

КАЦАДЗЕ ТЕЙМУРАЗ ЛУАРСАБОВИЧ – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри електричних мереж та систем, Національний технічний університет України «Київський політехнічний університет імені Ігоря Сікорського»; м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8365-0046>; e-mail: teymuraz@ukr.net.

ЩЕРБИНА ДМИТРО ВОЛОДИМИРОВИЧ ✉ – аспірант кафедри електричних мереж та систем, Національний технічний університет України «Київський політехнічний університет імені Ігоря Сікорського»; м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-2956-4385>; e-mail: djdimas75@gmail.com.

БАЛАНСУВАННЯ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ГРАВІТАЦІЙНИХ СИСТЕМ НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ

У роботі розглянуто актуальну проблему підвищення стабільності режимів електричних мереж в умовах зростання частки відновлюваних джерел енергії. Нестабільність генерації сонячних та вітрових електростанцій призводить до дисбалансів потужності, коливань напруги та частоти, що потребує впровадження високоєфективних систем накопичення енергії. Особливу увагу приділено гравітаційним системам накопичення енергії, які ґрунтуються на перетворенні електричної енергії у потенційну за рахунок підняття масивних вантажів та подальшому її відновленні під час опускання. Такі системи характеризуються високою надійністю, тривалим терміном служби, низькими експлуатаційними витратами та екологічною безпечністю, що робить їх перспективними для балансування режимів роботи електричних мереж з великою часткою відновлюваних джерел енергії. Проаналізовано технічні, економічні та алгоритмічні проблеми інтеграції гравітаційних систем накопичення енергії у структуру розподільних мереж. Показано, що основним обмежувальним фактором є значна механічна інерція, яка знижує швидкодію системи і унеможливує її використання для первинного регулювання частоти. Разом із тим, гравітаційні системи накопичення енергії ефективно виконують функції вторинного та третинного регулювання, згладжують добові коливання навантаження, забезпечують енергетичний резерв та зменшують технологічні втрати. Розглянуто можливість застосування гібридних схем на основі поєднання гравітаційних систем накопичення енергії з електронними компенсаторами потужності (STATCOM), що підвищує якість електроенергії та стабільність напруги. Представлено концептуальну постановку задачі оптимізації інтеграції гравітаційних систем накопичення енергії у електричні мережі з урахуванням технічних, економічних і фізичних обмежень. Наведено цільову функцію максимізації загальної рентабельності капіталовкладень, яка поєднує критерії оператора системи накопичення енергії та оператора системи розподілу. Визначено ключові обмеження моделі: за ємністю, потужністю, швидкістю зміни енергетичного стану, допустимими рівнями напруги й струмового навантаження. Для розв'язання задачі рекомендовано застосування комбінованих підходів, зокрема, методів декомпозиції, евристичних алгоритмів та аналітичних методів на основі еквівалентних схем.

Ключові слова: гравітаційна система накопичення енергії; балансування режимів; відновлювані джерела енергії; оптимізація; електрична мережа; енергетичний баланс; енергоефективність.

Вступ. Енергетична галузь України та світу переживає період трансформації, спричиненої масовим інтегруванням відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). Зростання частки генерації на основі сонячних та вітрових електростанцій, які характеризуються високою добовою та сезонною нестабільністю, суттєво змінило режими роботи об'єднаних енергосистем та розподільних електричних мереж (РЕМ). Це призводить до зростання технологічних втрат, коливань частоти, напруги та, як наслідок, до зниження загальної енергоефективності та якості електроенергії [1–3].

Для компенсації цієї нестабільності необхідне впровадження гнучких та високоманеврових засобів, серед яких ключову роль відіграють системи накопичення енергії (СНЕ). Такі системи здатні забезпечувати резерв потужності, згладжувати пікові навантаження, підтримувати стабільність напруги й швидко реагувати на зміни у балансі генерації й споживання. СНЕ можуть виконувати функції регулювання частоти й напруги, сприйматися як енергетичний буфер і резерв, а також підсилювати якісні характеристики мережі у складних режимах роботи [4–6].

Перспективним рішенням для великомасштабного, довготривалого зберігання енергії є гравітаційні системи накопичення енергії (ГСНЕ).

Концепція ГСНЕ базується на перетворенні електричної енергії на потенційну, шляхом підняття вантажів (бетонних блоків, ґрунту, води) на висоту, та подальшій регенерації електричної енергії при їхньому контрольованому опусканні. Переваги ГСНЕ, такі як термін експлуатації понад 50 років, мінімальна деградація від циклів заряду-розряду, екологічність (використання місцевих матеріалів) та безпека, роблять їх привабливими для забезпечення енергетичного балансу в мережах із високою часткою ВДЕ [7–9]. Незважаючи на значні переваги, інтегрування ГСНЕ у функціонування електричних мереж пов'язане зі специфічними технічними та економічними проблемами, які потребують науково-технічного вирішення [10].

Метою роботи є визначення та аналіз основних технічних, економічних і алгоритмічних аспектів балансування режимів електричних мереж із використанням гравітаційних систем накопичення енергії, та також формування концептуальних підходів до оптимізації їх інтеграції та режимів функціонування в енергосистемах із високою часткою відновлюваних джерел енергії.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішено такі задачі.

© Т. Л. Кацадзе, Д. В. Щербина, 2026



Ця робота ліцензується відповідно до *Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)*
Конфлікт інтересів: Автори заявили про відсутність конфлікту

1) Проаналізовано вплив зростання частки відновлюваних джерел енергії на стабільність і режими роботи розподільних електричних мереж

2) Досліджено принцип дії, переваги та обмеження гравітаційних систем накопичення енергії, можливості їх використання для балансування потужності у мережах

3) Визначено основні технічні та експлуатаційні проблеми інтеграції ГСНЕ у структуру електроенергетичних систем, зокрема з урахуванням їхньої механічної інерції, обмежень швидкодії та вимог щодо умов розміщення.

4) Розглянуто напрямки застосування ГСНЕ для вирішення завдань довготривалого зберігання енергії, згладжування графіків навантаження та забезпечення резервів потужності.

5) Представлено концептуальну постановку задачі оптимізації інтеграції ГСНЕ, визначивши цільову функцію, критерії економічної ефективності та систему технічних обмежень.

Аналіз проблем інтеграції ГСНЕ. Будь-яка ГСНЕ, впроваджена в розподільні мережі операторів систем розподілу (ОСР), повинна вирішувати три взаємопов'язані задачі: де її розташувати, які номінальні параметри призначити (потужність та ємність), і яким чином керувати режимами роботи протягом часу [10]. Очевидно, що ці задачі взаємопов'язані: неправильне розміщення або вибір параметрів може ускладнити алгоритмічне керування і навпаки.

ГСНЕ, засновані на механічному русі масивних вантажів, мають більшу інерцію порівняно з іншими накопичувачами енергії. Це обмежує їхню ефективність для надання швидких допоміжних послуг, таких як первинне керування частотою, яке вимагає надшвидкого відгуку порядку мілісекунд. Натомість такі системи доцільно використовувати для зсуву навантаження (time-shifting / arbitrage) – накопичення надлишкової енергії й її віддача в години з піковим попитом; надання резерву потужності (вторинного чи третинного), де час реакції може бути більшим; обмеження піків споживання (peak shaving) і згладжування добового профілю навантаження мережі [10–12].

Слід зазначити, що класичні моделі оптимізації СНЕ орієнтовані на електрохімічні накопичувачі та не враховують коефіцієнти інерційності механічної системи. Щоб це врахувати, у моделі керування потрібно вводити жорсткі обмеження на швидкість зміни потужності, що критично для безпечної роботи технічної системи [11].

В роботах [12, 13] зазначено, що об'єкти ГСНЕ (наприклад, системи Energy Vault або Gravitricity) вимагають значних площ або специфічних геологічних умов (високі вежі, занедбані шахти). Оптимізація місця приєднання та ємності ГСНЕ повинна ґрунтуватися на комплексному техніко-економічному критерії, який враховує технічні фактори ОСР – зменшення втрат активної потужності, підтримка допустимих рівнів напруги та розвантаження ліній електропередачі; економічні фактори оператора ГСНЕ (ОСН):

максимізація доходів від участі в енергетичному ринку та допоміжних службах з урахуванням капітальних і експлуатаційних витрат [10, 11]. Через великі капітальні витрати на будівництво ГСНЕ, неоптимальне розміщення може суттєво знизити загальну рентабельність проекту та викликати необхідність додаткової реконструкції мережі з боку ОСР [13].

Для ГСНЕ критичним є точне моделювання енергетичних потоків, які залежать не лише від електричних параметрів, але й від механічних характеристик системи. В роботі [11] запропоновано оцінювати енергетичний стан ГСНЕ через дискретне оновлення, виходячи з попереднього стану, потужності заряду/розряду та загального коефіцієнта корисної дії:

$$E_{i(t)} = E_{i(t-1)} - \sum_{t \in \Delta T} \left(\eta P_{Hi(t)}^+ - \frac{1}{\eta} P_{Hi(t)}^- \right) \cdot \Delta t, \quad (1)$$

де $E_{i(t)}, E_{i(t-1)}$ – поточний та попередній енергетичні стани ГСНЕ відповідно;

$P_{Hi(t)}^+, P_{Hi(t)}^-$ – потужність заряду/розряду ГСНЕ;

η – загальний ККД циклу накопичення/віддачі, який для ГСНЕ включає ККД електротехнічного обладнання (двигун/генератор, перетворювачі) та ККД механічної системи;

Δt – часовий інтервал моделювання.

В роботах [10, 12] зазначено, що ключовою проблемою є розробка моделі управління, яка б забезпечувала узгодження графіка роботи ГСНЕ з графіками генерації ВДЕ та споживання, при цьому дотримуючись як технічних обмежень мережі, так і механічних обмежень самої ГСНЕ (наприклад, мінімальний/максимальний рівень завантаження, гранична швидкість руху вантажів тощо).

Однією з ключових проблем інтеграції ГСНЕ до складу електроенергетичних систем є висока механічна інерція системи, що ускладнює балансування режимів електроенергетичної мережі, особливо, у разі швидких змін видачі потужності в мережу електричними станціями. На відміну від електрохімічних накопичувачів, які реагують на зміни навантаження за 10–50 мс завдяки швидким електрохімічним процесам, ГСНЕ демонструють затримку в 1–5 хв через кінетичну інерцію масивних вантажів, маса яких може сягати тисяч тон, що вимагає часу на прискорення/гальмування двигунів і стабілізацію механічних елементів. Ця інерція знижує швидкість відгуку, роблячи ГСНЕ непридатними для первинного регулювання частоти, але ефективними для вторинного та третинного регулювання, де вони компенсують довготривалі дисбаланси, забезпечуючи стабільність у мережах з високою часткою ВДЕ [10, 14].

Підтримка якості електроенергії, зокрема стабільності напруги та частоти, досягається через роль ГСНЕ як резерву для компенсації аварійних відключень ВДЕ. Повільна реакція ГСНЕ компенсується гібридними схемами з STATCOM, що

підвищує складність, але забезпечує інтеграцію в мережі з значною часткою (більше 50 %) ВДЕ, знижуючи втрати на 10–15 % [15, 16]. Додатково, оптимізація енергетичних потоків у ГСНЕ для регулювання частоти включає евристичні алгоритми, наприклад, гравітаційний пошуковий алгоритм, що дозволяє економічне обґрунтування розміщення установки ГСНЕ [17].

Концептуальна постановка задачі оптимізації інтегрування ГСНЕ. Для ефективного інтегрування ГСНЕ в електричну мережу необхідно застосовувати методи нелінійної оптимізації з комплексним критерієм, що враховує економічні та технічні аспекти, зокрема специфіку ГСНЕ. Такі підходи подібні до методів оптимізації електроенергетичних систем, проте включають специфічні характеристики ГСНЕ, такі як обмеження по потенційній енергії, швидкості підйому/опускання вантажів та ефективності перетворення енергії [11, 17]. Оптимізаційний підхід до інтеграції ГСНЕ дозволяє одночасно враховувати технічні, економічні та екологічні аспекти, що підвищує ефективність управління електричною мережею та забезпечує стабільне використання відновлюваних джерел енергії.

Цільову функцію оптимізації, зазвичай, визначають максимізацією загальної рентабельності капіталовкладень

$$R(X) = \frac{P_p(X) + P_p^{\Delta P}(X) + A_p(X)}{K(X)} \rightarrow \max, \quad (2)$$

де X – множина оптимізованих параметрів (номінальна потужність, ємність та вузол приєднання СНЕ)

$R(X)$ – загальна рентабельність капіталовкладень;

$P_p(X)$ – прибуток оператора СНЕ;

$P_p^{\Delta P}(X)$ – економічний ефект від зниження

технологічних втрат;

$K(X)$ – капіталовкладення;

$A_p(X)$ – амортизаційні відрахування;

Рішення задачі оптимізації обмежується технічними та фізичними параметрами системи. Баланс енергії в накопичувачі описується згідно рівнянням (1). Рішення оптимізаційної задачі слід реалізовувати з урахуванням обмежень, які відображають фізичні властивості ГСНЕ та забезпечують безпечну та стабільну роботу електроенергетичної системи [9, 18, 19]. До них слід віднести:

- обмеження по ємності ГСНЕ:

$$E_{i_min} \leq E_{i(t)} \leq E_{i_max}, \forall t \in T; \quad (3)$$

- обмеження на швидкість зміни енергетичного стану (швидкість заряду/розряду, яка визначається швидкістю підйому/опускання вантажів):

$$|E_{i(t)} - E_{i(t-1)}| \leq \Delta \bar{E}_i, \forall t \in T; \quad (4)$$

- обмеження на перетоки потужності з метою забезпечення номінальної потужності ГСНЕ та мінімізації небалансів у мережі:

$$\sum_{i=1}^{n_u} P_{Hi(t)} - P_{Ci(t)} \pm \Delta P(X_i) \leq D_{max}, \forall t \in T; \quad (5)$$

- обмеження по режиму напруги у вузлах електричної мережі:

$$U_{i_min} \leq U_{i(t)} \leq U_{i_max}, \forall i \in [1..n_n], \forall t \in T; \quad (6)$$

- обмеження по робочому струму (завантаженню ліній):

$$I_{i(t)} \leq I_{i_max}, \forall i \in [1..n_b], \forall t \in T. \quad (7)$$

В роботах [10, 20, 21] показано, що враховуючи високу складність задачі, яка визначається нелінійністю, дискретним характером параметрів та великими обсягами даних, доцільним є застосування комбінованих підходів: методів декомпозиції, евристичних алгоритмів та аналітичних методів на основі еквівалентних схем, таких як метод «ідеального струморозподілу», що дозволяє спростити розв'язання нелінійних рівнянь балансу потужності.

Висновки.

1. Проведений аналіз показав, що зростання частки відновлюваних джерел енергії в енергосистемах України потребує впровадження гнучких і довготривалих систем накопичення енергії. Гравітаційні системи накопичення енергії є перспективним рішенням для забезпечення балансування режимів електричних мереж завдяки екологічності, довговічності та високій безпеці експлуатації.

2. Визначено основні технічні проблеми інтеграції ГСНЕ до розподільних мереж, серед яких висока механічна інерція системи, значні капітальні витрати, вимоги до геологічних умов та складність алгоритмів керування. Ці чинники потребують врахування в моделях оптимізації параметрів і режимів роботи систем.

3. ГСНЕ ефективно застосовуються для завдань довготривалого зберігання енергії, зсуву навантаження, згладжування добових графіків споживання та резервування потужності у випадку коливань генерації ВДЕ. Однак вони не придатні для первинного регулювання частоти через затримку реакції, що обумовлено інерційністю механічних елементів.

4. Для підвищення ефективності функціонування гравітаційних накопичувачів доцільним є використання гібридних структур (зокрема, з системами STATCOM), які дозволяють

компенсувати інерційність і забезпечують підтримку напруги та частоти в мережі.

5. Представлена концептуальна постановка задачі оптимізації інтеграції ГСНЕ в електричну мережу. Вона базується на комплексному критерію, що враховує технічні, економічні та екологічні аспекти, а також фізичні обмеження системи. Для її реалізації запропоновано застосування комбінованих методів, зокрема, на основі евристичних, аналітичних і декомпозиційних підходів.

Список літератури

- Maintaining Ukraine's grid reliability under rapid growth of renewable electricity share: challenges in the pre-war, war-time, and post-war periods / T. Kurbatova et al. *International Journal of Sustainable Energy Planning and Management*. 2024. Vol. 40. P. 41–54. DOI: <https://doi.org/10.54337/ijsep.8112>.
- Kuzior A., Lobanova A., Kalashnikova L. Green energy in Ukraine: state, public demands, and trends. *Energies*. 2021. Vol. 14, no. 22. 7745. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14227745>.
- Prospects for the integration of distributed energy sources into the Ukrainian power grid / I. Hrytsiuk et al. *Machinery & Energetics*. 2025. Vol. 16, no. 1. P. 130–145. DOI: <https://doi.org/10.31548/machinery/1.2025.130>.
- Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation / X. Luo et al. *Applied Energy*. 2015. Vol. 137. P. 511–536. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.09.081>.
- A review of energy storage technologies for wind power applications / F. Díaz-González et al. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2012. Vol. 16, no. 4. P. 2154–2171. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.01.029>.
- The role of energy storage systems for a secure energy supply: a comprehensive review of system needs and technology solutions / G. De Carne et al. *Electric Power Systems Research*. 2024. Vol. 236. 110963. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epr.2024.110963>.
- Solid gravity energy storage: A review / W. Tong et al. *Journal of Energy Storage*. 2022. Vol. 53. 105226. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105226>.
- Potential of different forms of gravity energy storage / F.-F. Li et al. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2024. Vol. 64. 103728. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2024.103728>.
- Capacity optimization strategy for gravity energy storage stations considering the impact of new power systems / C. Lv et al. *PLOS One*. 2025. Vol. 20, no. 4. e0320734. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0320734>.
- A review of gravity energy storage / R. Wang et al. *Energies*. 2025. Vol. 18, no. 7. 1812. DOI: <https://doi.org/10.3390/en18071812>.
- Parametric optimisation for the design of gravity energy storage system using Taguchi method / M. E. A. Elsayed et al. *Scientific Reports*. 2022. Vol. 12, no. 1. 19648. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-20514-y>.
- Underground gravity energy storage: a solution for long-term energy storage / J. D. Hunt et al. *Energies*. 2023. Vol. 16, no. 2. 825. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16020825>.
- Geospatial optimization of location-dependent costs for gravity energy storage plants in a mountainous suburban area: the case of Fukuoka City, Japan / T. Hoshino et al. *Energy Technologies and Environment*. 2024. Vol. 2, no. 1. P. 37–48. DOI: <https://doi.org/10.58567/ete02010004>.
- Inertial characteristics of gravity energy storage systems / W. Tong et al. *2023 IEEE PES 15th Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, Chiang Mai, Thailand, 6–9 December 2023. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1109/appeec57400.2023.10561970>.
- The frequency-voltage stability control for isolated wind-diesel hybrid power system / Y. Mi et al. *Electric Power Systems Research*. 2021. Vol. 192. 106984. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epr.2020.106984>.
- Rashedi E., Nezamabadi-pour H., Saryazdi S. GSA: a gravitational search algorithm. *Information Sciences*. 2009. Vol. 179, no. 13. P. 2232–2248. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ins.2009.03.004>.
- Siting and sizing of energy storage for renewable generation utilization with multi-stage dispatch under uncertainty: a tri-level model and decomposition approach / B. Wang et al. *Applied Energy*. 2023. Vol. 344. 121286. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121286>.
- Optimizing grid regulation with gravity storage systems: a comparative analysis with different motor inertias / S. Sundeeep et al. *2024 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Phoenix, AZ, USA, 20–24 October 2024. 2024. P. 323–330. DOI: <https://doi.org/10.1109/ecce55643.2024.10860891>.
- Arsalan Hadaeghi, Ahmadreza Abdollahi Chirani. Optimizing power losses and voltage profiles through simultaneous distribution network reconfiguration and DG placement using a hybrid CDOA-PSO algorithm. *International Journal of Scientific Research in Science, Engineering and Technology*. 2025. Vol. 12, no. 2. P. 460–476. DOI: <https://doi.org/10.32628/ijrsrset25122157>.
- Huanca D. H., Gallego L. A., López-Lezama J. M. Transmission network expansion planning considering optimal allocation of series capacitive compensation and active power losses. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 12, no. 1. 388. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12010388>.
- Gravitational search algorithm optimization algorithm for grid distributed energy storage resource pool regulation matching load peak–valley and operation constraints / Z. Lin et al. *Discover Internet of Things*. 2025. Vol. 5, no. 1. 77. DOI: <https://doi.org/10.1007/s43926-025-00172-y>.

References

- T. Kurbatova, R. Sidortsov, G. Trypolska, D. Hulak, and I. Sotnyk, “Maintaining Ukraine’s grid reliability under rapid growth of renewable electricity share: Challenges in the pre-war, war-time, and post-war periods,” *International Journal of Sustainable Energy Planning and Management*, vol. 40, pp. 41–54, Apr. 2024, doi: <https://doi.org/10.54337/ijsep.8112>
- A. Kuzior, A. Lobanova, and L. Kalashnikova, “Green energy in Ukraine: State, public demands, and trends,” *Energies*, vol. 14, no. 22, Nov. 2021, Art. no. 7745, doi: <https://doi.org/10.3390/en14227745>
- I. Hrytsiuk, V. Volynets, Y. Hrytsiuk, I. Bandura, and N. Komenda, “Prospects for the integration of distributed energy sources into the Ukrainian power grid,” *Machinery & Energetics*, vol. 16, no. 1, pp. 130–145, 2025, doi: <https://doi.org/10.31548/machinery/1.2025.130>
- X. Luo, J. Wang, M. Dooner, and J. Clarke, “Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation,” *Applied Energy*, vol. 137, pp. 511–536, Jan. 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.09.081>
- F. Díaz-González, A. Sumper, O. Gomis-Bellmunt, and R. Villafañila-Robles, “A review of energy storage technologies for wind power applications,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 4, pp. 2154–2171, May 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.01.029>
- G. De Carne et al., “The role of energy storage systems for a secure energy supply: A comprehensive review of system needs and technology solutions,” *Electric Power Systems Research*, vol. 236, Nov. 2024, Art. no. 110963, doi: <https://doi.org/10.1016/j.epr.2024.110963>
- W. Tong et al., “Solid gravity energy storage: A review,” *Journal of Energy Storage*, vol. 53, 2022, Art. no. 105226, doi: <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105226>
- F.-F. Li, J.-Z. Xie, Y.-F. Fan, and J. Qiu, “Potential of different forms of gravity energy storage,” *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 64, Apr. 2024, Art. no. 103728, doi: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2024.103728>
- C. Lv, J. He, J. Ma, Y. Yang, F. Liu, and W. Huang, “Capacity optimization strategy for gravity energy storage stations considering the impact of new power systems,” *PLOS One*, vol. 20, no. 4, Apr. 2025, Art. no. e0320734, doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0320734>
- R. Wang, L. Zhang, C. Shi, and C. Zhao, “A review of gravity energy storage,” *Energies*, vol. 18, no. 7, Apr. 2025, Art. no. 1812, doi: <https://doi.org/10.3390/en18071812>
- M. E. A. Elsayed, S. Abdo, A. A. A. Attia, E.-A. Attia, and M. A. Abd Elrahman, “Parametric optimisation for the design of gravity energy storage system using Taguchi method,” *Scientific Reports*, vol. 12, no. 1, Nov. 2022, Art. no. 19648, doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-20514-y>

12. J. D. Hunt *et al.*, “Underground gravity energy storage: A solution for long-term energy storage,” *Energies*, vol. 16, no. 2, Jan. 2023, Art. no. 825, doi: <https://doi.org/10.3390/en16020825>
13. T. Hoshino, S. Basu, T. Ogawa, K. N. Ishihara, K. Hoshino, and H. Okumura, “Geospatial optimization of location-dependent costs for gravity energy storage plants in a mountainous suburban area: The case of Fukuoka City, Japan,” *Energy Technologies and Environment*, vol. 2, no. 1, pp. 37–48, Mar. 2024, doi: <https://doi.org/10.58567/ete02010004>
14. W. Tong *et al.*, “Inertial characteristics of gravity energy storage systems,” in *2023 IEEE PES 15th Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, Chiang Mai, Thailand, Dec. 6–9, 2023. IEEE, 2023, doi: <https://doi.org/10.1109/appeec57400.2023.10561970>
15. Y. Mi *et al.*, “The frequency-voltage stability control for isolated wind-diesel hybrid power system,” *Electric Power Systems Research*, vol. 192, Mar. 2021, Art. no. 106984, doi: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2020.106984>
16. E. Rashedi, H. Nezamabadi-pour, and S. Saryazdi, “GSA: A gravitational search algorithm,” *Information Sciences*, vol. 179, no. 13, pp. 2232–2248, Jun. 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ins.2009.03.004>
17. B. Wang, X. Wang, Z. Zhu, and X. Wu, “Siting and sizing of energy storage for renewable generation utilization with multi-stage dispatch under uncertainty: A tri-level model and decomposition approach,” *Applied Energy*, vol. 344, Aug. 2023, Art. no. 121286, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121286>
18. S. Sundeeep, L. Sethuraman, D. Akindipe, L. J. Fingersh, Z. Wenrick, and A. Munoz, “Optimizing grid regulation with gravity storage systems: A comparative analysis with different motor inertias,” in *2024 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Phoenix, AZ, USA, Oct. 20–24, 2024. IEEE, 2024, pp. 323–330, doi: <https://doi.org/10.1109/ecce55643.2024.10860891>
19. A. Hadaeghi and A. A. Chirani, “Optimizing power losses and voltage profiles through simultaneous distribution network reconfiguration and DG placement using a hybrid CDOA-PSO algorithm,” *International Journal of Scientific Research in Science, Engineering and Technology*, vol. 12, no. 2, pp. 460–476, Mar. 2025, doi: <https://doi.org/10.32628/ijrsrset25122157>
20. D. H. Huanca, L. A. Gallego, and J. M. López-Lezama, “Transmission network expansion planning considering optimal allocation of series capacitive compensation and active power losses,” *Applied Sciences*, vol. 12, no. 1, Dec. 2021, Art. no. 388, doi: <https://doi.org/10.3390/app12010388>
21. Z. Lin *et al.*, “Gravitational search algorithm optimization algorithm for grid distributed energy storage resource pool regulation matching load peak–valley and operation constraints,” *Discover Internet of Things*, vol. 5, no. 1, Jul. 2025, Art. no. 77, doi: <https://doi.org/10.1007/s43926-025-00172-y>

Надійшла (Received) 06.03.2026

Прийнята (Accepted) 18.03.2026

Опублікована (Published) 29.05.2026

UDC 621.316

KATSADZE TEIMURAZ – Candidate of Technical Sciences (PhD), Docent, Head of the Department of Electrical Networks and Systems, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”; Kyiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8365-0046>; e-mail: teymuraz@ukr.net.

SHCHERBYNA DMYTRO ✉ – Postgraduate Student of the Department of Electrical Networks and Systems, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”; Kyiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-2956-4385>; e-mail: djdimas75@gmail.com.

BALANCING ELECTRIC POWER GRID MODES USING GRAVITATIONAL ENERGY STORAGE SYSTEMS

The paper considers the topical issue of improving the stability of electrical networks in conditions of growing share of renewable energy sources. The instability of solar and wind power generation leads to power imbalances, voltage and frequency fluctuations, which requires the introduction of highly efficient energy storage systems. Particular attention is paid to gravitational energy storage systems, which are based on the conversion of electrical energy into potential energy by lifting massive loads and then restoring it during descent. Such systems are characterized by high reliability, long service life, low operating costs, and environmental safety, which makes them promising for balancing the operating modes of electrical networks with a large share of renewable energy sources. The technical, economic, and algorithmic problems of integrating gravitational energy storage systems into the structure of distribution networks are analyzed. It is shown that the main limiting factor is significant mechanical inertia, which reduces the speed of the system and makes it impossible to use it for primary frequency control. At the same time, gravitational energy storage systems effectively perform the functions of secondary and tertiary control, smooth out daily load fluctuations, provide energy reserves, and reduce technological losses. The possibility of using hybrid schemes based on combining gravitational energy storage systems with electronic power compensators (STATCOM) is considered, which improves the quality of electricity and voltage stability. A conceptual formulation of the problem of optimizing the integration of gravitational energy storage systems into electrical networks is presented, taking into account technical, economic, and physical constraints. A target function for maximizing the overall return on investment is presented, which combines the criteria of the energy storage system operator and the distribution system operator. The key limitations of the model are determined: capacity, power, rate of change of energy state, permissible voltage levels, and current load. To solve the problem, it is recommended to use combined approaches, in particular, decomposition methods, heuristic algorithms, and analytical methods based on equivalent circuits.

Keywords: gravitational energy storage system; mode balancing; renewable energy sources; optimization; electrical grid; energy balance; energy efficiency.