

УДК 621.472

## КОМПЕНСАЦІЯ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ СОНЯЧНОЮ ЕЛЕКТРО-СТАНЦІЄЮ ТА ВПЛИВ ДАНОГО ПРОЦЕСУ НА РОБОТУ ЦЕНТРАЛЬНОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ

М.М. Бордаков, аспірант

Інститут відновлюваної енергетики НАН України  
02094 вул. Гната Хоткевича, 20А, м. Київ

*Контроль реактивної потужності можна вважати однією з найменш досліджених проблем в фотоелектричній промисловості, він може дати ключ до значного збільшення прибутку власників промислових сонячних електростанцій.*

*В даній статті описується вплив компенсації реактивної потужності на промисловій ФЕС потужністю за технічними умовами 9 МВт. Інверторне обладнання : Kstar 500 КВт, сонячні панелі Talesun 270 Вт. В ДСТУ 8635:2016 є вимоги що до можливості регулювання реактивної потужності промисловими СЕС. Відповідно до даного стандарту промислова СЕС має регулювати свій коефіцієнт потужності від 0.8 до 1 відповідно до вимог центральної мережі. Також, в даній статті описується вплив компенсації реактивної потужності на якість електричної енергії лінії 35 кВ. Відповідно до постанови НКРЕКП від 14.03.2018 №312, про правила розрахунку за реактивну потужність, клієнт має відшкодовувати енерго-передаючій компанії збитки за перетікання реактивної потужності.*

*В статті описано алгоритм керування реактивною потужністю на рівні точки підключення до центральної електричної мережі. Він полягає в керуванні інверторним обладнанням через інформаційний протокол ModBus TCP. Кожен інвертор має запрограмований виробником реєстр інформаційних команд. Посилаючи команду через інформаційний протокол в потрібний реєстр інвертор може виконати дію чи передачу параметрів, відповідно до типу реєстру в який послано команду. Інвертор починає компенсувати реактивну потужність коли отримує команду в реєстр, який відповідає за значення коефіцієнту потужності. Значення для компенсації зчитується з пристрою аналізу якості електромережі на вхідній комірці. Зчитане значення оброблюється сервером і відправляється на інвертор. Використовуючи компенсацію реактивної потужності, збитки клієнта за перетікання реактивної потужності зводяться до мінімального значення. Бібл. 10, табл. 3, рис.3.*

**Ключові слова:** реактивна потужність, напруга, коефіцієнт нелінійних спотворень, активна потужність, коефіцієнт потужності, динамічне регулювання.

## COMPENSATION OF REACTIVE POWER BY INDUSTRIAL SOLAR POWER PLANT AND INFLUENCE OF THIS PROCESS ON THE CENTRAL ELECTRIC NETWORK

М. Bordakov, postgraduate student

Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine  
02094, 20A Hnata Khotkevycha St., Kyiv.

*The control of reactive power can be considered one of the least investigated problems in the photoelectric industry, it can give the key to a significant increase in the profit of owners of industrial solar power plants.*

*This article describes the effect of compensation of reactive power on the industrial FES power at the technical conditions of 9 MW. Inverter equipment: Kstar 500 kW, solar panels Talesun 270 W. In DSTU 8635: 2016 there are requirements for the possibility of regulation of reactive power by industrial SES. In accordance with this standard, the industrial SES must adjust its power factor from 0.8 to 1 in accordance with the requirements of the central network. Also, this article describes the effect of compensation of reactive power on the quality of electric energy in the 35 kV line. Also, in accordance with: the NERC regulation dated March 14, 2018, No. 312, on the rules for calculating reactive power, the client shall compensate the energy-transmitting company for losses due to the flow of reactive power.*

*The article describes the algorithm for verifying the bias fact at the level of the connection point to the central electric network. It consists in managing the inverter equipment through the ModBus TCP protocol. Each inverter has a manufacturer-programmed register of foreign-type teams. By sending a command through the information bar to the desired registry, the inverter can execute an action or pass parameters, according to the type of registry that is sent to the command. The inverter starts compensating the reactive power when it receives a command in the register which corresponds to the value of the power factor. Computation for compensation is read from the device for analyzing the quality of the electrical network in the input cell. The read value is processed by the server and sent to the inverter. Using reactive power compensation, customer losses due to jet power flow are reduced to a minimum value. Ref. 10, tab. 3, fig. 3.*

**Keywords:** reactive power, voltage, coefficient of nonlinear distortions, active power, power factor, dynamic regulation.



М.М. Бордаков

M. Bordakov

**Відомості про автора:** аспірант ІВЕ НАН України.  
**Освіта:** В 2016 р. закінчив НТУУ «КПІ ім. Сікорського» за спеціальністю: електротехніка та електротехнології. Отримав ступінь: молодшого інженера-дослідника.  
**Наукова діяльність:** сонячна енергетика, апаратна частина інвертора для сонячних панелей.  
**Публікації:** 2  
**ORCID:** 0000-0002-2890-5632  
**Контакти:** +38093 56 69 447  
**e-mail:** m.m.bordakov@gmail.com

**Author information:** postgraduate student Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine.  
**Education:** In 2016, the NTUU «Igor Sikorsky KPI», specialty: electrical engineering and electrotechnology. Get a degree: junior research engineer.  
**Research area:** solar energy, hardware part of solar panel inverter.  
**Publications:** 2  
**ORCID:** 0000-0002-2890-5632  
**Contacts:** +38093 56 69 447  
**e-mail:** m.m.bordakov@gmail.com

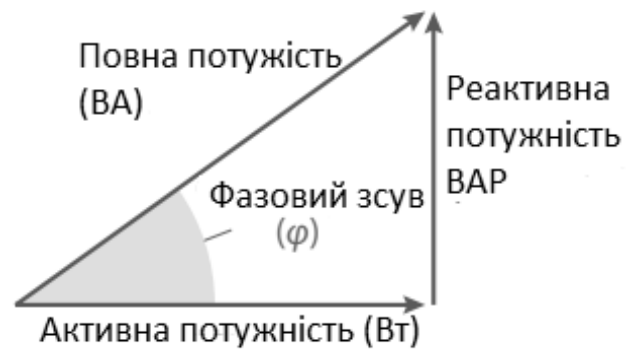
**Вступ.** В сучасній термінології електричних мереж є поняття: активної “P” та реактивної “Q” потужності. Під поняттям активної потужності розуміють потужність яка йде на виконання активної роботи (нагрів теплоелектричного нагрівача, свічіння лампи розжарювання). Поняття реактивна потужність з’явилося, коли людство почало використовувати змінний струм. Цей термін розуміє в собі енергію, яка йде на живлення реактивних споживачів (конденсаторні батареї, електродвигуни). Реактивна потужність системи характеризується коефіцієнтом потужності. При проходженні реактивного споживача струм системи починає відставати чи випереджати напругу у часі (в залежності від характеру навантаження: індуктивне чи ємнісне). Обчисливши косинус кута даного відставання ми отримаємо коефіцієнт потужності. На рис. 1 показано як відбувається дане часове відставання.



**Рис. 1. Проходження струму через індуктивне навантаження**  
**Fig. 1. Passage of current through inductive load**

Векторною сумою активної та реактивної потужності буде повна потужність системи. Дана величина показує скільки енергії споживає система в цілому.

На рис. 2 описано залежність між цими величинами.



**Рис. 2. Векторна сума активної та реактивної потужності**  
**Fig. 2. Vector amount of active and reactive power**

З рис. 2 можна обчислити значення коефіцієнта потужності:

$$\cos(\varphi) = \frac{P}{S},$$

де S – повна потужність системи, P – активна потужність системи.

В свою чергу, модуль повної потужності обчислюється:

$$|S| = \sqrt{P^2 + Q^2},$$

де Q – реактивна потужність системи.

Електрична мережа зазвичай має коефіцієнт потужності приблизно рівний 0.95-0.99, його часто прирівнюють до 1. Кожен увімкнений споживач несе свій вклад у величину даного коефіцієнта.

**Схема увімкнення ФЕС у точку обліку і причини споживання ФЕС реактивної потужності.** Сучасні інвертори мають коефіцієнт потужності 1. Тобто, вони генерують тільки активну складову потужності. Але, при роботі ФЕС споживання реактивної складової завжди присутне. Це пов’язано з тим, що інвертори вми-

каються в високовольтну мережу через трансформатори. Коли ФЕС починає генерувати більшу енергію в мережу споживання реактивної потужності збільшується, бо при проходженні більшого струму через трансформатор, зростає реактивна енергія спожита трансформатором. Індуктивна складова опору трансформатора є сталою, тому величина реактивної потужності залежить від струму генерації ФЕС. Розглянемо повний опір кола змінного струму:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2},$$

де  $Z$  – повний опір кола,  $X_L$  – індуктивна складова опору,  $X_C$  – ємнісна складова опору,  $R$  – активна складова. Ємнісна складова в трансформаторі майже нульова, тому нею нехтують. Тоді реактивна складова опору трансформатора матиме індуктивний характер. Реактивна потужність становитиме:

$$Q = I^2 \cdot X_L,$$

де  $I$  – струм, який проходить через трансформатор. Даний струм дорівнює струму генерації ФЕС. Далі розглянемо ФЕС побудовану в Херсонській області на території селища Мироліубівка. В роботі розглядаються лише дві інверторні станції даної ФЕС. Потужність однієї інверторної станції 2 МВт. Сумарна потужність гілки ФЕС 4 МВт. Кожна інверторна станція має

по 4-ри інвертори: KSTAR GSL 500. Потужність одного 500 кВт по стороні змінного струму. Кожна інверторна станція має трансформатор. Характеристики трансформатора: потужність 2500 кВА, напруга: 315/35000, схема підключення трикутник-трикутник. На рис 3. показано схему гілки ФЕС, яку розглядаємо.

**Опис алгоритму керування реактивною потужністю.** Даний інвертор має в собі запас регулювання реактивної потужності. Також додатково інвертор може регулювати реактивну потужність за допомогою свого коефіцієнта потужності. При використанні другого режиму інвертор зменшує свою активну потужність. Тому на даній ФЕС регулювання відбувається за допомогою вбудованого запасу. Інвертори отримують команду що до значення реактивної складової в точці, приєднання до мережі і компенсують її значення. Частота обробки даного процесу 1 с.

За рахунок цього алгоритму мінімізовано споживання станцією реактивної потужності.

**Порівняння показників аналізу мережі 35 кВ з компенсацією і без компенсації реактивної потужності.** Розглянемо два дні роботи ФЕС: 12.10.2018 і 13.10.2018. Компенсацію реактивної потужності було запущено 13.10.2018. На рис. 4 показано графіки реактивної потужності для двох днів. Генерація ФЕС в дані дні була однакова. По це свідчать дані з лічильника та метеопоста.

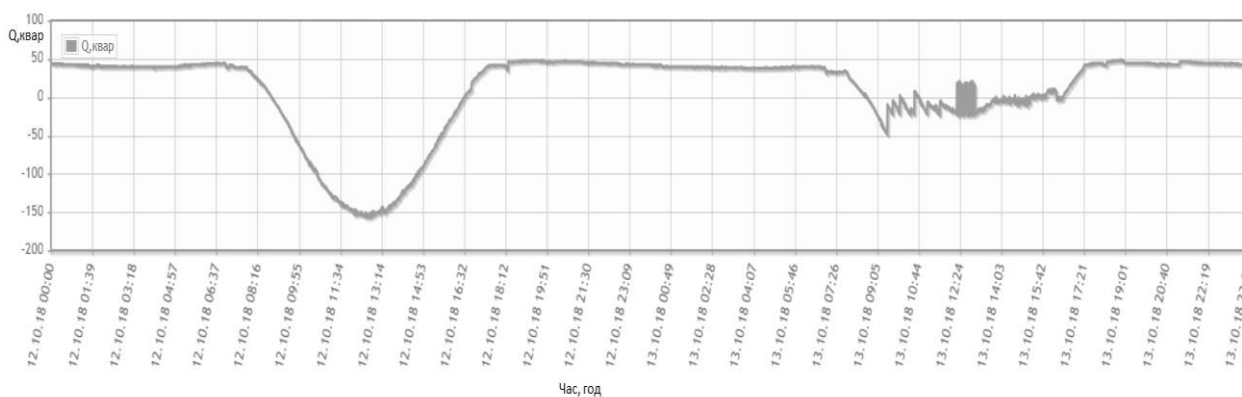


Рис. 3 Графіки реактивної потужності за період дослідження  
Fig. 3 Graphs of reactive power during the research period

За даними з лічильника дана гілка спожила 80 квар-год реактивної потужності за 13.10, а за 12.10 750 квар-год.

Розглянемо вплив компенсації реактивної потужності на лінійну напругу мережі 35 кВ. В Таблиці 1. Наведено дані напруги по кожній

фазі до увімкнення функції компенсації. В таблиці 2. наведено зміну напруги при компенсації реактивної потужності. Порівняння напруги проводиться між вихідними, так як це пов'язано з графіком навантаження енергосистеми.

**Таблиця 1. Зміна фазної напруги при генерації ФЕС без компенсації 13.10.2018**  
**Table 1. Change in phase voltage during generation without compensation. 13.10.2018**

U <sub>1</sub> , В	U <sub>2</sub> , В	U <sub>3</sub> , В
35834,49	36715,56	36054,49
36267,16	37186,27	36515,85
36240,57	37208,58	36539,93
36276,42	37270,59	36580,2
36302,46	37305,35	36624,28
36504,22	37543,13	36798,78
36652,31	37664,37	36943,72
36762,35	37787,18	37073,49
36730,51	37762,95	37054,26
36583,86	37598,24	36883,39
35954,26	36914,68	36239,68
35710,1	36624,16	36008,36
35536,98	36457,68	35856,6
35704,5	36622,49	36040,52

**Таблиця 2. Зміна фазної напруги при генерації ФЕС при компенсації за 06.10.2018**  
**Table 2. Changing the phase voltage during generation of the FES with compensation for 06.10.2018**

U <sub>1</sub> , В	U <sub>2</sub> , В	U <sub>3</sub> , В
35853,66	36840,58	36115,31
36000,74	36930,59	36257,81
36289,42	37209,45	36534,07
36302,23	37238,78	36545,44
36330,64	37235,63	36579,85
36385,31	37287,68	36647,66
36362,36	37262,13	36603,84
36353,7	37315,97	36570,24
36406,56	37347,47	36623,24
36176,43	37080,47	36392,7
35652,71	36583,6	35904,78
36126,92	37086,99	36429,85
35860,76	36795,78	36183,76
35995,49	36877,1	36250,09

Порівнюючи максимальні значення напруг, можливо зробити висновок що після компенсації рівні напруг майже не змінилися. Тільки зменшився рівень перенапруги на фазі 3. Там середній рівень знизився на 0.5 %.

Далі розглянемо вплив компенсації реактивної потужності на гармонічні спотворення мережі. В таблиці 3 наведено зміну THD до і після компенсації.

**Таблиця 3. THD ФЕС до і після компенсації**  
**Table 3. THD before and after compensation**

Дата	Thd <sub>1</sub> , %	Дата	Thd <sub>1</sub> , %
13.10.2018 7:00	1,32	12.10.2018 7:00	1,15
13.10.2018 8:00	1,26	12.10.2018 8:00	1,09
13.10.2018 9:00	1,2	12.10.2018 9:00	1,03
13.10.2018 10:00	1,29	12.10.2018 10:00	0,99
13.10.2018 11:00	1,32	12.10.2018 11:00	1,04
13.10.2018 12:00	1,28	12.10.2018 12:00	1,02
13.10.2018 13:00	1,29	12.10.2018 13:00	1,03
13.10.2018 14:00	1,37	12.10.2018 14:00	1,19
13.10.2018 15:00	1,38	12.10.2018 15:00	1,16
13.10.2018 16:00	1,38	12.10.2018 16:00	1,29
13.10.2018 17:00	1,37	12.10.2018 17:00	1,31
13.10.2018 18:00	1,48	12.10.2018 18:00	1,36
13.10.2018 19:00	1,54	12.10.2018 19:00	1,41
13.10.2018 20:00	1,61	12.10.2018 20:00	1,41
Середнє	1,272667	Середнє	1,098667

Дані, які наведені в табл. 3, свідчать про те, що при використанні компенсації коефіцієнт нелінійних спотворень по напрузі зменшується. Тобто даний процес збільшує якість мережі та її стійкість.

**Висновки.** Оброблені результати свідчать про те, що використання компенсації реактивної потужності зменшує кількість генерованої реактивної енергії в мережу, що призводить до зменшення збитків для власника станції та чинить позитивний вплив на стан центральної електромережі.

1. Постанова НКРЕКП №312 від 14.03.2018. URL: <http://www.nerc.gov.ua/?id=31833>.

2. ДСТУ 8635:2016. Площадки для фотоелектричних станцій приєднання станцій до електроенергетичної системи. URL: <http://eom.com.ua/index.php?action=downloads:sa=downfile&id=3656>.

3. Reactive Power Interconnection Requirements for PV and Wind Plants. Recommendations to NERC. URL: <https://prod-ng.sandia.gov/techlib-noauth/access-control.cgi/2012/121098.pdf>.

4. Brown T. Transmission network loading in Europe with high shares of renewables. IET Renewable Power Generation. Jan. 2015. Vol. 9. No. 1. Pp.57-65.

5. GB/T19964-2012. Photovoltaic power plant power system access technical requirements. Beijing. General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of Peoples Republic of China. China National Standardization Management Committee. 2012.

6. Campbell M., Aschenbrenner P., Blunden J., Smeloff E., Wright S. The drivers of the levelized cost of electricity for utility-scale photovoltaics. SunPower Corp. 200 p.

7. Zhou J. and Gole A. VSC transmission limitations imposed by AC system strength and AC impedance characteristics. in Proc. 10th IET International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC). 2012. Pp. 1-6.

8. Collins L. and Ward J. Real and reactive power control of distributed PV inverters for overvoltage prevention and increased renewable generation hosting capacity. Renewable Energy. 2015. Vol. 81. Pp. 464-471.

9. Utility-scale solar photovoltaic power plants-A project developers guide. International Finance Corporation (IFC). 2015.

10. Molina-Garcia A., Mastromauro R. A., Garcia-Sanchez T., Pugliese S., Liserre M., Stasi S. Reactive power flow control for PV inverters voltage support in LV distribution networks. IEEE Trans. Smart Grid. Jan. 2017. Vol. 8. No. 1. Pp. 447-456.

### КОМПЕНСАЦИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ СОЛНЕЧНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЕЙ И ВЛИЯНИЕ ДАННОГО ПРОЦЕССА НА РАБОТУ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

Н.Н. Бордаков, аспирант

Институт возобновляемой энергетики НАН Украины  
02094 г. Киев, ул. Г. Хоткевича, 20А

*Контроль реактивной мощности можно считать одной из наименее исследованных проблем в фотоэлектрической промышленности, он может дать ключ к значительному увеличению прибыли владельцев промышленных солнечных электростанций. В данной статье описывается влияние компенсации реактивной мощности на промышленной ФЭС мощностью по техническим условиям 9 МВт. Инверторное оборудование: Kstar 500 кВт, солнечные панели Talesun 270 Вт. В ДСТУ 8635:2016 сформулированные требования касающиеся возможности регулирования реактивной мощности промышленными СЭС. Согласно данному стандарту промышленная СЭС должна регулировать свой коэффициент мощности от 0.8 до 1 в соответствии с требованиями центральной сети. Также, в данной статье описывается влияние компенсации реактивной мощности на качество электрической энергии линии 35 кВ. Согласно постановления НКРЕКП от 14.03.2018 №312, о правилах расчета за реактивную мощность клиент должен возмещать энергопередающей компании убытки за перетоки реактивной мощности. В статье описан алгоритм управления реактивной мощностью на уровне точки подключения к центральной электрической сети. Он заключается в управлении инверторным оборудованием через информационный протокол ModBus TCP. Каждый инвертор имеет запрограммированный производителем реестр информационных команд. Посылая команду через информационный протокол в нужный реестр, инвертор может выполнить действие или передать параметры, в соответствии с типом реестра в который послана команда. Инвертор начинает компенсировать реактивную мощность, когда получает команду в*

*реестр, отвечающий значению коэффициента мощности. Значение для компенсации считывается с устройства анализа качества электросети на вводной ячейке. Считанное значение обрабатывается сервером и отправляется на инвертор. Используя компенсацию реактивной мощности убытки клиента за перетоки реактивной мощности сводятся до минимального значения. Библ. 10, табл. 3, рис. 3.*

**Ключевые слова:** реактивная мощность, напряжение, коэффициент нелинейных возмущений, активная мощность, коэффициент мощности, динамическое регулирование.

### REFERENCES

1. Postanovleniye NKREKP №312 ot 14.03.2018. [NERCP Resolution № 312 dated March 14. 2018]. Retrived from <http://www.nerc.gov.ua/?id=31833> [in Ukrainian].

2. DSTU 8635: 2016. Ploshchadki dlya fotoelektricheskikh stantsiy prisoyedineniya stantsiy k elektroenergeticheskoy sistemy. [DSTU 8635:2016. Surfaces for photoelectric stations connection of stations to the electrical energy system]. Retrived from

<http://eom.com.ua/index.php?action=downloads;sa=downfile&id=3656> [in Ukrainian].

3. Reactive Power Interconnection Requirements for PV and Wind Plants. Recommendations to NERC. Retrived from <https://prod-ng.sandia.gov/techlib-noauth/access-control.cgi/2012/121098.pdf> [in English].

4. Brown T. Transmission network loading in Europe with high shares of renewables. IET Renewable Power Generation. vol. 9. no. 1. pp.57-65. Jan. 2015. [in English].

5. GB/T19964-2012. Photovoltaic power plant power system access technical requirements. Beijing. General Administration of Quality Supervision. Inspection and Quarantine of Peoples Republic of China. China National Standardization Management Committee. 2012. [in English].

6. Campbell M., Aschenbrenner P., Blunden J., Smeloff E., Wright S. The drivers of the levelized cost of electricity for utility-scale photovoltaics. SunPower Corp. 200. [in English].

7. Zhou J. and Gole A. VSC transmission limitations imposed by AC system strength and AC impedance characteristics. in Proc. 10th IET International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC). 2012. Pp. 1-6. [in English].

8. Collins L. and Ward J. Real and reactive power control of distributed PV inverters for overvoltage prevention and increased renewable generation hosting capacity. Renewable Energy. 2015. vol. 81. Pp. 464-471. [in English].

9. Utility-scale solar photovoltaic power plants-A project developers guide. International Finance Corporation (IFC). 2015. [in English].

10. Molina-Garcia A., Mastromauro R. A., Garcia-Sanchez T., Pugliese S., Liserre M., Stasi S. Reactive power flow control for PV inverters voltage support in LV distribution networks. IEEE Trans. Smart Grid. Jan. 2017. Vol. 8. No. 1. Pp. 447-456. [in English].

Стаття надійшла до редакції: 06.02.2019  
Остаточна версія 11.03.19