

*І.В. ПАНТЕЛЄЄВА, І.С. ВАРШАМОВА***РОЗРАХУНОК СТРУМІВ КОРОТКИХ ЗАМИКАНЬ НА ПРИЄДНАННЯХ ЗНИЖУВАЛЬНОЇ ПІДСТАНЦІЇ 110/35/10 кВ**

Стаття присвячена комплексному аналізу та методиці розрахунку струмів коротких замикань (КЗ) на приєднаннях знижувальної підстанції 110/35/10 кВ, що є критично важливим елементом забезпечення надійності та сталості роботи розподільних електричних мереж. У роботі обґрунтовано актуальність дослідження з огляду на зростання навантажень, впровадження сучасного комутаційного обладнання, появу розосереджених джерел енергії та необхідність точного вибору апаратів, чутливих до параметрів КЗ. Показано, що для знижувальних підстанцій зі складною конфігурацією шин і декількома силовими трансформаторами величина струмів КЗ істотно залежить від схеми мережі, типу з'єднання обмоток трансформатора, параметрів джерела живлення на стороні 110 кВ, а також реактивних опорів ліній та трансформаторів. Висвітлено методику визначення діючого значення періодичної складової струму КЗ, аперіодичної складової, ударного струму (імпульсного пікового значення), а також тривалості аперіодичної складової з урахуванням постійної часу. Результати дослідження дозволяють сформулювати рекомендації щодо оптимального вибору комутаційного обладнання, підвищення чутливості релейного захисту, забезпечення термічної та електродинамічної стійкості струмопровідних частин, а також щодо підвищення загальної надійності розподільчих мереж.

Ключові слова: підстанція, електрична мережа, коротке замикання, термічна дія струмів короткого замикання, електродинамічна дія.

*І.В. PANTIELIEIEVA, I.S. VARSHAMOVA***CALCULATION OF SHORT-CIRCUIT CURRENTS AT CONNECTIONS OF A 110/35/10 kV STEP-DOWN SUBSTATION**

The article is devoted to a comprehensive analysis and calculation method of short-circuit currents (SC) at the connections of a 110/35/10 kV step-down substation, which is a critically important element in ensuring the reliability and stability of distribution electrical networks. The paper substantiates the relevance of the study in view of the growth of loads, the introduction of modern switching equipment, the emergence of distributed energy sources and the need for accurate selection of devices sensitive to short-circuit parameters. It is shown that for step-down substations with a complex busbar configuration and several power transformers, the magnitude of short-circuit currents significantly depends on the network scheme, the type of transformer winding connection, the parameters of the power source on the 110 kV side, as well as the reactive resistances of lines and transformers. The methods for determining the effective value of the periodic component of the short-circuit current, the aperiodic component, the surge current (pulse peak value), and the duration of the aperiodic component, taking into account the time constant, are highlighted. The results of the study allow us to formulate recommendations on the optimal choice of switching equipment, increasing the sensitivity of relay protection, ensuring the thermal and electrodynamic stability of current-carrying parts, as well as increasing the overall reliability of distribution networks.

Keywords: substation, electrical network, short circuit, thermal effect of short circuit currents, electrodynamic effect.

Вступ. У сучасних умовах активно створюються інтелектуальні системи та пристрої для підвищення рівня автоматизації електричних мереж і енергетичних об'єктів. Такі рішення забезпечують можливість дистанційного керування обладнанням, оперативного контролю параметрів електроенергії, а також динамічної зміни конфігурації мережі відповідно до поточного режиму роботи споживачів і джерел живлення. Вони дозволяють швидко реагувати на аварії та пошкодження на лініях електропередачі, що робить їх особливо важливими як для України, так і для інших країн [1].

Ще одним важливим напрямом розвитку сучасної енергетики є цифрова трансформація підстанцій. Її суть полягає у впровадженні систем повної автоматизації технологічних процесів приймання, перетворення та розподілу електроенергії. Це дає змогу ефективно регулювати реактивну потужність, здійснювати адаптивне керування напругою, а також реалізовувати функції релейного захисту та автоматики шляхом дистанційного та точного керування високовольтними викидачами вводитів і відхідних ліній. Цифровізація також забезпечує точний облік і локалізацію втрат електроенергії в силових трансформаторах та відхідних мережах, що підвищує ефективність експлуатації та надійність роботи електроенергетичних систем.

Цифрова підстанція передбачає оснащення сучасними інформаційно-технологічними комплексами та системами керування, у яких усі процеси взаємодії – як

між елементами власного обладнання, так і з зовнішніми системами – відбуваються виключно в цифровому середовищі [2]. У такій архітектурі первинне електротехнічне обладнання, разом із засобами автоматизації та управління, спроектоване таким чином, щоб повністю підтримувати безперервний та стандартизований цифровий обмін даними.

Паралельно з упровадженням цифрових рішень на підстанції реалізуються проекти автоматизації відхідних ліній 10 кВ. Для цього насамперед встановлюють реклоузери, а відповідно до рекомендацій їх виробників [3], першочергово доцільно проводити модернізацію фідерних комірків у центрах живлення, забезпечуючи комплексне оновлення та підвищення надійності мережевої інфраструктури.

Зазначені рекомендації ґрунтуються на тому, що саме збільшення кількості циклів автоматичного повторного включення (АПВ) має найбільший вплив на підвищення надійності електропостачання, оскільки дозволяє ефективно ліквідовувати нестійкі пошкодження.

Зокрема:

- впровадження дворазового АПВ на фідерах, де раніше АПВ було відключене, дає змогу знизити показник SAIFI приблизно на 80%;

- застосування дворазового АПВ на фідерах із раніше реалізованим одноразовим АПВ забезпечує покращення SAIFI орієнтовно на 20%.

© І.В. Пантелєєва, І.С. Варшамова, 2025

Можна стверджувати, що більшість підстанцій в Україні нині працюють на обладнанні, яке суттєво зношене як фізично, так і морально. Частина цього устаткування вже офіційно заборонена для використання на нових або реконструйованих об'єктах. У таких умовах повноцінна комплексна автоматизація підстанцій стає фактично неможливою, зокрема й упровадження систем безканального дистанційного контролю роботи реклоузерів на відхідних лініях 10 кВ [4]. Це зумовлено тим, що ефективність реклоузерів суттєво обмежується характеристиками застарілих комірок КРУН, які наразі встановлені на більшості підстанцій.

Отже, підстанція потребує оновлення: встановлення сучасного силового обладнання та перегляду базової електричної схеми приєднань. Це створить умови для впровадження комплексної автоматизації процесів передачі й розподілу електроенергії.

Постановка проблеми. Одним із ключових етапів, необхідних для реконструкції підстанції, є визначення розрахункових значень струмів короткого замикання, ударних струмів та теплових імпульсів, які виникають під час коротких замикань (КЗ) на приєднаннях напругою 110 кВ, 35 кВ та 10 кВ.

Розрахунок струмів короткого замикання виконано за відомою методикою, із урахуванням низки припущень, характерних для електроустановок напругою понад 1 кВ. Зокрема, під час розрахунків не враховувалися струми намагнічування силових трансформаторів, поперечна ємність повітряних та кабельних ліній 110/35/10 кВ (оскільки їхня протяжність менша за 200 км), а також активні опори ліній 110 кВ і обладнання підстанції. За таких умов можлива розрахункова похибка досягає приблизно 10%.

Методологія. У дослідженні застосовано аналітичні методи визначення струмів короткого замикання з використанням нормативної методики та формул, а також метод симетричних складових для розрахунку несиметричних КЗ. Параметри елементів підстанції приводилися до базисної системи та еквівалентувалися з метою спрощення схеми заміщення. Для перевірки отриманих результатів використовувався порівняльний аналіз різних режимів роботи мережі, а за потреби – комп'ютерне моделювання для підтвердження достовірності розрахунків.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз літератури свідчить, що проблематика розрахунку струмів коротких замикань на приєднаннях підстанцій класів напруги 110/35/10 кВ залишається актуальною у контексті модернізації мереж, інтеграції ВДЕ та використання перетворювальної техніки. У сучасних роботах значна увага приділяється уточненню методики розрахунку початкових симетричних струмів КЗ з урахуванням нетрадиційних джерел живлення та силових електроніки. Наприклад, у праці D. Deepak (2025) запропоновано підхід до розрахунку початкових струмів КЗ на основі результатів розрахунку режимів навантаження у системах з перетворювачами, який порівнюється з детальним моделюванням у часовій області і демонструє підвищену точність для реальних мереж ENTSO-E. [5] Водночас низка досліджень зосереджена на порівнянні різних стандартів та алгоритмів (IEC

60909, ANSI/IEEE), підкреслюючи, що вибір методики безпосередньо впливає на розрахункові значення струмів КЗ і, відповідно, на вибір та перевірку комутаційної апаратури й релейного захисту [6].

Окремий напрямок становлять роботи, де розрахунок струмів коротких замикань виконується для конкретних підстанцій з напругою 110/35/10 кВ. У науково-практичних дослідженнях для підстанцій енергетичних компаній України та Європи (наприклад, об'єкти типу «Рівнеобленерго», «Silmarsh», «Zubovo») розглядаються реальні схеми 110/35/10 кВ, виконується розрахунок струмів КЗ на шинах і приєднаннях 110, 35 і 10 кВ, а також перевірка налаштувань релейного захисту, аналіз впливу нових джерел чи схем приєднання на рівні струмів КЗ та на умови селективності. У частині робіт розрахунки доповнюються аналізом режимів за участю систем накопичення енергії або великої частки ВДЕ, зокрема для оцінки змін струмів КЗ у мережах 35–110 кВ при підключенні BESS або фотоелектричних станцій [7].

Таким чином, сучасні дослідження у сфері розрахунку струмів коротких замикань для знижувальних підстанцій 110/35/10 кВ орієнтовані на узгодження класичних нормативних методик з новими умовами роботи мережі: високою насиченістю перетворювальною технікою, інтеграцією BESS та ВДЕ, застосуванням інтелектуальних систем захисту та автоматизації. Це створює методичну базу для більш точного визначення струмів КЗ на приєднаннях усіх рівнів напруги підстанції та забезпечує обґрунтований вибір комутаційного обладнання і параметрів релейного захисту при реконструкції й модернізації таких об'єктів.

Мета дослідження полягає у визначенні чисельних значень струмів короткого замикання і параметрів їх електродинамічного і термічного впливів на розподільчому пристрої (РП) високої напруги (ВН), РП середньої напруги (СН), РП низької напруги (ПН) умовної підстанції 110/35/10 кВ.

Виклад основного матеріалу дослідження. Розрахунок струмів короткого замикання виконуватиметься у відносних одиницях із застосуванням методу симетричних складових, що дозволяє уникнути приведення опорів елементів схеми заміщення до єдиного рівня напруги. Спочатку формується схема заміщення для струмів прямої послідовності. Спрощена однолінійна схема приєднання підстанції 110/35/10 кВ до енергосистеми, із зазначенням основних елементів електроустановки та прилеглої частини мережі, наведена на рис. 1.

Враховуючи прийняті припущення, відповідно до цієї схеми будуватиметься схема заміщення прямої послідовності, на якій вимикачі та роз'єднувачі не відображаються, оскільки їхні параметри не впливають на величини струмів короткого замикання. Побудована схема подана на рис. 2.

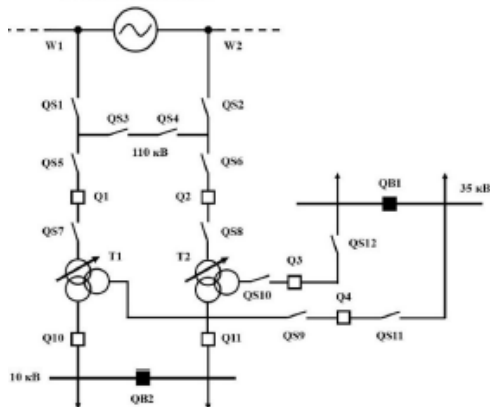


Рис. 1. Розрахункова схема приєднання підстанції 110/35/10 кВ до енергосистеми

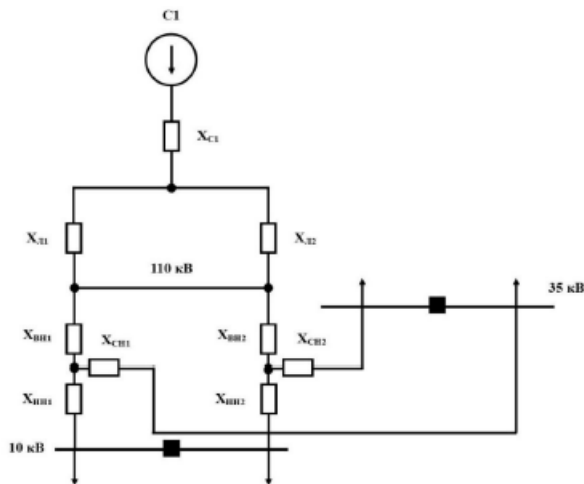


Рис. 2. Схема заміщення прямої послідовності енергосистеми з підстанцією 110/35/10 кВ

Для виконання розрахунку струмів короткого замикання необхідно визначити опори до точок КЗ на РП ВН, РП СН та РП НН підстанції 110/35/10 кВ. Насамперед слід обчислити опори прямої послідовності елементів енергосистеми, оскільки саме вони використовуються для визначення періодичної складової струмів КЗ. Точки, у яких потрібно знайти максимальні значення струмів короткого замикання за умови, що РУ середньої напруги (РП СН) та комплектний розподільний пристрій зовнішньої установки (КРПЗ) живляться лише від одного трансформатора, наведені на рис. 3.

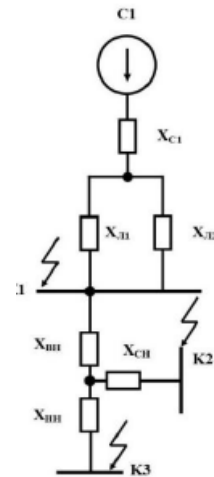


Рис. 3. Схема заміщення прямої послідовності ПС 110/35/10 кВ з точками КЗ К1-К3, що розглядаються.

Після відповідних розрахунків опорів всіх елементів, отримаємо:

$$X_{K3}^{(3)} = X_{K1}^{(3)} + X_{ВН} + X_{НН} = 0,553 + 17,1 + 10,32 = 27,973$$

Почнемо з визначення періодичної складової трифазних симетричних струмів короткого замикання. Розрахунок струмів КЗ може виконуватися різними методами: аналітичним способом, методом вузових напруг, методом контурних струмів, з урахуванням комплексних навантажень, а також наближеним методом еквівалентного генератора, який фактично є спрощеним різновидом методу симетричних складових. Більшість перелічених підходів потребує використання обчислювальної техніки або виконання досить складних математичних перетворень, що значно ускладнює практичне застосування цих методів під час оперативних чи проектних розрахунків.

На відміну від них, наближений метод дозволяє отримати необхідні значення струмів КЗ при мінімальних витратах часу, спираючись на еквівалентування мережі та спрощене подання схеми заміщення. У межах цього підходу значення періодичної симетричної складової струму в точці трифазного короткого замикання визначається за відповідною розрахунковою формулою, яка базується на параметрах еквівалентного генератора та повного опору в місці КЗ. Такий метод є достатньо точним для інженерних розрахунків і широко застосовується під час вибору апаратури, перевірки її динамічної та термічної стійкості, а також при розрахунку налаштувань релейного захисту.

Періодична складова 3-х фазного струму КЗ у точці К1 становить:

$$I_{K1}^{(3)} = \frac{1 \cdot 5,021 \cdot 10^3}{0,553} = 9,08 \text{ (кА)}$$

Періодична складова трифазного струму КЗ у точці К2:

$$I_{K2}^{(3)} = \frac{1 \cdot 15,604 \cdot 10^3}{17,653} = 0,884 \text{ (кА)}$$

Аналогічно, у точці К3:

$$I_{K3}^{(3)} = \frac{1 \cdot 54,986 \cdot 10^3}{27,973} = 1,966 \text{ (кА)}$$

Ударні струми для перевірки електричних апаратів, шин та ізоляторів на електродинамічну стійкість у точках, що розглядаються, визначимо за відомою формулою, отже, ударний струм у точках К1-К3:

$$i_{уд}^{K1} = 1,717 \cdot \sqrt{2} \cdot 9,08 = 22,048 \text{ (кА)}$$

$$i_{уд}^{K2} = 1,608 \cdot \sqrt{2} \cdot 0,884 = 2,01 \text{ (кА)}$$

$$i_{уд}^{K3} = 1,608 \cdot \sqrt{2} \cdot 1,966 = 4,471 \text{ (кА)}$$

Таким чином, потужність КЗ в точках:

$$S_{K3}^{K1} = \sqrt{3} \cdot 9,08 \cdot 115 = 1808,607 \text{ (МВА)}$$

$$S_{K3}^{K2} = \sqrt{3} \cdot 0,884 \cdot 37 = 56,652 \text{ (МВА)}$$

$$S_{K3}^{K3} = \sqrt{2} \cdot 1,966 \cdot 10,5 = 35,755 \text{ (МВА)}$$

Для оцінки електродинамічної стійкості обладнання необхідно також визначити струми двофазного короткого замикання. Розрахунок таких струмів виконується за методом симетричних складових. У цьому випадку, окрім вже визначених опорів прямої послідовності, додатково потрібно розрахувати опори зворотної послідовності, оскільки вони безпосередньо впливають на величину двофазних струмів КЗ.

Схема заміщення зворотної послідовності включає всі елементи розрахункової схеми прямої послідовності, наведеної на рис. 3. При цьому ЕРС зворотної послідовності синхронних та асинхронних машин, а також комплексних навантажень приймаються рівними нулю. Опори трансформаторів та повітряних ліній для зворотної послідовності вважаються такими самими, як і для прямої послідовності [8]. Відповідно, для опорів зворотної послідовності виконується рівність (15). Побудована розрахункова схема зворотної послідовності подана на рис. 4.

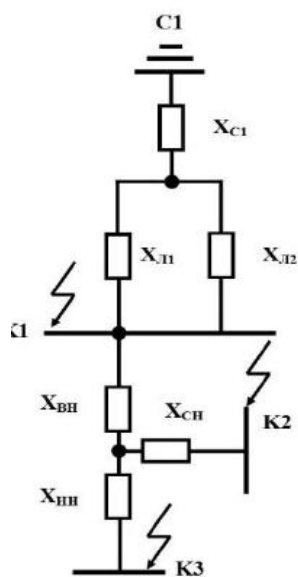


Рис. 4. Схема заміщення зворотної послідовності ПС 110/35/10 кВ з точками КЗ К1-К3, що розглядаються

З урахуванням відомих значень ланцюгів опорів прямої та зворотної послідовності визначимо струми двофазного КЗ у точках К1-К3:

$$I_{K1}^{(2)} = \frac{1 \cdot 5,021 \cdot 10^3}{0,553 + 0,553} = 4,539 \text{ (кА)}$$

$$I_{K2}^{(2)} = \frac{1 \cdot 15,604 \cdot 10^3}{17,653 + 17,653} = 0,442 \text{ (кА)}$$

$$I_{K3}^{(2)} = \frac{1 \cdot 54,986 \cdot 10^3}{27,973 + 27,973} = 0,983 \text{ (кА)}$$

Таким чином, для розглянутих точок КЗ ударний струм буде:

$$i_{K1}^{(2)} = \sqrt{3} \cdot 4,539 = 7,862 \text{ (кА)}$$

$$i_{K2}^{(2)} = \sqrt{3} \cdot 0,442 = 0,766 \text{ (кА)}$$

$$i_{K3}^{(2)} = \sqrt{3} \cdot 0,983 = 1,703 \text{ (кА)}$$

Розрахунок струмів однофазного короткого замикання в цій роботі не виконується, оскільки обмотка середньої напруги триобмотувального трансформатора 35 кВ має зіркове з'єднання без виведеної нейтралі, що унеможливує протікання струмів нульової послідовності. У такій конфігурації струми нульової послідовності можуть виникати лише в обмотці низької напруги 10 кВ, тоді як на шинах напругою 10 кВ їх протікання не спостерігається.

Загалом величина струму однофазного КЗ не впливає на вибір способу заземлення нейтралі обмотки ВН 110 кВ силового трансформатора, для якого визначальним є ударний струм. Проте значення однофазного струму необхідне під час розрахунку контуру заземлення підстанції та подальшого визначення допустимих напруг дотику, що є критично важливим для забезпечення електробезпеки персоналу.

Розрахуємо тепловий вплив струмів короткого замикання. Для коректного вибору комутаційної апаратури необхідно знати величини періодичної та аперіодичної складових струму КЗ у розрахунковий момент часу. Ці значення залежать від місця виникнення короткого замикання та визначаються за відповідною розрахунковою формулою:

$$\tau = t_{pc} + t_{cv} + n \cdot \Delta t,$$

де t_{pc} – час спрацювання релейного захисту, що рекомендується приймати рівним для сучасних мікропроцесорних захистів 0,1 с; t_{cv} – власний час відключення вимикача, наведений у технічних характеристиках, що становить для сучасних вимикачів трохи більше 0,1 с; n – кількість ступенів селективності струмових захистів, що встановлюються для захисту силового трансформатора.

Вимикач на стороні ВН 110 кВ у разі короткого замикання має спрацювати негайно, тому для нього цей параметр приймається рівним нулю. Ввідні вимикачі шин СН 35 кВ і НН 10 кВ підстанції виконують функцію першого ступеня резервування й повинні відключатися у випадку, якщо вимикач на стороні 110 кВ не спрацював. Вимикачі ліній 35 кВ (10 кВ) забезпечують другий ступінь селективності – вони

відключаються при відмові як вимикача ВН 110 кВ, так і ввідного вимикача відповідних шин 35 кВ (10 кВ).

Δt – це інтервал часу, що визначає тривалість ступеня селективності. Для сучасних вакуумних та елегазових вимикачів, з урахуванням інерційності роботи захисту, його можливих похибок та необхідного технологічного запасу, цей інтервал зазвичай становить приблизно 250 мс. Водночас у роботі [9] зазначено, що вплив похибок не можна ігнорувати, тому рекомендовано приймати збільшене значення – близько 0,3 с.

Передбачається замість існуючої на стороні ВН 110 кВ зв'язки «вимикач-роз'єднувач-короткозамикач» встановити сучасний високовольтний елегазовий вимикач ВГТ-110 вітчизняного виробництва. Цей вимикач призначений для роботи при найбільшій робочій напрузі 126 кВ, має номінальний струм 1250 А, відключаючу здатність 25 кА, струм термічної стійкості 25 кА та електродинамічну стійкість 102 кА. Тривалість допустимого протікання струму термічної стійкості становить не менше 3 с.

Визначимо час відключення КЗ у точці К1:

$$\tau_{K1} = 0,1 + 0,05 = 0,15 \text{ (с)}$$

У складі ВРП 35 кВ сторони середньої напруги підстанції пропонується встановити вакуумний баковий вимикач зовнішнього виконання ВВН-П/35-25/1000. Він призначений для роботи на номінальній напрузі 35 кВ, має номінальний струм 1000 А, відключаючу здатність 25 кА, термічну стійкість тривалістю 3 с. Повний час вимкнення становить $\tau_{св} = 0,06$ с.

Час вимкнення короткого замикання у точці К2 для ввідного вимикача шин (ВШ) становить:

$$\tau_{K2} = 0,1 + 0,06 + 1 \cdot 0,3 = 0,46 \text{ (с)}$$

Для вимикача лінії (ВЛ):

$$\tau_{K3} = 0,1 + 0,06 + 2 \cdot 0,3 = 0,76 \text{ (с)}$$

У складі КРУН 10 кВ підстанції, з урахуванням номенклатури технічних рішень, планується встановлення вакуумного вимикача ВВ/ТЕЛ-10-20/1000. У поєднанні з реклоузерами, змонтованими на відхідних автоматизованих лініях 10 кВ, він забезпечуватиме надійну та ефективну роботу системи.

Вимикач має номінальну напругу 12 кВ, номінальний струм 1000 А, відключаючу здатність 20 кА, електродинамічну стійкість 51 кА, допускає протікання струму термічної стійкості протягом 3 с, а повний власний час вимкнення становить 0,065 с.

Таким чином, час відключення КЗ у точці К3 для ввідного вимикача шин 10 кВ:

$$\tau_{K3} = 0,1 + 0,065 + 1 \cdot 0,3 = 0,465 \text{ (с)}$$

Для вимикача лінії:

$$\tau_{K3} = 0,1 + 0,065 + 2 \cdot 0,3 = 0,765 \text{ (с)}$$

Результати розрахунків струмів КЗ наведено у табл. 1.

Таблиця 1 – Результати розрахунків струмів КЗ їх електродинамічного та термічного впливів на РУ ВН, СН та ПН підстанції 110/35/10 кВ.

Параметри	Точка К1	Точка К2	Точка К3
$I_{n0}^{(3)}$, кА	9,08	0,884	1,966
$i_{уд}^{(3)}$, кА	22,048	2,01	4,471
τ , с ВШ/ВЛ	0,15	0,46/0,76	0,465/0,765
B_k , $A^2 \cdot c$ ВШ/ВЛ	$14,84 \cdot 10^6$	$0,375 \cdot 10^6$ $/0,61 \cdot 10^6$	$1,805 \cdot 10^6$ $/2,965 \cdot 10^6$
S_{K3} , МВА	1808,607	56,652	35,755
$I_{K3}^{(2)}$, кА	4,539	0,442	0,983
$i_{K3}^{(2)}$, кА	7,862	0,766	1,703
i_{at} , кА	1,798	0,038	0,068

Висновки. У процесі дослідження були визначені струми трифазного короткого замикання, а також параметри їхнього електродинамічного та термічного впливу. Додатково виконано розрахунок струмів двофазних коротких замикань на приєднаннях підстанції 110/35/10 кВ. Отримані розрахункові дані дають можливість обґрунтовано виконати реконструкцію підстанції та здійснити вибір основного силового обладнання, яке підтримує сучасні цифрові протоколи обміну даними. Це, у свою чергу, створює необхідні передумови для впровадження повноцінної автоматизації підстанції.

Під час розрахунку термічного впливу струмів короткого замикання були визначені типи та параметри високовольтних вакуумних вимикачів, що можуть бути застосовані на підстанції 110/35/10 кВ. Зокрема, використання у КРУН зовнішньої установки вимикачів типу ВВ/ТЕЛ-10-20/1000 з рівнем вакууму 15, змонтованих на відхідних лініях 10 кВ, дозволить підвищити ефективність роботи релейного захисту й автоматики. Це забезпечить високу швидкість захисту, покращить селективність та створить умови для надійної роботи системи, що додатково контролюватиметься пристроєм безканального дистанційного моніторингу реклоузерів.

Список літератури

1. Rashid Niaz Azari, Mohammad Amin Chitsazan, Iman Niazazari. Optimal Recloser Setting, Considering Reliability and Power Quality in Distribution Networks // American Journal of Electrical Power and Energy Systems. 2019. 6 (1). PP. 1-6
2. Huang Z., Du P., Kosterev D., Yang B. Application of extended Kalman filter techniques for dynamic model parameter calibration. 2019 IEEE Power & Energy Society General Meeting, Calgary, AB, 2019, pp. 1-8. DOI: 1109/pes.2019.
3. Shakouri H., Malik O.P. Estimation of synchronous generator parameters using an adaptive parameter estimator. IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2015, San Francisco, CA, 2015, vol. 3, pp. 2253-2258. DOI: 10.1109/pes.2005.1489096
4. Miles A.G., Johnson B.K., Fischer N. Online Characterization of a Synchronous Generator Using an Unscented Kalman Filter. 2019 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), San Diego, CA, USA, 2019, pp. 1485-1492. DOI: 10.1109/iemdc.2019.8785153
5. Василенко П.О. Шведченко В.Ф. Досвід та перспективи використання реклоузерів. Фізика, електроніка, електротехніка: матеріали НТК, Суми - 2018, С.151.
6. Xu Y., Li Y., Miao Z. Nonlinear least-square estimation (LSE)-based parameter identification of a synchronous generator. 2017 North American Power Symposium (NAPS), Morgantown, WV, 2017, pp. 1-6. DOI: 10.1109/naps.2017.8107385

7. Demiroren A., Zeynelgil H.L. Modelling and simulation of synchronous machine transient analysis using SIMULINK /International Journal of Electrical Engineering Education. 2022. 39/4. C. 337–346.
8. Analysis of an Adaptive Overcurrent Relay for Transmission and Distribution Lines / C. Yanxia [et al.] // Transmission and Distribution Conference and Exposition, New Orleans 7–12 Sept. 2023 / IEEE PES. 2023. Vol. 1. P. 250–255.
9. Huang J., Corzine K.A., Belkhat M. Online Synchronous Machine Parameter Extraction From Small-Signal Injection Techniques. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2019, vol. 24, no. 1, pp. 43–51. DOI:10.1109/tec.2018.2008953
4. Miles A.G., Johnson B.K., Fischer N. Online Characterization of a Synchronous Generator Using an Unscented Kalman Filter. 2019 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), San Diego, CA, USA, 2019, pp. 1485–1492. DOI: 10.1109/iemdc.2019.8785153
5. Vasyleha P.O. Shvedchenko V.F. Dosvid ta perspektyvy vykorystannia rezkouzeriv. Fizyka, elektronika, elektrotehnika: materialy NTK, Sumy - 2018, P.151.
6. Xu Y., Li Y., Miao Z. Nonlinear least-square estimation (LSE)-based parameter identification of a synchronous generator. 2017 North American Power Symposium (NAPS), Morgantown, WV, 2017, pp. 1–6. DOI: 10.1109/naps.2017.8107385
7. Demiroren A., Zeynelgil H.L. Modelling and simulation of synchronous machine transient analysis using SIMULINK /International Journal of Electrical Engineering Education. 2022. 39/4. C. 337–346.
8. C. Yanxia [et al.] Analysis of an Adaptive Overcurrent Relay for Transmission and Distribution Lines. Transmission and Distribution Conference and Exposition, New Orleans 7–12 Sept. 2023. IEEE PES. 2023. Vol. 1. P. 250–255.
9. Huang J., Corzine K.A., Belkhat M. Online Synchronous Machine Parameter Extraction From Small-Signal Injection Techniques. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2019, vol. 24, no. 1, pp. 43–51. DOI:10.1109/tec.2018.2008953

References (transliterated)

1. Rashid Niaz Azari, Mohammad Amin Chitsazan, Iman Niazazari. Optimal Recloser Setting, Considering Reliability and Power Quality in Distribution Networks. American Journal of Electrical Power and Energy Systems. 2019. 6 (1). Pp. 1–6
2. Huang Z., Du P., Kosterev D., Yang B. Application of extended Kalman filter techniques for dynamic model parameter calibration. 2019 IEEE Power & Energy Society General Meeting, Calgary, AB, 2019, pp. 1–8. DOI: 1109/pes.2019.
3. Shakouri H., Malik O.P. Estimation of synchronous generator parameters using an adaptive parameter estimator. IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2015, San Francisco, CA, 2015, vol. 3, pp. 2253–2258. DOI: 10.1109/pes.2005.1489096

Надійшла (received) 11.09.2025

Відомості про авторів / About the authors

Пантелєєва Ірина Вікторівна (Pantielieieva Iryna) – кандидат технічних наук, доцент, кафедра електротехніки і електроенергетики, Навчально-науковий інститут «Українська інженерно-педагогічна академія», Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2960-2358>; e-mail: panteleeva.iuipa@gmail.com.

Варшамова Ірина Сергіївна (Varshamova Iryna) – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електричних апаратів, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7411-2302>, e-mail: iryna.varshamova@kpi.edu.ua.