

аналитический бюллетень (научно-технический журнал). –2015. –№12 (специальный выпуск 70). –М.: Издательство «Горная книга». –С. 43-53.

15. **Андреева Л. И.** Исследование эксплуатационной надежности карьерных автосамосвалов / **Л.И. Андреева, Ю.Ю. Ушаков**// Известия УГГУ/ УГГУ. –Екатеринбург, 2016. –№ 3(43) –С. 74-77

16. **Бусыгин Е.Н.** Использование сетевых графиков при планировании, подготовке и организации проведения ремонтных работ / **Е.Н. Бусыгин, А.В. Напольских, А.Л. Блеч, А.Н. Рыбаков, Ю.Ю. Ушаков**// Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: сборник докладов Хмеждународ. науч.-техн. конф. «Чтения памяти В.Р. Кубачека»/УГГУ.–Екатеринбург, 2012.–С. 358-362.

17. **Рыбаков А. Н.** Сокращение потерь рабочего времени ремонтного персонала на основе использования сетевых графиков / **А.Н. Рыбаков, Ю.Ю. Ушаков**// Студент и научно-технический прогресс: тезисы докладов XXXVI студенческой научной конференции/ЧелГУ.–Челябинск, 2013.–С. 6-7.

18. **Рождественский Ю. В.** Оценка эффективности использования карьерных автосамосвалов по критерию «производительное время» на примере ОАО «Ковдорский ГОК» / **Ю.В. Рождественский, Ю.Ю. Ушаков**// Материалы пятой международной научно-практической конференции «Проблемы и перспективы развития евроазиатских транспортных систем»/ЮУрГУ.–Челябинск, 2013.–С. 232-235.

19. **Ушаков Ю.Ю.** Повышение эффективности системы технической эксплуатации карьерных автосамосвалов на горнодобывающих предприятиях // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: сборник трудов XIII междунар. науч.-техн. конф. «Чтения памяти В.Р. Кубачека»/УГГУ.–Екатеринбург, 2015.–С. 380-383.

20. **Андреева Л. И.** К вопросу о повышении эффективности ремонтной службы горнодобывающего предприятия / **Л.И. Андреева, В.Ю. Мартынов, Ю.Ю. Ушаков** // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: сборник трудов XIV междунар. науч.-техн. конф. «Чтения памяти В.Р. Кубачека»/УГГУ.–Екатеринбург, 2016.–С. 427-434.

21. **Андреева Л. И.** Оценка факторов, влияющих на эксплуатационные показатели карьерного автотранспорта / **Л. И. Андреева, Ю.Ю. Ушаков**// Мир дорог. Спецвыпуск. –2016.–С. 62-64.

Рукопись поступила в редакцию 15.01.2020

УДК 621.31

В.Г. САЯПІН, аспірант, Д.І. КУЗНЕЦОВ, канд. техн. наук, доцент
Криворізький національний університет

СТРУКТУРА І АРХІТЕКТУРА СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТА БУДОВИ MICROGRID З ВИКОРИСТАННЯМ ДЖЕРЕЛ ВІДНОВЛЮВАЛЬНОЇ ЕНЕРГІЇ

Мета. Кризовий стан енергосистеми України та велика залежність від імпорту палива призводять до потреби перегляду концепції енергосистеми та впровадження таких сучасних технологій, як Microgrid. Провести аналіз сучасних технологій, що використовуються у Microgrid з джерелами відновлювальної енергії, її структури та архітектури керування, особливості їх використання, для розробки системи керування розподіленням енергії в межах Microgrid з відновлювальними джерелами енергії.

Методи. Під час дослідження використано комплексні загальнонаукові теоретичні методи наукового дослідження. Методи теорії автоматичного керування та системний підхід в межах Microgrid з джерелами відновлювальної енергії.

Наукова новизна. Наукова новизна результатів після проведеного дослідження виходить з того, що визначено особливості побудови різних типів Microgrid, їх переваги та недоліки, особливості їх структури та архітектури керування. Аргументовано використання мереж постійного струму як перспективний напрямок в розвитку Microgrid.

Практична значимість. Отримані під час дослідження результати можуть використовуватись при розробці Microgrid з відновлювальними джерелами енергії з врахуванням їх переваг та недоліків, у розробці алгоритмів керування в межах Microgrid та дослідженні нових методів і архітектур керування для побудови Microgrid.

Результати. Означено теперішній стан енергосистеми України і визначено подальші перспективи. Перспективним є використання мереж постійного струму в Microgrid з використанням джерел відновлювальної енергії. Визначено пріоритет розробки Microgrid в Україні, але в наш час ще недостатньо досліджень використання Microgrid в умовах країни. Більш надійні архітектури керування Microgrid, такі як децентралізована архітектура і точка-точка не здатні до оптимального розподілення та прогнозування виробки та споживання енергії в межах мережі. Визначено подальші напрямки проведення досліджень для виявлення особливостей використання Microgrid з джерелами відновлювальної енергії в умовах України разом з використанням прогнозуючих моделей, що дозволить збільшити ефективність мережі.

Ключові слова: Microgrid, керування, відновлювальні джерела енергії, аналіз, архітектура.

doi: 10.31721/2306-5451-2020-1-50-138-142

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Згідно звіту про результати діяльності НКРЕКП у 2018р. [1] зазначається значна зношеність та застарілість основних фондів електроенергетики, систем передачі та розподілу, що складає 70-80%, і відратування, що покладені на амортизацію не здатні покрити витрати на ремонт та оновлення. Це все впливає на ефективність і якість роботи енергосистеми України. Технологічні витрати електроенергії у магістральних мережах склали 2,58%, а в розподільних – 9,84%. Індекс середньої тривалості довгих перерв в електропостачанні в системі (SAIDI) є найгірший в Європі. Також, беручи до уваги значну залежність від імпорту палива, можна стверджувати, що електроенергетична система України знаходиться в кризовому стані і інвестування лише в її ремонт не є рентабельним.

Енергетична стратегія України [2] визначає ключовим напрямком розвиток розподіленої генерації, smart grids, збільшення частки відновлювальних джерел енергії (ВДЕ) до 25% у 2035р.

Використання джерел розподіленої генерації породжує ряд проблем: в звичайній електричній мережі генератори володіють великою інерційністю, яка не дає сильно відхилитись частоті та напрузі, що не можна сказати про розподілені джерела, бо в них зазвичай використовуються малопотужні генератори, що не мають великою інерційності, також використання ВДЕ потребує використання інверторів, що нездатні надати ідеальну синусоїдальну форму вихідному струму.

Актуальним вирішенням даних проблем є доповнення енергетичних технологій інформаційними та телекомунікаційними, дотримуючись системного підходу. Такий підхід реалізується у сучасній концепції Microgrid. Це дозволить зменшити технологічні витрати електроенергії за рахунок використання локальних джерел енергії, збільшити надійність енергетичної системи за рахунок гнучкості режимів роботи Microgrid та ефективно використовувати ВДЕ, керуючи розподіленням навантаження та акумуляцією енергії.

Аналіз досліджень і публікацій. Аналіз публікацій показує, що бракує вітчизняних публікацій і експериментальних моделей. Натомість в зарубіжних публікаціях досить широко розглядаються різні аспекти визначеного кола проблем, але вони не враховують специфіки України.

Постановка задачі. Провести аналіз Microgrid з метою визначити існуючі та перспективні технології, види їх класифікації, архітектури керування виділити їх переваги та недоліки.

Викладення матеріалу та результати. Microgrid – це інтелектуальна енергетична мережа невеликого масштабу, що працює як одне ціле і включає споживачів, локальні джерела енергії, може включати засоби її акумулювання. Вона може бути приєднана до загальної енергетичної мережі через одну точку з'єднання або працювати в острівному (ізолюваному) режимі [3].

У Microgrid зазвичай поєднані мережі постійного та змінного струму, це визвано тим, що використовуються різні джерела енергії: сонячні панелі, що генерують постійний струм, генератори постійного або змінного струму, також постійний струм використовують акумулятори та паливні елементи.

Тому першочергово Microgrid можна класифікувати за типом струму, що використовується як основний[4]:

Microgrid постійного струму;

Microgrid змінного струму;

Microgrid з комбінованим використанням постійного та змінного струму.

Особливістю Microgrid постійного струму є те, що джерела і навантаження постійного струму напряму під'єднуються до загальної мережі постійного струму, а навантаження зі змінним струмом через інвертор. Даний тип Microgrid добре підходить для побутових та офісних споживачів, комп'ютерних центрів тощо, через те що більшість офісної, обчислювальної та значна частина побутової техніки працює з постійним струмом. Через те, що більшість ВДЕ виробляють постійний струм, то зменшується кількість перетворень і зменшуються пов'язані з цим втрати. І відповідно в таких мережах відсутня реактивна потужність і менший опір, що призводить до здешевлення мережі. Нема потреби в синхронізації частоти і легко керується напруга в острівному режимі[5].

До недоліків можна віднести:

спостерігається спотворення синусоїди при перетворенні постійного струму до змінного;

часто є потреба в розділенні мережі на частини з високою і низькою напругою;

оскільки мережі постійного струму є нестандартними для споживачів, то це ускладнює їх інтеграцію у Microgrid;

- складність приєднання microgrid до основної мережі;
- погано застосовується для промислових споживачів;
- втрати енергії для генераторів на традиційних видах палива.

У Microgrid змінного струму відповідно використовується шина змінного струму до якої також приєднуються усі навантаження та джерела енергії [6]. Така мережа є звичайною для споживачів, що призводить до їх легкої інтеграції в мережі. Така мережа легко приєднується до основної.

- До недоліків даного типу Microgrid відноситься:
- необхідність синхронізації розподілених джерел енергії;
- наявність реактивної потужності;
- наявність гармонічних збурень;
- дисбаланс у трифазових мережах;
- високий спротив ліній передач;
- оскільки більшість ДВЕ виробляє постійний струм, то присутні втрати під час перетворення.

Гібридна Microgrid зазвичай складається з двох шин: шини постійного струму та шини змінного які стикаються в точці з'єднання з основою мережею. Перевагою є легка інтеграція будь-яких джерел енергії з найменшою кількістю з'єднань та втрат. Традиційні мережі змінного струму легко модернізуються до гібридної, але така система є дорожчою, і вона стає вигідною тільки для великої кількості підключень [7].

- До недоліків даного типу Microgrid відноситься:
- більша складність Microgrid;

складність керування, через необхідність контролю за пристроями, що приєднані до мереж постійного струму і тими, що приєднані до мереж змінного струму, та за конверторами; в мережах змінного і постійного струму залишаються притаманні для них недоліки.

В залежності від базового виду струму обирається метод керування, який використовується у Microgrid: для мереж постійного струму зазвичай використовується керування за характеристикою статизму, яка виражає залежність між напругою і активною потужністю. А для Microgrid зі змінною напругою здійснюється керування за характеристикою статизму у відношенні між активною і реактивною потужністю та за частотою.

В серпні 2014 р. у Каліфорнії компанія Bosch збудувала Microgrid з архітектурою постійного струму для освітлення будівлі [8]. У якості джерела енергії було встановлено 41 кВт масив фотоелектричних панелей, а в якості навантаження задіяно 44 світлодіодні лампи та 4 промислових вентилятори постійного струму, зовнішня основна мережа під'єднана до Microgrid через AC/DC перетворювач, а лампи підключені через DC/DC драйвер. Поряд було встановлено аналогічну систему, але з архітектурою заснованою на змінному струмі. Сонячні панелі були під'єднані до мережі через інвертор, а навантаження через драйвер змінного струму. Порівняння отриманих показників показало на 8% більшу ефективність Microgrid з постійним струмом.

Так само як і в головній енергосистемі, в межах Microgrid електроенергія проходить ті ж самі етапи генерації, транспортування, розподілення та кінцевого споживання. Також робота в ізольованому режимі потребує наявності етапу накопичення.

Система керування в Microgrid є, як і в головній енергосистемі, ієрархічна і складається з чотирьох рівнів (табл. 1), а швидкість реакції на зміни збільшується з декількох мілісекунд на нульовому та першому рівні до декількох годин на третьому (іноді перший і нульовий рівень об'єднують в один) [6, 9-11].

Для керування Microgrid здебільшого використовуються контролери. Третинний контролер знаходиться на третьому рівні керування, виконує прогнозування та економічно ефективний обмін енергією з зовнішньою мережею. Також він керує переведенням в острівний режим та під'єднанням до зовнішньої мережі, передаючи команди до центрального контролера.

Центральний контролер (ЦК), контролер розподілених джерел енергії (КРДЕ) та контролер навантаження (КН) [12]. ЦК працює на другому рівні і контролює всю мережу. ЦК збирає дані з КРДЕ та КН та керує ними, слідкує за частотою в Microgrid, балансує потужність, вмикає та вимикає навантаження та джерела енергії.

Система керування в Microgrid

Третій рівень	Його основна задача – це організація економічно ефективного обміну енергією з зовнішньою мережею за рахунок планування. Віддає команди на під'єднання або роз'єднання з зовнішньою мережею.
Другий рівень	Слідкує за мережею і в залежності від навантаження здатний змінювати частоту та напругу в мережі. Змінює свої функції в залежності від режиму роботи Microgrid. Якщо встановлено з'єднання до зовнішньої мережі, то слугує інтерфейсом з'єднання Microgrid з зовнішньою мережею. В острівному режимі встановлює опорну частоту та напругу для перетворювачів струму.
Перший рівень	Підтримує напругу та частоту внутрішньої струмової петлі. Може працювати самостійно. Дає найшвидшу реакцію.
Нульовий рівень	Керує потужністю джерел енергії та контролює акумулюючі пристрої. Керування найчастіше виконується за статизмом.

КРДЕ та КН знаходяться на первинному рівні керування, але в залежності від архітектури системи керування можуть бути і на вторинному. Вони вимірюють показники окремих джерел енергії та показники навантаження відповідно, керують перетворювачами струму та за необхідністю від'єднують об'єкт керування від мережі. КРДЕ отримує команди від ЦК і контролює частоту та потужність джерела енергії.

Наступним менш поширеним видом виступає архітектура централізованого типу. В даній архітектурі відсутній контролер третього рівня керування, його роль на себе бере ЦК. Така система є дуже контрольованою, але сам контролер є єдиною точкою відмови, що погано для надійності системи. ЦК збирає велику кількість даних про роботу мережі, тому він повинен бути достатньо продуктивним для таких обчислень [13].

Протилежність централізованій та ієрархічній архітектурі керування складають розподілена архітектура та архітектура типу точка-точка.

У розподіленій системі на відміну від двох попередніх відсутні ЦК та контролер третього рівня. Натомість кожний об'єкт генерації, навантаження чи керування отримує власний розподілений контролер. Даний контролер не здатний до складного прогнозування, але має вбудовані евристичні програми для отримання субоптимального місцевого результату, наприклад, виробка мінімальної кількості викидів і т.д. Також кожний контролер здатний до розподілу енергії між іншими учасниками Microgrid. Але для зв'язку з іншими мережами використовується центральний агент, через який користувачі можуть взаємодіяти з зовнішніми мережами, що також є єдиною точкою відмови Microgrid [14].

На відміну від розподіленої архітектури, в архітектурі типу точка-точка кожний об'єкт сам взаємодіє з іншими, що призводить до більш приватної взаємодії між учасниками мережі, і якщо потрібно елемент може взаємодіяти з ними, використовуючи зв'язок через оточуючих учасників Microgrid. Така система виявляється досить надійною та здатною до зміни маршрутів взаємодії, немає єдиної точки відмови, але ускладнюється структура мережі через велику кількість зав'язків [12].

В залежності від того, чи під'єднана Microgrid до основної мережі, чи вона в ізолюваному стані у Microgrid використовуються різні стратегії керування.

Для ізолюваного режиму складним питанням є розподіл потужності серед перетворювачів струму. Для вирішення даної проблеми використовують різні стратегії керування [15]:

ведучий – ведений. В цьому методі обирається головний інвертор (ведучий), який задає параметри струму, а ведені дотримуються цих параметрів;

використання промислової мережі Controller Area Network, що дозволить керувати перетворювачами струму в режимі реального часу;

керування за статизмом відносно частоти та напруги.

При підключенні до зовнішньої мережі Microgrid переходить до керування за активною та реактивною потужністю.

Висновки та напрямки подальших досліджень. Згідно проведеного аналізу технологій, структури Microgrid та архітектури систем керування було визначено основні моменти, переваги та недоліки. А саме те, що перспективним є використання мереж постійного струму в Microgrid з ДВЕ. Відповідно до теперішнього стану енергосистеми України і прийнятої енергетичної стратегії визначено пріоритет розробки Microgrid в Україні, але зараз існує обмаль досліджень використання Microgrid в умовах країни. Більш надійні архітектури керування

Microgrid, такі як децентралізована архітектура або архітектура типу точка-точка, не здатні до оптимального розподілення та прогнозування виробки та споживання енергії в межах мережі.

Тому надалі планується дослідження використання Microgrid з ДВЕ в умовах України з використанням прогнозуючих моделей.

Список літератури

1. Звіт про результати діяльності Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг, у 2018 році [Електронний ресурс]/ офіційний сайт Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг. –Київ, 2020. – Режим доступу до ресурсу: <http://www.nerc.gov.ua/index.php/data/filearch/Proekty/2018/data/?id=39678>.
2. Енергетична стратегія України на період до 2035 року [Електронний ресурс]/ Офіційний сайт Верховної Ради України.-Київ, 2020.– Режим доступу до ресурсу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/file/text/58/f469391n10.pdf>.
3. CERTS Microgrid Concept [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://certs.lbl.gov/initiatives/certs-Microgrid-concept>.
4. **В. М. Eid, N. A. Rahim, J. Selvaraj and A. H. El Khateb**, "Control Methods and Objectives for Electronically Coupled Distributed Energy Resources in Microgrids: A Review," in IEEE Systems Journal, vol. 10, no. 2, pp. 446-458, June 2016.
5. **Arif, Mekhilef & Hasan, M.** (2018). Microgrid architecture, control, and operation. 10.1016/B978-0-08-102493-5.00002-9.
6. **Jackson John Justo, Francis Mwasilu, Ju Lee, Jin-Woo Jung**, AC-Microgrids versus DC-Microgrids with distributed energy resources: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 24, 2013, Pages 387-405, ISSN 1364-0321
7. **Unamuno, Eneko & Barrena, Jon Andoni.** (2015). Hybrid ac/dc Microgrids—Part I: Review and classification of topologies. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 52. 1251-1259. 10.1016/j.rser.2015.07.194.
8. **Fregosi, Daniel & Ravula, Sharmila & Brhlik, Dusan & Saussele, John & Frank, Stephen & Bonnema, Eric & Scheib, Jennifer & Wilson, Eric.** (2015). A comparative study of DC and AC Microgrids in commercial buildings across different climates and operating profiles. 159-164. 10.1109/ICDCM.2015.7152031.
9. **Omid Palizban, Kimmo Kauhaniemi**, Hierarchical control structure in Microgrids with distributed generation: Island and grid-connected mode, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 44, 2015, Pages 797-813, ISSN 1364-0321.
10. **Bordons, C.; Garcia-Torres, F.; Ridao, M.A.** Model Predictive Control of Microgrids; Springer: Cham, Switzerland, 2019.
11. **De Brabandere, Karel & Vanthournout, Koen & Driesen, J. & Deconinck, Geert & Belmans, Ronnie.** (2007). Control of Microgrids. IEEE Power Engineering Society General Meeting. 1 - 7. 10.1109/PES.2007.386042.
12. Microgrid Control Problems and Related Issues **M.S. Mahmoud**, in Microgrid, 2017
13. **M.S. Mahmoud**, Chapter 1 - Microgrid Control Problems and Related Issues, Editor(s): Magdi S. Mahmoud, Microgrid, Butterworth-Heinemann, 2017, Pages 1-42, ISBN 9780081017531, <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101753-1.00001-2>.
14. **Feng, Xianyong & Shekhar, Aditya & Yang, Fang & Hebner, Robert & Bauer, Pavol.** (2017). Comparison of Hierarchical Control and Distributed Control for Microgrid. Electric Power Components and Systems. 45. 1043-1056. 10.1080/15325008.2017.1318982.
15. **K.S. Rajesh, S.S. Dash, Ragam Rajagopal, R. Sridhar**, A review on control of ac Microgrid, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 71, 2017, Pages 814-819, ISSN 1364-0321, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.106>.

Рукопис подано до редакції 20.03.2020

УДК 621.311.4.031

І.О. СІНЧУК, І.А. КОЗАКЕВИЧ, М.Л. БАРАНОВСЬКА,
Т.М. БЕРІДЗЕ, кандидати техн. наук, доценти, І.І. ПЕРЕСУНЬКО, асистент
Криворізький національний університет

ПРЕВЕНТИВНА ОЦІНКА І ОСНОВНІ НАПРЯМИ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ПІДЗЕМНИХ ЗАЛІЗОРУДНИХ ПІДПРИЄМСТВ

Мета. Метою даної статті є превентивна оцінка та розгляд основних напрямів підвищення енергоефективності підземних залізрудних підприємств для досягнення необхідного рівня їх конкурентоспроможності.

Методи дослідження. У статті використовуються аналітичні і експериментальні методи досліджень. Аналітичні методи базуються на положеннях теорії імовірностей і математичної статистики, теорії розпізнавання образів, статистичної класифікації, кореляційно-регресійного, гармонічного, компонентного і причинного аналізу. Експериментальні методи ґрунтуються на положеннях теорії планування експерименту, електричних вимірів.

Наукова новизна. Розроблення раціонального управління електроенергопотоків, формування інформаційно-аналітичної бази щодо обґрунтування управлінських рішень в системі управління енергозабезпеченням залізрудних підприємств.