

Upravljanje distribucijskim transformatorima

Popović, Zvonimir

Professional thesis / Završni specijalistički

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Electrical Engineering and Computing / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:168:962117>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-10**



Repository / Repozitorij:

[FER Repository - University of Zagreb Faculty of Electrical Engineering and Computing repository](#)



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA**

Zvonimir Popović

**UPRAVLJANJE DISTRIBUCIJSKIM
TRANSFORMATORIMA**

SPECIJALISTIČKI RAD

Zagreb, 2021. godina

Mentor: izv. prof. dr. sc. Žarko Janić

Specijalistički rad: 70 stranica

Specijalistički rad br.:

Povjerenstvo za ocjenu u sastavu:

1. Prof. dr. sc. Ivica Pavić - predsjednik
2. Nasl. izv. prof. dr. sc. Žarko Janić, KONČAR – Energetski transformatori d.o.o. - mentor
3. Nasl. doc. dr. sc. Tomislav Župan, KONČAR – Institut za elektrotehniku d.d. – član.

Povjerenstvo za obranu u sastavu:

1. Prof. dr. sc. Ivica Pavić – predsjednik
2. Nasl. izv. prof. dr. sc. Žarko Janić, KONČAR – Energetski transformatori d.o.o. - mentor
3. Nasl. doc. dr. sc. Tomislav Župan, KONČAR – Institut za elektrotehniku d.d. – član.

Datum obrane: 2. prosinca 2021.

Sadržaj

1	Uvod	6
2	Gubici u elektroenergetskom sustavu	7
2.1	Podjela gubitaka	7
2.1.1	Tehnički gubici	7
2.1.2	Netehnički gubici	8
2.2	Raspodjela gubitaka u distribucijskoj mreži	8
2.3	Mjere za smanjenje gubitaka u mreži	10
2.3.1	Smanjenje gubitaka u srednjenaponskoj mreži	10
2.3.2	Energetski transformatori	10
2.3.3	Smanjenje gubitaka u niskonaponskoj mreži	11
2.3.4	Ugradnja i rekonstrukcija kompenzacije jalove energije	12
2.3.5	Ostale mjere	12
3	Vrste i tehnologije transformatora	13
3.1	Struktura gubitaka u transformatorima	15
3.1.1	Gubici praznog hoda	15
3.1.2	Gubici tereta	16
3.1.3	Ostali gubici	17
3.2	Podjela transformatora s obzirom na gubitke	17
3.2.1	„Eko direktiva“ i zakonski propisi	17
3.2.2	Klasični transformatori	19
3.2.3	Energetski učinkoviti transformatori	21
3.2.4	Amorfni transformatori	25
3.3	Mjere za smanjenje gubitaka u transformatorima	26
3.3.1	Smanjenje gubitaka u jezgri	26
3.3.2	Smanjenje gubitaka u namotima	28
3.3.3	Pregled mjera smanjenja gubitaka u transformatorima	29
4	Analiza smanjenja gubitaka	30
4.1	Usporedba smanjenja gubitaka radi ugradnje energetski učinkovitih transformatora	30
4.1.1	Primjer – zamjena transformatora 100 kVA	33

4.1.2	Primjer – zamjena transformatora 630 kVA	35
4.2	Usporedba smanjenja gubitaka optimiziranjem instalirane snage transformatora 38	
4.2.1	Primjer – transformator 160 kVA.....	38
4.2.2	Primjer – transformator 400 kVA.....	40
4.3	Tehno-ekonomska usporedba isplativosti ugradnje novih transformatora	41
4.3.1	Kapitalizacija troška transformatora	41
4.3.2	Slabo opterećeni transformator 100 kVA	42
4.3.3	Transformator 100 kVA s opterećenjem blizu nazivnog	44
4.3.4	Slabo opterećeni transformator 630 kVA	46
4.3.5	Transformator 630 kVA s opterećenjem blizu nazivnog	47
4.4	Isplativost transformatora s obzirom na relativno opterećenje	48
4.5	Smjernice za određivanje optimalnog transformatora	52
5	Upravljanje flotom transformatora u distribucijskom području.....	54
5.1	Baza podataka o transformatorima	54
5.1.1	Opterećenja transformatora	55
5.1.2	Stanje transformatora uočeno pregledom/održavanjem	57
5.2	Algoritam za određivanje prioriternih lokacija za zamjenu transformatora.....	59
5.2.1	Primjena aplikativnog rješenja algoritma za smanjenje gubitaka i upravljanje imovinom	59
5.2.2	Buduće stanje i mogući razvoj aplikativnog rješenja	60
6	Zaključak.....	62
7	Literatura.....	65
8	Sažetak	67
9	Summary	68
10	Ključne riječi (Keywords).....	69
11	Životopis.....	70

1 Uvod

Gubici električne energije neizbježan su dio svakog elektroenergetskog sustava. Gubici nastaju kao posljedica tehničkih karakteristika komponenti u elektroenergetskom sustavu i kao posljedica netočnih mjerenja. Oni čine dio tokova energije i imaju značajnu ulogu u prijenosu i distribuciji električne energije. Smanjenje gubitaka električne energije predstavlja poboljšanje energetske efikasnosti i smanjenje operativnih troškova elektroenergetskog sustava. Pojednostavljeno, gubici su razlika energije koja ulazi u dio mreže i energije koja iz te mreže izlazi, odnosno energije koja dolazi do krajnjih kupaca.

Gubici u elektroenergetskom sustavu su jedan od ključnih čimbenika koji ukazuju na stupanj ekonomičnosti poslovanja i kvalitetu obavljanja djelatnosti distribucije električne energije. Iz tog razloga, smanjenje gubitaka električne energije u distribucijskoj mreži jedan je od prioritarnih poslovnih ciljeva operatora distribucijskog sustava. [1]

Gubici se mogu podijeliti na tehničke i netehničke gubitke. Tehničke gubitke moguće je smanjiti određenim zahvatima na elektroenergetskoj mreži, kao što je povećanje distribucijskog napona, usklađivanje opterećenja po fazama, ugradnja kompenzacije električne energije ili ugrađivanje novijih i energetski učinkovitih transformatora, što će biti razmatrano u ovom radu.

Zbog velikog broja energetskih transformatora u elektroenergetskoj mreži, njihovi gubici imaju značajan učinak na poslovanje operatora distribucijskog sustava, kako u financijskom tako i u regulatornom smislu. Prema procjenama, gubici u energetskim transformatorima čine gotovo 50 % ukupnih tehničkih gubitaka [2]. Dodatno, energetski transformatori uz vodove čine temeljne elemente distribucijske mreže, te je upravljanje transformatorima bitno sa mnogo drugih aspekata, ne samo sa stajališta smanjenja gubitaka. Gledano prema ekonomskoj vrijednosti, distributivni energetski transformatori čine oko 6 % u ukupnoj vrijednosti distribucijskog područja, dok na elektroenergetske vodove otpada gotovo 54 %. Kvalitetnom strategijom upravljanja transformatorima, što dijelom podrazumijeva i nabavku novih jedinica, moguće je utjecati na smanjenje tehničkih gubitaka uz malo povećanje udjela u ukupnoj vrijednosti, odnosno manje investiranje u odnosu na druge elemente distribucijske mreže.

2 Gubici u elektroenergetskom sustavu

2.1 Podjela gubitaka

Gubici električne energije u sustavu distribucije električne energije po definiciji su jednaki razlici energije koja je ušla u distribucijsku mrežu i energije predane kupcima. Pritom se uzimaju u obzir izmjerene vrijednosti energije na ulazu u distribucijski sustav (iz prijenosne mreže, susjednih distribucijskih sustava i elektrana priključenih na distribucijsku mrežu) i izmjerene vrijednosti energije na mjestu priključka kupca. Tako definirani gubici električne energije dijele se na dvije grupe:

- gubitke u užem smislu (tehnički gubici)
- neregistriranu potrošnju električne energije (netehnički gubici) radi neovlaštene potrošnje električne energije, pogrešnog mjerenja, itd.

U HEP ODS d.o.o. u 2020. godini, prosječni iznos gubitaka iznosi je 7,61 %. Od toga, udio tehničkih gubitaka u prosjeku je iznosio 4,01 %, dok su se netehnički gubici procjenjivali na 3,59 %. [1] [3]

2.1.1 Tehnički gubici

Tehnički gubici posljedica su fizikalnih osobina distribucije električne energije kroz elemente elektroenergetskog sustava. Najčešće se manifestiraju kroz zagrijavanja i buku prilikom prijenosa energije do krajnjih kupaca, a u velikoj mjeri ovise o izgledu elektroenergetske mreže, pripadajućim naponskim razinama i razinama transformacije, te o duljini elektroenergetskih vodova. Tehnički gubici povezani su s razinom ulaganja u komponente elektroenergetske mreže odnosno planiranjem razvoja mreže. Oni se dodatno mogu podijeliti na stalne i promjenjive gubitke. [4]

Stalni tehnički gubici nastaju kad je pojedina komponenta elektroenergetske mreže pod naponom, neovisno o iznosu toka snage prema mjestima potrošnje. Najčešći uzroci stalnih gubitaka su gubici zbog nastanka korone na nadzemnim vodovima koji su izraženiji na višim naponskim razinama i ovise o dimenzijama vodiča i vremenskim uvjetima odnosno vlažnosti u zraku. Nadalje, pod stalnim gubicima ubrajamo dielektrične gubitke najizraženije u podzemnim kabelima i gubitke praznog hoda transformatora, odnosno gubitke zbog magnetiziranja jezgre transformatora. Smatra se da navedeni gubici u transformatorima imaju najveći udio u stalnim gubicima elektroenergetskog sustava. Općenito, procjenjuje se da stalni tehnički gubici čine između 25 % i 33 % ukupnih tehničkih gubitaka u elektroenergetskom distribucijskom sustavu. [4]

Promjenjivi gubici nastaju kao posljedica prijenosa električne energije kroz pojedine komponente elektroenergetske mreže. Svaki element u elektroenergetskom sustavu ima svoj karakteristični električni otpor koji uzrokuje zagrijavanje kada kroz njega prolazi struja. Navedeni gubici su proporcionalni kvadratu struje te se često označavaju kao I^2R gubici, a mogu se računati kao proporcionalni kvadratu prividne snage te se stoga nazivaju promjenjivim gubicima. Osim o iznosu struje, ovise o

duljini i presjeku vodiča. Za ove gubitke procjenjuje se da čine između 66 % i 75 % ukupnih tehničkih gubitaka. [4]

Gubici se mogu izračunati na dva načina: mjerenjem stvarnih vrijednosti ili pomoću izračuna. Analitička metoda daje približne vrijednosti i moguća su značajna odstupanja od stvarnih vrijednosti. S druge strane, energetske sustav čini mnogo različitih elemenata pa mjerenje stvarnih vrijednosti nije uvijek praktično ili čak moguće. Zbog toga je najbolji pristup izračunu gubitaka kombinacija dva spomenuta načina, čime se dobiva rezultat najbliži stvarnoj vrijednosti gubitaka.

2.1.2 Netehnički gubici

Razlika ukupnih gubitaka električne energije i tehničkih gubitaka naziva se netehničkim gubicima. Može ih se i nazvati izgubljenom energijom koja nije izravno vezana za prijenos električne energije i događa se neovisno o fizikalnim osobinama elemenata elektroenergetske mreže, odnosno tehničkim gubicima [4]. Sva energija koja je isporučena, a nije na neki način izmjerena čini sumu netehničkih gubitaka. Upravo se zbog toga netehničke gubitke ne može jednoznačno odrediti nijednom metodom, već samo neizravno kao razliku poznatih ukupnih i tehničkih gubitaka. [5]

Netehnički gubici nastaju zbog:

- pogrešaka uzrokovanih složenim poslovnim procesom očitavanja i obračuna potrošnje električne energije
- tehničkih neispravnosti na mjernim mjestima, odnosno mjernim uređajima,
- neovlaštene potrošnje električne energije, odnosno krađe u slučajevima:
 - potrošnje električne energije bez ili pokraj mjerne opreme ili kada je mjerna oprema onesposobljena za ispravni rad, uključujući i nedostatak plombe
 - samovoljnog priključenja instalacije i trošila na distribucijsku mrežu [5]

Problematika netehničkih gubitaka i njihovog smanjenja je vrlo složena tema i predstavlja osobit izazov za operatore distribucijskih sustava. S obzirom na to da se na netehničke gubitke ne može utjecati promjenom fizikalnih osobina elemenata elektroenergetske mreže, u ovom radu se ova problematika neće razmatrati te je samo spomenuta na informativnoj razini.

2.2 Raspodjela gubitaka u distribucijskoj mreži

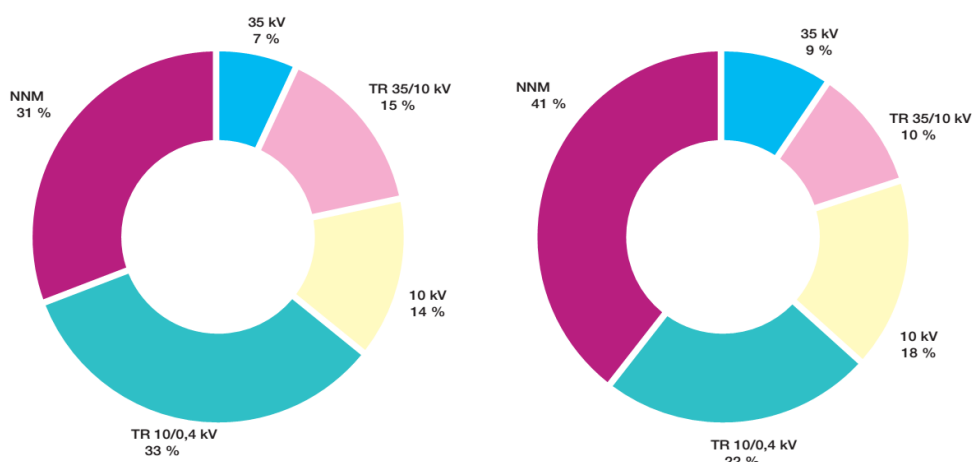
Određivanje tehničkih gubitaka pomoću proračuna vrlo je složen zadatak jer postoji veliki broj elemenata mreže i to na različitim naponskim razinama. Za ulazne proračune potrebno je imati što kvalitetnije tehničke baze podataka kako bi se postiglo što bolje modeliranje elemenata mreže i pripadnih tokova snaga [5]. Danas prisutni alati poput GIS-a, digitaliziranih baza podataka i programa za numeričke proračune mreže značajno olakšavaju postupak proračuna tehničkih gubitaka.

Podaci potrebni za proračun tehničkih gubitaka su impedancije dionica elektroenergetske mreže i transformatora, gubici u energetskim transformatorima,

topologija distribucijske mreže i dostupni mjerni podaci kojima se određuju tokovi snaga. [5]

Analiza rezultata proračuna tehničkih gubitaka omogućuje primjenu dvije strategije za kontrolu i praćenje gubitaka. Prva je odabir konkretnih objekata na kojima nastaju najveći iznosi gubitaka, na temelju čega se mogu izrađivati planovi ulaganja te određivati prioritete i financijska isplativost ulaganja koja će pridonijeti smanjenju tehničkih gubitaka. U drugoj strategiji promatra se općenita slika elektroenergetskog sustava u smislu gubitaka, odnosno raspodjela gubitaka ovisna o tipu elemenata mreže i njihovoj opterećenosti. Na ovaj način mogu se prepoznati slaba mjesta u mreži te odrediti mjere za smanjenje gubitaka kroz postupke upravljanja mrežom ili tipizacijom opreme sa smanjenim gubicima. [5]

Slika 2-1 prikazuje rezultat proračuna tehničkih gubitaka po razinama distribucijske mreže HEP-a, odnosno raspodjelu gubitaka po elementima u slučaju minimalnog i maksimalnog opterećenja (usporedba prema dva karakteristična dana u godini s minimalnim i maksimalnim opterećenjem) [5]. Oznaka NNM odnosi se na niskonaponsku mrežu, a skraćenica TR na energetske transformatore određenog prijenosnog omjera. Oznake 35 kV i 10 kV odnose se na elektroenergetske vodove navedenih naponskih razina.



Slika 2-1 - Dijagrami raspodjele gubitaka po elementima u distribucijskoj mreži za dan sa minimalnim (lijevo) i maksimalnim (desno) opterećenjem [5]

Iz prikazanih rezultata može se vidjeti da, ovisno o opterećenju, gubici u transformatorima čine između 33 % i 48 % ukupnih tehničkih gubitaka u distribucijskoj mreži. Udio gubitaka transformatora smanjuje se za slučaj maksimalnog opterećenja jer je općenita karakteristika pogona distributivnih transformatora podopterećenost u odnosu na nazivnu snagu. Iz toga proizlazi da je upravljanje flotom transformatora je vrlo bitan čimbenik u smanjenju gubitaka elektroenergetskog sustava, odnosno da se spomenutim postupcima vođenja elektroenergetske mreže i ugrađivanjem opreme boljih tehničkih karakteristika može značajno utjecati na cilj smanjenja gubitaka.

2.3 Mjere za smanjenje gubitaka u mreži

Pristup smanjenju gubitaka u distribucijskoj mreži ovisi o samoj vrsti gubitaka, odnosno jesu li tehnički ili netehnički. Netehnički gubici nisu vezani za fizikalne osobine elektroenergetskog sustava i na njih se utječe poslovnim procesima i odlukama operatora distribucijskog sustava, te stoga neće biti posebno razmatrani. Neke od najučinkovitijih, a istovremeno i ekonomski opravdanih mjera za smanjenje tehničkih gubitaka su:

- Usklađivanje opterećenja po fazama
- Ugradnja energetski učinkovitih transformatora
- Međusobna zamjena postojećih podopterećenih i preopterećenih transformatora
- Ugradnja kompenzacije jalove energije
- Povećanje distribucijskog napona

Ovisno o naponskoj razini, primjenjive su pojedine mjere za smanjenje gubitaka, koje su opisane u nastavku. Mjere se odnose na primjenu u pojedinom distribucijskom području, što na kraju utječe na iznos gubitaka u cijelom distribucijskom sustavu.

2.3.1 Smanjenje gubitaka u srednjenaponskoj mreži

Pristup smanjenju gubitaka u srednjenaponskoj mreži ovisi o naponskoj razini. Distribucijsku mrežu naponske razine 35 kV čine relativno veliki i skupi objekti, što znači da su bilo kakvi zahvati na takvoj mreži relativno skupi i složeni. Zbog toga, na smanjenje gubitaka uglavnom se utječe optimiranjem tokova snaga sukladno tehničkim mogućnostima objekata.

U srednjenaponskoj mreži razine 10 kV odnosno 20 kV složenost i vrijednosti objekata su manji te se osim spomenutih optimiranja tokova snaga mogu provesti i drugi ciljani zahvati na dionicama s najvećim gustoćama gubitaka kao što je povećanje presjeka vodiča na elektroenergetskim vodovima, što je najučinkovitije u njihovim početnim dionicama, ili promjena topologije mreže, gdje se kroz postupke ulaganja i vođenja elektroenergetske mreže može utjecati na poboljšanje naponskih prilika, povećanje pouzdanosti napajanja kupaca kao i smanjenje radijalnih srednjenaponskih izvoda izgradnjom spojnih vodova. [5]

2.3.2 Energetski transformatori

U transformatorskim stanicama VN/SN i SN/SN uglavnom su ugrađena dva ili više transformatora koji mogu biti u paralelnom radu, pa se gubici mogu smanjiti kvalitetnijim upravljanjem paralelnog rada transformatora. Kako bi se odredilo moguće smanjenje gubitaka, potrebno je napraviti usporedbu učinkovitosti transformatora za sve pogonske slučajeve. Sve do nedavno, regulacija napona provodila se isključivo sezonski. Zbog sve većeg udjela distribuiranih izvora energije u srednjenaponskoj mreži, pojavila se potreba za boljom kontrolom nad naponskim prilikama, što je omogućeno ugradnjom transformatora SN/SN s automatskom regulacijom napona, odnosno regulacijom napona pod teretom. Na taj način,

dnevna regulacija napona, koja je prije bila razmatrana samo na razini teorije, sve više postaje uobičajeno rješenje u transformatorskim stanicama. Konkretno, na distribucijskom području Elektre Bjelovar, kao posljedica priključenja geotermalne elektrane snage 10 MW u dijelu mreže s relativno malim konzumom, ugrađeni su prvi energetske transformatori 35/10(20) kV s automatskom regulacijom na višenaponskoj strani. Pojavom sličnih izvora, ovakva praksa nastavila se i u drugim distribucijskim područjima u Hrvatskoj.

Kad je riječ o transformatorskim stanicama SN/NN, transformacija se u pravilu vrši putem jednog energetskog transformatora po transformatorskoj stanici, te su moguća dva pristupa za smanjenja gubitaka.

2.3.2.1 Optimiranje nazivnih snaga međusobnim zamjenama ugrađenih transformatora

Transformatore čije je opterećenje znatno preko granice maksimalne učinkovitosti potrebno je zamijeniti transformatorima veće nazivne snage koji su opet opterećeni znatno ispod granice maksimalne učinkovitosti. Na taj se način ostvaruje ušteda jer se utječe na smanjenje gubitaka u namotima transformatora. Ograničenje ovog pristupa je u činjenici da je broj opterećenijih transformatora znatno manji od broja neopterećenih transformatora. Po paru međusobno zamijenjenih transformatora na ovaj način moguće je postići smanjenje gubitaka i do 5 MWh godišnje. [5]

2.3.2.2 Ugradnja energetski učinkovitih transformatora

U prosjeku, transformatori stariji od 30 godina čine oko 30 % od ukupnog broja instaliranih transformatora. Odnosi njihovih gubitaka prema gubicima najnovijih modela iste nazivne snage kreću se i do 3 : 1. Prilikom izbora novog transformatora treba uzeti u obzir i njegovo dimenzioniranje na nelinearno opterećenje, što će biti detaljno prikazano u sljedećim poglavljima. [5]

2.3.3 Smanjenje gubitaka u niskonaponskoj mreži

U poglavlju 2.2. prikazano je da gubici u niskonaponskim mrežama mogu imati udio i preko 40 % od ukupnih tehničkih gubitaka u distribucijskoj mreži. Ovu naponsku razinu karakteriziraju jednostavni i relativno jeftini elementi, te su mogući razni zahvati kako bi se postiglo smanjenje gubitaka. Obično već najjednostavnije i najučinkovitije mjere za smanjenje gubitaka predstavljaju značajan učinak u postizanju tog cilja [5].

Neke od mjera obuhvaćaju [5]:

- Smanjenje nesimetričnog opterećenja po NN izvodima (kako bi se eliminirali dodatni gubici u faznim i u povratnom vodiču u odnosu na idealnu situaciju simetričnog trofaznog opterećenja izvoda)
- Kompenzacija jalove energije po dubini NN mreže
- Ciljani zahvati (povećanje presjeka vodiča u početnim dionicama, razdvajanje NN izvoda na dva ili više, napajanje dijela NN izvoda preko susjednog manje opterećenog izvoda ili susjedne manje opterećene transformatorske stanice)

2.3.4 Ugradnja i rekonstrukcija kompenzacije jalove energije

Gubici uzrokovani protjecanjem jalove snage iznose oko 20 % ukupnih tehničkih gubitaka u NN mrežama, što predstavlja visokih 7 % iznosa tehničkih gubitaka u cijeloj distribucijskoj mreži. U višim razinama distribucijske mreže jalova snaga je dobrim dijelom kompenzirana, sve do posljednjeg stupnja kompenzacije jalove energije koji se nalazi u NN rasklopnim blokovima distributivnih transformatorskih stanica. Zbog toga se na niskonaponskim izvodima javljaju prirodne jalove snage priključenih kupaca. Odabirom odgovarajućih snaga kondenzatorskih baterija i mjesta njihove ugradnje, po dubini NN mreže moguće je smanjiti tok jalove snage, odnosno iznos prividne struja u početnim dionicama što utječe na smanjenje gubitaka. [5]

2.3.5 Ostale mjere

Sve ostale mjere za smanjenje tehničkih gubitaka uglavnom zahtijevaju veća ulaganja. Na primjer, interpolacije novih transformatorskih stanica SN/NN u postojeću elektroenergetsku mrežu primjenjuju se većinom kod preopterećenja postojećih postrojenja ili u slučajevima priključenja novih kupaca s većim priključnim snagama.

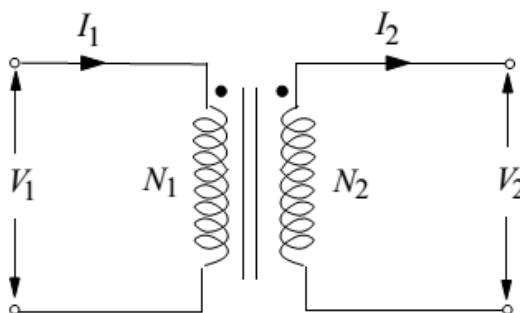
Povećanje naponske razine s 10 kV na 20 kV, koje ujedno podrazumijeva i ukidanje transformacije 35/10 kV, može smanjiti tehničke gubitke u distribucijskoj mreži za 1,5 % do 2 % od ulazne energije u distribucijsku mrežu. Ovaj pristup jedan je od strateških ciljeva HEP ODS-a i predstavlja najznačajnija ulaganja u razvoj SN mreže, no zbog svoje složenosti i financijskog iznosa provodi se etapno u dijelovima distribucijske mreže. [5]

3 Vrste i tehnologije transformatora

Transformator je statički uređaj koji pomoću elektromagnetske indukcije prenosi električnu energiju iz jednog električnog kruga u drugi bez promjene frekvencije. Transformatori najčešće imaju dva odvojena namota, primarni i sekundarni, no postoje izvedbe i s više namota. Električna energija se prvo u primarnom namotu transformatora pretvara u magnetsku, koja se ponovo pretvara u električnu energiju u drugim namotima (sekundarnom, tercijarnom i sl.). Na taj način transformatori povezuju električne krugove različitih napona, što je ključno u proizvodnji, prijenosu i distribuciji električne energije [6].

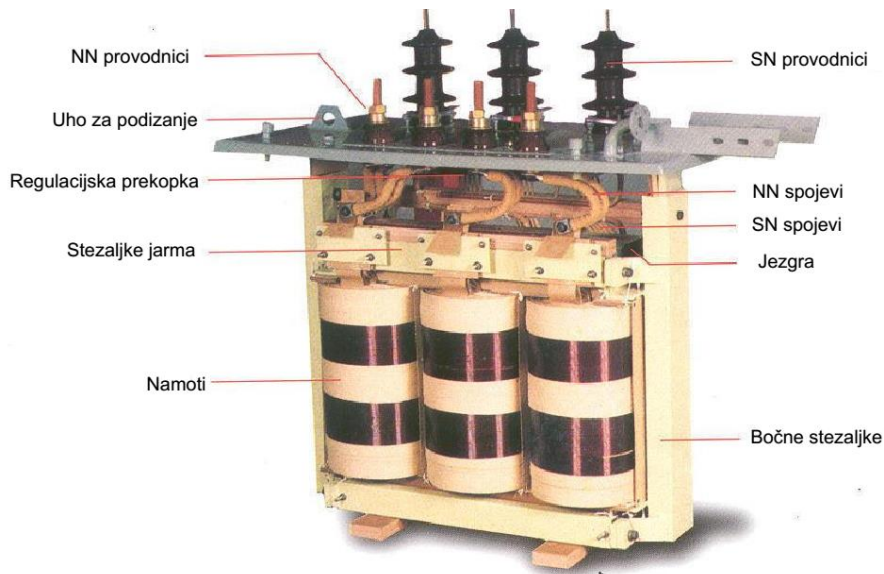
Transformator prenosi električnu energiju na način da se električne veličine u primarnom namotu (napon i struja) prenose na sekundarni namot u određenom omjeru koji je proporcionalan omjeru broja zavoja (N) između sekundarnog i primarnog namota:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2}; \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1}$$



Slika 3-1. Shematski prikaz idealnog transformatora

Transformator se sastoji od aktivnog dijela (magnetske jezgra, namoti) i konstrukcijskog i izolacijskog dijela koji izravno ne služe za transformaciju električne energije (slika 3-2).

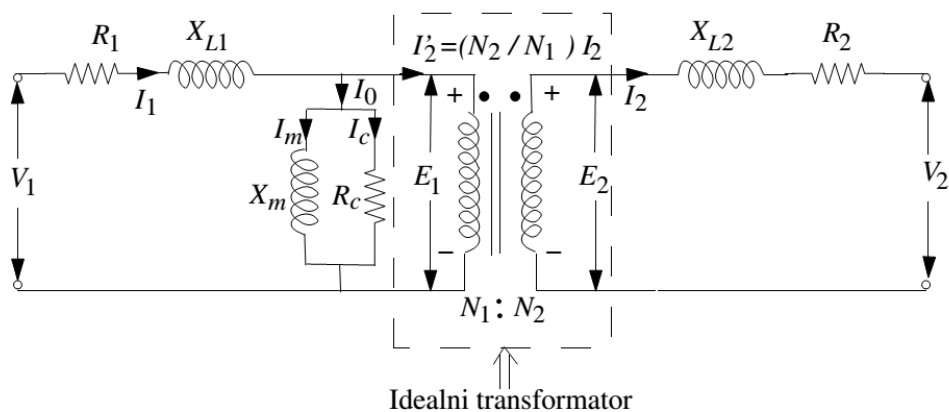


Slika 3-2 - Prikaz aktivnog dijela distributivnog transformatora [7]

Za razliku od slučaja idealnog transformatora, u praksi se pojavljuju gubici koji smanjuju učinkovitost transformatora:

- Gubici praznog hoda (gubici u jezgri – nastaju uslijed pojave histereze i vrtložnih struja)
- Gubici tereta (gubici u namotima - ohmski gubici u vodičima namota, i dodatni gubici uzrokovani rasipnim magnetskim poljem te dodatni gubici odnosno gubici izvan namota – gubici u metalnim konstrukcijskim dijelovima uzrokovani rasipnim magnetskim poljem)

Uzimajući u obzir navedene gubitke, može se napraviti nadomjesna shema stvarnog transformatora koju prikazuje slika 3-3 [6].

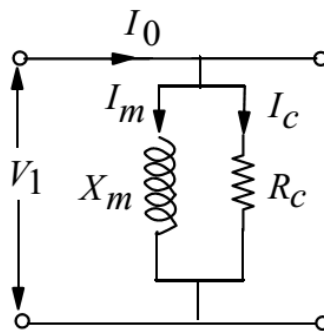


Slika 3-3. Nadomjesna shema stvarnog transformatora

3.1 Struktura gubitaka u transformatorima

3.1.1 Gubici praznog hoda

Jezgra transformatora izrađuje se od magnetskog materijala (najčešće od takozvanih transformatorskih limova) koji na efikasan način omogućava stvaranje magnetskog kruga odnosno magnetske indukcije pomoću koje se ostvaruje prijenos električne energije s primara na sekundar. Čim je magnetski materijal podvrgnut promjenjivom magnetskom polju, u njemu se stvaraju dvije pojave koje uzrokuju gubitke: histereza i vrtložne struje. To znači da su gubici praznog hoda uzrokovani navedenim pojavama uvijek prisutni u transformatorima koji su priključeni na napon, odnosno koji su energizirani, bez obzira na opterećenje. S obzirom na to da se magnetski materijal nalazi u jezgri transformatora, gubici praznog hoda nastaju isključivo na tom mjestu, pa se često nazivaju i gubici u jezgri. Gubici praznog hoda su stalno prisutni i zbog toga uzrokuju značajne gubitke u sustavu. Struja I_0 , zbog koje nastaju gubici u jezgri, mjeri se u pokusu praznog hoda transformatora, a sastoji se od struje magnetiziranja I_m i vrtložnih struja I_c . Slika 3-4 prikazuje nadomjesnu shemu pokusa praznog hoda transformatora.



Slika 3-4. Nadomjesna shema pokusa praznog hoda

Gubici histereze nastaju u jezgri kao posljedica promjenjivog magnetskog polja, proporcionalni su frekvenciji i ovise o petlji histereze u B-H dijagramu, odnosno o svojstvima materijala i funkciji vršne gustoće magnetskog toka. Promjenjivo magnetsko polje, ovisno o frekvenciji, mijenja smjer čestica materijala jezgre zbog čega se jezgra zagrijava, jer se pojavljuje trenje između čestica [8].

Gubici vrtložnih struja javljaju se u svim dijelovima magnetskog kruga, a proporcionalni su kvadratu frekvencije, kvadratu debljine materijala jezgre i o njegovom električnom otporu.

Kako bi se smanjili gubici histereze koriste se materijali sa što užom petljom histereze, a za smanjenje vrtložnih struja jezgra se sastavlja od što tanjih limova sa što većim otporom. Osim toga, dodatno smanjenje gubitaka praznog hoda postiže se takozvanim „step-lap“ slaganjem limova u jezgri. To znači da se u limovi preklapaju na takav način da se prosječna duljina preklopa limova podijeli na nekoliko koraka, čime se smanjuje utjecaj zračnih raspora na spojevima limova, odnosno dobiva se bolja usmjerenost magnetskog lima sa smjerom toka. [9]

3.1.2 Gubici tereta

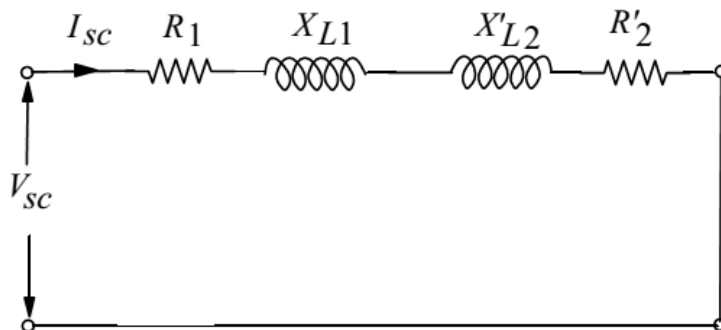
Pod pojmom gubitaka tereta smatramo gubitke nastale zbog iznosa struja opterećenja. Ovi gubici ovise o kvadratu struje opterećenja, a mogu se podijeliti u tri kategorije:

- gubici uslijed djelatnog otpora vodiča (mjereni pri istosmjernoj struji) [10]
- gubici vrtložnih struja u namotima
- gubici vrtložnih struja u vodljivim konstrukcijskim elementima transformatora

Zadnje dvije kategorije još se nazivaju i dodatnim gubicima. Gubici zbog ohmskog otpora namota mogu se smanjiti reduciranjem broja namota, povećanjem poprečnog presjeka vodiča namota ili kombinacijom dva navedena pristupa. No, za smanjenje broja namota potrebno je povećati magnetski tok odnosno povećati poprečni presjek jezgre, što s druge strane utječe na povećanje gubitaka u praznom hodu jer se povećava težina materijala jezgre, a samim time i gubici u jezgri.

Vrtložne struje nastaju kao posljedica rasipnog magnetskog toka, odnosno pojave da se magnetski tok nastao u primarnim namotima ne ulanča u potpunosti sa sekundarnim namotima, i obrnuto. Ovo rasipanje magnetskog toka određuje kratkospojnu impedanciju transformatora (u_k transformatora).

Put vrtložnih struja u namotima je složen. Veličina rasipnog magnetskog toka unutar namota transformatora ovisi o geometriji i samoj konstrukciji transformatora. Kao posljedica rasipnog magnetskog toka unutar transformatorskih namota nastaju aksijalne i radijalne promjene magnetskog toka u svakoj točki prostora u svakom trenutku. Navedene promjene induciraju napone koji izazivaju protjecanje struja okomitih na magnetski tok, odnosno stvaraju gubitke. Na iznos ovih struja može se utjecati povećanjem otpora na dijelovima u kojim se javljaju, a to se postiže smanjenjem poprečnog presjeka vodiča namota odnosno upotrebom transponiranih vodiča koji se sastoje od više međusobno izoliranih vodiča manjeg presjeka te su tvornički isprepleteni čime se ujedno smanjuju struje izjednačenja. S druge strane, ovim postupkom povećava se ukupni otpor namota, a samim time povećavaju se ohmski gubici u namotima. [11].



Slika 3-5. Nadomjesna shema pokusa kratkog spoja transformatora

Gubici tereta određuju se u pokusu kratkog spoja transformatora, čiju nadomjesnu shemu prikazuje slika 3-5. Dok je sekundarni namot kratkospojen, na primaru se

podigne napon sve dok sekundarom odnosno kratkospojnikom ne poteče nazivna struja transformatora.

Dodatni gubici izračunavaju se iz izmjerenih ukupnih gubitaka kratkog spoja prema sljedećoj relaciji:

$$P_s = P_t - I^2 R$$

gdje su P_t ukupni izmjereni gubici, $I^2 R$ ohmski gubici namota, a P_s dodatni gubici.

Dodatni gubici nastaju i van namota transformatora, a uzrokovani su rasipnim poljem i nastaju u vodljivim konstrukcijskim elementima. U ukupnom udjelu gubitaka tereta ovi gubici čine relativno mali postotak, no moraju se kontrolirati jer nisu jednoliko raspoređeni, rastu s dimenzijama transformatora, a uglavnom se manifestiraju kroz lokalno zagrijavanje. Kao mjere za njihovo smanjenje koriste se materijali s povećanim magnetskim otporom ili se ugrađuju magnetski štitovi, zaslони i paralelni putovi kojima se usmjeruje magnetsko polje.

3.1.3 Ostali gubici

Na učinkovitost transformatora mogu utjecati i druge pojave pored navedenih u prethodna dva poglavlja, a vezane su uz starost transformatora, stanje izolacijskih medija, pogonske prilike u kojima se transformator nalazi, klimatske uvjete i druge neelektrične okolnosti. Ovi gubici utječu vrlo malo na ukupne gubitke (manje od 1%) i obično se mogu zanemariti, pogotovo jer ovise od slučaja do slučaja.

Primjer ostalih gubitaka su dielektrični gubici zbog smanjenja kvalitete izolacijskoj medija (uglavnom transformatorskog ulja) zbog čega dolazi do pojave zagrijavanja, zatim nesimetrično opterećenje transformatora u pogonu i preopterećenje što dovodi do ubrzanog starenja izolacije, curenje ulja iz transformatora čime se smanjuju izolacijska svojstva i hlađenje transformatora i slično.

3.2 Podjela transformatora s obzirom na gubitke

3.2.1 „Eko direktiva“ i zakonski propisi

Europska unija donosi ciljeve koji su utvrđeni ugovorima Europske unije, a ostvaruju se različitim pravnim aktima. Neki su obvezujući, a neki nisu. Neki se primjenjuju na sve države EU-a, dok se neki primjenjuju samo na nekoliko njih.

Uredba je obvezujući zakonodavni akt koji se mora u cijelosti primjenjivati u čitavoj Europskoj uniji. Ne treba biti prebačena u nacionalni zakon država članica EU, iako je potrebno promijeniti nacionalne zakone, kako bi se izbjegao sukob s ostalim zakonskim aktima [12].

Direktiva je zakonodavni akt kojim se utvrđuje cilj koji sve države članice EU-a moraju ostvariti. Međutim, svaka država samostalno odlučuje o načinu na koji će ostvariti taj cilj. Direktive je potrebno prebaciti u nacionalne zakone kako bi stupile na snagu [12].

Do donošenja Europske direktive broj 2009/125/EZ koja propisuje uspostavu okvira za utvrđivanje zahtjeva za ekološki dizajn proizvoda koji koriste energiju, tehnologija

izrade energetskih transformatora nije bila usmjerena na postizanje određene razine gubitaka. Ekološki dizajn proizvoda je ključni faktor u strategiji Zajednice o integriranoj politici o proizvodima. Kao preventivni pristup, zamišljen je tako da optimizira djelovanje uređaja na okoliš, uz zadržavanje njihovih funkcionalnih kvaliteta. Unutar direktive definirani su opći zahtjevi za ekološki dizajn čiji cilj je poboljšanje ekološke učinkovitosti proizvoda koji koriste energiju, s naglaskom na njihove znatne ekološke aspekte bez utvrđivanja graničnih vrijednosti [13].

Krajem 2008. godine Europska unija usvojila je tzv. energetsko-klimatski paket zakona (poznat i kao cilj 20-20-20) koji je do 2020. godine trebao rezultirati s 20 % manjim emisijama stakleničkih plinova u usporedbi s 1990. godinom, 20 % udjela obnovljivih izvora energije u ukupnoj energetskoj potrošnji i 20 % manjom potrošnjom energije [14]. Prema tome, smanjenje potrošnje energije i eliminiranje rasipanja energije jedni su od glavnih ciljeva Europske unije. Na temelju direktive 2009/125/EZ, 2014. godine donesen je provedbeni dokument za energetske transformatore (uredba br. 548/2014). Ovim dokumentom se propisuju zahtjevi za ekološki dizajn za stavljanje na tržište ili stavljanje u uporabu energetskih transformatora najniže snage 1 kVA koji se koriste u prijenosu električne energije na 50 Hz i u distribucijskim mrežama ili za industrijske primjene. Uredba se primjenjuje isključivo na transformatore kupljene nakon stupanja na snagu ove Uredbe, a svodi se na ograničenje iznosa gubitaka u transformatorima. Na ovaj način želi se postići da transformatori proizvedeni u skladu sa spomenutim smjernicama daju doprinos u smanjenju emisije CO₂ u Europskoj uniji. S druge strane, zbog dodatnih zahtjeva, za očekivati je da će cijene transformatora porasti zbog upotrebe novih materijala i veće količine materijala nego što je to bilo do sada te da je moguća i promjena dimenzija u odnosu na postojeće transformatore

Uredbom se određuju zahtjevi na učinkovitost transformatora odnosno dozvoljene gubitke i to na dvije razine, od kojih je prva stupila na snagu 1. srpnja 2015. (Razina 1.), a druga od 1. srpnja 2021. (Razina 2.). Zahtjeve pojedinih razina prikazuje tablica 1. Uredba predviđa preispitivanje propisanih mjera do 2023. godine, kada će, između ostalog, biti razmatrano do koje su mjere zahtjevi iz razine 2. bili troškovno učinkoviti te je li primjereno uvesti još strože zahtjeve razine 3. [15]

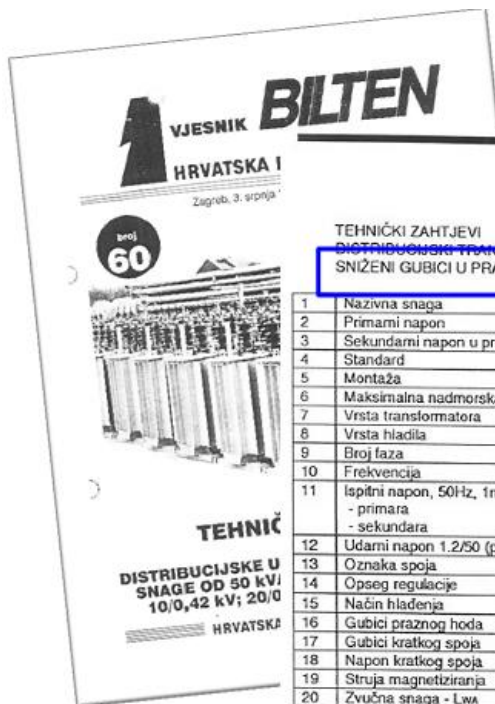
U prvoj razini znatno je ograničena najviša dozvoljena vrijednost gubitaka praznog hoda transformatora, dok su dozvoljeni gubici tereta smanjeni za jednu klasu (ukinuta je razina gubitaka tereta D_k). Stupanjem na snagu druge razine uredbe 548/2014, dodatno su ograničeni gubici praznog hoda i to za 10% od vrijednosti propisanih razinom 1. S druge strane, naglasak je na smanjenju gubitaka tereta čija najviša dozvoljena vrijednost ne smije prelaziti klasu A_k.

Tablica 1 - Zahtjevi za uljne transformatore ≤3150 kVA (Uredba (EU) br. 548/2014)

Nazivna snaga kVA	Razina 1 (od 01. 07. 2015.)		Razina 2 (od 01. 07. 2021.)	
	Maksimalni gubici tereta P_k (W)	Maksimalni gubici praznog hoda P_0 (W)	Maksimalni gubici tereta P_k (W)	Maksimalni gubici praznog hoda P_0 (W)
≤25	C_k (900)	A_0 (70)	A_k (600)	$A_0 - 10\%$ (63)
50	C_k (1100)	A_0 (90)	A_k (750)	$A_0 - 10\%$ (81)
100	C_k (1750)	A_0 (145)	A_k (1250)	$A_0 - 10\%$ (130)
160	C_k (2350)	A_0 (210)	A_k (1750)	$A_0 - 10\%$ (189)
250	C_k (3250)	A_0 (300)	A_k (2350)	$A_0 - 10\%$ (270)
315	C_k (3900)	A_0 (360)	A_k (2800)	$A_0 - 10\%$ (324)
400	C_k (4600)	A_0 (430)	A_k (3250)	$A_0 - 10\%$ (387)
500	C_k (5500)	A_0 (510)	A_k (3900)	$A_0 - 10\%$ (459)
630	C_k (6500)	A_0 (600)	A_k (4600)	$A_0 - 10\%$ (540)
800	C_k (8400)	A_0 (650)	A_k (6000)	$A_0 - 10\%$ (585)
1000	C_k (10500)	A_0 (770)	A_k (7600)	$A_0 - 10\%$ (693)
1250	B_k (11000)	A_0 (950)	A_k (9500)	$A_0 - 10\%$ (855)
1600	B_k (14000)	A_0 (1200)	A_k (12000)	$A_0 - 10\%$ (1080)
2000	B_k (18000)	A_0 (1450)	A_k (15000)	$A_0 - 10\%$ (1305)
2500	B_k (22000)	A_0 (1750)	A_k (18000)	$A_0 - 10\%$ (1575)
3150	B_k (27000)	A_0 (2200)	A_k (23000)	$A_0 - 10\%$ (1980)

3.2.2 Klasični transformatori

Od početka proizvodnje transformatora do danas, postojalo je nekoliko generacija transformatora, od kojih je svaka novija generacija u pravilu imala manje gubitke. Sve transformatore proizvedene prije stupanja uredbe EU br. 584/2014 na snagu možemo smatrati klasičnim transformatorima. Pojedine tehničke karakteristike klasičnih transformatora bile su definirane od strane kupca – tako je Hrvatska elektroprivreda 1997. godine donijela gransku normu pod nazivom „Tehnički uvjeti za distribucijske uljne transformatore snage od 50 kVA do 1000 kVA“ [16] gdje su opisani zahtjevi koji se odnose na izradu i isporuku trofaznih, uljnih distribucijskih transformatora snaga od 50 kVA do 1000 kVA. U tom dokumentu uvode se zahtjevi za „napredne transformatore sa sniženim gubicima” što je termin koji se odnosi relativno na izvedbe transformatora iz 1950-ih, 1960-ih i 1970-ih godina, jer su tada su postojale i slabije klase D_0 i E_0 . Prema zahtjevima, transformatori su trebali biti klase gubitaka C_0 za gubitke u praznom hodu i C_k za gubitke u kratkom spoju (gubici opterećenja), odnosno može se reći da su specificirani transformatori „srednje klase“, prema definicijama u normi HRN EN 50464-1. [17]



TABLICA 1

TEHNIČKI ZAHTJEVI
DISTRIBUCIJSKI TRANSFORMATORI
SNIŽENI GUBICI U PRAZKOM HODU

1	Nazivna snaga	kVA	400	630	1000
2	Primarni napon	kV	20(10)	20(10)	20(10)
3	Sekundarni napon u pr. hodu	kV	0.42	0.42	0.42
4	Standard		IEC 76	IEC 76	IEC 76
5	Montaža		Vanjska	Vanjska	Vanjska
6	Maksimalna nadmorska visina	m	1000	1000	1000
7	Vrsta transformatora		hermetički	hermetički	hermetički
8	Vrsta hladila		valoviti lim	valoviti lim	valoviti lim
9	Broj faza		3	3	3
10	Frekvencija	Hz	50	50	50
11	Ispitni napon, 50Hz, 1min - primara - sekundara	kV kV	50(28) 3	50(28) 3	50(28) 3
12	Udarni napon 1.2/50 (primarni)	kV	125(75)	125(75)	125(75)
13	Oznaka spoja		Dyn5	Dyn5	Dyn5
14	Opseg regulacije	%	±2x2.5	±2x2.5	±2x2.5
15	Način hlađenja		ONAN	ONAN	ONAN
16	Gubici praznog hoda	W	610	860	1100
17	Gubici kratkog spoja	W	4600	6500	10500
18	Napon kratkog spoja	%	4	4	6
19	Struja magnetiziranja	%	2.4	2.2	2.0
20	Zvučna snaga - L _w	dB	58	60	63

B.2.1. DISTRIBUTIVNI ULJNI TRANSFORMATORI 50 kVA (PREKLOPIVI)

Slika 3-6 - Zahtjevi za distributivne transformatore (Bilten HEP br. 60)

Vodeći se zahtjevima normi koje se odnose na transformatore, kupac je mogao određivati karakteristike transformatora, no nisu postojale propisane minimalne granice energetske učinkovitosti odnosno gubitaka transformatora.

Tablica 2 – Karakteristične vrijednosti gubitaka distributivnih transformatora starije izvedbe

Nazivna snaga [kVA]	KONČAR tip Tn-xx		Energoinvest Xx/10-0,4		Elektrosrbija Tip T1-xx	
	P ₀ [W]	P _k [W]	P ₀ [W]	P _k [W]	P ₀ [W]	P _k [W]
30	140	710	-	-	143	880
50	210	1090	210	1250	200	1200
100	340	1950	340	2150	330	2000
160	470	2800	480	3100	480	3000
250	680	3600	670	4300	720	3850
315	820	4300	-	-	900	4500
400	950	5150	960	6000	1050	5500
500	1150	6800	-	-	1200	6700
630	1310	8000	1350	8400	1500	8300

Neke od karakterističnih vrijednosti gubitaka praznog hoda i kratkog spoja za pojedinu vrstu klasičnih distributivnih transformatora starije izvedbe prikazuje tablica 2 [18]. Kada se ove vrijednosti usporede sa zahtjevima iz tehničke specifikacije HEP-a, vidljivo je da je i prije propisanih mjera za energetske učinkovitost transformatora HEP odredio nabavku novih transformatora sa više od 30% smanjenim gubicima praznog hoda u odnosu na spomenute starije izvedbe transformatorskih jedinica.

3.2.3 Energetski učinkoviti transformatori

Normom EN50464-1:2007 definirano je 5 razina gubitaka praznog hoda oznakama: A₀, B₀, C₀, D₀ i E₀, te 4 razine gubitaka opterećenja oznakama: A_k, B_k, C_k i D_k. Oznake A₀ odnosno A_k predstavljaju najnižu razinu, dok E₀ odnosno D_k najvišu razinu gubitaka, kako prikazuju tablica 3 i tablica 4.

Tablica 3 - Klase gubitaka praznog hoda i razine buke prema normi HRN EN 50464-1:2008

Nazivna snaga [kVA]	E ₀		D ₀		C ₀		B ₀		A ₀		Imped. k. s. [%]
	P ₀ [W]	L _{wA} [dB(A)]	P ₀ [W]	L _{wA} [dB(A)]	P ₀ [W]	L _{wA} [dB(A)]	P ₀ [W]	L _{wA} [dB(A)]	P ₀ [W]	L _{wA} [dB(A)]	
50	190	55	145	50	125	47	110	42	90	39	4
100	320	59	260	54	210	49	180	44	145	41	
160	460	62	375	57	300	52	260	47	210	44	
250	650	65	530	60	425	55	360	50	300	47	
315	770	67	630	61	520	57	440	52	360	49	
400	930	68	750	63	610	58	520	53	430	50	
500	1100	69	880	64	720	59	610	54	510	51	
630	1300	70	1030	65	860	60	730	55	600	52	6
630	1200	70	940	65	800	60	680	55	560	52	
800	1400	71	1150	66	930	61	800	56	650	53	
1000	1700	73	1400	68	1100	63	940	58	770	55	
1250	2100	74	1750	69	1350	64	1150	59	950	56	
1600	2600	76	2200	71	1700	66	1450	61	1200	58	
2000	3100	78	2700	73	2100	68	1800	63	1450	60	
2500	3500	81	3200	76	2500	71	2150	66	1750	63	

Norma HRN EN 50464-1:2008 više nije na snazi, te je prilikom proizvodnje i nabave novih transformatora i definiranja njihovih klasa gubitaka obvezno pozivanje na noviju normu HRN EN 50588-1:2015, s obzirom na to da je ista usklađena s odredbama Uredbe (EU) br. 548/2014 [2].

Tablica 4 - Klase gubitaka kratkog spoja prema normi HRN EN 50464-1:2008

Nazivna snaga [kVA]	D _k [W]	C _k [W]	B _k [W]	A _k [W]	Imped. k. s. %
50	1350	1100	875	750	4
100	2150	1750	1475	1250	
160	3100	2350	2000	1700	
250	4200	3250	2750	2350	
315	5000	3900	3250	2800	
400	6000	4600	3850	3250	
500	7200	5500	4600	3900	
630	8400	6500	5400	4600	
630	8700	6750	5600	4800	6
800	10500	8400	7000	6000	
1000	13000	10500	9000	7600	
1250	16000	13500	11000	9500	
1600	20000	17000	14000	12000	
2000	26000	21000	18000	15000	
2500	32000	26500	22000	18500	

Ako se usporedi pet klasa gubitaka praznog hoda transformatora koje utvrđuje norma HRN EN 50464-1:2008 (klase A₀ do E₀, Tablica 3), prema prvoj razini uredbe EU br. 548/2014, od 01.07.2015. najveći dopušteni gubici distributivnih uljnih transformatora snage ≤ 3150 kVA mogu biti klase A₀ (postojeće klase B₀, C₀, D₀ i E₀ su ukinute). Dodatno, u drugoj razini uredbe EU br. 548/2014, koja stupa na snagu 01.07.2021., propisuje se dodatno sniženje najveće dozvoljene vrijednost gubitaka praznog hoda na A₀-10% (AA₀).

Kad je riječ o gubicima kratkog spoja, u odnosu na četiri klase gubitaka kratkog spoja transformatora koje su bile utvrđene normom HRN EN 50464-1:2008 (klase A_k, B_k, C_k i D_k, Tablica 4), uredbom EU br. 548/2014 ukinuta je samo klasa D_k. Tako je od stupanja prve razine uredbe EU na snagu, za uljne transformatore do 1000 kVA klasa C_k postala klasa s najvišim dozvoljenim gubicima kratkog spoja, dok je za transformatore snaga 1000 – 3150 kVA propisana klasa B_k najviših dozvoljenih gubitaka. S drugom razinom uredbe propisano je dodatno sniženje najveće dozvoljene vrijednost gubitaka kratkog spoja na A_k, počevši od 01.07.2021. [2]

Nakon donošenja uredbe EU br. 548/2014, objavljena je nova norma za distributivne transformatore HRN EN 50588-1:2015, koja je uzela u obzir granične klase gubitaka iz uredbe, te je dodatno uvedena i klasa gubitaka AAA₀ (A₀-50%). Klase gubitaka u praznom hodu i kratkom spoju prema novoj normi HRN EN 50588-1:2015 za transformatore uronjene u tekućinu (uljni transformatori) prikazane su u tablicama tablica 5 i tablica 6.

Tablica 5 - Gubici praznog hoda i razine snage buke za distributivne transformatore prema HRN EN 50588-1:2015

Nazivna snaga [kVA]	AAA ₀	AA ₀		A ₀	
	P ₀ [W]	P ₀ [W]	L _{wA} [dB(A)]	P ₀ [W]	L _{wA} [dB(A)]
≤ 25	35	63	36	70	37
50	45	81	38	90	39
100	75	130	40	145	41
160	105	189	43	210	44
250	150	270	46	300	47
315	180	324	48	360	49
400	220	387	49	430	50
500	260	459	50	510	51
630	300	540	51	600	52
800	330	585	52	650	53
1000	390	693	54	770	55
1250	480	855	55	950	56
1600	600	1080	57	1200	58
2000	730	1305	59	1450	60
2500	880	1575	62	1750	63
3150	1100	1980	63	2200	64

Za primjer, može se napraviti pregled smanjenja gubitaka prema zahtjevima uredbe br. 548/2014 na gubitke transformatora u praznom hodu. Za nazivnu snagu transformatora 630 kVA, tehnička specifikacija HEP-a (usklađena s normom 50464-1:2008) propisivala je najveću razinu gubitaka C₀, odnosno 860 W. Za nove transformatore snage 630 kVA, prema razini 1 uredbe 548/2014, najveći dozvoljeni gubici praznog hoda mogu biti klase A₀ (600 W), što predstavlja smanjenje od 30% u usporedbi sa zahtjevima HEP-ove specifikacije. Stupanjem na snagu razine 2, dozvoljeni gubici se dodatno smanjuju i iznose 540 W, odnosno 38% niže od referentne vrijednosti iz specifikacije HEP-a, kako prikazuje slika 3-7. Usporedbom s podacima koje sadrži tablica 2, transformatori proizvedeni već po odredbama razine 1 uredbe 548/2014 imaju barem 55 % manje gubitke praznog hoda u odnosu na stare izvedbe transformatora od kojih su neki još prisutni u pogonu.

Rated power kVA	E0		D0		C0		B0		A0		Short circuit Impedance %
	P0	LwA	P0	LwA	P0	LwA	P0	LwA	P0	LwA	
	W	dB(A)	W	dB(A)	W	dB(A)	W	dB(A)	W	dB(A)	
50	190	55	145	50	125	47	110	42	90	39	6
100	320	59	260	54	210	49	180	44	145	41	
160	460	62	375	57	300	52	260	47	210	44	
250	650	65	530	60	420	55	360	50	300	47	
315	770	67	630	61	500	57	440	52	360	49	
400	930	68	750	63	600	58	520	53	420	50	
500	1 100	69	880	64	720	59	610	54	500	51	
630	1 300	70	1 030	65	860	60	730	55	600	52	
630	1 200	70	940	65	800	60	680	55	560	52	
800	1 400	71	1 150	66	930	61	800	56	650	53	
1 000	1 700	73	1 400	68	1 100	63	940	58	770	55	
1 250	2 100	74	1 750	69	1 350	64	1150	59	950	56	
1 600	2 600	76	2 200	71	1 700	66	1450	61	1 200	58	
2 000	3 100	78	2 700	73	2 100	68	1800	63	1 450	60	
2 500	3 500	81	3 200	76	2 500	71	2150	66	1 750	63	

Slika 3-7 - Primjer smanjenja gubitaka prema uredbi 548/2014

Što se tiče zahtjeva na gubitke tereta transformatora, novi transformatori do 1000 kVA moraju biti maksimalno klase gubitaka C_k , što je i bilo propisano HEP-ovom specifikacijom, dok transformatori snaga 1250 – 2000 kVA moraju biti sa minimalno 17 % nižim gubicima. Prema odredbama razine 2 uredbe 548/2019 od 1. srpnja 2021. svaki novi transformator mora biti minimalno klase A_k što za primjer transformatora 630 kVA iznosi 30 % nižih gubitka tereta.

Kad se usporedbe propisane dozvoljene razine gubitaka, može se vidjeti kako je stavljen veći naglasak na smanjenju gubitaka praznog hoda u odnosu na gubitke tereta transformatora. Jedan od razloga za ovakvu raspodjelu je činjenica da transformatori najčešće nisu nazivno opterećeni, te u tom slučaju gubici praznog hoda čine značajni udio u ukupnim gubicima transformatora. Prema istraživanjima, distributivni transformatori prosječno su opterećeni sa svega 20 % nazivne snage, s izuzetkom visoko-industrijaliziranih područja, odnosno udio gubitaka praznog hoda u ukupnim gubicima distributivnih transformatora u zemljama EU27 veći je od 70 %. Zbog toga postoji veliki interes da se gubici praznog hoda transformatora smanje u što većoj mjeri [19]. Drugi razlog većeg smanjenja gubitaka praznog hoda u odnosu na gubitke tereta je što se smanjenje gubitaka praznog hoda do određene razine u osnovi ostvaruje primjenom kvalitetnijeg materijala u jezgri, bez utjecaja na dimenzije i težinu transformatora. S druge strane smanjenje gubitaka tereta najčešće se postiže povećanjem presjeka vodiča što dovodi do povećanja težine i dimenzija transformatora. [20]

Tablica 6 - Gubici tereta za distributivne transformatore prema HRN EN 50588-1:2015

Nazivna snaga [kVA]	Ak	Bk	Ck	Imped. k. s. [%]
	P _k [W]	P _k [W]	P _k [W]	
≤ 25	600	725	900	4
50	750	875	1100	4
100	1250	1475	1750	4
160	1750	2000	2350	4
250	2350	2750	3250	4
315	2800	3250	3900	4
400	3250	3850	4600	4
500	3900	4600	5500	4
630	4600	5400	6500	4 ili 6
800	6000	7000	8400	6
1000	7600	9000	10500	6
1250	9500	11000	-	6
1600	12000	14000	-	6
2000	15000	18000	-	6
2500	18500	22000	-	6
3150	23000	27500	-	6

3.2.4 Amorfni transformatori

Norma HRN EN 50588-1:2015 za gubitke praznog hoda transformatora uvodi klasu AAA₀, što predstavlja 50% smanjenje gubitaka u odnosu na klasu A₀. Trenutna tehnologija izrade transformatorskih jezgri od magnetski orijentiranog lima ne omogućava postizanje manjih gubitaka od AA₀ (A₀-10%). Iz toga razloga, kod tema energetski učinkovitih transformatora bitno je spomenuti takozvane amorfne transformatore jer danas predstavljaju jedinu tehnologiju koja omogućava najnižu klasu gubitaka praznog hoda A₀-50%, tj. klasu AAA₀.

Amorfni transformatori su energetski transformatori čija jezgra je izrađena od amornih materijala. Amorfni materijal je oko 10 puta tanji od magnetski orijentiranog lima. Zbog manje debljine manji su i gubici vrtložnih struja. Osim toga, manje su i magnetske regije. Sukladno tome, specifični gubici amornog materijala su oko 3 puta manji od specifičnih gubitaka magnetski orijentiranog lima pri istoj indukciji. S druge strane, manja debljina pridonosi slabijoj iskoristivosti amornog materijala u jezgri. [19]

Uz niže gubitke praznog hoda, amorfni transformatori su u prednosti pred klasičnim zbog niže struje magnetiziranja, to jest manje potrebne snage magnetiziranja.

Specifična snaga magnetiziranja za jezgre od amornog materijala oko tri puta manja u odnosu na jezgru od klasičnog magnetskog lima. [19]

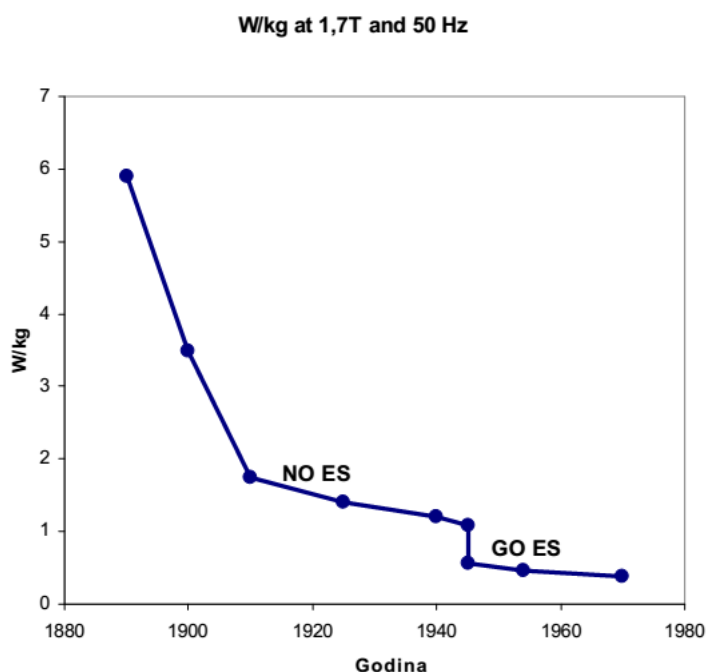
Zbog krhkosti strukture amornog materijala, kao amorfni transformatori proizvode se samo transformatori relativno malih snaga. Amorfni transformatori su zbog niže indukcije zasićenja teži i većih dimenzija od klasičnih distributivnih transformatora. Kod njih ne mogu ni približno postići niske vrijednosti buke kao kod klasičnih distributivnih transformatora. To potvrđuje i opaska u novom standardu EN 50558-1 u kojem se za razinu gubitaka AAA_0 (koja se ne može ostvariti u klasičnoj tehnologiji) navodi da se vrijednost za buku tj. za zvučnu snagu L_{wa} dogovara direktno između kupca i proizvođača transformatora. [20]

U svakom slučaju, tehnologija izrade amornih transformatora se razvija i predstavlja dobar potencijal za daljnje unaprjeđenje energetske učinkovitosti transformatora. U nekim zemljama, poput Indije, SAD-a, Japana i Kine ova tehnologija je već postala standard, te se redovno ugrađuju amorfni transformatori, ponajviše zbog koncentracije industrije koja proizvodi ovakav tip materijala. [21]

3.3 Mjere za smanjenje gubitaka u transformatorima

3.3.1 Smanjenje gubitaka u jezgri

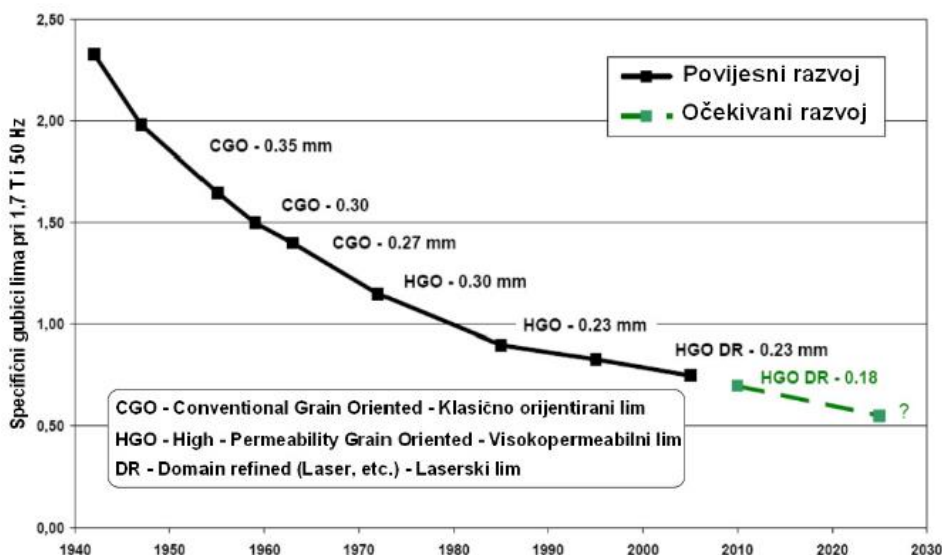
Razvojem industrijske proizvodnje kroz povijest, bilježen je napredak u tehnologiji izrade jezgre te materijalima korištenima za tu namjenu. U početku jezgre transformatora bile su građene od lijevanog željeza koje su zatim zamijenile jezgre od mekanog željeza.



Slika 3-8 - Prikaz smanjenja specifičnih gubitaka materijala za jezgru transformatora kroz godine [17]

Prvi veliki napredak u izradi transformatorskih jezgara dogodio se početkom 20. stoljeća kada je u upotrebu uveden neorijentirani električni čelik (NOES), odnosno legura čelika i silicija koja ima jednaka magnetska svojstva u svim smjerovima materijala, a odlikuje se značajno manjim specifičnim gubicima od običnog željeza. Dodavanjem silicija znatno se utječe na vodljivost čelika, čime se ujedno smanjuje iznos vrtložnih struja.

Drugi veliki napredak zabilježen je 40.-tih godina 20. stoljeća s primjenom klasično orijentiranog lima (grain oriented electrical steel – GOES). Karakteristika ovog materijala je da najbolja magnetska svojstva pokazuje u smjeru valjanja materijala, odnosno da magnetski tok ide u smjeru magnetizacije materijala, čime se postižu veće gustoće magnetskog toka u jezgri. Daljnjim razvojem pojavili su se materijali još boljih magnetskih svojstava od kojih je trenutačno najbolji laserski orijentiran lim (high permeability grain oriented domain refined).



Slika 3-9 - Povijesni razvoj transformatorskog lima [19]

Slika 3-9 prikazuje povijesni razvoj transformatorskog lima, s aspekta specifičnih gubitaka i debljine lima. Iz slike je vidljivo da su specifični gubici lima u posljednjih 60 godina smanjeni za oko 2,5 puta [19]. Isto tako, razvojem novih tehnologija i materijala proizvode se sve tanji limovi što također utječe na smanjenje gubitaka.

Današnje transformatorske jezgre karakterizira korištenje laserski orijentiranih limova koji se slažu u step-lap preklop. Na ovaj način postižu se vrijednosti gubitaka jezgre razine A_0 . Prema današnjim najboljim tehnologijama proizvodnje distributivnih transformatora, moguće je postići razinu gubitaka $A_k(A_0-20\%)$. Prema nekim procjenama, daljnjim razvojem se uskoro mogu očekivati i do 20 % bolji limovi, no time se još uvijek ne bi mogli postići gubici razine AAA_0 ($A_0-50\%$) koje definira norma HRN EN 50588-1:2015. [19]

Tehnologija proizvodnje distributivnih transformatora s jezgrama od amornog materijala može zadovoljiti zahtjeve za gubicima razine $A_0-50\%$. Takvi

transformatori imaju oko 50-70 % niže gubitke praznog hoda od klasičnih transformatora, a osim toga i nižu struju magnetiziranja. S druge strane amorfnih transformatori u odnosu na klasične imaju višu početnu cijenu, dimenzije i buku. Amorfnih materijal vrlo je krto i lomljiv te zbog toga vrlo osjetljiv na mehaničke manipulacije, što otežava samu izradu takvih transformatora.

3.3.2 Smanjenje gubitaka u namotima

Namoti transformatora uglavnom se izrađuju od bakrenih ili aluminijskih vodiča jer imaju najbolja tehnološka i ekonomska svojstva. Bakreni vodiči imaju veću vodljivost od aluminijskih te pridonose manjim dimenzijama namota, a samim time i cijelom transformatora.

Za postizanje optimalnih dimenzija namota transformatora u odnosu na presjek vodiča, koriste se vodiči pravokutnog oblika ili folijski vodiči koji mogu bolje popuniti prostor u usporedbi s vodičima okruglog presjeka. Osim toga, namoti transformatora izrađeni na ovaj način imaju bolju mehaničku stabilnost kod naprezanja nego što imaju namoti izrađeni od vodiča okruglog presjeka. [21]

S povećanjem presjeka, vodiči namota izvode se iz više paralelnih vodiča kako bi se smanjio iznos vrtložnih struja odnosno reducirali gubici. Vodiči se još dodatno tvornički isprepliću čime se ujednačuje induktivitet vodiča odnosno postiže se da vodiči prosječno budu u istom magnetskom polju čime se još više utječe na smanjenje vrtložnih struja i gubitaka zbog skin-efekta.

Smanjenje gubitaka u namotima odnosno vodičima svodi se na jednostavne pristupe poput upotrebe bakrenih umjesto aluminijskih vodiča, te povećanjem presjeka vodiča namota. Ove mjere su tehnološki učinkovite, no nose negativne ekonomske posljedice jer utječu na povećavanje dimenzija transformatora te njihove ukupne cijene.

U fazi razvoja su neka područja na kojima je moguće daljnje smanjenje gubitaka u namotima, poput upotrebe visokotemperaturnih supravodljivih namota (temperature između -121° i -93° C) koji su ujedno i manjih gabarita, ali s druge strane zahtijevaju dodatna rješenja hlađenja za postizanje navedenih temperatura. Trenutno je ovakvo rješenje između 150 i 200 % skuplje od klasične izvedbe transformatora, a s razvojem tehnologije moguće je očekivati da dođu na ekonomsku razinu konkurentnosti postojećim transformatorima.

Još jedna od novih tehnologija koja je tek u razvoju je takozvani „solid-state“ transformator. Ovaj tip transformatora funkcionira na način da se transformacija odvija preko komponenata energetske elektronike koje rade na srednjim ili visokim frekvencijama i visokofrekventnog transformatora, čime se mogu postići značajna smanjenja gabarita u odnosu na klasičnu izvedbu transformatora. Ovakvi uređaji imaju dodatni niz mogućnosti, kao što su regulacija napona i tokova snaga, te mogućnost prihvata istosmjernog napona, no potrebno je dodatni tehnološko unaprjeđenje kako bi postali prava alternativa klasičnim transformatorima. [22]

3.3.3 Pregled mjera smanjenja gubitaka u transformatorima

Nekoliko ustaljenih inženjerskih pristupa smanjenju gubitaka u transformatorima odnosno povećanju energetske učinkovitosti transformatora prikazuje tablica 7.

Tablica 7 - Općenite mjere za smanjenje gubitaka distributivnih transformatora [21]

Opis mjere za smanjenje gubitaka		Gubici praznog hoda	Gubici tereta	Utjecaj na cijenu
Smanjenje gubitaka u jezgri	Izgradnja jezgre od materijala manjih gubitaka	Niži	Bez promjene	Viša
	Smanjenje gustoće toka povećanjem presjeka jezgre	Niži	Viši	Viša
	Smanjenje gustoće toka smanjivanjem napona po zavoju	Niži	Viši	Niža
	Smanjenje duljine toka smanjivanjem poprečnog presjeka namota	Niži	Viši	Viša
Smanjenje gubitaka u namotima	Upotreba materijala s manjim gubicima	Bez promjene	Niži	Viša
	Smanjenje gustoće struje povećanjem presjeka vodiča	Viši	Niži	Viša
	Smanjenje duljine strujnog puta smanjivanjem poprečnog presjeka jezgre	Viši	Niži	Niža
	Smanjenje duljine strujnog puta povećanjem napona po zavoju	Viši	Niži	Niža

Iz prikazanog može se vidjeti kako gubici u jezgri i gubici u namotima nisu neovisni jedni o drugima, već mjere za smanjivanje jednih utječu na povećanje drugih. Proizvodnja energetski učinkovitih transformatora se dakle svodi na upotrebu kompromisnih pristupa, ovisno o veličini i namjeni konkretne transformatorske jedinice.

4 Analiza smanjenja gubitaka

Osnovni podatak za određivanje učinkovitosti energetskih transformatora je profil odnosno dijagram opterećenja transformatora, što je zapravo prikaz opterećenja transformatora u funkciji vremena. Najčešće se profil opterećenja svodi na period od jednog dana (24 sata) pa se koristi naziv „dnevni dijagram opterećenja“, no za proračune koriste se još i tjedni, mjesečni i sezonski dijagrami. Na primjer, u distribucijskoj elektroenergetskoj mreži bitno je poznavati dijagram opterećenja pojedinog dijela mreže radi ispravnog dimenzioniranja opreme i postizanja što veće učinkovitosti i pouzdanosti napajanja električnom energijom.

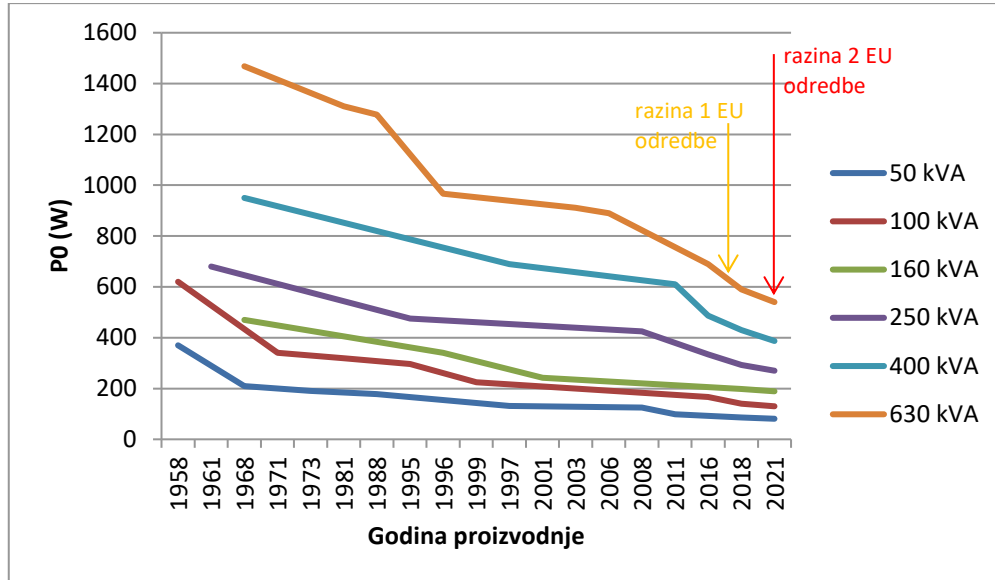
Distributivni energetski transformatori uglavnom se dimenzioniraju prema očekivanom vršnom opterećenju, a ne prema prosječnom. Razlog tomu je to što se u prosječnom dijagramu opterećenja transformatora izmjenjuju periodi većih i manjih opterećenja, što omogućuje čak da transformator bude određeno vrijeme preopterećen sve dok postoji dovoljno vremena niskog opterećenja u kojem će se transformator hladiti. Na primjer, prosječno opterećenje distribucijskog transformatora u urbanim sredinama može iznositi oko 20 % njegove nazivne snage, ali transformator mora biti tako dimenzioniran da izdrži karakteristična jutarnja i večernja vršna opterećenja. Zbog velike razlike između iznosa vršnog opterećenja i opterećenja u ostatku karakterističnog perioda, prosječno opterećenje transformatora je relativno nisko u odnosu na nazivnu snagu, što s aspekta gubitaka znači da prevladavaju gubici u jezgri transformatora odnosno gubici praznog hoda. [21]

Na konkretnom primjeru flote transformatora distribucijskog područja HEP ODS Elektre Bjelovar nalazi se ukupno 798 ugrađenih energetskih transformatora 10(20)/0,4 kV. S obzirom na to da, osim nekoliko urbanih zona i industrijskih potrošača, distribucijsko područje obuhvaća velik dio ruralnog područja koje karakterizira relativno mala potrošnja, ne čudi podatak da prosječno opterećenje ugrađenih energetskih transformatora iznosi oko 19 % u odnosu na njihovu instaliranu snagu [23]. Kako je prikazano u poglavlju 4.2., najveća učinkovitost transformatora postiže se kad su gubici tereta jednaki gubicima praznog hoda, odnosno kad je omjer $P_k/P_0 = 1$. U promatranom distribucijskom području, u pogonu transformatora ovaj omjer u prosjeku iznosi $P_k/P_0 = 0,39$, što znači da u strukturi gubitaka dominiraju gubici praznog hoda. Od spomenutih 798 transformatora, tek na njih 8 % (64 transformatora) gubici tereta veći su od gubitaka praznog hoda, što potvrđuje karakteristiku pogona što se tiče podopterećenosti transformatora.

4.1 Usporedba smanjenja gubitaka radi ugradnje energetski učinkovitih transformatora

U poglavlju 3.2.1. prikazani su propisani zahtjevi na energetsku učinkovitost transformatora prema uredbi EU 548/2014. U prvoj razini uredbe naglasak je bio na smanjenje gubitaka praznog hoda transformatora, s obzirom da su ovi gubici dominantni u pretežno neopterećenim transformatorima. Trend smanjenja gubitaka

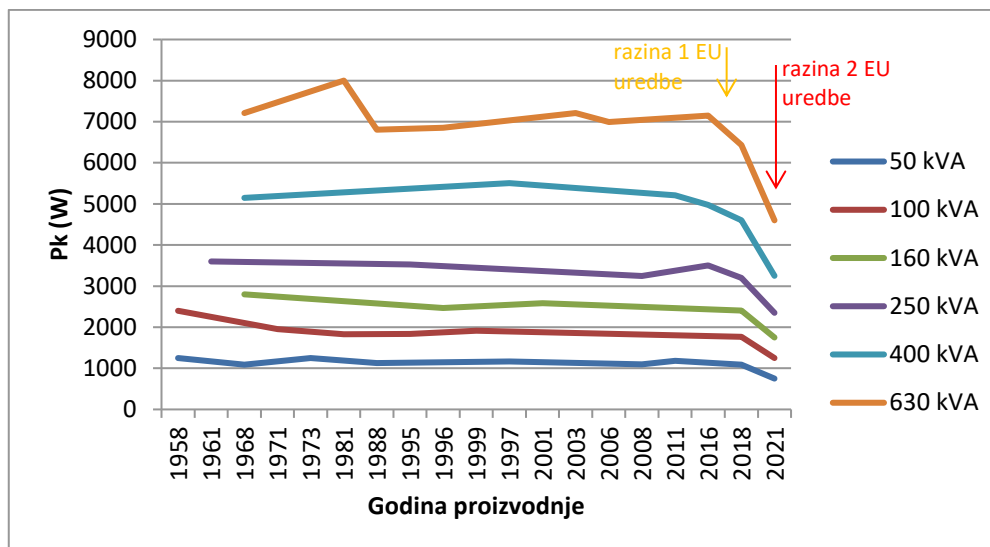
praznog hoda postojao je i prije navedene zakonske regulative, a prikazuje ga slika 4-1 gdje je prikazan pad gubitaka P_0 za pojedine snage distributivnih energetskih transformatora ovisno o godini proizvodnje u floti transformatora distribucijskog područja HEP Elektro Bjelovar.



Slika 4-1 - Trend promjene gubitaka praznog hoda transformatora

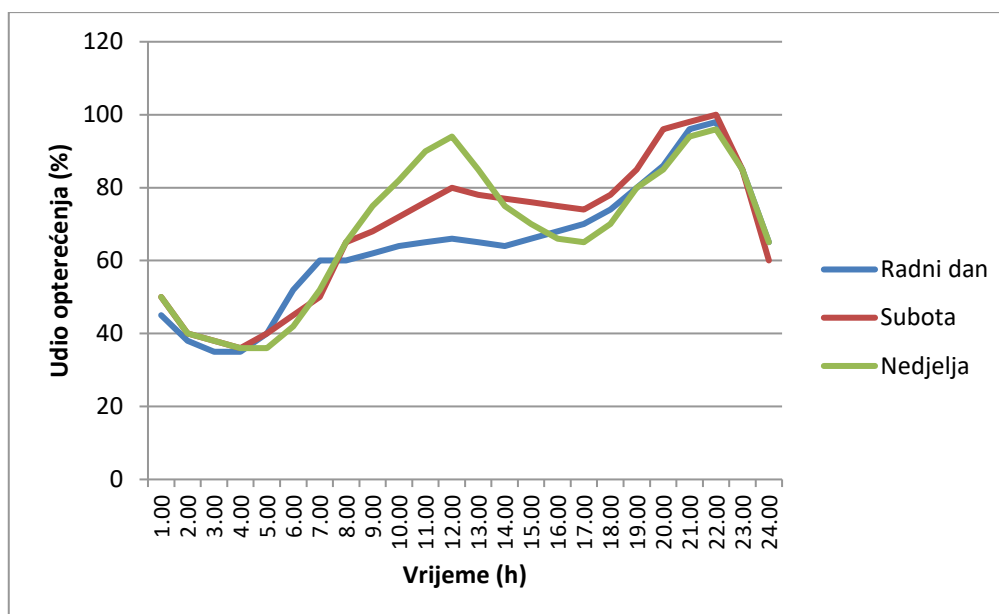
Gubici praznog hoda smanjivali su s pojavom kvalitetnijih i tanjih materijala za izradu transformatorske jezgre, a dodatni trend smanjenja gubitaka može se vidjeti na transformatorima koji su godišta 2018. i mlađi, odnosno koji su proizvedeni sukladno smjernicama uredbe EU 548/2014 čija je razina 1 na snagu stupila 2017. godine. Već prema samim krivuljama vidljivo je da će se ugradnjom transformatora novijeg datuma proizvodnje u velikoj mjeri utjecati na smanjenje gubitaka.

S druge strane, slika 4-2 prikazuje da se gubici tereta nisu bitno mijenjali tijekom godina, sve do 2021. godine kada na snagu stupa razina 2 uredbe EU 548/2014 kojom je propisana najveća dozvoljena razina gubitaka tereta klase A_k . Kako je spomenuto u poglavlju 3.3.2, razlog tomu je što se smanjenje gubitaka tereta, zasad postiže isključivo upotrebom bakrenih vodiča i povećanjem presjeka vodiča u namotima transformatora, što znatno utječe na količinu utrošenog materijala, povećava dimenzije a samim time i konačnu cijenu transformatora.



Slika 4-2 - Trend promjene gubitaka tereta distributivnih transformatora

Kako bi se napravila analiza isplativosti ugradnje energetski učinkovitih transformatora umjesto postojećih klasičnih, potrebno je poznavati dijagram opterećenja transformatora te osnovne tehno-ekonomske karakteristike. U primjerima na kojima je rađena usporedba korišteni su podaci o transformatorima iz flote distribucijskog područja HEP ODS Elektre Bjelovar uz karakteristične dijagrame opterećenja izrađene prema profilu potrošnje na tom distribucijskom području koji su prikazani u postotnom odnosu prema maksimalnom zabilježenom opterećenju u pojedinoj transformatorskoj stanici 10(20)/0,4 kV [24]. Za karakteristični dan ukupni gubici su dobiveni na način da su zbrojeni gubici izračunati za svaki sat u jednom danu, na temelju opterećenja dobivenog iz nadomjesne krivulje. Slika 4-3 prikazuje nadomjesnu krivulju opterećenja za kategoriju kućanstvo, koja će biti korištena u daljnjim analizama smanjenja gubitaka.



Slika 4-3 - Nadomjesna krivulja opterećenja za kategoriju kućanstvo [24]

4.1.1 Primjer – zamjena transformatora 100 kVA

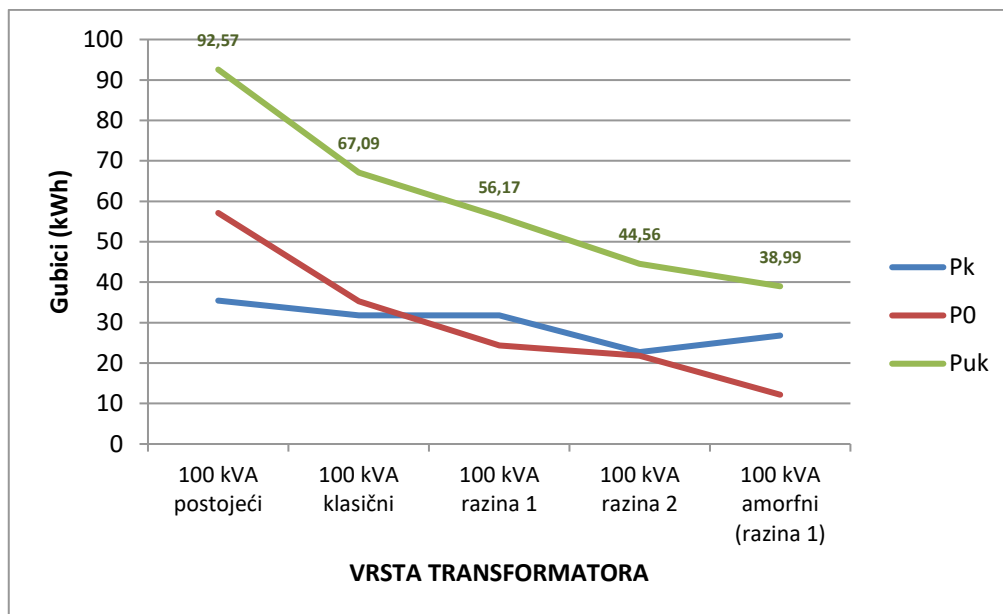
U transformatorskoj stanici ugrađen je klasični transformator snage 100 kVA. Transformator je proizveden 1982. godine, a nazivni gubici praznog hoda iznose 340 W, dok nazivni gubici opterećenja iznose 1950 W. Vršna vrijednost zabilježene potrošnje u transformatorskoj stanici iznosi 48,6 kW. Kad se u obzir uzme prosječni faktor snage od $\cos\varphi = 0,95$, nakon čega se opterećenje uvrsti u nadomjesnu krivulju, dobije se da je transformator u prosjeku opterećen s 31,15 % nazivne snage, odnosno 31,15 kVA.

Za modeliranje smanjenja gubitaka, bit će razmatrani slučajevi zamjene postojećeg transformatora novim klasičnim odnosno izvedbama energetskih učinkovitih transformatora prema razini 1 i 2 uredbe EU 548/2014. S obzirom na to da se u trenutku pisanja ovog rada u Europskoj Uniji više ne mogu kupovati i ugrađivati klasični transformatori, njihovi podaci koriste se kao informativni. Podaci o uspoređivanim transformatorima prikazuje tablica 8. Cijene predmetnih transformatora uzete su prema trenutno dostupnim informacijama na domaćem tržištu, osim za amorfnu izvedbu transformatora čija je informativna cijena korištena iz literature [2]. Potrebno je napomenuti kako su podaci za amorfnu transformator stari nekoliko godina te se ne mogu uzeti sa velikom pouzdanošću, što samim time znači da je upitna usporedivost rezultata dobivenih za amorfne transformatore s onima za ostale izvedbe transformatora iz primjera. S obzirom na potencijal koji predstavljaju na području smanjenja gubitaka, amorfni transformatori spomenuti su u daljnjim primjerima u radu, ali ih treba uzeti samo informativno.

Tablica 8 - Parametri transformatora 100 kVA za usporedbu

Parametri	Klasični transformator	Energetski učinkoviti transformator (razina 1)	Energetski učinkoviti transformator (razina 2)	Amorfni transformator (razina 1)
Snaga	100 kVA	100 kVA	100 kVA	100 kVA
Grupa spoja	Yzn5	Yzn5	Yzn5	Yzn5
Prijenosni omjer	20(10)/0,42 kV	20(10)/0,42 kV	20(10)/0,42 kV	20(10)/0,42 kV
Gubici praznog hoda, P_0	210 W (klasa C ₀)	145 W (klasa A ₀)	130 W (klasa AA ₀)	72,5 W (klasa AAA ₀)
Gubici opterećenja, P_k	1750 W (klasa C _k)	1750 W (klasa C _k)	1250 W (klasa A _k)	1475 W (klasa B _k)
Napon kratkog spoja, u_k	4%	4%	4%	4%
Nabavna cijena, C_i	30.500,00 kn	32.545,00 kn	45.500,00 kn	44.100,00 kn

Primjenom podataka o gubicima na nadomjesnu krivulju opterećenja dobije se razina gubitaka praznog hoda odnosno gubitaka tereta na tjednoj razini. Nadomjesna krivulja koristi se na način da se maksimum krivulje izjednači s izmjerenim vršnim opterećenjem na predmetnoj lokaciji, nakon čega je moguće odrediti nadomjesna opterećenja transformatora po satima u danu. Sumiranjem podataka za karakteristične dane u tjednu dobiva se iznos tjednih gubitaka. Slika 4-4 prikazuje usporedbu razine tjednih gubitaka ovisno o izvedbi transformatora 100 kVA za promatrani slučaj.



Slika 4-4 - Usporedba razine tjednih gubitaka ovisno o izvedbi transformatora snage 100 kVA (podopterećeni transformator)

Iz prikazanih rezultata jednostavno se može zaključiti kako gubici padaju sa novijom tehnologijom izvedbe transformatora. Za amorfne transformatore gubici tereta su nešto veći od energetski učinkovitih transformatora, no zbog vrlo niskih gubitaka praznog hoda i relativno malog opterećenja transformatora oni ne dolaze do izražaja, te u sumi gubitaka ova izvedba ima najmanje ukupne gubitke.

U odnosu na referentni slučaj postojećeg transformatora, ugradnjom bilo koje od predloženih izvedbi novih transformatora smanjuju se ukupni gubici, i to kako slijedi:

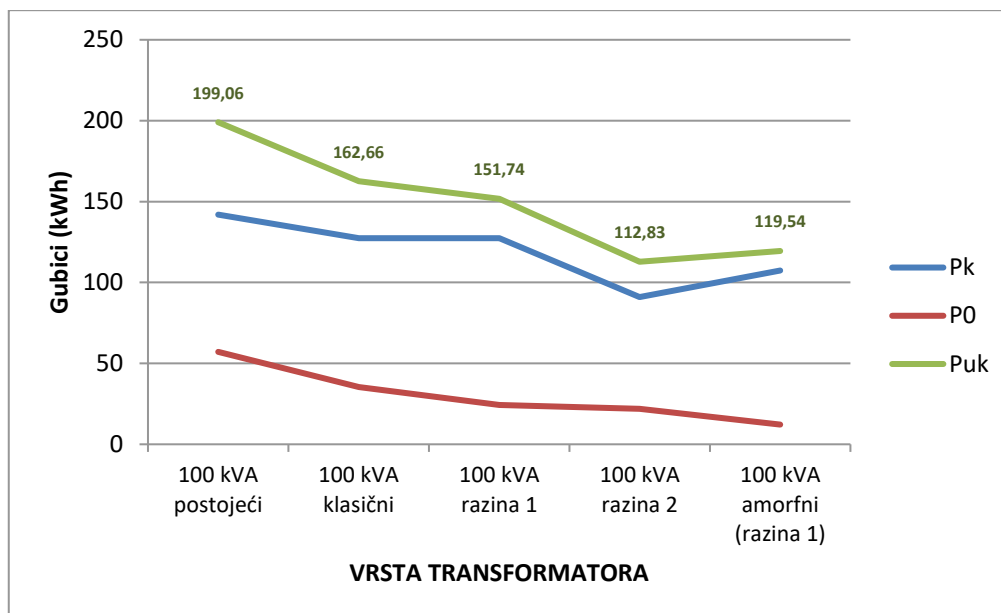
- 27,5 % za slučaj zamjene klasičnim transformatorom
- 39,3 % za slučaj zamjene energetski učinkovitim transformatorom (razina 1)
- 51,9 % za slučaj zamjene energetski učinkovitim transformatorom (razina 2)
- 57,9 % za slučaj zamjene amorfnim transformatorom (razine 1)

Energetski distributivni transformatori su u pravilu podopterećeni, no radi usporedbe moguće je promatrati razne slučajeve relativnih opterećenja kako bi se dobila usporedba promjene gubitaka ovisno o tipu odnosno izvedbi transformatora, gledano s aspekta energetske učinkovitosti.

Za konkretni primjer transformatora snage 100 kVA iz ovog poglavlja, razmotren je i slučaj u kojem je vršno opterećenje dvostruko veće, odnosno iznosi 97,2 kW. Usporedba tjednih gubitaka izračunatih prema nadomjesnoj krivulji opterećenja za ovaj slučaj prikazuje slika 4-5. Za razliku od prethodnog slučaja, može se primijetiti kako kod većeg opterećenja do izražaja više dolaze gubici tereta te se gubici smanjuju ovisno o izvedbama transformatora kako slijedi:

- 18,3 % za slučaj zamjene klasičnim transformatorom

- 23,8 % za slučaj zamjene energetski učinkovitim transformatorom (razina 1)
- 43,3 % za slučaj zamjene energetski učinkovitim transformatorom (razina 2)
- 39,9 % za slučaj zamjene amorfnim transformatorom (razine 1)



Slika 4-5 - Usporedba razine tjednih gubitaka ovisno o izvedbi transformatora snage 100 kVA (opterećeni transformator)

Za konačnu ocjenu isplativosti ugradnje pojedinog transformatora, potrebno je napraviti izračun kapitalizacije troškova transformatora koji u obzir uzima ekonomske faktore, a za pojedine slučajeve je prikazan u poglavlju 4.3.

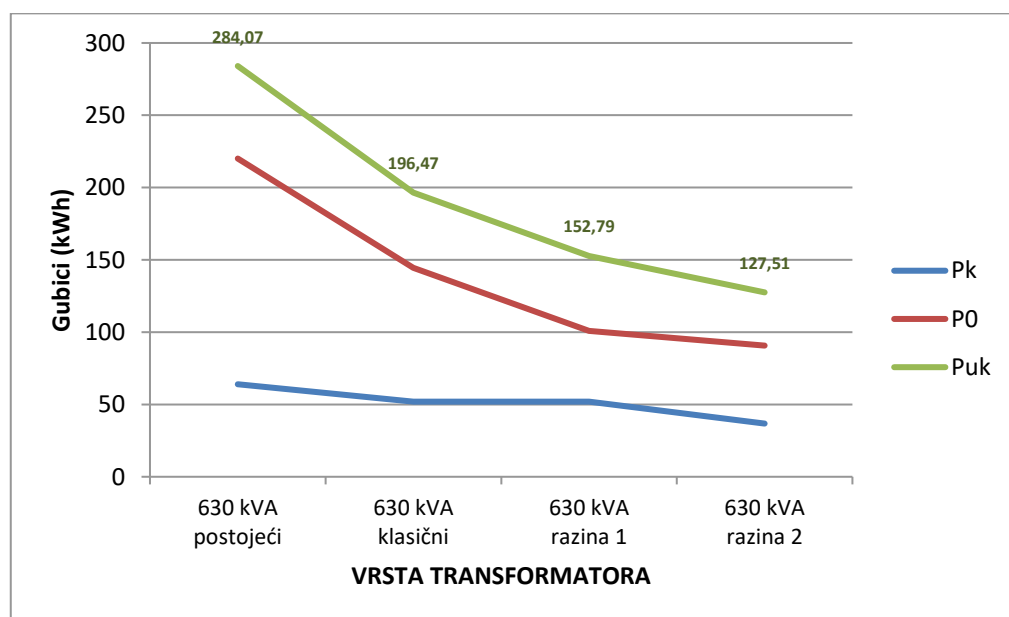
4.1.2 Primjer – zamjena transformatora 630 kVA

Transformatorske stanice u urbanim sredinama imaju veća specifična opterećenja, što ujedno znači da su tamo instalirani transformatori većih snaga. Na distribucijskom području HEP ODS Elektre Bjelovar u takvim sredinama ugrađeni su uglavnom transformatori snage do 630 kVA, te će jedan takav slučaj biti iskorišten za izradu usporedbe zamjene transformatora različitih razina gubitaka. Tablica 9 prikazuje usporedive parametre transformatora snage 630 kVA. U ovom primjeru neće biti razmatran transformator s amorfnom jezgrom zbog ograničenja u izvedbi za ovakve snage.

Tablica 9 – Parametri transformatora 630 kVA za usporedbu

Parametri	Klasični transformator	Energetski učinkoviti transformator (razina 1)	Energetski učinkoviti transformator (razina 2)
Snaga	630 kVA	630 kVA	630 kVA
Grupa spoja	Dyn5	Dyn5	Dyn5
Prijenosni omjer	20(10)/0,42 kV	20(10)/0,42 kV	20(10)/0,42 kV
Gubici praznog hoda, P_0	860 W (klasa C_0)	600 W (klasa A_0)	540 W (klasa AA_0)
Gubici opterećenja, P_k	6500 W (klasa C_k)	6500 W (klasa C_k)	4600 W (klasa A_k)
Napon kratkog spoja, u_k	4%	4%	4%
Nabavna cijena, C_i	70.990,00 kn	76.020,00 kn	105.000,00 kn

U specifičnom slučaju promatra se ugrađeni transformator snage 630 kVA, godine proizvodnje 1978. S obzirom na to da se radi o starijem transformatoru, razine gubitaka praznog hoda iznose 1310 W, dok nazivni su gubici tereta 8000 W. Vršno opterećenje zabilježeno u predmetnoj transformatorskoj stanici iznosi 203,06 kW.



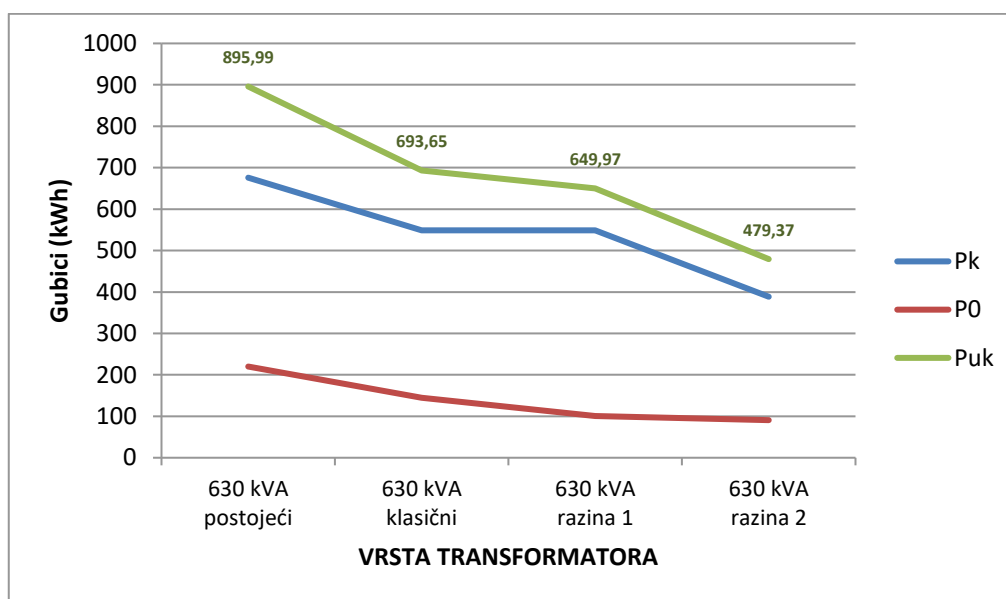
Slika 4-6 - Usporedba razine tjednih gubitaka po izvedbama za neopterećeni transformator snage 630 kVA

Nakon provedenog proračuna u kojem je korištena nadomjesna krivulja opterećenja odnosno gdje su tereti raspoređeni po satima u jednom danu, dobiveni su rezultati koje prikazuje slika 4-6. Relativni odnosi smanjenja gubitaka naspram slučaja postojećeg transformatora su sljedeći:

- 30,8 % za slučaj zamjene klasičnim transformatorom

- 46,2 % za slučaj zamjene energetski učinkovitim transformatorom (razina 1)
- 55,1 % za slučaj zamjene energetski učinkovitim transformatorom (razina 2)

Kako gubici tereta rastu s kvadratom struje pa time i kvadratom relativnog opterećenja transformatora, potrebno je razmotriti raspodjelu gubitaka u slučaju više opterećenog transformatora kod kojeg će gubici tereta biti izraženiji. Zbog lakše usporedbe, za takav slučaj iskoristit će se podaci transformatora 630 kVA iz gornjeg primjera, no koji se nalazi u području gdje je zabilježeno vršno opterećenje 660 kW. Razine gubitaka za ovaj slučaj prikazuje slika 4-7.



Slika 4-7 - Usporedba razine tjednih gubitaka po izvedbama za opterećeni transformator 630 kVA

S obzirom na to da su gubici tereta očekivano porasli, promijenili su se i ukupni gubici pojedinih izvedbi transformatora, a njihovo smanjenje u usporedbi s postojećim transformatorom sada iznosi:

- 22,6 % za slučaj zamjene klasičnim transformatorom
- 27,5 % za slučaj zamjene energetski učinkovitim transformatorom (razina 1)
- 46,5 % za slučaj zamjene energetski učinkovitim transformatorom (razina 2)

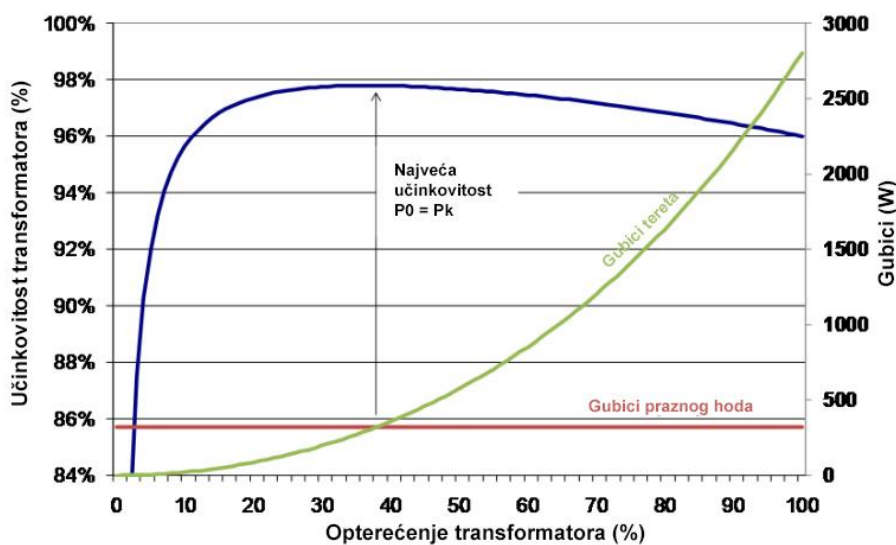
Mala razlika u smanjenju gubitaka između klasičnog i energetski učinkovitog transformatora proizvedenog po razini 1 uredbe EU 548/2014 posljedica je vrlo izraženih gubitaka tereta koji su gotovo jednaki za oba transformatora, odnosno razlika nastaje samo zbog manjih gubitaka praznog hoda koji su za prikazano opterećenje 4-5 puta manji od gubitaka tereta. Tek se s transformatorom proizvedenim po smjernicama razine 2 gubici osjetno smanjuju i to za 46,5 % u odnosu na slučaj postojećeg transformatora.

4.2 Usporedba smanjenja gubitaka optimiziranjem instalirane snage transformatora

Najveća učinkovitost transformatora je kod opterećenja u kojem su gubici tereta jednaki gubicima praznog hoda ($P_k = P_0$), odnosno za snagu koja se izračunava prema sljedećoj formuli [6]:

$$S_{\eta_{max}} = S_n \sqrt{\frac{P_0}{P_{kn}}}$$

gdje S_n označava nazivnu snagu transformatora, P_{kn} nazivne gubitke tereta (gubitke pri 100% opterećenja), a P_0 gubitke praznog hoda. Slika 4-8 prikazuje ovisnost učinkovitosti transformatora o opterećenju.

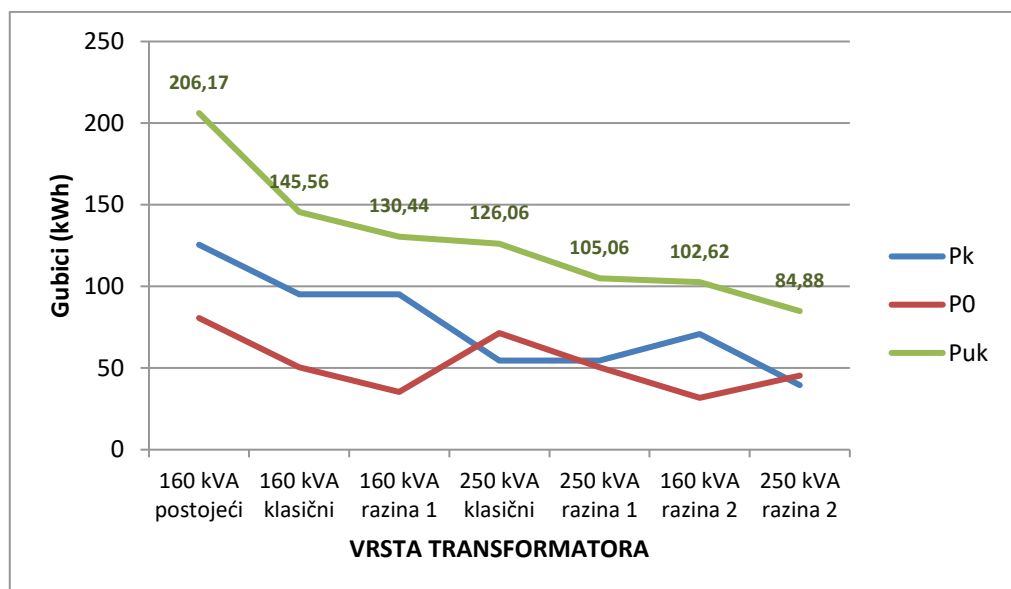


Slika 4-8 - Ovisnost učinkovitosti transformatora o opterećenju [21]

Ovisno o karakteristikama transformatora, maksimalna učinkovitost postiže se kad je transformator opterećen između 20 % i 40 % svoje nazivne snage. Kako opterećenje raste, do izražaja sve više dolaze gubici tereta koji rastu s kvadratom struje, odnosno kvadratom relativnog opterećenja, što je prikazano zelenom krivuljom koju prikazuje slika 4-8. Iz toga slijedi da se kod većih relativnih opterećenja, veća učinkovitost odnosno smanjenje gubitaka može postići ugradnjom transformatorske jedinice veće snage, kao što je prikazano u nastavku.

4.2.1 Primjer – transformator 160 kVA

U slučaju transformatorske stanice s instaliranom snagom od 160 kVA, vršno opterećenje iznosi 116 kW, odnosno transformator je u prosjeku opterećen s 45 % nazivne snage.



Slika 4-9 - Gubici po vrstama transformatora za opterećenje 116 kW

Analizom rezultata dobivenih proračunom koje prikazuje slika 4-9 moguće je zaključiti kako za smanjenje gubitaka u konkretnom slučaju nije potrebno nabavljati novi energetske učinkoviti transformator, već je dovoljno napraviti zamjenu s raspoloživim transformatorom veće snage (250 kVA) iz flote transformatora čime će se ukupni gubici smanjiti za 39 % u odnosu na postojeći ugrađeni transformator starije izvedbe snage 160 kVA. Ako u floti transformatora postoji raspoloživi transformator snage 250 kVA razine 1, njegovom ugradnjom gubici će se smanjiti za 49 %.

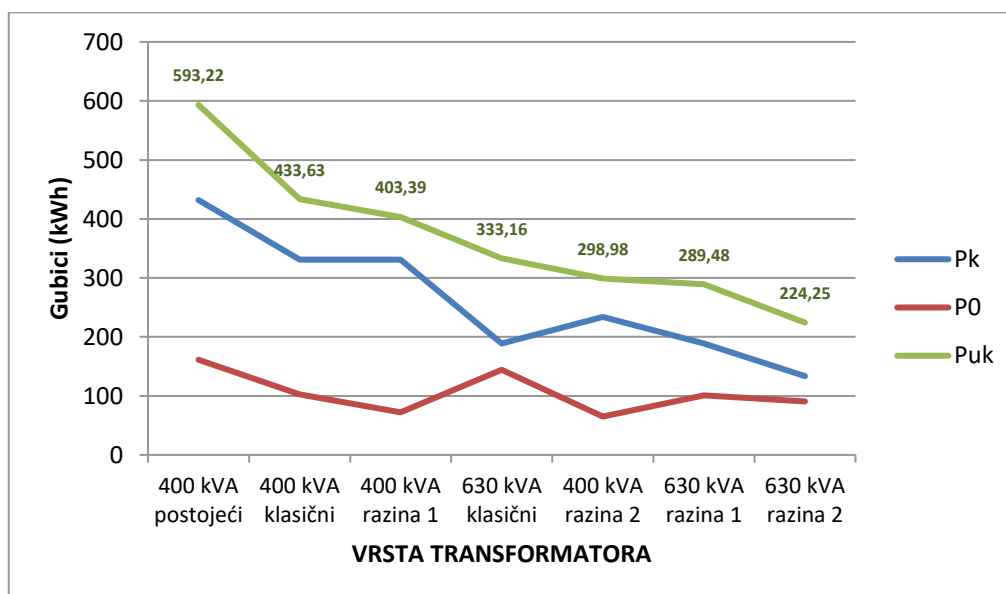
Tablica 10 - Podaci transformatora 160 kVA i 250 kVA korišteni za izračun gubitaka

	Klasični transformator 160 kVA	Energetski učinkoviti transformator 160 kVA (razina 1)	Energetski učinkoviti transformator 160 kVA (razina 2)	Klasični transformator 250 kVA	Energetski učinkoviti transformator 250 kVA (razina 1)	Energetski učinkoviti transformator 250 kVA (razina 2)
Nazivni gubici praznog hoda, PO	300 W	210 W	189 W	425 W	300 W	270 W
Nazivni gubici kratkog spoja, Pk	2350 W	2350 W	1750 W	3250 W	3250 W	2350 W

Dodatno, smanjenje gubitaka ugradnjom klasičnog transformatora veće snage je veće od slučaja ugradnje novog energetske učinkovitog transformatora snage 160 kVA proizvedenog prema smjernicama razine 1 uredbe EU 548/2014. Gledano isključivo sa perspektive smanjenja gubitaka, najpovoljniji slučaj je ugradnja novog transformatora snage 250 kVA koji je sukladan smjernicama razine 2 spomenute uredbe EU.

4.2.2 Primjer – transformator 400 kVA

Pretpostavimo da se transformator snage 400 kVA nalazi u transformatorskoj stanici čije je vršno opterećenje nešto niže od nazivne snage i iznosi 387 kW.



Slika 4-10 - Gubici po vrstama transformatora za opterećenje 387 kW

Slika 4-10 prikazuje razinu gubitaka za navedeni slučaj, ovisno o vrsti ugrađenog transformatora. U razmatranje je ubrojen i slučaj zamjene postojećim klasičnim transformatorom veće snage (630 kVA) jer se može pretpostaviti da zbog životnog vijeka od 40 godina transformator bude prisutan u floti transformatora distribucijskog područja, a prema rezultatima proračuna, njegova ugradnja bit će povoljnija na smanjenje gubitaka od ugradnje energetski učinkovitog transformatora manje snage proizvedenog po smjernicama razine 1 uredbe EU 548/2014. Isto vrijedi i za transformator snage 630 kVA proizveden po smjernicama razine 1 uredbe EU 548/2014 koji se nakon 1.7.2021. više neće moći kupiti na tržištu EU, no moguće je da bude prisutan u floti transformatora, a svojim karakteristikama predstavlja bolju opciju za ugradnju u usporedbi s novim transformatorom snage 400 kVA proizvedenim po razini 2 uredbe EU 548/2014. Ovo vrijedi u slučaju promatranog opterećenja za koje je pretpostavljeno da se neće bitno mijenjati. S obzirom da postoji mogućnost porasta konzuma, potrebno je raditi periodička mjerenja opterećenja i ponovo analizirati podatke, što je detaljnije objašnjeno u poglavlju 5. Sam trošak zamjene distribucijskih transformatora nije uzet u obzir jer je to rutinska radnja unutar poslova pojedinog distribucijskog područja, odnosno predstavlja zanemariv utjecaj na izračun isplativosti.

4.3 Tehno-ekonomska usporedba isplativosti ugradnje novih transformatora

Nakon određivanja razine gubitaka, potrebno je napraviti izračun isplativosti ugradnje pojedinog tipa transformatora za gore opisane slučajeve. Za tu namjenu potrebno je poznavati određene tehno-ekonomske parametre, kao što su cijena transformatora, trošak gubitaka u praznom hodu, trošak gubitaka pod opterećenjem, troškovi održavanja, životni vijek transformatora, cijena električne energije, cijena CO₂ i vrijednost novca. [2]

4.3.1 Kapitalizacija troška transformatora

Stvarna cijena transformatora za kupca odnosno ukupni trošak posjedovanja transformatora tijekom njegovog životnog vijeka (TCO, eng. total cost of ownership) računa se kao zbroj inicijalnog troška kupovine transformatora, kapitaliziranih troškova gubitaka, te ostalih kapitaliziranih troškova, kao što su troškovi održavanja i emisije CO₂. [25]

Kapitalizirana cijena transformatora znači da se u obzir uzima početna nabavna cijena kojoj se pridodaju troškovi gubitaka i održavanja transformatora za vrijeme njegovog životnog vijeka. Za to je potrebno procijeniti ukupne troškove gubitaka tijekom životnog vijeka (ukupni trošak posjedovanja) koje se potom preračunavaju u neto sadašnju vrijednost i dodaju početnoj cijeni transformatora. Radi pojednostavljenja, ostali kapitalizirani troškovi se zanemaruju jer su dovoljno niski, pa se trošak posjedovanja transformatora računa prema sljedećoj formuli [8]:

$$TCO = C_i + A \cdot P_0 + B \cdot P_k$$

gdje je:

- C_i inicijalna nabavna cijena transformatora (kn)
- A kapitalizacijski faktor za gubitke u praznom hodu (kn/kW)
- P_0 gubici praznog hoda (kW)
- B kapitalizacijski faktor za gubitke tereta (kn/kW)
- P_k gubici tereta (kW)

Faktore A i B određuje svaki pojedini kupac ovisno o prilikama na lokaciji ugradnje odnosno području gdje će se transformator nalaziti, a ovise o cijeni električne energije, broju razmatranih godina životnog vijeka transformatora, stopi inflacije te opterećenju transformatora.

Pojednostavljeno se može reći da faktor A služi kako bi se procijenila trenutna vrijednost kapitalnog troška u određenoj točki u vremenu, odnosno da se pomoću njega određuje koliko vrijedi jedinična mjera gubitaka u praznom hodu (1 watt) tijekom životnog vijeka transformatora u današnjem trenutku. [2]

$$A = 8760 \cdot C_{n/2} \cdot \left(\frac{(1+i)^n - 1}{i \cdot (1+i)^n} \right)$$

gdje je:

- $C_{n/2}$ - valorizacija gubitaka električne energije u jednoj godini na sredini životnog vijeka transformatora (prosječna vrijednost) [kn/kWh]
- i - fiksna kamatna stopa tijekom cijelog životnog vijeka transformatora
- n – životni vijek transformatora u godinama

Faktor B može se opisati kao vrijednost ukupnih gubitaka tereta transformatora koji su akumulirani kroz njegov cijeli životni vijek, svedenih na današnju vrijednost. [2]

$$B = C_{n/2} \cdot 8760 \cdot \left(\frac{I_t}{I_n}\right)^2 \left(\frac{(1+i)^n - 1}{i \cdot (1+i)^n}\right)$$

gdje je:

- $C_{n/2}$ - valorizacija gubitaka električne energije u jednoj godini na sredini životnog vijeka transformatora (prosječna vrijednost) [kn/kWh]
- I_t – prosječna struja opterećenja [A]
- I_n – nazivna struja opterećenja [A]
- i - fiksna kamatna stopa tijekom cijelog životnog vijeka transformatora
- n – životni vijek transformatora u godinama

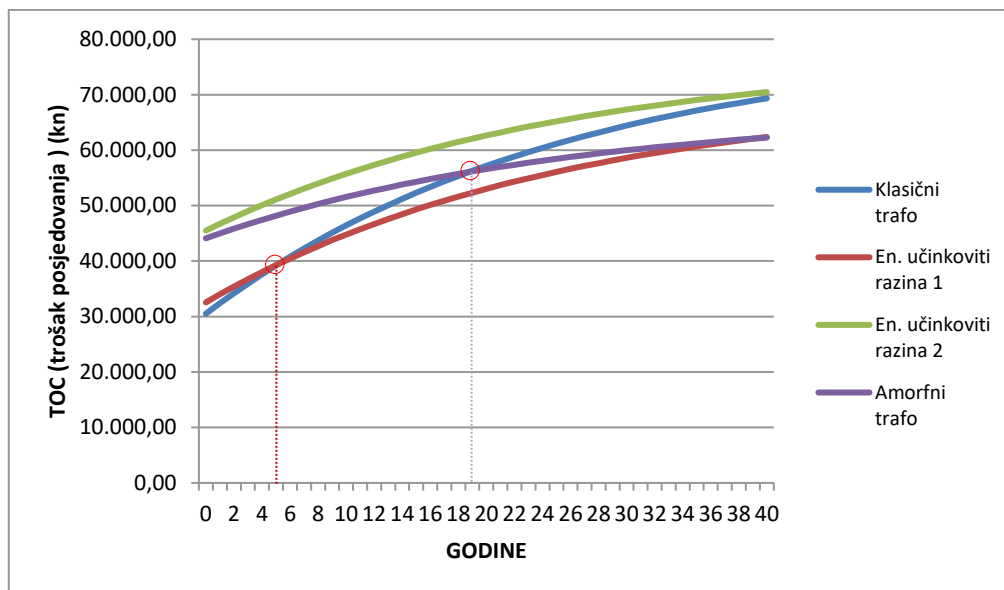
Za potrebne proračuna pretpostavit će se životni vijek od 40 godina za sve promatrane transformatore. Za ostvarivanje relativnih odnosa, nužno je uspoređivati transformatore jednakih snaga. U poglavlju 4.2. prikazan je utjecaj relativnog opterećenja transformatora na promjenu gubitaka, pa će se proračun izvršiti za različite diskretne vrijednosti opterećenja između 20 % i 80 % u odnosu na instaliranu snagu transformatora. Cijena električne energije za potrebe proračuna postavljena je na 0,8 kn/kWh.

U proračunima koji su napravljeni u ovom radu faktor A ovisi o godinama i iznosi između 0 i 138.707,8 (za period od 40 godina). Faktor B dodatno ovisi o i relativnom opterećenju transformatora, a njegova vrijednost se u proračunima kretala između 0 i 5.548,31 (za opterećenje od 20% i period 40 godina) odnosno do 88.772,97 (za opterećenje od 80% i period 40 godina).

4.3.2 Slabo opterećeni transformator 100 kVA

Za proračun isplativosti zamjene slabo opterećenog transformatora snage 100 kVA iskoristit će se podaci navedeni u poglavlju 4.1.1. Usporedit će se različite izvedbe transformatora koje prikazuje tablica 8, uz prosječno opterećenje transformatora od 20 %.

Simulaciju kapitalizacije troškova gubitaka za transformatore prema gorenavedenim podacima prikazuje slika 4-11.



Slika 4-11 - Usporedba isplativosti zamjene podopterećenog transformatora 100 kVA

U usporedbi s klasičnim transformatorom, ugradnja energetski učinkovitog transformatora proizvedenog po smjernicama razine 1 uredbe EU 548/2014 isplatiće se već nakon 5 godina, ponajviše zbog smanjenih gubitaka praznog hoda. Iako energetski transformator razine 2 ima dodatno smanjene gubitke, zbog značajno više inicijalne cijene (35 % - 40 % veće od transformatora proizvedenih po smjernicama razine 1), njegova ugradnja za promatrani slučaj u periodu od 40 godina ne može se ekonomski opravdati, odnosno na kraju životnog vijeka njegov trošak posjedovanja bit će 2 % veći nego za slučaj klasičnog transformatora. Ugradnja amornog transformatora isplativa je nakon 18. godine korištenja za varijantu transformatora proizvedenog po smjernicama razine 1, dok je za pretpostaviti da će po zahtjevima razine 2 njegova cijena značajno porasti što će utjecati na rok isplativosti. Zanimljivo je primijetiti da je u ovom slučaju slabo opterećenog transformatora trošak posjedovanja na kraju pretpostavljenog životnog vijeka transformatora od 40 godina u sve tri opcije unutar granica od 10 %, s tim da je trošak posjedovanja energetski učinkovitog transformatora razine 1 gotovo jednak kao i za amorfni transformator.

Tablica 11 - Prikaz troška posjedovanja za slučaj slabo opterećenog transformatora 100 kVA

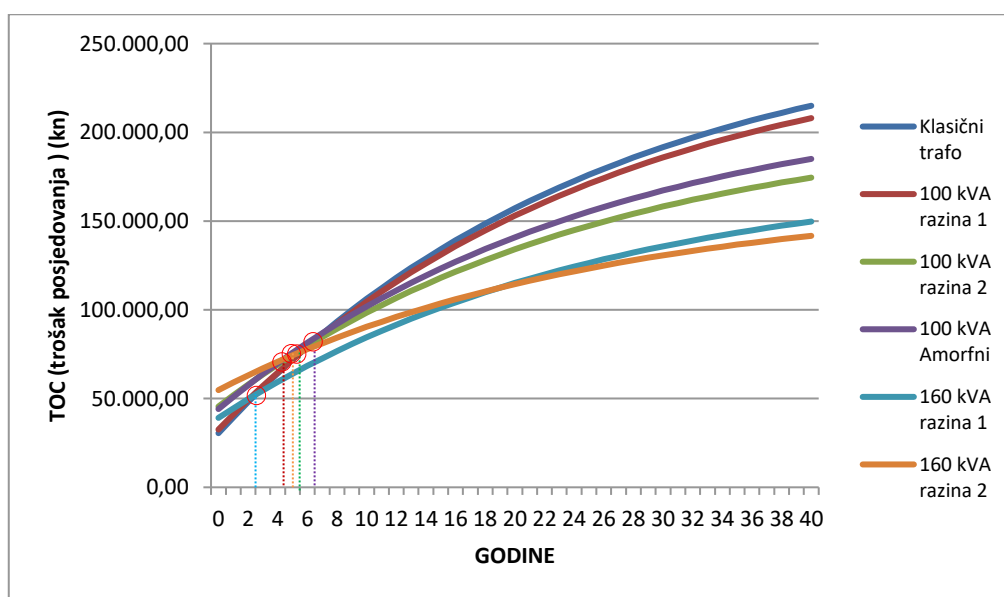
	Klasični transformator	Energetski učinkoviti transformator (razina 1)	Energetski učinkoviti transformator (razina 2)	Amorfni transformator (razina 1)
Inicijalna cijena	30.500,00 kn	32.545,00 kn	45.500,00 kn	44.100,00 kn
Trošak posjedovanja na kraju 40.-godišnjeg razdoblja	69.338,17 kn	62.367,17 kn	70.467,40 kn	62.270,72 kn
Razlika troška posjedovanja u odnosu na referentni slučaj	0 %	-10,05 %	1,63 %	-10,19 %

Dugoročno gledano, ugradnja energetski učinkovitog transformatora razine 1 i amorfnog transformatora iste razine podjednako su isplative i opravdane u odnosu na ugradnju klasičnog transformatora. No zbog malih snaga, niskog opterećenja i niske cijene distributivnih transformatora, relativna isplativost odnosno ušteda na kraju životnog vijeka iznosi oko 10 % ukupnog troška posjedovanja odnosno oko 7.000,00 kuna, kako prikazuje tablica 11.

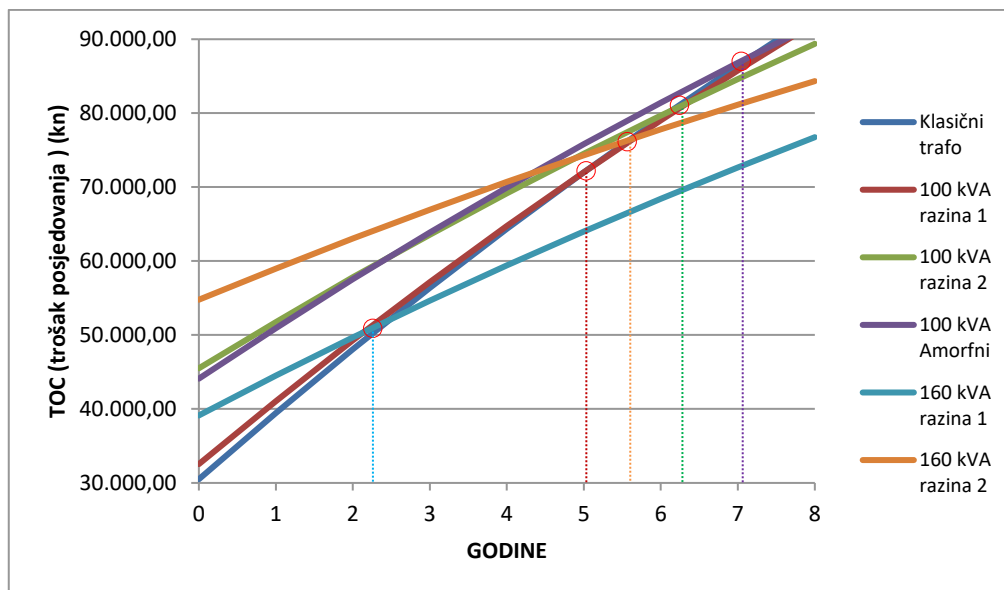
4.3.3 Transformator 100 kVA s opterećenjem blizu nazivnog

Za razliku od prošlog primjera, potrebno je promotriti trošak posjedovanja i u slučajevima transformatora opterećenih blizu nazivne snage. Za istu promatranu grupu transformatora snage 100 kVA uzet je slučaj prosječnog opterećenja od 76 kW, odnosno 80 kVA na samom transformatoru, kad se u obzir uzme faktor snage 0,95.

Usporedba troškova posjedovanja u 40-godišnjem razdoblju za transformatore u ovom slučaju prikazuje slika 4-12, dok slika 4-13 prikazuje uvećani detalj, odnosno uže područje u kojem se može jasnije vidjeti nakon kojeg razdoblja je koja izvedba transformatora jednako isplativa u usporedbi s klasičnim postojećim transformatorom.



Slika 4-12 - Trošak posjedovanja za slučaj opterećenog transformatora 100 kVA



Slika 4-13 - Trošak posjedovanja opterećenog transformatora 100 kVA (uvećano)

Kako je već opisano u prethodnim poglavljima, s većim relativnim opterećenjem očekivano su do izražaja došli gubici opterećenja u odnosu na gubitke praznog hoda. Zbog toga se trošak posjedovanja, odnosno rok isplativosti pojedinih vrsta transformatora razlikuje u odnosu na slučaj kada je promatran slabo opterećeni transformator, i to na način da je rok isplativosti značajno smanjen.

Tablica 12 - Prikaz troška posjedovanja za slučaj opterećenog transformatora 100 kVA

	Klasični transformator 100 kVA	Energetski učinkoviti transformator 100 kVA (razina 1)	Energetski učinkoviti transformator 100 kVA (razina 2)	Amorfni transformator 100 kVA (razina 1)	Energetski učinkoviti transformator 160 kVA (razina 1)	Energetski učinkoviti transformator 160 kVA (razina 2)
Inicijalna cijena	30.500,00 kn	32.545,00 kn	45.500,00 kn	44.100,00 kn	39.125,00 kn	54.775,00 kn
Trošak posjedovanja na kraju 40.- godišnjeg razdoblja	214.981,32 kn	208.010,32 kn	174.498,22 kn	185.027,08 kn	149.744,44 kn	141.675,41 kn
Razlika troška posjedovanja u odnosu na referentni slučaj	0 %	-3,24 %	-18,83 %	-13,93 %	-30,35 %	-34,10 %

Zbog velikog relativnog opterećenja transformatora u odnosi za nazivnu snagu, u ovom slučaju u usporedbi su uzeti i energetski transformatori nazivne snage za stupanj veće od promatranog, odnosno 160 kVA. Kako prikazuje tablica 12, trošak posjedovanja se značajnije smanjuje za sve promatranje varijante, u odnosu na slučaj slabo opterećenog transformatora. Ono što je bitno uočiti jest da se u ovakvom slučaju više isplati ugraditi transformator reda veličine veće snage, jer će se na taj način relativno opterećenje u odnosu na nazivnu snagu smanjiti s 0,8 na 0,5. Iznos gubitaka tereta mijenjaju se s kvadratom relativnog opterećenja pa će taj odnos u stvarnosti biti 0,64 naspram 0,25, odnosno transformator veće snage će,

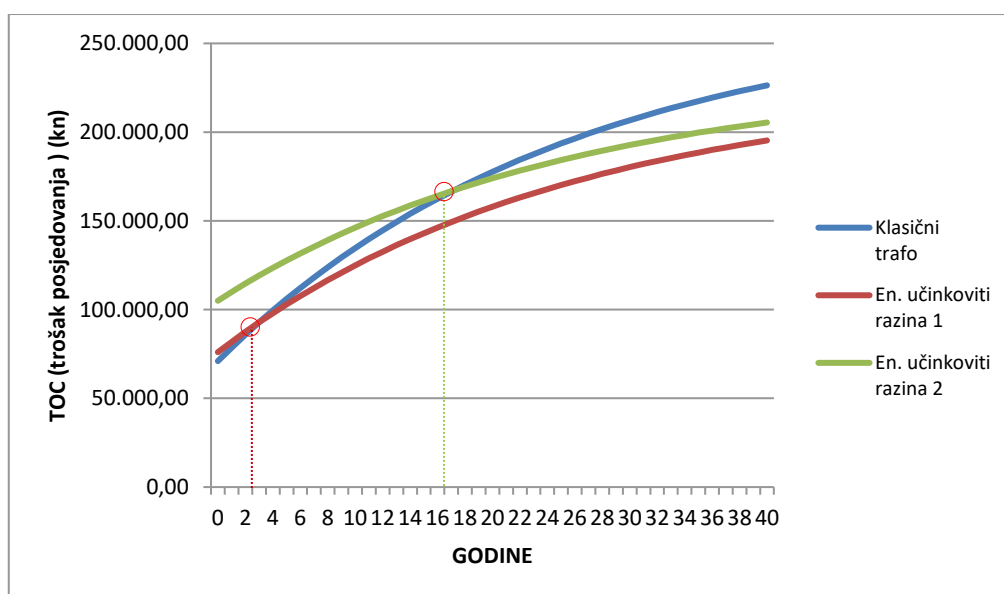
unatoč tome što ima veće nazivne gubitke tereta, stvarati manje gubitaka i na kraju biti isplativiji.

Sve promatrane varijante imaju relativno kratak rok isplativosti u odnosu na klasični transformator. Tako će se amorfni transformator isplatiti nakon 7 godina, energetski učinkoviti transformator 100 kVA razine 2 nakon 6 godina, energetski učinkoviti transformator 160 kVA razine 2 nakon 5,5 godina, a energetski učinkoviti transformator snage 160 kVA razine 1 nakon manje od 3 godine.

4.3.4 Slabo opterećeni transformator 630 kVA

Za proračun isplativosti zamjene slabo opterećenog transformatora snage 630 kVA iskoristit će se podaci navedeni u poglavlju 4.1.2, uz prosječno relativno opterećenje od 20% nazivne snage transformatora.

Slika 4-14 prikazuje usporedbu troška posjedovanja u promatranom periodu od 40 godina.



Slika 4-14 - Usporedba troška posjedovanja za slabo opterećeni transformator 630 kVA

U ovoj analizi nisu uključeni primjeri za transformatore u amorfnoj izvedbi s obzirom na to da njihove izvedbe imaju ograničenja ovisno o snazi, te u trenutku pisanja ovog rada nije bilo dostupnih podataka o tehno-ekonomskim karakteristikama amornih transformatora snage 630 kVA na domaćem tržištu.

Analizom rezultata usporedbe troška posjedovanja moguće je vidjeti da se ugradnja energetski učinkovitog transformatora proizvedenog po smjericama razine 1 isplati već za 3 godine, a nakon perioda od 40 godina trošak posjedovanja je manji za 13,71 % u odnosu na klasični transformator. Zbog veće inicijalne nabavne cijene i malog utjecaja gubitaka tereta, energetski učinkoviti transformator razine 2 isplativ je nakon 17 godina, dok će ukupna dobit na kraju životnog vijeka biti 9,24 % u odnosu na klasični transformator.

Tablica 13 - Prikaz troška posjedovanja za slučaj slabo opterećenog transformatora 630 kVA

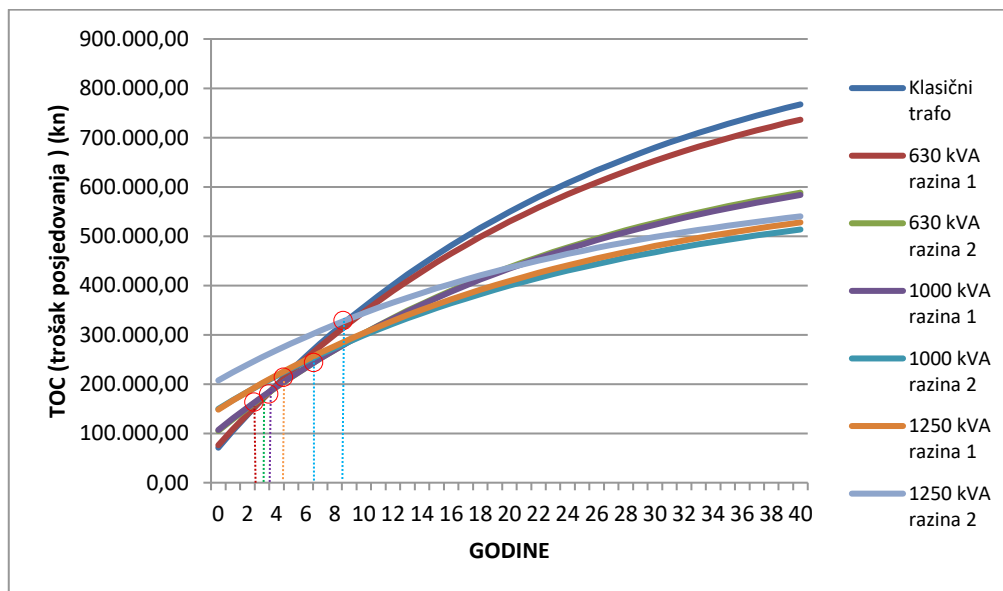
	Klasični transformator	Energetski učinkoviti transf. 630 kVA (razina 1)	Energetski učinkoviti transf. 630 kVA (razina 2)	Energetski učinkoviti transf. 1000 kVA (razina 1)	Energetski učinkoviti transf. 1000 kVA (razina 2)
Inicijalna cijena	70.990,00 kn	76.020,00 kn	105.500,00 kn	106.910,00 kn	149.674,00 kn
Trošak posjedovanja na kraju 40.- godišnjeg razdoblja	226.342,69 kn	195.308,67 kn	205.424,42 kn	236.837,28 kn	262.534,62 kn
Razlika troška posjedovanja u odnosu na referentni slučaj	0 %	-13,71 %	-9,24 %	4,64 %	15,99 %

Radi usporedbe, tablica 13 prikazuje i podatke za energetske transformatore jednog stupnja veće snage. Zbog niskog opterećenja i dominantnih gubitaka praznog hoda, isplativost ugradnje transformatora veće snage u ovom slučaju nije opravdana.

4.3.5 Transformator 630 kVA s opterećenjem blizu nazivnog

Koristeći podatke iz prošlog primjera prikazanog u poglavlju 4.3.4, napravljena je analiza troška posjedovanja transformatora snage 630 kVA uz prosječno opterećenje od 80%.

Grafički prikaz troška posjedovanja kroz godine prikazuje slika 4-15.



Slika 4-15 - Trošak posjedovanja za slučaj opterećenog transformatora 630 kVA

Kao i za slučaj opterećenog transformatora nazivne snage 100 kVA, i u ovom slučaju dominiraju gubici tereta zbog čega se postižu isplativosti u kraćim razdobljima. U analizi su obuhvaćeni transformatori za jedan i dva reda veličine veće snage (1000 kVA i 1250 kVA) od snage referentnog transformatora. Veće

inicijalne cijene, veće snage, a samim time i veći gubici uzrokuju značajnije financijske razlike ovisno o pojedinoj promatranoj varijanti zamjene transformatora. Najbrže će se isplatiti transformator snage 630 kVA proizveden po smjernicama razine 1 i to već nakon 3 godine korištenja, no u konačnici će njegova isplativost biti tek 4 % na kraju životnog vijeka. Osjetnija isplativost vidi se na transformatoru 630 kVA proizvedenom po smjernicama razine 2 koji nakon 40 godina uštedi preko 23 % u odnosu na referentni primjer. Gotovo identičnu liniju isplativosti slijedi i transformator snage 1000 kVA razine 1 koji unatoč većim nazivnim gubicima ima manji relativni omjer opterećenja, s neznatnom razlikom u inicijalnoj nabavnoj cijeni.

Tablica 14 - Prikaz troška posjedovanja za slučaj opterećenog transformatora 630 kVA

	Klasični transf. 630 kVA	Energetski učinkoviti transf. 630 kVA (razina 1)	Energetski učinkoviti transf. 630 kVA (razina 2)	Energetski učinkoviti transf. 1000 kVA (razina 1)	Energetski učinkoviti transf. 1000 kVA (razina 2)	Energetski učinkoviti transf. 1250 kVA (razina 1)	Energetski učinkoviti transf. 1250 kVA (razina 2)
Inicijalna cijena	70.990,00 kn	76.020,00 kn	105.000,00 kn	106.910,00 kn	148.135,00 kn	149.674,00 kn	207.389,00 kn
Trošak posjedovanja na kraju 40.- godišnjeg razdoblja	767.302,95 kn	736.268,93 kn	588.257,83 kn	583.671,90 kn	513.576,80 kn	527.944,56 kn	540.206,80 kn
Razlika troška posjedovanja u odnosu na referentni slučaj	0 %	-4,04 %	-23,33 %	-23,93 %	-33,07 %	-31,19 %	-29,60 %

Najveća ušteda postiže se ugradnjom transformatora 1000 kVA proizvedenog po smjernicama razine 2, i to više od 33 % odnosno 253.726,15 kn, što odgovara cijeni 2,5 transformatora snage 630 kVA. Može se uočiti da će se slična ušteda dobiti korištenjem transformatora 1250 kVA razine 1, što je posljedica gotovo iste inicijalne cijene, te manjeg omjera relativne snage odnosno gubitaka tereta.

Općenito, može se primijetiti da inicijalne cijene energetski učinkovitih transformatora proizvedenih po smjernicama razine 2 EU odredbe 548/2014 odgovaraju cijenama energetski učinkovitih transformatora razine 1 jednog reda veće nazivne snage. U ovom slučaju, isti odnos vrijedi i za trošak posjedovanja transformatora na kraju 40-godišnjeg razdoblja.

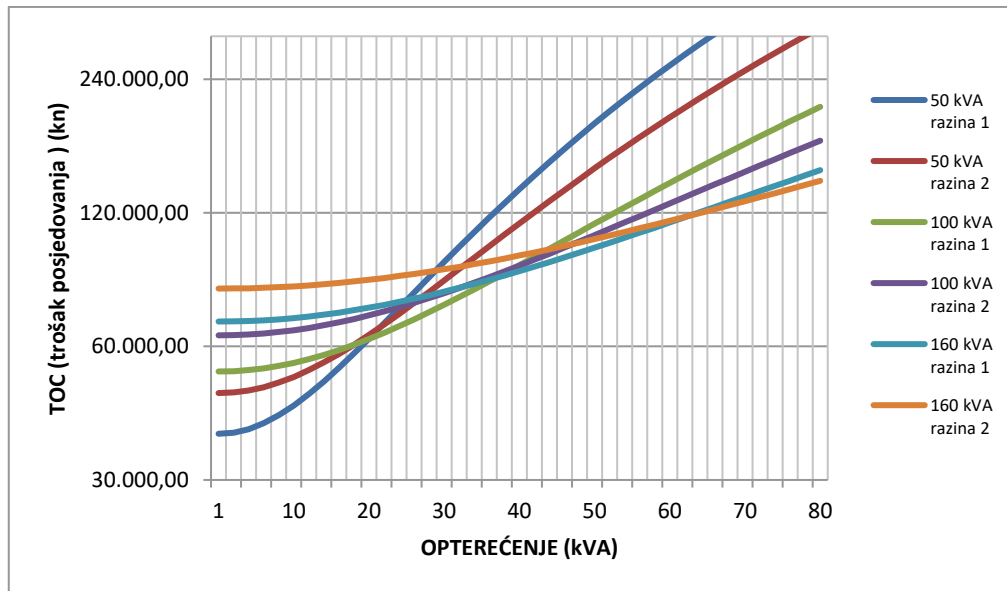
4.4 Isplativost transformatora s obzirom na relativno opterećenje

U prethodnim poglavljima prikazana je analiza na primjerima malog i velikog relativnog opterećenja postojećeg transformatora u odnosu na nazivnu snagu. U slučajevima malog relativnog opterećenja ugradnja transformatora reda veličine veće snage nije isplativa, dok se u slučajevima velikog relativnog opterećenja može razmatrati i ugradnja transformatora do dva reda veličine veće snage. Zbog toga je bitno promotriti u kojem trenutku odnosno kod kojeg relativnog opterećenja se može uzimati u obzir ugradnja transformatora veće snage.

Za transformatore u rasponu snaga od 50 kVA do 160 kVA, dijagram isplativosti prikazuje slika 4-16. Transformator je isplativiji što mu je linija isplativosti niže,

odnosno najisplativija verzija transformatora za pojedino opterećenje je ona čija se linija isplativosti nalazi najniže na prikazanom dijagramu.

Ako se promotri pretpostavljeni period životnog vijeka od 40 godina i iskoristi relacija za izračun troška posjedovanja, može se izračunati koliko će vlasnika pojedini transformator u konačnici koštati ovisno o prosječnom opterećenju.

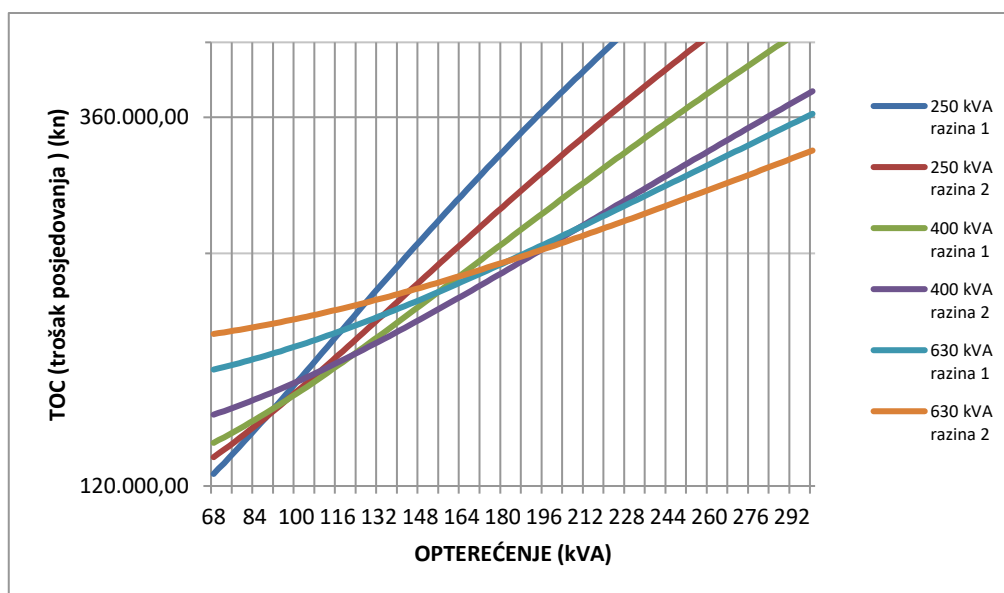


Slika 4-16 - Dijagram isplativosti transformatora 50 - 160 kVA u 40-godišnjem razdoblju, ovisno o opterećenju

Za razliku od izračuna gubitaka prikazanog poglavlju 4.1., kad se u obzir uzme ekonomski faktor, odnosno utjecaj inicijalne cijene i kapitalizacije gubitaka, granica isplativosti zamjene transformatora s obzirom na relativno opterećenje se mijenja. Na primjer, iako se za energetske učinkoviti transformator 50 kVA razine 2 maksimalna učinkovitost (uvjet $P_0 = P_k$) postiže na 33,5 % nazivnog opterećenja, odnosno pri teretu od 16,7 kVA, ugradnja transformatora stupnja veće snage (100 kVA, razine 2) isplativa je nakon snage od 26 kVA odnosno kad opterećenje transformatora nazivne snage 50 kVA pređe 52 %, gledano kroz aspekt ukupnog troška posjedovanja u životnom vijeku od 40 godina.

Dodatno valja primijetiti kako se s promjenom opterećenja mijenjaju optimalni tipovi transformatora za ugradnju. Osim tehničkih karakteristika, na odabir bitno utječu ekonomski čimbenici, odnosno inicijalna nabavna cijena. Gledano za energetske transformatore u rasponu snaga od 50 do 160 kVA, do opterećenja 21 kVA najisplativije je koristiti transformator nazivne snage 50 kVA s karakteristikama razine 1 europske uredbe 548/2014. Od 20 do 36 kVA opterećenja optimalno je ugraditi transformator snage 100 kVA razine 1, a nakon toga transformator snage 160 kVA, također razine 1. To znači da će transformatori promatranih snaga, s karakteristikama razine 1 europske uredbe 548/2014, uz pretpostavku da se prosječno opterećenje neće mijenjati tijekom životnog vijeka i da u floti transformatora postoje takvi raspoloživi transformatori za ugradnju, u konačnici biti isplativiji nego transformatori proizvedeni po razini 2 europske uredbe 548/2014.

Kod distributivnih transformatora većih snaga, veći su iznosi gubitaka te se sukladno tome izračun isplativosti mijenja, kako prikazuje slika 4-17. U rasponu opterećenja 67 – 88 kVA, u 40-godišnjem razdoblju najisplativije rješenje je ugradnja transformatora snage 250 kVA razine 1. Transformator iste snage proizveden po smjernicama razine 2 bit će isplativ za mali raspon opterećenja od 89 – 96 kVA, nakon čega je isplativo ugraditi transformator snage 400 kVA razine 1. Za razliku od usporedbe transformatora manjih snaga, smanjeni gubici transformatora razine 2 doći će do izražaja, te će u rasponu opterećenja 122 – 196 kVA transformator 400 kVA razine 2 biti najisplativije rješenje. Iznad tih snaga pa sve do opterećenja od 341 kVA, najisplativija opcija je transformator snage 630 kVA razine 2, nakon čega ga po isplativosti mijenja transformator snage 1000 kVA razine 2. To znači da transformatori proizvedeni po smjernicama razine 2 za veća opterećenja, unatoč većoj inicijalnoj cijeni, proizvode dovoljno manje gubitaka da se mogu ekonomski isplatiti u dugoročnom razdoblju.



Slika 4-17 - Dijagram isplativosti transformatora 250 - 630 kVA u 40-godišnjem razdoblju, ovisno o opterećenju

Ovakva analiza vrijedi ako se promatra cjelokupna flota transformatora, odnosno ako se uspoređuju svi dostupni tipovi transformatora. Prema zakonskim odredbama, od 1. srpnja 2021. na europskom tržištu bit će moguće kupiti samo transformatore koji odgovaraju smjernicama razine 2, te će zbog sve većeg upliva takvih transformatora u flote distribucijskih područja ovakva razmatranja biti moguća i smislena još određeno vrijeme u budućnosti.

Ako se promatraju samo transformatori proizvedeni po smjernicama razine 2, situacija se ponešto mijenja. Ako se pretpostavi da je na određenoj lokaciji ugrađen transformator nazivne snage 50 kVA s karakteristikama razine 1, on je najisplativije rješenje do opterećenja 21 kVA. Tek između 21 i 26 kVA isplativo je ugraditi transformator snage 50 kVA razine 2. Već iznad 26 kVA pa sve do 47 kVA isplativije

je ugraditi novi energetska učinkoviti transformator razine 2 snage 100 kVA, a nakon 47 kVA optimalno rješenje je ugradnja novog transformatora snage 160 kVA.

Dodatno je zanimljivo promotriti može li se ekonomski opravdati ugradnja novog energetskog transformatora proizvedenog po smjericama razine 2 umjesto postojećeg transformatora klasične izvedbe, gledajući uštedu na gubicima. Postojeći transformator ima smanjenu vrijednost ovisno o periodu koliko je ugrađen, odnosno koliko je amortiziran. Stopa amortizacije transformatora u HEP ODS-u iznosi 4 %, odnosno ekonomski on ima vrijednost tijekom 25 godina. Već je spomenuto da je životni vijek transformatora 40 godina, pa se usporedba isplativosti može napraviti na period do kraja životnog vijeka postojećeg transformatora. Za primjer se može promotriti transformator snage 50 kVA, starosti 20 godina. Njegova sadašnja vrijednost je zbog amortizacije 80 % manja od nabavne. S tom cijenom, uz promatranje različitih opterećenja, moguće je napraviti usporedbu troška posjedovanja s novim transformatorom, u idućih 20 godina, koliko je za očekivati da predmetni transformator može biti u pogonu. Trošak posjedovanja ovakvog klasičnog transformatora će za sve vrijednosti prosječnog opterećenja od 0 – 31 kVA biti manji od troška posjedovanja novog energetskog transformatora razine 2. Iznad 31 kVA bit će isplativije ugraditi energetska transformator reda veličine veće snage, no opet je takav transformator potrebno usporediti s amortiziranom vrijednosti postojećeg transformatora iste snage, što dovodi do jednakog zaključka kao i u prethodnom slučaju. Analizom rezultata izračuna na primjeru transformatora snage 50 kVA, energetska transformatore razine 2 isplativo je ugraditi umjesto postojećih transformatora koji su stari do 15 godina, i to za određeni manji raspon prosječnih opterećenja, slično kao što je opisano u prethodnom primjeru. Dobit koja se može ostvariti na smanjenju gubitaka ne može opravdati isplativost ugradnje energetskog transformatora razine 2 umjesto postojećeg transformatora koji je stariji od 15 godina.

U drugom primjeru može se usporediti isplativost zamjene transformatora snage 630 kVA, starog 25 godina, odnosno uz 100 % amortiziranu vrijednost. Transformator ima karakteristike koje prikazuje tablica 2. U periodu od idućih 15 godina, koliko bi stari transformator još mogao biti u pogonu, zbog smanjenog iznosa gubitaka, transformator snage 630 kVA razine 2 bit će isplativo rješenje u rasponu opterećenja 240 – 420 kVA, što je promjena u odnosu na prethodni primjer za transformator manje snage. U slučaju opterećenja od 420 kVA, trošak posjedovanja novog transformatora razine 2 bit će 28 % manji nego postojećeg transformatora. Potrebno je promotriti još jednu varijantu ovog slučaja. U floti transformatora, jedinice stare oko 20 godina pretežno će imati karakteristike klasičnih transformatora, kako prikazuje slika 3-6. Uz amortiziranost vrijednosti od 80% i promatrani period od narednih 20 godina, zamjena ovog transformatora bit će isplativa u značajno užem dijelu raspona opterećenja i to između 366 i 390 kVA, a dodatno je bitno istaknuti kako ta isplativost ne prelazi razliku od 2,5 % troška posjedovanja.

4.5 Smjernice za određivanje optimalnog transformatora

Određivanje optimalnog transformatora za određenu lokaciju može se temeljiti na različitim pristupima. Operatoru distribucijskog sustava je smanjenje gubitaka jedan od ključnih pokazatelja poslovanja, odnosno jedan od najvažnijih ciljeva. S te strane, bitno je odrediti lokacije na kojima su transformatori u takvim pogonskim prilikama gdje će se ugradnjom transformatora reda veličine manje ili veće snage utjecati na smanjenje gubitaka. Prema podacima koje prikazuje tablica 15, nakon relativnog prosječnog opterećenja od otprilike 33 %, transformator reda veličine veće snage stvarat će manje gubitke nego postojeći.

Tablica 15 – Prosječna opterećenja pri kojima se ostvaruje najveća korisnost transformatora

	Energetski učinkoviti transformatori (razina 2, uredba 548/2014)						
	50 kVA	100 kVA	160 kVA	250 kVA	400 kVA	630 kVA	1000 kVA
Prosječno opterećenje pri kojem su gubici jednaki onima transformatora veće snage	16,73 kVA	32,27 kVA	51,32 kVA	82,27 kVA	132,44 kVA	195,83 kVA	326,46 kVA
Relativno opterećenje u odnosu na nazivnu snagu pri kojem su gubici jednaki onima transformatora veće snage	33,47 %	32,27 %	32,07 %	32,91%	33,11 %	31,08 %	32,65 %

U analizi optimalne snage transformatora neizbježno je koristiti ekonomski pristup. Gledano strogo sa aspekta smanjenja gubitaka, oni se mogu isplatiti na primjer ugradnjom novog transformatora, no zbog većeg inicijalnog ulaganja ta investicija neće biti opravdana kroz životni vijek transformatora. Tablica 16 prikazuje usporedbu prosječnih i relativnih opterećenja transformatora pri kojima se postiže jednaka isplativost kao i kod transformatora reda veličine veće snage. Kad se usporede podaci s onima koje prikazuje tablica 15, može se uočiti da je transformator isplativije zamijeniti nakon vrijednosti relativnog prosječnog opterećenja od ugrubo 50 % nazivne snage transformatora.

U praksi, odluka operatora distribucijskog sustava bit će kombinacija dva navedena pristupa. U slučaju da u floti transformatora već postoji kupljeni i raspoloživi odgovarajući transformator za zamjenu, koristit će se pristup u kojem se gleda isključivo smanjenje gubitaka. U slučaju potrebe za investicijskim ulaganjem, odnosno kupovinom nove jedinice za zamjenu na određenoj lokaciji, potrebno je uzeti u obzir ekonomski pristup.

Tablica 16 - Prosječna opterećenja pri kojima se ostvaruje najbolja isplativost transformatora

	Energetski učinkoviti transformatori (razina 2, uredba 548/2014)						
	50 kVA	100 kVA	160 kVA	250 kVA	400 kVA	630 kVA	1000 kVA
Prosječno opterećenje pri kojem je trošak isplativosti jednak onome transformatora veće snage	26 kVA	48 kVA	78 kVA	110 kVA	196 kVA	342 kVA	618 kVA
Relativno opterećenje u odnosu na nazivnu snagu pri kojem je trošak isplativosti jednak onome transformatora veće snage	52,00 %	48,00 %	48,75 %	44,00 %	49,00 %	54,29 %	61,80 %

Važno je napomenuti da prikazana razmatranja vrijede za okolnosti u vrijeme pisanja ovog rada. Potencijalne promjene u elektroenergetskoj mreži, kao što su veliki udio obnovljivih izvora energije, veća penetracija sustava dizalica topline ili pak električnih vozila znatno će utjecati na prilike u mreži, te će operatori distribucijskih sustava morati odgovarati na izazove koje donose spomenute tehnologije, što dijelom podrazumijeva i pristup upravljanju transformatorima.

5 Upravljanje flotom transformatora u distribucijskom području

Tradicionalni pristup upravljanja flotom transformatora u velikoj mjeri oslanja se korištenje podataka iz nekoliko izvora, za čiju je usporedbu i organizaciju bio ključan iskustveni faktor zaposlenika zaduženih za navedene poslove. Kriteriji za eventualne zahvate na postrojenju, kao što su međusobna zamjena postojećih transformatora ili nabava novih, odnosno određivanje potrebne instalirane snage donosili su se na temelju zapisa o stanju transformatora u pogonu, ciljanih mjerenja opterećenja i prilika u kojima se transformatori nalaze, tehničke dokumentacije i zahtjeva kupaca u tom dijelu mreže. Mana ovakvog pristupa je raspršenost podataka za čije je prikupljanje i organiziranje zaduženo nekoliko različitih organizacijskih jedinica, zatim neusklađenost oblika i formata dostupnih podataka zbog kojih su potrebne analize bile prilično složene i vremenski zahtjevne, te u velikoj mjeri oslanjanje na osobnu procjenu radnika koji će donesti odluku o intervenciji na postrojenju. Osim toga, otežano je bilo pratiti i rezultate donesenih odluka u smislu optimizacije i dobrobiti za postrojenje.

Pojavom novih tehnologija, kao što su baze podataka, kvalitetniji instrumenti za mjerenje opterećenja, nova elektroenergetska oprema s već ugrađenim mjernim uređajima i općenita digitalizacija poslovanja omogućeni su novi pristupi za upravljanje transformatorima u distribucijskom sustavu, u kojima će podaci biti na centralnom jedinstvenom mjestu, lako usporedivi i dostupni svima, uz mogućnost uspoređivanja i organizacije prema različitim kriterijima i zahtjevnima korisnika.

5.1 Baza podataka o transformatorima

U distribucijskim područjima obično se kroz tehničku dokumentaciju čuvaju i ažuriraju podaci o pripadajućem elektroenergetskom postrojenju, između ostalog i energetskim transformatorima. U prijašnjim vremenima dokumentacija se vodila u fizičkom odnosno pisanom obliku. Konkretno, za energetske transformatora ispunjavala se takozvana „temeljnica transformatora“ gdje su se upisivali podaci sa ispitnog lista transformatora, te podaci iz pogona transformatora, kao što su redovna održavanja, zamjene ulja, lokacije na kojima je ugrađen, kvarovi i popravci i slično.

Pojavom i razvojem informatičkih tehnologija vođenje tehničke dokumentacije se u znatnoj mjeri olakšalo. Ispočetka, podaci su upisivani i ažurirani u tabličnim programima gdje su se onda mogli puno brže pretraživati i sortirati po određenim kriterijima. Nakon implementacije geografskog informacijskog sustava (GIS-a), tehnički podaci našli su se na jednom mjestu, povezani s prostornim podacima o elementima elektroenergetskog postrojenja. Ovakva rješenja omogućuju izvođenje složenih i naprednih upita u kratkom vremenu što znači da je moguće provoditi razne analize za dane elemente distribucijske mreže. Osim toga, karakteristični podaci o pojedinim dijelovima elektroenergetskog sustava organizirani su u kataloge, što pridonosi kompletnosti upisa podataka te smanjenju nepotrebnih i pogrešnih upisa, kao što je to znao biti slučaj s tipom transformatora, grupom spoja i slično.

Primjer karakterističnih podataka koji se nalaze u bazi podataka GIS-a prikazuje slika 5-1.

Transformator energetski SN

Postrojenje Interno	1TS213
Oznaka	-T1
Broj	1
Tip	Tip transformator energetski SN(6TBNO 630-24x/AC,20/0.4,630,KONČAR)
Napon primara	10 kV
Napon sekundara	0.4 kV
Status	eksploatacija
Status radni	u pogonu
Napon kratkog spoja	3.910 %
Opseg regulacije napona	2.5% \times 5
Položaj regulacijske sklopke	3
Iznos regulacije napona	0.000 %
Godina proizvodnje	2020
Godina ugradnje	2021
Masa Ulja	295.000 kg
Tvornička oznaka	662713
Vlasništvo	vlastito
Unos napravio	ekrmpotic
Datum unosa	5/14/19
Promijenio	ekrmpotic
Datum promijene	2/22/21

Slika 5-1 - Prikaz podataka o transformatoru u bazi GIS

U prijašnje vođenim bazama podataka najvažniji podaci o transformatorima bili su njegov tip, serijski broj, napon kratkog spoja i godina proizvodnje. U bazi podataka GIS-a vode se još dodatno podaci o masi ulja, gubicima tereta i praznog hoda, položaju regulacijske preklapke i drugi pogonski podaci.

Velika prednost ovakvog načina upravljanja tehničkim podacima je mogućnost korištenja i za druge potrebe osim samog pregledavanja podataka. Za složenije izračune i algoritme se uglavnom izrađuju vlastite aplikacije koje koriste podatke iz GIS-a.

5.1.1 Opterećenja transformatora

Jedan od strateških ciljeva operatora distribucijskog sustava je smanjenje gubitaka u sustavu, što tehničkih, što onih netehničke naravi. Kako je već spomenuto u prijašnjim poglavljima, tehnički gubici koji nastaju u energetskim transformatorima čine značajan udio u ukupnim gubicima, stoga je dobra poslovna praksa odabrati i ugraditi optimalni transformator odnosno onaj transformator za koji su gubici

najmanji. Između ostalog, jedan od preduvjeta odabira optimalnog transformatora je poznavanje karakteristika njegovog opterećenja, po mogućnosti u što dužem vremenskom periodu.

Kod projektiranja i izgradnje novih transformatorskih stanica potrebno je odabrati nazivnu snagu transformatora. U takvim slučajevima iznos opterećenja nije poznat, pa se najčešće napravi procjena opterećenja prema zakupljenim snagama pripadajućih kupaca koji se napajaju iz tog objekta. U prijašnjim praksama, nakon puštanja transformatorske stanice u pogon rijetko su se obavljale rutinske provjere stvarnog iznosa opterećenja, što je većinom bilo uzrokovano malim brojem prijenosnih uređaja za mjerenje opterećenja. Osim toga, mjerni interval po transformatorskoj stanici trebao bi biti najmanje tjedan dana koliko iznosi i mjerni interval za mjerenje prema normi za kvalitetu električne energije HRN EN 50160 [26].

Razvojem tehnologije i ulaganjem u elektroenergetsko postrojenje, u transformatorske stanice počeli su se ugrađivati niskonaponski razvodni blokovi i ormari koji u sebi imaju ugrađene mjerne terminale dizajnirane za mjerenja i kontrolu u jednofaznim ili trofaznim energetske mrežama. Ovakvi uređaji mogu mjeriti sve standardne parametre kao što su frekvencija, fazni i linijski naponi, struje, nesimetrije, radne i jalove energije, faktor snage, pojedinačne harmonike u naponu i struji do 50-og i THD u naponu i struji. Na temelju mjerenja iz ovakvih uređaja, koji mogu pohraniti podatke o opterećenjima od nekoliko mjeseci, mogu se napraviti kvalitetne procjene opterećenja pojedinih transformatora za daljnje analize.

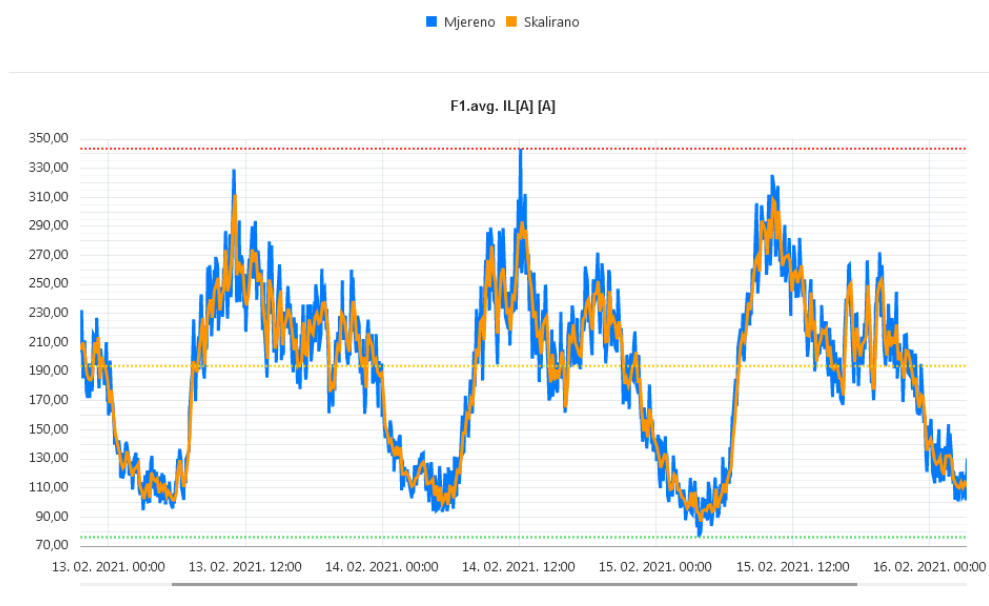
Osim toga, pribavljeni su dodatni mjerni instrumenti za mjerenje kvalitete električne energije koji se periodički postavljaju po transformatorskim stanicama i tako omogućuju realniji uvid u stvarne prilike u kojima se nalaze pojedini transformatori.

Izvor podataka o opterećenju pojedinog transformatora može biti rezultat ciljanog mjerenja odgovarajućim mjernim instrumentima, zapisa kontinuiranog mjerenja sa mjernog terminala koji se nalazi u transformatorskoj stanici, očitavanja brojila ili mjerenja toka snage u nadređenoj transformatorskoj stanici. Rezultati mjerenja dolaze u vlastitom formatu i obliku, ovisno na koji od navedenih načina su nastali. Osim toga, kod mjerenja mjernim instrumentima postoji nekoliko izvedbi koji opet međusobno daju različite formate mjerenih veličina. Kako bi se pojedina mjerenja mogla uspoređivati, osmišljena je aplikacija „Pogonska mjerenja“ u koju se učitavaju podaci s pojedinih izvora mjernih rezultata. Aplikacija se tako, osim za unificiranje rezultata mjerenih veličina, koristi kao jedinstveno mjesto za pohranu, pretraživanje i prikaz pogonskih mjerenja.

Mjerni podaci se učitavaju iz tekstualnih datoteka koji su nastali izvozom podataka preko softvera isporučenog s mjernim instrumentima. Aplikacija podržava sve tipove mjernih instrumenata koji se nalaze u distribucijskom području. Oblici izvoznih datoteka su opisani profilima instrumenata koji se inicijalno podešavaju prema pojedinom korisniku te verzijama korištenog softvera za izvoz podataka.

Svako mjerenje sastoji se od jedne ili više mjerenih veličina (na primjer minimalni, maksimalni i prosječni napon u mjerenom intervalu). Osim numeričkog, aplikacija

ima i grafički prikaz s dvije komponente: prikaz mjerenih podataka i prikaz skaliranih podataka. Skaliranje se vrši za sve veličine koje su mjerene s periodom mjerenja različitim od 10 minuta, kako bi se rezultati mogli biti međusobno usporedivi i da odgovaraju formatu koji propisuje norma HRN EN 50160. Pored toga, prikazuju se i linije minimuma, prosjeka i maksimuma mjerenih podataka. Pojedinu vrijednost u odabranom trenutku moguće je očitati postavljanjem strelice miša na željenu točku grafa.



Slika 5-2 - Graf mjerenih i skaliranih veličina u aplikaciji Pogonska mjerenja

Kako bi se što bolje odredila krivulja opterećenja pojedinog transformatora i prema tome napravio izračun gubitaka, potrebno je poznavati 15-minutne vrijednosti opterećenja, odnosno imati 96 mjerenja u 24 sata. Kako je već spomenuto, sva mjerenja rade se po intervalima od 10 minuta, tako da je ovaj uvjet zadovoljen. Dodatno, mjerni intervali se mogu podesiti i na kraća vremena, ovisno o tipu instrumenta kojim se vrši mjerenje, kao na primjer na interval od 2 minute, kako prikazuje slika 5-2.

5.1.2 Stanje transformatora uočeno pregledom/održavanjem

Digitalizacijom poslovanja i implementacijom GIS-a stvorena je jedinstvena baza podataka u kojoj se ažuriraju podaci o elementima elektroenergetskog sustava čime se izbjegava redundancija vođenja podataka na više mjesta. Procesi održavanja u distribucijskom području znatno su olakšani upotrebom aplikacije „Trafogled“, čiji se osnovni cilj rješavanje problema vođenja, pregleda i održavanja elektroenergetskog sustava, što je propisano važećim zakonskim i internim pravilnicima. Aplikacija se sastoji se od tri osnovna dijela: pregled, održavanje te popis objekata s nedostacima. [27]

2.2.	TRANSFORMATORI	ROK ODRŽAVANJA
2.2.1.	Transformatori 10(20)/0,4 kV s konzervatorom	
Pregled (vizualni)		
1.	Vanjsko stanje (čistoća, zauljenost, korozija, mehaničko oštećenje, učvršćenje na konstrukciju, ...)	1G
2.	Konzervator (zauljenost, razina ulja, brtvljenje, ...)	1G
3.	Sušionik zraka (silikagel, razina ulja u čašici, otvor za zrak, mehaničko stanje, brtvljenje, ...)	1G
4.	Priključak na uzemljenje	1G
5.	Termovizija (električni spojevi primara i sekundara, izolatori, ...)	4G
Održavanje		
1.	Prema nalazu pregleda i/ili mjerenja i ispitivanja	PP
2.2.2.	Transformatori 10(20)/0,4 kV hermetički zatvoreni	
Pregled (vizualni)		
1.	Vanjsko stanje (čistoća, zauljenost, korozija, mehaničko oštećenje, učvršćenje na konstrukciju, ...)	1G
2.	Priključak na uzemljenje	1G
3.	Termovizija (električni spojevi primara i sekundara, izolatori, ...)	4G
Održavanje		
1.	Prema nalazu pregleda i/ili mjerenja i ispitivanja	PP

Slika 5-3 - Prikaz dijela propisanih obaveza pregleda i održavanja za transformatore (HEP BILTEN 504)

U kategoriji transformatora, Pravilima o održavanju elektrodistribucijske mreže (Bilten HEP-a broj 504) propisane su radnje pregleda, održavanja i mjerenja te rokovi za njihovo izvršenje. Izvršitelji na terenu upisuju uočene nedostatke koji se pohranjuju u bazu podataka aplikacije za transformatorsku stanicu gdje je transformator ugrađen. U slučaju da se nedostatak ukloni, i taj podatak se evidentira u bazi.

2		Energetski transformatori - pregled
2.1		Energetski transformator 1
2.1.1		Mehanički dio
2.1.1.1	<input type="checkbox"/>	temperaturu ulja očitavanjem termometra,
2.1.1.2	<input type="checkbox"/>	razinu ulja u konzervatoru,
2.1.1.3	<input type="checkbox"/>	sušionik zraka, odnosno stanje silikagela i razinu ulja u čašici sušionika i provjeru otvora za zrak na sušioniku,
2.1.1.4	<input type="checkbox"/>	mehaničko stanje kotla, radijatora, konzervatora, ekspanzijske cijevi i vanjske opne, zasuna i ventila, džepa termometra, kuke za dizanje i svih varova,
2.1.1.5	<input type="checkbox"/>	antikorozijsku zaštitu transformatora,
2.1.1.6	<input type="checkbox"/>	čistoću površine provodnih izolatora,
2.1.1.8	<input type="checkbox"/>	brtvljenje provodnih izolatora, poklopca kotla, uljokaznog stakla, Bucholz releja, radijatora, upusnog i ispušnog ventila na kotlu, kontaktnog termometra i slično,
2.1.1.13	<input type="checkbox"/>	stanje jezgre, namota, spojeva i učvršćenja (za suhe transformatore),

Slika 5-4 - Stavke koje se provjeravaju kod redovnog pregleda transformatora (aplikacija Trafogled)

Kategorije nedostataka podijeljene su u dvije razine: nedostatak i hitni nedostatak. Radnik koji obavlja pregled označava odgovarajuću razinu nedostatka, što se odmah evidentira u bazi podataka. Nakon što se napravi pregled cijelog postrojenja ili smislene cjeline, na temelju rezultata donose se poslovni planovi koji mogu uključivati zahvate poput održavanja ili zamjene transformatora. Na ovaj način nastaje jedan od kriterija za upravljanje transformatorima na distribucijskom području, na temelju kojeg se može donositi odluka o eventualnoj zamjeni transformatora.

5.2 Algoritam za određivanje prioriteta lokacija za zamjenu transformatora

Kako bi se omogućili dodatni kriteriji za upravljanje transformatorima, postojeće aplikativno rješenje koje objedinjavanja pogonska mjerenja (opisano u poglavlju 5.1.1.) potrebno je nadopuniti i povezati s drugim izvorima podataka o transformatorima, kao što su osnovni podaci (snaga, nazivni gubici, godina proizvodnje), podaci iz pogona (uočeni nedostaci na transformatoru i razina hitnosti za njihovo otklanjanje) te podaci o planiranim zahvatima koji ukazuju na to da je na konkretnoj lokaciji planirana određena investicija (što dalje znači da unatoč lošim pokazateljima ne treba poduzimati pogonske zahvate jer će problem biti riješen kroz investicijske aktivnosti).

Nakon nadopunjavanja baze pogonska mjerenja potrebno je kreirati izvještaj koji će uspoređivati instaliranu snagu i maksimalno izmjerenu snagu, instaliranu snagu i srednju vrijednost izmjerene snage, itd.

Podatak o snazi ugrađenog transformatora i šifri pojedine transformatorske stanice nalazi se u aplikaciji GIS i oni se redovito ažuriraju.

5.2.1 Primjena aplikativnog rješenja algoritma za smanjenje gubitaka i upravljanje imovinom

U verziji aplikacije Pogonska mjerenja oznake 2k20, proširen je model podataka s podacima o transformatorima, a aplikacija je dopunjena stranicama za pregled, pretraživanje, izmjenu i unos podataka o transformatorima i njihovim karakteristikama. Krajnji cilj je korištenje podataka iz centralne baze podataka GIS-a, uz pretpostavku da će podaci na tom mjestu biti potpuni i ažurni.

Aplikaciju je potrebno proširiti na način da koristi podatke o pogonskom stanju transformatora, odnosno uočenim nedostacima i njihovoj hitnosti, što je moguće dohvatom podataka iz aplikacije Trafogled. Osim toga, povezivanjem s aplikativnim rješenjima koje se koriste za planiranje i realizaciju investicija, moguće je dobiti podatak o transformatorskim stanicama na kojima je u narednom periodu planiran određeni zahvat, što će također poslužiti kao kriterij kod donošenja odluke o postupanju s konkretnim transformatorom.

Kako bi se što bolje mogli procjenjivati gubici, pretpostavlja se da se podaci o mjerenim opterećenjima po transformatorskim stanicama kontinuirano ažuriraju i nadopunjuju. Unatoč tome što su mjerenja sve dostupnija, što zbog većeg broja mjernih instrumenata, što zbog već ugrađenih mjernih terminala u opremu koja se nalazi u samoj transformatorskoj stanici, potrebno je uzeti u obzir mogućnost da za neke lokacije mjerenja neće biti ažurirana u traženom vremenskom periodu (na primjer 2 godine), te je u takvim slučajevima potrebno napraviti procjenu opterećenja. Jedan od pristupa izrade procjene opterećenja je korištenje nadomjesnih krivulja koje su već opisane u poglavlju 4.1. Za tu svrhu potrebno je znati profil potrošnje korisnika koji se nalaze na pojedinoj transformatorskoj stanici, odnosno njihov udio u ukupnom teretu. Svakoj kategoriji pridjeljuje se karakteristična nadomjesna krivulja opterećenja (NKO) koja se koristi unutar Hrvatske elektroprivrede za nadzor i obračun energije uravnoteženja, na temelju

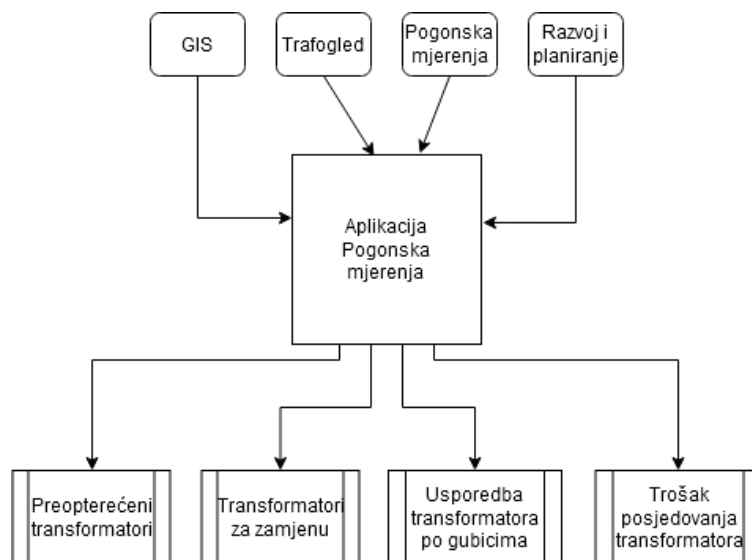
čega se može dobiti nadomjesni profil opterećenja za karakteristične dane u tjednu (obično se razlikuju radni dani, subota i nedjelja) [24]. Budući da podaci o kategorizaciji potrošnje za sve transformatorske stanice x/0,4 kV nisu uvijek dostupni, svakoj stanici sa malim potrošačima može se pridijeliti približan omjer potrošnje javne rasvjete i malog poduzetništva koji imaju različite nadomjesne krivulje opterećenja.

5.2.2 Buduće stanje i mogući razvoj aplikativnog rješenja

Za postizanje potpune funkcionalnosti navedene aplikacije, potrebno je zadovoljiti sljedeće uvjete:

- Katalog transformatora u aplikaciji GIS ažuriran je za sve tipove transformatora na distribucijskom području
- Ažurirani su bitni podaci o svim ugrađenim transformatorima
- Omogućen je dohvat podataka o stanju transformatora iz aplikacije Trafogled
- Omogućeno je povezivanje s aplikacijom Planiranje i razvoj radi dohvata podataka o planiranim investicijama
- Mjerenja po transformatorskim stanicama se rade periodički tako da se što bolje može dobiti uvid o pogonskim prilikama na pojedinoj lokaciji

Na temelju dostupnih podataka, u aplikativnom rješenju potrebno je izraditi predefinirane upite odnosno izvještaje, te omogućiti korisnicima stvaranje vlastitih upita. S obzirom da se radi o bazi podataka, podacima se može vrlo lako upravljati.



Slika 5-5 - Shematski prikaz funkcionalnosti aplikacije Pogonska mjerenja

Jedan od predefiniranih izvještaja trebao bi prikazati sve preopterećene transformatore, odnosno transformatore kojima prosječno opterećenje prelazi nazivnu snagu. Pored toga, na temelju izmjerenih opterećenja moguće je poredati transformatore ovisno o omjeru gubitaka kratkog spoja i praznog hoda, što je opet vrlo dobra polazna točka za razmatranje zamjene konkretnog transformatora.

Analiza transformatora za zamjenu svakako bi trebala sadržavati podatak o starosti transformatora te njegovom uočenom stanju na terenu. Korisnik bi trebao imati mogućnost sortiranja podataka na temelju više kriterija, na primjer prikaz preopterećenih transformatora koji su blizu kraja životnog vijeka od 40 godina ili s uočenim lošim stanjem.

U aplikaciji bilo bi vrlo korisno omogućiti modul koji za pogonske prilike na odabranom mjestu mjerenja uspoređuje različite transformatore po snazi i tipu, te prikazuje kakve gubitke pojedini transformator stvara, odnosno omogućuje poredati transformatore prema kriteriju najmanjih gubitaka.

Kako je prikazano u poglavlju 4.3.1, izračun troška posjedovanja transformatora može se vrlo lako izračunati kada su poznate pogonske prilike na mjestu ugradnje, te bi navedena aplikacija trebala sadržavati i ovakvu funkcionalnost pomoću koje se mogu projicirati i usporediti troškovi isplativosti pojedinih vrsta transformatora.

Osim troška isplativosti posjedovanja, bitno je dobiti podatak o lokacijama gdje se gubici mogu najviše smanjiti ugradnjom određenog tipa i snage transformatora. U nekim slučajevima, najveće smanjenje gubitaka moguće je postići ugradnjom transformatora koji neće biti najisplativija opcija, gledano dugoročno s aspekta troška posjedovanja, što ostaje na odluci operatora distribucijskog sustava.

Prikazane funkcionalnosti aplikativnog rješenja omogućile bi korisnicima izradu brzih i kvalitetnih analiza. Kroz korištenje i daljnji razvoj aplikacije bilo bi moguće nadograđivati funkcionalnosti ovisno o uočenim potrebama i zahtjevima korisnika.

6 Zaključak

Uz elektroenergetske vodove, energetska transformatori čine osnovu distribucijskog elektroenergetskog sustava. Gledano s ekonomskog aspekta, udio vrijednosti distributivnih energetskih transformatora u ukupnoj vrijednosti imovine operatora distribucijskog sustava na promatranom području iznosi oko 6 %, dok vodovi čine udio od oko 53 % ukupne vrijednosti. S druge strane, u energetskim transformatorima stvara se značajan udio tehničkih gubitaka (između 30 i 50 %, ovisno o opterećenju). Stoga je kvalitetno upravljanje transformatorima, u smislu nabave novih jedinica boljih karakteristika ili međusobne zamjene postojećih, vrlo bitan predmet razmatranja za operatora distribucijskog sustava koji želi smanjiti gubitke u elektroenergetskoj mreži kojom upravlja i tako povećati kvalitetu svojeg poslovanja.

Općenito obilježje pogona transformatora u distribucijskoj mreži je podopterećenost, zbog čega su dominantni gubici praznog hoda transformatora. Do donošenja europskih propisa o energetske učinkovitosti, operator distribucijskog sustava mogao je sam određivati karakteristike transformatora koje je nabavljao odnosno ugrađivao u svoju mrežu. Stupanjem na snagu europske direktive 2009/125/EZ i uredbe 548/2014, u prvoj razini značajno su smanjeni dopušteni iznosi gubitaka praznog hoda novih transformatora. Smanjenje navedenih gubitaka postiže se korištenjem kvalitetnijih magnetskih materijala i tehnikama izrade jezgre transformatora, što nije značajno utjecalo na povećanje cijene u odnosu na prethodne izvedbe transformatora. Zbog toga, ugradnja distributivnog transformatora proizvedenog po razini 1 uredbe 548/2014 će se na većini lokacija isplatiti u odnosu na postojeći odnosno klasični transformator starije izvedbe. Tako će za transformator snage 100 kVA, koji je prosječno opterećen s 30 % nazivne snage, uštede na gubicima biti i do 60 % u usporedbi s postojećim starim transformatorom, odnosno do 40 % u usporedbi s novijim klasičnim transformatorom koji se nabavljao prije donošenja propisa o energetske učinkovitosti. Kod usporedbe transformatora većih snaga ova razlika će se još povećavati, no s povećanjem relativnog opterećenja u odnosu na nazivnu snagu, razlika u gubicima će se smanjivati zbog podjednake iznosa nazivnih gubitaka tereta.

U drugoj razini propisa za izvedbu energetskih transformatora koja na snagu stupa 1.7.2021. godine, gubici praznog hoda dodatno su smanjeni, a što je još važnije, smanjeni su dozvoljeni gubici tereta. Tehnologija smanjenja gubitaka tereta podrazumijeva povećanje utrošenog materijala za izradu transformatora, te znatno utječe na povećanje cijene novih transformatorskih jedinica. Dijelom zbog većeg utroška materijala, a dijelom zbog značajnog porasta cijena sirovina na tržištu, novi transformatori proizvedeni po ovim smjernicama su i do 40 % skuplji od transformatora iste snage proizvedenih po smjernicama razine 1 uredbe 548/2014. Time se mijenjaju uvjeti u kojima će ugradnja ovakvih transformatora biti isplativa. Naime, transformator najveću učinkovitost postiže u radnoj točki gdje su izjednačeni gubici praznog hoda i tereta, što se događa, ovisno o izvedbi transformatora, kod opterećenja između 20 i 40 % nazivne snage transformatora. Nakon te točke dominantni postaju gubici tereta, što znači da će transformatori sa sniženim

gubicima tereta dati još veće uštede od ostalih izvedbi transformatora. Na primjer, za transformator u prosjeku opterećen blizu svoje nazivne snage, transformatori proizvedeni po razini 2 uredbe 548/2014 stvorit će oko 20 % manje gubitaka u odnosu na transformatore proizvedene po smjernicama razine 1.

Isplativost ugradnje energetskog transformatora potrebno je promatrati ne samo sa stajališta smanjenja gubitaka, već i kroz trošak posjedovanja transformatora u njegovom životnom vijeku. U radu je prikazano da zbog trenutno značajno veće inicijalne cijene transformatora proizvedenih prema smjernicama razine 2 uredbe 548/2014, za manje snage transformatora (50 – 160 kVA) njihova isplativost neće doći do izražaja, odnosno da će transformator razine 1 reda veličine veće snage imati istu isplativost kao i transformator razine 2, za iste uvjete na lokaciji ugradnje. Tek kod većih snaga i relativnih opterećenja, transformatori razine 2 nazivne snage 400 kVA i veći, mogu biti isplativi i to u vremenskom razdoblju od 15 godina, osobito ako dolaze na mjesto starih transformatora s izraženim gubicima, gdje uštede mogu biti i do 30 %. No, kako je prikazano primjerima, usporedbom s klasičnim transformatorima proizvedenima do novih europskih propisa, isplativost se može postići za uže raspone opterećenja, a i u tom slučaju iznose tek 2 - 3 % u odnosu na trošak posjedovanja postojećeg transformatora. U promatranom distribucijskom području transformatori snaga 50 – 160 kVA čine preko 70 % udjela u ukupnom broju. Ugradnjom novih transformatora razine 2 moguće je postići cilj ukupnog smanjenja gubitaka, no gledano ekonomski, njihov trošak posjedovanja bit će opravdan samo za transformatorske jedinice većih snaga i to u određenim uvjetima.

S obzirom na činjenicu da će se nakon 1.7.2021. na europskom tržištu moći nabaviti samo transformatori koji udovoljavaju smjernicama razine 2, napravljena je analiza isplativosti ugradnje i eventualne međusobne zamjene takvih transformatora kojom je pokazano da se iznad prosječnog opterećenja od oko 50 % nazivne snage transformatora dugoročno isplati ugraditi transformator reda veličine veće snage od postojećeg.

Proizvođači energetskih transformatora u pravilu deklariraju životni vijek transformatora između 30 i 40 godina, no u praksi to zna biti i duže. To je razlog što se u floti transformatora određenog distribucijskog područja mogu naći transformatori različitih karakteristika, proizvedeni po propisima koji su se izmjenjivali u zadnjih 40-tak godina. Dakle, uz razmatranje uštede nabavom novih jedinica, potrebno je i kvalitetno upravljanje flotom postojećih transformatora kako bi se pronašla optimalna strategija pomoću koje će se podići učinkovitost cijelog sustava odnosno postići smanjenje gubitaka. Implementacija aplikativnog rješenja, koje bi objedinilo i analiziralo sve veći broj dostupnih podataka o pogonskim prilikama iz mreže, uvelike bi olakšala donošenje odluke o upravljanju transformatorima u distribucijskom području, na način kako je to predloženo u poglavlju 5 ovog rada.

U promatranom području preostalo je oko 63 % transformatora koji su stariji od 15 godina, odnosno za koje se može uzeti da imaju lošije osobine u pogledu energetske učinkovitosti. Promatrano isključivo sa stajališta smanjenja gubitaka, zamjenom preostalih transformatora novima proizvedenim po smjernicama razine 2

uredbe 548/2014, ugrubo se može procijeniti da bi se tehnički gubici u transformatorima smanjili za oko 30 %. Već je spomenuto da u ukupnoj vrijednosti imovine transformatori čine oko 5,5 % udjela. Spomenutom zamjenom starijih transformatora taj udio podigao bi se na oko 8,9 %. Istovremeno, postiglo bi se smanjenje ukupnih tehničkih gubitaka za barem 9 % (ako se uzme da gubici transformatora čine barem 30 % ukupnih tehničkih gubitaka), što svakako predstavlja značajne uštede i vrijedno je barem teoretskog razmatranja.

U radu je prikazano kako se upotrebom aplikativnog rješenja, kroz koje je moguće analizirati sve dostupne podatke vezane za pogon transformatora, može dobiti točnija ili čak potpuna slika o optimalnom upravljanju transformatorima u distribucijskom području.

Na kraju se može zaključiti kako se kvalitetnim upravljanjem flotom transformatora može značajno utjecati na smanjenje gubitaka u elektroenergetskom sustavu, te smanjiti ukupne troškove životnog vijeka transformatora.

7 Literatura

- [1] HEP ODS d.o.o., »Godišnje izvješće poslovanja za 2019. godinu,« 2020. [Mrežno]. Available: https://www.hep.hr/ods/UserDocslImages//publikacije/godisnje_izvjesce//godisnje2019.pdf. [Pokušaj pristupa 7 Travanj 2021].
- [2] R. Čučić, »Ekonomsko vrednovanje troškova gubitaka energetske transformatora - Završni rad,« Ekonomski fakultet u Rijeci, Rijeka, 2018.
- [3] T. Baričević, M. Skok, V. Dudjak, D. Vidović i K. Perić, Stručna i znanstvena potpora u izradi metodologije za planiranje gubitaka električne energije i metodologije za izračun ostvarenja gubitaka te procjene tehničkih gubitaka i neovlašteno preuzete električne energije, Zagreb: Energetski institut Hrvoje Požar, 2016.
- [4] Working Group on Losses Reduction WG CC-2015-2, »Reduction of Technical and Non-Technical Losses in Distribution Networks,« CIRED, 2017.
- [5] A. Pavić i K. Trupinić, »Gubici električne energije,« *ENERGIJA*, br. 2, pp. 182-215, 2007.
- [6] S. Kulkarni i S. Khaparde, *Transformer Engineering: Design, Technology, and Diagnostics*, Boca Raton: CRC Press, 2013.
- [7] V. Suphi. [Mrežno]. Available: <https://docplayer.biz.tr/113271-Orta-gerilim-sebekesi.html>. [Pokušaj pristupa 12 5 2021].
- [8] D. Prhal, »Energetski učinkoviti transformatori s amorfnom jezgrom - diplomski rad,« Fakultet elektrotehnike, računarstva i informatike, Osijek, 2017.
- [9] Z. Valković i A. Rezić, »Improvement of transformer core magnetic properties using the step-lap design,« *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, svez. 112, br. 1-3, pp. 413-415, 1992.
- [10] Ž. Janić, »Unapređenje konstrukcije energetske transformatora u cilju smanjenja dodatnih gubitaka - Doktorska disertacija,« Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2008.
- [11] S. Bouwman, J. Groeman i W. Hulshorst, »Cost savings by low-loss distribution transformers: the influence of fluctuating loads and energy price on the economic optimum,« KEMA T&D Consulting, Arnhem, 2003.
- [12] »Europa - Pravo EU-a - Uredbe, direktive i akti,« Službene internetske stranice Europske unije, [Mrežno]. Available: https://europa.eu/european-union/law/legal-acts_hr. [Pokušaj pristupa 16 veljača 2021].
- [13] *Direktiva 2009/125/EZ Europskog parlamenta i Vijeća od 21. listopada 2009. o uspostavi okvira za utvrđivanje zahtjeva za ekološki dizajn proizvoda koji koriste energiju*, Službeni list Europske unije, 2009.

- [14] »Nacionalni portal energetske učinkovitosti - Put prema 20-20-20 i dalje,« [Mrežno]. Available: <https://www.enu.hr/ee-u-hrvatskoj/20-20-20-i-dalje/>. [Pokušaj pristupa 6 Travanj 2021].
- [15] *UREDBA KOMISIJE (EU) 2019/1783 o izmjeni Uredbe (EU) br. 548/2014 o provedbi Direktive 2009/125/EZ Europskog parlamenta i Vijeća u pogledu malih, srednjih i velikih energetskih transformatora*, Službeni list Europske unije, 2019.
- [16] Hrvatska Elektroprivreda d.d., *Bilten 60 - Tehnički uvjeti za distribucijske uljne transformatore snage od 50 kVA DO 1000 kVA napona 10/0.42 kV, 20/0.42 kV i 20(10)/0.42 kV Klas. br. 4.26, N.012.04*, Zagreb, 1997.
- [17] R. Ćučić, »Pilot projekt implementacije energetski učinkovitih transformatora 20(10)/0,42 kV - prezentacija,« HEP ODS d.o.o., Zagreb, 2016.
- [18] D. Kaiser, *Elektrotehnički priručnik*, Zagreb: Tehnička knjiga, 1971.
- [19] B. Ćučić, N. Meško, M. Mikulić i D. Trstoglavec, »Distributivni transformatori sa sniženim gubicima praznog hoda,« u *11. savjetovanje HRO CIGRÉ*, Cavtat, 2013.
- [20] N. Meško, S. Tojić, R. Ćučić i I. Dundović, »Amorfni distributivni transformatori,« u *5. (11.) savjetovanje HO CIRED*, Osijek, 2016.
- [21] P. Van Tichelen, E. Peeters, L. Goovaerts, M. Stevens, T. Geerken i A. Vercalsteren, *LOT 2: Distribution and power transformers, Task 1 - 7, VITO - Vision on Technology*, 2011.
- [22] X. She, A. Q. Huang i R. Burgos, »Review of Solid-State Transformer Technologies and Their Application in Power Distribution Systems,« *EEE JOURNAL OF EMERGING AND SELECTED TOPICS IN POWER ELECTRONICS*, svez. 1, br. 3, pp. 186-198, 2013.
- [23] HEP ODS d.o.o. Elektra Bjelovar, »Tehnička baza podataka elektroenergetskog postrojenja,« Bjelovar.
- [24] I. Kuzle, H. Pandžić, T. Capuder, M. Zidar i N. Holjevac, »Razvoj distribucijske mreže Elektre Bjelovar u razdoblju 2013.-2033. godine,« Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zagreb, 2013.
- [25] P. Rohan, »Total ownership cost (TOC),« ABB, 2011.
- [26] M. Bolfek, S. Dominković, L. Gregor i K. I., »Web aplikacija za procjenu opterećenja transformatora,« u *5. (11.) savjetovanje HO CIRED*, Osijek, 2016.
- [27] D. Habijan, I. Baran, S. Dominković i M. Martić, »Aplikacija za održavanje elektroenergetskih objekata temeljena na GIS-u,« u *3. (9.) savjetovanje HO CIRED*, Sv. Martin na Muri, 2012.
- [28] D. Greenwood i I. Sarantakos, »ENHANCING THE UNDERSTANDING OF DISTRIBUTION NETWORK LOSSES,« *CIRED Madrid*, 2019..

8 Sažetak

UPRAVLJANJE DISTRIBUCIJSKIM TRANSFORMATORIMA

Energetski transformatori i vodovi su temeljni elementi distribucijskog elektroenergetskog sustava. Transformatori su električni uređaji s visokim stupnjem učinkovitosti, no unatoč tome, zbog velikog broja ugrađenih jedinica i iznosa energije koju pretvaraju s jedne naponske razine na drugu, njihovi gubici čine značajan udio u tehničkim gubicima elektroenergetskog sustava. Energetska učinkovitost jedan je od strateških ciljeva Europske Unije koji se ostvaruje donošenjem zakonskih propisa. Tako su direktivom 2009/125/EZ i uredbom 548/2014 određeni najveći dopušteni iznosi gubitaka energetske transformatora, prema čemu se mora prilagoditi tržište Europske Unije. U razinama koje ovi zakonski propisi reguliraju, stavljaju se zahtjevi za smanjenje gubitaka praznog hoda i gubitaka tereta energetske transformatora. Nakon 1.7.2021. na europskom tržištu moći će se nabavljati samo transformatori proizvedeni po razini 2 uredbe 548/2014 koje karakteriziraju značajna smanjenja gubitaka praznog hoda, ali i gubitaka tereta, što opet utječe na njihovu cijenu. Kroz primjere, u ovom radu prikazane su usporedbe iznosa gubitaka te isplativosti ugradnje energetske transformatora proizvedenih po razini 1 i razini 2 u odnosu na prijašnje izvedbe transformatora.

Smanjenje gubitaka u elektroenergetskom sustavu je od velikog interesa za operatora distribucijskog sustava, jer je to između ostalog pokazatelj kvalitete poslovanja. S obzirom na životni vijek energetske transformatora koji iznosi 40 godina i više, u floti transformatora jednog distribucijskog područja nalaze se razne izvedbe energetske transformatora, gledano prema godini proizvodnje, tipu, razini gubitaka i slično. Zbog toga je kvalitetno upravljanje flotom transformatora jedan od načina optimiziranja pogona i poslovanja operatora distribucijskog sustava čime se mogu kontrolirati gubici odnosno utjecati na njihovo smanjenje. Korištenjem suvremenijih uređaja za mjerenje i nadzor, te aplikativnih rješenja za obradu podataka u velikoj mjeri je olakšan posao analize pogonskih prilika u pojedinom dijelu elektroenergetskog sustava, temeljem čega se brže i lakše mogu donijeti kvalitetne odluke o odabiru optimalne transformatorske jedinice za pojedino mjesto ugradnje. U radu je prikazano kako strategija zamjene transformatora može utjecati na smanjenje gubitaka odnosno efikasnost pogona elektroenergetskog sustava, te su predloženi kriteriji za izradu aplikacije koje će obraditi dostupne podatke za energetske transformatore u floti distribucijskog područja.

9 Summary

MANAGEMENT OF DISTRIBUTION TRANSFORMERS FLEET

Power transformers and lines are fundamental elements of the power distribution system. Transformers are electrical devices with a high level of efficiency, but due to the large number of installed units and the amount of energy they convert from one voltage level to another, their losses make up a significant share of technical losses of the electrical power system. Energy efficiency is one of the strategic goals of the European Union, which is achieved through the adoption of legal regulations. Thus, Directive 2009/125 / EC and Regulation 548/2014 set the maximum allowed levels of power transformer losses, according to which the European Union market must be adjusted. According to the tiers regulated by these legal regulations, requirements are set for the reduction of no-load and load losses of power transformers. After 1.7.2021. only transformers manufactured according to tier 2 of regulation 548/2014 will be available on the European market, which are characterized by significant reductions in no-load losses, but also in load losses, which in turn affects their price. Through examples, this paper presents comparisons of the amount of losses and cost-effectiveness of power transformers produced according to tier 1 and tier 2 in relation to previous versions of transformers.

Reducing losses in the electricity system is of great interest to the distribution system operator, as it is, among other things, an indicator of the quality of operations. Considering the lifespan of power transformers, which is 40 years and more, transformer fleet in one distribution area includes various versions of power transformers, according to the year of production, type, level of losses, etc. Therefore, quality management of the transformer fleet is one of the ways to optimize the operation of distribution system operators, which can control losses or affect their reduction. The use of modern measuring and monitoring devices and application solutions for data processing has greatly facilitated the analysis of operating conditions in a particular part of the power system, based on which quality decisions on selecting the optimal transformer for a particular location can be made faster and easier. The paper shows how the transformer replacement strategy can affect the reduction of losses, ie the efficiency of power system operation, and proposes criteria for the development of an application that will process the available data for power transformers in the distribution area fleet.

10 Ključne riječi (Keywords)

Ključne riječi: gubici električne energije, energetski učinkoviti transformatori, upravljanje flotom transformatora

Keywords: power losses, energy efficient transformers, transformer fleet management

11 Životopis

Zvonimir Popović rođen je 1984. godine u Bjelovaru. Nakon završene osnovne škole, upisuje Prirodoslovno-matematičku Gimnaziju u Bjelovaru koju završava s odličnim uspjehom. Školovanje nastavlja upisom na Fakultet elektrotehnike i računarstva u Zagrebu, gdje 2007. godine diplomira na smjeru Elektroenergetika – Energetski sustavi. Kao stipendist HEP-a odmah se zapošljava u DP Elektri Bjelovar gdje radi na poslovima održavanja transformatorskih stanica, energetskih transformatora i kabela. Osim toga, bavi se mjerenjima i dijagnostičkim ispitivanjima opreme, relejnom zaštitom te izradom tehničke specifikacije za složenije postupke javne nabave. Od 2012. član je Hrvatske komore inženjera elektrotehnike, što mu omogućava da u svojstvu glavnog projektanta izrađuje projektnu dokumentaciju za rekonstrukciju transformatorskih stanica X/10(20) kV, te vodi realizaciju takvih investicija, ujedno i kao glavni nadzorni inženjer. Aktivno i redovno sudjeluje na konferencijama HRO Cigre i HO Cired, autoriranjem i koautoriranjem brojnih članaka. Oženjen je i otac dvoje djece. U slobodno vrijeme bavi se fotografijom, planinarenjem i sportskim penjanjem.