Vpliv enosmerne komponente diferenčnega toka na delovanje zaščitnih naprav na diferenčni tok tipa A

Lara Barlič[1], **Domen Hudoklin**[1], **Franci Jenko**[2]

[1] *Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška cesta 25, 1000 Ljubljana*
[2] *ETI Elektroelement d.o.o., Obrezija 5, 1411 Izlake*
E-pošta: lara.barlic@gmail.com

Impact of the Direct Current Component of Residual Current on the Operation of Type A Residual Current Devices

Residual current devices are widely used in low-voltage electrical installations to protect against electric shock and fire. The increasing use of power electronic equipment, such as photovoltaic systems, electric vehicle chargers and variable-speed drives, may result in direct current components in the residual current, which can affect the operation of type A residual current devices. This paper investigates the influence of a superimposed smooth direct current component on the tripping characteristics of two-pole and four-pole type A residual current devices with rated residual operating currents of 30 mA, 100 mA and 300 mA. The results show that the direct current component alters the tripping behaviour of the tested devices and, at sufficiently high values, may lead to a loss of sensitivity. The two-pole 30 mA device exceeded the tripping-current limit specified by the standard, while one pole of the four-pole 30 mA device no longer tripped at a direct current component of 60 mA. The results demonstrate that smooth direct current components can significantly affect the reliable operation of type A residual current devices and should therefore be considered when selecting residual current protection for installations in which such currents may occur.

1 Uvod

Zaščitne naprave na diferenčni tok (RCD, angl. *Residual Current Device*) predstavljajo pomemben element zaščite v nizkonapetostnih električnih inštalacijah, saj zagotavljajo zaščito pred električnim udarom ter zmanjšujejo nevarnost požara zaradi okvarne izolacije. Njihovo pravilno delovanje je zato ključnega pomena za zagotavljanje električne varnosti v sodobnih električnih inštalacijah. Z razvojem močnostne elektronike ter vse večjo uporabo fotonapetostnih sistemov se v električnih inštalacijah vse pogosteje pojavljajo enosmerne (DC) komponente diferenčnega toka [1].

Na voljo je več tipov zaščitnih naprav na diferenčni tok, ki se med seboj razlikujejo glede na vrste diferenčnih tokov, ki jih zaznavajo. Zaščitne naprave tipa A so namenjene zaznavanju sinusnih izmeničnih (AC) in pulzirajočih enosmernih (DC) diferenčnih tokov, niso pa namenjene zaznavanju gladkega enosmernega diferenčnega toka [2]. Ker zaščitna naprava na diferenčni tok za zaznavanje diferenčnega toka uporablja diferenčni transformator, lahko prisotnost gladke enosmerne komponente povzroči nasičenje njegovega magnetnega jedra. Posledično se lahko spremenijo prožilne karakteristike zaščitne naprave oziroma lahko pride do zmanjšanja njene občutljivosti ali neodzivnosti, poznane tudi kot zaslepljenost zaščitne naprave [1].

Namen prispevka je eksperimentalno ovrednotiti vpliv enosmerne komponente diferenčnega toka na prožilne karakteristike zaščitnih naprav tipa A. Meritve so bile izvedene na dvopolnih (P2) in štiripolnih (P4) zaščitnih napravah proizvajalca ETI z nazivnimi diferenčnimi toki 30 mA, 100 mA in 300 mA. Raziskava je tako omejena na zaščitne naprave enega proizvajalca in tri nazivne diferenčne tokove, kar je treba upoštevati pri posploševanju rezultatov na druge proizvajalce, izvedbe in nazivne diferenčne tokove. Na podlagi izvedenih meritev je analiziran vpliv naraščajoče enosmerne komponente na delovanje preizkušenih zaščitnih naprav.

2 Teoretične osnove

2.1 Delovanje zaščitnih naprav na diferenčni tok

Zaščitna naprava na diferenčni tok deluje na principu primerjave tokov v faznem in nevtralnem vodniku. Pri normalnem obratovanju je njuna vsota enaka nič, zato v sekundarnem navitju diferenčnega transformatorja ni induciranega toka. Ob okvari izolacije del toka steče po drugi poti kot uhajavi tok, kar povzroči razliko, ki jo zaščitna naprava zazna kot diferenčni tok. Nazivni diferenčni tok zaščitne naprave je označen z $I_{\Delta n}$. Ko diferenčni tok doseže sprožilno vrednost, se v sekundarnem navitju inducira tok, ki sproži odklop tokokroga [1].

Uhajavi tok je tok, ki zaradi poškodovane izolacije, vlage ali delovanja EMC-filtrov steče po neželeni prevodni poti [3]. Ker se uhajavi tokovi različnih naprav v inštalaciji seštevajo, mora njihova skupna vrednost med normalnim obratovanjem ostati bistveno manjša od nazivnega diferenčnega toka zaščitne naprave, sicer lahko pride do njenega neželenega proženja [4, 5].

2.2 Vpliv enosmerne komponente diferenčnega toka

V tokokrogih z močnostno elektroniko se lahko pojavijo trajne gladke enosmerne komponente diferenčnega toka,

ki jih zaščitne naprave tipa A niso namenjene zaznavati [2]. Njihova prisotnost povzroči premik delovne točke magnetnega jedra diferenčnega transformatorja [1].

Posledica je postopno nasičenje magnetnega jedra v zaščitni napravi, zaradi katerega se zmanjša občutljivost naprave na izmenični diferenčni tok. Ob dovolj veliki enosmerni komponenti lahko zaščitna naprava izgubi sposobnost pravilnega zaznavanja diferenčnega toka in zato ne sproži, čeprav so izpolnjeni pogoji za izklop [1].

Takšno delovanje predstavlja pomemben varnostni problem predvsem pri fotonapetostnih sistemih, frekvenčnih pretvornikih in polnilnih postajah za električna vozila, kjer se lahko pojavljajo trajne enosmerne komponente diferenčnega toka [1]. V takšnih primerih se priporoča uporaba zaščitnih naprav tipa B ali tipa B+, ki so namenjene tudi zaznavanju gladkega enosmernega diferenčnega toka [2].

3 Sorodna dela

Vpliv enosmerne komponente diferenčnega toka na delovanje zaščitnih naprav na diferenčni tok je bil obravnavan že v predhodnih raziskavah. Czapp je eksperimentalno preučeval več kot trideset naprav tipov AC, A in B z različnimi nazivnimi diferenčnimi tokovi ter pokazal, da je njihovo proženje odvisno tudi od oblike diferenčnega toka. Pri številnih napravah tipa A je bilo pravilno delovanje ugotovljeno tudi pri pulzirajočem diferenčnem toku s superponirano gladko enosmerno komponento do 150 mA [6].

V novejši raziskavi so Czapp, Tariq in Cieślik pokazali, da lahko enosmerna komponenta glede na sestavo diferenčnega toka in lastnosti zaščitne naprave njeno občutljivost zmanjša ali v določenih primerih tudi poveča. Na odziv poleg velikosti in polaritete enosmerne komponente vplivajo tudi magnetne lastnosti jedra diferenčnega transformatorja [7].

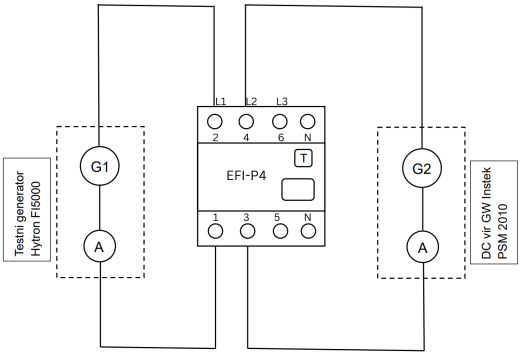
Problematika je posebej pomembna pri napravah z močnostno elektroniko. He, Chen in Chen so pri zaščiti za polnjenje električnih vozil izpostavili, da lahko zaradi usmernikov, pretvornikov in filtrov ob okvari nastanejo različne oblike diferenčnega toka, vključno s pulzirajočim in gladkim enosmernim tokom [8].

V tem prispevku je vpliv gladke enosmerne komponente obravnavan z neposredno primerjavo dvopolnih in štiripolnih zaščitnih naprav tipa A istega proizvajalca pri nazivnih diferenčnih tokovih 30 mA, 100 mA in 300 mA. Poseben poudarek je namenjen razlikam v odzivu obeh izvedb pri naraščajoči enosmerni komponenti diferenčnega toka.

4 Eksperimentalni postopek

Za ovrednotenje vpliva enosmerne komponente diferenčnega toka na delovanje zaščitnih naprav tipa A so bile izvedene laboratorijske meritve na zaščitnih napravah proizvajalca ETI.

Merilni sistem je sestavljal programabilni laboratorijski enosmerni napajalnik GW Instek PSM-2010, generator diferenčnih tokov HYTRON FI-generator ter preizkušane zaščitne naprave na diferenčni tok tipa A serije EFI proizvajalca ETI. Preizkušene so bile dvopolne (P2) in štiripolne (P4) zaščitne naprave z nazivnimi diferenčnimi toki 30 mA, 100 mA in 300 mA. Pri štiripolnih napravah so bili posamezni fazni poli označeni z L1, L2 in L3. Uporabljeno merilno vezje je prikazano na sliki 1. Enosmerni napajalnik je omogočal nastavljanje enosmerne komponente toka, generator diferenčnih tokov pa je ustvarjal izmenični diferenčni tok, ki se je povečeval do sprožitve zaščitne naprave.



Slika 1: Merilno vezje za določanje vpliva enosmerne komponente na delovanje zaščitnih naprav tipa A.

Med meritvami je bila nastavljena enosmerna komponenta toka, generator diferenčnih tokov pa je postopoma povečeval izmenični diferenčni tok do sprožitve zaščitne naprave, brez priključenega bremena. Pri štiripolnih napravah je bila DC komponenta dovedena le skozi en pol (simulacija enofaznega DC uhajavega toka), meritve pa so bile ponovljene za vsak fazni pol (L1, L2, L3) posebej. Za vsako nastavljeno vrednost DC komponente so bile izvedene tri ponovitve, iz katerih sta bila izračunana povprečni sprožilni tok in standardni odklon.

5 Rezultati in razprava

Glavni rezultati meritev so povzeti v tabeli 1. Primerjane so bile dvopolne (P2) in štiripolne (P4) zaščitne naprave tipa A z nazivnimi diferenčnimi toki 30 mA, 100 mA in 300 mA. $\mathrm{DC}_{\max}$ predstavlja največjo vrednost enosmerne komponente, pri kateri je naprava oziroma posamezni pol še sprožil, $\mathrm{AC}_{\max}$ in $\mathrm{AC}_{\min}$ pa največjo oziroma najmanjšo vrednost povprečnega izmeničnega sprožilnega toka med vsemi preizkušenimi vrednostmi enosmerne komponente.

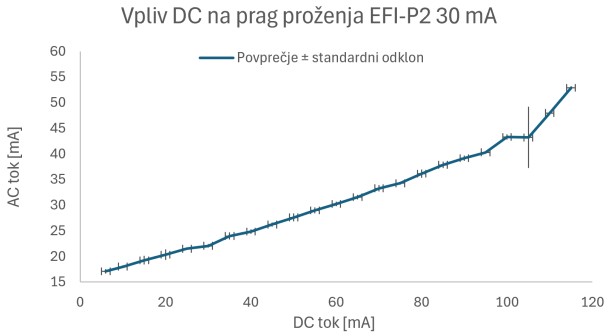
Iz meritev je razvidno, da prisotnost enosmerne komponente vpliva na delovanje vseh preizkušenih naprav tipa A. Z naraščanjem DC komponente se spreminja sprožilni tok zaščitne naprave, pri višjih vrednostih pa lahko pride tudi do izgube občutljivosti. Intenzivnost vpliva je bila odvisna od izvedbe zaščitne naprave in njenega nazivnega diferenčnega toka. Največji vpliv DC komponente je bil ugotovljen pri napravah z nazivnim diferenčnim tokom 30 mA, medtem ko je bilo pri 100 mA in 300 mA napravah naraščanje sprožilnega toka bolj postopno in znotraj preizkušenega območja ni prišlo do popolne izgube občutljivosti.

Slika 2 kaže skoraj linearno naraščanje sprožilnega

Tabela 1: Povzetek rezultatov meritev zaščitnih naprav tipa A pri prisotnosti enosmerne komponente diferenčnega toka.

Naprava	$I_{\Delta n}$ **[mA]**	$\mathbf{DC}_{\max}$ **[mA]**	$\mathbf{AC}_{\max}$ **[mA]**	$\mathbf{AC}_{\min}$ **[mA]**
P2	30	115	52,9	17,1
P2	100	190	107,2	76,5
P2	300	510	403,3	211,3
P4 - L1	30	60	28,2	21,7
	100	190	103,7	72,5
	300	540	386,3	228,0
P4 - L2	30	60	24,2	19,7
	100	190	103,3	72,5
	300	540	387,3	231,0
P4 - L3	30	55	24,4	21,4
	100	190	102,0	72,7
	300	540	387,3	226,0

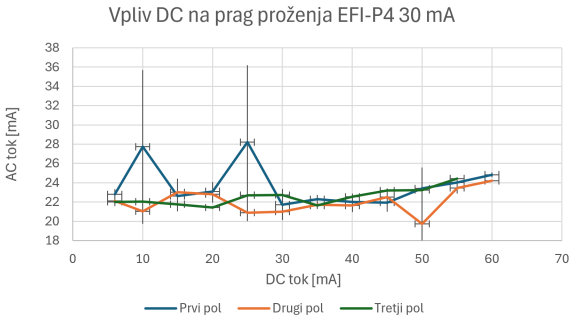
toka z večanjem DC komponente. Pri nizkih vrednostih naprava sproži pod nazivnim diferenčnim tokom, z nadaljnjim povečevanjem enosmerne komponente pa sprožilni tok postopno narašča. Pri DC komponenti 115 mA je povprečni izmenični sprožilni tok znašal 52,9 mA, kar predstavlja približno 76 % višjo vrednost od nazivnega diferenčnega toka in presega zgornjo dovoljeno mejo $1,4I_{\Delta n}$ (42 mA) po standardu IEC 61008 [1]. Pri približno 100 mA je bil opažen tudi povečan raztros meritev, kar kaže na slabšo ponovljivost delovanja.



Slika 2: Vpliv DC toka na sprožilni tok EFI P2 – 30 mA.

Rezultati kažejo, da zaščitna naprava pri visokih vrednostih enosmerne komponente ne izklopi več znotraj predpisanega območja sprožilnega toka, kar je še posebej nevarno, saj nazivni diferenčni tok 30 mA predstavlja mejo dodatne zaščite pred električnim udarom. Tokovi skozi človeško telo nad približno 40 mA lahko že povzročijo fibrilacijo srca, zato prekoračitev dovoljene meje sprožilnega toka predstavlja resno varnostno tveganje [9].

Drugačen odziv je bil ugotovljen pri štiripolni zaščitni napravi P4 z nazivnim diferenčnim tokom 30 mA. Slika 3 prikazuje potek sprožilnega toka za vse tri pole (L1, L2 in L3) štiripolne zaščitne naprave. Do DC komponente 55 mA so se sprožilni tokovi vseh treh polov gibali med 20 mA in 28 mA z manjšimi medsebojnimi odstopanji. Večji standardni odkloni so bili izmerjeni pri polu L1 (pri 10 in 25 mA DC), nekoliko večja občutljivost pa pri polu L2, ki je v določenih točkah sprožil pri nižjih vrednostih toka.



Slika 3: Vpliv DC toka na sprožilni tok EFI P4 – 30 mA za vsak pol posebej in standardni odklon.

Pri enosmerni komponenti 60 mA sta pola L1 in L2 še sprožila pri povprečnem izmeničnem sprožilnem toku 24,8 mA oziroma 24,2 mA, medtem ko pol L3 ni več sprožil. To kaže na izgubo občutljivosti pola L3. Takšno obnašanje je skladno z vplivom enosmerne komponente na magnetno jedro diferenčnega transformatorja [7].

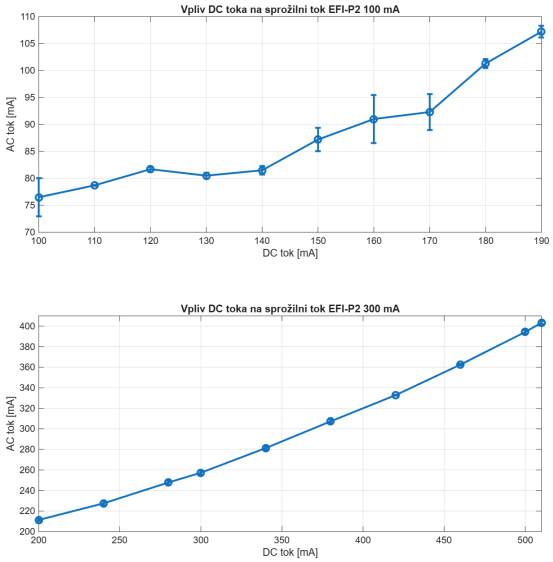
Primerjava dvopolne in štiripolne izvedbe z nazivnim diferenčnim tokom 30 mA pokaže izrazito razliko v odzivu na gladko DC komponento. Dvopolna naprava P2 je pri 115 mA še sprožila (sprožilni tok je narasel na 52,9 mA), medtem ko pol L3 štiripolne naprave P4 pri 60 mA ni več sprožil. Štiripolna izvedba je bila torej pri tem nazivnem toku bolj dovzetna za vpliv DC komponente. Vzroka za razliko na podlagi izvedenih meritev ni mogoče določiti, saj konstrukcijske in magnetne lastnosti diferenčnih transformatorjev niso bile analizirane. Ker predhodne raziskave kažejo na pomemben vpliv magnetnih lastnosti jedra [7], bi bila ugotovljena razlika lahko povezana z razlikami v konstrukciji oziroma magnetnih lastnostih jeder, kar bi bilo treba potrditi z dodatnimi raziskavami.

Pri zaščitnih napravah z nazivnima diferenčnima tokovoma 100 mA in 300 mA je bilo pri dvopolnih (P2) in štiripolnih (P4) zaščitnih napravah prav tako ugotovljeno postopno povečevanje sprožilnega toka z naraščanjem enosmerne komponente diferenčnega toka (sliki 4 in 5). Naraščanje je bilo pri 300 mA napravah skoraj linearno, pri 100 mA napravah pa nekoliko bolj postopno, z opaznejšim povečanjem naklona nad 140 mA enosmerne komponente.

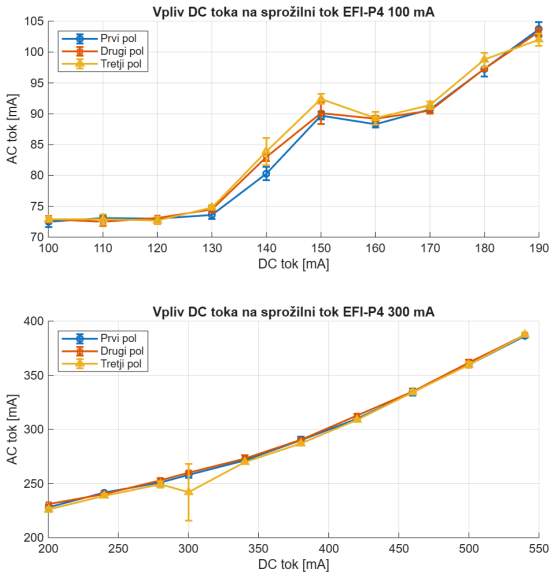
Pri štiripolni napravi P4 (slika 5) so bile razlike med posameznimi poli majhne, z izjemo posamezne meritve pri enosmerni komponenti 300 mA, kjer je bil zaznan večji raztros rezultatov. Standardni odkloni meritev so bili razmeroma nizki, kar kaže na dobro ponovljivost meritev.

6 Zaključek

Izvedene meritve so pokazale, da enosmerna komponenta diferenčnega toka vpliva na prožilne karakteristike zaščitnih naprav tipa A in lahko pri dovolj visokih vrednostih povzroči izgubo občutljivosti. Vpliv se razlikuje glede na izvedbo zaščitne naprave in njen nazivni diferenčni tok, kar je skladno z vplivom enosmerne komponente na magnetno jedro diferenčnega transformatorja. Ugotovitve so pomembne za sodobne nizkonapetostne električne



Slika 4: Vpliv enosmerne komponente na sprožilni tok dvopolnih zaščitnih naprav P2 z nazivnima diferenčnima tokovoma 100 mA in 300 mA.



Slika 5: Vpliv enosmerne komponente na sprožilni tok štiripolnih zaščitnih naprav P4 z nazivnima diferenčnima tokovoma 100 mA in 300 mA.

inštalacije, kjer se zaradi vse večje uporabe močnostne elektronike lahko pojavljajo tudi enosmerne komponente diferenčnega toka.

Na podlagi rezultatov je mogoče zaključiti, da je treba v tokokrogih, kjer se lahko pojavljajo gladke enosmerne komponente diferenčnega toka, ustrezno upoštevati omejitve zaščitnih naprav tipa A ter po potrebi uporabiti napravo tipa B oziroma B+ [2].

Ker je bila raziskava omejena na naprave enega proizvajalca, tri nazivne diferenčne tokove in enofazno dovajanje DC komponente pri štiripolnih napravah, bi bilo smiselno v nadaljnjih raziskavah preučiti tudi večfazne scenarije ter razširiti nabor proizvajalcev, nazivnih tokov in oblik diferenčnega toka.

Literatura

[1] ETI d.o.o., "Priročnik zaščitna stikala na diferenčni tok," 2018. [Na spletu]. Dostopno na: https://www.eti.si/images/userfiles/sl-SI/documents/products/building_industry/EFI-prirocnik.pdf. [Pridobljeno: 4. januar 2025].

[2] ETI d.o.o., "ASTI – Napredna zaščita in upravljanje nizkonapetostnih tokokrogov," 2021. [Na spletu]. Dostopno na: https://www.eti.si/images/userfiles/sl-SI/documents/products/building_industry/Asti_SLO.pdf. [Pridobljeno: 28. junij 2025].

[3] Fluke Corporation, "What is Leakage Current?" [Na spletu]. Dostopno na: https://www.fluke.com/en/learn/blog/electrical/what-is-leakage-current. [Pridobljeno: 30. junij 2025].

[4] ABB, "Residual Current Devices Application Guide," 2022. [Na spletu]. Dostopno na: https://new.abb.com/low-voltage/products/system-pro-m-compact/residual-current-devices. [Pridobljeno: 30. junij 2025].

[5] Ministrstvo za naravne vire in prostor, "Tehnična smernica TSG-N-002:2021 – Nizkonapetostne električne inštalacije." [Na spletu]. Dostopno na: https://www.gov.si/assets/ministrstva/MNVP/Dokumenti/Prostor-graditev/TSG/TSG-N-002-2021.pdf. [Pridobljeno: 30. junij 2025].

[6] S. Czapp, "The Impact of DC Earth Fault Current Shape on Tripping of Residual Current Devices," *Electronics and Electrical Engineering (Elektronika ir Elektrotechnika)*, no. 4(84), str. 9–12, 2008.

[7] S. Czapp, H. Tariq in S. Cieślik, "Behavior of Residual Current Devices at Earth Fault Currents with DC Component," *Sensors*, vol. 22, no. 21, čl. 8382, 2022. [Na spletu]. Dostopno na: https://doi.org/10.3390/s22218382. [Pridobljeno: 31. avgust 2026].

[8] M. He, Y. Chen in W. Chen, "Study on Residual Current Protector for Electric Vehicle Charging Pile," v *2021 IEEE 1st International Power Electronics and Application Symposium (PEAS)*, Shanghai, Kitajska, 2021, str. 1–5. [Na spletu]. Dostopno na: https://doi.org/10.1109/PEAS53589.2021.9628599. [Pridobljeno: 31. avgust 2026].

[9] BEAMA, "Guide to the Selection and Application of Residual Current Devices (RCDs)," RCD Handbook, 2018. [Na spletu]. Dostopno na: https://www.beama.org.uk/static/fbf52c82-78e8-4b89-8e7cf271aa9dd8bb/BEAMA-GUIDE-TO-THE-SELECTION-AND-APPLICATION-OF-RESIDUAL-CURRENT-DEVICES-4RCDs5.pdf. [Pridobljeno: 30. junij 2025].