

Primena veštačke inteligencije u monitoringu i dijagnostici visokonaponskih prekidača

Mileta Žarković, Zlatan Stojković, Jovan Mikulović

Energetika/Katedra za elektroenergetske sisteme

Univerzitet u Beogradu Elektrotehnički fakultet

Beograd, Srbija

mileta@etf.rs, zstojkovic@etf.rs, mikulovic@etf.rs

Sadržaj—U radu je predstavljen pregled postojećih metoda za monitoring i dijagnostiku prekidača sa posebnim akcentom na identifikovanje najbitnijih indikatora stanja i određivanje njihovih graničnih vrednosti. Na osnovu takvih podataka razvijene su nove metode za određivanje pokazatelja stanja prekidača na bazi veštačke inteligencije. Fazi logika je primenjena za formiranje fazi ekspertskih sistema koji ukazuju na stanje: kontakata prekidača, komore i medijuma za gašenje električnog luka i pogonskog mehanizma. Nenadgledano mašinsko učenje je primenjeno kroz *k-means* metodu klasterovanja za klasifikovanje i podelu ispitivanih visokonaponskih prekidača u grupe sa određenom verovatnoćom kvara. Rezultati i metode mogu poslužiti za praćenje stanja visokonaponskih prekidača i donošenje odluka o njihovom održavanju, remontu ili zameni.

Ključne reči—visokonaponski prekidač; dijagnostika; fazi logika; mašinsko učenje

I. UVOD

Pouzdanost snabdevanje električnom energijom je cilj svakog elektroenergetskog sistema (EES). Na pouzdanost rada EES-a u velikoj meri utiče stanje visokonaponske opreme. Karakteristike visokonaponske opreme se menjaju usled mehaničkih, električnih, atmosferskih i hemijskih naprezanja i usled toga povećavaju gubitke električne energije, vreme prekida rada EES-a i rizik od havarije skupe elektroenergetske opreme. Visokonaponski prekidač je rasklopni element koji služi za uspostavljanje, trajno provođenje i prekidanje struja. Prekidanje struja se vrši pri uobičajnim manipulacijama i pojavi kratkog spoja u EES-u. Prekidanjem struja kratkog spoja prekidač štiti sve elemente EES-a od havarija i zato je njegov ispravan rad jako bitan za pouzdanost EES-a. Održavanje elemenata EES-a pa i prekidača može biti korektivno, preventivno i održavanje na bazi pouzdanosti [1]. Trenutno u literaturi [2] je aktuelno održavanje prema stanju i pouzdanosti (*reliability centered asset management* – RCAM). Problem monitoringa i dijagnostike elemenata EES-a jeste određivanje stanja i donošenja odluke o prioritetu njihovog održavanja, remonta ili zamene. Monitoring visokonaponskih prekidača nije u toj meri razvijen kao monitoring energetskog transformatora ali takođe pruža dosta mernih metoda i podataka koji mogu biti iskorišćeni za dijagnostiku. Radovi [3]-[8] koji se bave dijagnostikom visokonaponskih prekidača

uglavnom koriste rezultate pojedinačnih metoda monitoringa bez sagledavanje objektivne slike stanja prekidača.

U ovom radu je korišćena veštačka inteligencija u cilju kombinacije rezultata različitih mernih metoda *on-line* i *off-line* monitoringa prekidača radi njegove pravilne dijagnostike. Fazi logika iz domena veštačke inteligencije je primenjena u cilju utvrđivanja stanja i verovatnoće kvara visokonaponskog prekidača. Formirani su fazi ekspertski sistemi za kontakte prekidača, komore i medijum za gašenje električnog luka i pogonski mehanizam. Nenadgledano mašinsko učenje je takođe primenjeno radi analize prikupljenih podataka monitoringa prekidača. Primenjena je *k-means* metoda klasterovanja za klasifikovanje i podelu ispitivanih visokonaponskih prekidača u grupe sa određenom verovatnoćom kvara. Takvi rezultati su poređeni sa rezultatima primene fazi logike.

U drugom poglavlju ovog rada prikazani su najbitniji identifikatori stanja prekidača i njihove orijentacije i granične vrednosti koje su prikupljene iz različitih standarda i preporuka radnih grupa CIGRE i CIRED. Treće poglavlje rada se odnosi na primenu fazi logike. Četvrto poglavlje rada predstavlja osnove i primenu mašinskog učenja. Rezultati primene metoda veštačke inteligencije su predstavljeni u petom poglavlju ovog rada, a zaključci su dati u šestom poglavlju.

II. IDENTIKATORI STANJA VISOKONAPONSKIH PREKIDAČA

Visokonaponski prekidač treba da obezbedi uspešno prekidanje električnog kola i brzo gašenje električnog luka, uz minimalne sklopne prenapone. Nezavisno od vrste prekidača postoje tri osnovna dela prekidača koja su bitna za njegov ispravan rad: komora za gašenje luka, izolator i pogonski mehanizam. Prekidači se dele na osnovu komore za gašenje električnog luka, tj. medijuma za gašenje na: uljne, malouljne, pneumatske, vakumske i SF6 prekidače. Pogonski mehanizam prekidača može biti opružni, pneumatski i hidraulični.

Visokonaponski prekidač je tokom eksploatacije izložen različitim vrstama naprezanja, pri čemu se njegov životni vek skraćuje. Pravilnim izborom odgovarajućih dijagnostičkih metoda aktivnosti održavanja mogu se prilagoditi stvarnom stanju prekidača. Dijagnostičke metode ispitivanja visokonaponskih prekidača su:

- merenje otpornosti izolacije,

- provera: dielektrične čvrstoće ulja, stepena vakuma ili gustine SF6 gasa,
- provera položaja kontakata u stanju otvoreno – zatvoreno,
- provera hoda kontakata snimanjem dijagrama prostor – vreme,
- merenje struje kalema za uključenje i isključenje,
- merenje vremena startovanja pogonskog mehanizma i
- provera broja operacija i merenje kontaktne otpornosti.

Na životni vek prekidača najveći uticaj imaju broj sklopnih operacija i veličine struja pri prekidima kratkih spojeva. Životni vek prekidača je za različite tipove prekidača drugačiji [4]:

- pneumatski prekidači: 41 ± 6 godina ($110 \text{ kV} < U_n < 345 \text{ kV}$) i 40 ± 6 godina ($345 \text{ kV} < U_n$)
- uljni prekidači: 42 ± 6 godina ($110 \text{ kV} < U_n < 199 \text{ kV}$), 41 ± 6 godina ($200 \text{ kV} < U_n < 275 \text{ kV}$) i 38 ± 5 godina ($345 \text{ kV} < U_n$) i
- SF6 prekidači: 43 ± 6 godina ($110 \text{ kV} < U_n < 199 \text{ kV}$), 42 ± 6 godina ($200 \text{ kV} < U_n < 275 \text{ kV}$) i 42 ± 6 godina ($345 \text{ kV} < U_n$).

Dozvoljeni broj sklopnih operacija varira od tipa prekidača, a maksimalni broj operacija (n_o) se utvrđuje mehaničkim testovima i iznosi do 10000. Takođe je bitna i veličina struje koja se prekida, pa se pored broja sklopnih operacija često beleži i kumulativna struja isključenja. Kumulativna struja je veoma korisna jer pohabanost kontakata prekidača kao i stanje medijuma za gašenje električnog luka veoma zavise od nje. Broj operacija se pre svega memoriše radi utvrđivanja mehaničkih oštećenja kontaktnih površina polova koje se oštećuju pri svakom sklapanju prekidača. Pri tome, stepen oštećenja kontakata zavisi od toplotnog impulsa, pa oštećenje raste s kvadratom struje koju polovi prekidaju. Životni vek prekidača veoma zavisi od broja isključenja i amplitude struja kratkog spoja. Svaki prekidač mora da zadovolji sledeći aproksimirani uslov:

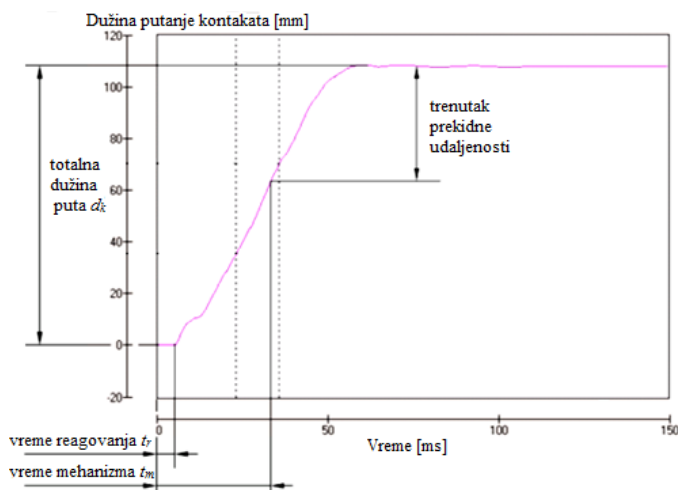
$$\Sigma n \cdot I_{ks}^2 \leq 20000 \quad (1)$$

gde je n – broj prekinutih struja, a I_{ks} – struja kratkog spoja u [kA]. Starenje, habanje kontakata i korozija stvaraju 50% neuspešnog reagovanja prekidača. Loši kontakti lako se uočavaju termovizijskim pregledom. Povećanje otpornosti kontakata dovodi do povećanog zagrevanja i toplih mesta na prekidaču koji se identifikuju temperaturama pregrevanja. Merenje kontaktne otpornosti (R_k [$\mu\Omega$]) se vrši pre svega pomoću jednosmerne struje za sve tri faze. Uobičajan način da se otpornost proceni jeste da se poredi sa vrednostima od preostale dve faze. Ako odstupanje (ΔR_k) prelazi vrednost od 50% potrebno je izvršiti popravku prekidača. Ovo merenje predstavlja merenje otpornosti glavnog strujnog kruga i ključno je za provođenje struje u zatvorenom položaju.

Zbog malog broja kvarova izolacije prekidača dijagnostika se ne bavi tom problematikom, pa se merenja povratnog napona i I_{gd} u praksi gotovo i ne primenjuju. Puno više pažnje se posvećuje ispitivanju izolacionih karakteristika medijuma za gašenje električnog luka. Najsavremeniji prekidači jesu SF6 prekidači pa se kao medijum za gašenje razmatra SF6 gas. U radu je predstavljena dijagnostika stanja prekidača koja se odnosi na SF6 gas kao medijum za gašenje električnog luka. Glavne karakteristike gasa su: koncentracije vlage i vazduha u SF6 gasu, gustina gasa, dielektrična čvrstoća gasa, temperatura i pritisak gasa. Ove karakteristike su međusobno zavisne, a uređaji sa senzovima koji su razvijeni za monitoring karakteristika SF6 gasa mere njegovu temperaturu, pritisak i curenje gasa. Opseg mogućih vrednosti temperature gasa (θ_{SF6}) je od $-30 \text{ }^\circ\text{C}$ do $100 \text{ }^\circ\text{C}$ [3]. Donja i gornja granična vrednost temperature su $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ i $110 \text{ }^\circ\text{C}$. Dozvoljeno curenje gasa (Δp) se kreće u granici 0,5 % do 1 % po godini [3]. Ovakav gubitak gasa je posledica nesavršenosti zaptivenosti komore za gašenje luka. Mesto curenja gasa se najčešće i najlakše uočava termovizijskim pregledom. Pritisak gasa (p) se meri manometrom i njegov normalni opseg je od 6,25 bara do 7,77 bara. Granične vrednosti pritiska su 5,98 i 8,05 bara [3]. Provera curenja i pritiska gasa se direktno odnosi na proveru zaptivenosti komore prekidača. Takođe pri velikom pritisku SF6 gas nema sposobnost da ugasi luk jer prelazi u tečno stanje. Još jedan važan parametar je gustina (ρ) SF6 gasa koja se pomoću densimetra poredi. Vrednosti gustine SF6 gasa kreću se u opsegu $45\text{--}50 \text{ kg/m}^3$ [3].

Najčešći kvarovi na prekidaču nisu kvarovi izolacije već mehanički kvarovi i kvarovi u upravljačkim kolima. Najučestaliji kvar prekidača jeste otkaz kalema za uključenje ili isključenje, pa se njegovom monitoringu najviše pažnje i posvećuje. Snimanjem hoda kontakata, hodograma, proverava se funkcionalnost pogonskog mehanizma. Analiza hodograma se zasniva na poređenju snimljenih kriva sa referentnim krivama ispravnog prekidača koje su dobijene od proizvođača ili snimljene pri prijemnom ispitivanju. Pri ovom poređenju ne postoji nijedna kvantitativna veličina za poređenje osim subjektivnog vizuelnog pregleda. Da bi se uzeo u obzir uticaj ispitivanja hodograma na ukupno stanje prekidača, razmatra se dužina putanje položaja kontakata i jednovremenost polova prekidača. Udaljenost koju kontakt prelazi za vreme kompletne sklopne operacije zatvaranja se može izračunati na osnovu snimljenog hodograma i poznavanja brzine kontakata. Senzori koji mere brzinu kontakata (v_k [m/s]) se ugrađuju u uređaje za *on-line* monitoring. Donja i gornja granična brzina sklopne operacije su 3,1 m/s i 5,6 m/s. Granice dozvoljene dužine puta kontakata (d_k [mm]) su 190 mm i 213 mm. Ako je vreme isključenja jednog pola kraće onda će on kao najbrži pol trpeti duža dielektrična naprežanja. Usled toga moguće je i ponovno paljenje električnog luka. Jednovremenost između polova se proverava upoređivanjem vremena isključenja i uključanja sva tri pola. Jednovremenost pri isključenju je važnija nego pri uključanju. Dozvoljena vremena rasipanja (Δt [ms]) između polova prekidača zavise od proizvođača. Za proizvođača *Siemens* dozvoljeno vreme rasipanja je 3 ms pri isključenju i 2 ms pri isključenju prekidača, dok su kod proizvođača *Areva* 5 ms i 3 ms, respektivno. Za najkritičniju vrednost u oba slučaja sklopne operacije je izabrano minimalno dozvoljeno odstupanje od 2 ms. Energija za pokretanje mehanizma

prekidača je potencijalna energija motorno opružnog pogona. Osnovni zadatak motorno opružnog pogona je i da obezbedi prenos energije iz opruge na kontakte da bi se oni otvarali i zatvarali u graničnim intervalima vremena. Duže vreme isključenja uzrokuje sporije uspostavljanje dielektrične čvrstoće prostora kontakata prekidača. Kao posledica moguće je ponovno paljenje električnog luka. Svako veće odstupanje u vremenu uključivanja ili isključenja od projektovanog, nominalnog, vremena je prvi indikator da postoji poremećaj u mehaničkom radu prekidača, koji za posledicu ima neispravno gašenje luka [5]. Predugačak proces uključivanja i isključenja prekidača ukazuje na manjak energije motorno opružnog pogona. Prevelika energija dovodi do većih mehaničkih naprezanja prekidača i mogućih sudara kontakata. Manja energija motorno opružnog pogona ukazuje na manju prekidnu moć i sporija vremena uključivanja i isključenja prekidača. Vremena sklopnih operacija su takođe u direktnoj vezi sa hodogramom kontakata. Uz pomoć snimljenog hodograma i brzine kontakata moguće je proračunati i vreme reagovanja (t_r [ms]) prekidača. Vreme reagovanja predstavlja vreme od reakcije opruge do početka pomeranja kontakata prekidača. Minimalno dozvoljeno vreme reagovanja prekidača je 1 ms, a maksimalno 19 ms. Vreme koje se takođe definiše je vreme mehanizma (t_m [ms]) prekidača. Vreme mehanizma je vreme koje protekne od reakcije opruge do sretanja lučnih kontakata. Ovaj trenutak se naziva i trenutak prekidne udaljenosti (Sl. 1). Prekidna udaljenost se definiše kao udaljenost na hodogramu za vreme koje su lučni kontakti sastavljeni, a glavni kontakti odvojeni. Dozvoljen opseg vremena mehanizma je od 51 do 76 ms. Vreme natezanja opruge (t_o [ms]) se takođe meri i normalni opseg vrednosti je od 18 ms do 40 ms. Sve granične vrednosti definisanih vremena su za operaciju zatvaranja kontakata. Vreme uključivanja je uvek veće od vremena isključenja jer se mehanizmu za uključivanje suprotstavlja opruga za isključenje prekidača i prigušni mehanizam prekidača koji treba da apsorbuje veliku energiju pri zaustavljanju kontakata prekidača prilikom uključivanja. Osnovni zahtevani ciklus sklopnih operacija od prekidača je O-0,3 s-C-O: isključenje (O) – 0,3 s pauza – uključivanje (C) – isključenje (O).



Slika 1. Snimljena kriva hodograma pri zatvaranju kontakata [6]

Dozvoljena odstupanja operacionih vremena koja su propisali proizvođači [3] za visokonaponske prekidače su:

- *Siemens* – dozvoljeno odstupanje je ± 7 ms pri uključivanju prekidača i ± 3 ms pri isključenju prekidača,
- *Areva* – dozvoljeno odstupanje je ± 10 ms pri uključivanju prekidača i ± 3 ms pri isključenju prekidača i
- *ABB* – dozvoljeno odstupanje je ± 2 ms pri isključenju dok se za uključivanje deklarise samo maksimalno vreme od 70 ms.

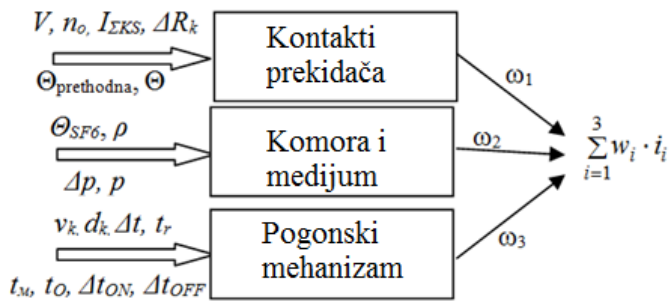
Granična vrednost dozvoljenih odstupanja vremena operacije uključivanja (Δt_{ON} [ms]) izabrana je ± 7 ms, a isključenja (Δt_{OFF} [ms]) ± 2 ms. Ove vrednosti su izabrane kao kritičniji slučajevi čijim se odabirom stvaraju granične vrednosti na strani sigurnosti. U Tab. I su sistematično prikazani parametri i njihove granične vrednosti koje su uzete u obzir kod formiranja fazi modela prekidača.

III. FAZI EKSPERTSKI SISTEM

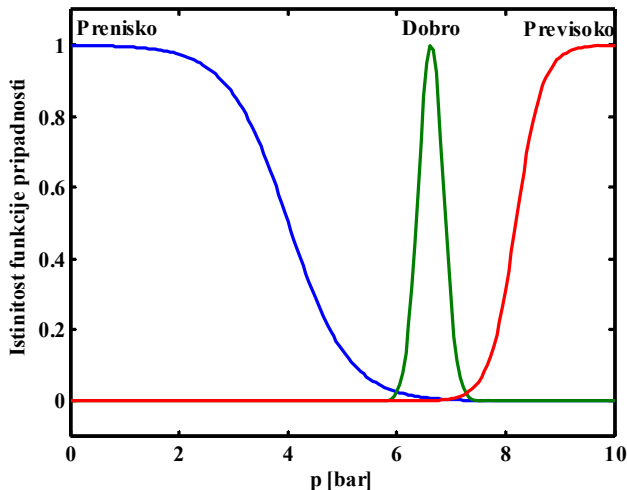
Primena i implementacija fazi logike u dijagnostiku elemenata EES-a je predstavljena u radovima [9]-[10]. U ovom radu pažnja je obraćena na visokonaponski prekidač čiji monitoring daje petnaest ulaznih podataka (Tab. I). Dodatni ulazni podaci su životni vek (V), temperature sadašnjeg (θ) i prethodnog pregrevanja ($\theta_{prethodna}$) kao rezultat termografije prekidača. Jako je teško formirati jedinstveni fazi ekspertski sistem sa velikim brojem ulaznih podataka i pri tome zadati adekvantna fazi pravila. Iz tog razloga ulazi su podeljeni u tri grupe koje će ukazivati na stanje kontakata, komore i medijuma za gašenje električnog luka i pogonskog mehanizma SF6 prekidača. Tri grupe se odnose na tri fazi ekspertski pod sistema SF6 prekidača (Sl. 2). Pri formiranju fazi ekspertskih pod sistema potrebno je izvršiti fazifikaciju ulaza u skladu sa graničnim vrednostima ulaznog parametra. Na Sl. 3 je predstavljena fazifikacija ulaza pritisak gasa SF6 čije su funkcije pripadnosti ulaza u skladu sa graničnim vrednostima 5,98 i 8,05 bara. Slično, fazifikacija je izvršena i za ostale ulaze u skladu sa Tab. I. Funkcije pripadnosti za treći ekspertski sistem se mogu naslutiti sa Sl. 4.

TABELA I. ORIJENTACIONE GRANIČNE VREDNOSTI PARAMETARA KOJI SU KORIŠĆENI ZA ODREĐIVANJE STANJA PREKIDAČA

Parametar	Granična vrednost	Parametar	Granična vrednost
n_o	10 000	v_k [m/s]	3,1 i 5,6
$\Sigma n \cdot I_{kS}^2$ [A ²]	20 000	d_k [mm]	190 i 213
ΔR_k [%]	50	Δt [ms]	2
θ_{SF6} [°C]	-40 i 100	t_r [ms]	1 i 19
Δp [%]	1	t_m [ms]	51 i 76
p [bar]	5,98 i 8,05	t_o [ms]	18 i 40
ρ [kg/m ³]	45 i 50	Δt_{ON} i Δt_{OFF} [ms]	± 7 i ± 2



Slika 2. Ekspertski sistem prekidača sa tri fazi ekspertski podsistema

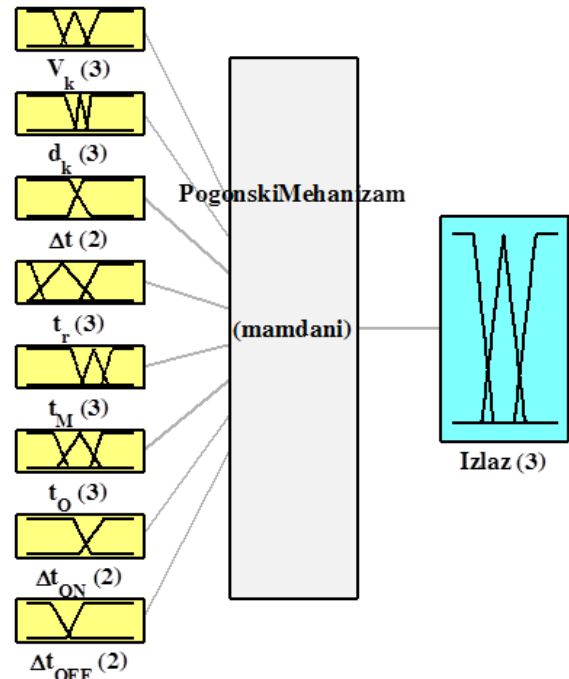


Slika 3. Funkcije pripadnosti za pritisak gasa

Sva tri fazi ekspertski sistema su sa Mamdani tipom zaključivanja, a sva pravila u svim ekspertskim sistemima imaju isti težinski faktor. Metoda defazifikacije u sva tri podsistema je centar gravitacije mase. Defazifikacija formira izlaz svakog podsistema u opsegu 0 do 1 gde 1 označava 100 % verovatnoće kvara podsistema, dela prekidača. Izlazi svakog ekspertskog podsistema se množe sa težinskim faktorima (ω_i). Izlazi pomnoženi sa težinskim faktorima se sabiraju i dele sa brojem fazi podsistema i na taj način se dobija konačni izlaz koji ukazuje na stanje visokonaponskog prekidača. Ako težinski faktori uzimaju svi vrednost jedan, onda su sva tri podsistema podjednako važni. Odabirom vrednosti težinskih faktora moguće je pojačati neki od izlaza podsistema i tako dati na važnosti konkretnom delu prekidača. Pojačanjem težinskih faktora određenog podsistema, odgovarajući deo prekidača ima veći udeo u potpunom stanju prekidača.

IV. NENADGLEDANO MAŠINSKO UČENJE

Veliki broj senzora *on-line* monitoringa beleži vrednosti merenih podataka u različitim vremenskim trenucima. Takođe metode *off-line* monitoringa se obavljaju bar jednom godišnje i njihovi rezultati se takođe skladište. Na osnovu baze podataka mernih metoda moguće je formirati relacije između podataka i otkriti nove i korisne obrazce ponašanja parametara visokonaponskih prekidača.



Slika 4. Fazi ekspertski podsistem za dijagnostiku pogonskog mehanizma prekidača

Za svaki set podataka nije poznato u kakvom je stanju prekidač i njegova verovatnoća kvara. Dakle za set ulaznih podataka nije poznat izlazni podatak pa nije moguće primeniti veštačke neuralne mreže iz domena nadgledanog mašinskog učenja. Moguće je primeniti klaster analizu koja organizuje posmatrane objekte, setove podataka, u smislene klasterne. Ovakva tehnika nenadgledanog mašinskog učenja je disciplina koja omogućava računarima da uče bez eksplicitnog programiranja. Algoritmi iz ove grupe omogućavaju rešavanje problema bez prethodnog predznanja o tome kakvi rezultati treba da budu. Nakon ustanovljene skrivene strukture, odnosno zakonitosti u podacima, algoritam razvrstava ispitivane visokonaponske prekidače u grupe sa određenom verovatnoćom kvara. Klasteri setova podataka mogu biti formirani prema homogenosti unutar klastera i heterogenosti između klastera. U ovom radu setovi podataka su podeljeni u četiri klastera. Prvi klaster je označen žutom bojom i odnosi se na verovatnoću kvara do 25 % i zahteva najkasniju intervenciju (Sl. 5 i 6). Četvrti klaster je označen plavom bojom i zahteva što hitniju intervenciju. Da bi se uopšte sprovela analiza grupisanja u klasterne, neophodno je definisati mere sličnosti dva seta na osnovu njihovih karakteristika pomoću euklidskog rastojanja:

$$d_E(x, y) = \|x - y\| = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} = d_E(y, x) \quad (2)$$

gde su $x = x_1, \dots, x_n$ i $y = y_1, \dots, y_n$ vrednosti atributa dva seta dužine n . Za optimalne performanse, klaster algoritmi zahtevaju normalizovanje podataka, odnosno njihovih numeričkih vrednosti, kako bi se sprečilo da atributi sa većim opsegom imaju i veći uticaj na rezultate. Normalizovane

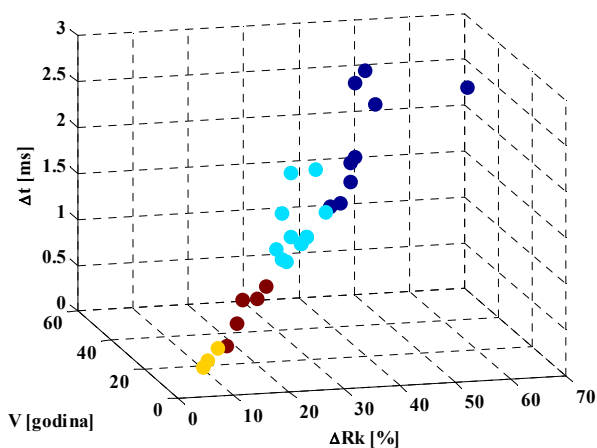
vrednosti su u opsegu [0,1], a u radu je normalizacija definisana kao:

$$x^* = \frac{x - \min(x)}{\text{range}(x)} = \frac{x - \min(x)}{\max(x) - \min(x)} \quad (3)$$

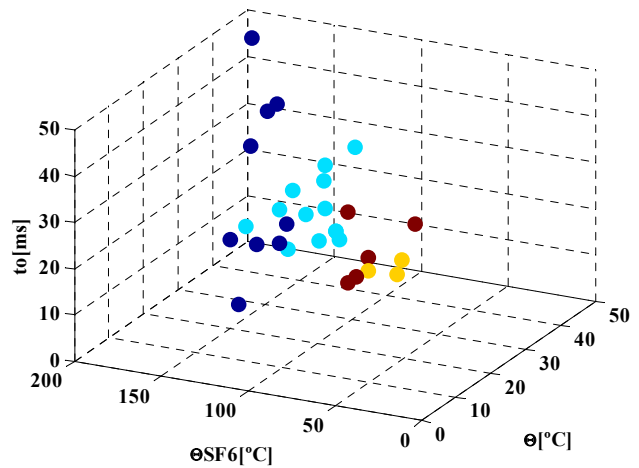
Nehijerarhijsko grupisanje započinje određivanjem inicijalnog centra za svaki od klastera. Zatim se određuje euklidsko odstojanje između svakog objekta i centra svakog klastera. Objekti se lociraju u klastere kojima su najbliži. Nakon pridruživanja objekta klasteru, izračunavaju se koordinate centra klastera iz koje je objekat „otišao” i klastera kojoj se objekat „pridružio”. Ponovo se za svaki objekat izračunava njegovo odstojanje od centra susjednih klastera i vrši se preraspodela setova podataka između grupa sve do zaustavljanja iterativnog procesa. Kriterijumi zaustavljanja mogu biti: ponavljanje sukcesivnih rešenja, dostizanje maksimalnog broja iteracija ili postizanje zadate homogenosti. Najčešće korišćena metoda nehijerarhijskog klasterovanja je *k-means* method srednjih vrednosti. Kao uslov zaustavljanja iterativnog procesa *k-means* algoritma koristi se minimizacija sume kvadrata grešaka (*SSE*). Za svaki set podataka greška je odstojanje do najbližeg centra klastera:

$$SSE = \sum_{i=1}^K \sum_{x \in C_i} d_E^2(m_i, x) \quad (4)$$

gde je x tačka u klasteru C_i , a m_i reprezentativna tačka u klasteru C_i koja odgovara centru klastera. Pomenuta metoda je realizovana primenom programskog alata MATLAB [11] na bazi podataka od 30 ispitivanih SF6 visokonaponskih prekidača. Rezultati primene metode su predstavljeni na Sl. 5 i 6, gde su žutom bojom označeni setovi podataka sa verovatnoćom kvara 0-25 %, crvenom 25-50 %, svetlo plavom 50-75 % i tamno plavom 75-100 %. Na taj način ispitivani SF6 prekidači su podeljeni u četiri grupe prema prioritetu održavanja.



Slika 5. Prikaz rezultata izvršenja *k-means* metode klasterovanja



Slika 6. Prikaz rezultata izvršenja *k-means* metode klasterovanja

V. REZULTATI

Formirani fazi ekspertski podsistemi su testirani na primeru tri visokonaponska SF6 prekidača. Rezultati kompletnih ekspertskih sistema jasno ukazuju na redosled u prioritetu održavanja. Rezultati pojedinačnih podsistema ukazuju na najkritičnije delove prekidača i tako skraćuju vreme ispitivanja i pronalazjenja kvara visokonaponske rasklopne opreme. Kao što je i očekivano najugroženiji su kontakti drugog prekidača usled velikog broja sklopnih operacija. Ujedno i fazi ekspertski sistem i metoda sa nenadgledanim mašinskim učenjem ukazuju da je drugi prekidač najugroženiji sa preko 70 % verovatnoće kvara (Tab. II).

VI. ZAKLJUČAK

Za potrebe monitoringa i dijagnostike stanja visokonaponskih prekidača potrebno je vršiti što veći broj *on-line* merenja i statističku analizu što većeg broja relevantnih pokazatelja stanja. U ovu svrhu se može koristiti predstavljena metoda na bazi fazi logike i nenadgledanog mašinskog učenja, koje u odnosu na ostale metode nude objektivnost i integraciju znanja eksperata. Formirani ekspertski sistemi i *k-means* metoda mogu brzo i automatizovano da rade sa postojećim ulaznim indikatorima ispitivanja visokonaponskih prekidača. Predstavljene metode ukazuju na hitnost intervencije i mogu upozoriti menadžment (elektroinženjere) o potrebi i pravilnom redosledu održavanja ispitivanih visokonaponskih prekidača.

Dalja istraživanja u okviru predstavljenih metoda se odnose na modifikacije u skladu sa ulaznim podacima. Veći broj merenja ulaznih podataka olakšaće testiranje sistema i formiranje adekvatne baze pravila. Takođe, statistika merenja ulaznih podataka omogućiće adekvatnije formiranje funkcija pripadnosti i podele klastera. Ovo se odnosi na to da je za pojedine proizvođače prekidača potrebno prikupiti što veći broj podataka i formirati što adekvatnije jedinstvene fazi ekspertске sisteme i baze podataka.

TABELA II. REZULTATI PRIMENE FAZI EKSPERTSKIH SISTEMA I
K-MEANS METODE

Prekidač	prvi	drugi	treći
V [godina]	20	28	6
$\theta_{\text{prekidača}}$ [°C]	15	24	0
θ [°C]	25	29	10
n_o	6000	9000	3000
$\Sigma n \cdot I_{ks}^2$ [A ²]	8000	19000	14000
ΔR_k [%]	40	60	10
θ_{SF6} [°C]	60	100	80
Δp [%]	0,6	0,9	0,1
p [bar]	6	7,9	6,5
ρ [kg/m ³]	46	49	47
v_k [m/s]	3,2	5,9	4,1
d_k [mm]	193	215	205
Δt [ms]	1,98	2,5	0,1
t_r [ms]	1	18	15
t_M [ms]	49	79	55
t_O [ms]	19	35	25
Δt_{ON} [ms]	3,5	6,5	1
Δt_{OFF} [ms]	1,5	2,1	0,5
Kontakti prekidača	0,488	0,886	0,35
Komora i medijum prekidača	0,338	0,609	0,133
Pogonski mehanizam	0,705	0,705	0,373
Tri podsistema	0,510	0,733	0,285
<i>k-means</i> metoda [%]	50-75	75-100	0-25

ZAHVALNICA

Autori zahvaljuju Ministarstvu za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije koje je omogućilo izradu ovog rada u okviru Projekata III 42009 Pametne mreže i III 45003 Optoelektronski nanodimenzioni sistemi – put ka primeni, Podprojekat: Nanostrukturni opto-elektronski senzorski sistemi. Drugi autor zahvaljuje Fondaciji "Alexander von Humboldt", Bon, SR Nemačka, na celokupnoj podršci njegovom naučno-istraživačkom radu.

LITERATURA

[1] G. Gavrilovs, "Technical Condition Asset Management of Power Transformers," in 2nd IEEE PES International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies, Manchester, 2011.

- [2] J. Endrenyi, S. Aboresheid and R. Allan, "The Present Status of Maintenance Strategies and the Impact of Maintenance on Reliability," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 16, No. 4, November 2001, vol. 16, no. 4, pp. 638 - 646, 2001
- [3] Siemens, "High voltage Circuit- Breakers: Trends and Recent Developments," Siemens AG, Energy Sector, Erlangen, Germany, 2011.
- [4] CIGE WG 37-27, Ageing of the system – Impact on planning, Paris, December 2000
- [5] IEEE, "IEEE Std C37.10: Guide for Diagnostics and Failure Investigation of Power Circuit Breakers," IEEE, 2002.
- [6] P. Dehghanian, T. Popovic and M. Kezunovic, "Circuit Breaker Operational Health Assessment via Condition Monitoring Data," in North American Power Symposium (NAPS), Pullman, USA, 2014.
- [7] D. Zhang, W. Li, X. Xiong, R. Liao, "Evaluating Condition Index and Its Probability Distribution Using Monitored Data of Circuit Breaker," Electric Power Components and Systems, vol. 39, p. 965–978, 2011.
- [8] E. A. Vianna, A. R. Abaide, L. N. Canha, V. Miranda, "Substations SF6 circuit breakers: Reliability evaluation based on equipment condition," Electric Power Systems Research, vol. 142, p. 36–46, 2017.
- [9] M. Žarković, Z. Stojković, "Artificial intelligence based thermographic approach for high voltage substations risk assessment," IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 9, no. 14, pp. 1935-1945, 2015.
- [10] M. Žarković, Z. Stojković, "Automatizacija termovizijskog postupka u monitoringu i dijagnostici elemenata prenosne mreže," Medunarodni naučno-stručni simpozijum INFOTEH-JAHORINA 2012, Vol. 11, Ref. ENS-2-5, 2012, p p.139-143
- [11] MATLAB®, The Language of Technical Computing, Version 7.11.0 (R2011a), The Math Works Inc., MA, USA, 2011.

ABSTRACT

This paper presents an overview of existing methods for monitoring and diagnostics of circuit breakers with special emphasis on identifying the most important indicators of the state and determining their limit values. Fuzzy logic was applied to form a fuzzy expert systems that indicates the state of: contacts, the fluid for extinguishing the electric arc and the drive mechanism. Unsupervised machine learning was applied through the k-means cluster method for classifying and dividing the examined high-voltage circuit breakers into groups with a certain probability of failure. The results and methods can be used to monitor the state of high-voltage circuit breakers and to make decisions about their maintenance, repair or replacement.

APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELIIGENCE IN THE MONITORING AND DIAGNOSTIC OF HIGH VOLTAGE CIRCUIT BREAKER

Mileta Žarković, Zlatan Stojković, Jovan Mikulović