

ANALYSIS OF DISPERSED GENERATION SYSTEMS

S. Baluta, V. Shesterenko, I. Izvolensky

National University of Food Technologies

Key words:

*Power supply system
Dispersed generation
Reliability
Energy efficiency*

Article history:

Received 13.05.2022
Received in revised form
27.05.2022
Accepted 17.06.2022

Corresponding author:

I. Izvolensky
E-mail:
energetyc@ukr.net

ABSTRACT

Ways to increase the efficiency of power supply systems are considered in the article. The main aspects of dispersed generation are presented. Recommendations for the creation of a dispersed energy infrastructure which allow to build a generation structure compatible with the load are given. This will localize the generation-consumption processes and thus minimize losses in networks by reducing the distance of energy transmission from generator to consumer. Distributed Generation System (DGS) is a fully integrated, self-regulating and self-healing energy system with a network topology, including all generation sources, all electricity networks and all types of electricity consumers, which are controlled by a single network of information control devices and systems in real-time (called Smart Grid abroad). Since all DG sources must work in synchronous mode, a person is not able to follow all these processes, and therefore the system must be independently managed and restored during various outages, which is enshrined in the concept of Smart Grid. Thus, the integration of distributed generation into electricity grids makes it possible to solve a number of problems to increase the reliability and security of electricity supply and optimize the cost of electricity for the consumer. The use of distributed generation allows to reduce the cost of centralized production and transmission of electricity and increase the reliability of electricity supply to consumers. The term “intellectual energy” is becoming a term which denotes the new principles of energy, both in Ukraine and abroad. Modern electronic, information, telecommunication, computing technologies improve energy production and energy flow management at enterprises, make them reliable, safe and efficient, give consumers new opportunities, and deepen decentralization, which aims to transform millions of private homes, office centers and businesses into producers and sellers of electricity and heat, will optimize the cost of electricity for the consumer.

АНАЛІЗ СИСТЕМ РОЗОСЕРЕДЖЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ

С. М. Балюта, В. Є. Шестеренко, І. Є. Ізволєнський

Національний університет харчових технологій

У статті розглянуто шляхи підвищення ефективності систем електропостачання. Наведено основні аспекти розосередженої генерації. Розроблено рекомендації щодо створення розосередженої енергетичної інфраструктури, що дає змогу будувати структуру генерації, сумісну із навантаженням, а це, у свою чергу, локалізує процеси генерування-споживання і таким чином мінімізує втрати в мережах за рахунок зменшення відстані передачі енергії від генератора до споживача. Система розосередженої генерації (СРГ) — це повністю інтегрована, саморегулююча і самовідновлювана енергетична система, що має мережеву топологію, включає в себе всі джерела генерації, всі електричні мережі і всі типи споживачів електричної енергії, які керуються єдиною мережею інформаційно-керуючих пристроїв та систем у режимі реального часу (за кордоном отримала назву Smart Grid). Оскільки всі джерела РГ мають працювати в синхронному режимі, то система повинна самостійно керуватись і відновлюватись при різних відключеннях, що й покладено у концепцію Smart Grid. Інтеграція розосередженої генерації в електричні мережі надає можливість вирішити ряд проблем для підвищення надійності та безпеки електропостачання й оптимізації вартості електроенергії для споживача. Застосування розосередженої генерації дасть змогу знизити витрати на централізоване виробництво та передачу електроенергії і підвищити надійність електропостачання споживачів. «Інтелектуальна енергетика» стає терміном, що позначає нові принципи роботи енергетики як в Україні, так і за кордоном. Сучасні електронні, інформаційні, телекомунікаційні, обчислювальні технології вдосконалюють процеси енерговиробництва та керування енергетичними потоками на підприємствах, роблять їх надійними, безпечними й ефективними, наділяють споживача новими можливостями, а поглиблення децентралізації, метою якого є перетворення мільйонів приватних будинків, офісних центрів і підприємств у виробників та продавців електричної й теплової енергії, призведе до оптимізації вартості електроенергії для споживача.

Ключові слова: система електропостачання, розосереджена генерація, надійність, енергоефективність.

Постановка проблеми. До складу СРГ відносять малі ТЕЦ та ГЕС, парогазові установки (ПГУ), газотурбінні установки (ГТУ), сонячні електростанції (СЕС) та вітрові електростанції (ВЕС). При цьому міні- і мікроустановки малої потужності, переважно приватні, можуть підключатися до мережі 0,4 кВ або працювати в автономному режимі. За такої організації розподільча мережа принципово змінює конфігурацію та властивості і можливості міжсистемних зв'язків. Серед основних переваг мобільних розосереджених генераторів можна також виділити їх спроможність віддавати електроенергію лише в зазначені часові інтервали пікових і напівпікових навантажень. Такий режим роботи є особливо актуальним

у періоди підвищеного споживання в тих районах, де надходження електроенергії відбувається за одно- або дволінійною схемою з недостатнім коефіцієнтом запасу потужності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. З точки зору зменшення нерівномірності графіка електричного навантаження застосування джерел розосередженої генерації матиме найбільший економічний ефект при використанні їх населенням. Варто зазначити, що встановлення та обслуговування таких відновлювальних джерел РГ занадто дороге для звичайних громадян, але якщо такою установкою користується група населення (житловий район, котеджне містечко тощо), то актуальність використання СРГ зростає (Василенко, Шестеренко & Ізволеньський, 2018; Праховник, 2007). За таких умов можливе застосування диференційних тарифів, зменшення плати за електричну енергію, гібридне електропостачання від мережі чи від джерел СРГ. Використання такої мікромережі вигідне не тільки для місцевих споживачів, а й для об'єднаної енергетичної системи України (Кириленко, 2009).

Мета статті: дослідження умов створення СРГ в невеликих населених пунктах України.

Матеріали і методи. Використовувались положення теорії автоматичного регулювання, фізичне та математичне моделювання процесів, методи багатокритеріального прийняття рішень.

Викладення основних результатів дослідження. Приведено результати дослідження системи енергозабезпечення цукрових заводів України.

Під час реконструкції цукрових заводів в 70-х роках ХХ ст. розрахункову потужність визначали приблизним методом коефіцієнта попиту. Цей метод надзвичайно простий. Розрахункова активна потужність за цим методом (Шестеренко, 2011) визначається за формулою:

$$P_p = K_{\text{поп}} P_{\text{ном}},$$

де $K_{\text{поп}}$ — коефіцієнт попиту; $P_{\text{ном}}$ — номінальна потужність групи електроприймачів.

Коефіцієнт попиту потужності обчислюється за формулою:

$$K_{\text{поп}} = \frac{P_{\text{м}}}{P_{\text{ном}}}.$$

Розрахункова реактивна та повна потужність:

$$Q_p = P_p \operatorname{tg} \varphi;$$

$$S_p = \sqrt{P_p^2 + Q_p^2}.$$

Похибка цього методу досягає 30%.

На сьогодні цей метод рекомендується для визначення розрахункової потужності тільки освітлювальних електроприймачів.

Електричне навантаження — це випадкова величина, що підпорядковується теорії ймовірності. Загалом, розрахункова потужність відповідає виразу:

$$P_p = \sqrt{M(P)^2 + \sigma^2},$$

де $M(P)$ — математичне очікування активної потужності; σ^2 — дисперсія.

Тільки за умови застосування апарату теорії ймовірності можна одержати задовільні результати при визначенні розрахункової потужності всіх електроприймачів.

Розрахункова потужність визначається за методом впорядкованих діаграм, розробленим з використанням математичного апарату теорії масового обслуговування:

$$P_p = K_M P_{CM},$$

де P_{CM} — середня потужність за максимально завантаженою зміну. Ця величина є базовою для всіх розрахунків.

Коефіцієнт максимуму потужності:

$$K_M = \frac{P_M}{P_{CM}},$$

де P_M — максимум за добовим графіком потужності;

$$P_{CM} = \sum_1^n K_{B_i} P_{НОМ_i};$$

$$K_M = 1 + \frac{1,4}{\sqrt{(n_e - 1)^{1,1}}} \cdot \sqrt{\frac{1 - 1,2 \cdot K_B}{K_B - 0,01}},$$

$$K_B = \frac{P_{CM}}{P_{НОМ}}.$$

Коефіцієнт форми графіка $K_\Phi = \frac{P_{CK}}{P_c}$, де P_{CK} — середньоквадратична потужність, визначаються за формулою:

$$P_{CK} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt}.$$

Основний параметр графіка — середня потужність.

$$P_c = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T p(t) dt,$$

$$P_c = \frac{W}{T},$$

де W — енергія, яку споживає підприємство протягом доби.

На цукровому заводі коефіцієнт форми графіка $K_\Phi \approx 1$, тобто добовий графік потужності стабільний, а в населених пунктах $K_\Phi \approx 1,5$, графік різкозмінний.

Застосування розосередженої генерації дає змогу знизити витрати на централизоване виробництво та передачу електроенергії і підвищити надійність електропостачання споживачів, надійність шляхом захищеності від аварійних відключень зменшити залежність від централізованих електричних мереж.

Практично всі цукрові заводи України мають комбіновану систему електропостачання. Проблеми розосередженої генерації в Україні були відомі у 80-х роках минулого століття. Коли ще терміна «розосереджена генерація» не існувало, проводилися експерименти з використання «надлишкової» електроенергії ТЕЦ

цукрових заводів для живлення інших споживачів. Для цього необхідно було підключити генератори ТЕЦ паралельно до енергосистеми, тобто до мереж обл-енерго. При цьому необхідно було вирішити ряд технічних задач та проблем енергоменеджменту. Технічні проблеми, зокрема релейний захист, були розв'язані досить добре. А несумісність добових графіків активної потужності ТЕЦ заводу та побутових споживачів населених пунктів не дала можливості широкого впровадження ідеї. На цукровому заводі коефіцієнт форми графіка $K_F \approx 1$, тобто добовий графік потужності стабільний, в населених пунктах $K_F \approx 1,5$, графік різкозмінний.

Уже тоді пропонувалось енергію ТЕЦ заводу акумулювати протягом ночі і споживати вранці та ввечері. На той час ця ідея здавалась нездійсненною мрією.

Незважаючи на відсутність законодавчої бази, автори тогочасної розосередженої генерації вирішили проблему енергоменеджменту таким чином: у період переробки буряків ТЕЦ цукрового заводу видає електроенергію в мережі обл-енерго авансом, не вимагаючи оплати. В ремонтний період, коли ТЕЦ не працює, обл-енерго повертає таку ж кількість енергії заводу. На жаль, згідно з чинними нормативними документами в електричних мережах, що мають двонаправлений облік перетікань активної та реактивної електроенергії, оцінювання втрат активної електроенергії можливе лише за умов збігу напрямків транзитів активної та реактивної потужності.

Була розроблена методика визначення втрат активної енергії при незбігу потоків активної та реактивної енергій. Втрата електроенергії при трансформації, передачі та розподіленні її є неминучою. Вона визначається фізичними властивостями матеріалів, які використовуються при конструюванні електроустановок. Техніко-економічне обґрунтування зниження втрат енергії у мережах, по суті, зводиться до одержання відповіді на питання про те, якою ціною й до якої межі вигідно знижувати рівень втрат електроенергії.

На кафедрі ЕПЕМ був створений прилад для вимірювання втрат енергії. Цілком задовільні результати можна отримати, якщо використовувати вимірні пристрої — реєстратори втрат (Шестеренко, 2011). При цьому втрати енергії дорівнюють:

$$\Delta W = AR,$$

де A — покази реєстратора втрат; R — активний опір лінії електропередачі (трансформатора, реактора тощо). Принцип роботи приладу полягає в аналоговому копіюванні рівняння:

$$A = \int_0^T I^2 dt,$$

де I — струм у лінії; T — час, за який визначають втрати.

Для радіальної лінії з одним трансформатором втрати енергії дорівнюють:

$$\Delta W = T \Delta P_x + m A k_1^2 \cdot 10^{-3} \left(R_{\text{л}} + \frac{\Delta P_k U_{\text{ном}}^2 \cdot 10^{-3}}{S_{\text{ном}}^2} \right).$$

Система споживання електричної енергії відзначається суттєвою інерційністю. Масове відключення потужних споживачів-регуляторів графіка навантаження

може призвести до небажаних перехідних процесів, до коливань у системі електропостачання і до погіршення стійкості паралельної роботи енергоагрегатів системи, що в критичних моментах може призвести до розвалу системи і до порушення електропостачання на тривалий період. Регулювання споживання електричної енергії по величині відхилення параметра від заданої величини має значну похибку. Крім того, похибка збільшується за рахунок зони нечутливості системи. Керування електроспоживанням за допомогою математичних моделей дасть змогу суттєво покращити процес регулювання, а застосування для регулювання існуючих систем вимірювання електроенергії забезпечить впровадження способу з мінімальними інвестиціями.

Інтеграція розосередженої генерації в електричні мережі надає можливість вирішити ряд проблем для підвищення надійності та безпеки електропостачання, збереження стійкості функціонування енергосистем та оптимізації вартості електроенергії для споживача, зниження витрат на централізовану передачу та розподіл електричної енергії, забезпечення основних послуг і підвищення енергоефективності. Зазначена ідеологія базується на активній інформатизації та інтелектуалізації енергетичних об'єктів, широкому використанні розосередженої генерації, передусім на рівні розподільних електричних мереж середньої та низької напруги, створенні та впровадженні провідних енергоефективних технологій у сфері генерації та розподілу енергії.

У системі розосередженої генерації для керування потоками реактивної потужності та регулювання напруги була запропонована дворівнева система керування (Шестеренко, 2011).

Як правило, пристрої для використання відновлювальних джерел енергії працюють ізольовано. А це призводить до використання додаткових, резервних пристроїв. Наприклад, для підігріву води використовують електронагрівачі, що підключені до енергосистеми. Сонячні батареї повинні мати акумулятори чи резервну дизельну електростанцію. Разом з тим, якщо об'єднати всі джерела енергії в єдину систему комплексного використання відновлювальних джерел енергії населеного пункту, необхідність у застосуванні резервних джерел зникає. В розробленій на кафедрі ЕПЕМ системі комплексного використання відновлювальних джерел енергії введено геліоколектори нагрівання води, сонячну електричну батарею, когенераційну систему, біогазову установку, підключену до когенераційної системи та паливного елемента, автоматизований твердопаливний водяний котел для спалювання горючих відходів, вітроелектростанції, сонячної батареї.

Паливний елемент та електричний вихід когенераційної системи приєднані до розподільчого щита з функцією перетворення параметрів електроенергії відповідно до чинного стандарту, виходи геліоколектора, водяного котла та тепловий вихід когенераційної системи приєднані до акумулятора тепла, вихід якого та вихід розподільчого щита приєднані до споживачів теплової та електричної енергії через датчики витрат води та електричної енергії, а також у схему системи введено мікропроцесорний блок керування, вхід якого підключений до датчиків витрат електроенергії та води, вихід блоку керування підключений до розподіль-

чого щита, когенераційної системи та автоматизованого твердопаливного водяного котла, мікропроцесорний блок керування враховує вартість енергії в кожному типі джерела енергії і забезпечує мінімум вартості енергії в загальній системі енергопостачання, об'єднує всі джерела енергії в єдину систему й оптимізує потужності окремих джерел за рекомендацією математичної оптимізаційної моделі, при цьому обмеження по потужності стосуються тільки паливного елемента, когенераційної системи та твердопаливного водяного котла.

Технічна суть запропонованої системи пояснюється кресленням (рис.), на якому зображено блок-схему системи комплексного використання відновлювальних джерел енергії (Патент України № 104083, F03 D 9/00 — Система комплексного використання відновлювальних джерел енергії).

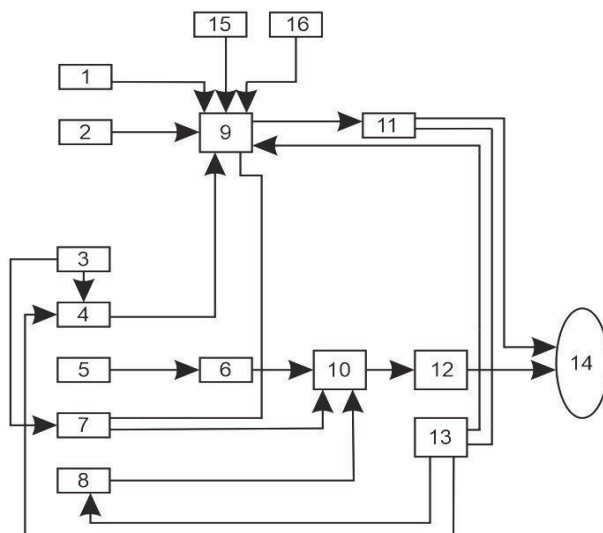


Рис. Схема системи комплексного використання відновлювальних джерел енергії:

1 — вітроенергетична установка; 2 — сонячна батарея; 3 — біогазова установка; 4 — паливний елемент; 5 — геліоколектор; 6 — термодатчик з термочутливим елементом на основі матеріалу з ефектом пам'яті форми (Патент України №13349); 7 — установка когенерації; 8 — автоматизований твердопаливний водяний котел, в якому використовують горючі відходи; 9 — розподільчий електрощит; 10 — акумулятор тепла з електропідігрівом; 11 — датчик електроспоживання; 12 — датчик витрат води з датчиком температури; 13 — блок керування; 14 — споживачі електроенергії та теплої води

Працює система таким чином: вітрова електростанція 1 та сонячна електрична батарея 2 можуть забезпечити населення електричною енергією, когенераційна система заводської комплектації 7 — тепловою та електричною, геліоколектори 5 — тепловою. Пальним для когенераційної системи є біогаз, який поступає з біогазової установки 3. Цей же біогаз поступає на паливний елемент 4, де його енергія безпосередньо перетворюється в електричну енергію. Всі джерела енергії об'єднують в єдину систему і регулюють потужності окремих джерел за рекомендацією математичної оптимізаційної моделі, при цьому враховують вартість енергії в кожному типі джерела енергії і забезпечують мінімум вартості енергії в

загальній системі енергопостачання. Електричну та теплову енергію від сонячних установок та вітрової електростанції споживають без обмежень. Джерела електроенергії приєднані до розподільчого щита з функцією перетворення параметрів електроенергії відповідно до чинного стандарту ГОСТ 13109-97. Можливе зменшення потужності когенераційної установки 7, паливного елемента 4 та твердопаливного водяного котла 8 в літній період. При незначних швидкостях вітру, зменшенні рівня сонячної радіації основне навантаження припадає на когенераційну систему 7 і біогазову установку 3, підключену до когенераційної системи 7. Команду на зміну режиму роботи видає блок керування 13, вхід якого підключений до датчиків витрат електроенергії та гарячої води 11, 12, вихід блоку керування 13 підключений до розподільчого щита 9, когенераційної системи 7 та автоматизованого твердопаливного водяного котла 8.

В опалювальний сезон суттєво зростає споживання теплової енергії і одночасно зменшується рівень сонячної радіації. Ефективність сонячної батареї та геліоколекторів суттєво зменшується, але зростає потужність вітроелектростанції, оскільки збільшується швидкість вітру. Це частково компенсує недовиробництво електроенергії сонячними батареями. В періоди штилю і низьких температур повітря збільшують потужність когенераційної системи, біогазової установки, автоматизованого твердопаливного водяного котла та паливного елемента. Оскільки біогазова установка працює періодично і відключається при завантаженні чи очистці її від відходів, необхідно передбачити дві (або більше) установок.

Якщо об'єднати всі відновлювальні джерела енергії — вітроенергетичну установку, сонячну батарею, біогазову установку, геліоколектор, автоматизований твердопаливний водяний котел, в якому використовують горючі відходи, в єдину систему, необхідність у застосуванні резервних джерел енергії зникає.

Висновки

Отже, використання джерел розосередженої генерації матиме найбільший економічний ефект при використанні їх населенням. Застосування розосередженої генерації дає змогу знизити витрати на централізоване виробництво та передачу електроенергії і підвищити надійність електропостачання.

Основна концепція роботи розосереджених джерел енергії — цілодобова генерація з буферним накопиченням енергії в кількості, достатній для покриття пікових споживчих навантажень.

Інтеграція розосередженої генерації в електричні мережі надає можливість вирішити ряд проблем для підвищення надійності та безпеки електропостачання, збереження стійкості функціонування мереж України та оптимізації вартості електроенергії для споживача, зниження витрат на централізовану передачу та розподіл електричної енергії, забезпечення основних послуг та підвищення енергоефективності, підвищення якості та безперебійності електропостачання, зменшення залежності від централізованих електричних мереж, підвищення надійності шляхом захищеності від аварійних відключень.

Література

Василенко, С. М., Шестеренко, В. Є., Изволенський, І. Є. (2018). Перша в Україні система розосередженої генерації на базі ТЕЦ цукрового заводу. *Цукор України*, 5—6, 22—27.

Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів: М-во палива та енергетики України. [1-ше вид., офіційне] (2007). Харків: Вид-во “Індустрія”.

Праховник, А. В. (2007). *Малая энергетика: распределенная генерация в системах энергоснабжения*. Київ: Освіта України.

Шестеренко, В. Є. (2011). *Системи електроспоживання та електропостачання промислових підприємств*. Вінниця: Нова Книга.

Кириленко, О. В. (2009). Технічні особливості функціонування енергосистем при інтеграції джерел розподіленої генерації. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*, 24, 3—7.

Правила користування електричною енергією. Національна комісія з питань регулювання електроенергетики України. Постанова НКРЕ, документ z0417-96, редакція від 07.05.2010, підстава z0304-10). <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/z0417-96>.

Балюта, С. М., Шестеренко, В. Є., Софілканич, В. В. (2016). Підвищення якості напруги на виході сонячних батарей. *Наукові праці НУХТ*, 22(1), 159—165.

Shesterenko, V., Baljuta, S., Romaniuk, V., Mashchenko, O. (2021). *Innovative methods of improving the electric power supply systems reliability*. The 9th International scientific and practical conference “European scientific discussions” (July 18—20, 2021). Potere della ragione Editore, Rome, Italy, 119—123.

Baljuta, S., Shesterenko, V., Mashchenko, O. (2015). Control sources of reactive power as effective method of increased efficiency in power supply systems for food production. *Journal of FOOD and PACKAGING Science, Technique and Technologies*, 4(7), 30—35.

Otsuka, K., Wayman, C. M. (1999). *Shape Memory Materials*, Cambridge University Press, Cambridge.

Koh, J. S. (2018). Design of Shape Memory Alloy Coil Spring Actuator for Improving Performance in Cyclic Actuation, 11(11), 2324.