

АНАЛІЗ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ЕНЕРГОПРОЦЕСІВ У РОЗОСЕРЕДЖЕНИХ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМАХ

С.П. Денисюк, докт.техн.наук

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,
пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна. E-mail: spdens@ukr.net

Досліджено особливості аналізу та оптимізації енергетичних процесів у розосереджених електроенергетичних системах із альтернативними джерелами енергії та регуляторами на базі пристроїв силової електроніки. Показано доцільність застосування декомпозиції потужності Фризе та обмінної потужності на складові, які відображають різні фактори впливу. Представлено співвідношення для аналізу складових втрат електроенергії, оцінки взаємного впливу елементів та точності вимірювання. Бібл. 5.

Ключові слова: розосереджені джерела енергії, енергопроцеси, потужність Фризе, обмінна потужність.

На сьогодні більшість напрямків розвитку розосереджених електроенергетичних систем (РЕЕС) формується на основі реалізації положень концепції Smart Grid [2–5]. Як складові РЕЕС у рамках концепції Smart Grid розвиваються системи з джерелами розосередженої генерації (ДРГ), віртуальними електростанціями (VPP), активними (керуваними) споживачами, локальні системи Microgrid. РЕЕС характеризуються наявністю в них генераторів обмеженої потужності, використанням різних типів альтернативних джерел енергії, широким діапазоном зміни параметрів, ускладненими системами керування [2, 5]. Зростає роль різних типів пристроїв силової електроніки як інтерфейса під'єднання ДРГ, так і забезпечення регулювання режимів у РЕЕС і технологічних процесів у споживачів, у т.ч. активних.

Вирішення багатьох проблем, зокрема, проектування та побудови РЕЕС, підвищення їхньої енергоефективності, покращення якості електроенергії, забезпечення заданих рівнів електромагнітної сумісності (ЕМС), моніторинг стану елементів системи, ведення режимів електропостачання, побудова системи енергоменеджменту, реалізація алгоритмів програм керування попитом (Demand Side Management – DSM) ґрунтуються на побудові адекватних моделей, проведенні комплексного аналізу енергетичних процесів та оптимізації параметрів, структури і режимів, розробці законів керування мультиагентними системами. Це обумовлює необхідність узгодженого розгляду задач оцінки обмінних процесів, складових втрат електроенергії, адекватності побудови та розрахунку складових балансу (як миттєвого, так і інтегрального), оцінки нерівномірності графіків електропостачання на інтервалі технологічного процесу T_T [1]. Реалізація клієнтоорієнтованого (Customer based) підходу при аналізі та оптимізації енергопроцесів у РЕЕС обумовила необхідність розширення системи показників якості електроенергії та показників якості електропостачання (показників безперервності та надійності). Тому метою статті є формування та застосування розширеної системи енергетичних показників та характеристик РЕЕС, які адекватно відображають процеси енергообміну та втрат електроенергії [1].

Оцінка оптимальності процесів в залежності від вимог поставлених задач будемо розглядати з врахуванням системних ефектів на кількох ієрархічних рівнях: (1) – у конкретній точці t_0 ; (2) – на інтервалі T_1 періоду дії генератора (споживача); на інтервалі T_2 сталості структури системи; (3) – періоду дії генератора T_T , роботи пристроїв силової електроніки $T_{ПЕ}$ чи споживачів T_H ; (4) – виділеної сукупності періодів дії генераторів та/чи роботи споживачів T_Δ ; (5) – протягом усього технологічного процесу T_T . У загальному випадку $T_T \neq T_H \neq T_{ПЕ}$. Розглядаючи РЕЕС з математичної точки зору як динамічні коливальні системи, можна виділити два типи процесів – консервативні та дисипативні, яким у загальному випадку поставимо у відповідність обмінну потужність $Q_{Об}$ і потужність накопичення Q_H та потужність Фризе Q_Φ і активну потужність P [1].

Для забезпечення оптимального функціонування РЕЕС має бути вирішена низка оптимізаційних задач, окремі 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:
 $P_{\text{ДРГ}} < P_{\text{ДРГ,ГР}}$; $Q_{\text{ДРГ}} < Q_{\text{ДРГ,ГР}}$;
- мінімізація обмінних процесів (обмінної потужності $Q_{Об}$): $Q_{Об} \rightarrow Q_{Об,\min}$;
- мінімізація додаткових втрат електроенергії (потужності Фризе Q_Φ): $Q_\Phi \rightarrow Q_{\Phi,\min}$;
- мінімізація заданого рівня ЕМС за обмінною потужністю $Q_{Об,\infty}$ вищих гармонік: $Q_{Об,\infty} \rightarrow Q_{Об,\infty,\min}$.

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

Для аналізу та подальшої оптимізації режимів РЕЕС доцільно задіяти декомпозицію потужності Фризе Q_Φ і обмінної потужності $Q_{Об}$ з врахуванням впливу різних факторів, поділ струму $i(t) = i_\Delta(t) + i_P(t)$ на дві ортого-

нальні складові (активну $i_A(t)$ і реактивну $i_P(t)$) та врахування балансу миттєвих ($p(t)=p_H(t)+p_0(t)$) та інтегральних ($S^2=P^2+Q_\Phi^2$) характеристик. Реактивну потужність Q_Φ будемо розглядати як еквівалентну величину додаткових втрат $W_{\text{ДОД}}$ електроенергії, оскільки $W_{\text{ДОД},Q_\Phi} = I_P^2 R_{\text{ЕКВ}} T = (Q_\Phi/U)^2 R_{\text{ЕКВ}} T$ – додаткові втрати при протіканні струму I_P через еквівалентний опір (наприклад, лінії електропередачі) $R_{\text{ЕКВ}}$ за час T . Покладемо, що за характеристиками відображення впливу визначеної множини впливів $\alpha_j[\Delta x_1^j, \dots, \Delta x_i^j, \dots, \Delta x_{n_s}^j]$ визначається відповідна j -а складова додаткових втрат електроенергії, де $j=1, \dots, n_\Phi$; n_Φ – кількість факторів декомпозиції Q_Φ , серед яких можуть бути технологічні, електромагнітні та керуючі впливи; x_i – контрольований параметр. Згідно з виділеними характеристиками зміни $\alpha_j[\Delta x_1^j, \dots, \Delta x_i^j, \dots, \Delta x_{n_s}^j]$, $j=1, \dots, n_\Phi$, визначимо квадратичні складові діючих значень струму $i_P(t)$ наступним чином:

$$I_P^2 = \sum_{j=1}^{n_\Phi} I_{j,P}^2. \quad (1)$$

З урахуванням (1) квадрат потужності Фризе Q_Φ розбивається на n_Φ адитивних складових, обумовлених впливом виділених факторів. Наприклад, при $u(t) = U_m \sin \omega t$ потужність Q_Φ розбивається на складові

$$Q_\Phi^2 = \sum_{j=1}^{n_\Phi} U^2 I_{j,P}^2 = \sum_{j=1}^{n_\Phi} Q_{\Phi,j}^2, \quad (2)$$

де $Q_{\Phi,j}$ – складова додаткових втрат від впливу j -го, $j=1, \dots, n_\Phi$, фактора. Вираз, аналогічний (2), можна отримати за наявності у спектрі напруги $u(t)$ нульової та вищих гармонічних складових, а також розгляду несиметричних трифазних систем напруги РЕЕС.

Отже, оцінка додаткових втрат електроенергії найбільш повно здійснюється із застосуванням потужності Фризе Q_Φ та її квадратичних складових, що відображають вплив різних факторів впливу на якість енергетичних процесів для одно- та багатofазних систем, довільного інтервалу часу ($Q_{\Phi,\tau}$), при несиметрії напруги ($Q_{\Phi,H}$), модуляції сигналів напруги та струму ($Q_{\Phi,M}$) [1]. Покажемо, що $Q_{\Phi,\tau}$ дозволяє здійснити більш точну оцінку нерівномірності (неоптимальності) графіків генерації та споживання електроенергії. Нехай для синусоїдальних напруги $u(t)$ та струму $i(t)$ графік електроспоживання містить два інтервали тривалістю t_1 та t_2 , для кожного з яких визначено діючі значення напруги (U_1, U_2), струму (I_1, I_2) та кути зсуву фаз (φ_1, φ_2). При оцінці рівня оптимальності графіка електропостачання сумарна реактивна потужність $Q_{\Phi,\tau}$ при $\tau = t_1 + t_2$ визначається із співвідношення $Q_{\Phi,\tau}^2 = Q_{1,1}^2 \delta_1^2 + Q_{1,2}^2 \delta_2^2 + U_1^2 I_2^2 + U_2^2 I_1^2 - 2U_1 U_2 I_1 I_2 \cos \varphi_1 \cos \varphi_2$ та відрізняється від традиційної усередненої реактивної потужності за першою гармонікою $Q_{1,\text{CP}} = Q_{1,1} \delta_1 + Q_{1,2} \delta_2$, де $Q_{1,1} = U_1 I_1 \sin \varphi_1$; $Q_{1,2} = U_2 I_2 \sin \varphi_2$; $\delta_1 = t_1 / (t_1 + t_2)$; $\delta_2 = t_2 / (t_1 + t_2)$.

Введення поняття обмінної потужності $Q_{\text{ОБ}}$ дає можливість оцінити інтенсивність обмінних процесів через перетин системи при довільному спектрі гармонік напруги та струму у виділеному перетині [1]. Обмінні процеси можна поділити за першою (індекс «1») та групою гармонік, які складають множину M_Γ потужністю N_Γ

(індекс « ∞ »):

$$Q_{\text{ОБ}}^{(1)} = \frac{1}{2T} \int_0^{t^+} u(t) I_{m(1)} \sin(\omega t - \psi_1^i) dt; \quad Q_{\text{ОБ}}^{(\infty)} = \frac{1}{2T} \int_0^{t^+} u(t) \left(\sum_{k=2}^{N_\Gamma} I_{m(k)} \sin(\omega t - \psi_k^i) \right) dt, \quad (3, 4)$$

де t^+ – інтервал періоду, коли $p(t) > 0$.

Безпосередньо рівень ЕМС можна оцінити, наприклад, за показниками Δ_{B1}, Δ_{B2} , які визначаються за співвідношеннями $\Delta_{B1} = Q_{\text{ОБ}} / P$; $\Delta_{B2} = Q_1 / Q_{\text{ОБ}} - \pi$. Показник Δ_{B1} відображає виконання критерію усереднення зворотних потоків енергії, а показник Δ_{B2} є інтегральною характеристикою наближення енергетичного процесу до синусоїдального. При цьому міра оцінки взаємного впливу елементів РЕЕС визначається ступенем їхнього наближення до нуля.

Для оцінки дольового внеску генераторів та/чи споживачів для заданої діючої напруги генератора $u(t)$ обмінні процеси у вузлі системи, крім представлених відповідно до формул (3) та (4) способів, доцільно також розділити за однією j -ю вищою (індекс « j ») та всіма (індекс « Σ ») гармоніками згідно з наступними виразами:

$$Q_{\text{ОБ}}^{(j)} = \frac{1}{2T} \int_0^{t^+} u(t) I_{m(j)} \sin(j\omega t - \psi_j^i) dt; \quad Q_{\text{ОБ}}^{(\infty)} = \frac{1}{2T} \int_0^{t^+} u(t) \left(\sum_{k=1}^{N_\Gamma} I_{m(k)} \sin(\omega t - \psi_k^i) \right) dt. \quad (5, 6)$$

Вплив елементів системи оцінюється відношенням однієї з величин (3)–(6) до суми відповідних обмінних потужностей всіх елементів РЕЕС, під'єднаних до виділеного вузла.

Щодо адекватної точності вимірювання інтегральних характеристик енергообміну з врахуванням спотворень сигналів. Співвідношення між напругами $u_i(t), u_\infty(t)$, і струмами $i_{A,1}(t), i_{A,\infty}(t), i_{P,1}(t)$ та $i_{P,\infty}(t)$ (де індекс «1» – визначає першу гармоніку; ∞ – вищі гармоніки) визначають особливості оцінки точності вимірювання складових електроенергії в РЕЕС. Адекватність оцінки неоптимальності при вимірюванні будемо характеризувати величиною відповідної складової реактивного струму. При цьому реактивній вимірюваній потужності Q_j поставимо у відповідність еквівалентний реактивний струм $i_{P,j}(t)$, де $Q_j = U I_{P,i}$. Здійснивши квадратичну декомпозицію потужності Q_Φ на складові Q_j та Q_D ($Q_\Phi^2 = Q_j^2 + Q_D^2$), для діючих значень струму запишемо співвідношення $I_D^2 = I_P^2 - I_{P,i}^2$, де величину I_D визначимо як показник адекватності визначення рівня неоптимальності процесів. Аналогічним чином як такий показник можна розглядати й величину

$$\Delta_Q = (Q_{\Phi}^2 - Q_j^2) / Q_{\Phi}^2. \quad (7)$$

Співвідношення (7) представляє рівень відображення додаткових втрат електроенергії у випадку використання при вимірюванні окремих визначень реактивних потужностей (зокрема, Q_j) по відношенню до реального рівня додаткових втрат електроенергії, визначених згідно з потужністю Фризе Q_{Φ} .

Таким чином, ортогоналізація миттєвих сигналів струму і напруги та декомпозиція реактивних потужностей Q_{Φ} і $Q_{Об}$ дозволяє отримати низку додаткових енергетичних характеристик і показників, які можна успішно використати при аналізі та оптимізації енергопроцесів в РЕЕС.

1. Жушков В.Я., Денисюк С.П. Энергетичні процеси в електричних системах з ключовими елементами. – К.: Текст, 2010. – 264 с.
2. Стогній Б.С., Кириленко О.В., Праховник А.В., Денисюк С.П. Еволюція інтелектуальних електричних мереж та їхні перспективи в Україні // Техн. електродинаміка. – 2012. – № 5. – С. 52–67.
3. *Future of the Grid: Evolving to Meet America's Needs.* – Prepared for the U.S. Department of Energy by Energetics Incorporated under contract No. GS-10F-0103J, Subtask J3806.0002. – Available at: <http://energy.gov/sites/prod/> (accessed 12.01.2016)
4. *Research and Innovation roadmap of the European Electricity Grid Initiative (EEGI).* – Available at: http://www.gridplus.eu/Documents/20130228_EEGI%20Roadmap%202013-2022_to%20print.pdf/ (accessed 22.01.2016)
5. *SmartGrids Strategic Research Agenda (SRA) for RD&D1 needs towards2035 "SmartGrids SRA 2035".* – Available at: <http://www.smartgrids.eu/documents/sra2035.pdf> (accessed 15.01.2016)

УДК 621.31

АНАЛИЗ И ОПТИМИЗАЦИЯ ЭНЕРГОПРОЦЕССОВ В РАССРЕДОТОЧЕННЫХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

С.П. Денисюк, докт. техн. наук

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», пр. Победы, 37, Киев, 03056, Украина. E-mail: spdens@ukr.net

Исследованы особенности анализа и оптимизации энергетических процессов в рассредоточенных электроэнергетических системах с альтернативными источниками энергии и регуляторами на базе устройств силовой электроники. Показана целесообразность применения декомпозиции мощности Фризе и обменной мощности на составляющие, отражающие различные факторы влияния. Представлено соотношение для анализа составляющих потерь электроэнергии, оценки взаимного влияния элементов и точности измерения. Библиография 5.

Ключевые слова: рассредоточенные источники энергии, энергопроцессы, мощность Фризе, обменная мощность.

ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF ENERGY PROCESSES IN DISPERSED ELECTRICAL POWER SYSTEMS

S. Denysiuk

National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute",

Pr. Peremohy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine. E-mail: spdens@ukr.net

The features of energy processes in distributed power systems with alternative energy sources and controls devices based on power electronics optimization analysis are researched. The feasibility of power freeze decomposition and power exchange in to components that reflect a variety of factors influence are showed. The ratio for component power losses analysis, the mutual influence of the elements estimation and measurement accuracy are presented. References 5.

Keywords: dispersed energy of energy processes, power Frize, power exchange.

1. Zhuiikov V.Ya., Denysiuk S.P. Energy processes in electrical systems with key elements. – Kyiv: Text, 2010. – 264 p. (Ukr)
2. Stogniy B.S., Kyrylenko O.V., Prakhovnik A.V., Denysiuk S.P. The evolution of smart grids and their prospects in Ukraine // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2012. – No 5. – Pp. 52–67.
3. *Future of the Grid: Evolving to Meet America's Needs.* – Prepared for the U.S. Department of Energy by Energetics Incorporated under contract No. GS-10F-0103J, Subtask J3806.0002. – Available at: <http://energy.gov/sites/prod/> (accessed 12.01.2016)
4. *Research and Innovation roadmap of the European Electricity Grid Initiative (EEGI).* – Available at: http://www.gridplus.eu/Documents/20130228_EEGI%20Roadmap%202013-2022_to%20print.pdf (accessed 22.01.2016)
5. *SmartGrids Strategic Research Agenda (SRA) for RD&D1 needs towards2035 "SmartGrids SRA 2035".* – Available at: <http://www.smartgrids.eu/documents/sra2035.pdf> (accessed 15.01.2016)

Надійшла 03.02.2016

Остаточний варіант 07.04.2016