

КУЗНЕЦОВ ВОЛОДИМИР

Інститут електродинаміки Національної академії наук України
<https://orcid.org/0000-0002-5399-2942>
e-mail: iednasu@gmail.com

КУЧАНСЬКИЙ ВЛАДИСЛАВ

Інститут електродинаміки Національної академії наук України
e-mail: kuchanskiyvladislav@gmail.com

КОШМАН ВСЕВОЛОД

Інститут електродинаміки Національної академії наук України
<https://orcid.org/0000-0001-6473-9478>
e-mail: skilldur@ukr.net

САБАРНО ЛЮДМИЛА

Інститут електродинаміки Національної академії наук України
<https://orcid.org/0000-0002-2153-2183>
e-mail: sabarno@ukr.net

СЕВАСТЮК ІГОР

Інститут електродинаміки Національної академії наук України
<https://orcid.org/0000-0003-1971-3345>
e-mail: sabarno@ukr.net

АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ ПІД ЧАС КОМУТАЦІЙ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАННЯ НАДВИСОКОЇ НАПРУГИ ТА АВТОТРАНСФОРМАТОРІВ

При експлуатації на ізоляцію електроустаткування та ліній впливає ряд факторів: тривала робоча напруга, короточасні перенапруги, температура та температурні коливання, вплив вологи та механічних зусиль та ін. Перенапруження, що виникають в електричних системах, є одним із факторів, суттєво що впливають на надійність електроустановок. Незважаючи на короточасність впливу, перенапруги характеризуються високою кратністю по відношенню до тривалої робочої напруги, впливом на всі електрично пов'язані елементи системи незалежно від місця виникнення, істотним посиленням процесів виникнення та розвитку дефектів, не пов'язаних із перенапругами, прискоренням старіння конструктивних вузлів. Найважливішим елементом будь-якого електроустаткування та будь-якої лінії є ізоляція, яка багато в чому визначає безпеку експлуатації, підходи до організації захисту від перенапруг. Для класу напруги 110 кВ і вище неухильно займають позиції електричні апарати та розподільні пристрої елегазового виконання, коли координація ізоляції з експлуатаційними впливами, захист від перенапруг має враховувати, крім основних ізоляційних конструкцій щодо землі ще, та особливості міжконтактної ізоляції комутаційних апаратів; вплив сусідніх фаз. Нові рішення в ізоляції трансформаторів, генераторів, двигунів, синхронних компенсаторів, шунтуючих, дугогасних, фільтруючих, струмообмежувальних реакторів вимагають обліку перенапруг, що впливають на ізоляцію між витками, шарами та котушками однієї фази. Удосконалення технічних засобів дозволяють з більшою високою ефективністю організувати захист від перенапруг. Перелічені проблеми недостатньо висвітлені у раніше виданих монографіях та статтях. Робота присвячена аналізу як традиційних, так і нових проблем аналізу та обґрунтування технологій захисту від перенапруг.

Ключові слова: резонансні перенапруги, електромагнітні перехідні процеси, ненавантажений режим роботи автотрансформатора, момент комутування.

**KUZNETSOV VOLODYMYR, KUCHANSKY VLADYSLAV, KOSHMAN VSEVOLOD,
SABARNO LYUDMILA, SEVASTYUK IHOR**

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine

ANALYSIS OF ELECTROMAGNETIC TRANSIENT PROCESSES DURING COMMUTING OF EXTRA-HIGH VOLTAGE POWER TRANSMISSION LINES AND AUTOTRANSFORMERS

During operation, the insulation of electrical equipment and lines is affected by a number of factors: long-term operating voltage, short-term overvoltages, temperature and temperature fluctuations, exposure to moisture and mechanical stress, etc. Overvoltages that occur in electrical systems are one of the factors that significantly affect the reliability of electrical installations. Despite the short-term impact, overvoltages are characterized by a high multiplicity in relation to the long-term operating voltage, an impact on all electrically connected elements of the system regardless of the place of occurrence, a significant increase in the processes of occurrence and development of defects not associated with overvoltages, and accelerated aging of structural units. The most important element of any electrical equipment and any line is insulation, which largely determines the safety of operation, approaches to organizing protection against overvoltages. In the voltage class of 110 kV and above, electrical apparatus and switchgear of gas-insulated design are steadily taking their positions, when the coordination of insulation with operational effects, protection against overvoltage should take into account, in addition to the main insulating structures relative to the ground, also the features of the insulation of switching devices, the influence of adjacent phases. New solutions in the insulation of transformers, generators, motors, synchronous compensators, shunt, arc-suppressing, filtering, current-limiting reactors require taking into account the overvoltage affecting the insulation between turns, layers and coils of one phase. Rethinking and more accurate understanding of the processes, improving technical means allow for more efficient organization of protection against overvoltage.

The listed problems are not sufficiently covered in previously published monographs and manuscripts. This brochure is devoted to the analysis of both traditional and new problems of analysis and justification of technologies for protection against overvoltage.

Keywords: resonant overvoltages, electromagnetic transients, unloaded mode operation of the autotransformer, switching moment.

Вступ

Аномальні резонансні перенапруги на вищих гармонічних складових виникають через появу несинусоїдальних режимів роботи магістральних електричних мереж. Розглянутий тип перенапруги належить до тривалих внутрішніх перенапруг, які мають характеристики, що можуть перевищувати регламентовані гранично допустимі значення. Типовим прикладом несинусоїдного режиму роботи є режим ввімкнення лінії на ненавантажений автотрансформатор із залишковим намагнічуванням осердя. Потрібно зазначити, що цей режим супроводжується не тільки резонансними перенапругами, але і кидками струмів намагнічення. Як результат, під час експлуатування ліній електропередавання надвисокої напруги потрібні застосовувати сучасні ефективні заходи для успішного вирішення двох завдань: притуплення струмів намагнічення та резонансних перенапруг [1-4].

Проаналізовано вплив залишкової намагнічування ненавантаженого автотрансформатора на резонансні перенапруги та кидки струмів намагнічування. Для усунення залишкового намагнічування автотрансформатора запропоновано комплекс ефективних заходів. Питання про появу другої гармоніки лінії передавання є одним із найскладніших у сучасній теоретичній електротехніці. Незважаючи на досить велику кількість публікацій на цю тему, причини та умови появи цієї гармоніки все ще не зовсім зрозумілі. Більше того, опубліковані роботи різних авторів суперечать один одному в деяких питаннях [5-8].

Проблема вивчення резонансних перенапруг, виникаючих під час ввімкнення ненавантаженого автотрансформатора, полягає в тому, що на сьогодні немає точної відповіді на питання про причину появи такого типу перенапруг.

У разі ввімкнення ненавантаженого автотрансформатора відбудеться автопараметричний резонанс та коливання, виникаючі у системі через періодичні зміни нелінійної індуктивності-осердя автотрансформатора. Намагнічування автотрансформатора під час ввімкнення вважають найсприятливішим випадком, спричиняючи великі значення кидків струмів намагнічування [1,5,7]. Під час вимкнення автотрансформатора напруга намагнічування дорівнює нулю, струм намагнічення зменшується до нуля, тоді як магнітна індукція змінюється залежно від характеристики намагніченості осердя. Це зумовлює наявність залишкової індукції в осерді під час вимкнення автотрансформатора.

У мережах різного призначення та різних класів напруги практично завжди є елементи, що містять феромагнітні осердя. Тому в будь-якій схемі є принципова можливість появи ферорезонансних процесів на промисловій частоті, на вищих або нижчих гармоніках. Для цих процесів необхідна наявність двох умов: струми повинні бути достатні для переходу кривих намагнічування за коліно насичення, а вхідний опір мережі, підключеної до затискачів обмотки повинно мати ємнісний характер. Активні складові вхідних опорів як підключеної мережі, так і самої обмотки демпфують ферорезонансні коливання. Тому найбільш небезпечними щодо ферорезонансних перенапруг є режими холостого ходу або переважання реактивного навантаження [9].

У симетричних трифазних режимах мережі, що є у схемі ємнісні елементи (ділянки повітряних і кабельних ліній, батареї конденсаторів для поліпшення $\cos\varphi$, власна вхідна ємність обмоток щодо землі) зазвичай виявляються зашунтованими низькоомним вхідним опором мережі живлення, яке завжди має індуктивний характер. Тому в нормальних режимах ферорезонанс мало ймовірний. силового трансформатора чи електромагнітного трансформатора напруги [4,5].

Метою роботи є дослідження резонансних перенапруг в блокових схемах, що виникає при комутаціях навантаженого блоку «автотрансформатор - лінія НВН» в умовах неповнофазного режиму. Для реалізації поставленої цілі було розроблено розрахункову модель, виконано розрахункові експерименти та визначено способи унеможливлення небезпечного аномального режиму.

Розрахунковий аналіз РП з використанням чисельних методів ускладнений тим, що в ньому беруть участь нелінійні елементи (індуктивність намагнічування трансформатора, ОПН, коронний розряд на лінії електропередавання). Наявність у розрахунковій схемі нелінійних елементів зумовлює застосування чисельних методів розрахунку у часовій області [1-4].

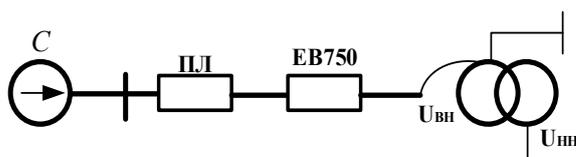


Рис. 1. Блочна схема "автотрансформатор-лінія"

Розрахунки проводилися для блокової схеми "автотрансформатор-лінія", представленої на рис. 1. Для розрахунків використано параметри автотрансформатора АОДЦТН 417000/750/330/10,5. Довжина лінії

750 кВ варіювалася в межах 150-500 км [9-12]. Слід зазначити, що довжина лінії безпосередньо впливає як на значення перенапруг, так і на умови їх виникнення, проте (що згодом підтвердили розрахунки), якщо при конкретній довжині лінії існують умови для виникнення РП, то основні закони його поведінки однакові для всіх схем з іншими довжинами ліній. У силу цього дослідження РП в блокових схемах

"автотрансформатор - лінія" були проведені для конкретної довжини лінії, за якої виконуються умови для розвитку РП.

На рис. 1 $U_{ВН}$, $U_{СН}$, $U_{НН}$ — виводи обмоток вищої, середньої та нижчої напруги автотрансформатора АТ-1. С — передавальна енергосистема, АТ-1 — автотрансформатор АОДТЦН 417000/750/500/10,5, В750, В330 – елегазові вимикачі номінальної напруги 750 и 330 кВ, ПЛ 330 — повітряна лінія напругою 330 кВ.

З ціллю виявлення режимів, що призводять до виникнення РП, на розробленій математичній моделі було проведено розрахунки наступних комутацій:

- однофазне включення блоку АТ-ПЛ під напругу на холостому ході лінії;
- неповнофазне включення блоку АТ-ПЛ під напругу двома фазами (відмова вимикача в одній із фаз) на холостому ході лінії та під навантаженням;
- неповнофазне відключення блоку АТ-ПЛ двома фазами (відмова вимикача в одній із фаз) на холостому ході лінії.

Так як режим роботи обмотки низької напруги автотрансформатора впливає на умови розвитку перенапруг на вищих гармонійних, були здійснені розрахунки різних видів комутацій ЛЕП НВН під час номінального навантаження обмотки ПН.

Електромагнітні перехідні процеси за умов комутацій автотрансформатора

Механізм явища самозбудження другої гармоніки, поки недостатньо вивчено, хоча опубліковано багато теоретичних праць [2,4,10,11]. На жаль, жодна з цих відомих робіт не займається вивченням фізичної природи явищ, що відбуваються, тоді як з'ясування цієї сутності є єдиним способом розробити інженерний підхід до явища та способів його притлумлення. Основним недоліком перших досліджень є наявність занадто фундаментального теоретичного обґрунтування природи виникнення резонансних коливань у схемах з нелінійною індуктивністю. Було зроблена значна упередженість щодо фізичної природи та класифікації резонансних явищ в електричних мережах та системах. Щодо перехідних процесів в електричних колах з нелінійною індуктивністю, то їх взагалі практично не вивчено. Невідомо, які початкові умови призводять до виникнення перенапруг на вищих гармонічних складових, а які ні.

Істотною потребою під час вимкнення трансформаторів є те, що через малі струми намагнічування гасіння дуги відбувається не при нульових значеннях струму, в результаті чого енергія магнітного поля переходить в енергію електричного поля, тобто підвищується напруга і, отже, виникають перенапруги.

Резонансний контур, що утворюється при підключенні фази лінії НВН на ненавантажений АТ, наведений на (рис. 2). На ньому прийняті наступні позначення елементів заступної схеми:

L_C – еквівалентна індуктивність електроенергетичної системи; L_L – індуктивність повітряної лінії; L_P – індуктивність ШР; C_M – ємність фази ПЛ відносно землі; C_M – ємність між фазами ПЛ; ω – кутова швидкість [3].

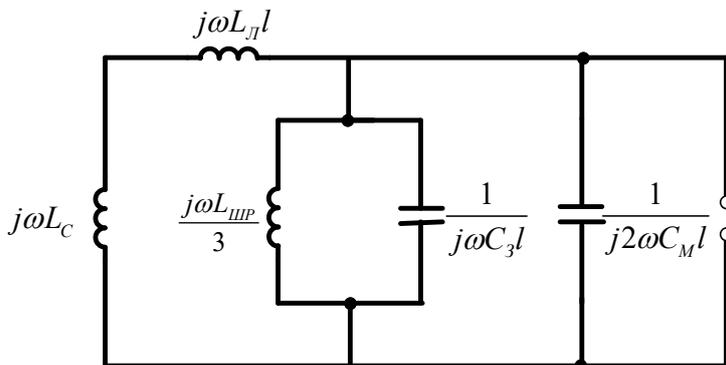


Рис. 2 . Схема вимкнення трансформатора [3]

У момент обриву дуги у вимикачі виникає коливальний контур LC, напруга на ємності U_C дорівнює напрузі на індуктивності U_L . Приймаємо, що дуга згасла під час певних середніх значеннях струму та напруги: $i = i_{ср}$, $U = U_{ср}$ у момент $t = 0$.

Запишемо рівняння для цього контуру за законом Кірхгофа:

$$U_C + U_L = 0, U_C + L \frac{di}{dt} = 0. \quad (1)$$

Ємнісний струм можна знайти з виразу:

$$i_C = C \frac{dU_C}{dt}. \quad (2)$$

Продиференціюємо (2):

$$\frac{di_C}{dt} = C \frac{d^2 U_C}{dt^2}. \quad (3)$$

Підставимо (3) у вираз (1) і отримаємо:

$$LC \frac{d^2 U_C}{dt^2} + U_C = 0, \frac{d^2 U_C}{dt^2} + \frac{1}{LC} U_C = 0 \quad (4)$$

Для вирішення рівнянь (4) складемо характеристичне рівняння:

$$\alpha^2 + \frac{1}{LC} = 0, \quad (5)$$

де α – корінь характеристичного рівняння.

Рівняння (5) має рішення:

$$U_C = A_1 e^{\alpha t} + A_2 e^{-\alpha t}. \quad (6)$$

Знайдемо постійні A_1 та A_2 , для цього продиференціюємо (7):

$$\frac{dU_C}{dt} = \alpha A_1 e^{\alpha t} + (-A_2 e^{-\alpha t} \alpha). \quad (7)$$

Помножимо (7) на C :

$$C \frac{dU_C}{dt} = C \alpha A_1 e^{\alpha t} - C \alpha A_2 e^{-\alpha t} \quad (8)$$

З врахуванням (2) рівняння (8) матиме вигляд

$$i_C = C \alpha A_1 e^{\alpha t} - C \alpha A_2 e^{-\alpha t}. \quad (9)$$

У початковий момент часу ($t = 0$) ємнісний струм дорівнює середньому значенню ($i_C = i_{cp}$), тому

$$i_{cp} = C \alpha A_1 - C \alpha A_2, \quad A_1 - A_2 = \frac{i_{cp}}{\alpha C}.$$

(10)

Підставивши в рівняння (6) $t = 0$ і $U = U_{cp}$, отримаємо

$$U_{cp} = A_1 + A_2. \quad (11)$$

Перетворимо вираз (11):

$$\alpha^2 = -\frac{1}{LC}, \quad \alpha = \sqrt{-\frac{1}{LC}}, \quad \alpha = j \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \alpha = j\omega. \quad (12)$$

Підставимо в рівняння (6) вираз (12):

$$U_C = A_1 e^{j\omega t} + A_2 e^{-j\omega t}. \quad (13)$$

Застосуємо формулу Ейлора

$$U_C = A_1 \cos \omega t + j A_1 \sin \omega t + A_2 \cos \omega t - j A_2 \sin \omega t$$

або $U_C = (A_1 + A_2) \cos \omega t + j(A_1 - A_2) \sin \omega t \quad (14)$

Підставив у (14) вирази (10) і (11), отримаємо

$$U_C = U_{cp} \cos \omega t + j \frac{i_{cp}}{\alpha C} \sin \omega t \quad (15)$$

Перетворивши множник $j \frac{i_{cp}}{\alpha C}$ у формулі (15) з врахуванням (12)

$$j \frac{i_{cp}}{\alpha C} = j \frac{i_{cp}}{j C} \sqrt{LC} = i_{cp} \sqrt{\frac{L}{C}} = i_{cp} Z,$$

де $\sqrt{\frac{L}{C}} = Z$ – опір контуру.

Тоді вираз (15) матиме вигляд

$$U_C = U_{cp} \cos \omega t + i_{cp} Z \sin \omega t. \quad (16)$$

Найдемо максимальне значення цієї величини, для цього прирівняємо похідну виразу (16) к нулю:

$$\frac{dU_C}{dt} = -\omega U_{cp} \sin \omega t + \omega i_{cp} Z \cos \omega t, \quad -\omega U_{cp} \sin \omega t + \omega i_{cp} Z \cos \omega t = 0,$$

$$i_{cp} Z \cos \omega t = U_{cp} \sin \omega t \quad \frac{i_{cp} Z}{U_{cp}} = \frac{\sin \omega t}{\cos \omega t} = \operatorname{tg} \omega t. \quad (17)$$

Напруга U_C буде максимальною за умов $\operatorname{tg} \omega t = \frac{i_{cp} Z}{U_{cp}}$

Виразимо $\sin \omega t$ та $\cos \omega t$ через $\operatorname{tg} \omega t$:

$$\sin \omega t = \frac{\operatorname{tg} \omega t}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \omega t}} = \frac{\frac{i_{cp} \sqrt{L}}{U_{cp} \sqrt{C}}}{\sqrt{1 + \frac{i_{cp}^2 L}{U_{cp}^2 C}}} = \frac{i_{cp} \sqrt{\frac{L}{C}}}{\sqrt{U_{cp}^2 + i_{cp}^2 \frac{L}{C}}}, \quad (18)$$

$$\cos \omega t = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \omega t}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{i_{cp}^2 L}{U_{cp}^2 C}}} = \frac{U_{cp}}{\sqrt{U_{cp}^2 + i_{cp}^2 \frac{L}{C}}}. \quad (19)$$

Тоді, підставивши (18) та (19) в (16), отримаємо:

$$U \frac{U_{cp}^2}{\sqrt{U_{cp}^2 + i_{cp}^2 \frac{L}{C}}} \frac{i_{cp}^2 \frac{L}{C}}{\sqrt{U_{cp}^2 + i_{cp}^2 \frac{L}{C}}} \frac{U_{cp}^2 + i_{cp}^2 \frac{L}{C}}{\sqrt{U_{cp}^2 + i_{cp}^2 \frac{L}{C}}_{max}},$$

$$U \sqrt{U_{cp}^2 + i_{cp}^2 \frac{L}{C}}_{max}. \quad (20)$$

З формули (20) видно, що чим більше індуктивність і менше ємність, тим більше величина перенапруги.

Однофазне включення блоку АТ-ПІЛ під напругу (рис. 3) - дана комутація є позаштатною і може спостерігатися при мимовільному включенні вимикача в одній із фаз через несправність автоматики вимикача. В даному випадку при подачі напруги, наприклад, фази А блоку АТ-ПІЛ спостерігається короткочасний перехідний процес, що супроводжується перенапругами на фазі А і загасаючий протягом

першого напівперіоду промислової частоти [9-11]. На сусідніх фазах при цьому після згасання коливань вищих гармонік встановлюються напруги, синфазні з напругою у фазі, обумовлені міжфазними ємнісними зв'язками.

Аналогічна картина спостерігається при однофазному включенні вимикачем фази блоку АТ-ПЛ (рис. 4). Напруги, які встановилися після загасання перехідного процесу на сусідніх фазах також синфазні, але в даному випадку однакові за значенням через рівні міжфазних відстаней і як наслідок рівності взаємних ємностей між фазами В - А і В - С. Даний режим, як і попередній, не небезпечний для ізоляції високовольтного обладнання, але може бути неприйнятним для споживача.

Заходи притуплення резонансних перенапруг

Включення активного опору в розсітку трикутника обмоток НН автотрансформатора дозволяє зменшити амплітуди і прискорити згасання коливань вищих гармонік, що виникають на відключених фазах, внаслідок зниження струму нульової послідовності. Розрахунки показують, що зі збільшенням опору кратності перенапруг знижуються від 1,5 за відсутності опору до 1,3 при опорі 0,1 Ом. При опорі 5 Ом, перенапруг немає, коливання вищих гармонік тривають трохи більше напівперіоду промислової частоти, після чого напруга встановлюється лише на рівні 0,8.

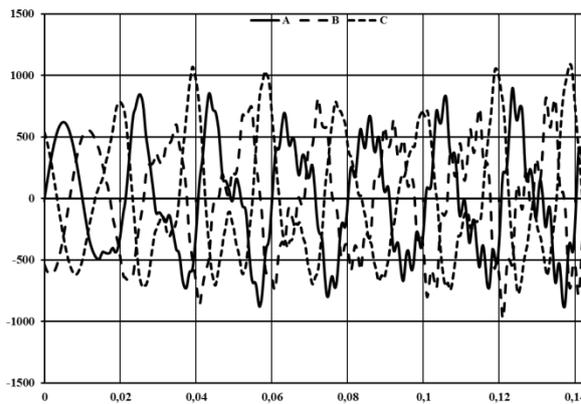


Рис. 3. Фазна напруга на стороні СН автотрансформатора при включенні під напругу фази А на холостому ході лінії.

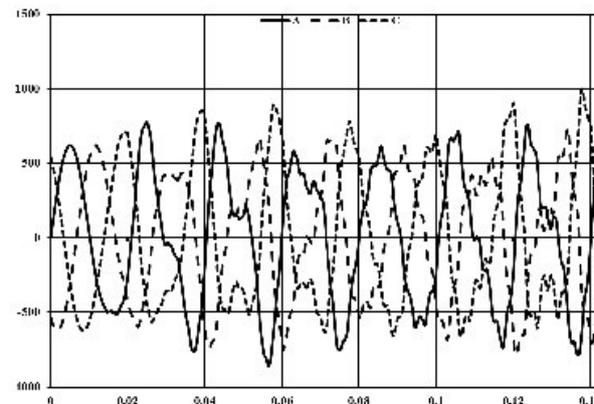


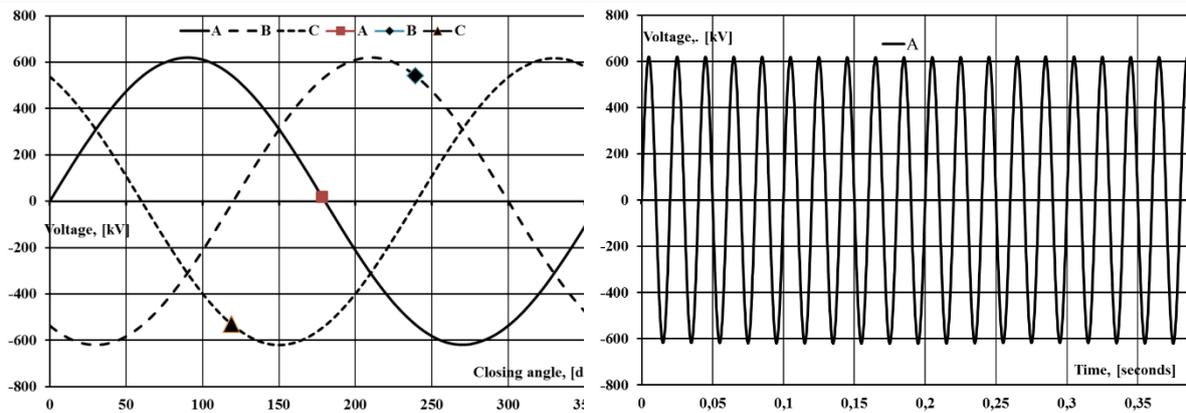
Рис. 4. Фазні напруги на стороні СН при включенні під напругу фази на холостому ході лінії.

При збільшенні опору також знижується постійна згасання вільних коливань вищих гармонік. Якщо при опорі 0,1 Ом квазівстановлене значення досягається більш ніж за 10 періодів, то при опорі 1,0 Ом квазівстановлене значення досягається за 4-5 періодів промислової частоти.

У робочому режимі включений у трикутник обмоток НН резистор ніяк не впливає на симетрію фазних напруг, енергія ж виділяється в ньому незначна і обумовлена нульовою складовою струму холостого ходу і регламентованою нормативними документами нульової складової, що виникає через несиметрію фазних напруг. Значення цього струму вбирається у 0,5% від номінального струму трансформатора.

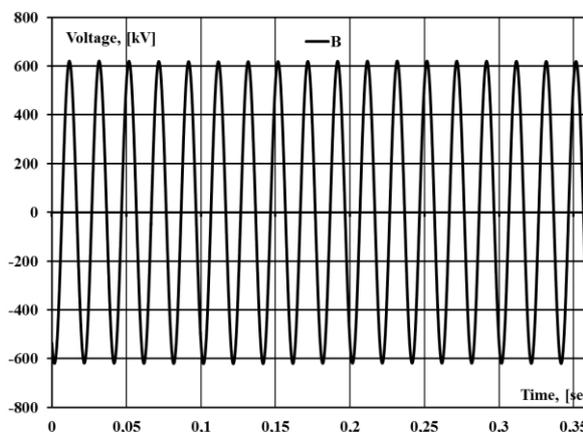
Як показали результати досліджень, що наведені в другому розділі, перенапруги при комутації ненавантаженого АТ суттєво залежать від моменту його включення [1-4]. Таким чином АП можуть бути обмежені при використанні блоку керованої комутації, налаштованого на замикання контактів поблизу від необхідного значення струму холостого ходу АТ ("кероване включення"). В загальному випадку керована комутація являє собою спосіб усунення шкідливих перехідних процесів за допомогою керованих в часі операцій комутації. Команди включення або відключення на вимикач виконуються таким чином, щоб замикання контактів відбувалося в сприятливий момент часу по відношенню до фазового кута. В даний час точність керованої комутації складає ± 2 мс, що недостатньо для вимикання КЗ, але для ліквідації перенапруг такий розкид не є критичним [12].

З метою оцінки ефективності заходу розглянемо дві ЛЕП НВН з однаковими параметрами та характеристиками. Кожна з цих двох ліній комутується своїм вимикачем. Перша лінія комутується вимикачем з некерованою комутацією, а друга - вимикачем з керованою комутацією. Для обох ліній моментом подачі команди на замикання вимикача є момент переходу струму через нуль. Замикання полюсів вимикача з некерованою комутацією відбувається одразу в момент подачі команди. З метою дослідження впливу керованої комутації на перенапруги необхідно попередньо розробити спеціальний блок для імітаційної моделі, що подає зовнішню команду на вимикач [12]. Результати моделювання у на розробленому підході наведено на рис. 5.

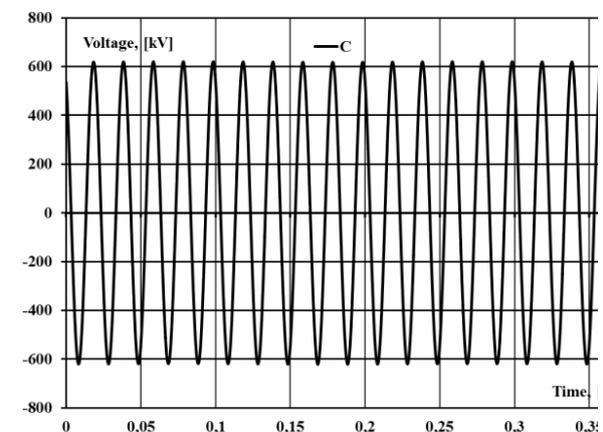


а) Фазні напруги А, В, С з позначеними точками комутації у відповідному випадку 1 а) Фази напруги синусоїди А, В, С з позначеними точками комутації

б) Крива напруги фази А у момент перемикання $A = 178,2$ [градусів] або $A = 0,0099$ [секунди]



в) Крива напруги фази В у момент переключення $B = 239,4$ [градусів] або $B = 0,0133$ [секунди]



г) Крива напруги фази С у момент перемикання $C = 118,8$ [градусів] або $C = 0,0066$ [секунди]

Рис. 5. Синусоїдальні напруги з рекомендованими моментами перемикання. Випадок 3: $A = 178,2$ [градуси], $B = 239,4$ [градусів], $C = 118,8$ [градусів].

Висновки

При проектуванні об'єктів, що будуються або реконструюються, необхідно проводити ретельне комп'ютерне моделювання всіх аномальних режимів і процесів з метою вибору як захисної, так і комутаційної апаратури. У ряді випадків може виникнути потреба висунути нові вимоги до цих апаратів, які можуть бути виконані їх виробниками. Виявлено найбільш небезпечні аварійні режими з огляду умов виникнення резонансних явищ у блокових схемах (двофазні відключення/вмикання ненавантаженої лінії (відмова третьої фази)). Розглянуто методи захисту від резонансу (розмикання трикутника обмотки НН автотрансформатора, з'єднання цих обмоток у зірку, включення в розсічення трикутника обмоток НН резистора). Показано, що перші два методи захисту є найбільш ефективними, проте підключення резистора до обмоток НН автотрансформатора є кращим.

Література

1. Зайцев, С. О., Кучанський, В. В., & Гулько, І. О. (2021). Підвищення експлуатаційної надійності та ефективності роботи електричних мереж та електроустаткування. Вінниця: ГО «Європейська наукова платформа».
2. Kuchansky, V., & Rubanenko, O. (2020). Influence assessment of autotransformer remanent flux on resonance overvoltage. *UPB Scientific Bulletin, Series C: Electrical Engineering*, 82(3), 233–250.
3. Кузнецов, В. Г., Тугай, Ю. І., Кучанський, В. В., Лиховид, Ю. Г., & Мельничук, В. А. (2018). Резонансні перенапруги у несинусоїдному режимі магістральної електричної мережі. *Електротехніка та електромеханіка*, (2), 69–73. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2018.2.12>
4. Кучанський, В. В. (2017). Керівана комутація елегазовими вимикачами в магістральних електричних мережах. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*, (48), 38–43.
5. Emanuel, A. E., & Orr, J. A. (2007). Current harmonics measurement by means of current transformer. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 22(3), 1318–1325.

6. Kaczmarek, M., & Nowicz, R. (2010). Application of instrument transformers in power quality assessment. *Modern Electric Power Systems Conference*, 34–38.
7. Song, Y., Zhang, Y., & Li, Y. (2017). Simulation analysis of inrush current of three-phase transformer based on Matlab. *Control and Decision Conference IEEE*, 3983–3985.
8. Opana, S., Avor, J. K., & Chang, C.-K. (2018). High accuracy and saturation free current transformers for medium voltage networks of nuclear power plants. *2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 1715–1719.
9. Stognii, B. S., Kyrilenko, O. V., Prahovnyk, A. V., & Denysiuk, S. P. (2012). The evolution of intelligent electrical networks and their prospects in Ukraine. *Technical Electrodynamics*, (5), 52–67.
10. Mostafa, H. E., Shalltoot, A. M., & Youssef, H. K. M. (2011). Evaluation of current transformer performance in the presence of remnant flux and harmonics. *2011 IEEE Jordan Conference on Applied Electrical Engineering and Computing Technologies (AEECT)*, 1–6.
11. Ajai, F. B., Sanaye-Pasand, M., Davarpanah, M., Rezaei-Zare, A., & Iravani, R. (2011). Compensation of the current-transformer saturation effects for digital relays. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 26(4), 2531–2540.
12. Тугай, Ю. І., Кучанський, В. В., & Лиховид, Ю. Г. (2019). Вплив початкових умов на перехідні процеси при комутаціях автотрансформаторів. *Вісник Харківського національного технічного університету імені Петра Василенка «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України»*, (203), 59–60.

References

1. Zaitsev, Ye. O., Kuchanskyi, V. V., & Hunko, I. O. (2021). Pidvyschennia ekspluatatsiinoi nadiinosti ta efektyvnosti roboty elektrychnykh mrezh ta elektroustatkuvannia. Vinnytsia: HO «Yevropeiska naukova platforma».
2. Kuchanskyi, V., & Rubanenko, O. (2020). Influence assessment of autotransformer remanent flux on resonance overvoltage. *UPB Scientific Bulletin, Series C: Electrical Engineering*, 82(3), 233–250.
3. Kuznetsov, V. H., Tuhai, Yu. I., Kuchanskyi, V. V., Lykhovyd, Yu. H., & Melnychuk, V. A. (2018). Rezonansni perenaprui u nesynusoidnomu rezhymy mahistralnoi elektrychnoi mrezhzi. *Elektrotehnika ta elektromekhanika*, (2), 69–73. <https://doi.org/10.20998/2074-272X.2018.2.12>
4. Kuchanskyi, V. V. (2017). Kerovana komutatsiia elehozovymy vumykachamy v mahistralnykh elektrychnykh mrezhakh. *Pratsi Instytutu elektrodynamiky NAN Ukrainy*, (48), 38–43.
5. Emanuel, A. E., & Orr, J. A. (2007). Current harmonics measurement by means of current transformer. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 22(3), 1318–1325.
6. Kaczmarek, M., & Nowicz, R. (2010). Application of instrument transformers in power quality assessment. *Modern Electric Power Systems Conference*, 34–38.
7. Song, Y., Zhang, Y., & Li, Y. (2017). Simulation analysis of inrush current of three-phase transformer based on Matlab. *Control and Decision Conference IEEE*, 3983–3985.
8. Opana, S., Avor, J. K., & Chang, C.-K. (2018). High accuracy and saturation free current transformers for medium voltage networks of nuclear power plants. *2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 1715–1719.
9. Stognii, B. S., Kyrilenko, O. V., Prahovnyk, A. V., & Denysiuk, S. P. (2012). The evolution of intelligent electrical networks and their prospects in Ukraine. *Technical Electrodynamics*, (5), 52–67.
10. Mostafa, H. E., Shalltoot, A. M., & Youssef, H. K. M. (2011). Evaluation of current transformer performance in the presence of remnant flux and harmonics. *2011 IEEE Jordan Conference on Applied Electrical Engineering and Computing Technologies (AEECT)*, 1–6.
11. Ajai, F. B., Sanaye-Pasand, M., Davarpanah, M., Rezaei-Zare, A., & Iravani, R. (2011). Compensation of the current-transformer saturation effects for digital relays. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 26(4), 2531–2540.
12. Tuhai, Yu. I., Kuchanskyi, V. V., & Lykhovyd, Yu. H. (2019). Vplyv pochatkovykh umov na perekhidni protsesy pry komutatsiiah avtotransformatoriv. *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu imeni Petra Vasylenka «Problemy enerhozabezpechennia ta enerhozberezhennia v APK Ukrainy»*, (203), 59–60.