



Politechnika
Wrocławska

unite!
University Network for Innovation,
Technology and Engineering



HR EXCELLENCE IN RESEARCH

Evaluated by
IEP INSTITUTIONAL
EVALUATION
PROGRAMME
www.iep-qaa.org



ANALIZA WPŁYWU NOWYCH REGULACJI UNIJNYCH DOTYCZĄCYCH FLUOROWANYCH GAZÓW CIEPLARNIANYCH NA INFRASTRUKTURĘ ELEKTROENERGETYCZNĄ

Dr hab. inż. Waldemar DOŁĘGA prof. P. Wr.

Katedra Energoelektryki, Wydział Elektryczny
Politechnika Wrocławska

50-370 Wrocław, ul. Wybrzeże Wyspiańskiego 27



KONFERENCJA ZAKOPANE 19-22.10.2025



Plan prezentacji

1. Wprowadzenie
2. Sześćciofluorek siarki (SF_6)
3. Rozwiązania konstrukcyjne i technologiczne stacji elektroenergetycznych
4. Obecne i przyszłe uwarunkowania wykorzystania sześćciofluorku siarki (SF_6)
5. Rozwiązania alternatywne dla sześćciofluorku siarki (SF_6)
6. Wyzwania dla producentów i użytkowników
7. Wnioski



Wprowadzenie

☐ Stacje elektroenergetyczne

- **Stacje elektroenergetyczne** są węzłami sieci elektroenergetycznej i stanowią jej ważne elementy.
- **Stacje elektroenergetyczne** funkcjonują zarówno w obszarze przesyłu (stacje najwyższych napięć) jak i w obszarze dystrybucji (stacje wysokich i średnich napięć).
- **Stacje elektroenergetyczne najwyższych napięć (NN)** obejmują stacje: 400/220/110 kV, 400/110 kV i 220/110 kV.
- **Stacje elektroenergetyczne wysokich napięć (WN)** obejmują stacje 110 kV/SN i 110 kV/SN/SN,
- **Stacje średnich napięć (SN)** obejmują stacje: SN/SN i SN/nN o poziomach napięć znamionowych 6, 10, 15, 20 i 30 kV.
- ❖ **Stacje te w zależności od napięcia znamionowego i miejsca gdzie są zlokalizowane mają kluczowe znaczenie dla funkcjonowania systemu elektroenergetycznego na poziomie: krajowym, regionalnym czy lokalnym. Decydują o poziomie bezpieczeństwa dostaw energii elektrycznej.**
- ☐ **W 2022 r. w kraju użytkowanych było łącznie 273 278 stacji elektroenergetycznych: 110 stacji 400 i 220 kV, 1 597 stacji 110 kV oraz 271 571 stacji SN, co stanowiło odpowiednio: 0,04%, 0,58% i 99,38% łącznej ich liczby.**
Źródło: Statystyka elektroenergetyki polskiej 2021. ARE, Warszawa, 2022.
- Stacje elektroenergetyczne w zdecydowanej większości należą do przedsiębiorstw energetycznych operatora systemu przesyłowego (OSP) - Polskie Sieci Elektroenergetyczne S.A. i operatorów systemów dystrybucyjnych (OSD) - PGE Dystrybucja S.A., TAURON Dystrybucja S.A., ENERGA-Operator S.A., ENEA Operator Sp. z o.o. oraz Stoen Operator Sp. z o.o..

Wprowadzenie

Tabela 1. Dane dotyczące infrastruktury sieciowej w latach 2000-2021

Długość linii elektroenergetycznych napowietrznych					
Wyszczególnienie	2000 r.	2005 r.	2010 r.	2020 r.	2021 r.
NN+WN	45 174 km	45 378 km	46 112 km	48 923 km	49 411 km
750 kV	114 km	114 km	114 km	114 km	114 km
400 kV	4 660 km	4 831 km	5 303 km	7 823 km	8 227 km
220 kV (w tym OSD*)	8 116 km (228 km)	8 123 km (232 km)	8 088 km (85 km)	7 461 km (81 km)	7 433 km (81 km)
110 kV (w tym OSD*)	32 284 km (32 270 km)	32 310 km (32 245 km)	32 607 km (32 494 km)	33 535 km (33 349 km)	33 637 km (33 451 km)
SN	223 800 km	233 855 km	234 741 km	227 043 km	226 039 km
40-60 kV	158 km	49 km	24 km	-	-
30 kV	3 990 km	3 766 km	3 290 km	2 459 km	2 3454 km
15-20 kV	219 200 km	228 752 km	230 023 km	223 451 km	222 661 km
Poniżej 15 kV	452 km	1 288 km	1 404 km	1 133 km	1 033 km
nn	284 116 km	286 994 km	289 977 km	317 205 km	321 235 km
Razem wszystkie napięcia	553 090 km	566 227 km	570 830 km	593 171 km	596 685 km
Długość linii kablowych					
NN+WN	48 km	79 km	164 km	769 km	869 km
SN	54 345 km	61 988 km	68 988 km	92 651 km	95 050 km
30-60 kV	112 km	161 km	197 km	348 km	342 km
15-20 kV	46 554 km	54 544 km	60 867 km	84 960 km	87 407 km
nn	105 755 km	125 776 km	140 320 km	177 159 km	183 257 km
Razem wszystkie napięcia	160 148 km	187 843 km	209 482 km	270 579 km	279 176 km
Liczba stacji o górnym napięciu					
400 i 750 Kv	30	31	35	53	49
220 kV	64	67	67	61	63
110 kV	1 308	1 356	1 405	1 574	1 597
SN	219 418	236 067	246 562	269 726	271 571
Razem wszystkie napięcia	220 820	237 521	248 069	271 414	273 280

* OSD – operatorzy systemów dystrybucyjnych

Źródło: Statystyka elektroenergetyki polskiej 2021. ARE, Warszawa, 2022.

Sześćciofluorek siarki

☐ Sześćciofluorek siarki (SF_6)

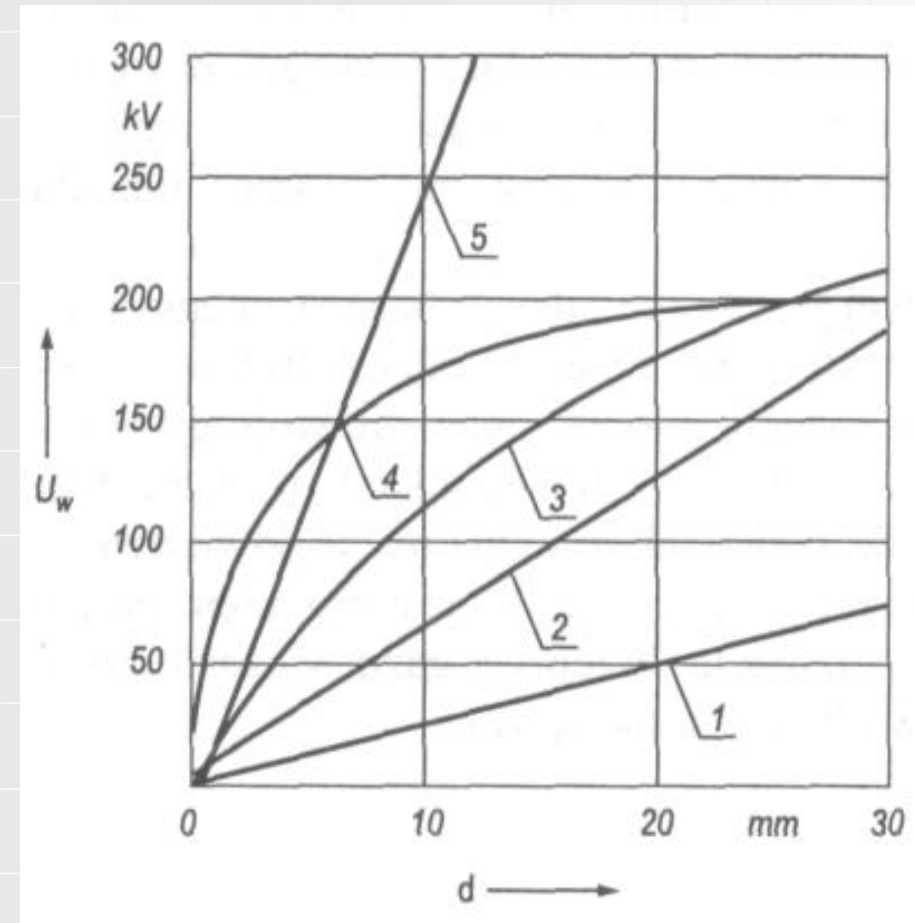
❖ Sześćciofluorek siarki jest jednym z ważniejszych mediów używanych w urządzeniach elektroenergetycznych użytkowanych w stacjach.

☐ Sześćciofluorek siarki (cechy):

- posiada doskonałe właściwości izolacyjne znacznie lepsze niż powietrze o ciśnieniu atmosferycznym, co wykorzystuje się w izolacji międzybiegunowej i doziemnej urządzeń elektroenergetycznych;
- jest gazem o znacznie lepszych parametrach od powietrza pod względem zdolności do gaszenia łuku elektrycznego;
- posiada silnie elektroujemne właściwości objawiających się przyciąganiem elektronów w strefie łuku i tworzeniem jonów ujemnych o dużej bezwładności, które z kolei łatwo łączą się z jonami dodatnimi tworząc dwie cząstki elektrycznie obojętne (dzięki czemu skutecznie gasi łuk elektryczny w łącznikach (wyłącznikach, rozłącznikach) wykorzystujących to medium).
- w stanie pierwotnym jest bezbarwny, bezwonny, niepalny, nietoksyczny i bardzo stabilny chemicznie;
- spośród znanych powszechnie gazów najtrudniej wchodzi w reakcje chemiczne;
- pozwala się sprężyć do stanu ciekłego w temperaturze 20°C , co umożliwia transport i przechowywanie gazu w butlach;
- odznacza się dużą wytrzymałością elektryczną przy ciśnieniu atmosferycznym, która jest 2÷3 razy większa niż powietrza.

Sześćciofluorek siarki

- ❑ Wprowadzenie sześćciofluorku siarki jako izolacji międzybiegunowej i doziemnej urządzeń elektroenergetycznych umożliwiło budowę stacji NN, WN i SN jakościowo różnych od stacji o izolacji powietrznej czy stałej.
- ❑ Dzięki zastosowaniu SF_6 uzyskano wielokrotne zmniejszenie wymiarów, a także zdecydowaną poprawę większości parametrów i właściwości technicznych, decydujących o niezawodności i jakości stacji elektroenergetycznych.



Rys. 1. Zależność wytrzymałości elektrycznej U_w od środowiska i odległości d między elektrodami: 1 - Powietrze przy ciśnieniu 0,1MPa; 2 - SF_6 przy ciśnieniu 0,1MPa; 3 - Olej; 4 - Próżnia; 5 - SF_6 przy ciśnieniu 0,5MPa

Rozwiązania stacji elektroenergetycznych

❖ Na terenie kraju spotyka się wiele rozwiązań technicznych i konstrukcyjnych stacji NN, WN i SN.

☐ Stacje elektroenergetyczne NN

☐ Stacje NN są realizowane w trzech technologiach: napowietrznej, wewnątrzowej i mieszanej.

☐ W stacjach NN w rozdzielniach o napięciu 400 kV, 220 kV i 110 kV, jako dopuszczalne układy konstrukcyjne, zgodnie z zaleceniami OSP, stosuje się następujące rozwiązania:

- napowietrzne otwarte z szynami linkowymi,
- napowietrzne otwarte z szynami rurowymi,
- napowietrzne otwarte modułowe – z zastosowaniem rozwiązań kompaktowych,
- napowietrzne hybrydowe – zintegrowane pola z izolacją gazową przyłączane do klasycznych szyn zbiorczych,
- napowietrzne z izolacją gazową SF₆,
- wewnątrzowe z izolacją gazową SF₆.



Rozwiązania stacji elektroenergetycznych

☐ Stacje elektroenergetyczne NN

- ❖ **Rozdzielnie napowietrzne z izolacją gazową SF_6** dopuszcza się w przypadku rozbudowy istniejącej rozdzielni otwartej z izolacją powietrzną przy jednoczesnym braku miejsca na utrzymanie już istniejącego rozwiązania konstrukcyjnego.
- ❖ **Rozdzielnie wewnętrzne z izolacją gazową SF_6** realizowane są w oparciu o rozdzielnice GIS (*ang. Gas Insulated Switchgear*) najwyższych i wysokich napięć.
 - Wyposażenie rozdzielnic stanowią m.in.: wyłączniki, odłączniki, uziemniki, przekładniki prądowe i napięciowe.
 - Budowa rozdzielnic GIS jest odmienna niż w przypadku rozwiązań napowietrznych (Podstawowa różnica - zastosowanie gazu SF_6 , który jest wykorzystywany w izolacji międzybiegunowej i doziemnej urządzeń elektroenergetycznych).
 - Szyny zbiorcze i wszystkie urządzenia rozdzielcze są umieszczone w hermetycznych rurach i zbiornikach, wypełnionych SF_6 o odpowiednim ciśnieniu, wykorzystywanych także jako konstrukcje nośne.
 - Osłony wykonuje się często ze stali ze względu na łatwość uzyskania niezbędnej szczelności zbiorników, dużą wytrzymałość mechaniczną oraz odporność na działanie łuku.
 - Osłony rozdzielni są dzielone na szczelne komory, zawierające jedno lub kilka urządzeń.
 - Ciśnienie gazu w zbiornikach powinno być możliwie wysokie (większa wytrzymałość elektryczna gazu przy wyższym ciśnieniu), ale jednocześnie takie, żeby nie następowała kondensacja SF_6 w najniższej temperaturze otoczenia.

Rozwiązania stacji elektroenergetycznych

- ❑ **Rozdzielnice GIS można podzielić na rozdzielnice w obudowie jednobiegunowej i trójbiegunowej.**
 - W pierwszej (jednobiegunowej) każda faza jest rozmieszczona w osobnej obudowie w przeciwieństwie do drugiej (trójbiegunowej), gdzie fazy są umieszczone we wspólnej obudowie.
 - Zastosowanie obudowy jednobiegunowej ma jedną podstawową zaletę - praktycznie nie ma możliwości wystąpienia zwarcia trójfazowego, oraz wadę - rozdzielnice takie zajmują znacznie większą powierzchnię.
 - Z tego powodu rozdzielnice GIS z obudowie trójfazowej stosuje się przeważnie na napięcie do 145 kV.
- ❖ **Rozdzielnie wewnętrzne z izolacją gazową SF₆ stanowią nowoczesne rozwiązania o najwyższym poziomie technicznym i technologicznym, które odznaczają się wieloma zaletami w porównaniu do tradycyjnych napowietrznych rozwiązań rozdzielni.**
- ❖ **Do zalet należą przede wszystkim: modułowa kompaktowa budowa, wysoka niezawodność, duża elastyczność, niewielkie wymagania przestrzenne, stosunkowo mała powierzchnia zajmowana, łatwość, prostota i bezpieczeństwo obsługi, niskie koszty eksploatacyjne, łatwość rozbudowy oraz duża trwałość. Mogą być dostosowane ściśle do indywidualnych potrzeb inwestora (operatora systemu) i uwzględniać: warunki lokalizacyjne, wymiary budynków, przyszłą rozbudowę.**

Rozwiązania stacji elektroenergetycznych

❑ Stacje elektroenergetyczne WN

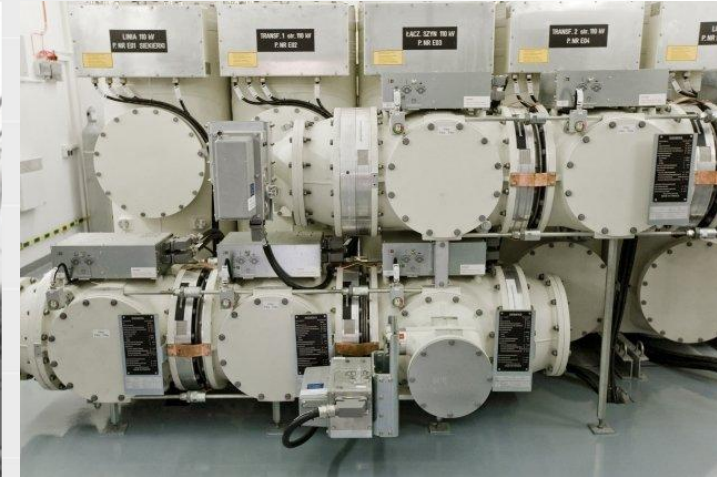
- ❑ **Stacje WN** są zasadniczo realizowane w dwóch technologiach: rozdzielnie napowietrzne otwarte (na obszarach słabo zaludnionych i wiejskich) i wewnątrzowe w izolacji SF₆ (w miastach, na terenach podmiejskich i w obszarach zabudowanych). Spotyka się również stacje kontenerowe.
- ❑ **Operatorzy systemów dystrybucyjnych mają określoną grupę preferowanych dopuszczalnych układów konstrukcyjnych w rozdzielniach 110 kV, które obejmują:**
 - napowietrzne otwarte z szynami linkowymi,
 - napowietrzne otwarte z szynami rurowymi,
 - napowietrzne otwarte modułowe – z zastosowaniem rozwiązań kompaktowych,
 - napowietrzne hybrydowe – zintegrowane pola z izolacją gazową przyłączane do klasycznych szyn zbiorczych,
 - napowietrzne z izolacją gazową SF₆,
 - wewnątrzowe z izolacją gazową SF₆.



Rozwiązania stacji elektroenergetycznych

☐ Stacje elektroenergetyczne WN

- **Rozwiązania napowietrzne z izolacją gazową SF_6** są realizowane na bazie pól kompaktowych i aparatów wielofunkcyjnych. Pozwalają w sposób znaczący ograniczyć wymaganą powierzchnię rozdzielni w porównaniu z tradycyjnymi rozwiązaniami otwartymi (konwencjonalnymi).
- **Rozwiązania wewnętrzne z izolacją gazową SF_6** oparte są na rozdzielnicach GIS. Ich budowa jest odmienna w stosunku do rozwiązań napowietrznych.



Rozwiązania stacji elektroenergetycznych

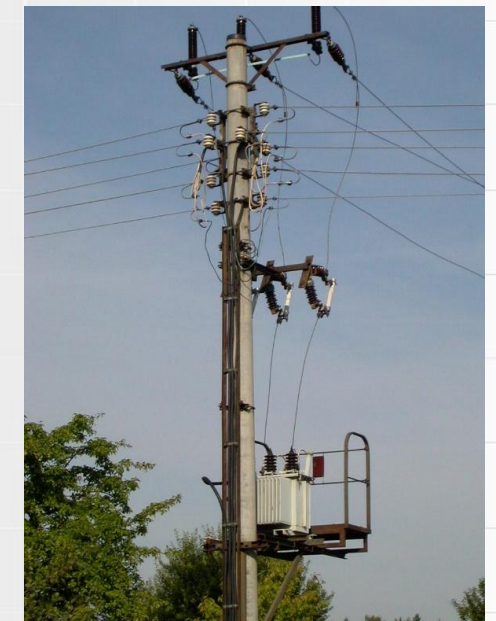
☐ Stacje elektroenergetyczne SN

☐ **Stacje SN** na terenie kraju mają wiele rozwiązań technicznych i konstrukcyjnych. Obejmują one stacje:

- prefabrykowane (betonowe i metalowe, kontenerowe, zagłębione i podziemne),
- wewnętrzne (wolnostojące, wbudowane, prefabrykowane budynkowe i wieżowe),
- kontenerowe (tymczasowe i przemieszczalne),
- słupowe.

☐ Stacje słupowe SN

- Stacje słupowe są jedynymi stacjami napowietrznymi w sieci dystrybucyjnej SN, należą do najprostszych, najtańszych i najczęściej spotykanych w kraju rozwiązań stacji elektroenergetycznych SN/nN.
- W kraju znajduje się ich prawie 170 tys. (60% łącznej liczby stacji SN/nN w KSE), są powszechnie stosowane w stacjach wiejskich, które stanowią najliczniejszą grupę stacji SN/nN w kraju.



Rozwiązania stacji elektroenergetycznych

☐ Rozdzielnice SN

☐ Rozdzielnice SN są realizowane w izolacji powietrznej lub izolacji gazowej SF₆.

- konstrukcje jedno- lub dwuczłonowe wykonane w wersji jednoprzedałowej lub wieloprzedałowej, realizowane przeważnie w układzie z pojedynczym niesekcjonowanym lub sekcjonowanym systemem szyn zbiorczych.

❖ **Rozdzielnice SN realizowane w izolacji SF₆ stanowią obecnie najbardziej zaawansowane technologicznie rozwiązania rozdzielnic SN.**

☐ Rozdzielnice SN realizowane w izolacji SF₆ dzieli się na dwie grupy:

- rozdzielnice wykorzystujące izolację gazu w głównych urządzeniach łącznikowych poprzez umieszczenie ich w szczelnie zaspawanych zbiornikach;
- rozdzielnice, w których aparatura łączeniowa i szyny zbiorcze rozdzielnic są umieszczone w szczelnym zbiorniku ze stali nierdzewnej wypełnionym gazem SF₆ (aparatura łączeniowa - wyłączniki próżniowe lub z sześćfluorkiem siarki).

☐ **Zastosowanie w rozdzielnicach izolacji aparatury łączeniowej gazem SF₆** pozwala z jednej strony na zachowanie doskonałego stanu technicznego rozdzielnic przez długi okres, a z drugiej – ułatwia i ogranicza do niezbędnego minimum wymagane czynności eksploatacyjne.

Rozwiązania stacji elektroenergetycznych

- ❑ **Rozdzielnice z izolacją gazową SF_6** mogą być wykonywane wg gotowych już konfiguracji lub w postaci pojedynczych pól o zróżnicowanym zastosowaniu.
 - W rozdzielnicy wszystkie aparaty łączeniowe oraz szyny zbiorcze są zamknięte w szczelnym zbiorniku wypełnionym gazem SF_6 .
 - Ze względu na szczelność zbiornika, połączenia szyn zbiorczych pomiędzy polami rozdzielczymi, odbywają się za pomocą specjalnego zestawu złączy, dzięki którym otrzymuje się przepływ prądu przy równoczesnej pełnej izolacji pola elektrycznego.
- ❖ **Rozdzielnice z izolacją gazową SF_6 charakteryzuje: bardzo duże bezpieczeństwo obsługi; bardzo duża trwałość mechaniczna i łączeniowa zastosowanych łączników; duża odporność na wpływ środowiska; blokady napędów łączników uniemożliwiające wykonanie błędnych połączeń; bardzo małe wymagania dotyczące obsługi i konserwacji.**
- ❑ W rozdzielnicach z izolacją gazową SF_6 pierwszy przegląd powinien być wykonany dopiero po 10 latach eksploatacji.



Obecne i przyszłe uwarunkowania wykorzystania SF₆

- ❑ Sześćciofluorek siarki (SF₆) należy do bardzo silnych gazów cieplarnianych.
- SF₆ jest zaliczany do grupy fluorowanych gazów (F-gazów) cieplarnianych, charakteryzujących się szczególnie wysokim współczynnikiem globalnego ocieplenia GWP (*ang. Global Warming Potential*), który określa zdolność do tworzenia efektu cieplarnianego.
- Dla SF₆ wartość współczynnika GWP wynosi 23 000 jednostek, co oznacza że emisja jednego kilograma tego gazu do atmosfery odpowiada emisji równej 23 000 kg CO₂.
- Dodatkowo problemem jest utylizacja SF₆, bowiem jego czas rozkładu w atmosferze wynosi 3 200 lat.
- ❖ **Unia Europejska podejmuje działania dotyczące fluorowanych gazów cieplarnianych, które mają na celu przede wszystkim ograniczenie ich stosowania w obszarach w których dostępne są technologie alternatywne, przyjazne dla środowiska naturalnego, a także ograniczenie przedostawania się F-gazów do atmosfery poprzez bardziej restrykcyjne wymagania dotyczące przechowywania, odzyskiwania gazu z urządzeń i kwalifikacji personelu, który je obsługuje.**
- ❑ Ostatnie rozporządzenie w tym zakresie - Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2024/573 z dnia 7 lutego 2024 r. w sprawie fluorowanych gazów cieplarnianych wprowadza istotne zmiany w stosunku do wcześniej obowiązujących przepisów.
- **Podstawowe postanowienie** - wprowadzenie dat granicznych dotyczących zakazu wprowadzania do użytku rozdzielnic elektrycznych wykorzystujących fluorowane gazy cieplarniane o GWP ≥ 1 (praktycznie oznacza eliminację możliwości stosowania nowych urządzeń wykorzystujących SF₆).

Obecne i przyszłe uwarunkowania wykorzystania SF₆

- ❑ **Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2024/573 z dnia 7 lutego 2024 r. w sprawie fluorowanych gazów cieplarnianych określa następujące daty rozpoczęcia obowiązywania zakazów:**
 - dla rozdzielnic elektrycznych o napięciu znamionowym do 24 kV włącznie od 01.01.2026 r.;
 - dla rozdzielnic elektrycznych o napięciu znamionowym powyżej 24 kV do 52 kV włącznie od 01.01.2030 r.;
 - dla rozdzielnic elektrycznych o napięciu znamionowym od 52 kV do 145 kV włącznie i o prądzie zwarciovym do 50 kA włącznie od 01.01.2028 r.,
 - dla rozdzielnic elektrycznych o napięciu znamionowym powyżej 145 kV lub o prądzie zwarciovym powyżej 50 kA od 01.01.2032 r.
- ❖ **W rozporządzeniu znajduje się postanowienie dotyczące zakazu stosowania od 01.01.2035 r. gazu SF₆ do konserwacji lub serwisowania rozdzielnic, o ile nie jest to gaz regenerowany lub poddany recyklingowi.**
 - Rozporządzenie dopuszcza odstępstwa w przypadkach, gdy użycie takiego gazu nie mogło nastąpić z przyczyn technicznych lub nie jest on dostępny w razie potrzeby wykonania pilnej naprawy urządzenia, ale wymaga to przedstawienia organowi uprawnionemu dowodów uzasadniających takie odstępstwo.
 - W praktyce oznacza dla użytkowników urządzeń wykorzystujących SF₆ utrudnienie, które będzie skutkowało eliminacją tych urządzeń.

Rozwiązania alternatywne dla SF₆

- ❖ **Uregulowania unijne w obszarze ochrony środowiska i ograniczenia emisji gazów cieplarnianych wymusiły na producentach urządzeń elektroenergetycznych dążenie do ograniczenia ich negatywnego wpływu na środowisko naturalne.**
- **W przypadku rozdzielnic** wiąże się to ze stosowaniem różnych zaawansowanych technologii, które pozwalają na zastąpienie gazu SF₆, takich jak zastosowanie izolacji stałej zamiast gazowej czy wykorzystanie gazów alternatywnych do SF₆, które spełniają wymagania zawarte we wspomnianym wcześniej rozporządzeniu.
- ❑ **Idealny gaz alternatywny powinien cechować się: niskim (najlepiej zerowym) współczynnikiem GWP, niską toksycznością i niepalnością, wysoką wytrzymałością dielektryczną, wysokim współczynnikiem przewodzenia ciepła, zdolnością do gaszenia łuku elektrycznego, a także stabilnością chemiczną i brakiem negatywnego oddziaływania na elementy konstrukcyjne rozdzielnic.**
- ❑ **Wytrzymałość dielektryczna gazów w znacznym stopniu zależy od ich składu oraz ciśnienia.**
- Ze względu na fakt, że wartość napięcia przebicia przerwy izolacyjnej w gazie zazwyczaj rośnie liniowo i proporcjonalnie do wielkości tej przerwy i ciśnienia gazu, wyższe ciśnienia i większe odległości izolacyjne pozwalają na zwiększenie wytrzymałości dielektrycznej układu.

Rozwiązania alternatywne dla SF₆

- ❑ W przypadku niektórych gazów syntetycznych i ich mieszanin górne wartości użytecznych ciśnień są znacznie ograniczone przez zjawisko skraplania.
 - Powoduje to konieczność stosowania mieszanin gazów, dzięki którym możliwe jest przesunięcie wartości temperatury skraplania (tzw. temperatury punktu rosy).
 - Istotny czynnik brany pod uwagę - zdolność gazu do odprowadzania ciepła.
 - W przypadku rozdzielnic w izolacji gazowej dominującym mechanizmem chłodzenia jest konwekcja.
 - Oddawanie ciepła przez zjawisko przewodnictwa cieplnego w gazach jest zdecydowanie mniejsze niż w cieczach czy ciałach stałych.
- ❖ Szerokie spektrum wymagań powoduje, że bardzo trudno jest znaleźć idealną alternatywę dla gazu SF₆.
- ❖ Dlatego istnieje wiele różniących się od siebie rozwiązań, opartych na odmiennych technologiach uwzględniających: poziom napięcia i specyfikę zastosowania danej rozdzielnic, koszty jej produkcji i eksploatacji oraz szacowaną długość życia.

Rozwiązania alternatywne dla SF₆

- ❑ **W obszarze rozdzielnic SN rozwija się głównie technologie związane z zastosowaniem gazów alternatywnych do SF₆.**
 - Wynika to z faktu, że w rozdzielnicach SN sześćciofluorek siarki jest wykorzystywany przede wszystkim jako medium izolacyjne.
 - Operacje łączeniowe związane z załączaniem i wyłączaniem prądów roboczych oraz zakłóceńowych są realizowane najczęściej z wykorzystaniem wyłączników próżniowych.
 - Dlatego właściwości związane ze zdolnością gazów alternatywnych do gaszenia łuku elektrycznego takie jak np. zdolność do szybkiej rekombinacji, zdolność do wychwytywania wolnych elektronów (elektroujemność) nie są istotne.
 - Cechy, które mają znaczenie, stanowią: możliwie jak najwyższa wytrzymałość dielektryczna, dobra przewodność cieplna, stabilność chemiczna, brak negatywnego oddziaływania na materiały użyte w konstrukcji rozdzielnic.
- ❖ **W przypadku rozdzielnic SN stosunkowo łatwo można przejść z użycia gazu SF₆ do technologii gazów alternatywnych, a podstawowym kryterium dla rozwiązania konstrukcyjnego jest uzyskanie odpowiedniej wytrzymałości dielektrycznej.**

Rozwiązania alternatywne dla SF₆

- ❑ **W obszarze rozdzielnic WN i NN zastosowanie gazów alternatywnych stwarza wiele problemów i stawia znaczne wymagania.**
 - W takich rozdzielnicach gaz używany w urządzeniu z reguły pełni nie tylko funkcję izolacyjną, lecz również jest wykorzystywany jako medium gaszeniowe w procesie załączania i wyłączania prądów roboczych oraz zakłóceń przez wyłącznik.
 - Gaz SF₆ jest gazem elektroujemnym. Pozwala to cząsteczkom gazu na wychwytywanie wolnych elektronów, wytwarzanych przez łuk elektryczny i łączenie ich z istniejącymi cząsteczkami gazu w celu wytworzenia dużych, ciężkich i wolno poruszających się jonów.
 - Absorpcja swobodnie poruszających się elektronów i niska ruchliwość połączonych jonów dodatkowo poprawiają wytrzymałość dielektryczną gazu.
 - Dodatkowo cechą cząsteczek gazu SF₆ jest zdolność do ich szybkiej rekombinacji po procesie dysocjacji, co pozwala na bardzo szybkie odzyskiwanie wytrzymałości dielektrycznej.
- ❖ **Te właściwości powodują, że wymagania techniczne wobec gazów alternatywnych, które mogą znaleźć zastosowanie w takich rozdzielnicach są bardzo wysokie.**

Rozwiązania alternatywne dla SF₆

- ❑ **Jedną z podstawowych technologii gazów będących alternatywą dla SF₆ jest wykorzystanie suchego powietrza.**
 - Stanowi mieszanina tlenu i azotu w proporcji 80% N₂ i 20% O₂.
 - Taka mieszanina musi dodatkowo odznaczać się znikomą zawartością cząsteczek wody i bardzo małą ilością zanieczyszczeń stałych.
 - Dzięki tym właściwościom możliwe jest uzyskanie o wiele lepszych właściwości izolacyjnych w porównaniu do powietrza atmosferycznego, a także niskiej temperatury punktu rosy, co umożliwia zastosowanie izolacji suchego powietrza w bardzo szerokim zakresie temperatur.
- ❑ **Suche powietrze wykorzystuje gazy naturalne tlen i azot, co przekłada się na łatwą dostępność i relatywnie tani proces wytwarzania.**
 - Suche powietrze jest stabilne chemicznie w długim okresie czasu, nie posiada właściwości toksycznych, jego współczynnik globalnego ocieplenia GWP wynosi 0.
 - Suche powietrze cechuje słaba zdolność do gaszenia łuku elektrycznego, co stanowi przeszkodę w jego wykorzystaniu w rozdzielnicach GIS najwyższych i wysokich napięć.

Rozwiązania alternatywne dla SF₆

- ❑ **Innym typem gazów stanowiących alternatywę do sześćciofluorku siarki są gazy syntetyczne z grupy fluoroketonów i fluoronitryli.**
- ❑ **Do pierwszej grupy jest zaliczany gaz występujący pod nazwą handlową Novec 5110.**
 - Posiada wytrzymałość dielektryczną ok. 1,4 razy większą w stosunku do SF₆.
 - Charakteryzuje się współczynnikiem globalnego ocieplenia GWP <1 i czasem rozkładu w atmosferze na poziomie 15 dni (0,04 roku).
 - Cechą charakterystyczną tego gazu jest wysoka temperatura wrzenia, co powoduje, że niemożliwe jest zastosowanie czystego gazu w rozdzielnicach.
 - Stosuje się jego różne mieszaniny np. z suchym powietrzem (ok. 7%÷14% gazu Novec 5110 w mieszaninie dla rozdzielnic SN).
 - Z tych powodów obszary zastosowania w rozdzielnicach GIS najwyższych i wysokich napięć są ograniczone.

Rozwiązania alternatywne dla SF₆

- ❑ **Do drugiej grupy jest zaliczany gaz występujący pod nazwą handlową Novec 4710.**
 - Jego właściwości izolacyjne są ok. 2 razy lepsze od sześćciofluorku siarki.
 - Posiada stosunkowo wysoką temperaturę wrzenia.
 - Charakteryzuje się relatywnie wysokim współczynnikiem globalnego ocieplenia GWP wynoszącym 2 100 jednostek i czasem rozkładu w atmosferze na poziomie 30 lat.
 - Dlatego nie stosuje się w czystej postaci, lecz w mieszaninach z innymi gazami np. z dwutlenkiem węgla i azotem (max. 4% gazu Novec 4710 w mieszaninie dla rozdzielnic SN).
 - Dzięki stosowaniu mieszanin uzyskuje się znacznie mniejszą wartość współczynnika GWP w porównaniu z czystym gazem.
- ❖ **Gaz Novec 4710 zastosowany w mieszaninach posiada właściwości do gaszenia łuku elektrycznego, przez co znajduje zastosowanie w wyłącznikach i możliwe jest uzyskanie konstrukcji rozdzielnic GIS najwyższych i wysokich napięć, gdzie ten sam gaz służy jako medium izolacyjne i gaszeniowe.**

Wyzwania dla producentów i użytkowników

- ❑ **Rozwój technologii rozdzielnic GIS wykorzystujących gazy alternatywne do SF₆ stawia przed producentami i użytkownikami urządzeń wiele nowych wyzwań.**
- ❑ **Jednym z podstawowych wyzwań są koszty związane z wprowadzeniem tych technologii na rynek.**
 - Producenci ponoszą ogromne nakłady finansowe na realizację procesów projektowania, badań i rozwoju rozwiązań alternatywnych w stosunku do SF₆, co znajduje swoje odzwierciedlenie w kosztach zakupu nowych urządzeń przez użytkowników, które są znacznie wyższe w porównaniu do istniejącej technologii SF₆. Wprawdzie te koszty będą w perspektywie czasu spadały, ale proces ten nie będzie postępował szybko.
- ❑ **Drugim z podstawowych wyzwań jest konieczność przeszkolenia personelu i zastosowanie nowego, niejednokrotnie bardziej zaawansowanego wyposażenia technicznego.**
 - Dotychczas stosowane urządzenia do serwisowania i obsługi rozdzielnic, szczególnie w obszarze dotyczącym gospodarki gazem SF₆ nie znajdują zastosowania w przypadku gazów alternatywnych.
 - Producenci rozdzielnic stosują bowiem indywidualne gazy i mieszanki gazowe, dedykowane do konkretnych typów rozdzielnic, co powoduje konieczność stosowania różnych typów urządzeń do odzysku gazu i napełniania rozdzielnic.

Wnioski

- ❑ W kraju spotyka się wiele rozwiązań konstrukcyjnych i technologicznych stacji elektroenergetycznych w których wykorzystuje się sześćiofluorek siarki. W stacjach 400 kV, 220 kV i 110 kV są to rozdzielnie napowietrzne z izolacją gazową SF₆ bądź wewnętrzne z izolacją gazową SF₆ (GIS), natomiast w stacjach SN są to rozdzielnice SN z izolacją gazową SF₆.
- ❑ Sześćiofluorek siarki należy do bardzo silnych gazów cieplarnianych, jest bowiem zaliczany do grupy fluorowanych gazów cieplarnianych, charakteryzujących się szczególnie wysokim współczynnikiem globalnego ocieplenia GWP. Dla SF₆ wartość tego współczynnika wynosi 23 000 jednostek, co oznacza, że emisja jednego kilograma tego gazu do atmosfery odpowiada emisji równej 23 000 kg CO₂. Ponadto ogromnym problemem jest jego utylizacja, bowiem jego czas rozkładu w atmosferze wynosi 3 200 lat.
- ❑ Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2024/573 z dnia 7 lutego 2024 r. w sprawie fluorowanych gazów cieplarnianych wprowadziło zakaz stosowania SF₆ w nowych urządzeniach i instalacjach elektroenergetycznych od: 2026 r. dla rozwiązań na napięcie do 24 kV; 2028 r. dla rozwiązań na napięcie do 145 kV i 2032 r. dla rozwiązań na napięcie równe lub większe niż 145 kV.

Wnioski

- ❑ Uregulowania unijne w obszarze ograniczenia emisji fluorowanych gazów cieplarnianych wymusiły na producentach urządzeń elektroenergetycznych stosowanie różnych zaawansowanych technologii, które pozwalają na zastąpienie gazu SF_6 . Należą do nich zastosowanie izolacji stałej zamiast gazowej oraz wykorzystanie gazów alternatywnych do SF_6 (suche powietrze, gazy syntetyczne z grupy fluoroketonów (np. Novec 5110) i fluoronitryli (np. Novec 4710)).
- ❑ Nowe regulacje dotyczące gazów fluorowanych stawiają przed producentami urządzeń elektroenergetycznych z jednej strony ogromne wyzwania techniczne, technologiczne i finansowe związane z ograniczeniem używania SF_6 w urządzeniach oraz koniecznością adaptacji nowych innowacyjnych technologii. Natomiast z drugiej strony, otwierają przestrzeń do rozwoju innowacyjnych rozwiązań, które mogą poprawić efektywność i zrównoważony rozwój infrastruktury elektroenergetycznej.



DZIĘKUJĘ ZA UWAGĘ

Dr hab. inż. Waldemar DOŁĘGA prof. P. Wr.