

Prenaponi pri operacijama vakuumskih sklopnih aparata

Petar Vukelja, Radomir Naumov, Jovan Mrvić, Dejan Hrvić¹,

¹ Elektrotehnicki institut Nikola Tesla, Koste Glavinića 8a,
11000 Beograd, Srbija
petar.vukelja@ieent.org

Kratak sadržaj: U radu su prezentirani rezultati eksperimentalnih istraživanja naponskih pojava pri uključenjima i isključenjima vakuumskih prekidača i kontaktora različitih proizvođača u više konfiguracijama mreža 6 kV, 10 kV, 20 kV i 35 kV. Pri uključenjima induktivnih opterećenja dolazi do pojave prethodnih paljenja električnog luka između kontakta polova vakuumskih sklopnih aparata. Svako paljenje električnog luka dovodi do pojave prenapona sa strminama bliskim strminama atmosferskih prenapona. Isključenja induktivnog opterećenja vakuumskim sklopnim aparatima dovodi do sečenja struje pre njenog prolaska kroz prirodnu nulu i do pojave višestrukih ponovnih paljenja električnog luka između kontakta njihovih polova. Ovo dovodi do značajnih prenapona na izolaciji opreme. Izvršena je analiza prenapona u istraživanim mrežama i predložene su mere i sredstva za smanjenje naprezanja izolacije opreme

Ključne reči: vakuumski prekidač, vakuumski kontaktor, prenapon, mreža

1. Uvod

Revitalizacijom postrojenja 35 kV, 20 kV, 10 kV i 6 kV u industriji, distribuciji, površinskim kopovima, rudnicima, termoelektranama, hidroelektranama i termoelektranama-toplanama, umesto maloujnih prekidača, hidromatskih prekidača i sklopnih aparata sa magnetnim oduvavanjem luka (vazdušni sklopni aparati) uvode se vakuumski sklopni aparati. Njihovim uključenjima i isključenjima javljaju se drugačiji prelazni naponski i strujni režimi u odnosu na ove koji su postojali pri radu prethodnih sklopnih aparata.

Vakuumski sklopni aparati pri uključenju induktivnog opterećenja dovode do specifične pojave koja nije bila prisutna kod ranije korišćenih sklopnih aparata. To je pojava prethodnih paljenja električnog luka između kontakta njihovih polova. Kod malouljnih, hidromatskih i vazdušnih prekidača pri uključenju, u toku približavanja kontakta njihovih polova, pojavljuje se na nekom rastojanju električni luk koji traje dok se kontakti ne spoje. Vakuumski sklopni aparati pri uključenju induktivnog opterećenja električni luk između kontakta polova više puta prekidaju sve dok se ne spoje. Pojavom električnog luka između kontakta polova sklopnog aparata pojavljuje se u induktivnom kolu visokofrekventna struja. Vakuumski prekidači imaju tu osobinu da mogu da prekidaju visokofrekventnu struju pri njenom prolasku kroz nulu. To se dešava više puta između kontakta svakog pola prekidača. Pri tome dolazi do pojave prenapona sa velikim strminama koji prevenstveno naprežu međunavojnu izolaciju visokonaponskih motora i transformatora.

Isključenja induktivnog opterećenja vakuumskim sklopnim aparatima mogu da dovedu do znatnih prenapona. Njihova pojava je vezana sa fenomenom prekidanja male induktivne struje pre njenog prolaska kroz prirodnu nulu, koju prate višestruka ponovna paljenja električnog luka između kontakta prekidača.

Saznanja o naponskim pojavama koje se dešavaju pri uključenju i isključenju vakuumskih sklopnih aparata su dobijena eksperimentalnim istraživanjima. Izvršena su brojna eksperimentalna istraživanja prelaznih faznih napona pri uključenjima i isključenjima vakuumskih sklopnih aparata u različitim konfiguracijama mreža 35 kV, 20 kV, 10 kV i 6 kV. Rezultati ovih istraživanja prezentirani su u ovom radu.

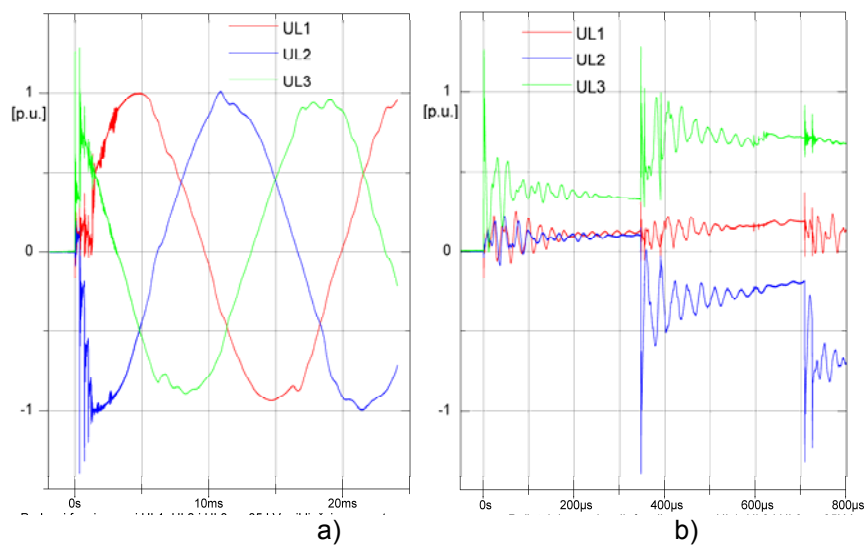
2. Eksperimentalna istraživanja naponskih pojava pri operacijama vakuumskih sklopnih aparata

U mrežama 35 kV, 20 kV, 10 kV i 6 kV izvršena su je brojna istraživanja naponskih pojava pri uključenju i isključenju vakuumskih sklopnih aparata (prekidača i kontaktora) različitih tipova. Prekidači 36 kV, 24 kV, 12 kV i 7,2 kV su od osam proizvođača, a kontaktori od jednog proizvođača. Ukupno je izvršeno oko 600 operacija uključenja i isto toliko operacija isključenja vakuumskih sklopnih aparata u različitim konfiguracijama u mrežama distribucije, industrije, površinskih kopova i elektrana, ukupno 22 mreže.

Uključivani su i isključivani neopterećeni transformatori, neopterećeni kablovski i nadzemno-kablovski vodovi, vodovi opterećeni transformatorima, transformatori opterećeni vodovima i drugim transformatorima, kondenzatorske baterije i kablovski vodovi sa visokonaponskim motorima. Određen broj isključenja je izvršen neposredno posle uključenja vakuumskih sklopnih aparata. Pri manipulacijama vakuumskih sklopnih aparata snimane su naponske pojave-prelazni fazni naponi na priključcima energetskih

transformatora i na ulazima kablovskih i nadzemno-kablovskih vodova. Snimanja su izvođena digitalnim i analognim osciloskopima i tranzijent rikorderom koristeći kapacitivna delila napona koja verno prenose pojave sa visokog napona od nekoliko Hz do 2 MHz. Prenaponi su izraženi u relativnim jedinicama (p.u.) kao odnos njihove maksimalne vrednosti i amplitude faznog napona u ustaljenom režimu rada neposredno pre ili posle njihovog pojavljivanja.

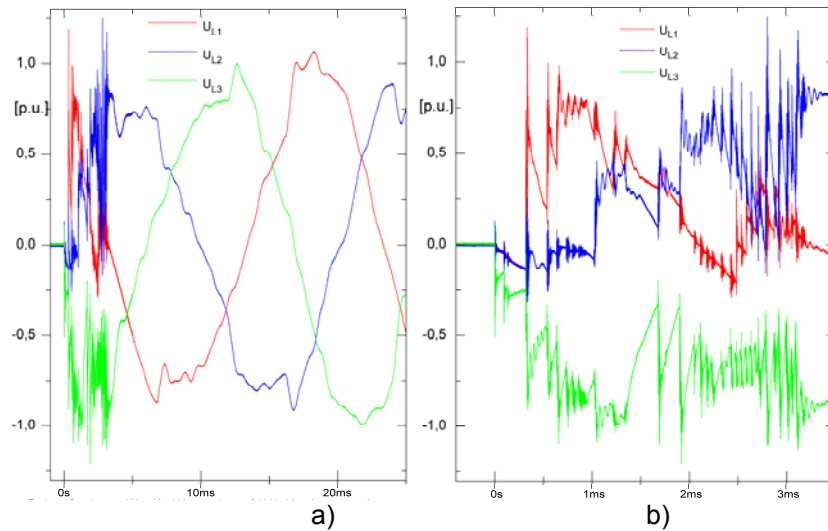
Iz obimnog materijala na slikama od 1 do 5 dati su karakteristični prikazi prelaznih faznih napona pri uključenju i isključenju vakuumskih prekidača.



Slika 1.

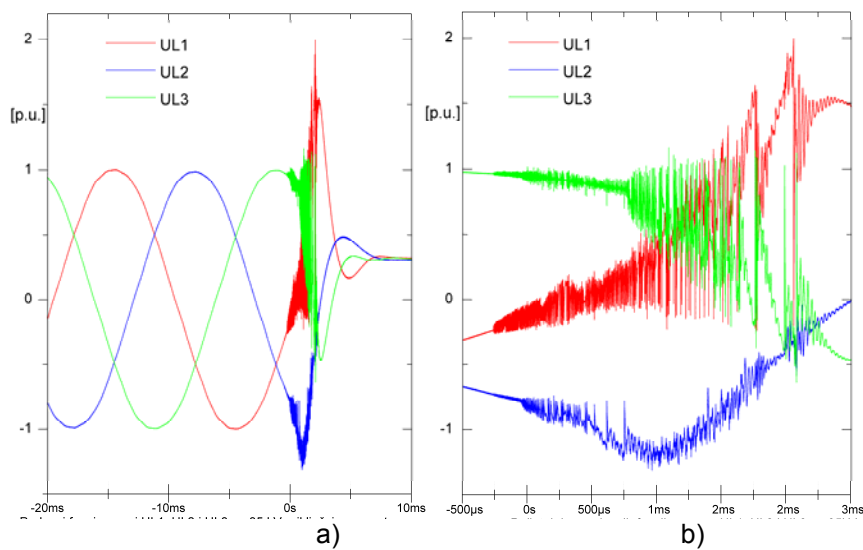
a) Prelazni fazni naponi u_{L1} , u_{L2} i u_{L3} na 35 kV priključcima neopterećenog transformatora 30kV/20 kV, 8 MVA pri njegovom uključenju vakuumskim prekidačem 36 kV

b) Početni deo prelaznih faznih napona u_{L1} , u_{L2} i u_{L3}



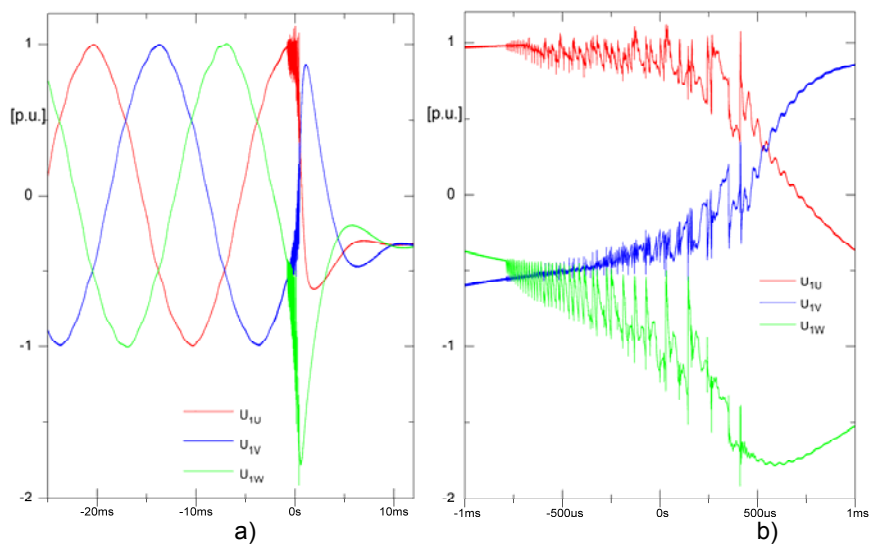
Slika 2.

- a) Prelazni fazni naponi u_{L1} , u_{L2} i u_{L3} na ulazu u 6 kV kablovske vodove dva transformatora 6kV/0,4kV, 1600 kVA pri njihovom istovremenom uključenju u neopterećenom stanju vakuumskim prekidačem 7,2 kV
- b) Početni deo prelaznih faznih napona u_{L1} , u_{L2} i u_{L3}



Slika 3.

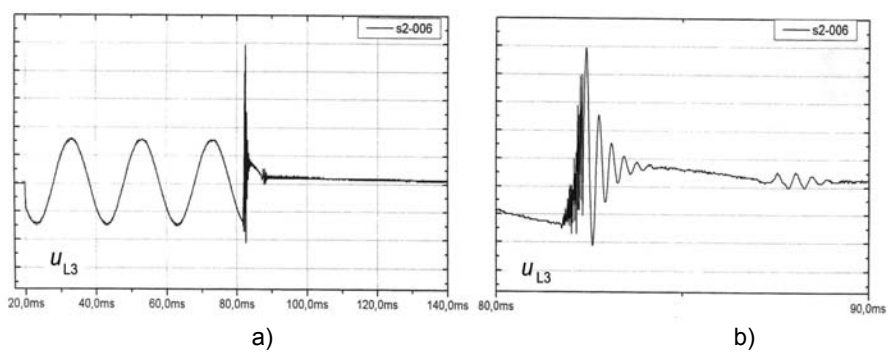
- a) Prelazni fazni naponi u_{L1} , u_{L2} i u_{L3} na 35 kV priključcima neopterećenog transformatora 30kV/20 kV, 8 MVA pri njegovom isključenju vakuumskim prekidačem 36 kV
- b) Početni deo prelaznih faznih napona u_{L1} , u_{L2} i u_{L3}



Slika 4.

a) Prelazni fazni naponi u_{1U} , u_{1V} i u_{1W} na 20 kV priključcima transformatora 20kV/6kV kada je opterećen sa tri transformatora 6kV/0,4kV pri njegovom isključenju vakuumskim prekidačem 24 kV

b) Početni deo prelaznih faznih napona u_{1U} , u_{1V} i u_{1W}



Slika 5.

a) Prelazni fazni naponi u_{L2} i u_{L3} na ulazu u kablovski vod motora 6 kV, 500 kW pri njegovom uključenju i isključenju u zaletu vakuumskim prekidačem 12 kV

b) Fazni naponi u_{L2} i u_{L3} pri isključenju u zaletu

3. Analiza rezultata eksperimentalnih istraživanja naponskih pojava pri operacijama vakuumskih sklopnih aparata

3.1. Naponske pojave pri uključenjima i isključenjima vakuumskih prekidača

3.1.1 Naponske pojave pri uključenjima vakuumskih prekidača

Pri uključenjima neopterećenih transformatora 35kV/10kV, 35kV/20kV i 20kV/6kV, kablovskih ili nadzemno kablovskih vodova sa neopterećenim transformatorima 20kV/0,4kV, 10kV/0,4kV, 6kV/0,4kV i motorima 6 kV vakuumskim prekidačima dolazi do višestrukih prethodnih paljenja električnog luka između kontakta njihovih polova (slike 1 i 2). To se dešava i u konfiguracijama kada su na niženaponskim stranama transformatora priključeni transformatori ili vodovi. Svako paljenje električnog luka između kontakta polova vakuumskog prekidača dovodi do pojave oscilatornog naponskog procesa koji traje veoma kratko, najčešće od nekoliko desetina do nekoliko stotina μ s. Tako dolazi u svakoj fazi do stvaranja kolone oscilatornih prenapona, učestanosti i do nekoliko stotina kHz. Ukupan proces trajanja prethodnih paljenja električnog luka u sve tri faze retko prelazi 2 ms. Nema bitne razlike između naponskih pojava koje se pojavljuju pri uključenju različitih tipova vakuumskih prekidača. Najviši izmereni prenapon na 35 kV priključcima transformatora od ukupno 61 izvedenih uključenja (183 članova uzorka prenapona sve tri faze) iznosi 1,68 p.u. Najviši izmereni prenapon na ulazu u kablovske ili nadzemno kablovske vodove opterećene transformatorima 20kV/0,4kV, 10kV/0,4kV i 6kV/0,4kV od ukupno 138 izvedenih uključenja (414 članova uzorka prenapona sve tri faze) iznosi 1,76 p.u. Najviši izmereni prenapon na ulazu u kablovske vodove sa 6 kV motorima od ukupno 92 izvedena uključenja (276 članova uzorka prenapona sve tri faze) iznosi 3,5 p.u. Kada su kablovski vodovi većih dužina manji je broj prethodnih paljenja električnog luka između kontakta polova vakuumskih prekidača. Najveće strmine ovih prenapona su prelazile 100 kV/ μ s.

Pri uključenjima vakuumskim prekidačem 36 kV transformatora 35kV/20kV, na čijoj 20 kV strani je priključen neopterećeni duži kablovsko-vazdušni vod ili kablovski vod sa transformatorom 20kV/0,4kV, naponi na 20 kV, po prestanku prelaznog režima, su veoma izobličeni. To ukazuje da su veoma velike struje uključenja transformatora 35kV/20kV. Osim toga u takvoj konfiguraciji mreže 20 kV (mreža 20 kV je sa izolovanom neutralnom tačkom), moguća je pojava rezonansnih oscilacija između kapacitivnosti vodova i induktivnosti 20 kV namotaja transformatora 35kV/20kV. Najviši izmereni prenapon na ulazu u 20 kV vodove pri ovim uključenjima je 1,68 p.u. U jednoj od konfiguracija iste mreže 20 kV izvedeno je uključenje voda vakuumskim

prekidačem 20 kV kada je na jednoj od faza istog postojao zemljospoj. Najviši prenapon, koji se pri tome pojavio, je 2,38 p.u..

U jednoj mreži 10 kV sa izolovanom neutralnom tačkom je izvedeno uključanje vakuumskim prekidačem 10 kV kablovskog voda sa transformatorom, kada je na jednoj od njegovih faza postojao zemljospoj. Najviši prenapon koji se pojavio pri 8 izvedenih uključenja (16 članova uzorka prenapona) je 3,34 p.u.

Uključenja neopterećenih kablovskih i nadzemno-kablovskih vodova 20 kV i 10 kV ne dovode do pojave prethodnih paljenja električnog luka između kontakta polova vakumskog prekidača. Uočavaju se samo prenaponi nastali usled višestrukih refleksija na vodovima, odnosno usled odbijanja i prelamanja talasa na krajevima vodova i na prelasku kablovskih u nadzemne vodove. Pojava prelaznog režima u sve tri faze pri uključanju traje nekoliko ms. Najviši izmereni prenapon pri 67 izvedenih uključenja neopterećenih vodova 20 kV i 10 kV (201 članova uzorka prenapona sve tri faze) iznosi 2,38 p.u. Viši prenaponi se javljaju u slučajevima kada se uključanja neopterećenih kablovskih vodova izvode relativno brzo posle njihovih isključenja. Razlog je što je na kablovskim vodovima prisutan zaostali napon, jer se u tako kratkom periodu vremena ne mogu potpuno rasteretiti.

3.1.2 Naponske pojave pri isključenjima vakuumskih prekidača

Isključenja neopterećenih transformatora, kratkih kablovskih vodova sa neopterećenim transformatorima i kablovskih vodova sa 6 kV motorima dovode do sečenja struje pre njenog prolaska kroz prirodnu nulu i do višestrukih ponovnih paljenja električnog luka (slika 3). To se dešava i kada se isključuju transformatori opterećeni drugim transformatorima (slika 4). Ove pojave sa višim prenaponima se javljaju kada se isključenja izvode neposredno posle uključanja, posebno kada su u pitanju visokinaponski motori (slika 5). Isključenja dužih kablovskih vodova sa neopterećenim transformatorima ne dovode do pojave ponovnih nastajanja električnog luka između kontakta polova prekidača, pa ni do visokih prenapona. Nema bitne razlike između naponskih pojava koji se pojavljuju pri isključenju različitih tipova prekidača.

Najviši izmereni prenapon na priključcima neopterećenih transformatora od ukupno izvedenih 47 isključenja u toku normalnog rada (141 članova uzorka prenapona sve tri faze) je 2,00 p.u., a pri 14 izvedenih isključenja neposredno posle uključanja (42 članova uzorka prenapona sve tri faze) iznosi 2,67 p.u.

Najviši prenaponi na ulazu u kablovske vodove sa transformatorima od ukupno 112 izvedenih isključenja u toku normalnog rada (336 članova uzorka prenapona sve tri faze) je 2,74 p.u., a pri 31 izvedenih isključenja neposredno posle uključanja (93 članova uzorka prenapona sve tri faze) iznosi 4,35 p.u.

Prenaponi pri isključenju 6 kV kablova sa visokonaponskim motorom u toku normalnog rada i u toku zaleta mogu da budu visoki. Najviši prenaponi od ukupno 47 izvedenih isključenja u toku normalnog rada (141 članova uzorka prenapona sve tri faze) je 3,90 p.u., a pri 17 izvedenih isključenja neposredno posle uključenja (51 članova uzorka prenapona sve tri faze) iznosi 3,30 p.u.

3.1.3 Naponske pojave pri uključenjima i isključenjima vakuumskih kontaktora

U sedam mreža 6 kV izvršeno je ukupno 191 ciklusa operacija uključenje-isključenje vakuumskim kontaktorima 7,2 kV istog proizvođača. Uključivani su i isključivani kablovski vodovi sa 6 kV motorima. Mreže 6 kV su sa izolovanom neutralnom tačkom.

Pri uključenjima kablovskih vodova sa motorima 6 kV dolazi do višestrukih prethodnih paljenja električnog luka između kontakta polova vakuumskih kontaktora, slično kao i kod uključenja vakuumskih prekidača. Najviši izmereni prenapon od ukupno 191 izvedenih uključenju 6 kV motora (573 članova uzorka prenapona sve tri faze) je 2,20 p.u.. Najveće strmine prenapona nisu prelazile $50 \text{ kV} / \mu \text{s}$

Isključenja kablovskih vodova sa 6 kV motorom vakuumskim kontaktorima ne dovode do pojave ponovnih nastajanja električnog luka između kontakta njihovih polova, pa ni do visokih prenapona. Najviši izmereni prenapon od ukupno 116 isključenja u normalnom radu motora (348 članova uzorka prenapona sve tri faze) je 1,25 p.u., a najviši izmereni prenapon od ukupno 53 isključenja motora neposredno posle njihovog uključenja (159 članova uzorka prenapona sve tri faze) je 1,85 p.u.

4. Dielektrička naprežanja izolacije opreme pri uključenjima i isključenjima vakuumskih sklopnih aparata

Podnosivi sklopni udarni naponi nisu definisani za izolaciju opreme u mrežama 35 kV, 20 kV, 10 kV i 6 kV. Međutim, može se smatrati da su oni viši od temene vrednosti podnosivih napona industrijske učestanosti koji za napred navedene mreže iznose 70 kV, 50 kV, 28 kV i 20 kV. Pretpostavljene vrednosti podnosivih sklopnih udarnih napona, izražene u relativnim jedinicama u odnosu na amplitudu najviših faznih napon mreža, su sledeće: 4,81 p.u. za mrežu 6 kV, izuzev izolacije namotaja statora visokonaponskih motora, 4,04 p.u. za mrežu 10 kV, 3,61 p.u. za mrežu 20 kV i 3,37 p.u. za mrežu 35 kV.

Na osnovu analize: standarda IEC 60034-15, Tehničke preporuke VN-RS-/81 JUGEL-a od 1981. god., Tehničke preporuke TP 32 ZEP-a od 1982. god, kriterijuma Radne grupe IEEE i kriterijuma Radne grupe 13.02 CIGRE za

podnosive napone izolacije namotaja statora su usvojene vrednosti koje je predložila Radna grupa IEEE. Opredeljenje za kriterijum Radne grupe IEEE što uzima u obzir i starenje izolacije namotaja statora motora. Kada je vreme čela prenapona $5 \mu\text{s}$ i više, smatra se da je njegova raspodela duž namotaja motora ravnomerna. Za takve slučajeve dominantno je naprezanje izolacije namotaja prema masi. Procenjeno je da je minimalni podnosivi napon izolacije namotaja prema masi u tom slučaju:

$$U = 1,25\sqrt{2}(2U_n + 1)(kV_{rv}) \text{ za } t_c \geq 5 \mu\text{s} \quad (1)$$

- U_n - naznačeni napon motora.

Prenaponi velikih strmina čela raspoređuju se na prve navoje namotaja statora motora, te je u tom slučaju dominantno naprezanje međunavojne izolacije. Procenjeno je da je podnosivi napon međunavojne izolacije za prenapone vremena čela $0,1 \mu\text{s}$ jednak temenoj vrednosti faznog napona, za prenapone čela $0,2 \mu\text{s}$ jednak dvostrukoj temenoj vrednosti faznog napona i da za prenapone vremena čela od $0,2 \mu\text{s}$ do $5 \mu\text{s}$ linearno raste od dvostruke temene vrednosti faznog napona do napona definisanog relacijom (1). Može se smatrati da je za motore naznačenog napona 6 kV podnosivi napon izolacije namotaja statora prema masi za prenapone vremena čela od nanosekundnog do milisekundnog područja reda 23 kV ili više, odnosno faktor podnosivog prenapona je najmanje $k=4,69 \text{ p.u.}$. Kada se radi o prenaponima vremena čela ispod $5 \mu\text{s}$, a nižim od 23 kV , izolacija namotaja prema masi motora naznačenog napona 6 kV nije ugrožena, ali može biti ugrožena međunavojna izolacija.

Za prenapone čela reda $0,1 \mu\text{s}$, odnosno strmine reda $50 \text{ kV}/\mu\text{s}$ može se smatrati da je podnosivi napon međunavojne izolacije namotaja motora naznačenog napona 6 kV reda $\sqrt{2} \times 6 / \sqrt{3} \approx 5kV_{rv}$. Porastom vremena čela prenapona, zadržavajući mu istu visinu, međunavojna izolacija se manje napreže, jer se prenapon ravnomernije raspoređuje na ulaznim navojcima namotaja motora; sada ulazni prenapon može da bude viši, a da se ne ugrozi međunavojnu izolaciju. Tako npr. međunavojna izolacija podnosi ulazne prenapone visine do 10 kV vremena čela $0,2 \mu\text{s}$, ulazne prenapone visine do $12,5 \text{ kV}$ vremena čela $1 \mu\text{s}$ i tako dalje do ulaznoga prenapona visine 23 kV vremena čela $5 \mu\text{s}$ i više. Tada postaje dominantnije naprezanje fazne izolacije namotaja statora prema masi nego naprezanje međunavojne izolacije.

Transformatori $35\text{kV}/10\text{kV}$ su predviđeni da izdrže bez proboja izolacije atmosferski udarni napon temene vrednosti 170 kV oblika $1,2/50$. To znači da njihova međunavojna izolacija podnosi prenapone sa strminama najmanje $170 \text{ kV}/\mu\text{s}$. Prenaponi koji se javljaju pri uključenjima i isključenjima su niži od podnosivih sklopnih napona ($3,37 \text{ p.u.}$) izolacije 35 kV namotaja

transformatora. Iako su im pri uključenjima strmine bliske strminama atmosferskih prenapona, niže su od $170 \text{ kV}/\mu\text{s}$, i ne bi trebalo da predstavljaju opasnost za međunavojnu izolaciju 35 kV namotaja transformatora $35\text{kV}/10\text{kV}$ pod uslovom da nije došlo do degradacije njihove izolacije tokom eksploatacije.

Izolacija 20 kV namotaja transformatora $20\text{kV}/0,4\text{kV}$ i izolacija ostale opreme u mreži 20 kV su predviđene da izdrže bez proboja atmosferski udarni napon temene vrednosti 125 kV oblika $1,2/50$. To znači da međunavojna izolacija 20 kV namotaja transformatora podnosi prenapone sa strminama najmanje $125 \text{ kV}/\mu\text{s}$. Prenaponi koji se javljaju pri uključenjima su znatno niži od podnosivih sklopnih napona izolacije u mreži 20 kV . Iako su im strmine bliske strminama atmosferskih prenapona, niže su od $120 \text{ kV}/\mu\text{s}$, i ne bi trebalo da predstavljaju opasnost za međunavojnu izolaciju 20 kV namotaja transformatora $20\text{kV}/0,4\text{kV}$, pod uslovom da nije došlo do degradacije njihove izolacije tokom eksploatacije.

Izolacija 10 kV namotaja transformatora $10\text{kV}/0,4\text{kV}$ i izolacija ostale opreme u mreži 10 kV su predviđene da izdrže bez proboja atmosferski udarni napon temene vrednosti 75 kV oblika $1,2/50$. To znači da međunavojna izolacija 10 kV namotaja transformatora podnosi prenapone sa strminama najmanje $75 \text{ kV}/\mu\text{s}$. Prenaponi koji se javljaju pri uključenjima i isključenjima savremenih konstrukcija vakuumskih prekidača su znatno niži od podnosivih sklopnih napona izolacije opreme u mreži 10 kV . Iako su im strmine bliske strminama atmosferskih prenapona, pretpostavlja se da na ulasku u namotaje transformatora ne bi trebalo da budu više od nekoliko desetina $\text{kV}/\mu\text{s}$, pa ne predstavljaju opasnost za međunavojnu izolaciju 10 kV namotaja transformatora $10\text{kV}/0,4\text{kV}$, pod uslovom da nije došlo do degradacije njihove izolacije tokom eksploatacije.

5. Zaključci

Ekperimentalna istraživanja prenapona pri uključenju i isključenju vakuumskih prekidača i kontaktora izvršena su u različitim konfiguracijama četiri mreže 35 kV , tri mreže 20 kV , pet mreža 10 kV i jedanaest mreža 6 kV . Ukupno je izvršeno oko 550 operacija uključenje-isključenje vakuumskim sklopnim aparatima. Analizirano je oko 1650 snimaka prenapona u sve tri faze pri uključenjima i isto toliko pri isključenjima. Na osnovu analize prenapona, koji se javljaju pri uključenjima i isključenjima vakuumskih prekidača i kontaktora može se zaključiti sledeće:

- Izolacija energetskih transformatora i ostale opreme u distributivnim mrežama 35 kV , 20 kV i 10 kV i mrežama 6 kV nije ugrožena od prenapona pri uključenju i isključenju vakuumskih prekidača, pod uslovom da tokom dugogodišnje eksploatacije nije došlo do degradacije njenih izolacija.

Najosetljiviji na prenapone koji se javljaju pri uključenju vakuumskih prekidača su suvi transformatori.

- Izolacija visokonaponskih motora i ostale opreme u mrežama 6 kV nije ugrožena od prenapona pri uključenju i isključenju vakuumskih sklopnih aparata, pod uslovom da tokom dugogodišnje eksploatacije nije došlo do degradacije njenih izolacija. Najviše je napregnuta međunavojna izolacija namotaja statora motora i izolacija namotaja statora prema masi visokonaponskih motora manjih snaga.

- Mere i sredstva sa kojima bi se mogla smanjiti naprezanja izolacije u mrežama 35 kV, 20 kV, 10 kV i 6 kV su sledeća:

- Ugradnja RC kola između svake faze i uzemljenja u samoj konstrukciji vakuumskih sklopnih aparata smanjile bi se strmine i visine prenapona koji se javljaju pri uključenju. Ovo je posebno bitno za suve transformatore, jer bi smanjilo prenapone koji se pojavljuju na njihovoj međunavojnoj izolaciji.

- Izbegavanja uključenja i isključenja sklopnih aparata u mrežama sa izolovanom neutralnom tačkom u kojima je prisutan zemljospoj, osim operacije isključenja kojom se zemljospoj prekida.

- Izbegavanja isključenja visokonaponskih motora u toku zaleta, odnosno onemogućavanje njihovog uključenja ako nisu ispunjeni svi potrebni tehnološki uslovi za proces koji oni pokreću.

- Ugradnja odvodnika prenapona na ulazu u kablovski vod visokonaponskih motora manjih snaga između svake faze i uzemljenja ili još bolje između priključaka visokonaponskih motora i uzemljenja, ako je to izvodljivo, ograničila bi prenapone koji se javljaju pri isključenju.

Literatura

- [1] "Eksperimentalna istraživanja prenapona pri operacijama vakuumskih i SF₆ sklopnih aparata različitih proizvođača", Studija br.310909, Elektrotehnički institut "Nikola Tesla" Beograd 2009, str. 182.
- [2] P. Vukelja, R.M. Naumov, J. Mrvić, D. Hrvić: "Prelazni fazni naponi i struje u mrežama 35 kV, 20 kV, 10 kV i 6 kV - eksperimentalna istraživanja", Monografija, Elektrotehnički institut "Nikola Tesla" Beograd 2010, str. 326.
- [3] P. Vukelja, J. Mrvić, D. Hrvić "Prenaponi i struje pri uključenju i isključenju transformatora 35kV/10kV vakuumskim prekidačem", *Zbornik radova Instituta "N. Tesla"*, Knjiga 18, 2007, 153-160.
- [4] Petar Vukelja, Jovan Mrvić, Dejan Hrvić, 2007, "Overvoltages at vacuum switching devices operation", *CIGRE, "Transient Phenomena in Large Electric Power Systems", Symposium 18-21, Zagreb, 2007, Croatia.*

Abstract. This paper presents the results of experimental studies of voltage phenomena in the switching operations of vacuum switching devices made by various manufacturers in several different configurations of 6 kV, 10 kV, 20 kV and 35 kV networks. During switching-on operations of the inductive loads, re-ignition of the electric arc between the contacts of the vacuum switching devices appears. Each arc ignition appearance leads to overvoltages with gradients close to those of lightning overvoltages. Switching-off operations of the inductive loads with vacuum switching devices leads to the cutting of the current before it passed through a natural zero and the appearance of multiple re-ignition of the arc between their contacts. All this leads to significant overvoltages on the equipment insulation. The analysis of surges in the studied networks, and the measures and means to reduce the stress of isolation are proposed.

Keywords: vacuum circuit breaker, vacuum contactor, overvoltage, network

Overvoltages During Switching Operations of Vacuum Switching Devices

Rad primljen u uredništvo 18.10.2013. godine
Rad prihvaćen 6.11.2013. godine