza efekta nejednakih dužina paralelnih vodova utiče na promenu vrednosti poprečne diferencijalne struje. Dodatna analiza je izvedena za slučaj kada se na sabirnice na kojima završavaju vodovi priključi jedan distributivni generator.

U poslednje dve glave dat je zaključak rada i spisak korišćene literature za pisanje ovog rada.

2. DIFERENCIJALNA ZAŠTITA VODOVA

U ovom delu su date osnovna razmatranja vezana za diferencijalnu zaštitu paralelnih vodova. Ova zaštita se poprečnome diferencijalne zaštite. Poduzna diferencijalna zaštita nije predmet ovog rada, pa je izostavljena.

2.1. Poprečna diferencijalna zaštita

Poprečna diferencijalna zaštita se koristi za zaštitu paralelnih vodova sa približno jednakim parametrima. Potrebno je da oba voda polaze i da se završavaju na zajedničkim sabirnicama.

Ako su dva voda dovoljno slična, da se mogu smatrati istim (ako su impedanse paralelnih vodova jednake ili približno jednake), onda u normalnom pogonu i kod kvarova van zone štice struje kroz vodove su približno iste, pa je njihova razlika vrlo mala ili jednaka nuli. Međutim, situacija se menja ako se na jednom od vodova dogodi kvar. U takvim slučajevima počinje da se razlikuje struja po vodovima, tj. razlika struja (diferencijalna struja) je različita od nule i to se koristi kao kriterijum za delovanje zaštite.

Postoji dve varijante poprečne diferencijalne zaštite: obična i selektivna diferencijalna zaštita.

Obična poprečna diferencijalna zaštita ima prekidače ispred i iza paralelnih vodova. Međutim, ako se kvar dogodi samo na jednom vodu, nema potrebe da se isključuju oba voda, već samo vod sa kvarom i tada se koristi selektivna poprečna diferencijalna zaštita, koja će isključiti samo vod sa kvarom [1-5].

NAPOMENA:

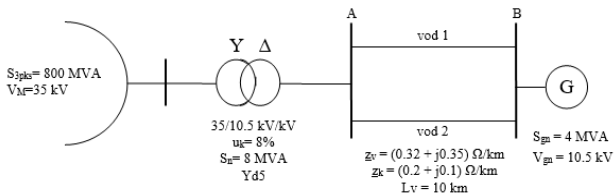
Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Duško Bekut, red. prof.

3. MATEMATIČKI MODEL ZA PRORAČUN DIFERENCIJALNE STRUJE NA PARALELNIM VODOVIMA

U ovoj glavi je predstavljen matematički model za proračun diferencijalne struje na paralelnim vodovima za primer distributivne mreže prikazan na slici 3.1. Proračun je urađen za trolpolni kratak spoj. Razmatraju se proračuni samo diferencijalne struje vodova kod sabirnica A pri čemu se ne razmatra i podešavanje same poprečne diferencijalne zaštite za šta su potrebni proračuni i tokova snaga što izlazi iz okvira razmatranja ovog rada.

3.1. Postavka problema

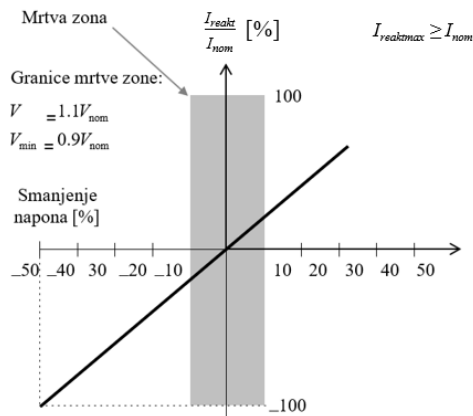
Za analizu vrednosti diferencijalne struje izabran je primer dva paralelna voda 10 kV (vazdušni i kablovski tip). Potrebno je simulirati trolpolni kratak spoj na vodu 1 i izračunati kolika se razlika struja meri na početku vodova. S obzirom da napajanje paralelnih sabirnica dolazi preko sabirnica A, ovaj slučaj je kritičniji za analizu od slučaja na kraju vodova kod sabirnica B. Parametri elemenata mreže su dati na slici 3.1.



Slika 3.1 Test distributivna mreža

3.2. Doprinos distributivnog generatora struji kratkog spoja

U radu je analiziran i uticaj DG na vrednost diferencijalne struje. Tokom trajanja kratkog spoja, postoji zahtev da DG injektiranja reaktivnu snagu u cilju očuvanja (podrške) napona čvora na koji je priključen u unapred definisanim granicama (podrazumevaju se DG koji su preko odgovarajuće energetske elektronike povezani na distributivnu mrežu [6]). Vreme trajanja naponske podrške DG za vreme kvara, kao i vrednost injektiranja, definisani su standardima. U ovom radu je korišćen nemački standard (Nemački grid kod) [6] koji definiše dve karakteristike: vreme trajanja naponske podrške DG tokom kvara i zavisnost injektiranja reaktivne struje DG od sniženja napona. Zavisnost injektiranja struje generatora od sniženja napona je prikazana na slici 3.2 [6].



Slika 3.2 Zavisnost injektiranja struje generatora od sniženja napona

Sa slike 3.2 se na osnovu sniženja napona priključnog čvora može odrediti vrednost injektiranja struje DG. Sa ove krive se može očitati da za svakih 1% sniženja napona injektiranje struje DG je 2% (struja koja se injektira ima fazni stav koji je kapacitivno pomeren za ugao od 90 stepeni u odnosu na fazni stav struje pre kvara). Najveće strujno injektiranje ne može da premaši 150% nominalne struje DG. Takođe, označena je i mrtva zona strujnog injektiranja DG, koja pokazuje da ukoliko je sniženje napona $\pm 10\%$, nema promene injektiranja generatora.

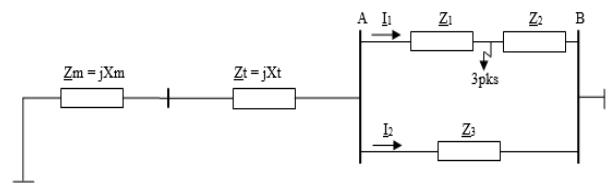
$$I_g = \frac{2}{100} \Delta U_{gen} I_{gn}, \quad (3.1)$$

gde su:

- ΔU_{gen} – sniženje napona priključnog čvora,
- I_{gn} – nominalna struja generatora.

3.3. Izvođenje matematičkog modela

Prvi korak izvođenja matematičkog modela predstavlja formiranje šeme direktnog redosleda za mrežu, a u ovom slučaju je to mreža prikazana na slici 3.3, i izračunavanje struje kvara po vodovima (I_1 i I_2).



Slika 3.3 Pogonska šema test distributivne mreže bez generatora

Relacije za izračunavanje struja kvara po vodovima su:

$$I_1 = \frac{Z_2 + Z_3}{Z_1 + Z_2 + Z_3} I_{3pks}, \quad (3.2)$$

$$I_3 = I_{3pks} - I_1, \quad (3.3)$$

gde su:

- Z_1 – impedansa voda 1 između sabirnica A i mesta kvara,
- Z_2 – impedansa voda 1 između sabirnica B i mesta kvara,
- Z_3 – impedansa voda 2,
- I_{3pks} – nominalna snaga transformatora.

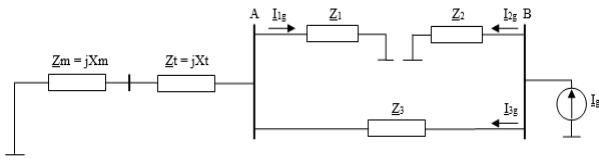
Zatim, potrebno je izračunati procentualno sniženje napona DG (na sabirnicama B) u odnosu na njegovu nominalnu vrednost:

$$\Delta U_{gen} = \left(1 - \frac{\sqrt{3} |U_{gen}|}{V_{gn}} \right) \cdot 100, \quad (3.4)$$

gde su:

- U_{gen} – fazni napon na mestu priključenja generatora za vreme kvara,
- V_{gn} – nominalni linijski napon generatora.

Sada treba odrediti doprinos DG strujama I_1 i I_3 . DG će se modelovati preko idealnog strujnog izvora priključenog na sabirnicama B, kao na slici 3.4.



Slika 3.4 Pogonska šema test distributivne mreže sa DG

Strujno injektiranje DG (I_g) na mestu priključenja izračunava se pomoću relacije 3.1. Doprinos generatora strujama kvara po vodovima se dobija preko strujnog razdelnika (I_{1g} i I_{3g}).

$$I_{3g} = \frac{Z_2}{Z_2 + Z_3 + Z_1 || (Z_M + Z_T)} I_g, \quad (3.5)$$

$$I_{1g} = \frac{Z_M + Z_T}{Z_1 + Z_M + Z_T} I_{3g}, \quad (3.6)$$

gde su:

- Z_M – impedansa napojne mreže,
- Z_T – impedansa napojnog transformatora.

Diferencijalna struja kod sabirnice A, na mestu ugradnje diferencijalne zaštite, sa uključenim DG je:

$$\Delta I_{gen} = (I_1 + I_{1g}) - (I_3 - I_{3g}). \quad (3.7)$$

Ukoliko se u relaciji za izračunavanje ΔI_{gen} izostave struje DG (I_{1g} i I_{3g}), dobija se izraz za izračunavanje diferencijalne struje za isključeno stanje DG:

$$\Delta I = I_1 - I_3. \quad (3.8)$$

Procentualna razlika diferencijalnih struja sa i bez DG u odnosu na diferencijalnu struju bez DG izračunava se na sledeći način:

$$\Delta I_{proc} = \frac{\Delta I - \Delta I_{gen}}{\Delta I} \cdot 100. \quad (3.9)$$

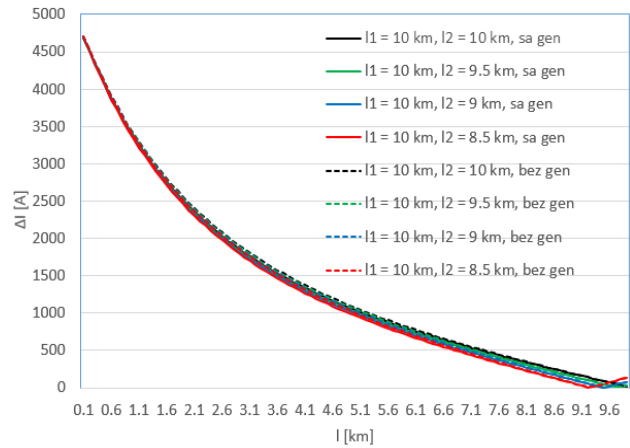
4. ANALIZA REZULTATA PRORAČUNA DIFERENCIJALNIH STRUJA PARALELNIH VODOVA

U ovom delu su prikazani rezultati proračuna diferencijalne struje za mrežu sa vazдушnim/kablovskim vodovima, pri promeni dužine paralelnih vodova. Analizira se primer za mrežu sa slike 3.1 gde su vodovi vazdušni, odnosno, kablovski.

Dužina voda 1 je konstantna u svim razmatranjima dok su za dužinu voda 2 korišćene sledeće vrednosti: 10, 9.5, 9 i 8.5 km (izbor ovih dužina odgovara slučajevima istih, vrlo sličnih, malo različitih i dosta različitih dužina vodova).

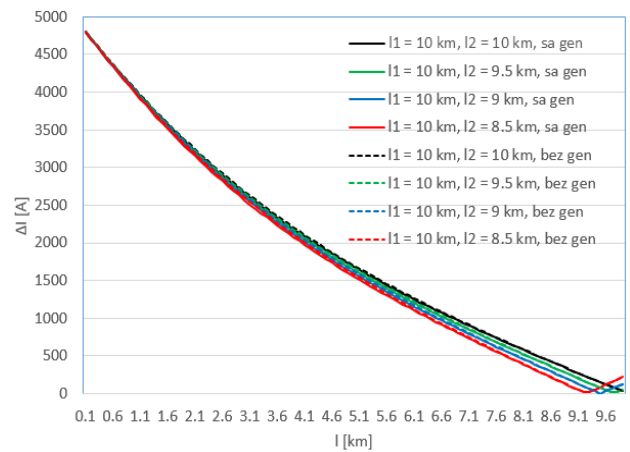
Duž voda 1 se simulira trolejni kratak spoj od 0.1 do 9.9 km dužine voda merene od sabirnice A, sa korakom 0.1 km. Ostali parametri elemenata mreže su fiksni. Rezultati proračuna vrednosti diferencijalnih struja sa i bez DG za slučaj vazдушnih vodova su prikazani na slici 4.1, a na slici 4.2 za slučaj kablovskih vodova.

Sa slike 4.1 vidi se da je diferencijalna struja za kvar na početku voda 1 najveća.



Slika 4.1 Zavisnost razlike struja od dužine voda 2 kod vazдушnih vodova

Razlog za to je što su struje kratkih spojeva veće za kvar bliži izvoru napajanja. Iz istog razloga se diferencijalna struja smanjuje sa povećanjem rastojanja između mesta kvara i sabirnica A. Iz dobijenih rezultata se može uočiti da je uticaj promene diferencijalne struje za različite dužine vodova relativno mali i da više dolazi do izražaja za mesta kvara kod sabirnice B jer tu najviše dolazi do izražaja nejednakost impedansi vodova. Važno je primetiti da nejednake dužine vodova utiču da se diferencijalna struja na vodu 1 smanjuje za mesto kvara koji odgovara dužini voda 2 što znači da nejednake dužine paralelnih vodova skraćuju dužinu štice. Takođe, rezultati sa uključenim DG i bez njega su slični, uticaj DG je zanemarljiv.



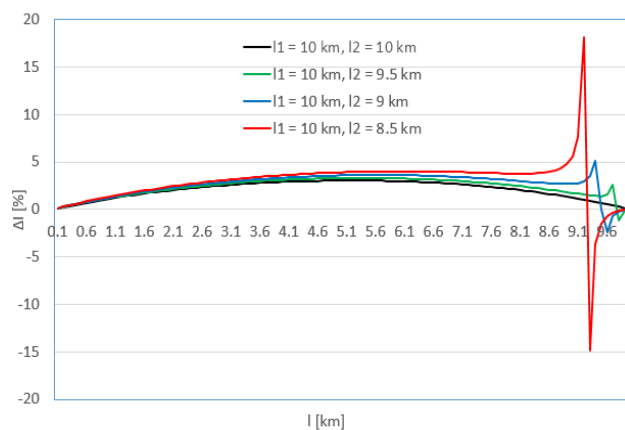
Slika 4.2 Zavisnost razlike struja od dužine voda 2 kod kablovskih vodova

Sa slike 4.2 se vidi da su diferencijalne struje kablovskih vodova slične odgovarajućim strujama vazдушnih vodova sa slike 4.1, što je posledica samog menjanja vrednosti podužne impedanse kablovskih vodova. Ostali efekti su isti kao i kod vazдушnih vodova.

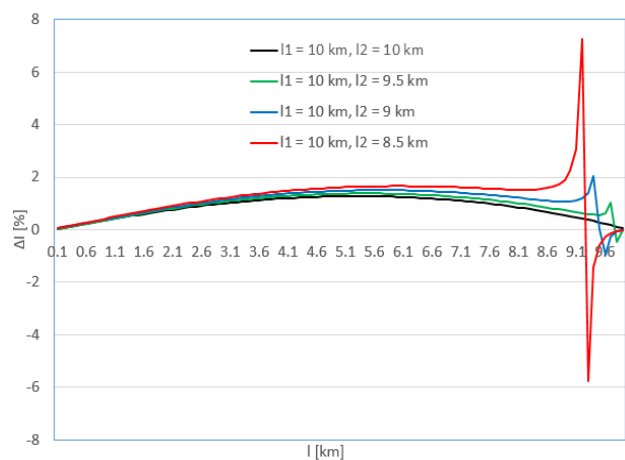
Procentualna razlika diferencijalnih struja za uključeno i isključeno stanje DG za vazdušne vodove prikazana je na slici 4.3, dok je na slici 4.4 prikazan slučaj za kablovske vodove.

Analizom rezultata proračuna sa slike 4.3 može se uočiti da je procentualna razlika diferencijalnih struja najveća za kvar na sredini voda, reda veličine do oko 4%, pa do 18%

za kvarove bliže sabirnicama B. Takođe, vidi se da je za veću razliku dužina vodova veća i procentualna razlika diferencijalnih struja. To je posledica činjenice da je mesto kvara bliže mestu gde se nalazi električna sredina mesta kvara na paralelnim vodovima (diferencijalna struja koja potiče od sistema (u ovom primeru to je mreža 35 kV) teži ka nultoj vrednosti). Zato strujno injektiranje DG i razlike struja po vodovima od DG više dolaze do izražaja jer na njihovu raspodelu utiču samo impedanse vodova. Zato se za mesta kvara pri kraju voda 2 pojavljuju pikovi na slici 4.3. kao posledica činjenice da vrednost diferencijalne struje teži ka malim vrednostima.



Slika 4.3 Procentualna razlika diferencijalnih struja za uključeno i isključeno stanje generatora, za različite dužine voda 2 za vazdušne vodove



Slika 4.4 Procentualna razlika diferencijalnih struja za uključeno i isključeno stanje generatora, za različite dužine voda 2 za kablovske vodove

Sa slike 4.4 vidi se da su procentualne razlike diferencijalnih struja kablovskih vodova manje od odgovarajućih procentualnih razlika diferencijalnih struja vazdušnih vodova sa slike 4.3 (oko 2% za kvarove na sredini voda, pa do 7.5% za kvar na sabirnicama B). Ostali efekti su isti kao i kod vazdušnih vodova.

5. ZAKLJUČAK

U ovom radu analizirani su uticaji parametara mreže i priključenja DG na vrednost prosečne diferencijalne struje paralelnih vodova.

Analizirani su različiti slučajevi promene parametara distributivne mreže: tip (vazdušni/kablovski) paralelnih

vodova i nejednake dužine ovih vodova. Konstatovano je da su promene najviše izražene u slučaju vazdušnih vodova, a da su manje izražene kod kablovskih vodova. Uticaj nejednakih dužina vodova najviše dolazi do izražaja na kraju voda suprotno od mesta proračuna diferencijalnih struja. Nejednake dužine paralelnih vodova utiču da se diferencijalna struja na vodu 1 smanjuje za mesto kvara koji odgovara dužini voda 2 što znači da nejednake dužine skraćuju dužinu štice. Konstatovano je da je uticaj DG na ove promene zanemariv.

Na kraju je konstatovano da je promena diferencijalnih struja ipak relativno mala i da na taj način ne može bitnije uticati bitno na podešenje poprečne diferencijalne zaštite.

6. LITERATURA

- [1] D. Bekut: Relejna zaštita, FTN izdavaštvo, Novi Sad, 2009.
- [2] M. Forcan, Z. Stojanović: A standby protection scheme to complement transverse differential protection of double circuit lines in the case of one parallel line tripped, Electric Power Systems Research, Volume 201, 2021, ISSN 0378-7796, <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107570>.
- [3] M. Kletsel, B. Masharapov: Differential protection of three and four parallel lines of idling current control, PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY, ISSN 0033-2097, R. 93 NR 10/2017, doi:10.15199/48.2017.10.26.
- [4] L. Shilong, C. Wei, Y. Xianggen, C. Deshu, O. Malik: Integrated Transverse Differential Protection Scheme for Double-Circuit Lines on the Same Tower, IEEE Transactions on Power Delivery, ISSN: 0885-8977, Volume: 33, October 2018, <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2017.2765762>.
- [5] L. Xiaohua, Y. Xianggen, Z. Zhe, C. Deshu: Department of Electrical Engineering, Huazhong – A New Novel of transverse differential protection Scheme University of science and technology, Wuhan Hubei, 430074, P.R. China, International Conference on Power Systems Transients – IPST 2003, https://www.ipstconf.org/papers/Proc_IPST2003/03IPST_05b-04.pdf.
- [6] L. Strezoski, I. Stefani, D. Bekut: Novel method for adaptive relay protection in distribution systems with electronically-coupled DERs, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, Vol. 116, pp. 1-10, ISSN 0142-0615.

Kratka biografija:



Marko Čančar rođen je u Sremskoj Mitrovici 1994. godine. Osnovne studije završio je na Fakultetu tehničkih nauka 2017. godine. iz oblasti Elektrotehnika i računarstvo, smer Elektroenergetski sistemi. Master rad, na istom fakultetu, odbranio je 2024. godine.