

УДК 621.315.62.027.3.004.1

В. С. Собчук, к.т.н., проф.; Н. В. Собчук, к.т.н., ст. викл.;
О. В. Слободянюк, ас.

ПОРУШЕННЯ КОНСТРУКТИВНОЇ КООРДИНАЦІЇ ІЗОЛЯЦІЇ І КУМУЛЯТИВНИЙ ЕФЕКТ ВІД СЕРІЇ ГРОЗОВИХ ІМПУЛЬСІВ

В статті розглянуто та досліджено процес електричного пробую епоксидних вводів. Представлено математичну модель процесу їх пошкодження. Виявлено, що канали електричного пробую в епоксидних вводах ВВБ 750 кВ є наслідком порушення конструктивної координації ізоляції і кумулятивного ефекту від серії грозових імпульсів.

***Ключові слова:** епоксидний ввід, електричний пробой, блукаюча хвиля, імпульсна напруга, поздовжня ізоляція, грозозахисні розрядники.*

Статистичні матеріали пошкоджуваності елементів конструкції вимикачів 750 кВ, надані службою ремонтів Південно-Західних електричних мереж (ПЗЕМ), свідчать, що епоксидні вводи дугогасильних камер пошкоджуються електричним наскрізним пробоем з утворенням характерних дефектів, які ілюструє фото. Найчастіше такі пошкодження виникають у фазах А або С, які пов'язані з крайніми фазами проводів повітряної лінії електропередач (ПЛЕП) 750 кВ.

Відомо, що з більшою ймовірністю грозові розряди вражають крайні фази ПЛЕП при їх горизонтальному розташуванні. Це відбувається як внаслідок проривів блискавки поза тросовим захистом, так і за рахунок електромагнітного зв'язку троса і проводу в динамічному режимі, коли на тросі виникає інтенсивна імпульсна корона.

Вищевикладене дає підстави стверджувати, що ініціатором пробоев епоксидних вводів у вимикачах є електромагнітні блукаючі хвилі від місця прямого удару блискавки в ПЛЕП у напрямку підстанції. Під час просування блукаючих хвиль до підстанції (ПС) їх амплітуда обмежується імпульсним рівнем ізоляції лінії, і оскільки вони деформуються і затухають за рахунок поздовжніх і поперечних параметрів ПЛЕП, тому не повинні створювати небезпеку як для головної, так і для поздовжньої ізоляції обмоток трансформаторів і реакторів. В дійсності спостерігається протилежне.

Відомо [1], що по - первинному каналу блискавки в місці прямий удар блискавки (ПУБ) без лідерної стадії може відбуватись до 10 – 15 і більше повторних головних розрядів, тому блукаючі хвилі набігають на ПС пачками імпульсів.

Це створює передумови для кумулятивного ефекту при формування електричного пробую ізоляторів.

На вимикач з ПЛЕП від природного джерела-блискавки приходять небезпечні імпульсні напруги у вигляді аперіодичних імпульсів мікросекундного діапазону.

По відношенню до цих імпульсів вимикач за певних умов безструмової паузи в циклі автоматичного повторного включення (АПВ) є загострювачем, який перетворює грозові імпульси напруги в небезпечні як для власної ізоляції, так і для поздовжньої ізоляції обмоток трансформаторів і шунтових реакторів. До цього висновку приводить аналіз його роботи за допомогою заступних електричних схем і математичних моделей.

Принципова електрична схема вимикача 750 кВ представлена на рис. 1, з неї видно, що фаза вимикача має 16 одиничних розривів, кожний із яких зашунтований двома паралельно з'єднаними конденсаторами і має ливарні епоксидні вводи.

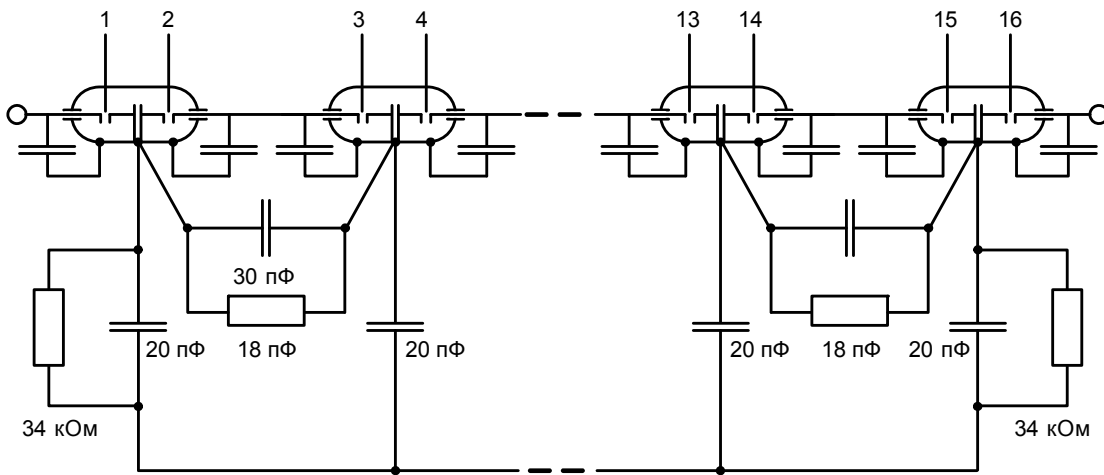


Рис. 1. Принципова електрична схема вимикача 750 кВ

Заступна схема вимикача для набігаючих імпульсних напруг грозового походження наведена на рис. 2.

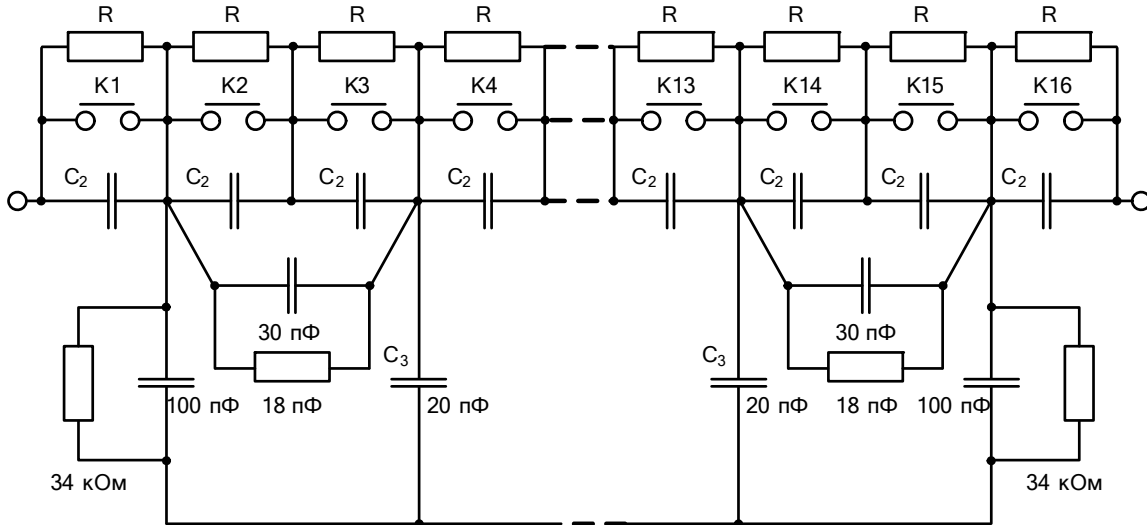


Рис. 2. Заступна схема вимикача для набігаючих імпульсних напруг грозового походження:

C_2 – ємності між електродами (поздовжні);
 C_3 – ємності електродів відносно бака (землі) – поперечні; R – опір витoku ізолюючої конструкції; ρ – хвильовий опір лінії

Пробій проміжків імітується замиканням ключів K . Опори R зазвичай такі великі, що практично не впливають на імпульсний процес у схемі.

Припустимо, що $2\rho \cdot C_e \ll t_{zan.min}$, де $t_{zan.min}$ – мінімальний час запізнення пробую; C_e – еквівалентна ємність вимикача по відношенню до шинного і лінійного полюсів; ρ – хвильовий опір ліній L_1 і L_2 . Тривалість фронту стандартного імпульсу грозового походження звичайно більше $t_{zan.min}$, тому аналіз перехідного процесу в схемі рис. 2 можна виконувати без урахування впливу хвильового опору ліній, вважаючи, що після пробую кожного ключа на решті непробитих проміжків встигає установитись напруга у відповідності із співвідношенням поздовжніх C_2 і поперечних C_3 питомих ємностей.

У цьому випадку розрахункову заступну схему можна представити у вигляді багатокоміркової схеми з “ m ” елементів (політрон). Імпульсна напруга по електродам Наукові праці ВНТУ, 2008, № 1

вимикача після пробою k проміжків розподіляється так:

$$U_{k+1} = 2U_0 \frac{ch(m-k)\gamma}{ch(m-j)\gamma}, \quad (1)$$

де $\gamma = \ln \left[1 + \frac{C_3}{2C_2} \left(1 + \sqrt{\frac{4C_2}{C_3} + 1} \right) \right]$; k – порядковий номер ключа.

У разі, якщо $C_3/C_2 < 2$, то величину γ можна визначити із простішої формули:

$$\gamma = \ln \sqrt{\frac{C_3}{C_2}}.$$

Миттєву різницю потенціалів можна визначити на будь-якому ключі K за формулою (1).

Наприклад, для $j = 0$, тобто перед пробоем першого проміжку, на ньому буде така миттєва різниця потенціалів:

$$\Delta U_1 = U_1 - U_2 = 2U_0 \left[1 - \frac{ch(m-1)\gamma}{ch(m\gamma)} \right], \quad (2)$$

якщо $j \gg 1$, а $m > 3$, то

$$\Delta U_1 = 2U_0 [1 - \exp(-\gamma)].$$

Отже, при $\gamma = 1$ на першому проміжку перед пробоем буде $0,63 \cdot 2U_0$, тобто K_1 буде пробиватись з великою кратністю перенапруги.

Перепад напруги на k -у ключі після пробою j проміжків буде:

$$\Delta U_k = U_k - U_{k+1} = 4U_0 ch \frac{\gamma}{2} \frac{ch\left(m-k+\frac{1}{2}\right)\gamma}{ch(m-j)\gamma}. \quad (3)$$

Для нашого об'єкта – повітряного вимикача 750 кВ – маємо початкові умови:

$m = 16$; $j = 3$; $m - j = 13$; $\gamma = 10$, тому напруга на проміжку $k+1=4$ практично не залежить від γ і дорівнює:

$$\Delta U_4 = 2U_0 [1 - \exp(-10)] \approx 2U_0, \quad (4)$$

де $U_0 \leq 1500$ кВ – напруга спрацювання розрядника РВМК-750, тому $\Delta U_4 \leq 3000$ кВ, а швидкість наростання напруги на фронті зростає до 10 МВ/мкс. При такій крутості фронту імпульсної напруги створюються умови для порушення конструктивної координації будь-якого ізолятора по шляху просування імпульсу і, насамперед, епоксидного вводу самого вимикача, що призводить до наскрізного електричного пробою по радіальному напрямку.

У наших попередніх експериментальних дослідженнях [3] було встановлено, що наскрізні електричні пробої ізоляторів імпульсами напруги з крутими фронтами виникали після декількох прикладань. Подача на ізолятор першого імпульсу напруги з крутизною фронту більше 1 МВ/мкс призводить до іскрового перекриття по поверхні через 0,1 мкс. На осцилограмі в цей момент спостерігається зріз напруги. Одночасно в цей момент прикладається напруга і до ізоляційного тіла, але висока напруженість електричного поля (НЕП) тут триває наносекунди. За цей час може виникнути тільки локальний частковий пробій вглиб твердої ізоляції на глибину приблизно $3 \cdot 10^{-5}$ м. Подальший розвиток розряду в глибину припиняється внаслідок зрізу напруги перекриттям і різким зниженням НЕП в тілі. Фактична товщина ізоляційного тіла в цьому місці зменшується на цю глибину. Проте поява мікротріщини, заповненої повітрям, суттєво спотворює картину електричного поля, внаслідок чого НЕП у кінці тріщини в десятки разів збільшується від наступного імпульсу

напруги, який по принципу естафетної палички просуває канал далі. Третій – четвертий імпульс, як правило завершує наскрізний електричний пробій. По мірі просування каналів часткових пробоїв у глибину ізоляційного тіла координуючий коефіцієнт від $1,6 \div 1,8$ зменшується до $1,0$. Такий ізолятор уже є дефектним, а ця багатоступенева модель порушення координації, що враховує кумулятивний ефект часткових послідовних пробоїв, повністю відповідає експериментальним даним [4].

Використаний в [4] осцилографічний метод дослідження процесу пробоїв ізоляторів у принципі не чутливий до зародження і розвитку часткових пробоїв, тому що перекриття нормального ізолятора екранує виявлення цих процесів на осцилограмі.

Подавання передостаннього (відносно кінцевого ефекту) імпульсу завершує формування каналу наскрізного пробою до стадії рівних ймовірностей пробою і перекриття, тому наступний імпульс діє на дефектний ізолятор.

Імпульсна напруга з крутим фронтом призводить до чисто електричного механізму пробою ізоляторів.

Основні геометричні розміри капілярів пробитих ізоляторів – радіус і довжина. Довжина капіляра визначається типом ізолятора і для епоксидних вводів вимикачів становить $40 - 45$ мм.

Радіус капіляра не залежить від типу ізолятора і змінюється у вузькому діапазоні величин $0,2 \div 0,3$ мм. Геометричні розміри кратерів відкольних воронок не залежать від типу ізолятора і визначаються характеристиками діелектрика. Розміри відкольних воронок, які виникають з обох боків каналу пробою, вимірювались за допомогою оптичного приладу МПБ-2, із збільшенням 24^* і ціною ділення $0,05$ мм. Воронки мають конусну форму з більшим радіусом $1,5 \div 5$ мм, а меншим, як у капіляра, тобто $0,2 \div 0,3$ мм.

На рис. 5 дано схематичне зображення інтегральної картини дефектів в ізоляторі після його імпульсного пробою. Ділянки епоксидного компаунда, які безпосередньо примикають до каналу пробою, руйнувались до дрібнодисперсної структури, утворюючи зону роздавлювання. Тут і в подальшому при описуванні наслідків пробою і руйнування ізоляторів вживаються терміни, які використовуються в теорії руйнування твердих речовин за допомогою вибухівки. Це не випадково, тому що математичні моделі, які описують руйнування твердих речовин вибухом вибухівки, розміщеної в шпурі, аналогічні моделям руйнування ізоляторів після електричного пробою імпульсами.

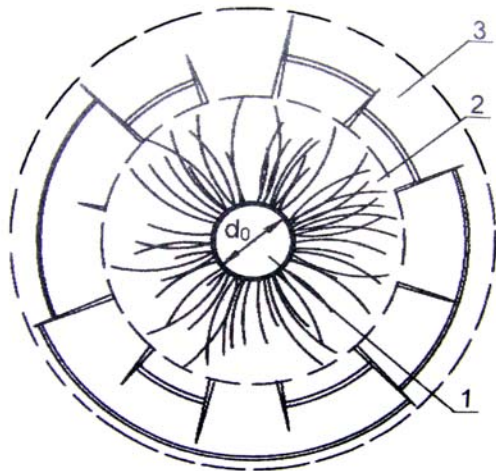


Рис. 5. Схематичне зображення інтегральної картини дефектів в ізоляції після його імпульсного пробою:
1 – канал пробою, 2 – зона роздавлювання, 3 – зона радіальних і кільцевих тріщин

Від периферійних областей зони роздавлювання в напрямку зовнішньої поверхні ізолятора утворюється мережа радіальних і кільцевих (тангенційних) тріщин. Вони утворюють загалом зону розтріскування. Після первинного пробою ізолятора ці тріщини не

розкриті, тому візуально спостерігаються, як волосяні [4]. Вхідна і вихідна відкольні воронки з'являються після того, як азимутна ударна хвиля, дійшовши до поверхні ізолятора, відбивається від неї (як границі розділення двох середовищ), внаслідок чого виникають розтягуючі механічні напруги, які руйнують гирло каналу електричного пробою характерним чином. Подальші експериментальні дослідження дозволили з'ясувати, що розрядний градієнт по капіляру не перевищує 10 ± 1 кВ/см. Це дозволяє прогнозувати залишковий рівень ізоляції дефектного ізолятора. Так епоксидний ввід вимикача має залишковий рівень $U_{\text{проб.залишк.}} = 10 \cdot 4 = 40$ кВ.

Висновки

1. Канали електричного пробою в епоксидних вводах 750 кВ є наслідком порушення конструктивної координації ізоляції і кумулятивного ефекту від серії грозових імпульсів, які приходять по повітряним лініям 750 кВ від місця прямого удару блискавки до вузлової підстанції.
2. Відносно блукаючих хвиль грозового походження вимикачі спрацьовують як загострювачі, що збільшують крутизну імпульсних напруг в декілька разів.
3. Після вимикача загострені імпульси набігають на обмотки автотрансформаторів і реакторів поперечної компенсації і створюють дуже небезпечні градієнти на перших витках і котушках, що може призвести до електричного пробою поздовжньої ізоляції.
4. Грозозахисні розрядники не впливають на крутизну загострених імпульсів, тобто не захищають поздовжню ізоляцію обмоток.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Чалмерс Дж. А. Атмосферное электричество –Л.: Гидрометеоиздат, 1974. – 691с.
2. Месяц Г.А. Исследования по генерированию наносекундных импульсов большой мощности: Автореф. – Томск, 1966.
3. Собчук В.С. Экспериментальное исследование механизма разрушения линейных изоляторов при электрическом пробое // Электрические станции, – 1975. – №2. – с.71-72.
4. Собчук В.С. Импульсный метод профилактических испытаний штыревых изоляторов: Автореф. – Киев, 1983.
5. Собчук В.С., Пашенко В.Н., Собчук Н.В. Вимикач ВВБ-750 кВ як загострювач імпульсних напруг. – Вісник Національного університету “Львівська політехніка”.– 2000. – №400. – с.134–139.

Собчук Валерій Степанович – професор кафедри електричних станцій та систем;

Собчук Наталія Валеріївна – ст. викладач кафедри електричних станцій та систем;

Слободянюк Олена Валеріївна – асистент кафедри інженерної та комп'ютерної графіки.
Вінницький національний технічний університет.