

УДК 621.315

Б.Т. Кононов, А.О. Мушаров, А.О. Нечаус

Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків

РЕЗОНАНСНИЙ ПРИСТРІЙ КОНТРОЛЮ ЧАСТКОВИХ РОЗРЯДІВ

Пропонується використовувати трифазний трансформатор в якості магнітокеруємого реактора для високовольтних випробувань об'єктів ємнісного типу. Наводиться схема з'єднання обмоток реактора, приводяться співвідношення для побудови вольт-амперних характеристик.

Ключові слова: ферорезонанс, магнітокеруємий реактор, високовольтні випробування, кабельні лінії.

Вступ

Традиційним способом оцінювання стану ізоляції кабелів середньої напруги ($U_{ном} = 1-6-10-35$ кВ) є їх випробування високою змінною напругою із частотою 50 Гц ($U_{вип} = 4-17-25-5-88$ кВ), а також постійною напругою ($U_{вип} = 9,6-41-60-120-210$ кВ) [1]. Випробуванню підлягає як кабельна продукція, що випускається вітчизняними виробниками, так і кабелі, що знаходяться в експлуатації. Для отримання вимагаємих значень випробувальної напруги використовується спеціальне обладнання, яке, як правило, містить високовольтний трансформатор і випрямляч і дозволяє проводити випробування високовольтною постійною напругою.

Суттєвим недоліком існуючого випробувального обладнання, працюючого на постійній напрузі, є його незначна потужність, що обмежує використання цього обладнання як в заводських випробуваннях, так і в випробуваннях, які необхідно проводити під час експлуатації силових кабельних мереж. Для випробування високою напругою кабельних ліній значної довжини та для заводських випробувань силових кабелів зручніше використовувати змінну напругу, забезпечивши при цьому створення необхідного високовольтного обладнання вимагаємої потужності, яка може складати до 1000 кВАр.

Для отримання таких значень реактивної потужності кабель, що випробується, та високовольтне обладнання з'єднуються послідовно, а створений таким чином послідовний L-C-контур налаштовується в резонанс для зниження втрат енергії в котушках, втрат на гістерезис та вихрові струми в магнітопроводі. Для компенсації реактивної потужності при високовольтних випробуваннях доцільно використовувати схеми, до складу яких входить керуємий реактор.

Створення керуємого реактору є не простою задачею не тільки під час випробувань, які проводяться в експлуатаційних умовах, але й при заводських випробуваннях.

Аналіз літератури. В відомих керуємих реакторах [2 – 4] для зміни індуктивності змінюють не-

магнітний проміжок у магнітопроводі. Наявність регулюємого проміжку в керуємому реакторі призводить до значних негараздів, основними з яких є механічні вібрації, поява суттєвих потоків розсіювання та додаткових втрат в магнітопроводі і в обмотках. Подолання цих негараздів вимагає удосконалення конструкції реактора й підвищення його ціни.

Таким чином резонансне випробувальне обладнання стає практично недосяжним для багатьох кабельних підприємств і неможливим для використання в експлуатації [5]. Альтернативою реактору з регулюємим немагнітним проміжком є магнітокеруємі реактори [6], зміна індуктивності яких досягається підмагнічуванням магнітопровода, але такі реактори для високовольтних випробувань не використовувалися.

Мета статті – обґрунтування можливості створення резонансного пристрою для випробувань силових кабелів за допомогою магнітокеруємого реактора на основі типового трифазного трансформатору.

Основний матеріал

Для отримання магнітокеруємого трансформатору пропонується використовувати звичайні трифазні тристрижневі силові трансформатори, наприклад, трансформатори серій ТМ, ТМГ, ТМГА. При цьому низьковольтні обмотки трансформатору слід використовувати, як обмотки збудження реактору, а дві крайні високовольтні обмотки з'єднати послідовно й використовувати в якості робочих обмоток реактору, а високовольтну обмотку третьої фази (середню обмотку) використовувати, як обмотку керування реактору й живити її напругою постійного струму.

Запропонована схема з'єднання високовольтних обмоток силового трансформатора дозволяє фактично отримати магнітний підсилювач, у якого при зміні величини струму в обмотці керування буде змінюватись індуктивність робочих обмоток, які з'єднані послідовно, і підключені до об'єкту контролю – силового кабелю й створюють разом з ним коливальний контур.

В цьому коливальному контурі можливо виконати умови появи явища ферорезонансу й отримати високовольтну напругу, необхідну для випробування кабельної продукції.

Запропонована схема з'єднання обмоток трансформатора дозволяє отримати при випробуваннях режим роботи силового трансформатора, близький до номінального, й використовувати трансформатор не тільки в якості джерела високої напруги, необ-

хідної для випробувань, а і в якості компенсатора реактивної потужності ємнісного об'єкту контролю (силового кабелю). Крім того, силовий трансформатор може бути використаний і в якості приймача сигналів часткових розрядів, що виникають під час випробувань як у трансформаторі, так і в об'єкті контролю.

Схема резонансного пристрою контролю часткових розрядів наведена на рис. 1.

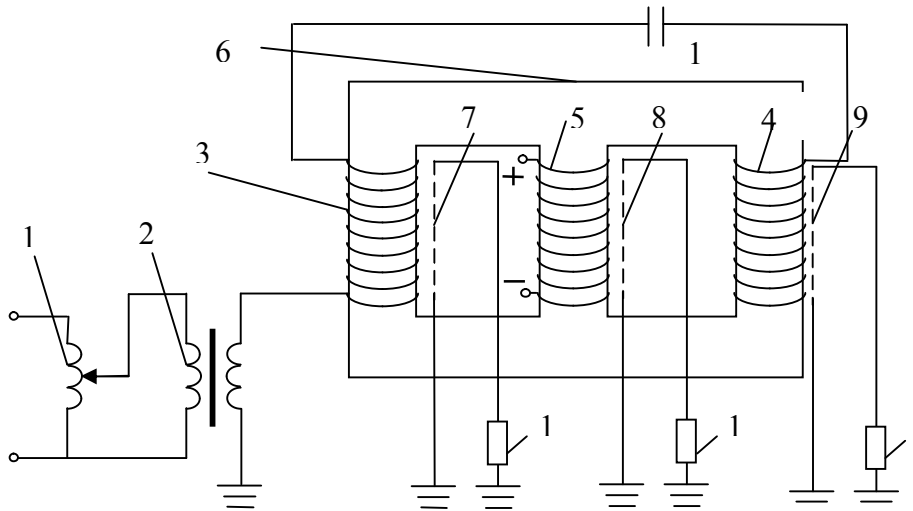


Рис. 1. Схема резонансного пристрою контролю часткових розрядів

Резонансний пристрій контролю часткових розрядів має регулювальний трансформатор 1, зв'язаний послідовно з трансформатором збудження 2, дві фази високовольтних обмоток якого 3 та 4 з'єднані послідовно і утворюють робочу обмотку реактору, а обмотка третьої фази 5 утворює обмотку керування.

На магнітопроводі 6 крім низьковольтних та високовольтних обмоток розміщені електростатичні екрани 7, 8, 9 з послідовно підключеними вимірювальними опорами 10, 11, 12. Об'єкт випробування 13 з'єднано послідовно з високовольтними робочими обмотками 3 та 4. Обмотки 3 та 4 з'єднані так, що їх основні магнітні потоки направлені узгоджено у крайніх стрижнях магнітопровода, де розміщені робочі обмотки 3 та 4, та зустрічно у середньому стрижні, де розміщена обмотка керування 5.

Таке з'єднання високовольтних обмоток дає змогу отримати подвоєну напругу порівняно з напругою силового трансформатора.

Електростатичні екрани мають ємнісний зв'язок між робочими обмотками 3, 4 та обмоткою керування 5.

Ємності між обмотками 3,4 та екранами 7,9 використовуються як конденсатор зв'язку з вимірювальним колом, на якому будуть виділятися сигнали часткових розрядів у об'єкті випробування 13 та сигнали шумів. Ємність між обмоткою 5 та

екраном 8 використовується, як конденсатор зв'язку з вимірювальним колом, на якому будуть виділятися сигнали шумів.

Відповідне з'єднання вимірювальних опорів 10,11,12 дозволяє збільшити розподільну здатність в процесі контролю часткових розрядів.

Резонансний пристрій контролю часткових розрядів працює таким чином. В обмотку керування подають постійний струм, який призводить до насичення магнітопроводу 6 реактору. За допомогою регулювального трансформатора 1 подають напругу на трансформатор збудження 2, завдяки чому з'являється напруга на випробувальному об'єкті. Далі зменшують струм керування до моменту виникнення явища ферорезонансу у коливальному контурі (високовольтні обмотки – об'єкт випробування).

При цьому напруга випробування $U_{вип}$ дорівнює подвійній фазній напрузі трансформатора, де

$$U_{\phi} = U_{ном.}$$

За допомогою трансформаторів 1 та 2 здійснюють налаштування випробувальної напруги, яка подається на протязі часу випробування на об'єкт контролю. В разі появи часткових розрядів здійснюється їх фіксація у вимірювальному колі. Для знімання напруги з об'єкту контролю збільшують струм керування, що подається у обмотку 5, до насичення магнітопроводу. При цьому явище фе-

резонансу зникає й напруга на об'єкті контролю зменшується до величини напруги збудження. Подальше зменшення напруги на об'єкті контролю до 0 здійснюють за допомогою регульовального трансформатору 1.

В разі потреби при значних значеннях ємності об'єкта випробування високовольтні обмотки 3 та 4 можливо з'єднувати паралельно.

Для отримання вимагаємої вольт-амперної характеристики керуемого реактора, перш за все, визначимо амплітуду B_m змінної складової індукції.

Для цього, виходячи з потрібного значення випробувальної напруги, яке дорівнює

$$U_{\text{вип}} = U_{\text{реакт}},$$

знаходимо B_m :

$$B_m = \frac{U_{\text{реакт}}}{4,44f S_p W_p}, \quad (1)$$

де S_p - переріз осердя магнітопроводу,

W_p - кількість витків котушок високовольтних обмоток,

f - частота змінної напруги.

Далі, задаючи значення струму управління I_0 , знаходимо напруженість електричного поля підмагнічування, нехтуючи розсіюванням цього поля і використовуючи для цього закон повного струму:

$$H_{\Pi} = \frac{I_0 W_p}{\ell_c}, \quad (2)$$

де ℓ_c - довжина середньої лінії потоку підмагнічування. Враховуючи, що частина потоку підмагнічування розсіюється на шляху від центрального стрижня до крайніх стрижнів, що має місце в зв'язку з втратами на з'єднаннях магнітопроводу, розсіюванням в стяжних шпильках і втратами на ділянках, де магнітопровід насичений, значення H_{Π} , знайдене з (2), повинно бути уточнене за допомогою коефіцієнта розсіювання η , тобто

$$H'_{\Pi} = \eta \cdot H_{\Pi}. \quad (3)$$

Здійснюючи апроксимацію основної кривої намагнічування $H = f(B)$ за допомогою, наприклад, функції гіперболічного синусу

$$H = \alpha \cdot \text{sh}(\beta B), \quad (4)$$

де α та β - емпіричні коефіцієнти, які знаходяться, маючи реальну криву намагнічування.

З (4) слідує, що індукція B_0 поля підмагнічування дорівнює:

$$B_0 = \frac{1}{\beta} \text{arcsch} \frac{H'_{\Pi}}{\alpha}. \quad (5)$$

Вважаючи, що індукція B поля змінюється за періодичним законом з постійною складовою B_0 , знаходимо

$$B = B_0 + B_m \sin \omega t, \quad (6)$$

де ω - кутова частота змінного струму.

З виразу (6) слідує, що напруженість електричного поля

$$H = \alpha \cdot \text{sh} \beta (B_0 + B_m \sin \omega t). \quad (7)$$

Виконуючи розклад виразу (7) в ряд Фур'є, отримуємо, що

$$H = H_0 + \sum_{i=1}^n [H_{m(2i-1)} \sin(2i-1)\omega t + H_{m2i} \cos 2i\omega t], \quad (8)$$

де $H_0 = \alpha \cdot \text{sh}(\beta B_0) I_0(j\beta B_m)$;

$$H_{m1} = 2\alpha \cdot \text{ch}(\beta B_0) [-I_1(j\beta B_m)];$$

$$H_{m2} = 2\alpha \cdot \text{sh}(\beta B_0) [I_2(j\beta B_m)];$$

$$H_{m3} = 2\alpha \cdot \text{ch}(\beta B_0) [-I_3(j\beta B_m)];$$

$$H_{m4} = 2\alpha \cdot \text{sh}(\beta B_0) [I_4(j\beta B_m)];$$

$$H_{m5} = 2\alpha \cdot \text{ch}(\beta B_0) [-I_5(j\beta B_m)];$$

$$H_{m6} = 2\alpha \cdot \text{sh}(\beta B_0) [I_6(j\beta B_m)],$$

де $I_0, I_1, I_2, I_3, I_4, I_5, I_6$ - функції Бесселя уявного аргументу $j\beta B_0$.

Зазвичай, достатньо обмежитись першими шістьма гармоніками ряду (8), що дозволяє знайти діюче значення змінної складової напруженості магнітного поля в осерді магнітопроводу

$$H_{\ell} = \sqrt{\frac{H_{m1}^2 + H_{m2}^2 + H_{m3}^2 + H_{m4}^2 + H_{m5}^2 + H_{m6}^2}{2}} \quad (9)$$

й діюче значення струму реактора I_p

$$I_p = \frac{H_{\ell} \ell_{\text{ср}}}{2W_p}, \quad (10)$$

де $\ell_{\text{ср}}$ - довжина середньої лінії робочого потоку.

Виконуючи розрахунки згідно із зазначеними співвідношеннями (1) - (10), можливо побудувати вольт-амперну характеристику магнітокеруемого реактора при заданих значеннях струму підмагнічування. Виходячи з того, що вольт-амперні характеристики реактора побудовані та знаючи при якому значенні струму управління вольт-амперні характеристики котушок починають переміщуватися вниз, можливо знайти значення струму управління I_y , при якому починає виконуватися умова виникнення явища ферорезонансу

$$U_{збуд} \geq \text{extr} |U_p(I_p) - U_c(I_p)|, \quad (11)$$

де $U_p(I_p) - U_c(I_p)$ - різниця напруг між реактором та об'єктом випробування, що визначає необхідне значення напруги збудження.

При виникненні явища ферорезонансу струм в коливальному контурі суттєво зростає й відповідно зростає напруга на ємності. При відсутності керування, коли струм в обмотці керування дорівнює нулю збудження резонансних коливань практично неможливо.

Висновки

1. Запропонована резонансна схема випробувань силових кабелів високою напругою з використанням явища ферорезонансу в послідовному резонансному контурі, який утворений ємністю об'єкта випробування та регулюємою індуктивністю магнітокеруемого реактору.

2. В якості магнітокеруемого реактору запропоновано використовувати звичайний трифазний тристрижневий трансформатор, у якого дві крайні високовольтні обмотки використовуються як робочі обмотки реактора і з'єднуються послідовно або паралельно між собою і послідовно з об'єктом випробувань, а середня обмотка використовується у якості обмотки керування для підмагнічування магнітопроводу реактора постійним струмом.

3. Запропоновані розрахункові співвідношення для побудови вольт-амперних характеристик магнітокеруемого реактора, з яких можливо знайти умови виникнення явища ферорезонансу при випробуваннях силових кабелів.

4. Використання магнітокеруемого реактора на базі звичайного трифазного тристрижневого трансформатору дозволяє вирішити триєдину науково-технічну задачу отримання високовольтного джерела випробувальної напруги, отримати компенсатор реактивної потужності, потрібної для здійснення випробувань, отримати приймач сигналів часткових розрядів, що виникають під час випробувань.

5. Використання магнітокеруемого реактору на базі звичайного трифазного тристрижневого силового трансформатору для випробування кабельної продукції заводів-виробників і випробування кабельних ліній електричних мереж під час експлуатації вимагає певних застережень. По-перше, необхідно ізолювати оболонку кабеля від землі, що дає змогу отримати біполярну напругу на об'єкті випробувань, доки фазний провідник має позитивний потенціал, оболонка кабелю буде мати негативний потенціал. По-друге, швидке зростання напруги на об'єкті випробувань при виникненні явища ферорезонансу вимагає обмеження потужності трансформатору збудження для гальмування цього явища. Нарешті, необхідна певна послідовність регулювання струму управління та напруги збудження під час випробувань.

Список літератури

- ГОСТ 18410-73. Кабели силовые с пропитанной бумажной изоляцией. Технические условия.
- Баженов С.А. Выбор аппаратуры для испытаний электрооборудования / С.А. Баженов. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 128 с.
- AC Dielectric Test Sete фірми Hipotronics THE MEASURE OF A LEADER, USA [Електронний ресурс]. – Режим доступу: www.hipotronics.com.
- Стационарные испытательные установки WR 3125/250-12550 фірми High Voltage (Германия) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: www.df.directindustry.com
- Експлуатація систем електропостачання військових об'єктів. / Б.Т. Кононов, О.Б. Котов, Г.І. Лагутін, О.М. Малиш. – Х.: ХУПС, 2014. – 432 с.
- Управляемые подмагничиванием дугогосищие реакторы с автоматической компенсацией емкостного тока замыкания на землю для сетей 6-35 кВ / А.М. Брянецев, А.И. Лурье, А.Г. Долгополов и др. // Электричество. – 2000. – № 7. – С. 59 – 67.

Надійшла до редколегії 11.05.2016

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.М. Більчук, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

РЕЗОНАНСНОЕ УСТРОЙСТВО КОНТРОЛЯ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ

Б.Т. Кононов, А.А. Мушаров, А.А. Нечаус

Предлагается использовать трехфазный трансформатор в качестве магнитоуправляемого реактора для высоковольтных испытаний объектов емкостного типа. Приводится схема соединения обмоток реактора, приводятся соотношения для построения вольтамперных характеристик.

Ключевые слова: феррорезонанс, магнитоуправляемый реактор, высоковольтные испытания, кабельные линии.

RESONANCE DEVICE FOR CONTROL OF PARTIAL DISCHARGE

B.T. Kononov, A.A. Musharov, A.A. Nechaus

It is proposed to use a three-phase transformer as solenoid reactor for high voltage testing facilities of the capacitive type. The scheme of connection of the reactor windings are relations for the construction of the current-voltage characteristics.

Keywords: ferro resonance, magnetically reactor, high voltage test, the cable line.