



PROCJENA PREOSTALOG ŽIVOTNOG VIJEKA ENERGETSKIH TRANSFORMATORA U MREŽI PRIJENOSNOG PODRUČJA OSIJEK

SAŽETAK

Svaki korisnik energetskih transformatora srednjih i velikih snaga treba imati informacije o preostalom životnom vijeku svojih jedinica, kako bi tijekom eksploatacije donosio valjane i optimalne odluke.

Na većini energetskih transformatora u mreži Prijenosnog područja Osijek izvršena su ispitivanja stupnja polimerizacije papira (DP) u cilju procjene preostalog životnog vijeka, što dugoročno određuje i potrebe nabavke novih jedinica.

Izvršena su i ispitivanja sadržaja furana, ali nije utvrđena povezanost između furana i stupnja polimerizacije papira.

Glavne riječi: energetski transformator, preostali životni vijek, stupanj polimerizacije papira (DP), furani

PREDICTION OF REST OF LIFE FOR POWER TRANSFORMERS IN TRANSMISSION NETWORK FROM PRP OSIJEK COMPANY

ABSTRACT

Every user of power transformers should have information on rest of transformer life, so that he could make good and optimal decision during the service.

On most units of power transformers in network PrP Osijek, paper polymerization degree (DP) and furanics have been tested. Results are indicative for prediction of rest of life, and then determine the necessity of new units in long period.

Correlation between paper polymerization degree and furanics is not found.

Key words: power transformer, rest of life, paper polymerisation degree, furanics

1. UVOD

Za korisnika visokonaponskih postrojenja važno je saznanje koliki je životni vijek pojedinih elemenata postrojenja. Posebno je to važno za energetski transformator, koji je najskuplji, najosjetljiviji i funkcionalno najvažniji dio postrojenja.

Životni vijek transformatora ovisan je o životnom vijeku njegove izolacije, koja se sastoji od tekućih i krutih spojeva organskog porijekla: od transformatorskog ulja i izolacijskog papira. Obje izolacije su podložne fizikalno-kemijskim procesima koji uzrokuju gubljenje početnih svojstava, pa kažemo da izolacija stari.

Uzimanje uzoraka i ispitivanje svojstava transformatorskog ulja je relativno jednostavno, a nakon gubljenja svojstava, na terenu je moguće izvršiti relativno jednostavan tehnološki postupak u cilju poboljšanja karakteristika (sušenje, regeneracija ili zamjena ulja). Cijena tih postupaka može iznositi do 15% vrijednosti transformatora, i prihvatljiva je korisniku.

Naprotiv, papirna izolacija, koja se sastoji od natron i krep papira, ima potpuno drugačije karakteristike.

Uzimanje uzoraka papira na transformatoru nije jednostavno, zahtjeva više radova, vremena i znanja, a reprezentativnost uzorka nije jednoznačna kao kod ulja.

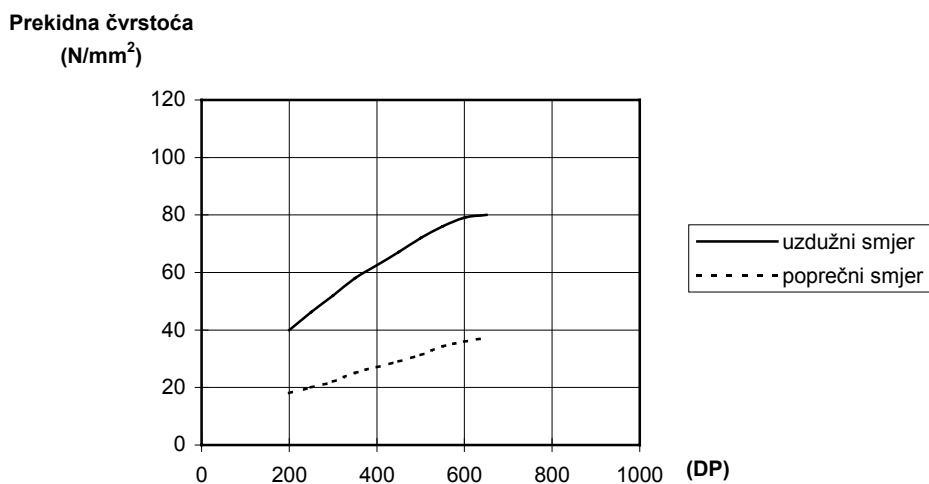
Zamjena papirne izolacije je teoretski moguća, no cijena tog postupka može se procjeniti da iznosi 60 do 80% cijene novog transformatora. U tom slučaju korisniku su upitni gubici u transformatoru, stanje opreme, brtvenog sustava i sl., tako da kratka računica pokazuje da je tada opravdano izvršiti rashod i nabaviti novu zamjensku jedinicu.

Životni vijek transformatora određuje dakle u izolacijskom sustavu ulje-papir stanje papira, i za procjenu preostalog životnog vijeka transformatora neophodno je utvrditi stanje papirne izolacije.

2. STARENJE PAPIRNE IZOLACIJE

Elektrotehnički papir na bazi čiste celuloze je prirodni ugljikovodik, čije su visokopolimerne molekule povezane međusobno u lance. Mehanička svojstva papira proizlaze iz prosječne duljine molekulskog lanca u strukturi papira, a broj jedinica glukoze u lančanim molekulama može iznositi do 2000. Starenje papira u pogonskim uvjetima pod utjecajem temperature, vlage i kisika uzrokuje oksidaciju i hidrolizu, uz posljedicu pucanja lančanih molekula, te razvijanje plinova CO i CO₂ i više spojeva furana.

Skraćanjem lančanih molekula pogoršavaju se mehanička svojstva papira, posebno prekidne čvrstoće, što je prema /L2/ prikazano na slici 1.



Slika 1. Ovisnost prekidne čvrstoće i stupnja polimerizacije (DP)

Starenje papira nije linearni proces. U nestarenoj celulozi nalaze se vrlo dugi, ali zbog toga i temperaturno nestabilni molekulski lanci, koji u početnoj "životnoj" fazi lako pucaju. To uzrokuje brzi pad stupnja polimerizacije, a nakon određene stabilizacije daljnji tijek pucanja lanaca je u većem skladu s normalnim gradijentom starenja.

U pogonskim uvjetima namoti transformatora su izloženi mehaničkim naprezanjima zbog kratkih spojeva u mreži ili iznenadnih preopterećenja, a prisutna je i pojava vibracija uslijed magnetostrikcije. U takvim uvjetima krti papir se lomi, puca i nestaje, a otpornost namota na sile kratkog spoja znatno se smanjuju, što dovodi pogon transformatora u rizično područje.

3. UZIMANJE UZORAKA PAPIRA

Uzimanje uzoraka papira na terenu je osjetljiv, nekada i kompliciran posao, a pokazalo se da je to na nekim konstrukcijskim rješenjima i nemoguće izvesti (u tablici 1. na objektu br.20 nismo mogli uzeti uzorak na terenu, nego tek u tvornici gdje je transformator rashodovan).

Ako se ukaže potreba radova većih zahvata na transformatoru s ispuštanjem ulja i ulaskom u transformator, to je izuzetna prilika za uzimanje uzorka papira i ne smije ju se propustiti.

U većini slučajeva, uzorci papira su uzeti prilikom godišnjih radova na transformatoru (godišnje revizije), postupkom koji je opisan u nastavku.

Gornji dio transformatora potrebno je osloboditi od ulja, što se postiže zatvaranjem ventila na cjevovodu konzervator - kotao i prepumpavanjem ulja iz transformatora u konzervator. Demontira se jedan ili dva fazna SN izolatora, a ako papir na izvodu namota nikako nije dostupan, demontira se VN izolator. Kroz otvor demontiranog izolatora rukom se treba doći do papirne izolacije, jer je u većini slučajeva gornji dio izvoda izvana zaštićen keperom. Potrebno je noktom zakinuti traku natrona ili krep-papira, otkinuti traku oko 3-4 cm dužine, a ako se ostatak trake odmota jednostavno ju treba zavezati u čvor oko izvoda. Demontirani izolator se ponovo postavi i pusti ulje iz konzervatora, te je tako postupak uzorkovanja završen.

Ako na poklopcu postoje otvori za montažu izolatora, što je uobičajeno na većim jedinicama, tada nije potrebna demontaža izolatora nego se uzorak uzima kroz te otvore.

Ne preporučuje se uzimanje uzoraka papira u terenskim uvjetima direktno sa namota, čak i kada je moguć ulazak u transformator. Najbolje je uzeti uzorak sa mjesta gdje postoji višeslojna papirna zaštita, a to su izvodi namota, unutrašnje međuveze, odcjepi regulacijskih izvoda i sl.

Ako je moguće, poželjno je uzeti uzorke sa dva mjesta (npr. sa dva fazna izvoda), kako bi se izbjegla vjerojatnost da se uzme papir sa izvoda na kojem se tijekom eksploatacije vršio popravak i stavio novi papir.

Velika je prednost što je za ispitivanje potrebno vrlo mali uzorak, mase 0,03 do 0,1 gram. Uzorak se stavi u plastičnu vrećicu i naznače osnovne karakteristike transformatora, te mjesto sa kojega je uzorak uzet.

Nije potrebna nikakva posebna pažnja u dostavi uzorka do laboratorija.

Reprezentativnost tako uzetih uzoraka može biti upitna, ali u terenskim uvjetima nemamo mogućnost izbora. Prema dosadašnjem iskustvu, uzorci papira sa izvoda su upotrebljivi za približnu procjenu preostalog životnog vijeka transformatora.

Za potrebe ovih ispitivanja, uzimanje uzoraka papira na svih 26 jedinica izvršila je ekipa za transformatore Prijenosnog područja Osijek.

4. METODA MJERENJA STUPNJA POLIMERIZACIJE PAPIRA (DP)

Mjerenje prosječnog stupnja polimerizacije papira izvodi se prema IEC publikaciji 450/L1/.

Nauljeni uzorak papira se odmašćuje pranjem u otapalu ili ekstrakcijom ulja iz papira u aparatu za ekstrakciju. Odmašćeni papir se mehanički usitnjava u što je moguće homogeniju masu, i zatim otapa u specijalnom otapalu (bakarnom etilen diaminu). Iz razlika izmjerenih viskoznosti otapala i otopine papira izračunava se prema IEC 450 stupanj polimerizacije papira (DP).

5. IZRAČUNAVANJE I PROCJENA PREOSTALOG ŽIVOTNOG VIJEKA TRANSFORMATORA

Prema /L2/, preostali životni vijek transformatora računa se prema jednadžbi:

$$n_{r\%} = \frac{\ln DP - \ln DP_K}{\ln DP_O - \ln DP_K} 100(\%) \quad (1)$$

gdje je: $n_{r\%}$ - preostali životni vijek u %

DP_O - odabrana početna vrijednost stupnja polimerizacije

DP_K - odabrana kritična vrijednost stupnja polimerizacije

DP - izmjerena vrijednost stupnja polimerizacije

Iz jednadžbe je vidljivo da na rezultat znatno utječu veličine početne (DP_0) i kritične vrijednosti (DP_K) stupnja polimerizacije.

Mjerenja stupnja polimerizacije provode se u zadnjih desetak godina, tako da za gotovo sve promatrane transformatore nemamo izmjerene vrijednosti DP_0 nego ih treba procijeniti.

Uobičajene vrijednosti DP_0 za nove transformatore iznose od 1200 do 800, a za proračun je odabrana srednja vrijednost koja iznosi 1000.

Također, niti kritična vrijednost DP_K nije u literaturi uvijek ista. Uobičajeno se korištene vrijednosti kreću od 150 do 250, a za ovaj proračun odobrena je srednja vrijednost 200.

U literaturi /L2/ su prikazane ovisnosti izračunatog životnog vijeka o odabranim početnim i kritičnim vrijednostima stupnja polimerizacije, a razlike mogu biti značajne. Međutim, proračun će svakako dobro poslužiti za dugoročniju procjenu stanja promatrane populacije transformatora.

U tablici 1. pregledno su prikazani rezultati ispitivanja.

Podaci o 26 ispitivanih transformatora prikazani su u kolonama 2,3,4 i 5 (lokacija, pozicija, snaga, godina proizvodnje).

U koloni 6 označeno je koliko godina je pojedini transformator bio u pogonu prije uzimanja uzoraka papira.

Kolona 7 prikazuje rezultate izmjerenog stupnja polimerizacije uzoraka papira. Zvijezdicom su označeni prosječni stupnjevi polimerizacije, u slučajevima gdje se iz transformatora uzimalo dva ili više uzoraka.

Kolona 8 prikazuje izmjerene koncentracije furana 2 FAL, što će se analizirati kasnije.

U koloni 9 nalazi se procjena preostalog životnog vijeka svakog transformatora, koja se izvršila na temelju rezultata ispitivanja stupnja polimerizacije jednog ili više uzoraka.

Zbog karakteristične degradacije celuloze, prema /L2/ nema smisla proračunavati preostali životni vijek za DP veće od 700 i manje od 300, već takve sustave treba ocijeniti kao nedegradirane (početno stanje), odnosno kao kritično ostarjele.

Od 26 promatranih jedinica, na devet jedinica (34,6%) je procijenjeno da je izolacijski sustav **nedegradiran**, tj. da odgovara početnom stanju. Te su jedinice u pogonu u prosjeku 19,3 godine, u rasponu od 7 do 26 godina.

Na 12 transformatora (46%) izmjereni DP papira je između 700 i 300, što je pogodno za izračunavanje preostalog životnog vijeka. Prosječno izračunati preostali životni vijek tih jedinica iznosi 64,3%, u pogonu su od 9 do 40 godina, prosječno u pogonu 24,8 godina.

Za pet jedinica (19,4%) je procijenjeno da je izolacijski sustav **kritično ostario**. Ti transformatori su u pogonu do 30 do 44 godine, prosječno 35,4 godina.

Transformator br.20 je već rashodovan, budući da su mu u međuvremenu i karakteristike ulja bile ispod dozvoljenih vrijednosti, pa se procijenilo da je cijeli izolacijski sustav takav da nije isplativa njegova obnova. Prilikom rastavljanja namota u tvornici papirna izolacija je bila krta i raspadala se u rukama, te je i bez ispitivanja bilo očito da je životni vijek te jedinice u potpunosti bio potrošen.

Rezultati ispitivanja papira i furana za transformator br.2 ukazuju na prisutnost degradacije izolacije. Prema stupnju polimerizacije papira ($DP=193$) ocjenjeno je, da je izolacija kritično ostarjela, dok je to istovremeno jedina jedinica na kojoj su utvrđene manje koncentracije furana ($2FAL=0,005$ ppm). Budući da po svim karakteristikama i uvjetima pogona navedena jedinica odgovara transformatoru br.1, kojemu procijenjeni preostali životni vijek iznosi 39%, za konačnu ocjenu uzet će se još nekoliko uzoraka papira prvom pogodnom prilikom.

Za transformatore pod br.12,13 i 16 smatra se da je procjena stanja izolacijskog sustava ispravna, pa je u slijedećim godinama potrebno planirati njihov rashod i nabavku novih zamjenskih jedinica.

Tablica 1. Rezultati ispitivanja i procjena preostalog životnog vijeka

Red br.	LOKACIJA	Transf. br.	Snaga (MVA)	God. proiz.	Godina u pogonu	Izmjereni DP	Furan 2 FAL (ppm)	Procjena preostalog životnog vijeka n_r (%)
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1.	TS ĐAKOVO	1	150	1965.	32	373*	0,0	39
2.	TS ĐAKOVO	2	150	1965.	30	193	0,005	KRITIČNO OSTARJELO
3.	TS 1505/2		150	69/86.	9	692	0,0	78
4.	TS OSIJEK 1	1	31,5	1965.	30	670*	0,0	75
5.	TS OSIJEK 1	2	31,5	1977.	19	916	0,0	NEDEGRADIRANO
6.	TS OSIJEK 2	1	40	1970.	26	813	0,0	NEDEGRADIRANO
7.	TS OSIJEK 2	2	40	1971.	25	854	0,0	NEDEGRADIRANO
8.	TS 505		22	1970.	26	775*	0,0	NEDEGRADIRANO
9.	TS OSIJEK 3	2	40	1986.	11	872*	0,0	NEDEGRADIRANO
10.	TS ĐAKOVO 2	1	20	1973.	23	675*	0,0	76
11.	TS ĐAKOVO 2	2	22	1970.	26	739*	0,0	NEDEGRADIRANO
12.	TS NAŠICE	1	20	1959.	36	181	0,0	KRITIČNO OSTARJELO
13.	TS NAŠICE	2	20	1960.	33	304*	0,0	KRITIČNO OSTARJELO
14.	TS VINKOVCI	1	30	1953.	40	495	0,0	57
15.	TS VINKOVCI	2	40	1979.	14	519*	0,0	60
16.	TS SLATINA	1	20	1962.	34	303*	0,0	KRITIČNO OSTARJELO
17.	TS SLATINA	2	20	1967.	29	593*	0,0	68
18.	TS POŽEGA	1	40	1981.	14	640*	0,0	73
19.	TS POŽEGA	2	40	1981.	15	745*	0,0	NEDEGRADIRANO
20.	TS VALPOVO	1	30	1954.	44	128	0,0	KRITIČNO OSTARJELO
21.	TS VALPOVO	2	22	1970.	26	704*	0,0	79
22.	TS SL.BROD 1	1	40	1977.	19	923	0,0	NEDEGRADIRANO
23.	TS SL.BROD 1	2	40	1977.	19	665	0,0	75
24.	TS SL.BROD 2		40	1989.	7	808*	0,0	NEDEGRADIRANO
25.	TS ŽUPANJA	1	20	1963.	32	518*	0,0	60
26.	TS ŽUPANJA	2	20	1966.	29	333*	0,0	32

6. REZULTATI ANALIZE FURANA

Posljedica razgradnje celuloze je niz međuprodukata, među kojima se zadnjih nekoliko godina posebno intenzivno promatraju furani.

Prema IEC 1198 /L3/ korištenjem visokoučinske tekućinske kromatografije (HPLC) normizirano je za analizu pet karakterističnih spojeva furana, na temelju kojih se procjenjuje veličina termičke degradacije papirne izolacije.

Ova metoda je posebno zanimljiva, budući da su furani otopljeni u lako dostupnom uzorku transformatorskog ulja, a uzorak se uzima u šprice kao i za kromatografsku analizu.

Od pet spojeva furana, posebno je zanimljiv sadržaj 2-furfurala (2 FAL), i trenutno radna grupa CIGRÉ/IEC razrađuje korelaciju između tog spoja i stupnja polimerizacije papira.

Na svih 26 promatranih transformatora izvršene su i analize furana, a izmjerene koncentracije spoja 2FAL prikazane su u Tablici 1, kolona 8.

Gotovo na svim promatranim jedinicama nije izmjerena prisutnost 2FAL-a, što vrijedi i za pet transformatora na kojima je utvrđeno da je papirna izolacija kritično ostarjela.

Iz gornjega se čini da analiza furana neće moći u budućnosti zamjeniti ispitivanje stupnja polimerizacije papira nego će biti metode koje se nadopunjuju, posebno u procesu starenja papira koji je slabog intenziteta i vremenski dugog razdoblja.

7. ZAKLJUČAK

Na većini energetskih transformatora u mreži Prijenosnog područja Osijek izvršena je procjena preostalog životnog vijeka.

Procjene preostalog životnog vijeka izvršene su na temelju ispitivanja stupnja polimerizacije papira (DP).

Za devet jedinica (34,6%) prosječne starosti 19,3 godine je procijenjeno da je izolacijski sustav **nedegradiran**.

Za dvanaest jedinica (46%) prosječne starosti 24,8 godina je izračunat preostali životni vijek, koji u prosjeku iznosi 64,3%.

Za pet jedinica (19,4%) prosječne starosti 35,4 godine je procijenjeno da je životni vijek potrošen, tj. da je izolacijski sustav **kritično ostarjao**. Jedan od tih transformatora je već rashodovan, a za jednu jedinicu postoji sumnja da uzorak papira nije bio reprezentativan, te će se ispitivanje ponoviti. Preostale tri jedinice potrebno je u dogledno vrijeme rashodovati i planirati nabavku zamjenskih novih jedinica.

Ispitivanjem spojeva furana, koja su također izvršena na svim jedinicama, nije se utvrdila prisutnost tih spojeva niti na jedinicama na kojima je životni vijek potrošen.

LITERATURA

- [1] IEC Publication 450: Measurement of the Average Degree of Polymerization of New and Aged Electrical Papers (1974).
- [2] V.Firinger, S.Čabrac: Ovisnost procjene preostalog vijeka trajanja transformatora o početnim i konačnim vrijednostima stupnja polimerizacije papira. Treće savjetovanje HK CIGRE, Cavtat, 26.-30.10.1997., R 15-03
- [3] IEC Publication 1198: Furanic compound analysis in mineral insulating oils, 1993.
- [4] A.Hadžić - Skerlev, S.Čabrac: Određivanje degradacije celuloze analizom furana. Treće savjetovanje HK CIGRÉ, Cavtat, 26.-30.10.1997., R15-02