

С.Л. Андрушко

АВТОМАТИЗАЦІЯ КЕРУВАННЯ РОЗОСЕРЕДЖЕНИМ ГЕНЕРУВАННЯМ ТА НАВАНТАЖЕННЯМ РОЗПОДІЛЬЧОЇ МЕРЕЖІ У РАЗІ ВІДДІЛЕННЯ ВІД ЕНЕРГОСИСТЕМИ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

В даній доповіді розглядаються актуальні питання децентралізації енергетичних систем, зокрема в контексті України, що стикається з викликами у підтримці надійного електропостачання через війну. Особлива увага акцентується на використанні концепції "енергетичного острова" для забезпечення автономності енергопостачання в умовах можливих аварійних ситуацій чи атак на інфраструктуру. Термін "енергетичний острів" охоплює самодостатні системи, які можуть функціонувати автономно від основної енергомережі, об'єднуючи розподілені джерела енергії (РДЕ), зокрема відновлювані джерела, і споживачів у межах мікромережі. В тексті наведені приклади країн, які вже успішно реалізували таку ізольовану енергосистему, та аналізуються потенційні вигоди від впровадження подібних технологій в Україні. Доповідь підкреслює стратегічну важливість розподіленої генерації (ДРГ), яка може діяти незалежно від централізованої енергосистеми в кризових умовах. На основі огляду літератури й міжнародного досвіду пропонується структурована концепція мікромережі, що базується на розподілених генераторах з автономними системами керування. Описуються технічні особливості систем автоматизації, що забезпечують стабільне функціонування мікромережі в умовах відключення від основної мережі. Зокрема, описуються вимоги до автоматичних регуляторів частоти та напруги, реклоузерів, що забезпечують безпечний перехід у режим "острова", а також системи моніторингу та синхронізації генераторів. Дослідження спрямоване на підвищення надійності української енергосистеми через впровадження розподілених джерел енергії та систем накопичення енергії (СНЕ), що підвищить стійкість розподільчих мереж до зовнішніх впливів. Важливим елементом дослідження є акцент на перевагах гідроелектростанцій, які легко запускаються без зовнішнього джерела живлення, оскільки потребують мінімальної енергії для допоміжних систем, тому за приклад в доповіді взято саме гідроелектростанцію, хоча загалом принципи актуальні також і для інших ДРГ.

Ключові слова : ізольований режим, генератор, джерело розосередженої генерації (ДРГ), автоматичний регулятор напруги (АРН), автоматичне частотне розвантаження (АЧР), система контролю потужності (СКП), мікромережа.

ВСТУП

Останніми роками термін «енергетичний острів» використовується науковцями, практиками, а також в урядових та міжурядових звітах для опису різного розуміння енергетичної ізоляції в широкому діапазоні контекстів та сценаріїв. Одне з вживань цього терміну стосується фізично ізольованих островів, які мають самодостатні системи виробництва та розподілу електроенергії. Прикладами є Швеція (о. Готланд), Данія, Ісландія, Кіпр. У цих випадках термін відзначає географічні та логістичні складнощі, пов'язані з постачанням енергії на віддалених островах. Інше використання стосується країн, які навмисно ізолюють свої електроенергетичні системи від навколишнього середовища з політичних причин, а не через фізичні обмеження. Донедавна яскравими прикладами таких країн вважалися Ізраїль та Південна Корея, та, на жаль, після масованих атак на енергетичні об'єкти з початку повномасштабного вторгнення даний статус стає все більш актуальним для України. У цьому контексті термін «енергетичний острів» відзначає свідоме відокремлення та самодостатність, яку прагнуть досягти ці країни у своїй енергетичній стратегії. Крім того, поняття «енергетичний острів» також може застосовуватися у менших масштабах, коли громади, міста, регіони або політичні структури

добровільно відокремлюються від основної електромережі, використовуючи технології, такі як мікромережі [1].

Термін «енергетичний острів» застосовується незалежно від того, чи виробництво електроенергії покладається на імпортовані чи вітчизняні джерела палива, такі як нафту, газ, вугілля, фотоелектричні модулі чи вітрогенератори.

Широке використання відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) безумовно визначає стратегічний курс розвитку сучасної енергетики у всьому світі. Впровадження ВДЕ відбувається як на рівні систем, що формують енергетичні мережі, так і шляхом розподіленої генерації (РГ) на рівні «енергетичних островів». Насичення розподільних мереж установками генерування електроенергії з відновлюваних джерел, особливо одного типу, породжує низку проблем, головним чином, пов'язаних з нестабільністю та непередбачуваністю рівня генерування. Інтегрування відновлюваних джерел енергії зі змінною потужністю в електричні мережі фактично перетворює традиційне генерування електроенергії з контрольованих та керованих джерел на некеровану та недиспетчеризовану систему [2].

Початок повномасштабної військової агресії російської федерації 24 лютого 2022 року суттєво позначився на енергетичному секторі України. Однією з причин значної руйнівності атак на енергетичну систему України є її «централізована» структура. Це означає, що велика частина електроенергії постачається від обмеженої кількості великих об'єктів генерування. Через це пошкодження таких об'єктів або їхніх мереж може призвести до масових відключень електропостачання для багатьох споживачів, що, у найгіршому сценарії, здатне спричинити критичну ситуацію в Об'єднаній енергосистемі України та викликати масштабний блекаут [7].

Протягом однієї ночі, на 22 березня 2024 року, країна пережила раптову зміну в енергетичному балансі: від часткового енергопрофіциту, коли був максимальний експорт електроенергії понад 700 МВт на початку березня, до енергодефіциту. Загальна потужність енергосистеми пошкоджена на рівні 3,0-3,5 ГВт, при цьому дефіцит потужності в системі сягає до 2 ГВт, і максимальний обсяг імпорту електроенергії досягає 1500 МВт в окремі години. Електростанції, що використовуються як маневрові для регулювання енергетичного балансу, вийшли з ладу, що ще більше поглибило існуючий дефіцит. Критична недостатність маневрових потужностей ще більше ускладнила перехід до відновлюваних джерел енергії в енергосистемі.

Стратегічний шлях полягає у децентралізації електропостачання завдяки збільшенню кількості джерел розосередженої генерації (ДРГ) та систем накопичення енергії (СНЕ), які можуть сприяти підвищенню надійності розподільчих мереж (РМ), та збільшенню частки балансуємих потужностей генерації, які мають сприяти підвищенню рівня надійності ОЕС України.

ЗАГАЛЬНА КОНЦЕПЦІЯ ОРГАНІЗАЦІЇ МІКРОМЕРЕЖІ НА ОСНОВІ ДЖЕРЕЛА РОЗРОДІЛЕНОГО ГЕНЕРУВАННЯ. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Мікромережа - це невелика і незалежна система, яка об'єднує розподілені джерела енергії (РДЕ), споживачів, системи накопичення енергії, а також пристрої керування, утворюючи інтегровану керовану систему електропостачання.

Для досягнення балансу генерування та споживання в мікромережах використовуються автоматизовані системи, які керують роботою генераторів, здійснюють управління вимикачами, пристроями РПН, регуляторами, а також дистанційний збір даних. Ці пристрої мають зворотній зв'язок, завдяки якому реагують на локально відстежувані частоту та напругу.

Мікромережа може працювати паралельно з основною енергомережею, або в ізолюваному режимі, де мікромережа від'єднана від основної мережі і працює автономно, обслуговуючи власних локальних споживачів, використовуючи власні джерела генерування. Під час аварійних режимів мікромережа може самостійно від'єднатися від основної мережі та працювати автономно. Після ліквідації аварійного режиму, мікромережа може знову під'єднатися до основної електромережі. Таким чином, мікромережа – це інтелектуальна автоматизована система, яка здатна самостійно переналаштовуватися, підтримувати баланс потужності та розподіляти потоки електроенергії [4].

Питання організації мікромереж та енергоостровів є актуальним не лише для України. Тож цій тематиці присвячено значну кількість публікацій. В [3] досліджено декілька схем переходу газотурбінних установок (ГТУ) від паралельної роботи з енергосистемою до острівного режиму. В роботі наведено результати моделювання переходу в ізолюваний режим двох та трьох генерувальних установок окремо на виділене навантаження та, як порівняння, відключення генераторів від мережі зі збереженням електричного зв'язку між ними. В обох варіантах, коли ГТУ підключені до системи, вони працюють в режимі регулювання активної та реактивної потужності (далі PQ-режим). У випадку від'єднання від мережі та незалежної роботи кожної з ГТУ регулятори переходять в режим регулювання частоти та напруги (далі режим V-f). Також описуються особливості функціонування в ізолюваному режимі кількох ГТУ, з'єднаних між собою. В такому випадку генератори працюють в режимі «ведучий – ведений» (master – slave). Ведуча ГТУ працює в режимі V-f, тоді як ведена установка працює в режимі PQ відносно ведучого. Також в даній роботі наглядно проілюстровано відмінність часу реакції та стабілізації системи після перехідного процесу в різних режимах.

В [4] описані методи діагностування переходу мікромережі з паралельного в ізолюваний режим. Автор розділяє їх на дві групи: дистанційні та локальні. У першій групі алгоритм виявлення знаходиться на стороні мережі, у другій групі метод виявлення знаходиться на стороні джерела генерування. Крім того, локальні методи запропоновано розділити на пасивні, які базуються на вимірюванні електричних параметрів, і активні, які продукують збурення на стороні генеруючої установки для зміни вихідних величин. Дистанційні методи використовують певний зв'язок між мережею та джерелом розподіленої генерації. Вони виявляють острівний режим з високим ступенем надійності та точності, проте їх впровадження є досить дорогим у порівнянні з локальними методами.

У [5] наведено результати дослідження системи первинного контролю гідроелектростанції в «ізолюваному» режимі, які проводилися з метою визначення найкращих параметрів систем керування регуляторами. Досліджено чотири регулятори: традиційний, ПІ, ПІД та ПІ-ПІД. Їхні характеристики оцінюються за критеріями стійкості та індексом швидкодії. Результати роботи моделі з розрахованими параметрами на основі реальної гідроелектростанції, що працює з однією турбіною, є задовільними. Аналіз показує, що ПІ-регулятор має найкращий показник ефективності, а традиційний регулятор має найгірший показник.

ДЕТАЛІЗАЦІЯ СТРУКТУРИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЕНЕРГООСТРОВОМ. ЗАСОБИ ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ

Концепція Smart grid має різні цілі, серед яких підвищення конкуренції між постачальниками, оптимізація використання різних енергетичних джерел, а також впровадження автоматизації та моніторингу для енергосистеми.

Гідроелектростанції є одними з найпростіших для запуску без зовнішнього джерела живлення, оскільки для запуску допоміжних систем потрібна невелика потужність. Допоміжними системами на ГЕС є масляні насоси для змащення підшипників і для відкриття шлюзів гідроагрегату, повітряні компресори та котушки збудження поля. На ГЕС немає тягодуттєвих вентиляторів, конвеєрів та інших енергоємних споживачів (як на вугільних електростанціях), які мають бути запущені до того, як генератор ввімкнеться в мережу. Газові турбіни також не потребують обладнання для роботи з паливом, але після того, як вони вичерпують усі запаси газу, що зберігаються на місці, їхня подальша робота вимагає, щоб газопроводи, які живлять турбіни, підтримували належний тиск; для цього потрібна електроенергія. Таким чином, мінімальне допоміжне обладнання на ГЕС зменшує величину потужності станції, що є значною перевагою гідроенергетики перед іншими типами генераторів.

Далі розглядатимуться саме способи керування, автоматизації та моніторингу для розподіленої генерації (на прикладі гідрогенераторів, хоча рішення щодо електричної складової та автоматизації можуть застосовуватися і для інших видів станцій з синхронними генераторами).

В цьому розділі розглядаються умови коректного переходу об'єкту генерування з паралельного режиму роботи з енергосистемою в «острівний» режим та особливості роботи в цьому режимі:

1). Система повинна розпізнати ненормальний стан електромережі і відключити автоматичний вимикач (або кілька вимикачів), розташованих у відповідному місці, щоб відокремити генератор та ізольоване навантаження міні-мережі від основної електромережі [6]. Це може бути як вимикач лінії зв'язку станції, в разі якщо потенційного ресурсу (води, пари і т.д.) вистачає лише для живлення власних потреб станції, або ж один з лінійних реклоузерів, у випадку якщо є можливість жити певну частину виділеного навантаження. Реклоузер в повному розумінні включає в себе вакуумний вимикач, трансформатори струму та напруги, допоміжну систему живлення постійного струму, мікропроцесорну систему захисту та управління, а також комунікаційні порти та програмне забезпечення SCADA.

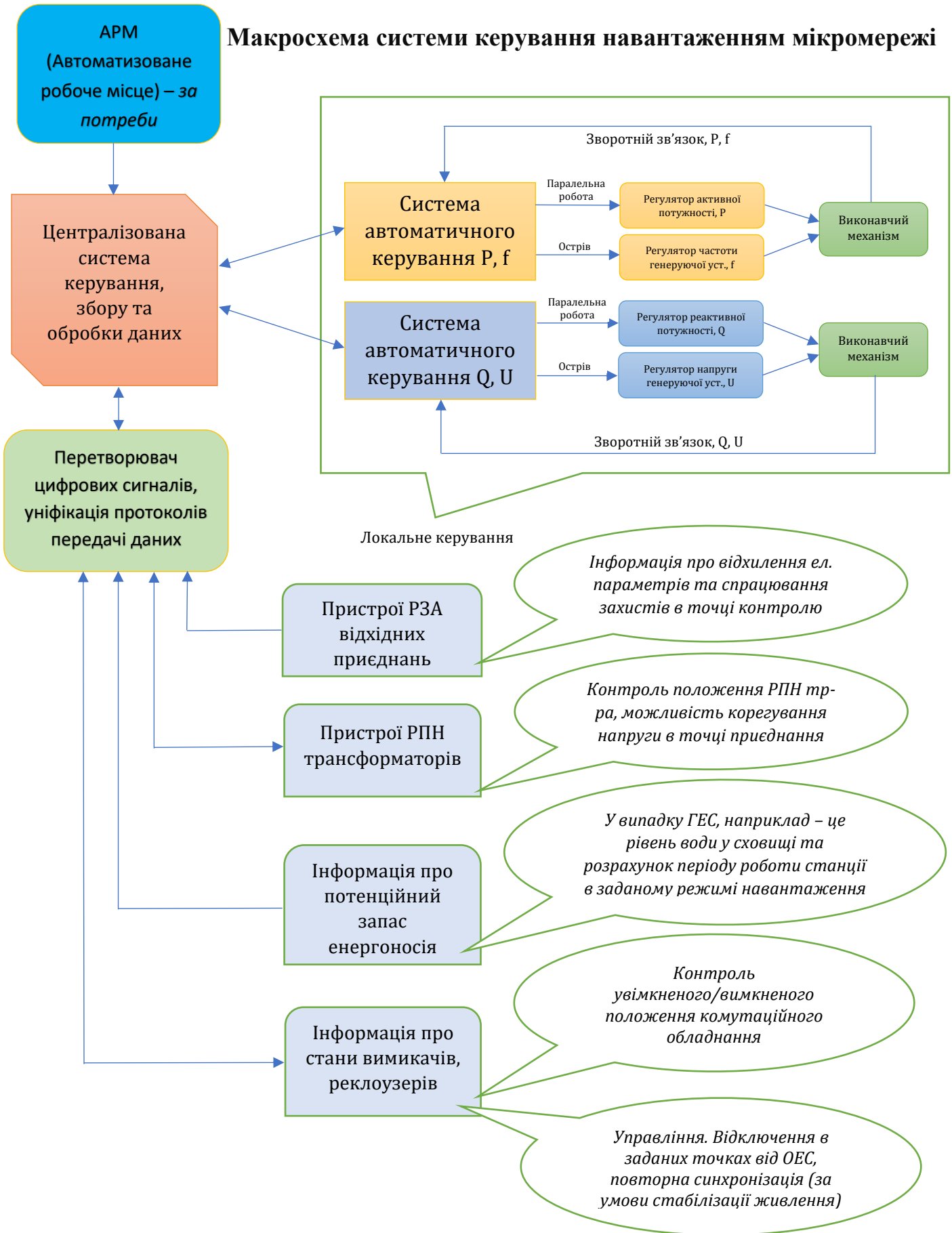
2). Після відключення генератор повинен негайно перейти з "паралельного режиму" в "автономний режим", задіявши засоби керування для регулювання частоти. У випадку гідроенергетичного проекту це може означати ввімкнення регулятора навантаження резистивного баласту або інших засобів, щоб турбіна оберталася з потрібною швидкістю. Може знадобитися негайне перемикавання автоматичного регулятора напруги (АРН) генератора для роботи в іншому режимі. Наприклад, якщо при підключенні до електромережі регулятор працював у режимі регулювання коефіцієнта потужності (pfc), його потрібно буде переключити в режим регулювання напруги. На додаток до конфігурації генератора, налаштування різних захисних реле, ймовірно, будуть відрізнятися в автономному режимі, або будуть використовуватися окремі реле, оскільки струм КЗ генераторів малої потужності зазвичай менший, ніж в генераторів великої потужності в основній мережі, і допуски на напругу або частоту можуть бути ширшими в автономному режимі [6]. Зазвичай в сучасних мікропроцесорних терміналах захисту реалізовано кілька «наборів» уставок захисту на випадок різних режимів роботи обладнання, вибір «набору» уставок можливо здійснювати дистанційно через подачу сигналу на дискретний вхід приладу. З першого погляду це несуттєве уточнення, але у випадку зміни режиму роботи генератора та, як наслідок, зміни уставок релейного захисту це веде до спрощення побудови схеми автоматизації та запобігає підвищенню вартості проекту в цілому.

3). Для запобігання виходу частоти за межі допустимого рівня та, як наслідок, втрати генерування, динамічне високошвидкісне скидання навантаження стає важливим рішенням. Теорія, що лежить в основі скидання навантаження, базується на простому принципі балансування між генеруванням та навантаженням. Якщо навантаження перевищує генерування через непередбачувані збої в енергосистемі, високошвидкісна система маневрування реагує на це, вимикаючи заздалегідь розраховану кількість навантаження, що дозволяє системі підтримувати баланс, мінімізуючи вплив на системні процеси.

Система контролю потужності (СКП) повинна провести аналіз і визначити порядок дій для відключення реклоузерів у разі зниження частоти (ЗПЧ) і налаштувати їх таким чином, щоб контроль здійснювався не тільки за відхиленням частоти (Δf), але і за швидкістю зміни частоти (df/dt). Це дозволить точніше регулювати величину навантаження в залежності від частоти та потужності ГЕС, яка має низьку маневреність [6]. Реалізація даного пункту здійснюється також за участі мікропроцесорних терміналів захисту, що встановлюються на кожному приєднанні, що керується системою. Необхідно зауважити, що для функціонування релейного захисту та автоматики (зокрема частотного захисту) на кожному приєднанні мають бути встановлені трансформатори напруги. Також без контролю напруги як зі сторони енергосистеми та і зі сторони генератора неможлива повторна синхронізація в даній точці системи.

4). Система повинна продовжувати моніторинг лінійної напруги в основній мережі, і коли живлення мережі стабілізується, забезпечити можливість повторного підключення до ОЕС. Перед повторним підключенням генератор, що працює в острівному режимі, повинен бути синхронізований з основною мережею [6]. Реле контролю синхронізму є ключовим компонентом з'єднання для синхронних генераторів. Перед тим, як синхронний генератор підключається до мережі, напруга генератора повинна бути синхронізована з напругою мережі, як за частотою, так і за фазою. Якщо генератор і мережа не синхронізовані, під час підключення можуть протікати великі струми, які можуть пошкодити генератор. Реле контролю синхронізму запобігає підключенню до мережі, якщо генератор не синхронізований з мережею.

Макросхема системи керування навантаженням мікромережі



ВИСНОВКИ

У роботі розглянуто важливі аспекти функціонування та автоматизації джерел розподіленої генерації у контексті концепції Smart Grid, що передбачає підвищення ефективності енергосистем за допомогою автоматизації та моніторингу. Гідроелектростанції мають значну перевагу в тому, що для їхнього запуску не потрібне складне допоміжне обладнання, а також вони можуть швидко переходити в автономний ("острівний") режим у випадку збоїв у роботі загальної енергосистеми. Важливими елементами керування в такому режимі є системи автоматичного регулювання потужності, системи збору та обробки даних, синхронізація генераторів із мережею та маневрування навантаженням. Це забезпечує стабільність і надійність роботи електростанцій, особливо в кризових ситуаціях або при нестабільності мережі, що актуально для сучасної енергетики України.

Зважаючи на необхідність планування функціонування розподільчих мереж як у режимі паралельної роботи з централізованою енергосистемою, так і в «острівному» режимі, а також на вплив нових джерел розподіленої генерації (ДРГ), які можуть бути розміщені як у межах таких «островів», так і поза ними, виникає потреба забезпечити надійність електропостачання. Це потребує створення нових підходів і алгоритмів для оцінки надійності та оптимізації розміщення комутаційного і захисного обладнання в таких умовах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Rettig E., Fischhendler I., Schlecht F., "The meaning of energy islands: Towards a theoretical framework", Renewable and Sustainable Energy Reviews 187 (2023) 113732;
2. Task Force, "Ukrainian energy sector evaluation and damage assessment -X (as of May24, 2023);
3. Chowdhury S., Ten S., Crossley P., "Operation and control of DG based power island in Smart Grid environment", CIRED Seminar 2008: Smart Grids for Distribution;
4. Trujillo C., Velasco D., Figueres E., Garcera G., "Local and Remote Techniques for Islanding Detection in Distributed Generators", Distributed generation, 2010;
5. Zoby M., Yanagihara J., "Analysis of the Primary Control System of a Hydropower Plant in Isolated Model", Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2009;
6. Андрушко С., "Особливості регулювання режимів синхронного генератора, що забезпечує живлення розподільчої мережі, ізольованої від енергосистеми», Вінницький національний технічний університет, 2023;
7. Фролов І., «Аналіз поточного стану енергосистеми та стратегії розвитку розосередженої генерації в Україні», DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2024.67.048>;

Андрушко Станіслав Леонідович – аспірант кафедри електричних станцій та систем, факультет електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Вінницький національний технічний університет, головний інженер ТОВ «Поділлятехналадка» м. Вінниця, ел.пошта : stanislav.andrushko@gmail.com.

Науковий керівник : **Володимир Володимирович Кулик** – професор кафедри електричних станцій та систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця.

AUTOMATION OF CONTROL OF DISTRIBUTED GENERATION AND LOAD OF THE DISTRIBUTION NETWORK IN CASE OF SEPARATION FROM THE POWER SYSTEM

Vinnytsya National Technical University

Abstract

This report discusses the current issues of distributed energy systems, in particular in the context of Ukraine, which is facing challenges in maintaining reliable electricity supply due to the war. Particular attention is paid to the use of the 'energy island' concept to ensure the autonomy of energy supply in the face of possible emergencies or attacks on infrastructure. The term 'energy island' covers self-sufficient systems that can operate autonomously from the main power grid, combining distributed energy sources (RES), including renewable energy sources, and consumers within microgrids. The text provides examples of countries that have already successfully implemented such an isolated power system and analyses the potential benefits of introducing similar technologies in Ukraine. The report emphasises the strategic importance of distributed generation (DG), which can operate independently of the centralised power system in crisis conditions. Based on a literature review and international experience, a structured concept of a microgrid based on distributed generators with autonomous control systems is proposed. The article describes the technical features of automation systems that ensure stable functioning of the microgrid in the conditions of disconnection from the main grid. In particular, it describes the requirements for automatic frequency and voltage regulators, reclosers that ensure safe transition to the island mode, as well as generator monitoring and synchronisation systems. The study is aimed at improving the reliability of the Ukrainian power system through the introduction of distributed energy sources and energy storage systems (ESS), which will increase the resilience of distribution networks to external influences. An important element of the study is the emphasis on the advantages of hydroelectric power plants, which can be easily started without an external power source, as they require minimal energy for auxiliary systems, so the report uses a hydroelectric power plant as an example, although the principles are generally relevant to other DGS.

Keywords: isolated mode, generator, distributed generation source (DGS), automatic voltage regulator (AVR), automatic frequency unloading (AFU), power control system (PCS), microgrid.

Andrushko Stanislav L. - Postgraduate student of Electrical Stations and Systems Department, Faculty of Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics, Vinnytsya National Technical University, Chief Engineer of Podillyatechnaladka LLC. Vinnytsya, e-mail: stanislav.andrushko@gmail.com.

Scientific supervisor Volodymyr V. Kulyk - Professor of the Electrical Stations and Systems Department, Vinnytsya National Technical University, Vinnytsya