

RELATIVNO OPTEREĆENJE I IZBOR OPTIMALNE SNAGE ENERGETSKIH TRANSFORMATORA X/10 kV

V.M.Šiljkut, PD „Elektrodistribucija Beograd“ d.o.o, Beograd, Srbija
S.M.Maksimović, PD „Elektrodistribucija Beograd“ d.o.o, Beograd, Srbija

UVOD

Za jednu istu određenu snagu koju treba transformisati ili razvesti do korisnika, svaki od elemenata elektroenergetskog sistema (transformator, vod) može biti „jači“ ili „slabiji“. U prvom slučaju imaće višu cenu ali manje gubitke električne energije, a u drugom obratno. Stoga može da se pretpostavi da postoji neka optimalna snaga, odnosno struja pri izboru odgovarajućeg elementa elektroenergetskog sistema, sa stanovišta godišnjih ili ukupnih troškova. Preciznije rečeno, treba očekivati da će neko relativno ili specifično opterećenje biti najekonomičnije. Iz minimiziranja sume investicionih i godišnjih eksploatacionih troškova nekog elementa mreže moguće je iznaći njegovo optimalno opterećenje. Ono, posmatrano po jedinici preseka provodnika (kad je reč o vodovima) tj. po jedinici instalisane snage (kod transformatora), definiše tzv. ekonomsku gustinu struje, odnosno optimalno relativno opterećenje. Istraživanja u ovoj oblasti vršena su u Srbiji pedesetih i sedamdesetih godina XX veka, dovodeći do različitih rezultata, zaključaka i preporuka u domenu planiranja elektrodistributivne mreže (1). Sedamdesetih godina istraživanja su obuhvatila ne samo određivanje optimalnog preseka provodnika vodova tj. nominalne snage transformatora, nego i određivanje optimalnog naponskog nivoa pojedinih elemenata i delova elektrodistributivne mreže.

U uslovima delovanja izmenjenog Tarifnog sistema od 2001. i izmene pariteta prosečne cene električne energije, transformatora i vodova došlo je do promene vrednosti uticajnih parametara i potrebe da se ova istraživanja ponove. U „Elektrodistribuciji Beograd“ (u daljem tekstu: EDB) ona su sistematski vršena počev od 2005, najpre za nadzemne vodove srednjeg napona sa Al/č provodnicima (2), da bi do 2009. obuhvatila sve vrste sredjenaponskih vodova (nadzemni, podzemni) i tipove provodnika, svih karakterističnih preseka (3). Tokom 2009. istraživanje je prošireno i na energetske transformatore X/10 kV (pretežno 35/10 kV).

U ovom radu su prikazani rezultati upravo tog poslednjeg istraživanja i analize ekonomskog opterećenja energetskih transformatora X/10 kV. Na osnovu dobijenih vrednosti ovog parametra i prema očekivanim opterećenjima napojenih konzuma, određeni su opsezi optimalnog relativnog opterećenja za tipske snage ovih transformatora. Primenjena metodologija uvažava efekte povećanja prosečnih vrednosti cena za električnu energiju i obračunsku snagu, ali i ekvivalentnog vremena trajanja maksimalnih gubitaka, koji nastaju izmenama Tarifnog sistema za prodaju električne energije. S obzirom na to da od ovih triju promenljivih direktno zavisi relativno ekonomsko opterećenje transformatora, dobijeni opsezi njihovog optimalnog opterećenja su upravo oni u kojima je u budućnosti najbolje vršiti njihovo opterećenje, uzimajući u obzir i očekivana kretanja na tržištu električne energije.

OPIS KORIŠĆENE METODOLOGIJE

Ukupni godišnji troškovi transformatora mogu se predstaviti sledećom relacijom:

$$C_T(S_{no}) = p_{gT} \cdot N_T + P_{fe} \cdot (c_p + T_g \cdot c_e) + P_{cun} \cdot \left(\frac{S_{max}}{S_{no}} \right)^2 \cdot (j_{T-k}^2 \cdot c_p + \tau \cdot c_e) , \text{ gde su:}$$

p_{gT} – ukupna godišnja stopa transformatora tj. suma stopa dobiti, amortizacije i održavanja (u našim uslovima iznosi oko 9 %);

N_T – nabavna vrednost transformatora (sa transportom i montažom);

P_{fe} – gubici snage u gvožđu transformatora (praktično su konstantni ako se zanemare promene napona U i učestanosti f); pri nominalnim vrednostima U_n i f_n takođe su nominalni, P_{fen} ;

c_p – ekvivalentna godišnja cena (stav) tarife za snagu na mestu kupoprodaje električne energije Distribucija-Prenos;

T_g – godišnje vreme upotrebe transformatora (praktično jednako 8760 h ako se zanemari vreme remonta);

c_e – ekvivalentna godišnja cena (stav) tarife za energiju na mestu kupoprodaje;

P_{cun} – nominalni gubici u bakru transformatora

S_{max}/S_{no} – faktor promene gubitaka u bakru za opterećenje različito od nominalnog (ovde je jednak 1);

S_n – naznačena snaga transformatora, S_{max} – ostvarena godišnja vršna prividna snaga;

j_{T-k} – faktor jednovremenosti (istovremenosti) koji pokazuje koji relativan deo vršne snage transformatora (indeks T) pada u vreme vršnog opterećenja na mestu kupoprodaje (indeks k);

τ – godišnje ekvivalentno (fiktivno) trajanje maksimalnih gubitaka u bakru, tj. vreme koje pomnoženo sa gubicima u bakru, pri godišnjoj vršnoj snazi, daje stvarne godišnje gubitke energije u bakru.

Uopštavanje gornjeg izraza za bilo koji odnos $X = S_{max} / S_n$ vršne i naznačene snage transformatora može se postići menjanjem početne naznačene snage S_{no} na bilo koju drugu S_n , a sa njom i odgovarajućih godišnjih troškova. Za utvrđivanje zavisnosti nabavne cene transformatora od naznačene snage koriste se dva (približna) zakona: Vidmarov zakon i Linearan zakon.

Specifični investicioni troškovi transformatora i gubici

Vidmarov zakon preciznije i tehnički korektnije opisuje, stepenom funkcijom (približno 3/4), zavisnost rasta zapremine, težine i cene transformatora od njegove snage. Jednostavnosti radi, međutim, za potrebe ovog istraživanja usvojen je Linearni zakon. Naime, analiza podataka o cenama i gubicima transformatora za razne naznačene snage standardnih tipskih konstrukcija istih napona i istog proizvođača, često pokazuje gotovo linearnu zavisnost, naročito za uži dijapazon snaga (1). Pritom, produžeci odgovarajućih pravih (v. sliku 1) koje predstavljaju zavisnost nabavne vrednosti i gubitaka u gvožđu od naznačene snage odsecaju na ordinati odgovarajuće vrednosti različite od nule (kada snaga tj. struja opterećenja teži nuli pri datom naponu imali bi se i izolacija i gvožđe, pa su time i cena transformatora i gubici u gvožđu različiti od nule).

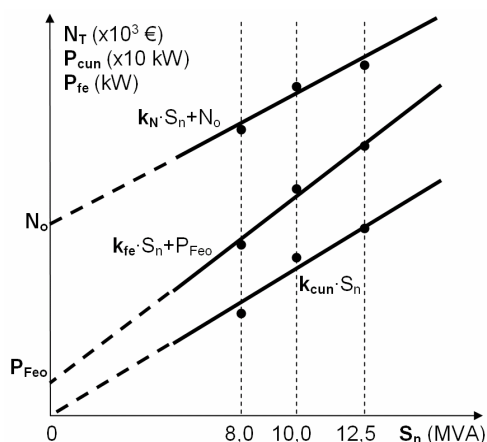


TABELA 1 – Vrednosti koeficijenata pravaca za transformatore X/10 kV

Transformatori	k_N (€/MVA)	N_0 (€)	k_{fe} (kW/MVA)	P_{Fe0} (kW)	k_{cun} (kW/MVA)
35/10 kV	5,697	61.618	0,8	3,0	5,1111
110/10 kV	7.185,3	192.479	0,588	11,47	4,7059

Slika 1 – Linearne zavisnosti investicionih troškova, gubitaka u gvožđu i bakru od naznačene snage transformatora

Za razliku od njih, produžena prava za nominalne gubitke u bakru teorijski, pa onda i praktično, prolazila bi kroz koordinatni početak (gubici koji zavise od opterećenja jednaki su nuli kad njega nema). Nagibi pravih sa prethodne slike: k_N , k_{fe} i k_{cun} su tzv. „koeficijenti pravca“ i zamenjuju, respektivno, funkcije nabavne vrednosti, gubitaka u gvožđu i naznačenih gubitaka u bakru od naznačene snage transformatora. Linearna zavisnost određena je metodom minimuma sume kvadrata greške (odstupanja) od stvarnih vrednosti (ilustrovanih na slici 1 tačkama). Stvarne vrednosti određene su na sledeći način:

Pri određivanju faktora k_N usvojene su budžetske cene transformatora, pribavljene od domaćeg proizvođača. Na njih su dodate cene transporta transformatora, pribavljene od preduzeća specijalizovanog za ove poslove, i troškovi montaže transformatora na osnovu poslednjih realnih radova na novim transformatorskim stanicama X/10 kV.

Radi određivanja koeficijenata k_{fe} i k_{cun} , iz (5) su usvojene tablične vrednosti gubitaka u gvožđu, P_{Fe} i naznačenih gubitaka u bakru, P_{cun} , za svaku pojedinačnu tipsku vrednost naznačene snage transformatora X/10 kV.

Na osnovu svih ovih podataka za tipske snage transformatora 35/10 kV i 110/10 kV respektivno, formirani su (shodno slici 1) grafici tipa:

$$N_T = f_1(S_n) = k_N \cdot S_n + N_o,$$

$$P_{fe} = f_2(S_n) = k_{fe} \cdot S_n + P_{Feo},$$

$$P_{cun} = f_3(S_n) = k_{cun} \cdot S_n.$$

Dobijeni rezultati – vrednosti „koeficijenata pravaca“ – dati su u pregledno u Tabeli 1.

Pokazuje se da je, korišćenjem Linearnog zakona, (1), relativno optimalno opterećenje transformatora:

$$X_{opt} = \sqrt{\frac{p_{gT} \cdot k_N + k_{fe} \cdot (c_p + T_g \cdot c_e)}{k_{cun} \cdot (j_{T-k}^2 \cdot c_p + \tau \cdot c_e)}}.$$

Parametri od uticaja na rezultate analize

Kao promenljive veličine u izrazu za relativno optimalno opterećenje transformatora, javljaju se još i: ekvivalentno vreme trajanja maksimalnih gubitaka, τ , koeficijent jednovremenog opterećenja, j_{T-k} , cene električne energije, c_e , i snage, c_p , tj. prosečna cena isporučenog kWh i prosečna cena aktivne snage (odobrene i prekomerne). Kako je kompletna analiza u ovom istraživanju bazirana na utvrđivanju troškova, kod određivanja prosečnih cena energije i snage korišćeni su podaci EDB o godišnjim iznosima sredstava koje je EDB platio EPS-u i prenosnoj mreži za preuzetu električnu energiju i odobrenu vršnu i prekomerno angažovanu aktivnu snagu. Analizirana su dva jednogodišnja perioda: kalendarska 2008. i period 1.8.2008. – 31.7.2009. Pri proračunu RSD/kWh i RSD/kW u €/kWh i €/kW korišćen je prosečan kurs od 81,9 RSD/€ u 2008, odnosno 88,627 RSD/€ za drugi navedeni jednogodišnji period. Kao rezultat ovog proračuna dobijamo, ustvari, donju granicu cene gubitaka električne energije, dok za gornju granicu možemo usvojiti cenu od 12 do 15 cent/kWh, ako se uzme u obzir neophodnost rasta cena električne energije u budućnosti, u Srbiji. U nastavku će biti prikazani načini na koje se izračunavaju ovi parametri od uticaja.

Prosečna cena preuzetog kWh, c_e . Troškovi koje EDB ima za utrošenu energiju su:

- Prema EPS: za aktivnu energiju (u kWh) po višem i nižem tarifnom stavu (VT i NT).
- Direktna nabavka od Lazarevca (TE Kolubara): za aktivnu energiju (u kWh), sve po VT.
- Prema EMS: mrežarina za:
 - aktivnu energiju (u kWh) po višem i nižem tarifnom stavu (VT i NT);
 - reaktivnu energiju (u kvarh) i
 - prekomerno preuzetu reaktivnu energiju (u kvarh).

Prosečna cena kWh (u RSD/kWh ili €/kWh) dobija se kao količnik sume rashoda (u RSD ili €) za kupljenu električnu energiju od elektrana (od EPS) i za mrežarinu koja se plaća EMS, u vremenskom periodu od godinu dana, i ukupno preuzete aktivne energije u kWh. Dakle:

$$c_e^{(god)} = \frac{\sum_{god} C_e}{\sum_{god} W_a} = \frac{\sum_{god} C_{ea}^{EPS+LAZ} + \sum_{god} C_{ea}^{EMS} + \sum_{god} C_{er}^{EMS} + \sum_{god} C_{er>}^{EMS}}{\sum_{god} W_a^{EPS} + \sum_{god} W_a^{LAZ}},$$

gde su:

c_e – prosečna cena kWh, tokom razmatranog jednogodišnjeg perioda;
 $C_{ea}^{EPS+LAZ}$ – troškovi za aktivnu energiju, finansijska obaveza prema EPS i TE Kolubara (Lazarevac);
 C_{ea}^{EMS} – troškovi za aktivnu energiju, obaveza prema EMS;
 C_{er} , $C_{er>}$ – troškovi za reaktivnu energiju i prekomerno preuzetu reaktivnu energiju u kvarh;
 W_a – ukupno preuzeta aktivna energija u kWh.

Ovako sračunata, prosečna vrednost 1 kWh je tokom 2008. bila: 2,97 RSD/kWh = 3,63 €€/kWh, a tokom perioda 1.8.2008. – 31.7.2009: 3,19 RSD/kWh = 3,60 €€/kWh.

Prosečna cena obračunskog kW, c_p . Po osnovu vršne snage ne postoje finansijske obaveze EDB prema EPS i TE Kolubara pri direktnoj nabavci električne energije. Stoga su troškovi koje EDB snosi za angažovanu (obračunsku) snagu isključivo obaveze koje ima prema EMS, i to je naknada za:

- sumu aktivnih snaga (u kW) do nivoa zbira pojedinačnih vršnih snaga odobrenih po obračunskim mernim mestima u TS VN/SN;
- sumu prekomerno angažovanih snaga (u kW) iznad nivoa odobrenih, po obračunskim mernim mestima u TS VN/SN.

Prosečna cena kW (u RSD/kW ili €€/kW) dobija se kao količnik rashoda za odobrenu i prekomerno angažovanu vršnu snagu i realno ostvarene maksimalne vršne snage, po obračunskim periodima. Dakle:

$$c_p^{(god)} = \frac{\sum_i C_p^{(god)}}{\sum P_V} = \frac{\sum_i C_{p\ odob}^{god} + \sum_i C_{\Delta p>}^{god}}{P_{obr} + \sum_i \Delta P_{i>}}, \text{ gde su:}$$

c_p – prosečna cena kW, tokom razmatranog jednogodišnjeg perioda;
 $C_{p\ odob}$ – troškovi za odobrenu maksimalnu aktivnu snagu na pojedinačnom, i -tom obračunskom mernom mestu prema EMS;
 $C_{\Delta p>}$ – troškovi za prekomerno angažovanu aktivnu snagu (iznad odobrene maksimalne) na svakom pojedinačnom obračunskom mernom mestu prema EMS;
 P_{obr} – ukupna odobrena obračunska snaga (suma odobrenih snaga po obračunskim mernim mestima);
 $\Delta P_{i>}$ – prekomerno preuzeta snaga na i -tom obračunskom mernom mestu (TS);
 ΣP_V – ukupna ostvarena obračunska vršna snaga.

Ovako sračunata, prosečna vrednost 1 kW je tokom 2008. bila: 39,86 RSD/kW = 48,67 €€/kW, a tokom perioda 1.8.2008. – 31.7.2009: 41,74 RSD/kW = 47,09 €€/kW.

Na osnovu sada dostignutih vrednosti c_e i c_p , zaključujemo da za donju granicu c_e može da se usvoji 3 €€/kWh, a za gornju, s ranijim obrazloženjem, 15 €€/kWh. U svim proračunima zadržan je sada postojeći odnos $c_p/c_e \approx 13$, pa je donja granica za cenu obračunske snage $c_p^{min} = 39$ €€/kW, a gornja $c_p^{max} = 1,95$ €€/kW.

Ekvivalentno vreme trajanja maksimalnih gubitaka, τ . Definiše se kao fiktivno vreme za koje bi konstantna maksimalna struja, I_{max} , uzrokovala gubitke električne energije jednake gubicima koje uzrokuje stvarna, vremenski promenljiva struja $i(t)$, za vreme T . U istraživanju koje je predmet ovog rada, ovaj parametar je određen na osnovu realnih dijagrama opterećenja analiziranih elemenata mreže – transformatora X/10 kV koji napajaju područje Beograda. Za njih su izračunate vrednosti godišnjeg ekvivalentnog vremena trajanja gubitaka, metodom integracije, prema:

$$\tau = \frac{\int_0^T P_{ij}^2(t) dt}{P_{ij\ max}^2} = \frac{\int_0^T I_{ij}^2 dt}{I_{ij\ max}^2}, \text{ pri zanemarenim mogućim fluktuacijama napona, frekvencije i } \cos\phi, \text{ gde su:}$$

P_{ij} , I_{ij} – trenutna snaga (struja) transformatorske ćelije i u trenutku j ,
 $P_{ij\ max}$, $I_{ij\ max}$ – maksimalna vrednost snage P_{ij} (struje I_{ij}) u periodu od 0 do T ,
 $T=8760$ h za prostu, $T=8784$ h za prestupnu godinu.

Vrednosti ovog parametra se značajno razlikuju za slučajeve normalnog pogona transformatora i nabacivanja tereta usled ispada drugih jedinica u istim ili susednim TS X/10 kV. Zbog toga je cela analiza urađena u dve osnovne varijante: za filtrirane dijagrame (prečišćene od transfera opterećenja tj. za normalni pogon) i za nefiltrirane (za sve zabeležene režime). Princip filtriranja hronoloških dijagrama opterećenja od havarijskih režima kao i od neispravnih merenja detaljno je objašnjen u (4). On se svodi na zamenu ovih vrednosti $i(t)$ u periodima u kojima se one javljaju, srednjom vrednošću I_{sr} koja se dobija iz preostalih perioda, $T < T$.

TABELA 2 – MINIMALNE, MAKSIMALNE I SREDNJE VREDNOSTI τ I j_{T-k}
ZA RAZMATRANI UZORAK OD 65 TRANSFORMATORA X/10 kV

Opsezi	Normalan pogon				Svi režimi			
	I_{max}	I_{sr}	τ	j_{T-k}	I_{max}	I_{sr}	τ	j_{T-k}
Vrednosti	[A]	[A]	[h]	[r.j.]	[A]	[A]	[h]	[r.j.]
Minimalna	192	82,65	1393,656	0,4955	234	82,69	535,952	0,3755
Maksimalna	720	276,26	4095,584	1,0000	798	233,83	3468,539	0,9958
Srednja	445	277,59	2792,809	0,8907	541	272,40	1982,089	0,7340

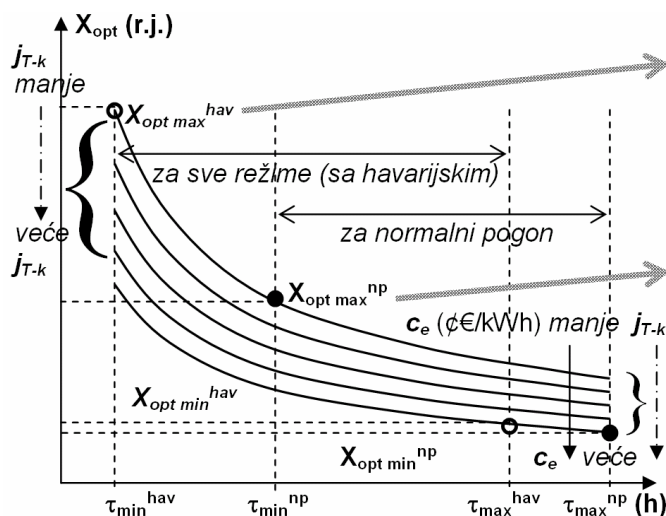
Generalno, vrednosti τ su se uvećale u odnosu na period pre 2001, zbog primene izmenjenog Tarifnog sistema, koji je doveo do „peglanja“ dnevnih dijagrama opterećenja. Sumarni rezultati podistraživanja τ za energetske transformatore X/10 kV dati su u Tabeli 2. Izvršena je i detaljnija analiza – izračunavanje veličina iz Tabele 2, prema naponskim nivoima i tipskim snagama transformatora.

Faktor jednovremenosti, j_{T-k} . Ovaj parametar pokazuje koji relativan deo vršne snage transformatora (njegov „lokalni“ maksimum) pada u vreme godišnjeg vršnog opterećenja na mestu kupoprodaje. U ovoj analizi nismo išli u detalje koji transformator pripada kom kupoprodajnome mestu, već smo ceo konzum EDB posmatrali kao jedinstven, tj. snabdeven sa jednog (fiktivnog) kupoprodajnog mesta EMS.

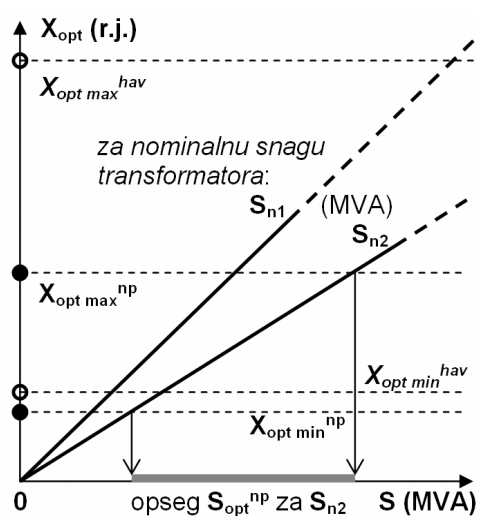
S obzirom na gore navedeno pojednostavljenje, faktor jednovremenosti j_{T-k} izračunava se kao količnik trenutnog opterećenja posmatranog transformatora u trenutku maksimalnog opterećenja celoga konzuma EDB i vršnog opterećenja istog transformatora, zabeleženog u analiziranom periodu. U zimskoj sezoni 2008/09. vršno opterećenje konzuma EDB registrovano je 13.1.2009. u 18:45, pa su za proračune uzeti podaci o trenutnim opterećenjima transformatora registrovani u tom trenutku. Sumarni rezultati proračuna faktora jednovremenosti za normalan pogon i sve režime prikazani su takođe u Tabeli 2. Ono što je važno istaći jeste to da je odgovarajuća analiza osetljivosti, sprovedena u sklopu ovog istraživanja, pokazala da je uticaj ovog parametra na krajnje rezultate izuzetno slab. Stoga se on može zanemariti.

Analiza osetljivosti i određivanje optimalnog opterećenja

Podaci iz Tabele 2 za najmanje i najveće vrednosti ekvivalentnog vremena trajanja maksimalnih gubitaka, τ , određuju opsege ovog parametra, za normalni pogon (*np*) i za sve zabeležene režime (*hav*). Oni su prikazani na apscisi grafika sa slike 2. Kad se i prosečne cene električne energije, c_e , i snage, c_p , menjaju u napred određenim i navedenim granicama, primena obrasca za relativno opterećenje transformatora, X_{opt} , rezultuje familijom krivih linija, ilustrovanih takođe na slici 2. Ukoliko i vrednosti koeficijenta jednovremenosti j_{T-k} variramo od manjih ka većim, u granicama takođe navedenim u Tabeli 2, doći će do neznatnog pomeranja cele familije krivih linija sa slike 2, i to u smeru naznačenom isprekidanim strelicama.



Slika 2 – Relativno optimalno opterećenje X_{opt} u funkciji od τ , pri različitim vrednostima cene el. energije; za veći j_{T-k} familija krivih se translira malo naniže.



Slika 3 – Poređenje optimalnog i očekivanog relativnog opterećenja; optimalno opterećenje za S_{n2} u norm. pogonu.

Za normalni pogon i sve režime, respektivno, najmanja i najveća vrednost X_{opt} (u r.j.) određuju opseg optimalnog relativnog opterećenja transformatora. Ova i dalja analiza su izvršene zasebno za transformatore 35/10 kV i 110/10 kV, omogućujući planeru lakši izbor njihove naznačene snage, prema očekivanom opterećenju konzuma koji treba da bude napojen.

Prema ovoj metodologiji, izbor naznačene snage transformatora zasnovan je na određivanju opsega optimalnog opterećenja u apsolutnim jedinicama (MVA), za pojedinačne tipske naznačene snage transformatora, S_{ni} , koje je ilustrovano na slici 3. Na ordinatu toga grafika nanete su najmanje i najveće vrednosti X_{opt} (r.j.) očitane sa grafika sa slike 2. Na slici 3 su u vidu pramena pravih linija koji se pruža iz koordinatnog početka, prikazana očekivana relativna opterećenja transformatora tipskih naznačenih snaga: $X_{opt}^{oc} = S_{oc} / S_{ni}$. Presek odgovarajuće prave iz pramena i po dveju horizontalnih pravih (X_{opt}^{min} i X_{opt}^{max}), za normalni pogon ili sve režime, određuje opseg optimalnog opterećenja (u MVA) za posmatranu jedinicu tipske snage S_{ni} , u svakom od ta dva pogonska režima.

Rezultati analize su pokazali, međutim, da je princip prikazan na slici 3 teorijski, tj. da se u stvarnosti ne dobija opseg, već samo minimalne vrednosti optimalnih opterećenja, ispod kojih nije ekonomično teretiti transformatore (v. Tabelu 3 u poglavlju Rezultati). Naime, ne samo $X_{opt}^{max}^{hav}$, nego i vrednosti $X_{opt}^{max}^{np}$ leže značajno iznad realno dostižnih (tj. trajno dozvoljenih) vrednosti opterećenja transformatora (u zoni na slici 3 u kojoj su prave u pramenu prikazane isprekidano). To praktično znači da je, pri sada dostignutim cenama električne energije i snage, i u normalnom pogonu i pri havarijama tj. nabacivanju tereta, pogon većine transformatora X/10 kV daleko od optimalnog. U sadašnjim uslovima, on bi se imao samo u slučaju nerealno velikog i nedopustivog preopterećenja. Ovaj rezultat analize pokazuje u kojoj je meri nužno i u narednim godinama nastaviti sa postepenim povećanjem cena električne energije i snage.

Poređenje relativnog optimalnog i trajno dozvoljenog opterećenja

Kad je reč o samoj ovoj analizi, rezultati postignuti na načine ilustrovane na slikama 2 i 3 ukazali su da je potrebno izvršiti i poređenje relativnog optimalnog opterećenja transformatora sa relativnim vrednostima njihovih trajno dozvoljenih opterećenja. Ova, dodatna, analiza urađena je zasebno za sve transformatore tipskih naznačenih snaga i za dva osnovna režima rada u pogledu ambijentalnih uslova – za zimski i za letnji period. Za osnovu su uzeti opšte prihvaćeni dijagrami trajno dozvoljenih opterećenja transformatora, za temperature ambijenta $\theta_a=0$ °C (zima) i $\theta_a=30$ °C (leto). Oni su predstavljeni pramenovima krivih linija tipa $K_2 = f(K_1)$, gde su:

$$\begin{aligned} K_1 &= S_1 / S_n ; & S_1 &= S_{preth} - \text{prethodno opterećenje transformatora;} \\ K_2 &= S_2 / S_n ; & S_2 &= S_{dozv} - \text{dozvoljeno opterećenje transformatora;} \\ & & S_n &- \text{naznačena snaga transformatora.} \end{aligned}$$

Za dato K_1 sa krive koja odgovara vremenu trajanja t vršnog opterećenja (uglavnom preopterećenja), očitava se vrednost koeficijenta K_2 (koji određuje vrednost dozvoljenog preopterećenja u tim uslovima). Ti, široko korišćeni, grafici prerađeni su tako da se dobiju grafici tipa $K_2 = f(S_1)$, za svaku pojedinačnu tipsku naznačenu snagu, S_n : 8; 10; 12,5; 31,5 i 40 MVA. Na taj način je omogućeno formiranje kombinovanih dijagrama relativnih optimalnih, relativnih trajno dozvoljenih i očekivanih opterećenja transformatora. Neki od njih su, radi ilustracije, prikazani u poglavlju Rezultati. Za konkretne uslove (meteorološke i uslove prethodnog opterećenja i dužine trajanja vršnog) kritičnog zimskog (sl. 4) ili kritičnog letnjeg dana (sl. 5), radna tačka transformatora će se nalaziti u zoni familije (pramena) krivih linija sa ovih grafika. Na osnovu ovih dijagrama je moguće dozvoljeno opterećenje (u r.j.) nekog energetskog transformatora X/10 kV, u tom kritičnom slučaju, uporediti sa njegovim relativnim ekonomskim (optimalnim) opterećenjem, dobijenim na osnovu analize koja je predmet ovog rada. Sa slika 4 i 5, recimo, vidimo da se velika većina vrednosti X (r.j) do kojih možemo preopterećivati transformator 35/10 kV snage 8 MVA nalazi u zoni ispod X_{opt}^{max} normalnog pogona, što je povoljno. Slični rezultati su dobijeni i za ostale tipske snage transformatora.

REZULTATI

Za transformatore 35/10 kV i 110/10 kV respektivno, formirani su dijagrami tipa onog sa slike 3. Maksimalne vrednosti optimalnih relativnih opterećenja na njima nalaze se značajno iznad 150% nominalnog opterećenja transformatora, pa su se praktično mogle odrediti samo donje granice optimalnih opterećenja transformatora. One su navedene u levim (nezatamnjanim) kolonama Tabele 3.

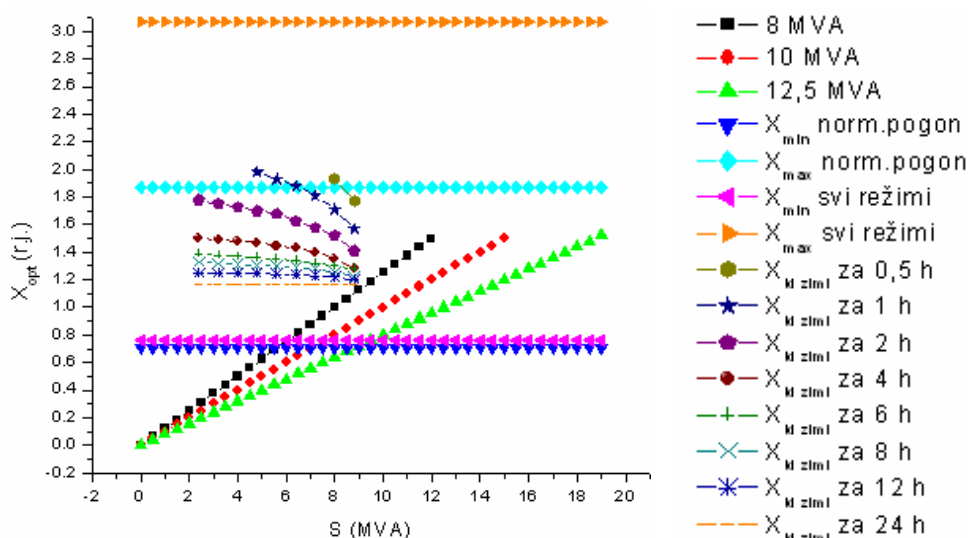
TABELA 3 – DONJE GRANICE EKONOMIČNIH OPTEREĆENJA TRANSFORMATORA X/10 kV

S_n (MVA)	S_{opt}^F (MVA)		S_{opt}^{NF} (MVA)	
	min	max	min	max
8	5,6232	14,9440	6,0992	24,5440
10	7,0290	18,6800	7,6240	30,6800
12,5	8,7863	23,3500	9,5300	38,3500
	Normalni pogon		Svi režimi	

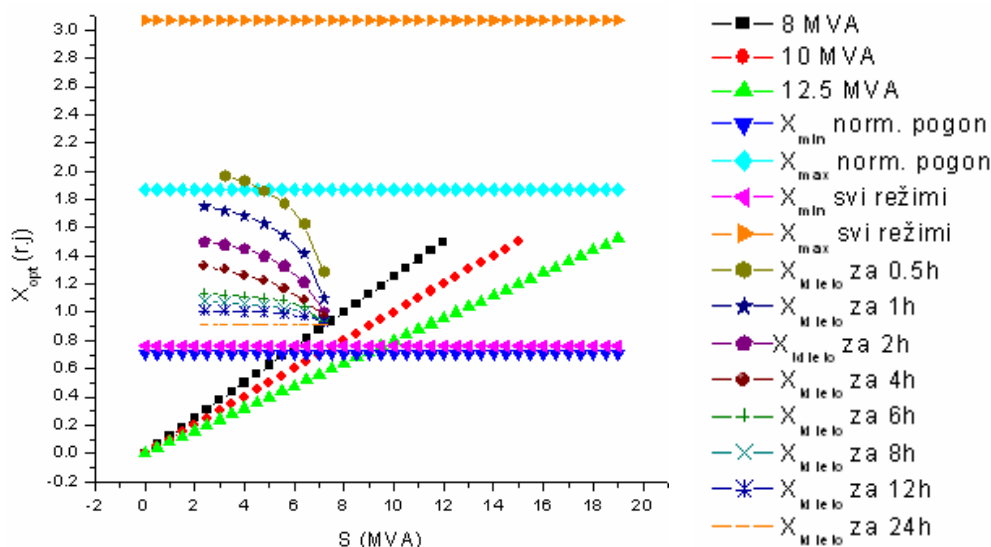
S_n (MVA)	S_{opt}^F (MVA)		S_{opt}^{NF} (MVA)	
	min	max	min	max
31,5	21,8925	63,8285	23,7447	105,2415
40	27,8000	81,0520	30,1520	133,6400
	Normalni pogon		Svi režimi	

Vrednosti $S_{opt\ min}^F$ (np) iz Tabele 3 su one koje bi bile optimalne pri $c_e=15$ €€/kWh. S obzirom da je reč o planskom horizontu, ne samo da ispod ovih vrednosti S_{opt} ne bi trebalo ići pri terećenju postojećih transformatora, nego bi i pri planiranju, ove vrednosti trebalo koristiti za izbor snage novih jedinica.

Iz grafika (familije krivih linija) na slikama 4 i 5 vidimo kolikom snagom (u MVA) neki transformator naznačene snage 8 MVA možemo prethodno teretiti, da bismo ga, pod određenim uslovima i tokom određenog vremena (u h), mogli preopteretiti i koliko (u r.j), npr. u slučaju da je potrebno da on primi deo opterećenja drugog transformatora (ispalag ili isključenog iz pogona) u istoj TS 35/10 kV.



Slika 4 – Dozvoljena relativna opterećenja (familija krivih linija) transformatora 35/10 kV, snage 8 MVA, za zimski period, u poređenju sa relativnim optimalnim (horizontalne prave) i očekivanim opterećenjima (pramen pravih)



Slika 5 – Dozvoljena opterećenja transformatora 35/10 kV snage 8 MVA, za letnji period, u poređenju sa relativnim optimalnim i očekivanim

ZAKLJUČCI

U zavisnosti od naznačene snage transformatora X/10 kV i relativnog optimalnog opterećenja ovih transformatora, određenog u prikazanom istraživanju, zasnovanom na obrađenim primerima godišnjih dijagrama opterećenja 65 transformatora X/10 kV, možemo konstatovati sledeće:

- Ekvivalentno vreme trajanja maksimalnih gubitaka (τ) određeno je metodom integracije, na osnovu realnih dijagrama opterećenja transformatora X/10 kV koji napajaju područje Beograda. Njegove vrednosti se značajno razlikuju za slučajeve normalnog pogona transformatora i nabacivanja tereta usled ispada drugih jedinica u istim ili susednim TS X/10 kV. Generalno, vrednosti τ su se uvećale u odnosu na raniji period, zbog primene izmenjenog Tarifnog sistema koja je dovela do „peglanja“ dnevnih dijagrama opterećenja.
- Relativna optimalna (ekonomska) opterećenja za normalni pogon sa slike 2 predstavljaju kretanje (smanjivanje) vrednosti ekonomski opravdanih opterećenja za transformatore X/10 kV pri planiranom porastu cena električne energije i snage, kao i pri povećanju vrednosti faktora jednovremenosti, $J_{T.k}$. Sa grafika ovoga tipa, koji su dobijeni kao rezultat ove analize, vidi se i to da ovaj poslednji faktor ne utiče značajno na promenu vrednosti relativnog opterećenja transformatora, X_{opt} .
- Proračunate vrednosti $X_{opt max}$ i $X_{opt min}$ pokazuju da je uputno ići na preopterećivanje transformatora. Međutim, optimalna relativna opterećenja se nalaze značajno iznad 50% preopterećenja transformatora, pa se praktično mogu odrediti samo donje granice optimalnih opterećenja (u MVA) transformatora, date u Tabeli 3. To su one vrednosti ispod kojih – za sadašnje uslove prosečnih cena električne energije i snage – ne bi trebalo ići pri terećenju transformatora, ako se želi njihov ekonomičan pogon. Tabela 3 može praktično da posluži za izbor nominalne snage transformatora, prema očekivanom opterećenju konzuma koji napaja.
- Analiza trajno dozvoljenih opterećenja transformatora tj. njihovo poređenje s očekivanim i ekonomskim (optimalnim) opterećenjima, pokazalo je (npr. grafici sa sl. 4 i 5) da se većina vrednosti X (r.j.) do kojih možemo preopteretiti transformatore nalazi u zoni ispod $X_{opt max}$ njihovog normalnog pogona, što je povoljno.

Ključne reči:

Relativno opterećenje, ekvivalentno vreme trajanja maksimalnih gubitaka, cena električne energije i snage, investicioni troškovi, optimalno opterećenje, naznačena snaga transformatora.

LITERATURA

1. Muždeka G, „Osnovne koncepcije perspektivnog napajanja Beograda električnom energijom do 2000. godine“ poglavlje „Relativno ekonomsko opterećenje transformatora“, iz nepublikovanog šireg materijala za Studiju „Osnovne koncepcije elektroenergetske mreže Beograda do 2000. godine“, ETF Beograd.
2. Šiljkut V.M, Maksimović S, Tanasković M. i Vulić G, 2006, „Ekonomska gustina struje i izbor optimalnog preseka Al/č provodnika nadzemnih vodova 10 kV“, „Elektroprivreda“, br. 4/2006, str. 98-105, i 27. savetovanje Juko CIRED Zlatibor, Srbija.
3. Shiljkut V.M. and Maksimovich S.M, 2010, „Load Economic Density of MV Lines and Asset Management Procedure of Their Conductors Optimal Cross-Section Selection“, CIRED Workshop, Lion, France
4. Šiljkut V.M, Maksimović S, Tanasković M. i Vulić G, 2006, „Odredjivanje ekvivalentnog vremena trajanja maksimalnih gubitaka na osnovu raspoloživih merenja u »Elektrodistribuciji Beograd«, „Elektrodistribucija“ br.1/2006, str. 9-12.
5. „Rade Končar Tehnički priručnik“, 1980, str. 171.