

УДК 621.311:681.5

**ТЕХНІЧНІ АСПЕКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ ДЖЕРЕЛ РОЗПОДІЛЬНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ
В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ****О.В.Кириленко¹**, академік НАН України, **В.В.Павловський²**, канд.техн.наук, **Л.М.Лук'яненко³**, канд.техн.наук^{1,2,3} – Інститут електродинаміки НАН України, пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна.

Розглянуто основні технічні проблеми, що пов'язані з впровадженням джерел розподільної генерації в електричних мережах України. Наведено визначення поняття розподільної генерації. Виконано аналіз впливу джерел розподільної генерації на надійність, показники якості та втрати електричної енергії в електричних мережах, побудову релейного захисту та систем автоматики. Вказано на особливості проектування та експлуатації таких електричних мереж. Визначено заходи, які необхідно провести при впровадженні джерел розподільної генерації. Бібл. 38.

Ключові слова: розподільна генерація, електричні мережі, місця розташування, якість електроенергії, релейний захист, планування

Вступ. Світова електроенергетика традиційно розвивалася шляхом централізації систем генерування при створенні все більш потужного енергетичного обладнання та його об'єднання в енергетичні комплекси. Як наслідок, були сформовані великі територіально протяжні енергетичні системи: європейська ENTSO-E, ЄЕС Росії, ОЕС України та інші. В останні роки спостерігається стійка тенденція до зміни загальної концепції розвитку енергетики. Мова йде про впровадження нової ідеології – енергетики сталого розвитку [4]. Важливим елементом такої ідеології є значне використання джерел розподільної генерації (РГ) — енергетичних установок невеликої потужності. Широке розповсюдження джерел РГ пов'язано, в першу чергу, з появою високоефективних газотурбінних і парогазових установок [1,3] та розвитком відновлюваних джерел енергії. Серед останніх найбільшого розповсюдження на даний момент отримали вітрові електричні станції (ВЕС), сумарна встановлена потужність яких становить понад 31 ГВт. Фотоелектричне перетворення енергії сонця стало надійним та зручним джерелом електроенергії для малих споживачів, віддалених від промислових центрів. Ведуться роботи щодо більш масового їхнього використання.

Впровадження джерел РГ в електричних мережах (ЕМ), зокрема побудованих на основі використання відновлюваних джерел енергії, крім зниження екологічного навантаження на навколишнє середовище та вирішення багатьох проблем, пов'язаних з викидами і відходами при виробництві електроенергії, дозволить, по-перше, суттєво підвищити ефективність використання первинних ресурсів та – в майбутньому – знизити вартість електричної енергії, по-друге, розвантажити як системоутворюючі, так і розподільні ЕМ, і нарешті, «підштовхнути» процес модернізації об'єктів електроенергетики і тим самим, підвищити надійність електропостачання. Це, в свою чергу, дозволить диверсифікувати ризики, пов'язані з подальшим зростанням цін на енергоносії. Але при цьому виникає ціла низка технічних проблем, які стосуються впливу джерел РГ на планування, організацію експлуатації та керування електричними мережами.

Визначення поняття РГ. У зв'язку з активним розвитком джерел живлення РГ наразі можна знайти багато синонімічних термінів та визначень цього поняття, які часто протирічають або дублюють одне одного [6, 12, 14, 27, 30]. Наприклад, в країнах Північної Америки використовується термін «dispersed generation», що перекладається як «розпорошена генерація», а в Західній Європі та деяких країнах Азії часто застосовується термін «децентралізована генерація» [7]. При цьому деякі автори [14] під розподільною генерацією вважають невеликі джерела електричної енергії, які не є частинами енергосистеми та знаходяться в безпосередній близькості до споживачів. Інші фахівці [27] дають більш конкретне визначення: РГ – це невеликі електростанції (робота яких може базуватися як на технологіях спалювання палива, так і на інших), розташовані біля або поблизу кінцевих споживачів

електричної енергії. У [12] під РГ маються на увазі малі генеруючі об'єкти потужністю до 30 МВт, що розташовуються біля споживачів з метою підвищення економічної ефективності розподільної мережі. Тип цих об'єктів залежить від специфіки місця приєднання. Більш чітке поняття РГ сформульоване в [7]: розподілена генерація – це джерело електричної енергії, з'єднане безпосередньо з розподільною ЕМ або підключене до такої мережі зі сторони електроспоживача.

Відомі міжнародні організації приділяють досить багато уваги проблемі РГ і беруть активну участь у її обговоренні [23, 29, 32]. Наприклад, робоча група CIGRE [11] під РГ розуміє генеруючі пристрої що, як правило, з'єднані з розподільними мережами, максимальна потужність яких становить від 50 МВт до 100 МВт. Тоді як IEEE [22] під РГ розглядають генераторні установки, значно менші за встановлену потужністю, ніж централізовані електричні станції, допускаючи їхній зв'язок з будь-яким вузлом в енергосистемі, розташованим неподалік. International Energy Agency [23], на відміну від згаданого, не встановлює вимог щодо максимальної потужності генеруючих пристроїв РГ. При цьому, до РГ належать об'єкти, що виробляють електричну енергію переважно на стороні споживачів та поставляють її безпосередньо в локальну розподільну ЕМ. Також в різних країнах досить суттєво різняться погляди на визначення потужності джерел РГ [38]. Наприклад, в шведському законодавстві під РГ маються на увазі енергоблоки до 1500 кВт, а на англійських енергетичних ринках електростанції потужністю менше 100 МВт не мають централізованого диспетчерського керування і, таким чином, джерелом РГ вважається будь-яка генеруюча одиниця потужністю до 100 МВт.

Враховуючи певну семантичну неузгодженість а, інколи навіть суперечливість визначень РГ та їхню синонімічну близькість (дисперсна, нецентралізована генерація тощо), можна стверджувати, що деякі експерти при визначенні поняття РГ надають перевагу розташуванню джерел РГ відносно основної енергосистеми та кінцевих споживачів електроенергії, а інші – встановленій максимальній потужності джерел розподільної генерації. Тому, зважаючи на зазначене, пропонується в подальшому під РГ розуміти *джерела електричної енергії, з'єднані безпосередньо з розподільною електричною мережею або підключені до такої мережі зі сторони електроспоживачів.*

Вплив РГ на роботу електричних мереж. Впровадження РГ впливає на розподільні ЕМ та перетворює їх на активні елементи енергосистем. Це призводить до необхідності внесення змін (або перегляду та модернізації) у прийнятті стратегії керування, експлуатації та планування ЕМ. При цьому їхній вплив може мати як позитивний, так і негативний характер, тому доцільно ретельно проаналізувати питання приєднання джерел РГ в розподільні ЕМ України.

Вплив РГ на втрати електричної енергії в ЕМ. Встановлення джерел живлення РГ в розподільній ЕМ неподалік від навантаження може змінювати напрямок потоків потужності. При цьому слід виділити три ситуації щодо вузлового навантаження і РГ [8]:

1. Власне навантаження кожного вузла в ЕМ більше або дорівнює вихідній потужності джерел РГ, підключених до цього вузла.

2. В ЕМ існує щонайменше один вузол, де вихідна потужність джерел РГ більша, ніж власне навантаження цього вузла, але сумарна потужність джерел РГ даної ЕМ у цілому менша, ніж її сумарне навантаження.

3. В ЕМ існує щонайменше один вузол, де вихідна потужність РГ більша, ніж власне навантаження цього вузла і сумарна потужність джерел РГ даної ЕМ в цілому більша, ніж її сумарне навантаження.

У першому випадку встановлені джерела РГ в ЕМ будуть впливати на зменшення втрат потужності в розподільній ЕМ. У другому випадку джерела РГ можуть перманентно збільшувати втрати потужності у деяких лініях електропередачі (ЛЕП) розподільної ЕМ, але, в цілому, сумарні втрати потужності в ЕМ знижуються. У третьому випадку сумарні втрати потужності всієї розподільної ЕМ будуть більше, ніж до встановлення джерел РГ. При цьому досить невдалою є ситуація, коли відбувається транспортування електричної енергії в зворотному напрямку, тобто із «хвоста» ЕМ до її головної ділянки. Це пов'язано з тим, що переріз проводів ЛЕП в розподільних мережах, як правило, зменшується від головної ділянки ЛЕП до її кінця, а, як відомо, опір ЛЕП і її втрати залежать від перерізу проводів. Також різні джерела РГ працюють із різним $\cos\phi$ і їхня вихідна реактивна потужність може змінюватися від незначної генерації (газотурбінні установки тощо) до значного, в масштабах розподільних ЕМ, споживання (ВЕС і т.п.), що також негативно впливає на величину втрат потужності в ЕМ [20].

Таким чином, встановлення джерел РГ може як збільшувати, так і зменшувати втрати потужності в ЕМ, що в основному залежить від місць розташування, потужності, рівня впровадження джерел РГ в ЕМ, їхнього $\cos\phi$, а також від топології ЕМ тощо.

Вплив РГ на напругу в ЕМ. Можна виділити два різновиди впливу. *По-перше*, це вплив на рівні напруги в усталеному режимі роботи ЕМ [36]. У традиційних розподільних мережах, тобто в

ЕМ радіального типу, зниження напруги відбувається вздовж напрямку електропостачання споживачів, від головної ділянки ЛЕП до її кінця. Після встановлення джерел РГ в такій ЕМ відбувається зниження навантаження живильного фідера, а напруга вздовж ЛЕП може збільшуватися. Важливими при цьому є $\cos\varphi$ джерел РГ та тип генератора (синхронний або асинхронний). У деяких випадках при використанні відносно потужних синхронних генераторів може відбуватися перевищення допустимого рівня напруги ($>1,1U_{ном}$). Таким чином, величина зміни напруги залежить від місць встановлення джерел РГ, їхньої потужності та $\cos\varphi$ (генерація або споживання).

По-друге, вплив РГ на коливання напруги в ЕМ [36]. У традиційній розподільній ЕМ, активне та реактивне навантаження вузлів змінюється з часом, що викликає певні коливання рівня напруги в ЕМ. У напрямку від головної ділянки до кінця ЛЕП коливання напруги, як правило, збільшується. Якщо навантаження сконцентровано в основному біля кінця ЛЕП, то рівень напруг буде коливатися більш інтенсивно. Після приєднання до розподільної ЕМ джерел РГ останні будуть впливати на коливання рівнів напруги у вузлах, збільшуючи або зменшуючи їх. У випадку, коли джерела РГ працюють узгоджено з місцевим навантаженням, тобто, їхня потужність збільшується (зменшується) при збільшенні (зменшенні) навантаження у вузлах, вони будуть демпфувати коливання напруги. Але, коли джерела РГ працюють неузгоджено з місцевим навантаженням, оскільки потужність джерел РГ залежить від первинних ресурсів і вихідні характеристики яких складно контролювати (такі як швидкість вітру, інтенсивності випромінювання сонячного світла тощо), то у такій ситуації РГ можуть значно збільшити коливання напруги в ЕМ. Крім того, деяким джерелам РГ (наприклад ВЕС, фотогальванічні елементи) притаманне сильне коливання вихідної потужності, що суттєво впливає на коливання рівнів напруги у вузлах ЕМ, ефект тим сильніший, чим більша встановлена потужність джерел РГ.

Вплив РГ на якість електричної енергії. Встановлення джерел РГ у розподільних ЕМ має досить суттєвий вплив на якість електричної енергії [13, 19]. *По-перше*, джерела РГ призводять до збільшення дози флікера, що може відбуватися при введенні або виведенні з роботи потужних джерел РГ в розподільних ЕМ, раптовій зміні вихідної потужності джерел РГ, взаємодії між джерелами РГ і регулюючими пристроями. *По-друге*, джерела РГ можуть генерувати в ЕМ гармоніки високих порядків, при цьому джерела РГ або самі по собі можуть бути джерелами гармонік вищих порядків або приєднуватися до розподільної ЕМ через інвертор, який генерує в мережу гармоніки вищих порядків, що характерно для паливних та фотогальванічних елементів, вітроустановок тощо. *По-третє*, джерела РГ впливають на провали напруги, що, здебільшого, пов'язано із типом генератора. Наприклад, при РГ із синхронними генераторами після провалу напруги остання відновлюється приблизно до початкового рівня, а у випадку асинхронних генераторів напруга не відновлюється до початкового рівня в зв'язку із зниженням підтримки за реактивною потужністю [10]. Також слід відзначити, що сумарний вплив джерел РГ на провали напруги хоч і залежить від потужності РГ, але не досить сильно.

Вплив РГ на релейний захист та автоматику. Оскільки традиційні розподільні ЕМ – це мережі радіального типу, то перетік потужності є однонаправленим від головної ділянки до кінцевих споживачів, і в більшості аварійних випадків використовується миттєвий струмовий захист [2]. Як правило, релейний захист (РЗ) розподільних ЕМ проектується з встановленням реле максимального струму та обладнання автоматичного повторного ввімкнення (АПВ) на головному фідері живильних підстанцій і плавких запобіжників у гілках ЕМ. Для забезпечення захисту розподільних ЕМ на практиці виконується відключення ЛЕП, де виникла аварія, ізолювання пошкодженого елемента (ділянки ЛЕП) та повторне ввімкнення лінії. Але вказаний підхід до РЗ розподільних ЕМ не розрахований на існування додаткових джерел потужності, таких як РГ, у зв'язку з чим виникає низка проблем.

По-перше, це проблема, пов'язана із використанням досить поширених у розподільних ЕМ пристроїв АПВ разом із джерелами РГ [8]. Безструмова пауза при роботі АПВ, як правило, триває частки секунди, що не завдає великих збитків споживачам. У випадку, коли захист джерел РГ не спрацював під час безструмової паузи АПВ, таке джерело залишається підключеним до ЕМ і буде намагатися підтримувати напругу у мережі. Отже електрична дуга не буде затухати і пошкодження не буде самоліквідовано, що призведе до значної перерви у електропостачанні [24]. При цьому слід зазначити, що, навіть якщо джерело РГ буде відключене протягом безструмової паузи АПВ, час, відведений на ліквідацію дуги, зменшується на час роботи РЗ джерел РГ. Ще однією причиною відключення джерел РГ від мережі під час безструмової паузи АПВ є підтримка безпечної експлуатації самої установки РГ. Якщо джерело РГ залишається приєднаним до мережі, швидкість обертання його генератора може змінитися (для РГ обертового типу) через дисбаланс потужностей.

Таким чином, щоб уникнути появи цих небажаних ситуацій при експлуатації ЕМ повинна бути вирішена задача координації роботи АПВ з роботою РЗ джерел РГ. Застосування більш довгих безструмових пауз є одним із можливих способів розв'язання вказаної проблеми, хоч це може призводити до погіршення якості електричної енергії.

По-друге, це значне ускладнення побудови систем РЗ мереж із встановленими пристроями РГ. Наприклад, при виникненні коротких замикань (КЗ) за межами фідера, що включає джерела РГ, але в межах однієї підстанції, джерело РГ бере участь у живленні КЗ. У цій ситуації може спрацювати реле, яке знаходиться на початку ЛЕП з РГ, що можливо, коли не враховувати напрямок протікання струму. Використання направлених або навіть диференційних систем РЗ у розподільних ЕМ дозволяє вирішити цю проблему.

Деякі автори [26] звертають увагу на іншу можливу проблему, пов'язану з роботою РЗ розподільних ЕМ, що в літературі отримала назву «засліплення» РЗ. Вона може проявлятися, коли джерела РГ знаходяться між точкою КЗ і живильним фідером. Джерело РГ бере участь у живленні КЗ і тим самим збільшує рівні струмів КЗ. Але струм КЗ, що проходить через живильний фідер, фактично зменшується через участь джерел РГ, що може відбуватися, коли сумарний струм КЗ розподіляється між різними джерелами.

Таким чином, РЗ в розподільних ЕМ в певних умовах не завжди працює відповідним чином у аварійних ситуаціях, для яких він був спроектований до встановлення джерел РГ [15,16,25]. Слід також відзначити, що підключення джерел РГ може призводити до затримки роботи РЗ живильного фідера – це обумовлюється часом роботи захисту самих джерел РГ.

Вплив РГ на надійність роботи та експлуатацію ЕМ. Якщо джерела РГ використовуються тільки як резервні джерела живлення, то можна стверджувати, що надійність системи живлення підвищується. Але коли джерела РГ працюють паралельно із системою, то надійність електропостачання споживачів у деяких випадках може знижуватись. Наприклад, в ЕМ, де є достатня кількість джерел РГ і їхня робота не скоординована між собою, буде відбуватися зниження надійності системи. Також, як відзначається в [36], зниження рівня надійності електропостачання може відбуватися при високій концентрації джерел РГ одного типу (наприклад, при концентрації фотогальванічних елементів, потужність яких залежить від інтенсивності сонячного випромінювання).

При цьому досить гостро постає проблема автономної роботи джерел РГ, так звана проблема енергоостровів [9,28,34]. Джерела РГ, як правило, не призначені для живлення фрагментів ЕМ самостійно, бо вони не в змозі підтримувати адекватний рівень якості електричної енергії та можуть наражати оперативний персонал на небезпеку [9]. Тому випадки знеструмлення ЕМ повинні виявлятися пристроями захисту джерел РГ і останні повинні відключатися від ЕМ [26]. При цьому, враховуючи існуючі в енергосистемах розвинених країн вимоги стандартів, джерела РГ повинні за 100–300 мс переключитися на автономне навантаження [18,37]. Це призвело до розвитку досліджень з розробки різних засобів виявлення режимів енергоостровів із залученням як пасивних, так і активних методів. Пасивні методи передбачають проведення замірів напруги або частоти, також розроблено методи, що враховують швидкості зміни цих параметрів. Останні більш надійні, ніж застосування простих реле напруги або частоти, але вони мають «мертві зони» [24]. Активні методи виявлення енергоостровів генерують в мережу тестові сигнали на частоті, що звичайно перевищує промислову, і за вимірними значеннями визначають наявність напруги на живильному фідері. Подібні пристрої в Україні розробляються в Інституті електродинаміки НАН України [35]. Таким чином, можна зазначити, що встановлення джерел РГ призводить до значного підвищення надійності електропостачання лише певних споживачів.

Більш ефективним засобом підвищення надійності електропостачання при виникненні порушень в енергосистемі є формування енергоостровів, які не обмежуються лише джерелом РГ і автономним навантаженням, а охоплюють певні фрагменти ЕМ із збалансованою генерацією та навантаженням. Вказане рішення дозволяє більш ефективно використовувати встановлену потужність джерел РГ, суттєво підвищити надійність розподільних ЕМ та розширити зону охоплення електроспоживачів. Застосування вказаного варіанту підвищення надійності електропостачання дозволяє на якісно новому рівні вирішити багато відомих проблем, наприклад, відновлення електропостачання знеструмлених споживачів [31]. Але цей варіант потребує серйозного технічного переоснащення ЕМ, встановлення сучасних не досить дешевих технічних засобів, а також розробки відповідних керівних вказівок для оперативного персоналу.

Вплив РГ на проектування та розвиток ЕМ. У випадку, коли з'являється велика кількість додаткових взаємозв'язків, що характерно для РГ, це серйозно впливає на проектування та експлуа-

тацію розподільних ЕМ, а також на надійність і безпеку системи в цілому [17]. Це вимагає внесення відповідних змін у традиційні методи планування розподільних ЕМ.

По-перше, поява джерел РГ в розподільних ЕМ вносить значно більше невизначеності в прогнозування навантажень, планування та експлуатацію ЕМ. Крім того, джерела РГ при «правильному» розміщенні знижують втрати електроенергії в ЕМ і це може в певній мірі відстрочити або зменшити обсяги необхідних інвестицій у модернізацію та розвиток розподільних ЕМ. Але, якщо місця встановлення і потужність джерел РГ визначені не оптимально, це неминуче призведе до збільшення втрат електричної енергії, недопустимих відхилень напруги в певних вузлах мережі, а також може змінити значення, тривалість та напрямки струмів КЗ. Таким чином, для того, щоб прийняти оптимальне рішення щодо планування розвитку розподільних ЕМ, необхідно зробити точну оцінку впливу джерел РГ на розподільну мережу, тобто повинні бути розроблені відповідні програмні та технічні засоби, які здатні точно оцінити вплив РГ на мережу, визначити оптимальні місця розташування і потужність джерел РГ, роблячи поступове збільшення об'ємів впровадження джерел РГ у розподільних ЕМ безпечним та ефективним.

По-друге, планування розвитку традиційних розподільних ЕМ, здебільшого, охоплює період від 5 до 20 років. Як правило, навантаження електромереж зростає планомірно з кожним роком. Постійно виникають нові вузли навантаження в результаті будівництва нових підстанцій. У зв'язку з обчислювальними проблемами, пов'язаними з розмірністю задачі розрахунку режимів (як правило, розглядаються тисячі вузлів), у випадку, коли число нових генераторних вузлів буде стрімко зростати, виникнуть ускладнення при визначенні оптимального плану розвитку ЕМ (оптимальні програми, що враховують витрати на капітальне будівництво, на технічне обслуговування і мінімальні втрати потужності).

По-третє, у споживачів або незалежних виробників електроенергії, які хотіли б встановити джерела РГ у розподільних ЕМ, будуть виникати протиріччя із енергопостачальними компаніями, що хочуть зберегти існуючий рівень керованості та безпеки ЕМ. Тому встановлення великої кількості джерел РГ в розподільних ЕМ суттєво вплине на структуру самої ЕМ, в результаті чого вона поступово буде зменшувати залежність від транзитної мережі та централізованих електростанцій. З метою забезпечення необхідного рівня безпеки ЕМ та необхідної якості електричної енергії джерела РГ повинні мати можливість гнучкого керування. Таким чином, характеристики ЕМ з традиційними живильними фідерами з однонаправленими потоками зазнають значних змін. При цьому виникне низка проблем, пов'язаних з регулюванням напруги та підтриманням балансу реактивної потужності. Для їхнього вирішення необхідно встановлювати додаткове обладнання для контролю та регулювання джерел РГ, які будуть інтегровані в існуючу розподільну ЕМ. Це пов'язано не тільки з необхідністю модернізації існуючих автоматизованих систем розподілу та обліку електричної енергії, а також зміни ідеології керування ЕМ і переходу від пасивних до активних систем керування.

Першочергові проблеми, пов'язані із впровадженням джерел РГ в Україні. Зважаючи на зазначене, на шляху широкого застосування джерел живлення РГ в ЕМ України будуть виникати певні технічні проблеми. Причому вони будуть різними на різних етапах. На *першому етапі*, що характеризується наявністю в ЕМ одиничних джерел РГ, як правило, будуть виникати в основному проблеми, що пов'язані із переоснащенням ЕМ.

1. Необхідно не тільки модифікувати існуючі системи РЗ, а й замінити їх на нові. Максимальні струмові захисти, що найбільш поширені в розподільних ЕМ, необхідно замінити на направлені та/або диференційні системи РЗ.

2. Заміна комутаційного обладнання (у зв'язку з збільшенням струмів КЗ).

3. Встановлення відповідних технічних засобів «виділення» джерел РГ у роботу на автономне навантаження (режим енергоостровів).

4. Визначення експлуатаційних схем та розробка технічного забезпечення (пристроїв синхронізації енергоостровів РГ із основною мережею, відповідної автоматики регулювання частоти та напруги тощо) для роботи джерел РГ в режимі живлення певних фрагментів ЕМ при аварії в основній ЕМ.

Коли відносна частка за потужністю встановлених джерел РГ досягне 5–10% або більше від генерації на централізованих електростанціях, то настане другий етап розвитку ЕМ з новими проблемами:

1. Невідповідність традиційних підходів до планування і керування усталеними та післяаварійними режимами ЕМ тим задачам, що виникають при високому ступені впровадження джерел РГ.

2. Забезпечення стійкості режимів роботи розподільних мереж, особливо із значним впровадженням відновлюваних джерел енергії.

3. Проведення оптимізації ustalених режимів розподільних ЕМ з високим ступенем впровадження джерел РГ.

Окрім визначених технічних проблем існує ще одна проблема, яка їм передує – визначення оптимальних місць встановлення та потужності відповідних джерел РГ. Ця проблема вирішується лише за умови застосування системного підходу, що дозволить уникнути нераціонального використання ресурсів та потенційних можливостей джерел РГ.

Визначення оптимальних місць розташування та потужності джерел РГ в розподільних ЕМ. Проведені дослідження показують, що місця встановлення та потужність джерел РГ суттєво впливають на низку характеристик ЕМ (втрати електричної енергії, рівні напруги у вузлах ЕМ, струми у гілках ЕМ та струми КЗ), що, в свою чергу, впливає на вибір електроенергетичного обладнання, планування та прогнозування режимів роботи тощо. Вказана задача найчастіше формулюється як багатокритеріальна оптимізаційна задача з певними обмеженнями [5,21,33]. Як правило, при цьому мінімізують втрати активної потужності [5] при різних ситуаціях в ЕМ. Маються на увазі обсяги, ступінь концентрації та територіальне розміщення РГ в ЕМ тощо.

Наприклад, в [5] для спрощення розв'язання та звуження простору пошуку використовується метод чутливості. На підставі розрахунків коефіцієнтів чутливості системних шин (СШ), де планується приєднання РГ, до втрат потужності в мережі формується скорочений список СШ – кандидатів на встановлення джерел РГ. Потім для кожної із відібраних СШ моделюється приєднання джерела РГ і формується діапазон його потужності. Системні шини, приєднання до яких забезпечує мінімальні втрати потужності в ЕМ, визначаються як найкраще місце для встановлення джерел РГ визначеної потужності. Проте цей метод не дозволяє враховувати певні існуючі обмеження в ЕМ. Крім того, його застосування обмежується потребами значних обчислювальних ресурсів.

Частково вказані недоліки вирішено у [33], де для розв'язання задачі визначення місць встановлення та потужності джерел РГ використовуються методи генетичних алгоритмів. При цьому при розв'язанні задачі як обмеження враховуються напруги у вузлах, струми у вітках, а також те, що потужність джерел РГ не повинна перевищувати навантаження вузла. Безперечною перевагою цього підходу є врахування вартості як самих джерел РГ так і електричної енергії. На підставі цих даних здійснюється техніко-економічна оцінка можливих варіантів встановлення джерел РГ на період від 1 до 10 років.

У [21] для вирішення вказаної проблеми використовується матриця коефіцієнтів втрат потужності, що базується на квадратичній апроксимації втрат у лініях ЕМ. Це дозволяє, при прийнятті певних припущень, не перераховувати ustalений режим кожного разу. На відміну від [5], при розв'язанні задачі мінімізації втрат потужності при встановленні в мережі РГ не беруться до розгляду потужності джерел РГ, а на відміну від [33], не враховуються витрати, які пов'язані з закупівлею РГ, їхнім встановленням та експлуатацією. При цьому, при визначенні оптимальних місць встановлення та величини потужності джерел РГ розглядаються лише режими в години пікових навантажень – коли втрати максимальні. Це призводить до певних методичних похибок визначення втрат електроенергії.

Таким чином, незважаючи на масштабні дослідження даної проблеми в різних країнах, вона не є повністю вирішеною. Зокрема залишається невирішеною ціла низка питань. У першу чергу, – це необхідність врахування впливу режимів реактивної потужності, типу джерел РГ (особливо це стосується відновлюваних джерел енергії, при виборі місць встановлення) та «острівних» режимів роботи внаслідок відокремлення РГ від енергосистеми із незбалансованим навантаженням при втраті основного джерела живлення. Розглянуті технічні проблеми та перешкоди, що виникають на шляху впровадження РГ, характерні, насамперед, для електричних мереж України та Росії.

Висновки.

Джерела розподільної генерації мають різноплановий вплив на електричні мережі. Це стосується не тільки електротехнічного обладнання, систем релейного захисту та автоматики, а також, забезпечення надійності, ефективності електропостачання та якості електричної енергії. Таким чином, впровадження РГ потребує перегляду стратегій керування, організації експлуатації та планування розвитку електричних мереж. При цьому лише застосування системного підходу до розв'язання проблеми впровадження джерел розподільної генерації в електричних мережах дозволить уникнути неефективного використання їхніх можливостей та зниження надійності режимів електричних мереж, що характерне для процесу реформування.

Однією із першочергових задач у зазначеному аспекті є розробка нових методів визначення оптимальної потужності та місць підключення джерел розподільної генерації. Такі методи повинні крім мінімізації втрат електричної енергії в електромережах, нормалізації рівнів напруги у вузлах,

підвищення надійності електроживлення споживачів попередити можливі помилки у плануванні ЕМ та забезпечити ефективне використання джерел РГ.

1. *Воропай Н.И.* Малая энергетика в рыночной среде: анализ требований и условий развития // Топливо-энергетический комплекс России. – 2003. – № 2. – С. 97–98.
Voropai N.I. Small power engineering in a market environment: analysis of claims and the conditions of development // Toplivno-energeticheskii kompleks Rossii. – 2003. – № 2. – P. 97–98. (Rus.)
2. *Гельфанд Я.С.* Релейная защита распределительных сетей – Москва: Энергоатомиздат, 1987. – 368 с.
Gelfand Ja.S. Relay Protection of distribution networks. – Moskva: Energoatomizdat, 1987. – 368 p. (Rus.)
3. *Энергетика XXI века: Условия развития, технологии, прогнозы / Л.С.Беляев, А.В.Лагереv, В.В.Посекалин.* Отв. ред. Н.И.Воропай. – Новосибирск: Наука, 2004. – 386 с.
Energy XXI Century: The conditions of development, technology, forecasts / L.S.Beliaev, A.V.Lagerev, V.V. Posekalin. Responsibl Editor N.I.Voropai. – Novosibirsk: Nauka, 2004. – 386 p (Rus.)
4. *Кириленко О.В., Праховник А.В.* Энергетика сталого розвитку: виклики та шляхи побудови // Праці Інституту електродинаміки. Спеціальний випуск. – 2010. – С. 10–16.
Kyrylenko O.V., Prahovnyk A.V. Power engineering of sustainable development: challenges and ways of building // Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy. Spetsialnyi vypusk. – 2010. – P. 10–16. (Ukr.)
5. *Acharya N., Mahat P., Mithulanathan N.* An analytical approach for DG allocation in primary distribution network // Electric Power and Energy Systems. – 2006. – Vol. 28. – P. 669–678.
6. *Ackermann T., Andersson G., Soder L.* Distributed generation: a definition // Electric Power Systems Research. – 2001. – Vol. 57. – P. 195–204.
7. *Ackermann T.* Distributed resources and re-regulated electricity markets // Electric Power Systems Research. – 2007. – Vol. 77, Issue 9. – P. 1148–1159.
8. *Ackerman T., Knyazkin V.* Interaction between distributed generation and the distribution network // Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia Pacific IEEE/PES. – 2000. – Vol. 2. – P. 1357–1362.
9. *Ahmed W. Sheta A.F.* Optimization of Electric Power Distribution Using Hybrid Simulated Annealing Approach // American Journal of Applied Sciences. – 2008. – Vol. 5. – P. 559–564.
10. *Baggini A.B.* Handbook of Power Quality // Chichester, England; Hoboken, NJ: John Wiley & Sons. – 2008. – 642 p.
11. *CIGRE*, International Council on Large Electricity Systems, <http://www.cigre.org>
12. *Chambers A.* Distributed generation: a nontechnical guide. PennWell, 2001. – 283 p.
13. *Dolezal J., Sautarius P., Tlustý J.* The effect of dispersed generation on power quality in distribution system // Quality and Security of Electric Power Delivery Systems. CIGRE/IEEE PES International Symposium. – 2003. – P. 204–207.
14. *Dondi P., Bayoumi D., Haederli C., Julian D., Suter M.* Network integration of distributed power generation // Journal of Power Sources 106. – 2002. – P. 1–9.
15. *Doyle M.T.* Reviewing the Impacts of Distributed Generation on Distribution Systems // IEEE Power Engineering Society Summer Meeting. – 2002. – P. 103–105.
16. *Dugan R.C., McDermott T.E.* Operating Conflicts for Distributed Generation interconnected with Distribution Systems // IEEE Industry App. Magazine. – 2002. – P. 19–25.
17. *Dugan R.C., McDermott T.E., Ball G.J.* Distribution planning for distributed generation // Rural Electric Power Conference. – 2000. – P. C4/1–C4/7.
18. *Engineering Recommendation G59/1* – Recommendations for the connection of embedded generation plant to the regional electricity companies' distribution systems. Electricity Assoc. – 1991.
19. *Esposito G., Golovanov N., Lazaroiu C., Zaninelli D.* Impact of Embedded Generation on the Voltage Quality of Distribution Networks // Electrical Power Quality and Utilisation, EPQU. – 2007. – Vol. 3. – № 1. Режим доступу: http://www.leonardo-energy.org/webfm_send/1079.
20. *Gonzalez-Longatt F.* Impact of Distributed Generation over Power Losses on Distribution System // 9th International EPQU Conference, Barcelona. – 2007. Режим доступу: http://www.leonardo-energy.org/webfm_send/1129.
21. *Griffin T., Tomosovic K., Secrest D., Law A.* Placement of dispersed generations systems for reduced losses // In: Proceedings of the 33rd Hawaii international conference on sciences, Hawaii. – 2000.
22. *IEEE*, Institute of Electrical and Electronics Engineers, <http://www.ieee.org>.
23. *International Energy Agency*, Distributed Generation in Liberalised Electricity Markets. – 2002. Available at: <http://www.iea.org>.
24. *Kumpulainen L., Kauhaniemi K., Verho P., Vähämäki O.* New Requirements for System Protection Caused by Distributed Generation // CIRED 18th International Conference on Electricity Distribution. – 2005.
25. *Mäki K., Repo S, Järventausta P.* Protection Coordination to meet the Requirements of Blinding Problems caused by Distributed Generation// WSEAS Transactions on Circuits and Systems. – 2005. – Vol. 4. – № 7. – P. 674–683.

26. Mäki K., Kulmala A., Repo S., Järventausta P. Studies on Grid Impacts of Distributed Generation in a Combined Real-Time Simulation Environment // 7th International Conference on Power System Transients. – 2007. – P. 149–155.
27. Momoh J., Boswell G.D. Improving Power Grid Efficiency Using Distributed Generation // IEEE Power Systems Conference and Exposition. – 2006. – P. 295–300.
28. Mithulananthan N., Than O. Distributed Generator Placement to Maximize the Loadability of Distribution System // IJEE. – 2006. – Vol. 43. – P. 107–118.
29. Olulope P.K., Chowdhury S.P., Chowdhury S., Folly K.A. Review of distributed generation, modeling and its impact on power system stability // Power and Energy Systems. – 2009. – P. 193–199.
30. Pepermans G., Driesen J., Haeseldonckx D., Belmans R., D'haeseleer W. Distributed generation: definition, benefits and issues // Energy Policy. – 2005. – Vol. 33. – P. 787–798.
31. Pham T.T.H., Besanger Y., Hadjsaid N. New Challenges in power system restoration with large scale of dispersed generation insertion // IEEE Trans. on Power Systems. – 2009. – Vol. 24.
32. Purchala K., Belmans R., Exarchakos L., Hawkes A.D. Distributed generation and the grid integration issues // Режим доступу: http://www.eusustel.be/public/documents_public/WP/WP3/WP%203.4.1%20Distributed%20generation%20and%20grid%20integration%20issues.pdf.
33. Shukla T.N., Singh S.P., Naik K.B. Allocation of optimal distributed generation using GA for minimum system losses in radial distribution networks // International Journal of Engineering, Science and Technology. – 2010. – Vol. 2. – № 3. – P. 94–106.
34. Subrahmanyam J.B.V., Radhakrishna C. Distributed Generator Placement and Sizing in Unbalanced Radial Distribution System // International Journal of Electrical Power and Energy Systems Engineering. – 2009. – Vol. 2. – P. 232–239.
35. Trach I. Simulation a new islanding detection method for distributed local power system // Праці Інституту електродинаміки НАН України. – 2007. – № 1. – Ч. 1. – С. 66–69.
- Trach I. Simulation a new islanding detection method for distributed local power system // Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy. – 2007. – № 1. – Vol. 1. – P. 66–69.
36. Wang S. Distributed generation and its effect on distribution network system // Electricity Distribution - Part 1. 20th International Conference and Exhibition on. – 2009. – P. 1–4.
37. Xu W., Zhang G., Li C., Wang W., Wang G., Kliber J. A Power Line Signaling Based Technique for Anti-Islanding Protection of Distributed Generators—Part I: Scheme and Analysis // IEEE Trans. Power Delivery. – 2007. – Vol. 22. – №3. – P. 1758–1766.
38. Zareipour H., Bhattacharya K., Cañizares C.A. Distributed Generation: Current Status and Challenges // IEEE Proc. of NAPS. – 2004. Реж. доступу: http://www.ucalgary.ca/files/hzareipo/Hamid_NAPS_04.pdf

УДК 621.311:681.5

А.В.Кириленко¹, академик НАН України, В.В.Павловский², канд.техн.наук, Л.Н.Лукьяненко³, канд.техн.наук^{1,2,3} – Інститут електродинаміки НАН України, пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна.

Технические аспекты внедрения источников распределенной генерации в электрических сетях

Рассмотрены основные технические проблемы, которые связаны с внедрением источников распределенной генерации в электрических сетях Украины. Приведено определение понятия распределенной генерации. Выполнен анализ влияния источников распределенной генерации на надежность, показатели качества и потери электрической энергии в электрических сетях, построение релейной защиты и систем автоматики. Указано на особенности проектирования и эксплуатации электрических сетей. Определены мероприятия, которые необходимо выполнить при внедрении источников распределенной генерации. Библ. 38.

Ключевые слова: распределенная генерация, электрические сети, места размещения, качество электроэнергии, релейная защита, планирование.

О.В.Курьяненко¹, В.В.Павловский², Л.М.Лукьяненко³

^{1,2,3} – Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine, Peremogy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine.

Technical aspects of adoption of distributed generation sources in electric mains

The main technical problems relating to adoption of distributed generation sources in electric mains of Ukraine have been considered. The concept definition of distributed generation has been given. The analysis of effect of distributed generation on reliability, rating of electric energy quality and losses in electric mains, construction of relay protection and automation systems has been performed. The features of designing and operation of electric mains have been indicated. The measures which should be taken by adoption of distributed generation sources have been assigned. References 38.

Key words: distribution generation, electrical network, placement, quality of electrical energy, relay protect, network planning.

Надійшла 30.09.2010

Received 30.09.2010