

Sandra Hutter
HEP – ODS d.o.o., Elektra Zagreb
sandra.hutter@hep.hr

PRAĆENJE OPTEREĆENJA DISTRIBUCIJSKIH TRANSFORMATORA

SAŽETAK

U članku su analizirani podaci o maksimalnim opterećenjima distribucijskih transformatora 10(20)/0,4 kV prikupljeni tijekom zadnjih sedam godina kako bi se ocijenilo stanje u mreži. Podaci su pokazali da je samo 2,5 % od ukupnog broja transformatora povremeno opterećeno iznad 100 %.

Preopterećivanje transformatora će dovesti do ubrzanog starenja i toplinske degradacije izolacije. Povišenje temperature namota je dinamička funkcija uslijed tereta i vanjske temperature okoline. Kod većine tereta postoji korelacija između kVA tereta i temperature okoline ovisno o vrsti priključenog tereta (npr. grijača tijela ili klime) što je lako uočljivo na dijagramima opterećenja.

Kod procjene opteretivosti transformatora potrebno je uzeti u obzir i smanjenu opteretivost kod nelinearnih tereta koji uzrokuju struje viših harmonika.

Ključne riječi: teret, transformator, preopterećivanje, dnevni dijagram, k-faktor

LOAD MONITORING OF THE DISTRIBUTION TRANSFORMERS

SUMMARY

In the article an analysis was conducted of the maximal distribution transformers 10(20)/0,4 kV load data collected during last seven years in order to assess the conditions in the distribution network. Measurements have shown that only about 2,5 % from the total number of transformers are loaded over 100 %.

Transformer overloading will result in an accelerated aging and dielectric deterioration of the insulation. Increased winding temperature is a dynamic function due to load and ambient temperature. In most type of loads there is a correlation between the peak load and the ambient temperature depending on the different type of loads e.g. heating or air-conditioning, which can be clearly observed on the daily load profiles.

An assessment of the transformer overloading capability should take into the consideration due to the nonlinear loads that generate harmonic currents.

Key words: load, transformer, overload, daily load profile, k-factor

1. UVOD

Distribucijska mreža grada Zagreba obuhvaća preko 2400 distribucijskih stanica 10(20)/0,4 kV s jednim ili više ugrađenih transformatora. Analizirani su podaci o maksimalnim opterećenjima distribucijskih transformatora 10(20)/0,4 kV prikupljeni tijekom zadnjih sedam godina na području grada Zagreba na uzorku od otprilike 500 transformatora, kako bi se ustanovilo stanje u distribucijskoj mreži.

Sustavno mjerenje opterećenja u gradu Zagrebu postaje sve važnije zbog naglog porasta broja potrošača i novih priključaka, rastućeg konzuma te naglog širenja i izgradnje grada.

Preopterećivanje transformatora dovesti će do ubrzanog starenja, međutim ponekad je u pogonu to nemoguće izbjeći. Povišenje temperature namota transformatora je dinamička funkcija uslijed tereta i vanjske temperature okoline i stoga do toplinske degradacije izolacije dolazi uslijed kumulativnog učinka ova dva faktora. Poznato je da povišenje radne temperature iznad nazivne temperature smanjuje životni vijek transformatora, ali vrijedi i obratno, smanjenje radne temperature produljuje životni vijek transformatora. Stoga kratki periodi rada s teretom iznad nazivnog mogu biti uravnoteženi s dužim periodima rada pod opterećenjem manjim od nazivnog tako da je ukupni životni vijek transformatora i dalje prihvatljiv.

2. BAZA OPTEREĆENJA TRAFOSTANICA

Baza opterećenja trafostanica sadrži podatke mjerenja za 1400 stanica na distribucijskom području grada Zagreba. Mjerenja se prikupljaju iz prijenosnih mjernih uređaja, više-funkcijskih mjernih terminala i elektroničkih ampermetara. Predviđeni su zimski i ljetni ciklusi mjerenja, a mjerenja su organizirana u periodima od jednog do nekoliko dana. Posljednjih godina javila se sve veća potreba za ljetnim mjerenjima, pogotovo u centru grada. Obuhvaćena su mjerenja od 2003. god.

2.1. Mjerni uređaji

Elektronički ampermetri i više-funkcijski mjerni terminali su trajno ugrađeni u stanicama, dok su više-kanalni analizatori mreže prijenosni uređaji koji imaju mogućnost mjerenja opterećenja transformatora i pojedinih strujnih krugova u sve tri faze.

Višefunkcijski mjerni terminali bilježe mjerenja u 10 min periodima tijekom nekoliko mjeseci te daju pregledan grafički prikaz električnih veličina (struje, naponi, $\cos \varphi$, itd.).

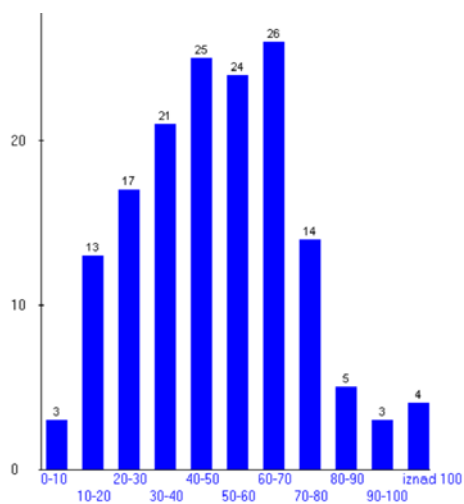
Elektronički ampermetri bilježe vrijednosti najvećih zabilježenih struja u pojedinoj fazi tijekom cijele godine i datum kada je najveća struja zabilježena te dnevni dijagram za jedan dan tijekom godine, odabran je Badnjak kao dan s natprosječnim opterećenjem. U 2009. godini najviše vršno opterećenje grada Zagreba je zabilježeno u ponedjeljak 21.12.2009 g. i iznosilo je 586 MW.

2.2. Raspodjela opterećenja transformatora

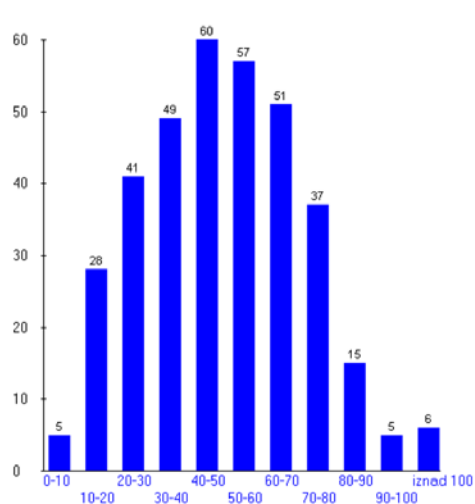
Na grafovima na slici 1. prikazana je raspodjela broja distribucijskih transformatora 10(20)/0,4 kV prema najvećem opterećenju u postocima nazivne snage prema podacima mjerenja od 2003. do 2008. godine. Ukupan broj transformatora (uzorak) varira ovisno o broju mjerenja u toj godini.

Podaci iz baze opterećenja transformatora pokazuju da je ispod 2,5 % od ukupnog broja transformatora povremeno opterećeno iznad 100 %. Statistički gledano taj postotak nije velik, međutim tokom ljetnih mjeseci u zadnje četiri godine desilo se sedam požara u distribucijskim stanicama. Uzroci požara su međutim bili pregrijani NN razvodi. Tokom ljetnih mjeseci temperature u stanicama se penju na znatno više vrijednosti od temperature okoline, što je često posljedica nedovoljnog provjetravanja stanica. Osim mjerenja opterećenja transformatora provode se i termovizijski pregledi transformatora i NN razvoda.

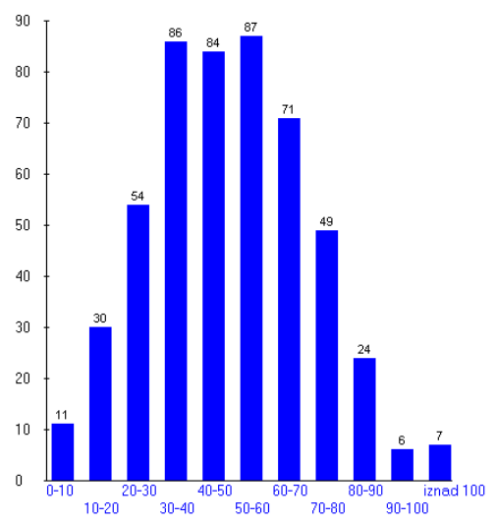
Prema raspodjeli sa slike 1. vidljivo je da je veliki broj transformatora podopterećen, a najveća opterećenja transformatora ne dosežu ni 50%. Kod velikog broja transformatora koji se ugrađuju u nove distribucijske stanice potreban je dulji vremenski period dok se ne priključe novi potrošači. Takav trend je npr. uočen u novim POS naseljima i novo izgrađenim stambenim zonama. Zbog očekivanog porasta opterećenja se sve češće ugrađuju transformatori većih snaga (1000 kVA), međutim u tim slučajevima treba uzeti u obzir i veću cijenu jedinica te povećane gubitke.



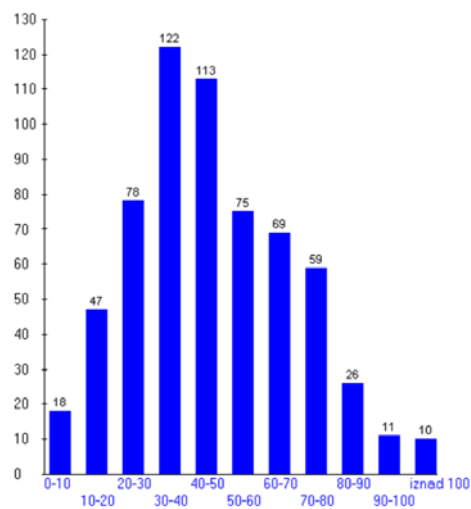
a) 2003. godina



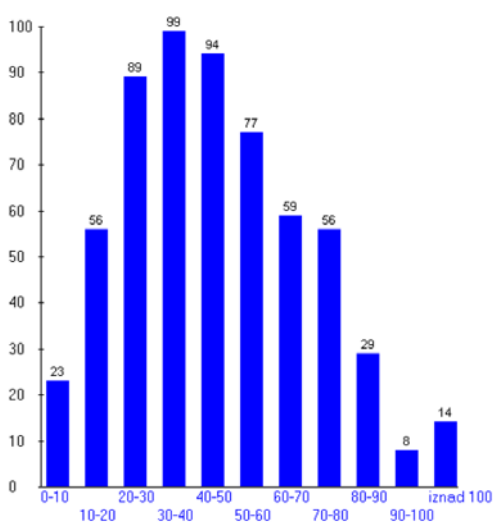
b) 2004. godina



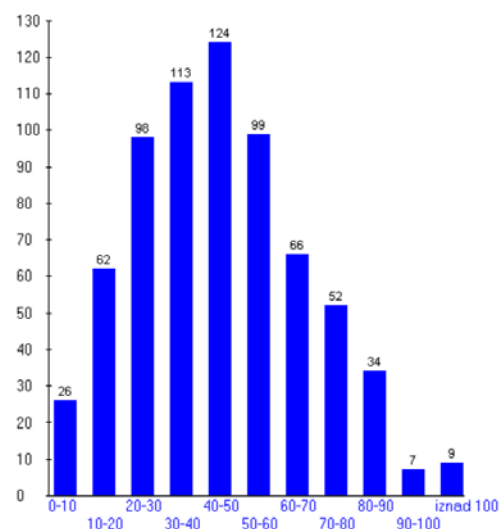
c) 2005. godina



d) 2006. godina

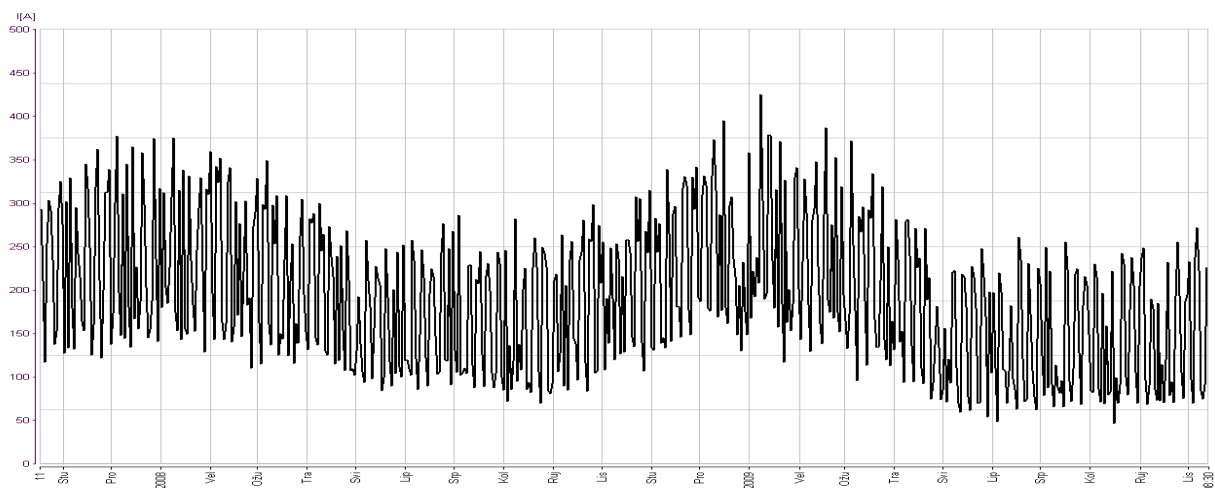


e) 2007. godina



e) 2008. godina

Slika 1. Raspodjela broja transformatora prema najvećem % opterećenja – podaci od 2003. do 2008. godine



Slika 2. Opterećenje transformatora nazivne snage 400 kVA u periodu od 2 godine

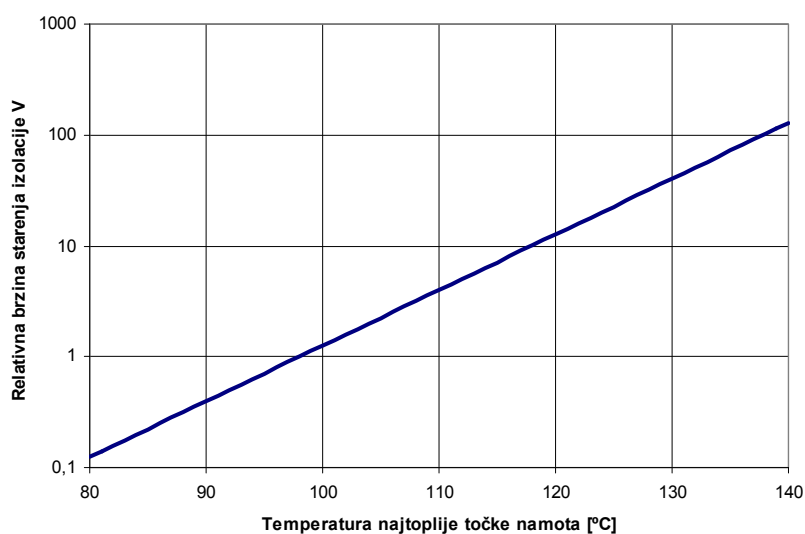
Na slici 2. je prikazano opterećenje transformatora (struja u jednoj fazi na NN strani) kroz period od 2 godine. Vidljiv je tipičan porast tereta u zimskim mjesecima s padom temperature, koje doseže svoje vršne vrijednosti oko Božića i Nove godine.

3. STARENJE TRANSFORMATORA

Prema IEC 60076-7 [1] posljedice opterećivanja transformatora iznad nazivnih vrijednosti su slijedeće:

- temperatura namota, izolacije i ulja će se povisiti i može dosegnuti nedozvoljene nivoe
- gustoća rasipnog toka izvan jezgre se povećava i uzrokuje dodatno zagrijavanje uslijed lutajućih struja u metalnim dijelovima kroz koje prolazi rasipni tok
- s promjenom temperature mijenja se količina vlage i plinova u izolaciji i ulju
- provodni izolatori, kabelski završeci i strujni transformatori su također izloženi većim naprezanjima.

Odnos između relativne brzine starenja V i temperature najtoplije točke namota kako je naveden u [1] prikazan je na slici 3. Kod temperature najtoplije točke od $98\text{ }^{\circ}\text{C}$, brzina starenja za papir u ulju iznosi 1,0. Svakih $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ iznad nazivne radne temperature dvostruko povećava brzinu starenja izolacije. Također, smanjenje temperature za $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ dvostruko usporava brzinu starenja izolacije.



Slika 3. Funkcija ovisnosti relativne brzine starenja izolacije za papir u ulju (toplinska klasa A) o temperaturi najtoplije točke namota

Da bi se zagrijao namot transformatora, jezgra i ulje potrebna je akumulacija stanovite toplinske energije. Norma IEC 60076-7 [1] daje pojednostavljeni termodinamički model s dvije efektivne toplinske konstante: vremenskom konstantom namota i vremenskom konstantom ulja. Vremenska konstanta najtoplije točke namota tipično iznosi nekoliko minuta, dok vremenska konstanta ulja ima vrijednosti od nekoliko sati za distribucijske transformatore.

Životni vijek transformatora i brzina starenja izolacije ovise o temperaturi najtoplije točke koja se za distribucijske transformatore računa tako da se temperaturi ulja u džepu doda razlika srednjeg zagrijanja namota i srednjeg zagrijanja ulja uvećana za 10 %.

Pri temperaturi okoline nižoj od 40 °C može se tolerirati povećano opterećenje transformatora. Ljeti su temperature u nekim distribucijskim stanicama znatno više od 40 °C. Termovizijskim pregledima izmjerene su temperature od 60 – 80 °C te je to potrebno uzeti u obzir.

Osim ubrzanog starenja izolacije izrazito visoke temperature namota mogu dovesti do pojave plinova, što može izazvati trenutne proboje.

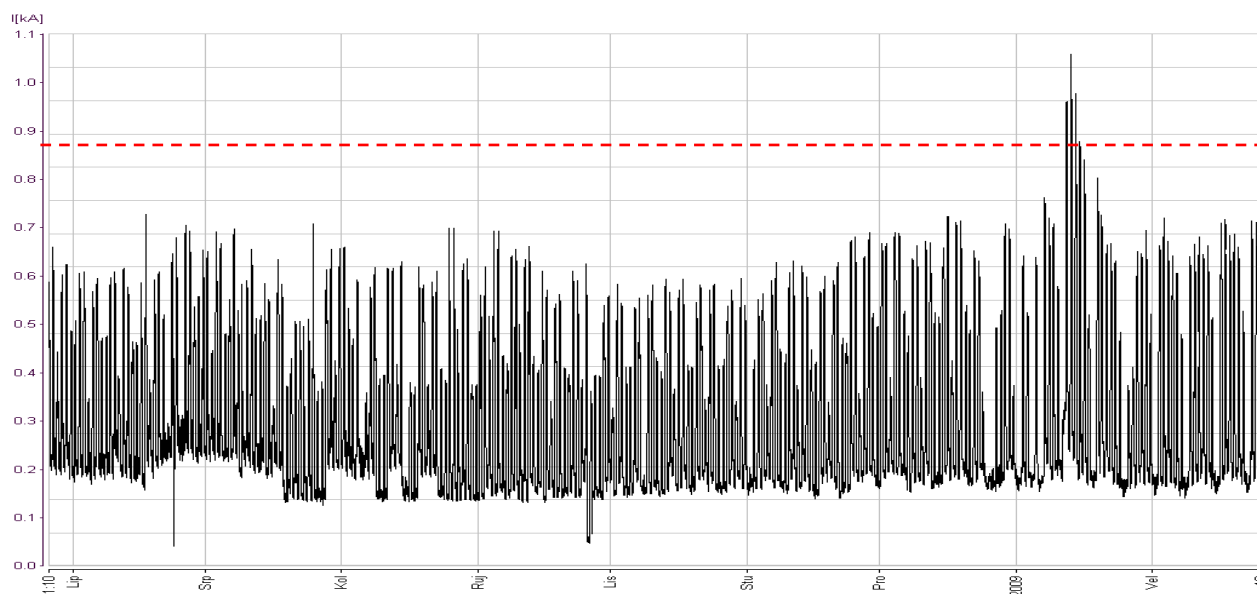
Prema normi IEC 60076-7 [1] dozvoljeno trajanje kratkotrajnog opterećenja u nuždi distribucijskih uljnih transformatora je obično do pola sata, odnosno trebalo bi biti kraće od toplinske vremenske konstante transformatora i ovisno je o radnoj temperaturi prije porasta tereta. Kao strujno ograničenje navodi se dozvoljeno kratkotrajno opterećenje do 2,0 p.u. nazivne struje. Za distribucijske transformatore nije navedena najviša dozvoljena temperatura ulja niti najviša dozvoljena temperatura najtoplije točke namota, već se umjesto tih graničnih vrijednosti navodi da treba uzeti u obzir da ukoliko temperatura najtoplije točke namota prelazi 140 °C može doći do pojave mjehurića plina u ulju koji mogu narušiti dielektričnu čvrstoću transformatora.

Za dugotrajno terećenje u nuždi distribucijskih uljnih transformatora definirane su sljedeće granične vrijednosti:

- a) najveća dozvoljena struja 1,8 p.u. nazivne struje transformatora,
- b) najviša dozvoljena temperatura najtoplije točke namota u doticaju sa izolacijskim materijalima od celuloze 140 °C,
- c) najviša dozvoljena temperatura najtoplije točke drugih metalnih dijelova koji su u doticaju sa uljem 160 °C,
- d) najviša temperatura ulja 115 °C.

Osim ovih ograničenja i **pad napona na transformatoru** može biti ograničavajući faktor kod opterećivanja distribucijskih transformatora iznad nazivnih snaga. [2]-[4]

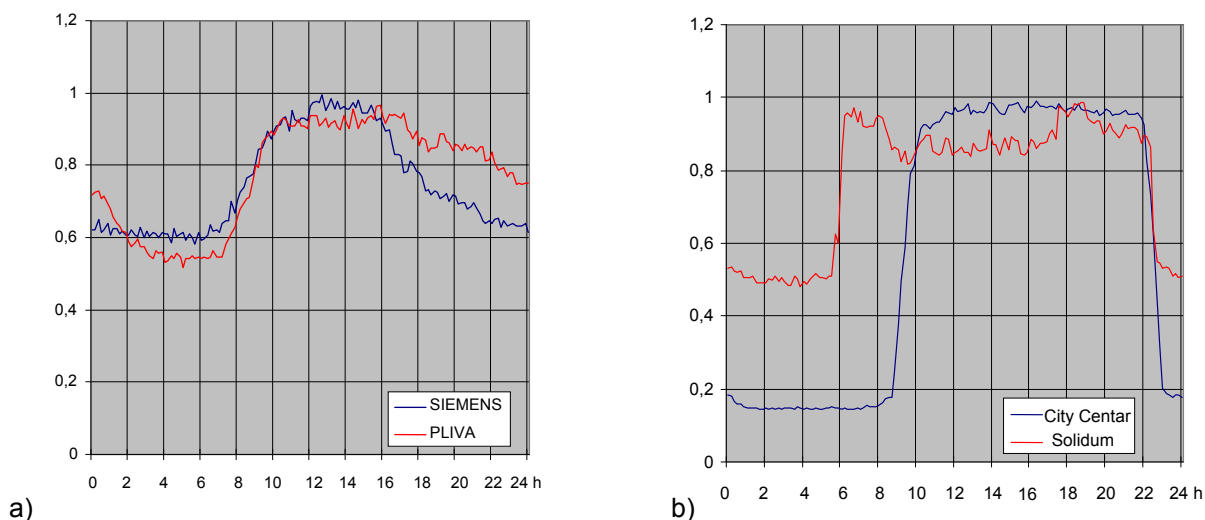
Na slici 4. je prikazano opterećenje transformatora (struja u jednoj fazi na NN strani). Vidljivo je da je transformator nazivne snage 630 kVA u siječnju kratkotrajno preopterećen tokom 4 dana. Najveća zabilježena vrijednost struje u jednoj fazi je iznosila 1059 A, što je 122 % nazivne struje.



Slika 4. Opterećenje transformatora nazivne snage $S_n = 630$ kVA, $U_{n2} = 0,42$ kV, $I_{n2} = 866$ A

3.1. Karakteri tereta

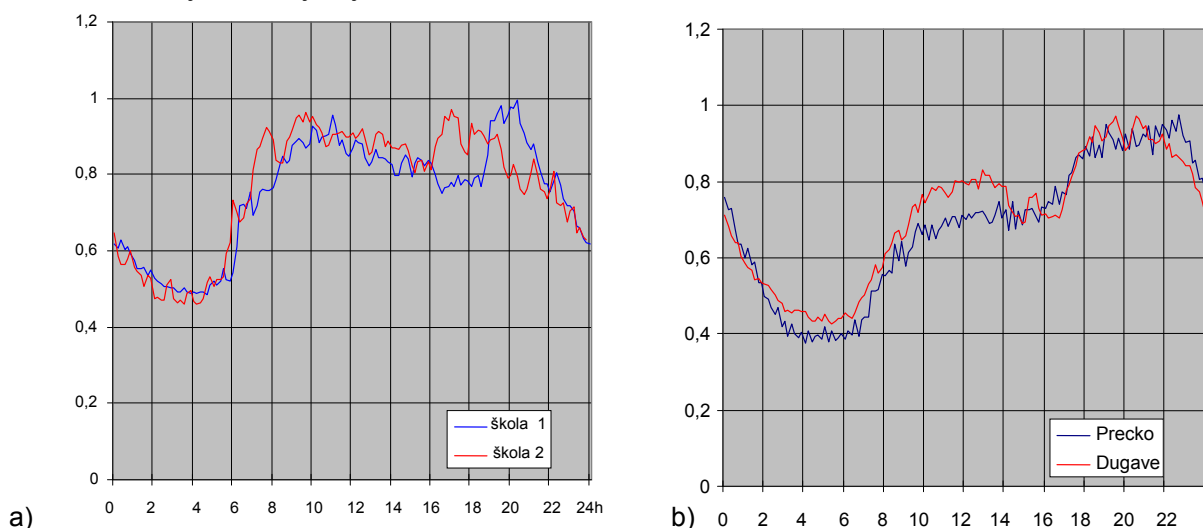
Tereti u komercijalnim djelatnostima i stambenim naseljima imati će bitno različiti karakter. U komercijalnom sektoru dnevni dijagram tereta će se bitno razlikovati ovisno o vrsti poduzetništva. Na slikama su prikazani dnevni dijagrami opterećenja tijekom karakteristične srijede u zimskom periodu za nekoliko različitih kategorija kupaca: dva velika poduzeća, dvije škole, dvije stambene zone (domaćinstva) i dva velika trgovačka centra na području grada Zagreba. Za karakterističnu srijedu je prema međunarodnom dogovoru odabrana prva srijeda iza 15. u mjesecu siječnju (zimski) i srpnju (ljetni).



Slika 5. Usporedba normiranih dnevnih dijagrama opterećenja za: a) dvije velike tvrtke i b) dvije škole

Sa slike 5. a) je vidljivo da dnevni dijagram opterećenja za dvije velike tvrtke korelira s radnim vremenom od kojih u jednoj u poslijepodnevним satima iza kraja radnog vremena teret opada te je vidljiv prestanak aktivnosti oko 22 h, dok u drugoj tvrtki vjerojatno i zbog istraživačkog karaktera ustanove teret pada za 15% iza 17 h, ostaje relativno konstantan do 22 h te nakon 2 h pada na 55 % vrijednosti.

Iz dnevnih dijagrama opterećenja za dva velika trgovačka centra se lako može pratiti početak aktivnosti tokom jutra (u jednom slučaju u 7 h, u drugom u 9h) što je povezano s vremenom otvaranja te je vidljivo da je teret tokom dana relativno konstantan. Najčešće se opterećenje ne mijenja ni tokom ostalih dana u tjednu, uključujući i vikend.



Slika 6. Usporedba normiranih dnevnih dijagrama opterećenja za: a) dvije škole i b) dvije stambene zone

Dnevni dijagrami opterećenja za dvije škole se tokom dana ne razlikuju mnogo (slika 6.a). U jednoj školi je ponovni porast opterećenja vidljiv iza 17 h, dok je u drugoj u poslijepodnevним satima od 19 h do 22 h. Dnevni dijagrami opterećenja za dvije stambene zone su otprilike jednaki tokom dana te je vidljiv skok u opterećenju domaćinstava iza 19 h (slika 6.b).

3.2. Nelinearni tereti i k-faktor

Nelinearni tereti uzrokuju struje viših harmonika u elektroenergetskoj mreži. U takvu vrstu tereta spadaju sva trošila koja uzrokuju nesinusoidalne struje, poput elektrolučnih peći, kondenzatorskih baterija, elektromotornih pogona s promjenjivom brzinom vrtnje, UPS sustava, osobnih računala i drugih uredskih uređaja poput pisača i fotokopirnih aparata, štednih žarulja, klima uređaja, itd. Iako su nekad nelinearni tereti prvenstveno predstavljali probleme u industrijskim postrojenjima to danas više nije slučaj, jer su zbog primjene elektroničkih sklopova u širokom spektru uređaja nelinearni tereti postali značajno zastupljeni i u komercijalnim djelatnostima i u stambenim naseljima [5].

Struje viših harmonika uzrokuju dodatna dielektrička, termička i mehanička naprezanja u elektroenergetskim mrežama te dovode do pojačanog zagrijavanja transformatora i zasićenja jezgre. Dodatni termički gubici mogu utjecati i na smanjenje životnog vijeka te na smanjenu opteretivost transformatora značajno ispod nazivne snage.

K-faktor je mjera za utjecaj viših harmoničkih članova struje na transformator, a definiran je prema ANSI/IEEE preporuci C57.110-1986 [6].

K-faktor se računa iz struje tereta:

$$\text{Error! Objects cannot be created from editing field codes.} \quad (1)$$

gdje je:

$n = 1 \dots 25$,

h – red višeg harmonika,

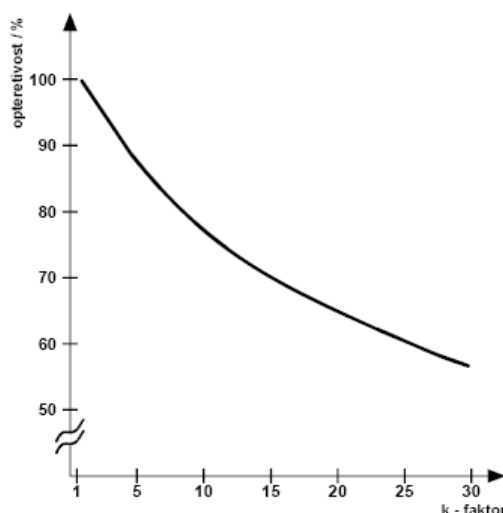
I_h – efektivna vrijednost struje višeg harmonika,

I_{rms} – efektivna vrijednost struje tereta.

Standardne vrijednosti k-faktora su 4, 9, 13, 20, 30, 40 i 50. Pojedinačni tereti s k-faktorima iznad 20 su rijetki. Tipično, uredi s nešto nelinearnih trošila ili serverske sobe obično imaju k-faktore od 4 do 9. Kod trošila s velikim brojem računala zabilježeni su k-faktori od 13 do 17 [5].

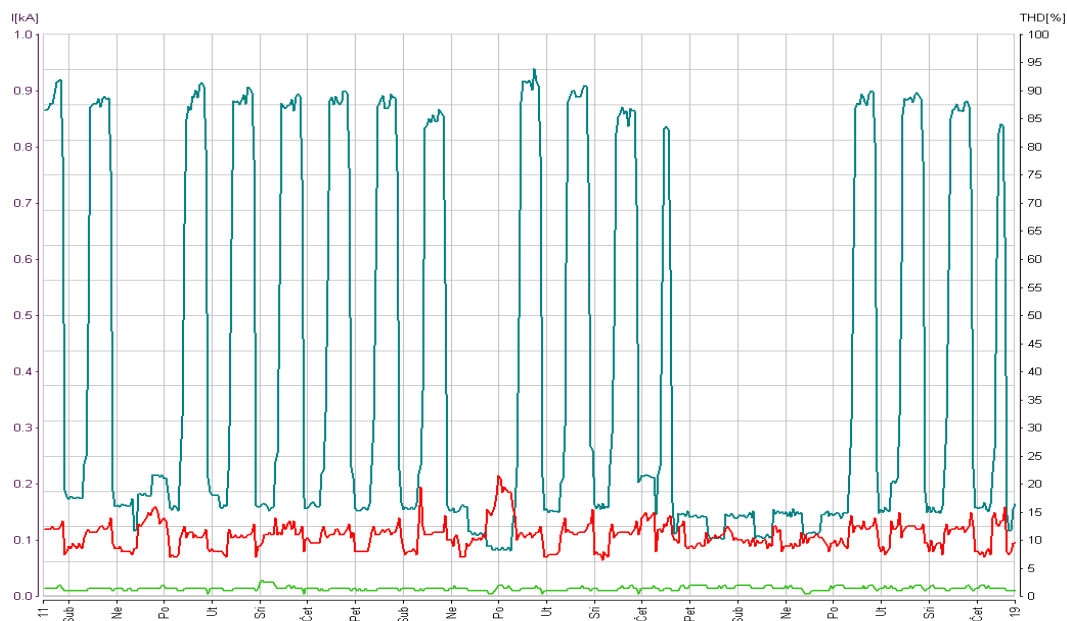
Ukoliko je velik broj nelinearnih tereta napajan iz istog izvora, može se očekivati manji ukupni sadržaj harmonika uslijed pomaka faza pojedinih potrošača.

Na temelju k-faktora se računa smanjenje raspoložive snage transformatora zbog dodatnih gubitaka i prema njemu se određuje potreban k-faktor transformatora. Ovisnost smanjenja opteretivosti transformatora o porastu k-faktora tereta, tj. harmoničkog izobličenja tereta, prikazana je na slici 7.



Slika 7. Ovisnost opteretivosti transformatora o k-faktoru tereta

Vidljivo je da s porastom k-faktora mogućnost terećenja transformatora nazivnom snagom opada te se tako npr. pri k-faktoru tereta vrijednosti 25, transformator može teretiti samo do 60 % nazivne snage kako bi gubici ostali u propisanim granicama i kako mu se ne bi skraćivao životni vijek [7]. K-faktor transformatora opisuje kako transformator podnosi dodatno zagrijavanje (gubitke) izazvane višim strujnim harmonicima.



Slika 8. Opterećenje transformatora nazivne snage 1000 kVA - struja na NN strani u jednoj fazi s pripadnim krivuljama ukupnog sadržaja harmonika struje i napona.

Na slici 8. je prikazano mjerenje opterećenja transformatora nazivne snage 1000 kVA zabilježeno pomoću mjernih terminala u stanici. Prikazana je struja na NN strani u jednoj fazi s pripadnim krivuljama ukupnog sadržaja harmonika struje i ukupnog sadržaja harmonika napona (*engl.* THD – Total Harmonic Distortion). U periodu od mjesec dana oko Nove godine 2010. najveća zabilježena srednja vrijednost struje mjerena u periodima od 10 minuta je iznosila 960 A i pritom je ukupni sadržaj strujnih i naponskih harmonika iznosio $THD I = 12,5 \%$ (crvena krivulja) i $THD U = 1,5 \%$ (zeleno krivulja).

Iako u ovom periodu transformator nije nazivno opterećen, tokom ljetnih mjeseci u ovoj stanici koja napaja jedan veći trgovački centar opterećenja transformatora često prelaze i nazivne vrijednosti te je vidljivo da upravo u ovom slučaju ne treba zanemariti i moguća dodatna zagrijavanja uslijed struja viših harmonika.

4. ZAKLJUČAK

Analiza maksimalnih zabilježenih opterećenja transformatora kroz sedam godina je pokazala da je manje od 2,5 % ukupnog broja transformatora povremeno opterećeno iznad 100 %.

Terećenje transformatora iznad nazivnih vrijednosti će dovesti do ubrzanog starenja i kraćeg vijeka trajanja, međutim zbog potrebe za neprekinutim napajanjem ponekad je u pogonu to nemoguće izbjeći te se iznimno iz tog razloga dopušta preopterećivanje distribucijskih transformatori u skladu s normom.

U većem broju slučajeva ispada stanica ili čak požara uzroci su bili pregrijani NN razvodi, dok su ispad zbog preopterećenja transformatora rijetki. Ventilacija u distribucijskim stanicama je također tokom ljetnih mjeseci često nedostatna.

Dok su kod stanica koje napajaju velike trgovačke centre transformatori često opterećeni nešto iznad nazivnih vrijednosti ali tokom dugih perioda, transformatori u stanicama koje pretežno napajaju stambena naselja će biti značajno preopterećeni (skokoviti porasti) u kraćim periodima tokom ljeta ili tokom zime, što je povezano s pojavom najviših ili najnižih temperatura tokom godine. To je posebno izraženo u centru grada u toku ljeta. U obzir bi također trebalo uzimati i oblike dnevnih dijagrama opterećenja, jer će tereti u komercijalnim djelatnostima i stambenim naseljima imati bitno različiti karakter.

Iako većina transformatora ima dovoljan termički kapacitet koji omogućuje dodatno zagrijavanje uslijed viših harmonika struja kod nelinearnih tereta, treba uzeti u obzir i ovisnost smanjenja opteretivosti transformatora o porastu k-faktora. Općenito nelinearni (elektronički) tereti u mreži se značajno povećavaju te se u budućnosti može očekivati i sve više problema u mreži.

LITERATURA

- [1] IEC 60076-7 Power transformers - Part 7: Loading guide for oil-immersed power transformers, 2005.
- [2] R. Walling, G.B. Shattuck, "Distribution Transformer Thermal Behavior and Aging in Local-Delivery Distribution Systems", CIREN 2007, 19th International Conference on Electricity Distribution, Beč, Austrija, svibanj 2007, 720.
- [3] A. Van Schijndel, J. M. Weyer, P. A. A. F. Wouters, "Forecasting Reliability of Transformer Populations", CIREN 2007, 19th International Conference on Electricity Distribution, Beč, Austrija, svibanj 2007, 108.
- [4] C. Ravetta, M. Samanna, A. Stucchi, A. Bossi, "Thermal Behaviour of Distribution Transformers in Summertime and Severe Loading Conditions", CIREN 2007, 19th International Conference on Electricity Distribution, Beč, Austrija, svibanj 2007, 53.
- [5] <http://www.prasa-pl.com/images/K-FactorTransformer.pdf>
- [6] M. Lasić, "Kvaliteta električne energije i negativno povratno djelovanje trošila na mrežu", kvalifikacijski doktorski ispit, FER, studeni 2006.
- [7] G. Šagovac, I. Šagovac: "Kvaliteta napona kao obilježje električne energije", Dani ovlaštenih inženjera elektrotehnike, Zadar, listopad 2009.