

**В. О. Комар**<sup>1</sup>  
**В. В. Тептя**<sup>1</sup>  
**О. В. Сікорська**<sup>1</sup>  
**А. А. Болдирев**<sup>1</sup>

## **ВПЛИВ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ НА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ**

<sup>1</sup>Вінницький національний технічний університет

Сумарна встановлена потужність відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) у 2021 році досягнула майже 10 відсотків від встановленої потужності ОЕС України. Це стало можливим завдяки державному стимулюванню у вигляді «зеленого тарифу». Однак, відсутність обґрунтованого підходу до визначення точки приєднання ВДЕ до електричної мережі (ЕМ) та її потужності призвело до зменшення ефективності функціонування ЕМ.

Через неспівмірні потужності ВДЕ та споживачів, які приєднанні до одного фідера, збільшуються втрати активної потужності, погіршуються показники якості електричної енергії (відхилення напруги), перевантажуються елементи електричної мережі (лінії електропередачі, силові трансформатори). Це все посилюється тим, що ЕМ проектувались та будувались за принципами централізованого електропостачання, для яких поява зустрічних потоків електроенергії є ненормальним режимом.

Фотоелектричні станції, які становлять майже 80 % ВДЕ в Україні, мають технічну можливість реалізувати вплив на перетікання реактивної енергії в мережі. Цю можливість підтверджено аналізом результатів натурних експериментів на діючих об'єктах та математичним моделюванням за допомогою Simulink Matlab.

Оптимізація перетоків реактивної потужності є найефективнішим засобом зменшення втрат активної потужності і енергії та покращення показників якості електричної енергії. Тому в роботі запропоновано метод визначення кількості генерованої реактивної потужності фотоелектричною станцією в залежності від точки її приєднання і конфігурації мережі.

**Ключові слова:** електричні мережі, відновлювані джерела енергії, втрати електроенергії, фотоелектричні станції, енергоефективність, реактивна потужність.

### **Вступ**

Приєднання до розподільних електричних мереж (ЕМ) 110(35)—10(6) кВ відновлюваних джерел електроенергії (ВДЕ) призвело до невідповідності експлуатаційних умов ЕМ, що проектувались в умовах централізованого електропостачання, а отже, до необхідності розв'язання нових задач, пов'язаних із забезпеченням необхідного рівня їхньої енергоефективності. Аналіз впливу ВДЕ на енергоефективність розподільних електричних мереж підтверджує необхідність системного підходу до розбудови таких джерел енергії, що потребує визначення засобів підвищення ефективності функціонування РЕМ і їхньої значущості.

Одним з ефективних заходів щодо зниження втрат в розподільних електричних мережах є компенсація реактивної потужності [1], [2]. Враховуючи особливості фотоелектричних станцій (ФЕС), які становлять майже 80 % ВДЕ на території України, доцільним є проведення аналізу можливості використання таких станцій для регулювання перетоків реактивної потужності в електричних мережах, до яких вони приєднані.

### **Результати досліджень**

Розглянемо основні режими роботи інверторів, оскільки вони є основним елементом ФЕС, який зв'язує її з мережею. На рис. 1 показано фрагмент електричної схеми з інвертором і векторні діаг-

рами до неї. З їхнього аналізу можна говорити про те, що за рахунок зміни кута запалювання тиристорів інвертора можна досягати різних кутів між струмом і напругою, що в електричній мережі буде спричиняти зміну перетоків реактивної потужності.

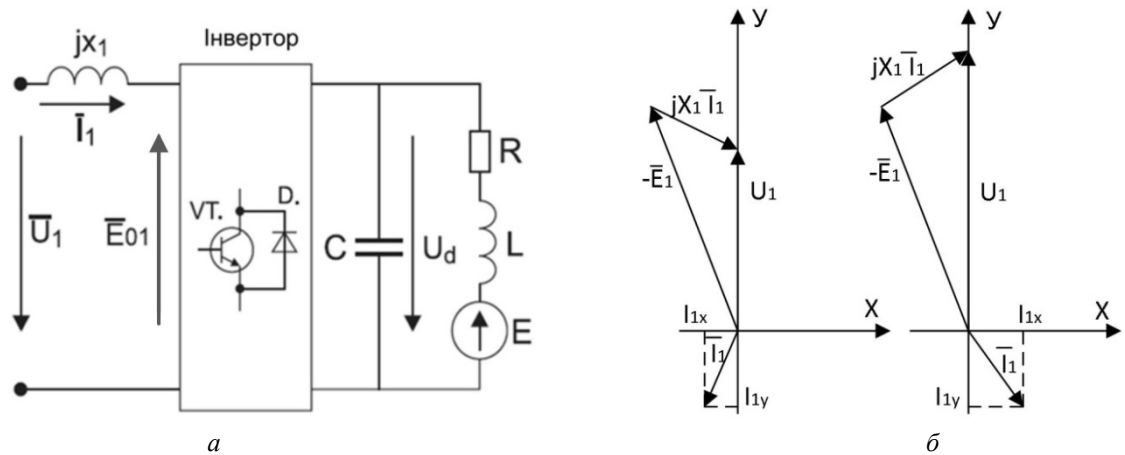


Рис. 1: а — фрагмент електричної схеми; б — векторні діаграми

Проведені натурні експерименти з інверторами на наявних фотоелектричних станціях підтверджують коректність висновків, зроблених за векторними діаграмами (див. рис. 1). На рис. 2, 3 показано графіки зміни активної і реактивної потужностей відповідно. Ці графіки отримані як копія з екрану системи АСКОЕ, яка виконує моніторинг режимних параметрів в точці приєднання ФЕС до електричної мережі.

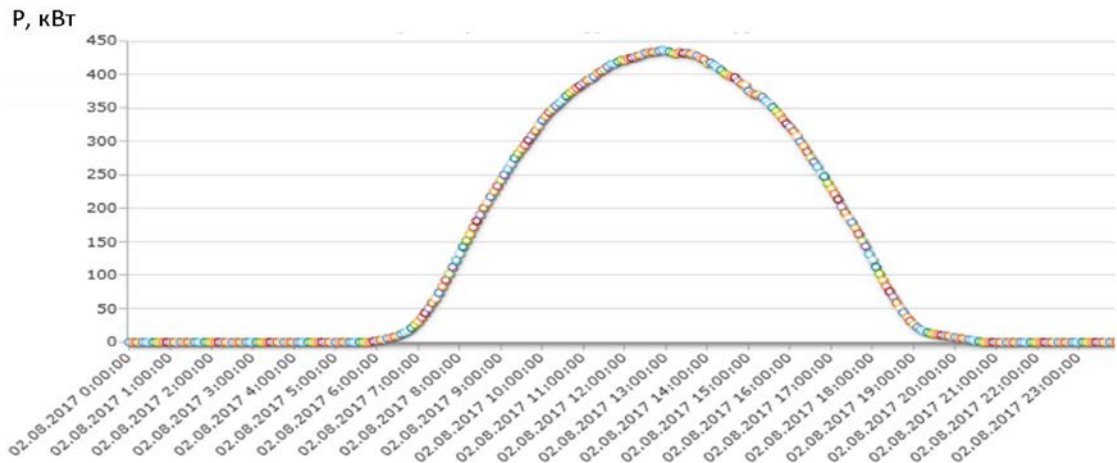


Рис. 2. Графік зміни активної потужності



Рис. 3. Графік зміни реактивної потужності

Промислові інвертори, які встановлюються на ФЕС, працюють в режимі підтримання коефіцієнта потужності в точці приєднання станції до електричної мережі на рівні одиниці. Тому спостерігаються такі незначні зміни реактивної потужності на рис. 3. Однак виробники інверторів передбачили інші режими: забезпечення заданого значення коефіцієнта потужності (відмінного від одиниці); забезпечення заданого значення реактивної потужності в точці приєднання ФЕС до мережі.

Оскільки, інвертори, в основному, використовуються в режимі підтримання коефіцієнта потужності на рівні одиниці, то провести натурні експерименти з іншими режимами не було можливості. Тому аналіз інших режимів проведено математичним моделюванням в середовищі Simulink Matlab R2018a. За основу взято модель представлену в базі прикладів Matlab — “power\_PVarray\_grid\_det”. Це модель фотоелектричної станції зі встановленою потужністю 100 кВт, яка під’єднана до електричної системи значно більшої потужності через електричну мережу 10 кВ. Оскільки ця модель відпрацьовувала лише один з можливих режимів, які реалізують сучасні інвертори, проведено вдосконалення системи керування інвертором для можливості реалізації не лише режиму видачі активної потужності з коефіцієнтом потужності рівним одиниці, а також підтримання заданого його значення, відмінного від одиниці, і підтримання заданого рівня реактивної потужності в точці приєднання ФЕС (рис. 4). До того ж, параметри моделі змінено у відповідності до параметрів реальної ФЕС для перевірки адекватності моделі. Вихідні дані сонячної інсоляції і температури сонячних панелей взяті для середньостатистичного дня без опадів, значної хмарності та вітру.

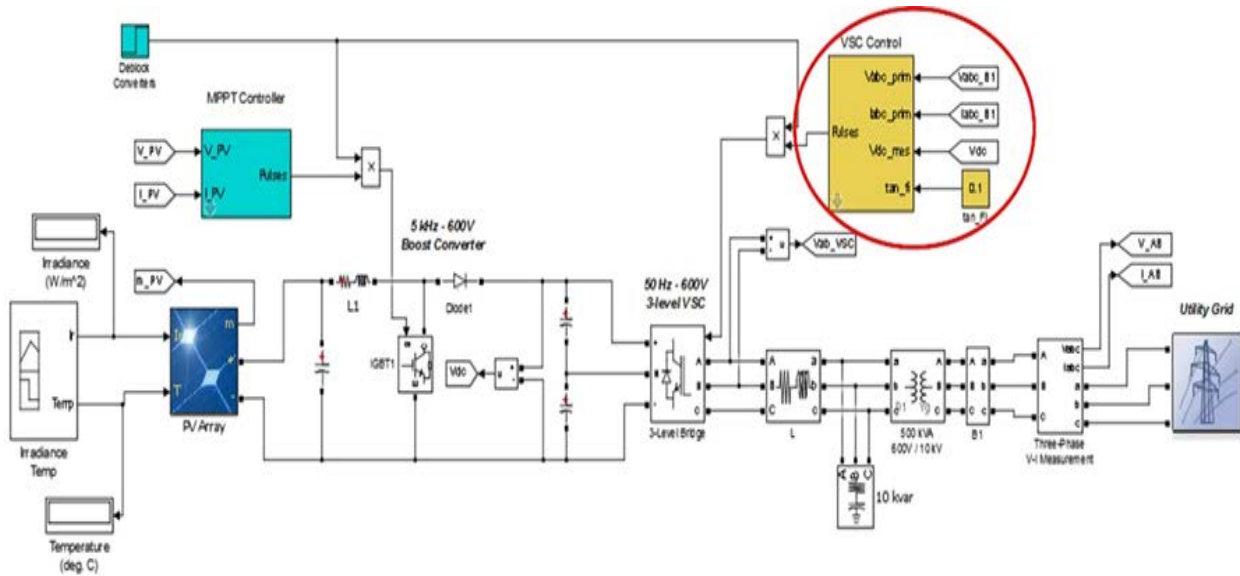


Рис. 4. Simulink-модель з вдосконаленою системою керування інвертором

На рис. 5 показано результати моделювання режиму підтримання коефіцієнта потужності на рівні 0,995. Крива 1 відповідає зміні генерованої активної потужності в точці приєднання станції (на стороні 10 кВ трансформатора). Крива 2 відповідає графіку, заявленому на передодні у відповідності до закону про ринок електричної енергії [3]. Криві 3 і 4 відповідні змінам діючих значень реактивної потужності і усереднених на годинних інтервалах. Оскільки джерела реактивної енергії в інверторі немає, то такий результат можна пояснити зміною потоків реактивної потужності в електричній мережі внаслідок зміни кута між струмом і напругою в точці приєднання фотоелектричної станції.

На рис. 6 показано результати моделювання режиму підтримання сталого значення генерованої реактивної потужності. В результаті моделювання отримано режим, який спостерігається за максимальної генерованої активної і реактивної потужності, коли знижується генерована активна потужність через обмеження максимального струму, який перетікає через інвертор.

Аналіз результатів моделювання підтверджує технічну можливість впливу фотоелектричних станцій на перетоки реактивної потужності в електричній мережі, до якої вони приєднуються.

Для визначення необхідного значення реактивної потужності в розподільній електричній мережі, яку можуть генерувати ФЕС в залежності від місць їхнього встановлення, пропонується розглянути лінійну модель нормального режиму, отриману представленням навантаження та генерації вузлів ЕМ у вигляді розрахованих задавальних струмів, буде цілком еквівалентна початковій нелінійній моделі для конкретного моменту часу [4], [5].

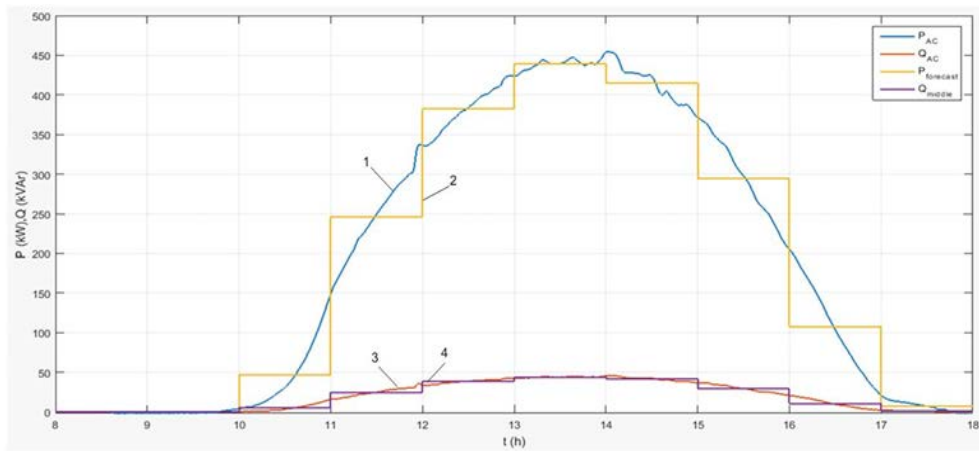


Рис. 5. Результати моделювання режиму підтримання коефіцієнта потужності на рівні 0,995

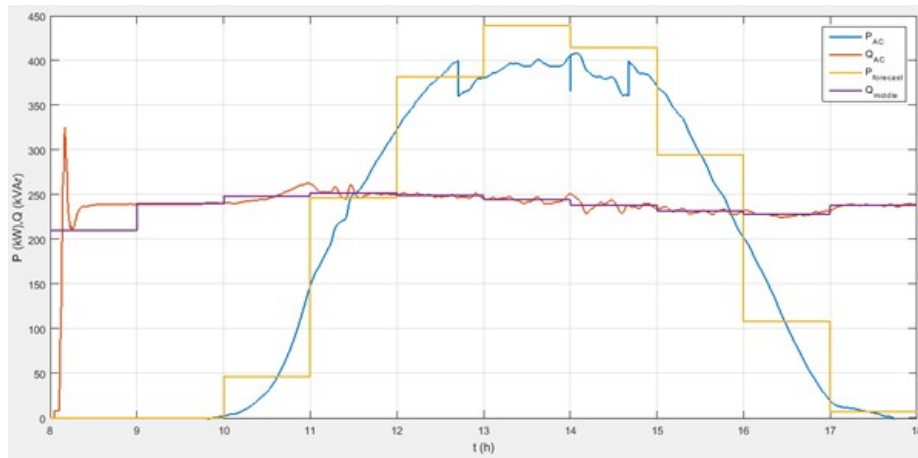


Рис. 6. Результати моделювання режиму підтримання сталого значення генерованої реактивної потужності

Розглянемо найпростіший випадок — магістральну ЕМ з трьома навантаженнями (рис. 7), що виконує розподіл електроенергії від центру живлення до трансформаторних підстанцій 10/0,4 кВ. Навантаження вузлів ЕМ задається постійним по модулю та фазі струмом.

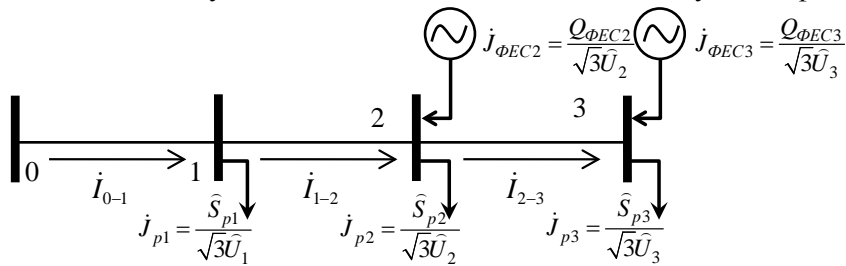


Рис. 7. Схема найпростішого перетікання потужності в магістральній мережі з компенсацією реактивної потужності засобами ФЕС

елементи поперечної складової заступної схеми ЛЕП враховані струмовими навантаженнями у розрахункових навантаженнях вузлів. Згідно з методом накладання через головну ділянку (0—1) будуть протікати узгоджено спрямовані часткові струми  $\dot{I}_1$ ,  $\dot{I}_2$  та  $\dot{I}_3$ , зумовлені навантаженням окремих ТП 10/0,4 кВ та функціонуванням засобів компенсації реактивної потужності (в нашому випадку фотоелектричні станції). Для цього випадку часткові струми дорівнюють відповідно  $\dot{I}_1 = \dot{J}_2$ ;  $\dot{I}_2 = \dot{J}_3$ ;  $\dot{I}_3 = \dot{J}_4$ . Таким чином втрати потужності у цій ЛЕП дорівнюють

$$\Delta \dot{S} = 3|\dot{I}_{1-2}|^2 \cdot \dot{Z}_{1-2} = 3|\dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3|^2 \cdot \dot{Z}_{1-2}. \quad (1)$$

Для дійсної площини струмів рівняння набуде вигляду

$$\Delta \dot{S} = 3 \left[ (I'_1 + I'_2 + I'_3)^2 + (I''_1 + I''_2 + I''_3)^2 \right] \dot{Z}_{1-2}, \quad (2)$$

де  $I', I''$  — дійсні та уявні складові часткових струмів.

Якщо виділити з уявних складових струмів складові, зумовлені наявністю додаткових джерел реактивної потужності  $I''_{\text{ФЕС}2}, I''_{\text{ФЕС}3}$ , то

$$\Delta \dot{S}_{1-2} = 3 \left[ (I'_1 + I'_2 + I'_3)^2 + (I''_{p1} + I''_{p2} + I''_{p3})^2 - \left\{ 2(I''_{p1} + I''_{p2} + I''_{p3})(I''_{\text{ФЕС}2} + I''_{\text{ФЕС}3}) - (I''_{\text{ФЕС}2} + I''_{\text{ФЕС}3})^2 \right\} \right] \dot{Z}_{1-2}. \quad (3)$$

З (3) видно, що на величину зменшення втрат потужності за рахунок використання ФЕС впливає не тільки їхня поточна потужність  $Q_{\text{ФЕС}}$ , але, що важливіше, співвідношення між реактивними складовими струмів навантаження  $I''_p$  та струмів, зумовлених дією ФЕС  $I''_{\text{ФЕС}}$  (зазначені струми є суто реактивними у припущенні про відсутність поперечної складової спадів напруги в ЕМ і чисельно рівні відповідним задавальним струмам  $\dot{J}_{\text{ФЕС}2}, \dot{J}_{\text{ФЕС}3}$ ).

З огляду на (3), втрати потужності в ЕМ після використання ФЕС в режими генерування реактивної потужності можуть бути подані у вигляді двох складових:

$$\Delta \dot{S}_{\Sigma\_ \text{ФЕС}} = \Delta \dot{S}_{\Sigma} - \delta \dot{S}_{\text{ФЕС}}, \quad (4)$$

перша з яких є втратами потужності в ЕМ до використання ФЕС, а друга — визначає ступінь зменшення втрат за рахунок їхнього використання.

Виділивши останню складову з (4) та виконавши низку перетворень, аналогічно з [6], можна отримати вирази, що характеризують зменшення втрат в ЕМ від використання ФЕС у окремих вузлах ЕМ:

$$\begin{aligned} \delta \dot{S}_{(I''_{\text{ФЕС}2})} &= 3I''_{\text{ФЕС}2} \left[ \left( \frac{2I''_{\Sigma} - I''_{\text{ФЕС}2}}{I''_{\text{ФЕС}2}} \right) - \left( \frac{I''_{\text{ФЕС}3}}{I''_{\text{ФЕС}2}} \right) \right] Z_{0-1}; \\ \delta \dot{S}_{(I''_{\text{ФЕС}3})} &= 3I''_{\text{ФЕС}3} \left[ \left( \frac{2I''_{\Sigma} - I''_{\text{ФЕС}3}}{I''_{\text{ФЕС}3}} \right) - \left( \frac{I''_{\text{ФЕС}2}}{I''_{\text{ФЕС}3}} \right) \right] Z_{0-1}, \end{aligned} \quad (5)$$

де  $I''_{\Sigma} = (I''_{p1} + I''_{p2} + I''_{p3})$  — сумарний реактивний розрахунковий струм (без урахування ФЕС), що протікає по заданій вітці ЕМ.

Узагальнюючи вирази (5) та вводячи позначення за аналогією з (5), отримуємо:

$$\delta \dot{S}_k (I''_{\text{ФЕС}i}) = 3I''_{\text{ФЕС}i} \left[ \frac{2 \sum_{j \in N_k} I''_{pj} - I''_{\text{ФЕС}i}}{I''_{\text{ФЕС}i}} - \frac{\sum_{\substack{j \in N_k \\ j \neq i}} I''_{\text{ФЕС}j}}{I''_{\text{ФЕС}i}} \right] Z_k, \quad (6)$$

де  $k$  — номер вітки електричної мережі;  $N_k$  — множина вузлів ЕМ, що отримують живлення цією віткою.

З (6) видно, що зменшення втрат потужності у поздовжній частині лінії електропередач від використання  $i$ -ї ФЕС залежить не тільки від значення її струму, але і від значень розрахункових струмів навантаження та струмів від інших ФЕС, що протікають цією лінією. Ця обставина обов'язково має враховуватися для ефективного вибору потужності генерованої ФЕС від місця їхнього встановлення. Величину цього впливу можна охарактеризувати коефіцієнтами впливу

$$\gamma_k^+ (I''_{\text{ФЕС}i}) = 2 \sum_{j \in N_k} \frac{I''_{pj}}{I''_{\text{ФЕС}i}} - 1; \quad \gamma_k^- (I''_{\text{ФЕС}i}) = \sum_{\substack{j \in N_k \\ j \neq i}} \frac{I''_{\text{ФЕС}j}}{I''_{\text{ФЕС}i}}. \quad (7)$$

Вказані коефіцієнти можуть набувати довільні значення в залежності від величини та напрямку розрахункових струмів навантаження та струмів ФЕС, що протікають  $k$ -ю ЛЕП і зумовлені перетоками реактивної потужності до (від) окремих ТП 10/0,4 кВ. При цьому,  $\gamma_k^+ > 0$  вказують на наявність позитивного ефекту від використання ФЕС,  $\gamma_k^- > 0$  вказують на величину його зменшення за рахунок впливу ФЕС у суміжних вузлах (ТП 10/0,4 кВ). Зважаючи на це, лише у випадку  $\gamma_k^- = 0$  (тобто відсутності перетоків від інших ФЕС у певній вітці) місце встановлення та реактивна потужність ФЕС може вибиратися, з огляду на електричну відстань від відповідної ТП 10/0,4 кВ до центру живлення.

З урахуванням (7) вираз для визначення сумарного ефекту зменшення втрат потужності у ЕМ від використання ФЕС у  $i$ -му вузлі ЕМ може бути переписаний у такому вигляді:

$$\delta\dot{S}_{\Sigma}(I_{\text{ФЕС}i}) = \sum_{k \in \mathbf{M}_i} \delta\dot{S}_k(I_{\text{ФЕС}i}) = \sum_{k \in \mathbf{M}_i} \left[ 3I_{\text{ФЕС}i}^2 \left( \gamma_k^+(I_{\text{ФЕС}i}) - \gamma_k^-(I_{\text{ФЕС}i}) \right) \dot{Z}_k \right]. \quad (8)$$

де  $\mathbf{M}_j$  — множина віток електричної мережі, що з'єднують центр живлення з вузлом встановлення  $i$ -ї ФЕС.

Враховуючи коефіцієнти чутливості (7), можна підібрати фрагмент електричної мережі та ТП 10/0,4 кВ, для яких використання ФЕС буде максимально ефективним, а використовуючи (8), — підібрати реактивну потужність ФЕС, що забезпечить максимальний ефект зменшення втрат у заданому режимі та електроенергії за певний проміжок часу.

Розглянемо задачу оптимізації потужностей ФЕС за реактивною потужністю за критерієм мінімуму втрат. Місце встановлення ФЕС визначено заздалегідь технічними умовами на приєднання. Тому постає задача визначення оптимальної реактивної потужності ФЕС, тобто такої, що забезпечить у характерних режимах мінімальні втрати потужності в ЕМ. Для ухвалення остаточного рішення щодо реактивних потужностей ФЕС доцільно скористатися методом аналізу чутливості.

Використовуючи (6), запишемо вираз зменшення втрат потужності в ЕМ за рахунок генерування реактивної потужності ФЕС, встановленої у вузлі 3:

$$\begin{aligned} \delta\dot{S}_{\Sigma}(I_{\text{ФЕС}3}) = & 3I_{\text{ФЕС}i}^2 \left[ \frac{2(I_{p1}'' + I_{p2}'' + I_{p3}'') - I_{\text{ФЕС}3}''}{I_{\text{ФЕС}3}''} - \frac{I_{\text{ФЕС}2}''}{I_{\text{ФЕС}3}''} \right] Z_{0-1} + \\ & + 3I_{\text{ФЕС}i}^2 \left[ \frac{2(I_{p1}'' + I_{p2}'' + I_{p3}'') - I_{\text{ФЕС}3}''}{I_{\text{ФЕС}3}''} - \frac{I_{\text{ФЕС}2}''}{I_{\text{ФЕС}3}''} \right] Z_{1-2} + \\ & + 3I_{\text{ФЕС}i}^2 \left[ \frac{2(I_{p1}'' + I_{p2}'' + I_{p3}'') - I_{\text{ФЕС}3}''}{I_{\text{ФЕС}3}''} \right] Z_{2-3}. \end{aligned} \quad (9)$$

Після нескладних перетворень

$$\delta\dot{S}_{\Sigma}(I_{\text{ФЕС}3}) = 3I_{\text{ФЕС}i}^2 \left[ \frac{2I_{p1}''}{I_{\text{ФЕС}3}''} Z_{0-1} + \frac{2I_{p2}'' - I_{\text{ФЕС}2}''}{I_{\text{ФЕС}3}''} (Z_{0-1} + Z_{1-2}) + \frac{2I_{p3}'' - I_{\text{ФЕС}3}''}{I_{\text{ФЕС}3}''} (Z_{0-1} + Z_{1-2} + Z_{2-3}) \right] \quad (10)$$

або, помноживши вираз у дужках на  $I_{\text{ФЕС}3}''$ , отримаємо

$$\delta\dot{S}_{\Sigma}(I_{\text{ФЕС}3}) = 3I_{\text{ФЕС}i}^2 \left[ \begin{aligned} & (2I_{p1}'')Z_{0-1} + (2I_{p2}'' - I_{\text{ФЕС}2}'')(Z_{0-1} + Z_{1-2}) + \\ & + (2I_{p3}'' - I_{\text{ФЕС}3}'')(Z_{0-1} + Z_{1-2} + Z_{2-3}) \end{aligned} \right]. \quad (11)$$

Узагальнюючи на електричну мережу довільної конфігурації

$$\delta\dot{S}_{\Sigma}(I_{\text{ФЕС}k}) = 3I_{\text{ФЕС}k}^2 \left[ \sum_{i=1}^n (2I_{pi}'' - I_{\text{ФЕС}i}'') \sum_{j \in \mathbf{M}_{ki}} Z_j \right], \quad (12)$$

де  $\mathbf{M}_{ki}$  — множина спільних віток заступної схеми електричної мережі на шляху між центром живлення  $i$ -м вузлом та вузлом  $k$  встановлення ФЕС:  $\mathbf{M}_{ki} = \mathbf{M}_k \cup \mathbf{M}_i$ .

Чутливість втрат потужності  $\Delta\dot{S}$  до зміни струму (потужності) окремої ФЕС  $I_{\text{ФЕС}k}''$  характеризує відповідна похідна. Для її визначення для ФЕС, встановленої у вузлі 3 схеми (див. рис. 7) скористаємося виразами (4) та (11):

$$\frac{\partial \Delta\dot{S}_{\Sigma}(I_{\text{ФЕС}3}'')}{\partial I_{\text{ФЕС}3}''} = -6 \left[ (I_{p1}'')Z_{0-1} + (I_{p2}'' - I_{\text{ФЕС}2}'')(Z_{0-1} + Z_{1-2}) + (I_{p3}'' - I_{\text{ФЕС}3}'')(Z_{0-1} + Z_{1-2} + Z_{2-3}) \right] \quad (13)$$

або, узагальнюючи на розімкнену мережу довільної конфігурації

$$\frac{\partial \Delta \dot{S}_{\Sigma}(I''_{\text{ФЕС}k})}{\partial I''_{\text{ФЕС}k}} = -6 \sum_{i=1}^n \left[ (I''_{pi} - I''_{\text{ФЕС}i}) \sum_{j \in \mathbf{M}_{ki}} Z_j \right]. \quad (14)$$

Використовуючи вирази (14) для всіх  $m$  перспективних місць встановлення джерел реактивної потужності, визначених згідно з вищенаведеним, можна сформуувати систему лінійних рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \Delta \dot{S}_{\Sigma}(I''_{\text{ФЕС}1})}{\partial I''_{\text{ФЕС}1}} = 0; \\ \frac{\partial \Delta \dot{S}_{\Sigma}(I''_{\text{ФЕС}2})}{\partial I''_{\text{ФЕС}2}} = 0; \\ \dots\dots\dots \\ \frac{\partial \Delta \dot{S}_{\Sigma}(I''_{\text{ФЕС}m})}{\partial I''_{\text{ФЕС}m}} = 0, \end{array} \right. \quad (15)$$

розв'язання якої дозволяє визначити оптимальні потужності ФЕС, встановлених у відповідних вузлах. При цьому розмірність системи рівнянь визначається лише кількістю місць встановлення ФЕС.

Отже, розроблений метод, який базується на аналізі чутливості втрат потужності в ЕМ, дозволяє однозначно характеризувати можливість і доцільність використання ФЕС для компенсації реактивної потужності, як найдієвішого заходу зі зменшення втрат для цього фрагменту електричних мереж за економічним критерієм.

### Висновки

Фотоелектричні станції мають технічні можливості для впливу на перетоки реактивної потужності в електричній мережі. Це підтверджено виконанням натурних експериментів та математичним моделюванням. В промислових інверторах, які встановлюються на ФЕС, передбачено різні режими із забезпечення впливу на перетікання реактивної потужності. Реалізуються ці режими зміною кута запалювання IGBT-транзисторів.

Проте, для остаточного висновку про доцільність використання ФЕС у цих режимах потрібно виконати додаткові дослідження температурного режиму інверторів під час роботи в різних режимах та спотворення синусоїди напруги в них.

В залежності від місця приєднання ФЕС до електричної мережі змінюється чутливість до зміни перетікань реактивної потужності. Тому в роботі запропоновано метод, який дозволяє визначити реактивну потужність, в залежності точки приєднання ФЕС, генерування якої дозволить знизити втрати активної потужності і підвищити ефективність функціонування ЕМ.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Національна енергетична компанія «Укренерго», Методичні вказівки з аналізу технологічних витрат електричної енергії та вибору заходів щодо їх зниження: *СОУ-Н ЕЕ 40.1-00100227-96:2014*. Київ: Держ. підпр. «Укренерго», 2014, 84 с.
- [2] П. Д. Лежнюк, і В. В. Кулик, *Оптимальне керування потоками потужності і напругою в неоднорідних електричних мережах*, моногр. Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2004, 188 с.
- [3] НКРЕКП, «Про затвердження нормативно-правових актів, що регулюють діяльність гарантованого покупця та купівлі електричної енергії за "зеленим" тарифом», *Постанова НКРЕКП № 641*, 26 квітня 2019 р. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0641874-19#Text>.
- [4] P. Lezhniuk, O. Rubanenko, V. Komar, and O. Sikorska, "The Sensitivity of the Model of the Process Making the Optimal Decision for Electric Power Systems in Relative Units," in *IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, 2020, pp. 247-252.
- [5] Ю. С. Железко, А. В. Артемьев, и О. В. Савченко, *Расчет и анализ потерь электроэнергии в электрических сетях*. Москва, РФ: ЭНАС, 2008.
- [6] П. Д. Лежнюк, В. В. Кулик, і О. Б. Бурикін, *Взаємовплив електричних мереж і систем в процесі оптимального керування їх режимами*, моногр. Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008.

Рекомендована кафедрою електричних станцій та систем ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 16.02.2023

**Комар Вячеслав Александрович** — д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри електричних станцій та систем, e-mail: kvo76@ukr.net ;

**Тептя Віра Володимирівна** — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електричних станцій та систем, e-mail: teptyavira@gmail.com ;

**Сікорська Олена Вікторівна** — канд. техн. наук, старший викладач кафедри електричних станцій та систем, e-mail: olenasikorska@ukr.net ;

**Болдырев Андрій Андрійович** — аспірант кафедри електричних станцій та систем.

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

**V. O. Komar<sup>1</sup>**  
**V. V. Teptia<sup>1</sup>**  
**O. V. Sikorska<sup>1</sup>**  
**A. A. Boldyrev<sup>1</sup>**

## **Influence of Renewable Energy Sources on the Energy Efficiency of Electric Distribution Networks**

<sup>1</sup>Vinnitsia National Technical University

*The total installed capacity of renewable energy sources (RES) in 2021 reached almost 10 percent of the installed capacity of UES of Ukraine. This became possible due to state incentives in the form of a “green tariff”. However, the lack of a reasonable approach to determining the point of connection of RES to the electric network (EN) and its power has led to the decrease of the effectiveness of the EN operation.*

*Due to the incommensurable capacities of RES and consumers connected to one feeder, losses of active power increase, indicators of the quality of electric energy (voltage deviations) deteriorate, and elements of the electric network (power transmission lines, power transformers) are overloaded. All this is aggravated by the fact that ENs were designed and built according to the principles of centralized power supply, for which the appearance of counterflows of electricity is an abnormal mode.*

*Photoelectric plants, which make up almost 80 percent of RES in Ukraine, have the technical possibility to realize the impact on the flow of reactive energy in the network. This possibility was confirmed by analyzing the results of field experiments on operational objects and mathematical modeling by means of Simulink Matlab.*

*Optimization of the reactive power flows is the most effective means of reducing active power and energy losses and improving electrical energy quality indicators. Therefore, the paper proposes a method for determining the amount of reactive power generated by a photovoltaic plant depending on its connection point and network configuration..*

**Keywords:** electrical networks, renewable energy sources, electricity losses, photovoltaic plants, energy efficiency, reactive power.

**Komar Vyacheslav O.** — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Electrical Plants and Systems, e-mail: kvo76@ukr.net ;

**Teptya Vira V.** — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Chair of Electrical Plants and Systems, e-mail: teptyavira@gmail.com ;

**Sikorska Olena V.** — Cand. Sc. (Eng.), Senior Lecturer of the Chair of Electrical Plants and Systems, e-mail: olenasikorska@ukr.net ;

**Boldyrev Andrii A.** — Post-Graduate Student of the Chair of Electrical Plants and Systems