

ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ В РОЗПОДІЛЬЧИХ ПРИСТРОЯХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ З ЕЛЕГАЗОВИМИ ВИМИКАЧАМИ

Ю.І. Тугай¹, докт. техн. наук, В.А. Мельничук²

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

2 – Київський енергетичний коледж,
вул. І. Сергієнка, 7, Київ-105, 02105, Україна

Процес модернізації розподільчих пристроїв високої напруги шляхом поступової заміни масляних та повітряних вимикачів на елегазові, яка здійснюється останнім часом на електростанціях України, показав, що поряд з отриманням переваг виникають і певні проблеми від такої заміни. Це зумовлено, перш за все, змінами в характері протікання перехідних процесів. Мета статті – виявлення причин та характеру цих змін, пошук засобів по запобіганню можливого виникненню аварійних режимів. Показано, що негативні наслідки можуть проявлятися під час як короткотривалих, так і довготривалих перехідних процесів. У першому випадку причиною негараздів є поява аперіодичної складової в струмі вимикача, в другому – створення передумов розвитку ферорезонансних явищ. Наведено рекомендації по математичному моделюванню перехідних процесів у розподільчих пристроях електростанцій з елегазовими вимикачами для виявлення проблемних ситуацій. Бібл. 5, рис. 3.

Ключові слова: розподільчий пристрій, електростанція, елегазовий вимикач, аперіодична складова струму, ферорезонансний процес.

Перехідні процеси, які відбуваються під час зміни нормальних та аномальних установлених режимів, є одним з головних факторів, що спричиняє відмову обладнання в розподільчих пристроях (РП) електростанцій (ЕС). Зокрема, це процеси, що супроводжують: включення й відключення ліній електропередачі (ЛЕП); відключення трансформаторів і реакторів; роботу засобів релейного захисту та протиаварійної автоматики і т.д. Значною мірою характер перехідного процесу визначається конструктивними особливостями комутаційних апаратів, встановлених у РП. Слід відзначити, що зараз у світовій енергетиці масляні й повітряні вимикачі поступаються місцем елегазовим вимикачам, оскільки останні мають менші габарити, більшу швидкість дії, довший термін служби. Можна констатувати, що зараз модернізація РП шляхом заміни вимикачів на елегазові є актуальною практичною задачею. Але це призводить до зміни умов комутації, а значить, і характеру протікання перехідних процесів у РП ЕС. Тому пряма заміна вимикачів без попереднього аналізу та врахування всіх можливих наслідків уже спричинила ряд аварій в енергосистемі України. Попередній аналіз особливо важливий для РП ЕС, в яких встановлена порівняно велика кількість вимикачів. Наприклад, схема електричних з'єднань Трипільської ТЕС тільки в РП надвисокої напруги (НВН) 330 кВ містить 20 вимикачів.

При дослідженні перехідних процесів малої тривалості (декілька періодів) виявилось, що висока пробивна стійкість елегазу може викликати негативні наслідки під час комутації ЛЕП НВН. Ці ЛЕП мають значну протяжність, а тому в них для запобігання режимним перенапругам застосовують компенсацію зарядної потужності ЛЕП шляхом встановлення шунтувальних реакторів (ШР). Згідно з теорією перехідних процесів, при включенні ЛЕП під напругу вимикачем Q_1 (рис. 1) РП ЕС у режимі холостого ходу (Q_2 розімкнутий) і з підключеним до ЛЕП ШР (Q_3 замкнутий) у струмі вимикача з'являються дві складові: вимушена періодична, що відповідає струму нормального усталеного режиму, і вільна аперіодична, виникнення якої викликано неможливістю миттєвої зміни струму індуктивності. Аперіодична складова характеризується початковим значенням і швидкістю загасання струму внаслідок розсіювання енергії. Початкове значення аперіодичної складової струму відповідно до першого закону комутації залежить від моменту замикання контактів вимикача. Так, якщо включення відбувається в момент, коли миттєве значення напруги наближене до нуля, то

аперіодична складова струму має найбільше початкове значення. Постійна часу загасання аперіодичної складової струму визначається співвідношенням активного опору та індуктивності заступних схем відповідних елементів електричної мережі (R, L на рис. 1).

Особливо великих значень аперіодична складова досягає при ввімкненні ЛЕП на КЗ,

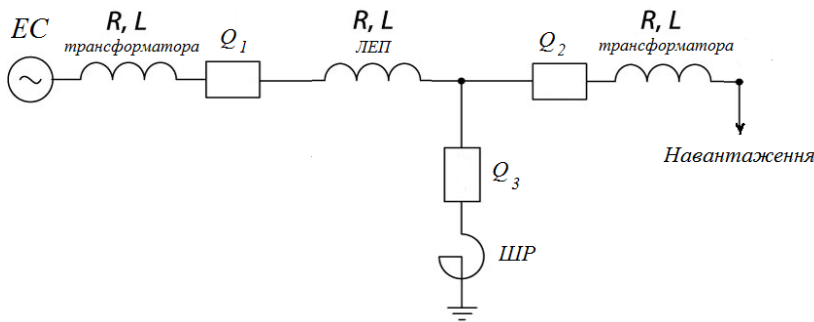


Рис. 1

наприклад, у процесі невдалого повторного включення (АПВ). Оскільки керування комутацією в елегазових вимикачах виконується в момент проходження напруги через нуль [5], то в усіх фазах виникають значні аперіодичні складові струму. В пошкодженій фазі вимушене значення струму КЗ має той же порядок, що й аперіодична складова, тому величина струму переходить через нуль, і він успішно відключається вимикачем. Однак у "здорових" фазах вимушений струм внаслідок компенсації ємності ЛЕП індуктивністю ШР значно менший аперіодичної складової, і через це відбувається затримка моменту переходу струму через нуль (рис. 2). Як можна бачити, струм відключення залежить від ступеня компенсації зарядної потужності ЛЕП: $K = b_L / b_C$, де b_L та b_C – еквівалентні індуктивна та ємнісна поперечні провідності еквівалентної заступної схеми ЛЕП відповідно. На рис. 2 графік 1 відповідає $K = 0,6$; графік 2 – $K = 0,8$; графік 3 – $K = 1,0$.

При керуванні комутацією наявність суттєвої аперіодичної складової струму відключення спричиняє тривалий час горіння дуги на контактах і як наслідок значне підвищення температури газу та зростання тиску всередині камери дугогасіння. Контакти вимикача під час тривалого горіння дуги можуть зваритись між собою. Зазначимо, що для повітряних вимикачів цієї проблеми не існує, оскільки в них замикання завжди відбувається в момент часу поблизу проходження напруги через максимум внаслідок пробою міжконтактного повітряного проміжку. В цих умовах значення аперіодичної складової струму, що проходить через вимикач,

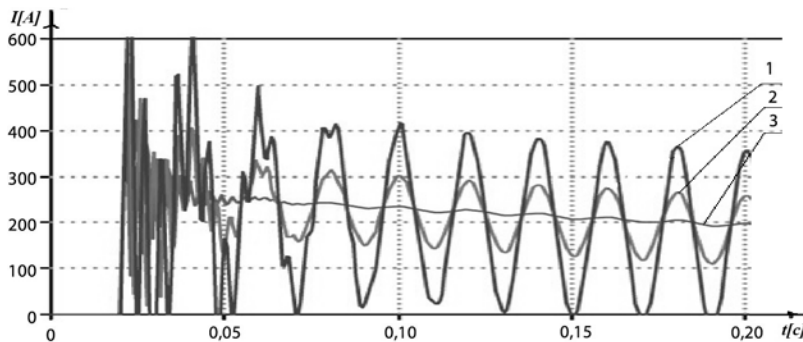


Рис. 2

невелике і проблем при подальшому відключенні не виникає. В той же час внаслідок високої ізоляційної здатності елегазу пробій проміжку відсутній навіть при мінімальному зближенні контактів, тобто замикання кола може відбутись при будь-яких значеннях напруги, в тому числі й при значеннях, наближених до нуля. З одного боку, це позитивний фактор, оскільки керувані комутації зменшують перенапруги [3]. Але саме в цих умовах може з'явитись велика аперіодична складова струму, що також загрожує розвитком аварії.

У РП НВН використовують елегазові вимикачі колонкового типу з автокомпресійним принципом гасіння дуги. Повний час відключення такого вимикача становить близько 40 мс. Ймовірність появи того чи іншого значення аперіодичної складової струму, а також здатність до відключення її повинні перевірятися в процесі циклічних випробувань вимикачів. На жаль, на цей час такі випробування не проводяться. Орієнтовно можна вважати, що аперіодична складова струму буде безпечна для вимикача, коли значення струму пройде через нуль не пізніше ніж за інтервал часу 80 мс після його включення. Цей час отримано шляхом дода-

наприклад, у процесі невдалого повторного включення (АПВ). Оскільки керування комутацією в елегазових вимикачах виконується в момент проходження напруги через нуль [5], то в усіх фазах виникають значні аперіодичні складові струму. В пошкодженій фазі вимушене значення струму КЗ має той же порядок, що й аперіодична складова, тому величина струму

переходить через нуль, і він успішно відключається вимикачем. Однак у "здорових" фазах вимушений струм внаслідок компенсації ємності ЛЕП індуктивністю ШР значно менший аперіодичної складової, і через це відбувається затримка моменту переходу струму через нуль (рис. 2). Як можна бачити, струм відключення залежить від ступеня компенсації зарядної потужності ЛЕП: $K = b_L / b_C$, де b_L та b_C – еквівалентні індуктивна та ємнісна поперечні провідності еквівалентної заступної схеми ЛЕП відповідно. На рис. 2 графік 1 відповідає $K = 0,6$; графік 2 – $K = 0,8$; графік 3 – $K = 1,0$.

вання часу спрацьовування пристроїв релейного захисту та автоматики (близько 40 мс) і повного часу відключення вимикача (близько 40 мс) [1]. Таким чином, для ЛЕП з характеристиками на рис. 2 безпечним для вимикача буде ступінь компенсації її зарядної потужності, не більший ніж 0,6.

Можна змінити час затухання аперіодичної складової струму, ввівши перед комутацією в електричне коло додаткові резистори. Взагалі застосування резисторів, що підключаються перед комутацією, є одним із заходів запобігання перенапругам у мережах НВН. У цих мережах запаси міцності ізоляції обладнання через високу ціну порівняно невеликі, а тому воно може бути ушкоджене комутаційними перенапругами [2]. На сьогодні виробники пропонують при необхідності комплектувати елегазові вимикачі резисторами для боротьби не тільки з перенапругами, а й з аперіодичною складовою струму відключення. Але вибір необхідного значення резисторів відрізняється залежно від мети їх застосування. Якщо при запобіганні комутаційним перенапругам фактором вибору є хвильовий опір ЛЕП НВН, то для демпфірування аперіодичної складової необхідно забезпечити коефіцієнт затухання, а також можливість розсіювання резистором енергії, що виділяється.

Слід зазначити, що заміна вимикачів у РП ЕС впливає на перебіг не тільки короткотривалих перехідних процесів, а й довготривалих (десятки періодів), зокрема, ферорезонансних. Фактором впливу при цьому є геометричні розміри вимикача. Зменшення розмірів вимикачів викликає в РП ЕС зростання небезпеки появи ферорезонансних процесів в електромагнітних трансформаторах напруги (ТН). Так, вже в згаданій головній схемі електричних з'єднань Трипільської ТЕС в РП НВН присутні чотири ТН, яким загрожує ферорезонанс. На рис. 3 наведена еквівалентна схема РП ЕС з ТН [4], на якій зображено джерело електрорушійної сили (ЕРС) E , вимикач з ємністю дільників напруги C_B , ємність шин та приєднаного до шин обладнання C_{III} , провідність, що враховує втрати в магнітопроводі ТН G .

Характер протікання ферорезонансного процесу, а також кратність перенапруг і надструмів визначаються параметрами елементів заступного електричного кола і, перш за все, еквівалентною ЕРС, яка може бути визначена за теоремою Тевенена:

$$E' = E \frac{C_B}{C_B + C_{III}}.$$

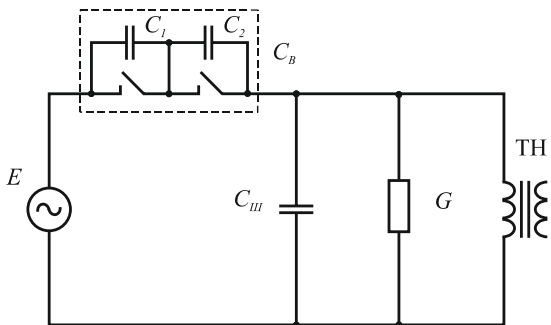


Рис. 3

Зменшення геометричних розмірів елегазових вимикачів призводить до зменшення значення C_{III} , а значить, і до зростання значення еквівалентної E' . З діаграм біфуркації цього параметра, які використовують при аналізі небезпеки виникнення ферорезонансних процесів, відомо, що таке зростання супроводжується не тільки більш жорсткими відхиленнями параметрів режиму, але й можливістю виникнення хаотичних режимів [4]. Небезпека хаотичних режимів полягає у тому, що вони можуть викликати не тільки пряме ушкодження обладнання, а й відмову пристроїв релейного захисту та автоматики, зокрема, АПВ шин РП ЕС.

Таким чином, хоча заміна вимикачів традиційної конструкції на елегазові в РП НВН, як правило, призводить до зростання надійності роботи електричної частини ЕС, все ж можна зробити висновок про необхідність виконання перед модернізацією попереднього аналізу перехідних процесів, що виникають у результаті комутацій за допомогою елегазових вимикачів, перш за все значення аперіодичної складової струму та еквівалентної ємності обладнання.

Для виконання досліджень слід використовувати адекватні математичні моделі, що ґрунтуються на числовому розв'язку відповідних диференціальних рівнянь. Зауважимо, що якщо передбачається зменшити аперіодичну складову струму за рахунок попереднього включення резисторів або відключення ШР, то моделювання перехідного процесу має виконуватись у два етапи: як для комутації елегазових вимикачів, так і попередньої допоміжної

комутації. Для обрання заходів щодо запобігання ферорезонансним процесам моделювання нелінійної динаміки коливань може бути виконано методом продовження з використанням в якості параметра біфуркації еквівалентної ЕРС [4].

1. Дмитриев М.В., Евдокунин Г.А. Коммутационное оборудование // Новости электротехники. – 2012. – № 4 (76). – С. 4–5.
2. Кузнецов В.Г., Тугай Ю.И. Підвищення надійності та ефективності магістральних електричних мереж // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2009. – Вип. 23. – С. 110–117.
3. Кузнецов В.Г., Тугай Ю.И., Шполянський О.Г. Використання керованої комутації для підвищення надійності роботи ЛЕП НВН // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАН України, 2012. – Вип. 32. – С. 123–129.
4. Тугай Ю.И. Умови виникнення ферорезонансних процесів в електричних мережах // Вісник НУ «Львівська політехніка». – 2007. – № 596. – С. 132–136.
5. *Controlled Switching* // *Buyers & Application Guide*, Edition 3.1. - ABB AB. 2010-04. – 54 с.

УДК 621.311.13

Ю.И. Тугай¹, докт. техн. наук, В.А. Мельничук²

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

2 – Київський енергетичний коледж,
ул. І. Сергієнко, 7, Київ-105, 02105, Україна

Переходные процессы в распределительных устройствах электростанций с элегазовыми выключателями
Модернизация распределительных устройств высокого напряжения посредством постепенной замены масляных и воздушных выключателей на элегазовые, которая выполняется в последнее время на электростанциях Украины, показала, что их эксплуатация сопровождается не только преимуществами, но и определенными проблемами. Это обусловлено, прежде всего, изменениями в характере протекания переходных процессов. Целью статьи являются выявление причин этих изменений и поиск средств по предотвращению развития аварийных режимов. Показано, что негативные проявления могут быть как во время краткосрочных, так и длительных переходных процессов. В первом случае причиной является появление аperiodической составляющей в токе выключателя, во втором – создание предпосылок развития феррорезонансных колебаний. Приведены рекомендации по математическому моделированию переходных процессов в распределительных устройствах электростанций с элегазовыми выключателями. Библ. 5, рис. 3.

Ключевые слова: распределительное устройство, электростанция, элегазовый выключатель, аperiodическая составляющая тока, феррорезонансный процесс.

Yu.I. Tugay¹, V.A. Melnychuk²

1 – Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

2 – College of Energy,
Sergienka, 7, Kyiv-105, 02105, Ukraine

The transients in power switchgear with gas-insulated breakers

The paper presents the analysis of some disadvantages of gas-insulated breakers which used in switch-gear of power stations. Emergency conditions for the switch-gear with SF₆ circuit-breakers occur when transient currents in unfaulted phases of an overhead power line can't interrupt by circuit breakers. It is caused by the fact that such currents do not cross zero line for a long time because the aperiodic components have the higher value in comparison with periodic components. For example, such emergency conditions may occur as result of transients after unsuccessful three-phase automatic reclosure. To solve this problem, such methods can be used: introduction of a time delay of switch for operation on the unfaulted phases; the change of the number of shunt reactors that connected to the overhead power line; the using of circuit breakers with the pre-connect resistors. In EHV, certain switching operations can drive voltage transformers connected between phases and earth into ferroresonance. Opening of circuit-breaker initiates the transients by causing capacitance to discharge through the voltage transformers which is then driven into saturation. The source delivers enough energy through the circuit-breaker grading capacitance to maintain the oscillation. Some of practical measures can be taken to prevent ferroresonance, whose overvoltage, overcurrent and distortion wave forms result in thermal and dielectric stresses which may be dangerous for electrical equipment: avoid, by proper design of configurations susceptible to ferroresonance; ensure that system parameter values are not included (even temporarily) in an area at risk; ensure that the energy supplied by the source is not sufficient to sustain the phenomenon. This technique normally consists of introducing losses which damp out ferroresonance when it occurs. References 5, figures 3.

Key words: switchgear, power plant, gas-insulated switch, the aperiodic component of current, ferroresonant process.

Надійшла 29.08.2014

Received 29.08.2014