

УДК 621.316.1

П.Д. Лежнюк<sup>1</sup>, В.О. Комар<sup>1</sup>, С.В. Кравчук<sup>1</sup>, І.О. Бандура<sup>2</sup>  
Вінницький національний технічний університет<sup>1</sup>  
Луцький національний технічний університет<sup>2</sup>

### ФОТОЕЛЕКТРИЧНІ СТАНЦІЇ ЯК ЗАСІБ РЕГУЛЮВАННЯ ПЕРЕТОКІВ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В ЕЛЕКТРИЧНІЙ СИСТЕМІ

*В статті аналізується можливість застосування фотоелектричних станцій в задачі підвищення якості електропостачання. На основі аналізу векторної діаграми інвертора та виконаного імітаційного моделювання підтверджено технічну можливість фотоелектричних станцій впливати на перетоки реактивної потужності в електричній системі. Показано позитивні результати такого впливу на економічність режиму розподільної електричної мережі. Показана необхідність обґрунтування вимог щодо участі фотоелектричних станцій в забезпеченні якості електроенергії.*

*Ключові слова:* електричні мережі, фотоелектричні станції, якість електропостачання, якість електричної енергії.

### П.Д. Лежнюк, В.О. Комар, С.В. Кравчук, І.О. Бандура ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ КАК СРЕДСТВО РЕГУЛИРОВАНИЕ ПЕРЕТОКОВ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

*В статье анализируется возможность применения фотоэлектрических станций в задачи повышения качества электроснабжения. На основе анализа векторной диаграммы инвертора и выполненного имитационного моделирования подтверждено техническую возможность фотоэлектрических станций влиять на перетоки реактивной мощности в электрической системе. Показано положительные результаты такого воздействия на экономичность режима распределительной электрической сети. Показана необходимость обоснования требований по участию фотоэлектрических станций в обеспечении качества электроэнергии.*

*Ключевые слова:* электрические сети, фотоэлектрические станции, качество электроснабжения, качество электрической энергии.

### P. Lezhnyuk, V. Komar, S. Kravchuk, I. Bandura PHOTOELECTRIC STATION AS A MEANS OF REGULATION OF REACTIVE POWER CONNECTIONS IN THE ELECTRICAL SYSTEM

*The article analyzes the possibility of using photovoltaic stations in the task of improving the quality of power supply. Based on the analysis of the vector diagram of the inverter and the simulated simulation carried out, the technical feasibility of the photoelectric stations to influence the flow of reactive power in the electric system has been confirmed. Positive results of such an impact on the economical nature of the distribution grid regime are shown. The necessity of justification of requirements on participation of photoelectric stations in providing of quality of electric power is shown.*

*Keywords:* electrical networks, photovoltaic stations, quality of electricity supply, quality of electric energy.

**Постановка проблеми.** В електроенергетичній галузі здійснюється перехід до децентралізованого електропостачання за рахунок збільшення в балансі електричної енергії складової розосередженого генерування (РГ). Основну частину РГ становлять відновлювані джерела енергії, до яких відносяться фотоелектричні станції (ФЕС).

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Це має як позитивні наслідки (зменшення впливу на екологію, розвантаження мереж вищих класів напруг), так і ряд негативних наслідків, в основному пов'язаних з нестабільністю генерування цими джерелами [1, 2]. Для зменшення негативного впливу РГ, зокрема фотоелектричних електричних станцій, в законі України про ринок електричної енергії [3] передбачено механізм, відповідно до якого такі відновлювані джерела енергії як фото та вітрові електричні станції повинні заявляти свій графік генерування на добу вперед. Це дозволить забезпечити достатній рівень якості електропостачання, який відповідно до статті 18 закону України про ринок електричної енергії [3] характеризується надійністю (безперервністю) електропостачання, комерційною якістю надання послуг з передачі, розподілу та постачання електричної енергії, а також якістю електричної енергії.

**Постановка завдань.** Щодо впливу на якість електричної енергії, то розбудова ФЕС має неоднозначний результат, особливо що стосується несинусоїдності напруг і струмів та відхилень напруги [2]. Забезпечення якості електроенергії на пряму залежить від забезпечення балансу по активній та реактивній потужності в електричній системі. Як джерело електричної енергії фотоелектричні станції є елементом, який здатен впливати на забезпечення якості електропостачання. Щодо балансу по активній потужності, то на законодавчому рівні передбачено необхідність прогнозування добового графіка по активній потужності на добу вперед. Щодо

балансу по реактивній потужності, то оскільки ФЕС не є її джерелом, тому не можна говорити вплив на баланс. Однак технічна здатність інвертора впливати на кут між струмом і напругою на його виході дозволяє впливати на перетоки реактивної потужності в електричній системі.

**Метою дослідження** є аналіз можливості використання ФЕС для впливу на перетоки реактивної потужності в електричній системі.

**Викладення основного матеріалу.** Оскільки одним з основних елементів фотоелектричної станції є інвертор, то з його можливих режимів почнемо аналіз. На рис. 1 показано фрагмент електричної схеми з інвертором з ШІМ керуванням і векторну діаграму до неї.

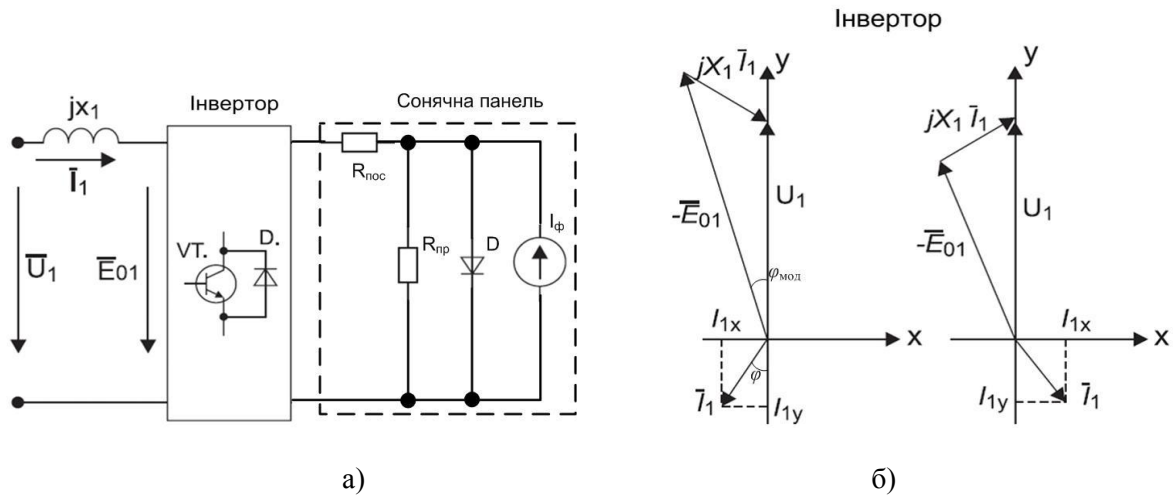


Рис. 1. Фрагмент електричної схеми а) та векторна діаграма б)

Рівняння, складене за другим законом Кіргофа для схеми (рис. 1 а), запишеться так:

$$\bar{U}_1 = \bar{E}_0 + jx_1 \bar{I}_1, \quad (1)$$

де  $\bar{E}_0$ ,  $\bar{U}_1$ ,  $\bar{I}_1$  – результуючі вектори е.р.с. на виході інвертора, напруги мережі і струму,

$$\bar{E}_0 = \mu U_0 e^{j\varphi_{\text{мод}}}, \quad (2)$$

де  $\mu$  – коефіцієнт модуляції,  $\varphi_{\text{мод}}$  – фаза напруги модуляції по відношенню до напруги мережі.

В живлячій мережі збільшення  $\bar{E}_0$  порівняно з  $\bar{U}_1$  призводить до ефекту, що відповідає появі емнісних струмів в точці приєднання ФЕС до електричної мережі. Зменшення  $\bar{E}_0$  порівняно з  $\bar{U}_1$  – індуктивних струмів в мережі.

Отже 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.

Для підтвердження цих висновків виконано математичне моделювання в середовищі Simulink Matlab R2015a. За основу взято модель представлену в базі прикладів Matlab (див. рис. 2) – 'power\_PVarray\_grid\_det' [4]. Оскільки ця модель відпрацьовувала лише один з можливих режимів, які реалізують сучасні інвертори, то вдосконалено модель системи керування інвертором для можливості реалізації режиму видачі активної потужності при коефіцієнті потужності рівному одиниці. Модель дозволяє також підтримувати задане його значення, відмінне від одиниці, і підтримувати заданий рівень реактивної потужності в точці приєднання ФЕС. Крім цього параметри моделі були змінені у відповідності з параметрами реальної ФЕС для перевірки адекватності моделі (дані по сонячній інсоляції і температурі сонячних панелей взяті для середньостатистичного дня без опадів, значної хмарності та вітру).

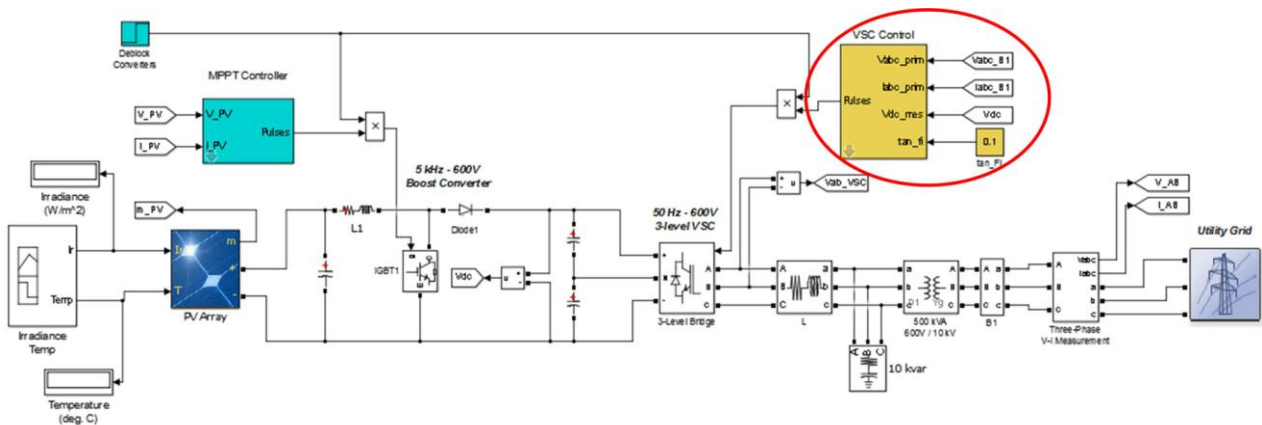


Рис. 2. Simulink-модель з вдосконаленою системою керування інвертором

На рис. 3 показано результати моделювання режиму підтримання коефіцієнту потужності на рівні 0,995. Крива 1 відповідає зміні генерованої активної потужності в точці приєднання станції (на стороні 10 кВ трансформатора).

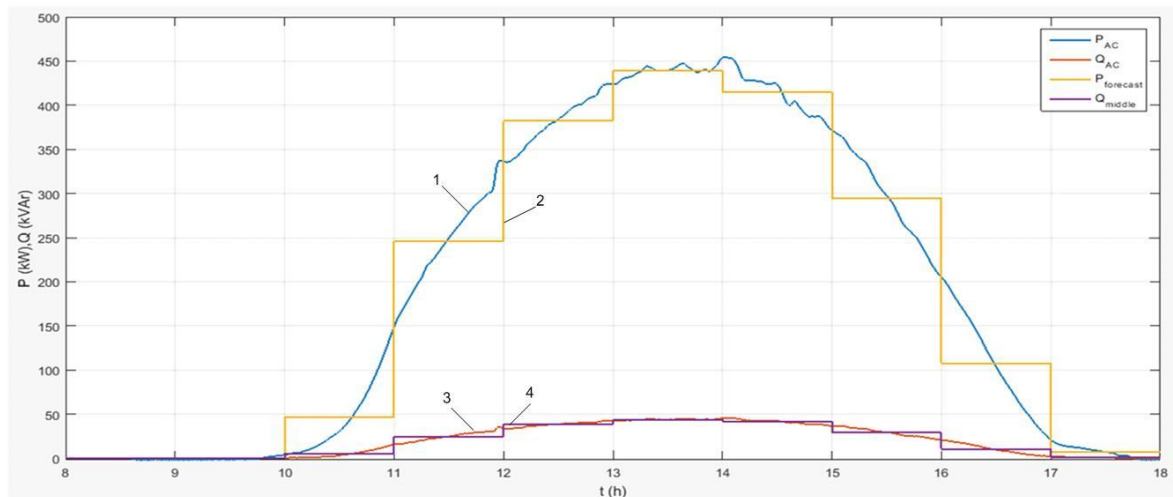


Рис. 3. Результати моделювання в режимі підтримання  $\cos\varphi = 0,995$

Крива 2 відповідає заявленому графіку генерування активної потужності, а криві 3 і 4 відповідають зміні значень реактивної потужності та усереднених на годинних інтервалах. Оскільки джерела реактивної енергії в інверторі немає, то такий результат можна пояснити зміною потоків реактивної потужності в електричній мережі в наслідок зміни кута між струмом і напругою в точці приєднання фотоелектричної станції.

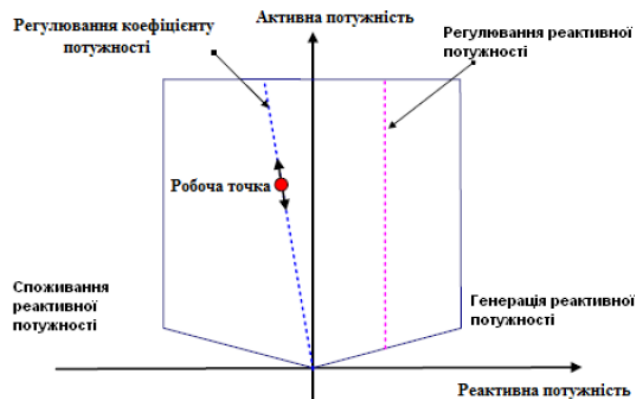


Рис. 4. Функція регулювання реактивної потужності для фотоелектричної станції

Отже фотоелектричні станції мають технічну можливість впливати на перетоки реактивної потужності в електричній системі. В залежності від потужності і класу напруги електричної мережі, до якої підключається ФЕС, можна забезпечити різні режими щодо впливу на перетоки реактивної потужності. На рис. 4 показано схематично область можливих впливів.

Зміна перетоків реактивної потужності впливає на втрати активної потужності в мережі, тобто фотоелектричні станції можна використати для підвищення економічності електричних систем.

Для фрагменту розподільної електричної мережі, показаної на рис. 5, було проведено аналіз режимів для різних режимів фотоелектричної станції Гальжбіївська (1,86 МВт).

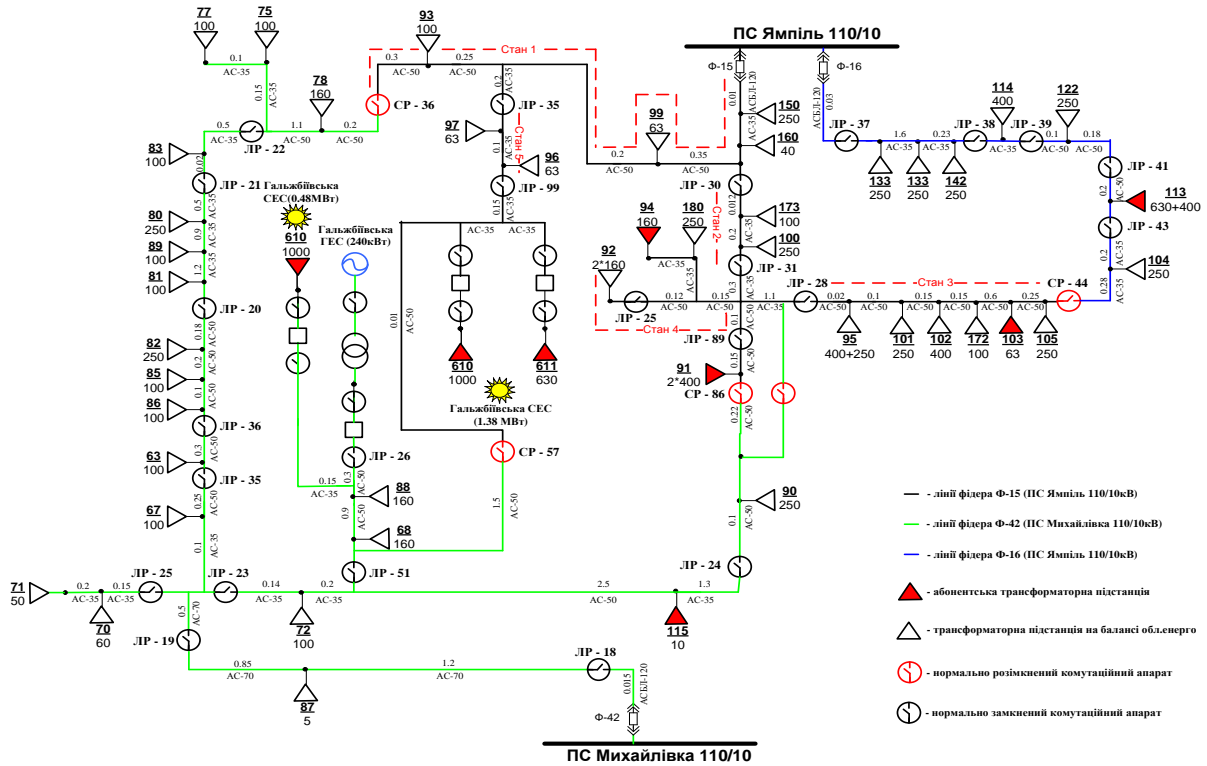


Рис. 5. Фрагмент розподільної електричної мережі

Результати розрахунків наведено в таблиці 1.

Таблиця 1.

Результати розрахунку втрат активної потужності для різних режимів ФЕС

Режим	Втрати активної потужності ΔP, % від сумарного споживання
без генерування ФЕС	5,7
генерування 1500 кВт (tan(φ)=0, cos(φ)=1)	5,5
генерування 1500 кВт (tan(φ)=0.1, cos(φ)=0.995)	5,0
генерування 1500 кВт (tan(φ)=0.33, cos(φ)=0.95)	4,7
генерування 1500 кВт (tan(φ)=0.48, cos(φ)=0.9)	5,1
генерування 1500 кВт (tan(φ)=0.75, cos(φ)=0.8)	5,7

**Висновки.** Отже з отриманих в роботі результатів можна зробити висновок про технічну можливість застосування таких джерел електричної енергії як ФЕС в підтримання необхідного рівня якості електропостачання шляхом використання інверторів в режимах, що дозволяють впливати на перетоки реактивної потужності в електричній системі. В результаті можна впливати не лише на відхилення напруги у вузлах мережі, а також і на їх економічність.

**Список використаних джерел:**

1. Кириленко О.В., Праховник А.В. Енергетика сталого розвитку: виклики та шляхи по-будови // Праці Інституту електродинаміки. Спеціальний випуск. – 2010. – С. 10 – 16.
2. Кириленко О.В., Павловський В.В., Лук'яненко Л.М. Технічні аспекти впровадження джерел розподіленої генерації в електричних мережах // Технічна електродинаміка. – 2011. – С. 46 – 53.
3. Закон України про ринок електричної енергії – <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/2019-19>
4. <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/examples/detailed-model-of-a-100-kw-grid-connected-pv-array.html?requestedDomain=true>

Стаття надійшла до редакції 18.03.2019