

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ЗМІНИ ОБСЯГІВ ГЕНЕРАЦІЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ НА СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯХ

В статті розглядаються методи зміни графіків генерації електричної енергії на сонячних електростанціях під час роботи під центральним регулятором енергосистеми. Проведено аналізування існуючих методів регулювання, запропоновано новий метод керування генерацією сонячних електростанцій під центральним регулятором енергосистеми.

Проблематика: зростання частки генерації сонячної електроенергії в енергосистемах країн світу призводить до необхідності контролювати та управляти процесом виробництва електричної енергії для підвищення стабільності та стійкості енергосистеми. Значна ціна на компенсацію небалансів в енергосистемі закладається в тарифи, що впливає на кінцевих споживачів електричної енергії.

Мета дослідження: підвищення адекватності результатів розподілу дефіцитних резервів підтримки частоти, резервів відновлення частоти для компенсації небалансів, що виникають під час зміни генерації на сонячних електростанціях. Зменшення вартості компенсації небалансів, що виникають при зміні генерації на сонячних електростанціях. Для вирішення мети необхідно проаналізувати існуючі методи компенсації небалансів енергосистеми, що виникають в наслідок зміни генерації на сонячних електростанціях та запропонувати нове технічне та математичне рішення для розподілу дефіцитних резервів підтримки та відновлення частоти.

Методика реалізації: використано соціально-інженерний підхід прогнозування та моделювання для аналізу процесів, що впливають на метод управління графіком генерації сонячної електростанції.

Результати дослідження: Запропоновано нове математичне та технічне рішення для компенсації небалансу в енергосистемі у разі швидкої зміни графіку генерації електричної енергії на сонячних електростанціях. Вперше вирішена поставлена задача з використанням нового технічного та математичного рішення. Таке технічне та математичне рішення може знайти широке застосування в процесі управління графіком генерації електричної енергії на сонячних електростанціях у багатьох системних операторів різних країн світу, де існує проблема дефіцитних резервів підтримки та відновлення частоти, а кількість сонячної генерації електричної енергії має значну частку в загальній кількості генерації електричної енергії.

Висновки. Проаналізовано існуючі методи компенсації небалансів енергосистеми, що виникають в наслідок зміни генерації на сонячних електростанціях та запропоновано нове технічне та математичне рішення для розподілу дефіцитних резервів підтримки та відновлення частоти. Запропоноване технічне та математичне рішення дозволяє спрогнозувати подію, під час якої відбудеться зміна рівня генерації електричної енергії на сонячних електростанціях, передати інформацію до центрального регулятора енергосистеми, який у свою чергу, дасть команду на зміну графіку генерації електричної енергії завчасно в межах зони нечутливості, що призведе до активації резервів відновлення частоти та дозволить компенсувати наявний небаланс за рахунок більш дешевих резервів та не активувати резерви підтримки частоти. Таке математичне та технічне рішення дозволить значно підвищити стійкість енергосистеми до виникаючих небалансів та здешевить їх компенсацію, що в цілому позитивно впливає на енергетичну безпеку держави.

Ключові слова: інтелектуальні системи, управління сонячними електростанціями, компенсація небалансу енергосистеми, допоміжні послуги, кодекс системи передачі.

Вступ

На теперішній час процес декарбонізації набуває світових масштабів, а отже чиста енергія та заходи з енергозбереження виходять на перший план. Щороку в країнах, що підтримують процес декарбонізації, зростає частка генерації електричної енергії за рахунок відновлювальних джерел енергії. Така тенденція спостерігається за рахунок відмови від теплової генерації на вугіллі та збільшення електростанцій, що генерують електричну енергію на відновлювальних джерелах енергії, у тому числі і сонячних електростанцій.

Окрім позитивних екологічних впливів на довкілля, що дає нам чиста енергетика, частина системних операторів енергосистем різних країн вже стикнулася з ризиками, що несуть в собі відмова від теплової генерації та збільшення кількості чистої енергії.

Для розуміння ризиків варто відзначити, що тепла генерація є однією з наймобільніших після гідроелектростанцій, а отже з відмовою від теплової генерації кількість наявних резервів підтримки частоти (РПЧ) та резервів відновлення частоти зменшується. Резервом підтримки частоти називають резервами активної потужності, наявні для регулювання частоти після виникнення небалансу [1]. Резервом відновлення частоти називають резерви активної потужності, наявні для відновлення частоти системи до номінальної частоти та, для синхронної області, що складається більше ніж з однієї області регулювання, для відновлення балансу потужності до планових обсягів. Регулюванням частоти називають здатність генеруючої одиниці, УЗЕ або системи ПСВН до регулювання своєї вихідної активної потужності у відповідь на вимірне відхилення частоти в енергосистемі від уставки з метою підтримання стабільної частоти в енергосистемі [1].

Окрім зменшення кількості резервів через зменшення кількості одиниць маневреної генерації, існує також проблема з самою генерацією, що базується на відновлювальних джерелах енергії. Сонячна генерація є однією з нестабільних та найменш прогнозованих, через можливі завади, що виникають в процесі генерації сонячної електричної енергії. Серед головних завад для сонячних електростанцій варто відзначити хмари, що затують сонячні промені і не дозволяють утримувати необхідний рівень генерації електричної енергії. З ростом кількості сонячних електростанцій коливання в системі та невідповідність плановому графіку генерації електричної енергії буде негативно впливати на стійкість енергосистеми та буде призводити до ситуацій, коли і без того дефіцитні резерви підтримки та відновлення частоти необхідно активувати для компенсації небалансів, що виникають від нестабільної роботи сонячних електростанцій.

Мета та завдання: підвищення адекватності результатів розподілу дефіцитних резервів підтримки частоти, резервів відновлення частоти для компенсації небалансів, що виникають при зміні генерації на сонячних електростанціях. Зменшення вартості компенсації небалансів, що виникають при зміні генерації на сонячних електростанціях. Для вирішення мети необхідно проаналізувати існуючі методи компенсації небалансів енергосистеми, що виникають в наслідок зміни генерації на сонячних електростанціях та запропонувати нове технічне та математичне рішення для розподілу дефіцитних резервів підтримки та відновлення частоти.

Огляд сучасної літератури та існуючих методів:

Більшість енергосистем країн світу спираються на нормативні документи розроблені спеціально під їх особливості та з врахуванням законів, що діють в країні. Важливим параметром в такій ситуації є наявність ринку електричної енергії та допоміжних послуг. В Україні системний оператор в своїй роботі спирається на кілька ключових документів, а саме: кодекс системи передачі [1], кодекс системи розподілу [2], а також постанова Про затвердження Правил ринку [3]. Після приєднання України до енергооб'єднання ENTSO-E відбувається процес узгодження та приведення у відповідність даних документів до нормативно-правових документів ENTSO-E, а саме: The Synchronous Area Framework (SAFA) та System Operation Guideline (SO GL). ENTSO-E є європейською асоціацією для співробітництва операторів систем передачі електроенергії. Згідно з документами асоціації, ставиться амбіційна задача досягнення повної декарбонізації в енергетиці [4].

Матеріал та результати досліджень:

Змістовне формулювання задачі

Нехай досліджувана енергосистема містить скінчену множину підсистем, що мають спільний однорідний ресурс: електрична енергія, яку генерують електростанції різних типів. В умовах дефіциту резерву підтримки частоти виникає необхідність збалансувати енергосистему, для забезпечення стійкої роботи енергооб'єднання. Тому виникає необхідність розробки нових методів прийняття рішень, які б значно підсилювали можливості у роз'язанні подібних задач.

Аналіз методів компенсації небалансу системними операторами

Проаналізуємо методи компенсації небалансів в країнах Європейського союзу, кошти, що витрачають енергосистеми на компенсацію небалансів, враховуючи особливості ринку електричної енергії країн Євросоюзу.

В наш час усі SCADA- системи налаштовані таким чином, щоб в режимі реального часу керувати та компенсувати виникаючі небаланси в енергосистемі в автоматичному режимі. Якщо відхилення частоти стає більшим за зону нечутливості системи, то система в автоматичному режимі починає активувати резерв підтримки частоти для стабілізації системи і автоматичний резерв відновлення частоти (аРВЧ) для компенсації небалансу.

Проаналізуємо вартість одного МВт резерву підтримки частоти та однієї МВт*год генерації електричної енергії на ринку електричної енергії в Європі. Для цього проаналізуємо дані за 2022 рік по різним країнам Євросоюзу та побудуємо відповідні графіки [5,6].

Для аналізу було обрано наступні країни Євросоюзу: Австрія, Бельгія, Данія, Франція, Німеччина та Нідерланди. Зважаючи на значний розмір вхідних даних для аналізу наведемо незначний фрагмент

таблиці за перші 10 днів 2022 року для Австрії (табл. 1). У результируючих графіках буде використано дані з таблиці за увесь 2022 рік.

Таблиця 1 – Ціна МВт РПЧ та МВт*год генерації за 10 днів 2022 року в Австрії

Країна	Вид	Австрія						
		РПЧ (00-04)	РПЧ (04-08)	РПЧ (08-12)	РПЧ (12-16)	РПЧ (16-20)	РПЧ (20-24)	Серед за день
01.01.2022	Генерація (€/MWh)	84,08						
	РПЧ (€/MW)	188	168	99	96,43	48,4	115,17	119,17
02.01.2022	Генерація (€/MWh)	55,83						
	РПЧ (€/MW)	185	165	118,83	136	99	127,29	138,52
03.01.2022	Генерація (€/MWh)	84,13						
	РПЧ (€/MW)	122,2	137,4	110,67	110	82	93,34	109,27
04.01.2022	Генерація (€/MWh)	154,55						
	РПЧ (€/MW)	89,5	99	52,4	56,67	55,6	55	68,03
05.01.2022	Генерація (€/MWh)	132,3						
	РПЧ (€/MW)	101,6	120,89	53,17	91,41	82	55,2	84,05
06.01.2022	Генерація (€/MWh)	201,62						
	РПЧ (€/MW)	63,52	99,32	40	38	38,4	55,32	55,76
07.01.2022	Генерація (€/MWh)	180,94						
	РПЧ (€/MW)	72,56	86,71	40	40,86	40,6	55,2	55,99
08.01.2022	Генерація (€/MWh)	177,54						
	РПЧ (€/MW)	53,33	89,67	100	48	51,67	93,75	72,74
09.01.2022	Генерація (€/MWh)	172,64						
	РПЧ (€/MW)	100	167,24	166,16	111,94	47	69	110,22
10.01.2022	Генерація (€/MWh)	261,47						
	РПЧ (€/MW)	94,14	125,04	27,2	26	31,68	76,6	63,44

Особливістю ринку електричної енергії в цих європейських країнах є розподіл продажу резервів підтримки частоти проміжками по 4 години. Такий метод дозволяє отримувати справедливую ціну на надання допоміжних послуг з урахуванням різного роду впливів зовнішніх факторів та часу надання даної послуги. Для аналізу та подальших розрахунків знайдемо середню ціну за день на 1 МВт резерву підтримки частоти. Для цього просумуємо між собою вартість одного МВт РПЧ та розділимо на кількість часових діапазонів. Отриманий результат записуємо в спеціально створений для цього стовпчик.

Проаналізуємо вартість генерації 1 МВт*год електричної енергії у відповідних країнах Європи [6]. Для цього зведемо дані в єдину таблицю та наведемо фрагмент цієї таблиці за перший місяць 2022 року (табл. 2).

Побудуємо графік цін на генерацію електричної енергії для обраних країн Європи з використанням вхідних даних з таблиці 2 за весь 2022 рік.

Враховуючи, що ціна на автоматичні резерви відновлення частоти (аРВЧ) значно нижчі, ніж на резерв підтримки частоти та змінюються щодня в залежності від ситуації на ринку електричної енергії [3], можемо зробити висновок, що ідеальним варіантом для зменшення витрат на компенсацію небалансів в мережі буде ситуація, коли значення небалансу буде меншим за значення, при якому відхилення частоти буде більшим за зону нечутливості енергосистеми. У такому випадку система автоматично буде

компенсувати наявний небаланс за рахунок автоматичного резерву відновлення частоти без активації резерву підтримки частоти, що є дуже дорогим у порівнянні з аРВЧ.

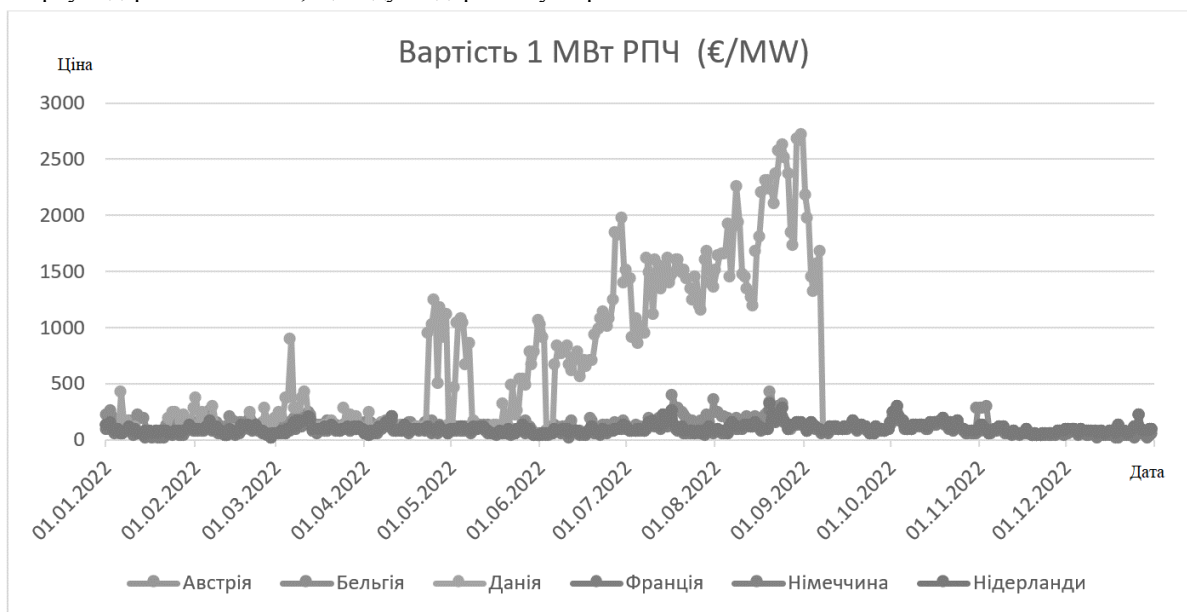


Рисунок 1 – Графік вартості 1 МВт РПЧ в обраних країнах Європи.

Таблиця 2 – Ціна на аукціоні на день наперед для обраних країн Європи.

Ціна на аукціоні на день наперед (EUR/MWh)						
	Австрія	Бельгія	Данія	Франція	Німеччина	Нідерланди
01.01.2022	84,08	85,68	82,41	87,08	82,58	93,51
02.01.2022	55,83	50,62	55,69	49,12	47,35	58,81
03.01.2022	84,13	79,4	78,2	92,12	76,11	98,38
04.01.2022	154,55	156,28	140,98	156,3	153,92	162,67
05.01.2022	132,3	155,75	108,69	185,56	107,87	185,32
06.01.2022	201,62	216,73	188,03	225,77	194,1	222,1
07.01.2022	180,94	185,14	157,72	215,92	167,18	204,28
08.01.2022	177,54	175,36	145,77	176,56	165,9	184,68
09.01.2022	172,64	147,51	131,53	150,28	146,56	153,74
10.01.2022	261,47	261,17	244,5	261,25	261,55	259,11
11.01.2022	254,75	251,96	155,98	253,96	255,41	240,89
12.01.2022	234,34	236,66	129,61	237,2	233,32	229,04
13.01.2022	196,67	216,6	18,54	223,7	180,16	189,65
14.01.2022	199,62	215,89	87,98	233,58	178,76	186
15.01.2022	216,98	217,6	170,22	220,5	216	210
16.01.2022	188,06	202,32	95,26	212,55	133,1	199,89
17.01.2022	184,39	204,71	83,26	261,13	129,31	204,29
18.01.2022	237,56	240,35	162,5	244,83	235,87	223,31
19.01.2022	203,93	195,54	52,47	236,03	172,18	180,53
20.01.2022	179,9	178,31	69,85	228,02	117,7	160,52

Продовження табл. 2

Ціна на аукціоні на день наперед (EUR/MWh)						
	Австрія	Бельгія	Данія	Франція	Німеччина	Нідерланди
21.01.2022	177,04	191,79	132,77	216,69	159,27	168,28
22.01.2022	190,76	192,5	157,5	202,74	175,76	176,82
23.01.2022	194,41	195,22	140,21	196,97	193,7	192,48
24.01.2022	246,19	244,06	130,66	247	245,94	242,93
25.01.2022	296,85	291,16	175,28	295,11	297,29	276,95
26.01.2022	246,75	225,84	104,9	275,45	234,98	222,96
27.01.2022	193,02	200,25	33,39	262,15	120,71	200,08
28.01.2022	205,07	217,75	115,81	250,65	174,35	212,15
29.01.2022	161,19	112,46	70,67	218,9	92,13	159,77
30.01.2022	141,42	186,48	52,68	223,55	55,3	168,39
31.01.2022	205,35	202,44	184,79	213,48	195,2	194,6



Рисунок 2 – Графік вартості МВт*год генерації на аукціоні на день наперед

Для виконання цієї умови також необхідно розуміти точку у часі, коли відбудеться подія на розвантаження сонячної електростанції. Для отримання цієї інформації в режимі реального часу пропонується створити нейронну мережу, яка буде заснована та навчена за рахунок масиву фотографій з хмарами різних видів та розмірів. Головною задачею нейронної мережі буде аналіз швидкості та напрямку руху хмар відносно сонця та сонячної електростанції та прогнозування у часі моментів, коли хмари будуть перекривати прямі сонячні промені. Отримана інформація буде оброблена та відправлена по каналам внутрішнього зв'язку до диспетчерського пункту центрального регулятора.

Отримавши всі необхідні дані диспетчера мають можливість збільшити діапазон регулювання удвічі відносно зони нечутливості за рахунок ручної команди на розвантаження/завантаження (команда залежить від майбутньої прогнозованої події і протилежна за знаком до події).

Припустимо сонячна електростанція з встановленою потужністю 100 МВт спрогнозувала через погодні умови розвантаження до 20 МВт через 15 хвилин. При цьому в умовній енергосистемі зона нечутливості складає 50 МВт. В такій ситуації, при звичайних умовах, спостерігався б дефіцит потужності

на 80 МВт. Це означає, що були б активовані резерви підтримки частоти на стрибкоподібне відхилення частоти, після чого почалась активація резерву відновлення частоти для компенсації наявного небалансу.

Для здешевлення процесу компенсації небалансу пропонується головному диспетчерському пункту завчасно віддати команду на завантаження 40 МВт. Таким чином в мережі виникне небаланс в межах, менших за зону нечутливості енергосистеми. Для компенсації даного небалансу буде активовано резерв відновлення частоти. В момент відповідної події виникає дефіцит в енергосистемі розміром в 40 МВт. Відповідно значення нового дефіциту також менше за зону нечутливості, тому резерв підтримки частоти активовано не буде. Резерв відновлення частоти почне відпрацьовувати новий небаланс системи.

Нехай на трьох хвилинному інтервалі часу задано значення потужності та частоти. Застосуємо до отриманих даних вказаний метод та за результатами прогнозування побудуємо графік.

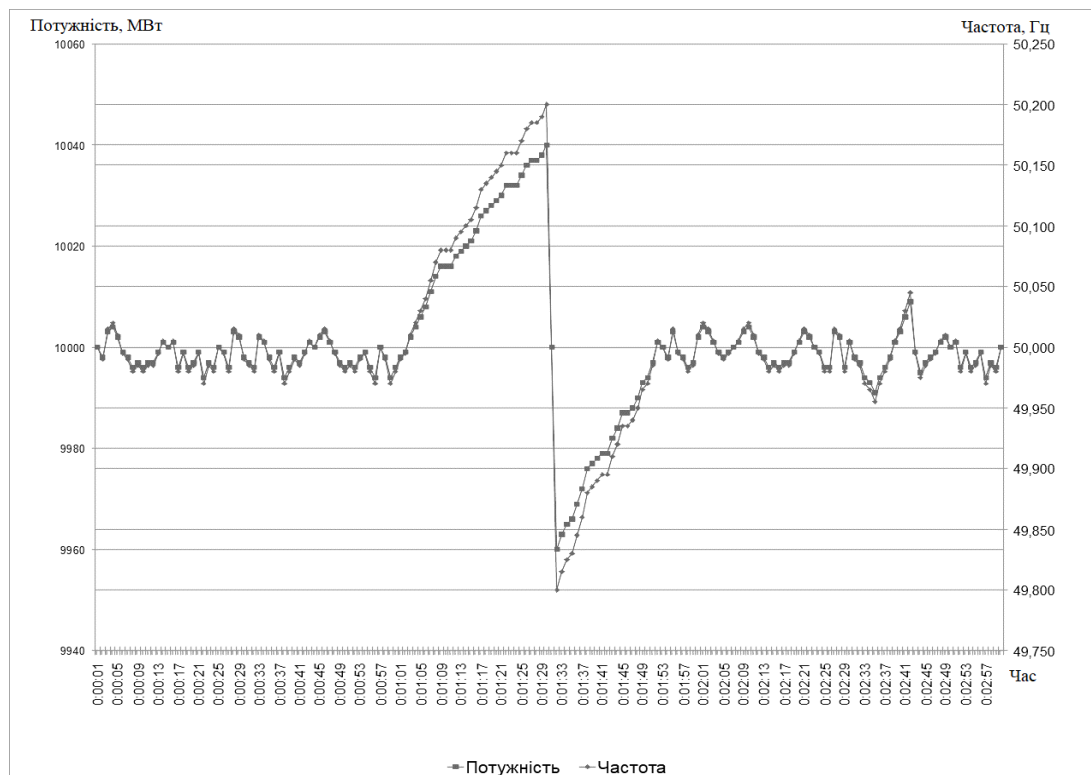


Рисунок 3 – Графік залежності частоти від потужності при активації аРВЧ

Отже, проаналізовано існуючі методи компенсації небалансів енергосистеми, що виникають в наслідок зміни генерації на сонячних електростанціях та запропоновано нове технічне та математичне рішення для розподілу дефіцитних резервів підтримки та відновлення частоти. Запропоноване технічне та математичне рішення дозволяє спрогнозувати подію, під час якої відбудеться зміна рівня генерації електричної енергії на сонячних електростанціях, передати інформацію до центрального регулятора енергосистеми, який у свою чергу, дасть команду на зміну графіку генерації електричної енергії завчасно в межах зони нечутливості, що призведе до активації резервів відновлення частоти та дозволить компенсувати наявний небаланс за рахунок більш дешевих резервів та не активувати резерви підтримки частоти. Таке математичне та технічне рішення дозволить значно підвищити стійкість енергосистеми до виникаючих небалансів та здешевить їх компенсацію, що в цілому позитивно впливає на енергетичну безпеку держави.

Список використаної літератури

- [1] [Електронний ресурс] Кодекс системи передачі. Версія №1848 від 27.12.2022-<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0309874-18#Text>
- [2] [Електронний ресурс] Кодекс системи розподілу. Версія №1575 від 29.11.2022-<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0310874-18#Text>
- [3] [Електронний ресурс] Про затвердження Правил ринку. Версія №1592 від 29.11.2022-<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0307874-18>
- [4] [Електронний ресурс] Офіційний сайт ENTSO-E - <https://vision.entsoe.eu/>
- [5] [Електронний ресурс] Енергетичний ринок Північної Європи -<https://www.nordpoolgroup.com/en/Market-data1/#/nordic/table>
- [6] [Електронний ресурс] Ринок допоміжних послуг північної Європи за видами резервів-https://www.regelleistung.net/apps/datacenter/tenders/?productTypes=PRL,SRL,MRL&markets=BALANCING_CAPACITY,BALANCING_ENERGY

A. Khomiak¹, Ph. D. student, ORCID 0000-0003-0315-0883

V. Rozen¹, Dr. Sc. (Eng.), Prof., ORCID: 0000-0002-0440-4251

¹National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

ANALYSIS OF METHODS OF CHANGING VOLUMES OF ELECTRICITY GENERATION AT SOLAR POWER PLANTS

The article examines the methods of changing electricity generation schedules at solar power plants when operating under the central regulator of the power system. An analysis of the existing regulation methods was carried out, and a new method of controlling the generation of solar power plants under the central regulator of the power system was proposed.

Background. *The increase in the share of solar electricity generation in the energy systems of the countries of the world leads to the need to control and manage the process of electricity production to increase the stability and sustainability of the energy system. A significant price for compensation of imbalances in the energy system is included in the tariffs, which affects the end consumers of electricity.*

Objective: *increasing the adequacy of the results of the distribution of deficit frequency containment reserves, frequency restoration reserves to compensate for imbalances that arise when generation is changed at solar power plants. Reducing the cost of compensation for imbalances that occur when changing generation at solar power plants. To solve the goal, it is necessary to analyze the existing methods of compensating power system imbalances that arise as a result of changes in generation at solar power plants and to propose a new technical and mathematical solution for the distribution of deficit reserves of support and frequency restoration.*

Methods: *the social engineering approach of forecasting and modeling was used to analyze the processes affecting the method of controlling the generation schedule of the solar power plant.*

Results. *A new mathematical and technical solution for compensating the imbalance in the power system in the event of a rapid change in the electricity generation schedule at solar power plants is proposed. For the first time, the given task was solved using a new technical and mathematical solution. Such a technical and mathematical solution can be widely used in the management of the electricity generation schedule at solar power plants in many system operators in different countries of the world, where there is a problem of insufficient for frequency containment and restoration reserves, and the amount of solar electricity generation has a significant share in the total amount of electricity generation energy.*

Conclusions. *Existing methods of compensating power system imbalances arising as a result of changes in generation at solar power plants are analyzed and a new technical and mathematical solution for the distribution of deficit reserves of frequency containment reserves and frequency restoration reserves is proposed. The proposed technical and mathematical solution makes it possible to predict an event during which there will be a change in the level of electric energy generation at solar power plants, to transmit information to the central regulator of the energy system, which in turn will give a command to change the schedule of electric energy generation in advance within the insensitivity zone, which will lead to the activation of the frequency restoration reserves and will allow to compensate the existing imbalance at the expense of cheaper reserves and not to activate the frequency containment reserves. Such a mathematical and technical solution will make it possible to significantly increase the stability of the energy system against emerging imbalances and make their compensation cheaper, which in general has a positive effect on the energy security of the state.*

Keywords: *Intelligent systems, solar power plant management, power system imbalance compensation, auxiliary services, transmission system code*

References

- [1] [Electronic resource] Transmission system code. Version No. 1848 dated 12/27/2022 - <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0309874-18#Text>
- [2] [Electronic resource] Distribution system code. Version No.1575 dated November 29, 2022 - <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0310874-18#Text>
- [3] [Electronic resource] On the approval of the Market Rules. Version No. 1592 dated 29.11.2022 - <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0307874-18>
- [4] [Electronic resource] ENTSO-E official website <https://vision.entsoe.eu/>
- [5][Electronic resource] Energy market of Northern Europe <https://www.nordpoolgroup.com/en/Market-data1/#/nordic/table>
- [6] [Electronic resource] Northern European auxiliary services market by types of reserves - https://www.regelleistung.net/apps/datacenter/tenders/?productTypes=PRL,SRL,MRL&markets=BALANCING_CAPACITY,BALANCING_ENERGY

Надійшла: 29.01.2023

Received: 29.01.2023