

СХЕМНІ РІШЕННЯ ВІДКРИТИХ РОЗПОДІЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ З УРАХУВАННЯМ ЖИВУЧОСТІ ТА ПІСЛЯВАРІЙНОГО ВІДНОВЛЕННЯ ПІДСТАНЦІЙ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Сформовано підхід до оцінювання схемних рішень відкритих розподільних пристроїв підстанцій з урахуванням не лише класичних критеріїв надійності та вартості, а й живучості, ремонтпридатності, локалізації пошкоджень і швидкості післяаварійного відновлення. Показано, що в умовах воєнних ризиків вибір схеми ВРП має враховувати просторову вразливість обладнання, можливість секціонування, резервування приєднань, збереження транзиту потужності та відновлення електропостачання обмеженими ресурсами. Обґрунтовано доцільність багатокритеріального порівняння схем з однією системою шин, секціонованою системою шин, обхідною системою шин та схемами підвищеної надійності.

Ключові слова: відкритий розподільний пристрій, ВРП, підстанція, схема електричних з'єднань, секціонування шин, резервування, живучість, післяаварійне відновлення.

Abstract

An approach to evaluating circuit configurations of outdoor switchgear substations is proposed, taking into account not only classical reliability and cost criteria, but also survivability, maintainability, damage localization, and post-emergency restoration speed. It is shown that under wartime risks the selection of an outdoor switchgear scheme should consider spatial vulnerability of equipment, sectionalization capability, feeder redundancy, power transit preservation, and restoration of power supply under limited resources. The feasibility of multicriteria comparison of single-busbar, sectionalized busbar, transfer-busbar, and high-reliability schemes is substantiated.

Keywords: outdoor switchgear, substation, electrical connection scheme, busbar sectionalization, redundancy, survivability, post-emergency restoration.

Відкриті розподільні пристрої залишаються поширеним технічним рішенням для підстанцій середньої, високої та надвисокої напруги завдяки простоті огляду, відносно меншій вартості, доступності обладнання для ремонту та можливості поетапного розширення. Однак сучасні умови експлуатації електроенергетичної інфраструктури України потребують перегляду традиційного підходу до вибору схем ВРП. Після масованих пошкоджень енергетичних об'єктів визначальними стають не тільки нормальна надійність схеми, а й її здатність обмежувати наслідки пошкоджень та забезпечувати швидке відновлення роботи.

За даними International Energy Agency, під час хвиль атак 2024 року Україна втратила значні обсяги генеруючої потужності, а пошкодження стосувалися також численних підстанцій [1]. Це означає, що для підстанцій, які проєктуються або відновлюються, критерій фізичної живучості має бути введений до складу основних технічних критеріїв. У класичному проєктуванні схема ВРП здебільшого оцінюється за надійністю електропостачання, кількістю комутаційних апаратів, вартістю, зручністю оперативних перемикань і перспективою розширення. В умовах воєнних ризиків цього вже недостатньо.

Відкритий розподільний пристрій має суперечливу природу. З одного боку, відкрите компонування підвищує просторову вразливість шин, порталів, вимикачів, роз'єднувачів, трансформаторів струму, трансформаторів напруги та ошиновки. З іншого боку, саме відкритість обладнання забезпечує швидкий доступ ремонтного персоналу, спрощує візуальну діагностику, дозволяє оперативно виконувати тимчасові

схеми відновлення та заміну окремих пошкоджених елементів. Тому ВРП не слід однозначно протиставляти КРУЕ; їх доцільність має визначатися функцією підстанції, класом напруги, наявністю площі, рівнем загроз і вимогами до відновлення.

Нормативною основою для проєктування електроустановок напругою понад 1 кВ є ДСТУ EN IEC 61936-1:2024, який встановлює загальні правила для електроустановок змінного струму напругою понад 1 кВ [2]. У контексті ВРП цей стандарт важливий не лише як документ щодо ізоляційних відстаней і безпеки, а як основа для системного розгляду компонування, заземлення, доступу персоналу, механічної міцності, електричних впливів і умов експлуатації. Високовольтні комутаційні апарати, що застосовуються у ВРП, мають відповідати загальним вимогам серії 62271, зокрема ДСТУ EN 62271-1:2018 [3].

Схема з однією системою шин є найпростішою та найдешевшою, однак має найнижчу живучість. Пошкодження шин або необхідність ремонту шинної системи може призводити до втрати всіх приєднань відповідної секції. Така схема може бути прийнятною для підстанцій меншої системної значущості, тупикових приєднань або об'єктів, де перерва електропостачання не створює значних системних наслідків. Водночас для вузлових підстанцій її застосування в сучасних умовах має бути обмеженим або потребує додаткового резервування з боку мережі.

Секціонована система шин підвищує живучість ВРП за рахунок поділу шин на окремі секції. У разі пошкодження однієї секції інші секції можуть залишатися в роботі, що обмежує масштаб відключення. Така схема є технічно доцільною для підстанцій з кількома лінійними та трансформаторними приєднаннями, де важливо зберегти хоча б частину навантаження або транзиту потужності. В умовах післяаварійного відновлення секціонування також спрощує поетапне введення обладнання після ремонту.

Схема з обхідною системою шин або обхідним вимикачем забезпечує можливість виведення основного вимикача в ремонт без відключення приєднання. Для відкритих розподільних пристроїв це має особливе значення, оскільки вимикачі, роз'єднувачі та вимірювальні трансформатори перебувають під впливом кліматичних і механічних факторів. Технічні вимоги до вимикачів змінного струму регламентуються ДСТУ EN IEC 62271-100:2022 [4], а до роз'єднувачів і уземлювальних перемикачів — ДСТУ EN IEC 62271-102:2022 [5]. Отже, схема ВРП повинна оцінюватися не абстрактно, а через взаємодію шинної системи, вимикачів, роз'єднувачів, захистів і оперативних блокувань.

Для підстанцій високої системної значущості доцільними можуть бути схеми з двома системами шин, схемами «півтора вимикача на приєднання» або кільцевими рішеннями. Їх перевагою є вища надійність і можливість збереження приєднання в роботі при ремонті або пошкодженні окремого елемента. Недоліками є більша кількість вимикачів, ускладнення релейного захисту, вища вартість, більша площа та складніша експлуатація. Тому застосування таких схем має бути обґрунтоване не формальним підвищенням надійності, а системною значущістю підстанції та величиною наслідків її відключення.

З позицій живучості важливим є не лише вибір схеми, а й просторове компонування ВРП. Навіть однакова електрична схема може мати різний рівень фізичної стійкості залежно від взаємного розташування шин, комутаційних апаратів, силових трансформаторів, кабельних каналів, релейних приміщень і систем власних потреб. Надмірна концентрація критичних елементів підвищує ризик одночасного пошкодження декількох приєднань. Навпаки, просторове розосередження секцій, протипожежні розриви, дублювання допоміжних кіл і можливість тимчасового перепідключення підвищують здатність ВРП до відновлення.

Окремим напрямом є цифровізація схемних рішень. Для відкритих розподільних пристроїв важливо мати не лише фізичну схему електричних з'єднань, а й цифрову модель стану обладнання, що відображає положення комутаційних апаратів, навантаження приєднань, аварійні обмеження та допустимі післяаварійні перемикання. У сучасних умовах це дозволяє скоротити час прийняття диспетчерських рішень, зменшити ймовірність помилкових операцій та сформувати заздалегідь підготовлені сценарії відновлення.

Світова практика розвитку енергетичної інфраструктури дедалі більше використовує поняття стійкості та живучості, а не лише показники безвідмовності. ІЕА у звіті щодо стійкості електроенергетичних систем підкреслює необхідність підготовки енергосистем до екстремальних впливів і швидкого відновлення після порушень [6]. Для ВРП це означає, що схема має бути оцінена не тільки за ймовірністю відмови, а й за відповідями на питання: яка частина підстанції залишиться в роботі після пошкодження; скільки приєднань можна відновити тимчасовою схемою; який час потрібен для локалізації дефекту; чи можливий ремонт без повного знеструмлення підстанції.

Таким чином, вибір схемного рішення ВРП доцільно здійснювати за багатокритеріальною моделлю. До її складу мають входити: надійність електропостачання, кількість вимикачів на приєднання, вартість спорудження, площа, складність експлуатації, ремонтпридатність, можливість секціонування, збереження транзиту потужності, стійкість до зовнішніх впливів, швидкість післяаварійного відновлення та можливість поетапної реконструкції. Такий підхід дозволяє перейти від формального вибору типової схеми до інженерного обґрунтування структури підстанції відповідно до її ролі в енергосистемі.

Висновки

Схемні рішення відкритих розподільних пристроїв у сучасних умовах мають оцінюватися не лише за класичними критеріями вартості та надійності, а й за показниками живучості, ремонтпридатності та швидкості післяаварійного відновлення. Найпростіші схеми з однією системою шин є економічними, але мають обмежену стійкість до пошкоджень. Секціоновані системи шин, обхідні системи та схеми підвищеної надійності забезпечують кращу локалізацію дефектів і більші можливості збереження електропостачання, однак потребують вищих капітальних витрат і складнішої експлуатації. Для відбудови енергосистеми України доцільним є багатокритеріальний вибір схем ВРП із урахуванням системної значущості підстанції, рівня фізичних загроз, можливості резервування, просторового компонування та сценаріїв оперативного відновлення.

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 IEC 61936-1:2024. Електроустановки понад 1 кВ змінного струму та 1,5 кВ постійного струму. Частина 1. Змінний струм (EN IEC 61936-1:2021, IDT; IEC 61936-1:2021, IDT). Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2024.
3. ДСТУ EN 62271-1:2018. Пристрої контрольні розподільчі високовольтні. Частина 1. Загальні технічні вимоги для пристроїв контрольних розподільчих високовольтних змінного струму (EN 62271-1:2017, IDT; IEC 62271-1:2017, IDT). Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2018.
4. 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.
5. ДСТУ EN IEC 62271-102:2022. Пристрої контрольні розподільні високовольтні. Частина 102. Роз'єднувачі та уземлювальні перемикачі змінного струму (EN IEC 62271-102:2018, IDT; IEC 62271-102:2018, IDT). Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2022.
6. Climate Resilience for Energy Security. International Energy Agency, 2022. URL: <https://www.iea.org/reports/climate-resilience-for-energy-security>.

Рудий Максим Анатолійович — студент групи 2ЕСМ-226 факультету електроенергетики та електромеханіки, Вінницький національний технічний університет, Вінниця.

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

Rudyi Maksym A. — student, Faculty of Electrical Power Engineering and Electromechanics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.

Svyatoslav Ya. Vyshnevskiy — 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