

УДК 621.315.62.027.3.004.1

В. С. Собчук, к. т. н., проф.;

Н. В. Собчук, к. т. н.;

Ю. В. Кондаков

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ПОШКОДЖЕННЯ (ЕЛЕКТРИЧНОГО ПРОБОЮ) ЕПОКСИДНИХ ВВОДІВ ВИМИКАЧІВ ЛЕП 750 КВ

Розглянуто та досліджено процес електричного пробою епоксидних ввідів, розроблено математичну модель процесу їх пошкодження. Виявлено, що канали електричного пробою в епоксидних вводах ВВБ 750 кВ є наслідком порушення конструктивної координації ізоляції і кумулятивного ефекту через серії грозових імпульсів від блукаючих хвиль.

Вступ

На вузловій підстанції «Вінницька 750/330 кВ», схема електричних з'єднань нормального режиму якої показана на рис. 1, вимикачем 1В типу ВВБ-750-40/3200 виконуються комутації Західно-Української ЛЕП 750 кВ в різних режимах роботи.

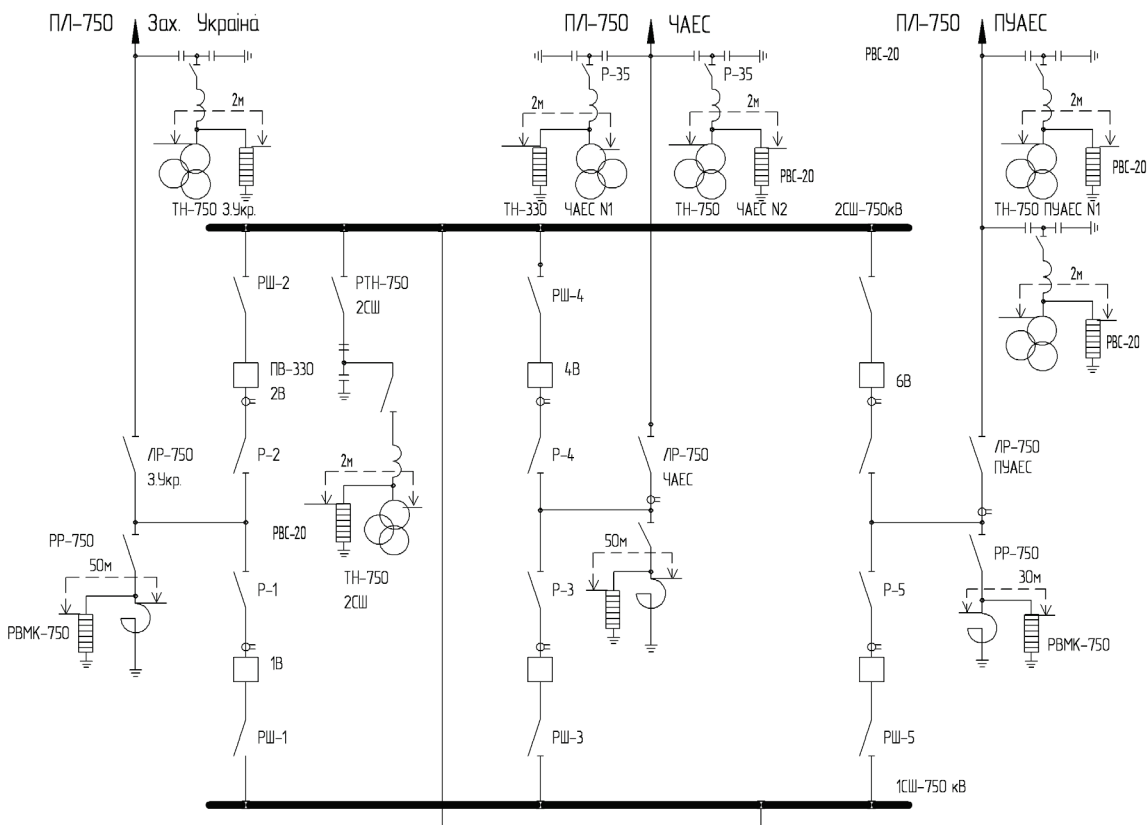


Рис. 1. Схема електричних з'єднань нормального режиму вузлової підстанції «Вінницька 750/330 кВ»

Велика частина комутацій пов'язана з ураженням ПЛЕП 750 кВ блискавкою під час грозового сезону, тобто з квітня по жовтень. Під час виконання 1В операцій «Вмикання» для введення ЛЕП 750 кВ в роботу черговим персоналом підстанції було виявлено витік повітря з показчика продувки системи вентиляції верхньої дугогасильної камери четвертого елемента фази А, що є ознакою заповнення порожнини між фарфоровою покривкою і епоксидним вводом повітрям з вим тиском.

Після розбирання модуля було з'ясовано, що епоксидний ввід має отвір від електричного пробую в районі торця виміральної обкладки з боку бака вимикача (рис. 2).

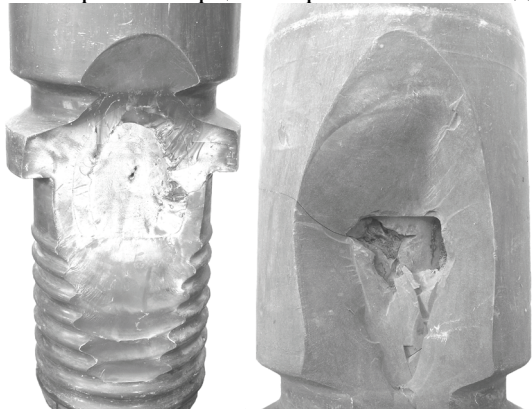


Рис. 2. Фото пошкоджених епоксидних ввідів

Аналогічні пошкодження епоксидних ввідів вимикачів 750 кВ, мали місце в південно-західних електричних мережах (ПЗЕМ) в багатьох інших випадках. Всі вони були раптовими і відбувались в грозовий сезон.

Статистичні матеріали пошкоджуваності елементів конструкції вимикачів 750 кВ, представлені службою ремонту ПЗЕМ свідчать, що епоксидні вводи дугогасильних камер пошкоджуються електричним наскрізним пробоем з утворенням характерних дефектів, проілюстрованих на фото. Найчастіше такі пошкодження виникають в фазах А або С, які пов'язані з крайніми фазами дротів 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 пробів епоксидних ввідів у вимикачах є електромагнітні блукаючі хвилі від місця прямого удару блискавки в ПЛЕП в напрямку підстанції. Під час просування блукаючих хвиль до ПС їх амплітуда обмежується імпульсним рівнем ізоляції лінії, і вони деформуються і затухають за рахунок поздовжніх і поперечних параметрів ПЛ, тому не повинні створювати небезпеку як для головної, так і для поздовжньої ізоляції обмоток трансформаторів і реакторів. В дійсності спостерігається протилежне.

Порушення конструктивної координації ізоляції і кумулятивний ефект від серії грозових імпульсів

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

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

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

По відношенню до цих імпульсів вимикач за певних умов безструмової паузи в циклі 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.

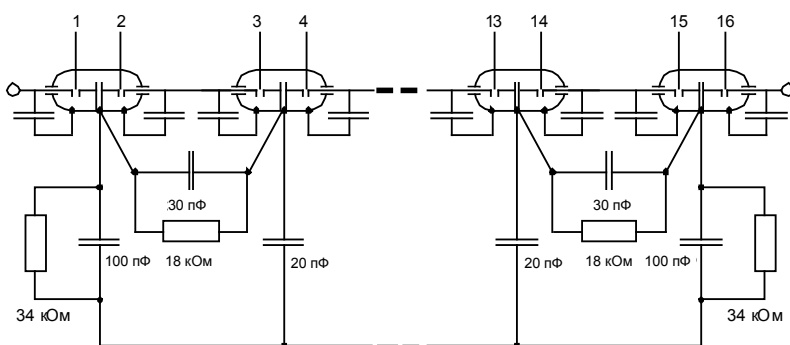


Рис. 3. Принципова електрична схема вимикача ВВБ-750 кВ

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

Принципова електрична схема вимикача ВВБ-750 кВ показана на рис. 3, з якої видно, що фаза вимикача має 16 одиничних розривів, кожний із яких зашунтований двома паралельно з'єднаними конденсаторами і має ливарні епоксидні вводи.

Заступна схема вимикача для набігаючих імпульсних напруг грозового походження показана на рис. 4.

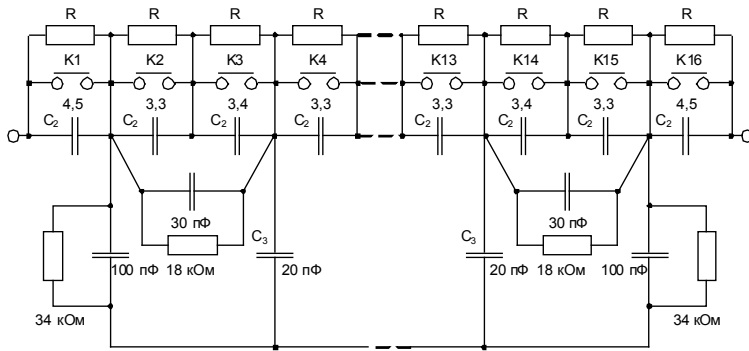


Рис. 4. Заступна схема вимикача для набігаючих імпульсних напруг грозового походження:

C_2 — ємності між електродами (поздовжні); C_3 — ємності електродів відносно бака (землі) — поперечні; R — опір витoku ізолюючої конструкції

Нехай $2\rho C_e \ll t_{\text{зап. min}}$, де $t_{\text{зап. min}}$ — 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 більша $t_{\text{зап. min}}$, тому аналіз перехідного процесу в схемі рис. 4 можна виконувати без урахування впливу хвильового опору ліній, вважаючи, що після пробую кожного ключа, на решті непробитих встигає встановитись напруга у відповідності із співвідношенням поздовжніх C_2 і

поперечних C_3 питомих ємностей.

В цьому випадку розрахункову заступну схему можна представити у вигляді багатокоміркової схеми з m елементів (політрон). Імпульсна напруга на електродах вимикача після пробую k проміжків розподіляється так:

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

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.

В разі, якщо $C_3/C_2 < 2$, то величину γ можна визначити з 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 пробую першого проміжку, на ньому буде така миттєва різниця потенціалів

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

якщо $j \gg 1$, а $m > 3$, то

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

Таким чином, якщо $\gamma = 1$ на першому проміжку перед пробую буде $0,63 \cdot 2U_0$, тобто пробій K_1 буде відбуватися в разі великої кратності перенапруги.

Перепад напруги на k -му ключі після пробую j проміжків буде

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

Для нашого об'єкта — повітряного вимикача ВВБ-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

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

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 крутизні фронту імпульсної напруги створюються умови для порушення конструктивної координації будь-якого ізолятора по шляху просування імпульсу і, перш за все, епоксидного вводу самого вимикача, що призводить до наскрізного електричного пробою в радіальному напрямку.

В попередніх експериментальних дослідженнях одного з авторів [3] було встановлено, що наскрізні електричні пробої ізоляторів виникали після декількох прикладань імпульсів напруги з крутими фронтами. 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 до цього моменту 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 вищевказану глибину. Проте виникнення мікротріщини, яка заповнена повітрям, суттєво спотворює картину електричного поля, внаслідок чого НЕП в кінці тріщини в десятки разів збільшується від наступного імпульсу напруги, який за принципом естафетної палички просуває канал далі. Третій-четвертий імпульс, як правило, завершує наскрізний електричний пробій. В міру просування каналів часткових пробоев в глибину ізоляційного тіла, координуючий коефіцієнт від 1,6...1,8 зменшується до 1,0. Такий ізолятор уже є дефектним, а ця багатоступенева модель порушення координації, яка враховує кумулятивний ефект часткових послідовних пробоев повністю відповідає експериментальним даним [4].

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

Подача 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 введів вимикачів становить 40...45 мм.

Радіус капіляра не залежить від типу ізолятора і змінюється у вузькому діапазоні величин 0,2...0,3 мм. Геометричні розміри кратерів відкольних вирв не залежать від типу ізолятора і визначаються характеристиками діелектрика. Розміри відкольних вирв, які виникають з обох боків каналу пробою, вимірювались за допомогою оптичного приладу МПБ-2, з 24-кратним збільшенням і ціною поділки 0,05 мм. Вирви мають конусну форму з більшим радіусом 1,5...5 мм, і меншим — як у капіляра, тобто 0,2...0,3 мм.

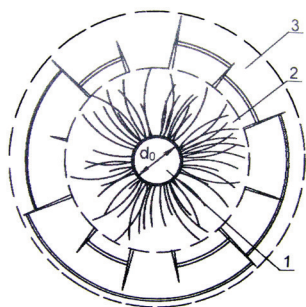


Рис. 5. Схематичне зображення інтегральної картини дефектів в ізоляції після її імпульсного пробою: 1 — канал пробою; 2 — зона роздавлювання; 3 — зона радіальних і кільцевих тріщин

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

Від периферійних областей зони роздавлювання в напрямку зовнішньої поверхні ізолятора утворюється мережа радіальних і кільцевих (тангенціальних) тріщин. Вони утворюють загалом зону розтріскування. Після первинного пробою ізолятора ці тріщини не розкриті, тому візуально спостерігаються волосяними [4]. Вхідна і вихідна відкольні вирви з'являються після того, як азимутна ударна хвиля, дійшовши до поверхні ізолятора, відбивається від неї (як границі розділення двох середовищ), внаслідок чого виникають механічні напруги розтягу, 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 пробую в епоксидних вводах ВВБ 750 кВ є наслідком порушення конструктивної координації ізоляції і кумулятивного ефекту через серії грозових імпульсів від блукаючих хвиль, які надходять повітряними лініями 750 кВ від місця прямого удару блискавки до вузлової підстанції.

2. Відносно блукаючих хвиль грозового походження вимикачі спрацьовують як загострювачі, які збільшують крутизну імпульсних напруг в декілька разів.

3. Після вимикача загострені імпульси набігають на обмотки АТ і реакторів поперечної компенсації і створюють дуже небезпечні градієнти на перших витках і котушках, що може привести до електричного пробую 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 — Гидрометеоздат, 1974.
2. Месяц Г. А. Исследования по генерированию наносекундных импульсов большой мощности. Дис. ... докт. техн. наук. — Томск, 1966. — 170 с.
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. дис. ... канд. техн. наук. — 1983. — 16 с.
5. Собчук В. С., Пащенко В. Н., Собчук Н. В. Вимикач ВВБ-750 кВ як загострювач імпульсних напруг. — Кременчук, 2000.

Рекомендована кафедрою електричних станцій і систем

Надійшла до редакції 15.02.07
Рекомендована до друку 23.03.07

Собчук Валерій Степанович — професор, **Собчук Наталія Валеріївна** — старший викладач, **Кондаков Юрій Валерійович** — асистент.

Кафедра електричних станцій та систем, Вінницький національний технічний університет