

Josip Klimeš, mag. ing. el.
Končar D&ST
josip.klimes@koncar-dst.hr

Matija Petranović, mag. ing. mech.
Končar D&ST
matija.petranovic@koncar-dst.hr

Helena Peći, mag. ing. el. techn. inf.
Končar D&ST
helena.peci@koncar-dst.hr

PRESPOJIVI DISTRIBUTIVNI TRANSFORMATOR S AUTOMATSKOM REGULACIJOM POD OPTEREĆENJEM

SAŽETAK

Distributivni transformatori s automatskom regulacijom napona pod opterećenjem (skraćeno RDT) rade u sustavu s povećanim brojem distribuiranih izvora energije u mreži, koji dovode do porasta varijacija napona na niskonaponskoj strani mreže. S obzirom na to da u nekim elektroenergetskim sustavima, radi lakšeg prilagođavanja i planiranja mreže, postoje dvije različite naponske razine na SN strani distributivnog transformatora, pojavila se potreba za razvojem prespojivog distributivnog transformatora s automatskom regulacijom napona pod opterećenjem. Regulacija napona na SN strani odvija se sklopkom pod opterećenjem, za razliku od klasičnih distributivnih transformatora, dok se prespajanje naponskih razina odvija pomoću preklopke u beznaponskom stanju.

Kako bi postojala mogućnost ugradnje prespojivih RDT-a u postojeće trafostanice, dizajn istih potrebno je prilagoditi tlocrtnim dimenzijama klasičnih distributivnih transformatora. Prespojivi distributivni transformator s automatskom regulacijom napona pod opterećenjem opisan u ovom radu dizajniran je, proizveden i ispitan u skladu s grupom normi IEC 60076.

Glavne riječi: prespojivi distributivni transformator s automatskom regulacijom napona pod opterećenjem, regulacijska sklopka, preklopka

DUAL-VOLTAGE VOLTAGE-REGULATING DISTRIBUTION TRANSFORMER

SUMMARY

Voltage regulating distribution transformers (VRDTs) operate in systems with an increased number of distributed energy sources in the network, which lead to an increase in voltage variations on the low-voltage side of the grid. Considering that some power systems, for the sake of easier network planning and adapting, have two different voltage levels on the medium-voltage side of the transformer, there was a need for the development of a dual-voltage VRDT. Voltage regulation on the medium-voltage side is achieved through an on-load tap changer, unlike conventional distribution transformers, while switching between voltage levels occurs using an off-load tap changer in a disconnected state.

In order to allow the installation of dual-voltage VRDTs in existing substations, their design needs to be adapted to the footprint dimensions of conventional distribution transformers. The dual-voltage VRDT described in this paper was designed, manufactured, and tested in accordance with the IEC 60076 standard series.

Key words: dual-voltage voltage-regulating distribution transformer, on-load tap changer, de-energized tap changer

1. UVOD

Distributivni transformatori s automatskom regulacijom napona pod opterećenjem (dalje: RDT) imaju važnu ulogu u današnjem elektroenergetskom sustavu, gdje su sve više prisutni distribuirani izvori energije. Ključna funkcija i karakteristika koja ih izdvaja od klasičnih distributivnih transformatora jest njihova sposobnost automatske prilagodbe napona mreže pod opterećenjem pomoću sklopke. RDT-i automatski stabiliziraju varijacije srednjeg napona te na taj način utječu na promjene napona i opterećenja na niskonaponskoj strani. Oni predstavljaju inteligentno rješenje koje omogućava prihvata energije iz različitih izvora, uključujući centralizirane i distribuirane izvore. Pouzdano distribuiraju energiju svim potrošačima, pridonoseći stabilnom naponu i visokokvalitetnoj električnoj energiji.

S obzirom na to da u nekim elektroenergetskim sustavima, radi fleksibilnosti planiranja, postoje dvije naponske razine na SN strani transformatora, pojavila se potreba za razvojem prespojivog RDT-a. Regulacija napona na SN strani odvija se sklopkom pod opterećenjem, za razliku od klasičnih distributivnih transformatora. Prespajanje naponskih razina odvija se pomoću preklopke u beznaponskom stanju, kao kod standardnih prespojivih distributivnih transformatora.

Prespojivi RDT-i kombiniraju prednosti standardnog prespojivog transformatora koji ima mogućnost rada na dvjema različitim naponskim razinama na SN strani te distributivnog transformatora s mogućnošću automatske regulacije napona pod opterećenjem.

2. DISTRIBUTIVNI TRANSFORMATORI S AUTOMATSKOM REGULACIJOM NAPONA POD OPTEREĆENJEM

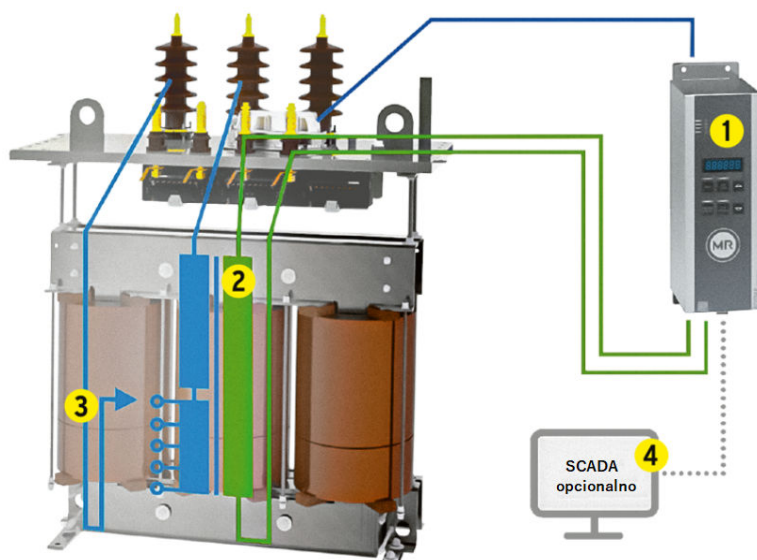
Distributivni transformatori s automatskom regulacijom napona pod opterećenjem imaju zadatak balansirati varijacije srednjeg napona i odgovarati na promjene napona i opterećenja na niskonaponskoj strani.

Načela rada ovog sustava temelje se na tehnologiji koja je već dobro poznata i primjenjuje se u energetskim transformatorima. RDT-i su opremljeni sklopkom koja omogućuje dinamičko održavanje napona pod opterećenjem. Ovo je značajna razlika u odnosu na klasične distributivne transformatore, gdje se napon ručno regulira u beznaponskom stanju, obično u 3, 5 ili 7 položaja na srednjenaponskoj strani.

Tijekom posljednjih godina razvijeno je nekoliko varijanti regulacijskih distributivnih transformatora, koje su potom implementirane u distributivnu mrežu. Ovi transformatori dolaze u različitim tehničkim izvedbama i nude raznovrsne funkcionalnosti, među kojima se izdvajaju:

- regulacija pod naponom
- automatska prilagodba napona
- veći opseg i veći broj koraka regulacije nego standardni distributivni transformator
- očuvane tlocrtne dimenzije
- jednostavna integracija u postojeće mreže
- upravljanje na daljinu
- komunikacijska sučelja

Princip rada RDT-a prikazan je na slici 1. Vidljivi su aktivni dio distributivnog transformatora s označenim NN i VN namotom, upravljačka jedinica, sklopna jedinica, motorna jedinica te opcionalna mogućnost daljinskog upravljanja i komunikacije putem SCADA sustava. Sve zajedno čini funkcionalni sustav koji nazivamo distributivni transformator s automatskom regulacijom pod opterećenjem – RDT. Linije zelene boje pokazuju vezu NN namota transformatora s regulacijskom sklopkom, svijetlo plavom bojom označen je VN namot, dok tamno plava boja predstavlja upravljački dio (komunikacija između upravljačke i motorne jedinice).

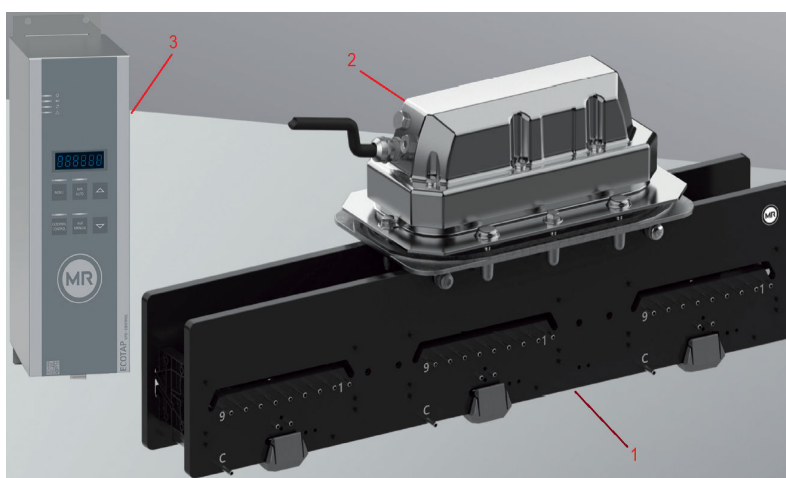


Slika 1. Princip rada RDT-a

Upravljačka jedinica (1) kontinuirano mjeri sekundarni napon (2) i automatski šalje signal sklopki kada treba promijeniti korak regulacije napona na primarnoj strani (3). Upravljačka jedinica također se može opcionalno putem nekoliko različitih komunikacijskih protokola povezati sa SCADA sustavima (4) za sofisticiraniju podršku kontrole napona.

3. VAKUUMSKA SKLOPKA ECOTAP® VPD® (treća generacija)

Prva generacija ECOTAP® VPD® sklopke na tržište je došla 2016. godine, druga generacija 2018. godine, dok je treća generacija ECOTAP® VPD® sklopke lansirana 2021. godine. Treća verzija vakuumske sklopke za regulaciju napona pod opterećenjem distributivnih transformatora predstavlja najekonomičniju izvedbu do sada. U odnosu na prethodnu generaciju, masa, uključujući motorni pogon, smanjena je za 30%, dok je volumen smanjen za 50%. Posljednja generacija sklopke dostupna je isključivo s maksimalnom nazivnom strujom od 30 A, najvećim dozvoljenim naponom opreme od 24 kV i do maksimalno devet položaja regulacije. Najveća prednost koja je postignuta ovakvim dizajnom sklopke jest povećanje kapaciteta serijske proizvodnje, smanjenje cijene te pojednostavljenje ugradnje i montaže. Spoj namota i sklopke postiže se na standardiziran način jednostavnim uprešavanjem u cjevčice. Upravljačka jedinica zadržava gotovo istu funkcionalnost kao prethodna verzija, uz mogućnost nadogradnje na paket usluga CONTROL PRO. Dijelovi sustava treće generacije ECOTAP® VPD® sklopke prikazani su na slici 2.

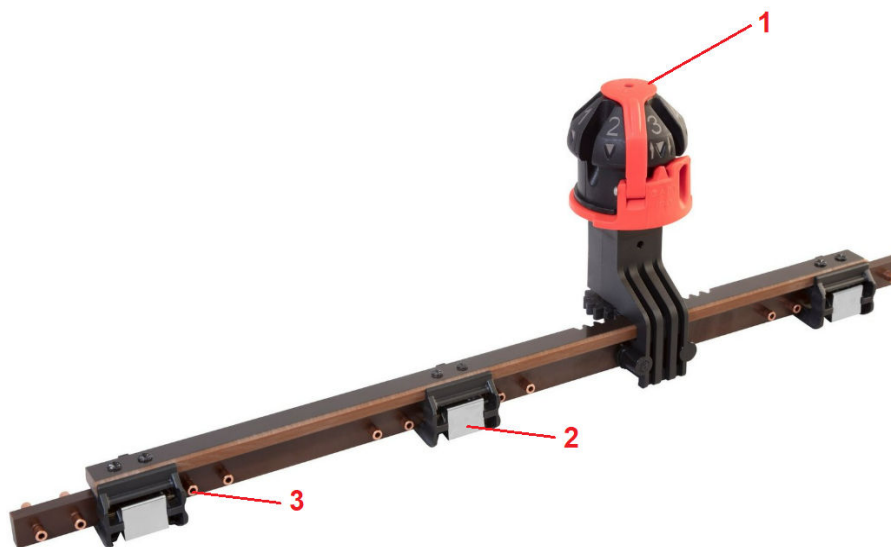


Slika 2. Dijelovi sustava sklopke treće generacije: sklopna jedinica (1), motorna jedinica (2) i upravljačka jedinica (3)

4. PREKLOPKA ZA PRESPAJANJE NAPONA NA SN STRANI

Kod prespojivog RDT-a opisanog u ovom radu preklopka služi za prespajanje napona koje se izvodi u beznaponskom stanju, odnosno kada je transformator potpuno isključen iz mreže. Isključivanjem napajanja omogućeno je sigurno podešavanje naponske razine jer se svi sklopovi isključuju iz mreže prije nego što se izvrše bilo kakve promjene na položajima transformatora. Karakteristike preklopke za prespajanje napona su: kompaktne dimenzije, jednostavna montaža i rukovanje, a prespajanje se izvodi fizičkom rotacijom ručice. Samocentrirajući pokretni kontakti preklopke osiguravaju da je spoj pokretnog i fiksnog kontakta u svakom položaju ispravan. Glavni dijelovi preklopke prikazani su na slici 3.

Prilikom ugradnje prespojivog RDT-a u mrežu poznat je SN na koji se transformator spaja. Pomoću ručice preklopke odabire se željena SN razina. Podešavanje SN razine izvodi se jednokratno kod početne instalacije ili i naknadno kod eventualne promjene SN razine.



Slika 3. Dijelovi preklopke: ručica preklopke (1), klizni kontakti (2) i fiksni kontakti (3)

5. KONSTRUKCIJA PRESPOJIVOG DISTRIBUTIVNOG TRANSFORMATORA S AUTOMATSKOM REGULACIJOM NAPONA POD OPTEREĆENJEM

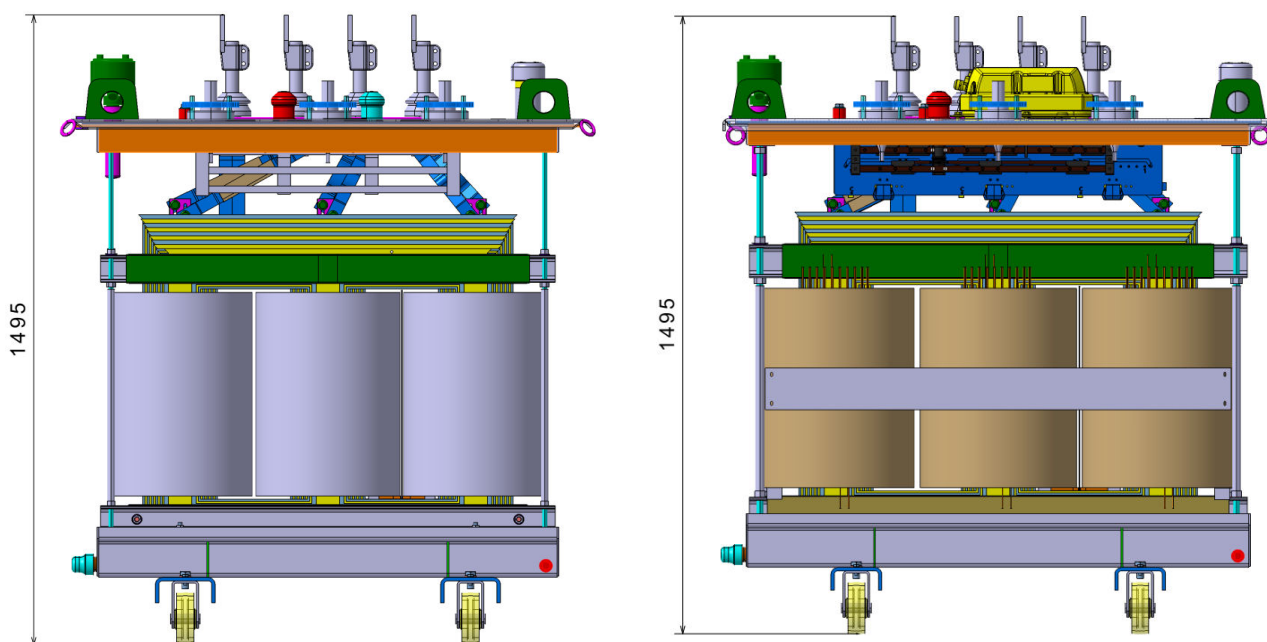
U tablici I. dana je usporedba standardnog prespojivog distributivnog transformatora s regulacijom u beznaponskom stanju te prespojivog RDT-a s ECOTAP® VPD® sklopkom treće generacije. Za izradu transformatora korišteni su isti materijali – materijal za izradu namota je bakar, a jezgra je napravljena od hladnovaljanog lima smanjenih gubitaka.

Tablica I. Usporedba nazivnih podataka transformatora

	Klasični prespojivi distributivni transformator s preklopkom	Prespojivi RDT s ECOTAP® VPD® sklopkom treće generacije
Nazivna snaga [kVA]	630	630
Tip transformatora	5TBNO630-24x/AAA	5TRNO630-24x/AAA
Prijenosni omjer [kV]	20(10)±2x2,5% / 0,4	20(10)±4x275V / 0,4
Promjena prijenosnog omjera	U beznaponskom stanju	Pod opterećenjem
Napon kratkog spoja [%]	4	4
Gubici praznog hoda [W]	540	594 (540 + 10%)
Gubici tereta [W]	4600	4600
Duljina x širina x visina [mm]	1265x920x1495	1305x950x1495
Masa ulja [kg]	325	435
Ukupna masa [kg]	2130	2525

Iz tablice I može se primijetiti da su za identične nazivne snage tlocrtne dimenzije ostale približno iste, odnosno jako malo se razlikuju, dok je visina u oba slučaja ista. Uspoređene su nazivne snage, napon kratkog spoja, gubici, dimenzije, masa ulja i ukupna masa. Također, može se primijetiti da postoji razlika u koracima regulacije. Klasični prespojivi distributivni transformator ima uobičajenu regulaciju $\pm 2 \times 2,5\%$, dok je kod prespojivog RDT-a opseg regulacije $\pm 4 \times 275 \text{ V}$.

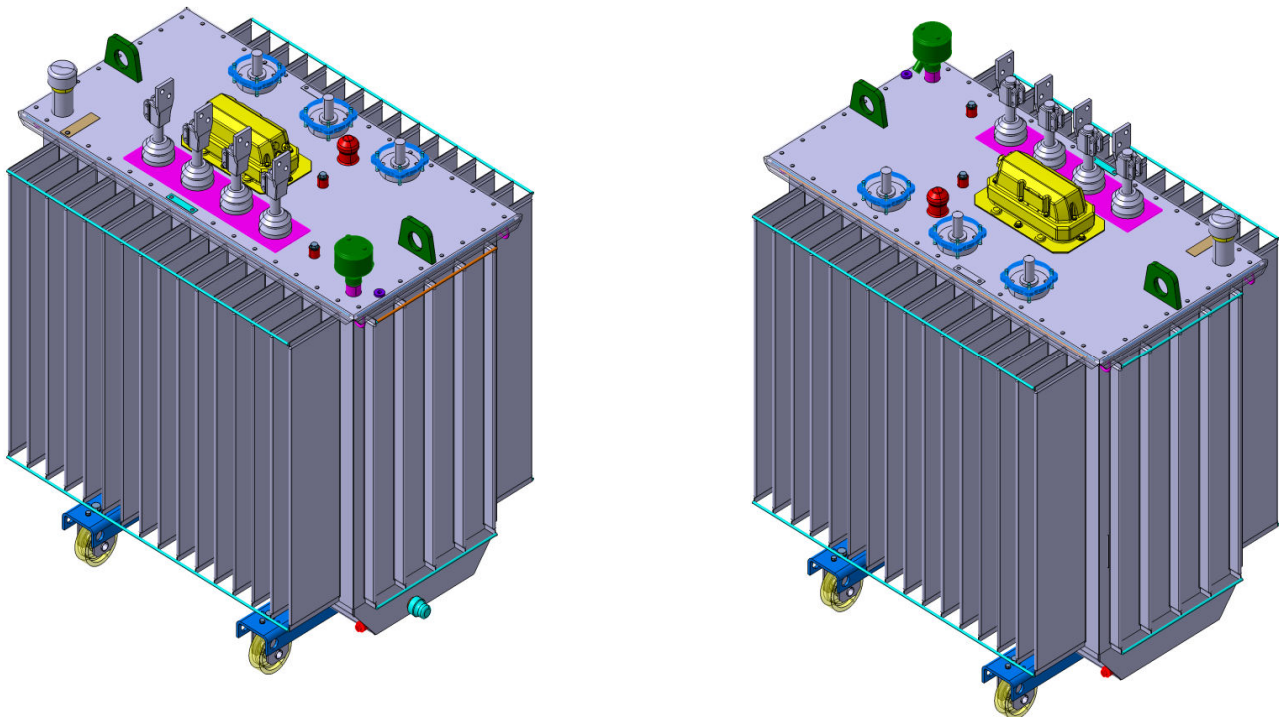
Upotrebom sklopke treće generacije, koja je gabaritno manja u odnosu na sklopku prethodnih generacija, uspijeva se postići ušteda i smanjiti visina između poklopca i aktivnog dijela transformatora te na taj način postići da ukupna visina prespojivog RDT-a odgovara visini klasičnog distributivnog prespojivog transformatora. Gubici navedeni u tablici I zadovoljavaju zahtjeve Uredbe Komisije (EU) br. 548/2014, razina 2 (Tier 2). Gubici praznog hoda razlikuju se kod klasičnih distributivnih transformatora i RDT-a zbog toga što je za RDT prema Uredbi Komisije (EU) br. 548/2014 dozvoljeno uvećanje gubitaka praznog hoda za 10 %. Na slici 4 prikazani su aktivni dijelovi prespojivih distributivnih transformatora.



Slika 4. Usporedba visina i aktivnih dijelova prespojivih distributivnih transformatora

Lijevo je prikazan izgled aktivnog dijela klasičnog distributivnog prespojivog transformatora. Ispod poklopca vidi se preklopka za prespajanje SN razine te regulaciju u beznaponskom stanju. Preklopka je označena sivom bojom.

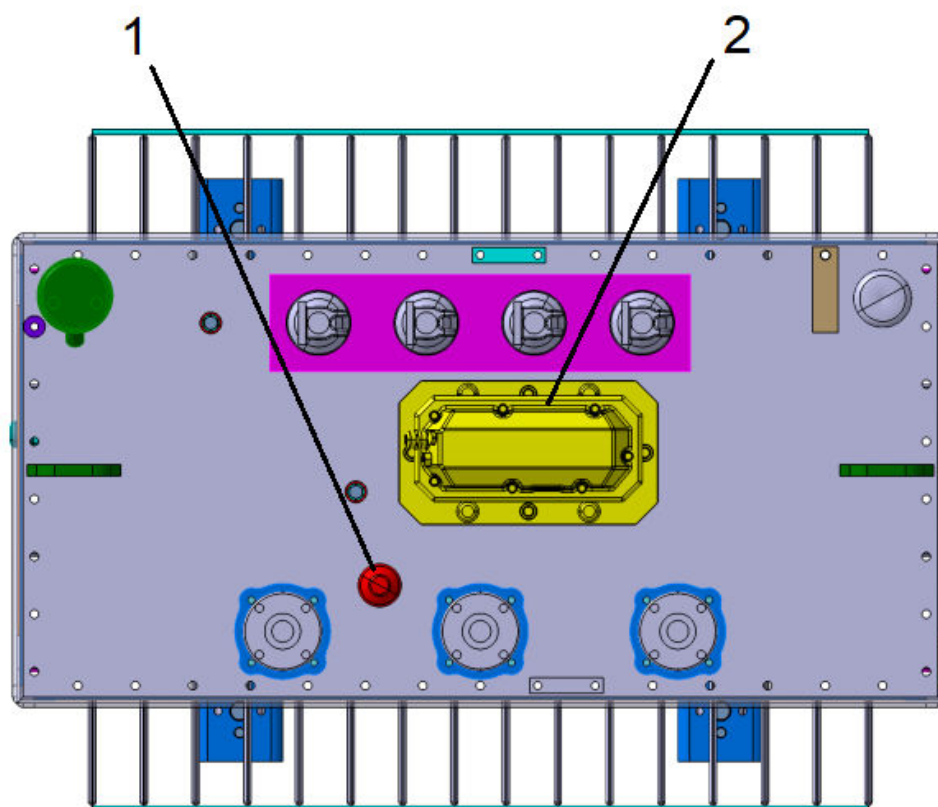
Desno je prikazan aktivni dio prespojivog RDT-a s pripadajućom ECOTAP® VPD® sklopkom. Motorna jedinica sklopke u kojoj je integriran mehanizam za pogon označena je žutom bojom, dok je sklopna jedinica u kojoj se nalaze kontakti i u kojoj se odvija preklapanje označena plavom bojom. Preklopka služi za prespajanje napona na SN strani u beznaponskom stanju te se na crtežu nalazi ispred sklopke i označena je crnom bojom, dok je ručica za prespajanje crvene boje.



Slika 5. Model prespojivog RDT-a s ECOTAP® VPD® sklopkom za regulaciju napona i preklopkom za prespajanje napona

Model prespojivog regulacijskog distributivnog transformatora s najnovijom generacijom vakuumske sklopke prikazan je na slici 5. Transformator je hermetičke izvedbe, a tehnologija montaže preuzeta je s klasičnih distributivnih transformatora. Izrada jezgre, namota i steznog sustava također je identična onoj kod klasičnih distributivnih transformatora. Regulacija napona vrši se u koracima od 275 V na višenaponskom namotu u devet položaja (četiri položaja iznad i četiri ispod nazivnog napona). To je ujedno jedna od glavnih karakteristika koja ga razlikuje od klasičnih prespojivih distributivnih transformatora. Procesi sušenja, punjenja i vakuumiranja RDT-a provedeni su u niskofrekventnom postrojenju (eng. *LFH - low frequency heating*), kao i kod klasičnih distributivnih transformatora.

Na slici 6 prikazan je razmještaj komponenti transformatora na poklopcu prespojivog RDT-a. ECOTAP® VPD® sklopka označena je brojem 1, a preklopka za prespajanje SN razine označena je brojem 2. Za razliku od standardnog RDT-a koji sadrži samo sklopku, prespojivi RDT uključuje i sklopku i preklopku, što predstavlja konstrukcijski izazov, osobito zbog ograničenog prostora na poklopcu i ispod njega. Situacija ispod poklopca je znatno složenija jer je važno osigurati pravilne razmake između vodljivih dijelova. Iz tog razloga bila je potrebna detaljna analiza i razrada modela kako bi se osigurala sigurna i učinkovita funkcionalnost uređaja.



Slika 6. Tlocrtni prikaz poklopca prespojivog RDT: 1 - ECOTAP® VPD® sklopka, 2 – preklopka za prespajanje napona

6. ISPITIVANJA PRESPOJIVOG RDT-A

Prespojivi RDT opisan u ovom radu dizajniran je, proizveden i uspješno ispitan u skladu s grupom normi IEC 60076.

7. ZAKLJUČAK

U ovom radu predstavljen je prespojivi distributivni transformator s automatskom regulacijom pod opterećenjem te je napravljena usporedba dimenzija i karakteristika s klasičnim prespojivim distributivnim transformatorom. Prespojivi RDT temelji se na dugogodišnjoj i provjerenoj tehnologiji RDT-a, koji su već dugi niz godina prisutni u industrijskoj proizvodnji.

Integracija takvog transformatora u postojeću mrežnu infrastrukturu donosi brojne prednosti, među kojima je najbitnija automatska regulacija napona pod opterećenjem, kako bi se napon zadržao unutar zakonski propisanih granica. U slučajevima kada nije poznato točno mjesto ugradnje i specifičan napon SN mreže, prespojivi RDT se jednostavno prilagođava željenom naponu okretanjem ručice preklopke u beznaponskom stanju.

Zbog svojih kompaktnih dimenzija prespojivi RDT se može instalirati u postojeće transformatorske stanice, gdje su do sada bili ugrađivani klasični distributivni transformatori.

5. LITERATURA

- [1] D. Žarko, B. Čučić, "Transformatori u teoriji i praksi", Graphis Zagreb, Hrvatska, 2020.
- [2] IEC 60076, „Power transformers“
- [3] Operating instructions, "On-Load Tap-Changer ECOTAP VPD", Maschinenfabrik Reinhausen, 2016.
- [4] The Reinhausen-Magazine "ONLOAD", Issue 10, The next level for the VRDT
- [5] S. Carević, M. Bakarić, B. Čučić, M. Mikulić, "Regulating distribution transformer", 4th Session of Cired Croatian National Committee, Trogir, May 11-14, 2014
- [6] T. Nižić, S. Carević, I. Perišić, "New generation of voltage regulated distribution transformer", 6th Session of Cired Croatian National Committee, Opatija, May 13-16, 2018
- [7] I. Perišić, S. Carević, Z. Grman, J. Hämmer, "Development of on-load voltage regulated distribution transformers", 8th Session of Cired Croatian National Committee, Seget Donji/ Trogir, June 4. - 6., 2023
- [8] Transformers magazine, Vol. 3, Issue 3, "Ecotap VPD"