

ЕКОЛОГІЧНО ЧИСТІ ГАЗИ В ЕЛЕКТРОУСТАНОВКАХ ВИСОКОЇ НАПРУГИ

Вовчинський Д. О., магістрант, Кирик В. В., д.т.н., професор
КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра електричних мереж та систем

Вступ. Екологічні аспекти все частіше займають перше місце в усіх сферах нашого повсякденного життя — технічному, політичному, промисловому та суспільному. Не останнє місце серед головних проблем займає глобальне потепління та парникові гази, які йому сприяють, оскільки їх концентрація в повітрі досягає нових висот. Тому енергетична промисловість зосереджена на гексафториді сірки (елегаз SF₆) і необхідності знайти відповідну альтернативу для нього в промислових цілях.

Мета роботи. Дослідження впливу елегазу на навколишнє середовище при його застосуванні в електроустановках високої напруги та знаходження альтернатив у вигляді екологічно чистих газів.

Матеріали та результати досліджень. Безумовно, найважливішим застосуванням елегазу є обладнання для передачі електроенергії високої напруги. Для цієї мети використовується приблизно 10 000 тонн елегазу на рік, що відповідає приблизно 80 % від загального обсягу. Підстанції з повітряною та елегазовою ізоляцією використовують газ у вимикачах, перемикачах і вимірювальних трансформаторах. На підстанціях елегаз використовують і в розрядниках перенапруги, шинах, роз'єднувачах і заземлювачах. Елегаз – це універсальний газ, який має багато корисних властивостей. Він виділяється своєю чудовою здатністю гасити дугу та діелектричними ізоляційними властивостями. Крім того, він хімічно інертний, і негорючий та нетоксичний для людей і тварин. Ці властивості дозволяють виробникам проектувати розподільні пристрої, які є компактними та нечутливими до кліматичних умов, мають мінімальний вплив на навколишнє середовище та потребують мінімального обслуговування.

Однак елегаз також має істотний недолік – це потужний парниковий газ. Дійсно, це один із семи газів, включених до Кіотського протоколу [1], спрямованого на скорочення викидів парникових газів. Його потенціал глобального потепління (ПГП) у 23 500 разів перевищує CO₂, а термін його життя в атмосфері становить 3200 років, що заслужено ставить його на перше місце в списку Кіотського протоколу. Елегазові розподільні пристрої, як правило, безпечні для навколишнього середовища, оскільки докладаються всі зусилля для того, щоб компоненти, що містять елегаз, були абсолютно газонепроникними. SF₆ він не токсичний і не становить прямого ризику для людей і тварин. Однак через більшу вагу SF₆ витік осідає на дно і витісняє кисень. Це може викликати проблеми з диханням у персоналу, який працює в ямах та траншеях, особливо якщо вони вдихають великі кількості.

Але, якщо лише один кілограм елегазу витікає в атмосферу, це матиме вплив на глобальне потепління, еквівалентний приблизно 23,5 тоннам CO₂.

Дослідження тривали протягом тривалого часу, щоб знайти альтернативу SF₆ для використання в передавальному обладнанні. Відповідно, екологічно стійке рішення досі не було знайдено, бо існують численні, дуже суворі технічні характеристики розподільних пристроїв високої напруги, яким вони повинні відповідати. До них належать: висока діелектрична міцність, хороша дугогасна здатність, низька температура кипіння, високий тиск пари при низькій температурі та інші. Він також має відповідати вимогам охорони здоров'я та безпеки, таким як низька токсичність та негорючість. І, звичайно ж, екологічні вимоги, такі як: низький ПГП, відсутність потенціалу руйнування озонового шару та мінімальний вплив на навколишнє середовище.

Пошук відповідної заміни включав вивчення простих “непарникових” газів, таких як азот і повітря. Однак їх діелектрична міцність становить лише третину міцності елегазу. Таким чином, їх використання для електричної ізоляції та гасіння електричної дуги в пристроях підстанцій означатиме різке збільшення об'єму та тиску наповнення пристроїв щонайменше в 2,5 рази. Це не тільки впливає на дизайн корпусу, безпеку та вартість, але й суперечить необхідності розробки більш компактного електричного обладнання з меншою площею.

Також розглядалися перфторвуглецеві сполуки (ПВФС). Деякі ПФВС мають діелектричну міцність, яка викликає інтерес, але їх ПГП коливається в діапазоні від 5 000 до 12 000, що виключає їх з розгляду. Ще є трифторйодметан (CF₃I), який має діелектричну міцність вищу за SF₆, з ПГП менше 5 і терміном служби в атмосфері лише кілька днів. Однак CF₃I класифікується як мутагенна категорія 3, тому про його використання в промислових цілях не може бути й мови.

Існують схеми, які включають використання гібридних систем ізоляції, що поєднують газ (сухе повітря, азот або CO₂) з твердою ізоляцією, яка полягає в покритті струмоведучих частин епоксидною смолою. Однак досягнута ізоляція не конкурує з ізоляцією елегазу, і використання таких рішень для високої напруги значно збільшить площу пристрою.

У зв'язку з тим, що вищезазначені гази не розглядалися як заміник елегазу, дослідницькі групи GE Grid Solutions зосередили свої зусилля на серії нових фторованих молекул, які показали перспективні характеристики.

Фторкетони (загальна формула C_nF_{2n}O) використовувалися для пожежогасіння протягом останнього десятиліття. Молекула C₆F₁₂O має діелектричну міцність у 1,7 рази вищу, ніж елегаз, тобто як чистий газ він може характеризуватися дуже високою ізоляційною здатністю. Він також має дуже низький рівень токсичності з LD₅₀ (летальна доза) приблизно 100 000 см³/м³. Крім того, він має дуже низький вплив на навколишнє середовище, з тривалістю життя в атмосфері близько одного тижня через нестабільність групи кетону під ультрафіолетовим випромінюванням. Таким чином, його ПГП становить 1 або менше, порівняно з 23 500 для SF₆. Однак молекула C₆F-кетону має температуру кипіння 49°C, що робить її рідкою за стандартних умов. Таким чином, C₆F-кетон не можна використовувати як чистий матеріал, а лише як добавку при низькому тиску.

Існують інші фторкетони з діелектричною міцністю, подібною до C_6F_8 -кетону, але з нижчою молекулярною масою – і, отже, з нижчою температурою кипіння. Наприклад, C_5F_8 -кетон і C_4F_8 -кетон мають температуру кипіння $27^\circ C$ та $0^\circ C$ відповідно. Точка кипіння $27^\circ C$ означає, що він має недостатній тиск пари при низьких температурах, що робить C_5F_8 -кетон непридатним для застосування під високою напругою. З іншого боку, C_4F_8 -кетон з точкою кипіння $0^\circ C$ створить вищий тиск пари за низьких температур. Однак C_4F_8 -кетон має вищий рівень токсичності ($LD_{50} \sim 200 \text{ см}^3/\text{м}^3$) і в поєднанні з його вищим тиском пари представлятиме неприйнятну небезпеку при транспортуванні в промислових цілях.

З ПГП менше 10 гідрофторолефіни (ГФО) розглядаються як потенційні замітники елегазу. Ці молекули мають ненасичені вуглеці (подвійні зв'язки $C=C$) і є частково фторованими та гідрогенізованими. Таким чином, їх діелектрична міцність становить приблизно 80 % від діелектричної міцності SF_6 . Однак було виявлено, що вони є легкозаймистими в певних ситуаціях, викликаючи вуглецевий пил і відкладення на ізоляторі в разі розкладання газу внаслідок дугового розряду або іскріння, і саме це іскріння не дозволяє використовувати цей газ в обладнанні високої напруги.

Дослідницька група Grid Solutions у партнерстві з компанією 3М випробувала багато нових фторованих сполук і серед них поглиблено вивчила багатообіцяючу хімічну групу під назвою фторнітрили. Особливі дослідницькі зусилля були спрямовані на розробку нових фторнітрилів із меншою токсичністю. Напруги пробою різних фторнітрилів та інших розроблених фторованих сполук подана на рисунку 1.

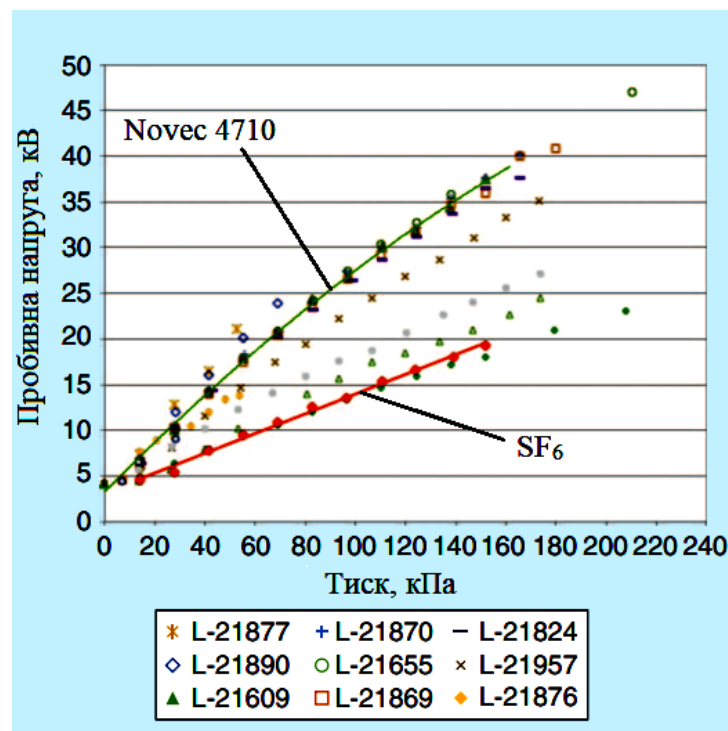


Рисунок 1 – Напруга пробою різних фторнітрилів та інших сполук

Спеціальна сполука з сімейства фторонітрилів, а саме гептафтор-ізобутиронітрил, була спеціально розроблена в рамках цієї координації, яка з комерційно доступна під назвою Novac 4710. Вона була обрана на основі її низької токсичності, високої діелектричної міцності, відносно помірному ПГП і низької температури кипіння. Рідина Novac 4710 має ПГП приблизно 2100, температуру кипіння – 4,7°C, діелектричну міцність приблизно вдвічі вища, ніж SF₆ при атмосферному тиску, високу теплопередачу та низьку токсичність, що робить її найкращим кандидатом для використання в суміш для заміни елегазу. Novac 4710 є першим матеріалом, який поєднує всі необхідні властивості в одній суміші, тоді як усі інші потенційні представники демонстрували недоліки в тій чи іншій категорії. Поліпшення однієї властивості часто призводить до негативних наслідків для іншої властивості. Структура молекули рідини Novac 4710 дозволила створити правильну комбінацію властивостей без суттєвої втрати в жодній із них.

Висновки. На даний момент доступне високовольтне обладнання без елегазу, яке пропонує такі ж характеристики та розміри, що й обладнання з елегазовою ізоляцією за аналогічних і доступних економічних умов. Газова суміш на основі фторнітрилу під назвою «g³» – зелений газ для мережі – може виступати заміною елегазу. Оскільки проблеми навколишнього середовища все частіше постають у центрі уваги урядів і споживачів, розробка g³ додає імпульс поточним пошукам більш стійкого рішення для високовольтного розподільного обладнання.

Перелік посилань

1. Кіотський протокол до Рамкової конвенції Організації Об'єднаних Націй про зміну клімату (укр/рос) ООН; Протокол, Міжнародний документ від 11.12.1997. Електронний ресурс. Режим доступу: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_801
2. Yannick Kieffel, Todd Irwin, Philippe Ponchon, and John Owens. Green Gas to Replace SF₆ in Electrical Grids. Електронний ресурс. Режим доступу: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7450928>