

SKLOPNI PRENAPONI NA PREKIDAČIMA USLED ISKLJUČENJA STRUJE KVARA – SLUČAJ PRIKLJUČENJA INDUKCIONOG GENERATORA NA DISTRIBUTIVNU MREŽU

Dragan ČETENović
Vladica MIJAILOVIĆ
Aleksandar RANKOVIĆ
Fakultet tehničkih nauka Čačak, Srbija

KRATAK SADRŽAJ

Sklopne operacije prekidačima su praćene brzim prelaznim procesima koji mogu dovesti do pojave prenapona u mreži, što je važno imati u vidu prilikom dimenzionisanja izolacije. Sklopne operacije su česte aktivnosti u radu elektroenergetskog sistema, karakteristične i za normalna pogonska stanja i za stanja sa kvarom. Izolacija treba da bude odabrana tako da podnese prenapone koji se mogu javiti nakon svake sklopne operacije prekidačem, bilo da je operacija izvršena u normalnom pogonu ili u cilju otklanjanja kvara.

Zahtevi za povećanjem učešća obnovljivih izvora u ukupnoj proizvodnji električne energije ukazuju na budući porast stepena integracije distribuiranih generatora u elektrodistributivnu mrežu. U ovom radu su analizirani sklopni prenaponi koji se mogu javiti na prekidaču prilikom isključenja kvara u distributivnoj mreži sa priključenom distribuiranom proizvodnjom. Analiza je urađena za slučaj priključenja na sredjenaponski i niskonaponski distributivni vod, pri čemu je u maloj elektrani instaliran indukcion generator. Indukcion generator je odabran da bude najveće dozvoljene snage za datu tačku priključenja. Analiza sklopnih prenapona je sprovedena za prekidač na početku distributivnog voda i spojni prekidač u maloj elektrani.

Ključne reči: sklopni prenaponi, prekidač, indukcion generator, distributivna mreža, kratak spoj.

TRANSIENT OVERVOLTAGES ON CIRCUIT BREAKERS AFTER FAULT CLEARANCE - CASE OF INDUCTION GENERATOR CONNECTION TO THE DISTRIBUTION NETWORK

SUMMARY

Switching operations are followed by fast transient processes that can cause occurrence of overvoltages in the network, which are important for dimensioning of insulation. Switching operations are frequent activities in the operation of the electric power system, characteristic for normal and abnormal operating conditions. The insulation should be selected to handle overvoltages that may occur after each switching operation, whether the operation is undertaken during normal conditions or in order to eliminate the fault.

Demands for increasing the contribution of renewable energy resources in total electricity production indicate a future increase in the degree of integration of distributed generators into the electrical distribution network. This paper analyzes transient overvoltages that can occur on the circuit breaker after clearing a fault in the distribution network with connected distributed generator. The analysis is performed when distributed generator is connected to the medium voltage and low voltage distribution line. Type of generator used in a small power plant is induction. Rated power of induction generator is equal to the hosting capacity for the given point of common coupling. The analysis of transient overvoltages is performed for the circuit breaker in the substation and for the circuit breaker at the point of generator connection.

Key words: transient overvoltages, circuit breaker, induction generator, electrical distribution network, short-circuit.

Dragan Četenović* – Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Kragujevcu, Svetog Save 65, 32000 Čačak, Srbija (e-mail: dragan.cetenovic@ftn.kg.ac.rs)

Vladica Mijailović – Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Kragujevcu, Svetog Save 65, 32000 Čačak, Srbija (e-mail: vladica.mijailovic@ftn.kg.ac.rs)

Aleksandar Ranković – Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Kragujevcu, Svetog Save 65, 32000 Čačak, Srbija (e-mail: aleksandar.rankovic@ftn.kg.ac.rs)

1. UVOD

Uvođenje distribuiranih izvora u postojeću distributivnu mrežu odražava se na rad svih elemenata mreže u većoj ili manjoj meri. Promena koncepcije napajanja, naponskog profila i stepena opterećenosti elemenata mreže, kao i uticaj na rad postojeće relejne zaštite samo su neki od poznatih efekata priključenja distribuirane proizvodnje. Osim toga, postoji niz potencijalnih neželjenih efekata priključenja koji nisu poznati ili nisu u dovoljnoj meri ispitani. Verovatnoća da dođe do pojave istih raste imajući u vidu različite tipove distribuiranih generatora koji mogu biti instalirani u maloj elektrani, s obzirom na specifične karakteristike u radu svakog od njih.

Iz teorije sklopnih prenapona poznato je da je sklopna operacija isključenja struje kvara od izuzete važnosti kada je u pitanju dimenzionisanje izolacije sistema. Kada je u pitanju analiza sklopnih prenapona na prekidaču pri otklanjanju trofaznih kvarova, za praksu su od interesa sledeća dva kvara:

- sabirnički kratak spoj, kada se kvar dogodi na samim krajevima prekidača,
- kilometarski kratak spoj, kada se kvar dogodi na nekoj udaljenosti od prekidača.

U ovom radu biće razmotrena mogućnost pojave sklopnih prenapona na prekidačima u distributivnoj mreži pri isključenjutrofaznog kratkog spoja na vodu na koji je priključen indukcion generator. Analize će biti sprovedene za različite tačke priključenja, različite tipove vodova i različite načine priključenja.

2. MODELOVANJE ELEMENATA MREŽE

2.1 Modelovanje napojne mreže

Ekvivalentna monofazna zamenska šema napojne mreže prikazana je na Sl. 1-a). Napojna mreža se sastoji od simetričnog trofaznog naponskog izvora $e(t)$ sa internim RLC elementima. Aktivna otpornost R i induktivnost L obuhvataju redne parametre svih elemenata napojne mreže. Kapacitivnost C obuhvata otočne kapacitivnosti elemenata, uključujući sabirnice, izolatore i drugu aparaturu. Tipični parametri 10 kV mreže su preuzeti iz [1]: $R = 0,0255 \Omega$; $L = 1,273 \text{ mH}$; $C = 3 \text{ pF}$.

2.2 Modelovanje prekidača

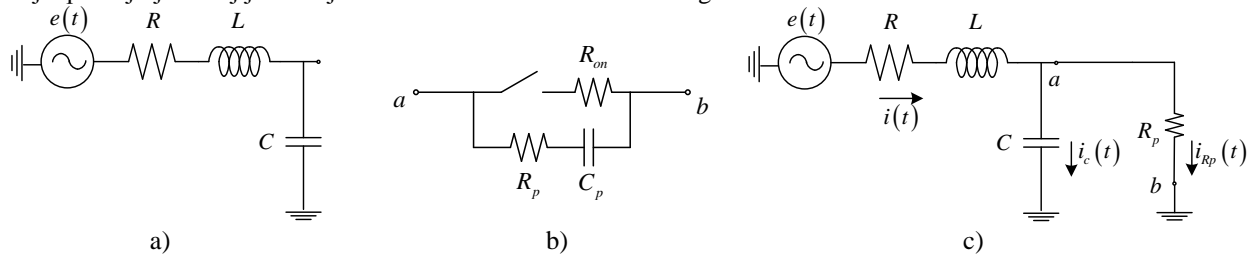
Uticaj električnog luka Kod realnog prekidača, pri razmicanju kontakata dolazi trenutno do paljenja električnog luka u komori prekidača. Pojava električnog luka pozitivno utiče na pojavu prenapona jer sprečava naglu promenu struje pri prekidanju strujnog kolai, posledično, indukovanje visokih prenapona na induktivnim elementima kola. Dobro odabran prekidač treba da prekine struju pri njenom prvom prolasku kroz nultu vrednost, jer ponovno paljenje električnog luka može da uzrokuje eksploziju prekidača [1]. Iz pomenutih razloga uticaj električnog luka je uzet u obzir na taj način što do prekidanja strujnog kruga dolazi pri prvom prolasku struje kroz nultu vrednost.

Vreme trajanja kvara Indukcion generatori (IG) za magnećenje svog magnetnog kola koriste reaktivnu energiju iz mreže. U cilju popravke faktora snage prema distributivnoj mreži, deo reaktivne energije se obično obezbeđuje iz kondenzatorske baterije vezane otočno u tački priključenja generatora na mrežu. Nakon nastanka kvara u mreži IG gubi pobudu, zbog čega napon na krajevima generatora naglo opada. Posledično, struja koja na mesto kvara dolazi sa strane IG-a brzo se prigušuje. Kraće vreme trajanja kvara znači veću efektivnu vrednost struje u trenutku prekidanja, a time i veću magnetnu energiju akumuliranu u induktivnim elementima kola, čime se povećava rizik od pojave prenapona. Što je vreme trajanja kvara duže, smanjuje se verovatnoća da će doći do pojave prenapona na spojnom prekidaču. Zbog toga, gledano sa stanovišta prenapona, od interesa je analizirati brzo isključenje kvara.

Vreme koje protekne od trenutka nastanka kvara do trenutka njegove detekcije je reda $1/(3f_n)$, što iznosi oko 7 ms za naznačenu učestanost od $f_n = 50 \text{ Hz}$ [1]. Prema praktičnim iskustvima vreme reagovanja prekidača je 20-30 ms za nove, ultra brze prekidače [2]. Prema tome, može se smatrati da je minimalno potrebno vreme za isključenje kratkog spoja 30-40 ms kod brzih zaštita realizovanih u kombinaciji sa ultra brzim prekidačima. Kod kratkih spojeva koji nisu praćeni velikim strujama kvara i koji se dešavaju u perifernim delovima EES-a, koriste se obično normalni prekidači. Pošto se analiza kvara sprovodi za distributivnu mrežu, realnije je usvojiti nešto duže trajanje kvara. U ovom radu vreme koje protekne od trenutka nastanka kvara do trenutka otvaranja prekidača iznosi 70 ms, za šta se

može reći da je opravdano usvojeno. Ovako usvojeno vreme je dovoljno kratko da se analizira brzo isključenje kvara, a sa druge strane i dovoljno dugo da odgovara realnim eksploatacionim uslovima.

Parazitivna otpornost prekidača Na Sl. 1-b) prikazan je monofaznomodel prekidača korišćen u analizama. Kada su kontakti prekidača zatvoreni, prekidač treba da bude dobar provodnik, ali za razliku od idealnog prekidača, realni prekidač ima malu internu otpornost R_{om} . Njom se obuhvata kontaktni otpor prekidača, koji je omskog karaktera. R_p i C_p su parazitivna rezistansa i kapacitivnost prekidača, respektivno. Podešavanje ovih parametara je od izuzetne važnosti za analizu prenapona na prekidaču. Posmatraćemo slučaj kvara na samim krajevima prekidača. Zamenska šema za analizu prelaznog procesa nakon isključenja kvara prikazana je na Sl. 1-c). Radi jednostavnosti, neka je parazitivna otpornost prekidača čisto omskog karaktera, što je validna pretpostavka obzirom na konstrukcione parametre prekidača (velika dielektrična čvrstoća i malo rastojanje između kontakata kada je prekidač u položaju "otvoreno"). Karakter kola u kvaru zavisi od parametara mreže, tj. odnosa $\omega L / R$. Sa stanovišta analize prenapona najnepovoljniji slučaj je kada je kolo u kvaru izrazito induktivnog karaktera.



Sl. 1—Ekvivalentna monofazna zamenska šema a) napojne mreže, b) prekidača i c) kola nakon prekidanja struje kvara Režim u kolu opisan je diferencijalnom jednačinom drugog reda:

$$\frac{d^2 u_c(t)}{dt^2} + 2 \cdot \delta' \frac{du_c(t)}{dt} + (\omega_i')^2 u_c(t) = \frac{E_m}{L \cdot C} \cdot \cos(\omega \cdot t), \quad (1)$$

gde su $u_c(t)$ trenutna vrednost napona kondenzatora C (u ovom slučaju i trenutna vrednost napona na prekidaču),

$$\delta' \text{ koeficijent prigušenja } \delta' = \frac{R}{2 \cdot L} + \frac{1}{2 \cdot R_p \cdot C} = \delta + \frac{1}{2 \cdot R_p \cdot C},$$

$$\omega_i' \text{ kružna učestanost slobodnih oscilacija } \omega_i' = \sqrt{\frac{1}{L \cdot C} + \frac{R}{R_p \cdot L \cdot C}} = \sqrt{\omega_i^2 + \frac{R}{R_p \cdot L \cdot C}},$$

δ i ω_i su koeficijent prigušenja i kružna učestanost slobodnih oscilacija, respektivno, kada ne bi bilo parazitivne otpornosti na prekidaču, E_m maksimalna vrednost naponskog izvora $e(t)$ i ω pogonska kružna učestanost.

Odziv napona na prekidaču nakon njegovog otvaranja jednak je odzivu napona na kontaktu a prekidača i dobija se kao rešenje jednačine (1). Imajući u vidu da je $\omega_i \gg \omega$ rešenje jednačine (1) može se zapisati u obliku:

$$u_c(t) = E_m \cdot \left[\cos(\omega \cdot t) - e^{(-\delta' \cdot t)} \cdot \cos(\omega_i' \cdot t) \right]. \quad (2)$$

Uzimanjem u obzir parazitivne otpornosti prekidača, tj smanjenjem ove vrednosti, koeficijent prigušenja i učestanost slobodnih oscilacija se povećavaju. Pravilnim izborom ovih otpornosti može se smanjiti i koeficijent prenapona [3]. Vrednosti parametara mreže su obično takve da promena parazitivne otpornosti ima veći uticaj na prigušenje nego na promenu učestanosti slobodnih oscilacija. Da bi se izbegao uticaj parazitivne otpornosti na odziv napona na prekidaču, član $1/(2 \cdot R_p \cdot C)$ u izrazu za δ' treba da bude bar za red veličine manji od člana $R/(2 \cdot L)$, tj. vrednost R_p treba podesiti tako da se zadovolji sledeća nejednakost:

$$R_p \geq \frac{10 \cdot L}{C \cdot R}. \quad (3)$$

Iako je primarna uloga parazitivnih elementa u modernim prekidačima da redukuju prelazne prenapone pri sklopnim operacijama prekidačem, razlog zbog kojeg su otpornosti ovih elementa podešene na visoke vrednosti je što se na taj način ide na stranu sigurnosti analizirajući najnepovoljniji slučaj sa stanovišta prenapona. Treba istaći da pomenute efekte na prigušenje imaju ne samo parazitivni elementi prekidača već i sve ostale očne aktivne otpornosti na mestu ugradnje prekidača. Ukoliko je u tački a priključen potrošačomskog karaktera, to će uticaj na prigušenjeprelaznog procesa biti veći ukoliko je potrošač veće snage. Isti efekat može imati otočna grana kojom se modeluju gubici u gvožđu energetskih transformatora, za prekidače koji se nalaze do transformatora[3].

2.3 Modelovanje voda i energetskog transformatora

Vodovi su modelovani kao trofazni simetrični elementi sa π – ekvivalentnom zamenskom šemom sa skoncentrisanim parametrima. Pomenuti model voda uzima u obzir induktivnu i kapacitivnu spregu između faznih provodnika, kao i karakteristike tla. Na osnovu impedansi simetričnih redosleda izračunavaju se sopstvena i međusobna aktivna otpornost, sopstvena i međusobna induktivnost, kao i fazna kapacitivnost i kapacitivnost voda prema zemlji.

IG se na distributivnu mrežu može priključiti direktno ili preko transformatora. U ovom radu analizirana su oba slučaja pri čemu se IG priključuje direktno na mrežu 0,4 kV, dok se priključenje na 10 kV mrežu izvodi posredstvom transformatora. Primodelovanju korišćena je tipična ekvivalentna zamenska šema transformatora. Izbor transformatora je vršen iz *ABB*-ovog kataloga distributivnih transformatora [4]. Naznačena snaga transformatora izabrana je prema naznačenoj snazi IG-a tako da transformator ne bude opterećen više od 80% svoje naznačene snage u režimu kada generator radi sa naznačenom snagom. Prema [3] neophodno je uzeti u obzir kapacitivnosti namotaja transformatora ukoliko se analiza sklopnih prenapona vrši za prekidač koji se nalazi do transformatora. U [3] su date tipične vrednosti kapacitivnosti namotaja transformatora. Podaci su dati za transformatore većih snaga (reda MVA i iznad). Kapacitivnost namotaja raste sa porastom snage transformatora, zbog čega su za transformatore korišćene u ovom radu usvojene vrednosti od 3 pF, s obzirom da su oni snage nekoliko stotina kVA.

2.4 Modelovanje potrošača i kondenzatorske baterije

Potrošači su modelovani kao potrošači konstantne impedanse omskog ili induktivnog karaktera.

Prema [5, 6] ugradnja baterije kondenzatora za kompenzaciju reaktivne snage je potrebna ukoliko je faktor snage male elektrane prema distributivnoj mreži $\cos \varphi < 0,95$ u normalnom radnom režimu. Pri odabiru kapaciteta kondenzatorske baterije treba imati u vidu da ni u jednom pogonskom slučaju ne sme doći do samopobuđivanja generatora. Nakon nastanka kratkog spoja u mreži mora se na spojnom prekidaču male elektrane prekinuti paralelan rad sa mrežom i izvršiti brzo razbuđivanje. Brzo razbuđivanje se postiže na taj način što se baterije kondenzatora isključuju istovremeno kad i spojni prekidač, kako bi se izbeglo samopobuđivanje.

2.5 Modelovanje indukcionog generatora

Sistem jednačina koji povezuje električni i mehanički deo indukcione mašine je:

$$\mathbf{u} = \mathbf{R} \cdot \mathbf{i} + \mathbf{i} \cdot \frac{d\theta_m}{dt} \cdot \frac{d\mathbf{L}}{d\theta_m} + \mathbf{L} \cdot \frac{d\mathbf{i}}{dt}, \quad (4)$$

$$m_{meh} = \frac{1}{2} \cdot \mathbf{i}^T \cdot \frac{d\mathbf{L}}{d\theta_m} \cdot \mathbf{i} - k_m \cdot \frac{d\theta_m}{dt} - J_m \cdot \frac{d^2\theta_m}{dt^2}, \quad (5)$$

gde je $\mathbf{u} = [u_{sa}, u_{sb}, u_{sc}, u_{ra}, u_{rb}, u_{rc}]^T$ vektor napona faza a, b, c statorskog i rotorskog namotaja,

$\mathbf{R} = \text{diag}\{R_s, R_s, R_s, R_r, R_r, R_r\}$ matrica aktivnih otpornosti faza statorskog i rotorskog namotaja,

$\mathbf{i} = [i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}, i_{ra}, i_{rb}, i_{rc}]^T$ vektor struja kroz faze statorskog i rotorskog namotaja, θ_m ugao između osa statorskog i

rotorskog namotaja, m_{meh} mehanički moment na vratilu mašine, k_m koeficijent trenja koji se odnosi na sve rotirajuće delove mašine, J_m ukupni moment inercije rotirajućih delova mašine i \mathbf{L} matrica induktivnosti definisana kao:

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} L_{s,a-a} & L_{s,a-b} & L_{s,a-c} & L_{sr,a-a} & L_{sr,a-b} & L_{sr,a-c} \\ L_{s,b-a} & L_{s,b-b} & L_{s,b-c} & L_{sr,b-a} & L_{sr,b-b} & L_{sr,b-c} \\ L_{s,c-a} & L_{s,c-b} & L_{s,c-c} & L_{sr,c-a} & L_{sr,c-b} & L_{sr,c-c} \\ L_{rs,a-a} & L_{rs,a-b} & L_{rs,a-c} & L_{r,a-a} & L_{r,a-b} & L_{r,a-c} \\ L_{rs,b-a} & L_{rs,b-b} & L_{rs,b-c} & L_{r,b-a} & L_{r,b-b} & L_{r,b-c} \\ L_{rs,c-a} & L_{rs,c-b} & L_{rs,c-c} & L_{r,c-a} & L_{r,c-b} & L_{r,c-c} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

gde su $L_{s,x-y}$ i $L_{r,x-y}$ induktivnost između x i y faze statorskog namotaja, odnosno x i y faze rotorskog namotaja, pri čemu je $x, y = a, b, c$ i $x \neq y$. Za $x = y$ dobija se induktivnost faze x odgovarajućeg namotaja, koja je zbir induktivnosti rasipanja $L_{s\sigma}$ ($L_{r\sigma}$) i sopstvene induktivnosti L_{ss} (L_{rs}). Imajući u vidu simetričnost mašine može se pisati da je:

$$L_{s,a-a} = L_{s,b-b} = L_{s,c-c} = L_{s\sigma} + L_{ss} = L_{s\sigma} + N_s^2 \cdot \lambda_\delta \quad (7)$$

$$L_{r,a-a} = L_{r,b-b} = L_{r,c-c} = L_{r\sigma} + L_{rs} = L_{r\sigma} + N_r^2 \cdot \lambda_\delta \quad (8)$$

gde je N broj navojaka odgovarajućeg namotaja, a λ_δ magnetena provodnost vazdušnog zazora između rotora i statora mašine. Obzirom da su faze jednog namotaja prostorno pomerene za 120° , dobija se da je za $x \neq y$:

$$L_{s,x-y} = N_s^2 \cdot \lambda_\delta \cdot \cos(\pm 120^\circ) = -0,5 \cdot L_{ss} \quad (9)$$

$$L_{r,x-y} = N_r^2 \cdot \lambda_\delta \cdot \cos(\pm 120^\circ) = -0,5 \cdot L_{rs} \quad (10)$$

U jednačini (6) $L_{sr,x-y}$ je induktivnost između faze x statorskog i faze y rotorskog namotaja, a $L_{rs,x-y}$ induktivnost između faze x rotorskog i faze y statorskog namotaja. Kako se zbog okretanja rotora stalno menja položaj između faznih provodnika statorskog i rotorskog namotaja to ove induktivnosti nisu konstantne, već se njihove vrednosti menjaju u vremenu. Neka je faza a referentna faza. Ako u trenutku t osa faze a statorskog i faze a rotorskog namotaja zaklapaju ugao θ_m tada je:

$$\begin{aligned} L_{sr,a-a} &= L_{rs,a-a} = L_{sr} \cos \theta_m \\ L_{sr,a-b} &= L_{rs,b-a} = L_{sr} \cos(\theta_m + 120^\circ) \\ L_{sr,a-c} &= L_{rs,c-a} = L_{sr} \cos(\theta_m - 120^\circ) \\ L_{sr,b-a} &= L_{rs,a-b} = L_{sr} \cos(\theta_m - 120^\circ) \\ L_{sr,b-b} &= L_{rs,b-b} = L_{sr} \cos \theta_m \\ L_{sr,b-c} &= L_{rs,c-b} = L_{sr} \cos(\theta_m + 120^\circ) \\ L_{sr,c-a} &= L_{rs,a-c} = L_{sr} \cos(\theta_m + 120^\circ) \\ L_{sr,c-b} &= L_{rs,b-c} = L_{sr} \cos(\theta_m - 120^\circ) \\ L_{sr,c-c} &= L_{rs,c-c} = L_{sr} \cos \theta_m \end{aligned} \quad (11)$$

gde je $L_{sr} = N_s \cdot N_r \cdot \lambda_\delta$ - međusobna induktivnost između pojedinih faza statorskog i rotorskog namotaja za slučaj poklapanja njihovih referentnih osa.

Sistem jednačina (4-5) predstavlja opšti matematički model asinhronne mašine, koji je nelinearan čak i kada je brzina obrtanja konstantna. Zbog toga se uvode odgovarajuće transformacije da bi se ovaj sistem preveo u linearan sistem:

- transformacija raspredanja, kojom se teži da se izvrši redukcija matrice \mathbf{L} ,
- transformacija obrtanja, koja ima za cilj da se postigne nezavisnost submatrica induktivnosti \mathbf{L}_{sr} i \mathbf{L}_{rs} od položaja namotaja rotora prema namotajima statora.

Nakon nastanka kratkog spoja u mreži mora se izvršiti brzo zaustavljanje agregata. Iako je u pitanju brzo zaustavljanje, prelazni procesi zatvaranja turbine su znatno sporiji od dinamike električnih veličina u mreži. Zbog toga se može smatrati da se snaga na turbini IG-a izvesno vreme nakon otvaranja spojnog prekidača neće značajnije promeniti, pa je opravdano usvojiti da je snaga na turbini IG-a konstantna tokom celog perioda simulacije.

Prema [7] kapacitivnost namotaja asinhronog motora C_{am} [nF] u funkciji njegove naznačene snage P_n [kW] se može aproksimirati sledećim izrazom:

$$C_{am} = 0,009 + 0,53 \cdot \ln(P_n). \quad (12)$$

3. POSTAVKA SIMULACIJE

Na Sl. 2 prikazan je slučaj priključenja IG-a na vod 10 kV. Trofazni kratak spoj u tački "M" je sabirnički kratak spoj za prekidač P_1 , a kilometarski kvar za prekidač P_2 . U slučaju da je mesto kvara u tački "N", prekidač P_1 "vidi" kvar kao kilometarski, dok ga prekidač P_2 "vidi" kao sabirnički. Kvar nastupa u trenutku $t = 0,2$ s od početka simulacije. Delovanjem zaštita u maloj elektrani mora da se na spojnom prekidaču (prekidač P_2) automatski prekine paralelan rad generatora sa distributivnom mrežom. S obzirom da je u pitanju trofazni kratak spoj na vodu, od svih zaštita u maloj elektrani najpre će na kvar reagovati kratkospojna zaštita i to bez vremenske zadržke. Na kvar će reagovati i kratkospojna zaštita voda, koja isključuje prekidač P_1 . U realnim uslovima, ove dve zaštite bi trebale da odreaguju skoro istovremeno, zbog čega je opravdano usvojiti da se prekidači P_1 i P_2 otvaraju u isto vreme.



Sl. 2 - Jednopolna šema priključenja IG-a na izvod 10 kV

Pri odabiru naznačene snage distribuiranog generatora S_{ng} koja se sme priključiti na distributivnu mrežu mora biti zadovoljen kriterijum dozvoljene promene napona u odnosu na vrednost naznačenog napona mreže. Naznačena snaga indukcionog generatora koja se sme priključiti u tački "K" određuje se iz:

$$S_{ng} = \frac{\Delta u_m \cdot S_{3pks}}{k_{i,max}} \quad (13)$$

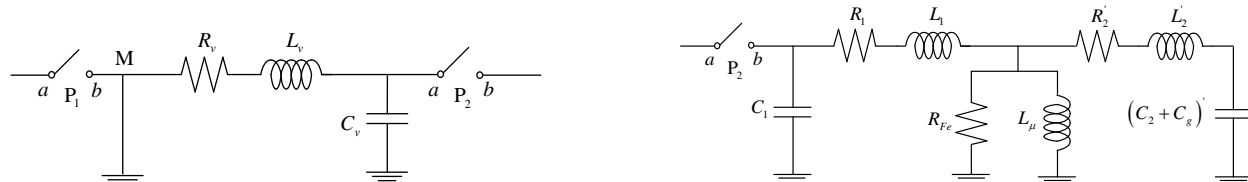
gde je Δu_m maksimalna dozvoljena promena napona, S_{3pks} snaga trofaznog kratkog spoja u tački "K" pre priključenja, a $k_{i,max}$ odnos maksimalne polazne struje generatora I_p i njegove naznačene struje I_n . U najkritičnijem slučaju, ukoliko se IG pokreće kao asinhroni motor preko mreže, uzima se da je vrednost ovog koeficijenta $k_{i,max}=8$ [5]. Najveće dozvoljeno odstupanje napona u sredjenaponskoj mreži iznosi 2%, a u niskonaponskoj mreži 3% [5]. Sa skraćivanjem izvoda raste snaga S_{3pks} , zbog čega se na izvod sme priključiti generator veće snage. U Tabeli 1 su prikazane snage IG-a u funkciji dužine voda za koje su vršene analize u slučaju priključenja male elektrane na nadzemni vod 10 kV i kablovski vod 0,4 kV, kao i snage transformatoru slučaju priključenja na sredjenaponsku mrežu.

TABELA 1– Naznačene snage IG-a i transformatora zavisno od tačke priključenja

Priključenje IG-a na vod 10 kV											
l_v [km]	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6	1,8	2
S_{ng} [kVA]	624	527	414	345	293	254	224	200	181	164	151
S_{nT} [kVA]	800	630	500	500	400	400	400	250	250	250	250
Priključenje IG-a na kablovski vod 0,4 kV											
l_v [m]	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300
S_{ng} [kVA]	67,2	40,2	25,7	18,6	14,5	11,8	10	8,6	7,6	6,8	6,2

4. REZULTATI I DISKUSIJA

Najpre će se analizirani odzivi napona na prekidaču P_2 nakon isključenja kvara u tački "M", a za slučaj priključenja IG-a na nadzemni vod 10 kV. Kako u slučaju kvara otvaranje prekidača P_1 i P_2 nastupa istovremeno, prelazni procesi levo od prekidača P_2 biće posledica oscilovanja energije akumulirane u induktivnim L_v i kapacitivnim C_v elementima voda. Monofazna zamenska šema oscilatornog kola levo od prekidača P_2 prikazana je na Sl. 3-a).



Sl. 3–Zamenska šema za analizu prelaznog procesa a) na strani distributivnog voda i b) na strani transformatora
U slučaju kvara u tački "M" sa strane IG-a dolazi znatno manja struja nego sa strane napojne mreže. Osim toga, napon na krajevima IG-a opada tokom tavanja kvara, jer generator ostaje bez pobude. Takođe, vrednost struje IG-a znatno brže opada nego vrednost struje koja na mesto kvara dolazi iz napojne mreže. Zbog toga je ukupna akumulirana energija na vodu u trenutku kada nastupi otvaranje prekidača jako mala. Ta energija će oscilovati u kolu levo od prekidača P_2 , koje je zatvoreno preko mesta kvara, održavajući neku malu vrednost napona na kontaktu a prekidača P_2 , sve dok se akumulirana energija u potpunosti ne disipira na aktivnoj otpornosti voda R_v .

Odziv napona na kontaktu a (u_a) faze C prekidača P_2 za slučaj kada je tačka priključenja IG-a 2 km daleko od napojnih sabirnica prikazan je na Sl. 4-a) (plava linija). Vidi se da je neposredno pre otvaranja prekidača efektivna vrednost faznog napona na mestu ugradnje prekidača pala na svegane koliko desetina volti. S obzirom da je u pitanju mreža 10 kV, jasno je da ovakvi početni uslovi ne mogu dovesti do pojave velikog napona na kontaktu a prekidača. Može se primetiti da napon na mestu ugradnje prekidača pre isključenja kvara osciluje sa dve učestanosti. Prva učestanost je prirodna učestanost, a druga se javlja kao posledica prelaznog režima koji nastupa nakon nastanka kvara, a pre njegovog isključenja, zbog izvršene kompenzacije reaktivne snage kondenzatorskom baterijom u maloj elektrani. Odzivi napona u ostale dve faze slični. Takođe, ovi odzivi se izvesno razlikuju od odziva koji bi se dobio primenom analitičkog izraza iz [1], ali treba imati u vidu da se ovde sistem modeluje trofazno, uzimajući u obzir elektromagnetnu spregu između faza na vodu i pojavu nesimetrije pri prekidanju kvara. Da bi proverili kolika su odstupanja, odredićemo učestanost i vreme prigušenja prelaznog procesa koji se javlja nakon otvaranja prekidača, a primenom izraza iz [1]:

$$\omega_i = \frac{1}{\sqrt{L_v \cdot C_v}} = \frac{1}{\sqrt{1,130 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 9,804 \cdot 10^{-9} \cdot 2}} = 0,15 \cdot 10^6 \text{ s}^{-1}, \quad (14)$$

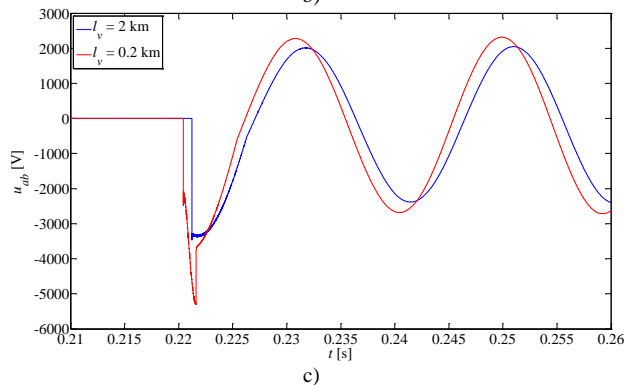
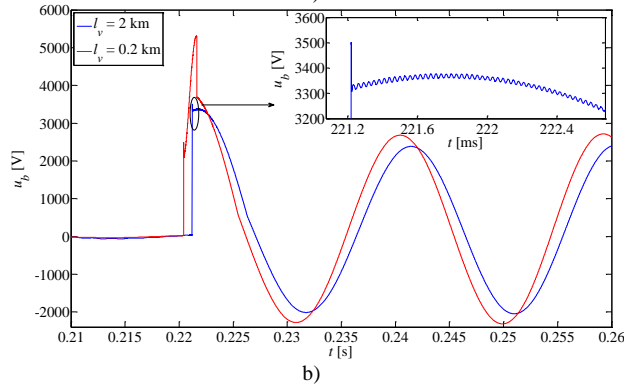
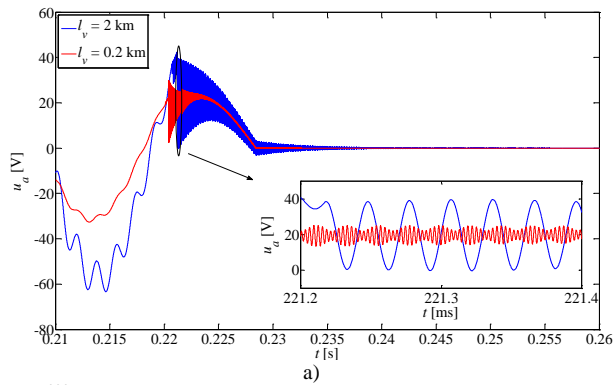
$$\delta = \frac{R_v}{2 \cdot L_v} = \frac{r_v}{2 \cdot l_v} = \frac{0,606}{2 \cdot 1,130 \cdot 10^{-3}} = 268,14 \text{ s}^{-1}. \quad (15)$$

Kružna učestanost i koeficijent prigušenja su izračunati sa parametrima direktnog redosleda. Sa Sl. 4-a) može se očitati da jedna perioda u prelaznom režimu traje oko $T = 31 \cdot 10^{-6} \text{ s}$, odakle sledi da je kružna učestanost prelaznog režima $\omega_i = 2\pi/T = 0,2 \cdot 10^6 \text{ s}^{-1}$, koja je približno jednaka vrednosti koja je dobijena analitičkim izrazom. Na osnovu izračunatog koeficijenta prigušenja sledi da prelazni proces treba da se završi nakon $t = 3/\delta = 0,011 \text{ s}$. Sa Sl. 4-a) može se videti da kompletan prelazni režim traje manje od 20 ms.

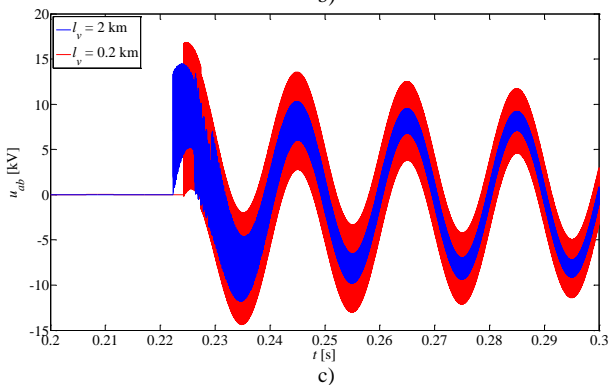
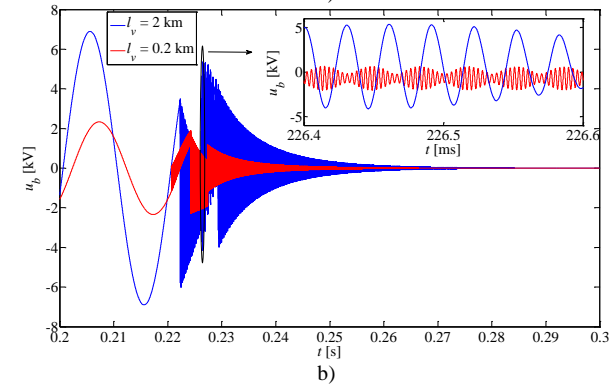
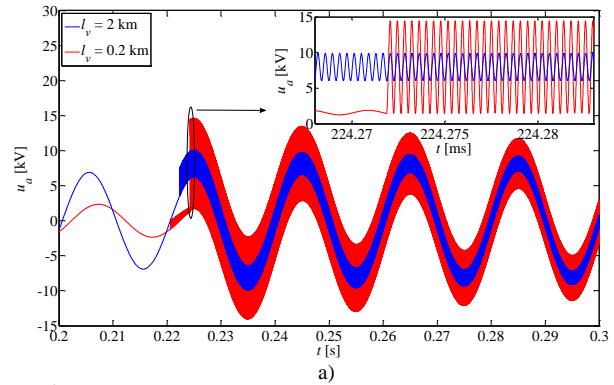
U slučaju da je tačka priključenja bliže napojnim sabirnicama, veća je i snaga IG-a koja se sme priključiti na mrežu, pa će biti veća i efektivna vrednost struje IG-a u trenutku prekidanja. Međutim, sa skraćivanjem izvoda smanjuju se induktivnost i kapacitivnost voda, tako da se energija akumulirana na vodu u trenutku prekidanja struje kvara neće značajnije promeniti. Na Sl. 4-a) crvenom linijom je prikazan odziv napona na kontaktu a faze C prekidača P_2 za slučaj da je tačka priključenja 200 m daleko od napojnih sabirnica. Poređenjem rezultata može se zaključiti da se efektivna vrednost napon u_a prekidača P_2 nakon prekidanja kvara ne menja značajnije bez obzira koliko je daleko tačka priključenja IG-a. Kao što je očekivano, učestanost prelaznog procesa se smanjuje sa skraćivanjem izvoda (manje vrednosti L_v i C_v), a dužina trajanja prelaznog procesa se ne menja (odnos R_v/L_v ostaje isti).

Napon kontakta b prekidača P_2 imaće dve komponente: tranzijentnu i ustaljenu. Tranzijentna komponenta zavisi od prelaznog režima u delu kola desno od prekidača, prikazanom na Sl. 3-b). Na Sl. 3-b) oznaka ' (prim) koristi se za parametre svedene na višenaponsku stranu transformatora, R_1, L_1 i C_1 (R_2, L_2 i C_2) su aktivna otpornost, induktivnost i kapacitivnost primarnog (sekundarnog) namotaja transformatora, R_{Fe} i L_μ parametri kojima se modeluju gubici u gvožđu transformatora i reaktansa magnećenja i C_g kapacitivnost namotaja generatora. Sa šeme je izostavljen IG zbog jednostavnosti, koji je ujedno i električno daleko pa nema velikog uticaja. Tranzijentna komponenta napona je posledica oscilovanja energije akumulirane u induktivnim i kapacitivnim elementima transformatora, kondenzatorske baterije i IG-a, ali pre svega transformatora. Pošto je nakon otvaranja prekidača P_2 kolo odvojeno od mreže, uticaj rednih parametara transformatora može se zanemariti. Vrednost otpornosti R_{Fe} zavisi od snage gubitaka u gvožđu i reda je veličine $10^5 \Omega$ za transformatore iz Tabele 1. U skladu sa teorijskim razmatranjima u poglavlju 2.2 ova vrednost je sa stanovišta analize prelaznih napona relativno mala obzirom da je otopno vezana, pa će dovesti do velikog i brzog prigušenja oscilatornog procesa u kolu desno od prekidača P_2 . Prema tome, tranzijentna komponenta napona se ekstremno brzo prigušuje (što je prikazano zumirano na Sl. 4-b), zbog čega bi bilo očekivano da napon na kontaktu b (u_b) prekidača P_2 brzo padne na nulu. Međutim, nakon otvaranja spojnog prekidača i isključenja kondenzatorske baterije, napon na krajevima IG-a održava se na nekoj vrednosti iako mu je pobuda isključena, što je posledica postojanja remanentnog magnetizma. Vidi se da je učestanost ustaljene komponente napona približno jednaka pogonskoj učestanosti.

Prelazni povratni napon (u_{ab}) na prekidaču P_2 dobija se kao razlika napona kontakta a (u_a) i kontakta b (u_b) prekidača. Na Sl. 4-c) prikazan je napon faze C prekidača P_2 nakon otvaranja. Za $l_v = 0$ dobijaju se odzivi napona sa slučaj sabirničkog kvara na prekidaču koji se ne razlikuju značajnije od odziva za $l_v = 0,2 \text{ km}$, pa neće biti posebno prikazani.



Sl. 4 – Odzivi napona na a) kontaktu a , b) kontaktu b i c) između kontakata prekidača P_2 u mreži 10 kV



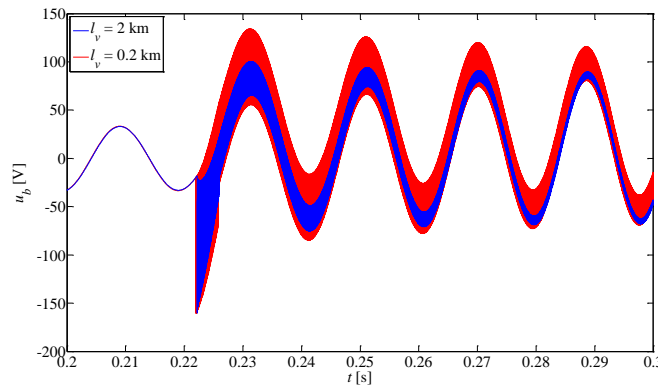
Sl. 5 – Odzivi napona na a) kontaktu a , b) kontaktu b i c) između kontakata prekidača P_1 u mreži 10 kV

Odzivi napona na prekidaču P_1 analiziraju se nakon isključenja kvara u tački "N" i prikazni su na Sl. 5 za fazu A. Prelazni režim levo od prekidača P_1 zavisi od parametara napojne mreže, a prelazni režim desno od prekidača zavisi od parametara voda. Napon u_a prekidača P_1 nakon njegovog otvaranja ima dve učestanosti: prva učestanost je pogonska, diktirana od strane izvora, a druga je posledica oscilovanja elektromagnetne energije akumulirane u induktivnim i kapacitivnim elementima napojne mreže u trenutku prekidanja struje kvara. Pošto je u pitanju jaka mreža, struja kvara koja dolazi sa strane mreže mnogo je veća i ne prigušuje se kao struja koja dolazi sa strane IG-a, zbog čega je akumulirana energija na vodu znatno veća kada je kvar u tački "N" (u odnosu na kvar u tački "M"). Zbog znatno manje aktivne otpornosti ($R_m = 0,0255 \Omega$) prelazni režim na strani napojne mreže znatno duže traje nego što je to slučaj sa prelaznim režimom na strani voda ($R_v = 1,212 \Omega$). Ni na strani napojne mreže ni na strani nadzemnog voda ne postoji otočno vezana otpornost koja bi dovela do velikog i brzog prigušenja prelaznog procesa na prekidaču P_1 , kao što je to bio slučaj sa odzivima na kontaktu b prekidača P_2 usled otočne grane kojom se modeluju gubici u gvožđu transformatora. S druge strane, zbog manje kapacitivnosti prelazni režim na strani napojne mreže se odvija sa većom frekvencijom nego na strani voda.

Sa skraćivanjem voda kolo u kvaru levo od mesta kvara dobija sve više induktivni karakter. Posledično, nakon isključenja napon u_a dostiže znatno veću vrednost kada je tačka priključenja IG-a 200 m delako od napojnih sabirnica u odnosu na slučaj kada je 2 km daleko. S obzirom da karakter prelaznog procesa zavisi od parametara napojne mreže, učestanost i dužina trajanja prelaznog procesa na kontaktu a prekidača se neće promeniti (Sl. 5-a) zumirano). Što se tiče prelaznog procesa desno od prekidača P_1 , usled smanjenja dužine voda povećaće se učestanost prelaznog procesa, zbog manje kapacitivnosti i induktivnosti voda, dok će se prelazni proces prigušiti nakon istog vremena kao i za slučaj kada je $l_v = 2$ km, kada će napon u_b pasti na nulu (Sl. 5-b)).

Prelazni povratni napon na prekidaču P_1 u fazi A prikazan je na Sl. 5-c). Vidi se da je prekidač izložen mogućnosti pojave prenapona. Koeficijent prenapona za $l_v = 0,2$ km iznosi $k_p = 2,06$, što je i očekivano jer je mesto kvara jako blizu prekidaču, pa se ovaj odziv neće puno razlikovati od odziva za slučaj sabirničkog kratkog spoja, za koji koeficijent prenapona iznosi $k_p \approx 2$ za napojne mreže induktivnog karaktera. Sa udaljavanjem tačke priključenja IG-a koeficijent prenapona se smanjuje i za $l_v = 2$ km iznosi $k_p = 1,77$.

Kada se IG priključuje na mrežu 0,4 kV jednopolna zamenska šema je ista kao na Sl. 2, samo nema transformatora. Sprovedena analiza daje rezultate slične onima za slučaj priključenja na srednjenaponsku mrežu. Jedina veća razlika je u odzivu napona na prekidaču P_2 (spojni prekidač) i to kontakta prekidača na strani male elektrane. Naime, s obzirom da se priključenje na niskonaponski vod vrši direktno, a ne preko transformatora, tranzijentna komponenta napona u_b prekidača P_2 se ne prigušuje naglo. Promena napona u_b za fazu C prekidača P_2 za slučaj isključenja kvara u tački "M" prikazana je na Sl. 6. S obzirom da je napon u_a prekidača P_2 zanemarljivo mali, jasno ja da ni u ovom slučaju ne postoji opasnost od pojave prenapona na prekidaču.



Sl. 6 – Odzivi napona na kontaktu b prekidača P_2 u mreži 0,4 kV

5. ZAKLJUČAK

U ovom radu su analizirani sklopni prenaponi na prekidaču do kojih može doći nakon isključenja kvara, u uslovima priključene distribuirane proizvodnje na srednjenaponski/niskonaponski distributivni vod, pri čemu je tip generatora u maloj elektrani indukcioni. Analize su rađene za prekidač na početku distributivnog voda i spojni prekidač u maloj elektrani. Rezultati analize pokazuju da ne postoji opasnost od pojave prenapona na spojnem prekidaču u slučaju isključenja kvara negde na distributivnom vodu. S druge strane, koeficijent prenapona na prekidaču koji se nalazi na početku distributivnog voda nije zanemarljiv, zavisi od tipa i dužine voda i utoliko je veći ukoliko je mesto kvara bliže početku voda.

LITERATURA

- [1] Nahman J, Mijailović V, "Razvodna postrojenja", Akademska misao, drugo izdanje, Beograd, 2015.
- [2] Bekut D, "Relejna zaštita", Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka Novi Sad, 1999.
- [3] Alan Greenwood, "Electrical Transients in Power Systems", John Wiley & Sons, Inc, 2nd ed., USA, 1991.
- [4] RESIBLOC@Suvi Tip distributivnih transformatora, 2005.
- [5] "Tehnička preporuka br. 16: Osnovni tehnički zahtevi za priključenje malih elektrana na distributivni sistem", JP EPS - Direkcija za distribuciju električne energije Srbije, II izdanje, Beograd, maj 2011.
- [6] Tehnicka dokumentacija za projekat izvedenog stanja MHE Studenica, jun 2010.
- [7] Ion Boldea, Syed A. Nasar, "The Induction Machines Design Handbook", CRC Press, Taylor & Francis Group, 2nd ed., USA, 2010.