**MERENJE NULTIH I MEĐUFAZNIH KAPACITIVNOSTI NADZEMNIH VODOVA I KABLOVA**

D. RISTIVOJEVIĆ[[1]](#footnote-1), RB KOLUBARA, SRBIJA

S. VUKOVIĆ, RB KOLUBARA, SRBIJA

S. DAMNJANOVIĆ, RB KOLUBARA, SRBIJA

V. PAJIĆ, RB KOLUBARA, SRBIJA

**UVOD**

Kada je reč o elektroenergetskim postrojenjima, veoma je bitno poznavati vrednosti nultih (dozemnih) kapacitivnosti, kako transformatora, tako i sabirničkih elemenata, prekidača, rastavlјača, kablovskih vodova, kao i nadzemne mreže. Ovi podaci su neophodni, kako zbog analize vrednosti kapacitivnih struja u izolovanim i sistemima uzemlјenim preko otpornika na osnovu kojih se vrši podešavanje relejne zaštite, tako i radi posmatranja mogućnosti nastanka ferorezonanse.

Podatak o vrednosti pogonske kapacitivnosti se može naći u katalozima proizvođača kablova i nadzemnih vodova, a za proveru vrednosti struje zemlјospoja, merodavna je nulta kapacitivnost, o kojoj obično nema nikakvih podataka. Shodno potrebama, u praksi su razvijene metode merenja, kako nultih tako i međufaznih kapacitivnosti nadzemnih vodova i kablova merenjem kapacitivnih struja. Ove merne metode daju izvrsne rezultate pri određivanju vrednosti struje zemlјospoja.

Merenje kapacitivnih struja ima izuzetan značaj prilikom procesa podešavanja zemlјospojne zaštite, naročito u izolovanoj mreži.

**MERENJE KAPACITETA I KAPACITIVNIH STRUJA U IZOLOVANOJ MREŽI**

Da bi se u potpunosti mogla izvršiti kompletna analiza električne mreže, uklјučujući kompleksne manifestacije različitih pojava, moraju se poznavati svi elementi konfiguracije sistema do najsitnijih detalјa. Zbog čega je potrebno izvršiti električna merenja kapacitivnosti u konzumu 35kV, 20kV, 10kV, 6kV?

Sa aspekta ispravne funkcije relejne zaštite, kako u izolovanoj mreži (20kV, 10kV, 6kV) tako i u mreži uzemlјenoj preko aktivne otpornosti (35kV), neophodno je poznavati nulte kapacitivnosti pojedinih elemenata. U izolovanoj mreži struja zemlјospoja je praktično kapacitivnog karaktera, dok aktivna komponenta, kao produkt provodnosti iznosi svega (2-3)% Ic, tako da se skoro može zanemariti.

Dakle, struja zemlјospoja u izolovanoj mreži iznosi:

$I\_{c}=3U\_{f}∙ωC∙l$ (1)

Gde je Uf fazni napon, 𝛚- kružna učestanost, C- podužna kapacitivnost kablova odn. nadzemnih vodova, a l je dužina trase (km).

Ukoliko je u pitanju 6kV-na električna mreža ne smeju se zanemariti ni nulte kapacitivnosti elektromotora tračnih transportera. Nјihove vrednosti su reda (60-70)nF po elektro motoru, što je ekvivalent kapacitivnosti kabla EPN 78, dužine 0,25km. O svemu ovome se mora strogo voditi računa da bi se znalo kojom vrednošću struje kvara raspolaže napojni konzum.

Energetski transformatori 35/6kV, snage 8MVA, na sekundarnoj 6kV-noj strani, raspolažu nultim kapacitivnostima reda veličine (4-5)nF, što je daleko manje u odnosu na vrednosti koje su date za elektro motore.

Mora se znati da su po tom pitanju kablovi značajno dominantniji u odnosu na nadzemne vodove.

Kablovi:

**Tabela 1:** Kataloške vrednosti kapaciteta

|  |
| --- |
| **SVEPREN-teški rudarski kabal EpN64 i EpN65** |
| Presek (mm2) | Kapacitet kabla EpN64 (nF/km) | Kapacitet kabla EpN65 (nF/km) |
| 3x16/10 | 188 | 307 |
| 3x25/16 | 205 | 347 |
| 3x35/16 | 223 | 391 |
| 3x50/25 | 230 | 445 |
| 3x70/35 | 257 | 499 |
| 3x95/50 | 279 | 559 |
| **Energetski kabal EpHP48 i EpHP48-A za 12/20kV i 20/35kV** |
| Presek (mm2) | Kapacitet kabla za 12/20kV(nF/km) | Kapacitet kabla za 20/35kV(nF/km) |
| 3x35/16 | 178 | / |
| 3x50/16 | 195 | 154 |
| 3x70/16 | 221 | 171 |
| 3x95/16 | 246 | 189 |
| 3x120/16 | 268 | 204 |
| 3x150/25 | 289 | 219 |

$Ic=\frac{1}{7}U\_{l }(kV)∙l(km);$ (2)

Nadzemni vodovi:

$Co=\left(3-5\right)nF/km; Ic=\frac{1}{350}U\_{l }(kV)∙l(km);$ (3)

Vidi se da je efekat kabla dužine jedan kilometar isti kao 50 kilometara nadzemnog voda, što se vidi iz obrazaca za približni proračun kapacitivnih struja zemlјospoja.

U izolovanim mrežama funkcionisanje usmerene zemljospojne zaštite zavisi od vrednosti nultih komponenata napona (koji se dobija na krajevima otvorenog trougla jednopolno izolovanih naponskih transformatora) i struje (obuhvatni kablovski transformatori, ili sprega tri strujna transformatora-povratna grana).

Na slici 1 prikazan je slučaj zemljospoja na fazi R voda 1. Vidi se da se kroz mesto kvara sumiraju kapacitivne struje neoštećenih faza iz čitavog konzuma napajanja (prikazan samo vod 2). Funkcionisanje usmerene zemljospojne zaštite (nisu prikazani naponski transformatori), zavisi od nultih kapacitivnosti preostalih „zdravih“ vodova, čije su dužine samim tim, veoma bitne.

$$I\_{c}=3U\_{f}∙ω∙C∙l$$



Slika 1: Slučaj zemljospoja na fazi R

Prag reagovanja usmerene zemljospojne zaštite je (0,5-1,3)A, primarno, zavisno od vrste releja. Po pitanju ograničenja vrednosti struja zemlјospoja u izolovanim električnim mrežama, mišlјenja su prilično različita i diskutabilna. Ipak, zna se da je potrebno posmatrati dva uslova:

a)Prag vrednosti struje pri kojoj prestaje mogućnost samogašenja električnog luka

b)Prag vrednosti struje pri kojoj zemlјospoj prerasta u višepolni kvar i na taj način ugrožava stabilnost izolacioni sistem napojne mreže i mrežnog transformatora.

Za 6kV-nu mrežu, uzima se granična vrednost struje zemlјospoja Ic=30A, kao merodavna za ispunjenje oba uslova. Dakle, ne sme se preći ova granica:

$C\_{uk}=\frac{I\_{cmax}}{3U\_{f}ω}$(4)

Odnosno, mora biti:

$C<C\_{ukmax}$(5)

Kada je u pitanju 20kV-na izolovana mreža maksimalna struja iznosi Icmax=15A, dok je kod 10kV-ne mreže, Icmax=20A.

Ukoliko ne želimo veće probleme u napojnom konzumu, trebalo bi da se pridržavamo ovih vrednosti struje zemlјospoja. Naravno, ostaje otvoreno pitanje različito mišlјenje pojedinih stručnjaka da li se radi o vrednostima struje osnovnog harmonika, ili je u pitanju suma harmonijskih vrednosti. Bilo kako bilo, neizostavno je potrebno izvršiti električna merenja kojima bi proverili kako ukupnu, tako i raspoređenu po izvodima nultu kapacitivnost elemenata električne mreže po aktivnom sistemu sabirnica.

**Tabela 2:** Merenja nultih kapacitivnosti i struje zemljospoja pri veštački napravljenom kvaru na kablovskim izvodima (EpN78 3x95/16mm2)

|  |  |
| --- | --- |
| C0 (nF) | I (A) |
| 330 | 1,80 |
| 480 | 2,64 |
| 520 | 2,73 |
| 600 | 3,41 |
| 850 | 4,62 |

Izmerene vrednosti su u granicama očekivanih. Merenje nultih kapacitivnosti je izvršeno prema šemi datoj na slici 13, tzv. klasičnom naponsko-strujnom metodom, pri kojoj se meri zadata vrednost napona i struja kroz nultu kapacitivnost faze R. Struje kroz međufazne kapacitivnosti se odvode van merne grane i samim tim ne registruju.

Vrednosti nultih kapacitivnosti se izračunavaju iz izraza (11). Zemljospoj je veštački simuliran upotrebom provodnika punog preseka, preko primara strujnog transformatora prenosnog odnosa m=20/5A/A, na čije sekundarno kolo je priključen ampermetar.

Delovanje vremenske baze isključenja je podešeno na 5 sec, da bi se mogao očitati intezitet struje zemljospoja. Struja zemljospoja je merena na izvodu 1, a kapacitivnosti na izvodima preostalog dela mreže. Nulte kapacitivnosti na izvodu 1 nisu značajne za reagovanje usmerene zemljospojne zaštite na istom izvodu.



Slika 2: Merenje struje zemljospoja

Bitno je obratiti pažnju i na mogućnost pojave ferorezonanse u postrojenju, kao produkt međusobnog uticaja ukupnih kapacitivnosti u konzumu i nelinearnih induktivnosti jednopolno izolovanih naponskih transformatora.

Mreža je prilično dinamična i učestale promene konfiguracije, pa je skoro nemoguće u potpunosti eliminisati mogućnost nastanka bar jedne od poznatih vrsta ferorezonanse (troharmonijska, dvoharmonijska, mrežna, 2-subharmonijska i 4-subharmonijska). Kao mera sprečavanja u ogromnom procentu, galvanski se na krajeve otvorenog trougla jednopolno izolovanih transformatora (e i n), postavlјa otpornik snage 250W (iskustveno) i otpornosti R=40Ω. U Rusiji se koristi R=25Ω, iskustveno (1), bez teorijskog objašnjavanja.

|  |  |
| --- | --- |
|  | $$6/\sqrt{3}/0,1/\sqrt{3}/0,1/3kV$$40Ω 40Ω40Ω 40ΩRe=40Ω$$I=\frac{U}{R}=\frac{100V}{40Ω}=2,5A$$ΣP=U$∙$I=100$∙$2,5=250W |

***Slika 3: Primena otpornika za suzbijenje ferorezonanse\****

\*koristi se redno paralelna veza 4 otpornika R=$40Ω$, snage 100W, jer je takve jednostavnije naći na tržištu

Da bi se napravila bilo kakva analiza stanja napajanja, neizostavno je potrebno utvrditi vrednost ukupne kapacitivnosti konzuma (izmeriti je), njene oscilacije u funkciji uklopnog stanja i međusobni odnos sa nelinearnom induktivnošću jednopolno izolovanih naponskih transformatora.

Merenje kapacitivnosti nije nešto što je bez ikakvog opravdanja, merenje radi merenja, već izuzetno neophodna komponenta u sistemu funkcionisanja i razumevanja pojava u električnom kolu.

Ferorezonansa može veoma negativno da deluje na izolacioni sistem električnih mašina, koji postaje termički i prenaponski ugrožen. Sistem linijskih napona ostaje nepromenjen, a fazni naponi počinju intezivno da osciluju.

Kod 35kV-ne mreže uzemlјene preko aktivne vrednosti otpora (uobičajeno R=73Ω, Iz=300A, a pri uvođenju 35kV na površinski kop, zbog smanjenja vrednosti napona dodira Ud i napona koraka Uk, preko R=400Ω, Iz=50A), u upotrebi su i kablovske dužine do 15km, pri čemu dolazi do izražaja kapacitivna komponenta (za l=15km, Ic=75A).

|  |  |
| --- | --- |
| ***Slika 4: Vektorski dijagram aktivne i reaktivne komponente struje zemlјospoja u mreži uzemlјenoj preko otpornosti*** | *Ia=50A**Ic=75A*$$I=\sum\_{}^{}I=\sqrt{Ia^{2}+Ic^{2}}=90A$$ |

Dakle, za uzemlјivački sistem može nastati problem jer je 90A>50A i uz tendenciju povećanja dužine kablova, može doći do povećanja napona dodira (Ud>Udmax).

Takođe, ugao između naponske i strujne nulte komponente, više nije φ=0, područje cosφ, već φ=54o (iskustveno), što takođe donekle pokriva cosφ područje, ali se mora neizostavno držati pod kontrolom, da se ne bi poremetila ispravna funkcija delovanja usmerene zemlјospojne zaštite.

$U\_{d}=\frac{75 }{t }$ (6)

gde je t vreme reagovanja usmerene zemlјospojne zaštite, sabrano sa vremenom delovanja prekidača.

$U\_{dmax }=I\_{z}∙Z\_{p}$ (7)

Pošto je 90A>50A, mora se vremenska baza projektovati u smislu skraćivanja vremena trajanja. Prilikom merenja kapacitivnosti, mora se uglavnom obratiti pažnja na kablove i elektro motore. Transformatori i nadzemni vodovi su manje dominantni, a sabirnice i sistem rastavlјač-prekidač, skoro da se mogu zanemariti jer su i njihove kapacitivnosti minornog karaktera, reda (150-250)pF (iskustveno).

Kablovska veza: sekundar transformatora 6kV–sabirnice 6kV se po pravilu ne može zanemariti, radi što pouzdanije i što kompletnije slike mogućih pojava u električnoj mreži.

Da bi se zanemarile nebitne međuzavojne kapacitivnosti u okviru iste faze namotaja, galvanski se kratko spajaju početak i kraj, gde je to moguće. Takođe, tako se objedinjuju parcijalne kapacitivnosti oba kraja, npr. prema masi.

|  |  |
| --- | --- |
| ***Slika 5: Raspodela kapacitivnosti bez kratkog spajanja namotaja*** | ***Slika 6: Raspodela kapacitivnosti pri kratkom spajanju oba kraja namotaja*** |
| ***Slika 7: Energetski transformator*** | ***Slika 8: Ekvivalentna šema raspodele kapacitivnosti energetskog transformatora*** |
| ***Slika 9: Merenje kapacitivnosti višenaponskog namotaja prema kotlu*** | ***Slika 10: Merenje kapacitivnosti niženaponskog namotaja prema kotlu*** |



***Slika 11: Merenje međunamotajne kapacitivnosti energetskog transformatora***

Slična merenja su i na naponskim i strujnim transformatorima. Bitno je uočiti postojeće kapacitivnosti, nacrtati ekvivalentnu šemu i upotrebiti ili običnu naponsko-strujnu metodu (na slici) ili koristiti dobijene vrednosti prilikom merenja ugla gubitaka električne mašine (tg δ).

Struja kroz kapacitivnost koja nam je bitna, meri se miliampermetrom, a preostala struja se odvodi van merne grane.

$Z=\frac{1}{ωC}=\frac{U}{I} =>ωC=\frac{I}{U}$ (8)

$C=\frac{I}{2πfU}= \frac{I}{314 U}$ (9)

$C\_{pog}=C\_{0}+3C\_{mf}$ (10)

Cmf- međufazna kapacitivnost





***Slika 12: Principijelna šema raspodele kapacitivnosti***

Međufazne kapacitivnosti skoro da se mogu zanemariti, pa ipak, preciznosti radi, moguće ih je izmeriti, kako na kablovima, tako i na nadzemnim vodovima.

Kapacitivnosti C0S i C0T ne figurišu jer su kratkospojene preko mernog instrumenta (mA) i u svrhu toga je postavlјena kratka veza (premost).

Struje kroz međufazne kapacitivnosti CRT se sumiraju i odvode van merne grane, dok kroz miliampermetar protiče samo struja ICR, čiji intezitet i želimo znati.



***Slika 13: Merenje nulte kapacitivnosti faze R kabla ili nadzemnog voda***

$C\_{0R}=\frac{I\_{CR}}{2πfU}= \frac{I\_{CR}}{314 U}$ (11)

$Z=\frac{1}{ωC}= \frac{U}{2 I\_{CRT}}$ (12)

$C\_{ekv}= \frac{2I\_{CRT}}{ωU}=2C\_{mf}$ (13)

$2C\_{mf}= \frac{2I\_{CRT}}{ωU}=>C\_{mf}= \frac{I\_{CRT}}{ωU}$(14)

$C\_{mf}= \frac{I\_{mer}}{2ωU}=\frac{I\_{mer}}{628 U}$ (15)



***Slika 14: Merenje međunamotajnih kapacitivnosti na kablovima i nadzemnim vodovima***

**UTICAJ KAPACITIVNOSTI ELEMENATA MREŽE NA POUZDANOST NAPAJANJA 6KV-NIH ELEKTROMOTORA I ZAŠTITNIH UREĐAJA**

**Proširenje trajanja čela prenaponskih talasa**

Kada su u mreži prisutni prenaponi koji nastaju pri manipulaciji prekidačima, uklјučenju i isklјučenju, prethodnom i potonjem palјenju električnog luka, čije trajanje čela traje reda nanosekundi (nsec), ugrožena je međuzavojna izolacija električnih mašina, zato što glavno naprezanje trpi čeoni deo namotaja i proboji mogu nastati u okviru iste faze, a retko ka zemlјi.



0,1 μsec

***Slika 15: Izgled prenaponskog talasa***

Potrebno je da bi se to izbeglo proširiti trajanje čela prenaponskog talasa do reda nekoliko mikrosekundi (μsec). Tada prestaje međuzavojno naprezanje, s obzirom da se prenaponski talas prostire ravnomerno duž namotaja, a postaje dominantno naprezanje prema zemlјi, što uz nižu amplitudu talasa nije od presudnog značaja. Proširenje trajanja čela prenaponskog talasa, ostvaruje se povećanjem kapacitivnosti koja se priklјučuje na napojne tačke elektromotora npr. to se može ostvariti povećanjem dužine kabla, ili priklјučenjem kondenzatorskih baterija određene vrednosti kapacitivnosti. Ukoliko se opredelјujemo za kondenzatorske baterije i galvanski ih spojimo u zvezdu, nipošto se zvezdište ne sme uzemlјiti, jer bi se povećale kapacitivne struje čija vrednost može premašiti 30A, $(I\_{c}>30A)$, što bi bilo opasno i zbog nemogućnosti gašenja električnog luka i prelaska u višepolni kvar.



***Slika 16: Kapacitivnosti kondenzatorskih baterija***

**Mogućnost pojačanјa harmonika pri popravci faktora snage**

Mora se voditi računa o kvalitetu električne energije i izraženim harmonicima. Oni se nehotično mogu pojačati ostvarivanjem rezonanse u nekim nepovolјnim okolnostima i nepovolјnom odnosu L-C u kolu. Neprecizni podaci o kapacitivnostima, uz neprihvatlјiva zanemarivanja (npr. kablovi, nadzemni vodovi, elektro motori, transformatori) mogu dovesti do nesagledivih posledica i nekontrolisanog pojačanja određenih harmonika, a samim tim i do ugroženosti izolacije u mreži. Moguća je pojava kako redne tako i paralelne rezonanse, pa se optimum napajanja mora sagledati i merenjem proveriti skup svih veličina. Svrha je formirati bazu podataka tzv. „ličnu kartu“ mrežnog napajanja. Popravak faktora snage u današnjim uslovima kada je u opticaju frekventna regulacija, uz preostalu kapacitivnost mreže je postala prava veština i potreban je maksimalno oprezan pristup problematici. Merenje kapacitivnosti se može realizovati po aktivnom izvodu, uz isklјučenje naponskog transformatora, ili na svakom od elemenata posebno.

Problem kompenzacije električne energije zaista predstavlјa pravu enigmu ukoliko mu se ne pristupi sa integralnim sagledavanjem. Elektroenergetika vremenom postaje sve kompleksnija i složenija i električna merenja kapacitivnosti predstavlјaju srž problema.

**Uticaj poznavanja kapacitivnosti na smanjenje prenapona u SF6 postrojenjima**

U sekundarnim kolima mernih transformatora skoro da je nemoguće sprečiti pojavu visokih potencijala i čak i neplaniranog reagovanja relejne zaštite kao posledice manipulacije rastavlјačem. Dozvolјena vrednost potencijala je do 1kV, iskustveno, a u postrojenjima gde je dobra magnetna kompatibilnost, ona iznosi oko (0,2-0,3)kV. Potrebno je pravo majstorstvo da se obezbedi normalna vrednost prenaponskih talasa i zato je neophodno, pored poznavanja sistema uzemlјenja, znati i vrednosti kapacitivnosti, kako nultih, tako i međufaznih.

Takođe, kod postrojenja u SF6 tehnici, potrebno je razmotriti mogućnost merenja kapacitivnosti sabirnica rastavlјača i prekidača, s obzirom da su rastojanja dosta manja, nego kod klasičnih postrojenja, pa su tako i kapacitivnosti dosta veće, kako prema zemlјi, tako i međufazna.

Poznato je da kod ove vrste postrojenja pri manipulaciji rastavlјačem, koja je izuzetno spora, dolazi do pojave prenaponskih talasa čije trajanje čela iznosi nekoliko nsec, što govori o velikim strminama krive. Pojavlјuju se učestanosti reda preko 100MHz, i tada su kapacitivne struje velike.

Prenaponi se prostiru preko metalnih površina i zahvataju sekundarna merna kola, a izjednačenje potencijala je veoma teško ostvariti.

Naime, veze između metalnih elemenata u postrojenju moraju biti što kraće i na što više mesta ostvarene. Provodnici velikih dužina (reda 1m), mogu biti loše rešenje, jer se na njihovim krajevima pri f=100MHz pojavlјuju velike potencijalne razlike reda nekoliko kV, dok je za f=50Hz potpuno svejedno.

Poznavanje reda veličine kapacitivnosti doprinosi stepenu dobre analize nastanka i istraživanja ove vrste prenaponskih pojava u SF6 postrojenjima.

**ZAKLJUČAK**

Poznavanje pravih vrednosti kapacitivnosti u napojnom konzumu predstavlјa neophodnost, s obzirom na kompleksnost problematike. Potrebno je izvršiti detalјnu analizu napajanja sa tačke gledišta uspešnog delovanja usmerene zemlјospojne zaštite, kako izolovanim, tako i u mrežama uzemlјenim preko aktivne otpornosti.

Takođe, pojava rezonantnih oscilacija zahteva ozbilјan pristup, pošto je teško neutralisati sve postojeće oblike ferorezonanse. Potrebno je utvrditi sve induktivno-kapacitivne karakteristike datog kola, i njihove međusobne zavisnosti (odnos L-C).

Prenaponski talasi se mogu redukovati, kako u smislu smanjenja amplitude, tako i po pitanju proširenja čela, čime se eliminiše naprezanje međuzavojne izolacije.

Popravka faktora snage i analiza vrednosti kapacitivnosti u postrojenjima SF6 tehnike, sprečavanje pojačanja određenih harmonika i posmatranje pojave prenaponskih talasa i izjednačenja potencijala pri manipulacijama rastavlјačem, koje su u principu jako spore, predstavlјaju kompleksan problem. Ova problematika predstavlјa nauku za sebe, a merenje kapacitivnosti poprima izuzetan značaj i samim tim postaje nezaobilazan postupak.

**LITERATURA**

1. Fjodorov M.: **Zemljospoji u električnim mrežama 6kV i 35kV**
2. Zdravković Z., Vukelјa P., Mrvić J.: **Koordinacija izolacije objekata visokih napona trofaznih mreža**, Beograd, 2005.god
3. Vukelјa P.: **Tranzijentni prenaponi u niskonaponskim kolima**, <http://www.ieent.org/prototip/pdf/>
4. **Tehnika visokog napona**, ees.etf.bg.ac.rs‎
1. *Dragan Ristivojević, RB Kolubara, Ogranak Površinski kopov, 064/8270984*  [↑](#footnote-ref-1)