

POUZDANOST KOMPONENTI I SUSTAVA UZEMLJENJA GRADSKE TS 10(20)/0.4 kV

Mr. sc. Pavle F i l k o, Osijek

UDK 621.317.1:621.316.1
IZVORNI ZNANSTVENI ČLANAK

Rad prikazuje analizu pouzdanosti komponenti i sustava uzemljivača gradske TS 10(20)/0.4 kV. Cilj je pokazati vrijednosti pokazatelja pouzdanosti pojedinih komponenti uzemljenja i sustava uzemljenja u cjelini. Podaci o kvarovima su prikupljeni i analizirani na stvarnoj mreži TS 10(20)/0.4 kV grada Osijeka.

Ključne riječi: sustav uzemljenja gradske TS 10(20)/0.4 kV, pouzdanost komponenti i sustava uzemljivača, izračun veličina pojedinih pokazatelja pouzdanosti uzemljenja.

1. UVOD

Sustav uzemljenja TS 10(20)/0.4 kV, pogotovo u gradskim sredinama, je tema o kojoj se, na prvi pogled, sve reklo. Takvim, vjerujem nenamjerno nemarnim odnosom, smanjeno je daljnje istraživanje uzemljenja, uzemljivačkih sustava i njegovih komponenti. Ovim radom pokušavamo drugim pristupom otvoriti novi pogled na uobičajene metode određivanja toga važnog dijela elektroenergetskog sustava. Uzemljivačima TS 10(20)/0.4 kV se od projektnog zadatka preko projektiranja, izvođenja pa do održavanja u pogonu ne pridaje dovoljna pozornost, možda i zato jer postoji uvjerenje da se o njima sve zna. Stoga pogledajmo što o uzemljivačima gradskih TS može reći pouzdanost, sve prisutnija disciplina u analizi svekolikog elektroenergetskog sustava.

Izvedba sustava uzemljenja gradske TS 10(20)/0.4 kV ovisi o načinu uzemljenja neutralne točke napojne TS (110/10(20) kV ili 35/10(20) kV) tj. o ograničenoj struji jednopolnog kratkog spoja. Za naš slučaj to je struja 300 A. Takav sustav uzemljenja gradskih TS 10(20)/0.4 kV općenito možemo zamisliti kao trokut (slika 1). U njemu su stranice pojedini uzemljivači, tj. osnovni uzemljivač same TS, dakle radni i zaštitni uzemljivač, zatim doprinos uzemljenju sustava TS preko plašteva visokonaponskih napojnih kabela te treća stranica – doprinos uzemljenju sustava TS putem nul-vodiča i/ili plašteva niskonaponskih kabela ili izvoda kojima iznosimo električnu energiju iz TS.

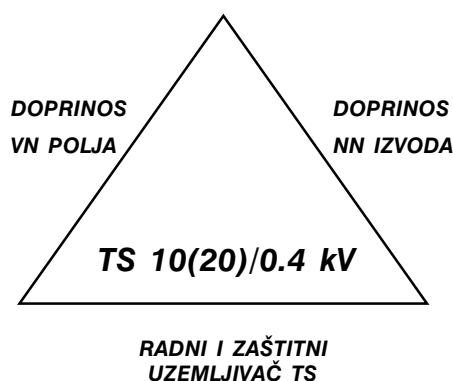
Prikupljanje podataka o uzemljivačima TS 10(20)/0.4 kV jest ponajveći problem jer tako sistematiziranih podataka nema. Stoga je početna zadaća bila da se prikupe, sistematizira i izradi baza podataka o uzemljenju

i kvarovima na uzemljenju preko 200 TS u gradu Osijeku. Potom je izvršena analiza pouzdanosti dijelova uzemljivačkog sustava i sustava u cjelini.

2. O POUZDANOSTI

Pojam pouzdanosti obuhvaća opis svih karakterističnih sposobnosti nekog sustava, iskazan najčešće matematičkom vjerojatnošću, da konkretan sustav radi na zadovoljavajući način uz zadane radne uvjete u predviđenom vremenu. To je dakle vjerojatnost da se sustav ponaša prema očekivanju. O pouzdanosti sustava zaključujemo preko pouzdanosti komponentata.

Skup komponentata povezanih u funkcionalnu cjelinu s točno određenom svrhom jest **sustav**. U našem slučaju uzemljivački sustav TS je skup njenih komponenti, tj. uzemljivača same TS, te spojeva visokonaponskih i niskonaponskih vodova koji doprinose smanjenju otpora rasprostiranja uzemljenja cijelog sustava. Dakle,



Slika 1. Sustav uzemljenja TS 10(20)/0.4 kV

komponenta je cjelina čija se pouzdanost ne može određivati rastavljajući je u dijelove. Rad na zadovoljavajući način jest rad u inženjerskim okvirima u kojima se promatra sustav.

Pouzdanost sustava se u potpunosti određuje s dva osnovna pojma, a to su: **statička pouzdanost** (ili adekvatnost, dostatnost) i **dinamička pouzdanost** (ili sigurnost). Pod pojmom statičke pouzdanosti se podrazumijeva mogućnost pokrivanja ukupnih zahtjeva na sustav vodeći računa o planiranim i neplaniranim prekidima pogona (kvarovima) komponenata sustava, kao i pogonskim ograničenjima sustava i njegovih komponenata. Sustav se u osnovi promatra stacionarno, a analiza obuhvaća sve moguće poremećaje. Pod pojmom dinamičke pouzdanosti se podrazumijeva i sposobnost sustava da ispravno radi i poslije iznenadnih poremećaja nastalih kao posljedica kvarova i ispada komponenata sustava. Dakle, sustav se promatra dinamički, a analizom su obuhvaćeni poremećaji i prilike u sustavu neposredno nakon pojave poremećaja.

Ovakva određenja pouzdanosti podrazumijevaju da je rad sustava i njegovih komponenata uspješan ako tijekom zadanog vremena nisu isпали iz pogona zbog kvarova ili nekih drugih poremećaja. Dakle, tu nije uključena mogućnost popravka i nastavljanja pogona nakon kvara. Zbog toga se promatraju dodatne mjere pouzdanosti koje uključuju sposobnost komponenata i sustava da se nakon kvara poprave i vrate u pogon. Najvažniji pokazatelj pouzdanosti za takav slučaj je **raspoloživost** koja kod popravljivih komponenata i sustava znači dio vremena tijekom dužeg razdoblja u kojem su te komponente ili sustav spremni za pogon ili su u pogonu. Radi se o vjerojatnosti da se komponente ili sustav u slučajno odabranom trenutku tijekom dužeg vremenskog razdoblja u budućnosti ne nalaze u stanju kvara. Različiti pokazatelji pouzdanosti pri tome, kao karakteristike iskazane najčešće vjerojatnošću, nužno pripadaju bilo komponentama pojedinačno, bilo sustavu u cjelini.

Temeljni pristupi u analizi pouzdanosti sustava su: **analitički pristup** (selektivna analiza kvarova, formiranje matematičkog modela, izračunavanje pokazatelja pouzdanosti za svako stanje posebno) i **simulacijski pristup** (iz poznatih funkcija razdiobe kvarova komponenata određujemo pokazatelje pouzdanosti sustava – metoda Monte Carlo).

Općenito se pouzdanost komponente, tj. vjerojatnost zadovoljavajućeg rada komponente, određuje kao statistička vjerojatnost budući da su kvarovi komponenata slučajni događaji. Tako bismo mogli odrediti i pouzdanost komponente, odnosno vjerojatnost da kroz neko, određeno, razdoblje (vrijeme) komponenta ispravno radi. Pustili bismo komponentu da radi i zabilježili protok vremena do trenutka kvara komponente. Zatim bismo komponentu popravili i ponovili postupak. U golemoj većini slučajeva komponenta će ispravno raditi kroz neko vrijeme koje će se razlikovati od prethodnog. Budući da trajanje tog vremena, vre-

mena do kvara komponente, može teoretski poprimiti bilo koju vrijednost veću od nule i manju od beskonačne, prihvaćamo da je vrijeme do kvara komponente kontinuirana slučajna varijabla. Kada bismo zatim mogli odrediti funkciju razdiobe (distribucije) slučajne varijable τ , koja je vrijeme do kvara komponente, dobili bismo vjerojatnost kvara komponente prije isteka vremena t, tj. **nepouzdanost komponente**:

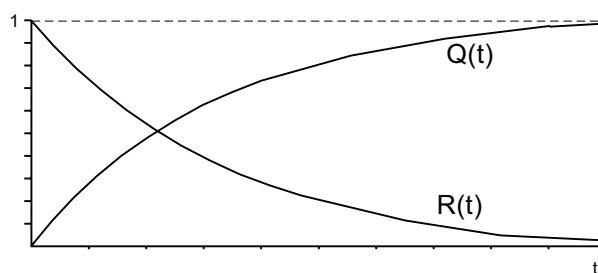
$$Q(t) = P\{\tau \leq t\}$$

Tada bismo mogli odrediti i vjerojatnost ispravnog rada komponente kroz vrijeme t, tj. **pouzdanost komponente** :

$$R(t) = 1 - Q(t) = P\{\tau \geq t\}$$

gdje je τ vrijeme kroz koje komponenta radi ispravno. Logičan je izraz $R(t) + Q(t) = 1$, jer komponenta ili radi unutar vremena t ili se pokvarila prije isteka vremena t.

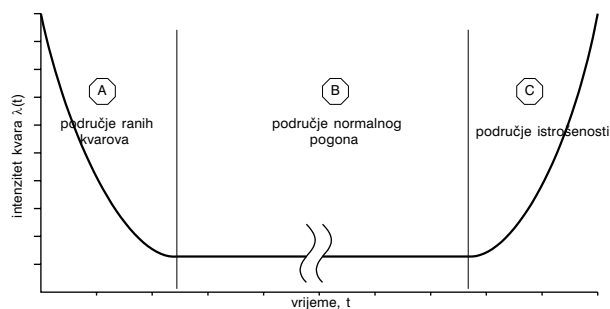
Tipičan je oblik funkcije pouzdanosti pokazan na slici 2. Ona opada monotono od vrijednosti $R(0) = 1$ prema nuli kada vrijeme trajanja rada komponente teži prema beskonačnosti. Obrnuto vrijedi za funkciju nepouzdanosti.



Slika 2. Funkcije pouzdanosti i nepouzdanosti komponente

Pored navedenih, postoje još neke veličine koje karakteriziraju komponentu. To su **intenzitet kvara komponente** $\lambda(t)$ i **srednje vrijeme do kvara** m .

Kako se vidi, a to i sva dostupna literatura iz područja pouzdanosti potvrđuje, u elektroenergetskom sustavu najkorišteniji je eksponencijalni oblik funkcije pouzdanosti i to s konstantnom funkcijom intenziteta kvara. Na sljedećoj slici vidi se oblik te funkcije u odnosu na vrijeme.



Slika 3. Intenzitet kvara komponente

Prikazana krivulja pokazuje tri vremenska područja u kojima se intenzitet kvara komponente (ili sustava) ponaša po bitno drukčijim zakonima. Prvo područje (A) određuje visok intenzitet kvarova koji eksponencijalno pada. To se objašnjava činjenicom kvarova koji nastaju u probnoj fazi uporabe dok se sustav ne uhoda, tj. dok se ne otklone "dječje bolesti". Elektroenergetski sustav čine komponente za koje se s dovoljnom točnošću može uzeti da područje ranih kvarova završava s testiranjima i probnim pogonom, dakle, s prvih nekoliko stotina sati rada, što je zanemarivo u odnosu na višegodišnji pogon (područje B) koji se i godišnje mjeri tisućama sati rada ili pripravnosti za rad. S druge strane, područje istrošenosti (područje C) odgađa se redovitim pregledima, zamjenama, održavanjima i remontima, te nastupa pri samom kraju životnog vijeka koji je u pravilu vrlo dug. Treće područje (C) pokazuje tendenciju eksponencijalnog porasta broja kvarova, a to je posljedica starenja i trošenja komponenti. Zbog svega toga se, sa zadovoljavajućom točnošću, područje promatranja komponenti i sustava ograničava na područje normalne eksploatacije (područje B). Kako je u tom periodu intenzitet kvara konstantan, karakteristične veličine pouzdanosti dane su sljedećim izrazima:

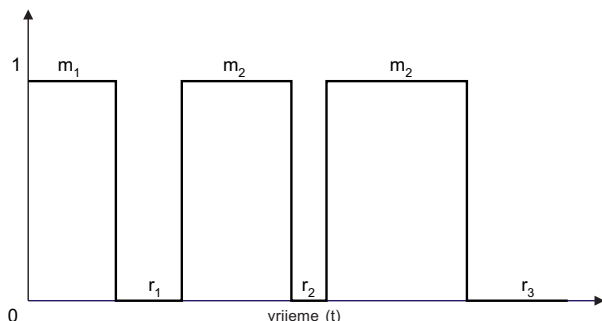
$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda \cdot dt} = e^{-\lambda \cdot t} \quad \text{- pouzdanost}$$

$$q(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad \text{- funkcija gustoće vjerojatnosti kvara}$$

$$Q(t) = 1 - e^{-\lambda \cdot t} \quad \text{- nepouzdanost}$$

$$m = \frac{1}{\lambda} \quad \text{- srednje vrijeme do kvara}$$

Komponenta elektroenergetskog sustava je prava obnovljiva komponenta koja radi ispravno do nastupa kvara. Nakon toga komponenta se isključuje iz pogona i popravljiva ili zamjenjuje novom. Smatra se da je stanje komponente nakon popravka identično stanju prije kvara. Tako se životni vijek komponente produžava i vremenski tijek komponente predstavlja cikličnu funkciju dvaju stanja, rada i popravka. Sljedeća slika pokazuje tijek životnog ciklusa obnovljive komponente.



Slika 4. Funkcija rada komponente

Pretpostavka je kako je vrijeme trajanja ispravnog rada slučajna veličina s poznatom funkcijom razdiobe kao i da je vrijeme trajanja popravka slučajna veličina. Ele-

menti elektroenergetskog sustava spadaju u skupinu obnovljivih komponenata (npr. elementi uzemljivača i dr.) i kod njih se uvodi pojam funkcije raspoloživosti.

Stacionarna raspoloživost $A(t)$ predstavlja matematičku vjerojatnost da će komponenta ili sustav raditi u trenutku promatranja. Na prethodnoj slici prikazana je funkcija rada jedne takve obnovljive komponente. Ističu se periodi rada, prikazani vremenom ispravnog rada m_i , u odnosu na periode kvara prikazanih vremenom popravka r_i . Iz toga slijedi **prosječno (srednje) vrijeme trajanja ispravnog rada** (do kvara) m :

$$m = \frac{\sum_{i=1}^n m_i}{n}$$

Ako promatramo komponentu kroz dulji vremenski period, bit ćemo u mogućnosti odrediti i **prosječno (srednje) vrijeme popravka r** :

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n r_i}{n}$$

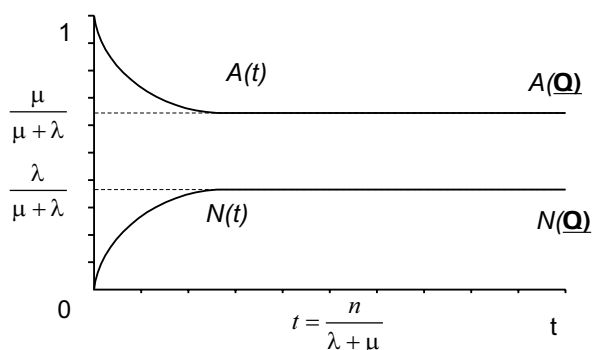
Tijekom životne dobi obnovljive komponente (uzemljivača), razdoblja rada i popravka slučajne su veličine sa svojim funkcijama razdiobe. Na temelju tih funkcija razdiobe mogu se odrediti očekivana (srednja) vremena trajanja rada i popravka koja su jednaka onim u prethodnim izrazima. Literatura [2] daje sljedeći izraz za **stacionarnu raspoloživost komponente**:

$$A = \frac{m}{m+r}$$

Stacionarna neraspoločivost komponente tada je:

$$N = 1 - A = \frac{r}{m+r}$$

Raspoločivost i neraspoločivost komponente imaju svoju konačnu vrijednost kada vrijeme promatranja komponente raste u velike vrijednosti. To se vidi na sljedećoj slici.



Slika 5. Funkcija raspoloživosti i neraspoločivosti komponente

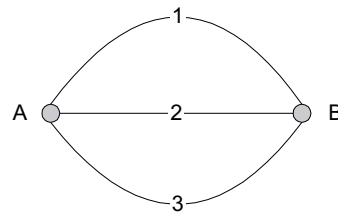
3. MODEL SUSTAVA S TRI KOMPONENTE (UZEMLJENJE TS)

Razmatranja provedena u prethodnom poglavlju, mogu se primijeniti na bilo koji broj neovisnih komponenata, koje su povezane u bilo kakav funkcionalni sus-

tav poznate strukture, čiji se rad u potpunosti može prikazati nizom stanja u prostoru stanja, odnosno modelom stanja i prijelaza između tih stanja. Uz navedeno, još je jedini uvjet da su poznate vrijednosti stacionarne raspoloživosti i nerasploživosti komponenta, ili točnije, stacionarne vjerojatnosti stanja svake od komponenata. Stacionarne vjerojatnosti stanja, raspoloživosti ili nerasploživosti sustava, izvode se direktno iz stacionarnih vjerojatnosti stanja, raspoloživosti i nerasploživosti komponenata, već prema stanjima komponenata, te kombinaciji ili grupi stanja sustava, koja u prostoru stanja znači raspoloživost ili nerasploživost sustava. To znači da se uvijek mora voditi računa o specifičnoj građi sustava i njegovim funkcionalnim karakteristikama, jer je samo tako moguće u prostoru svih mogućih stanja iste isticati i grupirati prema određenim kriterijima, npr. kriterijima uspješnog rada.

Konačno, da prikažemo navedeno, poslužiti ćemo se sustavom uzemljivača gradske KTS 10(20)/0.4 kV, tj. trima komponentama (uzemljivač TS - 1, uzemljivač susjednih TS preko VN kabela - 2, i uzemljivač niskog

napona preko nul-vodiča - 3). Model pouzdanosti sustava je prikazan na sljedećoj slici:



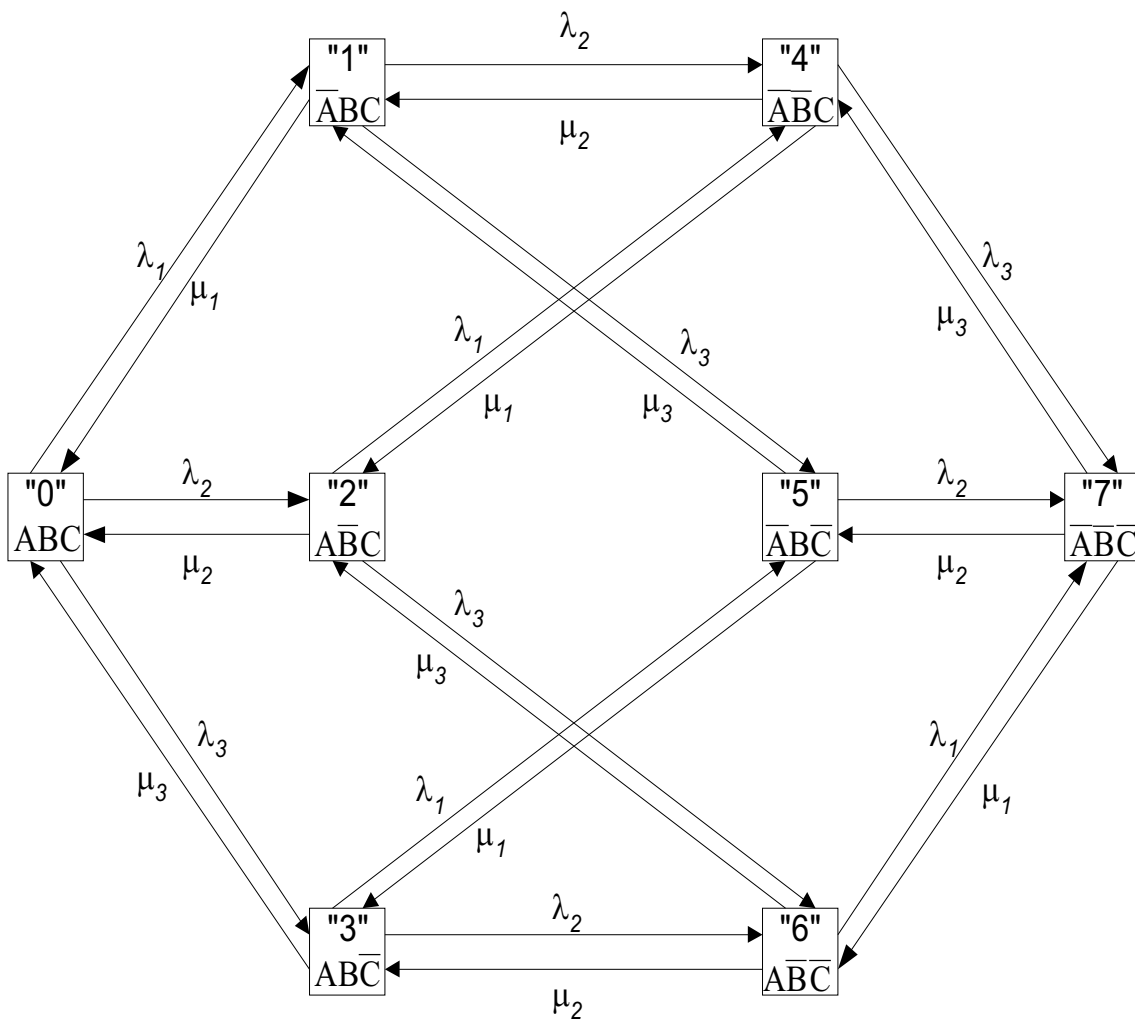
Slika 6. Model sustava uzemljenja TS s tri komponente

Poznate stacionarne vrijednosti raspoloživosti i nerasploživosti komponenata su:

$$A_1(\infty) = \frac{\mu_1}{\lambda_1 + \mu_1} \quad A_2(\infty) = \frac{\mu_2}{\lambda_2 + \mu_2} \quad A_3(\infty) = \frac{\mu_3}{\lambda_3 + \mu_3}$$

$$N_1(\infty) = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \mu_1} \quad N_2(\infty) = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 + \mu_2} \quad N_3(\infty) = \frac{\lambda_3}{\lambda_3 + \mu_3}$$

Sva stanja prostora i međuveze tih stanja možemo vidjeti na sljedećoj slici:



Slika 7. Model uzemljenja TS s tri komponente

Vjerojatnosti stanja takvog sustava u prostoru stanja dana su u sljedećoj tablici.

Tablica 1. Stanja sustava prema slici 7

Redni broj	Stanje sustava	Stanje komponente*			Vjerojatnosti stanja sustava	Frekvencije stanja sustava
		1.	2.	3.		
1.	"0"	1	1	1	$P_{"0"} = A_1 A_2 A_3$	$f_{"0"} = f_1 A_2 A_3 + f_2 A_1 A_3 + f_3 A_1 A_2$
2.	"1"	0	1	1	$P_{"1"} = N_1 A_2 A_3$	$f_{"1"} = f_1 A_2 A_3 + f_2 N_1 A_3 + f_3 N_1 A_2$
3.	"2"	1	0	1	$P_{"2"} = A_1 N_2 A_3$	$f_{"2"} = f_1 N_2 A_3 + f_2 A_1 A_3 + f_3 A_1 N_2$
4.	"3"	1	1	0	$P_{"3"} = A_1 A_2 N_3$	$f_{"3"} = f_1 A_2 N_3 + f_2 A_1 N_3 + f_3 A_1 A_2$
5.	"4"	0	0	1	$P_{"4"} = N_1 N_2 A_3$	$f_{"4"} = f_1 N_2 A_3 + f_2 N_1 A_3 + f_3 N_1 N_2$
6.	"5"	0	1	0	$P_{"5"} = N_1 A_2 N_3$	$f_{"5"} = f_1 A_2 N_3 + f_2 N_1 N_3 + f_3 N_1 A_2$
7.	"6"	1	0	0	$P_{"6"} = A_1 N_2 N_3$	$f_{"6"} = f_1 N_2 N_3 + f_2 A_1 N_3 + f_3 A_1 N_2$
8.	"7"	0	0	0	$P_{"7"} = N_1 N_2 N_3$	$f_{"7"} = f_1 N_2 N_3 + f_2 N_1 N_3 + f_3 N_1 N_2$

* 1 - komponenta u stanju ispravnosti; 0 - komponenta u stanju kvara

Izraz za **stacionarnu raspoloživost** sustava glasi:

$$A(\infty) = A_1(\infty)A_2(\infty)A_3(\infty) = \frac{\mu_1 \mu_2 \mu_3}{(\lambda_1 + \mu_1)(\lambda_2 + \mu_2)(\lambda_3 + \mu_3)}$$

Frekvencija kvara takvog sustava je:

$$f = f_1 N_2 N_3 + f_2 N_1 N_3 + f_3 N_1 N_2$$

a **srednje vrijeme popravka kvara** tog sustava je:

$$r = \frac{r_1 r_2 r_3}{r_1 r_2 + r_2 r_3 + r_1 r_3} = \frac{1}{\mu_1 + \mu_2 + \mu_3}$$

Frekvencije pojedinih stanja se mogu vidjeti u tablici 1, a vrijeme boravka u svakom stanju je:

$$m = T_{"0"} = \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3}, \quad T_{"1"} = \frac{1}{\mu_1 + \lambda_2 + \lambda_3},$$

$$T_{"2"} = \frac{1}{\mu_2 + \lambda_1 + \lambda_3}, \quad T_{"3"} = \frac{1}{\mu_3 + \lambda_1 + \lambda_2},$$

$$T_{"4"} = \frac{1}{\mu_1 + \mu_2 + \lambda_3}, \quad T_{"5"} = \frac{1}{\mu_1 + \mu_3 + \lambda_2},$$

$$T_{"6"} = \frac{1}{\lambda_1 + \mu_2 + \mu_3}, \quad r = T_{"7"} = \frac{1}{\mu_1 + \mu_2 + \mu_3}$$

4. PRORAČUN KARAKTERISTIČNIH VELIČINA POUZDANOSTI

a) Karakteristične veličine pouzdanosti komponenata uzemljivača transformatorske stanice 10(20)/0.4 kV

a1) Uzemljivači susjednih TS preko plašteva napojnih visokonaponskih kabela

Ulazne veličine:

- 279 KTS-ova u gradu Osijeku
- 497 vodova 10 kV (KDV-a) (N)
- ukupne duljine 182 km
- 12 kvarova godišnje (n) (promatrajući samo kvar na kabel glavi, spojnici, građevinsko oštećenje ili bilo

koji sličan kvar koji za posljedicu ima potpuni fizički prekid VN kabela dakle i prekid spoja sa uzemljivačem TS)

- srednje vrijeme trajanja kvara 60 sati godišnje po svim VN kabelima u gradu Osijeku godišnje.

Ako je "n" broj kvarova (prekida) svih VN kabela prosječno 12, u gradu Osijeku, to je dakle intenzitet takvih kvarova $\frac{12}{1.82} = 6.59$ na 100 km gradske visokonaponske kabelske mreže godišnje.

Učestalost kvarova (potpunog prekida kabela) računamo po izrazu:

$$f = \frac{n}{N \cdot T} = \frac{12}{497 \cdot 1} = 2.4145 \cdot 10^{-2} (1 / god)$$

Srednje vrijeme trajanja kvara (r) je prosječno 60 sati po godini, pa je broj sati pogona (srednje vrijeme ispravnog rada), $m = 8760 - 60 = 8700$ sati po godini u gradu Osijeku.

Slijedi stacionarna raspoloživost (vjerojatnost ispravnosti) VN komponente:

$$A = \frac{m}{m+r} = \frac{8700}{8760} = 0.993151$$

pa je intenzitet kvara jednog VN kabela kao komponente uzemljivačkog sustava:

$$\lambda = \frac{f}{A} = \frac{0.024145}{0.993151} = 0.024312 (1 / god)$$

Poznavajući stacionarnu raspoloživost, stacionarna neraspoločivost (vjerojatnost kvara) je:

$$N = 1 - A = 1 - 0.993151 = 6.849 \cdot 10^{-3}$$

pa je intenzitet popravka jednog VN kabela:

$$\mu = \frac{f}{N} = \frac{0.024145}{0.007} = 3.5253 (1 / god).$$

a2) Uzemljivači NN mreže preko nul-vodiča i plašteva niskonaponskih kabela

Ulazne veličine:

- 279 KTS-ova u gradu Osijeku

- 1953 NN kabelskih vodova (N)
- ukupne duljine 488 km
- 36 kvarova (potpunog prekida) godišnje (n) (promatran samo kvar na kabel glavi, spojnici, građevinsko oštećenje ili bilo koji sličan kvar koji za posljedicu ima potpuni fizički prekid NN kabela, dakle i prekid spoja sa uzemljivačem TS)
- srednje vrijeme trajanja kvara 72 sata godišnje po svim NN kabelima u gradu Osijeku godišnje.

Ako je "n" broj kvarova (prekida) svih NN kabela prosječno 36, u gradu Osijeku, to je dakle intenzitet takvih kvarova $\frac{36}{4.88} = 7.38$ na 100 km kabela niskonaponske mreže godišnje.

Učestalost kvarova (potpunog prekida kabela) računamo po izrazu:

$$f = \frac{n}{N \cdot T} = \frac{36}{1953 \cdot 1} = 1.8433 \cdot 10^{-2} (1/god)$$

Srednje vrijeme trajanja kvara (r) je prosječno 72 sata po godini i svim NN kabelima (izvodima), pa je broj sati pogona (srednje vrijeme ispravnog rada), $m = 8760 - 72 = 8688$ sati po godini u gradu Osijeku.

Slijedi stacionarna raspoloživost (vjerojatnost ispravnosti) NN komponente:

$$A = \frac{m}{m+r} = \frac{8688}{8760} = 0.991781$$

pa je intenzitet kvara jednog NN kabela kao komponente uzemljivačkog sustava:

$$\lambda = \frac{f}{A} = \frac{0.018433}{0.991781} = 1.8586 \cdot 10^{-12} (1/god)$$

Poznavajući stacionarnu raspoloživost, stacionarna neraspoločivost (vjerojatnost kvara) je:

$$N = 1 - A = 1 - 0.991781 = 8.219 \cdot 10^{-3}$$

pa je intenzitet popravka jednog NN kabela:

$$\mu = \frac{f}{N} = \frac{0.018433}{0.008219} = 2.24273 (1/god).$$

a3) Združeni (radni i zaštitni) uzemljivač – osnovni uzemljivač transformatorske stanice

Ulazne veličine:

- 279 KTS-ova u gradu Osijeku (N)
- procjena je 0.3 kvara godišnje (n) (prekida trake za uzemljenje, spoja na prsten i slično kao posljedica građevinskog oštećenja, oslabljenja mehaničkog i/ili električkog spoja, uključivo prekid zbog mjerenja otpora uzemljenja)
- procijenjeno prosječno srednje vrijeme trajanja kvara 0.9 sati po godini u gradu Osijeku.

Ako je "n" broj kvarova (prekida) na uzemljivačkim trakama radnog i/ili zaštitnog (osnovnog) uzemljivača TS, procijenjen na prosječno 0.3 u gradu Osijeku, to je dakle intenzitet takvih kvarova $\frac{0.3}{2.79} = 0.10753$ na 100 TS-a godišnje.

Učestalost kvarova (potpunog prekida spoja s uzemljenjem TS) računamo po izrazu:

$$f = \frac{n}{N \cdot T} = \frac{0.3}{279 \cdot 1} = 1.07527 \cdot 10^{-3} (1/god)$$

Srednje vrijeme trajanja kvara (r) je procijenjeno na prosječno 0.9 sati po godini, pa je broj sati pogona (srednje vrijeme ispravnog rada), $m = 8760 - 0.9 = 8759.1$ sati po godini u gradu Osijeku.

Slijedi stacionarna raspoloživost (vjerojatnost ispravnosti) te komponente uzemljivačkog sustava:

$$A = \frac{m}{m+r} = \frac{8759.1}{8760} = 0.999897$$

pa je intenzitet kvara ovog uzemljivača TS kao komponente uzemljivačkog sustava:

$$\lambda = \frac{f}{A} = \frac{0.00107527}{0.999897} = 1.07538 \cdot 10^{-3} (1/god)$$

Poznavajući stacionarnu raspoloživost, stacionarna neraspoločivost (vjerojatnost kvara) je:

$$N = 1 - A = 1 - 0.999897 = 1.03 \cdot 10^{-4}$$

pa je intenzitet popravka osnovnog uzemljivača jedne TS:

$$\mu = \frac{f}{N} = \frac{0.00107527}{0.000103} = 10.4395 (1/god).$$

b) Karakteristične veličine pouzdanosti sustava uzemljenja TS s tri komponente

Ulazne veličine komponenti:

1. osnovni uzemljivač TS :

$$-f_1 = 1.07527 \cdot 10^{-3} (1/god)$$

$$-A_1 = 0.999897$$

$$-\lambda_1 = 1.07538 \cdot 10^{-3} (1/god)$$

$$-N_1 = 1.03 \cdot 10^{-4}$$

$$-\mu_1 = 10.4395 (1/god)$$

2. uzemljivač susjednih TS preko VN kabela:

$$-f_2 = 2.4145 \cdot 10^{-2} (1/god)$$

$$-A_2 = 0.993151$$

$$-\lambda_2 = 2.4312 \cdot 10^{-2} (1/god)$$

$$-N_2 = 6.849 \cdot 10^{-3}$$

$$-\mu_2 = 3.5253 (1/god)$$

3. uzemljivači NN mreže preko NN izvoda:

$$-f_3 = 1.8433 \cdot 10^{-2} (1/god)$$

$$-A_3 = 0.991781$$

$$-\lambda_3 = 1.8587 \cdot 10^{-2} (1/god)$$

$$-N_3 = 8.219 \cdot 10^{-3}$$

$$-\mu_3 = 2.2427 (1/god).$$

b1) *Ako promatramo ovaj sustav s ispravnim komponentama (stanje "0"), karakteristične veličine pouzdanosti su sljedeće:*

Frekvencija (učestalost) kvarova sustava uzemljenja s tri komponente je:

$$f = f_1 A_2 A_3 + f_2 A_1 A_3 + f_3 A_1 A_2 = 4.3308 \cdot 10^{-2} (1/god)$$

Stacionarna raspoloživost (vjerojatnost ispravnosti) ovog sustava iznosi:

$$A = A_1 A_2 A_3 = 0.98489$$

Srednje vrijeme trajanja kvara ovog sustava je:

$$m = T = \frac{1}{\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3} = 22.741 (\text{sati} / \text{god})$$

Intenzitet kvara uzemljivačkog sustava kao cjeline je:

$$\lambda = \frac{f}{A} = 4.3972 \cdot 10^{-2} (1 / \text{god})$$

Stacionarna neraspoločivost (vjerojatnost kvara) sustava iznosi :

$$N = 1 - A = 1.511 \cdot 10^{-2}$$

I intenzitet popravka uzemljivačkog sustava iznosi:

$$\mu = \frac{f}{N} = 2.8662 (1 / \text{god}).$$

b2) *Ako promatramo sustav u stanju kvara jedne komponente, npr. NN izvoda (3. komponenta, stanje "3"), karakteristične veličine pouzdanosti su sljedeće:*

Frekvencija (učestalost) kvarova sustava uzemljenja u tom stanju je:

$$f = f_1 A_2 N_3 + f_2 A_1 N_3 + f_3 A_1 A_2 = 1.8512 \cdot 10^{-2} (1/\text{god})$$

Vjerojatnost stanja sustava iznosi:

$$P_{"3"} = A_1 A_2 N_3 = 8.1619 \cdot 10^{-3}$$

Vrijeme boravka u ovom stanju je:

$$T_{"3"} = \frac{1}{\mu_3 + \lambda_1 + \lambda_2} = 0.4409 (\text{sati} / \text{god})$$

b4) *Karakteristične veličine pouzdanosti sustava u svim stanjima, tj. u svim kombinacijama kvarova komponenti (prema tablici 1 i pripadajućim izrazima) dane su u sljedećoj tablici:*

Tablica 2. Karakteristične veličine pouzdanosti za sustav uzemljenja TS 10(20)/0.4 kV s tri komponente

Red. broj	Stanje sustava	Stanje komponente			Frekvencije stanja sustava (1/god.)	Stac. raspoloživost (vjeroj. ispravnosti)	Vrijeme boravka u stanju T (sati/god.)	Intenzitet kvara (1/god.)	Vjerojatnost kvara	Intenzitet popravka (1/god.)
		1.	2.	3.						
1.	"0"	1	1	1	$4.3308 \cdot 10^{-2}$	$A = 0.98489$	$m = 22.741$	$4.3972 \cdot 10^{-2}$	$1.511 \cdot 10^{-2}$	2.8662
2.	"1"	0	1	1	$1.0635 \cdot 10^{-3}$	$P_{"1"} = 1.0145 \cdot 10^{-4}$	$9.5398 \cdot 10^{-2}$	10.483	0.9999	$1.0636 \cdot 10^{-3}$
3.	"2"	1	0	1	$2.4078 \cdot 10^{-2}$	$P_{"2"} = 6.792 \cdot 10^{-3}$	0.28209	3.5451	0.99321	$2.4243 \cdot 10^{-2}$
4.	"3"	1	1	0	$1.8512 \cdot 10^{-2}$	$P_{"3"} = 8.1619 \cdot 10^{-3}$	0.4409	2.2681	0.99184	$1.8664 \cdot 10^{-2}$
5.	"4"	0	0	1	$9.7835 \cdot 10^{-6}$	$P_{"4"} = 6.9965 \cdot 10^{-7}$	$7.1513 \cdot 10^{-2}$	13.983	0.9999994	$9.7835 \cdot 10^{-6}$
6.	"5"	0	1	0	$1.0683 \cdot 10^{-5}$	$P_{"5"} = 8.4076 \cdot 10^{-7}$	$7.87 \cdot 10^{-2}$	12.706	0.99999916	$1.0683 \cdot 10^{-5}$
7.	"6"	1	0	0	$3.2472 \cdot 10^{-4}$	$P_{"6"} = 5.6286 \cdot 10^{-5}$	0.17334	5.7691	0.99994	$3.2474 \cdot 10^{-4}$
8.	"7"	0	0	0	$9.3973 \cdot 10^{-8}$	$N = 5.7981 \cdot 10^{-9}$	$r = 6.17 \cdot 10^{-2}$	16.208	0.999999995	$9.3973 \cdot 10^{-8}$

Napomena. - 1 - komponenta u stanju ispravnosti; 0 - komponenta u stanju kvara

- komponenta 1. – osnovni uzemljivač

- komponenta 2. - uzemljivač susjednih TS preko VN kabela

- komponenta 3. – uzemljivači NN mreže preko NN izvoda.

Intenzitet kvara uzemljivačkog sustava u ovom stanju je:

$$\lambda = \frac{f}{A} = 2.2681 (1 / \text{god})$$

I intenzitet popravka uzemljivačkog sustava u ovakvom stanju iznosi:

$$\mu = \frac{f}{N} = 1.8664 \cdot 10^{-2} (1 / \text{god}).$$

b3) *Ako promatramo sustav u stanju kvara dvije komponente, npr. VN kabela i NN izvoda (2. i 3. komponenta, stanje "6"), karakteristične veličine pouzdanosti su sljedeće:*

Frekvencija (učestalost) kvarova sustava uzemljenja u tom stanju je:

$$f = f_1 N_2 N_3 + f_2 A_1 N_3 + f_3 A_1 N_2 = 3.472 \cdot 10^{-4} (1/\text{god})$$

Vjerojatnost ovog stanja sustava iznosi:

$$P_{"6"} = A_1 N_2 N_3 = 5.6286 \cdot 10^{-5}$$

Vrijeme boravka u ovom stanju je:

$$T_{"6"} = \frac{1}{\lambda_1 + \mu_2 + \mu_3} = 0.17334 (\text{sati} / \text{god})$$

Intenzitet kvara uzemljivačkog sustava u ovom stanju je:

$$\lambda = \frac{f}{A} = 5.7691 (1 / \text{god})$$

I intenzitet popravka uzemljivačkog sustava u ovakvom stanju iznosi:

$$\mu = \frac{f}{N} = 3.2474 \cdot 10^{-4} (1 / \text{god}).$$

4. ZAKLJUČAK

Analizom dostupnih podataka iz dnevnika operatora mreže 10 i 0.4 kV, u gradu Osijeku, posljednjih pet godina, prosječno godišnje se događa 12 potpunih prekida visokonaponskog kabela. Također je analizom zapisa o prekidima ustanovljeno da oni prosječno traju 5 sati po prekidu. Za niskonaponsku mrežu istovrsni podaci su sljedeći: prosječno 36 prekida godišnje s dva sata trajanja prekida. Kvarovi osnovnog uzemljivačkog sustava TS su: prosječno 0.3 kvara godišnje s 0.9 sati trajanja kvara godišnje.

Prethodno poglavlje predočava proračun kojim se pokazuju vrijednosti karakterističnih veličina pouzdanosti komponenata i sustava uzemljenja TS. Po učestalosti kvarova prvi je VN kabel s 2.41 u 100 godina, a zadnji osnovni uzemljivač TS s 1.07 u 1000 godina, iako NN kabeli imaju veći intenzitet od 7.38 na 100 km NN mreže godišnje od VN kabela s 6.59 na 100 km. Razlog je u tome što je NN kabela gotovo 4 puta više od VN kabela.

Po stacionarnoj raspoloživosti, tj. vjerojatnosti ispravnosti, najbolji je naravno osnovni uzemljivač s 99.989 % vjerojatnošću ispravnosti, slijedi VN kabel s 99.31 %, te NN kabel s 99.18 %.

Po intenzitetu kvara prvi je VN kabel s 2.43 kvara u 100 godina, slijedi NN kabel s 1.86 kvarova u 100 godina, a najbolji je osnovni uzemljivač TS s 1.07 kvarova u 1000 godina.

Najveći intenzitet popravka ima osnovni uzemljivač TS s 10.44, slijedi VN kabel s 3.53, pa NN kabel s 2.24 popravka godišnje, što znači da se VN kabel gotovo 3 puta, a NN kabel nešto manje od 5 puta lošije popravlja od osnovnog uzemljivača. Time je slikovitije prikazana vjerojatnost ispravnosti, a potvrđene velike razlike komponenti sustava uzemljenja TS 10(20)/0.4 kV u intenzitetu kvara.

Kada promatramo sustav uzemljenja TS 10(20)/0.4 kV kao paralelni spoj sve tri komponente (tablica C2), ističu se dva ekstrema. Prvi je u stanju sustava "0" kada su sve tri komponente ispravne (što je i normalno željeno stanje koje se održava popravcima kod kvara i redovnim održavanjem) sa stacionarnom raspoloživošću od 98.49 %, s mogućim srednjim vremenom trajanja kvara od 22.74 sata godišnje, intenzitetom kvara od 4.4 kvara u 100 godina i intenzitetom popravka od 2.87. Ističe se frekvencija tog stanja od 4,33 u 100 godina. Drugi ekstrem je kada su sve tri komponente sustava uzemljenja u kvaru (što je i teoretski nemoguće jer je to slučaj kada TS uopće nije u nikakvom pogonu, tj. ne postoji kao elektroenergetski objekt) no i za to stanje pouzdanost daje veličine.

Stanje s kvarom samo osnovnog uzemljivača ima frekvenciju od 1.06 kvarova u 1000 godina, s kvarom samo VN kabela od 2.41, a stanje s kvarom samo NN kabela ima frekvenciju od 1.85 kvarova u 100 godina.

LITERATURA

- [1] V. MIKULIČIĆ, M. URBIHA-FEUEBACH: "Analiza pouzdanosti i raspoloživosti u Elektroenergetskom sustavu", I, II, III, IV ETF, Zagreb, 1976.-1977.
- [2] S. NIKOLOVSKI: "Osnove analize pouzdanosti elektroenergetskog sustava", ETF, Osijek 1995.
- [3] R. BILLINTON, R. N. ALLAN: "Reliability Evaluation of Power Systems", Third Printing, 1990.
- [4] R. BILLINTON, R. N. ALLAN: "Reliability of Large Electric power Systems", 1998.
- [5] V. MIKULIČIĆ, Z. ŠIMIĆ, S. NIKOLOVSKI: "Ovisnost raspoloživosti razdjelne mreže o smještaju i šemi TS 110/x kV", Savjetovanje HK CIGRE, Cavtat 1997.

RELIABILITY OF URBAN 10(20)/0.4 kV TS GROUNDING COMPONENTS AND SYSTEM

In the paper a reliability analysis of urban 10(20)/0.4 kV TS grounding components and system is given. The aim is to show the reliability parameters' value of certain components and the whole system. Failure data have been collected and analysed on the existing 10(20)/0.4 kV TS network of the town of Osijek.

ZUVERLÄSSIGKEIT DER BESTANDTEILE DES ERDUNGSSYSTEMS EINES STÄDTISCHEN 10(20)/04 KV UMSPANNWERKES

Die Arbeit stellt die Überprüfung der Zuverlässigkeit von Bestandteilen und von der Gesamtheit des Erdungssystems eines städtischen 10(20)/04 kV Umspannwerkes.

Ziel dieser Arbeit ist die Zuverlässigkeits-Kennzifferwerte einzelner Bestandteile und des ganzen Erdungssystems anzuzeigen. Die Angaben über entstandene Fehler sind am bestehenden Netz der städtischen 10(20)/04 kV Umspannwerke der Stadt Osijek angesammelt, und die Fehler selbst untersucht worden.

Naslov pisca:

Mr. sc. Pavle Filko, dipl. ing.
HEP DP "Elektroslovanija" Osijek
Šet. kard. F. Šepera 1a,
31000 Osijek, Hrvatska

Uredništvo primilo rukopis:
 2001-09-04.