

**MAKSIMALNE STRUJE KRATKOG SPOJA PRI KVAROVIMA NA PRIKLJUČCIMA TRONAMOTAJNIH TRANSFORMATORA RAZLIČITIH SPREGA****MAXIMUM SHORT-CIRCUIT CURRENTS DURING FAULTS ON THREE-WINDING TRANSFORMERS TERMINALS WITH DIFFERENT CONNECTION TYPES**

Zoran RADAKOVIĆ, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Srbija  
Marko NOVKOVIĆ, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Srbija  
Zoran LAZAREVIĆ, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Srbija  
Tomislav RAJIĆ, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Srbija  
Dušan KULIĆ, JP Elektroprivreda Srbije, Srbija  
Željko LAZOVIĆ, JP Elektroprivreda Srbije, Srbija

**KRATAK SADRŽAJ**

Rad prikazuje rezultate proračuna naizmeničnih komponenti struja kratkog spoja za dva trofazna tronamotajna transformatora, naznačene snage višenaponskog namotaja 68 MVA i naznačene snage svakog od dva niženaponska 6,6 kV namotaja 40 MVA. Naznačeni naponi višenaponske strane i sprege za višenaponsku stranu se razlikuju (za prvi transformator 110 kV, YNd5d5, za drugi 22 kV, Dd0d0). Razmatrani su svi tipovi kvara (tropolni, jednopolni, i dvopolni, sa i bez spoja sa zemljom) na priključcima transformatora. Sprege transformatora utiču na vrednosti struje kratkog spoja pri nesimetričnim kvarovima kod kojih postoji spoj sa zemljom. U radu su analizirane situacije da je samo jedna ili više mreža na koje je povezan transformator aktivne. Za svaku od navedenih situacija su određene struje kroz svaki od namotaja, kako onih na kojima se dogodio kratak spoj, tako i na namotajima na druge dve strane transformatora. Poređenjem rezultata dolazi se do vrednosti koju je potrebno koristiti za određivanje maksimalne (udarne) struje, merodavne za proveru izdržljivosti transformatora na mehanička naprezanja pri kratkom spoju.

Svi proračuni vršeni su polazeći od rezultata fabričkih oglada određivanja impedansi kratkog spoja transformatora. Kao karakteristike mreže uzete su tipske karakteristike iz standarda IEC 600076-5. Pored toga, analizirani su i kvarovi pri stvarnoj situaciji priključenja naponske strane 22 kV transformatora 22/6,6/6,6 kV na sabirnice 22 kV generatora u elektrani (generator snage 420 MVA, priključak na mrežu 400 kV preko generatorskog transformatora snage 420 MVA).

U radu je prikazan proračunski postupak određivanja struja kratkog spoja za sve tipove kvarova kod tronamotajnih trofaznih transformatora, različitih snaga namotaja i sprege na tri priključne strane, kao i različitih načina priključenja na mrežu. Prikazani su rezultati proračuna dobijeni primenom softverskog alata razvijenog po prikazanom matematičkom modelu. Podaci fabričkih ispitivanja prikazani u radu omogućavaju izradu proračuna nekim drugim alatom i poređenje sa vrednostima datim u radu.

Rezultati prikazani u radu pokazuju da je za kritična mehanička naprezanja transformatora važno definisati da li je transformator u toku rada priključen samo na jednu ili više aktivnih mreža. U vezi sa tim, moguće je da je transformator u normalnom radu priključen samo na jednu aktivnu mrežu, a da se tokom promene uklopnog stanja nalazi u kritičnijem režimu priključka na više aktivnih mreža. U svakom slučaju, pri nabavci transformatora su po pravilu poznata radna stanja, odnosno koje od mreža mogu biti aktivne.

**Ključne reči:** Energetski tronamotajni trofazni transformator, kratak spoj, kritične struje, mehanička naprezanja sprege transformatora

**ABSTRACT**

The paper presents results of alternating short-circuit currents calculation for two three-phase three-winding power transformers, 68 MVA high voltage rated power and 40 MVA low voltage rated power (there are two 6.6 kV windings). The rated voltages on high voltage sides are different for two analyzed transformers (110 kV for one with connection type YNd5d5, and 22 kV for another with a Dd0d0 connection). All fault types on

transformers terminals are considered (three-pole, one-pole, and two-pole, with and without ground connection). The connection type affects the short circuit current value of the non-symmetrical faults with earth connection. The paper analyzes both situations where either one or more networks connected on transformers are active. For each of these situations, determination of all currents in the transformers windings is performed, either for faulted side windings or for the other two windings on no faulted sides. Based on these results, the relevant current for determining the maximum winding mechanical stress during short-circuit is determined.

The calculations were performed using the results of short circuit tests from transformer factory tests. Typical source networks characteristics were calculated from the IEC 600076-5 standard. In addition to this, the faults in case of the transformers connected near the generator and its block transformer in power station are analyzed.

The paper presents the method for the calculations of all types of short circuits in the case of three-winding three-phase power transformers, with different winding powers and connections on different sides, and finally with different network connection conditions. The results obtained by using the software tool developed according to presented mathematical model are given in the paper. The results of factory acceptance tests of the transformers make it possible to perform the calculations with some other tool and to compare them with the results given in the paper.

The results presented in the paper show that for critical mechanical stresses determination of transformers windings it is important to know whether the transformer is connected to only one or more active networks. The plausible scenario is a transformer connection with only one active network in normal operation conditions, but more active networks could be attended during network reconfiguration causing a more critical situation. Anyway, in the process of contracting the transformer, the operating conditions are known, i.e. which networks can be active.

**Keywords:** Critical currents, Mechanical stresses, Power three-winding three-phase transformers, Short circuit, Transformer connection type

Zoran Radaković, Marko Novković, Zoran Lazarević, Tomislav Rajić Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11000 Beograd, tel: 011 3218 339, radakovic@etf.rs, novkovic@etf.rs, lazarevic@etf.rs, rajic@etf.rs, Dušan Kulić, Željko Lazović, JP Elektroprivreda Srbije, Masarikova 1-3, 11000 Beograd, dusan.kulic@eps.rs, zeljko.lazovic@eps.rs

## 1 UVOD

Struje koje se javljaju pri kratkom spoju, osim u nekim slučajevima jednopolnog zemljospoja, višestruko prevazilaze radne struje i dovode do velikih mehaničkih naprezanja transformatora i velikih porasta temperatura namotaja. Standard IEC 60076-5 [1] specificira koje je provere mehaničkih naprezanja i zagrevanja potrebno izvršiti kako bi se osiguralo da u toku pogona transformatora prilikom pojave kratkog spoja neće doći do njegovog oštećenja. Ulazni podatak za ove provere je vrednost struje kratkog spoja, od koje zavise vrednosti sila. Na osnovu ovih vrednosti vrše se proračuni i provere da li transformator može da izdrži mehanička naprezanja, odnosno da li će doći do deformacija i mehaničkih oštećenja pri kratkom spoju. Od vrednosti struje kratkog spoja zavisi i porast temperature namotaja, koji ne sme biti veći od granične vrednosti posle koje bi nastalo oštećenje izolacije. Vreme i način reagovanja relejne zaštite po pravilu utiče na termička naprezanja pri kratkom spoju, dok je udarna vrednost struje određena karakteristikama transformatora i mreže / generatora na koju su priključene različite naponske strane transformatora.

Rad se bavi određivanjem vrednosti naizmenične komponente struje kratkog spoja kod tronamotajnih energetskih transformatora. Metoda proračuna je prikazana na jednostavan način, preko zamenskih električnih šema. U skladu sa prikazanom metodom realizovana je prateća programska podrška za određivanje struja koje protiču kroz namotaje transformatora pri različitim vrstama kratkog spoja. Proračuni su vršeni za različite slučajeve priključenja svake od naponskih strana tronamotajnih transformatora (da li su jedna, dve ili sve tri strane priključene na aktivnu mrežu).

Primeri obrađeni u radu (dva trofazna tronamotajna transformatora, svaki različitih snaga namotaja, različitih sprega, različitih priključnih mesta (daleko ili u blizini generatora u termoelektrani)) pokrivaju veliki broj parametara koji utiču na struje kvara, a posledično i na mehaničko naprezanje transformatora. Rad se bavi određivanjem naizmeničnih komponenti struja kroz svaki od namotaja. Množenjem ovih struja udarnim koeficijentom, koji uvažava jednosmernu komponentu struje kratkog spoja, dolazi se do udarnih vrednosti struja, pri kojima sile dostižu maksimalne vrednosti. Tokom procesa projektovanja, proizvođač izračunava ove sile i

proverava da li će doći do deformacija i oštećenja transformatora. Spisak provera koje treba izvršiti je specificiran u standardu [1]. Razmatrani su svi tipovi kvara (tropolni, jednopolni i dvopolni sa i bez spoja sa zemljom). Za oba transformatora, za sve navedene topologije mreže (definisane stanjem prekidača na slici 4, kao i slikom 5) i sve tipove kvara određene su struje kroz sve namotaje transformatora. Na osnovu rezultata su definisane kritične vrednosti struja kvara, koje predstavljaju ulazni podatak za proračune i proveru mehaničke izdržljivosti u procesu projektovanja transformatora.

## 2 TEORIJSKE OSNOVE ODREĐIVANJA STRUJA KRATKOG SPOJA

Teorijska osnova za određivanje struje kratkog spoja je primena ekvivalentnog Tevenenovog generatora na mestu kvara. Napon ekvivalentnog Tevenenovog generatora ( $E_{Th}$ ) je jednak naponu između tačaka na kojima se izračunava struja kvara u trenutku neposredno pre nastanka kvara. Impedansa ekvivalentnog Tevenenovog generatora ( $Z_{Th}$ ) je jednaka ulaznoj impedansi između tačaka u kojima nastaje kratak spoj, pri čemu se svi naponski izvori (generatori i priključci napojnih mreža) kratko spajaju. Impedansa mreže obuhvata impedanse generatora, transformatora, napojnih mreža, energetskih vodova i, od potrošača električne energije, sinhrona i asinhrona motore. Određivanje impedanse elemenata vrši se na osnovu njihovih kataloških podataka, ili podataka koji se dobijaju od proizvođača, a koje on određuje ili proračunski ili na osnovu rezultata merenja u ispitnoj stanici [2].

Pri pisanju rada metoda za proračun struja kratkog spoja prezentovana je korišćenjem zamenskih električnih šema, bez formula za određivanje parametara elemenata šema, jednačina koje opisuju šeme, kao i bez objašnjavanja načina kako se te jednačine rešavaju. Razlog za ovakav pristup je taj što te jednačine predstavljaju elementarnu stvar u elektroenergetici i opisane su čak i u IEC standardima. Rešavanje jednačina je vršeno uz pomoć računara, kao što je i uobičajeno na aktuelnom nivou razvoja inženjerske prakse.

Jednostavniji slučaj primene Tevenenove teoreme se ima pri trofaznim kratkim spojevima u simetričnim trofaznim mrežama. Tada se može primeniti jednostavan impedansni model, u kome je svaka od komponenti u mreži predstavljena jednom impedansom.

Matematički model postaje složeniji u slučaju nesimetričnih kratkih spojeva (jedenpolnih i dvopolnih). U tom slučaju se koristi teorija simetričnih komponenti, koja sistem nesimetričnih napona i struja transformiše u tri sistema (direktni, inverzni i nulti), određuje raspodele struja i napona u njima, a zatim se iz njih određuju struje i naponi u svakoj od faza trofaznog sistema. Osnove teorije simetričnih komponenti i primeri njene primene se mogu naći u [3].

Jedna od formi primene Tevenenove teoreme i teorije simetričnih komponenti je preko zamenskih električnih šema. Ovaj pristup je pogodan za praktičnu primenu i primenjen je u analizama u ovom radu. Način povezivanja zamenskih šema, formiranih u direktnom (d), inverznom (i) i nultom (0) sistemu, za različite tipove kratkog spoja, proističe iz teorije simetričnih komponenti i može se naći u [3].

Jedan od ključnih elemenata pri formiranju zamenskih šema je sprega transformatora i način uzemljenja neutralne tačke. Njihov uticaj se ispoljava kroz zamensku šemu u (0) sistemu.

Razvoj softverskog alata je bio motivisan potrebom da se izvrši provera dva transformatora snage 68 MVA koji će se koristiti za napajanje sopstvene potrošnje u termoelektrani. Određivanje struja kvara za sve opcije povezivanja transformatora na mrežu bez korišćenja softverskog alata je bilo apsurdno, zbog zametnih izračunavanja i mogućnosti greške. Sa druge strane, korišćenje postojećih komercijalnih softvera otvara pitanje troškova za njihovu nabavku. Pored toga, kod komercijalnog softvera po pravilu postoje ograničenja (na primer, struje kratkog spoja se računaju samo u linijskim provodnicima, ali ne i u namotajima transformatora). Ovakva ograničenja je teško prevazići, jer kod u komercijalnom softveru po pravilu nije otvoren. Imajući navedeno u vidu, kao i ograničen obim rada, usvojen je koncept izlaganja ključnih elemenata modela. U radu su prikazani rezultati proračuna za veliki broj različitih situacija, pri čemu su specificirani ulazni podaci. Ovo omogućava inženjerima da sagledaju uticaj pojedinačnih relevantnih parametara sistema i opreme, ali i da mogu da uporede rezultate sa rezultatima koji se dobijaju primenom nekog drugog softvera.

## 3 KARAKTERISTIKE TRANSFORMATORA

Osnovne karakteristike dva analizirana transformatora su prikazane u tabeli 1. Podaci dobijeni tokom prijemnih fabričkih ispitivanja ovih transformatora prikazani su u tabeli 2, izmereni pri srednjoj poziciji regulacione

sklopke. Prema ugovoru, primopredajnim ispitivanjima u fabričkoj ispitnoj stanici je vršena provera specificiranih karakteristika, u skladu sa odredbama standarda IEC 60076-1 iz 2011. godine [4], tačka 11.4.

Tabela 1 – Karakteristike analiziranih transformatora

Sprega	Transformator 1			Transformator 2		
	Dd0d0			YNd5d5		
	Namotaj 1	Namotaj 2	Namotaj 3	Namotaj 1	Namotaj 2	Namotaj 3
Snaga (MVA)	68	40	40	68	40	40
Napon (kV)	22	6,6	6,6	110	6,6	6,6

Tabela 2 – Rezultati fabričkog ispitivanja transformatora

Napajana / kratko spojena strana (kV)	Transformator 1			Transformator 2		
	22/obe 6,6	22/6,6	6,6/6,6	110/obe 6,6	110/6,6	6,6/6,6
Napon (V)	1407,3	1513,0	859,3	7513,4	8774,6	907,4
Struja (A)	908,6	530,4	1795,8	188,6	122,57	199506
Snaga (kW) pri 30°C	58,53	45,73	58,54	57,77	53,69	66,63

Rezultat merenja nulte impedanse transformatora 2 (prema IEC 60076-1 iz 2011. godine [4], tačka 11.6., napon je priključen na tri paralelno vezana namotaja strane 110 kV, koja je u radu na mreži u sprezi YN): struja 128,5 A, napon 879,0 V, impedansa 20,5  $\Omega$ .

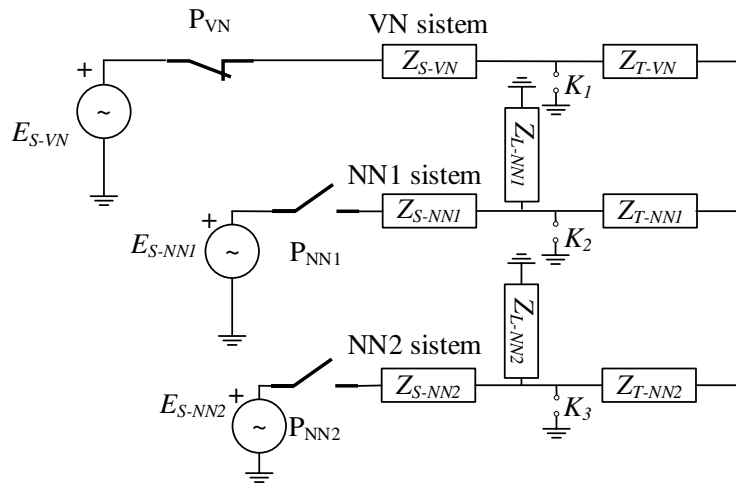
#### 4 MODEL AKTIVNIH MREŽA

Prema [1], ekvivalentna Tevenenova impedansa kojom se predstavlja mreža određuje se na osnovu snage kratkog spoja na mestu priključenja na mrežu. Generalno, u zavisnosti od vrednosti struje koju treba izračunati (subtranzijentna, tranzijentna ili ustaljena), koristi se odgovarajuća Tevenenova impedansa mreže, određena iz odgovarajuće snage kratkog spoja na mestu priključka. To važi za svaki od sistema (d), (i) i (0). Standard [1] daje preporučene vrednosti snage kratkog spoja (d) i (i) sistema u mrežama različitih naponskih nivoa ( $U$ ), koje se mogu primeniti u slučaju da ne postoji podatak o snazi kratkog spoja na mestu priključka,  $S$ . Standard [1] ne specificira eksplicitno da li je kvar blizu ili daleko od generatora. Imajući u vidu da se daje jedna vrednost snage kratkog spoja mreže, implicitno se podrazumeva da je kvar daleko od generatora. Na osnovu podataka iz [1], u proračunima za određivanje (d) i (i) impedanse korišćene su sledeće vrednosti: za naponske nivoe 22 kV i 6,6 kV, 500 MVA, za naponski nivo 110 kV 15.000 MVA i za naponski nivo 400 kV 40.000 MVA. Vrednost (0) impedanse mreže je trostruko veća od (d) i (i) impedansi. Pored navedenih podataka, u jednoj varijanti će se analizirati i struje kratkog spoja za slučaj da se transformator 22 kV koristi za napajanje opreme u elektrani, kada su sabirnice 22 kV povezane na generator (naznačene snage 412 MVA, 22 kV, subtranzijentne reaktanse 16,95%, inverzne reaktanse 16,21% i nulte reaktanse 7,83%). Na iste sabirnice povezan je i transformator sprege YNd5, 410/22 kV, naznačene snage 420 MVA, za koji su u ogledu kratkog spoja (napajanje sa VN strane, temperatura 25°C, središnja pozicija regulacione sklopke) izmerene sledeće vrednosti: napon 24.714 V, struja 301,04 A, gubici 164,6 kW.

#### 5 ZAMENSKÉ ŠEME U NORMALNOM POGONU I PRI KRATKIM SPOJEVIMA

##### 5.1 Normalan simetrični rad

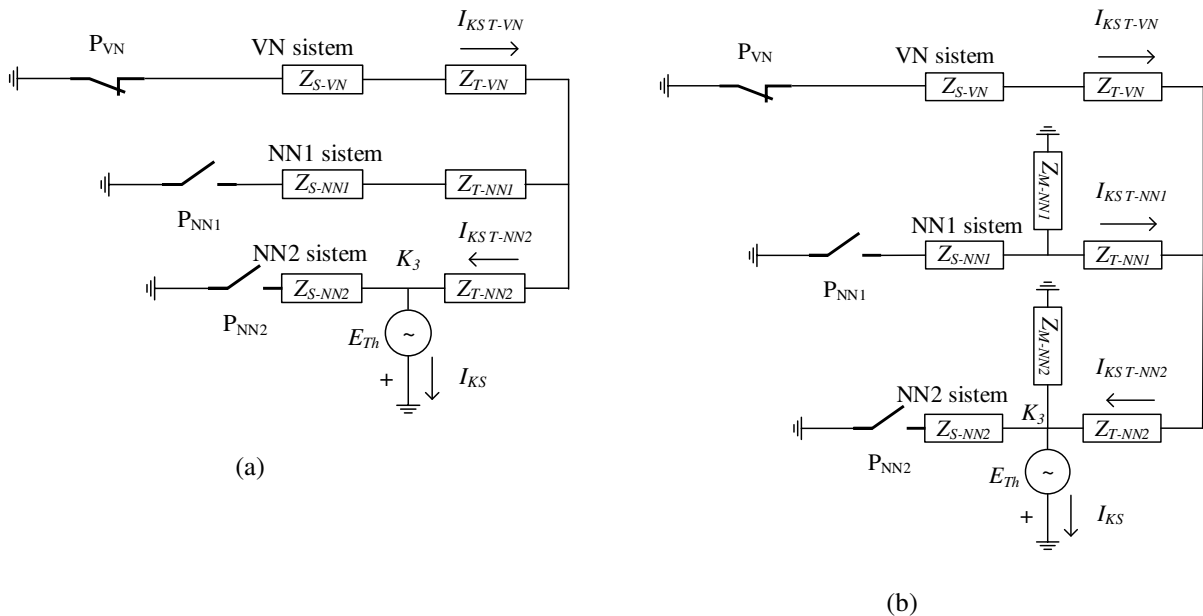
Na slici 1 je prikazana ekvivalentna šema tronamotajnog transformatora u normalnom simetričnom trofaznom pogonu, na kojoj su pored rednih impedansi transformatora ( $Z_T$ ), određenih iz rezultata ogleđa kratkog spoja, prikazane i impedanse sistema – impedansa ekvivalentnog Tevenenovog generatora mreže ( $Z_S$ ) i impedanse opterećenja ( $Z_L$ ). Položajem prekidača se definiše koliko je mreža aktivno, odnosno koliko mreža sadrži izvore energije. U slučaju prikazanom na slici aktivna je samo jedna (visokonaponska – VN) mreža.

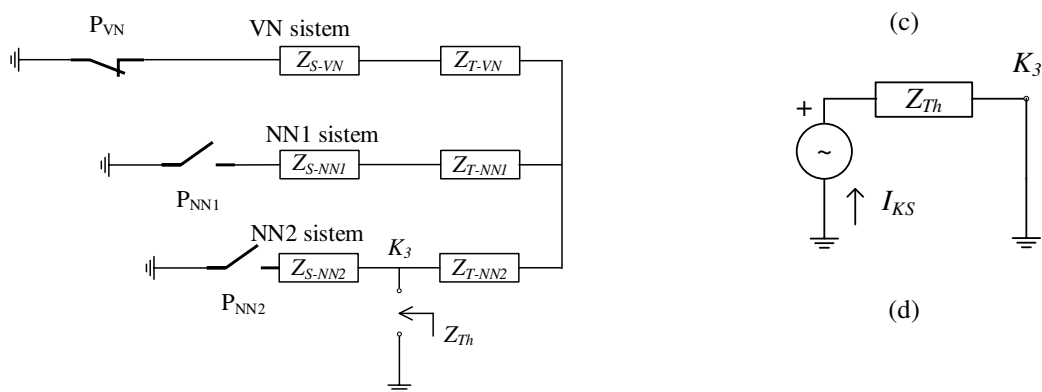


Slika 1 – Ekvivalentna šema sistema sa tronamotajnim transformatorom u normalnom radu

### 5.2 Slučaj kratkog spoja i uvođenje ekvivalentnog Tevenenog generatora na mestu kvara

Na slici 2 su prikazane različite šeme u procesu formiranja Tevenenog generatora na mestu kvara, pomenutog na početku poglavlja 2. Iz šeme sa slike 1 se izostavljaju impedanse opterećenja, osim impedanse motora 6 kV. Slike 2 a) i 2 c) se odnose na slučaj da nema značajnog prisustva motora u mreži 6 kV, dok se slika 2 b) odnosi na slučaj da postoji značajno prisustvo motora 6 kV. Impedansa kojom su prikazani motori se određuje kao paralelna veza subtranzijentnih impedansi motora, pri čemu je u slučaju asinhronog motora subtranzijentna impedansa približno jednaka odnosu napona napajanja i struje ukošenog rotora (polazne struje) motora.

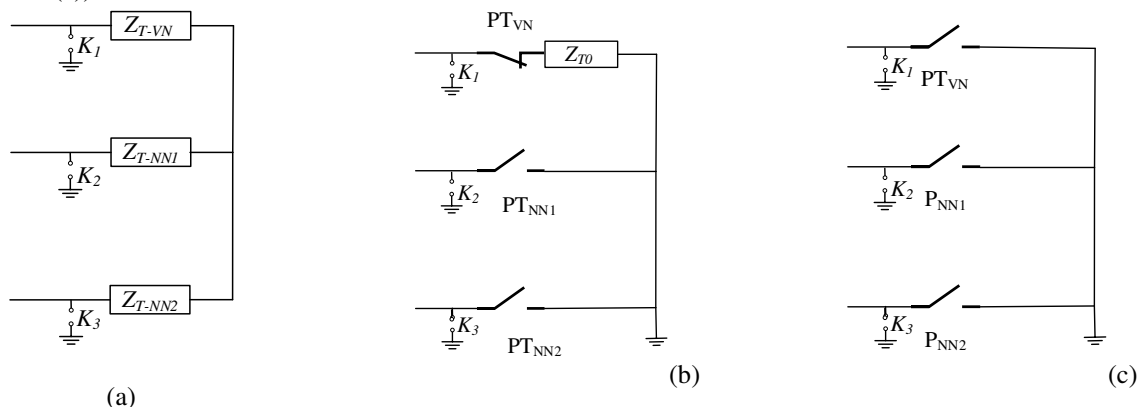




Slika 2 – Ekvivalentna šema (međukorak uvođenja naponskog Tevenenovog generatora u slučajevima da ne postoji (a) / postoji (b) značajan uticaj motora 6kV, šema za određivanje ekvivalentnog Tevenenovog generatora (c) kada uticaj motora 6kV nije značajan i (d) ekvivalentni Tevenenov generator (d))

### 5.3 Zamenska šema tronamotajnog transformatora

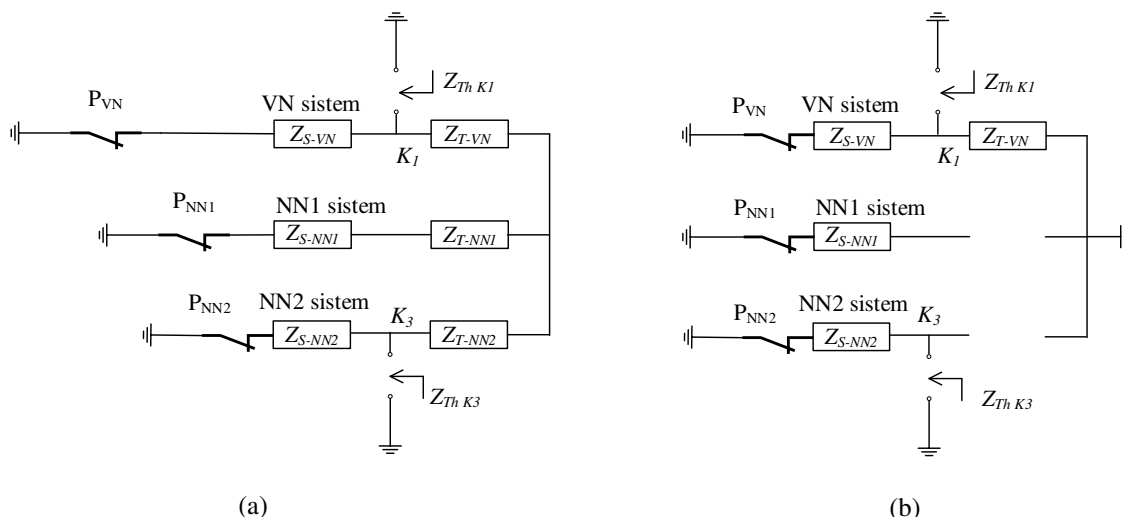
Zamenska šema transformatora u (0) sistemu se razlikuje od zamenske šeme u (d) i (i) sistemu, koja je korišćena na slikama 2 a) – c). Prema [3], zamenske šeme transformatora imaju izgled prikazan na slici 3: u (d) i (i) sistemu (slika 3 (a)) (one su iste za oba transformatora), dok se one u (0) sistemu razlikuju kod ova dva transformatora (za transformator YNd5d5 110/6,6/6,6 kV na slici 3 (b), a za transformator Dd0d0 22/6,6/6,6 kV na slici 3 (c)).



Slika 3 – Ekvivalentna šema transformatora u (d) i (i) sistemu (slika (a)) i u (0) sistemu za transformator YNd5d5 (slika (b)) i Dd0d0 (slika (c))

### 5.4 Elementi za Tevenenov generator pri postojanju tri aktivne mreže

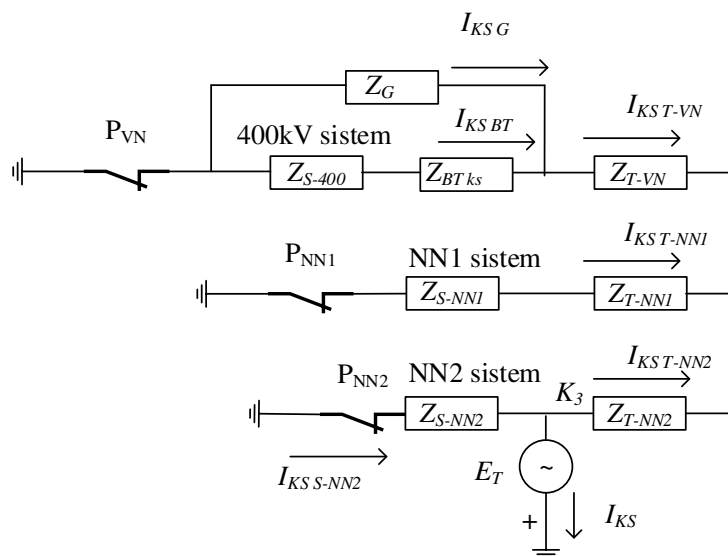
Na slici 4 je prikazan primer šema za određivanje impedansi ekvivalentnih Tevenenovih generatora za slučaj transformatora YNd5d5, 110/6,6/6,6 kV, 68/40/40 MVA, pri tri aktivne mreže, za mesta kvara K1 i K3. U slučaju posmatranog transformatora NN1 i NN2 namotaji su identični, pa su vrednosti na mestima kvara K2 i K3 identične.



Slika 4 – Ekvivalentna šema za određivanje impedansi ekvivalentnih Tevenenovih generatora u (d) i (i) sistemu (slika (a)) i u (0) sistemu za transformator sprege YNd5d5 (slika (b))

### 5.5 Situacija pri priključenju transformatora na generatorske sabirnice u elektrani

Na slici 5 je prikazana šema prema kojoj se određuje struja kvara u slučaju stvarnog načina priključenja transformatora 22/6,6/6,6 kV: strana 22 kV se priključuje na sabirnice 22 kV generatora u elektrani (ove sabirnice se napajaju sa generatora (snaga 420 MVA, subtranzijentna reaktansa 16,95 %) i sa sekundara generatorskog transformatora (snaga 420 MVA, napon kratkog spoja 11,84 %).

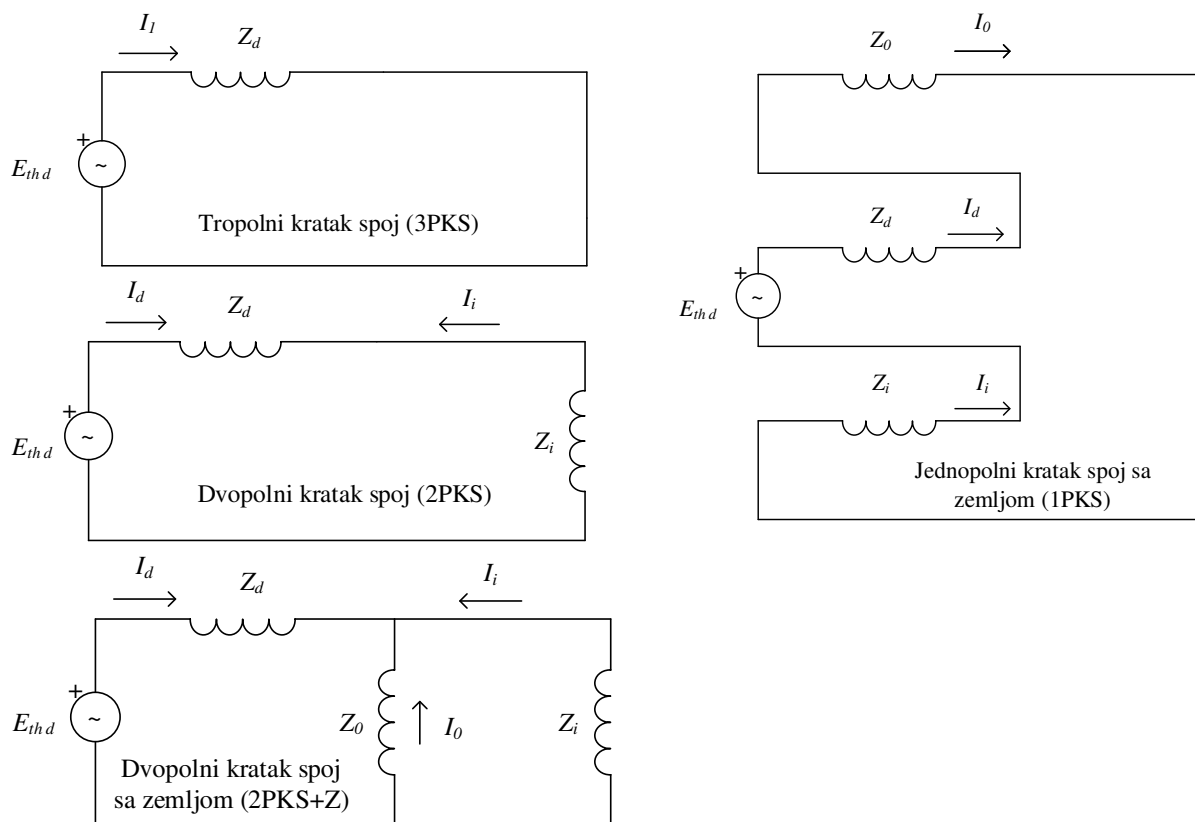


Slika 5 – Međukorak uvođenja naponskog Tevenenovog generatora za slučaj transformatora 22/6/6 kV priključenog u elektrani na generatorske sabirnice 22 kV

## 6 ODREĐIVANJE STRUJA PRI RAZLIČITIM TIPOVIMA KRATKOG SPOJA

Šeme prikazane na slici 6 se formiraju na osnovu teorije simetričnih komponenti [3], [5], [6]. Na šemama se povezuju ekvivalentni Tevenenovi generatori u (d), (i) i (0) sistemu, diskutovani u prethodnom poglavlju. Tevenenov generator sadrži idealni naponski izvor i ekvivalentnu impedansu samo u (d) sistemu, dok se u (i) i (0) svodi samo na ekvivalentnu Tevenenovu impedansu. Rešavanjem šema prikazanih na slici 6 određuju se (d), (i), (0) komponente struje kratkog spoja na mestu kvara, koje protiče kroz Tevenenove generatore u (d), (i) i (0) sistemu. U slučaju da je ekvivalentna Tevenenova impedansa za (0) sistem beskonačna, na slici 6 se raskida grana koja sadrži Z<sub>0</sub>. Korišćenjem transformacije iz (d), (i), (0) sistema u (a), (b), (c) sistem, određuju se struje kroz faze (a), (b), (c) na mestu kratkog spoja. Polazeći od (d), (i), (0) vrednosti struja na mestu kvara, korišćenjem šema poput onih na slikama 2 (a), 2 (b) i 5, mogu se odrediti vrednosti (d), (i) i (0) komponenti

struje kroz svaku granu mreže. Imajući u vidu da svaki od namotaja tronamotajnog transformatora predstavlja posebnu granu u mreži, na napred opisani način se mogu dobiti i struje kroz svaki od namotaja transformatora. Na osnovu njih, korišćenjem transformacije iz (d), (i), (0) sistema u trofazni (a), (b), (c) sistem [3], određuju se struje kroz faze (a), (b), (c) kroz svaku granu mreže, odnosno kroz svaki namotaj transformatora.



Slika 6 – Povezivanje ekvivalentnih Thevenenovih generatora pri različitim tipovima kratkog spoja i određivanje (d), (i) i (0) komponenti struja na mestu kvara

## 7 REZULTATI PRORAČUNA

### 7.1 Opšte

Pri formiranju prethodno navedenih šema korišćene su impedanse koja se vide sa strane priključaka (odnos faznog napona i linijske struje).

Sve impedanse su svodene na naponski nivo na mestu kvara, tako što su množene sa odnosom kvadrata napona na mestu kvara i napona u mreži u kojoj se nalazi impedansa.

Proračuni su vršeni u sistemu jediničnih veličina, pri čemu je bazna impedansa svodjenja definisana kao odnos kvadrata linijskog napona na mestu kvara i naznačene snage na primaru transformatora (ona, kod oba transformatora, iznosi 68 MVA). Elektromotorna sila Thevenenovog generatora je postavljena na vrednost 1,1 relativne jedinice, u skladu sa naponskim faktorom 1,1 [2] koji se koristi za određivanje maksimalnih vrednosti struja kratkog spoja. Struje u amperima su određivane množenjem struja izračunatih u relativnim jedinicama i bazne struje, koja je jednaka  $68 \text{ MVA} / \sqrt{3} U_n$ , gde je  $U_n$  za VN stranu 22 kV, za transformator 1, odnosno 110 kV za transformator 2, odnosno 6,6 kV za niskonaponsku (NN) stranu.

U korišćenom pristupu preko impedansi određenih kao odnos faznog napona i linijske struje potrebno je nakon prethodno opisanog izračunavanja struja u linijskim provodnicima izvršiti dodatni korak izračunavanja struja u namotajima. Ukoliko je sprega transformatora na strani u kojoj su određene linijske struje ka priključku transformatora zvezda, struje kroz namotaje su jednake linijskim strujama. Ukoliko je sprega trougao, vrednosti struja u namotajima trougla ( $I_{aw}$ ,  $I_{bw}$ ,  $I_{cw}$ ) se dobijaju iz vrednosti struja u d, i i 0 sistemima za linijske struje ( $I_d$ ,  $I_i$  i  $I_0$ ), na sledeći način:



$$I_{dw} = \frac{I_d}{\sqrt{3}} e^{j 30^\circ} \quad (1)$$

$$I_{iw} = \frac{I_i}{\sqrt{3}} e^{j -30^\circ} \quad (2)$$

$$I_{0w} = I_0 \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} I_{aw} \\ I_{bw} \\ I_{cw} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & e^{j 240^\circ} & e^{j 120^\circ} \\ 1 & e^{j 120^\circ} & e^{j 240^\circ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{0w} \\ I_{iw} \\ I_{dw} \end{bmatrix} \quad (4)$$

## 7.2 Maksimalne naizmenične komponente struje kvara u namotajima tronamotajnih transformatora

U tabeli 3 su prikazane najveće vrednosti struja koje se javljaju pri jednom od kvarova (3PKS, 1PKS, 2PKS, 2PKS+Z) kroz VN i NN namotaje tronamotajnih transformatora (isti su namotaji na NN1 i NN2 strani), za slučajeve jedne, dve i tri aktivne mreže (slika 1), pri čemu je VN mreža svakako aktivna. \* označava proračun u kome je za transformator 1 za mrežu 22 kV korišćena tipska snaga kratkog spoja 500 MVA, a \*\* proračun u kome je korišćena snaga kratkog spoja koja odgovara situaciji veze generatora i priključka na mrežu 400 kV preko transformatora 410/22 kV (slika 5).

Tabela 3 – Maksimalne struje kratkog spoja (u amperima) kroz namotaje u zavisnosti od topologije mreže

Sprega		Transformator 1 Dd0d0 (22/6,6/6,6 kV)		Transformator 2 YNd5d5 (110/6,6/6,6 kV)	
Napajanje	Mesto kvara	Namotaj VN	Namotaj NN	Namotaj VN	Namotaj NN
VN*	NN1	3097 <sup>3, 2, 2E</sup>	10322 <sup>3, 2, 2E</sup>	1674 <sup>3</sup>	16109 <sup>3, 2, 2E</sup>
VN**	NN1	4697 <sup>3</sup>	15656 <sup>3</sup>		
VN+NN1	NN1	3097 <sup>3, 2, 2E</sup>	10322 <sup>3, 2, 2E</sup>	1674 <sup>3</sup>	16109 <sup>3, 2, 2E</sup>
VN+NN1	VN	3097 <sup>3, 2, 2E</sup>	10322 <sup>3, 2, 2E</sup>	1073 <sup>3</sup>	11833 <sup>2E</sup>
VN+NN1	NN2	3330 <sup>3, 2, 2E</sup>	11921 <sup>3, 2, 2E</sup>	1570 <sup>3</sup>	m <sup>1</sup> 16231 <sup>3,2, 2E</sup>
VN+NN1+NN2*	VN	m <sup>1</sup> 5857 <sup>3, 2, 2E</sup>	9762 <sup>3, 2, 2E</sup>	m <sup>2</sup> 2654 <sup>1</sup>	8575 <sup>1</sup>
VN+NN1+NN2*	NN1	2458 <sup>3, 2, 2E</sup>	11921 <sup>3, 2, 2E</sup>	1720 <sup>2E</sup>	16231 <sup>3,2, 2E</sup>
VN+NN1+NN2**	VN	5857 <sup>3, 2, 2E</sup>	9761 <sup>3, 2, 2E</sup>	/	/
VN+NN1+NN2**	NN1	3265 <sup>3, 2, 2E</sup>	m <sup>2</sup> 15838 <sup>3, 2, 2E</sup>	/	/

Legenda: <sup>3</sup> 3PKS, <sup>1</sup> 1PKS, <sup>2</sup> 2PKS, <sup>2E</sup> 2PKS+Z

U tabeli 4 je dato još nekoliko vrednosti faznih struja kratkog spoja, i to u situacijama pri kojima se imaju najveće struje u VN i NN namotajima. Vrednosti su označene sa <sup>m</sup> u tabeli 3.

Tabela 4 – Raspodela struja (a) pri najvećim strujama u namotajima VN i NN koje se javljaju pri kvaru na transformatoru 1

	$I_{KS}$	$I_{KST-VN}$	$I_{KST-NN1}$	$I_{KST-NN2}$	$I_{KSS-VN}$	$I_{KSS-NN1}$	$I_{KSS-NN2}$
Transformator 1 <sup>m1, 3</sup>	24578	10145	16908	16908	14434	16908	16908
Transformator 1 <sup>m1, 2</sup>	21286	8786	14643	14643	12500	14643	14643
Transformator 1 <sup>m1, 2E</sup>	21538	8797	14662	14662	12817	14662	14662
Transformator 1 <sup>m2, 3</sup>	75545	5656	27432	8579	5656	48113	8579
Transformator 1 <sup>m2, 2</sup>	65423	4898	23757	7430	4898	41667	7430
Transformator 1 <sup>m2, 2E</sup>	66321	4905	23793	7441	4906	42749	7441
Transformator 2 <sup>m1, 3</sup>	28114	1571	28114	1935	1571	/	1935
Transformator 2 <sup>m1, 2</sup>	24347	1360	24345	1676	1360	/	1676
Transformator 2 <sup>m1, 2E</sup>	24347	1360	24347	1676	1360	/	1676
Transformator 2 <sup>m2, 1</sup>	89273	2029	16908	16908	87244	16908	16908

## 8 ZAKLJUČAK

Rad prikazuje način i rezultate proračuna naizmenične komponente struja kratkog spoja za niz različitih situacija (topologije mreža i tipova kvara) na krajevima tronamotajnih transformatora različitih sprega (YNdd i Ddd) i različitih snaga VN namotaja (68 MVA) i svakog od dva NN namotaja (40 MVA). Metodologija proračuna je prikazana u kompaktnoj formi, koristeći ekvivalentne šeme, čijim se rešavanjem dolazi do struja kratkog spoja na mestu kvara i raspodele struja po granama i kroz svaki od namotaja transformatora. Smatrajući da način određivanja impedansi pojedinih elemenata mreže predstavlja elementarno znanje, on nije objašnjavao u radu.

Primenjujući metodologiju prikazanu u radu razvijena je odgovarajuća softverska podrška. Motivacija za prikazani rad je bilo određivanje maksimalnih struja kratkog spoja koje se mogu javiti kroz namotaje transformatora, a u cilju provere mehaničke i termičke izdržljivosti transformatora pri kratkom spoju. Komercijalni softveri, kako zbog materijalnih troškova njihove upotrebe, tako i zbog nemogućnosti proširenja takvih programa da se dobiju vrednosti struja kroz svaki od namotaja transformatora pri različitim tipovima kvara, nisu upotrebljavani. Korišćeni su podaci o realnim transformatorima, za koje su bili dostupni rezultati fabričkih ispitivanja. U radu su prikazani svi ulazni podaci potrebni za proračun, što omogućava poređenje rezultata proračuna sa rezultatima dobijenim nekim drugim softverom. Jedan od ciljeva rada je i da se za konkretnu situaciju transformatora 110 kV (sprege YNd5d5), odnosno 22 kV (sprege Dd0d0), snage visokonaponskog namotaja 68 MVA i dva niskonaponska (6,6 kV) namotaja 40 MVA, sagledaju promene struje kvara u zavisnosti od broja aktivnih mreža na koje je priključen transformator, kao i od tipa kvara. S obzirom da su analizirani transformatori postavljeni u blizini generatora i blok transformatora (snage 420 MVA), u konkretnom slučaju je bilo od interesa sagledati i vrednosti struja kratkog spoja i u ovoj situaciji, odnosno razliku u odnosu na vrednosti koje bi se imale da su transformatori postavljeni u mreži, na mestu udaljenom od generatora.

## LITERATURA

- [1] IEC 60076-5, "Power transformers - Part 5: Ability to withstand short circuit", Edition 3.0, 2006-02-07.
- [2] IEC 60909-1, "Short-circuit currents in three-phase a.c. systems - Part 0: Calculation of currents", Edition 2.0, 2016-01-28.
- [3] J. Duncan Glover, Thomas Overbye, Mulukutla S. Sarma, 2015, "Power System Analysis and Design", SI Edition 6th Edition, Cengage Learning, ISBN: 9781305636187
- [4] IEC 60076-1, "Power transformers - Part 1: General", Edition 3.0, 2011-04-20.
- [5] J. Nahman, V. Mijailović, "Razvodna postrojenja", Akademska misao, Beograd, 2015.
- [6] N. Rajaković, "Analiza elektroenergetskih sistema I", Elektrotehnički fakultet, Akademska misao, Beograd, 2002.