

DOI: [10.46793/CIGRE37.A3.05](https://doi.org/10.46793/CIGRE37.A3.05)**A3.05****NOVI TRENDOWI U RAZVOJU SKLOPNIH APARATA SUKLADNO UREDBI (EU) 2024/573 EUROPSKOG PARLAMENTA I VIJEĆA: TEHNOLOŠKI, REGULATORNI I EKOLOŠKI IZAZOVI****NEW TRENDS IN SWITCHGEAR DEVELOPMENT, ACCORDING TO REGULATION (EU) 2024/573 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL: TECHNOLOGICAL, REGULATORY, AND ENVIRONMENTAL CHALLENGES****Igor Provči***

Kratak sadržaj: Uredba (EU) 2024/573 Europskog parlamenta i vijeća o fluoriranim stakleničkim plinovima donosi značajne promjene u elektroenergetskom sektoru, posebice u području sklopnih aparata. Implementacija nove uredbe predstavlja složen proces koji zahtijeva koordinirano djelovanje različitih sektora i razina vlasti kako bi se osigurala učinkovita provedba i postizanje ciljeva smanjenja emisija fluoriranih stakleničkih plinova. Uredba uvodi stroge restrikcije na uporabu SF₆ plina u elektroenergetskoj opremi, propisujući fazno ukidanje za različite naponske razine između 2026. i 2032. godine. U referatu će se analizirati novi trendovi u razvoju zamjenskih supstanci za gašenje električnog luka, s fokusom na tehnološke, regulatorne i ekološke izazove koje ova tranzicija donosi.

Ključne reči: Uredba (EU) 2024/573, SF₆ plin, zamjenska supstanca za gašenje električnog luka

Abstract: Regulation (EU) 2024/573 of the European Parliament and Council on fluorinated greenhouse gases introduces significant changes in the power sector, particularly in the field of switchgear. The implementation of this new regulation represents a complex process requiring coordinated action across various sectors and levels of governance to ensure effective execution and achievement of fluorinated greenhouse gas emission reduction targets. The regulation imposes stringent restrictions on the use of SF₆ gas in electrical equipment, mandating a phased elimination for different voltage levels between 2026 and 2032. This paper analyzes new trends in the development of alternative substances for arc quenching, focusing on the technological, regulatory, and environmental challenges that this transition presents.

Keywords: Regulation (EU) 2024/573, SF₆ gas, alternative arc quenching substance

* Hrvatski Operator Prijenosnog Sustava, Prijenosno područje Osijek, Vukovarska cesta 217, Osijek, Hrvatska
igor.provci@hops.hr

1 UVOD

Uredba (EU) 2024/573 Europskog parlamenta i Vijeća o fluoriranim stakleničkim plinovima (F-plinovima) [1] donosi temeljite promjene u upravljanju F-plinovima, s posebnim naglaskom na elektroenergetski sektor i postupno ukidanje uporabe sumpor heksafluorida (SF_6) u visokonaponskim sklopnim aparatima. SF_6 je desetljećima bio standard u ovoj primjeni zbog svojih iznimnih dielektričnih i gasiteljskih svojstava, no zbog izuzetno visokog potencijala globalnog zagrijavanja (GWP) i dugog životnog vijeka, predstavlja jedan od najštetnijih stakleničkih plinova. Nova regulativa predviđa postupno ukidanje SF_6 i potiče razvoj te primjenu zamjenskih supstanci i tehnologija koje zadovoljavaju strože ekološke i tehničke standarde. Prijelaz na ekološki prihvatljive alternative ključan je za ostvarenje ciljeva klimatske neutralnosti Europske unije, ali zahtijeva pažljivo planiranje i koordinaciju kako bi se osigurala stabilnost i sigurnost elektroenergetske mreže.

Cilj ovog rada je analiza aktualnih tehnoloških trendova, regulatornih zahtjeva i ekoloških izazova u tranziciji prema rješenjima bez SF_6 plina u visokonaponskim sklopnim aparatima. Poseban naglasak stavljen je na primjenu novih tehnologija i zamjenskih supstanci, kao i na utjecaj regulative na tehničke, ekološke i ekonomske aspekte elektroenergetskog sustava.

U prvom dijelu rada prikazani su osnovni tehnički principi i karakteristike zamjenskih tehnologija, uključujući vakuumske prekidače, mješavine fluoronitrila i CO_2 , tehnologiju „čistog zraka” i druge inovativne pristupe. U drugom dijelu analizirani su regulatorni zahtjevi prema Uredbi (EU) 2024/573, s naglaskom na zabrane, prijelazne rokove i izuzetke, kao i na implikacije za nacionalno zakonodavstvo i praksu. Treći dio rada posvećen je ekološkim izazovima i procjeni utjecaja novih tehnologija kroz analizu životnog ciklusa, dok su u četvrtom dijelu razmotrene ekonomske implikacije tranzicije, uključujući troškove, investicije i utjecaj na pouzdanost mreže.

2 TEHNOLOŠKI ASPEKTI

2.1. Trenutno stanje tehnologije

Sumpor heksafluorid (SF_6) desetljećima je bio preferirani izolacijski i gasiteljski medij u visokonaponskim sklopnim aparatima zbog svoje visoke dielektrične čvrstoće i izvrsnih svojstava gašenja luka. Međutim, njegov izuzetno visok GWP (23.500) i dug životni vijek (do 3.200 godina) čine ga jednim od najštetnijih stakleničkih plinova [2]. Zbog toga je Europska unija usmjerila napore na razvoj alternativnih tehnologija i supstanci koje mogu zadovoljiti iste tehničke zahtjeve uz znatno manji utjecaj na okoliš. Trenutačno se u srednjem naponu (do 52 kV) koriste vakuumski prekidači i izolacija suhim zrakom, dok su za visoki napon (do 145 kV) dostupna plinom izolirana postrojenja (GIS) s alternativnim izolacijskim medijima. Za vrlo visoke napone (>145 kV) razvijaju se prototipovi, ali je tržišna dostupnost još uvijek ograničena[3].

2.2. Nove tehnologije i zamjenske supstance

Tri vodeće tehnološke tvrtke razvile su vlastite ekološki prihvatljive GIS proizvode koji koriste alternative za SF_6 s niskim GWP-om: GE (g^3), Hitachi Energy (EconIQ) i Siemens (Blue portfolio). Sve tri tvrtke implementirale su brojne projekte ili prototipove, uglavnom u Europi, koristeći svoje ekološki učinkovite alternative za SF_6 u srednjenaponskim (SN) i visokonaponskim (VN) GIS i AIS postrojenjima[4-5].

Ključne alternative uključuju:

- Vakuumska prekidačka tehnologija (VIT): Široko primijenjena u srednjem naponu, sada se razvija i za visoki napon. Vakuumski prekidači omogućuju efikasno gašenje luka bez upotrebe plinova s visokim GWP-om.
- Mješavine fluoronitrila i CO₂: Primjer je GE-ov g³ plin (Green Gas for Grid), koji kombinira CO₂ (90–96%) s fluoronitrilom (C₄F₇N, 4–10%). Ove mješavine nude slična izolacijska i gasiteljska svojstva kao SF₆, ali s GWP-om nižim za 98%. [6,8].
- Tehnologija „čistog zraka”: Siemens koristi mješavinu 80% dušika i 20% kisika za izolaciju, u kombinaciji s vakuumskom prekidačkom tehnologijom. GWP ovih rješenja je nula, ali su dimenzije opreme nešto veće zbog niže dielektrične čvrstoće zraka.
- EconiQ™ (Hitachi Energy): Ova tehnologija koristi ekološki prihvatljive mješavine plinova za visokonaponske sklopne aparate, uz dokazano smanjenje emisija CO₂ ekvivalenta kroz cijeli životni ciklus opreme. EconiQ retrofill rješenja omogućuju zamjenu SF₆ plina u postojećim GIS postrojenjima bez potrebe za zamjenom cijele opreme, čime se omogućuje brza i učinkovita dekarbonizacija postojećih elektroenergetskih mreža [7].

Tabela 1: Ključne alternative SF₆ u visokonaponskim sklopnim aparatima

Tehnologija	Izolacijski/gasiteljski medij	GWP	Komercijalna dostupnost
Vakuumska prekidač	Vakuum	0	srednji/visoki napon
GE g ³	CO ₂ + C ₄ F ₇ N	~400	do 420 kV
Siemens Blue	Čisti zrak (N ₂ /O ₂) + vakuum	0	do 145 kV
Hitachi Energy EconiQ	Ekološki prihvatljiva mješavina	<500	do 420 kV

GE - g³

GE je razvio revolucionarnu tehnologiju koja zamjenjuje SF₆ u visokonaponskim primjenama s g³ plinom. Smjesa g³ temelji se na molekuli 3M Novec 4710 s pažljivo uravnoteženim udjelom ugljičnog dioksida (CO₂, 90–96 %). GE promovira g³ kao ekološki prihvatljivu alternativu SF₆, koja pruža brojne tehničke, ekološke i financijske prednosti.

Oprema na g³ plin u potpunosti je tipski ispitana, primjenjiva u istim okolišnim uvjetima i temperaturnim rasponima kao SF₆, kompatibilna s materijalima rasklopne opreme te pogodna za unutarnju i vanjsku primjenu do -30°C. Dimenzije opreme na g³ plin identične su onima na SF₆ [8].

Siemens - Blue portfelj

Siemens je razvio tehnologiju koja zamjenjuje SF₆ u visokonaponskim primjenama koristeći vakuumsku tehnologiju i tzv. tehnologiju čistog zraka do napona od 145 kV. Vakuumska jedinica prekidača obavlja prekidanje i gašenje luka, dok tehnički obrađen i pročišćen zrak (bez vlage) u omjeru 80 % N₂ i 20 % O₂ – tzv. čisti zrak – služi kao izolacija za vodiče unutar metalnog kućišta GIS-a.

Nova generacija prekidača i rasklopne opreme omogućuje primjenu vakuumske tehnologije do nazivnog napona od 145 kV, nazivne struje prekidanja kratkog spoja do 40 kA i radne temperature od -55°C do +55°C, što ih čini pogodnima za unutarnju i vanjsku primjenu. GWP ove tehnologije iznosi nula. Zbog niže izolacijske sposobnosti prirodnih plinova, dimenzije opreme su nešto veće u odnosu na GIS sa SF₆, ali učinkovitost prijenosa električne energije ostaje jednaka. [9].

Hitachi Energy – EconiQ portfelj

Novi eko-učinkoviti rasklopni uređaji Hitachi Energy koriste alternativnu plinsku smjesu EconiQ™ (ranije poznatu kao AirPlus™) kao izolacijsko sredstvo za visokonaponske uređaje, koja je dokazano više nego prepolovila ekvivalentne emisije CO₂ tijekom životnog ciklusa. Primjena EconiQ-a pomaže izbjeći regulatorne procedure vezane uz SF₆, kao što su vođenje evidencije, posebni zahtjevi pri rukovanju, punjenju i zbrinjavanju opreme, kao i uštede na porezima vezanim uz SF₆, koji su na snazi u nekim zemljama. Oprema sa EconiQ plinom zadržava iste kompaktne dimenzije, električnu izdržljivost i pouzdanost kao i tradicionalna SF₆ oprema, što omogućuje jednostavnu integraciju u postojeće energetske sustave bez potrebe za dodatnim prostorom ili promjenama u dizajnu postrojenja. Također, EconiQ retrofill rješenja omogućuju zamjenu SF₆ plina u postojećim GIS postrojenjima bez potrebe za zamjenom cijele opreme, čime se omogućuje brza i učinkovita dekarbonizacija postojećih elektroenergetskih mreža [7].

Tabela 2: Usporedbu ključnih alternativa SF₆ prema GWP-u i dielektričnim svojstvima.

Zamjenska supstanca	GWP	Primjena	Dielektrična čvrstoća
SF ₆	23.500	Svi naponi	Vrlo visoka
g ³ (CO ₂ /C ₄ F ₇ N/O ₂)	<500	72–245 kV	Visoka
Čisti zrak (N ₂ /O ₂)	1	do 145 kV	Srednja
Vakuum	0	do 145 kV	Vrlo visoka

3 REGULATORNI OKVIR

3.1. Uredba (EU) 2024/573

Uredba (EU) 2024/573 Europskog parlamenta i Vijeća od 7. veljače 2024. odnosi se na fluorirane stakleničke plinove (F-plinove), mijenja Direktivu (EU) 2019/1937 i stavlja izvan snage Uredbu (EU) br. 517/2014 [10]. Stupila je na snagu 11. ožujka 2024. godine [11]. Glavni cilj Uredbe je dodatno smanjenje emisija fluoriranih stakleničkih plinova kroz stroža pravila o proizvodnji, uvozu, upotrebi i stavljanju na tržište opreme koja sadrži te plinove. Uredba propisuje zabrane stavljanja na tržište opreme koja koristi F-plinove s GWP-om većim od 1, uvodi kvote, stroge zahtjeve za izvještavanje i certificiranje, kao i proširenu odgovornost proizvođača za zbrinjavanje stare opreme.

Uredba predstavlja prekretnicu u dekarbonizaciji elektroenergetskog sektora, posebno kroz postupno ukidanje upotrebe SF₆ i drugih fluoriranih plinova u visokonaponskoj sklopnoj opremi. Potiče razvoj i primjenu alternativnih tehnologija s niskim ili nultim utjecajem na klimu, uz jasno definirane prijelazne rokove i mogućnost izuzeća u slučaju nedostatka tehničkih rješenja na tržištu. Ključne odredbe odnose se na zabranu stavljanja na tržište opreme koja sadrži fluorirane plinove, a detaljno su opisane u članku 13. i Prilogu IV. Uredbe. Zabrane se odnose na novu opremu, dok se postojeća oprema može premještati ili proširivati ako nije moguće koristiti kompatibilnu opremu bez F-plinova.

Tabela 3: Ključne zabrane i prijelazni rokovi za visokonaponsku sklopnu opremu.

Tip sklopne opreme	Napon	Zabrana F-plinova	Početak zabrane
Srednjenaponska	≤ 24 kV	Svi F-plinovi (npr. SF ₆)	Od 2026.
Srednjenaponska	> 24 kV i ≤ 52 kV	Svi F-plinovi	Od 2030.
Visokonaponska	≥ 52 kV i ≤ 145 kV, kratki spoj ≤ 50 kA	F-plinovi s $GWP \geq 1$	Od 2028.
Visokonaponska	> 145 kV ili kratki spoj > 50 kA	F-plinovi s $GWP \geq 1$	Od 2032.

Predviđena su izuzeća i prijelazna razdoblja, pa tako tijekom prve dvije godine od početka zabrane, ako u postupku nabave nije moguće dobiti ponude za opremu bez F-plinova (ili samo od jednog proizvođača), dopušteno je staviti u rad opremu s F-plinovima čiji GWP ne prelazi 1000. Nakon isteka prijelaznog razdoblja, izuzeća su moguća samo ako ne postoje tehnički prikladne alternative na tržištu, uz strogo definirane kriterije [12].

3.2. Implementacija na nacionalnoj razini

Uredba se izravno primjenjuje u svim državama članicama od dana stupanja na snagu. Države članice moraju prilagoditi nacionalno zakonodavstvo, uspostaviti sustave za nadzor i izvještavanje, te osigurati edukaciju i tehničku podršku dionicima. Prilagodba uključuje ažuriranje nacionalnih standarda i propisa, jačanje institucionalnih kapaciteta i informiranje industrije i javnosti o novim obvezama. Nacionalna tijela odgovorna su za nadzor tržišta, provođenje inspekcija, kontrolu uvoza/izvoza i kaznene mjere protiv prekršitelja, uključujući borbu protiv ilegalne trgovine F-plinovima.

Uredba predviđa suradnju između carinskih, okolišnih i tržišnih inspekcija te razmjenu informacija među državama članicama i s Europskom komisijom radi učinkovitijeg nadzora i suzbijanja nezakonitih aktivnosti. Države članice moraju propisati učinkovite, proporcionalne i odvraćajuće kazne za kršenje odredbi Uredbe. Kazne se odnose na ilegalni promet, prekoračenje kvota, nepravilno označavanje, neprovođenje provjera propuštanja i druge povrede. Proizvođači i uvoznici moraju koristiti F-Gas Portal za prijavu, upravljanje kvotama i izvještavanje o prometu F-plinova [13]. Do kraja 2027. proizvođači moraju financirati sakupljanje, obradu, oporabu i uništavanje F-plinova iz otpada električne i elektroničke opreme, a države članice dužne su izraditi i dostaviti nacionalne planove za oporavak i provedbu mjera iz Uredbe, kao i redovito izvještavati Europsku komisiju o provedbi i postignutim rezultatima. Iz svega rečenog proizlazi da uspješna implementacija Uredba zahtijeva koordinaciju između nacionalnih tijela, industrije i Europske komisije radi postizanja ciljeva smanjenja emisija F-plinova i zaštite okoliša.

4 EKOLOŠKI IZAZOVI

4.1. Smanjenje emisija stakleničkih plinova

Uredba (EU) 2024/573 snažno potiče zamjenu SF₆ i drugih F-plinova ekološki prihvatljivijim alternativama, kao što su čisti plinovi (npr. CO₂, O₂, N₂ smjese), čvrsti izolacijski materijali ili vakuumske prekidači, koji su već dostupni na tržištu. SF₆ je odgovoran za oko 80% emisija F-plinova u europskim elektroenergetskim mrežama. Iako SF₆ čini manji dio ukupnih emisija stakleničkih plinova (oko 0,2% ukupno), njegova zamjena donosi značajan učinak po jedinici mase. Zbog iznimno visokog GWP-a, čak i male količine SF₆ imaju neproporcionalno velik klimatski utjecaj, pa je zamjena ovog plina tehnološki i klimatski opravdana. Procjene pokazuju da bi zamjena SF₆ mogla smanjiti ekvivalent emisije milijuna tona CO₂ godišnje na globalnoj razini. Implementacija nove regulative očekuje se da će donijeti i ekonomske uštede od 36,3 eura po toni CO₂ ekvivalenta na razini EU [18]. Zamjena SF₆ plina zahtijeva sustavan pristup i stalno praćenje utjecaja na okoliš, čime se doprinosi održivom razvoju i smanjenju globalnog zatopljenja. [14].

4.2. Životni ciklus novih tehnologija

Analize životnog ciklusa (LCA) novih tehnologija ključne su za procjenu ukupnog ekološkog otiska. LCA pristup omogućuje procjenu ukupnog utjecaja novih tehnologija na okoliš kroz sve faze – od proizvodnje i korištenja do zbrinjavanja. Zamjenski plinovi, poput fluoronitrila, fluoroketona ili čak čistog zraka, nude niži potencijal globalnog zagrijavanja i smanjuju emisije stakleničkih plinova tijekom eksploatacije. Međutim, njihova proizvodnja može zahtijevati više energije i resursa, što povećava emisije u ranoj fazi životnog ciklusa. [15-16].

U fazi korištenja, nove tehnologije često pokazuju prednost jer ne dolazi do značajnog ispuštanja štetnih plinova. Na primjer, čisti zrak kao izolacijski medij nema GWP te eliminira rizik od curenja opasnih spojeva, dok fluorirani zamjenski plinovi imaju znatno kraći atmosferski vijek i manji utjecaj na klimatske promjene u slučaju curenja. Poseban izazov predstavlja sprječavanje curenja i emisija tijekom cijelog životnog ciklusa opreme.

Dodatni ekološki izazov predstavlja pravilno zbrinjavanje postojeće opreme koja sadrži SF₆. Prilikom dekontaminacije i reciklaže opreme važno je spriječiti ispuštanje plina u atmosferu, što zahtijeva posebne postupke i ovlaštene operatere. Kod zbrinjavanja, važno je uzeti u obzir mogućnost recikliranja materijala i opasnost od nastanka nusproizvoda, poput HF ili drugih toksičnih spojeva, što zahtijeva posebne mjere zaštite okoliša. Također, zamjena infrastrukture može dovesti do povećanog stvaranja otpada, što dodatno naglašava potrebu za cirkularnim pristupom u dizajnu novih rješenja [16].

Analize pokazuju da zamjena SF₆ plina može rezultirati smanjenjem ukupnih emisija stakleničkih plinova, ali i povećanjem potrošnje materijala, posebice metala, zbog većih dimenzija opreme koja koristi alternativne plinove ili zrak.

S obzirom na sve aspekte životnog ciklusa, najbolja rješenja su ona koja kombiniraju nisku emisiju tijekom korištenja s optimiziranom proizvodnjom i mogućnošću recikliranja. Pravilnim odabirom tehnologije i upravljanjem životnim ciklusom moguće je postići značajan napredak prema klimatskoj neutralnosti, uz istovremeno osiguranje pouzdanosti elektroenergetskih mreža.

5 EKONOMSKE IMPLIKACIJE TRANZICIJE

5.1. Troškovi tranzicije

Kako bi ubrzali energetske tranzicije i integraciju obnovljivih izvora energije, operatori prijenosnih sustava (OPS-ovi) već se suočavaju s kašnjenjima u razvoju mreže zbog dugotrajnih procesa izdavanja dozvola, promjena u zahtjevima za zaštitu okoliša i nedostatka prihvatanja od strane javnosti. Novi propisi s ambicioznim ciljevima, koji nisu potkrijepljeni realnim pristupom provedbi, mogu dodatno pogoršati ove izazove. Svaka prepreka u procesu nabave ili kašnjenje u proširenju ili popravku takve opreme predstavlja kritičan rizik za stabilnost mreže u osiguranju pouzdane opskrbe električnom energijom i ugrožava postizanje ciljeva dekarbonizacije. OPS-ovi ulažu značajne napore i novčana sredstva u suradnji s dobavljačima kako bi testirali alternativna rješenja i postupno smanjili upotrebu SF₆ u svojim mrežama. Međutim, implementacija pouzdanih i znatno ekološki prihvatljivijih alternativa SF₆ za različite naponske razine vrlo je složen proces koji zahtijeva tehničku spremnost i provjeru kvalitete kako bi se osigurao nesmetan i pouzdan rad mreže. Zabrana stavljanja na tržište proizvoda i opreme koji sadrže SF₆ ne bi trebala onemogućiti mogućnost nabave ili korištenja rezervnih dijelova s SF₆ za popravak postojeće opreme, čiji je očekivani vijek trajanja više od 50 godina. Kako bi osigurali sigurnu opskrbu električnom energijom, OPS-ovi moraju imati mogućnost održavanja postojeće SF₆ opreme do kraja njezina tehničkog vijeka trajanja. Time bi se vrijeme popravka svelo na minimum. Svako kašnjenje u popravku opreme može destabilizirati elektroenergetski sustav, uzrokovati značajne troškove ponovnog raspoređivanja proizvodnje ili onemogućiti priključak obnovljivih izvora energije na mrežu. Stoga rezervni dijelovi moraju biti dostupni bez odgađanja kako bi se izvršili potrebni popravci. [17].

Proizvođači moraju prilagoditi proizvodne procese i infrastrukturu, što zahtijeva značajna sredstva. Iako se kratkoročno očekuje povećanje cijena za 15–20% proizvoda koji koriste zamjenske tehnologije i supstancije zbog ulaganja u istraživanje, razvoj i certifikaciju novih tehnologija [18]. Dugoročno se predviđa stabilizacija i potencijalno smanjenje cijena kako tržište bude sazrijevalo i tehnologije postajale dostupnije i učinkovitije. Rast tržišta za ekološki prihvatljivu opremu i povećana konkurencija među proizvođačima mogu dovesti do smanjenja cijena. Nova regulativa potiče inovacije i razvoj održivih tehnologija, otvarajući prilike za nove poslovne modele i izvoz naprednih rješenja[19].

6 ZAKLJUČAK

Tranzicija prema SF₆-slobodnim tehnologijama u sklopnim aparatima predstavlja kompleksan izazov koji zahtijeva usklađivanje tehnoloških performansi, regulatornih zahtjeva i ekološke održivosti. Uredba (EU) 2024/573 donosi stroge zabrane i obveze za visokonaponsku sklopnu opremu s ciljem smanjenja emisija F-plinova, uz jasne rokove za postupno ukidanje SF₆, obvezne provjere i detekciju propuštanja, vođenje evidencije te označavanje opreme. Time se elektroenergetski sektor usmjerava prema održivim, ekološki prihvatljivim tehnologijama. Države članice moraju prilagoditi zakonodavstvo, ojačati institucionalne kapacitete, uspostaviti sustave za praćenje i izvještavanje te provoditi edukaciju dionika. Implementacija zahtijeva koordinaciju između regulatornih tijela, industrije i znanstvene zajednice. Uspješna implementacija Uredbe (EU) 2024/573 ovisi o suradnji proizvođača, operatora elektroenergetskih sustava, regulatornih tijela i istraživačkih institucija. Unatoč inicijalnim troškovima i tehničkim izazovima, očekuje se značajno smanjenje emisija stakleničkih plinova i poticanje inovacija u elektroenergetskom sektoru. Zaključno, iako prijelaz na tehnologije bez SF₆ plina donosi brojne ekološke koristi, uključujući smanjenje emisija stakleničkih plinova i veću održivost, on sa sobom nosi kompleksne izazove koje je nužno sustavno i interdisciplinarno rješavati – kroz tehnološki razvoj, zakonodavstvo, ekonomske poticaje i obrazovanje stručnog kadra.

7 LITERATURA

[1] <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/573/oj/eng>

[2] Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2013; Cambridge University Press: New York, NY, USA, 2013; pp. 159–254.

[3] <https://aktif.net/en/significant-development-about-f-gas-regulation/>

[4] <https://eeb.org/wp-content/uploads/2024/11/EIA-2024-EU-F-Gas-Regulations-Climate-Briefing-SPREADS.pdf>

[5] A. Xiao, A. Zhang, J. Bonk, J. Owens, M. DeLorme: Recent Development of Alternative Gases to SF₆ for High Voltage Electrical Power Applications, 2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE 2020), Beijing China, Sep. 06 - 10, 2020

[6] Kieffel, Y.; Biquez, F.; Ponchon, P. Alternative gas to SF₆ for use in high voltage switchgears: g3. In Proceedings of the International Conference on Electricity Distribution, Lyon, France, 15–18 June 2015; pp. 1–5.

- [7] <https://www.ssen-transmission.co.uk/news/news--views/2024/8/ssen-transmission-leads-the-way-in-sustainable-grid-infrastructure-by-being-first-to-implement-hitachi-energys-new-sf6-free-switchgear-technology/>
- [8] <https://www.gevernova.com/news/press-releases/ge-vernova-deliver-worlds-first-245-kv-sf6-free-gas-insulated-substation-r>
- [9] <https://www.globalgrowthinsights.com/market-reports/gas-insulated-switchgear-sf6-free-market-105050>
- [10] Regulation (EU) N° 517/2014 of The European Parliament and of The Council of 16 April 2014 on fluorinated greenhouse gases
- [11] <https://eur-lex.europa.eu/legalcontent/HR/ALL/?uri=CELEX%3A32024R0573>
- [12] <https://blog.siemens.com/en/2025/02/changes-to-electricity-companies-and-technology-brought-by-the-f-gas-regulation>
- [13] https://climate.ec.europa.eu/eu-action/fluorinated-greenhouse-gases/f-gas-portal_en
- [14] https://mingo.gov.hr/UserDocsImages/UPRAVA%20ZA%20ENERGETIKU/N_ECP_Update_HRV_HR_Revidirani.pdf
- [15] <https://esavjetovanja.gov.hr/ECon/Slicing/GetDocx/28734>
- [16] <https://cigre.ca/papers/2021/paper%20447.pdf>
- [17] <https://sf6.co.uk/the-evolution-of-sf6-free-switchgear-the-benefits-and-challenges/>
- [18] <https://eeb.org/wp-content/uploads/2024/11/EIA-2024-EU-F-Gas-Regulations-Climate-Briefing-SPREADS.pdf>
- [19] <https://globaltransmission.info/eus-revised-f-gases-emissions-regulation-focus-on-use-of-sf6-free-technology-in-transmission/>