

БАГАТОРІВНЕВІ ГНУЧКІ СИСТЕМИ РОЗПОДІЛУ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

А.Ф. Жаркін^{1*}, академік НАН України, **В.А. Попов**^{2**}, докт. техн. наук,
О.С. Ярмолюк^{2***}, канд. техн. наук, **С.О. Палачов**^{1****}, канд. техн. наук, **В.О. Наталич**^{2*****}

¹ Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна.

² НТУ України «КПІ імені Ігоря Сікорського»,
пр. Берестейський, 37, Київ, 03056, Україна,
e-mail: tig@ukr.net; yarmolyuk.lena@gmail.com.

В умовах довготривалої загрози руйнування енергетичної структури розподільні мережі нашої країни потребують зміни принципів їхньої побудови. З цією метою запропоновано багаторівневу структуру побудови розподільної системи, що за рахунок використання сучасних апаратних рішень та широкого залучення локальних енергетичних ресурсів дає можливість забезпечити високий рівень їхньої гнучкості з метою підтримки живлення максимальної кількості споживачів у разі пошкоджень різної тяжкості та тривалості, які можуть виникнути у централізованій системі електропостачання, що відрізняє її від існуючих технічних рішень. Бібл. 9, рис. 2.

Ключові слова: розподільні системи, надійність електропостачання, силові перетворювачі, мікромережі.

Вступ. Безпрецедентність та складність ситуації, у якій на даний час опинилася електроенергетична галузь України, полягає у тому, що подальше відновлення та розвиток всієї інфраструктури необхідно планувати та здійснювати з урахуванням існуючих і довготривалих потенційних загроз зовнішнього втручання (включаючи фізичне) в їхню роботу. Ще жодна країна не ставила перед собою таке завдання та саме тому відсутні будь-які типові напрацювання та загальноприйняті рекомендації у цьому напрямі.

У цьому випадку мова має йти не стосовно відновлення пошкоджених елементів електроенергетичної інфраструктури у старих форматах, а відносно створення принципово нової організації електропостачання, заснованої на перевагах і можливостях, які надають сучасні та перспективні технічні засоби. Певною мірою це пов'язано з тим, що більшість діючих в країні нормативних документів, зокрема стосовно забезпечення надійності електропостачання, не передбачали можливості зовнішнього цілеспрямованого агресивного втручання як у роботу Об'єднаної енергетичної системи України, так і окремих її ланок. Відповідно, забезпечення надійності (а скоріше живучості) систем електропостачання у зазначених умовах та максимальне залучення локальних енергетичних ресурсів вимагає реалізації нетрадиційних технічних рішень.

Мета досліджень полягає у розробці концептуальних пропозицій щодо побудови гнучкої системи розподілу електричної енергії, яка б не тільки гарантувала підтримку електропостачання, принаймні, критичній групі електроприймачів у найбільш несприятливих випадках, але одночасно сприяла безконфліктній інтеграції локальних джерел енергії, що розглядається як пріоритетний напрям розвитку галузі при формуванні ефективних режимів роботи у нормальних умовах експлуатації. Важливою рисою такої системи розподілу є прагнення в залежності від важкості можливих пошкоджень в енергосистемі країни зберегти електропостачання для максимально можливої кількості споживачів.

Загальні принципи організації електропостачання. Умовно систему розподілу електричної енергії можна поділити на три складові. Перша з них являє собою безпосередньо розподільні мережі з приєднаними до них трансформаторами напругою 10/0,4 кВ, які забезпечують електричною енергією споживачів певної (достатньо великої) території. Другою складовою є мережі низької напруги, у загальному випадку з інтегрованими до них як окремими локальними джерелами енергії, так і, що вва-

© Жаркін А.Ф., Попов В.А., Ярмолюк О.С., Палачов С.О., Наталич В.О., 2024
ORCID: * <https://orcid.org/0000-0001-5996-0901>; ** <https://orcid.org/0000-0003-3484-4597>;
*** <https://orcid.org/0000-0001-8571-2573>; **** <https://orcid.org/0000-0002-4502-1724>;
***** <https://orcid.org/0000-0003-0242-626X>

© Видавець Інститут електродинаміки НАН України, 2024



Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>

жається більш прогресивним та ефективним, їх груп у вигляді мікромереж. Міжнародні стандарти дають наступне визначення: мікромережа (*microgrid*) – це об'єднана група навантажень і розподілених енергетичних ресурсів у певних межах, яка діє як єдиний керований об'єкт і здатна працювати паралельно з зовнішньою мережею розподілу, а також в ізолюваному режимі. У цьому випадку мова йде щодо забезпечення електропостачання відносно невеликої групи компактно розташованих споживачів. Третя складова – це безпосередньо внутрішні мережі окремих об'єктів електропостачання, які також у загальному випадку можуть включати певні локальні джерела енергії, склад і параметри яких значною мірою залежать від характеристик самого об'єкту.

У роботі пропонується нова структура системи розподілу електричної енергії, сутність якої полягає у забезпеченні гнучкості, узгодженості й ефективності спільного функціонування окремих її складових як у нормальних умовах експлуатації, так і підтримки гарантованого живлення певної групи електроприймачів у надзвичайних ситуаціях, пов'язаних із обмеженістю або відсутністю можливості отримання електричної енергії від централізованих джерел живлення у залежності від важкості й обсягу їх пошкоджень, що відрізняє її від існуючих пропозицій комплексністю вирішення завдання високонадійного електропостачання з максимальним залученням локальних джерел енергії.

Таким чином, створювана структура системи розподілу електричної енергії повинна забезпечити повноцінне або, принаймні, часткове її функціонування у наступних умовах.

1. Нормальні умови експлуатації, коли наявні локальні джерела енергії працюють паралельно з централізованою системою електропостачання та режими їхньої роботи (участь у покритті загального навантаження) визначаються виключно економічними міркуваннями, з забезпеченням усіх технічних обмежень та вимог.

2. Умови, пов'язані з певними обмеженнями в отриманні електричної енергії з боку централізованої системи. За таких обставин режими роботи локальних джерел енергії також визначаються економічними міркуваннями, але у межах жорстких обмежень щодо можливості отримання енергії з зовнішніх мереж (наприклад, за наявності певного графіку обмежень), дотриманні низки технічних вимог і передбачаючи можливість використання потенціалу регульованого навантаження (перша черга розвантаження). Зазначена ситуація, наприклад, може скластися, коли вийшли з ладу певні джерела централізованого електропостачання, а пропускна здатність елементів мереж не дає змоги в окремих режимах перерозподілити усе навантаження між рештою підстанцій.

3. Робота в умовах запланованих відключень централізованого електропостачання (впровадження графіку відключень). У такому випадку оператор, який здійснює експлуатацію локальних енергетичних ресурсів, планує заздалегідь їхнє оптимальне використання, тобто визначає графік припустимого навантаження та здійснює його розподіл між окремими джерелами енергії з урахуванням потенціалу регульованого навантаження (друга черга розвантаження).

4. Форс-мажорна ситуація, коли зовнішнє електропостачання повністю відсутнє, а локальні джерела енергії працюють на жорстко обмежене критичне навантаження (третя черга розвантаження). При цьому передбачається, що визначене заздалегідь (індивідуально за кожним конкретним об'єктом електропостачання) навантаження є відносно стабільним, мало змінюється у часі, що дає можливість підтримувати майже постійну вихідну потужність з боку локальних джерел енергії.

Розглянемо, яким чином наведені вище вимоги стосуються кожної з зазначених вище складових систем розподілу електричної енергії.

Розподільні мережі. Традиційно електропостачання навіть найбільш важливих споживачів розподільної мережі здійснювалося за двопробеневою схемою з двотрансформаторними підстанціями. При цьому у багатьох випадках відповідні розподільні лінії приєднувалися до різних шин однієї підстанції. Це обґрунтовувалося тим, що вірогідність одночасного пошкодження двох шин або трансформаторів, або живлячих їх ліній вважалася майже нульовою. Сьогоднішні реалії роблять наведене припущення безпідставним.

Це передбачає необхідність переорієнтування на іншу схему побудови розподільних мереж. Одночасно з цим, враховуючи перспективу активного насичення даного сегменту електроенергетики локальними джерелами енергії, зазначені мережі повинні мати високий рівень автоматизації, що забезпечить їм необхідний рівень гнучкості під час керування режимами у будь-яких ситуаціях, з дотриманням у зазначених умовах високого рівня ефективності, надійності й якості електричної енергії.

Дослідження останніх років свідчать, що зазначеним вимогам у значній мірі відповідає використання технології *Soft open points (SOP)* [1–3]. Більш того, в умовах реалій нашої країни є доцільним орієнтуватися на багатотермінальні (багатопортові) *SOP* (рис. 1) [4], де кожна розподільна лінія

спирається на незалежний центр живлення. Така побудова розподільних мереж дає можливість гнучко керувати потоками потужності окремих ліній, забезпечуючи за необхідності повноцінне або, принаймні, обмежене електропостачання споживачів у разі відключення (виходу з ладу) якогось з центрів живлення та, тим самим, підвищуючи надійність електропостачання у екстремальних ситуаціях.

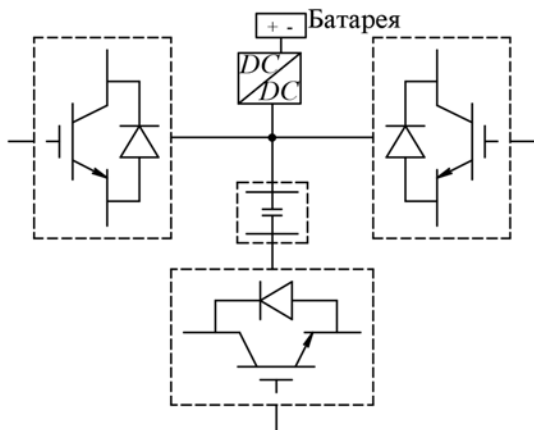


Рис. 1

Багатотермінальні *SOP* будуються з декількох груп *AC/DC* двонапрямлених *voltage source converters (VSC)* конверторів, у яких шини *DC* паралельно з'єднані між собою, а *AC* шини пов'язані з окремими розподільними лініями, що дає змогу підвищити ефективність використання обладнання та, тим самим, зменшити необхідні інвестиції [2].

Одночасно з цим у нормальних режимах незалежне керування потоками активної та реактивної потужностей дає можливість контролювати ступінь оптимальності

потокорозподілу практично у реальному часі у залежності як від поточної зміни навантаження у вузлах мережі, так і від значення вихідної потужності відновлюваних джерел енергії, які знаходяться в їхній структурі. Це є одним з найважливіших факторів, який дає змогу підвищити обсяг використання локальних джерел енергії, виключивши негативний вплив на режими усієї системи розподілу електричної енергії.

Вважається, що оптимальний режим роботи розподільної мережі досягається у тому випадку, коли на її ділянках формується потокорозподіл, максимально наближений до того, який створювався би за умов роботи зазначеного контуру у замкненому режимі.

У роботі [5] було продемонстровано, що одним з можливих критеріїв у такому випадку є забезпечення на усіх ділянках мережі мінімальних відхилень потокорозподілу активної та реактивної потужностей (враховуючи можливість незалежного керування зазначених параметрів) від тих значень, які мали би місце під час роботи контуру у замкненому режимі, тобто

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{K_i} (P_{ijt} - P_{ijt}^*)^2 \rightarrow \min, \quad \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{K_i} (Q_{ijt} - Q_{ijt}^*)^2 \rightarrow \min, \quad t = 1, \dots, T,$$

де N – кількість розподільних ліній; K_i – кількість ділянок i -тої розподільної лінії; P_{ijt} , Q_{ijt} – потокорозподіл на j -й ділянці i -тої розподільної лінії у період часу t ; P_{ijt}^* , Q_{ijt}^* – потокорозподіл на j -й ділянці i -тої розподільної лінії у період часу t за умов її роботи у замкненому режимі.

Додатково варто врахувати, що поширення використання малих локальних однофазних джерел енергії може призвести до появи суттєвої несиметрії напруги у мережах. У таких випадках використання *SOP* може надати значний позитивний ефект як в плані зменшення втрат потужності, так і з точки зору забезпечення необхідних рівнів напруги та нормованих значень інших показників якості електроенергії [6]. Окрім цього, на відміну від стандартних рішень, запропоновані багатотермінальні *SOP* надають можливість більш ефективно вирішити задачу інтеграції установок зберігання енергії у розподільні мережі за рахунок її оптимального перерозподілу між споживачами (рис. 1).

Мережі низької напруги. На даний час використання мікромереж є достатньо поширеним явищем у світовій електроенергетиці. Створені на рівні напруги 0,38 кВ мікромережі зазвичай об'єднують декілька типів розосереджених джерел генерації енергії (здебільше відновлюваних) та установку зберігання енергії. Під час проектування мікромереж планується, що вони мають працювати як паралельно з централізованою системою електропостачання, так і автономно у разі необхідності.

З точки зору надійності електропостачання саме можливість автономної роботи мікромереж має найбільше значення. Перш за все, це стосується випадків, коли електропостачання з боку централізованих джерел стає неможливим.

Основна складність у забезпеченні роботи мікромережі в автономному режимі полягає в необхідності постійної підтримки балансу генерація–навантаження, що вимагає обов'язкової наявності в її структурі регульованих джерел генерації енергії достатньої потужності, установок зберігання енергії, регульованого навантаження. При цьому ступінь використання зазначених джерел значною

мірою залежить від того чи режим автономної роботи у певні періоди часу планується заздалегідь або виникає несподівано, наприклад, у наслідок зовнішнього втручання у роботу енергосистеми.

У зв'язку з цим розглядається один із можливих шляхів полегшення виконання умови узгодження мінливої (у загальному випадку) генерації та змінного навантаження, а, відповідно, й підтримки надійної роботи, який полягає у створенні можливості обміну електроенергією між окремими мікромережами, які розташовано у певній обмеженій зоні. У той же час, у більшості наявних досліджень передбачається використання для цієї мети безпосередньо розподільних мереж [7], що не завжди є можливим в умовах виникнення екстремальних ситуацій.

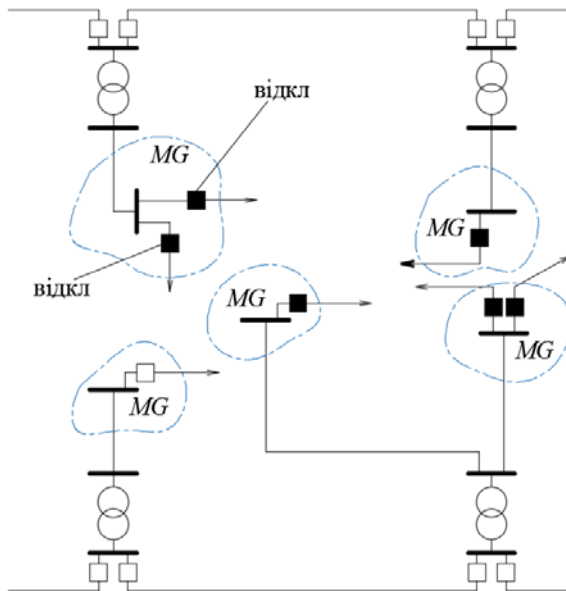


Рис. 2

Як певну альтернативу можна розглядати створення на рівні напруги 0,38 кВ зв'язків між окремими мікромережами (рис. 2) за умови, що вони знаходяться під спільним оперативним керуванням.

У нормальному режимі роботи на зазначених лініях відповідні вимикачі знаходяться у відключеному стані, тобто мережі зберігають розімкнену топологію. При цьому, з метою забезпечення більшої гнучкості та надійності роботи такої структури деякі фахівці як відповідні комутаційні апарати пропонують використовувати так звані *static transfer (interconnecting) switches (STS)* [8].

Лінія зв'язку може вмикатися, коли одній з мікромереж потрібна підтримка додаткової потужності, а інша мікромережа (мікромережі) у той час має певний резерв потужності. Зазначені умови можуть бути визначені наступним чином.

Мікромережа i потребує додаткової потужності, якщо

$$\sum_{j=1}^{N_i} S_{MGj}^{\max,t} - \sum_{j=1}^{N_i} S_{MGj}^t < \alpha \sum_{j=1}^{N_i} S_{MGj}^{\max,t}.$$

Підтримка i -тої мікромережі з боку m -тої можлива, якщо виконується умова

$$\sum_{k=1}^{N_m} S_{MGk}^{\max,t} - \sum_{k=1}^{N_m} S_{MGk}^t > \alpha \left[(1-\gamma) \sum_{j=1}^{N_i} S_{MGj}^{\max,t} + \sum_{k=1}^{N_m} S_{MGk}^{\max,t} \right].$$

У наведених виразах $\alpha \approx 0,1$ та визначається експертним шляхом, $\gamma = \left(\sum_{j=1}^{N_i} S_{MGj}^{\max,t} - \sum_{j=1}^{N_i} S_{MFj}^t \right) / \left(\sum_{j=1}^{N_i} S_{MGj}^{\max,t} \right)$, де $S_{MGj}^{\max,t}$, S_{MGj}^t – відповідно максимально можлива та фактична

потужності, що генеруються j -м джерелом i -тої мікромережі у момент часу t ; N_i – кількість локальних джерел енергії i -тої мікромережі; $S_{MGk}^{\max,t}$, S_{MGk}^t , N_k – аналогічні показники для k -тої мікромережі.

Аналогічним чином можливо визначити й умови доцільності відключення відповідної лінії зв'язку, тобто роз'єднання мікромереж.

Додатковою позитивною рисою з'єднання мікромереж між собою лініями зв'язку є можливість концентрації в одній із них більш потужних, а, відповідно, і більш ефективних (мікротурбіни, газопоршньові установки) регульованих джерел енергії та/або установок її зберігання колективного використання. Це створить додаткові можливості для балансування режимів у межах кожної мікромережі під час їхньої роботи в автономному режимі.

Доцільність використання зв'язку між мікромережами у нормальному режимі роботи, звісно, потребує певного обґрунтування. Наприклад, це може бути виправдано, коли в одній з мікромереж у певний період часу є профіцит електроенергії, що генерується відновлюваними джерелами енергії. У загальному випадку як альтернатива обміну потужністю між мікромережами розглядається можливість отримання додаткової потужності з енергосистеми.

У той же час автори вважають важливим підкреслити, що в екстремальних умовах наявність та використання зв'язку між мікромережами може бути єдиним варіантом підтримки електропостачання максимальної кількості споживачів без їхнього масового відключення.

Внутрішні мережі об'єктів електропостачання. На перший погляд здається, що питання підтримки живлення найбільш важливих або критичних електроприймачів у певних об'єктах у разі відключення централізованих джерел чітко регламентується діючими нормативними документами, де наведено умови та конкретні схеми організації як безперебійного, так і гарантованого електропостачання [9].

У той же час, ситуація, що складається сьогодні у цій сфері, створює нові виклики, які мають бути враховані у процесі вирішення питання організації електропостачання різноманітних об'єктів.

Суттєво зростає спектр споживачів, які власним коштом або іншим шляхом бажають забезпечити гарантоване електропостачання критичних (на їх погляд) власних електроприймачів.

Припинення централізованого електропостачання надалі не є поодиноким явищем, а може отримати циклічний характер, наприклад, за умов впровадження графіку відключень, що суттєво підвищує частоту використання аварійних схем живлення об'єктів.

Тривалість відключення споживачів може суттєво збільшуватися та залежить від масштабу пошкоджень об'єктів інфраструктури у системах централізованого електропостачання.

Активне впровадження локальних джерел енергії з боку споживачів, по суті, створює умови для перетворення системи розподілу електроенергії в межах об'єкту в аналог мікромережі, що вимагатиме виконання певних умов задля забезпечення її максимально ефективного функціонування у будь-яких можливих ситуаціях.

Окрім цього додатково варто врахувати можливість появи зарядних станцій зі зростанням парку електромобілів, доцільність впровадження замість традиційних дизельних генераторів як засіб забезпечення гарантованого електропостачання, що передбачено діючими нормами, наприклад [9], когенераційного обладнання, враховуючи потребу багатьох споживачів і у тепловій енергії.

Зазначені обставини ускладнюють завдання розробки уніфікованого рішення щодо побудови оптимальної структури внутрішніх мереж об'єкту електропостачання, яка буде залежати як від обсягу критичного навантаження, яке, по суті, може визначатися індивідуально кожним окремим споживачем, так і наявності, номенклатури та параметрів існуючих локальних засобів генерування та зберігання енергії.

Висновки. Вирішення питань збільшення питомої ваги децентралізованих джерел енергії у забезпеченні електропостачання широкого кола споживачів із широким залученням локальних енергетичних ресурсів в умовах тривалої загрози зовнішнього руйнівного втручання в роботу об'єктів Об'єднаної енергетичної системи України може бути реалізовано за рахунок суттєвої зміни принципів побудови усіх ланок систем розподілу електричної енергії.

Запропоновані в роботі технічні рішення щодо побудови розподільних мереж пов'язані з використанням багатотермінальних силових перетворювачів, що у порівнянні з традиційною технологією *SOP* за рахунок гнучкості дає змогу додатково підвищити надійність електропостачання в умовах відмови окремих сегментів Об'єднаної енергетичної системи України. Одночасне залучення *micro-grids* у мережі низької напруги зі створенням певних електричних зв'язків між ними, використання власних джерел енергії безпосередньо у мережах самих об'єктів електропостачання надає можливість не тільки підтримати живлення максимальної кількості електроприймачів у залежності від поточного стану Об'єднаної енергетичної системи, але й створить умови для ефективного функціонування усєї системи розподілу електричної енергії в нормальних умовах їхньої експлуатації. Реалізація усіх зазначених технічних рішень потребує подальших досліджень, спрямованих на наукове обґрунтування принципів та розробку безпосередньо алгоритмів керування силовими перетворювачами адаптованих до різноманітної їхньої локалізації й умов використання.

1. Bloemink J.M., Green T.C. Increasing distributed generation penetration using soft normally-open points. *Proc. IEEE PES General Meeting*. 2010. Vol. 1. Pp. 1–8.

2. Fuad K.S., Hafezi H., Kauhaniemi K., Laaksonen H. Soft Open Point in Distribution Networks. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8 (2). Pp. 210550–210565. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3039552>.

3. Cao W., Wu J., Jenkins N., Wang C., Green T. Operating principle of soft open points for electrical distribution network operation. *Applied Energy*. 2016. Vol. 164. Pp. 245–257. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.12.005>.

4. Deakin M., Taylory P.C., Bialek J., Ming W. Design and Operation of Hybrid Multi-Terminal Soft Open Points using Feeder Selector Switches for Flexible Distribution System Interconnection. Proc. 22nd *Power Systems Computation Conference (PSCC 2022)*, Porto, Portugal, June 27 – July 1, 2022. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2201.05817>.
5. Popov V., Tkachenko V., Yarmoliuk O., Yatsenko D. Actual Trends of Electrical Distribution Systems Automation. *Power Systems Research and Operation. Studies in Systems, Decision and Control book series*. Switzerland: Springer Cham, 2022. Vol. 220. Pp. 319–346. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-17554-1_14.
6. Lou C., Yang J., Vega-Fuentes E., Meena N.K., Min L. Multi-terminal phase-changing soft open point SDP modeling for imbalance mitigation in active distribution networks. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*. 2022. Vol. 142 (5). No 108228. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2022.108228>.
7. Wang Z., Chen B., Wang J., Begovic M.M., Chen C. Coordinated Energy Management of Networked Microgrids in Distribution Systems. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2015. Vol. 6. No 1. Pp. 45–53. DOI: <https://doi.org/10.1109/TSG.2014.2329846>.
8. Pashajavid E., Shahnian F., Ghosh A. Development of a Self-Healing Strategy to Enhance the Overloading Resilience of Islanded Microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2017. Vol. 8. No 2. Pp. 868–880. DOI: <https://doi.org/10.1109/TSG.2015.2477601>.
9. ДБН В.2.5-23:2010 Інженерне обладнання будинків і споруд. Проектування електрообладнання об'єктів цивільного призначення. Київ: Мінрегіонбуд України, 2010. 104 с. URL: <https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/1-1-0-356>.

MULTI-LEVEL FLEXIBLE ELECTRICITY DISTRIBUTION SYSTEMS

A.F. Zharkin¹, V.A. Popov², O.S. Yarmoliuk², S.O. Palachov¹, V.O. Natalych²

¹ Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,

56, Beresteyskiy Ave., Kyiv, 03057, Ukraine,

² National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",

37, Beresteyskiy Ave., Kyiv, 03056, Ukraine,

e-mail: fig@ukr.net, yarmolvuk.jena@gmail.com.

In the conditions of a long-term threat of the destruction of the energy structure, the distribution networks of our country need to change the principles of their construction. For this purpose, a multi-level structure of the construction of the distribution system is proposed. Such a structure, due to the use of modern hardware solutions and extensive involvement of local energy resources, makes it possible to ensure a high level of their flexibility. In order to maintain power supply to the maximum number of consumers in the event of damage of varying severity and duration that may occur in the centralized power supply system. References 9, figures 2.

Keywords: distribution systems, reliability, power electronics, microgrids.

1. Bloemink J.M., Green T.C. Increasing distributed generation penetration using soft normally-open points. Proc. IEEE PES General Meeting. 2010. Vol. 1. Pp. 1–8.
2. Fuad K.S., Hafezi H., Kauhaniemi K., Laaksonen H. Soft Open Point in Distribution Networks. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8 (2). Pp. 210550–210565. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3039552>
3. Cao W., Wu J., Jenkins N., Wang C., Green T. Operating principle of soft open points for electrical distribution network operation. *Applied Energy*. 2016. Vol. 164. Pp. 245–257. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.12.005>
4. Deakin M., Taylory P.C., Bialek J., Ming W. Design and Operation of Hybrid Multi-Terminal Soft Open Points using Feeder Selector Switches for Flexible Distribution System Interconnection. Proc. 22nd *Power Systems Computation Conference (PSCC 2022)*, Porto, Portugal, June 27 – July 1, 2022. 2022. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2201.05817>
5. Popov V., Tkachenko V., Yarmoliuk O., Yatsenko D. Actual Trends of Electrical Distribution Systems Automation. *Power Systems Research and Operation. Studies in Systems, Decision and Control book series*. Switzerland: Springer Cham, 2022. Vol. 220. Pp. 319–346. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-17554-1_14
6. Lou C., Yang J., Vega-Fuentes E., Meena N.K., Min L. Multi-terminal phase-changing soft open point SDP modeling for imbalance mitigation in active distribution networks. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*. 2022. Vol. 142 (5), No. 108228. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2022.108228>
7. Wang Z., Chen B., Wang J., Begovic M.M., Chen C. Coordinated Energy Management of Networked Microgrids in Distribution Systems. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2015. Vol. 6, No 1. Pp. 45–53. DOI: <https://doi.org/10.1109/TSG.2014.2329846>
8. Pashajavid E., Shahnian F., Ghosh A. Development of a Self-Healing Strategy to Enhance the Overloading Resilience of Islanded Microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2017. Vol. 8, No 2. Pp. 868–880. DOI: <https://doi.org/10.1109/TSG.2015.2477601>
9. State construction standards V.2.5-23:2010 Engineering equipment of buildings and structures. Designing electrical equipment of civil objects. Kyiv: Ministry of Regional Construction of Ukraine, 2010. 104 p. URL: <https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/1-1-0-356> (Ukr).

Надійшла 30.04.2024
Остаточний варіант 06.06.2024