

Г.С. БЕЛОХА

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна, e-mail: *pointage13@gmail.com*.

С.П. ДЕНИСЮК

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна, e-mail: *pointage13@gmail.com*.

В.В. ХИЛЕНКО

Національний університет біоресурсів і природокористування України, Київ, Україна, e-mail: *vkhilenko@ukr.net*.

АНАЛІЗ ОБМІННИХ ПРОЦЕСІВ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ СИСТЕМ MICROGRID

Анотація. Розглянуто системи Microgrid, які складаються з генераторів та навантажень, струми яких мають вищі гармоніки. Проаналізовано енергетичні характеристики і показано наявність обмінних потужностей, компенсація яких зменшує реактивну потужність та вищі гармоніки. Досліджено динаміку обмінних процесів у системах Microgrid і розглянуто задачу визначення вартості електроенергії за динамічної тарифікації у системах Microgrid з урахуванням як економічної, так і технічної складової.

Ключові слова: системи Microgrid, динаміка обмінних процесів, локальні енергоринки, динамічна тарифікація, реактивна потужність, вищі гармоніки.

Протягом останнього десятиліття спостерігається швидкий розвиток як сучасних локальних систем, зокрема Microgrid, так і активних споживачів чи віртуальних електростанцій із застосуванням джерел розосередженого генерування (ДРГ) з відновлювальними джерелами енергії. Забезпечення оптимального за сукупністю факторів режиму роботи розподілених систем енергозабезпечення, до яких належать локальні енергосистеми, потребує комплексного врахування як економічних, так і технічних складових [1–5]. Мета цього дослідження — визначення загальних вимог поєднання технічних рішень та економічних характеристик елементів розподіленої енергосистеми, що є необхідним елементом для створення інтелектуальних (з використанням елементів штучного інтелекту) систем керування ними [2, 6]. У цій статті для аналізу енергетичних процесів обмінних потужностей, визначення процесів динамічної тарифікації враховано тільки квазісталий характер обох факторів.

Для подальшого застосування математичного апарату системного аналізу розглядатимемо Microgrid як групу взаємопов'язаних навантажень та розосереджених енергетичних ресурсів у чітко визначених територіальних межах, що діє як єдиний керований об'єкт щодо мережі вищого рівня, та може під'єднуватися або від'єднуватися від цієї мережі, щоб мати можливість працювати як у під'єднаному, так і в острівному режимі [5]. Фактично локальний ринок електроенергії для Microgrid надає змогу координувати обсяги виробництва та споживання енергії від ДРГ (наприклад, від відновлювальних джерел енергії (ВДЕ), систем акумуляування) у межах вузької географічної зони. Локальні ринки, розв'язуючи проблеми енергопостачання, зберігання, транспортування, дають змогу кінцевим споживачам здійснювати торгівлю енергією на місцевому рівні та надавати послуги з підтримки мережі. У локальних ринках впроваджують свої тарифи, які можуть змінюватися з часом. Такі динамічні тарифи стимулюють регулювання навантаження як вручну, так і автоматично, що дає змогу споживачам заощадити електроенергію, користуючись перевагами системи [5, 7–13].

Визначення вартості електроенергії для динамічної тарифікації в системах Microgrid залежить від двох складових: економічної та технічної, які поєднуються в один енергоекономічний контур [13]. Аналіз економічної та технічної складових функціонування Microgrid має виконуватися з метою:

- підвищення ефективності використання первинного палива дизель-генераторів;
- оптимізації графіка відбору потужності;
- оптимізації відбору потужності від генератора;
- мінімізації втрат електроенергії для її передавання та розподілення;
- оптимізації режимів електроспоживання; забезпечення вимог щодо якості електроенергії та якості енергопостачання;
- мінімізації витрат сумарних коштів на генерування та споживання електроенергії.

Точку під'єднання генераторів у загальному випадку можна розглядати як точку «введення» потужності як власних ДРГ, так і додаткових джерел (у разі купівлі електроенергії у «третьої» сторони), та яка є контрольованим перетином інформаційних потоків у мережі, де встановлено Smart-лічильники. Оскільки до цієї точки можуть бути під'єднані різні типи генераторів, до складу системи генерації входять окремі джерела електроенергії, які мають різну економічно обґрунтовану вартість генерації 1 кВт·год електроенергії.

Реалізація клієнтоорієнтованого підходу для аналізу та оптимізації енергопроцесів у ДРГ зумовила не тільки використання показників якості електроенергії та показників якості електропостачання, зокрема показників безперервності та надійності, але й формування та застосування розширеної системи енергетичних показників ДРГ, які коректно відображають енергообмін та втрати електроенергії [7].

Розглядаючи систему з ДРГ як динамічні коливальні системи, можна виокремити два типи процесів — консервативні та дисипативні. У загальному випадку поставимо їм у відповідність обмінну потужність $Q_{об}$, потужність накопичення Q_n , потужність Фризе Q_f і активну потужність P . Обмінна потужність $Q_{об}$ дає змогу оцінювати інтенсивність обмінних процесів через перетин системи для довільного спектра гармонік напруги та струму. Оцінювання додаткових втрат електроенергії найбільш повно здійснюється із застосуванням потужності Фризе Q_f та її квадратичних складових, що відображають вплив різних факторів на якість енергетичних процесів для одно- та багатозначних систем.

Проаналізуємо обмінні процеси джерел розосередженого генерування з відновлювальними джерелами енергії для техніко-економічної оптимізації розв'язання проблем електромагнітної сумісності, динамічної тарифікації, мінімізації витрат.

Оцінювання оптимальності процесів відповідно до вимог поставлених задач має розглядатися з врахуванням системних ефектів на кількох ієрархічних рівнях:

- в конкретній точці t_0 ;
- на інтервалі T_1 періоду дії генератора (споживача);
- на інтервалі T_2 сталості структури системи;
- періоду дії генератора T_r ;
- періоду роботи пристроїв силової електроніки чи споживачів;
- виділеної сукупності періодів дії генераторів та/чи роботи споживачів T_{Δ} ;
- протягом всього технологічного процесу T_T .

Обмінні процеси можна розрізнити за першою групою (індекс 1) та групою гармонік, які складають множину M_r потужністю N_r (індекс ∞):

$$Q_e^1 = \frac{1}{2T} \int_0^{t^+} u(t) I_{m(1)} \sin(\omega t - \psi_1^i) dt, \quad (1)$$

$$Q_e^\infty = \frac{1}{2T} \int_0^{t^+} u(t) \left(\sum_{k=2}^{N_r} I_{m(k)} \sin(k\omega t - \psi_k^i) \right) dt, \quad (2)$$

де t^+ — інтервал періоду, коли миттєва потужність $p(t) > 0$.

Для оцінювання частки внеску генераторів та/чи споживачів для заданої діючої напруги генератора $u(t)$ обмінні процеси у вузлі системи, крім представлених відповідно до (1) та (2) способів, доцільно також розрізняти за однією j -ю вищою (індекс j) та всіма гармоніками згідно з виразами:

$$Q_e^j = \frac{1}{2T} \int_0^{t^+} u(t) I_{m(j)} \sin(j\omega t - \psi_j^i) dt, \quad (3)$$

$$Q_e = \frac{1}{2T} \int_0^{t^+} u(t) \left(\sum_{k=1}^{N_r} I_{m(k)} \sin(k\omega t - \psi_k^i) \right) dt. \quad (4)$$

Вплив елементів системи оцінюється відношенням однієї з величин (1)–(4) до суми відповідних обмінних потужностей всіх елементів ДРГ, які приєднані до виокремленого вузла.

Рівень електромагнітної сумісності оцінюватимемо за показниками Δ_{B1}, Δ_{B2} :

$$\Delta_{B1} = \frac{Q_e}{P}, \quad (5)$$

$$\Delta_{B2} = \frac{Q_1}{Q_e} - \pi. \quad (6)$$

Показник Δ_{B1} відповідає критерію усереднення зворотних потоків енергії, а показник Δ_{B2} є інтегральною характеристикою наближення енергетичного процесу до синусоїдального. При цьому міра оцінки взаємного впливу елементів ДРГ визначається ступенем їхнього наближення до нуля.

Критерієм оптимальності процесів є також потужність Фризе, яка у загальному випадку є квадратичною нев'язкою між повною S та активною P потужностями та дає змогу оцінити рівень втрат від нерівномірного споживання чи генерування електроенергії:

$$Q_f^2 = S^2 - P^2. \quad (7)$$

Реактивну потужність Q_f будемо розглядати як еквівалентну величину додаткових втрат електроенергії. Додаткові втрати струму I_r через еквівалентний опір (наприклад, лінії електропередачі) $R_{ек}$ за час T складають

$$\Delta W = I_r^2 R_{ек} T = \left(\frac{Q_f}{U} \right)^2 R_{ек} T. \quad (8)$$

Вважатимемо, що за характеристиками відображення впливу визначеної множини впливів $\alpha_j [\Delta x_1^j, \dots, \Delta x_i^j, \dots, \Delta x_{ns}^j]$ обчислюється відповідна j -а складова додаткових втрат електроенергії, де $j = 1, \dots, n$; n — кількість факторів декомпозиції Q_f , серед яких можуть бути технологічні, електромагнітні та керувальні впливи; x_i — контрольований параметр. Згідно з визначеними характеристиками зміни $\alpha_j [\Delta x_1^j, \dots, \Delta x_i^j, \dots, \Delta x_{ns}^j]$, $j = 1, \dots, n$, виділимо квадратичні

складові значень струму $i_r(t)$:

$$I_r^2 = \sum_{j=1}^n I_{j,r}^2. \quad (9)$$

З урахуванням (9) квадрат потужності Фризе Q_f розбивається на n_f адитивних складових, зумовлених впливом виділених факторів. Наприклад, для $u(t) = U_m \sin \omega t$ потужність Q_f розбивається на складові:

$$Q_f^2 = \sum_{j=1}^n U^2 I_{j,r}^2 = \sum_{j=1}^n Q_{fj}^2, \quad (10)$$

де Q_{fj} — складова додаткових втрат від впливу j -го, $j=1, \dots, n$, фактора.

Вираз, аналогічний (10), можна отримати за наявності у спектрі напруги $u(t)$ нульової та вищих гармонічних складових, а також розглядаючи несиметричні трифазні системи напруги електроенергосистеми.

Отже, оцінювання додаткових втрат електроенергії найбільш повно здійснюється із застосуванням потужності Фризе Q_f та її квадратичних складових, що відображають вплив різних факторів на якість енергетичних процесів для одно- та багатофазних систем, довільного інтервалу часу ($Q_{f,r}$), у випадку несиметрії напруги ($Q_{f,H}$), модуляції сигналів напруги та струму ($Q_{f,M}$).

Для забезпечення оптимального функціонування локальних систем з ДРГ має бути розв'язана низка оптимізаційних задач (деякі з яких наведено нижче):

— оптимізація нерівномірності генерації/споживання електроенергії $p(t)$ за активною потужністю P : $|p(t) - P| \rightarrow P_{\min}$;

— оптимізація сумарної активної P та реактивної Q потужностей ДРГ, одночасно приєднаних до мережі;

— мінімізація обмінних процесів (обмінної потужності Q_e): $Q_e \rightarrow Q_{e,\min}$;

— мінімізація додаткових втрат електроенергії (потужності Фризе Q_f): $Q_f \rightarrow Q_{f,\min}$;

— мінімізація заданого рівня електромагнітної сумісності (ЕМС) за обмінною потужністю $Q_{e\infty}$ вищих гармонік: $Q_{e\infty} \rightarrow Q_{fe\infty,\min}$.

Складність розв'язання задач у процесі аналізу та оптимізації ДРГ пов'язана з високою розмірністю математичних моделей цих систем, різномірністю та дискретним характером параметрів, що варіюються, багатоекстремальністю цільових функцій.

Для оптимізації процесів у Microgrid та її елементах модель Microgrid представимо у вигляді системи $\{\Gamma\} - \{H\}$, де $\{\Gamma\}$ — множина генераторів; $\{H\}$ — множина навантажень. Втрати у лініях електропередачі не враховуємо. Для генераторів та навантажень в Microgrid виокремимо оптимальні та неоптимальні режими, зумовлені додатковими втратами електроенергії, рівнями якості електроенергії та якості енергопостачання.

Розглянемо моделі $\{\Gamma\} - \{H1\}$ та $\{\Gamma\} - \{H2\}$ Microgrid, які містять один генератор Γ і одне навантаження $H1, H2$ відповідно. Напряга генератора для двох моделей складає $u(t) = U_m \sin \omega t$, струм навантаження у вигляді графіка наведено на рис. 1, амплітуда першої гармоніки для обох навантажень однакова: 40 А.

Розвинемо струм (рис. 1, а) у ряд Фур'є. Він має першу гармоніку струму та непарні вищі гармоніки:

$$i(t) = I_m \sin(\omega t + \psi_1) + \sum_{k=2}^N I_{mk} \sin(k\omega t + \psi_k).$$

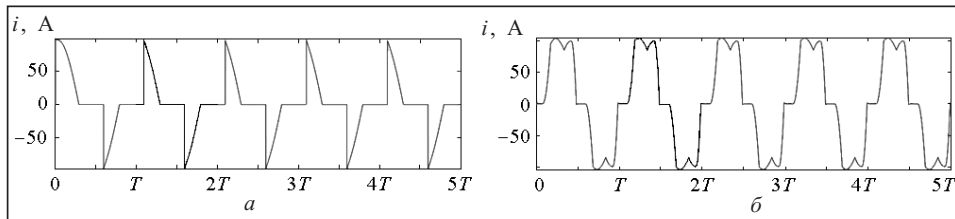


Рис. 1. Графіки струмів навантаження Н1 (а) і навантаження Н2 (б)

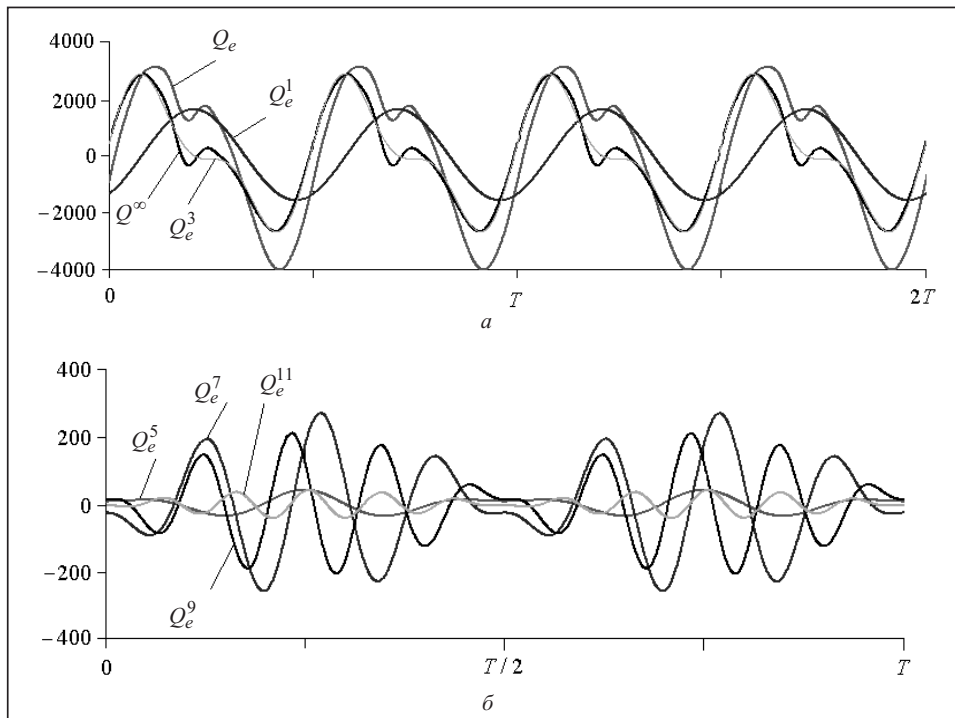


Рис. 2. Графіки обмінних процесів $\{\Gamma\}$ — $\{H1\}$

Коефіцієнт нелінійних спотворень THD такого струму складає 73 %. Визначимо найбільш «впливові» гармоніки: 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13 та обчислимо за виразами (1)–(4) обмінні потужності (табл. 1). Також визначимо реактивну потужність основної гармоніки. За виразом (5) отримано $\Delta_{B1} = 0.22$, а за виразом (6) отриманий коефіцієнт наближення енергетичного процесу до синусоїдального складає -1.3 .

Графіки обмінних потужностей $Q_e^1, Q_e^3, Q_e, Q_e^\infty$ на всьому інтервалі зображено на рис. 2, а, а графіки обмінних потужностей за кожною гармонікою — на рис. 2, б. Аналіз показує, що найбільший вплив на обмінні процеси мають вищі гармоніки (зокрема, найбільший вплив має третя гармоніка).

Аналогічні результати отримано для системи $\{\Gamma\}$ — $\{H2\}$. Графік струму, наведений на рис. 1, б, має THD = 29 %.

Графіки обмінних потужностей Q_e^1, Q_e^∞, Q_e на всьому інтервалі (рис. 3, а) наведено для струму, графік якого представлено на рис. 1, б. Графіки обмінних потужностей за кожною гармонікою зображено на рис. 3, б. Розрахункові параметри наведено в табл. 1.

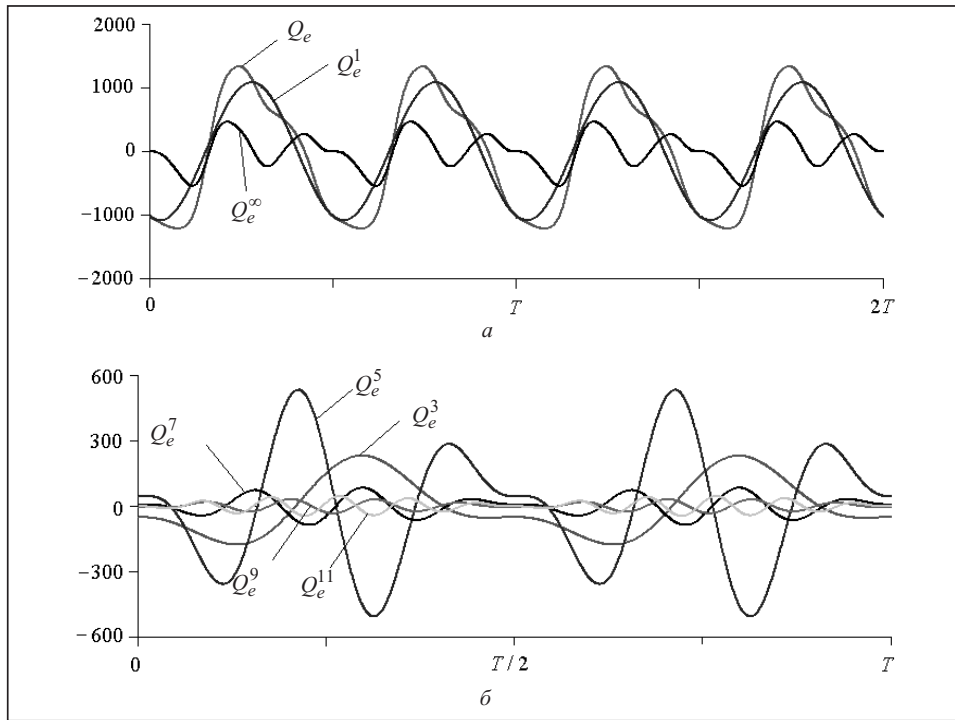


Рис. 3. Графіки обмінних процесів $\{\Gamma\} — \{H2\}$

Таблиця 1

Показники	Система $\{\Gamma\} — \{H1\}$	Система $\{\Gamma\} — \{H2\}$
P	5321	5834
Q_1	3181	-2170
Q_e^1	1150	733
Q_e^3	1755	130
Q_e^5	41.6	535.7
Q_e^7	380	122.5
Q_e^9	384	60
Q_e^{11}	94	102
Q_e^{13}	299	40
Q_e^∞	1810	484
Q_e	1891	805
Δ_{B1}	0.22	0.126
Δ_{B2}	-1.3	-0.18

На відміну від системи $\{\Gamma\} — \{H1\}$ в системі $\{\Gamma\} — \{H2\}$ обмінна потужність зумовлена першою та п'ятою гармоніками. Із табл. 1 випливає, що реактивна потужність другої системи є більшою у порівнянні з активною, що вказує на більший кут зсуву між напругою та першою гармонікою струму. Чим більше графік струму стає подібним до синусоїди ($\Delta_{B2} = -0.18$), тим меншими будуть обмінні процеси за вищими гармоніками.

Компенсація обмінної потужності зменшить реактивну потужність та вищі гармоніки, що покращить електромагнітну сумісність. Цей ефект досяжний, якщо приєднати до системи пристрої для компенсації: активні фільтри, пасивні фільтри окремих гармонік або споживачеві замінити обладнання на більш сучасне з використанням активних випрямлячів [12].

Щоб краще аналізувати енергетичні процеси, обмінні потужності можна використовувати для таких досліджень.

1. Однозначне відображення обмінних процесів.
2. Накопичення енергії в реактивних елементах (характеристика енергоємності та екстремальних режимів роботи реактивних елементів).
3. Відображення енергообміну за наявності різнойменних гармонік струму та напруги в перетині кола.
4. Відображення обмінних процесів між генераторами струму та напруги.
5. Оцінювання обмінних процесів у перехідних режимах.
6. Зіставлення обмінних процесів у різних перетинах кола.
7. Оцінювання взаємного впливу елементів кола з різним гармонічним складом напруги $u(t)$ та струму $i(t)$.
8. Оцінювання стійкості режимів роботи за рахунок введення граничних значень величини характеристик.
9. Урахування величин кутів струму та напруги ($k > 1$) для вищих гармонік.
10. Однозначне усунення зворотних потоків енергії для компенсації відповідної характеристики.

На рівні локальних систем з ДРГ динамічна тарифікація обов'язково повинна базуватися на динамічних моделях, які враховуватимуть характер генерації, регулювання споживання електроенергії в системі та стимулювання відповідних дій на вимогу споживача [13–15].

Крім досліджень обмінних процесів у ДРГ для досягнення більшого економічного ефекту потрібно оптимізувати процеси генерування потужності, оптимально перерозподіляючи потужності між генераторами, які належать до локальної системи для мінімізації витрат первинного палива у разі використання дизель-генераторів, відбору енергії сонця та вітру за оптимальних умов.

Розроблені алгоритми розподілу потужностей дадуть змогу

- керувати в реальному часі генераторами;
- користувачам аналізувати вплив добових показників потужностей споживаної електроенергії на зміну вартісних показників системи, що за умов динамічного ціноутворення дасть змогу споживачу зменшити витрати за рахунок перерозподілу потужності протягом дня;
- провести попередній розрахунок витрат ДРГ для заданих графіків потужностей навантажень.

Поєднання алгоритмів оптимального розподілу потужностей з аналізом обмінних потужностей дає змогу оптимізувати систему, отримати меншу ціну за 1 кВт електроенергії високої якості.

Подальше підвищення ефективності роботи розподіленої локальної енергосистеми потребує застосування складних алгоритмів прогнозування з урахуванням процесів генерування і споживання електроенергії. Для локальних систем енергозабезпечення має бути розв'язаним цілий комплекс проблем на рівні кінцевого споживача. Однією із найбільш важливих задач забезпечення ефективної роботи розподіленої енергетичної системи є впровадження відповідних інтелектуальних систем керування, які на базі сучасних інформаційних технологій [17, 18] використовують алгоритми комплексного прогнозування роботи як генерувальних так і споживчих елементів мережі.

Отже, проведено дослідження обмінних процесів для двох систем з різними споживачами за наявності обмінних потужностей.

За значеннями отриманих обмінних потужностей оцінено низку додаткових енергетичних характеристик і показників, які можна використати для аналізу та оптимізації енергопроцесів в ДРГ, а також визначено ефективність роботи як генератора, так і навантаження систем Microgrid у цілому.

На підставі отриманих результатів можна сформулювати пропозиції щодо зміни алгоритмів керування генераторами та навантаженнями, впровадження заходів з енергоефективності, а також реалізувати механізми керування попитом.

Подальша оптимізація керування процесами генерування енергії, перерозподілом потужностей і динамічна тарифікація в системах Microgrid дадуть змогу підвищити якість роботи, мінімізуючи при цьому наслідки поєднання фінансової неоптимальності режимів функціонування Microgrid з неоптимальністю загальної сукупності енергопроцесів (постачання, спотворення якості електроенергії, рівень втрат та ін.).

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Cudria S.O. (ed.). Renewable energy sources. Kyiv: Institute of Renewable Energy of NASU, 2020. 392 p. (Ukrainian).
2. Zhaoyun Z., Wenjun Z., Yang M., Li K., Zhi Z., Yang Z., Guozhong L., Na Y. Application of micro-grid control system in smart park. *The Journal of Engineering*. 2019. Vol. 2019, Iss. 16. P. 3116–3119. <https://doi.org/10.1049/joe.2018.8771>.
3. Milind J. Pati, Shalaka N. Chaphekar. Control of Microgrid: Literature review. *International Journal of Engineering Innovation & Research*. 2018. Vol. 7, Iss. 2. P. 145–151.
4. Hirscha A., Paraga Y., Guerrerob J. Microgrids: A review of technologies, key drivers, and outstanding issues. *Renewable and Sustainable Energy. Reviews*. 2018. Vol. 90. P. 402–411.
5. Denysiuk S.P. Analysis and optimization of energy processes in dispersed power systems. *Technical Electrodynamics*. 2016. N 4. P. 62–64 (Ukrainian).
6. Khilenko V.V., Stepanov O.V., Kotuliak I., Reis M. Optimization of the selection of software elements in control systems with significantly different-speed processes. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2021. Vol. 57, N 2. P. 185–189.
7. Dudjak V., Neves D., Alsaikaf T., Khadem Sh., Pena-Bello A., Saggese P., Bowler B., Andoni M., Bertolini M., Zhou Y., Lormeteau B., Mustafá M.A., Wang Y., Francis C., Zobiri F., Parra D., Papaemmanouil A. Impact of local energy markets integration in power systems layer: A comprehensive review. *Applied Energy*. 2021. Vol. 301. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117434>.
8. Honarmand M.E., Hosseinmezhad V., Hayes B., Siano P. Local energy trading in future distribution systems. *Energies*. 2021. Vol. 14, Iss. 11. 3110. <https://doi.org/10.3390/en14113110>.
9. Sasaki Y., Tsurumi T., Yorino N., Zoka Y., Rehiara A.B. Real-time dynamic economic load dispatch integrated with renewable energy curtailment. *Journal of International Council on Electrical Engineering*. 2019. Vol. 9, N 1. P. 85–92.
10. Subrramanian V., Das T.K. A two-layer model for dynamic pricing of electricity and optimal charging of electric vehicles under price spikes. *Energy*. 2019. N 167. P. 1266–1277.
11. Dutta G., Mitra K. A literature review on dynamic pricing of electricity. *Journal of the Operational Research Society*. 2017. Vol. 68 (10). P. 1131–1145.

12. Kyrylenko O.V., Strzelecki R., Denysiuk S.P., Derevianko D.G. Main features of the stability and reliability enhancement of electricity GRID with DG in Ukraine based on IEEE Standards. *Техн. електродинаміка*. 2013. № 6. С. 48–50.
13. Bielokha H., Samcheleev Y. Electromagnetic compliant of voltage source with relay control. *Intern. Conf. on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*. 2017. P. 32–35. <https://doi.org/10.1109/MEES.2017.8248921>.
14. Zhuikov V.Y., Boiko I.Y., Denysiuk S.P. Model of dynamic tariffing Microgrid's electricity consumption in local energy markets. *Science and Education a New Dimension. Natural and Technical Sciences*. 2021. IX(31), Issue 250. P. 46–49.
15. Rehman S., Natrajan N., Mohandes M., Alhems L.M., Himri Y., Allouhi A. Feasibility study of hybrid power systems for remote dwellings in Tamil Nadu. *IEEE Access*. 2022. Vol. 8. P. 143881–143890. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3014164>.
16. IRENA (2021), Renewable Power Generation Costs in 2020, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. URL: <https://www.irena.org/publications/2021/Jun/Renewable-Power-Costs-in-2020>.
17. Khilenko V.V. Application of blockchain technologies for improving the quality of ACS of complex dynamic systems. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2020. Vol. 56, N 2. P. 181–186.
18. Helebrandt P., Bellus M., Ries M., Kotuliak I., Khilenko V. Blockchain adoption for monitoring and management of enterprise networks. *2018 IEEE 9th Annual Information Technology, Electronics and Mobile Communication Conference, IEMCON 2018*. 2019. P. 1221–1225.

H.S. Bielokha, S.P. Denysiuk, V.V. Khilenko

ANALYSIS OF METABOLIC PROCESSES TO OPTIMIZE THE TECHNICAL AND ECONOMIC INDICATORS OF MICROGRID

Abstract. The authors discuss Microgrid systems consisting of generators and loads whose currents have higher harmonics. The energy characteristics are analyzed and the presence of exchange powers whose compensation reduces the reactive power and high harmonics is shown. The dynamics of exchange processes in Microgrid is analyzed and the problem of determining the cost of electricity with dynamic billing in Microgrid is considered, taking into account both economic and technical components.

Keywords: Microgrid, dynamics of exchange processes, local energy markets, dynamic billing, reactive power, higher harmonics.

Надійшла до редакції 04.06.2022