

АНАЛІЗ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

Я.В. Бацала, І.В. Гладь, У.М. Николин

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 727172,
e-mail: krishtiano@ukr.net

Проведено аналіз основних показників якості електроенергії, яка виробляється сонячними електростанціями прикарпатського регіону і подається в електричну систему. Проаналізовано показники енергоефективності інверторів, які використовують на даних сонячних електростанціях. Після вимірювання основних показників якості електроенергії, яка перетворена інверторами Fronius, проведено порівняльний аналіз допустимих значень основних параметрів електроенергії з експериментальними. Згідно з експериментальними даними на основі виміряних та записаних у бінарний файл миттєвих значень струмів та напруг, які генерує сонячна електростанція, розраховано значення струмів вищих гармонік, активної та реактивної потужностей. Наведено критерії впливу сонячних електростанцій на електротехнічне обладнання, системи релейного захисту та автоматики і надійність елементів енергосистеми. Порушено питання електромагнітної сумісності сонячних електростанцій з електричною системою.

Ключові слова: сонячна електростанція, інвертори, показники якості, електромагнітна сумісність, стійкість енергосистеми.

Проведен анализ основных показателей качества электроэнергии, производимой солнечными электростанциями региона Прикарпатья и подаваемой в электрическую систему. Проанализировано показатели энергоэффективности инверторов, используемые на данных солнечных электростанциях. После измерения основных показателей качества, преобразованной инверторами Fronius проведен сравнительный анализ допустимых значений основных параметров электроэнергии и экспериментальных. Согласно экспериментальных данных на основе измеренных и записанных в бинарный файл мгновенных значений токов и напряжений, генерируемых солнечной электростанцией рассчитано значение токов высших гармоник, активной и реактивной мощности. Приведены критерии воздействия солнечных электростанций на электротехническое оборудование, системы релейной защиты и автоматики и надежность элементов энергосистемы. Затронуты вопросы электромагнитной совместимости солнечных электростанций с электрической системой.

Ключевые слова: солнечная электростанция, инверторы, показатели качества, электромагнитная совместимость, устойчивость энергосистемы.

The main quality indices analysis of the electric power, produced with the help of the solar power stations of the Precarpathian Region and supplied into the energy system, has been conducted. The converter power efficiency indices that are used at the solar power stations have been analyzed. The basic admissible power parameter values have been compared with the experimental data after the main efficiency indices of the electrical power, converted by the Fronius converters, were measured. The current values of the high harmonic, active, and reactive powers have been calculated in accordance with the experimental data on the basis of the currents and voltages instantaneous values that were measured and recorded into the binary file. The criteria of the solar power stations influence onto electric equipment, relay protection and automatic equipment system, and electric power system elements reliability have been developed. The problems of electric and magnetic compatibility of the solar power stations with the electric system have been discussed.

Key words: solar power station, converters, quality indices, electromagnetic compatibility, system stability.

Вступ

Завдяки сприянню уряду України та впровадженню «зеленого тарифу» розвиток сонячної енергетики в нашій державі отримав потужний поштовх. Зокрема, лише в Івано-Франківській області у 2013 році вже побудовано дві електростанції: Богородчанська СЕС потужністю 2,803 МВт (компанія «Еко-Оптіма»), та СЕС «Радче» потужністю 3,993 МВт (компанія ТОВ «Геліос Енерджі»). В сонячний період дані електростанції виробляють електроенергію, яка постачається в електромережу, яка потребує узгодження параметрів з енергосистемою та покращення якості. Крім того, наявність в мережі сонячних електростанцій впливають на її параметри і, відповідно, на все електротехнічне обладнання, системи релейного захисту та автоматики, надійність елементів енергосистеми. Залежно від потужності СЕС та місця під-

ключення до мережі, а також ряду інших факторів доцільно на підставі техніко-економічних розрахунків шляхом порівняння вибрати оптимальний варіант підключення СЕС до енергосистеми.

Актуальність і невирішені питання

Генерування електроенергії альтернативними джерелами та під'єднання останніх до енергосистеми за допомогою перетворювачів струму впливає на якість електроенергії в мережі. Висока частота перемикання інверторів може створювати додаткові гармоніки в системах та зменшувати ефективність системи у зв'язку з порушенням стійкості джерела та збоями в роботі інверторів. Також через коливання величини виробленої електроенергії сонячними та вітровими електростанціями, яка постачається в енергосистему, що залежить від часу доби,

пори року, інтенсивності сонячної енергії через хмарність для сонячних електростанцій та швидкість вітру для вітрових електростанцій, порушується стійкість роботи, а відповідно й надійність енергосистеми.

Проаналізувавши дослідження, які проводилися в Україні та в інших європейських країнах, можна зробити висновок, що вплив неякісної електроенергії на електричне обладнання є досить суттєвим, а дослідження проблеми впливу джерел нетрадиційної генерації на показники якості електроенергії дозволить отримати шляхи зменшення втрат електроенергії, збільшити термін роботи електричного обладнання, зменшити швидкість старіння ізоляції ліній електропередач під дією вищих гармонік та обмежити нагрівання трансформаторів через несиметрію [1]. Велике значення для аналізу впливу СЕС на показники якості електроенергії в системі має місце підключення та потужність джерела. Згідно з [2] можна виділити три варіанти впливу «розподільної генерації» (РГ) на енергосистему, що може як збільшувати, так і зменшувати втрати потужності в електричних мережах, впливати на величину зміни напруги, коливання напруги, величину флікера, надійність роботи та термін експлуатації електричної мережі.

Приєднання СЕС та ВЕС до мережі може покращити рівні напруг у вузлах системи, але необхідно передбачити резерв потужності в системі для покриття дефіциту потужності у випадку раптового відімкнення через природні фактори [3]

Зміна амплітуди та характеру потужності в місцевих електромережах завдяки підключенню джерел нетрадиційної енергетики зумовлює розгляд питань аналізу параметрів якості електроенергії, яку отримують від сонячних електростанцій, перегляду стандартів стійкості енергетичних систем та поглиблене вивчення даної проблематики.

Постановка завдання

Метою цієї роботи було провести аналіз якості електроенергії, виробленої сонячною електростанцією в Прикарпатському регіоні в піковий сонячний період, а саме в обідню пору сонячного дня в липні 2013 року. Для аналізу енергетичних параметрів виробленої сонячної енергії застосовуємо інформаційно-вимірвальний апаратно-програмний комплекс (ІВАПК), який розроблено на кафедрі електропостачання та електрообладнання промислових підприємств ІФНТУНГ, що дає можливість проаналізувати параметри електроенергії з відображенням середньоквадратичних і пікових значень, коефіцієнтів спотворення синусоїди для вибраного каналу, зміну частоти [4]. Згідно з отриманими результатами необхідно зробити висновки щодо проблематики підключення сонячних електростанцій в мережу та розробити основні заходи з підвищення якості електроенергії.

Результати

Вимоги до вітрових та сонячних фотоелектричних електростанцій щодо приєднання до зовнішніх електричних мереж розроблено на основі Датських вимог до вітрових станцій в жовтні 2011 року. Згідно з даними вимогами за умови приєднання відновлюваних джерел до електричних мереж, класифікують електростанції малої (до 2 МВт), середньої (від 2 до 25 МВт) та значної потужності (більше 25 МВт), які можуть впливати на режими роботи місцевих, магістральних мереж, а також помітно впливати на баланс потужності енергосистем [5].

Прикарпатські СЕС належать до електростанцій середньої потужності, що можуть впливати на режими роботи місцевих (локальних) електричних мереж середньої та високої напруги.

Показники якості електричної енергії в точці приєднання повинні відповідати міждержавному стандарту «ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения» [6]. Зазвичай робоча напруга має знаходитися в діапазоні 0,34-0,42 кВ (низька напруга), 9-11 кВ (середня напруга), а частота від 49,6 до (гранично допустиме зниження частоти) до 50,2 Гц (нормально допустиме підвищення частоти). Крім того, СЕС повинна залишатися підключеною до мережі у випадку аварійних умов експлуатації (стрибокподібні зміни фаз до 20° в точці приєднання, падіння напруги в точці приєднання до рівня 20% від номінальної напруги як мінімум протягом 0,5 с без відключення), а також витримувати всі групи нормативних збурень відповідно до ГКД 34.20.575-2002 «Стійкість енергосистеми. Керівні вказівки» та міждержавних стандартів [7], [8], [9], [10].

На СЕС «Радче» енергія, вироблена фотомодулями Chaori Solar CRM240S-156P-60 (240W), перетворюється інверторами Fronius, які підключені до низьковольтної частини електростанції пофазно. До кожного інвертора підключено групу сонячних фотомодулів певної потужності (в нашому випадку 240 Вт). Інвертори, в свою чергу, під'єднані до певної секції низької напруги трансформаторної підстанції (КТП – 1000 кВА). Кількість виробленої енергії залежить від величини освітленості в даний період.

Виробництво електроенергії на сонячній електростанції «Старі Богородчани-1» здійснюють за допомогою фотомодулів SUNOWE потужністю 225-230 Вт. Перетворення постійного струму в змінний на даній СЕС відбувається інверторами KACO POWADOR 39.0 TL3.XL з номінальною потужністю 39 кВт.

На рисунку 1 зображено принципову схему підключення інверторів Fronius до шин низької напруги трансформаторів ТМ-1000, на якій відбувається генерація електроенергії. Безпосередньо до системи СЕС під'єднують з боку високої напруги 10 кВ, але аналіз здійснювався на напрузі 0,4 кВ, оскільки розглядається можли-

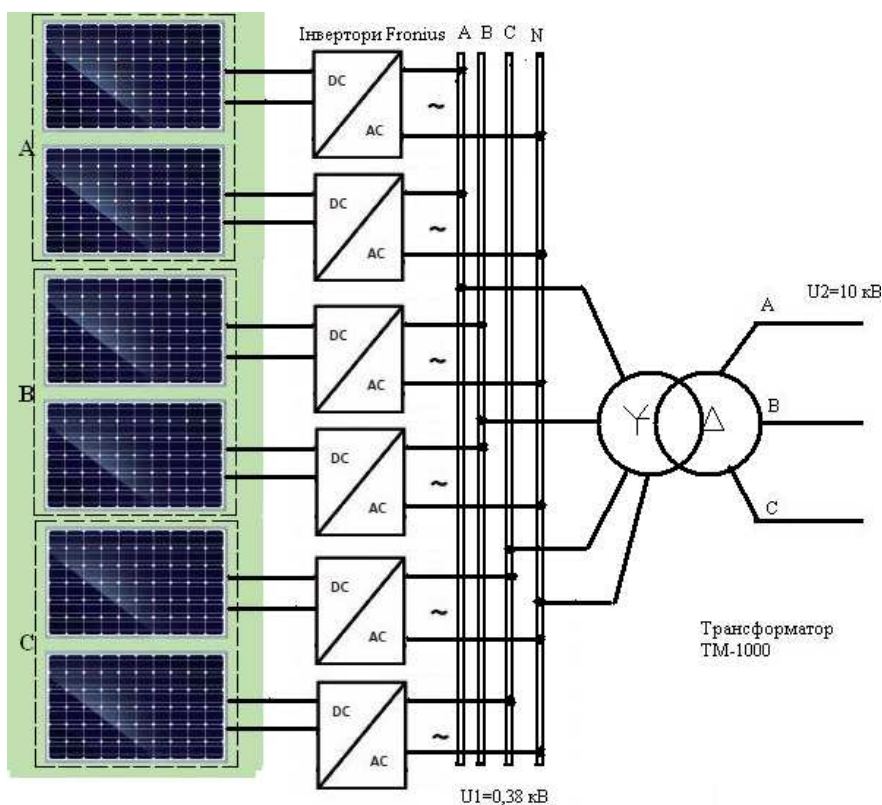


Рисунок 1 – Принципова схема підключення інверторів Fronius

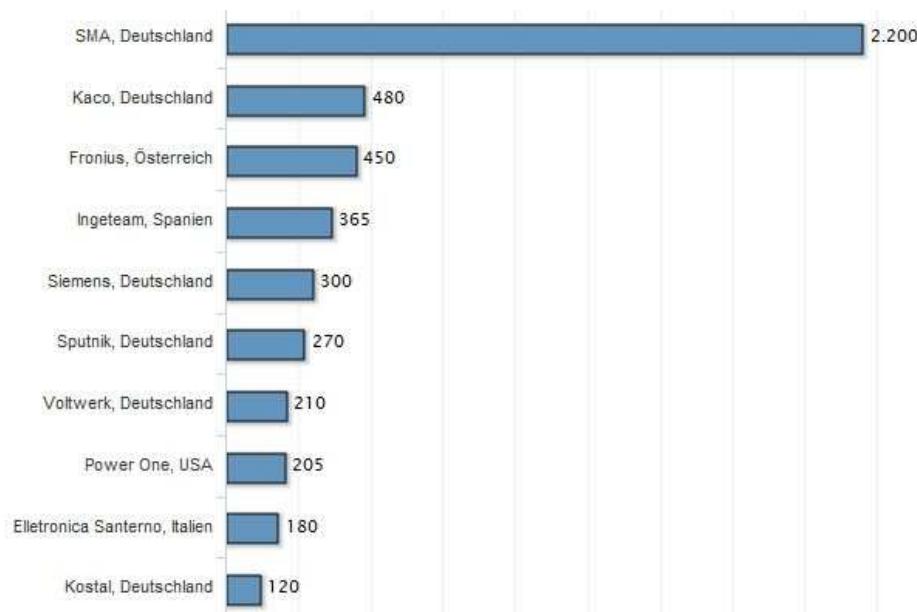


Рисунок 2 – Виробники інверторів

вість приєднання приватних будинків з фото-модулями через інвертори до мережі 0,4 кВ.

Інвертор Fronius являє собою перетворюючий пристрій, призначений для роботи у складі фотоелектричної системи з потужністю від 24 кВт. Дані інвертори, а також інвертори виробників SMA (Німеччина), Kaco (Німеччина), Ingeteam (США) і Siemens (Німеччина) належать до п'ятірки найбільш розповсюджених інверторів, які застосовують на СЕС (За даними IMS Research Neup 2011) [11]. Вибір даних ін-

верторів базується на порівнянні ефективності різних типів інверторів, тобто величини втрат енергії на перетворення постійного струму в змінний струм під час роботи та нічних годин. На рисунку 2 порівняно десять найкращих виробників інверторів за величиною перетвореної електроенергії в МВт. З рисунка 2 можна зробити висновки, що інвертори, які виробники використовують в Україні, належать до найбільш енергоефективних і їх використовують в усьому світі.

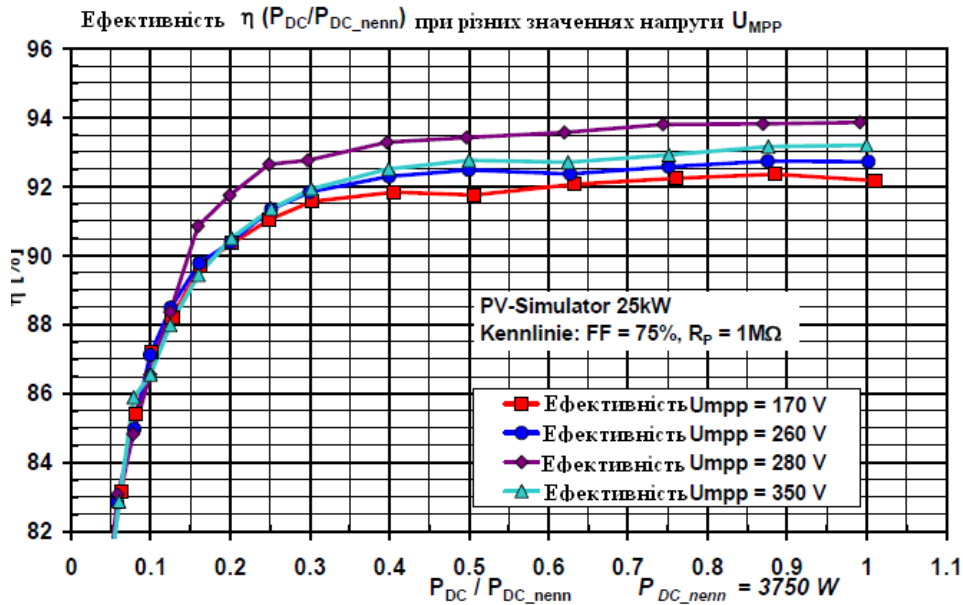


Рисунок 3 – Залежність ефективності інверторів Fronius від відношення потужності інвертора до номінальної потужності інвертора

На рисунку 3 зображено залежність енергоефективності інверторів Fronius від завантаження та величини напруги перетворення. Максимальна ефективність інверторів Fronius досягає 93,5%. Ця величина залежить також від напруги, яка подається до інвертора і тактової частоти. Якщо здійснювати порівняння за напругою, то можна зробити висновок, що оптимальна ефективність інверторів досягається на напрузі 280 В.

У Fronius використовують нову конфігурацію системи, яка заснована на модульному принципі. За основу цієї конфігурації закладено принцип використання більш завантажених перетворювачів, які працюють з більшою ефективністю. Саме тому інверторні станції працюють з модулями невеликих потужностей, що підключаються або відмикаються автоматично, залежно від генерування сонячних батарей, для того, щоб забезпечити роботу з навантаженням, яке відповідає максимальному ККД і дає змогу ефективно генерувати енергію в період слабкої освітленості – у ранкові та вечірні години і при високій хмарності.

Особливостями інвертора Fronius є можливість паралельного з'єднання з енергосистемою, інформативний графічний дисплей, простота в обслуговуванні та технологічність. Дисплей інвертора Fronius із задньою підсвіткою екрану відрізняється підвищеною яскравістю зображення. Крім цього, моделі інвертора Fronius відрізняються стійкістю до впливу навколишнього середовища та ремонтоздатністю. У тому випадку, якщо виникне несправність, дефектну схемну плату швидко і легко можна замінити на місці без демонтажу інвертора, у результаті час простою мінімізується.

Функція інвертора полягає в тому, щоб у будь-який час ефективно перетворювати вироблений сонячними батареями постійний струм у змінний з максимально можливою продуктив-



Рисунок 4 – Приєднання ІВАПК до вихідних затискачів інвертора Fronius

ністю. Чим вища швидкодія системи управління інвертором, тим краще він адаптується до зміни рівня освітленості батарей.

На рисунку 4 зображено приєднання інформаційно-вимірювального АПК до виходу інвертора. Аналізатор якості напруги та електроспоживання, який використаний для проведення досліджень побудовано на використанні перетворювачів напруг і струму швейцарської фірми LEM - CV3-1000 і LemFlex i3000s по 3 шт. відповідно; 16 бітного аналого-цифрового перетворювача (АЦП) американської фірми National Instruments NI-USB-6210, що має 8 диференціальних каналів і максимальну частоту перетворення 250 кГц; блоку узгодження перетворювачів з АЦП; ноутбука; спеціалізованого програмного забезпечення. Даний аналізатор дає змогу вимірювати миттєві значення струмів і напруг, підключати давачі вимірювання неелектричних величин, при цьому з достатньою легкістю зберігати та використовувати і аналізувати результати вимірювань з високою точні-

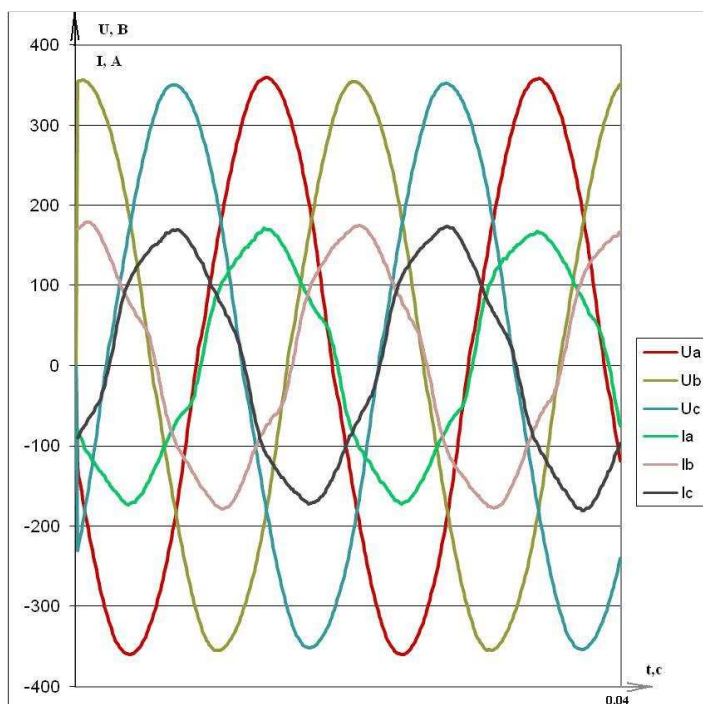


Рисунок 5 – Графік миттєвих значень струмів та напруг в трьох фазах на затискачах інвертора

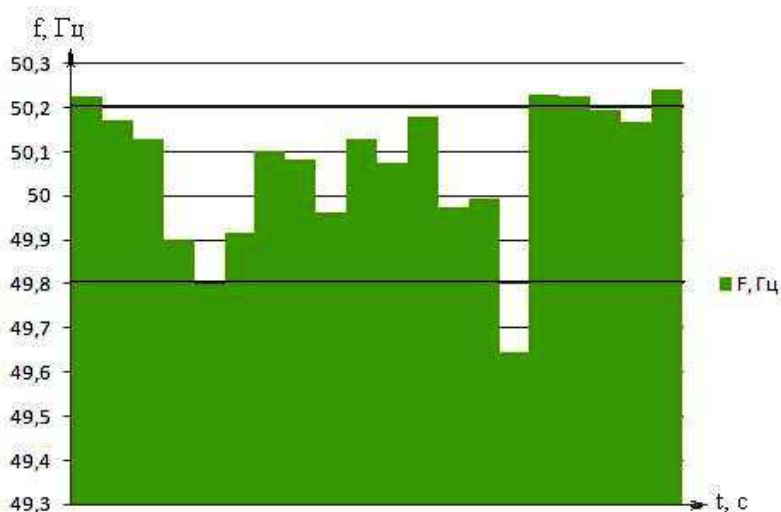


Рисунок 6 – Графік зміни частоти струму на затискачах інвертора

стю (максимальна похибка вимірювання $\pm 2\%$). Під час роботи аналізатора в режимі багатоканального реєстратора протягом певного часу відбувається запис сигналів у файл, а після закінчення запису запускається певна спеціалізована підпрограма, що дає можливість графічно відображати записані сигнали, обробляти і зберігати у файлі необхідний відрізок сигналів з корисною інформацією та аналізувати параметри електроенергії з відображенням середньоквадратичних і пікових значень, коефіцієнт спотворення синусоїди для вибраного каналу, зміни частоти тощо [4].

На рисунках 5-7 зображено графіки зміни миттєвих значень напруг і струмів в трьох фазах, зміни частоти струму інвертора та аналіз гармонічного складу струмів фази А інвертора.

Напруга має чітко виражену синусоїдну форму, натомість в формі струму фази А присутні гармонічні складові, що детально відображено на графіку гармонічного складу струму фази А. Кут зсуву між напругою та струмом дорівнює нулю, це означає, що за класичним поняттям реактивна потужність практично рівна нулю. Частота струму інвертора коливається в допустимих межах, але за експериментальних досліджень було зауважено відімкнення частини інверторів при максимальному освітленні сонячних фотомодулів, що не дає змогу розвинути максимальну потужність генерування. Перспективою подальших досліджень є виявлення причин збою інвертування та шляхів вирішення цієї проблеми.

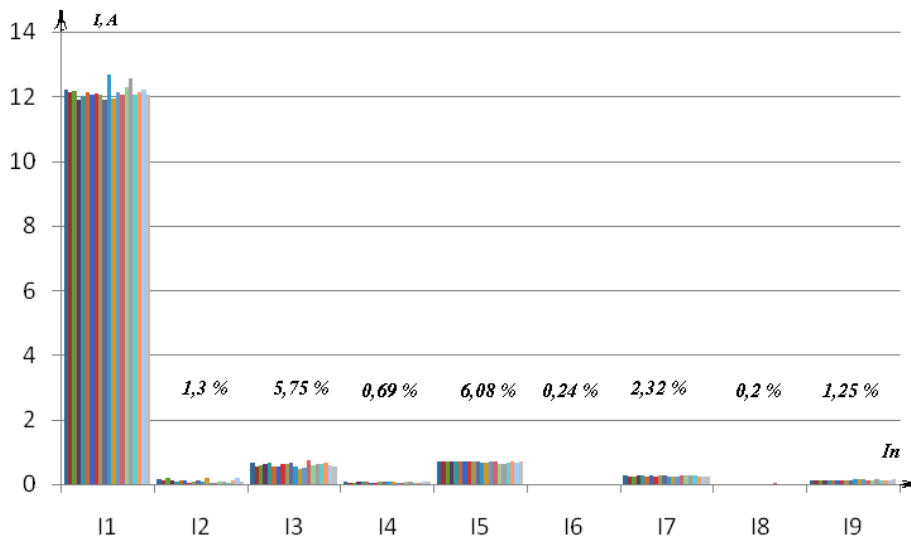


Рисунок 7 – Гармонічний спектр струму на затискачах інвертора

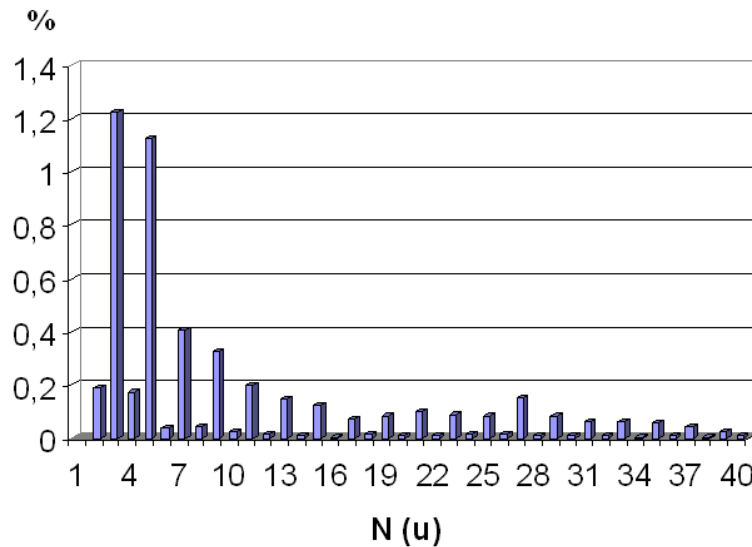


Рисунок 8 – Гармонічний спектр напруги на затискачах інвертора

На рисунку 7, 8 значення коефіцієнтів n -гармонічних складових струму $K_{(n)i} = \frac{i_{n(t)}}{i_i}$ і

напруги $K_{(n)U} = \frac{U_{n(t)}}{U_i}$ визначене у відсотках.

Якість електричної енергії за коефіцієнтом n -ої гармонічної складової напруги вважають відповідною нормам стандартів, якщо сумарний час відхилень від нормально допустимих значень становить не більше 5 % від встановленого періоду часу, тобто 1 година 12 хвилин. Якість електроенергії на затискачах інвертора відповідає необхідним вимогам.

Наступним етапом дослідження було проведення вимірювань на шині 0,4 кВ трансформаторної підстанції, яка віддає електроенергію в мережу. Вироблення електроенергії супроводжувалося відключеннями певних груп інверторів, які відбувалися спонтанно і впливали на

кількість виробленої активної потужності. На рисунку 9 зображено графік зміни активної потужності сонячного джерела, який умовно можна розділити на чотири періоди. На першому етапі відбувається вироблення електроенергії всіма групами інверторів (480 кВт), що супроводжується значними коливаннями величини виробленої енергії. На наступному етапі ми відімкнули половину навантаження і отримали практично прямолінійний графік виробітку електроенергії (350 кВт). На третьому етапі було ввімкнено 4/6 навантаження, в результаті чого величина виробленого навантаження зростає до 400 кВт, а графік залишився прямолінійним. На четвертому етапі ввімкнено 5/6 навантаження, що несуттєво збільшило величину виробленої електроенергії, а коливання величини виробленої електроенергії повернулося на попередній рівень. Інтенсивність коливання збільшується зі зростанням активної потужності генерування.

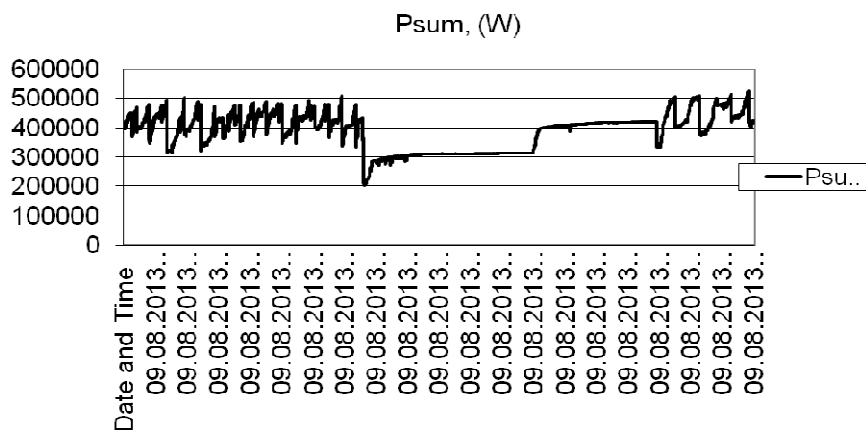


Рисунок 9 – Графік зміни активної потужності на затискачах підстанції СЕС

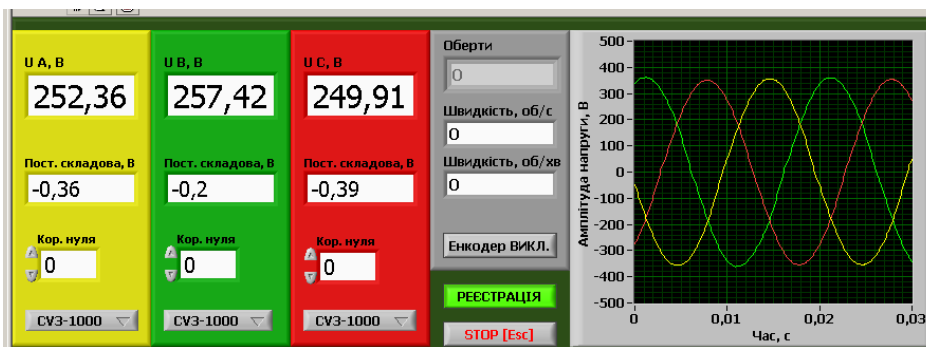


Рисунок 10 – Панель реєстратора з миттєвими значеннями напруг в трьох фазах під час вимірювання параметрів сонячної електроенергії

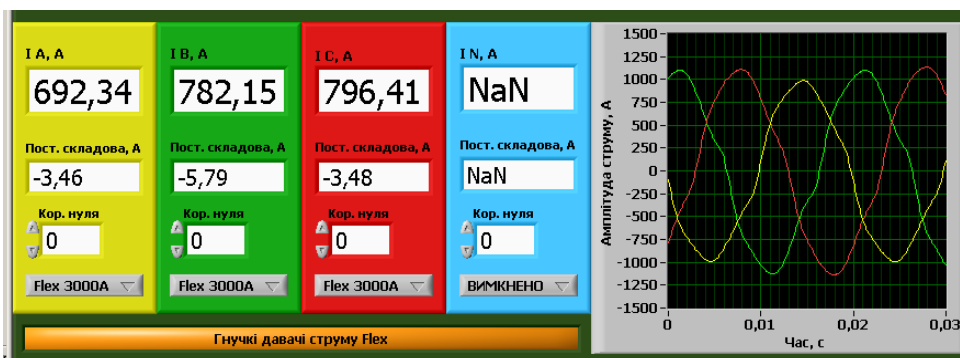


Рисунок 11 – Панель реєстратора з миттєвими значеннями струмів в трьох фазах під час вимірювання параметрів сонячної електроенергії

На рисунках 9, 10 зображено панелі реєстратора (ІВ АПК), на якому в реальному часі можна спостерігати значення струмів та напруг в трьох фазах і графіки струмів і напруг. Крім несинусоїдності форми струму, спостерігається несиметричність даної кривої.

Проаналізувавши графік зміни напруг в трьох фазах, можна прийти до висновку, що коливання напруги відбувається в межах норми. Вищих гармонік напруги як у неробочому ході, так і за генерування практично немає, частота в межах ГОСТ 13109-97 (50 Гц).

Після опрацювання даних вимірювань, можна зробити висновок, що на затискачах ТП СЕС присутнє коливання активної, і відповід-

но, повної потужності, реактивна потужність практично відсутня. Також бачимо, що рівень споживаної реактивної потужності зсуву практично незмінний, але має різкі зміни під час відключення частини інверторів та за інших перехідних процесів. Питання визначення реактивної потужності в мережах з різко змінним навантаженням та вибір відповідних компенсуювальних пристроїв за необхідності потребує додаткового вивчення. Згідно з [12] розрізняють реактивну потужність зсуву $Q = UI_1 \sin \phi_1$, яку можна компенсувати конденсаторними батареями, синхронними компенсаторами або недовантаженими синхронними електродвигунами в режимі перезбудження, та реактивну

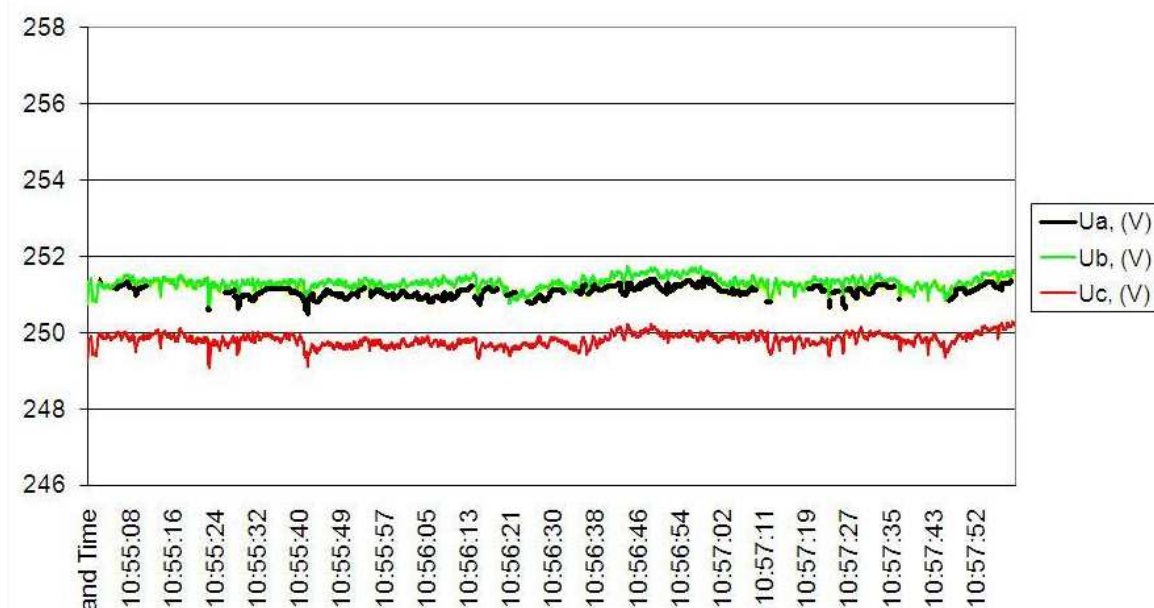


Рисунок 12 – Графік зміни напруги на затискачах ТП СЕС

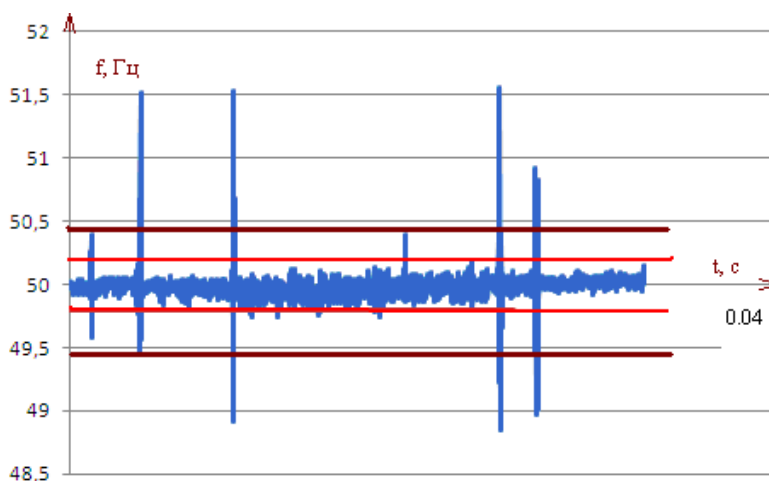


Рисунок 13 – Графік зміни частоти на затискачах ТП СЕС

потужність спотворення $T = U \sqrt{\sum_{i=2}^n I_i^2}$, яка

спричинена вищими гармоніками струму і для компенсації якої необхідні спеціальні фільтрокомпенсувальні пристрої. Реактивна потужність зсуву в даному випадку має від'ємний характер, а піки практично симетричні з піками потужності спотворення.

Через наявність впливу сонячної електростанції на електричну систему та, відповідно, на окремих споживачів за умови підключення без пристроїв трансформації в мережу важливе значення має вірне формулювання умов безтрансформаторного приєднання до мережі нових джерел енергії. Це призводить до необхідності застосування нових методів і програм розрахунку показників якості електроенергії в місці приєднання СЕС. Так як, практично усі технічні засоби підвищення якості електроенергії мають у своєму складі реактивні елементи і тому

впливають на баланс реактивної потужності у мережі, то слід комплексно проаналізувати дані питання. Виникає необхідність детального аналізу впливу сонячних джерел на здатність обладнання нормально функціонувати в електромагнітному середовищі, пов'язаному з роботою СЕС, не створюючи при цьому недопустимих перешкод для інших елементів мережі. Тому дослідження впливу СЕС на показники якості електроенергії енергосистеми та енергетичну сумісність надалі є перспективними і потребує детальних досліджень.

Висновки

1. Експериментально отримано достовірні результати вимірювання основних показників якості електроенергії та складових потужності, які базуються на стандартних алгоритмах цифрового оброблення сигналів, що використані в ІВ АПК.

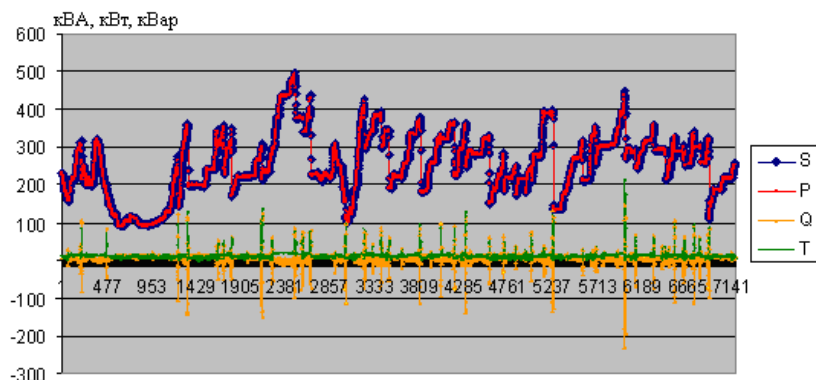


Рисунок 14 – Динаміка зміни активної та реактивної потужностей на затискачах ТП СЕС

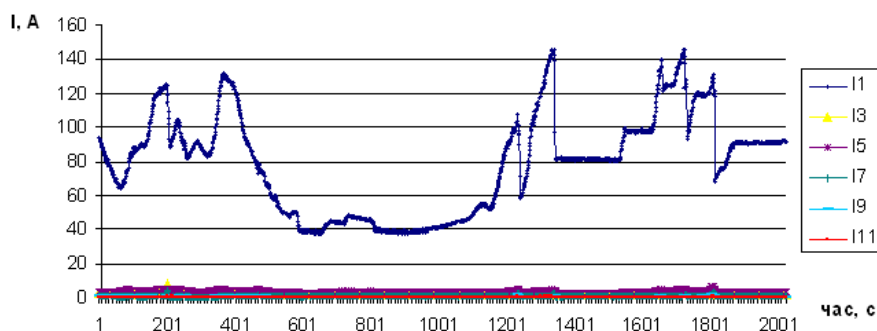


Рисунок 15 – Графік зміни струму фази А та розклад струму на гармонічні складові

2. Використання ІВ АПК дає змогу в реальному часі проводити аналіз показників якості електроенергії та використовувати результати досліджень для розроблення заходів підвищення ефективності роботи сонячної електростанції в енергосистемі.

3. За допомогою експериментальних досліджень енергетичних параметрів та показників якості електроенергії сонячних електростанцій робимо висновок, що за нормального режиму на досліджуваній СЕС відбувається генерація електричної енергії з дотриманням чинних стандартів.

Література

1 Бекиров Э. А. Анализ качества электрической энергии, генерируемой солнечной электростанцией в энергосистему. [Текст] / Бекиров Э. А., Романовский И. В. // Строительство и техногенная безопасность. – 2011. – Вып. 40. – С. 106-115.

2 Кириленко О. В. Технічні аспекти впровадження джерел розподільної генерації в електричних мережах. [Текст] / Кириленко О. В., Павловський В. В., Лук'яненко Л. М. // Технічна електродинаміка. – 2011. – №1. – С. 46–51.

3 Коновал В. С. Дослідження впливу вітрової електростанції на режимі роботи електричної мережі / В. С. Коновал, А. Ю. Кучинський, О. І. Горак. – С. 64-69.

4 Гладь І. В. Проблеми та принципи проектування універсального апаратно-програмного комплексу для енергетичних обстежень електромереж [Текст] / Гладь І. В., Галушак І. Д.,

Поточний А.І., Маскевич У. М., Бацала Я. В., Кіянюк О. І. // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2008. – № 3(28). – С. 83-87.

5 Вимоги до вітрових та сонячних фотоелектричних електростанцій потужністю більше 150 кВт щодо приєднання до зовнішніх електричних мереж // Жовтень 2011 року. – С. 1-42.

6 ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения».

7 IEC TR 61000-3-6: EMC limits. Limitation of emissions of harmonic currents for equipment connected to medium and high voltage power supply systems. (February 2008).

8 IEC TR 61000-3-7: EMC-limits. Limitation of voltage fluctuations and flicker for equipment connected to medium and high voltage power supply systems. (February 2008).

9 IEC 61400-21: Measurement and assessment of power quality characteristics of grid connected wind turbines.

10 ДСТУ EN 50160:2008. Характеристики напруги електропостачання у розподільчих мережах загальної призначеності.

11 Berner Fachhochschule/haute école spécialisée bernoise Bern University of Applied Science. [Online]. Available: <http://www.pvttest.ch/>

12 Соломчак О.В Проблеми розрахунку та компенсації реактивної потужності в мережах з несінусоїдним (нелінійним) навантаженням [Текст] / Соломчак О.В, Гладь І.В. // Енергетика та електрифікація. – 2008. – № 6. – С. 27-32.

13 Денисюк С. П. Оптимізація режимів електропостачання в локальних системах з розосередженою генерацією [Текст] / Денисюк С.П., Дерев'янку Д.Г., Колесник П.С. // Зб. пр. Ін-ту електродинаміки НАН України. Спец. вип. – 2011. – С. 30–37.

14 Денисюк С. П. Аналіз електромагнітної сумісності елементів систем електропостачання при змінних параметрах генератора та навантажень [Текст] / Денисюк С. П., Рибіна О. Б., Дерев'янку Д. Г. // Спец. випуск Праць Ін-ту електродинаміки НАН України (Матеріали I Міжнародної конференції «Інтелектуальні енергетичні системи – ІЕС'10»), – К.: ІЕД НАНУ, 2010 – С. 32–43.

15 Кириленко О.В. Аналіз стійкості енергетичних систем за напругою [Текст] // Кириленко О.В., Павловський В.В., Лук'яненко Л.М., Зорін Є.В., // Технічна електродинаміка. – К.: ІЕД НАНУ, – 2010. – № 3. – С. 59 – 67.

*Стаття надійшла до редакційної колегії
27.11.13*

*Рекомендована до друку
професором **Костишиним В.С.**
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)
канд. техн. наук **Добровольською Л.Н.**
(Луцький національний технічний університет,
м. Луцьк)*