

## ФАКТОРИ ЗМІНЕННЯ НАПРУГИ У ВУЗЛІ ПІДКЛЮЧЕННЯ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ ДО РОЗПОДІЛЬНОЇ МЕРЕЖІ

<sup>1</sup>Гаєвська Г.М., ст. викл., <sup>1,2</sup>Гаєвський О.Ю., д.ф.-м.н., проф.,  
<sup>2</sup>Коновалов М.О., аспірант

<sup>1</sup>КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра відновлюваних джерел енергії; <sup>2</sup>Інститут відновлюваної енергетики НАН України

**Вступ.** У даний час в Україні спостерігається зростання кількості фотоелектричних станцій (ФЕС) невеликої потужності, вони утворюють так звані мікромережі. Мікромережа (microgrid) зазвичай – це локалізована група з компонентів генерації електроенергії та її зберігання, а також з локальним навантаженням [1, 2]. Декілька таких об'єктів можуть підтримувати на стабільному рівні частоту і напругу мережі, тому їх розглядають як елементи розподільчої генерації (РГ). При роботі фотоелектричної станції в складі розподільної мережі доволі часто відбувається вихід значення напруги змінного струму за границі допустимих значень в спільній точці підключення (СТП), що призводить до автоматичного відключення інверторів ФЕС від мережі та перериванню постачання енергії в мережу. Оскільки кількість розподілених генераторів, що додаються до енергосистеми, постійно зростає, підвищується ризик втрати керованості системи, коли виникають нестабільності частоти і напруги, а також випадки зростання частки вищих гармонік.

**Метою роботи** є аналіз і моделювання значень напруги в СТП при змінненні співвідношення рівнів споживання в мережі та генерації ФЕС; визначення факторів, які впливають на підвищення напруги в точці підключення.

**Матеріали і результати досліджень.** Відключення інверторної системою від мережі ФЕС (острівкування) відбуваються у більшості випадків, коли напруга на інверторній стороні від СТП виходить за гранично допустимі значення, наприклад, при високому рівні фотоелектричної генерації, або при обмеженій пропускну здатності ліній, або внаслідок електричних втрат в розподільній мережі. Як показано в попередніх роботах авторів [3] найбільший вплив на напругу СТП має опір з'єднувального кабелю між інвертором і трансформатором. При заданих параметрах ліній і трансформатора перевищення вихідної напруги інвертора над номінальним може складати до 7%. Згідно зі стандартами [4, 5] мінімальний час для виявлення острова встановлюється  $< 2$  с, по факту виходу напруги та частоти за межі допустимих діапазонів ( $0.88 \leq V \leq 1.1$  pu,  $49.3 \text{ Hz} \leq f \leq 50.5 \text{ Hz}$ ). Антиострівкові системи в складі інверторів тестуються розробниками в лабораторних умовах, але тести, що включають лише один інвертор та спрощене навантаження, не завжди відповідають реальним умовам експлуатації – це збільшує ризики нестабільності.

Проаналізуємо фактор підвищення напруги в СТП. На рис.1 представлено послідовна еквівалентна схема, яка має подвійне живлення: від ПС і ФЕС. Вона складається з інвертора  $Inv$ , з'єднувального відрізка кабелю  $Z_{line3}$ ,

підвищуючого трансформатора  $T_2$ , розподільної лінії з еквівалентним навантаженням  $S_{IL}$ , трансформаторної підстанції (ПС)  $T_1$ , високовольтної мережі. Схожа система аналізувалась в [3], але десь до системи додано вузол, який описує споживання в розподільній лінії, який ділить усю лінію на відрізки Line1 і Line2. Споживачі, підключені до лінії, моделюються ефективним локальним навантаженням, розташованим точно посередині радіальної лінії.

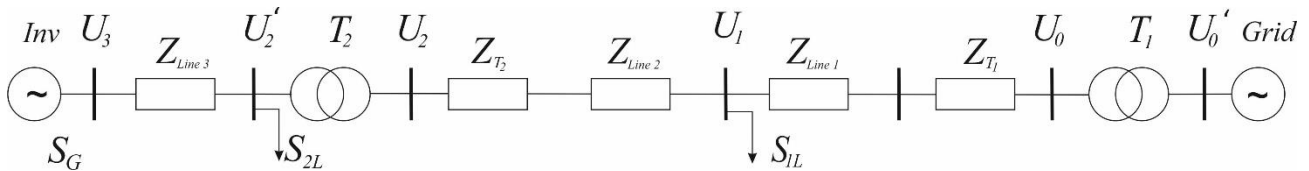


Рисунок 1 – Вихідна схема заміщення енергосистеми: інвертор ФЕС (генерація  $S_G$ );  $Z_{line3}$  – з'єднувальний відрізок кабелю (імпеданс);  $S_{2L}$  – локальне низьковольтне навантаження;  $T_2$  – підвищуючий трансформатор з еквівалентним послідовним імпедансом  $Z_{T2}$ ;  $Z_{line2}$  – відрізок розподільної лінії з підключеним навантаженням  $S_{IL}$ ;  $Z_{line1}$  – відрізок розподільної лінії;  $T_1$  – трансформаторна підстанція з еквівалентним послідовним імпедансом  $Z_{T1}$ .

В даній роботі за алгоритмом, реалізованим в MATLAB, проаналізовано вплив на напругу  $U_3$  в СТП змінення величини навантаження  $S_{IL}$ , а також місця його розташування в розподільній лінії. Моделюємо відключення інвертора від електромережі, яке відбувається при певних співвідношеннях потоків потужності від генераторів *Inv* і *Grid* та споживання  $S_{IL}$ ,  $S_{2L}$  в лінії. Флуктуації споживання  $S_{IL}$  на розподільних лініях з невеликою кількістю споживачів відбуваються на невеликих інтервалах часу та призводять до відносно швидких змін профілю напруги в лінії. До цих змін можуть додаватися флуктуації потоку  $S_G$  від ФЕС внаслідок швидких змін інтенсивності сонячної радіації. Як відомо, процес перемикання за допомогою системи РПН пов'язаний з перериванням електропостачання споживачеві, тому він виконується досить нечасто. Таким чином, на малих інтервалах часу ми маємо не врегульовану (засобами РПН) систему зі змінним у часі профілем напруги у вузлах. Тому можливі такі ситуації, які призводять до стрімкого зростання напруги на стороні інвертора [6] внаслідок наступних факторів:

- падіння споживання в електромережі при незмінному рівні генерації ФЕС;
- зростання генерації ФЕС при незмінному рівні споживання;
- одночасного зростання генерації ФЕС і падіння споживання в електромережі.

Моделювання цих трьох ситуацій було здійснено нами на основі розрахунків статичного режиму схеми (передбачалося, що статичний режим встигає встановитися зі змінами рівнів споживання і фотогенерації). Позначення  $Z_{\Sigma 1}, Z_{\Sigma 2}$  на схемі рисунка 2 відповідають сумі імпедансів  $Z_{\Sigma 1} = Z_{T1} + Z_{Line1}$ ,  $Z_{\Sigma 2} = Z_{T2} + Z_{Line2}$ . Локальне навантаження  $S_{2L}$  на низьковольтній

стороні трансформатора  $T_2$  приймалося рівним нулю, оскільки його можна врахувати відніманням від потужності генерації  $S_G$ .

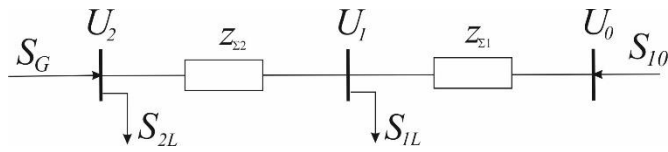


Рисунок 2 – Еквівалентна трьохвузлова схема заміщення для підключення ФЕС до розподільної мережі

Розрахункові параметри схеми наступні: трансформатори  $T_1$  – 1.6 МВА, 10/35 кВ,  $T_2$  – 40 кВА, 0.4/10 кВ; загальна довжина розподільної лінії 20 км, складається з відрізків Line1, Line2 довжиною  $L_1$ ,  $L_2$ , що прокладені проводом АС-35; з'єднувальна лінія довжиною  $L_3$  прокладена кабелем СІП 4×25. При моделюванні вважалося, що РПН трансформатора ПС налаштований для умов відсутності генерації ФЕС і забезпечує напругу в останньому вузлі радіальної лінії (вузол ФЕС) на необхідному рівні – не нижче 95% від номінальної 380 В.

Змінення напруги  $U_3$  в СТП при зростанні навантаження випадку показано на рисунку 3.

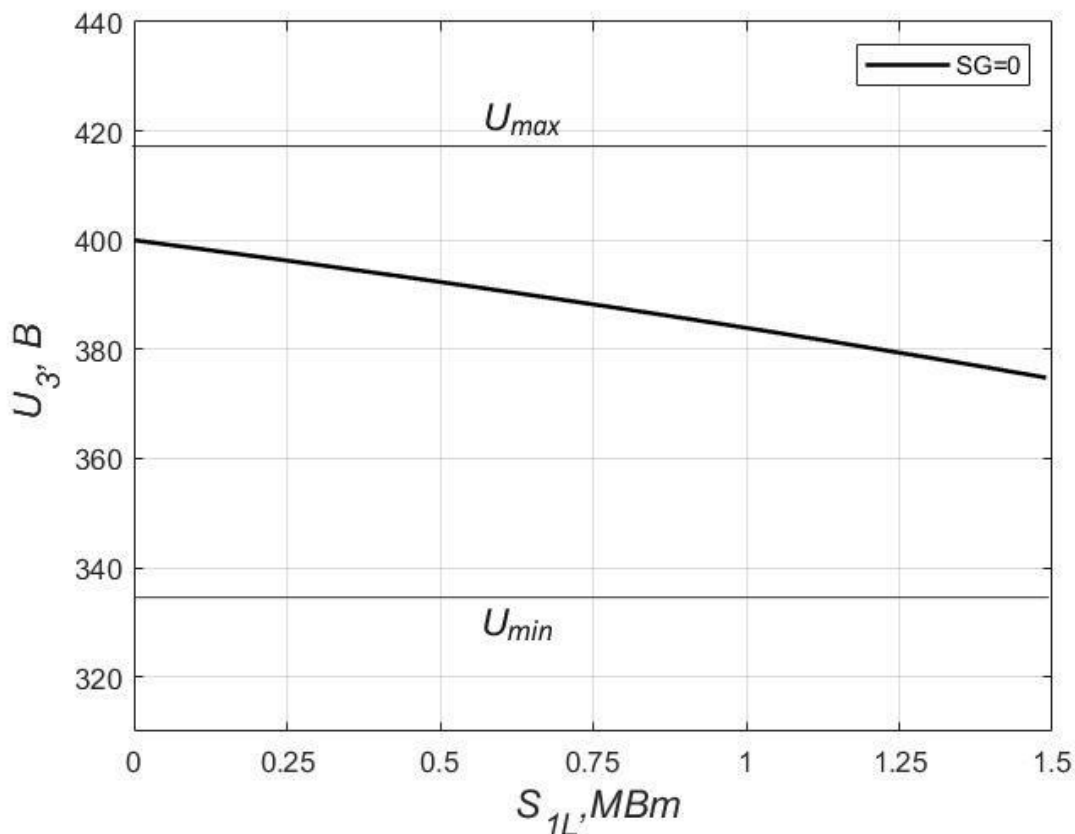


Рисунок 3 – Залежність вихідної напруги інвертора від навантаження радіальної лінії при  $L_1 = L_2 = 10$  км

Для різних варіантів розміщення навантаження вздовж лінії при генерації ФЕС потужності (активної)  $S_G = P_G = 30$  кВт на рисунку 4 показані графіки залежності вихідної напруги  $U_3$  ( $S_{1L}$ ) від потужності навантаження. Для

ілюстрації розмаху значень  $U_3$  при змінненні рівня генерації на графіках ще нанесені криві залежності  $U_3(S_{1L})$  для  $S_G = 0$  (пунктирні лінії). Верхні рисунки (а, б) відповідають більш довгої з'єднувальної лінії довжиною  $L_3 = 200$  м, нижні (г, д) – більш короткої лінії з  $L_3 = 20$  м.

З порівняння кривих на рисунках можна побачити, що чим ближче вузол мережевого навантаження знаходиться до ФЕС, тим в сильніше змінення потужності  $S_{1L}$  впливає на напругу в СТП  $U_3$ . Проміжок між кривими для  $P_G = 30$  кВт і  $P_G = 0$  відповідає робочій області інвертора, яка обмежена гранично допустимими напругами  $U_{min}$ ,  $U_{max}$ , визначеними стандартами. Порівняння рисунків у верхньому і нижньому рядках показує, що чим більше довжина з'єднувальної лінії, тим в більших межах змінюється  $U_3$  зі зміною генерації  $P_G$  (більше ширина робочої області по вертикалі). Тобто при незмінному навантаженні  $S_{1L}$  зростання генерації більш суттєво впливає на  $U_3$  у випадку Line3 з більшим імпедансом.

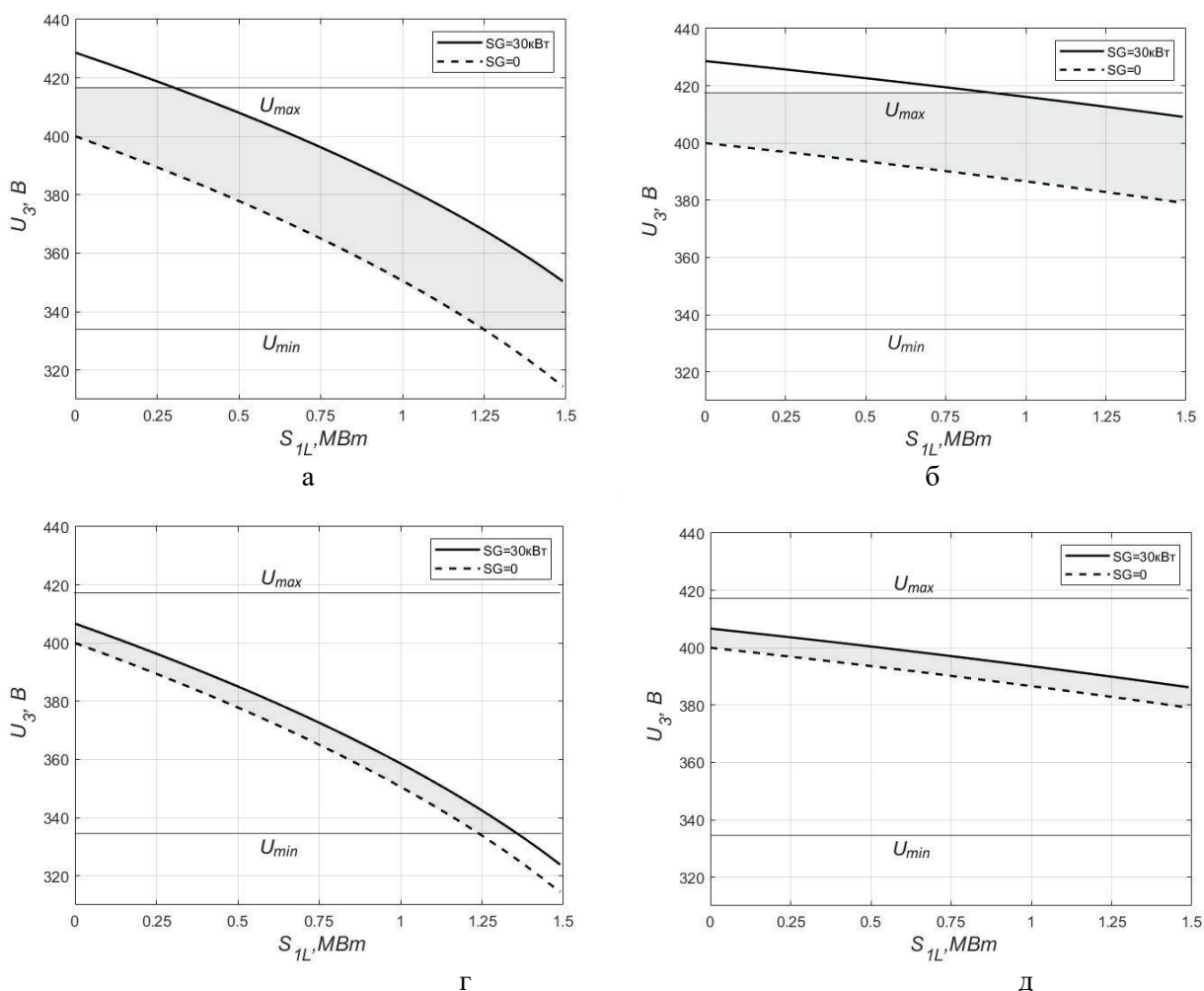


Рисунок 4 – Графіки залежності вихідної напруги інвертора  $U_3$  від величини навантаження  $S_{1L}$  в розподільній мережі при наявності та відсутності генерації ( $S_G = 30$  кВт та  $S_G = 0$ ) для: а –  $L_1/L_2 = 4$ ,  $L_3 = 200$  м; б –  $L_1/L_2 = 0.25$ ,  $L_3 = 200$  м; в –  $L_1/L_2 = 4$ ,  $L_3 = 200$  м; г –  $L_1/L_2 = 0.25$ ,  $L_3 = 200$  м.

**Висновки.** Модель ФЕС, яка підключена до радіальної розподільної мережі, при змінному споживанні, у вузлу розташованому на відстані від ФЕС показує:

1. Тимчасове падіння потужності навантаження в радіальній мережі може призвести при максимальній генерації ФЕС до суттєвого зростання напруги в СТП і перевищення її над гранично допустимої. В зв'язку з цим необхідно враховувати співвідношення рівнів генерації ФЕС і споживання в електромережі.

2. Вплив падіння потужності навантаження на ріст напруги в СТП зростає з підвищенням загального імпедансу мережевого обладнання (розподільної лінії і підвищувачого трансформатора) та з'єднувального кабелю між інвертором і трансформатором.

3. Вплив тимчасового падіння навантаження в розподільній лінії на прирощення напруги в СТП зростає при наближенні вузла з переважним падінням потужності навантаження до ФЕС. При розподілі навантаження мережі переважно ближче до вузла підключення ФЕС будемо мати більший вплив зміни потужності навантаження на коливання напруги в СТП.

4. Амплітуда коливань напруги в СТП при зміні навантаження тим більше, чим більше імпеданс з'єднувального кабелю на низьковольтній стороні трансформатора.

#### Перелік посилань

1. A. Hirsch, Y. Parag, J. Guerrero. Microgrids: A review of technologies, key drivers, and outstanding issues. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018, V.90, P. 402-411.
2. M. Rezkallah, A. Chandra, B. Singh and S. Singh. Microgrid: Configurations, Control and Applications. *IEEE Transactions on Smart Grid*. 2019, V.10, No.2, P. 1290-1302.
3. О.Ю. Гаєвський, Г.М. Гаєвська, В.В. Бодняк, М.О. Коновалов. Причини підвищення напруги у вузлі підключення ФЕС до розподільної мережі та інверторне регулювання напруги. *Відновлювана енергетика*. 2022, №1, с.
4. IEEE Recommended Practice for Utility Interface of Photovoltaic (PV) Systems, USA, IEEE Std 929-2000. <https://standards.ieee.org/standard/929-2000.html>
5. IEEE Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces, USA, IEEE Std 1547–2018.
6. А.Ю. Гаевский, В.В. Бодняк, А.Н. Гаевская. Анализ мониторинговых данных о работе PV-инверторов, подключенных к распределительной сети. *Альтернативная энергетика и экология (ISJAE)*. 2018, № 31-36, с. 279-284.