

УДК 621.314.1.027

А.В.Журахівський, докт.техн.наук, **Ю.А.Кенс**, канд.техн.наук, **А.Я.Яцейко**, канд.техн.наук, **Р.Я.Масляк** (Національний університет «Львівська політехніка», Львів)

ФЕРОРЕЗОНАНСНІ ПРОЦЕСИ В ЕЛЕКТРОМЕРЕЖАХ 10 КВ З РІЗНОТИПНИМИ ТРАНСФОРМАТОРАМИ НАПРУГИ

Досліджено ферорезонансні процеси в електромережах 10 кВ з ізольованою нейтраллю за наявності в них різнотипних трансформаторів напруги. Наведено деякі результати розрахунків.

Исследованы феррорезонансные процессы в электросетях 10 кВ с изолированной нейтралью при наличии в них разнотипных трансформаторов напряжения. Приведены некоторые результаты расчетов.

Постановка проблеми. Відомо, що в Україні та країнах СНД електропостачання споживачів у більшості випадків здійснюється електромережами 6–10–35 кВ з так званою ізольованою нейтраллю. Ці ж мережі ще називають мережами з малими струмами замикання на землю [6].

Вагомим недоліком таких мереж є можливість виникнення в них ферорезонансних процесів (ФРП), що можуть призводити до пошкодження електрообладнання підстанцій і, в першу чергу, трансформаторів напруги. Справа у тому, що для контролю ізоляції сучасних електромереж 6–35 кВ, а також для вимірювань, обліку електроенергії, роботи пристроїв сигналізації, релейного захисту та автоматики понад 90 % встановлених трансформаторів напруги (ТН) є ТН типів НТМИ та ЗНОМ. У трансформаторах типу НТМИ три первинні (високовольтні) обмотки з'єднуються в зірку, нуль якої заземлюється. У ТН типу ЗНОМ заземлюється кожна фаза окремо, тому ці мережі ще називають мережами з умовно ізольованою нейтраллю (що більше відповідає суті). Нейтраль мережі в дійсності заземлена, щоправда через велику нелінійну індуктивність ТН, оскільки потужність трансформаторів напруги невелика і становить від 0,6 кВА до 1,0 кВА для напруг від 6 кВ до 35 кВ.

Згадані ТН мають вагомий недолік – після обриву «землі» в мережі, за певних співвідношень параметрів ТН і мережі, вони самі є фактично збурювачами незатухаючих ФРП, які й можуть пошкоджувати ці ж трансформатори. А вихід з ладу трансформатора напруги може призводити до різних негативних наслідків зі значними збитками для енергопостачальних компаній та й народного господарства в цілому. Тому для усунення вказаних недоліків як трансформаторів напруги, так і самих мереж запропоновано різноманітні рішення.

Основні серед них: розробка та впровадження в експлуатацію пристроїв захисту ТН від пошкоджень ФРП; розробка нових трансформаторів напруги, так званих антирезонансних, типів НАМИ, НАМИТ; і зовсім радикальний засіб – реконструкція існуючих мереж з ізольованою нейтраллю в мережі з глухозаземленою нейтраллю або заземленою через резистор [6,8,9].

Аналіз останніх досліджень. На сьогодні фактично єдиним реально працюючим засобом захисту ТН від пошкоджень ФРП є пристрій, запропонований в [1]. На даний час в експлуатацію електромереж України впроваджено біля 100 таких пристроїв. Суть роботи пристрою полягає в тому, що він виявляє наявність ФРП в мережі та, під'єднуючи гасильний резистор до обмотки розімкненого трикутника ТН, зриває ферорезонанс за частки секунди і відновлює нормальну роботу обладнання підстанції.

Що стосується другого способу уникнення пошкоджень трансформаторів напруги, а саме розробки антирезонансних ТН, то останні дійсно відносно рідше пошкоджуються, ніж трансформатори типу НТМИ чи ЗНОМ. Справа у тому, що в цих антирезонансних ТН залишається зв'язок через електромагнітний

нелінійний елемент з землею, а це означає, що рано чи пізно наступить таке співвідношення параметрів ТН й електромережі, за якого виникатиме ферорезонанс з усіма негативними наслідками цього явища.

Оскільки, все ж таки антирезонансні ТН поступово впроваджуються в електромережі України, то постала нагальна проблема дослідження сумісної їх роботи з існуючими ТН типу НТМИ та ЗНОМ.

Стосовно третього способу уникнення пошкоджень трансформаторів напруги ферорезонансними процесами – перетворення мереж в мережі з заземленою нейтраллю, то й самі автори цієї стратегії розуміють та говорять про необхідність величезних капітальних витрат, необхідність зміни концептуальних засад побудови електромереж тощо. Тобто, мова може йти поки що про окремі випадки або про будівництво (розширення) нових електромереж.

Задачею досліджень є аналіз на математичних (цифрових) моделях режимів електромереж з різнотипними трансформаторами напруги та оцінка можливості та ефективності їх сумісної роботи.

Основний матеріал. Аналіз режимів електромереж спочатку доцільно проводити на математичних (цифрових) моделях [2,7], оскільки натурні випробування – це достатньо громізка та витратна процедура, яку не завжди можна реалізувати на діючих підстанціях. В разі крайньої необхідності підтвердження чи спростування деяких результатів розрахунків можна (доцільно) провести окремі натурні випробування, що не пов'язані з можливими непередбачуваними наслідками. Комп'ютерну симуляцію ферорезонансних процесів (ФРП) виконано для електромережі 10 кВ, де найбільш широко застосовуються різнотипні ТН.

На рис. 1 показана принципова схема типової електромережі 10 кВ, де встановлено різнотипні трансформатори напруги. Тут С – система живлення; СШ – секція шин; ПС₁–ПС₃ – підстанції; Т – силовий трансформатор, що живить СШ-10 та СШ-35 кВ; НТМИ, НАМИ, НАМИТ, НТН – типи трансформаторів напруги.

На рис. 2 показано принципові схеми сполучень первинних обмоток вказаних вище трансформаторів напруги. Тут ДОТ – додатковий однофазний трансформатор напруги; К – ключ; С₁–С₂ – ємнісний дільник. Схеми наведено для кращого розуміння процесів, що відбуваються на підстанціях під час появи та обриву землі в мережі.

Дослідження режимів роботи такої електричної мережі виконуємо на цифровій моделі, яку сформовано

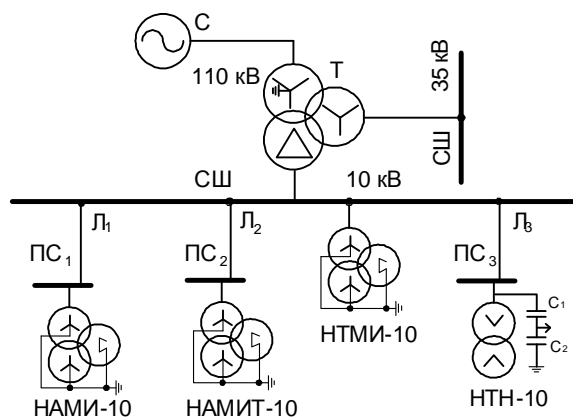


Рис. 1

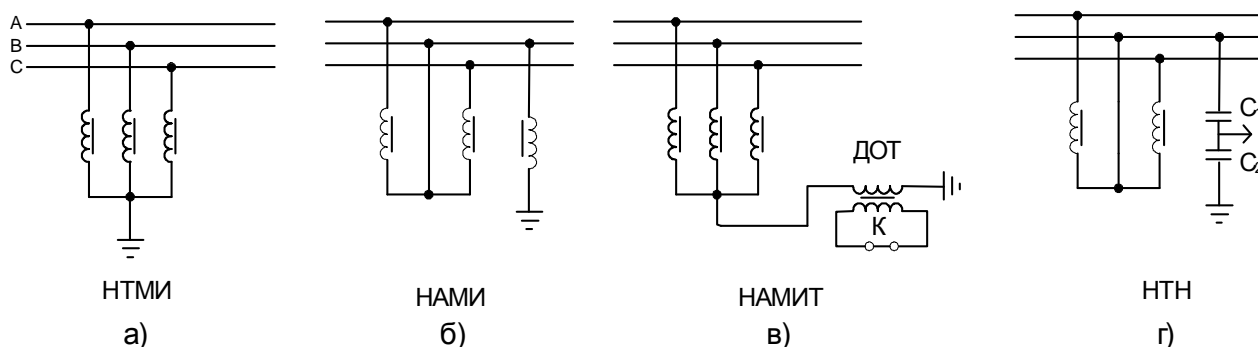


Рис. 2

в цифровому комплексі RE [2]. У свою чергу комплекс RE формує математичну модель у методі контурних координат,

$$\overset{\vee}{\Gamma} \begin{vmatrix} \overset{\vee}{L} & \overset{\vee}{K}'_T \\ \overset{\vee}{K}_T & -R_M \end{vmatrix} \overset{\vee}{\Gamma}_t \left(\frac{d\vec{i}_K}{dt}, \frac{d\vec{\psi}}{dt} \right) = \overset{\vee}{\Gamma} \left(\vec{e} - \vec{r}\vec{i} - \vec{u}_c, 0 \right);$$

$$(\vec{i}, \vec{\psi}) = \overset{\vee}{\Gamma}_t(\vec{i}_K, \vec{\psi}_K); \quad \overset{\vee}{C} d\vec{u}_c/dt = \vec{i},$$

де $\overset{\vee}{\Gamma}$ та $\overset{\vee}{\Gamma}_t$ – пряма та транспонована матриці головних контурів, взаємозв'язаних електричних та магнітних кіл; $\vec{i}, \vec{e}, \vec{u}_c$ – відповідно вектори струмів, ЕРС та напруг на ємностях електричних кіл; $\vec{\psi}$ – вектор потокозчеплень магнітних віток схеми; $\overset{\vee}{r} = \text{diag}(r_1, r_2, \dots, r_n)$ – діагональна матриця активних опорів віток розрахункової схеми заміщення електричних кіл; $\overset{\vee}{C} = \text{diag}(C_1, C_2, \dots, C_n)$ – діагональна матриця ємностей схеми; $\overset{\vee}{L}$ – матриця власних та взаємних індуктивностей; $\overset{\vee}{K}_T$ – матриця коефіцієнтів зв'язку між вітками електричних та магнітних кіл; $\overset{\vee}{R}_M = \text{diag}(R'_{M1}, R'_{M2}, \dots, R'_{Mn})$ – діагональна матриця зведених до одного витка диференційних магнітних опорів, для якої кожний елемент матриці визначається як $R'_{Mn} = R_{Mn}/W^2$, де R_{Mn} – диференційний магнітний опір вітки, а W – кількість витків обмотки, до якої зведено потокозчеплення цієї вітки.

Оскільки досліджуються ферорезонансні процеси, а основними елементами, що провокують їх появу в електромережі, є трансформатори напруги, то особливу увагу слід приділити формуванню адекватних моделей ТН. Модель кожного з типів трансформаторів напруги сформовано відповідно до електричної схеми з'єднань обмоток, конструктивного виконання та режиму його роботи. Вимірювальний трансформатор напруги в розрахункову схему вводиться наступними параметрами: активними опорами та індуктивностями розсіяння кожної з обмоток; динамічною нелінійною індуктивністю по шляху основного магнітного потоку, якій відповідає вебер-амперна характеристика; коефіцієнтами трансформації; параметрами ємнісного дільника C_1 – C_2 тощо.

У цифровому комплексі [2] параметри кусково-лінійної апроксимації кривої намагнічування трансформатора, що характеризує динамічні індуктивності ($L\mu$), задані 10–16 точками, в інтервалі між якими лінеаризовані ділянки нелінійної індуктивності змінюють своє значення, а взаємне спряження лінійних відрізків кусково-лінійної апроксимації вольт-амперної характеристики намагнічування трансформатора в цифровому комплексі здійснюється автоматично.

Узагальнена розрахункова модель для принципової схеми (рис. 1) показана рис. 3. У ній всі різнотипні ТН умовно під'єднані до спільної секції шин. Під час дослідження ферорезонансних процесів це допустимо, оскільки спади напруг на ЛЕП, по яких протікають відносно невеликі ферорезонансні струми (2–3 А), практично не призводять до спотворення фазних та лінійних напруг на виводах трансформаторів напруги.

Нами було досліджено можливість виникнення ФРП в електромережі за появи та подальшого обриву замикання фази на землю. Причому, розглядалися варіанти під'єднання до електромережі декількох різнотипних трансформаторів напруги та встановлено діапазони ємнісних струмів в мережі, за яких в них виникають незгасаючі ФРП. Результати розрахунків наведено в таблиці, а на рис. 4 показано розрахункові осцилограми параметрів режиму схеми (рис. 1) для випадку паралельної роботи всіх типів ТН. Тут: 1 – еквівалентна розрахункова схема ЕРС енергосистеми з первинною обмоткою силового трансформатора Т з втратами в обмотці, баку, оливі, повітрі тощо; 2 – еквівалентна розрахункова схема вторинної обмотки силового трансформатора, з'єднаної в зірку, що живить навантаження 35 кВ; 3 – третинна обмотка силового трансформатора, з'єднана в трикутник, що живить шини 10 кВ; 4 – еквівалентна електрична схема магнітної системи силового трансформатора; 5 – еквівалентні схеми первинних обмоток відповідних трансформаторів напруги; 6 – еквівалентні електричні схеми магнітопроводів відповідних ТН; 7 – еквівалентні розрахункові схеми вторинних обмоток ТН з навантаженням та вітками, що імітують втрати в обмотках, баці, оливі, повітрі тощо; 8 – розрахункові схеми вторинних обмоток ТН, з'єднаних у розімкнений трикутник, з навантаженням; 9 – обмотка фази В ТН типу НАМИ з еквівалентною його магнітною системою; 10 – первинна обмотка, вторинна обмотка з ключем та своєю магнітною системою додаткового ТН, ввімкненого в нейтраль основного ТН типу НАМИТ; C_1 – C_2 – ємнісний дільник, що використовується в НТН, замість електромагнітного ТН фази В.

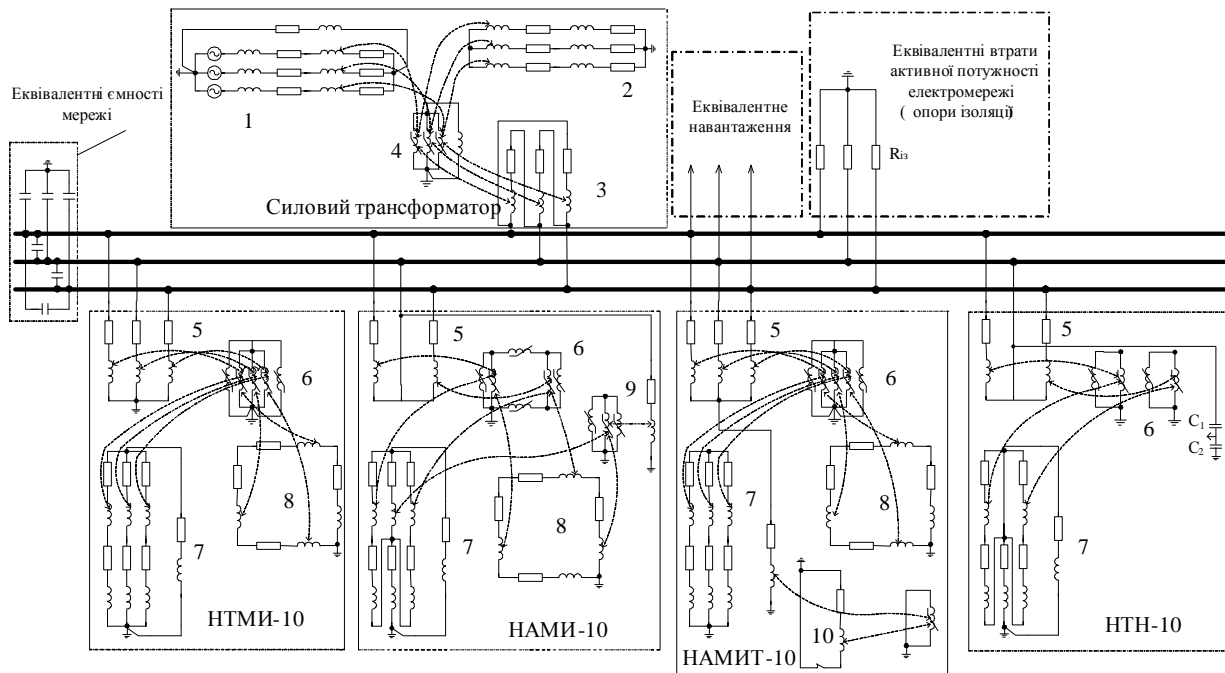


Рис. 3

Комбінації під'єднання ТН	Діапазон ємнісних струмів замикання на землю, А	Величини струмів первинної обмотки ТН, А			
		НАМИ		НАМИТ	
НТМИ+НАМИ	від 0,6А до 2,5А	1	0,002		
2×НТМИ+НАМИ	від 1 А до 5,2 А	1,13	0,002		
3×НТМИ+НАМИ	від 1,3 А до 7,8 А	1,11	0,0014		
2×НАМИ+НТМИ	від 0,1 А до 2,6 А	1,17	0,0011		
3×НАМИ+НТМИ	від 0,1 А до 2,6 А	1,2	0,0014		
НТМИ+НАМИТ	від 0,8 А до 2,9 А	0,807	0,1397		
2×НТМИ+НАМИТ	від 0,9 А до 5,6 А	1,06	0,159		
3×НТМИ+НАМИТ	від 1,5 А до 8,1 А	1,13	0,163		
НТМИ+НТН	від 0,5 А до 2,5 А	1,13	0,0057		
2×НТМИ+НТН	від 0,9 А до 5,2 А	1,17	0,0057		
3×НТМИ+НТН	від 1,3 А до 7,8 А	1,41	0,0057		
НАМИ+НТН	від 0,7 А до 1,4 А	1,48	0,0064		
2×НАМИ+НТН	від 1,3 А до 2,8 А	1,48	0,0057		
НАМИТ+НТН	0,4	0,594	0,009		
2×НАМИТ+НТН	0,8	0,594	0,009		

Як видно із осцилограм, у мережі виникає класичний ферорезонансний процес з частотою напруги u_0 в нейтралі мережі 25 Гц, при цьому в первинних обмотках ТН типу НТМИ протікають струми, що перевищують допустимі значення більш, ніж на порядок. Напруги фаз відносно землі на шинах підстанції спотворені накладанням напруги u_0 нейтралі мережі на фазні напруги мережі частотою 50 Гц, в результаті чого діючі значення напруг фаз відносно землі стають приблизно рівними ефективним значенням лінійних напруг електромережі. Такі напруги призводять до протікання підвищених струмів у первинних обмотках ТН типу НАМИТ, оскільки він за закороченої вторинної обмотки ДОТ (рис. 2, в) практично ідентичний ТН типу НТМИ і за своїми параметрами вони близькі між собою. Що стосується трансформаторів типів НАМИ та НТН, то струми в їхніх первинних обмотках залишаються практично незмінними порівняно з нормальним режимом, оскільки залишаються практично незмінними лінійні напруги на шинах підстанцій.

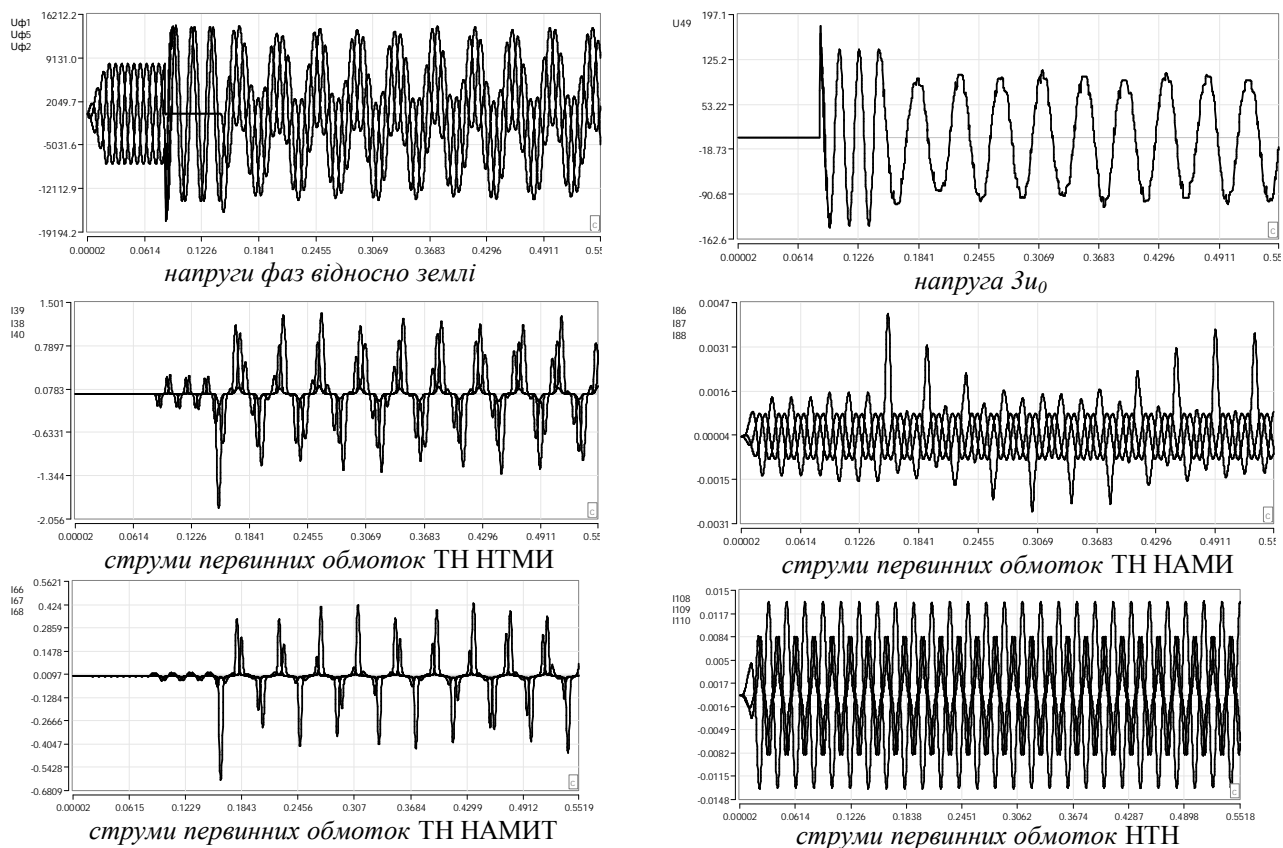


Рис. 4

Отже, визначальними з точки зору збурення ферорезонансних процесів в електромережі є ТН типу НТМИ (частково і НАМИТ), а кількість антирезонансних трансформаторів практично не впливає на загальну картину процесів для типової електромережі 10 кВ.

Висновки. Дослідження, проведені на запропонованій узагальненій розрахунковій математичній моделі електромережі 10 кВ з трансформаторами напруги НТМИ, НАМИ, НАМИТ і НТН показують, що визначальними для появи ФРП в мережах є ТН типу НТМИ, незалежно від кількості антирезонансних (нерезонуючих) ТН.

1. Журахівський А.В., Кенс Ю.А., Голяк О.Ю. Захист трансформатора напруги від пошкоджень при ферорезонансних процесах у мережах з ізолюваною нейтраллю. // Вісник ДУ "Львівська політехніка" "Електромеханічні та електроенергетичні системи". – 1997. – №340. – С. 40–47.
2. Равлик О., Гречин Т., Іваньків В. Цифровий комплекс для аналізу роботи та проектування пристроїв релейного захисту й автоматики // Вісник ДУ „ЛПР”. – 1997. – №340. – С. 96–101.
3. Степанов Ю.А., Овчинников А.Г. Трансформатори напруги контролю ізоляції 6–10 кВ. Сравнительный анализ моделей. // Новости электротехники. – 2006. – №6(24). – С. 1–6.
4. Стогний Б.С., Масляник В.В., Назаров В.В. и др Способы заземления нейтрали электрических сетей 3–35 кВ // Энергетика и электрификация. – 2002. – №2. – С. 23–27.
5. ГКД 34.20.507 – 2003. Технічна експлуатація електричних станцій і мереж. Правила. – Вид-во ДП "НТУКЦ" АсЕлЕнерго. – Київ, 2003. – 598 с.
6. Правила устройства электроустановок/Минэнерго СССР. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 648 с.
7. Программа моделирования электрических цепей FASTMEAN. www.fastmean.ru.
8. Трансформатор типа НАМИ – 10. ИАЯК.671241. 008 ТО.
9. Трансформатор типа НАМИТ – 10 – 2. УХЛ2. ИБЛТ. 671241. 021 ПС.

29.09.2009

Надійшла