

УДК 621.311.661

МОЖЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ АКУМУЛЯТОРНИХ БАТАРЕЙ ДЛЯ СТАБІЛІЗАЦІЇ ЧАСТОТИ В ОБ'ЄДНАНИХ ЕНЕРГОСИСТЕМАХ З ПОТУЖНИМИ СОНЯЧНИМИ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯМИ

М.М. Кулик¹, академік НАН України, д-р. техн. наук, професор, **І.В. Дрьомін²**, канд. техн. наук, ст. наук. співр.,
О.В. Згуровець¹

¹Інститут загальної енергетики НАН України,
03150, Україна, м. Київ, вул. Антоновича, 172

²Advanced Analytics and Data Science S.R.O.,
19900, Czech Republic, Praha, Štanderoва 869/2

Створено і досліджено математичну модель процесів регулювання частоти і потужності в об'єднаних енергосистемах з сонячними електростанціями (СЕС) і акумуляторними батареями (АБ). Розроблена модель дозволяє вивчати особливості процесів регулювання частоти і потужності при спільній роботі АБ та СЕС за різних умов та характеристик елементів системи, а також визначати найбільш ефективні закони регулювання. Показано, що за умови використання великої СЕС сумісно з АБ співставної потужності можна досягти точності регулювання частоти на рівні, що відповідає нормативним вимогам енергосистем України та Євросоюзу. Бібл. 9, табл. 2, рис. 3.

Ключові слова: математична модель, об'єднана енергосистема, сонячна електростанція, акумуляторна батарея, регулювання частоти та потужності.

FEASIBILITY OF USING BATTERY ENERGY STORAGE SYSTEMS FOR FREQUENCY STABILIZATION IN INTEGRATED POWER SYSTEMS WITH POWERFUL SOLAR POWER PLANTS

M.M. Kulyk¹, Academician of the National Academy of Sciences of Ukraine, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Director of the Institute of General Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine, **I.V. Dryomin²**, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher,
O.V. Zgurovets¹

¹Institute of General Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine,
03150, Ukraine, Kyiv, 172 Antonovycha str.

²Advanced Analytics and Data Science S.R.O.,
19900, Czech Republic, Praha, Štanderoва 869/2

A mathematical model of frequency and power regulation processes in integrated power systems with solar power plants (SPPs) and battery energy storage systems (BESSs) has been developed and investigated. The model enables one to study the features of frequency and power regulation processes when BESS and SPP work together under various conditions and characteristics of system elements as well as to determine the most efficient control laws. It is shown that the use of large SPP combined with BESS of comparable power makes possible to achieve frequency control accuracy at a level that meets the regulatory requirements of the power systems of Ukraine and European Union. References 9, tables 2, figures 3.

Keywords: mathematical model, integrated power system, solar power plant, battery energy storage system, frequency and power regulation.



М.М. Кулик
M. Kulyk

Відомості про автора: директор Інституту загальної енергетики НАН України, академік НАН України, доктор технічних наук, професор. Член бюро Відділення фізико-технічних проблем енергетики НАН України, керує секцією Наукової ради НАН України з комплексної проблеми "Наукові основи електроенергетики", є членом міжвідомчих комісій, що діють при Уряді України. Голова спеціалізованої ради з захисту кандидатських дисертацій К 26.223.01 при Інституті загальної енергетики НАН України за спеціальністю 05.14.01 "Енергетичні системи та комплекси". Під його керівництвом підготовлено більше 20 кандидатів наук.

Публікації: більш ніж 200 наукових праць, серед яких 11 монографій.

ORCID: 0000-0002-5582-7027

Контакти: тел.: +38(044) 2201670

e-mail: info@ienergy.kiev.ua

Author information: director of the Institute of General Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine (NASU), Academician of the NASU, Doctor of Technical Sciences, Professor. He is a member of the Bureau of the Department of Physical and Technical Problems of Power Engineering of the NASU, Interdepartmental Commissions under the Government of Ukraine. He is the head of specialized council K 26.223.01 for the protection of candidate's theses at the Institute of General Energy of the NASU in the specialty 05.14.01 "Energy systems and complexes". Under his leadership, more than 20 candidates of sciences have been trained.

Publications: over 200 scientific works, among which 11 monographs.

ORCID: 0000-0002-5582-7027

Contacts: tel.: +38(044) 2201670

e-mail: info@ienergy.kiev.ua



І.В. Дрьомін
I. Dryomin

Відомості про автора: системний аналітик в Advanced Analytics and Data Science S.R.O.. Старший науковий співробітник, кандидат технічних наук.

Освіта: в 2003р. закінчив факультет "Радіотехніки і кібернетики" Московського фізико-технологічного інституту за спеціальністю "Прикладні фізика і математика". У 2011 р. захистив кандидатську роботу на тему "Узагальнені моделі та засоби з підвищення ефективності автоматичного регулювання частоти і потужності в об'єднаних енергосистемах", за спеціальністю 05.14.01 – "Енергетичні системи та комплекси".

Публікації: 18 статей.

ORCID: 0000-0003-0959-1751

Контакти: тел.: +38(095) 4414405

e-mail: ivan.dryomin@gmail.com

Author information: System Analyst in Advanced Analytics and Data Science S.R.O. Senior Researcher, Candidate of Technical Sciences.

Education: in 2003, he graduated from the Faculty of Radiotechnics and Cybernetics of the Moscow Institute of Physics and Technology, specializing in Applied Physics and Mathematics. In 2011, he defended his Candidate thesis on the topic "Generalized models and means for increasing the efficiency of automatic regulation of frequency and power in integrated power systems", specialty 05.14.01 - "Power systems and complexes".

Publications: 18 articles.

ORCID: 0000-0003-0959-1751

Contacts: tel.: +38(095) 4414405

e-mail: ivan.dryomin@gmail.com



О.В. Згуровець
O. Zgurovets

Відомості про автора: молодший науковий співробітник відділу "Прогнозування розвитку атомної та відновлюваної енергетики" Інституту загальної енергетики НАН України.

Освіта: в 2004р. закінчив теплоенергетичний факультет Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут" за спеціальністю "Програмне забезпечення автоматизованих систем".

Публікації: 6 статей.

ORCID: 0000-0001-8439-9781

Контакти: тел.: +38(060) 0664535

e-mail: gojtosir@gmail.com

Author information: Junior Researcher of the Department of Forecasting of the Development of Nuclear and Renewable Energy at the Institute of General Energy of the NASU.

Education: in 2004, he graduated from the Heat-and-Power Engineering Department of the National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute" with the specialization "Software of automated systems".

Publications: 6 articles.

ORCID: 0000-0001-8439-9781

Contacts: tel.: +38(060) 0664535

e-mail: gojtosir@gmail.com

Перелік використаних позначень та скорочень:

АБ – акумуляторна батарея;

ПІД – Пропорційно-інтегрально-диференційний.

СЕС – сонячна електростанція;

Вступ. Прагнення зменшити негативний вплив на навколишнє середовище, що пов'язаний з викидами парникових газів, шкідливих речовин, техногенним навантаженням, зумовленим видобутком та подальшим споживанням первинних енергетичних ресурсів, захороненням відпрацьованого палива, в тому числі – ядерного, аваріями на об'єктах традиційної енергетики, а також високі ціни і вичерпність викопних енергетичних ресурсів підштовхують світову спільноту до посиленого розвитку поновлюваних джерел енергії, збільшуючи їх роль в загальному енергетичному балансі енергосистем світу.

Так, частку відновлюваних джерел в структурі генерації електричної енергії, на яку в 2017 році в світі припадало близько 26,5% [1], багато країн планують збільшити до 50% і більше до 2040-2050 років. Більш того, 57 країн поставили собі за мету повністю відмовитися від викопних джерел, а 17 країн вже досягли частки відновлюваної енергетики в 90%, і хоча більшу частину цих потужностей складають гідроресурси, багато країн також нарощують потенціал вітрових і сонячних станцій. Такі країни як Данія, Уругвай, Німеччина, Ірландія, Португалія та Іспанія вже мають більш ніж 20% вітрових і сонячних станцій в балансі генерації електроенергії. Вже зараз відзначаються факти того, що виникають періоди, протягом яких споживання в енергосистемах деяких країн з високою часткою або повністю покривається за рахунок відновлюваних джерел (вітрові станції в серпні 2016 року виробляли 106% від усієї потреби Шотландії завдяки сильним вітрам; вітрові станції Німеччини о 6 ранку 1 січня 2018 року видавали 85% від загальної потреби, в той час як іншу частину покрили гідроелектростанції і електростанції на біопаливі, а вже 1 травня завдяки внеску сонячних електростанцій, відновлюваним джерелам вдалося знову перевищити споживання, забезпечивши у вихідний день 53,987 ГВт потужності [2]). З 2015 по 2017 роки зростання частки відновлюваних джерел енергії склав більше 8% в рік або більше 17% без урахування потужностей гідроелектро-

станцій (їх приріст становив близько 2% в рік). При цьому найбільше зростання встановленої в світі потужності, понад 32%, щорічно спостерігалось в області фотоелектричних сонячних електро-станцій [1, 3].

Не менш динамічна картина зростання спостерігається і в Україні, де тільки кількість сонячних електроустановок приватних господарств (потужністю до 30 кВт) в 2017 році перевищила показник 2016 року більш ніж удвічі і склала 3010 установок сумарною потужністю 51 МВт. Загальна кількість сонячних електростанцій в кінці першого кварталу 2018 року налічувала 235 одиниць загальною потужністю 841 МВт, а темпи зростання в 2017 році випередили 2016 рік на більш ніж 40% [4].

Незважаючи на екологічність, невичерпність та зниження ціни поряд з всебічною урядовою та фінансовою підтримкою, такі джерела як вітрові та сонячні електростанції мають основний суттєвий недолік, який досі стримує масове запровадження цих систем по всьому світу замість традиційних електростанцій на викопних видах палива. Цей недолік полягає в нерівномірності виробництва електроенергії, що має пряму залежність від погодних умов: уривчастого (непостійного) характеру дії відновлювального джерела енергії. Інтенсивність генерації часто не співпадає із годинами пікового навантаження, а відсутність моменту інерції фотоелектричних електростанцій призводять до того, що потужність генерації, яка прямо пропорційна інсоляції сонячних елементів, може швидко змінюватися в широких межах протягом десятків секунд кілька разів на день.

Особливістю роботи енергосистем є одночасне вироблення і споживання електроенергії, яка вимагає дотримання постійного балансу між споживачами і генераторами. Введення до складу енергосистеми сонячних станцій (непостійної генерації) буде вимагати введення відповідного обсягу маневрених потужностей або зміни характеру споживання. Для вирішення цього питання з боку генерації успішно використовуються гідро-

електростанції або маневрені блоки малої потужності. Рішення шляхом зміни потужності споживання можливо завдяки введенню споживачів регуляторів [5-7]. Але у багатьох країнах недостатньо необхідних для цього ресурсів.

Постановка завдання. Останнім часом великої популярності починають набувати системи накопичення енергії, що також можуть забезпечити вирішення цих питань [8]. Найбільш поширеною технологією зберігання енергії на сьогодні є гідроакumuлюючі електростанції. Прикладами інших нових технологій зберігання енергії є адиабатичні накопичувачі стиснутого повітря, маховики, конденсатори надвисокої ємності. Найбільш перспективною є технологія зберігання енергії у акумуляторних батареях через їх вивченість та легкість у проектуванні та встановленні у порівнянні з іншими технологіями зберігання, а також великою швидкодією.

Розвиток індустрії акумуляторних батарей великої потужності та ємності відкриває широкі перспективи у використанні енергії Сонця. Втім, для застосування цієї технології їй повинні передувати теоретичні дослідження процесів регулювання частоти і потужності в об'єднаних енергосистемах, в яких одночасно функціонують СЕС та АБ великої потужності.

Математична модель. Математична модель цієї задачі являє собою модифіковану систему алгебраїчних та диференціальних рівнянь і обмежень, що була розроблена авторами при дослідженні процесів регулювання частоти і потужності в енергосистемі в аварійних режимах за допомогою споживачів-регуляторів [5-7]. Відмінність полягає в заміні рівнянь, що описують процеси в споживачах-регуляторах, на необхідні рівняння для акумуляторних батарей.

Отримана таким чином математична модель має вигляд (1) – (12).

$$\frac{d\omega(t)}{dt} = \frac{\sum_{i=1}^I P_{zi}(t) + P_{AB}(t) - P_n(t) - P_m(t) + P_{CEC}(t)}{T_c P_{\Sigma 0} \omega(t)} \omega_0^2, \quad (1)$$

$$\frac{dP_{zi}(t)}{dt} = \frac{P_{z0i} - P_{zi}(t) + B_{zi}(\omega(t) - \omega_0)}{\tau_{zi}}, \quad i = \overline{1, I}, \quad (2)$$

$$\frac{dP_n(t)}{dt} = \frac{P_{n0} - P_n(t) + C_n(\omega(t) - \omega_0)}{\tau_n}, \quad (3)$$

$$P_{AB}(t) = (e^{-\frac{t}{\tau_{AB}}} - 1) F_{AB}(t), \quad (4)$$

$$P_{CEC}(t) = \frac{1}{2} A_0 + \sum_{k=1}^M (A_k \cos k\omega_0 t + B_k \sin k\omega_0 t), \quad (5)$$

$$A_k = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{2M} \left(P_{CEC}(t_m) \cos \frac{2\pi k}{T} t_m \right), \quad k = 0, 1, \dots, M, \quad (6)$$

$$B_k = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^{2M} \left(P_{CEC}(t_m) \sin \frac{2\pi k}{T} t_m \right), \quad k = 0, 1, \dots, M, \quad (7)$$

$$F_{AB}(t) = A_{AB}(\omega(t) - \omega_0) + Q_{AB} \frac{d\omega}{dt} + S_{AB} \int_{t_0}^{t_1} (\omega(\tau) - \omega_0) d\tau, \quad (8)$$

де T_c – постійна часу енергосистеми, $P_{\Sigma 0}$ – сумарна потужність генераторів у початковий момент часу; $P_{zi}(t)$, $P_n(t)$, $P_{AB}(t)$, $P_{CEC}(t)$, $P_m(t)$ – шукані змінні-функції потужностей, що відповідають генераторам, навантаженню, акумуляторній батареї, СЕС та втратам у мережі відповідно; τ_{zi} , τ_n , τ_{AB} – постійні часу генераторів, навантаження та акумуляторної батареї; B_{zi} , C_n – крутизни частотних характеристик генераторів та навантаження; A_{AB} , Q_{AB} , S_{AB} – коефіцієнти підсилення пропорційної, диференціальної та інтегральної складових ПІД-закону регулювання для акумуляторної батареї; t – змінна часу; $P_{CEC}(t_m)$ – таблично задані значення потужності СЕС в точках t_m , M – кількість натуральних замірів потужності СЕС на всьому інтервалі часу, A_k , B_k – коефіцієнти дискретного перетворення Фур'є.

Окрім рівнянь (1) – (8) математична модель включає такі обмеження.

Обмеження на швидкість зміни потужності:

$$L_{ABng} \leq \left| \frac{dP_{AB}(t)}{dt} \right| \leq L_{ABeg}, \quad (9)$$

$$t \in [t_0, T], P_{AB} \in [P_{ABg1}, P_{ABg2}].$$

Обмеження на рівень потужності АБ:

$$P_{AB.min} \leq P_{AB}(t) \leq P_{AB.max}. \quad (10)$$

Зона нечутливості:

$$\frac{dP_{AB}(t)}{dt} = const, \omega(t) - \omega_0 \in [\omega_{s1}, \omega_{s2}], \quad (11)$$

де $[t_0, T]$ – інтервал часу, на якому досліджуються процеси в енергосистемі; g – індекс, що позначає інтервал потужності АБ, в якому діє обмеження швидкості; $P_{ABs.min}, P_{ABs.max}$ – обмеження мінімальної і максимальної потужності акумуляторної батареї; $[\omega_{s1}, \omega_{s2}]$ – зона нечутливості акумуляторної батареї.

Початкові умови:

$$\begin{cases} \omega(t_0) = \omega_n, \\ P_{ei}(t_0) = P_{ei0}, \\ P_n(t_0) = P_{n0}, \\ P_{AB}(t_0) = P_{AB0}, \\ P_{CEC}(t_0) = P_{CEC0}. \end{cases} \quad (12)$$

В наведеній математичній моделі (1) – (12) рівняння (1) відображає загальний баланс потужності в енергосистемі в канонічній формі; рівняння (2) моделює процес зміни в часі потужностей усіх генераторів в залежності від кругової частоти; рівняння (3) – те саме для навантаження; рівняння (4) відображає процес формування регулюючої потужності акумуляторної батареї $P_{AB}(t)$. У ньому регулююча функція $F_{AB}(t)$ використана у вигляді пропорційно-диференційно-інтегрального закону регулювання в залежності від відхилення частоти (рівняння (8)), а коефіцієнт τ_{AB} відображає швидкість зміни потужності $P_{AB}(t)$ при роботі батареї в енергосистемі.

Рівняння (5) описує потужність СЕС. Вона задається дискретним перетворенням Фур'є табличних натурних даних. В даній моделі потужність СЕС представлена аналітичними залежностями (5) – (7). Ці залежності надають можливість визначати значення потужності СЕС з довільним кроком за часом, що є необхідним при моделюванні.

За допомогою математичної моделі (1) – (12) можна описувати не тільки енергосистему з будь-якою деталізацією елементів енергосистеми (аж до енергоблоку) та заданими параметрами, а й довільну кількість сонячних електростанцій з різними графіками видачі потужності, що залежать від сонячної інсоляції та встановленої потужності. Вона також надає можливість

здійснювати пошук найбільш ефективних законів регулювання шляхом відповідного вибору функції $F_{AB}(t)$.

Результати досліджень. За допомогою моделі (1) – (12) було виконано розрахунки процесу стабілізації частоти і потужності в енергосистемі, у якій разом з традиційними електростанціями працюють потужна СЕС та акумуляторна батарея (рис. 1). Графік видачі потужності СЕС заданий характерним для взятої за зразок сонячної станції у місті Міларго, Іспанія, що розташована у спільній широті з південною частиною України [9].

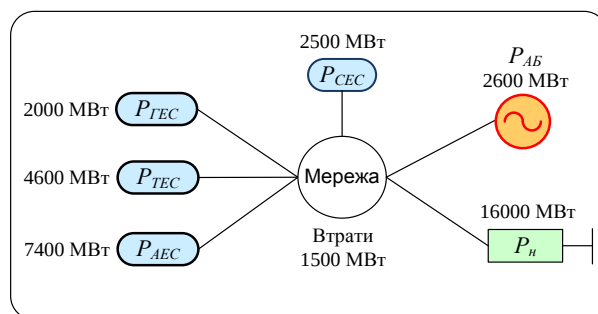


Рис. 1. Агрегована розрахункова схема енергосистеми з сонячною електростанцією та акумуляторною батареєю.

Fig. 1. Aggregate calculation scheme of the power system with solar power plant and battery energy storage system.

При застосуванні моделі (1) – (12) за схемою на рис. 1, були використані параметри, що наведені в табл. 1.

У виконаному дослідженні моделювався режим роботи енергосистеми, за яким в інтервалі часу $t = 0 - 2$ с система є нерегульованою, тобто працює СЕС та інші елементи системи, окрім АБ. Потім, починаючи з $t = 2$ с і в подальшому, в роботу долучається акумуляторна батарея. (рис. 2).

Як видно із рис. 3 та табл. 2 при цьому протягом 9 с після вмикання АБ в енергосистемі частота стабілізується на рівні 50 Гц з відхиленням менш, ніж 0,01 Гц і забезпечується такою на всьому інтервалі до 400 с.

Таблиця 1. Параметри моделі енергосистеми з СЕС та АБ згідно рис. 1

Table 1. Parameters of the energy system model with SPP and BESS according to Fig. 1

Назва елементу ЕС	Крутизна частотної характеристики, МВт/1/с	Пост. часу, с	Поч. умо-ви/змінна	Макс. потужність, МВт	Швидкість скидання/набору потужності, %/с
ГЕС	0,37	5	2000	—	—
ТЕС	0,73	5	4600	—	—
АЕС	1,81	5	7400	—	—
СЕС	—	—	2500	—	—
АБ	—	0,05	0	2600	714
Навантаження	153	0,5	16000	—	—
Втрати	—	—	1500	—	—

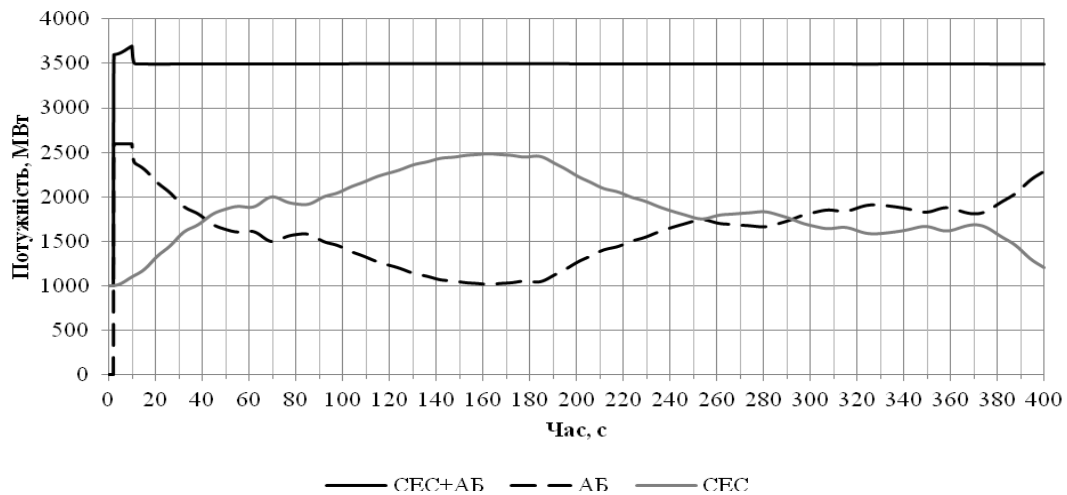


Рис. 2. Потужність АБ, СЕС та їх сумарна потужність.

Fig. 2. Power of BESS, SPP and their total capacity.

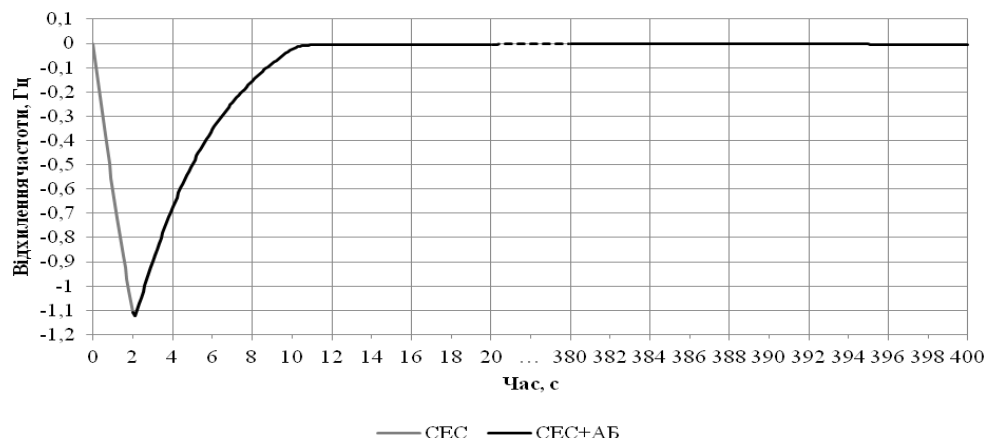


Рис. 3. Відхилення частоти в системі при роботі СЕС із включенням АБ на 2-й секунді.

Fig. 3. Frequency deviation in the system during operation of the SPP with the inclusion of BESS at 2nd second.

Також варто відзначити, що в процесі регулювання частоти і потужності після включення акумуляторної батареї та стабілізації частоти до початкового рівня, також досить точно стабілі-

зується сумарна потужність АБ та СЕС обсягом 3500 МВт, яка дорівнює небалансу потужності в енергосистемі в момент часу $t = t_0 - 0$ с, тобто до вмикання СЕС та АБ (рис.2).

Таблиця 2. Значення відхилення частоти та потужності в енергосистемі з СЕС та АБ в процесі регулювання

Table 2. The value of the frequency and power deviation in the power system with SPP and BESS during regulation process

Час, с	Відхилення частоти, Гц	Потужність, МВт						
		ГЕС	ТЕС	АЕС	Навантаження	АБ	СЕС	СЕС+ АБ
0	0,000	2000,00	4600,00	7400,00	16000,00	0,00	1000,00	1000,00
0,5	-0,316	1999,96	4599,93	7399,82	15887,48	0,00	1000,49	1000,49
1	-0,611	1999,86	4599,73	7399,33	15660,74	0,00	1001,10	1001,10
1,5	-0,876	1999,71	4599,43	7398,59	15408,58	0,00	1001,93	1001,93
2	-1,110	1999,52	4599,05	7397,64	15165,96	0,00	1003,13	1003,13
2,5	-1,023	1999,32	4598,67	7396,70	15040,92	2600,00	1004,80	3604,80
3	-0,897	1999,18	4598,38	7395,97	15070,33	2600,00	1007,08	3607,08
3,5	-0,780	1999,07	4598,17	7395,45	15154,82	2600,00	1010,08	3610,08
4	-0,674	1999,00	4598,02	7395,10	15253,30	2600,00	1013,87	3613,87
4,5	-0,579	1998,96	4597,94	7394,89	15349,87	2600,00	1018,51	3618,51
5	-0,495	1998,94	4597,90	7394,80	15438,99	2600,00	1023,99	3623,99
5,5	-0,421	1998,94	4597,90	7394,80	15519,28	2600,00	1030,28	3630,28
6	-0,355	1998,95	4597,93	7394,87	15590,94	2600,00	1037,30	3637,30
6,5	-0,297	1998,98	4597,99	7395,01	15654,74	2600,00	1044,92	3644,92
7	-0,244	1999,02	4598,06	7395,19	15711,58	2600,00	1053,01	3653,01
7,5	-0,197	1999,06	4598,15	7395,41	15762,34	2600,00	1061,39	3661,39
8	-0,155	1999,11	4598,25	7395,66	15807,79	2600,00	1069,90	3669,90
8,5	-0,117	1999,17	4598,36	7395,93	15848,62	2600,00	1078,38	3678,38
9	-0,083	1999,22	4598,47	7396,21	15885,41	2600,00	1086,69	3686,69
9,5	-0,052	1999,28	4598,59	7396,49	15918,66	2600,00	1094,75	3694,75
10	-0,024	1999,34	4598,70	7396,79	15948,78	2570,00	1102,49	3672,50
10,5	-0,010	1999,40	4598,82	7397,08	15972,39	2428,27	1109,92	3538,19
11	-0,006	1999,46	4598,93	7397,35	15985,27	2389,74	1117,08	3506,82
.	.	.	.	.	.	.	.	.
400	-0,004	1999,99	4599,98	7399,96	15996,20	2289,82	1206,07	3495,89

Висновки. Проведені дослідження дають змогу зробити такі основні висновки:

1. Розроблена та апробована математична модель процесів регулювання частоти і потужності в об'єднаних енергосистемах з сонячними електростанціями та акумуляторними батареями дозволяє аналізувати різні режими роботи енергосистеми в залежності від заданих умов та параметрів елементів системи.

2. Введення таких нестабільних джерел генерації, як потужні СЕС в структуру енергосистеми, без прийняття додаткових заходів може погіршити стабільність роботи системи, збільшити ймовірність виникнення небезпечних відхилень частоти, які, в свою чергу, можуть призводити до виникнення аварійних ситуацій.

3. Введення в структуру об'єднаних енергосистем потужних накопичувачів у вигляді АБ

може повністю вирішити проблему стабілізації частоти і потужності, пов'язану з використанням в системах потужних СЕС.

4. Наявність у структурі енергосистем АБ, накопичувачів, потужність яких є співставною із потужністю СЕС, надає змогу отримати точність регулювання частоти і потужності на рівні або навіть вищою за нормативну для енергосистем як України, так і Євросоюзу.

1. Renewables 2018: Global Status Report. REN21. URL: http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2018/06/17-8652_GSR2018_FullReport_web_final_.pdf (дата звернення: 30.08.2018).

2. Renewables briefly cover 100% of Germany's power demand for 2nd time. Clean Energy Wire. URL: <https://www.cleanenergywire.org/news/renewables-briefly-cover-100-germanys-power-demand-2nd-time> (дата звернення: 30.08.2018).

3. Renewables 2017: Global Status Report. REN21. URL: http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2017/06/170607_GSR_2017_Full_Report.pdf (дата звернення: 30.08.2018).

4. Інформація щодо потужності та обсягів виробництва електроенергії об'єктами відновлюваної електроенергетики, яким встановлено «зелений» тариф (станом на 31.03.2018). Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження України. URL: <http://saee.gov.ua/sites/default/files/Information%20RES%20in%20Ukraine%20%20Q1%202018.pdf> (дата звернення: 30.08.2018).

5. Визначення граничних обсягів, умов і режимів використання вітрових та сонячних електростанцій у складі об'єднаної енергосистеми України. Звіт про науково-дослідну роботу. ДР № 0113U004085. К.: Інститут загальної енергетики НАН України, 2015. С. 26—30.

6. Кулик М.М., Дрьомін І.В. Універсальна модель регулювання частоти і потужності в об'єднаних енергосистемах. Проблеми загальної енергетики. 2013. № 4(35). С. 5-15.

7. Кулик М.М., Дрьомін І.В. Узагальнена математична модель та характеристики адаптивних систем автоматичного регулювання частоти і потужності. Проблеми загальної енергетики. 2015. № 4(43). С. 14—23. <https://doi.org/10.15407/pge2015.04.014>.

8. Electricity and Energy Storage (Updated May 2018). World Nuclear Association. URL: <http://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/electricity-and-energy-storage.aspx> (дата звернення: 01.06.2018).

9. Javier Marcos, Luis Marroyo, Eduardo Lorenzo, David Alvira, Eloisa Izco. Power output fluctuations in large scale PV plants: one year observations with one second resolution and a derived analytic model. Progress in Photovoltaics: Research and Applications. 2011. Volume 19, Issue 24.

ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ ДЛЯ СТАБИЛИЗАЦИИ ЧАСТОТЫ В ОБЪЕДИНЕННЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМАХ С МОЩНЫМИ СОЛНЕЧНЫМИ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯМИ

М.Н. Кулик¹, академик НАН Украины, д-р. техн. наук, профессор, И.В. Дрьомин², канд. техн. наук, ст. науч. сотр., А.В. Згуровец¹

¹Институт общей энергетики НАН Украины, 03150, Украина, г. Киев, ул. Антоновича, 172

²Advanced Analytics and Data Science S.R.O., 19900, Czech Republic, Praha, Štanderoва 869/2

Создана и исследована математическая модель процессов регулирования частоты и мощности в объединенных энергосистемах с солнечными электростанциями (СЭС) и аккумуляторными батареями (АБ). Разработанная модель позволяет изучать особенности процессов регулирования частоты и мощности при совместной работе АБ и СЭС при различных условиях и характеристиках элементов системы, а также определять наиболее эффективные законы регулирования. Показано, что при использовании большой СЭС совместно с АБ сопоставимой мощности, можно достичь точности регулирования частоты на уровне, соответствующем нормативным требованиям энергосистем Украины и Евросоюза. Библ. 9, табл. 2, рис. 3.

Ключевые слова: математическая модель, объединенная энергосистема, солнечная электростанция, аккумуляторная батарея, регулирование частоты и мощности.

REFERENCES

1. Renewables 2018: Global Status Report. REN21. URL: http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2018/06/17-8652_GSR2018_FullReport_web_final_.pdf (Last accessed: 30.08.2018).

2. Renewables briefly cover 100% of Germany's power demand for 2nd time. Clean Energy Wire. URL: <https://www.cleanenergywire.org/news/renewables-briefly-cover-100-germanys-power-demand-2nd-time> (Last accessed: 30.08.2018).

3. Renewables 2017: Global Status Report. REN21. URL: http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2017/06/170607_GSR_2017_Full_Report.pdf (Last accessed: 30.08.2018).

4. Informatsiia shchodo potuzhnosti ta obsiahiv vyrobnytstva elektroenerhii ob'iektamy vidnovliuvanoi elektroenerhetyky, yakym vstanovleno «zelenyi» taryf (stanom na 31.03.2018). Derzhavne ahentstvo z enerhoefektyvnosti ta enerhozberezhennia Ukrainy. URL: <http://saee.gov.ua/sites/default/files/Information%20RES%20in%20Ukraine%20%20Q1%202018.pdf> (Last accessed: 30.08.2018) (Ukr.).

5. Vyznachennia hranychnykh obsiahiv, umov i rezhymiv vykorystannia vitrovykh ta soniachnykh elektrostantsii u skladi obiednanoi enerhosystemy Ukrainy. (2015). Zvit pro naukovu-

doslidnu robotu. DR № 0113U004085. K.: Instytut zahalnoi enerhetyky NAN Ukrainy., S. 26—30 (Ukr.).

6. Kulyk, M.M., & Dryomin, I.V. (2013). General-purpose model of frequency and capacity regulation in united power systems. *Problemy Zahal'noi Enerhetyky - The Problems of General Energy*, 4 (35). 5—15 (Ukr.).

7. Kulyk, M.M., & Dryomin, I.V. (2015). Generalized mathematical model and features of adaptive automatic frequency and power control systems. *Problemy Zahal'noi Enerhetyky - The Problems of General Energy*, 4 (43). 14—23 (Ukr.). <https://doi.org/10.15407/pge2015.04.014>

8. Electricity and Energy Storage (Updated May 2018). World Nuclear Association. URL: <http://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/electricity-and-energy-storage.aspx> (Last accessed: 01.06.2018).

9. Javier Marcos, Luis Marroyo, Eduardo Lorenzo, David Alvira, Eloisa Izco. Power output fluctuations in large scale PV plants: one year observations with one second resolution and a derived analytic model. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*. 2011. Volume 19, Issue 24.

SYNOPSIS

Current trends in the development of electric-power industry point to an increase in the part of renewable energy in the total energy balance. The annual increase in total installed capacity of SPPs is more than 32%. The introduction of large volumes of such power into the power system may cause a deterioration of the quality of electricity, stability of the power system, and rise of emergency situations. This problem can be solved with the help of new energy storage systems based on batteries, which, due to their high power and operating speed, make it possible to consider them as a means of frequency stabilization for compensating changes in SPP power. In this paper, we consider the process of frequency and power regulation in integrated power systems where powerful SPP and BESS work simultaneously. For these investigations we developed mathematical model that consists of the general power balance equation, equations describing the operation of all generators, electrical load and losses, as well as constraints and initial conditions. The resulting model enables one to study the features of frequency and power regulation processes when BESS and SPP work together under various conditions and characteristics of system elements as well as to determine the most efficient control laws. The calculations were carried out for an aggregated power system, including nuclear, thermal, hydroelectric power plants, load, losses, solar power plant and battery energy storage system. In the study performed, we modeled the mode of operation of the power system where it was unregulated for 2 s, in other words, SPP and other elements of the system worked, except for BESS. During such work, a significant frequency deviation (more than 1,1 Hz) was

observed. Starting from 2 s and further, the battery was switched on. In the course of operation, the battery for 9 seconds stabilized frequency at level of 50 Hz with a deviation less than 0,01 Hz and ensured it at this level throughout the entire interval to 400 s. The results obtained show that the use of large SPP combined with BESS of comparable power makes it possible to achieve frequency control accuracy at a level that meets the regulatory requirements of the power systems of Ukraine and European Union.

РЕФЕРАТ

Сучасні тенденції розвитку енергетики вказують на зростання частки відновлюваної енергетики в загальному енергобалансі. Щорічний світовий приріст сонячних електростанцій становить понад 32%. Введення великих обсягів такої потужності в енергосистему може стати причиною погіршення якості електроенергії, стабільності роботи енергосистеми і виникнення аварійних ситуацій. Вирішити це питання можна за допомогою нових систем зберігання електроенергії на базі АБ, які, завдяки своїй великій потужності та швидкодії, дозволяють розглядати їх як засіб стабілізації частоти для компенсації змін потужності СЕС. У даній роботі розглянуто процес регулювання частоти і потужності в об'єднаних енергосистемах, в яких одночасно функціонують СЕС та АБ великої потужності. Для проведення досліджень була розроблена математична модель, що складається з рівняння загального балансу потужності, рівнянь, що описують роботу всіх генераторів, електричного навантаження і втрат, а також обмежень і початкових умов. Отримана модель дозволяє вивчати особливості процесів регулювання частоти і потужності при спільній роботі АБ і СЕС за різних умов та характеристик елементів системи, а також визначати найбільш ефективні закони регулювання. Розрахунки проводились на агрегованій енергосистемі, що включала в себе атомну та теплову електростанції, гідроелектростанцію, навантаження, втрати, сонячну електростанцію та акумуляторну батарею. У виконаному дослідженні моделювався режим роботи енергосистеми, за яким протягом 2 с система була нерегульованою, тобто в системі працювала СЕС та інші елементи системи, окрім АБ. Під час такої роботи спостерігалось значне відхилення частоти, понад 1,1 Гц. Починаючи з 2 с і в подальшому, в роботу долучалась акумуляторна батарея. В процесі роботи АБ за 9 с стабілізувала частоту на рівні 50 Гц з відхиленням менш, ніж 0,01 Гц, і забезпечувала її такою на всьому інтервалі до 400 с. Результати досліджень дають змогу стверджувати, що при використанні великої СЕС спільно з АБ порівнянної потужності досягається точність регулювання частоти на рівні, відповідному нормативним вимогам енергосистем України і Євросоюзу.

Стаття надійшла до редакції 29.08.18

Остаточна версія 07.09.18