



ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ПОЛІМЕРНОЇ ІЗОЛЯЦІЇ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

Висвітлено характерні особливості композитних ізоляторів з полімерною захисною оболонкою, яка захищає несучий стрижень від атмосферного впливу та забезпечує необхідну довжину шляху витoku. Описані основні класи матеріалів, які використовуються для полімерної ізоляції. Для композитних ізоляторів дана характеристика пошкодженням, які не викликають негайної заміни ізоляторів та тих, що призводять до негайної їх заміни.

К л ю ч о в і с л о в а: композитні ізолятори, полімерні матеріали, пошкодження, електричні мережі.

На теперішній час доступно досить багато інформації про використання некерамічної композитної ізоляції в електричних мережах різних класів напруги в енергосистемах розвинених країн світу. Фірми виробники освоїли економічно вигідне хімічне виробництво полімерних матеріалів для композитної ізоляції (КІ) і проводять досить інтенсивно рекламу даного класу ізоляції, наділяючи її неймовірними техніко-економічними характеристиками. За деякими публікаціями показники надійності полімерної ізоляції в 10...100 разів перевищують показники надійності скляних ізоляторів [1,4], але експлуатаційний персонал електричних мереж відноситься з певною недовірою та насторогою до даного класу ізоляції. Поширене використання полімерної ізоляції обумовлено, насамперед, комерційним інтересом.

Світовий досвід використання підтверджує те, що початкові електричні та механічні параметри композитної ізоляції перевищують відповідні параметри класичної фарфорової та скляної ізоляції. Але інтенсивність зниження значень параметрів полімерних матеріалів в процесі експлуатації набагато перевищує даний параметр для класичної скляної ізоляції. Хімічні та фізичні властивості полімерних матеріалів безперервно змінюються через постійні хімічні процеси, що може призвести до повного розпаду полімерів на мономери. Через старіння полімеру і при підвищених температурах зменшується механічна міцність. Важливим фактором для композитної ізоляції, який впливає на її якість та надійність в роботі, є процес її транспортування, зберігання та діагностики.

Як показує практика експлуатації, деякі композитні ізолятори добре працюють протягом 18...20 років, в той час як інші відмовляють через кілька місяців роботи.

До основних переваг композитних ізоляторів можна віднести більш низький у порівнянні з фарфоровими та скляними рівень радіоперешкод, менша вага, зручність транспортування і простий монтаж, більша стійкість актам вандалізму, проте існує можливість пошкодження захисної оболонки при експлуатації гострими предметами при упакуванні і транспортуванні. Для запобігання по-

шкодження захисної оболонки при монтажі необхідно дотримуватися обережності. Діагностика ізоляторів досить дорога і не завжди дозволяє виявити приховані дефекти.

Звичайно, першочерговим фактором використання КІ є економічний фактор. Використання КІ суттєво знижує капіталовкладення при спорудженні електроустановок. А от затрати на експлуатацію суттєво зростають.

Метою роботи є висвітлення характерних особливостей полімерної ізоляції, які проявляються під час її експлуатації.

Композитні ізолятори складаються з окремих полімерних елементів (тарілок) або з монолітної полімерної оболонки, які змонтовано на утримуючому скловолоконному стрижні з проміжним шаром або без нього.

На теперішній час для композитних ізоляторів використовуються три основні класи матеріалів:

- епоксидні смоли (компаунди);
- вуглеводневі еластоміри;
- силіконові-еластоміри.

Етилен-пропіленові гуми (EPR) на теперішній час використовуються для зовнішньої ізоляції, а саме дві модифікації етилен-пропіленового мономера (EPM, EPDM) і співполімер етилен-пропілену і силікону (ESP). Всі три типи мають високий ступінь заповнення гідратом алюмінію або іншими наповнювачами. Ранні типи EPR піддавалися трекінгу з утворенням провідникових вуглецевих доріжок на поверхні і мали слабку стійкість до ультрафіолетового випромінювання. Треки розвиваються деревоподібно, поки весь ізолятор не зашунтується, що призводить до перекриття. Сучасні EPR більш стійкі до треку і ультрафіолетових променів. Ізолятори з оболонками з EPR придатні для електроустановок надвисокої напруги. При роботі в забруднених умовах характеристики оболонок із EPR неоднозначні, але частіше за все вони незадовільні. Для оцінки характеристик оболонок із ESP необхідно накопичити досвід експлуатації.

Силіконові еластоміри (SE) або кремнійорганічні гуми (SIR) для зовнішньої ізоляції застосовуються трьох типів:

- вулканізовані при кімнатній температурі (RTV);



- рідка силіконова гума (LSR);
- вулканізовані при високій температурі (HTV).

Обидва вулканізовані типи (RTV і HTV) мають високе заповнення гідратом алюмінію і обпаленим кремнеземом (окис кремнію) і обидва ці типи за більшістю публікацій проявили себе як найбільш надійні полімерні матеріали для зовнішньої ізоляції. Гума LSR ще тільки починає застосовуватися, хоча набирає значних обсягів використання. Еластомери RTV застосовують зазвичай на підстанційних ізоляторах, їх характеристики в забруднених районах в більшості випадків, виявилися задовільними.

На відміну від більшості інших полімерних ізоляційних матеріалів силіконові еластомери здатні зберегти свою низьку поверхневу енергію, що забезпечує їх відмінні гідрофобні поверхневі властивості. Крім того, на відміну від EPR, силіконові еластомери стійкі до ультрафіолетових променів. В цілому на теперішній час за кордоном намітилась тенденція використовувати SE матеріал для оболонок всіх типів зовнішніх ізоляторів. Розробники прагнуть до стандартизації, як це зроблено для керамічних ізоляторів, причому більш дешеві модифікації силікону використовуються під загальною назвою "силікон".

Конфігурація тарілок, що використовується в композитних ізоляторах, дуже різноманітна. На перших ізоляторах тарілки робили ребристими за зразком порцелянових підвісних ізоляторів. Застосовувалась також конусна форма тарілок для забезпечення великої довжини шляху витoku. Тарілки такої конфігурації легко видаляються з відливної форми. Однак з переходом від модульних відливок до монолітної оболонки форма тарілок стала, у більшості випадків, слабко конічною (майже пласкою й горизонтальною), для кращого відокремлення з відливної форми. В останні роки виробники найчастіше застосовують гладкі профілі тарілок, вони краще очищаються від забруднення вітром і опадами.

На теперішній час більшість передових виробників для підвищення терміну служби ізоляторів, особливо для більш високих напруг, відмовилися від модульної відливки і перейшли на відливку монолітних оболонок, що вулканізуються на стрижні (за один технологічний цикл). Причин для такого переходу існує кілька. У модульних оболонках через корону в просторі між тарілками і ерозію, викликану поверхневими розрядами, часто утворюються мікропровідникові канали між окремими тарілками, що призводить до виходу їх з роботи. У кількох відомих випадках такі канали проникали безпосередньо до склопластикового стрижня та були причиною його трекінгу. Крім того, в модульних конструкціях для заповнення повітряних порожнин між тарілками використовуються з'єднувальні компаунди (си-

ліконова мазь, силіконовий гель), які виділяють масло, що сприяє накопиченню забруднень на стиках між тарілками. Герметики типу епоксидних смол не утворюють постійного зв'язку з еластомерними матеріалами, тому модульні з'єднання механічно розділяються за короткий період часу через вплив вологи. Окремо сформовані тарілки або групи тарілок, що насаджуються на стрижень ізолятора, зазвичай мають менший внутрішній діаметр, ніж діаметр стрижня. Посадка таких тарілок на стрижень найчастіше проводиться за рахунок тертя (натяжкою), при цьому знижується кількість компаунду (прошарку), необхідного для заповнення повітряного проміжку між стрижнем і оболонкою. Це призводить до механічних розтягувальних навантажень в тарілках і зменшує термін служби ізоляторів. Ультрафіолетові промені сонця в деяких полімерах, наприклад в EPR, також можуть викликати розрив зв'язку між тарілками, що призводить до утворення мікроскопічних тріщин. Зазвичай ці тріщини сильно поширюються в глибину через наявність органічних і неорганічних ультрафіолетових інгібіторів, які введені в матеріал. Ці тріщини не обов'язково скорочують термін служби ізоляторів, але у модульних тарілок при впливі на них механічних навантажень ці тріщини поступово збільшуються і можуть викликати руйнування тарілок.

Арматура (наконечники) композитних ізоляторів виготовляється з литого високоміцного чавуну або сталі. Для забезпечення необхідної механічної міцності арматура прикріплюється до стрижня пресуванням або приклеюванням. Коли пресування відбувається рівномірно навколо арматури, ізолятор має кращі характеристики, ніж при використанні клеєного конічного наконечника (має велику розривну міцність на одиницю поперечного перерізу осердя). Під час пресування наконечників круглою матрицею методом витяжки в стрижні ізолятора можуть утворюватися мікротріщини. Ці тріщини, як правило, не можуть бути виявлені при кінцевих випробуваннях, а дефект проявляється вже при експлуатації. У клиноподібних конструкціях наконечників виникають механічні навантаження, що передаються до центру стрижня. Вони можуть призвести до утворення в осерді тріщин при досить малих крутих навантаженнях. Ізолятори з такими наконечниками вимагають особливої обережності при монтажі та експлуатації. Обтиснуті і клеєні конструкції наконечників мають високу міцність на скручування.

При перекритті ізолятора силовою дугою на наконечниках, де розташовуються опорні точки дуги, концентрується тепло. У конструкцій з обтисненням при нагріванні наконечники розширюються, тому їх з'єднання зі стрижнем послаблюється. У клейових епоксидних конструкціях розкладання клейової частини є типовою причи-

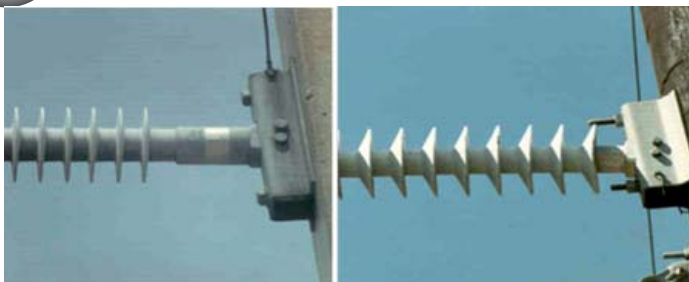


Рис. 1. Ізолятори з вапнуванням

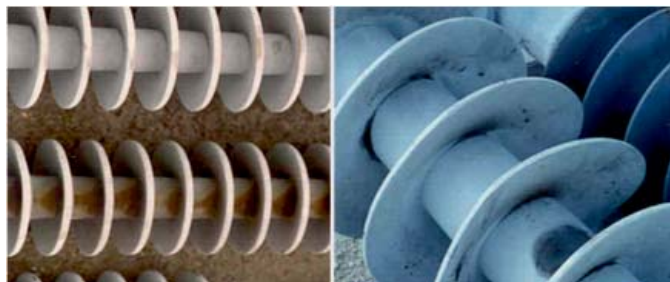


Рис. 2. Ізолятори з витком наповнювача в місці з'єднання



Рис. 3. Забруднені ізолятори



Рис. 4. Ізолятор пошкоджений пліснявою



Рис. 5. Ізолятори з різною гідрофобністю



Рис. 6. Ізолятор із незначними механічними пошкодженнями



Рис. 7. Пошкодження наконечників внаслідок горіння дуги



Рис. 8. Корозія на кінцях ізолятора



Рис. 9. Мікротріщини по поверхні ізолятора



Рис. 10. Пошкодження утримуючого склопластикового стрижня



Рис. 11. Пошкодження з оголенням утримуючого склопластикового стрижня



Рис. 12. Пошкодження корозією наконечників стрижня



Рис. 13. Тріщини на поверхні ізолятора глибиною більше 0,1 мм



Рис. 14. Поверхневі тріщини з оголенням склопластикового стрижня



Рис. 17. Ізолятор покритий колоніями грибків



Рис. 15. Поверхнева ерозія полімерного покриття



Рис. 16. Наслідки поверхневого пробою полімерного покриття ізолятора



ною пошкодження. У клиноподібних конструкціях нагрів стрижня призводить до пошкодження в результаті послаблення клину. На багатьох конструкціях наконечників встановлюються додаткові металеві диски (кільця), які оберігають наконечники від теплової енергії дуги. Ізолятори більш високих класів напруги оснащуються захисною арматурою для вирівнювання розподілу напруги. Однак в деяких випадках ця арматура може сильно пошкоджуватися від дії силової дуги. Якщо таке кільце не замінити відразу після його пошкодження, це може призвести до пошкоджень в ізоляторі. Крім того в таких випадках виникають сильні радіо- і телевізійні перешкоди. Виявлено, якщо наслідки дугового пошкодження захисної арматури ліквідовані досить швидко, механічна міцність ізоляторів не змінюється. Однак, якщо пошкодження відбуваються повторно на вже пошкодженій захисній арматурі, може відбутися розрив ізолятора.

Кінцеве закладення, тобто з'єднання наконечників із захисною оболонкою, є найбільш важливим елементом композитного ізолятора з точки зору забезпечення його безаварійної тривалої роботи. Через порушення цілісності (герметичності) неодноразово відбувалися важкі аварії в експлуатації, викликані розривом склопластикового стрижня, що входив в контакт з атмосферними забрудненнями і вологою. Основною причиною таких розривів є трекінг по зволоженій поверхні. При цьому ізолятори, в яких використовується клиноподібне приєднання металевих наконечників до стрижня, мають, як правило, низьку надійність кінцевих закладень. Переміщення стрижня всередині наконечників в таких конструкціях призводить до зміщення оболонки відносно наконечників, в результаті чого стрижень може виявитися незахищеним. Основними типами закладення є клейова, фрикційна (тертя) і формувальна. Закладення клейового типу, що виконуються з використанням замазочного матеріалу (герметика), такого як силіконова гума RTV, через погану адгезію недовговічна. Закладення фрикційного типу, в яких стрижень з тертям вводиться в наконечники, працюють ефективно доти, поки зберігаються розмірні співвідношення. Кінцеві закладення, виконані формуванням стрижня в наконечники, є найкращими, оскільки при формуванні утворюється міцне скріплення стрижня, наконечника та оболонки [2].

Пошкодження полімерних ізоляторів можна умовно розділити на два види: що не потребують негайної заміни та ті, що потребують негайної заміни.

До пошкоджень, що не викликають негайної заміни ізоляторів, можна віднести [3]: **вапнування, витік з'єднувального наповнювача, накопичення бруду, ріст плісняви та водоростей, зменшення гідрофобності поверхні, механічні пошкодження, незначне пошкодження внаслідок дуги, корозія, поверхневі мікротріщини.**

1. Вапнування. Вапнування є наслідком ультрафіолетової радіації або електричної активності, що спричинила поверхневі пошкодження полімерного покриття. В результаті цього частинки наповнювача із матеріалу оболонки з'являються на поверхні ізолятора і вона стає шорсткою або порошкоподібною. Це призводить до накопичення бруду, затримки вологи на поверхні ізолятора. На Рис. 1 наведені приклади ізоляторів з вапнуванням.

2. Витік з'єднувального наповнювача, що заповнює повітряний проміжок між тарілками ізоляторів. Це супроводжується накопиченням бруду та цвілі в місці витоку, так як цей наповнювач липкий. Якщо витік відбувається в місці з'єднань, то ізолятор не потребує негайної заміни, якщо витік відбувається в результаті механічних пошкоджень, то потрібна негайна заміна. На Рис. 2 показані такі види пошкоджень.

3. Накопичення бруду. На поверхню композитного ізолятора вітром заносяться частинки пилу та інших забруднень. Загальна дія ультрафіолетового випромінювання і механічного впливу на ці частинки викликає легку ерозію поверхні, збільшуючи її нерівності, і викликає накопичення на ній забруднень. Бруд не пошкоджує полімерне покриття ізолятора, але якщо шар бруду занадто товстий, то він може викликати пробій. Полімерні ізолятори сильно забруднюються в кінці лінії електропередавання через сильне магнітне поле. У міру збільшення нерівностей поверхні, і накопичення в них забруднень, старіння ізолятора прискорюється. На Рис. 3 показані ізолятори з забрудненнями.

4. Ріст плісняви та водоростей. Не дивлячись на задекларовану підвищену гідрофобність на поверхні некерамічних ізоляторів в порівнянні з керамічними, на поверхні полімерних ізоляторів мають місце грибокві пошкодження, які викликають зниження діелектричної проникності ізоляційного матеріалу. Такі види пошкоджень також супроводжуються накопиченням бруду та вологи, але є не суттєвими. В районах із підвищеним вмістом солі, де найбільш важливі забруднюючі властивості, ріст плісняви та водоростей не спостерігається. На Рис. 4 зображено ізолятор із пліснявою.

5. Зменшення гідрофобності поверхні ізолятора. При високій вологості, наприклад, через туман або росу, на водовідштовхувальній поверхні ізолятора утворюються крапельки води. Якщо нахил поверхні великий, то краплі води можуть скотитися вниз. Але в інших місцях ізолятора вони проникають крізь забруднення і тонкий шар полімерів, стаючи провідниками струму і викликаючи розряди. Розряди поглинають тонкий шар полімеру навколо крапель води і руйнують гідрофобність. Деякі ізолятори із значним вапнуванням можуть взагалі втратити здатність відштовхувати вологу. На Рис. 5 зліва наведений приклад ізолято-



ра з повною гідрофобністю, праворуч — з дуже низькою здатністю відштовхувати вологу.

6. Механічні пошкодження декількох тарілок.

Вони можуть бути надірвані, частково відірвані, подряпані, мати проколи, але такі пошкодження не суттєво вплинуть на властивості ізолятора. Такі ізолятори не потребують негайної заміни, але не можуть бути придатними до встановлення. На Рис. 6 показаний ізолятор із такими пошкодженнями.

7. Незначне пошкодження внаслідок дуги.

Короткочасне горіння дуги не спричиняє пошкодження полімерного покриття ізолятора, а лише незначні пошкодження арматури. Ізолятор може бути замінений в тому випадку, коли на арматурі з'являється значна корозія (в результаті видалення оцинкованого шару). На Рис. 7 наведені приклади таких пошкоджень.

8. **Мінімальна корозія** арматури не є причиною до негайної заміни ізолятора, але в подальшому вона буде збільшуватись і вже тоді буде потрібна негайна заміна. На Рис. 8 наведені приклади таких пошкоджень.

9. **Поверхневі мікротріщини** глибиною менше 0,1 мм, що утворюються в результаті електричної активності. Вони призводять до незначних зломів поверхні ізолятора. Негайної заміни такі пошкодження не вимагають, але потребують контролю, адже поступово можуть перерости в більш серйозні пошкодження. На Рис. 9 наведені такі пошкодження.

Іноколи ізолятори пошкоджуються таким чином або в тій мірі, що подальша їх експлуатація стає проблематичною. Тоді такі ізолятори потребують негайної заміни.

Негайної заміни потребують ізолятори з такими пошкодженнями: **пошкодження склопластикового стрижня, оголення склопластикового стрижня, поверхневі тріщини, що більші за 0,1 мм, значна ерозія поверхні матеріалу, пробій поверхні, колонії грибів** [3]:

1. Пошкодження склопластикового стрижня.

Якщо виявлено, що волокна склопластикового стрижня з'явилися на поверхні ізолятора, то такий ізолятор потребує негайної заміни. На Рис. 10 показані приклади таких пошкоджень.

2. **Оголення склопластикового стрижня.** Існує багато причин таких пошкоджень: ерозія зовнішнього покриття чи виникнення глибоких тріщин, розщеплення чи трекінг покриття, пошкодження внаслідок вогнепального пострілу. Відкритий стрижень може в подальшому пошкоджуватися внаслідок проникнення води, ультрафіолетового випромінювання. На Рис. 10 наведено приклад пошкодження.

3. **Сильна корозія наконечників.** Якщо наконечники полімерних ізоляторів покрились корозією настільки, що не можуть витримувати механічні навантаження, то такі ізолятори потребують негайної заміни (Рис. 12).

4. **Поверхневі тріщини, глибина яких більша за 0,1 мм.** Такі тріщини можуть призвести до на-

копичення бруду та поверхневих трекінгів і оголення склопластикового стрижня. На рис. 13, 14 наведені приклади таких пошкоджень.

5. **Значна ерозія поверхні матеріалу.** Ерозія представляє собою незворотну руйнацію полімерного матеріалу, що виникає внаслідок старіння матеріалу. На Рис. 15 наведені ізолятори з ерозійними пошкодженнями.

6. **Електричний пробій поверхні.** Пробій виникає внаслідок тривало існуючих часткових розрядів по поверхні оболонки або стрижня. На Рис. 16 представлений ізолятор після поверхневих пробіів полімерних матеріалів.

7. **Колонії грибків.** Ці мікроорганізми спочатку розвиваються на поверхні матеріалу, а в процесі життєдіяльності можуть виділяти органічні кислоти, що призводять до інтенсифікації процесу руйнації матеріалу і проникнення грибків всередину ізолятора. На Рис. 17 наведений приклад ізолятора з колоніями грибків на поверхні.

Розподіл ліній електричного поля полімерного ізолятора більш нелінійний, ніж в скляного, що обумовлено гнучкістю некерамічної ізоляції. Коронний розряд може локалізуватися по трьох шляхах: кінцеві металеві частини гірлянди ізоляторів; в межах штанги скловолоконного стрижня та на поверхні і в повітряному його просторі полімера. Нерівномірний розподіл градієнта напруги по поверхні призводить до того, що в місцях з високим градієнтом напруги з'являються коронні розряди. Виникнення коронних розрядів в даному випадку складніше розрахувати та спрогнозувати. Наявність забруднення і вологи в комбінації з електричною напругою призводить до збільшення локальних розрядів, які викликають ерозію поверхні ізоляції та утримуючого стрижня і їх деградації.

Часткових розрядів на високовольтних електроустановках уникнути практично неможливо, а вони є чинником утворення кислот, особливо при підвищеній вологості, які призводять до пошкодження скловолоконних утримуючих стрижнів і зниження рівня пробивної напруги ізоляції.

Цей процес посилюється внаслідок дефектів адгезії та порушеннями кремній-органічного герметика в прошарку між оболонкою і металевою арматурою в процесі експлуатації під дією зовнішніх чинників (ультрафіолетове випромінювання, радіація, механічні навантаження), в тому числі і термічних.

Традиційна гірлянда скляних ізоляторів має певний ступінь свободи, так як між ізоляторами не жорстке кріплення і розриви гірлянд практично виключені. Що стосується гірлянди з полімерної ізоляції, то при різких поривах вітру чи при горизонтальному зміщенні провода на утримуючий стрижень гірлянди діє сила на його згинання. В такому разі можливі пошкодження скловолоконного стрижня. Необхідно відмітити і те, що не виключені пошкодження стрижнів полімерних гірлянд від вібрації та галапування проводів ЛЕП.



Полімерну ізоляцію не бажано використовувати в зонах підвищеної вологості та при зближенні з магістральними автошляхами, які сезонно обробляються хімічними реагентами, що може призвести до прискореного старіння полімерної ізоляції при попаданні реагентів на ізоляцію, в якій не виключені хімічні пошкодження та розмноження грибка на поверхні.

Композитні ізолятори з модульними тарілками не можуть обмиватися водою під високим тиском, і тому не повинні використовуватися в забруднених районах.

Традиційні скляні або порцелянові гірлянди ізоляторів в порівнянні з полімерними звичайно істотно важчі. З однієї сторони це недолік, але з іншої надлишкова вага надає класичним гірляндам ізоляторів більшої стійкості ліній електропе-

редавання в зонах з підвищеною вітровою активністю, що не можна сказати про ЛЕП з композитною ізоляцією.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Гайворонский А. С.* Опыт эксплуатации и диагностика подвесных полимерных изоляторов // Энергетик. – 2010. – № 10. – С. 37–39.

2. *Полимерные изоляторы. Опыт и перспективы* [Электронный ресурс]. Режим доступа: www.korsil.ru/content/files/catalog1/raber1.pdf.

3. *Jeff Burnham.* Guideline for visual identification of damaged polymer insulators [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.ieee.org/searchresults/index.html?cx=0065-39740418318249752%3Af2h38l7gvis&cof=FORID%3A11&q=&ie=UTF-8&oe=UTF-8&q=polymer+insulators>.

4. *Шидловський А.К.* Высоковольтные полимерные изоляторы/А.К.Шидловський, Ю.Н.Шумилов, А.А.Щерба, В.М.Золотарев.–К.: Издательская группа "Сучасність", 2008. – 253 с.

© Кирик В.В., 2018

