

ЗАСТОСУВАННЯ ВАКУУМНИХ ВИМИКАЧІВ У МЕРЕЖАХ СЕРЕДНЬОЇ НАПРУГИ: АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У роботі досліджується застосування, аналіз ефективності та перспективи розвитку вакуумних вимикачів у мережах середньої напруги.

Ключові слова: вакуумний вимикач; середня напруга; масляний вимикач; елегаз (SF₆); дугогасіння; діагностика; ретрофіт.

Abstract

The article analysis of efficiency and development prospects of vacuum circuit breakers in medium voltage networks were investigated.

Keywords: vacuum circuit breaker; medium voltage; oil circuit breaker; SF₆; arc extinguishing; diagnostics; retrofit.

Вступ

Надійність роботи мереж середньої напруги 6–35 кВ значною мірою залежить від ефективності вимикачів, що захищають обладнання від коротких замикань та перевантажень. Традиційно використовувалися масляні, повітряні та елегазові (SF₆) вимикачі, проте кожен з цих типів має суттєві недоліки – від обмежених діелектричних властивостей до екологічних та експлуатаційних проблем. Масляні вимикачі, наприклад, пожежонебезпечні та вимагають частого обслуговування, повітряні (особливо повітряно-дугові) – громіздкі й шумні, а елегаз (SF₆) є сильним парниковим газом (глобальний потенціал нагріву ~23 500 разів вищий за CO₂), що вже призвело до регуляторних обмежень його використання. Вакуумні вимикачі з'явилися як альтернатива для розв'язання цих проблем, забезпечуючи безпечне гасіння дуги без утворення шкідливих побічних продуктів. Наразі саме вакуумні вимикачі все ширше застосовуються у розподільчих мережах середньої напруги, поступово витісняючи застарілі рішення. Актуальність дослідження зумовлена потребою підвищення надійності та екологічності електромереж, а також завданням модернізації існуючих підстанцій шляхом заміни застарілих вимикачів на сучасні вакуумні (ретрофіт).

Результати дослідження

Вакуумні вимикачі мають низку суттєвих переваг, що вигідно вирізняють їх у середньому класі напруги. З технічної точки зору, вакуумні комутаційні апарати характеризуються високою надійністю та великим ресурсом роботи (кількістю комутацій) за рахунок герметично закритих дугогасильних камер, незасмічення контактів продуктами горіння та простішої конструкції. Відсутність зовнішнього газового або масляного середовища усуває потребу в регулярному контролі тиску чи рівня середовища та змащенні механізмів. Вакуумні вимикачі здатні комутувати великі струми короткого замикання (мають високу вимикальну здатність) і швидко гасити дугу – струм обривається при першому переході через нуль, а вакуум відновлює діелектричну міцність за лічені мікросекунди. Сучасні вакуумні контакти із спеціальних сплавів (наприклад, безкисневої міді з хромом) забезпечують ефективне гасіння дуги, мінімізують ерозію та запобігають зварюванню контактів, а нові конструкції контактних систем з аксіальним магнітним полем дають можливість вимикати струми понад 31,5 кА. Простота кінематики приводного механізму (мінімум рухомих і тертьових деталей) підвищує загальну надійність та знижує рівень шуму при спрацюванні. Вакуумні вимикачі також компактніші і легші: маса сучасного вакуумного вимикача може становити ~35 кг, тоді

як аналогічні масляні чи елегазові – понад 100 кг . Відсутність масла означає, що немає ризику загоряння чи вибуху, притаманного масляним апаратам , що підвищує безпеку експлуатації.

Вказані технічні переваги безпосередньо впливають на економіку експлуатації. Вакуумні вимикачі фактично не потребують регламентного технічного обслуговування, окрім періодичного діагностування стану (яке може виконуватися автоматизовано). Відсутність необхідності заміни або очищення масла, поповнення газу чи частого ремонту приводів знижує експлуатаційні витрати і час простоїв обладнання . Тривалий термін служби контакторів у вакуумі (суттєво довший, ніж у масляних або повітряних вимикачів за рахунок мінімального зносу контактів) забезпечує більше напрацювання на відмову . Сукупно це зменшує вартість життєвого циклу: за оцінками, повна вартість володіння вакуумним вимикачем на 40–60% нижча, ніж елегазовим (SF₆) . Хоча початкова вартість вакуумних вимикачів може бути вищою, їхній довгий ресурс і низькі витрати на обслуговування роблять їх економічно вигіднішими у довгостроковій перспективі .

Вакуумні вимикачі є екологічно чистішим рішенням для електричних мереж. На відміну від елегазових апаратів, вони не містять SF₆ газу, який має надзвичайно високий парниковий ефект і підлягає жорсткому контролю та поступовому виведенню з експлуатації в усьому світі. Використання вакууму як середовища для гасіння дуги означає відсутність викидів парникових газів під час комутації . Також немає проблем утилізації відпрацьованого елегазу чи масла – після відпрацювання ресурсу вакуумного вимикача не залишається токсичних відходів. Вакуумні дугогасильні камери не продукують шкідливих газових сполук при горінні дуги (на відміну від продуктів розкладання елегазу чи оливи), металеві пари конденсуються всередині камери . Це робить вакуумні вимикачі значно безпечнішими для довкілля та персоналу (відсутній ризик витоку масла в ґрунт чи атмосферу, немає диму та сажі). Таким чином, перехід на вакуумні комутаційні технології в розподільчих мережах сприяє зменшенню впливу енергетики на навколишнє середовище.

Сучасним трендом у розвитку вакуумних вимикачів є впровадження «інтелекту» – систем моніторингу та діагностики стану в реальному часі. Вакуумні вимикачі нового покоління оснащуються вбудованими датчиками струму, напруги, температури та положення, які безперервно відстежують параметри роботи апарата . Зібрана інформація може передаватися на локальні контролери або в диспетчерські системи (SCADA) для дистанційного моніторингу обладнання . Інтелектуальні вакуумні вимикачі (так звані iVCB) інтегруються з цифровими системами управління та можуть виконувати самодіагностику, сигналізувати про відхилення в характеристиках руху або часу спрацювання, рахувати кількість комутацій тощо . Це дозволяє запровадити концепцію прогнозного обслуговування: на основі даних датчиків оцінюється залишковий ресурс та своєчасно планується ремонт або заміна вузлів до виникнення аварії. Таким чином, впровадження систем онлайн-діагностики підвищує надійність та безпеку експлуатації вакуумних вимикачів, знижує витрати на ремонт за рахунок попередження відмов і скорочує простої обладнання .

Подальше вдосконалення вакуумних вимикачів пов'язане з розвитком матеріалознавства і конструкції дугогасильних камер. Запровадження контактів зі спеціальних тугоплавких сплавів (мідь-хром, мідь-вольфрам тощо) дозволило суттєво підвищити стійкість до ерозії та зварювання, одночасно забезпечивши низький рівень дроблення струму при відключенні індуктивних навантажень. Це вирішило проблему приварювання контактів у вакуумі, яка гальмувала впровадження технології на ранніх етапах розвитку. Додатково, застосування спеціальної профілізації контактів і зовнішніх магнітних котушок дало можливість керувати дугою в вакуумі: перехід від дифузної до стислої форми дуги контролюється магнітним полем таким чином, щоб рівномірно розподіляти тепло по контактній поверхні . Зокрема, технологія аксіально-магнітного поля (AMF) дає змогу надійно комутувати струми короткого замикання високого рівня (>31,5 кА) у вакуумних вимикачах без втрати діелектричної міцності після відключення . Паралельно вдосконалюються приводи вимикачів: традиційні пружинно-моторні приводи поступово замінюються магніто-керованими (соленоїдними) приводами, що мають менше рухомих частин і не потребують регулярного технічного обслуговування. У сукупності нові матеріали і технології спрямовані на підвищення надійності, довговічності та швидкодії вакуумних комутаційних апаратів.

Історично вакуумні вимикачі домінували у класі напруг до ~35 кВ, тоді як на вищих класах (110 кВ і більше) використовувалися переважно елегазові вимикачі через технологічні обмеження вакууму по рівню напруги. Проте сучасні дослідження і розробки спрямовані на подолання цього бар'єру. Вже нині з'являються комерційні зразки вакуумних вимикачів на клас напруг 72,5–84 кВ, здатні комутувати струми до 50–100 кА . Деякі експериментальні конструкції досягають рівня 145 кВ , що

наближає вакуумну технологію до високовольного класу. Втім, для роботи на надвисоких напругах (220 кВ і вище) зазвичай потрібно послідовне з'єднання кількох вакуумних камер, щоб забезпечити необхідну довжину ізоляційного проміжку. Наприклад, для вимикача 220 кВ необхідно умовно чотири вакуумних осередки по ~84 кВ кожен, що ускладнює конструкцію і синхронізацію комутації. Тому наразі на найвищих рівнях напруг вакуумні вимикачі ще не набули масового застосування. Проте тенденція до відмови від SF₆-газу з екологічних міркувань стимулює розвиток SF₆-free технологій, де вакуум в поєднанні з твердою або повітряною ізоляцією використовується у високовольному обладнанні. Очікується, що найближчим часом вдосконалення матеріалів та інженерних рішень дозволить значно розширити верхню межу напруг для вакуумних вимикачів, що відкриє можливості їх застосування в магістральних мережах високої напруги як екологічно безпечної альтернативи елегазовим вимикачам.

Значна кількість діючих розподільчих установок 6–35 кВ все ще оснащена морально та фізично застарілими вимикачами (особливо масляними та повітряними), ресурс роботи яких вичерпано або близький до кінця. Повна заміна таких вимикачів і комірок на нові – затратний і довготривалий процес. Тому набув поширення підхід ретрофіту, коли в існуючі панелі встановлюють сучасні вакуумні вимикачі замість старих, з мінімальними конструктивними доробками. Виробники електрообладнання пропонують стандартизовані рішення для заміни масляних вимикачів на вакуумні модулі, що дозволяє суттєво продовжити строк служби розподільчих пристроїв та підвищити їхню безаварійність. У процесі ретрофіту старий вимикач демонтується, а на його місце монтується вакуумний вимикач (стаціонарний або висувний модуль) разом з новими вимірювальними трансформаторами та блоком управління, сумісним з існуючою шафою. Така модернізація має низку переваг: мінімальний час і обсяг будівельно-монтажних робіт, відсутність тривалих перерв в електропостачанні, підвищення надійності та пожежо- і вибухобезпеки розподільчого пристрою. Як зазначають профільні компанії, заміна на вакуумні вимикачі рекомендована для всіх старих типів (масляних, повітряних, елегазових) з метою забезпечення безпечної та надійної роботи обладнання. Вакуумні ретрофіт-вимикачі є обслуговування-непотребуючими, тож після модернізації зникає потреба в трудомістких регламентних роботах, пов'язаних з обслуговуванням масла чи газу. У результаті зростає оперативна готовність розподільчої мережі, знижуються витрати на експлуатацію і усуваються екологічні ризики (витік масла, викиди SF₆). Отже, програми ретрофіту, що впроваджуються енергопостачальниками, відводять вакуумним вимикачам ключову роль у підвищенні надійності та екологічності електромереж.

Висновки

Проведений аналіз показав, що вакуумні вимикачі середньої напруги мають істотні технічні, економічні та екологічні переваги над застарілими масляними, повітряними та елегазовими апаратами. Завдяки відсутності масла і газу як середовища для гасіння дуги, вони забезпечують високу надійність роботи без регулярного обслуговування, виключають ризики пожеж та викидів парникових газів. Вакуумні вимикачі компактні, тихі та здатні багаторазово комутувати великі струми, зберігаючи працездатність протягом десятків років, що знижує сумарні експлуатаційні витрати. Сучасні тенденції розвитку включають перехід до “розумних” вимикачів із системами онлайн-діагностики, застосування нових контактних матеріалів та приводів для ще більшого підвищення ресурсу, а також розширення вакуумної технології у високовольний клас напруг. В умовах посилення екологічних норм щодо SF₆ та потреби в модернізації розподільчих мереж, вакуумні вимикачі виступають оптимальним рішенням для оновлення електроенергетичної інфраструктури. Отримані результати підтверджують доцільність ширшого впровадження вакуумних комутаційних апаратів у мережах середньої і високої напруги та окреслюють напрями їх подальшого удосконалення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Основи Електропостачання С. О. Тимчук, Ю. М. Хандола, Харків - 2023р
2. Innovations in Vacuum Interruption: Diagnostics and Monitoring - A. Lee, S. Kumar, IEEE Access, 2021р.
3. Electrical Engineering Portal [Електронний ресурс] Режим доступу: electrical-engineering-portal.com
4. ASBEAM [Електронний ресурс] Режим доступу: – asbeam.com
5. CSQ Electric [Електронний ресурс] Режим доступу: – csqelectric.com

6. Tavrída Electric [Електронний ресурс] Режим доступу: – tavrida.com
7. ABB [Електронний ресурс] Режим доступу: – new.abb.com
8. Siemens [Електронний ресурс] Режим доступу: – blog.siemens.com
9. Giant Electric [Електронний ресурс] Режим доступу: – giant-electric.com
10. Composite Power Group [Електронний ресурс] Режим доступу: – compow.com
11. Pluton Polska [Електронний ресурс] Режим доступу: – pluton-polska.pl
12. SSPower Blog [Електронний ресурс] Режим доступу: – ssppower.com
13. Intelligent Power Today [Електронний ресурс] Режим доступу: – intelligent-power-today.com

Гнатюк Руслана Олександрівна — студентка групи ІЕСМ-26, факультет електроенергетики та електромеханіки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: Ruslanagnatuk29@gmail.com

Собчук Наталія Валеріївна — кандидат технічних наук, доцент кафедри електричних станцій та систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: sobchuk3vntueduua@vntu.edu.ua

Hnatiuk Ruslana O. — student of group ІЕСМ-2b, Faculty of Electric Power Engineering and Electromechanics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: Ruslanagnatuk29@gmail.com

Sobchuk Natalia V. — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electrical Power Plants and Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: sobchuk3vntueduua@vntu.edu.ua