

DOI: [10.46793/CIGRE37.A2.01](https://doi.org/10.46793/CIGRE37.A2.01)**A2.01****OPTIMIZACIJA ENERGETSKIH TRANSFORMATORA STEPENOVANE
IZOLOVANOSTI****OPTIMIZATION OF POWER TRANSFORMERS WITH GRADED INSULATION****Milan Ćelović, Jelena Ćelović, Aleksandr Bushev, Ana Pastor, Lenka Cvetković***

Kratak sadržaj: Izolacioni sistem igra ključnu ulogu u bezbednom i pouzdanom radu svih električnih mašina, a posebno kada je reč o energetskim transformatorima. Projektuje se tako da osigura izdržljivost transformatora na dielektrična i termička naprezanja pri raznim ambijentalnim i eksploatacionim uslovima. Projektovanje izolacionog aranžmana jedan je od najvažnijih inženjerskih aspekata u proizvodnji transformatora, posebno u slučaju visokonaponskih energetskih transformatora. Praćenjem kako adekvatnih procedura, tako i proračuna i analiza, upotreba odgovarajućih izolacionih materijala, kontrolisani proizvodni procesi osiguravaju kvalitet i pouzdanost transformatora, a robusnost izolacionog aranžmana neophodna je za nesmetan i dug radni vek transformatora. Sveobuhvatna verifikacija pravila za dimenzionisanje od suštinskog je značaja za povećanje pouzdanosti, kao i za optimizaciju troškova materijala što otvara temu o mogućnostima optimizacije u zavisnosti od tehničkih zahteva za parametre izolovanosti, a sve u skladu sa zahtevima od strane Investitora. Fokus rada usmeren je na energetske transformatore naponskog nivoa 110kV kod kojih je visokonaponski priključak realizovan u „YN“ sprezi, što je gotovo uvek slučaj posmatrajući jedinice instalirane na teritoriji Republike Srbije. Predviđena je analiza detalja izolovanosti 110kV priključka u varijaciji sa punom izolovanosti (*eng. uniform insulation*) i stepenovanom izolovanosti (*eng. graded insulation*), kao i uticaj ovog parametra na gabarite, a samim tim i na cenu finalnog proizvoda. Kako su zahtevi za nivoom izolovanosti priključaka energetskih transformatora i odgovarajuća dielektrična ispitivanja ulazni parametar prilikom projektovanja, odnosno deo tehničke specifikacije Naručioca, deo rada takođe predviđen je za razmatranje suštinske potrebe pune izolovanosti 110kV priključaka. Ideja jeste da ovo poglavlje bude polazna osnova za izradu novih radova na ovu temu sa stanovišta operatora distributivnih i prenosnih mreža. Cilj rada jeste pregled mogućih tačaka za optimizaciju energetskog transformatora koristeći stepenovanu izolovanost umesto pune izolovanosti visokonaponskog priključka, kao i otvaranje novih diskusija na ovu temu sa stanovišta proizvođača transformatora, operatora distributivnih / prenosnih mreža i naravno krajnjih korisnika.

* Milan Ćelović, Comel transformatori d.o.o., Milan.Celovic@comel.co.rs

Jelena Ćelović, Comel transformatori, Jelena.Celovic@comel.co.rs

Aleksandr Bushev, Comel Transformatori d.o.o., aleksandr.bushev@comel.co.rs

Ana Pastor, Comel transformatori, anapastor97@gmail.com

Lenka Cvetković, Comel Transformatori d.o.o., lenka.cvetkovic@comel.co.rs

Ključne reči: izolacioni sistem energetskih transformatora, neuniformna–stepenovana izolovanost, snižena nula, optimizacija, uniformna–puna izolovanost

Abstract: The insulation system plays a key role in the safe and reliable operation of all electrical machines, especially when it comes to power transformers. It is designed to ensure the durability of the transformer against dielectric and thermal stresses under various ambient and operating conditions. The design of the insulation system is one of the most important engineering aspects in the production of transformers, especially in the case of high-voltage power transformers. By following adequate procedures, as well as calculations and analyses, the use of suitable insulation materials, controlled production processes ensure the quality and reliability of the transformer, and the robustness of the insulation system is necessary for a smooth and long operating life of the transformer. Comprehensive verification of sizing rules is essential to increase reliability, as well as to optimize material costs, which opens the topic of optimization possibilities depending on the technical requirements for insulation parameters, all in accordance with the requirements of the Investor. The focus of the work is on power transformers with a voltage level of 110kV where the high-voltage connection is realized in "YN" coupling, which is almost always the case when observing the units installed on the territory of the Republic of Serbia. An analysis of the insulation details of the 110kV connection in the variation with uniform insulation and graded insulation is foreseen, as well as the influence of this parameter on the dimensions, and therefore on the price of the final product. As the requirements for the insulation level of power transformer connections and corresponding dielectric tests are an input parameter in the design annex, that is, part of the technical specification of the Client, part of the work is also intended to consider the essential need for full insulation of 110kV connections. The idea is for this chapter to be the starting point for creating new works on this topic from the point of view of operators of distribution and transmission networks. The aim of the work is to review the possible points for optimizing the power transformer using graded insulation instead of uniform insulation of the high-voltage terminal, as well as opening new discussions on this topic from the point of view of transformer manufacturers, operators of distribution / transmission networks and, of course, end users.

Key words: insulation assembly of power transformers, non-uniform graded insulation, uniform insulation, design optimization, graded neutral

1 UVOD

Optimizacija izolacije unutar energetskih transformatora jedan je od načina za smanjenje troškova materijala neophodnih za proizvodnju, kao i smanjenje mase i dimenzija transformatora. Osnovni parametri koji određuju tipove glavnih komponenti transformatora i potrebna izolaciona rastojanja u okviru njegove konstrukcije su ispitni naponi kojima transformator mora biti podvrgnut tokom tipskih i rutinskih ispitivanja. Shodno tome, opravdano smanjenje vrednosti ispitnih napona kako transformatora, tako i njegovih komponenti, predstavlja jedan od mogućih načina za smanjenje troškova izrade istog.

Ovaj rad posvećen je analizi mogućnosti smanjenje nivoa izolovanosti neutralne tačke visokonaponskog (VN) priključka i proceni uticaja takvog smanjenja na konstrukciju energetskih transformatora naponskog nivoa 110 kV.

Ova studija analizira kriterijume na osnovu kojih se određuje nivo izolacije neutralne tačke transformatora, takođe razmatra zahteve koje važeći standardi postavljaju u tom pogledu.

Prikazuje najzastupljeniji način izvedbe neutralne tačke visokonaponskih priključaka transformatora na teritoriji Republike Srbije, analizira potencijalne korekcije konstruktivnih rešenja unutar energetskih transformatora i na osnovu toga daje grubu procenu u uštedi materijala neophodnih za izradu predmetnog rešenja.

2 OPŠTE ODREDBE ZA ODREĐIVANJE NIVOA IZOLACIJE NEUTRALNE TAČKE VISOKONAPONSKOG PRIKLJUČKA

Uopšteno, neutralna tačka visokonaponskog priključka može se izvesti na sledeći način:

- Direktno uzemljena, ili uzemljena preko strujnog transformatora koji predstavlja veoma malu impedansu);
- Uzemljena preko nisko–omske impedanse ugradnjom otpornika ili prigušnice kako bi se struja zemljospoja ograničila na odgovarajuću vrednost i kako bi se smanjio prenapon u mreži tokom trajanja kvara;
- Izolovana.

U slučaju da je neutralna tačka transformatora direktno uzemljena u okviru postrojenja/trafostanice, uticaj prenapona koji se mogu javiti tokom eksploatacionog perioda transformatora je relativno mali. Međutim, u prethodno navedenom slučaju, postoji rizik od pojave visokih struja jednofaznog kratkog spoja koji protiču kako kroz transformator, tako i kroz sklopne uređaje. U cilju smanjenja struja izazvanih pojavom kratkih spojeva, može se primeniti način uzemljenja uz pomoć prigušnice ili otpornika.

Na teritoriji Rusije i Kine, a za naponske nivoe 110, 150 i 220kV [2], [3], [4], primenjuje se i sistem “neuzemljenja” odnosno izolovanog neutralnog priključka.

U slučaju da je uzemljenje neutralnog priključka izvedeno preko prigušnice, otpornika ili pak izolovano na predmetnom priključku može doći do pojave povišenog napona, koji se javlja kao posledica:

- Atmosferskih prenapona koji dolaze putem 110kV vodova;
- Jednofaznih kratkih spojeva;
- Prenapona izazvanih radom sklopnih uređaja unutar postrojenja.

U skladu sa prethodno navedenim, do pojave najviše vrednosti napona na neutralnom priključku dolazi usled pojave atmosferskih prenapona. Analiza atmosferskih uticaja i određivanje vrednosti napona koji se može pojaviti detaljno je objašnjeno u okviru literature [1] i [2].

U okviru [1] navedeno je da se amplitude napona mogu odrediti u skladu sa sledećom matematičkom relacijom:

$$U_{max} = \frac{n}{3} \cdot U_0 \cdot f(\tau_B/T)$$

Gde je:

n – broj faza duž kojih se prostire talas;

U_0 – amplituda prenaposnog talasa;

$f(\tau_B/T)$ – funkcija odnosa talasne dužine na linijskim priključcima transformatora i perioda osnovne frekvencije prirodnih oscilacija namotaja transformatora T.

U skladu sa [1] vrednost prethodno navedene funkcije kreće se u osegu 1.0 – 1.9.

Maksimalne vrednost napona na izolovanom neutralnom priključku energetskih transformatora navedene su u okviru Tabele br.1, a sve u skadu sa podacima datim u okviru literature [2].

Tabela 1: Maksimalna vrednost napona na izolovanom neutralnom priključku energetskog transformatora

Broj faza izložen udarnom naponskom impulsu	Amplituda udarnog naposkog impulsa	Maksimalna vrednost napona koji se može pojaviti na neutralnom priključku
1	U_0	$(0.6 \div 0.7) U_0$
2	U_0	$(1.3 \div 1.34) U_0$
3	U_0	$(1.8 \div 1.9) U_0$

Kako postoji podudarnost između podataka u okviru [1] i [2], može se izvesti zaključak da maksimalna vrednost napona koji se može javiti na neutralnom priključku energetskog transformatora doseže vrednost od $1.9 U_0$.

Na osnovu prethodno navedenog, može se zaključiti da čak i ako je neutralni priključak energetskog transformatora projektovan za identične vrednosti ispitnog napona kao i fazni priključci, neophodna je instalacija dodatne zaštite od delovanja prenapona u okviru postrojenja/trafostanice.

3 NIVO IZOLACIJE NEUTRALNOG PRIKLJUČKA TRANSFORMATORA DEFINISAN VAŽEĆIM STANDARDIMA

Detaljan postupak za određivanje nivoa izolacije neutralnog priključka opisan je u okviru [5] i [6].

Poglavlje br. 5.6. standarda [5], propisuje da je priključke, odnosno namotaje energetskog transformatora, čiji je maksimalni radni napon veći od 72.5 kV, Kupac / Investitor u obavezi da definiše da li će neki od neutralnih priključaka biti direktno uzemljen tokom rada ili ne. Ako ne, Kupac / Investitor je u obavezi da definiše maksimalni radni napon neutralnog priključka.

Poglavlje 7.4.2 standarda [6], propisuje vrednosti ispitnih napona, za priključke energetskog transformatora, čiji je maksimalni radni napon veći od 72.5kV, i to:

- Sa direktno uzemljenim neutralnim priključkom, kada je neutralni priključak trajno spojen sa zemljom, bilo direktno ili uz pomoć strujnog transformatora, a bez dodatne otpornosti. U ovom slučaju:
 - Vrednost ispitnog napona mora biti najmanje 38kV ($U_m \geq 17.5kV$). Takođe, i viši naponski nivoi mogu biti definisani;

- Ispitivanje neutralnog priključka udarnim naponskim impulsom se ne preporučuje, ali može biti specificirano.
- U slučaju da neutralni priključak nije direktno povezan sa zemljom propisuje sledeće:
 - Vrednost maksimalnog radnog napona, kao i vrednosti ispitnih napona moraju biti definisani od strane Investitora / Kupca u fazi upita / porudžbine. Vrednost maksimalnog radnog napona zavisi da li je neutralni priključak predviđen za rad u izolovanom stanju ili je pak povezan sa zemljom preko otpornika.
 - Vrednost maksimalnog radnog napona, kao i vrednost ispitnih napona poželjno je izabrati iz tabele br. 2 standarda [6]. U svakom slučaju maksimalni radni napon ne sme biti manji od 17.5 kV.
 - U slučaju da je zahtevano ispitivanje neutralnog priključka udarnim naponskim impulsom, nivo ispitnog napona mora biti definisan u fazi upita / porudžbine energetskog transformatora, a kasnije ta vrednost potvrđena u okviru fabričkih ispitivanja.

Ispitivanje neutralnog priključka sečenim naponskim impulsom se ne sprovodi.

- Proračun ispitnih napona vrši se u skladu sa smernicama datim u okviru aneksa D, standarda [6]. Takođe, prethodno pomenuti standard definiše da u slučaju nepostojanja direktnog uzemljenja neutralnog priključka, neophodno postojanje zaštitnog uređaja između neutralnog priključka i zemlje, a sve u cilju ograničavanja prolaznih prenapona. Investitor je u obavezi da pravilno definiše pomenuti uređaj, kao i da dostavi podatke o ispitnim naponima.

Za energetske transformatore, naznačenog naponskog nivoa od 110kV, GOST standard [3], [7], definiše sledeće kriterijume vezane za izbor načina uzemljenja i zaštite neutralnog priključka:

Tabela 2: Vrednosti ispitnog napona neutralnog priključka energetskog transformatora naznačenog naponskog nivoa 110, 150 i 220 kV sa stepenovanom izolovanošću neutralnog priključka, koji omogućava rad u okviru neuzemljenog sistema

- Član br. 2.2, standarda [3], propisuje nesmetani rad energetskog transformatora sa neuzemljenim neutralnim priključkom visokonaponskog namotaja, pod uslovom da isti poseduje adekvatnu zaštitu od prenapona;
- Član br. 5.4.9, standarda [7], propisuje naponske nivoe u skladu sa podacima datim u okviru tabele br. 2:

Naznačeni naponski nivo transformatora [kV]	Ispitivanje neutralnog priključka dovedenim naponom u trajanju od 1 min (eng. <i>One minute test voltage</i>) [kV]	Ispitivanje izolatora neutralnog priključka dovedenim naponom u trajanju od 1 min (eng. <i>One minute test voltage</i>) [kV]	Ispitivanje neutralnog priključka udarnim naponom (eng. <i>Lightning impulse LIN</i>) [kV]
110	100	110	200

Naznačeni naponski nivo transformatora [kV]	Ispitivanje neutralnog priključka dovedenim naponom u trajanju od 1 min (eng. <i>One minute test voltage</i>) [kV]	Ispitivanje izolatora neutralnog priključka dovedenim naponom u trajanju od 1 min (eng. <i>One minute test voltage</i>) [kV]	Ispitivanje neutralnog priključka udarnim naponom (eng. <i>Lightning impulse LIN</i>) [kV]
150	130	145	275
220	200	230	400

- Standard [8] propisuje vrednosti ispitnih napona neutralnog priključka, za transformatore naznačenog naponskog nivoa od 115kV na sledeći način:

- U slučaju uzemljenja neutralne tačke, vrednost dovedenog napona je 34kV, dok je vrednost udarnog impulsnog talasa 110kV.
- U slučaju uzemljenja neutralnog priključka uz pomoć otpornika, vrednost dovedenog napona je 95kV, dok je vrednost udarnog impulsnog talasa 250kV.

U cilju što boljeg razumevanja, u nastavku je dat tabelarni pregled vrednosti ispitnih napona, definisanih prethodno pobrojanim standardima, za transformatore naznačenog naponskog nivoa 110 i 115kV.

Tabela 2: Pregled vrednosti ispitnih napona definisan IEC, IEEE i GOST standardom

Standard	Način uzemljenja	Vrednost dovedenog napona (eng. <i>One minute test voltage</i>) [kV]	Vrednost udarnog impulsnog talasa (eng. <i>Lightning impulse LIN</i>) [kV]	Tip zaštite
IEC	Direktno uzemljena	≥ 38 kV	Nije zahtevano	—
	Uzemljena uz pomoć otpornika ili izolovano	Obaveza kupca da definiše	Obaveza kupca da definiše	Zaštitni uređaj od prenapona
GOST	Direktno uzemljena	—	—	—
	Sa mogućnošću neuzemljenja	100 kV za namotaj 110 kV za izolator	200 kV	Zaštitni uređaj od prenapona
IEEE	Direktno uzemljena	34 kV	110kV	—
	Uzemljena uz pomoć otpornika ili izolovano	95 kV	250 kV	—

U skladu sa sprovedenom analizom, može se izvesti sledeći zaključak – nijedan od trenutno važećih standarda ne propisuje identičnu vrednost ispitnih napona / izolacionog nivoa neutralnog i linijskog/faznog priključka.

Kako je prilikom sprovođenja rutinskih ispitivanja, napon na priključcima neutralnog terminala definisan na 1 / 3 vrednosti linijskog napona, može se predložiti sledeći nivo izolovanosti neutralnog priključka:

$$U_m = 52 \text{ kV}; LI 250 AC 95$$

Nivo izolovanosti neutralnog priključka u 110kV mreži koji se primenjuje prema trenutnoj praksi u Republici Srbiji jeste:

$$U_m = 123 \text{ kV}; LI 550 \text{ AC } 230$$

4 PREDMET I ANALIZA IZVEDBE UZEMLJENJA NEUTRALNE TAČKE NA TERITORIJI REPUBLIKE SRBIJE

Na osnovu dostupne tenderske dokumentacije za nabavku energetskih transformatora naznačenog naposkog nivoa 110kV – najčešće uvidom u jednopolne šeme postrojenja (*eng. Single line diagrams*), a sve u cilju jasnijeg pregleda, formirana je tabela br. 4.

Tabela 4: Prikaz izvođenja uzemljenja neutralnog priključka

TS	Karakteristike energetskog transformatora	Način izvođenja uzemljenja neutralnog priključka
1	16 MVA 110 ± 101.5% / 6.3/ 6.3 kV YN,d5,d5	Direktno uzemljen preko strujnog transformatora
2	31.5 MVA 110±11×1.5% / 36.75/ 10.5 kV YN,yn0,d5	Direktno uzemljen preko strujnog transformatora
3	31.5 MVA 110±10×1.6% / 21/ 10.5 kV YN,yn0,d5	Direktno uzemljen preko strujnog transformatora
4	31.5 MVA 110 ± 10×1.5 / 36.75 / 10.5 kV YN,yn0,d5	Direktno uzemljen preko strujnog transformatora
5	31.5 MVA 110 ± 11×1.5 / 10.5 kV YN,d5	Direktno uzemljen preko strujnog transformatora
6	31.5 MVA 110 ± 11×1.5 / 36.75 / 10.5 kV YN,yn0,d5	Direktno uzemljen preko strujnog transformatora
7	16 MVA; 110 ± 10×1.5 / 6.3; YNd5	Direktno uzemljen preko strujnog transformatora

Na osnovu podataka priloženih u okviru tabele br. 4, na teritoriji Republike Srbije, uzemljenje neutralnog priključka VN namotaja – naznačenog naposkog nivoa 110kV, sprovodi se direktno preko strujnog transformatora koji ima zaštitnu ulogu.

5 POTENCIJALNE KOREKCIJE KONSTRUKTIVNOG REŠENJA ENERGETSKOG TRANSFORMATORA U SLUČAJU STEPENOVANOG IZOLACIONOG NIVOA NEUTRALNOG PRIKLJUČKA

U nastavku je dat pregled glavnih komponenti energetskog transformatora čije definisanje direktno zavisi od vrednosti ispitnih napona / nivoa izolovanosti neutralnog VN priključka:

1. Teretna regulaciona preklopka (*eng. OLTC On Load Tap Changer*);
2. Provodni izolator neutralnog priključka (*eng. Bushing*);
3. Deo montaže glavne izolacije – izolacioni sklop između jarma magnetnog kola i VN namotaja;
4. Izolaciono rastojanje između regulacionih izvoda visokonapovskog namotaja i transformatorskog suda

5.1. Teretna regulaciona preklompka

Uporedna analiza dimenzija – visine regulacionih preklompki (prekidački i birački deo), tri različita dobavljača, sa vakuumskom komorom za prekidanje električnog luka, navedena je u okviru tabele br. 5.

Tabela 5: Pregled dimenzija teretne regulacione preklompke

Proizvođač	Tip uređaja za prekidanje	Nominalna / naznačena struja [A]	Visina preklompke za maksimalni napon opreme od 72.5 kV [mm]	Visina preklompke za maksimalni napon opreme od 123 kV [mm]
1	A	650	2069	2199
	B	400	1942	2072
	C*	400	1345	—
2	A	400, 550, 700	1741	1791
3	A	350, 600	1388	1578
*Maksimalni broj otcepa 19				

Korekcijom ispitnog napona neutralnog priključka sa U_m 123 LI 550 AC 230 na U_m 52kV LI 250 AC 95, visina uređaja se može korigovati za 850mm. Uzimajući u obzir odgovarajuće korekcije na transformatorskom sudu, prethodno navedena izmena može dovesti do uštede od približno jedne tone ulja po proizvodu.

5.2. Provodni izolator neutralnog priključka

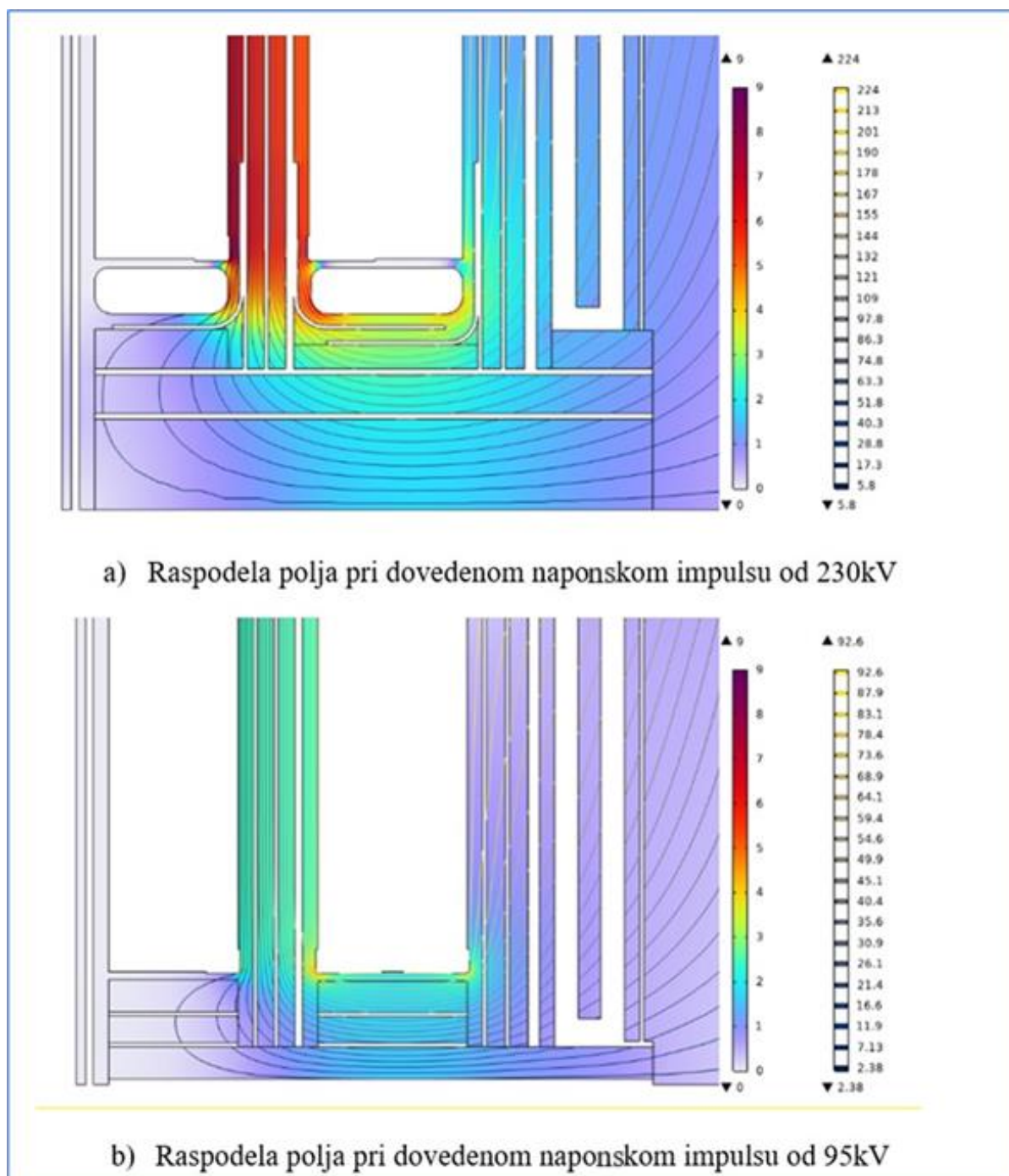
Standardna izvedba neutralnog priključka u slučaju uniformne / pune izolovanosti neutralnog i faznog priključka korišćenjem OIP (*eng. Oil impregnated paper*) tipa izolatora, može biti zamenjena porcelanskim izolatorom (nekondenzatorskim) čija je cena višestruko niža.

Tabela 6: Pregled izbora provodnog izolatora neutralnog priključka

	Uniformna izolacije (<i>eng. Uniform insulation</i>)	Stepenovana izolacija neutralnog priključka (<i>eng. Graded insulation</i>)
Tip izolatora	Tehnologija OIP (<i>eng. Oil impregnated paper</i>) papir impregnisan ulju	Porcelanski (nekondenzatorski)
Nominalni naznačeni napon [kV]	123 / 170	52
Vrednost udarnog naponskog impulsa [kV]	550	250
Vrednost dovedenog naponskog impulsa [kV]	230	95
Nominalna / naznačena vrednost struje [A]	800	1000

5.3. Izolacioni sklop između jarma magnetnog kola i VN namotaja

Redukovanje izolacionih ispitnih napona neutralnog priključka energetskog transformatora dovodi do korekcije izolacionog aranžmana između donjeg jarma i izvoda VN namotaja. Tipična raspodela jačine električnog polja unutar energetskog transformatora, naznačenog naponskog nivoa VN priključka 110kV prikazana je na slici br. 1.



Slika 1: Raspodela električnog polja u prozoru magnetnog kola za naznačene nivoe dovedenog talasa

Redukovanjem vrednosti dovedenog napona sa 230kV na 95kV, postižu se sledeća pojednostavljenja u okviru izolacionog aranžmana:

- Izbacivanje kapacitivnog (ekvipotencijalnog) prstena – 2 komada / fazi → 6 komada / transformatoru;
- Redukovanje izolacionog rastojanja za 50–70mm, što prouzrokuje smanjenje od oko 250kg mase izolacionih delova za transformatore snage 31.5MVA (najzastupljeniji na teritoriji Republike Srbije).

5.4. Izolaciona rastojanja između izvoda regulacionog namotaja i transformatorskog suda

U slučaju uniformne (pune) izolacije – ispitni napon neutralnog priključka identičan je kao ispitni napon faznih priključaka / namotaja, tj. identičan dovedeni jednominutni napon industrijske frekvencije primenjuje se kako na izvode namotaja visokog napona, tako i na izvode regulacionog namotaja. Sa druge strane, u slučaju snižene nule – ispitni napon neutralnog priključka niži je od ispitnog napona faznih / linijskih priključaka, što omogućava smanjenje izolacionih rastojanja unutar transformatorskog suda, tačnije rastojanja između zida transformatorskog suda (omotača) i izvoda regulacionih namotaja.

U skladu sa ograničenjima za maksimalnu dozvoljenu vrednost električnog polja, a sve u skladu sa karakteristikama izolacionog medijuma – transformatorskog ulja, navedenim u okviru [9] i [10], definisan je minimalni izolacioni razmak od 110 mm (prethodno navedena vrednost ne pokriva proizvodne mogućnosti, pa ovo rastojanje može varirati u skladu sa istim) za neutralni priključak projektovan za ispitivanje dovedenim naponskim impulsom od 230kV. U slučaju stepenovane izolacije, kada je predviđeno ispitivanje neutralnog priključka dovedenim naponom od 95kV, za standardno projektno rešenje ovo rastojanje iznosi 60mm.

U slučaju najzastupljenije jedinice na teritoriji Republike Srbije, energetskog transformatora naznačene snage 31.5MVA i naznačenog naponskog nivoa visokonaponskog namotaja 110kV, prethodno navedena korekcija dovodi do uštede u količini izolacionog medijuma – transformatorskog ulja i to u količinama od 1000 do 1500kg po jedinici.

U cilju što boljeg sagledavanja potencijalnih ušteda na temu korišćenja transformatora sa stepenovanom izolovanošću, dat je tabelarni pregled ušteda na primeru transformatora snage 31.5MVA:

Tabela 7: Pregled potencijalnih ušteda na transformatoru snage 31.5MVA

Red. br.	Opis optimizacije	Procenjene uštede
1.	Redukovanje visine teretne regulacione preklopke	Umanjenje od 1000 kg ulja po jedinici
2.	Izmena provodnog izolatora neutralnog priključka	Umanjenje novčanih troškova
3.	Promena izolacionog aranžmana donji jaram – izvod VN namotaja	Umanjenje od 250kg magnetnog lima / jedinici Umanjenje od 250kg transformatorskog ulja / jedinici Umanjenje mase od 250kg izolacionih delova / jedinici

Red. br.	Opis optimizacije	Procenjene uštede
4.	Redukovanje izolacionog rastojanja (transformatorski sud – izvodi regulacionog namotaja)	Umanjenje od 1250kg transformatorskog ulja po jedinici
	UKUPNO	3000 kg po jedinici

6 ZAKLJUČAK

- Na osnovu prethodno sprovedene analize, izvodi se zaključak da se nivo izolovanosti neutralnog priključka energetskog transformatora naznačenog naponskog nivoa primara 110kV, može redukovati kako u slučaju direktno uzemljenog tako i u slučaju neuzemljenog / izolovanog priključka. U slučaju izolovanog priključka neophodno je obezbediti zaštitni uređaj od prenapona.
- U slučaju pune izolovanosti neutralne tačke, ne može se garantovati stabilnost izolacionog aranžmana u prenaponskim prilikama tokom eksploatacionog perioda u slučaju nepostojanja zaštitnog uređaja.
- Nijedan od važećih standarda ne zahteva identičan nivo izolovanosti linijskog/faznog i neutralnog priključka za energetske transformatore naznačenog naponskog nivoa primara od 110kV.
- Kako je većina uzemljenja neutralnog priključka na teritoriji Srbije izvedena direktno, smanjenje nivoa izolovanosti može se sprovesti bez dodatnih modifikacija u okviru postrojenja.
- Smanjenjem stepena izolovanosti neutralnog priključka energetskih transformatora naznačenog naponskog nivoa primara 110kV dovodi do smanjenja materijala neophodnih za njihovu proizvodnju, odnosno smanjenje mase aktivnog dela, smanjenje ukupne količine transformatorskog ulja kao i pojednostavljenje izolacionog aranžmana.

Dodatno, najveći efekat postigao bi se dodatnim ograničenjem u pogledu broja otepa regulacionog namotaja, tj. Teretne regulacione preklopke (OLTC), svođenjem na regulaciju primarnog napona u opsegu $\pm 9 \times 1.78\%$. Prethodno navedeno omogućava primenu najjednostavnijeg modela teretne regulacione preklopke dostupne na tržištu.

7 LITERATURA

- [1] A.G. Zolotikh, F.H. Halilov, "Selection of Surge Arresters for Protection of Neutral of 110-220 kV Power Transformers," UDK 621.31.015.038.
- [2] T. Wang, Q. Wang, H. Chen, C. Lan, S. Wang, and J. Xu, "Selection Method of Neutral Point Overvoltage Protection for 220kV Transformer," 2019 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia), Chengdu, China, 2019, pp. 360-363, doi: 10.1109/ISGT-Asia.2019.8881269.
- [3] GOST 12965-85, General Purpose 110 and 150 kV Power Oil Transformers. Specifications.

- [4] RD 34.20.176-84, Guidelines for Limiting Single-Phase Short Circuit Currents in Electrical Networks of 110-220 kV Energy Systems.
- [5] IEC 60076-1:2011, Power Transformers – Part 1: General.
- [6] IEC 60076-3:2013, Power Transformers – Part 3: Insulation Levels, Dielectric Tests and External Clearances in Air.
- [7] GOST 1516.3-96, Electrical Equipment of Alternating Current for Voltages from 1 to 750 kV. Requirements for Electrical Strength of Insulation.
- [8] "IEEE Standard for General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers," IEEE Std C57.12.00-2015 (Revision of IEEE Std C57.12.00-2010), pp. 1-74, 12 May 2016, doi: 10.1109/IEEESTD.2016.7469278.
- [9] J.K. Nelson, "An Assessment of the Physical Basis for the Application of Design Criteria for Dielectric Structures," IEEE Transactions on Electrical Insulation, vol. 24, no. 5, pp. 835-847, Oct. 1989, doi: 10.1109/14.42161.
- [10] Y. Kawaguchi, H. Murata, and M. Ikeda, "Breakdown of Transformer Oil," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-91, no. 1, pp. 9-23, Jan. 1972, doi: 10.1109/TPAS.1972.293284.