

# ДЕЯКІ АКТУАЛЬНІ ЗАДАЧІ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ ТА ЕНЕРГООБ'ЄДНАНЬ ТА ЇХ РОЗВ'ЯЗАННЯ<sup>1</sup>

**О.Ф. БУТКЕВИЧ,**  
Інститут електродинаміки НАН України  
м. Київ, Україна  
[o.butkevych@gmail.com](mailto:o.butkevych@gmail.com)

***Анотація.** Розглядаються дві задачі проблеми підвищення надійності функціонування електроенергетичних систем (ЕЕС) та їх об'єднань (ЕО), що не є традиційними в рамках проблеми режимної надійності ЕЕС. Мета розв'язання задач – запобігання переобтяженню електричних зв'язків ЕЕС (ЕО) та втрати їх стійкості. Актуальність задач зумовлюється як об'єднанням ЕЕС та ЕО на паралельну роботу з утворенням потужніших ЕО, так і відчутним зростанням частки відновлюваних джерел енергії в балансі активної потужності генерування ЕО. Запропоновано способи та засоби розв'язання таких задач.*

***Ключові слова:** електроенергетична система, енергооб'єднання, режим, стійкість, відновлювані джерела енергії, накопичувачі електроенергії, низькочастотні коливання*

**Вступ.** Проблема надійності електроенергетичних систем (ЕЕС) є багатовимірною і стосується як створення умов для безаварійного функціонування ЕЕС та енергооб'єднань (ЕО), так і засобів протидії розвитку аварій. Більша частина відповідних задач є традиційною і їх розв'язують в рамках проблеми *режимної надійності* ЕЕС, яка є складовою загальнішою проблеми надійності ЕЕС. Разом з тим, сучасний етап розвитку ЕЕС, що характеризується тенденціями до «розширення» ЕО (приклад ENTSO-E) та збільшенням впливу на режимну надійність ЕО відновлюваних джерел енергії, сумарна встановлена потужність яких зростатиме в процесі переходу до безвуглецевої енергетики, характеризується появою нових задач, що не є традиційними в аспекті проблеми режимної надійності ЕЕС.

---

<sup>1</sup> Робота підтримана CRDF Global (грант G-202102-68020)

Розглянемо дві такі задачі, що поєднані гіпотетичними загрозами втрати стійкості ЕО: 1) визначення оптимального розподілу (за місцем та потужністю) в ЕО накопичувачів електроенергії (НЕЕ), призначених для балансування стохастичних змін потужності відновлюваних джерел енергії (ВДЕ): завдяки використанню такого розподілу унеможливується загроза наднормативного переобтяження «проблемних» контрольованих перетинів ЕО внаслідок «ввімкнення» НЕЕ; 2) виявлення в режимі реального часу загрози коливного порушення стійкості ЕО внаслідок виникнення низькочастотних коливань (НЧК) параметрів режиму ЕО: своєчасне вживання заходів дає змогу демпфувати НЧК і запобігти аварії.

**Постановка та розв'язання задачі № 1** [1, 2]. Визначити об'єкти (вузли) ЕО та потужність окремих НЕЕ, які слід встановити на таких об'єктах для бажаної зміни потоків активної потужності заданими контрольованими перетинами ЕО внаслідок «ввімкнення» НЕЕ для балансування стохастичних змін (зменшення) потужності ВДЕ. Значення параметрів режиму ЕО мають знаходитися в заданих межах. Значення сумарної потужності НЕЕ, що підлягає розподілу, задано. Формалізація задачі визначення розподілу НЕЕ з метою досягнення *бажаної* зміни сум розрахункових скалярних значень потоків активної потужності елементами *заданого* (*i*-го) перетину ЕО у вигляді

$$F_i = |P_i(X) - P_{id}| \rightarrow \min, \quad i = \overline{1, k}; \quad (1)$$

$$X \supset W_{on}; \quad W = [W_{on} \ W_{off}]^T; \quad W = [w_1 \ w_2 \ \dots \ w_q]^T; \\ P_j \leq P_{jmax}, \quad j = \overline{1, n_j}; \quad n_j \geq k; \quad (2)$$

$$U_{smin} \leq U_s \leq U_{smax}, \quad s = \overline{1, m_s}; \quad (3)$$

$$I_r \leq I_{rmax}, \quad r = \overline{1, m_r}, \quad (4)$$

де  $F_i$  – цільова функція,  $i = \overline{1, k}$ ,  $k$  – кількість *заданих* перетинів ЕО;  $P_i(X)$ ,  $P_{id}$  – арифметична сума розрахункових значень потоків активної потужності елементами *i*-го перетину та *задане* значення такої суми відповідно;  $X$  – вектор параметрів режиму, до якого входить і змінний субвектор  $W_{on}$  частини потужностей НЕЕ, вже розподілених в окремих *вузлах-претендентах*;  $W$  – вектор

потужностей *вузлів-претендентів*, окремі елементи якого в процесі розподілу потужностей НEE утворюють субвектор  $W_{on}$ , а інші (без встановлених НEE) – субвектор нульових елементів ( $W_{off}$ );  $q$  – кількість *вузлів-претендентів*;  $n_j$  – кількість контрольованих перетинів EO, суми скалярних значень активної потужності якими ( $P_j$ ) не мають перевищувати заданих значень  $P_{jmax}$  (такі обмеження можуть стосуватися і окремих елементів перетинів EO);  $m_s$  – кількість вузлів, для кожного ( $s$ -го) з яких значення напруги ( $U_s$ ) має перебувати у допустимих межах;  $m_r$  – кількість повітряних ліній (ПЛ), для кожної ( $r$ -ої) з яких розрахункова сила струму ( $I_r$ ) не має перевищувати максимально допустимого значення за термічною стійкістю дротів ПЛ ( $I_{rmax}$ ).

Оскільки одержання аналітичних виразів залежностей  $P_i = P_i(W)$  для заданого ( $i$ -го) перетину проблематично, то для визначення напрямку пошуку чисельним диференціюванням розраховуються коефіцієнти чутливості

$$\partial P_i(X) / \partial W = \left[ \Delta P_i(X) / \Delta w_1 \quad \Delta P_i(X) / \Delta w_2 \quad \Delta P_i(X) / \Delta w_3 \quad \dots \quad \Delta P_i(X) / \Delta w_q \right]^T,$$

для чого використовуються розроблені програмні засоби моделювання режимів ЕЕС (EO), що самовстановлюються за частотою. Далі, використовуючи один із відповідних градієнтних методів та враховуючи (1)-(4), виконується оптимізаційний крок з розподілу НEE. Покроковий процес розподілу завершується з розподілом заданої сумарної потужності НEE.

Попередньо (до оптимізаційного процесу розподілу НEE) слід визначати «рівень проблемності» контрольованих перетинів EO (для визначення множини *заданих* перетинів та послідовності їх використання в оптимізаційному процесі розподілу НEE) та формувати відповідні *заданим* перетинам множини *вузлів-претендентів* (об'єктів EO), в яких гіпотетично може бути встановлено НEE.

**Постановка та розв'язання задачі № 2 [3].** Більшість великих системних аварій, які сталися протягом останніх років, є наслідком виникнення, посилення та поширення в EO низькочастотних (до 1 Гц) НЧК.

Запропоновано в режимі реального часу оцінювати загрозу коливної втрати стійкості EO, неперервно аналізуючи (у вигляді

ковзних вибірок даних) результати цифрової реєстрації параметрів режиму ЕО, насамперед потоків активної потужності елементами «проблемних» перетинів ЕО, з метою виявлення домінантних мод НЧК, зростання амплітуд яких може призводити до небезпечного зростання амплітуд НЧК, загрожуючи коливною втратою стійкості ЕО. Аналогом аналізу зазначених вибірок даних в реальному часі (але без впливу похибок математичної моделі) є визначення власних чисел ( $\lambda_i, i = 1, n$ ) характеристичної матриці  $A$  лінеаризованої математичної моделі «динаміки» ЕЕС. Кожне  $\lambda_i$  характеризує  $i$ -ту моду ( $e^{\lambda_i t}$ ) і йому відповідає власний вектор  $U_i$  матриці  $A$  та власний вектор  $V_i$  матриці  $A^T$ . Кожна мода робить свій «внесок» до змінних стану системи (моделі). Позначивши вектор змінних стану  $\Delta x$ , його зміну у часі можна подати у вигляді

$$\Delta x(t) = \sum_{i=1}^{i=n} e^{\lambda_i t} U_i V_i^T \Delta x(0) = U e^{\Lambda t} U^{-1} \Delta x(0), \quad (5)$$

де  $\Delta x(0)$  – це  $\Delta x(t=0)$ ;  $U$  – модальна матриця, сформована із власних векторів матриці  $A$ ;  $e^{\Lambda t}$  – діагональна матриця, ненульові елементи якої – моди.

**Висновок.** Результатами моделювання підтверджено цілковиту працездатність запропонованих способів та відповідно розроблених засобів розв’язання розглянутих задач.

#### Література

1. Буткевич О.Ф., Юнесва Н.Т., Гурєєва Т.М. До питання про розміщення накопичувачів енергії в ОЕС України. Техн. електродинаміка. 2019. № 6. – С. 59-64.
2. Буткевич О.Ф., Юнесва Н.Т., Гурєєва Т.М., Стецюк П.І. Задача розташування накопичувачів електроенергії в ОЕС України з урахуванням його впливу на потоки потужності контрольованими перетинами. Техн. електродинаміка. 2020. № 4. – С. 46-50.
3. Butkevych O., Chyzhevskiy V. Some Features of Electromechanical Oscillations Modes Identification in Power Systems. Pp. 47-70, in “Power systems research and operation. Selected problems”, Olexandr Kurylenko, Andrii Zharkin, Oleksandr Butkevych, Ihor Blinov, Ievgen Zaitsev, Artur Zaporozhets (Eds.). Springer, ISBN 978-3-030-82925-4 <https://doi.org/10.1007/978-3-030-82926-1>