

УДК 621.314:004.896

**МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ СЕРЕДНЬОЇ НАПРУГИ ПРИ ПІДКЛЮЧЕННІ ДО НЕЇ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ**

**А.Ф. Жаркін** чл.-кор. НАН України, **В.О. Новський**, докт.техн.наук, **Д.О. Малахатка**  
 Інститут електродинаміки НАН України,  
 пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна. **E-mail: [novsky@ied.org.ua](mailto:novsky@ied.org.ua)**

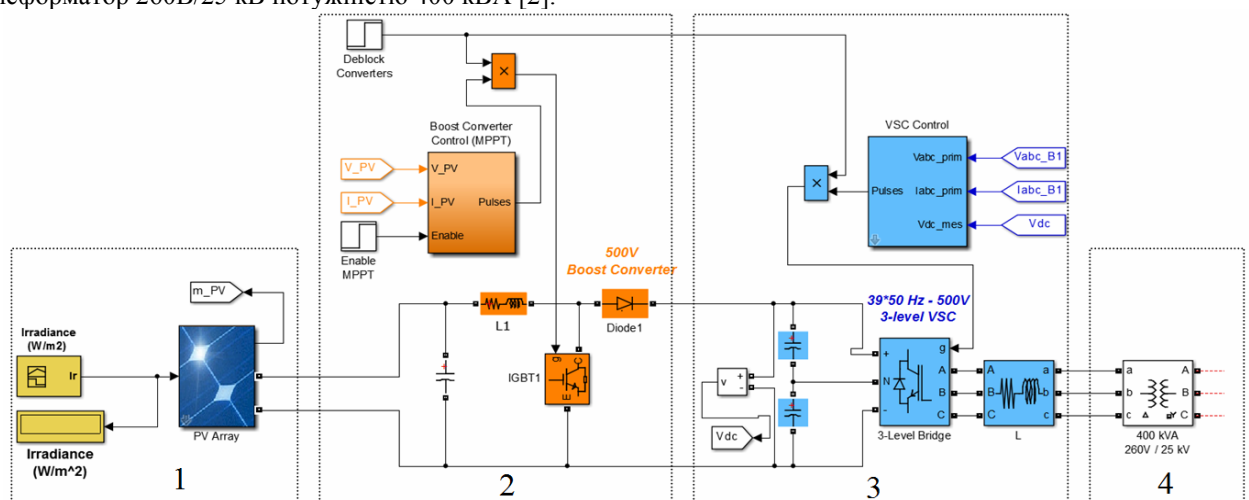
Виконано імітаційне моделювання режимів роботи сонячної електростанції (СЕС) та електричної мережі середньої напруги (СН) при підключенні до неї СЕС для визначення впливу роботи СЕС на значення показників якості електричної енергії (ПЯЕ) у точці загального приєднання (ТЗП) в залежності від параметрів і місця підключення СЕС до розподільної мережі СН та зміни рівнів потужності сонячного випромінювання. Бібл. 2, рис. 4.

**Ключові слова:** якість електроенергії, сонячна електростанція, розподільна мережа.

Джерела розосередженої генерації (ДРГ) є генеруючими об'єктами, що базуються, як правило, на технологіях відновлюваної енергетики з можливістю використання систем накопичення енергії, причому частка встановленої потужності ДРГ, які підключаються до енергосистем ОЕС України, з кожним роком значно збільшується [1]. За рахунок застосування ДРГ, з одного боку, знижуються втрати енергії в мережах і підвищується надійність електропостачання, проте, з другого, сонячні електростанції та особливо вітроелектростанції (ВЕС) є джерелами значного погіршення якості електричної енергії (ЯЕ) в мережах, до яких вони підключаються. Тому розробка відповідних спеціалізованих імітаційних моделей та проведення комп'ютерного моделювання режимів роботи трифазних систем з ДРГ сприятиме вирішенню задачі забезпечення показників ЯЕ в електричних мережах з ДРГ відповідно до норм міжнародних стандартів.

Метою даної роботи є дослідження показників якості електричної енергії (ПЯЕ) у точці загального приєднання розподільної мережі середньої напруги, які очікуються при підключенні до неї сонячної електростанції, шляхом імітаційного моделювання режимів роботи її основних елементів та електричної мережі СН у програмному пакеті «*Matlab Simulink*».

На рис. 1 показано імітаційну модель СЕС потужністю 400 кВт, до складу якої входять наступні елементи: 1 – блок, що імітує роботу масиву сонячних панелей, наприклад, типу *SPR-305-WHT* потужністю 305,2 Вт, які з'єднано у 264 паралельні ряди по 5 послідовно з'єднаних панелей загальною потужністю 402,8 кВт (у блоці 1 також імітується зміна сонячного випромінювання (інсоляції) за допомогою блока *Irradiance*, що задає графік зміни потужності сонячного випромінювання у Вт/м<sup>2</sup>); 2 – блоки, що імітують підвищувальний перетворювач (*Boost converter*), який підвищує постійну напругу з 274,5 В до 500 В, та його систему керування (*Boost converter control*), що реалізує принцип автоматичного пошуку точки максимальної потужності сонячних панелей у режимі реального часу «*Maximum Power Point Tracking*» (*MPPT*); 3 – блоки, що імітують трифазний трирівневий перетворювач напруги 500 В *DC/260 В AC* (3 level - *VSC*) з частотою широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) 1950 Гц та систему його керування (*VSC control*); 4 – блок, що імітує узгоджувальний підвищувальний трансформатор 260В/25 кВ потужністю 400 кВА [2].



**Рис. 1**

На основі адаптованих імітаційних моделей СЕС та розподільної мережі СН побудовано низку комплексних імітаційних моделей (одну з яких наведено на рис. 2), що дозволяє проводити моделювання режимів ро-

боти СЕС при її підключенні до розподільної мережі СН для оцінювання значень ПKE у ТЗП мережі, наприклад, з двома підключеними до неї СЕС потужністю 400 кВт кожна. Клас першої середньої напруги 25 кВ обрано для зручності порівняння та оцінки результатів моделювання режимів мережі та ефективності роботи СЕС при їхньому підключенні до національних розподільних мереж та деяких європейських країн.

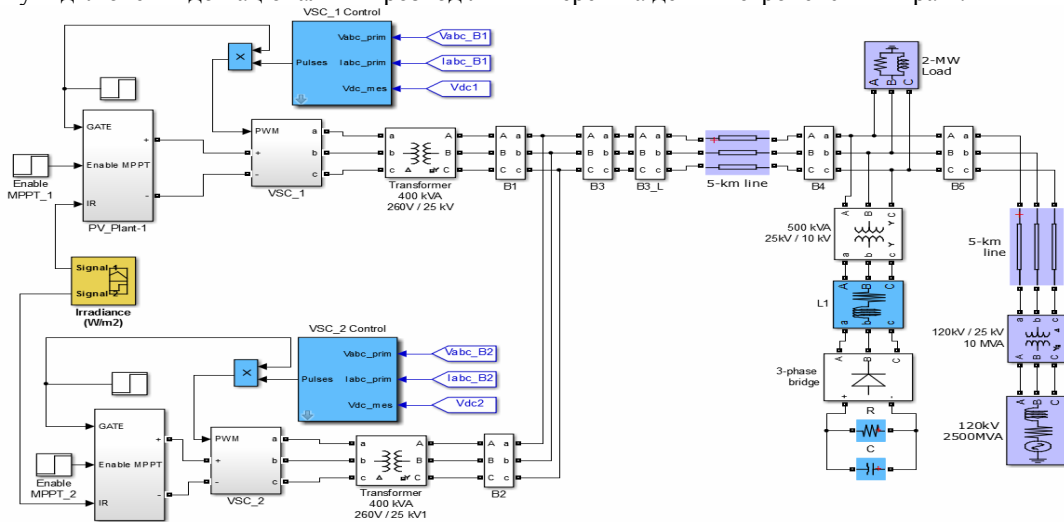


Рис. 2

До складу моделі розподільної мережі входять: два паралельно підключені блоки, що імітують роботу сонячних електростанцій потужністю 400 кВт кожна; два блоки, що імітують лінію електропередачі довжиною, наприклад, 5 км (блоки 5-km line); блоки, що імітують підключення через узгоджувальний трансформатор до мережі нелінійного навантаження потужністю 500 кВА; блок, що імітує підключення до мережі лінійного навантаження потужністю активного навантаження – 2 МВт, індуктивного – 0,5 МВАр (блок Load); блоки, що імітують трифазний генератор електроенергії (потужністю КЗ 2500 МВА) і понижувальний живильний трансформатор 120 кВ/25 кВ. Слід відзначити, що за допомогою зрівняльних реакторів цього трансформатора можна здійснити зв'язок СЕС із зовнішньою енергосистемою 120 кВ. Ця модель розподільної мережі з СЕС дозволяє моделювати її режимні параметри, а також потужності сонячного випромінювання. На рис. 3 два верхні графіки показують зміну потужності сонячної інсоляції для першої та другої СЕС, а нижній графік – рівень напруги мережі у ТЗП. З рис. 3 видно, що графіки потужності сонячної інсоляції для двох СЕС зсунуто по відношенню один до одного на проміжок часу 3 с, протягом якого проводиться моделювання роботи системи. При відключенні від мережі СЕС рівень напруги у ній – 24,7 кВ. В момент часу, коли рівень сонячної інсоляції максимальний (2,5 с) та мінімальний (1 с), значення коли-

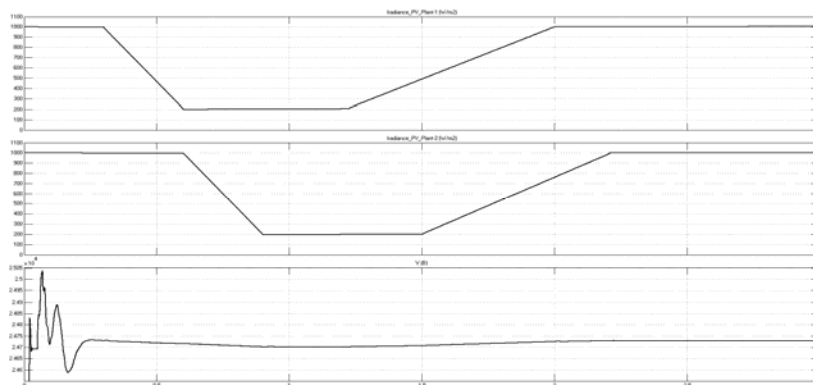


Рис. 3

вань напруги (від 24700 В до 24730 В) у мережі складають десяті доли процента. Це свідчить про високу ефективність видачі електроенергії обома СЕС навіть при незначному сонячному випромінюванні на деякому проміжку часу 0,9–1,25 с для підтримання рівня напруги в мережі. На рис. 4 вгорі показано графік зміни кривих напруги мережі ( $V_{abc\_B4\_L}$ ) у ТЗП (вимірювач В4) на проміжку часу, коли потужність сонячного випромінювання, наприклад, мінімальна. Аналіз результатів гармонічного аналізу показує, що сумарний коефіцієнт гармонічних спотворень кривої напруги мережі в ТЗП у цьому випадку складає 2,9% (5-а гармоніка – 2,04%, 7-а – 0,6%, 11-а – 0,55%, 35-а – 1,2%), а при максимальній потужності сонячного випромінювання складає 2,96% (5-а гармоніка 2,09%, 7-а – 0,57%, 11-а – 0,61%, 35-а – 1,14%). На рис. 4 також наведено результати імітаційного моделювання роботи розподільної мережі СН при зниженні потужності сонячного випромінювання з 100% до 20% за умови її значно швидшої зміни у часі.

Було проведено також імітаційне моделювання режимів паралельної роботи розподільної мережі СН з двома і більше (до 40 модулів) паралельно підключеними до неї СЕС потужністю 400 кВт кожна при потужності понижуючого живильного трансформатора 47 МВА, а також для випадків зменшення проміжку часу, за який потужність сонячного випромінювання знижується, наприклад, у 5 разів, тобто з 100% (1000 Вт/м<sup>2</sup>) до 20% (200 Вт/м<sup>2</sup>) при довжині лінії 1 км. Розроблені спеціалізовані імітаційні моделі ДРГ, що інтегровані з програмним пакетом *MATLAB*, дозволяють досліджувати процеси генерації електроенергії СЕС та визначати вплив їхньої

роботи на зниження значень показників ЯЕ. Обґрунтовано можливість застосування методу подібності при масштабуванні значень параметрів мережі та, відповідно, потужностей СЕС і наявних трансформаторів у розподільній мережі з СЕС.

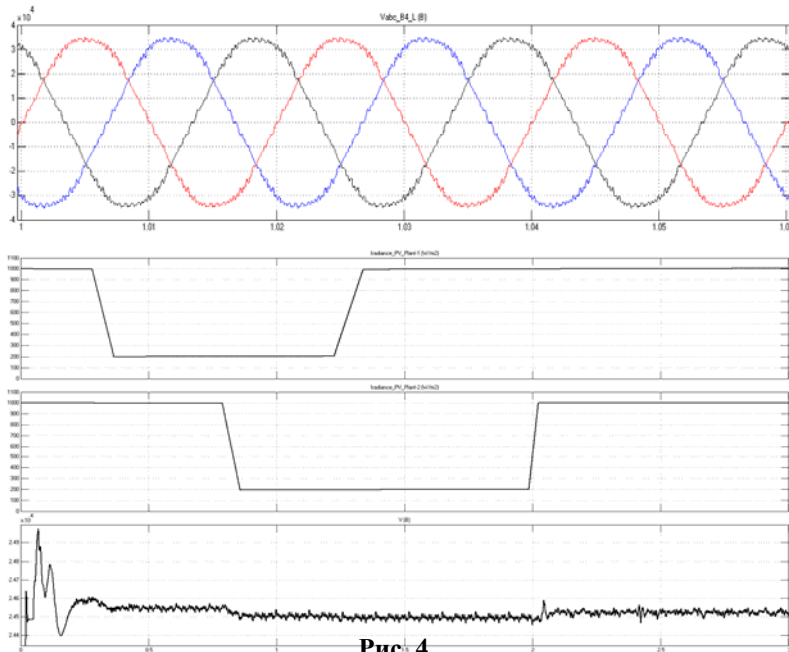


Рис. 4

Для визначення впливу СЕС на показники ЯЕ в залежності від місця їхнього розміщення у мережі розроблено імітаційні моделі, що описують роботу СЕС при підключенні їх також безпосередньо до шин розподільного трансформатора. На показники якості напруги, які характеризуються формою її кривої, суттєвий вплив мають наступні чинники: рівень емісії гармонік струму «сонячного інвертора», що визначається топологією його схеми та частотою ШІМ і параметрами вихідного фільтра основної гармоніки; гармонічний імпеданс мережі в точці приєднання СЕС, місця розміщення СЕС і у мережі СН при підключенні до неї потужних навантажень; достатній запас по стійкості системи; зміни у часі значень потужностей навантажень і сонячного випромінювання та ін.

Одержані результати числених комп'ютерних розрахунків показників якості електроенергії для багатьох варіантів

виконання СЕС необхідні для реалізації практичних рекомендацій щодо умов приєднання СЕС і ВЕС до розподільних мереж при забезпеченні нормованих значень ПКЕ (коефіцієнтів несинусоїдальності, несиметрії та відхилення напруг).

1. Кириленко О.В., Павловський В.В., Яндульський О.С., Стелюк А.О. Керування режимом роботи електростанції з відновлюваними джерелами енергії в умовах зміни частоти в енергосистемі / Техн. електродинаміка. – 2012. – № 4. – С. 52-57.

2. Ahmed A. Elserougi, Ayman S. Abdel-Khalik. A Grid-Connected Switched PV Array / IECON2015-Yokohama. – November 9-12, 2015. – Pp. 68-70.

УДК 621.314:004.896

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ СРЕДНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ПОДКЛЮЧЕНИИ К НЕЙ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

А.Ф. Жаркин чл.-корр. НАН Украины, В.А. Новский докт.техн.наук, Д.А. Малахатка

Институт электродинамики НАН Украины,  
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина.

E-mail: [novsky@ied.org.ua](mailto:novsky@ied.org.ua)

Выполнено имитационное моделирование режимов работы солнечной электростанции (СЭС) и электрической сети среднего напряжения (СН) при подключении к ней СЭС для определения влияния работы СЭС на значения показателей качества электрической энергии (ПКЭ) в точке общего присоединения (ТЗП) в зависимости от параметров и места подключения СЭС к распределительной сети СН, а также изменения уровней мощности солнечного излучения. Библ. 2, рис. 4.

**Ключевые слова:** качество электроэнергии, солнечная электростанция, распределительная сеть.

## SIMULATION OF MODES OF ELECTRIC NETWORKS OF MEDIUM VOLTAGE WHEN CONNECTING SOLAR POWER PLANTS

A.F. Zharkin, V.O. Novsky, D.O. Malakhatka

Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,

pr. Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine.

E-mail: [novsky@ied.org.ua](mailto:novsky@ied.org.ua)

Simulation Modeling of work regimes of solar power plants (SPP) and medium voltage (MV) network with them is executed. The influence on quality of electrical energy in a point of common connection (PCC) in dependence from power plants parameters and point of common connection deployment in the distribution MV network, as well solar power radiation level is defined.

References 2, figures 4.

**Key words:** quality of electric energy, solar power plant, distribution network.

1. Kyrylenko O.V., Pavlovskyy V.V., Yandulskyy O.S., Stelyuk A.O. Control of power plant with renewable energy sources in condstony of changing frequency in power system / Tekhnichna Elektrodynamika. – 2012. – No 4. – Pp. 52-57. (Ukr.)

2. Ahmed A. Elserougi, Ayman S. Abdel-Khalik. A Grid-Connected Switched PV Array / IECON2015-Yokohama. – November 9-12, 2015. – Pp. 68-70.

Надійшла 25.01.2016  
Остаточний варіант 05.04.2016