УДК 621.311.24

ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ З ВІДНОВЛЮВАНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ *SMART GRID* ТЕХНОЛОГІЙ

Лежнюк П. Д.[1], Кулик В. В.[1] , Ковальчук О. А.[2] , Котилко І. В.[1]

[1]Вінницький національний технічний університет,
[2]ТОВ "Енергоінвест" (м. Вінниця)

Розглядаються принципи створення системи автоматизованого керування відновлюваними джерелами енергії в електричних мережах для досягнення спільного техніко-економічного ефекту.

Вступ. Модернізація сучасних систем електропостачання з розвитком відновлюваних джерел електроенергії (ВДЕ) і обмеженням централізованого електропостачання тісно пов'язана з *SMART Grid* технологіями. Планований техніко-економічний ефект від впровадження ВДЕ може бути досягнутий шляхом узгодження в часі оптимізації процесів вироблення, транспортування і споживання електроенергії. Електричні мережі за рахунок локальних систем керування, самоналагодження та самодіагностування можуть здійснювати регулювання постачанням електроенергії в залежності від режиму її споживання, але за умови достатнього інформаційного забезпечення [1]. За допомогою сучасних інформаційно-комунікаційних технологій «розумні» мережі можуть забезпечити інформаційне сполучення централізованого та місцевого електропостачання з ВДЕ, а також активних споживачів електроенергії [2, 3].

Метою роботи є створення на основі принципів *SMART Grid* системи автоматизованого керування ВДЕ в електричних мережах для досягнення загального техніко-економічного ефекту.

Основні матеріали дослідження

Задачі оптимального керування ВДЕ в електричних мережах

Задачі, пов'язані з ВДЕ в електричних мережах суттєво залежать від значення сумарного розосередженого генерування в ній, від одиничної встановленої потужності ВДЕ та їх типу, а також від їх місця під'єднання в електричній мережі (це можуть бути шини нижчої напруги підстанцій або відгалуження ліній електропередачі).

Крім того слід враховувати, що одночасно змінюються економічні умови функціонування електроенергетики як галузі, зокрема змінюється модель оптового ринку. У випадку реалізації електропостачання за двосторонніми договорами за участі ВДЕ, коли останні видають потужність в електричну мережу, постає необхідність узгодження їх роботи з енергосистемою, від якої здійснюється централізоване живлення. Це стає обов'язковим, коли встановлена потужність ВДЕ в мережі складає вагому частку від її сумарного навантаження (наприклад, 20% і більше). В цьому випадку електричну мережу можна і доцільно розглядати як локальну електричну систему (ЛЕС), в якій окрім зазначених вище задач постають задачі дослідження статичної і динамічної стійкості ВДЕ та інші, характерні для електричної системи [4, 5].

Перед ВДЕ в ЛЕС можуть ставитися різні задачі. У нормальних режимах ЛЕС і ЕЕС актуальними, особливо з погляду вигоди "зелених тарифів", виявляються питання організації планування і оперативного керування режимами роботи ВДЕ з метою отримання максимального прибутку від їх експлуатації. Отже найбільш актуальною, враховуючи специфіку забезпечення їх рентабельності, є задача оптимізації добових режимів керованих ВДЕ з урахуванням режимів умовно-керованих джерел для забезпечення максимальних надходжень від реалізації їх електроенергії за умов багатоступеневого тарифу енергоринку та технічних обмежень з боку окремих ВДЕ. В цьому випадку задача оптимізації добових режимів (на інтервалі часу $[t_0; t_k]$) керованих джерел енергії $P_i(t)$, $i = 1,2\ldots n$ (наприклад МГЕС) з урахуванням режимів умовно-керованих джерел для забезпечення максимальних надходжень від реалізації їх електроенергії за умов багатоступеневого тарифу енергоринку ц(t) та технічних обмежень з боку окремих ВДЕ формулюється як

$$\int_{t_0}^{t_k} \text{ц}(t)\sum_{i=1}^{n} P_i(t)dt \to \max . \qquad (1)$$

У випадку, коли в ЕЕС як основного джерела електроенергії виникає з різних причин необхідність в обмеженні електропостачання, то переходять до розв'язання задачі оптимізація режиму ВДЕ з метою зменшення залежності ЛЕС від централізованого електропостачання. Тобто ставиться задача мінімізації навантаження ЛЕС на основний центр живлення. При цьому задіюються можливості *SMART Grid* технологій для контролю і регулювання споживання електроенергії в ЛЕС. Задача оптимізації зводиться до зменшення залежності ЛЕС з сукупним навантаженням $P_{\text{нав}}(t)$ від централізованого енергопостачання, тобто мінімізації навантаження локальної системи на основний центр живлення $P_{\text{цж}}(t)$:

$$\int_{t_0}^{t_k} P_{\text{ЦЖ}}(t)dt \to \min \qquad (2)$$

з урахуванням балансового обмеження:

$$P_{\text{ЦЖ}}(t) + \sum_{i=1}^{n} P_i(t) - P_{\text{нав}}(t) = 0.$$

Як різновид останньої задачі може виникнути задача споживання локальною системою електроенергії з ЕЕС за заданим графіком. В цьому випадку актуальною є оптимізація режимів ВДЕ з метою мінімізації відхилень від централізовано заданого графіка сукупного генерування за заданих обмежень на первинні енергоресурси та з врахуванням характеристик ВДЕ. При цьому забезпечується стійкість ЛЕС як в режимі мінімального навантаження, так і в режимі максимального навантаження. Враховується також прогнозна інформація щодо метеорологічної обстановки, яка надається відповідною підсистемою *SMART Grid* системи й дозволяє достатньо адекватно прогнозувати можливе генерування ВДЕ. Задача оптимізації формулюється наступним чином:

$$\int_{t_0}^{t_k} \frac{1}{2}\left(P_{\text{ВДЕ}}(t) - \sum_{i=1}^{n} P_i(t) \right)^2 dt \to \min . \qquad (3)$$

Очевидно, що ефективне розв'язання задач оптимізації в ЛЕС можливе тільки за умови створення активно-адаптивної автоматизованої системи керування (АСК) режимами ВДЕ і електричних мереж в реальному часі. Частина функцій керування, враховуючи характеристики ВДЕ, може виконуватися системою автоматичного керування (САК).

Автоматизована система керування ВДЕ в електричних мережах

Важливою задекларованою особливістю *SMART Grid* є можливість для постачальників електроенергії контролювати роботу електроустановок споживачів, тобто дистанційно регулювати споживання електроенергії, зсуваючи його в часі й «підганяючи» під оптимальний графік сукупного генерування. У перспективі за рахунок гнучких зворотних зв'язків з використанням комунікаційних мереж можливе керування режимами роботи окремих електроустановок споживачів з метою адаптування режимів споживання під нестабільне генерування ВДЕ. Переваги такого підходу очевидні. Тому доцільно розглянути питання організації децентралізованого керування ВДЕ в локальних електричних системах, отримати математичні моделі умов оптимальності та обґрунтувати методи оптимального керування ВДЕ з врахуванням інтересів розподільної мережі.

Забезпечення оптимальності процесу генерування, розподілу та споживання електроенергії з урахуванням особливостей ВДЕ у реальному часі крім потужних комунікаційних можливостей розосередженої системи керування вимагає залучення відповідних підходів щодо формування керуючих впливів та законів керування окремими джерелами електроенергії з урахуванням специфіки їх керованості та спостережності. Децентралізація частини функцій керування за рахунок застосування локальних систем керування, переважно автоматичних, потребує створення умов стійкості, адекватності та адаптивності керування енергетичними об'єктами, як у штатних ситуаціях – з метою оптимізації функціонування, так і у не штатних.

Під час формування автоматичної системи керування роботою ВДЕ в електричній мережі враховуються їх природні особливості. Сумісна їх робота організується таким чином, щоб досягався системний техніко-економічний ефект. ВДЕ повинні працювати з максимальним прибутком, створюючи умови для зменшення втрат електроенергії в електричній мережі, покращення якості напруги та забезпечення надійності електропостачання.

В ЛЕС можуть використовуватися одночасно як джерела розосередженого генерування малі ГЕС, сонячні та вітрові електростанції. Перші з них за рахунок наявності водосховища можуть приймати участь в регулюванні потужності і працювати за потрібним для ЕЕС і споживачів графіком. Оскільки потужність малих ГЕС в ЛЕС, як правило, відносно мала, то роль регулювального і резервного джерела електроенергії для неї залишається за електростанціями ЕЕС. Малі ГЕС використовуються під час вранішнього і вечірнього максимумів навантаження, а ВЕС і СЕС відповідно до своїх можливостей. Для ВДЕ в ЛЕС існують "провальні" години в генеруванні. Причому вони будуть існувати незалежно від частки ВДЕ в ЛЕС. Ці години повинні заповнюватися або споживанням електроенергії з ЕЕС, або за рахунок зміни навантаження "активних" споживачів.

Враховуючи наведене вище для реалізації комплексу задач оптимального керування ВДЕ в розподільних мережах необхідною умовою є забезпечення можливості централізованого керування об'єктом у реальному часі. Однак, ця умова не може бути забезпечена через просторову розподіленість об'єкта керування та обмежену надійність каналів зв'язку між ними та диспетчерським центром. Виходячи з цього АСК з необхідним переліком функцій керування може бути побудована як централізована система оперативного керування з децентралізацією функцій реального часу за рахунок застосування локальних САК (у перспективі адаптивних). Структурна схема такої АСК розосередженими джерелами енергії в електричних мережах показана на рисунку 1.

Враховуючи структурну та апаратну складність такої системи у поєднанні з достатньо жорсткими фінансовими обмеження щодо проектування, реалізації та подальшого супроводження, АСК має будуватися спираючись на результати детального техніко-економічного аналізу, на підставі якого розроблено концепцію автоматизації малих ГЕС. В результаті практичних досліджень її було розширено на сукупність різнотипних ВДЕ (малі ГЕС, сонячні та вітрові електростанції). Головними принципами тут є:

– всебічне техніко-економічне обґрунтування послідовності розроблення та реалізації АСК, що забезпечує черговість реалізації задач автоматизованої системи керування, яка відповідає змінним умовам функціонування ВДЕ на ринку електроенергії;

– забезпечення максимальної автономності об’єктів керування (ВДЕ) у нормальних (планових) режимах їх роботи, що дозволяє створити умови керованості джерел та виконання ними покладених функцій щодо вироблення електроенергії, регулювання параметрів розподільних електромереж, регулювання стоків річок (для малих ГЕС) та ін. протягом заданого часу у разі відмови інформаційних та комунікаційних каналів АСК;

– реалізація ієрархічної структури керування з виділенням трьох рівнів: перший рівень – диспетчерський центр централізованого керування; другий рівень – "опорні" керовані ВДЕ, які функціонально підпорядковуються першому рівню та здійснюють керування розосередженими джерелами третього рівня, ретранслюючи команди, або коригуючи налагоджувальні параметри, що надходять з вищого рівня; третій рівень – розосереджені джерела з оснащені засобами локальної автоматизації керування з мінімально-необхідною інтелектуалізацією та максимальною автономністю функціонування, які виконують команди та реалізують закони керування з вищих ієрархічних рівнів, адаптуючи їх до місцевих умов.

Така структура дозволяє зменшити витрати на апаратно-програмну реалізацію АСК.

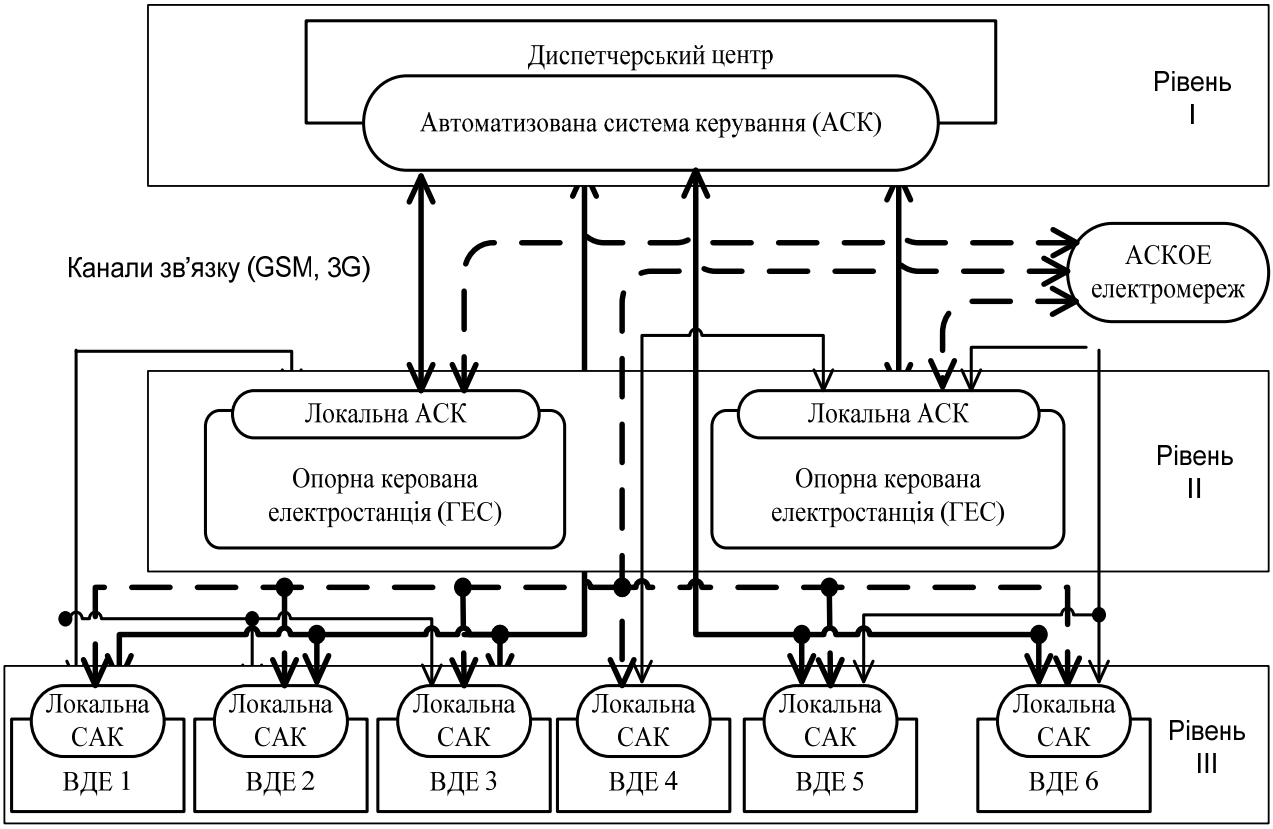

Рисунок 1 – Структурна схема АСК розосередженими джерелами енергії в електричних мережах

Розроблена автоматизована систем керування ВДЕ в електричних мережах впроваджена в ТОВ "Енергоінвест".

Практична реалізація АСК ВДЕ в електричних мережах здійснювалась поетапно.

На першому етапі розв’язано задачі автоматизації комерційного обліку електроенергії, оскільки це є необхідною умовою функціонування ВДЕ в енергоринку, розроблено апаратне та програмне забезпечення для збору та передачі даних щодо півгодинних графіків відпуску електроенергії та формування звітної документації згідно з діючими нормативними документами.

На наступному етапі реалізації АСК за мету ставилася автоматизація процесу виробництва електроенергії та забезпечення автономності ВДЕ у нормальних (планових) режимах їх роботи.

Розв’язано задачі дистанційного маневрування керованих ВДЕ (у даному випадку – малих ГЕС), автоматичного контролю роботоздатності та захисту їх основного обладнання і, таким чином, зменшення необхідної кількості обслуговуючого персоналу.

Для вирішення проблем інформаційного забезпечення задачі оптимізації функціонування ВДЕ на підставі отриманих умов оптимальності розширено апаратно-програмну частину локальних систем автоматичного керування.

На керованих ВДЕ встановлено сенсори механічних та електричних параметрів, а також виконавчі органи, об’єднані у інформаційну мережу нижнього рівня, а також *PLC*-контролери для організації виконання задач реального часу та обміну даними між підсистемами АСК.

Третій етап реалізації АСК розосередженими джерелами електроенергії передбачає виділення з переліку ВДЕ опорних електростанцій – малих ГЕС, які за територіальним розташуванням, встановленою

потужністю та кваліфікацією обслуговуючого персоналу відповідали вимогам.

На таких станціях встановлено додаткове обладнання для організації локальної автоматизованої системи керування суміжними ВДЕ нижчого рівня. *PLC*-контролери таких об'єктів об'єднано у локальну мережу *Ethernet*, що забезпечило можливість обміну даними між ними та сервером локальної АСК. Останній оснащено програмним забезпеченням, розробленим на основі *SCADA*-системи *TRACE MODE*, яке дозволяє накопичувати та аналізувати ретроспективні дані власної локальної АСК та систем автоматичного керування суміжних ВДЕ.

Аналіз накопичених даних дозволяє, враховуючи закономірності зміни визначальних параметрів, підвищувати ефективність визначених диспетчерських графіків ведення режиму для окремих керованих ВДЕ, а також керувальних впливів для них, прогнозувати аварійні ситуації та ліквідувати їх з мінімальними збитками.

Очевидно, що остаточна реалізація АСК ВДЕ в ЛЕС крім належної апаратної реалізації процесів інформаційного обміну, потребує розроблення відповідного математичного та програмного забезпечення.

Цей етап, як відомо, вимагає значних капітальних затрат та витрат часу, враховуючи складність, динамічність та відповідальність об'єкта керування.

Очікуваний економічний ефект від реалізації АСК ВДЕ, пов'язаний з покращенням їх керованості та маневреності, зменшенням кількості обслуговуючого персоналу, підвищенням надійності роботи та ефективності використання первинних енергоресурсів (гідропотенціалу річок, на яких розташовані ГЕС) за приблизними оцінками дозволить компенсувати витрати на створення автоматизованої системи протягом 3–4 роки.

Висновки. Сформовані задачі і умови оптимальності режимів роботи ВДЕ можуть бути використані для формування диспетчерських графіків та законів керування генеруванням джерел електроенергії.

Реалізація цих умов дозволяє визначати оптимальну послідовність керувальних впливів для окремих ВДЕ і максимально ефективно використовувати первинні ресурси.

Розглянуто можливі варіанти використання ВДЕ електричних мережах і обґрунтовано умови їх взаємного оптимального функціонування.

За умови застосуванні *SMART Grid* технологій задачі оптимізації режимів ВДЕ та активних споживачів в електричних мережах можуть розв'язуватися комплексно.

За рахунок гнучких зворотних зв'язків з використанням комунікаційних мереж можливе узгодження режимів роботи керованих та умовно-керованих ВДЕ з метою зменшення негативного впливу на економічність та якість функціонування електричних мереж. Для реалізації цього підходу пропонується адаптивна САК у реальному часі, яка дозволяє здійснювати керування технологічними процесами генерування електроенергії в умовах неповної та недостовірної поточної інформації відносно характеристик об'єктів керування та впливів зовнішнього середовища, що характерне для розосереджених джерел енергії.

Список використаних джерел

1. Кобец Б. Б. Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции SmartGrid. /Б. Б. Кобец, И. О. Волкова // – М.: ИАЦ Энергия. – 2010. – 208 с.
2. Стогній Б. С. Сталий розвиток енергетики та інтелектуальні енергетичні системи / Б. С. Стогній // Праці Інституту електродинаміки НАН України. Збірник наукових праць. Спеціальний випуск. – 2010. – С. 6–9.
3. Smart Power Grids – Talking about a Revolution. IEEE Emerging Technology Portal, 2009.
4. Кириленко О. В. Інтелектуальні системи керування потоками електроенергії у локальних об'єктах / О. В. Кириленко, Ю. С. Петергеря, Т. О. Терещенко, В. Я. Жуйков. – К.: Медіа ПРЕС, 2005. – 211 с.
5. Лежнюк П. Д. Відновлювані джерела енергії в розподільних електричних мережах: монографія / П. Д. Лежнюк, О. А. Ковальчук, О. В. Нікіторович, В. В. Кулик. – Вінниця: ВНТУ, 2014. – 204 с.

Аннотация

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С ВОЗОБНОВЛЯЕМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ *SMART GRID* ТЕХНОЛОГИЙ

Лежнюк П. Д., Кулик В. В., Ковальчук А. А., Котылко І. В.

Рассматриваются принципы создания системы автоматизированного управления возобновляемыми источниками энергии в электрических сетях для достижения общего технико-экономического эффекта.

Abstract

OPTIMIZATION OF ELECTRICAL NETWORKS WITH RENEWABLE ENERGY SOURCES USING *SMART GRID* TECHNOLOGIES

P. Lezhnyuk, V. Kulik, O. Kovalchuk, I. Kotilko

The principles of establishing a system of automatic control renewable energy sources in power grids to achieve the technical and economic effect.