

Iskorišćenje veka trajanja srednjenaponskih transformatora

Snežana Aleksandrović, Vesna Damnjanović

Rudarsko-geološki fakultet

Univerzitet u Beogradu

Beograd, Srbija

snezana.aleksandrovic@rgf.bg.ac.rs, vesna.damnjanovic@rgf.bg.ac.rs

Sadržaj—Da bi se ostvarilo maksimalno iskorišćenje rudarske opreme i tehnologije na površinskim kopovima neophodno je obezbediti trajnu i kvalitetnu električnu energiju. Sa druge strane, privredni uslovi zahtevaju da se električna mreža izvede sa što manjim troškovima. To nameće pitanje dimenzionisanja i ekonomičnosti električne mreže i njenih elemenata. Na transformatorske stanice 10/0.4kV troši se značajan deo finansijskih sredstava, pa je u ovom radu analiziran tehnički vek transformatora sa aspekta preopterećenja, odnosno zagrevanja i ekonomski optimalne oblasti rada.

Ključne reči - transformator; preopterećenje; izolacija; zagrevanje; površinski kop

I. UVOD

Problemi vezani za kvalitetno snabdevanje električnom energijom u pogonima sve su izraženiji i svakim danom sve složeniji. Eksploataciju na površinskim kopovima karakterišu: dekoncentrisanost električnih potrošača i angažovanost velikih instalisanih snaga na pojedinim mašinama. Osim toga, elektrooprema je nedovoljno zaštićena od atmosferskih uticaja, izložena različitim mehaničkim opterećenjima i stalno se pomera, zajedno sa rudarskim proizvodnim postrojenjima.

Svaki elektroenergetski sistem iz kojeg se napaja rudarska oprema na površinskim kopovima, uz određene specifične uslove koje određuje usvojena tehnologija na radilištima, treba da ostvari pouzdano i neprekidno napajanje električnom energijom, mora da ispuni zahteve ekonomičnosti, omogućiti što jednostavniju eksploataciju i ostvari potpunu sigurnost u opsluživanju. U tom smislu, od značaja je produženje životnog veka transformatora, vodeći računa o njihovom opterećenju. Analiza tehničko-ekonomskih efekata transformatorskih stanica svodi se uglavnom na kriterijume tehničkog veka, odnosno zagrevanja transformatora i kriterijume smanjenja godišnjih pogonskih troškova na donju granicu, a da pri tome ne dođe do degradacije kvaliteta električne energije.

II. OBLAST EKONOMIČNOG RADA TRANSFORMATORA

Optimizaciju rada transformatora u ekonomskom smislu moguće je izvršiti obzirom da su poznati empirijski podaci o godišnjim troškovima pojedinih tipova energetskih transformatora u zavisnosti od njihove prosečne opterećenosti. Ukupni pogonski troškovi K_u najčešće se definišu za period od

godinu dana i oni se sastoje iz stalnih godišnjih troškova i troškova koji su srazmerni opterećenju:

$$K_u = K_{\text{perm}} + K_{\text{prom}} \quad (1)$$

Stalni godišnji troškovi K_{perm} mogu se predstaviti u sledećem obliku:

$$K_{\text{perm}} = f \cdot K_i + t_g P_{\text{Fe}} K_{\text{Fe}} \quad (2)$$

pri čemu je: f faktor godišnjih kapitalnih troškova (amortizacija, održavanje i slično), K_i su troškovi investicije (nabavna cena transformatora), t_g predstavljaju prosečan ukupan broj godišnjih časova (8760 h), P_{Fe} je snaga gubitaka u gvožđu transformatora u kW i K_{Fe} su troškovi gubitaka u gvožđu transformatora (određuju se množenjem cene izgubljenog kWh u gvožđu transformatora sa brojem časova u godini).

Godišnji troškovi proporcionalni opterećenju K_{prop} mogu se odrediti na osnovu sledećeg izraza:

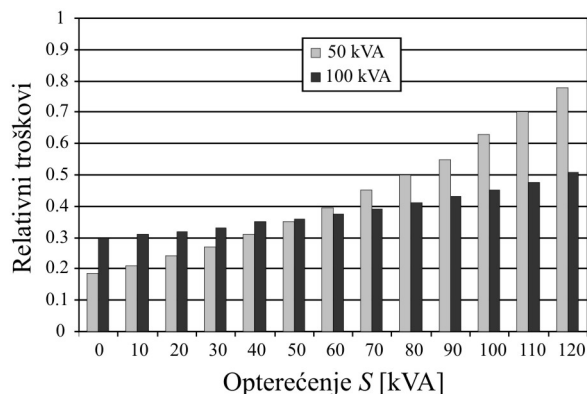
$$K_{\text{prop}} = k \cdot S_t^2 t_A K_{\text{Cu}} \quad (3)$$

gde je k konstanta, S_t je vršno opterećenje transformatora u kVA, t_g su godišnji pogonski časovi i K_{Cu} - troškovi gubitaka u bakru transformatora (proizvod cene izgubljenog kWh u bakru transformatora i broja godišnjih pogonskih časova).

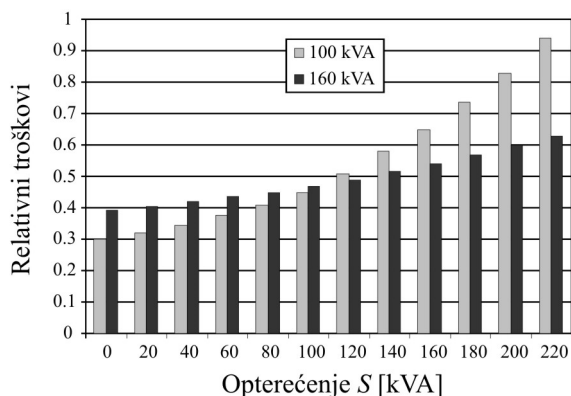
Ukupni godišnji troškovi za jedan određeni tip transformatora proporcionalni su kvadratu snage opterećenja. Da bi se utvrdila granica ekonomičnosti rada, odnosno kada transformator jedne nominalne snage treba zameniti transformatorom veće nominalne snage i obrnuto, pogodno je posmatrati grafički prikaz njihovih godišnjih troškova od opterećenja i za 3000 pogonskih časova, što približno predstavlja rad od 8h dnevno.

Na sl. 1–4 prikazane su zavisnosti godišnjih troškova srednjenaponskih transformatora od opterećenja, pri čemu je kao parametar usvojena nominalna snaga transformatora. Prikazani su uporedni dijagrami i to za transformatore sledećih snaga: 50 kVA, 100 kVA, 160 kVA, 250 kVA i 400 kVA.

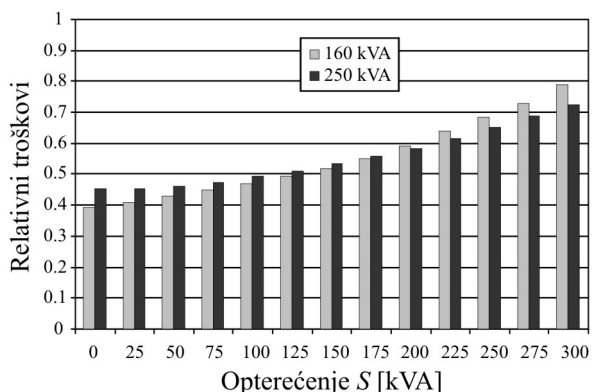
Troškovi su dati u relativnom odnosu, s obzirom da njihov iznos zavisi od trenutka u kome se vrši analiza i ima promenjivu vremensku dimenziju.



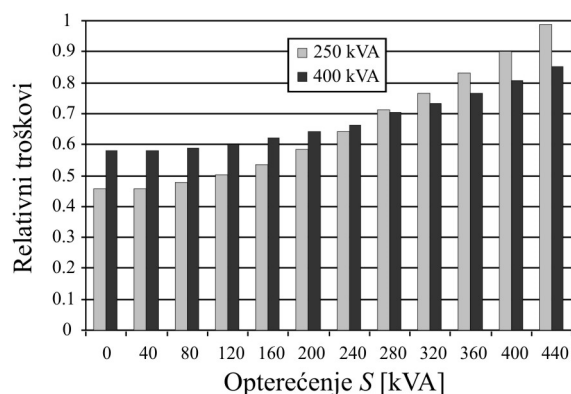
Slika 1. Godišnji troškovi transformatora nominalne snage 50 kVA i 100 kVA u zavisnosti od opterećenja



Slika 2. Godišnji troškovi transformatora nominalne snage 100 kVA i 160 kVA u zavisnosti od opterećenja



Slika 3. Godišnji troškovi transformatora nominalne snage 160 kVA i 250 kVA u zavisnosti od opterećenja



Slika 4. Godišnji troškovi transformatora nominalne snage 250 kVA i 400 kVA u zavisnosti od opterećenja

Granice ekonomičnog rada pojedinih transformatora određene su tačkama izjednačenja relativnih godišnjih troškova za data dva transformatora na dijagramima i one određuju kada transformator treba zameniti većim i obratno, kako bi se postigli manji godišnji pogonski troškovi [1].

Sa dijagrama se može zaključiti da je granica ekonomičnog rada za 3000 pogonskih časova u toku godine, za koje su urađeni dijagrami, na oko 110-120% nazivnog opterećenja.

Međutim, preopterećenje transformatora ne utiče samo na ekonomičnost rada, već i na tehnički životni vek transformatora.

III. TEHNIČKI VEK TRAJANJA TRANSFORMATORA

Tehnički vek trajanja transformatora u najvećoj meri zavisi od stanja njegove izolacije i određen je električnim, termičkim i mehaničkim naprezanjima i njihovom interakcijom [2].

A. Električna naprezanja u transformatoru

Električno naprezanje odnosi se na prenapone usled prekida u kolu, kratkih spojeva atmosferskih pražnjenja i lukova prema zemlji. Kao rezultat može doći do dielektričnih gubitak, kao i do električnog proboja dielektrika. Električno naprezanje u izolacionom sistemu obrnuto je proporcionalno dielektričnoj konstanti [3], a u svim vrstama izolacionih ulja, proboj dielektrika dešava se na oko 60-70 kV. Granica proboja dielektrika značajno se snižava usled prisustva vode i gasova (na primer, sa 100 ppm vode, proboj dielektrika mineralnih ulja opada na 10-20 kV), a još više opada usled postojanja različitih primesa u obliku prašine, čestica u kombinaciji sa vodom. Zaključuje se da je, u vezi sa električnim naprezanjem, neophodan uslov dugotrajnog i pouzdanog rada transformatora, održavanje proizvodnog procesa čistim.

B. Termička naprezanja u transformatoru

Termička naprezanja i intenzitet termičkog starenja transformatora zavise od temperature namotaja i od trajanja te temperature, a u najvećoj meri dovode do hemijskih promena izolacionog sistema transformatora.

S obzirom da raspodela temperature u transformatoru nije uniformna, kao osnovni faktor određivanja životnog veka transformatora posmatra se najtoplija tačka u transformatoru.

Najtopliju tačku nije moguće direktno meriti, već za njeno određivanje postoje standardi koji su rezultat laboratorijskih ispitivanja.

Standardima u našoj zemlji definišu se:

- srednja dnevna ambijentalna temperatura do 30°C,
- srednja godišnja temperatura do 20°C,
- maksimalna temperatura do 40°C i
- minimalna temperatura do -25°C.

Maksimalno dozvoljeno zagrevanje namotaja ograničeno je na 65°C, mereno na principu promene električne otpornosti.

Maksimalna srednja temperatura namotaja transformatora određuje se kao suma ambijentalne temperature i najvećeg dozvoljenog zagrevanja namotaja i iznosi 105°C. Nadtemperatura najtoplije tačke transformatora iznosi 78°C. Za prosečnu srednju godišnju temperaturu ambijenta od 20°C, prema našim standardima, temperatura najtoplije tačke transformatora iznosi 98°C.

Jedan od načina procene veka trajanja transformatora T_Z u zavisnosti od temperature ϑ prema poznatom Montsingerovom zakonu, određen je temperaturom koju podnosi izolacija namotaja i može se predstaviti na sledeći način [4], [5]:

$$T_Z = T_{Z0} \cdot 2^{-\left(\frac{\vartheta - \vartheta_0}{\Delta_0}\right)} \quad (4)$$

gde je T_{Z0} normalan vek trajanja transformatora pri temperaturi najtoplije tačke ϑ_0 , Δ_0 - smanjenje temperature pri kojem su vek trajanja transformatora udvostruči. U literaturi se vrednost Δ_0 nalazi u opsegu od 6°C do 10°C, a prema IEC specifikacijama [6] usvaja se da iznosi 6°C.

Prema američkim preporukama, vek trajanja transformatora definiše se kao apsolutno iskorišćenje životnog veka u zavisnosti od intenziteta i trajanja opterećenja, a izražava se u procentima veka trajanja u posmatranom vremenskom intervalu [7]. Ove preporuke odnose se na dva postojeća tipa izolacije kod transformatora i to za kontinualni rad do 55°C i do 65°C iznad temperature ambijenta.

U tabeli I predstavljene su maksimalne dozvoljene temperature u odnosu na tip transformatora, pri čemu opterećenje ni u jednom slučaju ne premašuje 200% nazivnog opterećenja.

TABELA I. MAKSIMALNE DOZVOLJENE TEMPERATURE

Temperatura	Nadtemperatura izolacije transformatora	
	55°C	65°C
Temperatura ambijenta	30°C	30°C
Srednji temperaturni porast	55°C	65°C
Nadtemperatura najtoplije tačke	10°C	15°C
Srednja temperatura najtoplije tačke	95°C	110°C

Najtoplija tačka transformatora određuje se kao suma prosečne nadtemperature bakra, temperature vazduha za

hlađenje i temperature najtoplije tačke pri datom opterećenju. Na ovaj način, za srednju temperaturu najtoplije tačke transformatora dobijaju se vrednosti 95°C (za dozvoljeno povišenje temperature od 55°C) i 110°C (za dozvoljeno povišenje temperature od 65°C).

Različite vrednosti za temperaturu najtoplije tačke objašnjavaju se postupcima poboljšanja kvaliteta izolacije. Kod transformatora sa poboljšanom izolacijom u termičkom pogledu, životni vek određuje se na osnovu izraza:

$$T_Z = e^{\left(\frac{15000}{110+273} - \frac{15000}{\vartheta+273}\right)} \quad (5)$$

Kao rezultat, razvijen je program izračunavanja normalnih i preopterećenih stanja transformatora, u odnosu na dnevni dijagram opterećenja, temperaturu ambijenta i s obzirom na tehničke podatke transformatora [8].

Iskorišćenje životnog veka transformatora, odnosno gubitak veka trajanja transformatora G_Z izračunava se kao procentualni odnos životnog veka transformatora u odnosu na definisani vremenski interval, pri čemu se za svaki sat određuje kao:

$$G_Z = \frac{1}{T_Z} \cdot 100\% = 0.0025 \cdot e^{\frac{0.69(\vartheta-110)}{8.06}} \quad (6)$$

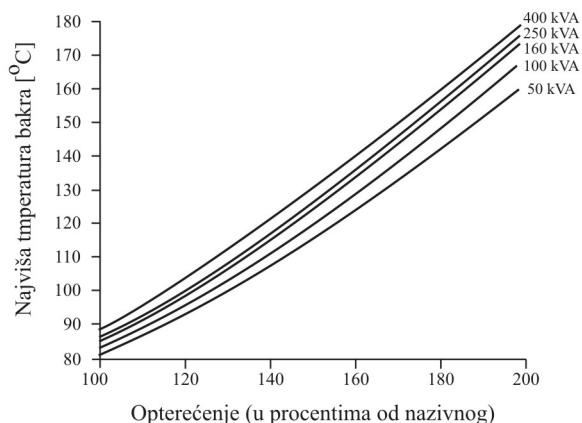
Upoređivanjem sa odgovarajućim izrazom, dobijenim prema IEC specifikacijama, dolazi se do zaključka da vek trajanja transformatora od 5.4 godine, koji se dobija za temperaturu namotaja 110°C odgovara iskorišćenju veka trajanja od 0.0025% na čas odnosno nešto manjem veku trajanja od 4.5 godine. Za Δ_0 , prema američkim preporukama, usvojena je vrednost od 8.06°C, što znači da se izračunati periodi trajanja transformatora sa povećanjem najtoplije tačke sporije smanjuje nego u slučaju IEC specifikacija, gde se za ovu veličinu usvaja 6°C.

S obzirom na postojeća ograničenja za transformatore i kako pomenuti program u računu uzima u obzir temperaturu najtoplije tačke za 2°C višu nego što je to slučaj sa IEC specifikacija, može se zaključiti da se ovaj način izračunavanja preopterećenja i veka trajanja transformatora može primeniti i našim uslovima.

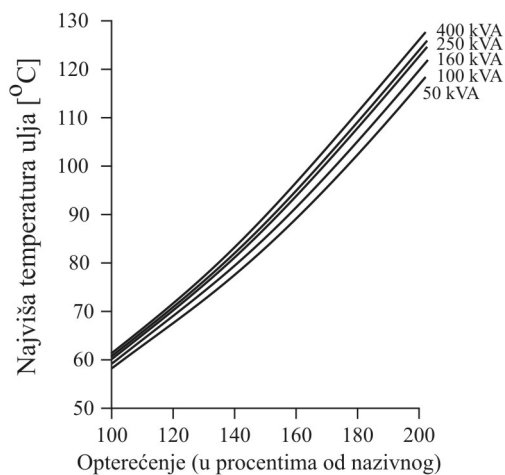
Najviše temperature bakra i ulja transformatora 10/0.4 kV, nazivnih snaga od 50 kVA, 100 kVA, 160 kVA, 250 kVA i 400 kVA u zavisnosti od opterećenja predstavljene su na sl. 5 i sl. 6, respektivno, za 3000 pogonskih časova. Opterećenje je prikazano u procentima od maksimalnog, a za temperaturu okolnog vazduha uzeta je prosečna temperatura u letnjim mesecima od 20°C.

Najviše temperature ulja transformatora 10/0.4 kV, nazivnih snaga od 50 kVA do 400 kVA u zavisnosti od opterećenja predstavljene su na slici 6 za 3000 pogonskih časova. Opterećenje je prikazano u procentima od maksimalnog, a za temperaturu okolnog vazduha uzeta je prosečna temperatura u letnjim mesecima od 20°C.

Prema IEC specifikacijama, temperatura najtoplije tačke bakra ne sme biti viša od 140°C, a temperatura najtoplije tačke ulja ne sme biti viša od 105°C, čime se ograničavaju opterećenja datih transformatora.



Slika 5. Zavisnost temperature najtoplije tačke bakra od opterećenja



Slika 6. Zavisnost temperature najtoplije tačke ulja od opterećenja

C. Mehanička naprezanja u transformatoru

Mehaničko starenje predstavlja zamor izolacionih delova transformatora kao rezultat velikog broja ponavljanja slabih naprezanja, kao posledica termomehaničkih naprezanja usled toplotnih dilatacija i kontrakcija, lomljenja i pomaka delova izolacije usled jakih mehaničkih naprezanja. U slučaju postojanja mehaničkih naprezanja koja se ponavljaju, mehaničko starenje zavisi i od učestanosti ovog ponavljanja. Namotaji transformatora izloženi su i mehaničkim naprezanjima u slučaju kratkih spojeva u mreži, naglih preopterećenja ili pojave vibracija usled magnetostrikcije kada

može doći do pucanja i naglog starenja izolacije, što u velikoj meri skrećuje životni vek transformatora.

Optimalno opterećenje transformatora je ono pri kojem su njegov ekonomski i tehnički vek jednaki.

IV. ZAKLJUČAK

Usled sve veće potrebe za električnom energijom, kao i nedostatka finansijskih sredstava, neophodno je obezbediti maksimalno iskorišćenje postojećih elektroenergetskih uređaja uz uslov kvalitetnog i pouzdanog snabdevanja potrošača energijom. U ovom radu grafički su predstavljene granice ekonomičnog rada transformatora, uzimajući u obzir opterećenje i područje najmanjih godišnjih troškova. Osim ekonomskog, značajan je i tehnički vek trajanja transformatora, a koji je u korelaciji sa životnim vekom izolacije. U radu su analizirani parametri tehničkog veka trajanja, u skladu sa odgovarajućim specifičnostima postojećih standarda.

LITERATURA

- [1] S. Aleksandrović, and M. Jović, "Economic And Technical Aspects Of Transformer Operation", *Energy Sources, Part B: Economics, Planning and Policy*, vol. 11 (1), pp. 26-31, March 2016.
- [2] C. R., Bayliss, and B. J. Hardy, "Transmission and distribution electrical engineering", Burlington, MA: Newnes 2003.
- [3] FIST Manuals, "Permissible Loading Of Oil-Immersed Transformers And Regulators", United states department of the interior bureau of reclamation: 1991.
- [4] M. Meshkatoddini, "Aging Study and Lifetime Estimation of Transformer Mineral Oil", *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 1, Issue 4, pp. 384-388, 2008.
- [5] C. Sumerered, M. Muhr, and B. Körbler, "Lifetime management of power transformers", *Elektrotechnik und Informationstechnik*, vol. 120, Issue 12, pp. 420-423, 2004.
- [6] IEC Loading guide for oil-immersed power transformers, IEC Standard 60076-7 - Power transformers, Committee draft 14/403/CD, 2001.
- [7] IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers - Annex I: Transformer insulation life, IEEE standard C57.91, 1995.
- [8] Guide for loading oil-immersed power and distribution transformers with 65°C average winding temperature rise, NEMA Publication No. TR 98, 1964.

ABSTRACT

The maximum utilization of mining equipment and technology in open-pit mines can be realized only with a continuous and reliable energy supply to the consumers. From an economic point of view, electrical networks are to be performed with minimal costs. The question then arises as to sizing and cost-effectiveness electrical network and its elements. A significant portion of financial means is spent on transformer substations of average 10 / 0.4kV and in response to this the paper deals with the technical transformer life cycle from the point of overload, heating and economic transformer operation.

EFFICIENCY AND LIFETIME OF MEDIUM VOLTAGE TRANSFORMERS

Snežana Aleksandrović, Vesna Damnjanović