

АКТУАЛІЗАЦІЯ РОЗРАХУНКУ СТРУМІВ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ В МЕРЕЖАХ ЗІ ЗМІННОЮ КОНФІГУРАЦІЄЮ ТА РОЗОСЕРЕДЖЕНОЮ ГЕНЕРАЦІЄЮ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Обґрунтовано необхідність актуалізації розрахунку струмів короткого замикання в електричних мережах, конфігурація яких швидко змінюється внаслідок післяаварійного відновлення, застосування тимчасових схем живлення, заміни пошкодженого обладнання трансформаторами з іншими паспортними параметрами та приєднання розосереджених джерел генерації. Показано, що поява великої кількості малих генеруючих установок, відновлюваних джерел енергії та систем накопичення електроенергії ускладнює визначення як максимальних, так і мінімальних струмів КЗ. Запропоновано розглядати розрахунок струмів КЗ як основу для зменшення ймовірності термічного та електродинамічного пошкодження обладнання, а також для забезпечення коректної роботи релейного захисту й автоматики під час керування комутаційними апаратами.

Ключові слова: струм короткого замикання, змінна конфігурація мережі, тимчасова схема живлення, розосереджена генерація, BESS, заземлення нейтралі, релейний захист, комутаційний апарат.

Abstract

The necessity of updating short-circuit current calculations in electrical networks whose configuration changes rapidly due to post-emergency restoration, temporary supply schemes, replacement of damaged equipment with transformers having different nameplate parameters, and the connection of distributed generation sources is substantiated. It is shown that the emergence of numerous small generating units, renewable energy sources, and battery energy storage systems complicates the determination of both maximum and minimum short-circuit currents. It is proposed to consider short-circuit current calculation as a basis for reducing the probability of thermal and electrodynamic equipment damage, as well as for ensuring correct operation of relay protection and automation when controlling switching devices.

Keywords: short-circuit current, variable network configuration, temporary supply scheme, distributed generation, BESS, neutral grounding, relay protection, switching device.

Електричні мережі України в сучасних умовах дедалі частіше працюють не за сталою проектною схемою, а в режимі постійної зміни конфігурації. Пошкодження підстанцій, трансформаторів, ліній електропередавання та комутаційного обладнання змушує застосовувати тимчасові схеми живлення, переносити точки секціонування, змінювати нормальні розриви в кільцевих мережах і використовувати резервні варіанти приєднання споживачів. За даними International Energy Agency, енергетична інфраструктура України зазнає системних пошкоджень, що безпосередньо впливає на режими роботи електричних мереж і підстанцій [1].

У таких умовах попередні розрахунки струмів короткого замикання швидко втрачають достатню достовірність. Під час аварійної або післяаварійної заміни пошкодженого трансформатора на інший апарат близької номінальної потужності можуть відрізнятись його напруга короткого замикання, співвідношення активної та реактивної складових опору, фактичні положення пристрою регулювання напруги, допустимі

перевантаження та параметри схеми заміщення. Це змінює еквівалентний опір вузла мережі та впливає на розрахункові значення струмів КЗ. Окремо мають перевірятися режими заземлення нейтралей у відповідному вузлі, оскільки вони визначаються не довільною заміною трансформатора, а схемою заземлення відповідної обмотки, станом нейтралеутворювальних пристроїв, дугогасних реакторів, резисторів або заземлювальних кіл у фактичній післяаварійній конфігурації мережі.

Додаткову складність створює неповна або змінна кільцева робота мереж. У нормальному режимі кільце може бути розімкнене в одній точці, у післяаварійному — в іншій, а в окремих випадках тимчасово замикається для резервування споживачів. Кожна така зміна змінює еквівалентний опір джерела живлення в точці КЗ, розподіл струмів між приєднаннями та умови роботи релейного захисту. Тому для підстанцій і розподільних мереж доцільно розраховувати не один базовий режим, а набір характерних конфігурацій: нормальну, ремонтну, післяаварійну, тимчасову та схему з максимальною і мінімальною кількістю джерел живлення.

Методичною основою для такого підходу є ДСТУ EN 60909-0:2022, який регламентує розрахунок струмів короткого замикання у трифазних системах змінного струму [2]. Однак практичне застосування цього стандарту в сучасних умовах потребує постійного оновлення вихідних даних: фактичних параметрів трансформаторів, положення комутаційних апаратів, стану секцій шин, складу джерел генерації, режимів роботи нейтралей та реальної конфігурації мережі.

Окремим джерелом невизначеності є режими заземлення нейтралей. У тимчасових або післяаварійних схемах може змінюватися не лише шлях живлення навантаження, а й умови протікання струмів нульової послідовності. Для мереж із різними способами заземлення нейтралі це безпосередньо впливає на величину струму однофазного КЗ, напруги дотику, роботу захистів від замикань на землю та допустимість комутацій. Розрахунки таких режимів мають виконуватися з урахуванням положень ДСТУ EN 60909-3:2022 [3].

Принципово новим фактором є зростання кількості джерел генерації малої потужності, сонячних і вітрових електростанцій, газопоршневих установок та систем накопичення електроенергії. Частина цих джерел приєднується через силові електронні перетворювачі, тому їх внесок у струм КЗ відрізняється від внеску синхронних машин. Для інверторних джерел характерними є обмеження струму, залежність аварійного режиму від алгоритмів керування та вимог до приєднання розосереджених енергетичних ресурсів [4]. Отже, у мережах з ВДЕ та BESS неможливо механічно переносити класичні припущення щодо джерел живлення без уточнення їх аварійної поведінки.

Для практичної експлуатації найбільш небезпечними є дві протилежні ситуації. Перша — недооцінювання максимального струму КЗ, що може призвести до перевищення комутаційної здатності вимикача, електродинамічної стійкості шин або термічної стійкості струмопровідних частин. Друга — переоцінювання мінімального струму КЗ, за якого релейний захист може втратити чутливість або спрацювати із недопустимою затримкою. Саме тому розрахунок струмів КЗ має бути пов'язаний не тільки з вибором обладнання, а й з перевіркою уставок РЗА, логіки блокувань та команд на вимикання комутаційних апаратів.

Доцільним є формування матриці розрахункових сценаріїв. Її основними осями мають бути: склад працюючих трансформаторів; фактичні паспортні параметри заміненого обладнання; положення секційних і міжсекційних вимикачів; точка розмикання кільцевої схеми; режим заземлення нейтралі; склад розосередженої генерації; режим роботи BESS; мінімальне та максимальне навантаження; нормальний, ремонтний і післяаварійний стани мережі. Такий підхід дозволяє виявити не лише найбільші струми КЗ, а й режими, у яких захист може бути недостатньо чутливим.

У мережах зі значною кількістю розосереджених джерел доцільним є використання цифрових моделей, які дозволяють автоматизувати перерахунок струмів КЗ при зміні конфігурації. Сучасні дослідження з реалізації IEC 60909 для мереж з розосередженою генерацією підтверджують, що автоматизований

розрахунок є необхідним інструментом планування та перевірки мереж з високою кількістю змінних елементів [5].

Результати таких розрахунків повинні використовуватися для трьох практичних рішень: перевірки комутаційної здатності вимикачів, перевірки термічної та електродинамічної стійкості обладнання, а також актуалізації уставок релейного захисту. Для високовольтних вимикачів визначальними є здатність відключати струм КЗ, вмикати на коротке замикання та витримувати аварійний струм протягом заданого часу, що регламентується вимогами ДСТУ EN IEC 62271-100:2022 [6].

Висновки

У мережах зі змінною конфігурацією розрахунок струмів короткого замикання має бути не разовою проектною процедурою, а періодично актуалізованим інструментом експлуатації та відновлення. Основними чинниками невизначеності є тимчасові схеми живлення, встановлення трансформаторів з іншими паспортними параметрами, зміна кількості паралельно працюючих трансформаторів, неповна кільцева робота мережі, режими заземлення нейтралей, поява розосередженої генерації, ВДЕ та систем накопичення енергії. Найбільш обґрунтованим є сценарний підхід, за якого для кожної характерної конфігурації визначаються максимальні та мінімальні струми КЗ, перевіряються комутаційна здатність вимикачів, стійкість обладнання та чутливість релейного захисту. Це дозволяє зменшити ймовірність пошкодження обладнання та забезпечити коректну роботу РЗА під час керування комутаційними апаратами.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Ukraine's energy system under attack. International Energy Agency. URL: <https://www.iea.org/reports/ukraines-energy-security-and-the-coming-winter/ukraines-energy-system-under-attack>.
2. ДСТУ EN 60909-0:2022. Струми короткого замикання в трифазних системах змінного струму. Частина 0. Розрахунок струмів (EN 60909-0:2016, IDT; IEC 60909-0:2016, IDT). Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2022.
3. ДСТУ EN 60909-3:2022. Струми короткого замикання в трифазних системах змінного струму. Частина 3. Струми під час двох окремих одночасних коротких замикань лінія–земля та часткових струмів короткого замикання, що протікають через землю (EN 60909-3:2010, IDT; IEC 60909-3:2009, IDT). Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2022.
4. IEEE Std 1547-2018. IEEE Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces. New York : IEEE, 2018.
5. Turner L., Braun M. Vectorized calculation of short circuit currents considering distributed generation: an open source implementation of IEC 60909. 2018. URL: <https://arxiv.org/abs/1802.01502>.
6. ДСТУ EN IEC 62271-100:2022. Пристрої контрольні розподільчі високовольтні. Частина 100. Вимикачі змінного струму (EN IEC 62271-100:2021, IDT; IEC 62271-100:2021, IDT). Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2022.

Федоришин Костянтин Володимирович — студент групи ІЕС-226 факультету електроенергетики та електромеханіки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця.

Вишневецький Святослав Янович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електричних станцій та систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця. e-mail: svyato.vish.ua@gmail.com

Fedoryshyn Kostiantyn V. — student, Faculty of Electrical Power Engineering and Electromechanics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.

Sviatoslav Ya. Vyshnevskyi — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electric Power Plants and Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia. e-mail: svyato.vish.ua@gmail.com