

Виконані експериментальні дослідження вольт-амперних характеристик обмежувача перенапруг нелінійного. Встановлено, що обмежувач перенапруг нелінійний має два стани: провідниковий та діелектричний. Встановлено вплив вищих гармонійних коливань в електричній мережі на теплові режими обмежувача перенапруг нелінійного. Встановлено, що втрати активної потужності в обмежувачі перенапруг нелінійному залежать від його стану

Ключові слова: обмежувач перенапруг нелінійний, вольт-амперна характеристика, теплові режими, гармонійні коливання

Выполнены экспериментальные исследования вольт-амперных характеристик ограничителя перенапряжений нелинейного. Установлено, что ограничитель перенапряжений нелинейный имеет два состояния: проводящее и диэлектрическое. Установлено влияние высших гармонических колебаний в электрической сети на тепловые режимы ограничителя перенапряжений нелинейного. Установлено, что потери активной мощности в ограничителе перенапряжений нелинейном зависят от его состояния

Ключевые слова: ограничитель перенапряжений нелинейный, вольт-амперная характеристика, тепловые режимы, гармонические колебания

УДК 621.314
DOI: 10.15587/1729-4061.2015.47123

ОСОБЛИВОСТІ ТЕПЛОВИХ РЕЖИМІВ ОБМЕЖУВАЧА ПЕРЕНАПРУГ НЕЛІНІЙНОГО В УМОВАХ НИЗЬКОЇ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

С. Ю. Шевченко

Кандидат технічних наук, доцент, професор
Кафедра "Передача електричної енергії"
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»
вул. Фрунзе, 21, м. Харків, Україна, 61002

1. Вступ

При виборі параметрів захисного апарату для обмеження перенапруг в електричних мережах усіх класів номінальної напруги прийнято виходити з того, що допустимими є режими мережі з коротко строковими перевищеннями найбільшої робочої напруги, що викликаються різноманітними видами перенапруг. При цьому для обмежувачів перенапруг нелінійних (ОПН) в якості найбільшого робочого приймається напруга, близька до лінійної напруги мережі. Захисний апарат при цьому вибирається таким чином, що сумарний струм, що протікає по його варисторній колонці при дії лінійної напруги мережі, не перевищує декількох міліампер. При цьому в тілі варистора в безперервному режимі виділяється потужність, яка призводить до того, що температура ОПН на декілька градусів перевищує температуру навколишнього середовища [1]. Однак такий підхід до вибору ОПН не дає змоги визначити його параметри при виникненні в мережі гармонійних коливань напруги тому, що зовсім іншими стають умови роботи обмежувача перенапруг. При достатньо великому вмісті вищих гармонік та часу їх дії в електричній мережі потужність, що виділяється в варисторах ОПН, може суттєво зрости. Величина потужності, що розсіює ОПН в такому випадку може перевищити нормовану виробником для варисторів, що призведе до порушення теплового балансу ОПН та виходу його з ладу.

Фізично процес нагріву ОПН можна представити таким, що складається з трьох стадій: початкової, коли

варистор ОПН нагрівається в адиабатичному режимі і істотного відтоку тепла в навколишнє середовище не відбувається; перехідною, при якій стають помітними процеси теплопередачі в ізоляційній стінці корпусу ОПН та конвективного тепловідводу з поверхні ізоляційної покритишки. Конвективний тепловідвід на протязі всього часу експлуатації ОПН зумовлює його сталий тепловий режим. Усталена температура апарату визначається співвідношенням ефективності тепловідведення від варистора в навколишнє середовище та активної потужності, що виділяється в варисторі. Тому істотними чинниками, що визначають працездатність ОПН в умовах низької якості напруги електричної мережі, будуть як теплофізичні та конструктивні особливості захисного апарату, так і склад та амплітуди вищих гармонік напруги. Слід зазначити, що стандартний тест, що визначає здатність обмежувача до розсіювання енергії, що складається з 20 імпульсів прямокутної хвилі струму амплітудою 300–500 А [1], не відповідає фізичним умовам нагріву ОПН за низької якості електричної енергії мережі. Згідно з нормами випробувань максимальна серія складається з трьох імпульсів струму, прикладених з інтервалом 60 с, після чого відбувається охолодження апарату до температури навколишнього середовища. Тому аналіз теплового режиму в умовах низької якості електричної енергії в мережі являє собою важливу проблему, оскільки тривалий вплив гармонійних складових може призвести до нагрівання конструкції ОПН до неприпустимо високих температур і виходу апарату з ладу.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Усі дослідники теплових режимів ОПН основну увагу приділяють його роботі під час обмеження перенапруг, що відповідає зоні ВАХ з досить великими струмами. В роботах [1–3] аналіз теплового режиму зводиться до оцінювання спроможності ОПН витримувати імпульсні впливи атмосферних та комутаційних перенапруг, що безумовно є важливою характеристикою ОПН, однак ніяк не характеризує роботу ОПН при дії на нього робочої напруги низької якості. Автори [4] зазначають, що для використання ОПН в мережах з низькою якістю електричної енергії необхідно звертатися до виробників, які можуть дати рекомендації по вибору типу та характеристик ОПН. Робота [5, 6] присвячена дослідженню спрощеної моделі ОПН, яка дозволяє виконувати розрахунки режимів їх роботи. Однак наведена модель не може бути використана для розрахунків режимів роботи ОПН при низькій якості електричної енергії тому, що вона не враховує електрофізичні характеристики апарату. Усі виробники ОПН у своїх каталогах та технічних документах зазначають неможливість використання їх у мережах з підвищеним рівнем гармонійних коливань, без будь яких пояснень [2–4]. Аналіз теплових режимів роботи ОПН проводиться при впливі достатньо великих напруг (в декілька разів вище ніж найбільша припустима робоча напруга) [1–7]. При напругах, що мало відрізняються від номінальної аналіз теплових процесів у ОПН не виконується.

На сьогодні усі нормативні документи з вибору ОПН рекомендують оцінювати їх енергетичні характеристики при впливах досить великих перенапруг та не враховують впливи вищих гармонійних коливань напруги. Подібні впливи можуть мати досить великі значення та призводити до порушення теплового балансу ОПН в нормальних режимах роботи

Аналізу роботи ОПН в зоні струмів витоку вольт-амперних характеристик (ВАХ) дослідники приділяють дуже мало уваги та публікації на цю тему практично відсутні. В той же час подібний аналіз є необхідним для визначення спроможності ОПН залишатися під впливом найбільшої робочої напруги електричної мережі без порушення теплового балансу. Однак в роботах [8, 9] показано, що якість електричної енергії може суттєво вплинути на теплові режими роботи ОПН. Це викликано тим, що за наявності в мережі вищих гармонік напруги втрати активної енергії в ОПН можуть стати значними та перевищити допустимі значення.

Вивчення літературних джерел показує необхідність дослідження теплових режимів роботи ОПН при низькій якості електричної енергії в мережі. Необхідно розробити методи та математичні моделі для оцінювання теплових режимів роботи ОПН в зоні струмів витоку ВАХ. Для цього мають бути виконані експериментальні дослідження ВАХ ОПН та його електрофізичні властивості для різних частот напруги, що дозволить розробити подібні моделі.

3. Ціль та задачі дослідження

Проведені дослідження ставили за мету визначення методу розрахунку теплового режиму обмежувача

перенапруг нелінійного в зоні струмів витоку ВАХ на базі експериментально отриманих ВАХ ОПН.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні завдання:

- отримати математичний вираз для розрахунку теплових режимів ОПН;
- виконати експериментальні дослідження ВАХ ОПН в зоні струмів витоку;
- на базі отриманих ВАХ ОПН вдосконалити математичний вираз для розрахунку теплових режимів;
- визначити чи існує вплив гармонійних коливань напруги в мережі на теплові режими ОПН.

4. Матеріали та методи дослідження теплових режимів та впливу на них вищих гармонік напруги на теплові режими обмежувачів перенапруг нелінійних

4.1. Методика визначення теплових режимів обмежувачів перенапруг нелінійних

Для аналізу теплових процесів, що відбуваються в ОПН в умовах наявності в електричній мережі вищих гармонійних складових напруги, необхідна математична модель, добре сумісна з моделями, які застосовуються для аналізу якості електричної енергії мережі та розрахунків перехідних та сталих її режимів, які засновані на чисельному рішенні систем звичайних диференціальних рівнянь. При цьому розрахункова теплова модель має давати змогу оцінити як перехідний процес теплопередачі, так і усталений режим роботи ОПН, що надасть можливість оцінювати як час нагріву до критичних температур, так і сталу температуру ОПН у випадку тривалого впливу гармонійних коливань.

4.2. Досліджувані матеріали та обладнання, що використовувались в експерименті

Для експериментальних досліджень ВАХ використовувалися варистори двох провідників виробників варисторів АВВ та EPCOS. Всі варистори, які досліджувалися, мали відповідне маркування, унікальне для кожного з них, не марковані варистори не досліджувалися. Маркування, нанесене на торці варистора за допомогою лазерного друку, що є запорукою того, що варистор вироблено фабричним способом та він не є підробкою. Зазвичай маркування містить відомості про виробника, величину кваліфікаційного струму (різний для різних виробників) та напруги, залишкової напруги при дії імпульсу струму 5, 10 або 20 кА, максимальної активної потужності, яку варистор може розсіювати на протязі всього строку експлуатації без втрати теплового балансу та заводський номер.

Для проведення випробувань варисторів та ОПН у зібраному стані була розроблена та створена лабораторна випробувальна установка “Test Surge Arrester up to 25 kV” (TSA-25).

5. Результати досліджень теплових режимів та впливу на них вищих гармонік напруги на теплові режими ОПН

Найважливішою характеристикою варистора, що дозволяє визначити залежність прикладеної напруги

від струму а також потужності об'ємного тепловиділення, є його вольт-амперна характеристика. Її особливістю є наявність ділянки малих струмів (зона струмів витоку ВАХ, умовно від нуля до декількох міліампер), в якому знаходиться робоча точка варистора і ділянка великих струмів до тисяч ампер (зона робочих струмів ВАХ). Зона робочих струмів ВАХ визначає захисні властивості ОПН і, зокрема, залишкову напругу, тобто максимальну напругу, що впливає на електрообладнання при шунтуванні його варисторної колонкою ОПН.

У випадку визначення впливу гармонійних коливань напруги в мережі на тепловий баланс ОПН, необхідно знати параметри ВАХ в зоні струмів витоку. Для визначення ВАХ ОПН були виконані їх експериментальні дослідження.

Для проведення випробувань варисторів та ОПН у зібраному стані та окремих варисторів була розроблена та створена лабораторна випробувальна установка "Test Surge Arrester up to 25 kV" (TSA-25). Ця установка призначена для проведення високовольтних випробувань, напругою промислової частоти 50 Гц, обмежувачів перенапруг нелінійних (ОПН) типу ОПН-КР, ОПН-РТ і ін. Любого ОПН з Унд не більш 20 кВ, відповідно до вимог міжнародного стандарту МЕК 99-4 і ГОСТ 16357-83. Установка відноситься до категорії устаткування спеціального застосування і виготовлена в одиничному екземплярі. Зовнішній вигляд наведено на рис. 1.

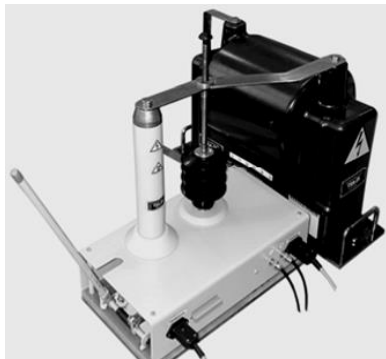


Рис. 1. Зовнішній вигляд установки TSA-25

Експериментальні дослідження ВАХ варисторів в зоні струмів витоку проведені для більш ніж 1000 варисторів різних типів, які використовуються виробниками ОПН на класи напруги 6–10 кВ. Конструкція ОПН на ці класи напруги може включати в себе декілька варисторів тому ВАХ вимірювалися для пар варисторів, що використовуються при виробництві. Характерний вигляд ВАХ наведено на рис. 2. Всі графіки зображені в координатах «струм – відношення напруг». В якості відношення напруг використано відношення напруги, діючої на варистор до найбільшої робочої напруги.

Аналіз отриманих експериментально ВАХ варисторів та літературних джерел [1–6] дозволив зробити важливий висновок, що діелектричні властивості варисторної кераміки впливають на величину втрат активної потужності у ОПН тільки коли активна складова струму витоку дуже мала. Це підтверджують вольт-фарадні характеристики варисторів різних класів напруги. Характерні вольт-фарадні характеристики варисторів наведено на рис 3.

Значення напруги у маркуванні варисторів дорівнює найбільшій припустимій робочій напрузі даного типу варистора. Як видно з рис. 3, ємність варисторів залишається не змінною практично у всьому діапазоні робочих напруг. Однак при наближенні значень напруги до найбільших припустимих значень ємність варисторів дуже швидко зменшується до нульових значень. Такий вигляд вольт-фарадних характеристик варисторів обумовлений тим, що в структурі варисторної кераміки при підвищенні напруги з'являються кола, які проводять електричний струм. Таким чином, варистор перетворюється на провідник і втрачає активної потужності в ньому визначаються внутрішнім опором та діючою напругою. Подібна властивість варисторів та ОПН в цілому обумовлює необхідність урахування як діелектричних, так і провідникових властивостей варисторної кераміки при аналізі роботи ОПН в зоні струмів витоку ВАХ. Наведені результати демонструють необхідність уточнення математичної моделі та методу для визначення енергії, що розсіює ОПН в зоні струмів витоку ВАХ з їх урахуванням.

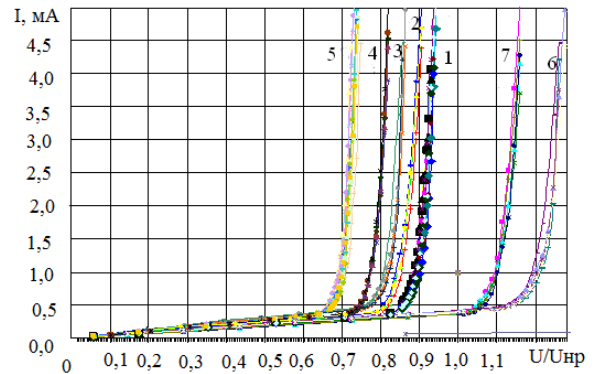


Рис. 2. Експериментальні ВАХ варисторів та пар варисторів різних виробників. 1 – пари варисторів виробництва АВВ 6 кВ; 2 – пари варисторів 5 кВ виробництва АВВ; 3 – варистори 6 кВ виробництва АВВ; 4 – пари варистори 5 кВ виробництва АВВ; 5 – пари варисторів 5 кВ виробництва АВВ; 6 – варистори 6 кВ виробництва EPCOS; 7 – пари варисторів 3 та 5 кВ виробництва EPCOS

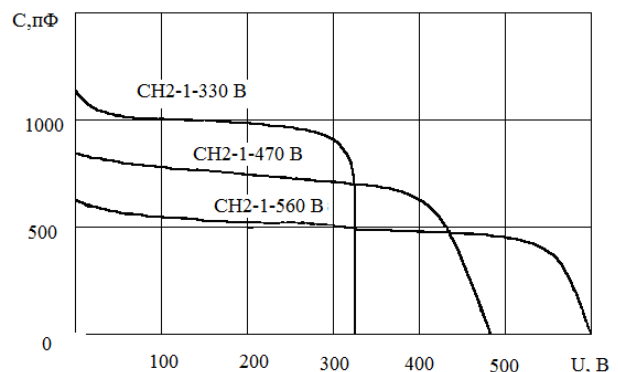


Рис. 3. Приклади вольт-фарадних характеристик варисторів різних класів напруги

Для подібного удосконалення вказаної математичної моделі необхідно визначити величину напругу при дії, якої варистор перетворюється на провідник. Детальне вивчення ВАХ варисторів в зоні струмів ви-

току дозволило отримати значення такої напруги у відносних одиницях. Для визначення такого значення напруги наведемо характерні ВАХ отримані у результаті експерименту. З рис. 4 добре видно, що до значення відношення діючої напруги до найбільшої робочої мережі, що дорівнює 0,65. ВАХ усіх досліджених варисторів практично ідентичні, а після цього значення вони починають суттєво розрізнятися. Такий вигляд ВАХ спостерігався для всіх видів досліджених варисторів різних типів, розмірів та виробників. Розбіжності ВАХ мають місце тому, що структура варисторної кераміки в кожному конкретному варисторі має індивідуальний вигляд. У одних варисторів кількість кіл, що проводять активний струм, може бути більшою або меншою, тому величина струму в зоні струмів витoku ВАХ ОПН може набагато відрізнятись та має унікальний вигляд для кожного окремо взятого варистора.

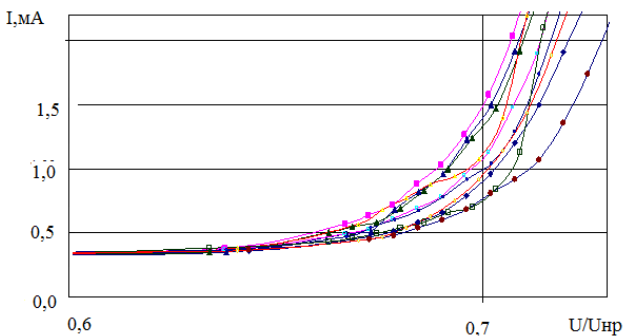


Рис. 4. Характерні ВАХ пар варисторів 5 кВ виробництва АВВ

На базі вище викладеного існує можливість удосконалення математичної моделі та методу для визначення енергії, що розсіює ОПН в зоні струмів витoku ВАХ, з урахуванням того, що при дії напруги, яка становить 65 % від найбільшої робочої напруги мережі, ОПН практично перетворюється у провідник. Тому, математичну модель для визначення енергії, що розсіює ОПН в зоні струмів витoku ВАХ при наявності гармонійних коливань напруги, можна записати наступним чином:

$$\begin{aligned}
 < 0,65 \cdot U_{up} \cdot w(t) = \int_0^1 \sum_0^k tg\delta_k \cdot p_k(t) = \sum_0^k \int_0^1 tg\delta_k \cdot u_k(t) \cdot i_k(t) dt \\
 \geq 0,65 U_{up} w(t) = \int_0^1 \sum_0^k p_k(t) = \sum_0^k \int_0^1 u_k(t) \cdot i_k(t) dt, \quad (1)
 \end{aligned}$$

де k – номер гармонійної складової.

При спільному рішенні рівнянь електричного кола і теплових рівнянь останні можна представити у вигляді систем звичайних диференціальних рівнянь. Для отримання такої форми рівнянь теплопередачі вивчимо розподіл температури в конструкції ОПН. Оскільки енергія, що виділяється в ОПН,

рівномірно розподіляється по об'єму варисторної колонки, а її матеріал має теплопровідність, що на два порядки перевершує теплопровідність оточуючих його ізоляційних шарів, то розподіл температури в межах варисторного блоку близький до рівномірного (рис. 5).

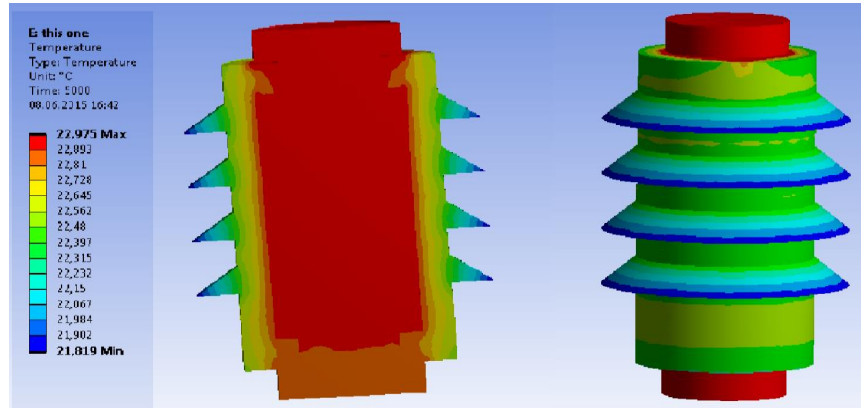


Рис. 5. Розподіл температури у варисторному блоці ОПН

Обмежувач перенапруг являє собою апарат, площа бічної поверхні якого значно перевершує площу торцевих частин. Тому з деякою похибкою можна вважати, що охолодження апарату відбувається внаслідок конвективного тепловідводу з бічної поверхні. Крім того, як видно з рис. 5, температура вже досить близько від контактних металевих фланців ОПН рівномірно розподілена по висоті апарату за винятком невеликих збурень, що викликані наявністю юбок ізоляційної покривки.

Для наближеного опису процесів нагріву і теплопередачі в конструкції обмежувача перенапруг можна використовувати одномірне рівняння віссиметричної теплопровідності справедливе в межах висоти варисторної колонки апарату

$$\rho c \frac{dT}{dt} = \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(\lambda r \frac{dT}{dr} \right), \quad (2)$$

де t – час; r – радіальна координата, відраховується від вісі конструкції; ρ , c і λ – залежні від координати густина, питома теплоємність і теплопровідність матеріалу; T – температура; q(t) – потужність об'ємного тепловиділення.

Для подальшого спрощення рівняння теплопередачі скористаємося тією обставиною, що в межах варисторної колонки радіальний розподіл температури однорідний (рис. 5). Тому графік розподілу температури по радіусу можна представити таким, що складається з двох ділянок: перша – в межах радіусу варистора R₁, де температура характеризується постійним по радіусу значенням T₁, і друга, що описує розподіл температури в ізоляційному шарі r=R₂, температура на зовнішній поверхні якої позначена як T₂ (рис. 6).

Розподіл теплофізичних характеристик (густина, теплоємність і теплопровідність, потужність об'ємного тепловиділення) для даної конструкції є кусочно-постійним:

$$\begin{aligned}
 &\text{при } r \leq R_1, \\
 &\rho = \rho_B, \quad c = c_B, \quad \lambda = \lambda_B, \quad q = u(t)i(t)/V,
 \end{aligned}$$

де ρ_B , c_B і λ_B – густина, питома теплоємність і теплопровідність варисторної кераміки; u(t) – падіння напруги

на варисторах; $i(t)$ – струм скрізь них; V – об’єм варисторної колонки;

$$\begin{aligned} &\text{при } R_1 < r \leq R_2, \\ &\rho = \rho_i, \quad c = c_i, \quad \lambda = \lambda_i, \quad q = 0, \end{aligned}$$

де ρ_i , c_i і λ_i – густина, питома теплоємність і теплопровідність ізоляційного матеріалу ОПН.

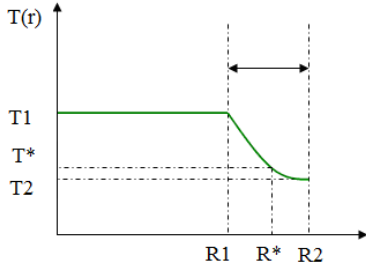


Рис. 6. Розподіл температури по радіусу конструкції ОПН

Таким чином, приймаючи до уваги, що тепловий потік $\lambda \frac{dT}{dr}$ на вісі обертання ($r = 0$) дорівнює нулю, та виконавши ряд математичних перетворень використавши метод кінцевих елементів [9, 10] для апроксимації, отримаємо систему з двох звичайних диференціальних рівнянь у формі Коші

$$\frac{dT}{dt} = AT + BU, \quad (3)$$

$$\text{де } T = \begin{vmatrix} T_1 \\ T^* \end{vmatrix};$$

$$U = \begin{vmatrix} u(t)i(t) \\ T_\alpha \end{vmatrix};$$

$$B = \begin{vmatrix} \frac{1}{mc} & \beta \frac{\chi}{3+\chi} \\ 0 & 0 \end{vmatrix};$$

$$A = \begin{vmatrix} \beta \left(\frac{1}{3+\chi} \right) & 4\beta \left(1 - \frac{1}{3+\chi} \right) \\ D_i \left(\frac{4}{h^2} - \frac{1}{hR^*} \right) - \frac{D_i}{3\chi} \left(\frac{4}{h^2} + \frac{1}{hR^*} \right) & D_i \left(\frac{4}{h^2} + \frac{1}{hR^*} \right) \frac{4}{3\chi} - D_i \frac{8}{h^2} \end{vmatrix},$$

$$\text{де } \chi = \frac{2\pi R_i h_d \lambda^*}{mch}; \quad D_i = \frac{\lambda_i}{\rho_i c_i}.$$

Система (3) інтегрується з початковими умовами

$$T(0) = \begin{vmatrix} T_\alpha \\ T_\alpha \end{vmatrix}.$$

6. Обговорення результатів дослідження теплових режимів та впливу на них вищих гармонік напруги на теплові режими ОПН

Отримана математична модель температурного режиму ОПН дозволяє оцінювати температуру нагріву

варисторної колонки та ізоляції при впливах усіх видів перенапруг та визначати вплив якості електричної енергії на спроможність апарату підтримувати тепловий баланс на протязі всього строку експлуатації. Для оцінювання впливу вищих гармонік на тепловий баланс ОПН вираз потужності об’ємного тепловиділення має враховувати наявність в мережі гармонійних коливань

$$q = \frac{\sum_{i=0}^{\infty} u_i(t) i_i(t)}{V},$$

де $u_i(t)$ – миттєве значення напруги i -тої гармонійної складової; $i_i(t)$ – миттєве значення струму i -тої гармонійної складової.

Розрахунки теплових режимів ОПН виконувалися на основі вище наведеної методики. При дослідженні температурних режимів ОПН мають бути враховані електрофізичні властивості варисторів. Як було показано вище при роботі ОПН в зоні струмів витоку ВАХ необхідно враховувати ту обставину, що при підвищенні напруги він переходить зі стану діелектрика, коли переважає ємнісна складова струму в привідний стан. Ця обставина дозволяє уточнити математичну модель температурного режиму ОПН.

При напрузі нижчої або рівної $0,65U_{нр}$ математична модель температурного режиму ОПН за низької якості електричної енергії в мережі буде мати наступний вигляд:

$$\frac{dT}{dt} = AT + BU,$$

$$\text{де } T = \begin{vmatrix} T_1 \\ T^* \end{vmatrix};$$

$$U = \begin{vmatrix} \sum_{i=0}^{\infty} u_i(t) i_i(t) \cdot \text{tg} \delta \\ T_\alpha \end{vmatrix};$$

$$A = \begin{vmatrix} \beta \left(\frac{1}{3+\chi} \right) & 4\beta \left(1 - \frac{1}{3+\chi} \right) \\ D_i \left(\frac{4}{h^2} - \frac{1}{hR^*} \right) - \frac{D_i}{3\chi} \left(\frac{4}{h^2} + \frac{1}{hR^*} \right) & D_i \left(\frac{4}{h^2} + \frac{1}{hR^*} \right) \frac{4}{3\chi} - D_i \frac{8}{h^2} \end{vmatrix},$$

$$\text{де } \chi = \frac{2\pi R_i h_d \lambda^*}{mch}; \quad D_i = \frac{\lambda_i}{\rho_i c_i}.$$

При напрузі вищій за $0,65U_{нр}$ математична модель температурного режиму ОПН при низькій якості електричної енергії в мережі буде мати вигляд виразу (3) з урахуванням гармонійного складу напруги.

Таке удосконалення математичної моделі для визначення енергії, що розсіює ОПН в зоні струмів витоку ВАХ, дозволить врахувати обидва стани ОПН, а

саме коли він є діелектриком та коли він стає провідником, а також розробити метод оцінювання спроможності ОПН підтримувати тепловий баланс на протязі всього строку експлуатації. Суть такого методу полягає в тому, що для визначення спроможності роботи ОПН без втрати теплового балансу, повинна бути розрахована енергія втрат активної потужності в ньому на протязі однієї секунди. Отримане значення втрат активної потужності повинно бути меншим за припустимі втрати зазначені в каталозі виробника варисторів. У випадку коли ОПН складається з декількох варисторів, каталожні дані потужності для них мають бути додані одне до одного.

Розрахунки температурного режиму ОПН дадуть змогу проводити якісний контроль їх стану під час експлуатації. Це обумовлено тим, що за наявності відомостей про режим температур ОПН експлуатаційний контроль їх може бути зведений до вимірювання температури його ізоляційної покривки. Такий контроль можна проводити дистанційно без обов'язкового відключення електроустаткування та розширення ОПН, що суттєво скоротить час, необхідний для проведення подібного контролю та підвищить його інформативність.

7. Висновки

В результаті виконаних експериментальних досліджень ВАХ ОПН в зоні струмів витоку визначено, що при розрахунках теплових режимів необхідно враховувати два стану ОПН, стан діелектрика та стан провідника.

Отримані на базі експериментальних даних вирази математичних моделей температурного режиму ОПН враховують електрофізичні властивості варисторної кераміки та наявність в мережі гармонійних коливань, що дозволяє розрахувати температури варистору та ізоляційної покривки для будь якої конструкції апарату. Отримані результати показують наявність впливу якості електричної енергії на теплові режими ОПН. Виконання розрахунків згідно наведеної математичної дозволить на етапі вибору ОПН визначити його необхідну пропускну здатність, що суттєво підвищить надійність електропостачання споживачів електричної енергії. Виробники ОПН використавши отриману математичну зможуть виробляти апарати з підвищеними експлуатаційними характеристиками, що дозволить розширення використання їх у мережах з низькою якістю електричної енергії.

Література

1. Шевченко, С. Ю. Обмежувачі перенапруг нелінійні : застосування, монтаж та вибір [Текст]: монографія / С. Ю. Шевченко, П. В. Петров, Г. М. Катренко, О. М. Пасько, Б. Ф. Єрмоленко, О. М. Пучков; під заг. ред. С. Ю. Шевченко. – Харків: Форт, 2015. – 278 с.
2. Выбор, испытание и применение металлооксидных ограничителей перенапряжений в сетях среднего напряжения. Правила выбора [Текст] / ABB HighVoltage Technologies Ltd. – Швейцария, Ветинген, Май 1994. – 52 с.
3. Nafar, M. A novel parameter estimation method for metal oxide surge arrester models [Text] / M. Nafar, G. B Gharehpetian, T. Niknam // Sadhana. – 2011. – Vol. 36, № 6. – P. 941–961. doi:10.1007/s12046-011-0054-0
4. Металлооксидные ограничители перенапряжений. Выбор ограничителей перенапряжений и их применение в распределительных сетях среднего напряжения [Текст] / Тайко Электроникс Райхем Гмбх. – Киев, 2011. – 18 с.
5. Sandeep, K. Current Research Trends in Electrical Discharge Machining: A Review [Text] / K. Sandeep // Research Journal of Engineering Sciences. – 2013. – Vol. 2, № 2. – P. 56–60.
6. Al-Maamori, M. H. Study the Efficiency of adsorption Leshman's Stain Dye on the surface of some metal oxides [Text] / M. H. Al-Maamori, A. I. Al-Mosawi, H. Khudhair Shaymaa, M. K. Muttaleb // Engineering Sci. – 2013. – Vol. 2, № 4. – P. 16–21.
7. Pinceti, P. A simplified model for zinc oxide surge arresters [Text] / P. Pinceti, M. Giannettoni // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1999. – Vol. 14, № 2. – P. 393–398. doi:10.1109/61.754079
8. Шевченко, С. Ю. Схема заміщення обмежувача перенапруг нелінійного для аналізу його роботи при порушеннях якості електроенергії в мережі [Текст] / С. Ю. Шевченко // Вісник НТУ «ХПІ». – 2015. – № 53. – С. 56–63.
9. Шевченко, С. Ю. Експериментальні дослідження електричних характеристик ОПН [Текст] / С. Ю. Шевченко // Вісник НТУ «ХПІ». – 2015. – № 52. – С. 63–72.
10. Сегерлинд, Л. Применение метода конечных элементов [Текст] / Л. Сегерлинд. – М.: Мир, 1979. – 392 с.