

DOI: [10.46793/CIGRE37.A3.04](https://doi.org/10.46793/CIGRE37.A3.04)**A3.04****GASOM IZOLOVANI VN PREKIDAČI BEZ PRIMENE SF6 DO 420 KV****GAS-INSULATED HV CIRCUIT BREAKERS SF6 FREE UP TO 420 KV****Ninoslav Simić, Filip Jevtić, Slaviša Dobrosavljević***

Kratak sadržaj: U uvodu će biti razmotreni razlozi za odustajanje od upotrebe SF6 gasa u elektroenergetskoj opremi, zbog želje da se smanji emisija štetnih gasova. Dodatno će biti predstavljena neka od rešenja prekidača različitih naznačenih napona, koja predstavljaju alternativu prekidačima u kojima se kao izolacija koristi SF6 gas. Pored toga, biće navedene i neke mešavine izolacionih gasova na bazi F i N (fluor i azot), koje predstavljaju adekvatnu zamenu za gas SF6. Zatim će biti predstavljeni primeri razvijenih i testiranih prekidača, kao i neka idejna rešenja. Takođe će biti dat pregled rešenja koja se potencijalno mogu primeniti u praksi, kao i neka rešenja koja su već u funkciji i namenjena su za naznačene napone do 420 kV. Cilj ovog rada je da se stekne uvid u očekivane promene na tržištu nove VN opreme uzrokovane zabranom korišćenja SF6 gasa počevši od 2026. godine.

Ključne reči: VN prekidač, zamena SF6 gasa, C4-FN gas

Abstract: In the introduction will be discussed the reasons for abandoning the use of SF6 gas in power equipment, due to the desire to reduce the emission of harmful gases. Additionally, some of the circuit breaker (CB) solutions for different voltages will be presented, which represent an alternative to CB where SF6 gas is used as an insulating agent. Also, some insulating gas mixtures, based on F and N (fluorine and nitrogen), which represent an adequate replacement for SF6 gas, will be listed. Then, examples of developed and tested CB will be presented, as well as some conceptual solutions. There will also be an overview of CB solutions that can potentially be implemented in practice, as well as some solutions that are already in operation and are intended for indicated voltages up to and including 420 kV. The aim of this paper is to gain insight into the expected changes in the market of new HV equipment caused by the ban on the use of SF6 gas starting in 2026.

Key words: HV circuit breaker, replacement of SF6 gas, C4-FN gas

* Ninoslav Simić, Institut Nikola Tesla AD, ninoslav.simic@ieent.org

Filip Jevtić, Institut Nikola Tesla AD, filip.jevtic@ieent.org

Slaviša Dobrosavljević, JP EPS Ogranak TENT TE Morava, slavisa.dobrosavljevic@eps.rs

1 UVOD

Težnja za smanjenjem efekata staklene bašte uticala je i na elektroenergetski sektor. U dosadašnjoj praksi veliku upotrebu ima gas sumpor heksafluorid (SF_6), koji se koristi kao izolaciono sredstvo kod prekidača i u metalom oklopljenim i gasom izolovanim postrojenjima. I po Kjoto protokolu i po Pariskom sporazumu SF_6 gas je prepoznat kao gas koji ima veliki uticaj na globalno zagrevanje. Potencijal globalnog zagrevanja (GWP) SF_6 gasa iznosi 24,300 [1], što znači da je 24,300 puta veći od uticaja CO_2 .

SF_6 gas ima višedecenijsku upotrebu, a razlozi za to su njegove dobre karakteristike, kao što su dug eksploatacioni vek, velika moć dejonizacije, velika brzina uspostavljanja dielektrične čvrstoće, mala promena pritiska sa promenom temperature, itd. Zbog svega navedenog, pronalaženje rešenja koje će efikasno zameniti SF_6 gas je zahtevan posao. Potreba za SF_6 gasom i dalje je velika. Šest evropskih operatora prenosnog sistema je procenilo da će za potrebe visokonaponskih prekidača u njihovim mrežama do 2032. godine biti potrebno oko 130 tona SF_6 gasa, dok će ukupna količina uključujući i sve ostale komponente sistema iznositi oko 1000 tona [1].

Godinama unazad istraživala su se različita rešenja koja predstavljaju smese gasova, koje imaju značajno manji ugljenični otisak u odnosu na SF_6 gas. Tokom istraživanja akcenat je stavljen na gas $\text{C}_4\text{-FN}$ u kombinaciji sa gasom koji pomaže u stabilizaciji hemijske reakcije tokom procesa komutacije, poput kiseonika (O_2) ili ugljen-dioksida (CO_2) [2]. Dve smese koje pokazuju najbolje karakteristike su CO_2 , O_2 i $\text{C}_4\text{-FN}$ i smesa CO_2 i $\text{C}_4\text{-F}_7\text{N}$. Svaki od gasova utiče na različite osobine smese. Uloga $\text{C}_4\text{-FN}$ jeste poboljšanje dielektričnih karakteristika, dok CO_2 i O_2 učestvuju u stabilizaciji hemijske reakcije tokom prekidanja električnog luka.

2 PRIMERI PREKIDAČA

U nastavku biće prikazani modeli prekidača sa svojim osnovnim karakteristikama, koji su testirani po IEC i IEEE standardima, testovi koji su sprovedeni kao i problemi koji su postojali tokom samog procesa projektovanja.

2.1 Prekidač 420 kV/63kA sa smesom gasova CO_2 , O_2 i $\text{C}_4\text{-FN}$

Ovaj prekidač je prvi prekidač ovog tipa u svetu, on je u potpunosti testiran po IEC i IEEE standardima. Razvijene su verzija za vazduhom izolovana postrojenja (AIS) odnosno “dead tank” prekidač (DTB), ali i verzija za gasom izolovana postrojenja (GIS). Kako bi se pokrilo veće tržište, sva testiranja su sprovedena i sa 50 Hz i sa 60 Hz [2].

U fazi razvoja sprovedene su različite softverske simulacije kako bi se ustanovio optimalno rešenje. Cilj simulacija bio je određivanje dizajna kod koga će biti minimalna jačina električnog polja na odgovarajućim komponentama, kao i smanjenje dielektričnog naprezanja na kritičnim mestima.

Po izradi prekidača sprovedeni su testovi po IEC i IEEE standardima. Prekidač ne samo da je zadovoljio propisane standarde već su neki testovi sprovedeni sa većim vrednostima testnih veličina. Tokom testova prekidač je izlagan većim naponima, nijednom nije došlo do pojave dielektričnog proboja kao ni do ponovnog paljenja luka tokom prekidanja kapacitivnih struja [3].

Tokom ovih testova bitnu ulogu je imao novi dielektrik, koji se pokazao kao dobra zamena SF₆ gasa. Sama mešavina se sastoji od 3.5 mol% C4-FN, 10 mol% O₂ i 86.5 mol% CO₂. Pritisak gasa je izabran tako da se izbegne razgradnja gasa usled kondenzacije pri niskim temperaturama.

Smese gasova na bazi C4-FN za sada predstavljaju najbolju alternative SF₆ gasu zbog dobrih karakteristika u pogledu dielektrične izdržljivosti i gašenja električnog luka. Mešavina C4-FN i ugljen-dioksida pokazala se kao najbolja alternativa SF₆ gasu jer značajno smanjuje ugljenični otisak, ima dobre dielektrične osobine i ima mogućnost rada pri izuzetno niskim temperaturama. Razlog za manji udeo C4-FN jeste to što bi pri većem udelu i veoma niskim temperaturama došlo do pojave kondenzacije [2].

Naznačeni napon prekidača je 420 kV, a maksimalna struja kratkog spoja koju može da prekine je 63 kA. Prekidač je sa dve komore za gašenje luka.

Komore za gašenje luka (prekidni elementi) su redno povezane. U svakoj jedinici se nalazi naponski delitelj za preraspodelu napona. Pogonski mehanizam prekidača je hidraulični, sa oprugom. Prenosjenje pokreta između komora se ostvaruje pomoću kinematskog lanca [1].



Slika 1. Prekidač 420 kV sa mešavinom gasova CO₂, O₂ i C4-FN u postrojenju (SAD)¹.

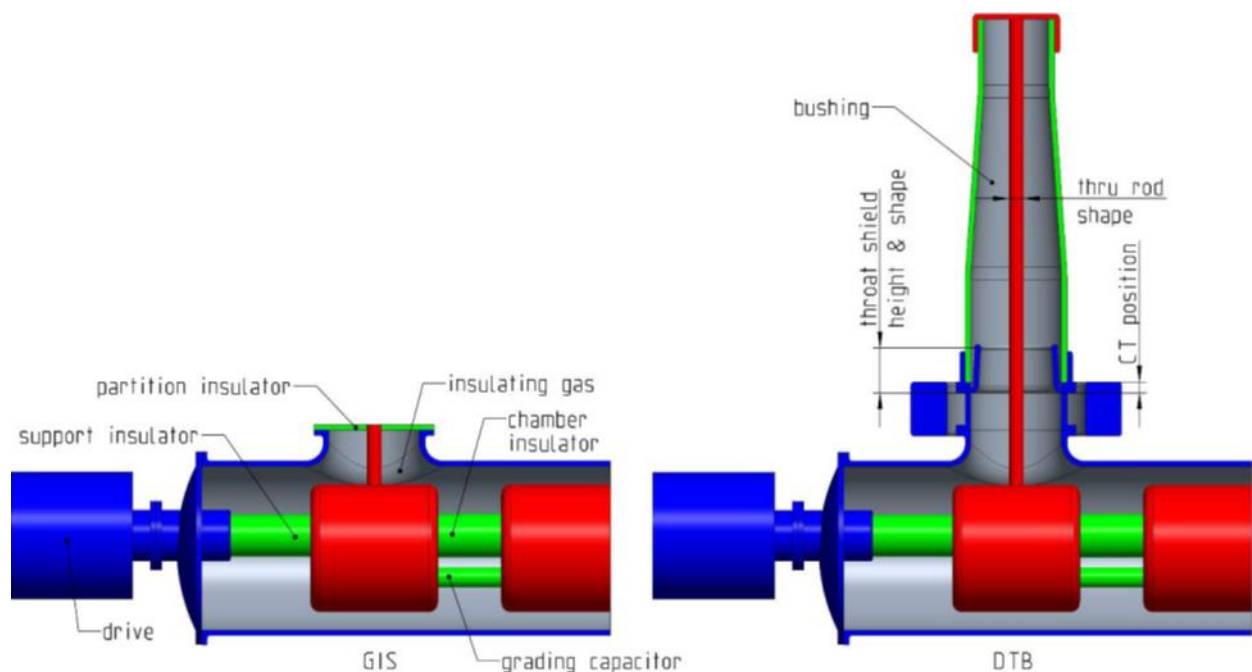
Kod obe verzije i za GIS i za DTB u centru prekidača se nalaze prekidne jedinice. Oko prekidne jedinice nalaze se štitovi čija je uloga da zaštite prekidnu jedinicu od naponskih naprezanja, zbog čega je njihova konstrukcija definisana jačinom električnog polja na njihovoj površini [3].

Na krajevima GIS verzije nalaze se potpuno-provodni izolatori koji razdvajaju prekidač od ostalih elemenata postrojenja, dok je kod DTB provodni izolator. Posebna pažnja posvećenja je dizajnu izolatora kako bi adekvatno podneli termička naprezanja. Izvršene su različite modifikacije kako bi se postiglo rešenje kod koga je raspodela temperature optimalna, a termička naprezanja ravnomerno raspoređena. Razlog za ovo jeste to što u nekim slučajevima

¹ Izvor [2].

termička naprezanja mogu uticati na dielektrična naprezanja i tako ugroziti dielektričnu izdržljivost [2].

Na slici 2 je predstavljen šematski prikaz samog prekidača.



Slika 2. Šematski prikaz GIS i DTB modela prekidača².

Za procenu dielektričnih osobina prekidača korišćene su različite 2D i 3D simulacije, kako bi se izračunala raspodela električnog polja na različitim komponentama prekidača. Granične vrednosti električnog polja kojima komponente mogu biti izložene zavise od hemijskog sastava izolacionog gasa, da li je u pitanju naizmenični napon ili impulsni talas, izrade samih elemenata tj. njihovih površina i drugih faktora [3].

Prekidač je pokazao dobre rezultate tokom testa prekida struja kratkog spoja bliskih kvarova (Short Line Fault-SFL³) i tokom terminalnog prekida. Test prekidanja bliskih kratkih spojeva se vrši sa 90% ili 75% naznačene struje kratkog spoja, što je definisano IEC i IEEE standardima (SLF90, SLF75). [2] Oba testa odnose se na takozvanu termičku prekidnost koja predstavlja mogućnost prekidača da prekinе struju bez oštećenja njegovih delova usled visoke temperature.

Termički prekid zavisi od strmine struje pri prolasku kroz nulu, struje čiji izvodi imaju veći nagib teže se prekidaju, i od vremenskog odlaganja tranzijentnog oporavka napona. Terminalni kvarovi predstavljaju kvarove na samim priključcima prekidača i sprovode se kako bi se ustanovila dielektrična izdržljivost izolacionog medijuma.

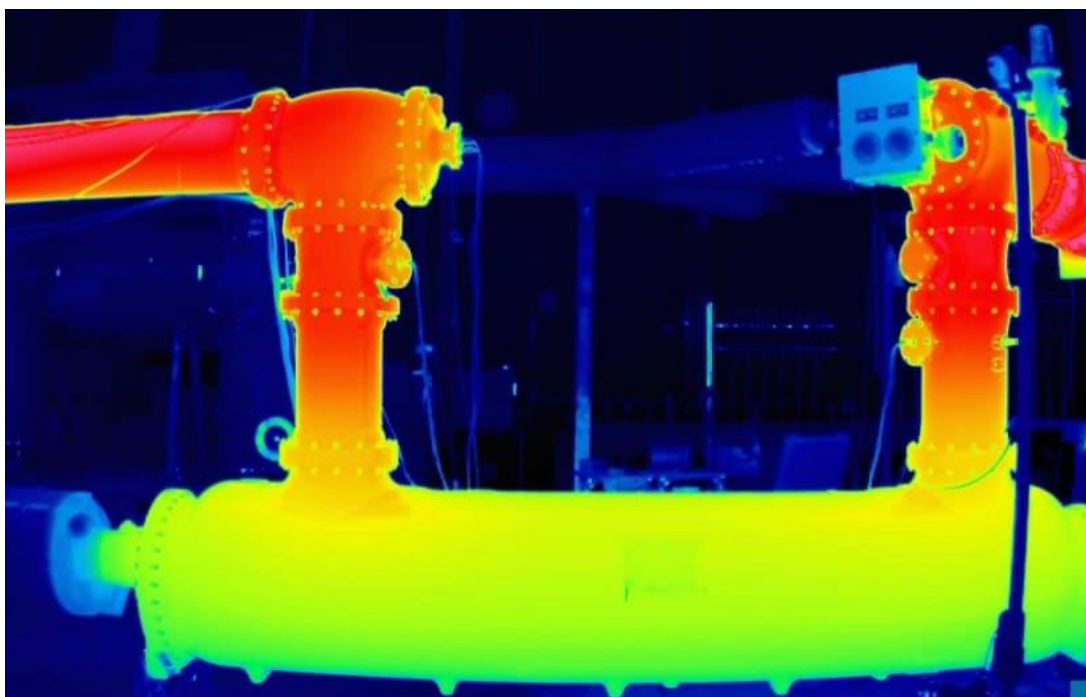
Prekidač je pri testiranju prekidanja struja dvostrukog zemljospoja, koje predstavljaju struje koje su veće od 87% naznačene struje kratkog spoja po IEEE standardu uspešno prošao test.

² Izvor [3].

³ IEC 62271-100

Na temperaturu prekidača utiče toplota koja se generiše tokom prekidanja struje, toplota koju prekidač odaje i temperatura okoline. Relevantni standardi definišu dozvoljena termička naprezanja koja svaka komponenta prekidača, zavisno od funkcije, može da podnese. Posebna pažnja posvećena je dizajniranju kontakata. Pošto prekidač ima glavne i lučne kontakte, izrada kontakata je prilagođena funkciji koju obavljaju. Prekidač je zadovoljio neophodne testove u pogledu termičkih naprezanja [2].

Zbog postojanja izolacionog gasa odavanje toplote je omogućeno i strujanjem, a ne samo provođenjem i zračenjem, zbog čega je značajno smanjena temperatura pojedinih delova prekidača. Posledica toga je da prekidač može nesmetano da izdrži velika opterećenja. Ovaj prekidač može u trajnom radu da podnese struju od 5000 A pri učestanosti od 60 Hz i ambijentalnoj temperaturi od 40 °C. Zbog dobrog dizajna u pogledu termičkih naprezanja GIS model prekidača ima značajno niže temperature u odnosu na ostale komponente sistema sa kojim je prekidač povezan, što se može videti na slici 3. Kod DTB modela prekidača odavanje toplote zavisi od načina projektovanja provodnog izolatora. I GIS i DTB modeli prekidača su prošli IEC i IEEE testove koji se odnose na termičku izdržljivost [2].



Slika 3. Termovizijski snimak GIS modela prekidača tokom opterećenja od 5000 A⁴.

Erozija kontakata, ablacija (trošenje) mlaznica i dekompozicija C4-FN predstavljaju bitne parametre koji utiču na eksploatacioni vek prekidača. Usled izlaganja mlaznica i lučnih kontakata strujama kratkog spoja, posle određenog vremena dolazi do njihove razgradnje. Pored toga vremenom dolazi do dekompozicije C4-FN gasa. Ispitivanjem je ustanovljeno da razlaganje C4-FN gasa linearno zavisi od struje kratkog spoja. Moguće je izračunati koeficijent dekompozicije za određenu struju kratkog spoja za šta je neophodno poznavati energiju luka koja predstavlja proizvod struje luka i napona luka. Pošto je napon luka konstantan, energija luka se može aproksimirati kvadratom struje luka. Pri tome sama dekompozicija gasa nema presudan uticaj na eksploatacioni vek prekidača, već on zavisi od trošenja kontakata i mlaznica [2].

⁴ Izvor [2]

2.2 Prekidač 145 kV/40 kA sa mešavinom gasova CO₂ i C4F7N

Prekidač kao izolaciono sredstvo koristi mešavinu CO₂ i C4F7N. Prekidač je sa naznačenim naponom od 145 kV pri čemu postoji mogućnost razvoja do 175 kV. Pogonski mehanizam prekidača je sa oprugom, uz to se za oduvavanje električnog luka koristi i energija samog luka, tj. prekidač je autokompresioni. Prednost ovog prekidača je to što je zadržao iste dimenzije kao i ekvivalentni prekidač sa SF₆ gasom, a značajno je smanjen ugljenični otisak [4].

U Tabeli 1 prikazane su karakteristike prekidača [4].

Tabela 1. Osnovne karakteristike prekidača

Naznačeni napon U_n	145 kV
Naznačena frekvencija f	50 Hz
Naznačena struja I_n	3150 A
Naznačena struja kratkog spoja I_{sc}	40 kA

Za razliku od prethodno navedenog prekidača, izolacioni gas kod ovog prekidača je bez kiseonika. Razlog za to je što je ustanovljeno da kiseonik nema veliki uticaj na hemijsku reakciju gorenja luka tokom koje se stvaraju štetne čestice. Dodatna prednost je to što bez kiseonika mešavina ima samo dva gasa sa fiksnim odnosom pa su skladištenje i prenos olakšani. Pored toga bez kiseonika nema oksidacije, pa metalne delove ne ugrožava korozija [4].

Umesto linijskog rasporeda kontakata svake faze izabran je trougaoni. Ovakvom konstrukcijom omogućen je veći razmak između polova, što za posledicu ima mogućnost podnošenja većih dielektričnih napreznja. Uz to raspodela dielektričnih napreznja je ravnomernija. Ovim rasporedom maksimalno je iskorišćena zapremina kućišta prekidača, a uz to su zadržane iste dimenzije kao kod ekvivalentnog prekidača sa SF₆ gasom [4].

Kako bi se postigla optimalna raspodela kontakata, vršene su 2D i 3D simulacije koje su uvažavale različite faktore, poput raspodele električnog polja, pritiska i karakteristike izrade samog prekidača (hrapavost metalnih površina). Tokom razvoja sproveden je niz različitih softverskih simulacija u cilju pronalaska optimalnog rešenja koje će zadovoljiti kriterijume koji su definisani dimenzijama kućišta, prosečnim vremenom prekidanja struje tokom komutacije i energijom pogonskog mehanizma.

Analizirani su slučajevi bez opterećenja kako bi se ustanovila minimalna vrednost pritiska potrebnog za test prekidanja malih struja i minimalnog vremena prekidanja tih struja. Pored toga sproveden je i IEC test SLF90. Sprovedeni su i testovi kako bi se ustanovilo smanjenje dielektrične izdržljivosti izolacionog gasa usled razgradnje molekula.

Sprovedena je i analiza dinamike fluida kako bi se ustanovilo ponašanje prekidača tokom prekidanja bliskih kratkih spojeva (SLF) i terminalnih kvarova, tj. kako bi se odredili kritični delovi prekidača u pogledu termičkih napreznja. Na ponašanje prekidača tokom termičkih napreznja utiče gustina izolacionog gasa, pritisak ali i metalne površine kao i njihova hrapavost. Zbog toga je izvršen veliki broj simulacija kako bi se posmatrao proces odavanja toplote.

Test termičke prekidnost koristi se kako bi se ustanovilo ponašanje prekidača tokom prekidanja struja kvara koje generišu veliku toplotu. Ovaj test je važan kako bi se ustanovila sposobnost prekidača da nesmetano funkcioniše pri pojavi oštećenja kontakata i pojavi erozije mlaznica [4].

Sve pomenute testove prekidač je uspešno prošao.

Tokom razvoja posebna pažnja posvećena je sistemu za oduvavanje luka, kako bi se sprečilo ponovno paljenje luka tokm uspostavljanja dielektrične čvrstoće.

Kompanija koja je proizvela ovaj prekidač planira da razvije digitalizovane verzije svojih proizvoda. Takozvani “digitalni blizanac” predstavlja digitalnu verziju prekidača koja omogućava praćenje svih parameter uživo, kao i mogućnost sprovođenja različitih simulacija i analiza. Kompanija planira da u budućnosti primeni modele i stečena znanja za proizvodnju prekidača većih naznačenih napona zaključno sa 420 kV [4].

2.3 Trendovi definisani od CIGRE

Svetski proizvođači rasklopne opreme danas potenciraju upotrebu sledećih gasova:

- C4-FN sa dodatkom N_2 , O_2 i CO_2 (u smešama $GWP < 1000$)
- C5-FK (C_5F_{10}) sa dodatkom N_2 , O_2 i CO_2 - ova smeša se napušta
- Sintetički gas (drugi naziv Dry air) 80% N_2 i 20 % O_2
- Smeše gasova N_2 , O_2 i CO_2 koje potiču od prirodnog vazduha (Natural Origin gas)

Prvi u nizu gasova se sada koristi za naponske nivoe 245 kV i 420 kV. Za prekidače 110 kV, i do 145 kV, uglavnom se ide sa vakuumskim prekidnim elementima, dok se za izolacioni gas teži upotreba sintetičkog gasa. Za sredjenaponske nivoe, npr. metalom oklopljen razvod 24 kV razvijena je oprema sa sintetičkim gasom, gde i rasklopna oprema može prekinuti struje opterećenja, ali se za prekidanje struje kratkog spoja koristi osigurač na srednjem naponu. U svakom slučaju, broj narudžbi novih prekidača sa alternativnim gasovima je u velikom porastu i grubo govoreći, očekuje se da će već sledeće godine u Evropi biti dominantna proizvodnja nove rasklopne opreme sa alternativnim gasovima.

Sa obzirom da postoje različiti gasovi, da su oni pod različitim pritiscima u VN opremi, u pripremi je posebno CIGRE uputstvo (Technical guide) kako se zapravo prave smeše gasova na terenu i pod kojima pritiscima i pri kojoj temperaturi se oprema puni gasom. Postojaće i opcija da se kupe unapred pripremljene smeše u manjim kontejnerima pod pritiskom, pa da se onda izbegava miksanje gasova na terenu. Naravno, za pretakanje gasa, proveru pritiska, kontrolu sastava smeše, itd., biće potrebno nabaviti posebne, nove uređaje i dodatnu mernu opremu. Takođe je definisano da se za svaki gas koristi posebna boja ventila na VN opremi i da svaki od tih ventila ima drugačiji promer “M” navrtke, kao i poseban alat. Smatra se da će se ovim onemogućiti greške pri radu na terenu.

Tabela 2. Preporučeni merni sistem jedinica za nove prekidače sa alternativnim gasovima

Temperatura	°C
Temperaturna razlika	K
Pritisak	kPa
Gustina	kg/m ³
Koncentracija izolacionog gasa	% _{mol}
Koncentracija razloženih podukata	μl/L (ppm _v)
Koncentracija vlažnosti	μl/L (ppm _v)
Tačka rose	°C

3 ZAKLJUČAK

U radu su prikazani modeli prekidača koji predstavljaju neka od dostupnih rešenja. Cilj projektovanja novih prekidača bio je da se postigne konstrukcija i karakteristike prekidača koje u velikoj meri odgovaraju postojećim SF₆ prekidačima, kako bi se ostvarila brza i jednostavna tranzicija. Na tržištu ima dovoljno prekidača koji će u potpunosti moći da zadovolje postojeće zahteve. Potreba za SF₆ gasom je i dalje postoji, ali rezultati CIGRE anketa u vezi VN opreme pokazuju da alternativni gasovi nailaze na izuzetan odziv kupaca, TSO, DSO, i da je velika svest o štetnosti SF₆ gasa. Nova VN oprema je već u velikoj meri ugrađena, iskustva su dobra, zamena za SF₆ postoji. Već sad je 50% narudžbina za novu opremu. Proizvođači prekidača trenutno postižu da održe lance snabdevanja.

Prema F-gas EU regulativi broj 2024/573 (1) definisani su važni datumi posle kojih neće biti moguća isporuka i ugradnja SF₆ prekidača.

Za srednji napon: Sa obzirom na različite naponske nivoe od 1.1.2026. u EU zemljama će stupiti na snagu zabrana u novim proizvodima naponskog nivoa do, i uključujući 24 kV. Za ostale prekidače srednjeg napona od 24 kV do i uključujući 52 kV (ovde spada 35 kV oprema) rok je 1.1.2030. godine.

Za visoki napon: Od 1.1.2028. godine stupa na snagu zabrana za prekidače do, i uključujući 145 kV i 50kA (ovde potpada oprema EMS 110 kV). Od 1.1.2032. godine stupa na snagu zabrana za prekidače iznad 145 kV ili iznad 50kA (ovde potpada oprema EMS 220 kV i više, ili 110 kV / 63 kA).

Zemljama EU je ostavljen period da naruče opremu sa SF₆ gasom mnogo pre ovih datuma.

Sve navedeno se ne odnosi na zemlje koje nisu članice EU, odnosno Srbija i zemlje regiona će moći i dalje naručivati opremu sa SF₆ gasom, kaja je danas usavršena tako da je curenje gasa manje od 0,1% godišnje. Ipak sa obzirom da je u nekim članicama EU definisana taksa za uvoz SF₆ gasa (primer Norveške takse od 2700 Eur/kg gasa koji se uvozi za dopunu usled curenja) za očekivati je da u sledećim godinama ova taksa bude široko rasprostanjena. O ovome i o reciklaži SF₆ gasa u budućnosti se treba na vreme informisati, zbog troškova, koji danas nisu poznati.

4 LITERATURA

- [1] Lisa SCHAEFER, Aurelien TAUREAU, Jonas BAUMANN, Thomas WIJNHOFEN, Maria Isabel Martin, Patrick SCHORNBÖCK, Frank RICHTER, Pierre MEYER Paul LEEMANS, “Future needs and common approach of the implementation of SF6-free equipment in the grid of six European TSOs”, CIGRE Paris 2024.
- [2] Valeria TEPPATI, Reto KARRER, Mahesh DHOTRE, Peter FREI, Patrick STOLLER, Markus BUJOTZEK, “Development and type testing of a 420 kV 63 kA 50 and 60 Hz SF6-free High Voltage Circuit Breaker“, CIGRE Paris 2024.
- [3] Peter FREI, Reto KARRER, Wilhelm THUNBERG, Valeria TEPPATI, Brian CHRISTOPHER, Matt CUPPETT, Carl R. KURINKO, “High voltage type testing of a 420 kV SF6-free High Voltage Circuit Breaker for Gas Insulated Switchgear and Dead Tank Breaker Applications”, CIGRE Paris 2024.
- [4] Manuel GOTTI, Kilsoo HAN, Jeong Cheol KIM, Sihyeong KIM, Xiangyang YE, Javier MANTILLA, Kedar PANDYA, “Experience in the development of a Fluoronitriles-based 145 kV / 40 kA / 50-60Hz HVCB with an extremely low CO2 footprint”, CIGRE Paris 2024.