

М. В. БАЗИЛЕВИЧ

ВИЗНАЧЕННЯ ГРАНИЧНОГО ЗНАЧЕННЯ НАПРУГИ В ТОЧЦІ ПРИЄДНАННЯ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

Для побутових сонячних електростанцій не розраховують режими електричної мережі. Відомо, що напруга в точці встановлення сонячної електростанції може перевищувати допустиму. Таке підвищення напруги спричиняє вихід електрообладнання з ладу. Існуючі методи передбачають знаходження напруги шляхом повного розрахунку режимів електричної мережі. Це непрактично і незручно, особливо для розподільних мереж 0,4 кВ. Запропоновано знаходити найбільш ймовірне граничне значення напруги в точці встановлення сонячної електростанції без розрахунку режиму електричної мережі із використанням інформації про значення напруги в центрі живлення. Напруга в точці встановлення сонячної електростанції в основному залежить від генерованої потужності сонячної електростанції, опору лінії, потужності навантаження, що ввімкнено на напругу 0,4 кВ, і напруги на шинах 0,4 кВ пункту живлення. Напруга майже не залежить від потужності силового трансформатора, параметрів ліній 10 кВ і параметрів ліній 0,4 кВ, крім лінії «центр живлення–сонячна електростанція». Напруга в точці встановлення сонячної електростанції буде найвищою у випадку, коли на лінії немає навантаження. Запропоновано методи, які дозволяють аналітично знайти максимальне значення напруги в точці встановлення сонячної електростанції без використання методів послідовних наближень. Враховано, що сонячна електростанція, як правило, працює в режимі видачі максимальної активної потужності. Визначено значення напруги в точці встановлення сонячної електростанції за різними аналітичними формулами. Визначено точність знаходження напруги за різними формулами. Встановлено, що для досягнення необхідної точності слід враховувати залежність струму на виході сонячної електростанції від напруги в точці підключення. Розглянуто модифікацію формул з ціллю спрощення їх застосування. Розглянуті умови знаходження граничного можливого значення напруги в точці встановлення сонячної електростанції. Для цього необхідно, щоб аргумент вектору падіння напруги на лінії був рівний аргументу вектору напруги на шинах пункту живлення. Це досягається тим, що сонячна електростанція генерує активну і реактивну потужність у певному співвідношенні. Показана недоцільність знаходження граничного можливого значення напруги в точці встановлення сонячної електростанції через незначну різницю із найбільш ймовірним значенням напруги при значному ускладненні обчислень.

Ключові слова: сонячна електростанція, розрахунок режимів, мережа 0,4 кВ, напруга в мережі.

Н. В. БАЗИЛЕВИЧ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАКСИМАЛЬНОГО ЗНАЧЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ В ТОЧКЕ ПРИСОЕДИНЕНИЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Для бытовых солнечных электростанций не рассчитывают режимы электрической сети. Известно, что напряжение в точке установки солнечной электростанции может превышать допустимое. Такое повышение напряжения приводит к выходу электрооборудования из строя. Существующие методы предусматривают нахождения напряжения путем полного расчета режимов электрической сети. Это не практично и неудобно, особенно для распределительных сетей 0,4 кВ. Предложено находить наиболее вероятное пороговое значение напряжения в точке установки солнечной электростанции без расчета режима электрической сети с использованием информации о значении напряжения в центре питания. Напряжение в точке установки солнечной электростанции в основном зависит от генерируемой мощности солнечной электростанцией, сопротивления линии, мощности нагрузки, включенной на напряжение 0,4 кВ и напряжения на шинах 0,4 кВ пункта питания. Напряжение практически не зависит от мощности силового трансформатора, параметров линий 10 кВ и параметров линий 0,4 кВ, кроме линии «центр питания - солнечная электростанция». Напряжение в точке установки солнечной электростанции будет самой высокой в случае, когда на линии нет нагрузки. Предложены методы, которые позволяют аналитически найти максимальное значение напряжения в точке установки солнечной электростанции без использования методов последовательных приближений. Учтено, что солнечная электростанция, как правило, работает в режиме выдачи максимальной активной мощности. Определены значения напряжения в точке установки солнечной электростанции по различным аналитическим формулам. Определены точность нахождения напряжения по разным формулам. Установлено, что для достижения необходимой точности следует учитывать зависимость тока на выходе солнечной электростанции от напряжения в точке подключения. Рассмотрены модификации формул с целью упрощения их применения. Рассмотрены условия нахождения предельно возможного значения напряжения в точке установки солнечной электростанции. Для этого необходимо, чтобы аргумент вектора падения напряжения на линии был равен аргументу вектора напряжения на шинах пункта питания. Это достигается тем, что солнечная электростанция генерирует активную и реактивную мощность в определенном соотношении. Показана нецелесообразность нахождения предельно возможного значения напряжения в точке установки солнечной электростанции из-за незначительной разницы с наиболее вероятным значением напряжения при значительном усложнении вычислений.

Ключевые слова: солнечная электростанция, расчет режимов, сеть 0,4 кВ, напряжение в сети.

M. V. BAZYLEVYCH

DETERMINATION OF THE MAXIMUM VOLTAGE AT THE PHOTOVOLTAIC POWER PLANT CONNECTION POINT

The modes of the electrical network have not been calculated for the photovoltaic power plants if they are used for small and medium-sized applications. It is known that the voltage at the point of installation of a photovoltaics power plant may exceed the critical limit voltage and as a result it may cause the emergency with the electrical equipment. According to the existing methods, it is possible to find the voltage only by full electrical network modes calculating. In practice such calculation is not convenient, especially for 0.4 kV distribution networks. The suggestion is to find the most probable limit voltage at the point of installation of a photovoltaic power plant without calculating the mode of the electrical network using instead the information about the voltage value in the power supply centre. The voltage at the installation point of the photovoltaic power plant mainly depends on the generated power of the photovoltaics power plant, line resistance, load power connected to a voltage of 0.4 kV and bus voltages of 0.4 kV of the power supply. The voltage hardly depends on the power of the power transformer, the parameters of 10 kV lines and the parameters of 0.4 kV lines, except for the line

© М. В. Базилевич, 2021

"power centre–photovoltaic power plant". The highest voltage at the point of installation of the photovoltaics power plant will be in the case when the load on the line is absent. The suggested methods allow finding analytically the maximum value of voltage at the point of installation of a photovoltaic power plant without using of the successive approximations methods. As a rule the photovoltaics power plant operates in the mode of delivery of the maximum active power. By the range of various analytical formulas, the value of voltage at the point of installation of a photovoltaic power plant has been determined. The accuracy of finding the voltage by different formulas has also been determined. It is established that in order to achieve the required accuracy, the dependence of the current at the output of the photovoltaics power plant on the voltage at the connection point should be taken into account. Modification of formulas for the purpose of simplification of their application is considered. The conditions for finding the maximum possible voltage value at the point of installation of a photovoltaics power plant are considered. This requires that the argument of the voltage drop vector on the line be equal to the argument of the voltage vector on the busbars of the power supply. This is achieved by the fact that the photovoltaic power plant generates active and reactive power in a certain ratio. It is shown the inexpediency of finding the maximum possible voltage value at the point of installation of a photovoltaic power plant due to a small difference with the most possible voltage value with a significant complication of calculations.

Keywords: photovoltaic power plant, calculation of electric network modes, 0,4 kV network, voltage in electric networks.

Актуальність проблеми та її зв'язок з прикладними задачами. В Україні все більше будується побутових та промислових сонячних електростанцій (СЕС). Основною ціллю побудови таких СЕС є отримання прибутку від продажу електроенергії за «зеленим тарифом». При побудові СЕС були невраховані принципи побудови розподільчих мереж. Типові розподільні мережі спроектовані так, що електрична енергія від центру живлення по радіальних лініях передається до споживачів. Величина напруги поступово знижується від центру живлення до кінця лінії. При побудові СЕС не враховувалось, що СЕС є генератором. Тобто до радіальної лінії підключався ще один центр живлення із підвищеним рівнем напруги. В результаті в мережах 0,4 кВ зростає рівень напруги. Наслідком підвищення рівня напруги став вихід побутових приладів з ладу. На даний час не визначалось, наскільки встановлення СЕС може підвищити рівень напруги в мережі. Знаючи рівень напруги після встановлення СЕС, можна визначити необхідні додаткові заходи, які дозволять підтримувати значення напруги в допустимих межах.

Огляд публікацій і недоліки відомих рішень. Відхилення напруги від номінальної в мережах 0,4 кВ регулюється стандартом [1]. У ньому прописано, що відхилення напруги від номінальної на повинне перевищувати $\pm 10\%$ від номінального значення. Стандарти по встановленню СЕС не визначають способи підключення СЕС до мережі і регламентують розрахунок режимів тільки для СЕС із потужністю, понад 150 кВт [2]. Для побутових СЕС потужністю до 30 кВт не передбачено проводити розрахунок режимів мережі. Практично, не дивлячись на існуючі проблеми, енергопостачальні компанії і проектні організації не проводять розрахунок режимів при ввімкненні СЕС. Наслідком цього є вихід обладнання споживачів з ладу.

Існує значна кількість публікацій, в яких розглядається розрахунок режимів при ввімкненні СЕС. Можна виділити спільні риси цих публікацій:

- розрахунок режимів відбувався для мереж середньої та високої напруги;
- розрахунок відбувався для СЕС із потужністю понад 150 кВт;
- для розрахунку використовувались програмні комплекси, призначені для розрахунку режимів електричних мереж [3, 4].

Результати розрахунку режимів для промислових СЕС можна контролювати пристроями телевимірів (які мають бути встановлені на СЕС [2]) і пристроями релейного захисту від підвищеної напруги, які можуть

бути встановлені як на СЕС, так і на підстанціях. Мережі 0,4 кВ мають особливості: вони дуже розгалужені; в них не встановлені пристрої телемеханіки та телевимірів; в них не встановлені пристрої релейного захисту від підвищення напруги. Можна вважати надлишковим використання програмних комплексів розрахунку режимів для визначення напруги в точці приєднання СЕС.

Найбільш поширений спосіб розрахунку режиму радіальної електричної мережі по напрузі на початку лінії та потужності в кінці лінії передбачає використання методу послідовного наближення [5, 6]. Цей метод не є ефективним для практичного використання.

Для практичних цілей досить встановити максимальну напругу в точці підключення СЕС без розрахунку режиму мережі і визначити чи перевищить вона допустимі межі чи ні і за яких умов це станеться.

Мета статті – описати простий спосіб визначення максимальної напруги в точці підключення СЕС без використання послідовних наближень з достатньою для практичних цілей точністю.

Основний матеріал і отримані результати. Встановлені на СЕС інвертори служать для перетворення електричної енергії постійної напруги на виході сонячних панелей в енергію змінної напруги і видачі цієї енергії в електричну мережу. Такі інвертори керуються мережею [7, 8]. Інвертори підключаються або на фазні напруги, або на лінійні. Всі сучасні інвертори зібрані на напівпровідникових приладах і можуть працювати при великих коливаннях напруги в зовнішній електричній мережі. Наприклад, інвертор, із номінальною лінійною напругою 400 В може працювати при зміні напруги в точці підключення в межах 304÷477 В [8]. Також, інвертор може генерувати не тільки активну потужність, але й генерувати/споживати реактивну енергію. Коефіцієнт потужності може змінюватися в межах від $-0,8$ ємнісного (генерація реактивної потужності) до $+0,8$ індуктивного (споживання реактивної потужності). При цьому максимальна повна потужність не може перевищувати допустимого значення для даного типу інвертора, тобто при генерації/споживанні максимальної реактивної потужності, інвертор автоматично знижує генерування активної потужності. Потужність на виході інвертора не залежить від прикладеної напруги. При дослідженнях інвертор будемо розглядати як генератор.

На рис. 1 подана типова схема мережі 0,4 кВ із встановленою СЕС.

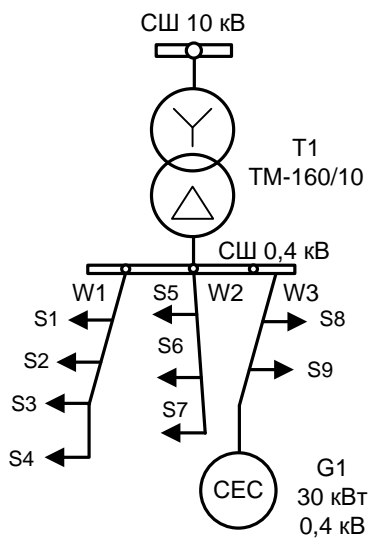


Рисунок 1 – Типова схема мережі 0,4 кВ

Вихідними даними для визначення напруги в точці приєднання СЕС будемо вважати:

- потужність СЕС;
- параметри лінії 0,4 кВ між трансформаторним пунктом (ТП) і СЕС;
- значення напруги на шинах 0,4 кВ ТП (вважаємо, що маємо інформацію про значення напруги на ТП).

Найвищу напругу в точці приєднання СЕС будемо визначати за наступних допущень:

- СЕС видає максимальну потужність;
- навантаження даної електричної мережі дорівнює 0;
- видавана СЕС потужність не залежить від напруг (фазних/лінійних) у точці приєднання (побутові СЕС трифазні) та їх несиметрії, за умови, що напруги залишаються в робочих межах інвертора (не електричної мережі);

- напруга на шинах 0,4 кВ ТП відома;
- електрична мережа симетрична;
- параметри інших ліній, що відходять від ТП не враховуємо, оскільки вони не впливають на напругу в місці встановлення СЕС;
- ємності фаз не враховуємо.

Обов'язково враховуємо, що напруга в точці приєднання СЕС залежить від напруги на шинах ТП. Для зручності розрахунків приймаємо, що початкова фаза напруги на шинах ТП дорівнює 0° . Опором трансформатора, встановленого на ТП і опором ліній 10 кВ, що живлять дане ТП, нехтуємо, оскільки їх опір є значно меншим за опір ліній 0,4 кВ.

Для розрахунків враховуємо тільки параметри лінії між ТП і СЕС. При розрахунках також враховуємо, що видаваний СЕС струм залежить від напруги в точці приєднання.

На рис. 2 показана заступна схема мережі із врахуванням умов, перелічених вище.

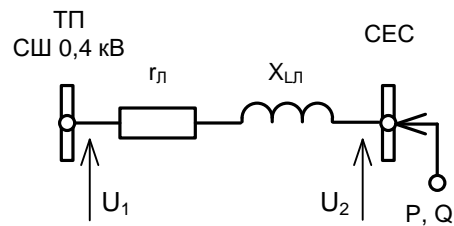


Рисунок 2 – Заступна схема мережі

На основі рис. 2 складаємо рівняння електричного кола по другому закону Кірхгофа:

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_1 + \sqrt{3} \cdot \dot{I}_{\text{СЕС}} \cdot \underline{Z}, \quad (1)$$

де U_1 та U_2 – лінійна напруга на шинах ТП і в точці приєднання СЕС, відповідно, В;

$\dot{I}_{\text{СЕС}}$ – генерований СЕС струм, А;

\underline{Z} – повний опір лінії між ТП і СЕС, Ом.

Генерований СЕС струм визначається за формулою [9]:

$$\dot{I}_{\text{СЕС}} = \frac{\bar{S}}{\sqrt{3} \cdot \bar{U}_2}, \quad (2)$$

де \bar{S} – комплексно-спряжене значення повної потужності СЕС, ВА;

\bar{U}_2 – комплексно-спряжене значення напруги в точці підключення СЕС, В.

Падіння напруги на лінії залежить від повного струму, що по ній протікає – при даному струмі падіння напруги на лінії буде завжди одне й те ж, незалежно від співвідношення між активною та реактивною потужністю, яку генерує СЕС (за умови, що напруга в точці підключення СЕС лишається тією самою). Але значення напруги в точці підключення СЕС буде залежати і від аргумента вектора падіння напруги на лінії. Тому будемо розглядати два випадки: ймовірне граничне значення напруги в точці підключення СЕС $U_{\text{тип}}$ і гранично можливе значення напруги в точці підключення СЕС U_{max} . Перший випадок можливий у випадку, коли СЕС виробляє тільки активну потужність [10]. У цьому даному випадку формула (2) спроститься до вигляду:

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_1 + \frac{P}{\bar{U}_2} \cdot \underline{Z}, \quad (3)$$

де P – максимальне значення активної потужності на виході СЕС, Вт.

Підставивши (3) в (1), спростивши вираз і перенісши всі члени в ліву сторону отримуємо рівняння:

$$\dot{U}_2 \cdot \bar{U}_2 - \dot{U}_1 \cdot \bar{U}_2 - P \cdot \underline{Z} = 0. \quad (4)$$

Рівняння (4) має два комплексних розв'язки. Шуканим розв'язком є більше за модулем число. Менше за модулем число – уявний розв'язок, який непридатний для використання, оскільки такий низький рівень напруги неможливий в реальній електричній мережі. Дане рівняння може бути

розв'язане за допомогою математичного пакету MathCAD [11].

Точність формули (1) оцінювали, порівнюючи отримано аналітично результати із результатами програмного комплексу ДАКАР [3]. Для порівняння також застосували спрощену формулу обчислення напруги в точці приєднання СЕС (на предмет її практичного використання):

$$\dot{U}_2 = U_1 + \frac{P}{U_{\text{НОМ}}} \cdot Z, \quad (5)$$

де $U_{\text{НОМ}}$ – номінальне значення напруги на шинах ТП, дорівнює 380 В.

Для перевірки було змодельовано частину мережі 0,4 кВ. Живлення мережі 0,4 кВ відбувається від ТП. ТП підключено до системи 10 кВ безмежної потужності. На ТП встановлено трансформатор типу ТМ-160/10 потужністю 160 кВА. СЕС підключена до ТП за допомогою лінії, виконаної з проводу типу АС-25/4,2 із погонними параметрами: $r_0 = 1,8$ Ом/км, $x_0 = 0,319$ Ом/км. Довжина лінії 400 метрів. В кінці лінії встановлено СЕС потужністю 30 кВА. Інформацію про елементи електричної мережі взято з [12 і 13]. Дослідження проводили при п'яти рівнях напруги на шинах низької напруги ТП: від $U_{\text{min}} = 342$ В (0,9 від $U_{\text{НОМ}} = 380$ В) до $U_{\text{max}} = 418$ В (1,1 від $U_{\text{НОМ}}$) із кроком 19 В (5% від $U_{\text{НОМ}}$).

Результати обчислення напруги в точці приєднання СЕС показані в табл. 1.

Таблиця 1 – Результати знаходження напруги в точці приєднання СЕС різними методами

№	$U_1, \text{В}$	$U_{2\text{зр}}, \text{В}$	$U_2, \text{В}$	$U_{2\text{спр}}, \text{В}$
1	342,0	378,5	379,1	379,3
2	361,0	396,5	396,5	398,3
3	380,0	413,5	414,0	417,3
4	399,0	432,4	431,6	436,3
5	418,0	449,3	449,3	455,3

У табл. 1 використано наступні позначення:

- $U_{2\text{зр}}$ – напруга, визначена за допомогою комплексу ДАКАР (взята за зразкову);
- U_2 – напруга, визначена за допомогою (4);
- $U_{2\text{спр}}$ – напруга, визначена за допомогою (5);
- $U_{2\text{max}}$ – гранично можливе значення напруги.

З табл. 1 видно, що втрати напруги на лінії зменшуються при збільшенні напруги на шинах ТП від 36,5 В (при напрузі 342 В) до 31,3 В (при напрузі 418 В). Різниця становить 15 %. Це означає, що обов'язково слід враховувати залежність струму на виході інвертора СЕС від напруги в точці встановлення СЕС.

З табл. 1 видно, що результати, отримані за допомогою комплексу ДАКАР, і аналітичні (за формулою (4)) практично співпадають – різниця між ними не перевищує 0,6 В або 0,15 %. Ця точність достатня для практичного застосування формули (4). Результати, отримані за допомогою спрощеної

формули (5), суттєво відрізняються від зразкових – різниця досягає 6 В або 1,4 %. Цього недостатньо для практичного застосування.

Формули (4) і (5) можна вдосконалити. У формулі (4) незручним є використання комплексно-спряженого множника. Це не дозволяє розв'язувати рівняння як звичайне квадратне. Оскільки в електричній мережі поперечна складова падіння напруги є незначною, порівняно із поздовжньою і, відповідно, фаза напруги U_2 несуттєво відрізняється від фази напруги U_1 , формулу можна записати наступним чином:

$$\bar{U}_2^2 - \dot{U}_1 \cdot \bar{U}_2 - P \cdot \underline{Z} = 0. \quad (6)$$

Недоліком формули (5) є низька точність. Підвищити точність можна за рахунок врахування залежності струму СЕС від напруги. У першому наближенні можна прийняти, що струм від СЕС обернено пропорційний напрузі на шинах ТП. Тому формулу (5) можна записати:

$$\dot{U}_2 = U_1 + \frac{P}{U_1} \cdot \underline{Z}. \quad (7)$$

Величина U_2 безпосередньо визначається із цієї формули.

Результати, отримані за модифікованими формулами (6) та (7), наведені в табл. 2.

Таблиця 2 – Результати знаходження напруги в точці приєднання СЕС за допомогою модифікованих формул

№	$U_1, \text{В}$	$U_{2\text{зр}}, \text{В}$	$U_{2\text{мод}}, \text{В}$	$U_{2\text{спрмод}}, \text{В}$
1	342,0	378,5	379,5	383,4
2	361,0	396,5	396,9	400,2
3	380,0	413,5	414,3	417,3
4	399,0	432,4	431,9	434,5
5	418,0	449,3	449,6	451,9

У табл. 2 використано наступні позначення:

- $U_{2\text{зр}}$ – напруга, визначена за допомогою комплексу ДАКАР (взята за зразкову);
- $U_{2\text{мод}}$ – напруга, визначена за допомогою (6);
- $U_{2\text{спрмод}}$ – напруга, визначена за допомогою формули (7).

З табл. 2 видно, що результати, отримані за допомогою модифікованої формули (6), хоч і гірші за результати, отримані за формулою (4), але достатньо точні для практичного використання. Точність отриманих результатів за формулою (7) є недостатньою для практичного використання.

Похибки знаходження напруги різними методами зведено в табл. 3. У табл. 3 $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3, \Delta_4$ – абсолютні похибки знаходження напруги за формулами (4), (5), (6) і (7) відповідно.

Гранично можливе значення напруги U_{max} в точці підключення СЕС буде у випадку, коли СЕС вироблятиме одночасно і активну, і реактивну потужності. Як правило, інвертори СЕС налаштовані, щоб видавати тільки активну потужність (оплата йде саме за виробіток активної енергії). Тому знаходження

U_{\max} становить більший науковий інтерес. U_{\max} буде у випадку, коли напруга в точці встановлення СЕС співпадатиме по фазі з напругою на ТП (рис. 3). Вектор напруги U_2 є сумою двох векторів: вектора напруги на ТП U_1 і вектора падіння напруги на лінії. З математики відомо, що сума двох векторів має найбільше значення, коли вони мають однакові аргументи (за умови, що величина векторів не змінюється). Тобто, падіння напруги на лінії має співпадати по фазі із напругою на ТП.

Таблиця 3 – Абсолютні похибки знаходження напруги в точці приєднання СЕС

№	$U_1, \text{В}$	$\Delta 1, \text{В}$	$\Delta 2, \text{В}$	$\Delta 3, \text{В}$	$\Delta 4, \text{В}$
1	360,0	-0,6	-0,8	-1,0	-4,9
2	380,0	0,0	-1,8	-0,4	-3,7
3	400,0	-0,6	-3,8	-0,8	-3,8
4	420,0	0,8	-3,9	0,5	-2,1
5	440,0	0,0	-6,2	-0,3	-2,6

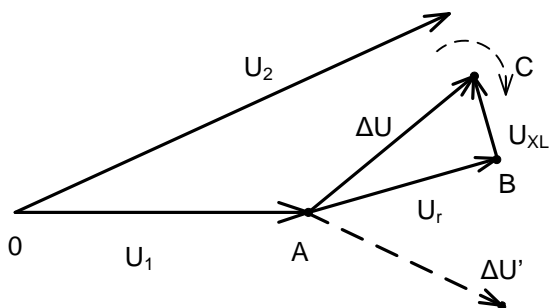


Рисунок 3 – Векторна діаграма напруг в мережі

Співвідношення падіння напруги на активному r і реактивному X_L опорах лінії не залежить від потужності, яку генерує СЕС, чи співвідношення між активною та реактивною потужністю. Воно залежить тільки від співвідношення опорів лінії, оскільки по активному і реактивному опорі протікатиме той самий струм від СЕС. Змінюватиметься тільки аргумент результуючого вектора ΔU .

Оскільки напруга в точці встановлення СЕС залежить від параметрів лінії та співвідношення між генерованою активною та реактивною потужністю і є нелінійною залежністю, то U_{\max} шукатимемо числовим методом. Слід врахувати обмеження на $\cos\phi$, з якими працюють інвертори. Міркуючи подібно, можна знайти і мінімальне значення напруги в точці встановлення СЕС (при роботі на максимальну потужність) (табл. 4).

Таблиця 4 – Результати знаходження гранично можливого та найменшого значення напруги в точці приєднання СЕС

№	$U_1, \text{В}$	$U_{\max}, \text{В}$	$U_{2\min}$	$U_{2\text{зр}}, \text{В}$
1	342,0	380,4	375,3	378,5
2	361,0	397,8	392,9	396,5
3	380,0	415,2	410,5	413,5
4	399,0	432,8	428,3	432,4
5	418,0	450,5	446,2	449,3

З табл. 4 можна помітити, що різниця між гранично можливим, найменшим і типовим значенням напруги в точці приєднання СЕС не перевищує 1,7 В. При цьому обчислення гранично можливого значення напруги суттєво складніше. Тому для побутових СЕС досить обчислювати найбільш ймовірне значення напруги в точці приєднання СЕС

Висновки. Граничне значення напруги в точці приєднання СЕС можна знайти аналітично, розв'язавши рівняння. Для забезпечення точності необхідно враховувати залежність струму на виході СЕС від напруги в точці встановлення. Граничне значення напруги в точці встановлення СЕС можна оцінити по значенню напруги на ТП та параметрах лінії між ТП і СЕС. Даний метод ефективний, в першу чергу, для СЕС, встановлених в мережі 0,4 кВ. Гранично можливе значення незначно більше від найбільш ймовірного значення напруги при суттєво простішому методі знаходження останнього, тому доцільно знаходити найбільш ймовірне значення напруги в точці встановлення СЕС. Модифікована формула із заміною добутку комплексної змінної на комплексно-спряжену формулу із добутком комплексно-спряжених змінних перетворює рівняння на квадратне із простим розв'язком.

Список літератури

1. ДСТУ EN 50160:2014. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності (EN 50160:2010, IDT) / Нац. Стандарт України. Київ: Мінекономрозвитку України, 2014. 27 с.
2. СОУ НЕК 341.001:2019. Вимоги до вітрових та сонячних електростанцій при їх роботі паралельно з об'єднаною енергетичною системою України / Стандарт підприємства. Київ: ДП «Національна енергетична компанія «Укренерго», 2019. 43 с.
3. Потужний програмний інструмент для моделювання, аналізу, планування та оптимізації сучасних електроенергетичних систем. URL: <https://dakar.eleks.com/> (дата звернення: 15.05.2021).
4. PowerFactory 2021. URL: <https://www.digsilent.de/en/> (дата звернення: 10.02.2021).
5. Сегеда М. С. Електричні мережі та системи: Підручник. 3-є видання перероблене та доповнене. Львів: Вид-во Національного ун-ту "Львівська політехніка", 2015. 540 с.
6. Кирик В. В. Електричні мережі та системи. Режим роботи розімкнених мереж: навчальний посібник. Київ: НТУУ «КПІ», 2014. 130 с.
7. Мережевий сонячний інвертор з резервною функцією AXIOMA energy. Інструкція користувача SGRID BF 3000, SGRID BF 5000. URL: https://sun-energy.com.ua/image/pdf/ISGRID_BF_3-5kv.pdf (дата звернення: 20.05.2021).
8. Growatt 7000TL3-S/8000TL3-S/9000TL3-S/10000TL3-S/11000TL3-S Технічний паспорт. URL: https://e-energy.in.ua/solar_inverters/setevoj-invertor-growatt%20A08000tl3-s.html (дата звернення: 22.05.2021).
9. Лук'яненко Ю. В., Остапчук Ж. І., Кулик В. В. Розрахунки електричних мереж при їх проектуванні. Навчальний посібник. Вінниця: ВДТУ, 2002. 116 с.
10. Базилевич М. В. Розрахунок граничного значення напруги в точці підключення сонячної електростанції. Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я. Тези доповідей XXIX міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2020. Ч. 2 (18-20 травня 2021 р.). Харків: НТУ «ХПІ», 2021. С. 54
11. PTC Mathcad Prime 5.0. URL: <http://mathcad.com.ua/news.php?name=20-08-2018>. (дата звернення: 10.02.2021).
12. Типовые конструкции, изделия и узлы зданий и сооружений. Серия 3.407.1-136. Железобетонные опоры ВЛ 0,38 кВ. Выпуск 1.

Материалы для проектирования. Рабочие чертежи. Сельэнергопроект. 1985. 107 с.

13. Неклепаев Б. П., Крючков И. П. *Электрическая часть электростанций и подстанций: Справочные материалы для курсового и дипломного проектирования: Учеб. пособие для вузов*. Москва: Энергоатомиздат, 1989. 608 с.

References (transliterated)

1. *DSTU EN 50160:2014. Kharakterystyky napruhy elektropostachannya v elektrychnykh mrezhakh zahal'noyi pryznachenosti (EN 50160:2010, IDT)* [State Standard 50160:2014. Characteristics of electricity voltage in general purpose electrical networks]. Kyiv, Ministry of Economic Development and Trade of Ukraine Publ., 2014. 27 p.
2. *SOU NEK 341.001:2019. Vymohy do vitrovykh ta sonyachnykh elektrostansiy pry yikh roboti paralel'no z ob'yednanyu enerhetychnoyu systemoyu Ukrayiny* [Company Standard 341.001:2019. Requirements for wind and solar power plants during their operation in parallel with the unified energy system of Ukraine]. Kyiv, National Power Company Ukrenergo Publ., 2019. 43 p.
3. *Potuzhnyy prohramnyy instrument dlya modelyuvannya, analizu, planuvannya ta optymizatsiyi suchasnykh elektroenerhetychnykh system* [Powerful software tool for modeling, analysis, planning and optimization of modern power systems] Available at: <https://dakar.eleks.com/> (accessed 15.05.2021).
4. *PowerFactory 2021*. Available at: <https://www.digsilent.de/en/> (accessed 10.02.2021).
5. Segeda M. S. *Elektrychni mrezhi ta systemy: Pidruchnyk. 3-ye vydannya pereroblene ta dopovnene* [Electrical Networks and Systems]. Lviv, Lviv Polytechnic Publ., 2015. 540 p.
6. Kyryk V. V.. *Elektrychni mrezhi ta systemy. Rezhymy roboty rozimknykh mrezh: navchal'nyy posibnyk* [Electrical networks and systems. Modes of operation of open networks: A textbook]. Kyiv: NTUU "KPI" Publ., 2014. 130 p.
7. *Merezhevyy sonyachnyy inverter z rezervnoyu funktsiyeyu AXIOMA energy. Instruksiya korystuvacha SGRID BF 3000, SGRID BF 5000* [Mains solar inverter with backup function AXIOMA energy. User guide SGRID BF 3000, SGRID BF 5000]. Available at: https://sun-energy.com.ua/image/pdf/ISGRID_BF_3-5kv.pdf (accessed 20.05.2021).
8. *Growatt 7000TL3-S/8000TL3-S/9000TL3-S/10000TL3-S/11000TL3-S Tekhichnyy pasport* [Growatt 7000TL3-S/8000TL3-S/9000TL3-S/10000TL3-S/11000TL3-S/ Data sheet]. Available at: https://e-energy.in.ua/solar_inverters/setevoj-invertor-growatt%C2%A08000tl3-s.html (accessed 22.05.2021).
9. Lukianenko U. V., Ostapchuk G. I., Kulyk V. V. *Rozrakhunky elektrychnykh mrezh pry yikh proektuvanni. Navchal'nyy posibnyk* [Electrical networks calculations in their design. Tutorial]. Vinnytsja, VSTU Publ., 2002. 116 p.
10. Bazylevych M. V. *Rozrakhunok hranychnoho znachennya napruhy v tochti pidklyuchennya sonyachnoyi elektrostansiyi* [Calculation of the limit voltage value at the connection point photovoltaic power plant]. *Informatsiyi tekhnolohiyi: nauka, tekhnika, tekhnolohiya, osvita, zdorov'ya. Tezy dopovidey XXIX mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi MicroCAD-2020. Ch. 2 (18-20 travnya 2021 r.)*. [Information technology: science, engineering, technology, education, health. Abstracts of the XXIX Int. Sci.-Pract. Conf. MicroCAD-2020. Part 2 (18-20 May 2021)]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2021, p. 54.
11. *PTC Mathcad Prime 5.0*. Available at: <http://mathcad.com.ua/news.php?name=20-08-2018> (accessed 10.02.2021).
12. *Tipovye konstruksii, izdeliya i uzly zdaniy i sooruzheniy. Seriya 3.407.1-136. Zhelezobetonnye opory VL 0,38 kV. Vypusk 1. Materialy dlya proektirovaniya. Rabochie chertezhi* [Typical constructions, products and units of buildings and structures. Series 3.407.1-136. Reinforced concrete supports of 0.38 kV overhead lines. Issue 1. Materials for design. Working drawings]. Selenergoprojekt Institute Publ., 1985. 107 p.
13. Neklepaev B. P., Kruchkov I. P. *Elektricheskaya chast' elektrostansiy i podstansiy: Spravochnye materialy dlya kursovogo i diplomnogo proektirovaniya: Ucheb. posobie dlya vuzov* [Electrical part of power plants and substations: Reference materials for course and diploma design: Textbook. Manual for universities]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1989. 608 p.

Надійшла (received) 23.05.2021

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Базилевич Микола Володимирович (Базилевич Николай Владимирович, Bazylevych Mykola Volodymyrovych) – інженер кафедри електроенергетики та систем управління Національного університету «Львівська політехніка»; м. Львів, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0171-2064>; e-mail: Mykola.V.Bazylevych@lpnu.ua.