

ВПЛИВ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ НА НИЗЬКОВОЛЬТНІ РОЗПОДІЛЬНІ МЕРЕЖІ

Проаналізовано показники електромагнітної сумісності підключеної до низьковольтної мережі сонячної електростанції. Згідно з вимірними експериментально миттєвими значеннями струмів і напруг, які генеруються за допомогою сонячних електростанцій, обчислено струми вищих гармонік. Результати вимірювання показали, що наявність фотоелектричних систем у мережі може призвести до зниження параметрів якості напруги живлення, таких як коливання напруги, коефіцієнтів гармонічних спотворень, флікера напруги і коефіцієнта потужності. Зроблено порівняння допустимих значень основних параметрів електричної енергії з експериментальними даними. Показано ймовірність виникнення коливних енергообмінних процесів та необхідність експериментального визначення імпедансу мережі.

Ключові слова: сонячна електростанція, інвертор, показники якості, електромагнітна сумісність, реактивна потужність, енергоефективність.

Зростаючий попит на сонячні електростанції, крім користі для навколишнього середовища, зумовив розгляд фахівцями-енергетиками питання щодо впливу даних електростанцій на якість електроенергії та надійність енергосистеми. Підключення до мережі фотоелектричних джерел, які мають у своєму складі інвертори, може призвести до збільшення втрат, зміни перетоку потужностей, ферорезонансу, флікера напруги, втрати координації системи захисту, а як наслідок – до відключень споживачів. Крім того, фотоелектричні системи можуть спричиняти гармонійні складові, а варіації сонячної радіації можуть викликати коливання потужності генерування і напруги.

Стабільність в мережі може досягатись за допомогою Smart Grid, які ефективно керують процесами виробництва і споживання електроенергії з отриманням максимальної вигоди від наявних ресурсів. Для нового покоління сонячних інверторів PV необхідно збільшувати рівень інтелектуалізації при інтеграції в мережу за рахунок збільшення кількості контрольованих параметрів та уникнення режимів з низькою ефективністю та електромагнітною сумісністю. Також при підключенні сонячної електростанції до енергосистеми необхідно проводити попереднє математичне моделювання режимів роботи при різних параметрах мережі, а за можливості – експериментальні дослідження на наявність гармонічних спотворень. Ускладнює процес моделювання динамічна зміна параметрів джерела генерації та навантаження, що найбільше проявляється в локальних мережах. В цілому, система інвертор-мережа може бути представлена за допомогою еквівалентної схеми, зображеної на рисунку 1.

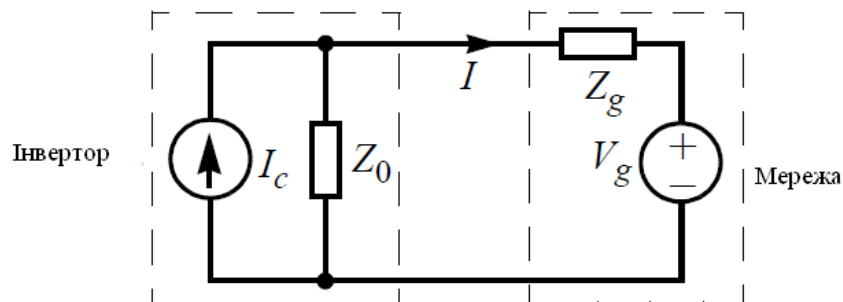


Рисунок 1 – Схема заміщення інвертора та мережі

На підставі еквівалентної схеми, вихідний струм перетворювача, який може бути перетворений

$$I(s) = \frac{I_c(s)Z_0(s)}{Z_0(s) + Z_g(s)} - \frac{V_g(s)}{Z_0(s) + Z_g(s)}, \quad (1)$$

$$I(s) = \left[I_c(s) - \frac{V_g(s)}{Z_0(s)} \right] \cdot \frac{1}{1 + \frac{Z_g(s)}{Z_0(s)}} \quad (2)$$

Проте при домінуванні в мережі нелінійного навантаження дані рівняння не завжди адекватні і не можуть бути використані при резонансах та інших високочастотних явищах. Також даний «імпедансний метод» не може бути застосований для однофазних сонячних джерел локальної генерації, тому рекомендовано використовувати методи аналізу сигналів «гармонійної лінеаризації».

$$Z_p(s) = \frac{\frac{H_i(s)V_{dc}}{2} + sL}{1 - \frac{1}{2}T_{PLL}(s \pm j2\pi f_1) \left[H_i(s) \frac{V_{DC}}{V_1} \frac{I_1}{2} e^{j\phi} \right]} \quad (3)$$

де $H_i(s)$ - передавальна функція ємнісного струму, L - вихідна індуктивність, V_{dc} - напруга шини постійного струму, T_{PLL} - коефіцієнт посилення петлі фази автопідстроювання частоти (ФАПЧ), який використовується для синхронізації з мережею, I_1 , Φ - амплітуда і фазовий кут вихідного струму.

Даний метод дозволяє аналізувати криві струму залежно від характеристик перетворювача. Для більш повного аналізу пропонується симулятор з експериментальними дослідженнями та можливістю моделювання режимів мережі, застосовуючи генератори гармонійних спотворень. Такі вимірювання дозволять відобразити наявні процеси при різних частотах [1].

При дослідженні роботи сонячної електростанції потужністю 4 МВт у селі Радча на Прикарпатті за допомогою переносного інформаційно-вимірювального апаратно-програмного комплексу (ІВАПК) було проаналізовано енергетичні показники на шинах 0,4 кВ однієї з ТП 1000 кВА, яка віддає сонячну енергію в мережу. Розроблений вимірювальний пристрій побудований за допомогою застосування технології віртуальних приладів і середовища графічного програмування LabVIEW має в складі ноутбук та конструктивно завершені вузли з нормованими метрологічними характеристиками (три давачі напруги CV3-1000 та три давачі струму типу струмових кліщів з аналоговим виходом АТА-2502, які приєднані до входів 16-розрядного АЦП NI USB-6210). Останній за допомогою шини USB з'єднується з портативною ЕОМ із встановленим програмним забезпеченням, яке реалізує зчитування інформації з АЦП, розрахунок і візуалізацію ПЯЕ та розроблений інтерфейс. Програмне забезпечення містить велику кількість підпрограм стандартних алгоритмів цифрової обробки сигналів (швидке перетворення Фур'є, визначення середньоквадратичного значення, цифрові фільтри та ін.), підпрограм візуалізації інформації та записування у файл на жорсткому диску ЕОМ, а також інтерфейс віртуального приладу та блок-схеми, яка є алгоритмом його функціонування.

Вимірювання проводилися в серпні при максимальному рівні сонячної інсоляції, проте вироблення електроенергії супроводжувалося відключеннями певних груп інверторів, які відбувалися спонтанно і впливали на кількість виробленої активної потужності. На рисунку 2 зображено графік зміни активної потужності сонячного джерела (в кожній фазі та сумарне), 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 зросла 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 [2].

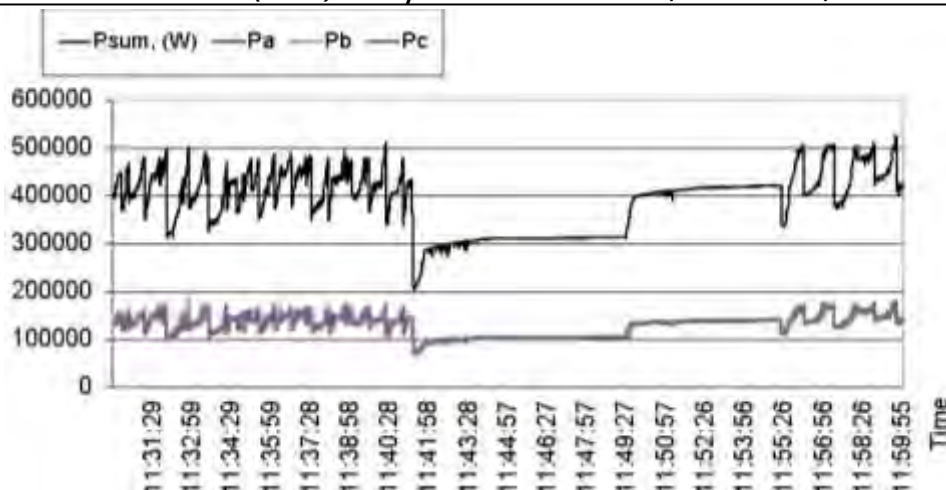


Рисунок 2 – Графік зміни активних потужностей на шинях 0,4 кВ підстанції сонячної електростанції

Експериментально доказано, що правильний вибір трансформатора та його групи з'єднання має важливу роль при сумісній роботі джерела генерації з мережею, які необхідно враховувати власникам електростанції. При зміні групи з'єднання трансформаторів на даній електростанції інвертори перестали відмикатися і потужність генерації зросла до номінальної.

На рисунку 3 зображено графік зміни реактивну потужність зсуву $Q = UI_1 \sin \varphi_1$, яку можна компенсувати конденсаторними батареями, синхронними компенсаторами або недовантаженими синхронними електродвигунами в режимі перезбудження, та реактивну потужність спотворення

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

яка спричинена вищими гармоніками струму і для компенсації якої необхідні спеціальні

фільтро-компенсувальні пристрої. Реактивна потужність зсуву в даному випадку має від'ємний характер, а піки практично симетричні з піками потужності спотворення. Рівень споживаної реактивної потужності зсуву практично незмінний, але має різкі зміни під час відключення частини інверторів та за інших перехідних процесів.

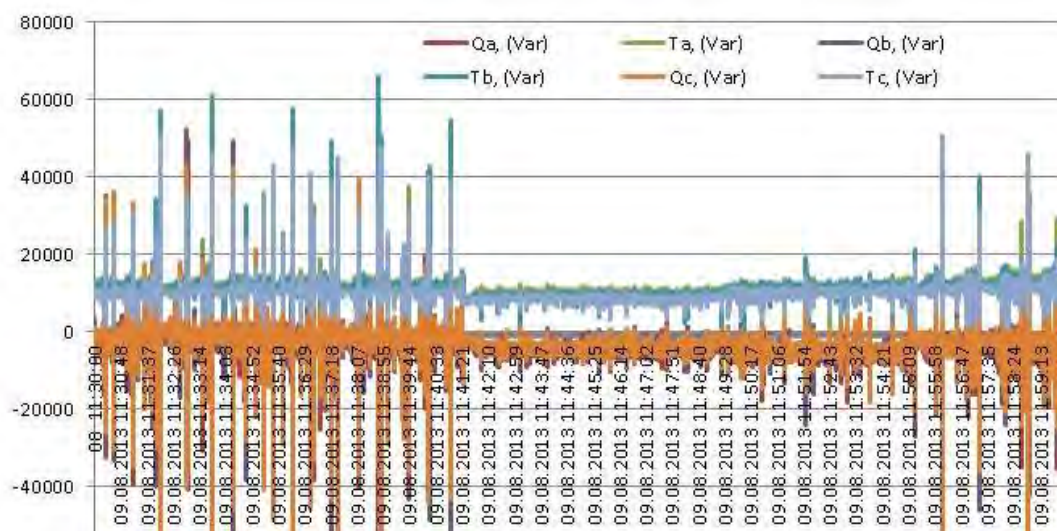


Рисунок 3 – Графіки зміни реактивної потужності зсуву та спотворення

Проаналізувавши зміну миттєвих значень напруг і струмів в трьох фазах, зміни частоти струму інвертора та аналіз гармонійного складу струмів фази А інвертора за допомогою середовища LabVIEW

було розроблено підпрограми пофрагментної обробки сигналу для розрахунку коефіцієнтів несиметрії та несинусоїдності. При вимірюваннях на затискачах підстанції сонячної електростанції коефіцієнт несиметрії струму досягав в окремі періоди 17 %, що перевищує допустиме значення. При цьому коефіцієнт несиметрії напруг не перевищував 5 %. Напряга має чітко виражену синусоїдну форму, натомість в формі струму фази А присутні гармонійні складові.

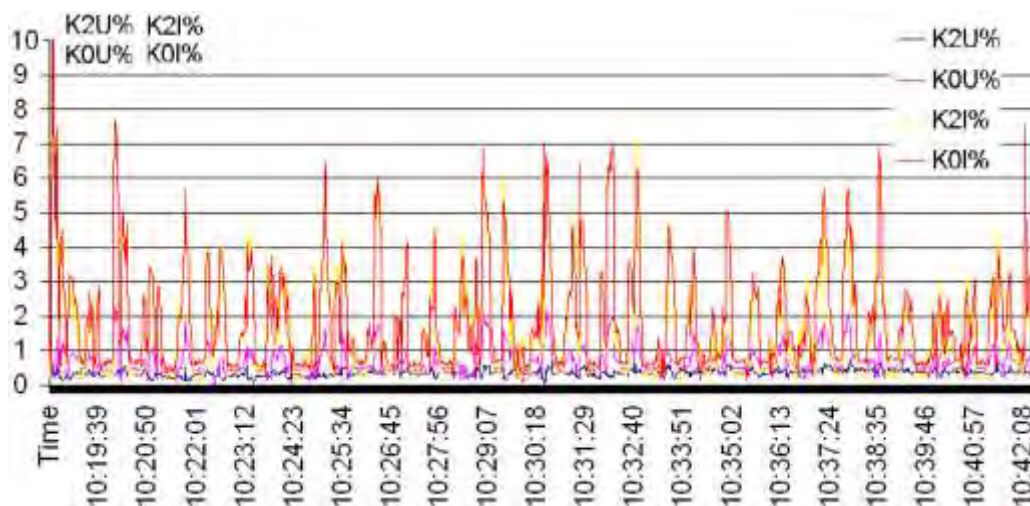


Рисунок 4 – Графік зміни коефіцієнтів несиметрії струмів та напруг сонячної електростанції

Важливим показником електромагнітної сумісності є сумарний коефіцієнт гармонійних спотворень (THD). Як і очікувалося, максимальні значення THD були виміряні під час роботи при низькій активній потужності, у той час як мінімальні значення спостерігалися, коли інвертори PV працювали практично при номінальній потужності. Значення суммарного коефіцієнта гармонійних спотворень струму THDi під час генерації становило близько 5 %, проте при відмиканнях інверторів збільшувалось до 14 %, що не відповідає нормованим ГОСТ 13109-97 значенням.

Коливні зміни реактивної потужності фотоелектричних систем можуть викликати швидке перемикання конденсаторів. У зв'язку з цим, піки напруги і коливання можуть відбуватися з непередбачуваною амплітудою і тривалістю. Це може призвести до виходу з ладу чутливе електронне обладнання або мінімізацію тривалості роботи. Таким чином, бажано зменшити існування коливних процесів. Сучасні конструкції інтелектуальних інверторів повинні мати функції контролю реактивної потужності та забезпечувати кращу компенсацію, що ґрунтується на системних параметрах і потребах в розподільній мережі.

Список використаної літератури

1. SUN, Jian. Power quality in renewable energy systems-Challenges and opportunities. In: International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'12), Spain. 2012. p. 28-30.
2. Гладь І. В. Аналіз показників якості електроенергії сонячної електростанції. [Текст] / Бацала Я. В., Гладь І. В., Николин У. М. // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2013. - № 4(49). – С 81-89 с.
3. Бацала Я. В. Удосконалення засобів контролю параметрів електроенергії відновлюваних джерел енергії [Текст] / Я. В. Бацала, І. В. Гладь, О.І. Кіянюк // Нафтогазова енергетика. – 2015. – №1 (23). – с.52-60.

I. Glad, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof.

Y. Batsala, TF

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

INFLUENCE OF SOLAR POWER PLANTS ON LOW-VOLTAGE DISTRIBUTION NETWORKS

It is analyzed indexes of electromagnetic compatibility of a solar power plant connected to a low-voltage network. According to the experimentally measured instantaneous values of currents and voltages generated by solar power stations, the currents of the higher harmonics are calculated. The measurement results showed that the presence of photovoltaic systems in the network can lead to a decrease in the quality parameters of the supply voltage, such as voltage fluctuations, harmonic distortion factors, voltage flicker and power factor. A comparison of the admissible values of the main parameters of electric energy with the experimental data is made. The probability of occurrence of oscillating energy-exchange processes and the need for experimental determination of the network impedance are shown.

Key words: solar power station, inverter, quality indicators, electromagnetic compatibility, reactive power, energy efficiency.

References

1. SUN, Jian. Power quality in renewable energy systems-Challenges and opportunities. // In: International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'12), – Spain. – 2012. p. 28-30.
2. Glad I. V., Batsala Y., Nykolyn U The analysis of power quality solar power. // *Rozvidka ta rozrobka naftovyh i gasovyh rodovysch.* – 2013. - № 4(49). – pp. 81-89 (Ukr)
3. Batsala Y., Glad I., Kiianiuk O. Improving means of control an electrical parametrs renewable energy. // *Naftogazova enerhetyka.* -2015. -№1 (23). – pp.52-60. (Ukr)

УДК 621.311:681.5

И.В. Гладь, канд. техн. наук, доц.

Я.В. Бацала, асс.

Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа ВЛИЯНИЕ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ НА НИЗКОВОЛЬТНЫЕ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫЕ СЕТИ

Проанализированы показатели электромагнитной совместимости подключенной к низковольтной сети солнечной электростанции. Согласно измеренным экспериментально мгновенными значениями токов и напряжений, генерируемых с помощью солнечных электростанций, вычислено токи высших гармоник. Результаты измерения показали, что наличие фотоэлектрических систем в сети может привести к снижению параметров качества напряжения питания, таких как колебания напряжения, коэффициентов гармонических искажений, фликера напряжения и коэффициента мощности. Сделано сравнение допустимых значений основных параметров электрической энергии с экспериментальными данными. Показано вероятность возникновения колеблющихся энергообменных процессов и необходимость экспериментального определения импеданса сети.

Ключевые слова: солнечная электростанция, инвертор, показатели качества, электромагнитная совместимость, реактивная мощность, энергоэффективность.

Надійшла 13.04.2017

Received 13.04.2017