

УДК 621.316:681.5

О. В. Кириленко¹, С. П. Денисюк², С. Є. Танкевич¹, Т. М. Базюк²

ІНФОРМАЦІЙНЕ ТА НОРМАТИВНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ОРГАНІЗАЦІЇ МУЛЬТИАГЕНТНОГО КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ ІЗ АКТИВНИМ СПОЖИВАЧЕМ

¹ Інститут електродинаміки Національної академії наук України, м. Київ;² Інститут енергозбереження та енергоменеджменту НТУУ «КПІ», м. Київ

Анотація. Створено технологічну платформу для забезпечення комплексної ефективної діяльності об'єднаної енергосистеми України з активним споживачем, що охоплює нормативну базу, інформаційне забезпечення, а також моделі активного споживача та його взаємодії із системним оператором. Розроблено інформаційні моделі, що дозволяють створити еталонну архітектуру ОЕС України, яка відповідає міжнародним нормам, враховувати всі необхідні аспекти побудови Smart Grid систем. Сформовано систему механізмів «активізації» споживачів, яка орієнтована на потреби та інтереси споживача. Розроблено алгоритм визначення потенціалу активної поведінки такого споживача електроенергії. Визначено заходи, що забезпечують ефективну взаємодію активних споживачів між собою та із системним оператором. З метою оптимізації режимів роботи обладнання споживача та мережі створена модель активного споживача.

Ключові слова: мультиагентне керування, активний споживач, нормативне забезпечення.

Аннотация. Создано технологическую платформу для обеспечения комплексной эффективной работы объединенной энергосистемы Украины с активным потребителем, которая включает нормативную базу, информационное обеспечение, а также модели активного потребителя и его взаимодействия с системным оператором. Разработаны информационные модели, позволяющие создать эталонную архитектуру ОЭС Украины, которая соответствует международным нормам, учитывать все необходимые аспекты построения Smart Grid систем. Сформировано систему механизмов «активизации» потребителей, ориентированную на потребности и интересы потребителя. Разработано алгоритм определения потенциала активного поведения такого потребителя электроэнергии. Определены мероприятия, обеспечивающие эффективное взаимодействие активных потребителей между собой и системным оператором. С целью оптимизации режимов работы оборудования потребителя и сети создана модель активного потребителя.

Ключевые слова: мультиагентное управление, активный потребитель, нормативное обеспечение.

Abstract. A technology platform to ensure the effective operation of interconnected power system of Ukraine with energy prosumer is created. It includes regulatory framework, information support and prosumer models with relationship with the system operator. The information model to create a reference architecture UES Ukraine which meet international standards necessary to consider all aspects of building Smart Grid systems. The system mechanisms "enhance" customer-oriented to the needs and interests of the consumer. An algorithm for determining the potential of active behavior of the consumers. The measures to ensure the effective interaction of active customers among themselves and with the system operator. For the purpose of optimization of customer equipment and network model set active consumer.

Keywords: multiagent control, prosumer, regulations.

Вступ

Розвиток та поширення концепції Smart Grid призводить до суттєвих змін у підходах до керування в галузі електроенергетики і у правилах взаємодії учасників на ринку електроенергії. Виникають нові учасники ринку та додаткові можливості у існуючих учасників. В першу чергу це стосується споживачів електроенергії, які досі виконували роль лише споживачів послуг ринку. Сучасний рівень розвитку технологій дозволяє створити умови для змін досі «пасивної» поведінки учасників ринку на «активну». Слід зазначити, що активний споживач разом із ефективним мультиагентним керуванням широко застосовуються у провідних розвинутих країнах Заходу. Робота таких активних споживачів у електроенергетичних системах дає суттєвий економічний і технологічний ефект (до 10%) за рахунок використання систем керування попитом, використання джерел розосередженої генерації та технологій накопичення енергії. Українській електроенергетиці сьогодні вкрай важливо здійснити впровадження активного споживача в рамках модернізації електроенергетичної системи та стимулювати таких споживачів до участі у регулюванні навантаження. Однак, існує ряд обмежень, що перешкоджають на сьогодні реалізації активного споживача в Україні.

Тому метою роботи було створити основу для розробки заходів з усунення цих обмежень за рахунок визначення необхідної нормативної бази, розробки архітектур інформаційних систем та технологічної платформи зв'язків активного споживача із інтелектуальною електроенергетичною системою.

Одним із базових підходів концепції Smart Grid є клієнтоорієнтованість, коли споживач набуває властивостей активного учасника ринку електроенергії, і самостійно формує вимоги до якості та характеру послуг. Активний споживач – це такий споживач енергії, що реалізує функції пасивного покупця та функції взаємодії з мережею енергопостачання, впливаючи на її стан та ціни на ринку.

Активний споживач, виходячи зі своїх потреб та можливостей, може:
оптимізувати графік завантаження своїх власних потужностей, як з метою мінімізації власних витрат на енергію, так і з метою отримання доходу від продажу енергії та потужності на ринок, або ж надання різного роду додаткових послуг системному оператору чи іншим споживачам;
продавати вироблену або накопичену власним обладнанням електроенергію;
керувати власним навантаженням та надавати відповідні послуги з керування навантаженням інших споживачів.

Проведено аналіз можливостей активного споживача в залежності від встановленого обладнання. Бралося до уваги основне обладнання, використання якого створює умови до перетворення звичайного (пасивного) споживача електроенергії на активного: джерела розосередженої генерації; системи керування навантаженням споживача; пристрої акумулювання електроенергії.

Використання джерел розосередженої генерації та систем керування навантаженням під час їхньої експлуатації передбачає отримання максимального прибутку, що проявляється через реалізацію виробленої або зекономленої електроенергії та отриманні компенсацій або плати за надані додаткові послуги. Тому, при коригуванні режимів роботи системи електропостачання із активними споживачами, для самих активних споживачів дана задача є першочерговою. Звичайно, комбінування кількох типів обладнання активного споживача сприяє отриманню кращого економічного ефекту.

Досліджено, що для визначення можливості споживача керувати власним навантаженням необхідно мати наступну інформацію: дані про електроспоживання підприємства (галузь економіки; структура електроспоживання; типові добові та річний графік споживання); технологічну схему електропостачання споживача та режими роботи обладнання; потенціал власної генерації електричної потужності та режимів генерації; максимально допустиму величину зниження потужності споживання об'єкту та час його безбиткового підтримання; затрати підприємства на зміну режиму роботи підприємства (чи обладнання) з метою короткотривалого зменшення споживаної потужності.

Визначено, що ефективна система керування попитом в електроенергетиці включає в себе технологічні аспекти – контроль перетоків, систему обліку, а також ринкові аспекти – систему модифікації тарифів і цін. Така система найкраще проявляє себе із застосуванням мультиагентного підходу до керування. Мультиагентна система керування (МАСК) – це багаторівнева багатозв'язна система керування, з вирішенням багатокритеріальних задач в умовах невизначеності. Основні можливості МАСК: використання засобів адаптації до змін середовища, можливість модифікації її структури і параметрів безпосередньо в процесі функціонування; застосування динамічного моделювання в реальному часі з прогнозуванням стану енергосистеми; можливості інформаційного обміну не тільки даними, але й знаннями; застосування паралельних обчислень; здатність здійснювати керування станом технічних комплексів і систем на основі розподілених інформаційних мереж і гнучкої інфраструктури обчислювальних компонентів.

Організаційна модель МАСК описується багатофакторним вектором стану всієї сукупності агентів, тому доцільно використовувати гібридну архітектуру МАСК, доповнену системою моделювання, що дозволяє агенту забезпечити вибір стратегії і виконати дії для досягнення цілей. Визначено, що така архітектура має містити: спеціалізовані бази знань для представлення інформаційних потреб функціонування різних агентів; моделі процесів; функціонально повну підсистему спеціалізованих агентів для пошуку, обробки і розподілу інформації; підсистему прогнозуючого моделювання; підсистему формування критеріїв і обмежень; підсистему моделювання та координації взаємодії між агентами, організації кооперативної поведінки, забезпечення сумісності агентів; підсистему формування керуючих впливів і реалізації керування; підсистему аналізу і планування.

Були визначені структури та особливості реалізації сучасних МАСК. Визначено переваги таких систем, сформовано вимоги та створено основу архітектури інформаційних систем керування інтелектуальними енергосистемами на основі МАСК, що дає можливість їх впровадження в Україні.

Нормативне забезпечення

Актуалізація нормативної бази в енергетиці особливо важлива, зважаючи на швидкий розвиток світової та вітчизняної електроенергетики внаслідок інтелектуалізації та інформатизації галузі та на євроінтеграційний курс України та відповідно до договору про заснування Європейського Енергетичного Співтовариства (ЄЕС) [1], ратифікованого Україною. Постає питання про формування єдиних підходів щодо впровадження концепції Smart Grid, а отже й питання формування нормативної бази інтелектуальних електроенергетичних мереж із активним споживачем. Активний споживач, як зазначалося вище є невід'ємною складовою інтелектуальної електроенергетичної мережі і тому, в значній мірі, впровадження стандартів зі сфери Smart Grid є необхідною умовою активізації споживача.

На сьогодні провідними організаціями зі стандартизації розроблено ряд нормативних документів у сфері Smart Grid, і вони чинні тривалий час. Насамперед це стосується стандартів зі сфери інформацій-

них технологій в енергетиці. Сьогодні загалом понад 100 стандартів ІЕС можна визначити, як пріоритетні для реалізації концепції Smart Grid.

Основним завданням стандартизації концепції Smart Grids є комунікації на всіх ієрархічних рівнях енергосистем. Безпечне, надійне та економічне енергопостачання тісно пов'язане зі швидкою, ефективною та надійною комунікаційною інфраструктурою енергосистеми, тому проектування та побудова комунікаційних мереж потребує такої самої високої точності та надійності, як і системи електропостачання. Високопродуктивний зв'язок між усіма складниками системи – це основна мета концепції Smart Grid. Це означає, що зв'язок має бути засновано на спільних даних, загальних протоколах їхнього передавання та єдиній концепції мережі, що має бути відкрита для ефективного інтегрування. Сьогодні вже набули чинності стандарти ІЕС щодо функціональної сумісності складників систем згідно з концепцією Smart Grid. Наприклад, стандарт ІЕС 62357-1 дає змогу адресно налагодити зв'язок між підсистемами моделі Smart Grid. Основним завданням цього стандарту є зближення моделей даних, сервісів і протоколів для ефективного та перспективного системного інтегрування для всіх підсистем моделі.

Сучасна система керування мережею забезпечує сервісно-орієнтовану архітектуру з уніфікованими процесами, взаємодією та комунікаціями на основі багаточастинних стандартів ІЕС 61968 та ІЕС 61970. Вони формують основу для інтегрування системи керування мережею в середовищі електропостачальної компанії.

Щоб бути конкурентоспроможними на нерегульованому ринку енергоносіїв, перед енергетичними компаніями сьогодні стоїть невідкладне завдання – оптимізувати свої процеси. Це єдиний спосіб, за допомогою якого вони можуть конкурувати в цьому середовищі. Важливим кроком для цього є об'єднання значної кількості автономних ІТ-систем в однорідну глобальну ІТ-систему. Наявні звичайні системи керування мережею можна інтегрувати лише зі значними труднощами, оскільки вони не використовують єдині стандарти даних. Мережу систем керування зі стандартизованим форматом даних базовано на Загальній інформаційній моделі (СІМ) відповідно до ІЕС 61970 і вона є найкращою основою для ІТ-інтегрування. Іншим важливим аспектом роботи ринку електроенергії є розроблення моделей інформаційного обміну між учасниками ринку, основні вимоги до якого визначені в багаточастинному стандарті ІЕС 62325 «Інфраструктура комунікацій на енергоринку». Зокрема цей стандарт надає загальні рекомендації щодо побудови бізнес-моделей функціонування сегментів ринку електроенергії, визначає вимоги щодо інформаційного забезпечення ринку та розкриває особливості побудови СІМ для учасників та суб'єктів ринку.

Наступним важливим аспектом концепції Smart Grid є протоколи передавання даних. Основним стандартом у цій сфері є багаточастинний стандарт ІЕС 61850. Окремі стандарти у його складі набули чинності ще у 2004 році, і стандартизують зв'язок у системах автоматизації підстанцій. На сьогодні сфера застосування цього багаточастинного стандарту поширюється не лише на електричні підстанції, а й пропонує надзвичайно гнучкі технології для побудови комунікаційного середовища систем автоматизації електроенергетичних підприємств та між ними.

Також важливим аспектом впровадження систем Smart Grid є стандартизація їх технологічного базису [2]. Насамперед, йдеться про інтелектуалізацію системи передавання електроенергії. До сучасних перспективних систем передавання електричної енергії належать технології FACTS (гнучкі системи передавання змінного струму) та HVDC (системи постійного струму високої напруги). Основним чинним стандартом на такі системи є багаточастинний стандарт ІЕС 60919, а основним стандартом на сумісність обладнання в таких системах є ІЕС 60870-5 та ІЕС 61850.

Важливим кроком на шляху створення інтелектуальної енергетичної системи із активним споживачем є використання джерел розподіленого генерування. Генерування енергії для споживачів має бути економічним та відповідати вимогам щодо екологічності та безпеки. В ІЕС чинна низка стандартів щодо джерел розподіленої генерації:

- для енергії сонця: ІЕС 61724; ІЕС/TS 61836; ІЕС 62446; багаточастинні стандарти ІЕС 60904; ІЕС 61730; ІЕС/TS 62257 тощо;

- для енергії вітру: ІЕС 61400-1; ІЕС 61400-2; ІЕС 61400-3;

- для енергії припливів: ІЕС 62600-1; ІЕС 62600-100; ІЕС 62600-200.

Сумісність обладнання в таких системах регламентовано в основному багаточастинними стандартами ІЕС 61400-25 та ІЕС 61850, що є найперспективнішим та повноцінним рішенням для інтегрування відновлюваних джерел енергії в енергосистему.

Інформаційне забезпечення

Як зазначалося вище, застосування інформаційно-комунікаційних технологій у електроенергетичних системах поряд із розширенням можливостей керування призводить також і до утворення нової структури систем із численними новими учасниками, безліччю додатків і мереж, які мають спільно функціонувати і ефективно взаємодіяти між собою. Цього можна досягти лише у тому разі, якщо буде

доступний узгоджений набір моделей, що дозволять детально описувати системи, регламентувати комунікаційні зв'язки та протоколи, а також встановлювати певні правила щодо організації процесу керування. Такі моделі дозволяють розробляти, так звану, еталонну архітектуру [3]. Еталонна архітектура системи представляє собою концептуальну модель системи і задає специфікацію її спільних об'єктів, сервісів, інтерфейсів. Тобто, еталонна архітектура – узагальнений інструмент опису, дослідження та розробки архітектури конкретної системи. Метою еталонної архітектури є можливість розділення складних систем (якими, априорі, є системи Smart Grid) на об'єкти, які можна відокремити один від одного згідно з певними принципами. Існує кілька підходів до розгляду інтелектуальних систем і проведення їх розподілення.

Першим, слід визначити розробку концептуальної архітектури, яка є високорівневим представленням основних учасників системи, основних бізнес областей (вузлів) системи та їх взаємодії.

Функціональна архітектура є систематизацією функцій та їх підфункцій, інтерфейсів (внутрішніх і зовнішніх) і визначає послідовність виконання, умов для потоків даних або керування, а також вимоги до функціонування та робочих характеристик.

Наступна, комунікаційна архітектура є формалізованим описом системи обміну інформацією між автоматизованими системами керування, її компонентами та електроенергетичними об'єктами. Фактично, мова йде про відображення функціональної архітектури, але із значним акцентом на систему зв'язку.

Архітектура інформаційної безпеки є специфікацією складових із забезпечення безпеки інформаційного обміну у відповідності до набору принципів щодо розробки таких систем.

Інформаційна архітектура являє собою узагальнене, але чітко визначене представлення учасників, включно з їх функціями, властивостями та взаємозв'язками. Ця архітектура, в значній мірі, базується на СІМ технології, що знаходить широке застосування сьогодні для формалізації моделі опису ЕЕО, обміну інформацією про їх структуру, обладнання і топологію та методології УММ, яка дозволяє створювати об'єктно-орієнтовані (рольові) моделі сегментів ринку.

І на кінець, сервіс-орієнтована архітектура, що не залежить від застосовуваної технології та організовує окремі функції, що виконують зовнішні або сторонні програми і елементи систем у взаємозамінні, застандартизовані сервіси, які можуть бути об'єднані та швидко використані відповідно до потреб певного ЕЕО.

Розроблення зазначених інформаційних архітектур є невід'ємною частиною вимог до побудови та впровадження технологій Smart Grid в Україні.

Моделювання роботи активного споживача

Реалізація стратегії активного споживача передбачає узгодження режимів роботи обладнання споживача та мережі. З метою оптимізації таких режимів була створена математична модель активного споживача, в якій виділено кілька складових основного оптимізаційного завдання. Загальна модель поведінки передбачає формування таких складових оптимізаційної задачі: 1) мінімізація витрат на електроенергію; 2) максимізація прибутку від продажу електроенергії та надання окремих системних послуг; 3) оптимізація споживання (вибір та дотримання оптимального графіку споживання); 4) оптимізація конфігурації мережі та параметрів системи електропостачання; 5) вибір оптимальних режимів роботи; 6) оптимізація режимів роботи системи енергопостачання; 7) оптимізація виробництва та використання електроенергії, виробленої від власних джерел розосередженої генерації; 8) мінімізація впливу на екологію; 9) інші можливі вигоди. В залежності від особливостей та можливостей того чи іншого споживача, а також потреб системи електропостачання формується окрема оптимізаційна задача [4].

Кожна із складових представляється відповідною моделлю. Наприклад, для вирішення оптимізаційної задачі мінімізації витрат на електроенергію враховуються такі складові оптимізаційної задачі: профіль споживання електроенергії обладнанням споживача; профіль генерації електроенергії власним генеруючим обладнанням; обсяги споживання та генерації; значення тарифів на генеровану та споживану енергію; зовнішні умови що впливають на параметри споживання (температура, пора року, тривалість дня); проміжні витрати на переналаштування обладнання; втрати оцінені як відхилення від запланованого профілю споживання; витрати на оплату спожитої енергії та інші.

Кожен із параметрів загальної оптимізаційної задачі має різну степінь важливості для споживача. Тому, для формування найбільш точного вирішення оптимізаційної задачі запропоновано використовувати узагальнений критерій, який визначається методом скаляризації:

$$F_c(X) = \alpha_1 F_1(X) + \alpha_2 F_2(X) + \dots + \alpha_n F_n(X) = \sum_{i=1}^n \alpha_i F_i(X),$$

де $F_i(X)$ – вектор оптимізованих параметрів системи;

α_i – коефіцієнти скаляризації або критерії важливості, які визначаються експертним шляхом.

Розмірність векторів $F_1(X), \dots, F_8(X)$ може бути різною. Векторні коефіцієнти дозволяють на базі векторів $F_1(X), \dots, F_8(X)$ побудувати узагальнений критерій, який може бути як скалярний так і векторний.

Розв'язком загальної оптимізаційної задачі є параметри оптимального режиму роботи для активного споживача. Дана модель дозволяє визначити пріоритетні напрямки роботи для кожного активного

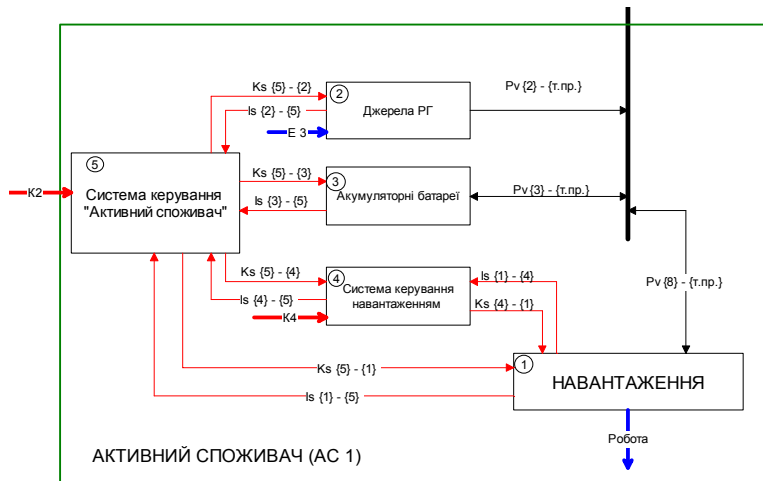


Рисунок – Модель взаємодії активного споживача, де Is – інформаційний сигнал; Ks – керуючий сигнал; Pv – прямий зв'язок; E – потоки енергії; K – зовнішні керуючі впливи

них складових;

б) вирішення загальної оптимізаційної задачі.

Виконано моделювання взаємодії обладнання активного споживача між собою, взаємодії обладнання активного споживача із його системою керування (рис.) та взаємодії системи керування активного споживача із системним оператором, іншим активним споживачем та власним обладнанням активного споживача.

Висновки

В роботі виконано комплексне дослідження міжнародної нормативної бази із забезпечення вимог щодо впровадження систем Smart Grid. Аналіз показав, що існує близько двохсот стандартів у цій сфері. Визначено ключові стандарти та наголошено на важливості введення в дію цих стандартів в Україні.

Розроблені інформаційні моделі, що дозволяють створити еталонну архітектуру ОЕС України, яка відповідає міжнародним нормам, враховувати всі необхідні аспекти побудови Smart Grid систем і, в свою чергу, дозволяє: покращити взаєморозуміння усіх зацікавлених задіяних сторін; забезпечити практичну реалізацію найбільш прогресивних способів створення інтелектуальних систем; забезпечити сумісність створюваних і вже існуючих компонентів систем; забезпечити цілеспрямоване виконання критично необхідних для реалізації інтелектуальної енергосистеми заходів. До того ж, така еталонна архітектура дозволить в перспективі об'єднати інформаційні архітектури підсистем із відповідними моделями енергосистем європейських країн.

Визначено проблеми та перспективи функціонування, а також фактори впровадження активного споживання в Україні. Сформовано систему механізмів «активізації» споживачів, яка в першу чергу орієнтована на потреби та інтереси споживача. Розроблено алгоритм визначення потенціалу активної поведінки такого споживача електроенергії. Визначені заходи, що забезпечують ефективну взаємодію активних споживачів між собою та із системним оператором. З метою оптимізації режимів роботи обладнання споживача та мережі була створена модель активного споживача. Така модель дозволяє визначити пріоритети для кожного активного споживача, збалансувати вигоди та врахувати можливі вимоги й обмеження які встановлюються оператором системи енергопостачання.

Список літератури

1. Договір про заснування Енергетичного Співтовариства. Набрання чинності від 01.02.2011.
2. Стогній Б.С. Інтелектуальні електричні мережі електроенергетичних систем та їхнє технологічне забезпечення / Б.С.Стогній, О.В. Кириленко, С.П. Денисюк // Технічна електродинаміка. – 2010. – № 6. – С. 44–50.

3. Smart Grid Reference Architecture / CEN-CENELEC-ETSI Smart Grid Coordination Group. – 2012. – 107 p.

4. Sergii Denysiuk. Algorithms For Optimal Mode Selection Of Energy Prosumer / Sergii Denysiuk, Taras Baziuk // Conference Proceedings [2014 IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems] (June 2-6, 2014, Kyiv, Ukraine), p. 171–177.

Відомості про авторів

Кириленко Олександр Васильович – д-р техн. наук, професор, акад. НАН України, директор.

Денисюк Сергій Петрович – д-р техн. наук, професор, директор Інституту енергозбереження та енергоменеджменту НТУ України «КП».

Танкевич Сергій Євгенійович – канд. техн. наук, старший науковий співробітник відділу моделювання електроенергетичних об'єктів та систем Інституту електродинаміки НАН України.

Базюк Тарас Миколайович – асистент кафедри електропостачання Інституту енергозбереження та енергоменеджменту НТУ України «КП».