

Pomen optimiranja hlajenja za življenjsko dobo in zanesljivost transformatorjev velikih moči

Tim Gradnik¹, Maks Babuder¹, Maja Končan-Gradnik¹

¹ Elektroinštitut Milan Vidmar, Hajdrihova 2, Ljubljana
E-pošta: tim.gradnik@eimv.si

Povzetek – V referatu so predstavljeni vidiki tveganja za dielektrično porušitev izolacije transformatorjev zaradi njene ostarelosti. Ovrednoten je pomen izsledkov najnovejših raziskav o procesih staranja v transformatorski izolaciji in obrazložen vpliv temperature olja ter navitij na doseganje pričakovane življenjske dobe transformatorjev. Izsledki teh raziskav in ugotovitve dveh študij EIMV s področja ocene ostarelosti in stanja hladilnih sistemov energetskih transformatorjev, opravljenih v letu 2004/2005, so nam omogočili pojasniti pojav nepričakovane, zgodnje ostarelosti nekaterih velikih transformatorjev v Sloveniji, vgrajenih okoli leta 1980. V ta namen je podrobno prikazana problematika merjenja temperatur in krmiljenja hladilnih sistemov transformatorjev s prisilnim tipom sistema hlajenja (OFAF). Tak sistem hlajenja je vgrajen pri skoraj vseh 400kV in 220kV transformatorjih velikih moči v slovenskem elektroenergetskem omrežju. Ovrednoten je vpliv optimiranja hlajenja na podaljšanje preostale življenjske dobe in celotne stroške transformacije – LCC (life cycle cost).

Ključne besede: optimiranje, hlajenje, transformator, temperatura, staranje

Importance of cooling system optimization with regard to lifetime and reliability of power transformers

Extended Abstract – The paper presents different risk aspects of transformer insulation breakdown caused by ageing of transformer insulation. Evaluation of recent artificial ageing of paper-in-oil transformer insulation results explains the effect of winding temperature on the achievement of the targeted transformer lifetime. These results and findings of two studies made at the Milan Vidmar Electric Power Research Institute (EIMV) in 2004/2005 assessing the ageing and cooling system state of large power transformers provided the basis for highlighting the occurrence of unexpected early ageing of particular large transformers that had been installed in the Slovenian power grid around 1980. Issues of temperature measurement and cooling system control associated with oil-forced type of transformer cooling are discussed in detail. Oil-forced type cooling has been installed in majority of the 400 kV and 220 kV large power transformers operating in the Slovenian power grid. The paper also discusses the importance of cooling optimization in order to have transformer residual lifetime extended and its life-cycle cost minimized.

Keywords: cooling optimization, lifetime, power transformer, insulation ageing, temperature

1. Uvod

Namen referata je prikazati pomen in utemeljiti potrebnost merjenja temperatur in optimiranja hlajenja pri velikih energetskih transformatorjih. Ker je ta problematika izrazito multidisciplinarna, smo v članku prikazali spoznanja kemije staranja, vidike tveganja za dielektrično porušitev izolacije, pomen mehanske trdnosti navitij, življenjske dobe in diagnostike transformatorjev ter raziskav hlajenja in ekonomskih učinkov optimiranja hlajenja.

Cilj te kompleksne obravnave je, da se z vsemi potrebnimi ukrepi prepreči neizogibno skrajšanje tradicionalno pričakovane življenjske dobe 40 let pri novejših transformatorjih zaradi nerazumevanja različnih strok, ki največkrat delujejo vsaka zase. Doseči ga bo mogoče s sodelovanjem raziskovalcev, načrtovalcev in lastnikov transformatorjev.

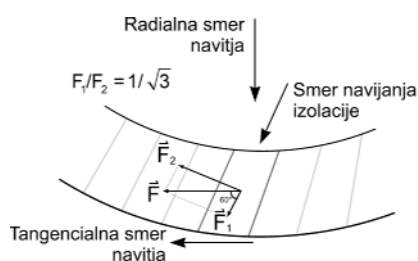
2. Tveganja za dielektrično porušitev izolacije kot posledica ostarelosti papirja

Tveganje za razelektritev v izolaciji je na splošno opredeljeno v standardu za koordinacijo izolacije IEC 60071.

Transformatorska navitja so pri kratkostičnih obremenitvah izpostavljena izjemno močnim elektromagnetnim silam, ki skušajo deformirati navitja. Če se

ob kratkem stiku navitje plastično deformira, se ob tem sila prenese tudi na papirno izolacijo v tangencialni smeri navitja (sila F na sl. 1).

V literaturi [12] lahko utemeljitev kriterijev glede dopustnega poslabšanja natezne trdnosti papirne izolacije v povezavi z zanesljivostjo transformatorja. Sila obremenitve papirja F se razdeli v vzdolžni smeri (F_1) in prečno na smer (F_2) navijanja izolacije. Papir je ob kratkih stikih v prečni smeri zaradi razmerja vzdolžnih in prečnih sil $1:\sqrt{3}$ za pribl. 70% bolj obremenjen kot v vzdolžni smeri, hkrati pa ima v prečni smeri le 70% natezne trdnosti v vzdolžni smeri (t.j. v smeri navijanja) papirja.



Slika 1: Porazdelitev sil v papirni izolaciji ob kratkem stiku

Vrednost porušitvene sile v vzdolžni smeri je za nov papir enaka štirikratni vrednosti natezne trdnosti papirja (varnostni faktor 4), varnostni faktor v prečni smeri pa zaradi večje obremenitve in manjše natezne trdnosti tako znaša le še 1,6.

Iz tega izhaja, da je natezna trdnost papirja v prečni smeri tisti faktor, ki odloča o vzdržljivosti papirne izolacije. S staranjem papirja pri znižanju natezne trdnosti papirja v prečni smeri na 60% ($1/1,6$) začetne vrednosti močno poveča verjetnost porušitve (trganja) papirja ob kratkih stikih in posledično zmanjša zanesljivost obratovanja transformatorja.

Pri uveljavljenem dosedanjem načinu obravnave staranja izolacije temelji odločitev o koncu življenjske dobe transformatorja na ugotavljanju stopnje ostarelosti papirja. Pot do tega podatka vodi prek ugotavljanja količine furanov v olju in/ali neposredno prek preskušanj vzorcev papirja iz transformatorja. Dejansko pa primeri poškodb kažejo, da vodita do njih neposredno vsaj dva dejavnika: zmanjšanje dielektrične trdnosti papirja zaradi samega staranja in verjetne mehanske poškodbe (pretrganje papirja) zaradi plastičnih deformacij navitja ob kratkih stikih. Neposredni porušitelj izolacije pa je električno polje (zaradi prehodnih prenapetosti). Izhajajoč iz teh ugotovitev lahko v grobem identificiramo tri dejavnike, ki vodijo k porušitvi izolacije:

- delovno temperaturo izolacije (termično staranje),
- napetostne obremenitve (neposredni vzrok) in
- kratkostične obremenitve (mehanske poškodbe).

Nenatančno poznavanje omenjenih treh dejavnikov v posameznih delih transformatorja onemogoča podrobnejše raziskave in razumnega postopka presoje. Njegova pričakovana zanesljivost temelji le na izkustvenem podatku o kritični ostarelosti papirja. Strokovnjaki se osredotočajo na verodostojnost podatka o zmanjšanju natezne trdnosti oziroma stopnji polimerizacije papirja. Ne nazadnje pa vlaknati delci razpadajočega papirja povzročajo celo vrsto drugih nevarnih vplivov, zlasti nevarno je znatno zmanjšanje dielektrične trdnosti olja zaradi prisotnosti papirnih vlaken.

Ob raziskavi primernih metod in orodij za strokovno ocenjevanje pričakovane zanesljivosti velikih transformatorjev se nam je porodila zamisel o izdelavi in uporabi kompleksne podatkovne baze za vse zgoraj omenjene dejavnike.

Uporaba računalniških orodij pri konstruiranju transformatorjev ponuja nekoliko naprednejši pristop k strokovni obravnavi zanesljivosti. Temperaturno sliko transformatorja bi lahko predstavili v poenostavljeni obliki s prostorsko shemo podatkov ter podobno izdelano sliko prenapetostnih in elektromehanskih obremenitev. Presek navedenih treh množic podatkov bi nas pripeljal do najbolj ogroženega območja v transformatorju.

Sedanje poznavanje notranjega ustroja transformatorja glede specifičnih obremenitev nam tega ne omogoča. V tem pogledu je pri manjših enotah ekspertna obravnava negospodarna, pri velikih enotah pa sedanji način konstruiranja tega ne omogoča in je zanesljivost presoje zato tvegana.

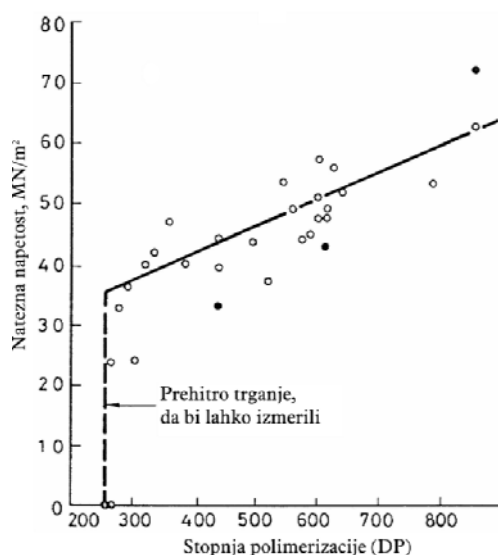
Glede na funkcijo transformatorja se v posameznih primerih merila zanesljivosti lahko razlikujejo, v ozadju vselej nastopa neko ekonomsko tveganje. Električni blok transformatorji ob odpovedi povzročijo nerazpoložljivost proizvodne enote v celoti. V tem primeru bodo mejni zanesljivostni kriteriji zahtevnejši kot npr. pri omrežnih transformatorjih, kjer je na voljo druga možnost rešitve problema izpada. Ekonomski vidiki nas vodijo k iskanju učinkovitejših metod za ugotovitev stopnje ogroženosti izolacije.

3. Življenjska doba transformatorjev

Življenjska doba velikih energetskih transformatorjev je odvisna od začetne kakovosti papirne izolacije in hitrosti njenega staranja. Glede na dejstvo, da obratuje danes v svetu že polovica transformatorjev, ki so stari več kot 30 let, je tudi v svetu pričakovana življenjska doba 40 let povsem utemeljena. V strokovni literaturi najdemo sicer različne vrednosti pričakovane življenjske dobe od 25 do 40 let, ki pa izhajajo tudi iz različnih meril stopnje ostarelosti za doseganje izteka življenjske dobe. Življenjska doba (ŽD) transformatorja je po definiciji tisto število let, v katerem transformator,

ob pravilnem vzdrževanju, obratuje z normalno zanesljivostjo.

Za doseganje normalne zanesljivosti je potrebna zadostna mehanska trdnost papirne izolacije v vseh predelih navitij. S poskusi je bilo ugotovljeno, da je natezna trdnost papirne izolacije navitij in vodnikov kritični parameter pri dinamičnih mehanskih obremenitvah, ki so posledice elektromagnetnih prehodnih pojavov v transformatorju (kratek stik, nenadne spremembe bremena, itd.). Natezna trdnost izolacije se s staranjem transformatorja stalno znižuje. Odvisna je od povprečne stopnje polimerizacije (DP) celuloznih vlaken v papirni izolaciji, ki jo direktno izmerimo na manjšem koščku papirja, odvzetem iz transformatorja. Iz niza eksperimentalno ugotovljenih korelacij [natezna trdnost-DP], prikazanih na sliki 2, vidimo, da se natezna trdnost začne strmo zmanjševati pod 50% njene začetne vrednosti pri znižanju DP na okoli 300[1].



Slika 2: Odvisnost natezne trdnosti od DP papirja iz različnih modelnih transformatorjev

V Evropi velja merilo normalne zanesljivosti obratovanja do DP = 200 v najslabši točki papirja, v ZDA 250, na Japonskem 50%-odstotno zmanjšanje začetne natezne trdnosti (okoli DP = 300). Te različne mejne vrednosti izhajajo iz različnih načel projektiranja transformatorjev, pogostosti in vrste mehanskih dinamičnih obremenitev, osveženosti ter potrebe po večji ali manjši zanesljivosti neprekinjenega obratovanja transformatorja.

Evropska pričakovana ŽD 40 let in kritična vrednost DP 200 izhajata iz tradicije gradnje EE omrežja z velikim številom podvojenih transformatorjev z ONAN/F sistemom hlajenja, primernim nivojem nadzora in vzdrževanja ter razmeroma počasnim naraščanjem energetskih potreb. V primerjavi z Japonsko in ZDA imamo ugodne potresne in klimatske

razmere, ki omogočajo razmeroma mirno obratovanje transformatorjev, kar pa dopušča tudi obratovanje transformatorjev z bolj ostarelo izolacijo.

Zaradi visoke cene velikih energetskih transformatorjev je doseganje čim daljše ŽD v tehničnem pomenu edino odločujoče za znižanje stroškov v življenjski dobi transformatorja (LCC - Life Cycle Cost) in ekonomska ostarelost v praksi praviloma ni razlog za zamenjavo transformatorja. Take ugotovitve najdemo tako v Evropi kot tudi v Kanadi in drugih državah. Zniževanje LCC pa postaja tako rekoč zakon v privatizirani elektroenergetski proizvodnji, distribucijskem in prenosnem sistemu. [2].

Zaradi nenehnega naraščanja porabe električne energije in deregulacije energetskega trga se povečuje obremenitev obstoječih in novih transformatorjev. Po drugi strani sta globalizacija in privatizacija pred proizvajalce in upravljavce transformatorjev postavili zahteve po čim nižji prodajni ceni, manjših gabaritih, manjših izgubah in hrupnosti, ki si pogosto nasprotujejo. Logična posledica so višje temperature navitij in hitreje staranje transformatorja.

Vsi ti dejavniki, če ne bo prišlo do nekaterih sprememb pri izdelavi in upravljanju transformatorjev, vodijo v skrajšanje pričakovane življenjske dobe pri obstoječih transformatorjih, kot tudi pri novih transformatorjih,

4. Vpliv temperature in vlage na življenjsko dobo transformatorjev

Oglejmo si, kakšna je kritična temperatura, na katero naj bi projektant načrtoval hlajenje nekega transformatorja.

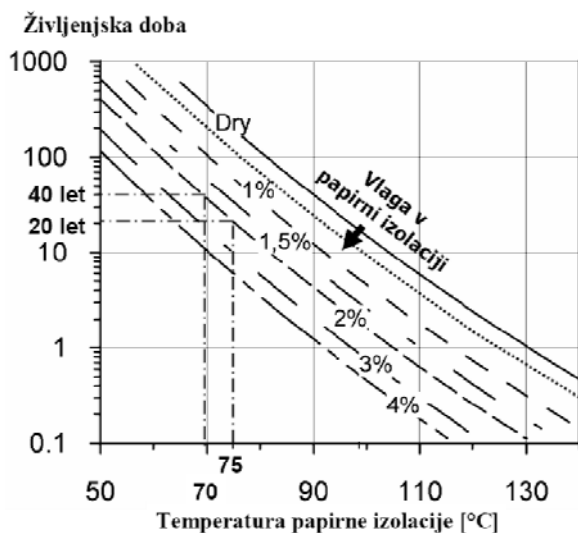
V prejšnjem stoletju je veljala splošna ocena, da pod temperaturo 80°C ni staranja papirne izolacije. Montsinger je leta 1930 ugotovil [3], da je v temperaturnem območju med 90°C in 110°C podvajanje hitrosti staranja navadne papirne izolacije prisotno pri povišanju temperature za vsakih 8°C. Nekateri drugi raziskovalci so ugotovili podvajanje hitrosti pri dvigu temperature med 5°C do 10°C. Tako je danes splošno privzeta ocena, da dvig temperature za 6°C podvoji hitrost staranja.

Na podlagi vseh izkušenj in ugotovitev so bile v okviru družine standardov IEC 60076-x ter standarda IEC 60354, ki bo v kratkem pridružen prvemu, postavljene maksimalne dovoljene temperature olja in navitij tako, da bi v danih klimatskih razmerah pri polni obremenitvi transformatorja dosegli temperaturo najtoplejše točke navitij največ 98°C. V takih razmerah naj bi transformator dosegel življenjsko dobo vsaj 30 let. Ali so taka pričakovanja realna? Vprašanje je več kot utemeljeno, če analiziramo izsledke najnovejših raziskav.

Rezultati laboratorijskih analiz umetnega staranja, pridobljeni v okviru petletnega Sintefovega projekta [4], so prinesli nova spoznanja o vplivu temperature in

drugih kemijskih dejavnikov na hitrost staranja transformatorske izolacije v širšem temperaturnem intervalu. Ovrgli so oceno, da ni staranja izolacije pri temperaturah pod 80°C, kar je razvidno na grafičnem prikazu rezultatov Sintefove raziskave na sliki 3. Ta spoznanja imajo v okolščinah, v katerih transformatorji delujejo danes, še posebej pomembno težo.

Toplota, ki v transformatorju nastaja zaradi izgub, povzroča termično-oksidativen hidrolitičen razkroj papirno-oljnega izolacijskega sistema. Staranje papirne izolacije v transformatorskem olju je avtokatalitičen (samopospešujoč) proces, katerega hitrost je v največji meri določena s temperaturo in deležem vlage v izolaciji. Na sliki 3 so prikazani rezultati laboratorijskih analiz umetnega staranja, iz katerih je razvidna pričakovana ŽD transformatorja (čas znižanja z DP 1000 do DP 200) v odvisnosti od temperature in vlage papirne izolacije.



Slika 3: Odvisnost pričakovane življenjske dobe papirne izolacije v transformatorju v odvisnosti od temperature in vlažnosti

Iz slike 3 je razvidno, da prisotnost vlage bistveno pospešuje staranje papirne izolacije. Tako bi pri temperaturi najtoplejše točke 98°C lahko pričakovali ŽD 20 let le v transformatorju s popolnoma suhim papirjem skozi vso ŽD, kar pa je nemogoče. Pri stalno polno obremenjenem transformatorju, ki ima v povprečju vsaj 2% vlage bi za ŽD 20 let morali omejiti temperaturo najtoplejše točke na 75°C. Za doseganje ŽD 40 let pa bi temperaturo najtoplejše točke morali omejiti na največ 70°C.

Večji del vlage v transformatorju nastaja kot razkrojni produkt staranja papirno-oljne izolacije (0,1% letno), vlaga pa lahko pride v transformator tudi iz okoliskega zraka, če transformator ni ustrezno zaščiten. Na prisotnost vlage v transformatorju ne moremo bistveno vplivati, saj se največji del vlage v

transformatorju tvori in zadržuje v papirni izolaciji navitij, zaradi procesov staranja, ki so zopet temperaturno pogojeni (avto-kataliza). Tako preostane temperatura oz. hlajenje takorekoč edini vzvod, s katerim lahko vplivamo na hitrost vlaženja in staranja transformatorja [5].

5. Opažanja iz prakse

Izkušnje spremljanja stanja s fizikalno-kemijsko diagnostiko slovenskih transformatorjev, danes starejših od 35 let, nedvomno kažejo, da so ti praviloma vse doslej obratovali s temperaturami izolacije precej pod najvišjimi dovoljenimi po standardu IEC. Temperature olja v zgornjem delu so praviloma nižje od 40°C, iz česar lahko sklepamo, da tudi temperature navitij ne presegajo 60°C. Če pogledamo krivulje na sliki 3, vidimo, da bi bila ob vseskozi začetni vlažnosti izolacije 1% pričakovana življenjska doba takih enot kar nekaj sto let. Ker pa je vlažnost v navitjih postopoma naraščala in je običajno po 30 letih dosegla vsaj 3%-4% je mogoče pričakovati kritično ostarelost že po ca. 40 letih. Stopnja vlažnosti torej bistveno pospeši staranje tudi pri temperaturah pod 80°C, ki jih še danes večinoma ocenjujejo kot povsem nevlplivne za staranje.

Pri novejših transformatorjih, starih od 20 do 30 let, (OFAF transformatorji 400kV omrežja, grajenega v osemdesetih letih, 220kV enote, kot tudi najmlajše generacije 110 kV transformatorjev), pa opažamo precej višje temperature olja okoli 45°C do 70°C in sklepamo, da so temperature navitij 65°C do 90°C. Vsi ti transformatorji imajo precej večje količine 2FAL (2FAL je eden izmed stranskih produktov razpadanja papirne izolacije) v olju kot 40 let stari transformatorji, iz česar lahko dokaj zanesljivo ocenimo, da je hitrost zniževanja DP njihove papirne izolacije bistveno zvišana tudi brez odprtja transformatorjev in analize vzorca papirja.

V zadnjih osmih letih smo na podlagi rezultatov preventivne diagnostike s tekočinsko kromatografijo (količina 2FAL v olju) in meritev DP vzorcev, odvzetih iz sumljivih transformatorjev, že ugotovili kritično ostarelost papirne izolacije pri prvem 400kV transformatorju po pribl. 15 letih obratovanja kljub relativno nizkim povprečnim obremenitvam (pod 50%). Tudi pri več 110kV ter 220 kV enotah je bila zaradi neoptimalnega hlajenja, dodatnih toplotnih obremenitev zaradi ponovnega sušenja po popravilu v tovarni opažena povišana hitrost staranja papirne izolacije [6].

Zato smo se v zadnjih treh letih na Elektroinštitutu Milan Vidmar posvetili raziskavam hlajenja in optimiranju hladilnih sistemov velikih transformatorjev, da bi preprečili prehitro staranje transformatorjev.

6. Hlajenje transformatorjev

Vse od iznajdbe transformatorja se zaradi tehnološkega napredka in z njim povezane naraščajoče potrebe po električni energiji soočamo tudi s trendom večanja moči transformatorjev. Hkrati z večanjem nazivne moči naraščajo tudi izgube v transformatorju, medtem ko lastna sposobnost hlajenja transformatorja narašča počasneje kot izgube. Zato večji transformatorji potrebujejo intenzivnejše hlajenje s pomočjo hladilnih aparatov, ki preko toplotnega medija olja učinkoviteje odstranjujejo toploto, ki nastaja zaradi jouskih, histereznih in vrtničnih izgub v kovinskih delih transformatorja.

Princip hlajenja transformatorja temelji na konvekciji, tj. prenosu toplote z gibanjem hladilnega medija (olja). Ta prevzema toplotno energijo iz navitij in jedra ter jo prek hladilnih aparatov oddaja v okolico.

6.1 Sistemi hlajenja - fizikalno ozadje

Osnovni tip prenosa toplote v transformatorjih je konvekcija – prenos toplote z gibanjem toplotnega medija. Ločimo naravno konvekcijo, pogojeno z gravitacijo, ter prisilno konvekcijo, „gnano“ s pomočjo oljnih črpalk. Sisteme hlajenja transformatorjev glede na tip konvekcije olja v hladilnikih in navitjih razvrščamo v naslednje kategorije:

- ON.. (oil natural)
- OF.. (oil forced)
- OD.. (oil directed)

Sistem hlajenja ON.. je bil razvit že manj kot dese let po izumu transformatorja. Segrevanje olja v navitjih, kot tudi ohlajanje olja v hladilnikih poteka po principu naravne (gravitacijske) konvekcije. Za sisteme ON.. je značilna relativno velika razlika med temperaturo olja zgoraj-spodaj v navitjih in hladilnikih (~20K), ki pogojuje kroženje olja z naravno konvekcijo.

Sistem hlajenja OF.. se uporablja pri transformatorjih z večjo močjo, ki se uporabljajo šele od sredine prejšnjega stoletja. Značilnost sistema hlajenja OF.. je uporaba oljnih črpalk za prisilno pretakanje olja skozi hladilne aparate da bi se povečal izkoristek ter zmanjšale dimenzije in cena hladilnega aparata. Olje v navitjih se, enako kot pri sistemu ON.., tudi pri OF.. sistemu pretaka po principu naravne konvekcije.

Pri sistemu hlajenja OD.. olje v hladilnikih, kot tudi olje v navitjih izmenjuje toploto po principu prisilne konvekcije. S pomočjo črpalk in usmerjanja toka olja se večinski del olja pretaka ob navitjih, zato je odvajanje toplote iz transformatorja (še) učinkovitejše kot pri OF.. sistemih hlajenja.

Učinkovitost hlajenja transformatorja je odvisna od številnih dejavnikov. Transformatorsko olje mora imeti čim nižjo viskoznost v celotnem delovnem temperaturnem intervalu, hladilni kanali med navitji morajo biti primerno široki in geometrijsko izpeljani tako, da iz vseh mest čim učinkoviteje odvajajo toploto.

Nečistoče med hladilnimi rebri zračnih hladilnikov zmanjšujejo pretok zraka in s tem zmanjšujejo hladilno moč, zato so temperature v transformatorju lahko tudi za več kot 10 K višje.

7. Merjenje temperatur v transformatorju

Eden glavnih vzvodov staranja transformatorja je termična obremenitev papirne izolacije v navitjih. Poznavanje temperaturnih razmer v transformatorju je pomembno v vseh fazah življenjske dobe transformatorja, ker poleg hitrosti staranja odloča tudi o zanesljivosti delovanja. Napaka pri merjenju temperature tako botruje neoptimalnemu hlajenju, posledično skrajšanju življenjske dobe in predčasemu zmanjšanju zanesljivosti obratovanja transformatorja.

Temperatura najtoplejše točke v navitjih je osnovno merilo za termično obremenitev transformatorja in jo lahko določimo na dva načina:

- neposredno, z meritvijo temperature najtoplejše točke s termo-optičnimi tipali, vgrajenimi v navitja
- posredno, z izračunom na podlagi termičnega modela, znanih temperatur in drugih parametrov, izmerjenih pri preskusu segrevanja transformatorja.

Neposredni način merjenja temperature s termo-optičnimi tipali, ki se je uveljavil po letu 1980, je pripomogel k izdelavi standardiziranih termičnih modelov za posamezne tipe hlajenja. Termični model je osnova za delovanje in nastavitvev krmiljenja hladilnega sistema. Njegovi parametri se ponavadi izmerijo ob preskusu segrevanja transformatorja po posredni metodi. V standardu IEC 60076-7: Loading guide for oil immersed power transformers, ki je v letu 2006 nadomestil istoimenski standard IEC 60354, so postavili zahtevo, da se temperature pri preskusu segrevanja transformatorjev z veliko močjo praviloma izmerijo neposredno. Posredna meritev je možna le v primeru, da je termični izračun dokazan z neposrednimi meritvami transformatorja enake konstrukcije.

Razlog za opisano spremembo, kot navaja novi predlog standarda IEC 60076-7, so ugotovitve raziskav [8], da so pri uporabi posredne metode izračuna temperature z uporabo standardnih termičnih modelov možna velika odstopanja od dejanskih temperatur v navitjih.

Pri sistemu hlajenja OF.. se pri posredni metodi določanja temperature najtoplejše točke pojavi sledeč problem, na katerega opozarja že standard IEC 60076-2 (1993), dodatek A, stran 31:

»Temperatura olja v vrhnjem delu navitja (uporablja se kot parameter termičnega modela pri izračunu temperature najtoplejše točke, op.av.) se zaradi mešanja toplega olja iz navitij in hladnega olja, ki se s črpalkami pretaka ob steni kotla, lahko bistveno razlikuje od izmerjene temperature mešanice olja v oljnem žepu pod vrhom transformatorskega kotla (top-oil temperature)«.

Če se pri določitvi temperature olja v navitjih uporabi kar meritev temperature olja v oljnem žepu (kar se v praksi pogosto dogaja), so rezultati izračunov temperature najtoplejše točke v navitjih nerealni in zavajajoči, posledično pa je napačno nastavljeno tudi krmiljenje hladilnega sistema in zaščita transformatorja.

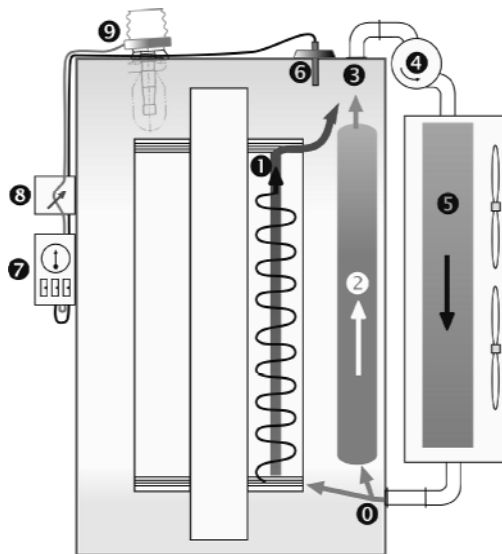
Naslednje poglavje je namenjeno utemeljitvi in podrobnejši razlagi tega fizikalnega pojava.

8. Termo-hidravlični model OFAF transformatorja

Shema spodaj v poenostavljeni obliki prikazuje toplotni proces, ki poteka v notranjosti OFAF hlajenega transformatorja. V navitjih transformatorja se pri obremenitvi sproščajo toplotne izgube, pri čemer se povišuje njihova temperatura.

Olje se v stiku z navitji segreva (točka 1), zato se začne mejna plast olja vzgonsko dvigovati po principu naravne konvekcije. Segreto olje iz navitij se pod vrhom transformatorskega kotla pomeša (točka 3) s hladnejšim oljem, ki teče ob stenah kotla (točka 2) in se le malo segreje zaradi relativno majhnih izgub v kotlu in hitrega pretoka olja (glede na vzgonski pretok olja v navitjih). Pretok olja skozi hladilni aparat (točka 5), ki odvaja toploto iz olja v zrak, vsiljujejo oljne črpalke (točka 4). Ohlajeno olje se v spodnjem delu vrača v kotel in s tem zaključuje notranji konvekcijski krog.

Splošno razširjeno mnenje, da črpalke neposredno vsiljujejo pretok olja v navitjih, nima fizikalne podlage. Razlog je v dejstvu, da je pri tipičnem OFAF sistemu hidravlični presek hladilnih kanalov v navitjih precej manjši (~100-krat) od hidravličnega preseka toka olja, ki se pretaka ob stenah kotla, poleg tega pa je hidrodinamični upor hladilnih kanalov v navitjih veliko večji od proste poti olja ob stenah kotla.



Slika 4: Notranji konvekcijski krog OFAF transformatorja

Zanemarljivo napako naredimo, če pri sistemu hlajenja OFAF upoštevamo v navitjih prenos toplote le z naravno konvekcijo. Velikost pretoka olja v navitjih zaradi konvekcije je odvisna od temperaturne razlike navitje-olje in od hidravlične geometrije (preseka) hladilnih kanalov v navitjih.

Velikost pretoka olja v hladilnikih in ob stenah kotla (mimo navitij) je zaradi toge navorne karakteristike asinhronskih motorjev oljnih črpalk in nestisljivosti hladilnega medija odvisna le od moči in števila oljnih črpalk.

Posledično je pretok črpalk pri sistemu hlajenja OFAF tipično 5- do 10-krat večji od konvekcijskega pretoka olja skozi navitja.

Temperatura olja pod vrhom kotla (Θ_6 – točka 6 na sliki 4) je tako poleg same temperature olja iz navitij odvisna od:

- razmerja pretokov olja skozi in mimo navitij
- temperature olja mimo navitij
- položaja tipala termične slike.

V nadaljevanju ocenimo vpliv mešanja olja na meritev temperature Θ_6 . V nadaljevanju uporabljene temperature izrazimo z relativnimi vrednostmi glede na temperaturo okolice:

$$\Theta_x = T_x - T_{okolice} \quad (1)$$

$$[\text{nadtemperatura}] = [\text{temperatura}] - [\text{temp. okolice}]$$

Pri mešanju olja toplo olje odda hladnemu enako količino toplote, kot je hladno sprejme od toplega. Na podlagi enačbe o ohranitvi toplotne energije mešanice olja lahko zapišemo enačbo (2), ki jo je mogoče v poenostavljeni obliki interpretirati sledeče: *Kolikor večji je pretok olja mimo navitij (Φ_2) od pretoka olja v navitjih (Φ_1), toliko višja je tudi dejanska nadtemperatura olja v navitjih od izmerjene nadtemperature olja v točki 6, glede na temperaturo olja spodaj.* Pri tem upoštevamo, da sta temperaturi olja spodaj in olja ob stenah kotla podobni, $\Theta_2 \approx \Theta_0$

$$\Theta_1 = \frac{\Phi_2}{\Phi_1} (\Theta_6 - \Theta_2) + \Theta_c \quad (2)$$

kjer je (oznake ustrezajo tudi k sliki 4):

Φ_1 – (konvekcijski) pretok olja skozi navitja

Φ_2 – (vsiljeni) pretok olja ob stranici kotla

Θ_6 – (merjena) nadtemperatura olja v oljnem žepu

Θ_1 – nadtemperatura olja v navitjih

Θ_2 – nadtemp. olja ob stenah kotla

Θ_0 – nadtemp. olja na dnu kotla

Ker se najtoplejše olje na izhodu iz navitij meša s hladnim oljem, ki se dviga ob steni kotla, dobimo pri meritvi temperature Θ_6 napako, katere morebitne posledice so naslednje:

- Z napačno informacijo o (najvišji) temperaturi olja je nepravilno krmiljen hladilni sistem, kar vodi v manj intenzivno hlajenje in posledično hitrejšo staranje transformatorja (krmiljenje hladilnega sistema podrobneje opisuje naslednje poglavje).
- Z napačno informacijo o temperaturi olja je nepravilno krmiljena tudi zaščita transformatorja, zato je v primeru preobremenitve zmanjšana zanesljivost obratovanja transformatorja.

9. Krmiljenje hladilnega sistema

Osnovni namen hladilnega sistema je omejevanje temperature transformatorja. Moč hladilnega aparata pri hladilnih sistemih z naravnim konvekcijskim hlajenjem narašča samodejno z dviganjem temperature transformatorja, pri čemer se zaradi izgube dviguje temperatura transformatorja do tiste točke, pri kateri je doseženo izenačenje hladilne moči z močjo izgub.

Pri sistemih s prisilnim konvekcijskim hlajenjem je uravnavanje hladilne moči hladilnega aparata navadno krmiljeno avtomatsko s pomočjo termične slike, ki vklaplja oljne črpalke in ventilatorje v hladilnih blokih. Pri teh sistemih se ponavadi uporabljajo kompaktni lamelni hladilniki, katerih hladilna moč je odvisna od vklopljenosti ventilatorjev in črpalk. Ker pri delnih obremenitvah ali nizkih temperaturah okolice ne potrebujemo polne hladilne moči, termična slika uravnava vklop potrebnih hladilnih blokov.

V termični sliki (točka 1 na sliki 5) je termostatsko stikalo, ki je krmiljeno s pomočjo posredno izračunane temperature najtoplejše točke v navitjih, katero naj bi instrument termične slike tudi prikazoval. Parametri, ki jih termična slika potrebuje za izračun temperature najtoplejše točke v navitjih, so:

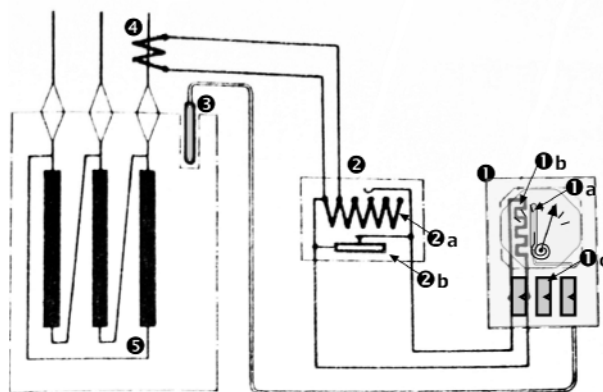
- relativna obremenitev transformatorja (k) – meritev toka prek tokovnika (točka 4 na sliki 5)
- temperatura olja v navitjih zgoraj (Θ_1)
- maksimalna vrednost temperaturne razlike pri nazivni obremenitvi $Hg_r =$

[najtoplejša točka v navitjih–olje v navitjih zgoraj], ki je ponavadi izračunana po standardnem IEC termičnem modelu s podatki preskusa segrevanja, alternativno pa izmerjena neposredno med preskusom segrevanja z uporabo optičnih temperaturnih senzorjev

Temperatura olja v kotlu zgoraj se prek tipala v oljnem žepu (točka 3 na sl. 4) in kapilarne cevke prenaša v temperaturni indikator termične slike (točka 1a). Vpliv segrevanja navitij v olju simulira uporovno gredo (točka 1b), ki dogreva temperaturni indikator termične slike kvadratično z obremenitvijo transformatorja, s čimer termična slika simulira temperaturo najtoplejše točke v navitjih. Os temperaturnega indikatorja je mehansko povezana s stikali termične slike, ki glede na temperaturne

nastavitve vklaplja in izklaplja črpalke in ventilatorje v hladilnih blokih in s tem krmilijo temperaturo transformatorja.

Nastavitev maksimalne temperaturne razlike Hg_r v prilagoditveni enoti termične slike (točka 2) praviloma izvede izdelovalec transformatorja na podlagi rezultatov preskusa segrevanja, ko so poznani vsi trije prej omenjeni parametri (k , Θ_1 in Hg_r).



Slika 5: Shema termične slike s prilagoditveno enoto (Legenda: 1 - termična slika, 2 - prilagoditvena enota, 3 - tipalo temperature olja, 4 - tokovni transformator na skožniku, 5 - navitja transformatorja)

V prejšnjem poglavju je bilo prikazano, da pri sistemu hlajenja OFAF temperaturi olja v navitjih zgoraj (Θ_1) in temperatura olja pod vrhom kotla (Θ_6) nista enaki. Zato termična slika ne more verno simulirati temperature najtoplejše točke, hladilni sistem pa zato ni krmiljen optimalno.

10. Optimiranje hlajenja transformatorja

Glavna parametra pri optimiranju hlajenja sta temperatura transformatorja in izgube hladilnega aparata. Parametra, ki si medsebojno nasprotujeta, sta odvisna od več dejavnikov:

- obremenitve transformatorja
- učinkovitosti hladilnega sistema
- nastavitve termostata hladilnega sistema
- temperature okolice

Zniževanje temperature upočasnjuje staranje transformatorja, hkrati pa povečuje moč, potrebno za napajanje hladilnega aparata, ki jo lahko smatramo kot dodatne izgube transformatorja. Običajni pristop k dimenzioniranju oz. nastavitvi hlajenja v praksi lahko ponazorimo v obliki vprašanja:

Kako visoka je še lahko temperatura transformatorja oz. kako šibko je lahko hlajenje, da se transformator ne bo prehitro staral?

Preden pa se odločimo za tak pristop k hlajenju, si na realnem primeru OFAF hlajenega transformatorja, 400/110 kV, 300 MVA najprej oglejmo, kakšno vlogo

imajo stroški hlajenja glede na vse stroške, povezane s transformatorjem.

Vzemimo, da je transformator v povprečju 50-odstotno obremenjen, pri čemer v njem nastaja nekaj manj kot 50% nazivnih skupnih izgub v jedru in navitjih, kar znaša okvirno 300 kW.

Predpostavimo, da termična slika krmili hlajenje tako, da je hladilni sistem v povprečju izkoriščen 50-odstotno (delujeta dva od 4štirih hladilnih aparatov).

Temperatura olja pod vrhom kotla (top-oil) je med 20K in 30K nad temperaturo okolice. Če pri optimiranju hlajenja povečamo povprečno moč hlajenja s prenavitvijo termične slike na 75% oz. 100% opazimo, da se povprečna temperatura olja in z njo tudi vse druge temperature v transformatorju znižajo za pribl. 10 do 15K.

Moč izgub hladilnega sistema znaša pri 50% povprečni moči hlajenja 15 kW, pri podvojeni (maksimalni) moči hlajenja pa 30 kW.

V tabeli 1 je prikazano, kakšno vlogo imajo pri opisanem primeru stroški izgub hladilnega aparata pri različnih nastavitvah hlajenja glede na druge stroške v življenjski dobi različno hitro starajočih se transformatorjev (t.i. Life-cycle-Cost). Vidimo lahko, da so največji stroški zaradi intenzivnejšega delovanja hladilnega režima bistveno manjši, kot je strošek transformacije v primeru, ko zaradi nezadostnega hlajenja skrajšamo življenjsko dobo transformatorja na 20 let.

S tega vidika se prej zastavljeno vprašanje optimalne nastavitve hlajenja spremeni v:

Koliko lahko znižamo temperature in s tem podaljšamo življenjsko dobo transformatorja?

Enostavnega splošnega odgovora na to vprašanje ni mogoče podati zaradi raznolikosti hladilnih sistemov, povprečnih obremenitev in starosti transformatorjev, katerih hlajenje optimiramo, lahko pa podamo nekaj smernic k optimiranju:

- Pri tipu hlajenja OFAF je prisoten problem kazanja nižje temperature termične slike, zato je pri optimiranju hlajenja smiselna najprej podrobnejša termična analiza transformatorja.
- Po opravljeni termični analizi je smiselno nastaviti termično sliko tako, da bo najvišja temperatura olja zgoraj (top-oil) ob upoštevanju morebitnih napak merjenja temperature omejena na pribl. 45°C in najvišja temperatura navitij (hot-spot) na 65°C do 70°C.
- Za doseganje največje učinkovitosti hladilnega aparata mora biti le-ta redno vzdrževan in čiščen, še posebej v primeru če so v hladilnem aparatu uporabljeni kompaktni lamelni hladilniki
- Pri obstoječih transformatorjih v primeru višjih temperatur v smislu doseganja daljše življenjske dobe najenostavneje in ekonomsko povsem upravičeno aktivirati rezervne hladilne sposobnosti obstoječega sistema, ki se kvarijo tudi v mirujočem stanju. V primeru okvare hladilnega bloka ostane termična situacija in s tem obratovalna zanesljivost enaka kot pred aktiviranjem rezervnega hladilnega bloka.
- Pri nastavitvi režima delovanja in sestave hladilnih shupin se je smiselno izogibati strmim spremembam hladilne moči in s tem povezanim temperaturnim nihanjem, ki povečajo vdiranje vlage v transformator.

TR: 400 kV, 300MVA, OFAF povprečna obremenitev TR = 50% cena kWh el.en. = 0,025 € izgube hladilnega sistema 15-30kW	Stroški transformacije v 40 letih	
	1 transformator ŽD 40 let, z optimiranjem hlajenja	2 transformatorja ŽD 20 let, brez optimiranja hlajenja
Cena transformatorja	3 mio €	6 mio €
Cena izgub pri povprečni 50% obremenitvi	2,6 mio € (= 300 kW · 24 h · 365 dni · 40 let · 0,025 €/kWh)	2,6 mio € (= 300 kW · 24h · 365 dni · 40 let · 0,025 €/kWh)
Minimalna cena izgub hladilnega sistema (50% popvr. hladilna moč)	130.000 € (= 15 kW · 24h · 365 dni · 40 let · 0,025 €/kWh)	
Srednja cena izgub hladilnega sistema (75% povprečna hladilna moč)	195.000 € (= 22,5 kW · 24 h · 365 dni · 40 let · 0,025 €/kWh)	
Maksimalna cena izgub hladilnega sistema (100% povprečna hlad. moč)	260.000 € (= 30 kW · 24 h · 365 dni · 40 let · 0,025 €/kWh)	
Skupni stroški	5,86 mio €	8,73 mio €

Tabela 1: Vpliv optimiranja hlajenja na stroške transformacije

11. Sklep

Za doseganje pričakovane ŽD transformatorjev 40 let bo treba upoštevati izsledke zadnjih raziskav, ki opozarjajo na pomembno vlogo staranja papirne izolacije pri temperaturah pod 80°C zaradi vpliva vlage na pospeševanje razkrojnih procesov v celulozni izolaciji.

Z optimiranjem hlajenja je mogoče znižati stroške v ŽD ob nezmanjšani zanesljivosti obratovanja transformatorja. Učinek optimiranja je odvisen od moči hladilnega sistema, povprečne obremenitve in starosti transformatorja. Na podlagi raziskave temperaturnih razmer v velikih transformatorjih s sistemom hlajenja OFAF smo pojasnili razloge za nepravilnosti dosedanjega standardnega termičnega modela, ki so tudi razlog za neoptimalno hlajenje in prehitro staranje le-teh.

Po uveljavitvi novega standarda IEC 60076-7: *Loading guide for oil immersed power transformers*, ki med preskusom segrevanja novih transformatorjev predvideva neposredne meritve temperatur (z optičnimi senzorji ali s predhodno validirano računsko metodo), bo ta problem rešen za nove transformatorje.

Čeprav so se cene opreme za neposredno merjenje temperature v zadnjem desetletju znižale na povsem dosegljivo raven in so na trgu prisotne že preskušene rešitve, se kupci transformatorjev do sedaj praviloma niso odločali za vgradnjo optičnih senzorjev.

Uveljavitev novega standarda IEC 60076-7 bo izdelovalcem transformatorjev omogočila izdelavo, kupcem pa nakup transformatorja s pričakovano življenjsko dobo 40 let.

12. Literatura

- [1] D.H. Shroff et.al., A review of paper ageing in power transformers, IEE proceedings, Vol. 132, Pt. C, No. 6, Nov 1985
- [2] T. Molinski, Minimising the Life Power Cost of power transformers, Cigre SC12, Colloquium Dublin, 2001
- [3] Montsinger V.M., "Loading transformers by temperature", Trans.Amer.Inst.Elect.Engrs, 1930, pp. 776-790
- [4] Lars E. Lundgaard, Dag Linhjell, Walter Hansen, Morten U. Anker, "Ageing and Restoration of Transformer Windings", SINTEF Energiforskning, TR A5540, EBL-K 43-2001, Dec. 2001
- [5] M. Končan Gradnik, "Temperature, hlajenje in življenjska doba transformatorja", Sloko Cigré 2003 session, A2
- [6] M. Končan, A. Varl, I. Kopal, "Izdelava globalne ocene stanja in preostale življenjske dobe energetskih transformatorjev v PEE", EIMV ref. št. 1625, Ljubljana, Nov. 2003
- [7] T. Gradnik, "Prenos toplote v transformatorju z OFAF sistemom hlajenja", seminarska naloga, EIMV, sept. 2005.
- [8] Experimental determination of power transformer hot-spot factor – CIGRE WG 12-09, Electra no. 161, Aug. 1995
- [9] K. Eckholz, "New developments in transformer cooling calculations", Cigré 2004 session, A2-107
- [11] Incropera, F.P., DeWitt, D.P.: Fundamentals of heat and mass transfer.- 5th ed.- New York [etc.]: J. Wiley & Sons, Inc. 2002
- [12] K. Goto, H. Tsukioka, E. Mori: Measurement of winding temperature of power transformers and diagnostics of ageing deterioration by detection of CO₂ and CO, Cigré 1990 session, A12-102

Tim Gradnik received his B.S.E.E. degree from Faculty of Electrical Engineering, University of Ljubljana, Slovenia in 2004. He is working as a Research Engineer at the Physical-Chemical Transformer Diagnostics Department of the Milan Vidmar Electric Power Research Institute in Ljubljana. His current work involves research in cooling, diagnostics and maintenance of power transformers. He is a member of IEC TC14 MT6.

Maks Babuder received his B.S.E.E. degree from Faculty of Electrical Engineering of the University of Ljubljana, Slovenia and Ph.D. degree from University of Zagreb, Croatia, in 1964 and 1993, respectively. He started his professional career as a Research Engineer at the High-Voltage Laboratory of the Milan Vidmar Electric Power Research Institute in Ljubljana. Later on he became its Head and is currently the Institute's Managing Director. Since 1987 he has been giving lectures on the High-Voltage Technique at the Faculty of Electrical Engineering of Ljubljana.

Maja Končan Gradnik received her B.Sc degree in Chemical Engineering and M.Sc. degree in 1975 and 1983, respectively, from University of Ljubljana, Faculty of Natural Science and Engineering. From 1977-1985 she was the Head of Department for Industry of Construction Materials at civil engineering company SCT, Ljubljana. From 1985 to 1991 she was the Head of Chemistry Group at the High-Voltage Department of the Electric Power Research Institute Milan Vidmar, Ljubljana. Since 1992 she has been the Head of Physical-chemical Transformer Diagnostics Department. The main topics of her research are insulating oils, transformers residual lifetime evaluation techniques and transformer condition monitoring.

Mrs. Končan-Gradnik is a member of CIGRE D1, CIGRE WG D1.01, IEC TC 10 and several IEC and CIGRE working bodies in the field of transformer insulation and diagnostics. She is also the President of SIST/TC TPD (Liquid and gaseous dielectrics) and the President of CIGRE National Committee D1.