

АНАЛІЗ СУБГАРМОНІЧНИХ ФЕРОРЕЗОНАНСНИХ ПРОЦЕСІВ НА ШИНАХ ВИЩОЇ НАПРУГИ ПІДСТАНЦІЇ 330 кВ

І.Ю. Тугай, мол. наук. співр.

Інститут електродинаміки НАН України, Київ,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

Розглянуто питання виникнення та розвитку субгармонічного ферорезонансу на шинах вищої напруги підстанції 330 кВ. Показано, що ці процеси супроводжуються перенапругами та надструмами, які зумовлюють небезпеку таких режимів на практиці. Наведено область небезпечних параметрів, яку доцільно використовувати для оцінки можливості виникнення субгармонічного ферорезонансного процесу в схемах розподільних пристроїв 330 кВ на практиці. Надано рекомендації щодо попередження розвитку субгармонічних ферорезонансних процесів. Бібл. 4, рис. 3.

Ключові слова: ферорезонанс, субгармоніки, перенапруги, надструми.

Ферорезонанс – складний нелінійний динамічний процес в електричних мережах. Для його виникнення необхідна наявність нелінійних індуктивностей з феромагнітним осердям та ємностей. Як нелінійні індуктивні елементи в електричних мережах можуть виступати силові трансформатори, електромагнітні трансформатори напруги, реактори. Ємнісними елементами є дільники напруги у вимикачах, поздовжні та поперечні конденсатори, ємнісні трансформатори напруги. За таких умов будь-які перехідні процеси, атмосферні перенапруги, підключення чи відключення трансформаторів, виникнення чи ліквідація коротких замикань, ремонт під напругою та інші збурення можуть викликати появу ферорезонансного процесу.

Дослідження осцилограм, що були записані в діючих електричних мережах, а також результати математичного моделювання за допомогою чисельного аналізу дають можливість класифікувати ферорезонансні процеси на чотири групи [2-4]:

1. Періодичний ферорезонанс на основній частоті. При такому процесі напруги та струми періодичні з періодом T , рівним періоду системи, та можуть мати різну кількість гармонік. Спектр сигналу є дискретним і складається з основної частоти системи f_0 та її вищих гармонічних ($2f_0$, $3f_0$ і т.д.).

2. Субгармонічний ферорезонанс. Напруги та струми є періодичними з періодом nT , який є кратним до періоду джерела живлення. Цей режим відомий як n -субгармонічний чи з гармонікою $\frac{1}{n}$. Субгармонічний резонанс має, як правило, непарний порядок. Спектр має як основну частоту f_0/n (де f_0 – частота джерела, n – ціле число), так і гармоніки (таким чином, частота f_0 теж може бути частиною цього спектра).

3. Квазіперіодичний ферорезонанс. Цей режим не є періодичним. Спектр гармонічних складових при такому режимі дискретний з частотами, які визначаються за виразом $nf_1 + mf_2$ (де n та m – цілі числа, а f_1/f_2 є ірраціональним дійсним числом).

4. Хаотичний режим. Відповідний спектр гармонічних складових є безперервним, тобто не пропускається жодна частота.

До недавнього часу найбільша увага приділялась періодичним ферорезонансним процесам на основній частоті. Однак після впровадження сучасних цифрових засобів реєстрації аномальних процесів в електричних мережах зараз фіксується також виникнення ферорезонансних процесів на частотах, відмінних від основної. Виникають ферорезонансні процеси на цих частотах головним чином при комутаційних операціях, зокрема, при включенні чи відключенні ненавантаженої установки або трансформаторної її частини під напругу, ски-

данні навантаження. Вони також спостерігаються і при деяких інших комутаціях, наприклад, під час відключення короткого замикання або при зтяжному спрацьовуванні обмежувачів перенапруг.

На практиці серед ферорезонансних явищ на неосновній частоті саме субгармонічний ферорезонанс виникає найчастіше. Наприклад, такий процес був зареєстрований на шинах підстанції "Північна" Центральної енергосистеми Національної енергетичної компанії "Укренерго". Вихідні дані для аналізу субгармонічних ферорезонансних процесів на шинах підстанції "Північна" були надані відповідними службами Центральної енергосистеми.

На рис. 1 наведено аварійні осцилограми, які зафіксував пристрій „Рекон” на шинах 330 кВ підстанції "Північна" Центральної енергосистеми.

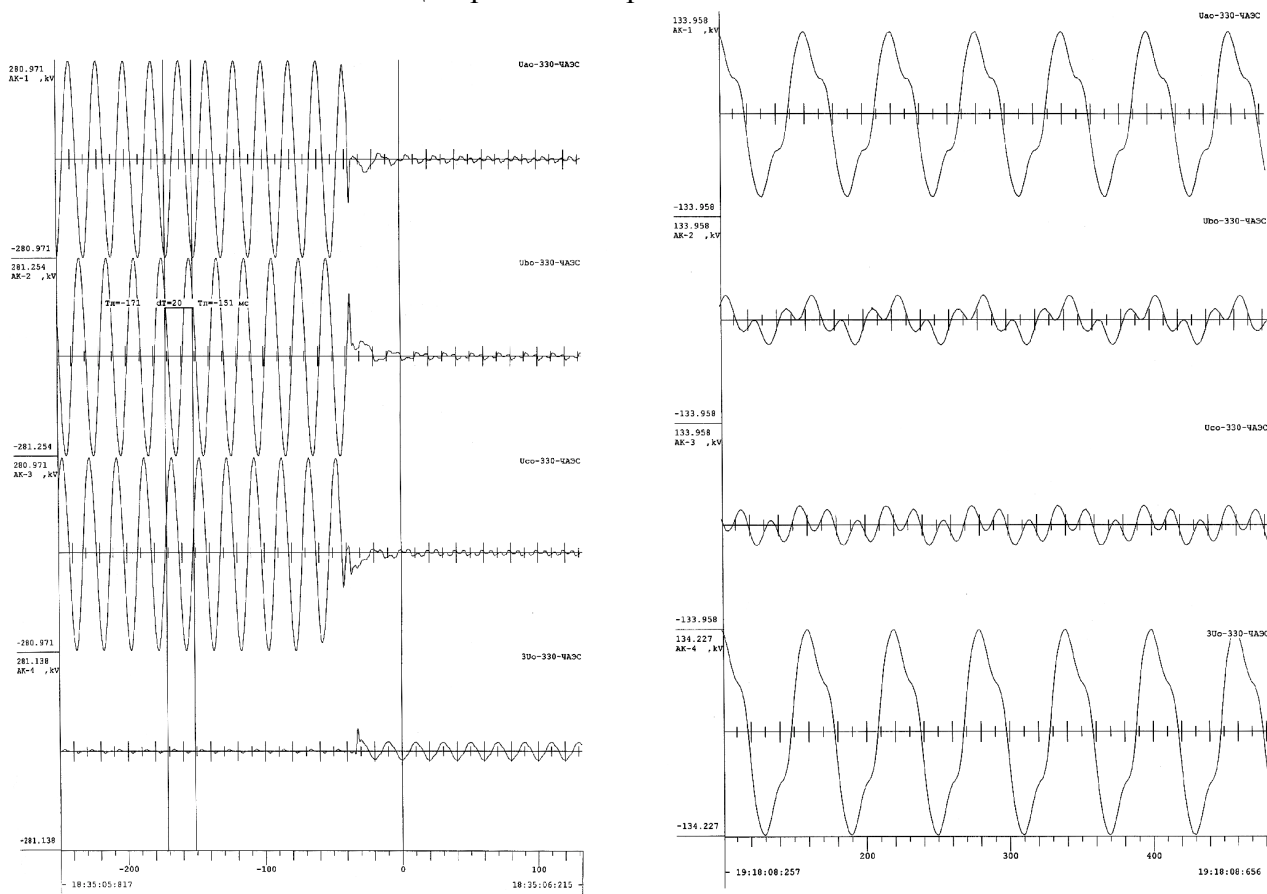


Рис. 1

На цій осцилограмі можна помітити, що до відключення на шинах була нормальна робоча напруга. Після відключення і короткого перехідного процесу напруга знизилась до залишкових значень, які були зумовлені наявністю дільників напруги у відключених вимикачах. Через деякий час на фазі А з'явилась напруга з амплітудою близько 70 % від робочої, причому в фазах В та С такого зростання напруг не спостерігалось. Але незважаючи на спотворену форму кривої напруг, можна чітко спостерігати її періодичність. Розрахунок показав, що частота коливань складала 16 Гц, тобто 1/3 від промислової частоти. Таким чином, на осцилограмі можна спостерігати типову картину розвитку субгармонічного ферорезонансного процесу.

Слід зазначити, що результати аналізу аварії були надіслані на Запорізький завод високовольтної апаратури, де було зроблено висновок про неприпустимість такого режиму для трансформатора напруги, оскільки при цьому магнітний потік в осерді перевищує розрахункові величини. Окрім цього було зазначено, що за осцилограмами, які були отримані на вторинній обмотці трансформатора напруги підстанції "Північна", принципово не можна оцінити величини перенапруг на первинній стороні, оскільки вони знаходяться поза зоною сертифікованих значень вимірювального трансформатора.

Як йшлося раніше, поділ частоти внаслідок ферорезонансу спостерігається в електричних колах, коли до них входять елементи зі сталлю. У даному випадку таким елементом став трансформатор напруги на третій секції шин підстанції "Північна". Ємностями, необхідними для утворення коливального контура, були ємності ліній електропередач, обладнання та шин підстанції стосовно землі, а також ємності дільників напруги високовольтних вимикачів. З метою дослідження субгармонічного ферорезонансного процесу на шинах підстанції "Північна" вихідна схема, що була надана службами Центральної енергосистеми, шляхом еквівалентних перетворень була приведена до схеми послідовного ферорезонансного кола (рис. 2).

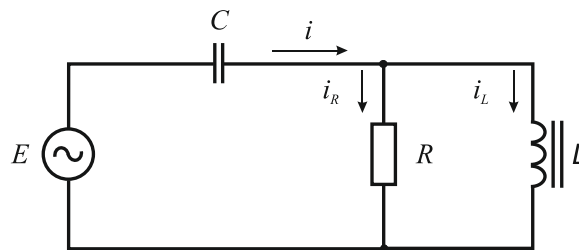


Рис. 2

На розрахунковій ферорезонансній схемі (рис. 2) представлено: джерело живлення E ; сумарна ємність дільників напруги вимикача, ємностей шин і приєднаного до шин обладнання C ; опір R , який враховує втрати в трансформаторі напруги підстанції та нелінійна індуктивність трансформатора L .

Метою моделювання ферорезонансу на субгармонічній частоті була оцінка усталених струму та напруги на індуктивності трансформатора напруги при розімкненому вимикачі.

За еквівалентною ферорезонансною схемою (рис. 2) складаємо диференціальне рівняння, що описує процес у колі:

$$\frac{d\Phi}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt = E \sin(\omega t + \delta), \quad (1)$$

де струм $i = i_R + i_L$.

Після перетворень рівняння (1) можна записати у вигляді

$$\frac{d^2\Phi}{dt^2} + \frac{1}{R \cdot C} \cdot \frac{d\Phi}{dt} + \frac{1}{C} \cdot i_L = E \cdot \cos(\omega t + \delta) \quad (2)$$

Слід зазначити, що субгармонічні коливання можуть виникнути тільки тоді, коли вони генеруються самим коливальним контуром, причому цей контур повинен мати частоту власних коливань меншою від частоти мережі. Власна частота ферорезонансної схеми залежить від результуючого магнітного потоку в сердечнику трансформатора Φ . Оскільки магнітний потік Φ містить гармонічні складові, вираз для потоку було записано у вигляді

$$\Phi = \Phi_1 \cos \omega t + \Phi_{1/3} \cos\left(\frac{\omega t}{3} + \theta_{1/3}\right), \quad (3)$$

де Φ_1 , $\Phi_{1/3}$ – амплітуди потоку; $\theta_{1/3}$ – зсув фаз між основною гармонікою та субгармонікою.

Струм i_L є періодичною функцією від часу, тому при розрахунку був розкладений у ряд Фур'є, причому розрахунковий вираз для i_L знаходився за допомогою кусочно-лінійної апроксимації вебер-амперної характеристики трансформатора напруги на третій секції шин підстанції "Північна".

Розв'язком рівняння (2) є значення амплітуд магнітного потоку Φ_1 та $\Phi_{1/3}$. Відповідно до цих значень і було розраховано напругу, оскільки вона є похідною від магнітного потоку в сердечнику трансформатора та струму.

Після проведення розрахунків було визначено, що струм в первинній обмотці трансформатора напруги при протіканні субгармонічного ферорезонансу на шинах підстанції "Північна" перебуває в межах 0,23 А. Слід зазначити, що з погляду термічної стійкості ізоляції трансформаторів напруги 330 кВ струм не повинен перевищувати 0,1 А. Таким чином, ферорезонанс на субгармонічній частоті може викликати не тільки перенапруги, але й надструми в трансформаторі напруг. Це пояснюється низькою частотою субгармонік і відповід-

но низьким значенням реактивного опору нелінійної індуктивності. Протікання таких надструмів при досить тривалому часі (у конкретному випадку більше 5 год) призводить до ушкодження ізоляції трансформатора напруги, що у свою чергу може призвести до розвитку важких системних аварій.

Слід зазначити, що для оцінки можливості пошкодження трансформаторів напруги в практичних ферорезонансних схемах розподільних пристроїв 330 кВ необхідно використовувати область небезпечних параметрів, у межах якої існує вірогідність виникнення субгармонічного ферорезонансу (рис. 3).

На рис. 3 представлено: C_e – еквівалентна ємність дільників, які шунтують розриви у вимикачах і через які відбувається живлення вимкнених шин розподільного пристрою 330 кВ; $C_{ш}$ – сумарна еквівалентна ємність вимкнених шин разом з ємністю встановленого обладнання.

Крім того, як відомо, автоматичне повторне включення шин і ліній розподільного пристрою може здійснюватися з урахуванням одного з трьох ознак: контроль відсутності напруги; контроль наявності напруги; контроль наявності напруги й синхронізму. Наявність напруги на шинах 330 кВ підстанції "Північна" під час субгармонічного ферорезонансу призводить до відмови автоматики повторного включення.

Для забезпечення правильності дії автоматики повторного включення шин розподільних пристроїв, де можливий субгармонічний ферорезонанс і не передбачені заходи щодо його запобігання або заглушення, має бути виконано таке:

- дія автоматики повторного включення шин (або випробування напругою) від обраного приєднання має бути дозволена як при відсутності робочої напруги на шинах, так і при наявності напруги, викликаній ферорезонансом;
- включення приєднань на систему шин від автоматики повторного включення після дії захисту шин, окрім призначеної для випробування напруги системи шин, має блокуватися (заборонятися) при наявності напруги, спричиненої ферорезонансними процесами;
- уставка реле контролю наявності напруги на шинах, задіяних у схемі автоматики повторного включення шин розподільних пристроїв, де виникає ферорезонанс, має бути збільшена у порівнянні з прийнятою із загальних міркувань.

Найбільш простим способом запобігання розвитку субгармонічного ферорезонансу є постійно ввімкнене навантаження відповідної величини на вторинних виводах трансформатора напруги, однак при цьому погіршуються вимірювальні властивості схеми [1]. Тому більш ефективним засобом запобігання субгармонічному ферорезонансу є застосування спеціальних захисних пристроїв, які не впливають на роботу схеми при нормальних умовах, але ефективно заглушують ферорезонансний процес при його виникненні. З метою відповідного

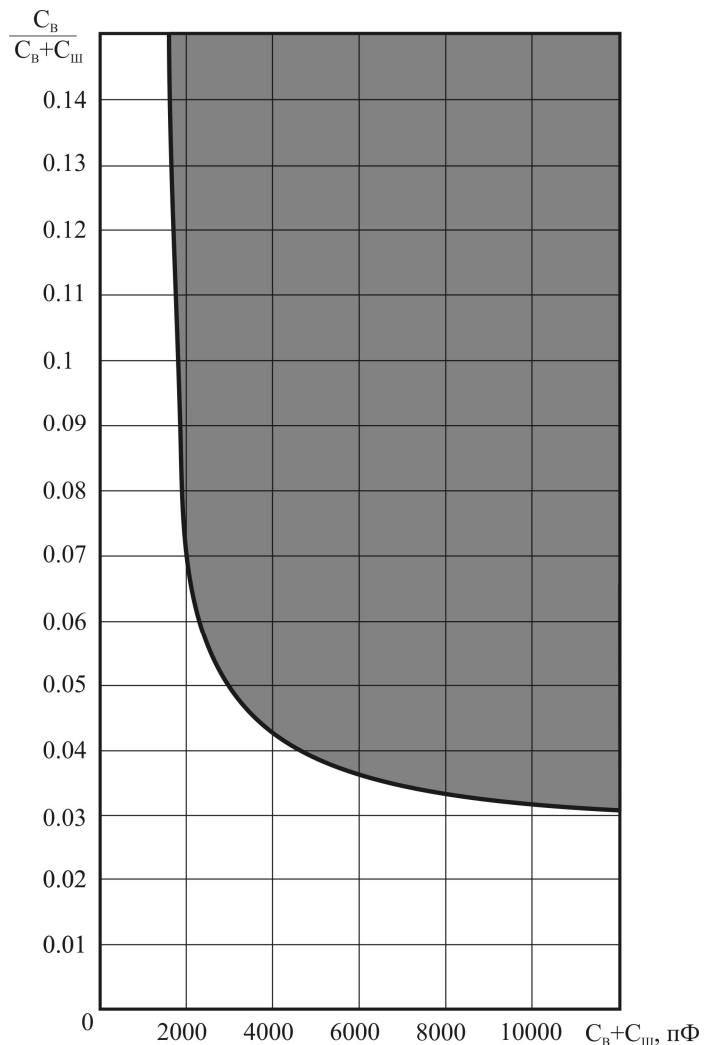


Рис. 3

налаштування пристрою необхідно визначити критерії початку ферорезонансного процесу на субгармонічній частоті, а також умови для його припинення.

1. Кузнецов В.Г., Тугай І.Ю. Моделирование трансформатора напруги при ферорезонансных процессах // Вісн. Нац. ун-ту «Львівська політехніка». Електроенергетичні та електромеханічні системи. – Львів, 2007. – С. 127–131.
2. Escudero M., Redfern M.A. Characterization of ferroresonant mode in HV substation with CB grading capacitors // International Conference on Power Systems Transients (IPST'05). – Montreal, Canada, June 19-23, 2005. – P. 1506–1513.
3. The Study of Ferroresonance. Part III // IEEE Trans. on Power Delivery. – Vol. 15, No. 1, January 2000. – P. 255–265.
4. Ferracci P. Ferroresonance // Cahier technique: Power Quality. – No.199, 2001. – P. 1–34.

УДК 621.311.4

І.Ю. Тугай, мл. науч. сотр.

Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина

Анализ субгармонических феррорезонансных процессов на шинах высшего напряжения подстанции 330 кВ

Рассмотрен вопрос возникновения и развития субгармонического феррорезонанса на шинах высшего напряжения подстанции 330 кВ. Показано, что эти процессы сопровождаются перенапряжениями и сверхтоками, определяющими опасность таких режимов на практике. Приведена область опасных параметров, которую целесообразно использовать для оценки возможностей возникновения субгармонического феррорезонансного процесса в схемах распределительных устройств 330 кВ на практике. Даны рекомендации по предупреждению развития субгармонических феррорезонансных процессов. Библ. 4, рис. 3.

Ключевые слова: феррорезонанс, субгармоники, перенапряжения, сверхтоки.

I.Yu. Tugai

Institute of electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,
Peremogy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

The analysis of subharmonic ferroresonance processes on the high-voltage bus of 330 kV substation

The problems of the subharmonic ferroresonance initiation and its development in the 330 kV substation bus are observed. It is shown, that these processes are followed by overvoltages and overcurrents, causing the danger of such modes in practice. For the estimation of subharmonic ferroresonant process in high-voltage switching centres the dangerous parameters domain is given. The recommendations for the prevention of subharmonic ferroresonant processes development are presented.

Key words: ferroresonance, overvoltages, overcurrents, subharmonics.

Надійшла 21.02.2011

Received 21.02.2011