

PREVENTIVNO ODRŽAVANJE SF_6 PREKIDAČA U DISTRIBUTIVNIM MREŽAMA

-pogonska iskustva-

PREVENTIVE MAINTENANCE OF SF_6 CIRCUIT BREAKERS IN ELECTRICAL DISTRIBUTION NETWORK

-operational experinces-

Vladimir OSTRACANIN, Elektrodistribucija Srbije d.o.o. Beograd, Ogranak Kraljevo
Vladica MIJAILOVIĆ, Fakultet tehničkih nauka, Čačak

KRATAK SADRŽAJ

U radu je dat pregled mera, postupaka i metoda koje se primenjuju u okviru procesa preventivnog održavanja SF_6 prekidača u distributivnim mrežama. Pokazan je generalni proces planiranja preventivnog održavanja u velikim inostranim kompanijama i dat je okvirni pregled parametara pouzdanosti SF_6 prekidača. Navedena su ispitivanja koja se sprovode pre prvog puštanja prekidača u rad, parametri koji određuju stanje prekidača, vremenski intervali u kojima treba vršiti njihovu proveru i redosled sprovođenja pojedinih provera tokom eksploatacije. Takođe, dati su procedure i kriterijumi na osnovu kojih se procenjuje stanje gasa, što je od suštinskog značaja za ispravno funkcionisanje prekidača (čistoća gasa, vlaga u gasu, produkti razlaganja gasa). Neke od ovih procedura su standardizovane, a neke su proistekle iz iskustva korisnika.

Ključne reči: Prekidač, pouzdanost, testiranje, stanje, preventivno održavanje

ABSTRACT

The paper gives an overview of measures, procedures and methods that are applied within the process of preventive maintenance of SF_6 -circuit breakers in electrical distribution network. The general process of preventive maintenance planning in large companies is shown and a tentative overview of the reliability parameters of SF_6 -circuit breakers is given. There are listed the tests that are to be performed before the first commissioning of the SF_6 -circuit breaker, the parameters that determine the state of circuit breaker, the time intervals at which they should be checked and the order of carrying out individual checks during operation. Also, procedures and criteria on the basis of which the gas SF_6 condition is evaluated are given, which is essential for the proper functioning of circuit breaker (gas purity, gas moisture, gas decomposition products). Some of these procedures are standardized and some are derived from user experience.

Key words: Circuit breaker, reliability, testing, condition, preventive maintenance

vladimir.ostracanin@ods.rs, vladica.mijailovic@ftn.kg.ac.rs

UVOD

Elektroprivredna preduzeća neprestano teže smanjenju troškova poslovanja, naročito onih koji su posledica kvarova opreme. Da bi se umanjile posledice kvarova na neprekidnost napajanja potrošača i ograničio negativni uticaj na ispravne delove sistema, ugrađuju se prekidači kojima se vrši sekcionisanje izvoda, sabirnica i dr., tako da je pouzdanost pomenutih elemenata od suštinskog značaja, a što se u eksploataciji obezbeđuje adekvatnim preventivnim održavanjem.

Pouzdanost opreme se ne može proceniti samo na osnovu njene starosti, zato što stanje nekog elementa zavisi od stepena i promenljivosti opterećenja, ambijentalnih uslova, broja sklopnih operacija, stepena sprovedenog preventivnog održavanja i dr.

Definisanje i primena adekvatnog plana preventivnog održavanja kao rezultat ima nizak broj kvarova, odnosno visok nivo pouzdanosti isporuke električne energije. Uz odgovarajuće eksploatacione uslove, između ostalog, starenje opreme će biti usporeno, odnosno biće produžen životni vek. Dostignuti nivo razvoja omogućava da se, uz prihvatljiv nivo troškova, preventivno održavanje sprovodi na osnovu stanja, koje podrazumeva obavljanje niza merenja bitnih parametara i dijagnostičkih ispitivanja. Preventivno održavanje se planira za svaki element pojedinačno, zavisno od njegove starosti, tipa, stepena opterećenja, ambijentalnih uslova i dr.

Do sada, najuspešniji koncept održavanja prekidača, uređaja relejne zaštite i mernih transformatora su razvili u Nemačkoj. Održavanje pomenutih elemenata se sprovodi po RCM-konceptu (*RCM - Reliability Centered Maintenance*).

RCM-koncept održavanja kombinuje stanje elementa i njegovu važnost u mreži, uz poštovanje sledeće procedure:

- utvrđivanje stanja prekidača,
- određivanje važnosti svakog prekidača (konkretno, misli se na posledice koje nastaju zbog ispada posmatranog prekidača iz pogona),
- procena optimalnog nivoa preventivnog održavanja koje treba sprovesti uz uvažavanje stanja i važnosti prekidača.

Stanje prekidača se procenjuje na osnovu starosti, tipa, broja prekidanja struja kvara, broja sklopnih operacija, prethodnog eksploatacionog iskustva sa datom vrstom prekidača, rezultata sprovedenih merenja i iskustva osoblja zaduženog za održavanje. Za svaki od napred navedenih činilaca se određuje težinski faktor (faktor uticaja, obično u opsegu 0-100), kojim se predstavlja važnost svakog činilaca na ukupno stanje prekidača.

Zavisno od procenjenog stanja i važnosti prekidača definisani su kriterijumi na osnovu kojih se određuje obim potrebnih aktivnosti u sklopu preventivnog održavanja. Obično se razmatraju tri mogućnosti: 1) zamena, 2) sitnije opravke, 3) bez ikakvih intervencija.

Radi procene stanja prekidača proveravaju se pogonski mehanizmi, kontakti otpor i ispravnost kontaktne komore i upotrebljenog dielektrika (vakuum, ulje ili gas SF_6).

PRAKSA VELIKIH KORISNIKA

Planiranje preventivnog održavanja SF_6 prekidača

Preventivno održavanje SF_6 prekidača se pažljivo planira, kako zbog velikih troškova koje iziskuju nabavka potrebne opreme i radovi, tako i zbog posledica koje će imati potrošači električne energije, ako održavanje ne bude adekvatno. Sagledavaju se uslovi u kojima prekidač radi, dosadašnja pogonska iskustva sa datim tipom prekidača i pogonska statistika o kvarovima i uočenim nedostacima.

Gas SF_6 ima jedinstvene karakteristike koje ga čine skoro idealnim sredstvom za gašenje luka u rasklopnim aparatima. Dielektrična čvrstoća gasa SF_6 je veća od bilo kog drugog gasa, što je posledica velike molekularne mase, a toplotna provodljivost na nižim temperaturama mu je znatno bolja.

Kao subprodukt razlaganja SF_6 stvara se fluor, gas sa najvećom elektronegativnošću, što dovodi do smanjenja provodljivosti gasa, a što je povoljna osobina.

Tokom eksploatacije, uočeni su sledeći nedostaci SF_6 prekidača:

- Izraženi su problemi sa zaptivanjem, što dovodi do curenja gasa. Neophodna je primena uređaja za monitoring;
- Produkti razlaganja gasa SF_6 su otrovni;
- Periodično čišćenje unutrašnjih delova se mora obavljati u suvom i čistom okruženju;
- Transport, skladištenje i održavanje gasa zahtevaju posebne uslove i uređaje;
- Loša osobina gasa SF_6 je vrednost temperature pri kojoj dolazi do prelaska u tečno stanje (od $-23^{\circ}C$ do $-34^{\circ}C$), što zavisi od vrednosti pritiska. Zbog ove činjenice, u nekim sredinama je potrebno obezbediti održavanje temperature iznad pomenutih vrednosti (obično korišćenjem grejača gasa).
- Pogonski mehanizam SF_6 prekidača zahteva pet puta više energije od pogonskog mehanizma maloulnjih prekidača.

Svi modeli sredjenaponskih SF_6 prekidača mogu da obave 10000 sklopnih operacija u normalnom pogonu pre sprovođenja preventivnog održavanja. Broj prekidanja struje kratkog spoja je znatno manji (nekoliko stotina).

Testiranje prekidača se sprovodi sa ciljem utvrđivanja da oni:

- obezbeđuju predviđenu zaštitu delova mreže od preopterećenja i kratkih spojeva,
- svojim delovanjem sprečavaju širenje poremećaja, kada on nastupi,

- obezbeđuju pouzdanu isporuku električne energije potrošačima, automatskim prebacivanjem na rezervne napojne pravce,
- ispunjavaju ostale predviđene zahteve.

Pouzdanost SF_6 prekidača

Funkcionalno posmatrano, prekidač se može podeliti na sledeće celine:

- komponente na pogonskom naponu (glavni i lučni kontakti, pomoćni otpornici i kondenzatori, glavna izolacija);
- kontrolna i pomoćna kola (komandni namotaji, pomoćni kontaktori i releji, grejači, termostati, osigurači, uređaji za blokiranje) i
- ostale komponente (mehanički prenosnici, aktuatori i prigušne komponente, kompresori, motori, elementi za akumuliranje energije).

Prema anketi CIGRE [1, 2, 3]:

- na komponentama na pogonskom naponu se dogodi $(21 \div 31)\%$ od ukupnog broja kvarova,
- na komponentama koje čine kontrolna i pomoćna kola se dogodi $(20 \div 29)\%$ od ukupnog broja kvarova,
- na ostalim komponentama se dogodi $(43 \div 44)\%$ od ukupnog broja kvarova.

Najčešći uzrok su mehanički problemi. Prikupljeni statistički podaci mogu da posluže kao osnova da se odaberu komponente i parametri koji će biti praćeni.

U 7% slučajeva krupni kvarovi su bili posledica curenja gasa, dok je 40% malih kvarova uzrokovano poremećajem u izolacionom sistemu SF_6 prekidača.

Neotkazivost $R(t)$ prekidača se obično modeluje *Weibull*-ovom raspodelom:

$$R(t) = \exp \left[- \left(\frac{t}{\alpha} \right)^\beta \right] \quad (1)$$

gde su: t - vreme, α - parametar razmere, β - parametar oblika.

Vrednosti pojedinih parametara za svaku od pomenutih celina prekidača su dati u Tabeli 1.

TABELA 1 - PARAMETRI POUZDANOSTI SF_6 PREKIDAČA [1, 8, 9, 11,12]

| Funkcionalna celina | Parametri Weibull-ove raspodele | | Periodičnost kvara T [god] | Intenzitet kvarova λ $\left[\frac{1}{god} \right]$ |
|--------------------------------|---------------------------------|---------|------------------------------|---|
| | α | β | | |
| Komponente na pogonskom naponu | 19,0644 | 2,0676 | 17,1580 | 0,0960 |
| Kontrolna i pomoćna kola | 19,5946 | 1,9474 | 17,6351 | 0,0869 |
| Ostale komponente | 23,7381 | 2,1140 | 21,3643 | 0,0777 |

Degradacioni procesi u prekidaču su posledica naprezanja tokom normalnog pogona, prekidanja i uspostavljanja struja kratkog spoja i starenja. Radi primene ekonomičnog sistema za nadzor kritičan je izbor parametara koji će biti praćeni. Pregled ovih parametara, prema stepenu važnosti, dat je u Tabeli 2.

TABELA 2 - VAŽNOST PARAMETARA PREMA UTICAJU NA STANJE PREKIDAČA [1, 8, 9, 11]

| Važnost | Mala | Umerena | Visoka |
|-----------|---|--|---|
| Parametri | <ul style="list-style-type: none"> - Status kontakata nakon izvršene komande "uključiti/isključiti" - Pomoćni kontaktori i kontrolna kola - Akumulirana energija - Vibracije polova - Struja rasipanja | <ul style="list-style-type: none"> - Gradijent temperature - Parcijalna pražnjenja - Vrednost napona - Gubici na provodnim izolatorima | <ul style="list-style-type: none"> - Pogonske karakteristike glavnih i lučnih kontakata - Kontaktne otpor |

Tokom izvršenja sklopnih operacija luk oštećuje površine kontakata, pri čemu dolazi do njihove oksidacije i stvaranja sloja visoke otpornosti, što može dovesti do stvaranja kontaktnih površina sa veoma visokim temperaturama. Pogonska iskustva ukazuju da kontaktni otpor raste sa porastom broja sklopnih operacija i da to izvesno dovodi do nedozvoljenog porasta temperature.

Statičko merenje kontaktnog otpora ne daje dobru procenu stanja lučnih kontakata. Realni rezultati se dobijaju dinamičkim merenjima pomenutog otpora, jer je omogućena detekcija pohabanosti ili nesimetrije kontakata, praćenjem krive "vreme-vrednost izmerenog kontaktnog otpora".

PREGLED TIPSKIH ISPITIVANJA, PERIODIČNOST I KRITERIJUMI INTERPRETACIJE

Tipično, proizvođači navode parametre koji određuju stanje opreme i intervale u kojima treba vršiti njihovu proveru. Opsege vrednosti pojedinačnih veličina, na osnovu kojih se utvrđuje stanje elementa, definišu sami proizvođači ili strukovni Standardi.

Nakon montaže, a pre puštanja u rad prekidača, preporučuju se sledeća ispitivanja i merenja:

- provera mehaničke ispravnosti,
- merenje otpora izolacije,
- merenje otpora jednosmernom strujom,
- provera pritiska gasa SF_6 u kontaktnoj komori,
- merenje vremena operacije otvaranja i operacije zatvaranja kontakata,
- provera rada opružnog mehanizma,
- provera ispravnosti rada kola za otvaranje i kola za zatvaranje,
- ručna i daljinska provera ispravnosti rada prekidača.

Svi proizvođači definišu intervale u kojima treba sprovoditi provere određenog tipa i obima.

Rutinske provere se vrše svakih šest meseci do godinu dana, ne zahtevaju isključenje prekidača iz pogona, a obuhvataju:

- vizuelni pregled spoljašnjih elemenata prekidača,
- proveru brojača sklopnih operacija,
- proveru manometra,
- detekciju curenja gasa,
- merenje temperature itd.

Malo održavanje se sprovodi svakih (6 ÷ 8) godina, zahteva dovođenje prekidača u beznaponsko stanje i, pored rutinskih provera, obuhvata i:

- detaljnu proveru stanja i funkcionisanja svih komponenti (podсистема) prekidača,
- testiranje prekidača,
- zamenu vidno pohabanih lako dostupnih delova,
- promenu filtera, dolivanje ulja i dopunu gasa (po potrebi).

Veliko održavanje se sprovodi svakih (15 ÷ 20) godina, takođe zahteva dovođenje prekidača u beznaponsko stanje i obuhvata otvaranje čitavog sklopa da bi se proverila unutrašnjost komore za gašenje luka, oklopa i pogonskog mehanizma.

Precizno su definisane dijagnostičke procedure koje se sprovode, bez obzira na tip prekidača koji se ispituje (snimanje karakteristike hoda kontakata, provera namotaja za uključanje i isključenje, statičko i dinamičko merenje kontaktnog otpora, merenje vibracija, provera pogonskog mehanizma, merenje $tg\delta$ i kapacitivnosti).

Prema [4] inspekcijски nadzor prekidača bilo kog tipa u postrojenju sprovodi se svakih 18 meseci. Na osnovu toga se utvrđuje da li potrebno isključenje prekidača iz pogona i angažovanje posebnih timova.

Provera ispravnosti funkcionisanja pogonskog mehanizma SF_6 prekidača, bez obzira na mesto montaže (spolja ili unutra), vrši se:

- svake treće godine za prekidače ugrađene uz sisteme za kompenzaciju reaktivne energije,
- svake šeste godine za prekidače u izvodima.

Održavanje koje ne zahteva otvaranje prekidača se sprovodi:

- svake šeste godine za prekidače ugrađene uz sisteme za kompenzaciju reaktivne energije,
- svake 12. godine za prekidače u izvodima.

Održavanje na osnovu rezultata procene stanja se sprovodi ako:

- nivo parcijalnih praznjenja prelazi dozvoljeni intenzitet ili
- rezultati ispitivanja gasa SF_6 ukazuju da je došlo do njegovog slabljenja ili
- broj izvršenih sklopnih operacija je dostigao propisanu vrednost.

Za SF_6 prekidače je potrebno izvršiti i proveru kvaliteta gasa, odnosno sledeće parametre:

1. Čistoća gasa- neophodna je zbog:

- a) obezbeđenja zahtevane prekidne moći prekidača, i
- b) obezbeđenja dielektrične čvrstoće između otvorenih kontakata prekidača.

- Čistoća gasa jednaka ili veća od 95% je prihvatljiva.

- Ako je čistoća gasa u opsegu (80 ÷ 94,9)% treba izvršiti zamenu prilikom sledećeg testiranja.

- Ako je čistoća gasa manja od 80% prekidač treba povući iz pogona i izvršiti zamenu gasa.

2. Vlaga u gasu- u kombinaciji sa subproduktima razlaganja SF_6 stvara se fluorovodonična kiselina, koja može da uzrokuje probleme u sistemu izolacije. Količina stvorene kiseline je srazmerna koncentraciji vlage.

Kriterijumi interpretacije vezani za koncentraciju vlage su:

- za novu opremu prihvatljiva je koncentracija vlage u opsegu do 50 ppm,

- za opremu u pogonu prihvatljiva je koncentracija vlage u opsegu do 200 ppm,

- ako je koncentracija vlage u opsegu (201 ÷ 400) ppm planirati sušenje gasa tokom sledeće provere,

- ako je koncentracija vlage veća od 400 ppm prekidač treba povući iz pogona i sprovesti sušenje gasa.

3. Produkti razlaganja gasa SF_6 (ovo nije standardna dijagnostička procedura)

Prisustvo sumpor-dioksida (SO_2) je posledica postojanja oksida u gasu, koji su posledica metalnih isparenja tokom gorenja luka. Luk se javlja tokom prekidanja struje (uspešnog ili neuspešnog) i tokom zemljospoja.

Prisustvo sumpor-dioksida (SO_2) ukazuje na:

1) moguće oštećenje glavnih kontakata prekidača ili

2) na postojanje zemljospoja unutar komore prekidača sa uzemljenim kućištem.

Kriterijumi intepretacije vezani za koncentraciju SO_2 su:

- (0 ÷ 250) ppm prihvatljivo,

- (251 ÷ 500) ppm potrebno procesiranje gasa (filtriranje),

- veća od 500 ppm prekidač treba povući iz pogona i tretirati ga kao da je u kvaru.

Prema dokumentu IEC 60480, propisani su zahtevi koje sredstvo za gašenje luka mora da ispuni.

Pregled pomenutih zahteva je dat u Tabeli 3.

TABELA 3- KRITERIJUMI ZA UPOTREBU POJEDINIHX SUPSTANCI ZA GAŠENJE LUKA [1, 5, 6, 10]

| Supstanca | Koncentracija |
|--------------------------|---|
| SF_6 | - Ako se koristi samostalno, u gasnom stanju mora biti veća od 98,5% - Ako se koristi mešavina gasova, koncentracija gasa SF_6 mora biti veća od 99,7% |
| Vazduh | - U gasu SF_6 koncentracija vazduha mora biti manja od $10000 \frac{\mu l}{l}$ (manje od 1% zapremine) - Ako se koristi mešavina gasova, koncentracija vazduha mora biti manja od $2000 \frac{\mu l}{l}$ (manje od 0,2% zapremine) |
| CF_4 | - U gasu SF_6 koncentracija CF_4 mora biti manja od $4000 \frac{\mu l}{l}$ (manje od 0,4% zapremine) - Ako se koristi mešavina gasova, koncentracija CF_4 mora biti manja od $800 \frac{\mu l}{l}$ (manje od 0,08% zapremine) |
| H_2O | Mora biti manja od $200 \frac{\mu l}{l}$ (odnosno manje od 200 ppm (parts per million)) |
| Mineralno ulje | Količina mora biti manja od $10 \frac{mg}{kg}$ |
| Ukupna količina kiseline | Količina mora biti manja od $7 \frac{\mu l}{l}$ |

ZAKLJUČAK

Preventivno održavanje opreme je veoma važan i veoma skup posao. Imajući u vidu broj, važnost i cenu, održavanje prekidača se mora pažljivo planirati. Izložena iskustva i praksa velikih korisnika ukazuju na sledeće:

- vođenje pogonske statistike je neophodno pri planiranju redosleda, obima i tipa preventivnih aktivnosti;
- provera ispravnosti prekidača pre prvog puštanja u rad je od ekstremne važnosti;
- zavisno od broja prekidača, nabavka sistema za procenu stanja može biti veoma isplativa.

LITERATURA

1. G. Balzer et al., "Reliability centered maintenance strategy for MV-substations", proceedings, paper 3.15, CIRED, 1999.
2. G. Balzer et al., "Maintenance and refurbishment strategies for MV substations", 16th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, 2001. Part 1: Contributions. CIRED. (IEE Conf. Publ No. 482)
3. Cigré Working Group A3.06, "International Enquiry on Reliability of HV Equipment, Part 2: HV CB Failure – Final Report 2012"
4. Network Optimisation: Standard for Preventive Maintenance Programs 2015-16 to 2019-2020, Ergon Energy Corporation, Australia, 2020.
5. X. Zhang et al., "Life Management of Circuit Breakers based on Monitoring and Diagnosis", IEEE Electrical Insulation Magazine, Volume: 25 , Issue: 3, May-June 2009.
6. W. Feiming et al., "Test Analysis of Dielectric Recovery Characteristic in High Voltage Circuit Breaker", 4th International Conference on Electric Power Equipment - Switching Technology, 2017.
7. A. Pörtl, M. Lane, "Field Experiences with HV Circuit Breaker Condition Monitoring", Transmission and Distribution Conference and Exposition, Vol. 2, IEEE/PES, 2001.
8. P. Westerlund, "Condition measuring and lifetime modelling of disconnectors, circuit breakers and other electrical power transmission equipment", Doctoral Thesis, KTH Stockholm, Sweden 2017.
9. T. Suwanasri et al., "Failure Rate Analysis of Power Circuit Breaker in High Voltage Substation", International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS), 2014.
10. E. A. L. Vianna et al., "gas circuit breakers reliability estimation, considering likely wear points", 51st International Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2016.
11. E. A.L. Vianna, "Substations circuit breakers: Reliability evaluation based on equipment condition", Electric Power Systems Research 142 (2017) 36–46
12. X. Zhang, E. Gockenbach, "Age-dependent maintenance strategies of medium-voltage circuit-breakers and transformers", Electric Power Systems Research 81 (2011) 1709–1714