

Metodologija za određivanje vremena zamene prekidača na bazi pouzdanosti i integrisanog faktora rizika

DRAGAN A. STEVANOVIĆ, ODS EPS Distribucija, Beograd, Zaječar

ALEKSANDAR D. JANJIĆ, Univerzitet u Nišu,

Elektronski fakultet, Niš

DRAGAN S. TASIĆ, Univerzitet u Nišu,

Elektronski fakultet, Niš

Stručni rad

UDC: 621.316.542

DOI: 10.5937/tehnika1905687S

U ovom radu biće predstavljena nova metodologija za procenu vremena zamene prekidača u transformatorskoj stanici (TS). Metoda se zasniva na statističkoj analizi prikupljenih podataka iz eksploatacije prekidača, kao i uticaja zamene prekidača na pouzdanost TS. Predstavljen je i ekonomski uticaj zamene pojedinih prekidača na pouzdanost postrojenja kao i troškovi takve akcije. Prikupljeni podaci obuhvataju 427 maloljuna 35kV i 10kV prekidača, posmatranih u periodu od 10 godina.

Analiza podataka je izvršena uz pomoć Vajbulove raspodele (Weibull probability distribution) padova napona na kontaktima prekidača nadzemnih i kablovskih izvoda 10kV i 35kV. Pouzdanost postrojenja je određena metodama minimalnih puteva i minimalnih preseka. Na taj način sagledan je uticaj stanja srednjenaponskih prekidača na pouzdanost čitavog postrojenja. Primer metode je demonstriran na jednoj TS 35/10kV. Pouzdanost postrojenja je analizirana kroz 5 scenarija zamene prekidača sa njihovim pratećim troškovima. Za analiziranu TS rezultati su pokazali najisplativiju varijantu pri zameni prekidača na trafo poljima.

Ključne reči: prekidač, pouzdanost, padovi napona, preostali životni vek, Vajbulova raspodela

1. UVOD

Prekidač snage je jako važan element jednog elektroenergetskog postrojenja, posebno zbog svoje primarne funkcije uključivanja i isključenja izvoda u svim režimima rada (normalan pogon ili kvar). Otkaz prekidača da izvrši isključenje pri pojavi kvara može imati velike posledice na ostalu ispravnu opremu, a samim tim i na pouzdanost samog postrojenja. Zato je opravdano vršiti analizu stanja prekidača i uticaj stanja prekidača na pouzdanost postrojenja.

Da bi se utvrdio ekonomski uticaj održavanja, remonta i zamene prekidača [1], [2], potrebno je izvršiti procenu njegovog preostalog životnog veka [3], [4] (RUL – remaining useful life). Preostali životni vek se definiše kao vreme od sadašnjeg trenutka do trenutka kada uređaj otkáže sa radom [1], i predstavlja promenljivu koja zavisi od dosta faktora (kao što su starost

uređaja, radni uslovi, nivo održavanja...) [5].

Analiza pouzdanosti prekidača uslovljena je vrstom prikupljenih podataka, koji mogu biti: otpornost kontakta, eroziona otpornost [6], podaci sa ultrazvučnih detektora, tranzijentni napon prema zemlji [7], podaci kontrolnog kola prekidača [8] ili prikupljeni podaci o kvarovima na prekidaču [9]. U zavisnosti od prikupljenih podataka, RUL se može određivati pomoću: metoda očekivanog životnog veka (statističke metode [5], [11] - [15]), metodama zasnovanim na iskustvu (fazi metoda [10]), veštačkih neuro-mreža i fizičkih modela [4].

U [17] izvršena je procena pouzdanosti različitih konfiguracija postrojenja, pomoću metode minimalnih preseka na osnovu kriterijuma neprekidnosti snabdevanja kupaca električnom energijom.

U [18] pokazatelji pouzdanosti svakog kvara za prstenastu konfiguraciju sabirnica i konfiguraciju sa dvostrukim sabirnicama i prekidačima su izračunati i kvantitativno upoređeni.

Metoda koja kombinuje modelovanje kvarova i njihovo otklanjanje kao stohastički proces i Monte Carlo simulaciju za procenu pokazatelja pouzdanosti predstavljena je u [19].

Adresa autora: Dragan Stevanović, ODS EPS Distribucija, Beograd, Ogranak ED Zaječar, Trg oslobođenja 37, Zaječar

e-mail: dragan985@gmail.com

Rad primljen: 17.07.2019.

Rad prihvaćen: 10.09.2017.

U [20] predstavljeno je poređenje između pouzdanosti različitih tipova konfiguracija postrojenja.

Za određivanje pouzdanosti postrojenja može se koristiti veliki broj metoda, kao što su Marovljev model, metoda minimalnih preseka, stablo kvara, stablo događaja, Monte Karlo simulacija. [20] - [21]

Postrojenja, operatori distributivnih sistema i industrijski potrošači se suočavaju sa velikim izazovima u pogledu održavanja opreme. Sa jedne strane tu je zastarela oprema, a sa druge težnja za smanjenjem troškova poslovanja i rad u konkurentskim uslovima, tako da je samim tim određivanje prioriteta ulaganja postalo jako značajno [16].

2. PROCES STARENJA PREKIDAČA

Glavni razlog pogoršanja stanja prekidača su starost, broj manipulacija pod opterećenjem i normalnim pogonom i radni uslovi kao što su temperatura i zagađena sredina.

Merenje otpornosti kontakta se sprovodi pomoću Omovog zakona. Kako je komora u kojoj se nalaze kontakti zatvorenog oblika, i jedini dostupni krajevi su priključne kleme, izmerena otpornost R između ova dva kraja će predstavljati zbir otpornosti date redne veze (fiksni kontakti, kontaktnog spoja...). Na osnovu IEC 60694 [23], članak 6.4.1, vrednost struje tokom ispitivanja bi trebala da bude što bliža nominalnoj vrednosti, ali se može koristiti i niža vrednost, ali ne i niža od 50A da bi se izbegao galvanski efekat, koji može poremetiti očitane vrednosti.

2.1. Prikupljanje i analiza podataka

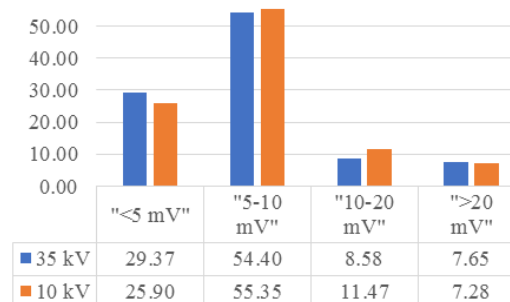
Analiza je izvršena u 42 TS 35/10kV, sa ukupno 427 malouljnih prekidača montiranih na 35 kV i 10 kV izvodima. Merenja statičke otpornosti kontakta, u ovom slučaju predstavljene padovima napona, su prikupljena u poslednjih 10 godina (2007-2017), pri čemu je pad napona meren svake druge godine.

Ostali prikupljeni podaci su: naponski nivo izvoda, tip izvoda, godina proizvodnje prekidača, broj isključenih struja kratkog spoja, ukupan broj isključenja od delovanja relejne zaštite, broj kupaca na izvodu i prosečno opterećenje izvoda.

U zavisnosti od nominalne struje i napona prekidača, dozvoljene vrednosti padova napona se kreću od 3.5 mV do 14 mV [23]. Analizirani prekidači imaju sledeće dozvoljene vrednosti padova napona: 35 kV prekidači : 3.5 – 7 mV; 10 kV prekidači : 7 – 14 mV. U uputstvu proizvođača [23] navedeno je da prekidač mora biti kompletno remontovan nakon: 10-12 godina eksploatacije, ili 5000 manipulacija, ili 6 prekinutih struja kratkog spoja, šta god se dogodi prvo.

Ispitivanje je vršeno jednosmernom strujom od 100 A, merenjem napona na priključnim krajevima

prekidača. Na slici 1 je prikazana raspodela prikupljenih vrednosti padova napona, gde su vrednosti podeljene u 4 kategorija u zavisnosti od vrednosti pada napona.



Slika 1 - Raspodela padova napona analiziranih prekidača

U prvom koraku određeno je stanje svakog prekidača na osnovu vrednosti pada napona, tj. da li je pad napona prekoračen ili je i dalje u dozvoljenim granicama. Za prekidače kod kojih je prekoračena dozvoljena vrednost smatra se da su otkazali, ostali prekidači se smatraju ispravnim. Za svaki otkazali prekidač zabeležena je i godina kada je nastupilo to stanje.

Iz uputstva proizvođača [23] dozvoljene vrednosti padova napona se mogu prekoračiti za 25%, tako da je sagledano stanje prekidača kroz dva dodatna kriterijuma: (a) normalna raspodela pada napona i (b) dozvoljena vrednost pada napona je 25% veća od nominalne. Broj otkazalih i ispravnih prekidača kroz ova dva kriterijuma će se razlikovati, tako što će u drugom kriterijumu biti manje otkazalih prekidača, zbog povećane granice dozvoljenog pada napona.

Vajbulova raspodela je najčešće korišćena metoda pri analizi otkaza opreme, pouzdanosti i starenja [24]. Ona može opisati tri tipa stanja opreme (otkaz u periodu razrade, normalan rad i stanje habanja, tj. povećan nivo otkaza), preko tzv. karakteristike kade [25]. Vajbulova kumulativna funkcija raspodele predstavlja verovatnoću da će u posmatranom vremenskom trenutku doći do otkaza posmatranog uređaja (3). Opisana je sa dva parametra: parametar nagiba η i parametar oblika β :

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}} \quad (3)$$

Parametar nagiba označava vremenski trenutak kada je 63.2% analiziranih jedinica otkazalo. Parametar oblika označava vrstu kvara. Njegova vrednost govori da li se kvarovi povećavaju ili smanjuju. $\beta < 1$ označava otkaz u periodu razrade (karakteristično za period nakon puštanja uređaja u rad), dok $\beta > 1$ označava kvarove usled zastarelih delova i habanja. Veća vrednost β označava veći intenzitet otkaza opreme. U tabeli 1 su prikazani Vajbulovi parametri za različite kriterijume analiziranih prekidača.

Tabela 1. Vajbulovi parametri

Tip izvoda	η	β	Otkazali \ Ispravni
Nadzemni +25%	39.1	5.2	100 \ 87
Nadzemni	37.1	4.8	131 \ 56
Kablovski +25%	41.5	6.1	63 \ 169
Kablovski	38.1	6.1	97 \ 135
10 kV izvodi +25%	43.4	5.6	87 \ 224
10 kV izvodi	40.4	5.1	135 \ 176
35 kV izvodi +25%	35.2	5.6	79 \ 31
35 kV izvodi	33.8	5.6	96 \ 14
svi izvodi +25%	40.4	5.6	166 \ 255
svi izvodi	38.0	5.3	231 \ 190

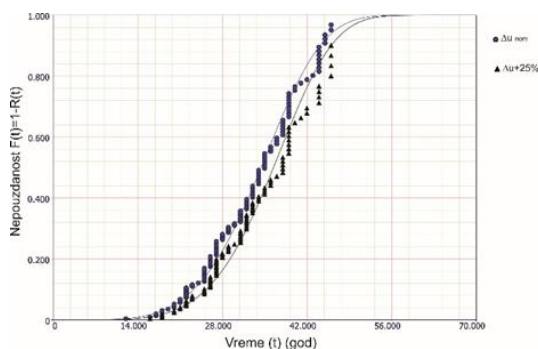
Posmatranjem dobijenih Vajbulovih parametara mogu se doneti dva zaključka, kablovski izvodi imaju veću vrednost β , dok nadzemni izvodi imaju najnižu vrednost. Posmatranjem η parametra, 10kV izvodi (+25% veća vrednost pada napona) imaju najduže vreme do otkaza, dok je kod 35kV izvoda η najniže (tj. kraće vreme do otkaza prekidača).

Oba parametra su dobijena iz statističkih podataka pomoću metode najmanjih kvadrata [26]. U analizi su korišćeni desno cenzurisani podaci, tj. podaci o prekidačima koji još nisu otkazali.

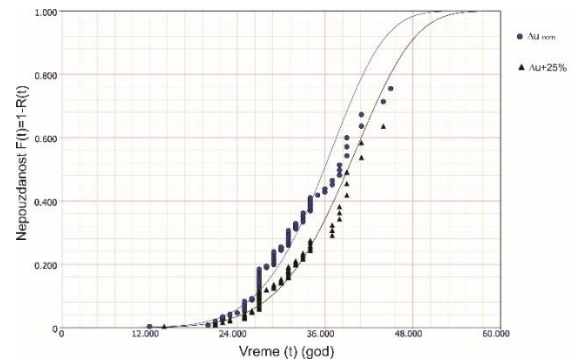
Na slikama od 2 do 5 predstavljena je raspodela nepouzdanosti za različite kriterijume, dok su u tabeli 2 prikazane vrednosti nepouzdanosti i intenzitet otkaza u zavisnosti od starosti prekidača.

Tabela 2. Pokazatelji pouzdanosti prekidača dobijeni Vajbulovom analizom

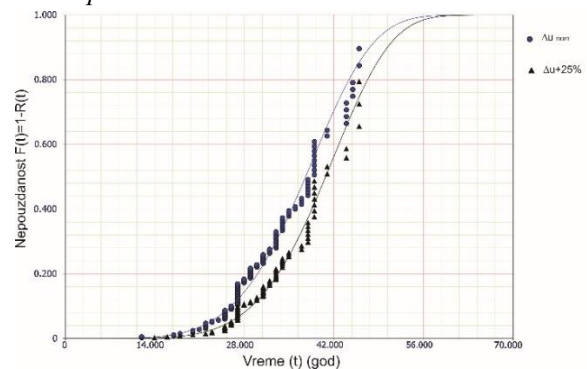
Tip izvoda	Starost (god)	Nepouzdanost	Intenzitet otkaza
Trafo 35 kV	32	0.532	0.226
Trafo 10 kV	41	0.278	0.11
Dovod 35 kV	32	0.532	0.226
Izvodi 10 kV	41	0.612	0.11



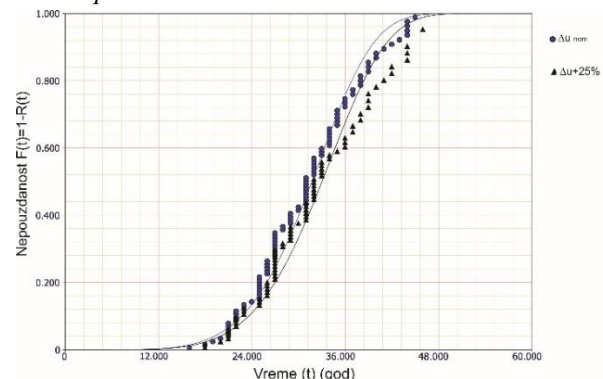
Slika 2 - Vajbulova raspodela nepouzdanosti za prekidače na nadzemnim vodovima



Slika 3 - Vajbulova raspodela nepouzdanosti za prekidače na kablovskim izvodima



Slika 4 - Vajbulova raspodela nepouzdanosti za prekidače na 10 kV vodovima



Slika 5 - Vajbulova raspodela nepouzdanosti za prekidače na 35 kV vodovima

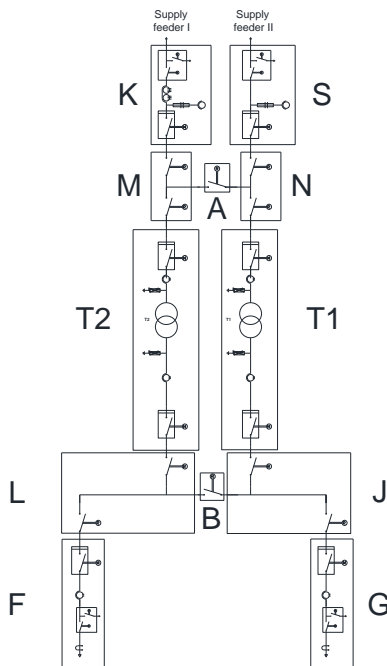
3. ANALIZA POUZDANOSTI TS

U ovom primeru korišćena je TS 35/10 kV, koja ima dva 8 MVA transformatora, dva 35 kV dovoda i deset 10 kV izvoda. Definisani funkcionalni blokovi su prikazani na slici 6.

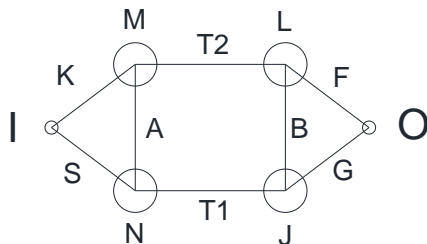
Funkcionalni blok predstavlja grupu elemenata koja je tako povezana da će ostati bez napajanja ako je samo jedna od komponenti isključena. Aktivan kvar je događaj koji aktivira susedne prekidače [17].

Koristeći funkcionalni blok sa slike 6, može se kreirati funkcionalni graf (slika 7). U ovom slučaju smatra se da 10 kV izvodi mogu napajati isto opterećenje (prstenasta mreža). Pouzdanost postrojenja je

računata metodama minimalnih puteva i minimalnih preseka [27].



Slika 6 - Funkcionalni blok



Slika 7 - Funkcionalni graf

3.1. Metoda minimalnih puteva

Put je redna veza grana grafa, koje povezuju izlazni i ulazni čvor. Minimalni put ne može više od jedanput preći isti čvor. Najviši red minimalnog puta jednak je ukupnom broju čvorova mreže umanjenom za 1. U ovom slučaju (slika 7), broj čvorova je $m=6$, a matrica povezanosti C će imati dimenziju $m \times m$, gde je element E_{ij} grana koja spaja čvorove „ i “ i „ j “.

$$C = \begin{bmatrix} 0 & K & S & 0 & 0 & 0 \\ K & 0 & A & T2 & 0 & 0 \\ S & A & 0 & 0 & T1 & 0 \\ 0 & T2 & 0 & 0 & B & F \\ 0 & 0 & T1 & B & 0 & G \\ 0 & 0 & 0 & F & G & 0 \end{bmatrix} \quad 4)$$

Minimalni put prvog reda ne postoji, jer ne postoji jedna grana koja spaja ulazni i izlazni čvor. Minimalni putevi drugog reda se dobijaju množenjem (sa desne strane) prve vrste matrice C sa celom matricom C . Minimalni putevi trećeg reda dobijaju se množenjem rezultata minimalnih puteva drugog reda sa matricom

C. Identičan proces se ponavlja za minimalne puteve narednih redova. Nakon proračuna dobijeni su sledeći minimalni putevi:

- III: FKT_2, SGT_1
- IV: $KAT_1G, KT_2BG, SAT_2F, ST_1BF$
- V: KAT_1BF, SAT_2BG

3.2. Metoda minimalnih preseka

Preseci grafa se sastoje od grupe grana, čijim se uklanjanjem prekidna veza između ulaznog i izlaznog čvora. Minimalni presek je jedinstven i ne može uključivati druge preseke. Matrica minimalnih puteva P (5), dimenzija $m \times n$, gde je m -broj minimalnih puteva a n -broj grana, čiji su elementi E_{ij} , koji mogu biti jednaki 1 ukoliko grana „ j “ pripada minimalnom putu „ i “, u suprotnom je jednaka 0.

Ukoliko minimalne puteva navedemo u sledećem redosledu: $FKT_2; SGT_1; KAT_1G; KT_2BG; SAT_2F; ST_1BF; KAT_1BF; SAT_2BG$

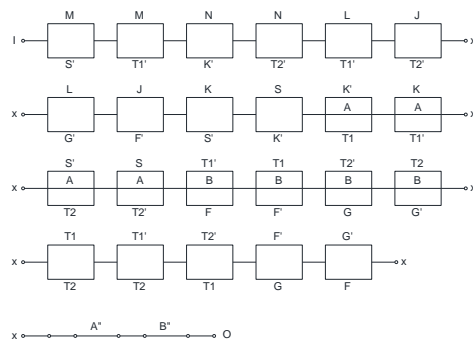
A grane na sledeći način: K, S, A, T1, T2, B, F, G. Za graf sa slike 7 matrica minimalnih puteva biće:

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Ukoliko su svi elementi jedne kolone jednaki 1, onda je ta grana minimalni presek prvog reda. Minimalni preseci drugog reda se dobijaju sabiranjem kolona matrice P (svaka kolona se dodaje kolonama koje joj slede). Sabiranje se vrši pomoću zakona Bulove algebre ($1+1=1, 1+0=1, 0+1=1, 0+0=0$). Kao rezultat dobijeni su minimalni preseci drugog i trećeg reda:

- II: K-S, T1-T2, F-G
- III: K-A-T1, S-A-T2, T1-B-F, T2-B-G

Veza između ulaznog i izlaznog čvora funkcionalnog grafa je raskinuta kada su sve grane koje čine presek u prekidu. Drugim rečima, veza je prekinuta ukoliko je prekinut samo jedan minimalni presek.



Slika 8 - Ekvivalentni graf minimalnih puteva

Sa dobijenim rezultatima, ekvivalentni graf minimalnih puteva analizirane TS je formiran i prikazan na slici 8.

4. ZAMENA PREKIDAČA KROZ NEKOLIKO SCENARIJA

Analiza isplativosti zamene prekidača i uticaja takve zamene na nepouzdanosti postrojenja analizirana je kroz 5 različita scenarija. Za nepouzdanost novog prekidača uzeta je vrednost od $U=0.00000822$ [20] (sa pretpostavkom da je intenzitet otkaza i verovatnoća otkaza nepromenjena).

Spisak akcija:

- I – Bez zamene prekidača
- II – Zamena prekidača na 10kV izvodima
- III – Zamena prekidača na 35kV dovodima
- IV – Zamena prekidača na trafo poljima
- V – Zamena svih prekidača

Rezultati svake akcije, u zavisnosti od trenutka preduzimanja akcije, prikazani su u tabeli 3, dok se u tabeli 4 nalaze podaci kako svaka akcija utiče na nepouzdanost postrojenja i intenzitet otkaza.

Tabela 3. Nepouzdanost u različitim akcijama

god	Akcija				
	I	II	III	IV	V
1	0.50038	0.48357	0.47501	0.04219	1.403E-05
2	0.62222	0.60417	0.59232	0.04796	1.403E-05
3	0.72393	0.70440	0.69079	0.05269	1.403E-05
4	0.78698	0.76531	0.75203	0.05664	1.403E-05
5	0.83704	0.81432	0.80080	0.05897	1.40364E-05

Tabela 4. Smanjenje nepouzdanosti TS

Parametar	Rezultati različitih scenarija (%)			
	Akcija II	Akcija III	Akcija IV	Akcija V
Smanjenje nepouzdanosti (%)	3.36	5.07	91.57	99.99
Intenzitet otkaza	8.73	6.59	80.26	95.59

5. PRORAČUN TROŠKOVA AKCIJA

Uzimajući za cenu zamene 35 kV prekidača 5.000 \$ i 2.000 \$ za 10 kV prekidače (uključujući troškove radova) sa prosečnim vremenom zamene prekidača od 6 časova (transport, montaža...), mogu se izračunati troškovi različitih akcija, i oni su prikazani u tabeli 5. Kolona „održavanje“ obuhvata troškove redovnog održavanja starih prekidača koji nisu zamenjeni, a kolona „zamena“ sadrži samo troškove zamene.

Vrednosti iz kolone „zbir“ su ukupni troškovi u godini u kojoj se sprovodi investicija (održavanje nezamenjenih prekidača i troškovi ugradnje novih).

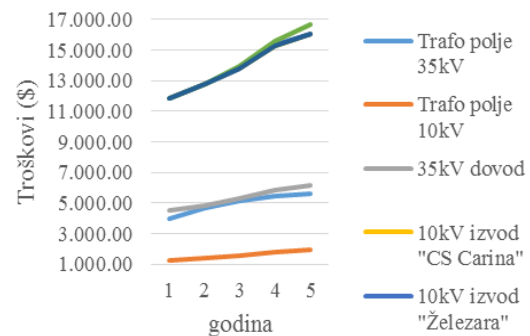
Tabela 5. Troškovi zamene prekidača

Akcija	Opis	Održavanje (\$)	Zamena (\$)	Zbir (\$)
I	Bez zamene, samo troškovi održavanje	13 200	0	13 200
II	Zamena prekidača 10 kV izvoda	2 400	38 800	41 200
III	Zamena prekidača 35 kV dovoda	12 400	14 800	27 200
IV	Zamena prekidača na trafo poljima	11 600	23 600	35 200
V	Zamena svih prekidača	0	77 200	77 200

Uzimajući u obzir verovatnoću otkaza prekidača usled njegove starosti i lošeg stanja, troškovi neplaniranog otkaza su proračunati i predstavljeni u tabeli 6 (i slici 9).

Tabela 6. Varijabilni troškovi svakog prekidača, uzimajući u obzir verovatnoću otkaza

Izvod	godina				
	I	II	III	IV	V
trafo 35	3,936.80	4,639.80	5,143.00	5,424.20	5,624.00
trafo 10	1,223.20	1,368.40	1,579.60	1,760.00	1,966.80
Klad. I	4,528.80	4,861.80	5,261.40	5,838.60	6,119.80
CS Car.	11,872.8	12,745.83	13,793.50	15,306.87	16,044.43
Zelezara	11,873.0	12,747.18	13,798.03	15,318.13	16,068.36
CS Jeze.	11,884.3	12,794.19	13,932.46	15,627.93	16,657.18
radio st.	11,872.8	12,745.80	13,793.40	15,306.60	16,043.80
ostali izv.	3,936.80	4,639.80	5,143.00	5,424.20	5,624.00



Slika 9 - Varijabilni troškovi po prekidaču

6. ZAKLJUČAK

Određivanje adekvatnog vremena zamene prekidača je kompleksna procedura koja zavisi od mnogih faktora. Pouzdanost transformatorske stanice se može upotrebiti za određivanje obima investicije i njene novčane opravdanosti.

Koristeći desetogodišnje statističke podatke 427 maloljudna prekidača Vajbulovom raspodelom su dobijeni pokazatelji njihove pouzdanosti. Opravdanost

zamene prekidača je posmatrana sa aspekta povećanja pouzdanosti cele TS i ekonomske isplativosti takve investicije.

Rezultati pokazuju da se u prvom koraku mogu zameniti prekidači na trafo poljima, pri čemu se dobija najveće povećanje pouzdanosti u odnosu na uložena novčana sredstva (akcija IV). U tom slučaju nepouzdanost je umanjena za ~92% sa investicijama od 23 600 \$ za zamenu 4 prekidača.

Predložena metodologija je jednostavna za upotrebu, naročito zbog toga što nije potrebno ulaganje u dodatnu opremu ili ljudstvo, jer svi potrebni podaci već postoje (prikupljaju se u postupku redovne godišnje revizije TS).

LITERATURA

- [1] Y. Hu, S. Liu, H. Lu, H. Zhang, *Remaining useful life assessment and its application in the decision for remanufacturing*, *Procedia CIRP*, vol. 15, pp. 212–217, 2014.
- [2] H. Picard, J. Verstraten, M. Hakkens, R. Vervaet, *Decision model for End of Life management of switchgears*, *El. and Instr. Appl. in the Petroleum & Chem. Ind.*, PCIC Europe 4th European Conference, Jun. 2007.
- [3] C. Okoh, R. Roy, J. Mehnen, L. Redding, *Overview of Remaining Useful Life Prediction Techniques in Through-Life Engineering Services*, *ScienceDirect, Procedia CIRP*, vol. 16, pp. 158 – 163, 2014.
- [4] J. Z. Sikorska, M. Hodkiewicz, L. Ma, *Prognostic modelling options for remaining useful life estimation by industry*, *Mech. Syst. and sign. Process.*, vol. 25, no. 5, pp. 1803-1836, Jul. 2011.
- [5] X. S. Si, W. Wang, C. H. Hu, D. H. Zhou, *Remaining useful life estimation – A review on the statistical data driven approaches*, *European Journal of Operational Research*, vol. 2013, no. 1, pp. 1-14, Aug. 2011.
- [6] M. Braunović, V. V. Konchits, N. K. Myshkin, *Fundamentals of Electrical Contacts*, CRC Press, 2006.
- [7] A. H. A. Bakar, H. A. Illias, M. K. Othman, H. Mokhils, *Identification of failure root causes using condition based monitoring data on a 33 kV switchgear*, *El. Power and Energy Systems*, vol. 47, pp. 305-312, May, 2013.
- [8] S. Natti, M. Kezunovic, *Assessing circuit breaker performance using condition-based data and Bayesian approach*, *El. Power Systems Research*, vol. 81, no. 9, pp. 1796-1804, Sep. 2011.
- [9] A. Janssen, D. Makareinis, C. E. Sölver, *International Survey on Circuit-Breaker Reliability Data for Substation and System Studies*, *IEEE Trans. Power Delivery*. vol. 29, pp. 808-814, Apr. 2014.
- [10] P. Sun, H. Jiang, H. Yu, X. Huang, Y. Sun, X. Wang, *Reliability evaluation of high voltage circuit breaker based on IFAHP and GA*, *ICAEEES*, Nov. 2015.
- [11] J. F. Boudreau, S. Poirier, *End-of-life assessment of electric power equipment allowing for non-constant hazard rate – Application to circuit breakers*, *El. Power and Energy Systems*, vol. 62, pp. 556-561, Nov. 2014.
- [12] X. Zhang, E. Gockenbach, Z. Liu, H. Chen, L. Yang, *Reliability estimation of high voltage SF6 circuit breakers by statistical analysis on the basis of the field data*, *El. Power System Research*, vol. 103, pp. 105-113, Oct. 2013
- [13] L. Jian, T. Tianyuan, *LS-SVM based substation circuit breaker maintenance scheduling optimization*, *El. Power and Energy System*, vol. 64, pp. 1251-1258, Jan. 2015.
- [14] G. Balzer, F. Heil, P. Kirchesch, R. Meister, C. Neumann, *Evaluation of failure data of HV circuit-breakers for condition based maintenance*, *CIGRE*, Paris, report A3-305, 2004.
- [15] T. M. Lindquist, L. Bertling, R. Eriksson, *Circuit breaker failure data and reliability modelling*, *IET Gen., Transm. & Distrib.* vol. 2, no. 6, pp. 813-820, Nov. 2008.
- [16] ABB Switzerland Ltd, *Substation Reliability Management Services*, 2016, www.abb.com/substation-service
- [17] D. Nack, *Reliability of Substation Configurations*, Iowa State University, 2005.
- [18] S. H. Kim, D. J. Lee, *Substation Reliability Evaluation Considering the Failure Events*, *IOP Conf. Ser, Earth Environ. Sci.* 159, 2018.
- [19] C. J. Zapata, A. Alzate, M. A. Ríos, *Reliability Assessment of Substations using Stochastic Point Processes and Monte Carlo Simulation*, *IEEE PES General Meeting*, July 2010
- [20] F. Wang, *Reliability Evaluation of Substations Subject to Protection Failures*, Delft University of Technology, Netherlands, July 2012.
- [21] R. Billington and G. Lian, *Monte Carlo Approach to Substation Reliability Evaluation*, *IEE Proceedings-C*, Vol. 140, No. 2, March 1993.

- [22] Common specifications for high-voltage switchgear and controlgear standards, International standard IEC 60694, Edition 2.2, 2002-01
- [23] Operating manual for medium voltage medium oil circuit breakers for internal assembly, Minel, Serbia, 1984
- [24] T. Suwanasri, M. T. Hlaing, C. Suwanasri, *Failure Rate Analysis of Power Circuit Breaker in High Voltage Substation*, GMSARN International Journal 8 (2014) 1 – 6.
- [25] J. Z. Sikorska, M. Hodkiewicz, L. Ma, Prognostic modelling options for remaining useful life estimation by industry, *Mech. Syst. and sign. Process.*, vol. 25, no. 5, pp. 1803-1836, Jul. 2011.
- [26] W. Li, J. Zhou, J. Lu, W. Yan, *A Probabilistic Analysis Approach to Making Decision on Retirement of Aged Equipment in Transmission Systems*, *IEEE trans. on power delivery*, vol. 22, pp. 1891–1896, no. 3, July 2007.
- [27] J. Nahman, V. Mijailović, *Razvodna postrojenja*, Beograd, 2005

SUMMARY

METHODOLOGY FOR CIRCUIT BREAKERS REMINING USEFUL LIFE ASSESSMENT

In this paper, new methodology for circuit breaker (CB) replacement time is introduced. Method is based on statistical analysis of gathered data from CB's exploitation, and on the influence of CB replacement on power stations reliability. Economical influence of CB replacement on power stations reliability is also analyzed with costs of each action. Gathered data covers 427 minimum oil CB's of 35kV and 10kV from period of 10 years.

Voltage drop values from all CB's were analyzed using Weibull probability distribution and power stations reliability is determined by minimal path and minimal cut methods. That way, influence of CB's condition on power stations reliability is assessed. Example of this method is shown on 35/10kV power station.

Power stations reliability is analyzed through 5 different scenarios of CB's replacement, with cost of each action. At the end, discounted costs of future investments for each action are calculated.

For the power station in this example results are showing best scenario with power transformers CB's replacement.

Key words: *circuit breaker, reliability, remaining useful life, voltage drop, Weibull distribution*