

## ВПРОВАДЖЕННЯ В УКРАЇНІ МЕРЕЖ НАПРУГОЮ 20 КВ

**Проблематика** У зв'язку з війною мережі середньої напруги перебувають у вкрай тяжкому стані, окрім цього вони мають високий ступінь зношеності електрообладнання і низький рівень автоматизації. В енергосистемі України назріла необхідність розв'язання задачі модернізації мереж середньої напруги та переведення їх на новий клас номінальної напруги 20 кВ.

**Мета дослідження** Загальний огляд мереж 20 кВ та організація їх топології з відновлювальними джерелами енергії та «накопичувачами енергії».

**Методика реалізації** В роботі для дослідження «накопичувачів енергії» використано модель мережі в програмному пакеті MatLab. Дослідження ефективності роботи «накопичувачів енергії» проведено у варіативності потужності до загального навантаження, а також часу підключення до мережі.

**Результати дослідження** Доведено необхідність переведення напруг 6 (10) кВ на вищий рівень 20 кВ. Розглянуто різні способи заземлення нейтралі мереж середньої напруги та визначено найефективніші режими заземлення нейтралі для мереж 20 кВ: через дугогасний реактор або через резистор.

Проведено порівняльний аналіз мереж з використанням накопичувачів енергії та без них. У мережах 20 кВ без використання накопичувачів енергії буде зростати споживання енергії з мережі та втрати потужності. При використанні накопичувачів вони постійно приєднані в мережу та мають власні втрати потужності. Батареї увімкнені в мережу 20 кВ призводять до коливального процесу, який носить затухаючий характер (впродовж 2-х секунд).

**Висновки** Перехід з рівня напруги 6 (10) кВ на 20 кВ дозволить суттєво підвищити ефективність функціонування розподільних мереж та зменшити втрати електроенергії. Встановлення накопичувачів енергії в розподільні мережі 20 кВ дозволить впровадити нові інтелектуальні системи для забезпечення інтересів безпеки, економії і енергоефективності та створить передумови для впровадження концепції Smart Grid.

**Ключові слова:** напруга, мережі 20 кВ, мережі середньої напруги, заземлення, нейтраль, накопичувачі енергії.

**Вступ** Умови воєнного стану, в яких знаходиться Україна, вимагають нових підходів до вирішення проблеми збереження енергетичних ресурсів країни і відновлення функціональності енергосистеми. На теперішній час модернізація існуючої електромережі, безумовно, є дуже актуальним питанням. Нині електромережі України перебувають у вкрай важкому стані через пошкодження внаслідок військових дій. Окрім цього мережі мають високий ступінь зношеності електрообладнання і низький рівень автоматизації. З кожним роком зростає навантаження на розподільні мережі, а вкрай повільне будівництво нових розподільних ліній електропередавання напругою 10 кВ не вирішує проблему забезпечення споживачів необхідною кількістю електроенергії нормованої якості.

В розподільних мережах середньої напруги найбільш поширені приєднання приватних ВДЕ, що ускладнює прогнозування споживання, а також потребує наявного обертового резерву потужності. Одним із способів боротьби із стохастичним характером генерування ВДЕ є використання «накопичувачів енергії». Оскільки приватні домогосподарства, а також просто ВДЕ не зобов'язані встановлювати такі накопичувачі, то прийнятним рішенням є використання мережевих «накопичувачів енергії», що приєднані безпосередньо до мереж середньої напруги та є окремим вузлом.

У промислово розвинених країнах системи розподілу постачають електроенергію буквально скрізь, приймаючи електроенергію, вироблену у багатьох місцях, і доставляючи її кінцевим споживачам. Із трьох великих складових інфраструктури електроенергетичної системи: виробництво, передача та розподіл, розподіл електричної енергії приділяється найменша увага. Проте часто це найважливіший компонент з точки зору його впливу на надійність і якість обслуговування та вартість електроенергії.

**Мета та завдання** Загальний огляд мереж 20 кВ та організація їх топології з відновлювальними джерелами енергії та «накопичувачами енергії».

**Матеріал і результати досліджень** На теперішній час в багатьох розвинених країнах активно використовують розподільні мережі середнього класу з підвищеними значеннями номінальних напруг (18,

20, 22, 23 кВ). Більшість країн Європи використовують клас номінальної напруги 20 кВ. Також своє застосування напруга 20 кВ знайшла у Латвії, Англії, Японії (22 кВ), США (18, 23 кВ) [1].

Основним чинником впровадження мереж номінальною напругою 20 кВ є збільшення поверхневої щільності навантаження. У Києві максимальна щільність перевищує 10 МВт/км<sup>2</sup>. Власне, одним із перспективних шляхів зменшення втрат електроенергії в електричній мережі є переведення розподільної мережі на вищий клас номінальної напруги – від 6 кВ і 10 кВ до 20 кВ або 35 кВ. Для України більш економічно вигідно переходити на напругу 20 кВ [2].

Номінальні напруги 6 та 10 кВ застосовуються для формування промислових, міських та сільських розподільних мереж. Найбільш поширені мережі напругою 10 кВ, а мережі номінальною напругою 6 кВ, які перебувають у незадовільному стані, переводяться на напругу 10 кВ. Однозначним є те, що для надійної роботи розподільних мереж необхідно переводити мережі з рівня напруги 6 та 10 кВ на вищий клас номінальної напруги – 20 кВ. Звичайно, що перехід на вищий клас напруги має свої переваги та недоліки, але дозволить надійно та якісно передавати споживачам електроенергією. У табл. 1. перераховані основні переваги та недоліки переходу на напругу 20 кВ [3].

Табл. 1. Переваги та недоліки переходу на вищий клас напруги розподільної мережі

<b>Переваги</b>
<p><i>Падіння напруги</i> – ланцюги з більш високою напругою мають менше падіння напруги для однієї і тієї ж потужності.</p> <p><i>Потужність</i> – системи з більш високою напругою можуть передавати більшу потужність.</p> <p><i>Втрати</i> – вищий клас напруги розподільної мережі має менші втрати в лінії.</p> <p><i>Функціональність</i> – з меншим падінням напруги і більшою енергоємністю, можна охоплювати більше споживачів.</p> <p><i>Ефективність</i> – завдяки більшому радіусу дії, системи розподілу вищої напруги потребують меншої кількості підстанцій.</p>
<b>Недоліки</b>
<p><i>Надійність</i> – суттєвий недолік вищого класу напруги: більша протяжність лінії електропередавання у разі аварії – більша кількість знеструмлених споживачів.</p> <p><i>Безпека</i> – більш напруги вимагають більш кваліфікованих робітників та несуть більшу небезпеку їхньому здоров'ю.</p> <p><i>Вартість обладнання</i> – трансформатори, кабелі та ізоляція обладнання вищої напруги має вищу вартість.</p>

Загалом напруга 20 кВ забезпечує хороший баланс між вартістю, надійністю, безпекою та доступністю. Переведення мереж 6, 10 кВ на більш високу напругу має переваги, особливо для ліній у сільській місцевості та для міст з великою щільністю завантаження, особливо там, де земля для підстанції коштує дорого.

Однофазні замикання на землю є найбільш розповсюдженим видом пошкодження в трьохфазних електричних мережах усіх класів напруги. В електричних мережах 6...20 кВ, що зазвичай функціонують з ізольованою або компенсованою нейтраллю, значення струмів однофазного короткого замикання невелика, не перевищує 20...30 А. Тому мережі даних класів напруги називають мережами з малими струмами замикання на землю. Однофазні замикання на землю несуть велику небезпеку для обладнання електричних мереж, людей та тварин, що можуть знаходитись поряд з місцем виникнення однофазного короткого замикання. У світовій практиці використовуються наступні способи заземлення нейтралі мереж середньої напруги:

- ізольована (незаземлена);
- грухозаземлена (безпосередньо приєднана до заземляючого контуру);
- заземлення через дугогасний реактор (резонансне заземлення через котушку Петерсона);
- заземлення через резистор (низькоомний або високоомний).

Для мереж 20 кВ рекомендовано виконувати наступні режими заземлення нейтралі: 1 – через дугогасний реактор; 2 – через резистор.

Режим №1: нейтраль, заземлена через дугогасний реактор. Котушка Петерсона скомутована між нейтральною точкою системи та землею, розрахована таким чином, що емнісний струм при замиканні на землю компенсується індуктивним струмом, який проходить через неї. Залишається некомпенсований незначний струм, але будь-яка дуга між пошкодженою фазою та землею підтримуватися не буде [4]. Незначні пошкодження можуть усуватися без відключення аварійного фідера. Даний спосіб заземлення застосовується в розгалужених кабельних мережах промислових підприємств у багатьох країнах світу.

Режим №2: у мережах із заземленою нейтраллю через резистор при однофазних замиканнях на землю протікає власне емнісні струми, і в разі пошкодження у приєднанні протікає активний струм. У

мережах 20 кВ даний режим зменшує внутрішні коливання напруги, виключає можливість періодичних перенапруг і забезпечує більш надійний захист. У мережах з малими ємнісними струми (до 10 А) слід виконувати високоомне заземлення, а мережах з значними ємнісними струмами допустиме застосування лише низькоомного заземлення нейтралі, значенням опору резистора нижче 50 Ом [5].

Розподільні мережі мають різну конфігурацію і довжини фідерів. Більшість мереж 20 кВ є радіальними з можливістю формування кільця і мають в порівнянні з мережами 10 кВ з ізольованою нейтраллю наступні переваги: простий захист від струмів короткого замикання; швидке визначення місця пошкодження; менші струми замикання на більшість частині мережі; простий контроль напруги; функціонально простіший прогноз та контроль потоків потужності; більшу економічність.

На теперішній час проявляється світова тенденція переходу від радіальних мереж до більш гнучкої рівномірно розподіленої мережі. В цій мережі кожний вузол має бути активним елементом, що дасть змогу робити реконфігурацію мережі відповідно до оптимального режиму роботи [1]. Мережі 20 кВ будуються в такий спосіб, щоб якісно доставляти електричну енергію споживачу різної категорії надійності.

При побудові мережі в районах з високою щільністю навантаження лінії 20 кВ необхідно якнайближче підводити до споживача.

З кожним роком у мережі світу з'являється все більше відновлювальних джерел енергії вітру і сонця. У минулому мережі працювали лише у напрямку постачання електроенергії з більш високого класу напруги. Розподільні мережі України побудовані для вирішення цього конкретного завдання, тобто не спроектовані для роботи з розподіленою генерацією на основі відновлювальних джерел енергії. Безпосередньо споживачі, що до сьогодні зберігали пасивність, перетворюються на активних учасників ринку електричної енергії, тобто стають і споживачами, і виробниками в одній особі. У всьому світі в 2019 році до систем електроенергетики було додано 2,9 ГВт накопичувальних потужностей – майже на 30 % менше, ніж у 2018 році. Фактори цієї тенденції підкреслюють, технології накопичення електроенергії залишаються на ранніх стадіях і сильно залежить від політики підтримки [6]. Розподільні мережі швидше і частіше реагують на зміни виробництва та споживання електроенергії – напрямків потоків і величин навантаження [1].

В роботі для дослідження «накопичувачів енергії» використано модель мережі в програмному пакеті MatLab. Модель базується на еталонному моделі, яка представлена в версії R2022b. Дослідження ефективності роботи «накопичувачів енергії» проведено у варіативності потужності до загального навантаження, а також часу підключення до мережі. Математична модель наведена на рис. 1.

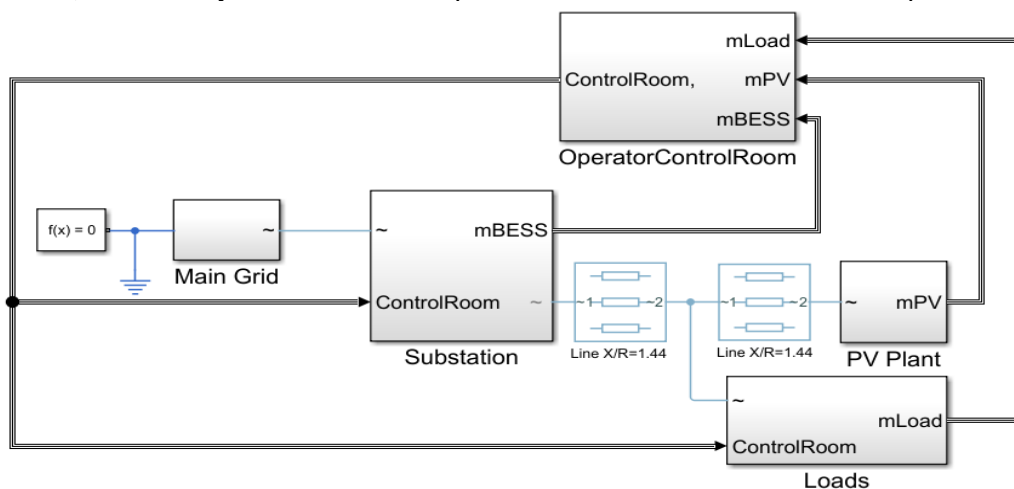


Рисунок 1 – Модель фрагмента розподільної мережі 20 кВ  
Авторський внесок

Функція контролю потужності та частоти наведена на рис.2.

При зміні навантаження без використання накопичувачів енергії в електричній мережі буде зростати споживання енергії з мережі та втрати, що показано на рис. 3.

Аналогічно змінюється споживання реактивної енергії. При використанні накопичувачів енергії споживання енергії з мережі знижується. Накопичувачі постійно приєднані до мережі, мають власні втрати потужності. На рис. 4 наведені графіки активної та реактивної потужностей. Батареї, увімкнені в мережі призводять до коливального процесу, що носить затухаючий характер (впродовж 2-х секунд). При вимкненні СЕС, крива споживаної потужності зміститься по осі Y вгору, що зумовить увімкнення накопичувачів енергії при меншому збільшенні навантаження.

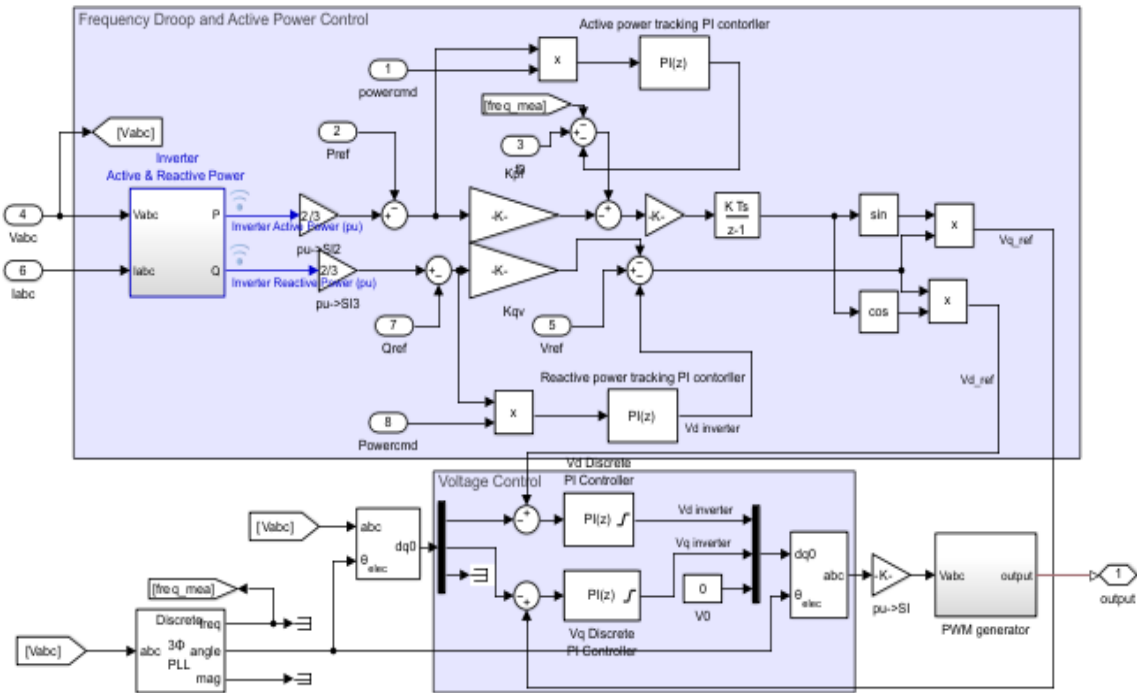


Рисунок 2 – Функція контролю потужності та частоти розподільної мережі 20 кВ в середовищі MatLab

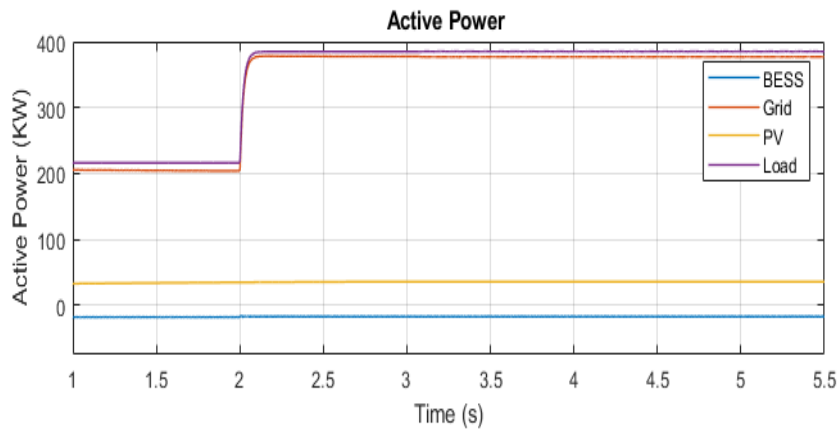
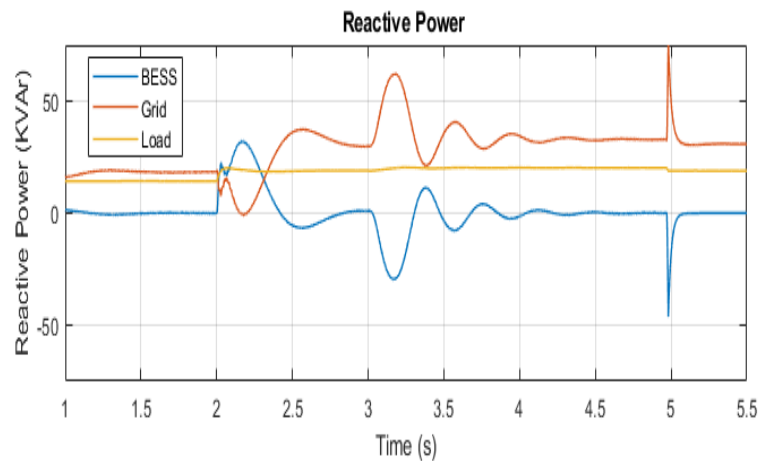


Рисунок 3 – Графіки споживання енергії та втрат без використання накопичувачів енергії в мережі



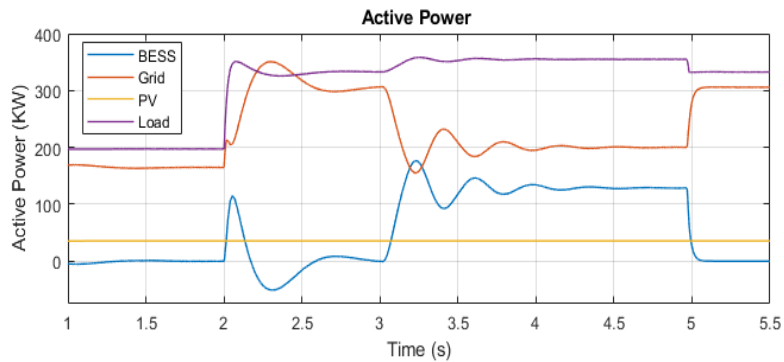


Рисунок 4 – Активна та реактивна потужності при використанні накопичувачів енергії

Важливим фактором є залежність якості електричної електроенергії від використовуваних перетворювачів напруги. Для випадку використання наведеної функції керування потужністю та частотою показник THD не перевищує 5%, рис. 5. З моменту завершення коливального процесу – 3,3 с. напруга та струм на навантаженні носять синусоїдальний характер, рис. 6.

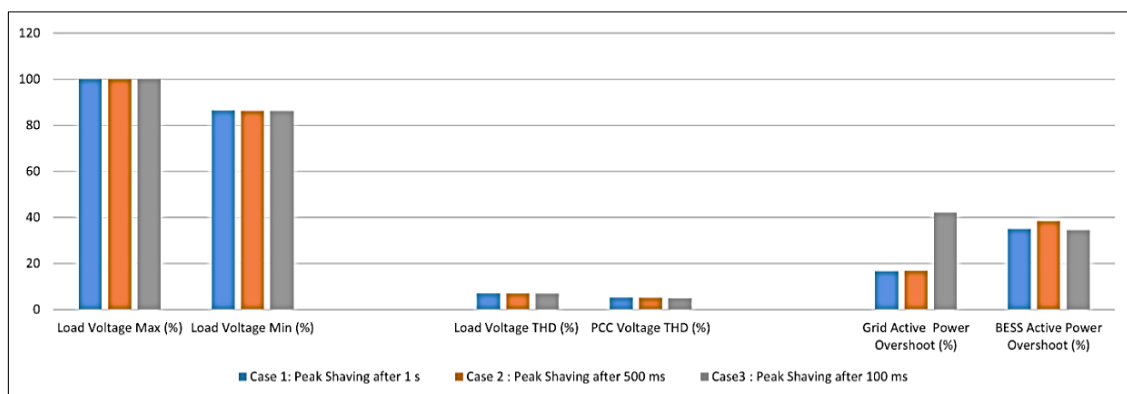


Рисунок 5 – Показник THD

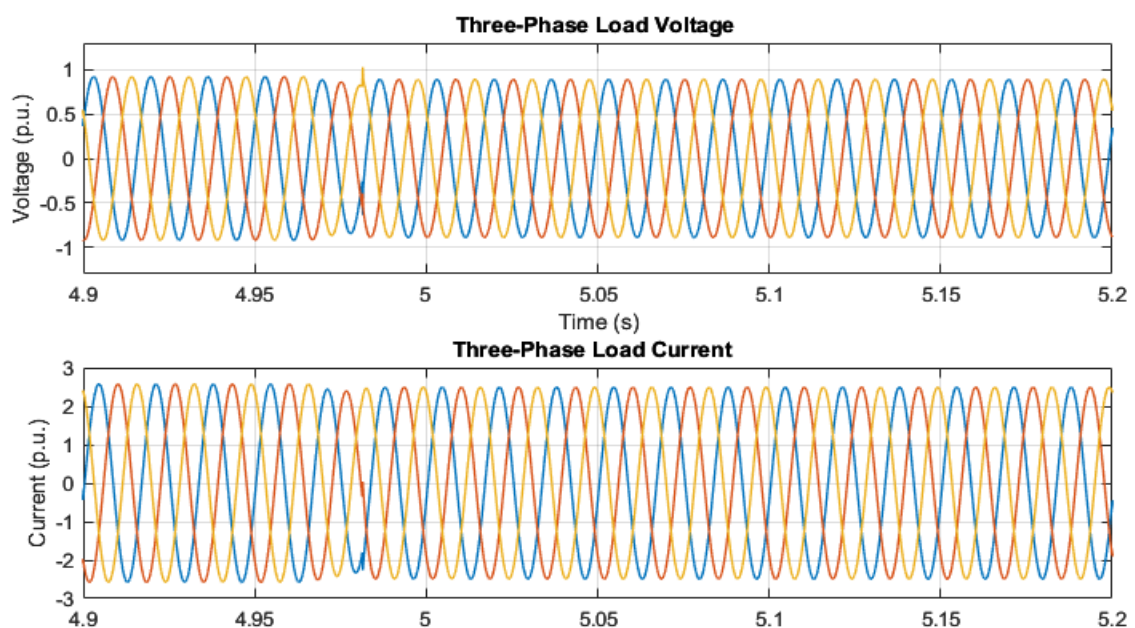


Рисунок 6 – Напруга та струм після завершення коливального процесу

Змінюючи потужність накопичувача енергії можна досягти оптимальних економічних показників завдяки зменшенню втрат активної енергії. Залежність в номінальних величинах наведена на рис. 7.

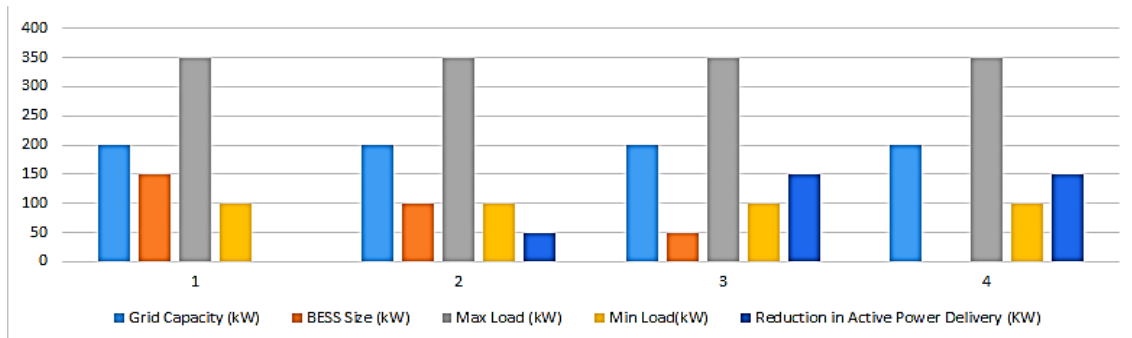


Рисунок 7 – Залежність втрат активної енергії від потужності накопичувача енергії

**Висновки** Впровадження мереж 20 кВ в енергосистемі дозволяє зменшити втрати та збільшити дальність передачі електричної енергії, скоротити використання кольорового металу. Враховуючи світову тенденцію у розвитку відновлювальних джерел енергії необхідно забезпечити передавання енергії не тільки від великих центрів генерації, а і від «активних» споживачів, які стають учасниками ринку електроенергії.

Розподільні мережі України, побудовані у минулому столітті, морально зношені та не відповідають нормам надійності і не в змозі забезпечити ефективне та безперебійне електропостачання на рівні країн Євросоюзу. Для України переведення мережі 6 та 10 кВ на вищий клас напруги 20 кВ дозволить впровадити нові інтелектуальні системи для забезпечення інтересів безпеки, економії і енергоефективності та створить передумови для впровадження концепції Smart Grid.

#### Список використаної літератури

1. Кирик В. В. Розподільні електричні мережі напругою 20 кВ та ефективність їх роботи / В.В.Кирик, Б.В. Циганенко, О.С. Яндутьський.-К.: «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2018.-233с
2. Циганенко, Б. В. Ефективність роботи розподільних електричних мереж при підвищенні їх класу напруги.– Рукопис / Автореферат на здобуття наукового ступеня канд. техн. наук, Київ, 2017.-21 с.
3. Т. А. Short. Electric power distribution handbook. USA, 2003.-762.
4. Шабад М. А. Защита от однофазных замыканий на землю в сетях 6-35 кВ. – М.: НТФ «Энергопрогресс», 2007.-64.
5. Кирик В. В., Буряк А. Р., Іськова М. С. Визначення оптимального значення опору резистора заземлення нейтралі в мережах 20 кВ / Вісник Вінницького політехнічного інституту.-2021.-№5.-с.96-102
6. Гуменюк О., Курєдова І., Гаврилук Р. Розвиток відновлювальної енергетики та створення балансуєючих потужностей – аналіз викликів для стійкості енергосистеми України в розрізі досягнення енергетичних та кліматичних цілей.-Дослідження. Київ, 2020.-24с

M. S. Iskova, student, ORCID 0000-0003-4206-5630

A. R. Buriak, postgraduate, ORCID 0000-0001-7732-575X

V. V. Kyryk, Dr. Sc. (Eng.), Professor, ORCID 0000-0003-0419-8934

National Technical University of Ukraine  
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

#### IMPLEMENTATION OF 20 kV VOLTAGE NETWORK IN UKRAINE

**Background** Due to the war, the medium voltage networks are in an extremely difficult condition, they have a high degree of depreciation of electrical equipment and a low level of automation. The energy system of Ukraine has a problem of modernizing medium voltage networks and transfer them to a new class of rated voltage of 20 kV.

**Objective** Overall overview of 20 kV networks and organization of their topology with renewable energy sources and "energy storages".

**Methods** A network model in the MatLab software package was used to study "energy accumulators". The study of the efficiency of the "energy storages" was carried out in the variability of the power to the total load, as well as the time of connection to the network.

**Results** *The need to transfer voltages of 6 (10) kV to a higher level of 20 kV has been proven. Various methods of grounding the neutral of medium voltage networks are considered and the most effective modes of neutral grounding for 20 kV networks are determined: through an arc suppression coil or through a resistor. A comparative analysis of networks with and without energy storage was carried out. In 20 kV networks, without the use of energy storage, energy consumption from the network and power losses will increase. When using storage devices, they are permanently connected to the network and have their own power losses. Batteries connected to a 20 kV network lead to an oscillating process that has a damping character (within 2 seconds).*

**Conclusions** *The transition from the voltage level of 6 (10) kV to 20 kV will significantly increase the efficiency of distribution networks and reduce electricity losses. The installation of energy storage in 20 kV distribution networks will allow the introduction of new intelligent systems to ensure the interests of safety, economy and energy efficiency and will create the prerequisites for the implementation of the Smart Grid concept.*

**Key words:** *voltage, 20 kV networks, medium voltage networks, grounding, neutral, energy storage.*

#### **References**

1. V. V. Kyryk, B. V. Tsiganenko and A. S. Yandulsky, Distribution electrical networks with a voltage of 20 kV and the efficiency of their work, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine, 2018.
2. B. V. Tsiganenko, The efficiency of distribution electrical networks when increasing their voltage class, abstract for obtaining the scientific degree of Candidate of Technical Science, Kyiv, Ukraine 2017.
3. T. A. Short, Electric power distribution handbook, USA, 2003.
4. M. A. Shabad, Protection against single-phase earth faults in 6-35 kV networks, Russia, Moskov, 2007.
5. V. V. Kyryk, A. R. Buriak and M. S. Iskova, "Determination of the optimal value of the resistance of the neutral grounding resistor in 20 kV networks", Bulletin of the Vinnitsa Polytechnic Institute, vol.1, no.5, pp. 96-102, 2021.
6. O. Humenyuk, I. Kuroyedova, R. Gavrilyuk, Development of renewable energy and creation of balancing capacities - analysis of challenges for the sustainability of the energy system of Ukraine in terms of achieving energy and climate goals, Kyiv, 2020.

Надійшла 7.11.2022  
Received 7.11.2022