

ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕЛІ НЕЛІНІЙНОЇ ІНДУКТИВНОСТІ ТРАНСФОРМАТОРА НАПРУГИ ЯК ЧИННИКА, ЩО ВПЛИВАЄ НА ВИНИКНЕННЯ ФЕРОРЕЗОНАНСНИХ ПРОЦЕСІВ

Ганус О. І., Старков К. О.

АК "Харківобленерго"

Розглянуто математичну модель трансформатора напруги. Визначено причини, закономірності, умови та математичні вирази для розрахунку параметрів трансформаторів напруги, що необхідні при підборі конкретного трансформатора напруги для певної електричної мережі.

Постановка проблеми

Передача і розподіл електричної енергії здійснюється електричними мережами (ЕМ) різних номінальних напруг. ЕМ АК "Харківобленерго", енергокомпанії, яка входить до п'ятірки найбільших в Україні, мають 288 підстанцій (ПС) 35-154/6-10 кВ, 10.781 трансформаторних підстанцій 6-10/0,4 кВ, 40.904 км повітряних ліній (ПЛ) напругою 0,4-154 кВ, 7.091 км кабельних ліній різних класів напруги.

Однією з найбільш істотних проблем експлуатації є досить висока аварійність.

В акціонерної компанії заведено розслідувати причини основних з технологічних порушень і вживати заходів щодо запобігання виявлених причин в подальшому.

Зазначений підхід дозволяє постійно знижувати пошкоджуваність практично будь-якого обладнання.

Значною проблемою в плінні тривалого часу була пошкоджуваність трансформаторів напруги (ТН), які виходили з ладу при появі землі в ЕМ з ізольованою нейтраллю, незважаючи на дотримання всіх відомих вимог та рекомендацій щодо підвищення їх надійності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Аналіз результатів дослідження статистичних даних по пошкоджуваності ТН 6-10 кВ ЕМ АК "Харківобленерго" [1] виявив цілий ряд закономірностей, при яких можливе виникнення ферорезонансних процесів (ФРП). Основною з них були параметри ЕМ, до якої був підключений ТН. В [2] були визначені межі області можливого виникнення ФРП в ЕМ 6 (10) -35кВ з ТН.

Однак, як показали дослідження, параметри ТН не є незмінними. В [3] було досліджено вплив дрейфу магнітних характеристик ТН 6-10 кВ на характер протікання ФРП.

У розглянутих роботах в якості заходів по виключенню умов виникнення ФРП пропонувалися обмеження за параметрами ЕМ, що впливають на величину ємності ЕМ.

Однак, виключення умов виникнення ФРП можливе також шляхом урахування індуктивності ТН.

У зв'язку з відносно великим спектром зміни даного параметра в ТН, що знаходяться в експлуатації, вирішення завдання попередження виникнення ФРП даними шляхом дозволить значно розширити зону безпечної роботи енергообладнання з точки зору запобігання умов виникнення ФРП.

Таким чином дослідження причин, закономірностей, умов виникнення ФРП та отримання математичних виразів для розрахунку параметрів ТН, що необхідні при підборі конкретного трансформатора напруги для певної ЕМ являються актуальними.

Мета статті - визначити причини, закономірності, умови та математичні вирази для розрахунку параметрів трансформаторів напруги, що необхідні при підборі конкретного трансформатора напруги для певної електричної мережі

Основні матеріали дослідження

Вихідні для вирішення задачі моделювання нелінійні характеристики ТН були отримані в такий спосіб. Кожен ТН після капітального ремонту в майстернях АК "Харківобленерго", проходив випробування і дослідження з визначенням його магнітних характеристик.

За результатами аналізу після відновлювальних ремонтів магнітних характеристик ТН, які пошкодились в ЕМ при ФРП, а також тих ТН, що раніше не пошкоджувались, були виявлені загальні закономірності розташування вказаних характеристик, які наведені на рис.1, у вигляді залежностей між діючими значеннями напруг і струмів.

На цьому рисунку наведені межі зон, в яких розташовуються магнітні характеристики ТН, які не мали раніше ушкоджень (характеристики 1 і 2), а також мали одне пошкодження перед відновленням в майстернях (характеристики 3 і 4), два пошкодження перед останнім капітальним ремонтом (характеристики 5 і 6), три (характеристики 7 і 8), чотири і більш пошкоджень (характеристики 9 і 10).

У кожній із зазначених зон розташування характеристик, в основному, відповідає терміну служби ТН. Так, ТН, з великим терміном служби (криві 2, 4, 6, 8 і 10) мають магнітну характеристику, розташовану нижче, в порівнянні з тими ТН, у яких термін служби менший (криві 1, 3, 5, 7 і 9).

До виявлених закономірностей можливо віднести також і те, що від кількості пошкоджень з подальшими відновлювальними ремонтами залежить нахил лінійних частин характеристик, а від терміну служби - розташування точки перегину, тобто довжина лінійної ділянки.

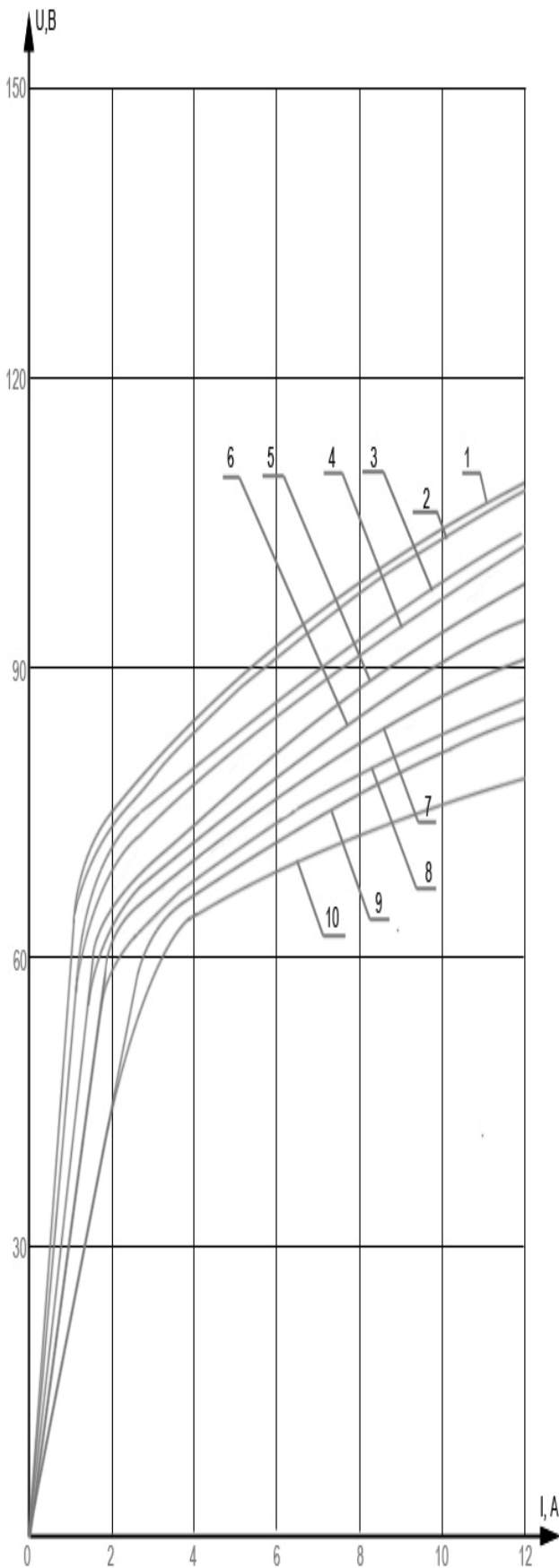


Рисунок 1 – Магнітні характеристики ТН типу НТМІ, які не пошкоджувалися, а також пройшли різну кількість відновлювальних ремонтів і мають різний післяремонтний термін служби

При цьому розкид характеристик у ТН з однаковою кількістю ремонтів залежить від різниці в терміні служби.

У ТН, що пройшли меншу кількість ремонтів - менший, порівняно з тими ТН, які більшу кількість разів пошкоджувалися і проходили після цих пошкоджень процедуру відновлювального ремонту.

Для аналізу параметрів нелінійної індуктивності ТН прийемо схему [4], яка представлена на рис. 2.

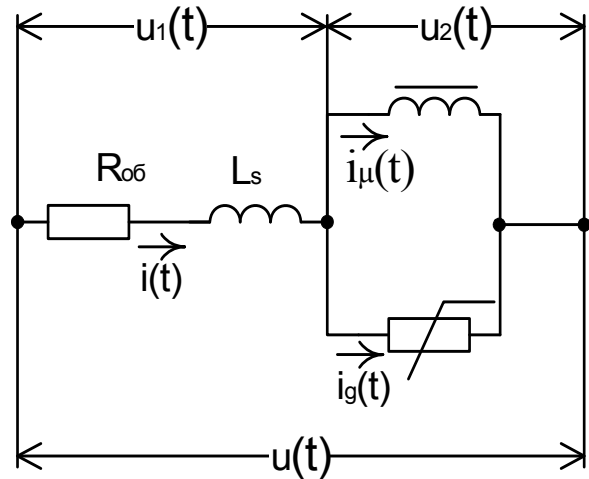


Рисунок 2 – Схема заміщення нелінійної індуктивності ТН

Параметри, використані для визначення характеристик розрахункової схеми заміщення:

S - Перетин сердечника ТН;

l - Довжина середньої лінії сердечника ТН;

W - Число витків обмотки ТН.

Послідовно з паралельно з'єднаними ідеалізованою нелінійною індуктивністю і нелінійним активним опором, що характеризує втрати на гістерезис і вихрові струми, включається опір обмотки $R_{об}$ і лінійна індуктивність L_S , яка обумовлена потоком розсіювання.

Загальний струм $i(t)$ розділяється на дві складових $i_{\mu}(t), i_g(t)$ - реактивну і активну, які, відповідно, йдуть на створення магнітного поля і подолання втрат, пов'язаних з гістерезисом і вихровими струмами в осердді.

$U(t)$ - напруга довільної форми, що підводиться до нелінійної індуктивності.

Введемо дві функції, які апроксимують відповідно ідеалізовану нелінійну індуктивність і нелінійне активний опір [5], що характеризують втрати на гістерезис і вихрові струми:

$$i_{\mu}(t) = f_1(B); \quad (1)$$

$$i_g(t) = f_2(u_2) = f_2\left(\frac{dB}{dt}\right). \quad (2)$$

Складемо систему рівнянь за законами Кірхгофа

для схеми заміщення нелінійної індуктивності, наведеною на рис.2.

$$R_{o\sigma} \cdot i(t) + L_S \cdot \left(\frac{di(t)}{dt} \right) + S \cdot W \cdot \left(\frac{dB}{dt} \right) = u(t); \quad (3)$$

$$i(t) = i_\mu(t) + i_g(t); \quad (4)$$

$$u_2(t) = S \cdot W \cdot \left(\frac{dB}{dt} \right). \quad (5)$$

Враховуючи (1) і (2), після перетворень, система рівнянь (3), (4) і (5) зводиться до диференціального рівняння другого порядку з початковими умовами, що впливають із умов комутації:

$$L_S \cdot f_2' \left(\frac{dB}{dt} \right) + S \cdot W \cdot \frac{dB}{dt} + L_S \cdot f_2'(B) + R_{o\sigma} \cdot f_1(B) + R_{o\sigma} \cdot f_2 \left(\frac{dB}{dt} \right) = u(t); \quad (6)$$

$$B(0) = 0; \quad (7)$$

$$B'(0) = 0. \quad (8)$$

Якщо прийняти, що індуктивність розсіювання дорівнює нулю ($L_S = 0$), тоді, згідно [6], рівняння (6) та (7) приймають вигляд:

$$S \cdot W \cdot \left(\frac{dB}{dt} \right) + R_{o\sigma} \cdot f_2 \left(\frac{dB}{dt} \right) + R_{o\sigma} \cdot f_1(B) = u(t); \quad (9)$$

$$B(0) = 0. \quad (10)$$

Розглянемо випадок, коли активний опір $R_{o\sigma}$, який характеризує втрати на гістерезис та вихрові струми, апроксимується прямою лінією.

В цьому випадку вираз для струму $i_g(t)$ у формулі (2) набуває вигляду:

$$i_g(t) = \frac{S \cdot W}{R_{\sigma\sigma}} \cdot \frac{dB}{dt}, \quad (11)$$

а рівняння (6), (7) і (8) відповідно записуються наступним чином:

$$\frac{L_S \cdot S \cdot W}{R_{\sigma\sigma}} \cdot \frac{d^2 B}{dt^2} + S \cdot W \cdot \left(1 + \frac{R_{o\sigma}}{R_{\sigma\sigma}} \right) \cdot \frac{dB}{dt} + L_S \cdot f_1'(B) + R_{o\sigma} \cdot f_1(B) = u(t); \quad (12)$$

$$B(0) = 0, \quad (13)$$

$$B'(0) = 0. \quad (14)$$

З урахуванням (11) вирази (9) і (10) приймуть вигляд:

$$\left(1 + \frac{R_{o\sigma}}{R_{\sigma\sigma}} \right) \cdot S \cdot W \cdot \frac{dB}{dt} + R_{o\sigma} \cdot f_1(B) = u(t); \quad (15)$$

$$B(0) = 0. \quad (16)$$

Якщо прийняти, що втрати на гістерезис та вихрові струми зневажаємо малі, що припустимо, згідно [7], тоді:

$$i_g(t) = f_2(u_2) = f_2 \left(\frac{dB}{dt} \right) = 0 \quad (17)$$

і вирази (6), (7) (9) і (10) приймають вигляд:

$$L_S \cdot f_1'(B) + S \cdot W \cdot \frac{dB}{dt} + R_{o\sigma} \cdot f_1(B) = u(t); \quad (18)$$

$$B(0) = 0; \quad (19)$$

$$S \cdot W \cdot \left(\frac{dB}{dt} \right) + R_{o\sigma} \cdot f_1(B) = u(t); \quad (20)$$

$$B(0) = 0. \quad (21)$$

У разі, якщо опір обмотки $R_{o\sigma}$ малий, тоді:

$$S \cdot W \cdot \left(\frac{dB}{dt} \right) = u(t); \quad (22)$$

$$B(0) = 0. \quad (23)$$

З урахуванням початкових умов (23) з виразу (22) відповідно до рекомендацій, викладених в [8], запишемо вираз, що визначає величину миттєвого значення магнітної індукції:

$$B = \frac{1}{S \cdot W} \cdot \left[\left(\int u(t) \cdot dt \right)_{t=t_1} - \left(\int u(t) \cdot dt \right)_{t=0} \right]. \quad (24)$$

Мінімальний час, через який індукція набуває максимального значення визначається з рівняння:

$$u(t_1) = 0. \quad (25)$$

Виходячи з (24) і (25) можливо визначити значення індукції в момент часу t_1 :

$$B(t_1) = \frac{1}{S \cdot W} \cdot \left[\int u(t) \cdot dt - \left(\int u(t) \cdot dt \right)_{t=0} \right]_{t=t_1} \quad (26)$$

Враховуючи, що прикладена до індуктивності напруга змінюється за синусоїдальним законом:

$$u(t) = u_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \psi_u) \quad (27)$$

рішення рівняння (22), згідно [9], має вигляд:

$$B = \frac{U_m}{S \cdot W \cdot \omega} [-\cos(\omega \cdot t + \psi) + \cos \psi_u]. \quad (28)$$

З виразу (28) з урахуванням (25), (26), (27) маємо:

$$B(t_1) = \frac{U_m}{S \cdot W \cdot \omega} [-1 + \cos \psi_u]. \quad (29)$$

Таким чином, за виразом (29) можливо визначити максимальне значення індукції, яке необхідно використати при підборі ТН заводського виготовлення або тих ТН, що пройшли капітальний ремонт для погодження з параметрами ЕМ, в яких установка конкретних ТН не приводитиметься до виникнення ФРП.

Висновки. В представленій статті визначено:

- причини, що викликають дрейф магнітних характеристик ТН.
- закономірності розташування магнітних характеристик ТН в залежності від параметрів, що викликають дрейф його магнітних характеристик (кількість ушкоджень під час ФРП і термін служби).
- умови, при яких попередження виникнення ФРП в ЕМ можливе шляхом підбору ТН з відповідними магнітними характеристиками.
- математичний вираз для обчислення максимального значення індукції схеми заміщення нелінійної індуктивності ТН.

Список використаних джерел

1. Ганус А. И. Повреждаемость трансформаторов напряжения в областных электрических сетях АК «Харьковоблэнерго» и мероприятия по её снижению / А. И. Ганус, К. А. Старков // Світлотехніка та електроенергетика. – 2003. - № 1. - С.75-81.
2. Говоров Ф. П. Определение границ области возможного возникновения феррорезонансного процесса в электрических сетях 6(10)-35 кВ с трансформаторами напряжения / Ф. П. Говоров, А. И. Ганус, К.А. Старков // Технічна електродинаміка: зб.наук.пр. Тематичний випуск "Проблеми сучасної електротехніки", частина 6. - Київ: ІЕД НАН України. – 2006. – С.26-31.
3. Говоров Ф. П. Влияние дрейфа магнитных характеристик трансформаторов напряжения 6(10) кВ на характер протекания феррорезонансных процессов / Ф. П. Говоров, А. И. Ганус, К. А. Старков // Технічна електродинаміка: зб.наук.пр. Тематичний випуск

“Силовая электроника та енергоефективність”, – частина 5. - Київ: ІЕД НАН України.– 2006. – С.94-99.

4. Митропольский Ю. А. Нестационарные процессы в нелинейных автоколебательных системах. / Ю. А. Митропольский – Киев: Изд. АН УССР, 1955.– 284 с.

5. Фельдбаум А. А. Введение в теорию нелинейных цепей. / А. А. Фельдбаум – М.: Госэнергоиздат, 1948. – 324 с.

6. Малкин И. Н. Некоторые задачи теории нелинейных колебаний. / И. Н. Малкин – М.: Гостехиздат, 1956. – 491 с..

7. Бессонов Л. А. Переходные процессы в нелинейных электрических цепях со сталью. / Л. А. Бессонов – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1951. – 163 с.

8. Андреев В. С. Теория нелинейных электрических цепей. / В. С. Андреев – М.: Связь, 1972.– 328 с.

9. Филипов Е. Нелинейная электротехника. / Е. Филипов – М.: Энергия, 1976. – 496 с.

Аннотация

ИССЛЕДОВАНИЯ МОДЕЛИ НЕЛИНЕЙНОЙ ИНДУКТИВНОСТИ ТРАНСФОРМАТОРА НАПРЯЖЕНИЯ КАК ФАКТОРА, КОТОРЫЙ ВЛИЯЕТ НА ВОЗНИКНОВЕНИЕ ФЕРРОРЕЗОНАНСНЫХ ПРОЦЕССОВ

Ганус А. И., Старков К. А.

Рассмотрена математическая модель трансформатора напряжения. Определены причины, закономерности, условия и математические выражения для расчета параметров трансформаторов напряжения, которые необходимы при подборе конкретного трансформатора напряжения для определенной электрической сети

Abstract

RESEARCH OF MODEL OF NONLINEAR INDUCTANCE OF TRANSFORMER OF TENSION AS FACTOR THAT INFLUENCES ON ORIGIN OF FERRORESONANS PROCESSES

A. Ganus, K. Starkov

Is considered the mathematical model of transformer of tension. Certain reasons, conformities to law, terms and mathematical expressions, for the calculation of parameters of transformers tensions that is needed at the selection of concrete transformer of tension for a certain electric network.