

УДК 621.31

**Д.Г. Дерев'янюк, К.Ю. Суменко, В.Г. Процько.**

**АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТІЙКОСТІ ТА НАДІЙНОСТІ СИСТЕМ З ІНТЕГРАЦІЄЮ ДЖЕРЕЛ РОЗОСЕРЕДЖЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ**

*Проведено оцінку спотворень в локальних системах з елементами розосередженої генерації. Проаналізовано особливості інтеграції фотоелектричних та вітроенергетичних установок в локальні електроенергетичні системи. Наведено основні показники аналізу/оцінки стійкості та надійності в системах з відновлюваними джерелами енергії.*

*Ключові слова: фотоелектричні системи, розосереджена генерація, інтеграція ВДЕ, стійкість, надійність.*

*Проведена оценка искажений в локальных системах с элементами рассредоточенной генерации. Проанализированы особенности интеграции фотоэлектрических и ветроэнергетических установок в локальные электроэнергетические системы. Приведены основные показатели анализа / оценки устойчивости и надежности в системах с возобновляемыми источниками энергии.*

*Ключевые слова: фотоэлектрические системы, рассредоточена генерация, интеграция ВИЭ, устойчивость, надежность.*

*The estimation of distortions in local systems with elements of distributed generation was held. The features integration of photovoltaic and wind-power installations in the local electricity system were explored. The basic performance of the analysis / assessment of the stability and reliability and in systems with renewable energy sources was shown.*

*Key words: photovoltaic systems, dispersed generation, renewables integration, stability and reliability.*

Оскільки у період до 2020 року є тенденція зростання попиту на електричну енергію на рівні 1,4 % на рік [1], розосередженій генерації відводиться велика роль у розвитку енергосистем України.

При побудові централізованих систем енергопостачання постає дві проблеми: зниження споживання паливних ресурсів, та необхідність зменшити шкідливі викиди. Довгі лінії електропередач є основним джерелом втрат електричної енергії. Інтеграція джерел розосередженої генерації в цих системах дозволяє підвищити енергоефективність та зменшити викиди в енергосистемі. Збільшення кількості таких відновлювальних джерел енергії в мережі впливає на якість електричної енергії в розподільчих мережах середньої та низької напруги.

До пристроїв розосередженої генерації відносять установки малої потужності (до 10 МВт), що розташовані безпосередньо поблизу споживача, та можуть буди під'єднані до енергосистеми. До джерел розосередженої генерації відносяться: фотоелектричні елементи, паливні комірочки, газові турбіни, мікротурбіни, поршневі двигуни внутрішнього згорання та вітроенергетичні установки. Такі системи також відомі як джерела альтернативної енергії, так як вони є альтернативою до традиційних джерел електричної енергії, наприклад, нафти, природного газу та вугілля. Крім того, що вони є резервом для системи, їх популярність зростає через низький рівень викидів, низький рівень шуму і їх високу ефективність.

Більшість джерел розосередженої генерації під'єднані до мережі за допомогою перетворювачів струму. При підключенні ці перетворювачі повинні зберігати якість електричної енергії. Тим не менш, висока частота перемикання перетворювачів може вводити

додаткові гармоніки в системах, та знижувати якість електричної енергії, якщо вони підключені неналежним чином.

Приблизно 70 – 80% всіх проблем порушення якості електроенергії, можуть бути пов'язані з несправностями з'єднань і / або кабелями [2]. У таблиці 1 наведено категорії чинників порушення якості що пов'язані з джерелом живлення і типом навантаження, а саме: порушення частоти, електромагнітні завади, перехідні процеси, наявність вищих гармонік і низький коефіцієнт потужності [3].

Серед цих причин, наявність вищих гармонік є найбільш домінуючою. Відповідно до стандарту IEEE, гармоніки в системі можуть бути зменшені двома різними методами, один з яких – обмеження гармонік струму, який користувач може ввести в мережу в точці загального приєднання, а інший – обмеження гармонік напруги, що мережа може поставити споживачу.

Силові пристрої, такі як STATCOM (що працює як паралельний активний фільтр), DVR (що працює як послідовний активний фільтр) і UPQC (що працює як гібридний активний фільтр) – є новітньою розробкою пристроїв для розподільчих мереж та системам постачання і споживання, що забезпечують зменшення порушень форми струму/напруги і підвищення якості електроенергії за рахунок компенсації реактивної потужності і вищих гармонік, що поглинаються або генеруються навантаженням.

Таблиця 1 – Основні причини погіршення якості електроенергії.

Порушення частоти	Електромагнітний вплив	Перехідні процеси	Вплив гармонік	Електростатичний розряд	Коефіцієнт потужності
<ul style="list-style-type: none"> <li>• явище зменшення частоти</li> <li>• поява скачків напруги</li> </ul>	явище збільшення частоти взаємодія між електричними і магнітними полями	тимчасові порушення спотворення сигналу	низькочастотні перешкоди виникнення хвилеподібних (синусоїдних) спотворень	виникнення різниці потенціалів індукціювання електростатичного поля за рахунок постійного струми	зменшення коефіцієнту потужності призводить до руйнування обладнання.

Сонячна та вітрова енергетика є найбільш перспективними джерелами альтернативної енергії і їх рівень проникнення в мережу також знаходиться на підйомі. Хоча переваги таких джерел включають в себе підтримання рівня напруги, різномірність джерел енергії, зниження втрат при передачі і розподілі електричної енергії, а також підвищення надійності [1], до недоліків відноситься їх негативний вплив на параметри мережі. Ця стаття має справу з технічним обстеженням, дослідженням і розробкою проблем якості електричної енергії, пов'язаних з інтеграцією сонячної і вітрової енергії в мережу.

#### **Сонячні фотоелектричні системи:**

Хоча вихідна напруга сонячної панелі залежить від сонячної інтенсивності і хмарного покриття, проблеми якості залежать не тільки від сонячного опромінення, але й від загальної продуктивності сонячної фотоелектричної системи, включаючи фотоелектричні модулі, інвертор, фільтр, механізм керування і т.д. Дослідження показують, що короточасні зміни освітленості і хмарності відіграють важливу роль у низьковольтних розподільних мережах з високою кількістю сонячних установок. Тому особлива увага у даних системах повинна бути приділена підтриманню рівня напруги і балансу потужності в лінії. Дані показники можуть бути досягнуті за допомогою використання суперконденсаторів, які призводять до збільшення вартості фотоелектричних систем приблизно на 20%. Падіння напруги також виникнути при від'єднанні від мережі зі споживачами великої потужності. Порушення напруги може призвести до відключення інвертора від мережі, отже, призвести до втрат енергії. Також

довгострокова експлуатація мереж, до яких підключені сонячні фотоелектричні системи, показує значне зменшення ефективності у зв'язку з порушенням стійкості джерела та збоями в роботі інвертора.

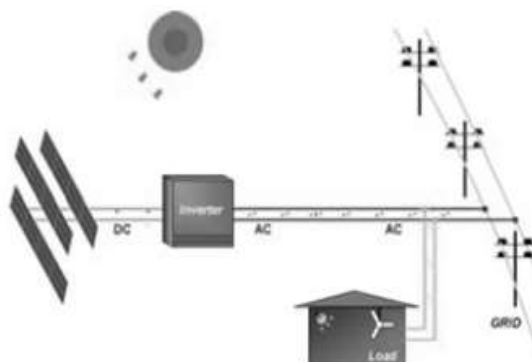


Рис.1. Загальна структура підключення фотоелектричної системи до мережі

Загальну блок-схему мережі до якої підключена сонячна фотоелектрична система показано на рис.1. Така система може бути однофазною або трифазною залежно від технічних вимог до під'єднання. Сонячна фотоелектрична система може складатися з однієї панелі або груп панелей які під'єднані паралельно.

Силові перетворювачі в даних системах разом з нелінійними навантаженнями є джерелом вищих гармонік. На додаток, гармоніки викликані перемінним сонячним опроміненням, хмарністю та ефектами затінення можуть зробити сонячну фотоелектричну систему нестійкою з точки зору технологічного приєднання до мережі. Таким чином, це необхідно враховувати при моделюванні контролера в ланці інвертора [4-6].

Загалом, підключений до мережі фотоелектричної системи інвертор не в змозі управляти реактивними і гармонійними струмами, від нелінійного навантаження. В новітніх дослідженнях показано фотоелектричну систему, що використовується в якості активного фільтру для компенсації реактивних та гармонічних струмів від споживачів, підключених до мережі. Ця система також може працювати в автономному режимі. Але при цьому ланка керування стає більш складною. Багатофункціональний фотоелектричний інвертор з'єднаний з мережею системи (рис. 2). Ця система використовується в якості джерела безперебійного живлення та демонструє підвищення надійності, компенсацію вищих гармонік, реактивної потужності та зменшення скачків напруги. Тим не менш, результати показують, що підвищення якості електроенергії залишається поза IEEE стандартами.

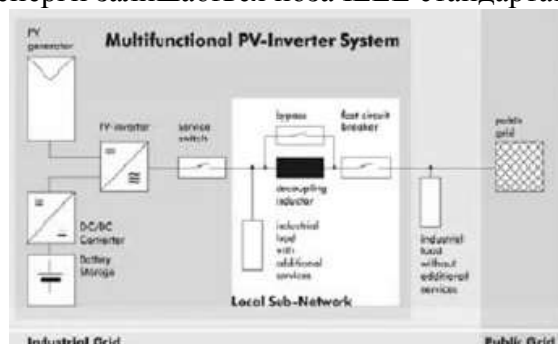


Рис.2 Схема підключення багатофункціональної фотоелектричної інверторної системи до електромережі

**Вітроенергетичні системи:**

Спрощена схема, що представляє деякі загальні типи систем вітрової енергії, наведена на рис 3. За способом підключення розрізняють генератори, які безпосередньо підключені до мережі через спеціальний трансформатор, та генератори підключені через пристрої силової електроніки. Більшість конструкцій включають певний рівень силової електроніки для поліпшення керованості і збільшення операційного діапазону. Незалежно від конфігурації з'єднання що використовується, кожна вітрова турбіна впливає на якість електроенергії в системі електропередач. Останні дослідження [16] показують, що помилки з'єднання приводного валу з валом турбіни і горизонтальний зсув вітру впливає на потужність (крутний момент) і коливання напруги, більш серйозно, ніж ефекти, пов'язані з вертикальним зсувом вітру.

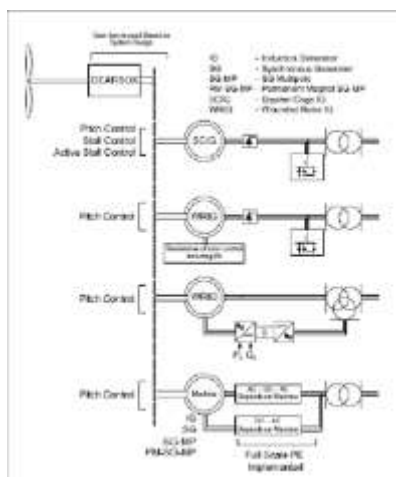


Рис.3 Види підключення вітроенергетичних установок

Світовий досвід показує що при проектуванні нових мереж, адаптованих спеціально для під'єднання великої кількості вітрових установок виникає багато проблем з якістю ел. ен. Нові вітрові електростанції повинні бути в змозі забезпечити контроль рівня напруги та реактивної потужності, частоти управління та усунення несправностей, для того, щоб підтримувати стійкість роботи системи. В існуючих вітрових електростанціях зі змінною швидкістю повинно бути оновлено програмне забезпечення системи контролю частотної характеристики двофазних індукційних генераторів (DFIG) і синхронних генераторів (СГ). Робота вітрових електростанцій з асинхронними генераторами повинна бути припинена, тому що вони не можуть забезпечити необхідний рівень регулювання напруги або частоти. Також розглянуто вже розроблені контролери для об'єднаної системи і показано, що пристрої DFIG зараз мають найбільш ефективну конструкцію для регулювання реактивної потужності і регулювання кутової швидкості, для максимальної ефективності вихідної потужності. Ці генератори можна використовувати для підтримки системи протягом провалів напруги. Тим не менш, недоліком такого перетворювача є створення гармонійних спотворень в системі. Для вирішення проблеми якості електроенергії можна використовувати Z-подібний інвертор типу ZSI що розглянуто в [19] (рис. 5).

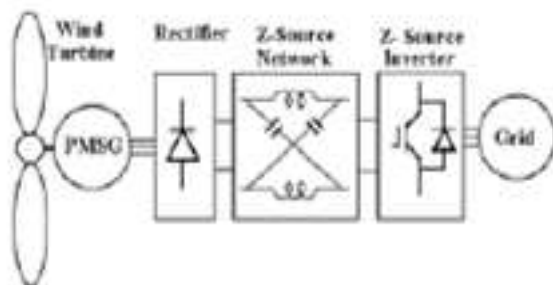


Рис.5 Схема Z-подібного інвертора

Захист від пікових струмів є одним з важливих питань для мережі, з'єднаної з відновлюваним джерелом енергії (ВДЕ). Одним з основних завдань захисту від пікових струмів операційної схеми і схеми управління є захист розподільчих систем з двонаправленими потоками струму короткого замикання, що відрізняється від звичайного захисту від перевантажень по струму для радіальної системи з односпрямованими потоками струму короткого замикання. В [20] приведений докладний опис існуючих систем захисту при впровадженні методів острікування.

### Проблеми порушення якості електроенергії

Проблеми якості електроенергії, як правило, діляться на три основні категорії: прямі, непрямі і соціальні.

Протягом 2-річного періоду в 8 Європейських країнах було проведено дослідження засноване на інтерв'ю і веб-опитуваннях фахівців, в ході якого досліджувалися збитки за рахунок ефекту провалів напруги, короткочасних перерв та довгих перерв в електропостачанні, вищих гармонік, перенапруг і перехідних процесів, коливань напруги, дисбалансу проблем заземлення і електромагнітної сумісності (ЕМС). В ході цього дослідження встановлено, що річні збитки, викликані неякісною електроенергією перевищують € 150 млрд. в 25 країнах ЄС, де на промисловість припадає понад 90% цих збитків. Провали напруги та короткочасні переривання електропостачання складають майже 60% загальної вартості в промисловості, і 57% для загальних підрахунків. Дослідження також показує, що економічний вплив неякісної електроенергії складає, для промисловості та сфери послуг, більш ніж 4% і 0,15% від їх річного обороту. В той же час необхідно враховувати вплив розосередженої генерації на збитки пов'язані з недотриманням якості електроенергії.

### Підвищення якості електричної енергії

Є два підходи для підвищення якості електроенергії – з боку споживача та з боку електромережі. Перший підхід являє собою компенсацію реактивної потужності, який гарантує, що обладнання є менш чутливим до порушень, що дозволяє обладнанню працювати навіть при значних змінах напруги. Інше рішення полягає у тому щоб встановити лінію компенсаторів, які пригнічують або протидіють порушенням якості енергосистеми. Існує кілька приладів, включаючи супер-конденсатори, трансформатори з нульовою точкою, згладжувальні трансформатори, гармонічні фільтри, та інші системи акумулювання енергії, що використовуються для вирішення конкретних проблем якості електроенергії. Силкові пристрої такі як DSTATCOM, DVR і UPQC дозволяють вирішувати цю проблему від електричної мережі до споживача. В розділі цієї статті розглядаються пристрої, що можуть вирішувати проблеми якості електроенергії при підключенні вітрових та сонячних електростанцій до об'єднаної енергосистеми.

Надійність та стійкість роботи енергосистеми є ключовим фактором в якісному електропостачанні. Для оцінки стійкості та надійності в Україні використовуються наступні стандарти ГКД 34.20.575-2002 «Стійкість енергосистем, керівні вказівки», а також відповідно до Законів України "Про природні монополії" (1682-14), "Про електроенергетику" (575/97-ВР), Указу Президента України від 14.03.95 № 213 ( 213/95 ) "Про заходи щодо забезпечення діяльності Національної комісії з питань регулювання електроенергетики України", Комплексного плану заходів із забезпечення фінансової стабілізації підприємств паливно-енергетичного комплексу, затвердженого розпорядженням Кабінету Міністрів України від 28.05.2005 № 167-р ( 167-2005-р ), Національна комісія регулювання електроенергетики України 21 березня 2011 р. ввела звітні показники надійності енергосистем. Згідно цієї постанови надійність електропостачання споживача характеризується такими показниками:

а) індекс середньої тривалості довгих перерв в електропостачанні в системі (далі SAIDI) розраховується за формулою (1) як відношення сумарної тривалості відключень точок продажу електричної енергії внаслідок усіх довгих перерв в електропостачанні за звітний період до загальної кількості точок продажу електричної енергії:

$$SAIDI = \frac{\sum_{i=1}^k t_i \times n_i}{n} \text{ (хв.)} \quad (1)$$

де:  $\Sigma$  – знак суми;  $t_i$  – тривалість  $i$ -ї довгої перерви в електропостачанні, хв.;  $n_i$  – кількість точок продажу електричної енергії, відключених у результаті  $i$ -ї довгої перерви в електропостачанні, шт.;  $k$  – кількість довгих перерв в електропостачанні протягом звітного періоду;  $i$  – номер довгої перерви в електропостачанні,  $i = 1, 2, 3, \dots k$ ;  $n$  – загальна кількість точок продажу електричної енергії, шт.;

б) індекс середньої частоти довгих перерв в електропостачанні в системі (далі – SAIFI) розраховується за формулою (2) як відношення сумарної кількості відключених точок продажу електричної енергії внаслідок усіх довгих перерв в електропостачанні протягом звітного періоду до загальної кількості точок продажу електричної енергії:

$$SAIFI = \frac{\sum_{i=1}^k n_i}{n} \quad (2)$$

де:  $\Sigma$  – знак суми;  $n_i$  – кількість точок продажу електричної енергії, відключених у результаті  $i$ -ї довгої перерви в електропостачанні, шт.;  $k$  – кількість довгих перерв в електропостачанні протягом звітного періоду;  $i$  – номер довгої перерви в електропостачанні,  $i = 1, 2, 3, \dots k$ ;  $n$  – загальна кількість точок продажу електричної енергії, шт.;

в) індекс середньої частоти коротких перерв в електропостачанні в системі (далі – MAIFI) розраховується за формулою (3) як відношення сумарної кількості відключених точок продажу електричної енергії внаслідок усіх коротких перерв в електропостачанні протягом звітного періоду до загальної кількості точок продажу електричної енергії:

$$MAIFI = \frac{\sum_{j=1}^r n_j}{n} \quad (3)$$

де:  $\Sigma$  – знак суми;  $n_j$  – кількість точок продажу електричної енергії, відключених у результаті  $j$ -ї короткої перерви в електропостачанні, шт.;  $r$  – кількість коротких перерв у електропостачанні протягом звітного періоду;  $j$  – номер короткої перерви в електропостачанні,  $j = 1, 2, 3, \dots r$ ;  $n$  – загальна кількість точок продажу електричної енергії, шт.;

г) розрахунковий обсяг недовідпущеної електроенергії (далі – ENS) розраховується за формулою (4) як сума добутків кількості відключених точок продажу електричної енергії на тривалість довгої перерви та на середнє споживання електроенергії на відповідному рівні напруги:

$$ENS = \sum_{i=n}^k \frac{n_i^z \times t_i \times Q^z}{43800} \quad (4)$$

де:  $\Sigma$  – знак суми;  $z$  – ознака рівня напруги та відповідної території (0,4 кВ – міський населений пункт, 0,4 кВ – сільський населений пункт, 6-20 кВ – міський населений пункт, 6-20 кВ – сільський населений пункт, 27,5-35 кВ, 110/154 кВ);  $i$  – номер довгої перерви в електропостачанні,  $i = 1, 2, 3, \dots k$ ;  $n_i^z$  – кількість точок продажу електричної енергії, відключених внаслідок  $i$ -го довгого переривання з  $z$ -ю ознакою рівня напруги та відповідної території, шт.;  $t_i$  – тривалість  $i$ -ї довгої перерви в електропостачанні, хв.;  $Q^z$  – середньомісячне споживання електричної енергії в попередньому році на одну точку продажу електричної енергії з  $z$ -ю ознакою рівня напруги та відповідної території, тис.кВт·год; 43800 – звітний період часу (середньомісячний за рік), перерахований у хвилинах.

Дана система показників була розроблена Інститутом електротехніки та електроніки (ІЕЕЕ) ще у 1998 році, і хоча й була уточнена НКРЕ, в зв'язку з публікацією стандартів "IEEE guide for electric power distribution reliability indices" 2003 та 2012 років потребують доповнення та розширення.

### Висновок

Останні тенденції у розвитку систем генерації і розподілу електроенергії показують, що рівень проникнення альтернативних джерел в мережу значно зріс. Техніка кінцевого споживача стає все більш чутливою до стану якості електроенергії. Було проведено дослідження впливу інтеграції джерел розосередженої генерації на порушення якості електроенергії. Локальна електромережа виявилася здатною до інтеграції сонячних та вітрових джерел енергії. Вони відіграють важливу роль у інтеграції ВДЕ в локальних системах при забезпеченні якості електроенергії, а також стійкості та надійності електропостачання на різних рівнях.

Наявна в Україні система показників надійності, що була розроблена Інститутом електротехніки та електроніки (ІЕЕЕ) ще у 1998 році, а також існуючий в Україні стандарт зі стійкості енергетичних систем потребують доповнення та розширення.

1. "IEEE trial-use guide for electric power distribution reliability indices," IEEE Std 1366-2012 (Revision of IEEE Std 1366-2003), vol., no., pp., 2012.

2. Дерев'яно Д.Г.. Особливості оцінки стійкості та надійності роботи локальних систем з розосередженою генерацією. – Зб. Гірництво. №21. – 2013. – С..

3. ГКД 34.20.575-2002 // Стійкість енергосистем, керівні вказівки / К.: – ОЕП «Гріфре», – 23с.

4. R. Strzelecki, G. Benysek. Power Electronics in Smart Electrical Energy Networks // Springer. – 2008. – Рр. 414.

5. Стогній Б.С., Кириленко О.В., Денисюк С.П. Інтелектуальні електричні мережі електроенергетичних систем та їхнє технологічне забезпечення // Техн. електродинаміка. – 2010. – № 6. – С. 44–50.

6. Стогній Б.С., Кириленко О.В., Праховник А.В., Денисюк С.П. Інтелектуальні електричні мережі: світовий досвід і перспективи України // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. Спец. випуск. Ч. 1. – К.: ІЕД НАНУ, 2011. – С. 5–20.

УДК 621.3.011.74.005

Дерев'яно Д.Г., Мирошніченко В.В.

## АНАЛІЗ ВПЛИВУ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ НА ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ