



## IZBOR KLASSE TRANSFORMATORA U DISTRIBUTIVNIM MREŽAMA

Jovan Radaković\*, Željko Popović\*\*, Dragan Matejić\*\*\*

\* EPS Distribucija, Elektrodistribucija Subotica, Subotica, jovan.radakovic@su.ev.rs

\*\* Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad

\*\*\* EPS Distribucija, Elektrodistribucija Subotica, Subotica, zeljko.popovic@su.ev.rs

\*\*\* EPS Distribucija, Elektrodistribucija Subotica, Subotica, dragan.matejic@su.ev.rs

**Kratak sadržaj:** U ovom radu je razmatran izbor distributivnih transformatora (DT) u postojećim distributivnim mrežama sa stanovišta minimizacije ukupnog troška, kojeg čine trošak investicija i svedeni troškovi održavanja i gubitaka snage i energije u toku životnog veka transformatora. Na osnovu prognoziranog vršnog i prosečnog opterećenja transformatora, njegovih parametara, vremena trajanja vršnih opterećenja i temperature ambijenta analiziran je izbor nazivne snage i odgovarajuće klase transformatora prema standardu EN 50464-1. Ovaj standard se odnosi na trofazne uljno hladene DT snaga od 50 kVA do 2500 kVA i napona primara do 36 kV, 50Hz. Njime su DT razvrstani u četiri klase prema stepenu korisnog dejstva, tako da najveće vrednosti stepena korisnog dejstva imaju transformatori u „A-klasi”, a najmanje u „D-klasi”. Analiza je sprovedena za transformatore 20/0.42 kV/kV, snage 250 kVA, 400 kVA i 630 kVA. Na osnovu dobijenih računskih rezultata, uz uvažavanje preuzetih podataka iz navedenog standarda i usvojenih parametara (nabavnih cena transformatora, cena gubitaka za električnu energiju i snagu i procenjenih eksploatacionih troškova), date su smernice za izbor transformatora odgovarajuće nazivne snage i klase za potrebe nove transformatorske stanice (TS).

**Ključne reči:** distributivni transformatori, standard EN 50464-1, stepen korisnog dejstva

### 1. UVOD

U cilju postizanja ekonomski opravdanog izbora distributivnog transformatora (DT) 20/0.42 kV/kV, baziranog na stepenu korisnog dejstva, neophodno je usvojiti niže navedene pretpostavke:

- novi DT će sa pretpostavljenim faktorom opterećenja i vršnim opterećenjem raditi narednih 30 godina,
- analiza i izbor DT, po osnovu klase gubitaka, će biti u skladu sa standardom EN 50464-1 za A,B, C i D-kl [3],
- za rešavanje pitanja optimalnog izbora DT, kako po kl. gubitaka, tako i po tipskoj snazi, u ovom radu je uz napred navedene pretpostavke ocenjeno da treba sprovesti analizu i komparaciju za tri tipske, najčešće korišćene, nazivne snage: 250, 400 i 630 kVA,
- godišnji rad svakog DT je:  $t_{1g} = 1$  god (8760 h),
- nab.vredn. DT 250, 400 i 630 kVA za A, B, C i D-kl:

250 kVA:  $T_{na2}=7,00$ ;  $T_{nb2}=6,30$ ;  $T_{nc2}=5,60$ ;  $T_{nd2}=4,80$  (k€),

400 kVA:  $T_{na4}=11,2$ ;  $T_{nb4}=10,10$ ;  $T_{nc4}=8,96$ ;  $T_{nd4}=7,68$  (k€),

630 kVA:  $T_{na6}=16,8$ ;  $T_{nb6}=15,3$ ;  $T_{nc6}=13,44$ ;  $T_{nd6}=11,52$  (k€)

- cena el. enrgije, bitne za izračunavanje troškova po osnovu gubitaka u bakru i gvožđu je  $C_w=0,06$  (€/kWh),
- cena za trošak snage gubitaka je  $C_p=4,5$  (€/kW, god),
- snage gubitaka u gvožđu i bakru, pri nazivnom naponu i opterećenju, za DT snaga 250, 400 i 630 kVA, po A, B, C i D-klasi su date u Tabeli 1,

U nastavku ovog rada je dat prikaz DT prema standardu EN 50464-1 za nazivni napon primara 20 kV, razvrstanih u klase A, B, C i D sa pripadajućim nazivnim vrednostima gubtaka u gvožđu i bakru – Tabela 1, [3].

Tabela 1

$S_n$ (kVA)	A-klasa(kW)		B-klasa(kW)		C-klasa(kW)		D-klasa(kW)	
	$P_{fe}$	$P_{cu}$	$P_{fe}$	$P_{cu}$	$P_{fe}$	$P_{cu}$	$P_{fe}$	$P_{cu}$
50	0,09	0,75	0,11	0,87	0,13	1,10	0,15	1,35
100	0,15	1,25	0,18	1,47	0,21	1,75	0,26	2,15
160	0,21	1,70	0,26	2,00	0,30	2,35	0,38	3,10
250	0,30	2,35	0,36	2,75	0,43	3,25	0,53	4,20
400	0,43	3,25	0,52	3,85	0,61	4,60	0,75	6,00
500	0,51	3,90	0,61	4,60	0,72	5,50	0,88	7,20
630	0,60	4,60	0,73	5,40	0,86	6,50	1,03	8,40
1000	0,77	7,60	0,94	9,00	1,10	10,50	1,40	13,00
1250	0,95	9,50	1,15	11,00	1,35	13,50	1,75	16,00
1600	1,20	12,00	1,45	14,00	1,70	17,00	2,20	20,00
2000	1,45	15,00	1,80	18,00	2,10	21,00	2,70	26,00

Uvažavajući podatke za nazivne gubitke u DT, navedene u Tabeli 1 i pretpostavljajući, za ovaj rad, da DT rade sa nazivnim faktorom snage  $\cos\varphi_n=0,9$ , dobijaju se nazivne vrednosti stepena korisnog dejstva ( $\eta_n$ ) navedene u Tabeli 2.

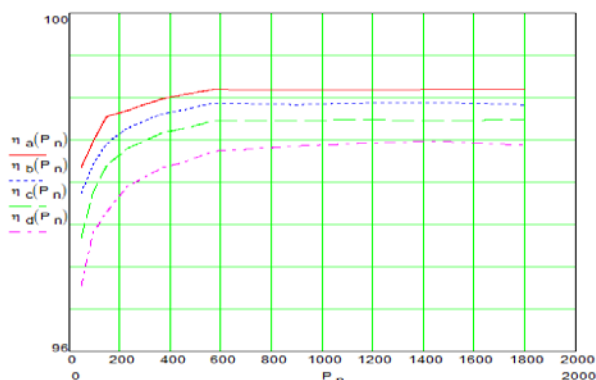
Tabela 2

$\eta_n$ (%)	$S_n$ (kVA)										
	50	100	160	250	400	500	630	1000	1250	1600	2000
$\eta_A$	98,17	98,47	98,77	98,84	98,98	99,03	99,09	99,08	99,08	99,09	99,09
$\eta_B$	98,87	98,20	98,45	98,63	98,80	98,85	98,93	98,91	98,93	98,94	98,91
$\eta_C$	97,34	97,87	98,19	98,39	98,57	98,63	98,72	98,72	98,73	98,72	98,73
$\eta_D$	96,77	97,39	97,64	97,94	98,16	98,23	98,36	98,42	98,45	98,48	98,43

Podaci iz Tabele 2 su prikazani i u graf. obliku, sl. 1.

Treba ukazati na razliku procentualnih vrednosti stepena korisnog dejstva između  $\eta_A$  i  $\eta_D$  za dva područja snaga:

- za snage 50 ÷ 400 kVA,  $\eta_A - \eta_D \approx 1\%$ ,
- za snage 630 ÷ 2000 kVA,  $\eta_A - \eta_D \approx 0,7\%$ .



Sl.1 Karakteristike stepena korisnog dejstva za DT po klasama A,B,C,D - prema EN50464

## 2. PRIKAZ SVEDENIH TROŠKOVA ZA DT U TOKU CELOKUPNOG EKSPLOATAACIONOG VEKA

U nameri da se ukaže ne samo na kvalitativnu, već i na kvantitativnu razliku između ukupnih troškova za 30-to godišnji rad DT, zavisno od toga da li je isti klase A, B, C ili D i u skladu sa usvojenim pretpostavkama, izabrani su DT tipskih snaga 250, 400 i 630 kVA, te je za naznačeno opterećenje izvršeno izračunavanje gubitaka i po tom osnovu i izračunavanje troškova.

Za izračunavanje svedenih ukupnih troškova za navedeni vremenski period  $t=30$  god, na termin početka rada transformatora, koriste se sledeći izrazi [4]:

a) izraz za izračunavanje fiksnih troškova:

$$T_f = I_V + \sum_{t=0}^{30} \frac{1}{(1+d)^t} (P_{Fe} \cdot C_P + P_{Fe} \cdot C_W \cdot 8760) \quad (1)$$

$C_P$  - cena gubitaka snage (€/kW),

$C_W$  - cena gubitaka energije (€/kWh).

b) izraz za izračunavanje promenljivih troškova je:

$$T_p = \sum_{t=0}^{30} \frac{1}{(1+d)^t} \left\{ P_{Cu}^n \cdot \left( \frac{S_{tr}}{S_n} \right)^2 \cdot EQ_F \cdot C_P + P_{Cu}^n \cdot \left( \frac{S_{tr}}{S_n} \right)^2 \cdot EQ_F \cdot C_W \cdot 8760 \right\} \quad (2)$$

$P_{Cu}^n$  - snaga gubitaka u bakru pri nazivnom opterećenju,

$S_n$  - nazivna snaga transformatora,

$S_{tr}$  - tekuća vršna snaga transformatora,

$EQ_F$  - faktor gubitaka, prema lit [5], izračunava se:

$$EQ_F = (LD_F)^{1.912} \quad (3)$$

$LD_F$  - faktor opterećenja,

$d$  - diskontna stopa,

$t$  - vreme (god). Usvojeno je da je prosečno opterećenje transformatora  $LD_F = 40\%$  i  $d = 8\%$ .

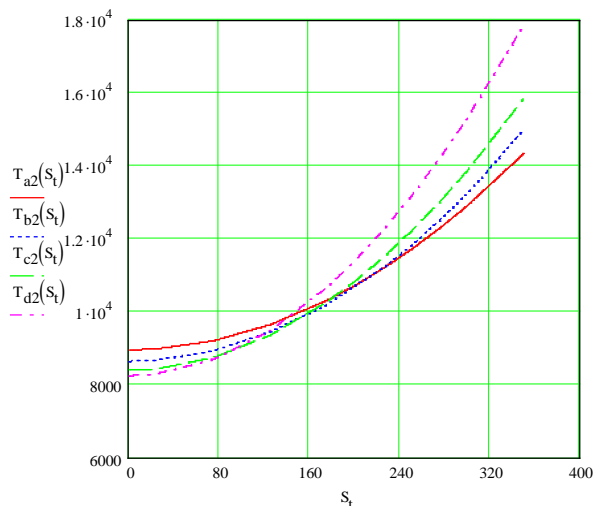
Na osnovu relacija (1)-(3) i parametara datih u prvom poglavlju, izračunavaju se karakteristike troško-

va, koje uključuju investicioni trošak i trošak budućih gubitaka snage i energije, za različite veličine i klase transformatora. Karakteristike troškova u funkciji vrednosti vršnog opterećenja transformatora su prikazane u nastavku sl. 2, sl.3 i sl.4.

### 2.1. Prikaz svedenih uk. troškova za DT 250 kVA

U skladu sa napred navedenim matematičkim izrazima

i usvojenim polaznim parametarskim podacima, sprovedeno je izračunavanje svedenih uk. troškova (€) za 30-to godišnji eksploatacioni vek DT 250 kVA, A, B, C i D klase za opseg vršnih snaga 0-350 kVA.



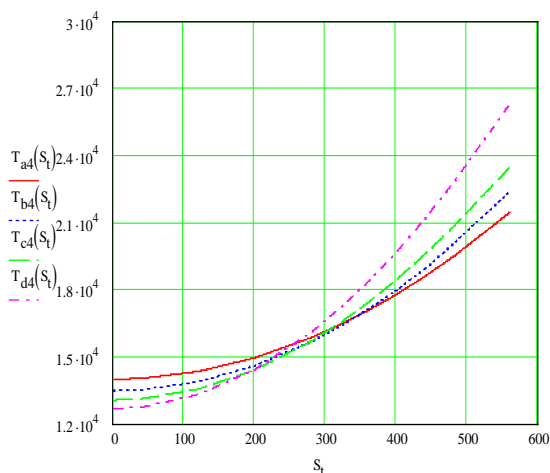
Dobijeni rezultati su prikazani u obliku matematičkih funkcija na sl. 2, gde su korišćene sledeće oznake:

- $T_{a2}(S_t)$ : svedeni uk. troškovi za DT 250 kVA A-klase,
  - $T_{b2}(S_t)$ : svedeni uk. troškovi za DT 250 kVA B-klase,
  - $T_{c2}(S_t)$ : svedeni uk. troškovi za DT 250 kVA C-klase,
  - $T_{d2}(S_t)$ : svedeni uk. troškovi za DT 250 kVA D-klase
- Sl.2 Svedeni ukupni troškovi (€) za 30-to godišnji rad DT 250 kVA A, B, C i D-kl za opseg vršnih snaga 0-350kVA

### 2.2. Prikaz svedenih uk. troškova za DT 400 kVA

Kao i u prethodnom slučaju i u ovom su na isti način izračunati svedeni ukupni troškova (€) za 30-to godišnji eksploatacioni vek, ali za DT 400 kVA, A, B, C i D-kl za opseg vršnih snaga 0-560 kVA. Dobijeni rezultati su prikazani u obliku matematičkih funkcija na sl. 3, gde su korišćene sledeće oznake:

- $T_{a4}(S_t)$ : svedeni uk. troškovi za DT 400 kVA A-klase,
- $T_{b4}(S_t)$ : svedeni uk. troškovi za DT 400 kVA B-klase,
- $T_{c4}(S_t)$ : svedeni uk. troškovi za DT 400 kVA C-klase,
- $T_{d4}(S_t)$ : svedeni uk. troškovi za DT 400 kVA D-klase

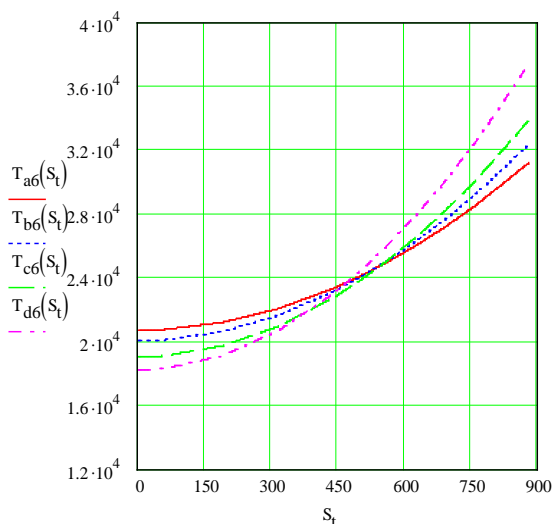


Sl.3 Svedeni ukupni troškovi (€) za 30-to godišnji rad DT 400 kVA A, B, C i D-kl za opseg vršnih snaga 0-560kVA

### 2.3. Prikaz svedenih uk.troškova za DT 630 kVA

I u ovom slučaju su na isti način izračunati svedeni uk. troškovi (€) za 30-to godišnji eksploatacioni vek, kao i u prethodnim slučajevima, ali za DT 630 kVA A, B, C i D-kl za opseg vršnih snaga 0-880 kVA. Dobijeni rezultati su prikazani u obliku matematičkih funkcija na sl. 4, gde su korišćene sledeće oznake:

- $T_{a6}(S_t)$ : svedeni uk. troškovi za DT 630 kVA A-klase,
- $T_{b6}(S_t)$ : svedeni uk. troškovi za DT 630 kVA B-klase,
- $T_{c6}(S_t)$ : svedeni uk. troškovi za DT 630 kVA C-klase,
- $T_{d6}(S_t)$ : svedeni uk. troškovi za DT 630 kVA D-klase.



Sl.4 Svedeni ukupni troškovi (€) za 30-to godišnji rad DT 630 kVA A, B, C i D-kl za opseg vršnih snaga 0-880kVA

## 3. PROCEDURA ZA IZBOR TRANSFORMATORA

Izbor DT po pitanju nazivne snage i klase se vrši primenom sledećih koraka (procedure):

1. Izračunavanje karakteristika troškova, na način prikazan u poglavlju 2, za sve razmatrane/dostupne snage i klase transformatora.
2. Prognoza vršne snage sa kojom će transformator raditi u budućnosti,
3. Određivanje faktora dugotrajnih preopterećenja koje transformator može da podnese bez uticaja na gubitak životnog veka. Ovaj faktor se određuje na osnovu parametra definisanih u [6,7,8] (temperatura ambijenta, prethodno opterećenje transformatora, vremena trajanja vršnih (pre)opterećenja).
4. Određivanje mogućih veličina i klasa transformatora na osnovu koraka 2 i 3.
5. Na osnovu karakteristika troškova izračunatih u koraku 1, sličnih prikazanim na slikama 2, 3 i 4, bira se transformator (nazivna snaga i klasa) koji zadovoljava uslove iz tačaka 2. i 3. uz minimalne svedene ukupne troškove.

Ovde je potrebno naglasiti da opisna procedura, pored veličine transformatora (naznačene snage), omogućuje izbor i najekonomičnije klase transformatora [3] i na taj način unapređuje do sada široko primenjivanu proceduru za izbor veličine transformatora predloženu u literaturi [4], koja ne razmatra izbor klase transformatora.

Na osnovu napred navedenih koraka, u nastavku je prikazan izbor nazivne snage i klase transformatora za sledeće slučajeve:

- I Prognozirana vršna snaga **DT je 350 kVA**, prosečna temperatura ambijenta u periodu najvećih opterećenja je  $0^{\circ}\text{C}$ , trajanje vršnih opterećenja je 3 sata, a prethodno opterećenje DT je 180 kVA.
- II Prognozirana vršna snaga **DT je 350 kVA**, prosečna temperatura ambijenta u periodu najvećih opterećenja je  $0^{\circ}\text{C}$ , trajanje vršnih opterećenja je 4 sata, a prethodno opterećenje DT je 230 kVA.
- III Prognozirana vršna snaga **DT je 550 kVA**, prosečna temperatura ambijenta u periodu najvećih opterećenja je  $10^{\circ}\text{C}$  (temperatura ambijenta u unutrašnjosti montažno-betonske ili zidane transformatorske stanice u zimskom periodu), trajanje vršnih opterećenja je 3 sata, a prethodno opterećenje transformatora je 280 kVA.

### 3.1 Slučaj I

Uzimajući u obzir gore definisane ulazne podatke, moguće opcije za DT su:

- DT nazivne snage 250 kVA, A-klase. Ovaj transformator može raditi sa (pre)opterećenjem od 150% u vreme vršnih opterećenja bez gubitka (smanjenja) životnog veka u datim okolnostima [6,7,8], čime je zadovoljeno prognozirano vršno opterećenje. Svedeni ukupni troškovi za ovaj DT su najmanji za A-kl. i iznose 13.800 €. Ova vrednost je očitana na sl.2
- DT nazivne snage 400 kVA, A-klase. Svedeni uk. troškovi za ovaj transformator i navedeno vršno opterećenje su najmanji za A-klasu i iznose 16.800 €. Ova vrednost je očitana na sl. 3.
- DT nazivne snage 630 kVA, C-klase. Svedeni uk. troškovi za ovaj transformator i navedeno vršno opterećenje su najmanji za D-kl. i iznose 22.500 €. Ova vrednost je očitana na sl.4.

Na osnovu napred navedenoga, u ovome slučaju se bira DT nazivne snage **250 kVA, A-klase**.

### 3.2 Slučaj II

Uzimajući u obzir prethodno definisane ulazne podatke, moguće opcije za DT su:

- DT nazivne snage 250 kVA, A-klase. Ovaj transformator može raditi sa (pre)opterećenjem od 140% u vreme vršnih opterećenja bez gubitka (smanjenja) životnog veka u datim okolnostima [6,7,8]. Uz ovaj faktor preopterećenja, transformator nazivne snage 250 kVA može da zadovolji prognozirano vršno opterećenje bez gubitka (smanjenja) životnog veka, ali se ovaj rezultat nalazi na samoj granici (352 kVA u odnosu na 350 kVA). Zbog toga, kao i zbog neizvesnosti po pitanju vrednosti svih navedenih parametara, transformator ove nazivne snage se ne razmatra kao moguća opcija pa se ne razmatraju ni svedeni ukupni troškovi za ovaj transformator.
- DT nazivne snage 400 kVA, A-klase. Svedeni uk. troškovi za ovaj transformator i navedeno vršno opterećenje su najmanji za A-klasu i iznose 16.800 €. Ova vrednost je očitana na sl. 3.
- DT nazivne snage 630 kVA, A-klase. Svedeni uk. troškovi za ovaj transformator i navedeno vršno opterećenje su najmanji za D-klasu i iznose 22.500 €. Ova vrednost je očitana na sl. 4.

Na osnovu napred navedenoga, u ovome slučaju se bira DT nazivne snage **400 kVA, A-klase**.

### 3.3 Slučaj III

Uzimajući u obzir sve ulazne podatke, moguće opcije za DT su:

- DT nazivne snage 400 kVA, A-klase. Ovaj transformator može raditi sa (pre)opterećenjem od 145% u vreme vršnih opterećenja bez gubitka (smanjenja) životnog veka u datim okolnostima. Svedeni uk. troškovi za ovaj transformator su najmanji za A-klasu i iznose 21.000 €. Ova vrednost je očitana na sl.3.
- DT nazivne snage 630 kVA, A-klase. Svedeni uk. troškovi za ovaj transformator i navedeno vršno opterećenje su najmanji za A-kl. i iznose 25.300 €. Ova vrednost je očitana na sl. 4.

Na osnovu napred navedenoga, u ovome slučaju se bira DT nazivne snage **400 kVA, A-klase**.

## 4. ZAKLJUČAK

U ovom radu je prezentovana procedura za izbor nazivne snage i klase DT kod aktiviranje nove TS koji obezbeđuje minimum svedenih ukupnih troškova u životnom veku transformatora uz zadovoljavanje operativnih ograničenja. Uvažena je mogućnost dugotrajnih preopterećenja transformatora (3-4 sata u toku 24 časa) koja ne dovode do gubitka (smanjenja) njegovog životnog veka. Predložena procedura uvažava postojanje različitih klasa transformatora [3] u procesu donošenja odluke o izboru najekonomičnijeg transformatora u distributivnim mrežama, što nije razmatrano u jednoj od do sada najšire primenjivanih procedura opisanih u [4].

Za ovako dobijen rezultat neophodno je navesti i sledeće napomene:

- nabavne cene DT će biti i ubuduće uglavnom konst,
- cene el. energije i gub. snage će se ubuduće povećavati,
- vrednosti transformatorskih gubitaka  $P_{fe}$  i  $P_{cu}$  će ubuduće biti nepromenjene u odnosu na podatke u lit [3].

Promene cena električne energije, odnosno troška po osnovu gubitaka snage i energije, će uticati na izgled (oblik) karakteristika na sl. 2, 3 i 4, što može uticati na izbor najpovoljnijeg DT za date uslove. Zbog toga, kao i zbog neizvesnosti po pitanju nekih drugih parametara (npr. temperature okoline, prognoziранog vršnog opterećenja DT, trajanja vršnih opterećenja), u budućim istraživanjima će se obraditi procedura za izbor najpovoljnijeg DT (nazivne snage i klase) u prisustvu neizvesnosti, gde se izbor DT bazira na (pr)oceni rizika, korišćenjem odgovarajućih alata za merenje i upravljanje rizikom.

## 5. LITERATURA

- [1] J. Krstović, R. Radosavljević „Projektovanje DT“ Akademska misao, Bgd 2009.
- [2] Energetski transformatori, međunarodni standard IEC 60076, izdanje 3.0, 2011-04,
- [3] Three-phase oil immersed distribution transformers 50 Hz, from 50 kVA to 2500 kVA, with highest voltage for equipment not exceeding 36 kV, part-1: general requirements (EN 50464-1:2007),
- [4] H.L.Willis, Power Distribution Planning Reference Book, Marcel Dekker Inc., New York, 2004.
- [5] M.W. Gustafson, J.S. Baylor, „The equivalent hours loss factor revisited“ IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 3, No. 4, pp. 1502-1508, Nov. 1988.
- [6] IEEE Std C57.91-1995(R2002), IEEE Guide for Loading Mineral-Oil Immersed Transformers.
- [7] United States Department of the Interior Bureau of Reclamation, Permissible loading of oil-immersed transformers and regulators, 1991.
- [8] IEC 60076-7:2005-Part 7, Loading guide for oil-immersed power transformers.