

О. В. КУЛАПИН, К. В. МАХОТИЛО

МОДЕЛЮВАННЯ СМАРТ-МЕРЕЖІ СПОЖИВАЧІВ-ПРОСЬЮМЕРІВ З ФОТОЕЛЕКТРИЧНИМИ СИСТЕМАМИ

Запропоновано модель вузла смарт-мережі для споживача-просьюмера в межах котеджного селища. Модель включає в себе типові добові графіки навантаження будинку та генерації дахової фотоелектричної системи, модель акумуляторної системи зберігання енергії та контролера вузла смарт-мережі. Розроблено алгоритми керування роботою вузла смарт-мережі, який передбачає різні режими роботи для літа та зими. В залежності від години доби, стану заряду акумулятора, генерації фотоелектричної системи та навантаження будинку контролер керує балансує споживанням або віддачею енергії до мережі, зарядженням або розрядженням акумулятора, купівлею або продажем енергії просьюмером до енергосистеми. Метою керування влітку є повне використання енергії, виробленої власною фотоелектричною системою, для власного споживання та продажу надлишків в енергосистему в години пікового навантаження. Метою керування взимку є зниження витрат споживача за рахунок перенесення навантаження на нічні години та збільшення доходів від перепродажу накопиченої енергії до енергосистеми в пікові години. За результатами моделювання на прикладі котеджного селища в харківській області визначено мінімальну ємність акумуляторної системи, якої достатньо для забезпечення автономності споживача-просьюмера влітку та отримання доходу від перепродажу енергії взимку. Показано, що запропоновані алгоритми керування роботою вузла смарт-мережі дозволяють споживачу-просьюмеру ефективно використовувати власну фотоелектричну систему та надавати системні послуги об'єднаній енергосистемі.

Ключові слова: смарт мережа, споживач-просьюмер, фотоелектрична система, математична модель, алгоритм керування.

A. V. KULAPIN, K. V. MAKHOTILO

МОДЕЛИРОВАНИЕ СМАРТ-СЕТИ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ-ПРОСЬЮМЕР С ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Предложена модель узла смарт-сети для потребителя-просьюмера в пределах коттеджного поселка. Модель включает в себя типичные суточные графики нагрузки дома и генерации крышной фотоэлектрической системы, модель аккумуляторной системы хранения энергии и контроллера узла смарт-сети. Разработаны алгоритмы управления работой узла смарт-сети, предусматривающие различные режимы работы для лета и зимы. В зависимости от времени суток, состояния заряда аккумулятора, генерации фотоэлектрической системы и нагрузки дома контроллер управляет балансирующим потреблением или отдачей энергии в сеть, зарядом или разрядом аккумулятора, покупкой или продажей энергии просьюмером в энергосистему. Целью управления летом является полное использование энергии, производимой собственной фотоэлектрической системой, для собственного потребления и продажи излишков в энергосистему в часы пиковой нагрузки. Целью управления зимой является снижение затрат потребителя за счет переноса нагрузки на ночные часы и увеличение доходов от перепродажи накопленной энергии в энергосистему в пиковые часы. По результатам моделирования на примере коттеджного поселка в харьковской области определена минимальная емкость аккумуляторной системы, достаточная для обеспечения автономности потребителя-просьюмер летом и получения дохода от перепродажи энергии зимой. Показано, что предложенные алгоритмы управления работой узла смарт-сети позволяют потребителю-просьюмер эффективно использовать собственную фотоэлектрическую систему и оказывать системные услуги объединенной энергосистеме.

Ключевые слова: смарт сеть, потребитель-просьюмер, фотоэлектрическая система, математическая модель, алгоритм управления.

O. V. KULAPIN, K. V. MAKHOTILO

MODELING SMART GRID OF PROSUMERS WITH PHOTOVOLTAIC SYSTEMS

The smart-grid node model for prosumer within a cottage community has been proposed. The model includes a typical cottage load daily profiles and a roof photovoltaic system generation daily profiles, an energy storage system model and a smart grid node controller. The control algorithms for the smart grid node operation, providing different operation modes for summer and winter are developed. Depending on the time of day, the battery state of charge, the photovoltaic system generation and the cottage load, the controller controls the balancing power consumption or output to the grid, the battery charge or discharge, the energy buy or sale by prosumer. The control goal in summer is to fully use the energy produced by own photovoltaic system for own needs and to sale of surplus energy to the grid during peak hours. The control goal in winter is to reduce consumer costs by shifting the load overnight and increasing revenues from the resale of stored energy to the grid during peak hours. The minimum battery capacity of the energy storage system, sufficient to ensure the consumer autonomy in the summer and generate income from the energy resale in the winter, was estimated based on the simulation results for the case of a cottage community in the Kharkiv region. It is shown that the proposed algorithms for control of a smart grid node

Постановка проблеми. Останнім часом у світі зростає інтерес до нових принципів організації виробництва, розподілу і споживання енергії, які передбачають активне залучення абонентів енергетичних кампаній до управління роботою енергомереж. Одним з них є створення спільнот просьюмерів, тобто об'єднань абонентів мережі нового типу, які не лише купують, а й виробляють і продають енергію, в основному від відновлюваних джерел з

малою встановленою потужністю. Технологічною базою для їх функціонування є смарт-мережі (СМ), які об'єднують розподілену генерацію й споживачів електричною мережею гнучкої конфігурації та інформаційною системою обміну даних й керування. Також в спільнотах просьюмерів передбачається активне використання систем акумуляції електроенергії.

Можна очікувати, що найбільш активний

розвиток спільнот просьюмерів буде відбуватись серед сільських господарств та власників котеджних будинків, які вже зараз є лідерами з встановлення малих фотоелектричних систем в Україні. Однак, на цьому шляху існує багато технічних проблем, які належить подолати [1]. Тому задача розробки методів створення СМ для спільнот просьюмерів з акумулюванням енергії є актуальною і потребує широких теоретичних та практичних досліджень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В рамках даного дослідження смарт мережа – це невелика гнучка мережа, яка об'єднує споживачів відновлюваних джерел енергії, системи зберігання енергії, навантаження, вузли підключення до об'єднаної енергосистеми (ОЕС) та інформаційно-керуючу систему. СМ може працювати як в режимі, приєднання до ОЕС, та і в автономному режимі. Головною перевагою технології СМ є те, що вона може забезпечити гнучку та двосторонню взаємодію споживачів і виробників електроенергії, гарантуючи надійність і ефективність енергопостачання [2].

Як показують останні дослідження [3], забезпечення стійкості і довгострокової ефективності процесу розподілу енергії в мережах з великою часткою розподіленої відновленої генерації потребує створення нового типу споживача енергії – просьюмера. У порівнянні з традиційними споживачами просьюмери керують споживанням, генерують, передають, а також зберігають енергію [4]. Передбачається, що вимірювальні прилади просьюмерів, об'єднаних СМ, можуть інтегруватись з їх побутовими системами управління енергоспоживанням [6], системами зберігання енергії [7], електромобілями [8] для інтелектуального керування спільною роботою [9].

Просьюмери можуть використовувати власні системи накопичення енергії для майбутнього споживання, або продажу надлишкової енергії іншим споживачам [5]. За останніми дослідженнями, на сьогодні найбільш пристосованою технологією накопичення енергії для масштабу невеликої СМ, є електрохімічні Li-Ion акумулятори [6]. Одним з лідерів ринку індивідуальних систем зберігання енергії є компанія Tesla Motors, Inc., яка займається розробкою і виробництвом акумуляторних систем Powerwall для побутових фотоелектричних систем, крім неї такі системи випускають LG, Nissan, BMW. Ємність їх акумуляторів складає 2,5–13,5 кВт·год [9]. Також перспективним є використання в СМ акумуляторів електромобілів ємністю 35-60 кВт·год, які можуть використовуватись для зберігання і віддачі енергії до мережі [8].

Координація роботи всього цього енергетичного обладнання просьюмером вручну фактично неможлива і вимагає створення автоматизованої системи керування та алгоритмів, які можуть адаптуватись до різних цілей окремих просьюмерів, кліматичних умов й ситуації на енергоринку. Найбільш активно теоретичними дослідженнями та розвитком малих СМ займаються в США. В своїй більшості відомі техніко-економічні дослідження СМ використовують звичайні

моделі попиту на електроенергію з урахуванням кліматичних умов даної місцевості [10]. Але розробка оптимальної стратегії управління СМ просьюмерів має спиратись на більш детальне моделювання режимів генерації та споживання.

В останній час для моделювання роботи СМ широко застосовуються моделі з бібліотек пакету Matlab [11]. Стандартно вони включають в себе блоки джерел енергії (фотоелектричних та вітрових), Li-Ion системи акумуляції та навантаження. Перевагою і в той же час недоліком таких моделей є детальний опис роботи перетворювачів енергії [12], який потребує тривалих обчислень при моделюванні процесів, що відбуваються в СМ на протязі годин чи діб. Іншим недоліком є складність завдання правил керування режимами роботи локальної СМ та її взаємодії з ОЕС. Тому для моделювання процесів взаємодії просьюмерів в межах СМ необхідно використовувати спеціально розроблені, більш спрощені, проте зручні для експериментування з законами керування моделі.

Мета статті. Створити математичну та комп'ютерну модель смарт-мережі населеного пункту сільської місцевості для споживачів-просьюмерів та розробити алгоритм керування її роботою.

Основні матеріали дослідження. В даній роботі розглядається СМ для спільноти просьюмерів бази котеджного селища в Харківській області з домами, обладнаними автономними фотоелектричними системами та акумуляторами.

В якості базового елемента для створення моделі СМ обрано вузол просьюмера. У вузлі здійснюється підключення навантаження абонента, власної фотоелектричної системи (ФЕС), акумуляторної системи зберігання енергії (АС), а також підключення до електричної мережі (рис. 1).

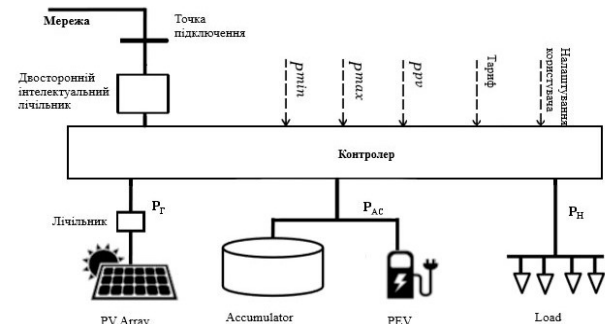


Рисунок 1 - Вузол просьюмера в смарт-мережі

Облік споживання та генерації енергії здійснює інтелектуальний лічильник, а роботою вузла керує контролер. З організаційної точки зору з інформаційною підсистемою контролера також взаємодіють диспетчер розподільчої мережі, який встановлює межі потужності генерації та споживання вузла, а також роздрібний енергопостачальник, з яким укладено енергетичний контракт споживача-просьюмера.

Задачами системи керування вузла просьюмера є повне забезпечення його споживачів енергією, максимізація використання енергії, генерованої ФЕС,

максимізація доходу від продажу енергії в ОЕС, мінімізація витрат на купівлю енергії з ОЕС, мінімізація незапланованих перетоків енергії з ОЕС, максимізація використання встановленого енергетичного обладнання.

Для створення алгоритмів керування, що відповідають вказаним задачам, необхідно розробити математичну модель вузла. Вона включає в себе моделі навантаження, генерації ФЕС, акумуляторної системи та контролер. Якості засобу комп'ютерного моделювання обрано пакет MatLab та базові елементи тулбоксу Simulink.

Модель навантаження та генерації. На рис. 2. наведено літні та зимові графіки потужності генерації P_G дахової ФЕС та споживання P_H електроенергії будинком в обраному для дослідження котеджному селищі, в Харківській області. Це – розрахункові дані, отримані для типових робочих днів за сонячної погоди з урахуванням реального орієнтування даху будинку. Встановлена потужність ФЕС прийнята рівною 5 кВт, а встановлена потужність електроприймачів будинку – 2,5 кВт (ця потужність не враховує систему опалення/кондиціонування).

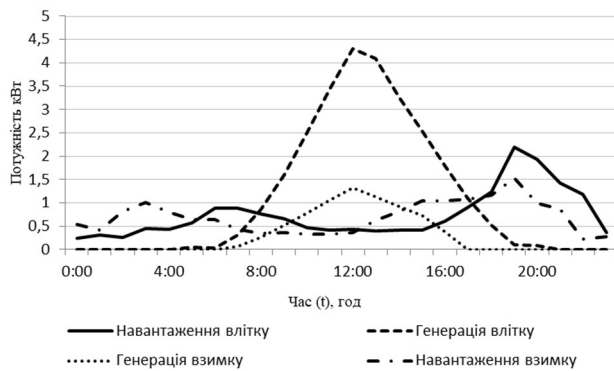


Рисунок 2 - Графік навантаження та генерації ФЕС

Модель акумуляторної системи. Для моделювання акумуляторної системи зберігання енергії розроблено вказану на рис. 3 спрощену модель Li-Ion акумулятора на базі інтегратора з обмеженнями.

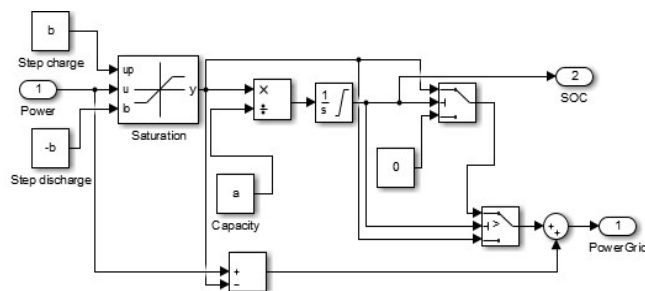


Рисунок 3 – Модель системи зберігання енергії

Моделювання здійснюється у нормованих параметрах, приведених до ємності акумулятора. На вхід моделі АС подається різниця між потужністю, генерованою ФЕС, та спожитою будинком. На виході моделі видається так звана балансуєча потужність мережі P_M , тобто потужність, яка буде спожита з чи віддана до мережі енергопостачальної компанії поза запланованих операцій купівлі й продажу просьюмера.

Фактично, величина P_M відображає залучення ОЕС для балансування генерації й споживання в СМ, яке має бути мінімізовано системою керування СМ.

Величина P_M залежить як від потужності на вході АС, так і від стану заряду акумулятора:

$$P_M = f(P_{AC}, SOC) \quad (1)$$

де P_{AC} – потужність на вході АС; SOC – стан заряду акумулятора АС.

Потужність заряджання та розряджання акумулятора відповідають технічним обмеженням:

$$P_A = \begin{cases} b, & \text{при } P_{AC} > b; \\ P_{AC}, & \text{при } -b \leq P_{AC} \leq b; \\ -b, & \text{при } P_{AC} < -b, \end{cases} \quad (2)$$

де P_A – потужність заряджання або розряджання акумулятора; b – максимальна потужність заряджання чи розряджання акумулятора.

Коли акумулятор повністю заряджений, потужність заряджання дорівнює нулю, $P_A=0$.

Стан заряду акумулятора у поточний момент часу, визначається у відносних одиницях за формулою:

$$SOC = 1/C_{ном} \int P_A dt; \quad 0,2 \leq SOC \leq 1, \quad (3)$$

де $C_{ном}$ – номінальна ємність акумулятора; обмеження знизу 0,2 відображає типову максимальну глибину розряджання Li-Ion акумулятора у 20%.

Таким чином, балансуєча потужність мережі P_M визначається за наступним виразом:

$$P_M = \begin{cases} P_{AC} - P_A, & \text{при } SOC < 1 \\ P_{AC}, & \text{при } SOC = 1 \end{cases} \quad (4)$$

Модель вузла просьюмера в СМ. На рис. 4 подано запропоновану модель СМ.

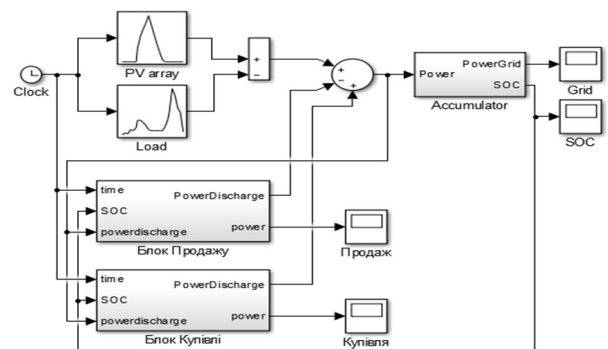


Рисунок 4 – Модель вузла просьюмера в СМ

Модель є спрощеною і не враховує, зокрема втрати, та процеси комутації в обладнанні, але дозволяє оцінити ефективність різних алгоритмів керування роботою вузла просьюмера СМ.

Рівняння балансу у вузлу просьюмера в СМ визначається формулою:

$$P_{\Gamma} - P_{\text{H}} - P_{\text{П}} + P_{\text{К}} = P_{\text{А}} + P_{\text{М}} \quad (5)$$

де: P_{Γ} – потужність, що генерується даховою ФЕС; P_{H} – потужність, що споживається будинком; $P_{\text{П}}$ – потужність, що продається просьюмером до ОЕС; $P_{\text{К}}$ – потужність, що купується просьюмером з ОЕС.

Система керування роботою вузла СМ.

Система керування (СК) роботою вузла просьюмера в СМ представлена двома блоками: продажу та купівлі енергії (см. рис.4). СК дає команди на купівлю або продаж потужності в визначений період доби згідно заданої операційної стратегії просьюмера.

У літній період енергія, що споживається будинком просьюмера, більшу частину днів менша за енергію, що генерується даховою ФЕС. Тому його операційна стратегія передбачає накопичення енергії від ФЕС в АС і максимальне використання для власних потреб протягом всієї доби, а також продаж її надлишків в енергосистему в години максимальної ціни в ОЕС. Тобто мета стратегії – максимальний рівень автономності споживача-просьюмера та максимізація доходу від надлишків генерації ФЕС.

У зимній період генерації від ФЕС зазвичай недостатньо для покриття навантаження будинку. Тому операційна стратегія просьюмера передбачає використання АС для накопичення енергії, купленої в енергосистемі в години найменшої за добу ціни, і подальший її продаж в енергосистему в години максимальної ціни в ОЕС. Тобто мета стратегії – максимізація доходу від перенесення навантаження і покриття експлуатаційних витрат на СМ.

При цьому в кожен момент часу балансує потужність мережі $P_{\text{М}}$ має бути мінімальною. При розрахунках вважається, що сплата за споживання $P_{\text{М}}$ здійснюється за роздрібним тарифом енергопостачальної компанії, а віддача $P_{\text{М}}$ до мережі не оплачується.

Алгоритм роботи вузла СМ в літній період.

Впродовж доби в літній період можливі чотири різні режими роботи вузла СМ, які реалізуються СК.

Режим 1. Генерація ФЕС P_{Γ} покриває навантаження будинку P_{H} , надлишки потужності заряджають АС та віддаються до мережі.

Якщо $SOC < 1$, то АС заряджає акумулятор до стану $SOC = 1$, а надлишок потужності видається в мережу ($P_{\text{М}} > 0$) для балансування вузла:

$$P_{\Gamma} - P_{\text{H}} = P_{\text{А}} + P_{\text{М}} \quad (6)$$

Коли акумулятор заряджений, $SOC = 1$, уся надлишкова потужність віддається в мережу:

$$P_{\Gamma} - P_{\text{H}} = P_{\text{М}} \quad (7)$$

Режим 2. Потужність навантаження P_{H} перевищує генерацію P_{Γ} , але дефіцит потужності у вузлу СМ менший за максимальну потужність розрядження акумулятора b . Дефіцит потужності покривається за рахунок енергії, накопиченої в АС:

$$P_{\Gamma} - P_{\text{H}} = P_{\text{А}} \quad (8)$$

Режим 3. Дефіцит потужності у вузлу СМ менший за максимальну потужність розрядження акумулятора b , а тариф на електроенергію T в поточний момент часу t більший, ніж середньодобовий $T_{\text{сд}}$, $T(t) > T_{\text{сд}}$. АС використовується як для покриття дефіциту потужності у вузлу, так і для продажу енергії в мережу до повного розрядження акумулятора ($SOC = 0,2$):

$$P_{\Gamma} - P_{\text{H}} - P_{\text{П}} = P_{\text{А}} \quad (9)$$

Режим 4. Навантаження P_{H} перевищує власну генерацію ФЕС P_{Γ} , і дефіцит потужності більший за максимальну потужність розрядження акумулятора b . Покриття навантаження в вузлу здійснюється спільно за рахунок розрядження акумулятора та балансуємого споживання енергії з мережі $P_{\text{М}}$:

$$P_{\Gamma} - P_{\text{H}} = P_{\text{А}} + P_{\text{М}} \quad (10)$$

Алгоритм роботи вузла СМ в зимовий період.

Впродовж доби в зимовий період СК реалізує ті ж чотири режими роботи вузла СМ, що й в літній період, а також ще один додатковий режим.

Режим 5. Тариф T в поточний момент часу t менший, ніж середньодобовий, $T(t) < T_{\text{сд}}$ і акумулятор не повністю заряджений, $SOC < 1$. Відбувається покупка енергії в мережі для покриття дефіциту потужності в СМ, а також для зарядження акумулятора:

$$P_{\Gamma} - P_{\text{H}} + P_{\text{К}} = P_{\text{А}}. \quad (11)$$

Вибір ємності акумулятора АС просьюмера.

Незважаючи на стале зниження цін, Li-Ion акумулятори залишаються самою дорогою частиною відновлюваних систем електропостачання. Тому ємність АС необхідно вибрати такою, щоб забезпечити повне використання енергії від ФЕС та ефективну роботу просьюмера на ринку при мінімальній вартості системи.

На рис 5 представлені результати моделювання роботи вузла СМ протягом доби для різних варіантів ємності акумулятора АС. Тут $W_{\text{П}}$ – планована продаж енергії до мережі, $W_{\text{К}}$ – планована купівля енергії з мережі, $W_{\text{М}}$ – енергія, відана чи спожита з мережі при балансуванні потужності.

Як видно на рис. 5,а, в зимовий період, починаючи з ємності АС 7,2 кВт·год просьюмера з'являється можливість продавати енергію до мережі $W_{\text{П}} > 0$. Завдяки багатозонному тарифу він може отримувати прибуток від використання власної АС для продажу акумуляованої вночі енергії у години піку. Згідно алгоритму роботи СМ при ємності до 13,5 кВт·год енергія з АС продається лише у години ранкового, а при більшій – і у години вечірнього піку навантаження в ОЕС. Після досягнення ємності у 22 кВт·год обмеження по потужності не дозволяють повністю зарядити АС за нічні години, обсяг купівлі енергії $W_{\text{К}}$

не змінюється, і подальше збільшення АС не є доцільним.

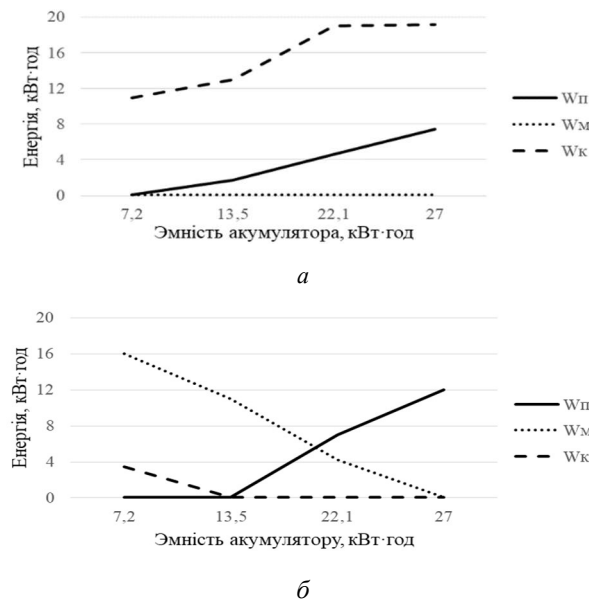


Рисунок 5 – Добові показники роботи вузла СМ:
а) в зимовий період, б) в літній період

В літній період (див. рис. 5,б) при ємності акумулятора більше 13,5 кВт-год просьюмер може відмовитись від купівлі енергії з мережі і почати продавати в години пік енергію з власної ФЕС. При ємності акумулятора в 27 кВт-год АС може повністю акумулявати енергію, вироблену даховою ФЕС протягом доби в липні. Завдяки СМ ця енергія повністю покриває власне споживання просьюмера і буде продана до мережі в години піку за найвигіднішим для нього тарифом. Але подальше збільшення ємності АС не є доцільним, тому що для її заряджання не вистачить енергії від ФЕС.

Таким чином, найменша ємність акумулятора для вузла споживача-просьюмера в СМ розглянутого котеджного селища складає 13,5 кВт-год.

Для створення АС вузла СМ можуть використовуватись окремі установки на базі Li-Ion акумуляторів або, чи разом з ними, акумуляторні батареї власного електроавтомобіля споживача-просьюмера. Ємність відомих окремих акумуляторних установок складає 2,5; 4; 7 або 13,5 кВт-год. Ємність акумулятора сучасного електроавтомобіля перевищує 30 кВт-год, але його заряд у будь-який час повинен бути достатнім для середньої по дальності поїздки. Виходячи з цього, можна прийняти, що ємність акумулятора електроавтомобіля, доступна системі зберігання вузла просьюмера, складає 7,2 кВт-год. Тобто АС просьюмера легко може бути реалізована на базі будь-якого з цих рішень.

Моделювання режимів роботи СМ. На рис. 6 наведено приклади добових графіків роботи вузла СМ з АС ємністю 13,5 кВт-год за сонячної погоди.

Рис. 6,а відображає роботу вузла СМ влітку, коли СМ підтримує максимальний рівень автономності просьюмера. Як видно, в період з 0:00 по 5:00 вузол СМ працює в режимі 3. АС повністю розрядилась до кінця

попередньої доби, і незначна потреба будинку в потужності покривається з мережі. В період з 5:30 до 11:30 СМ працює в режимі 2. Навантаження будинку покривається за рахунок генерації з ФЕС. В період з 11:30 до 17:30 СМ переходить в режим 1, тому що потужність, генерована ФЕС, достатня для покриття навантаження будинку і заряджання АС. В період з 17:30 до 0:00 СМ переходить в режим 4, коли АС забезпечує навантаження та продаж надлишків потужності за вигідним тарифом до повного розряду акумуляторів. Як видно, вузол просьюмера купує енергію з мережі лише вночі і в мінімальних обсягах. АС зберігає енергію від ФЕС для власних потреб і продажу до мережі у пікові години.

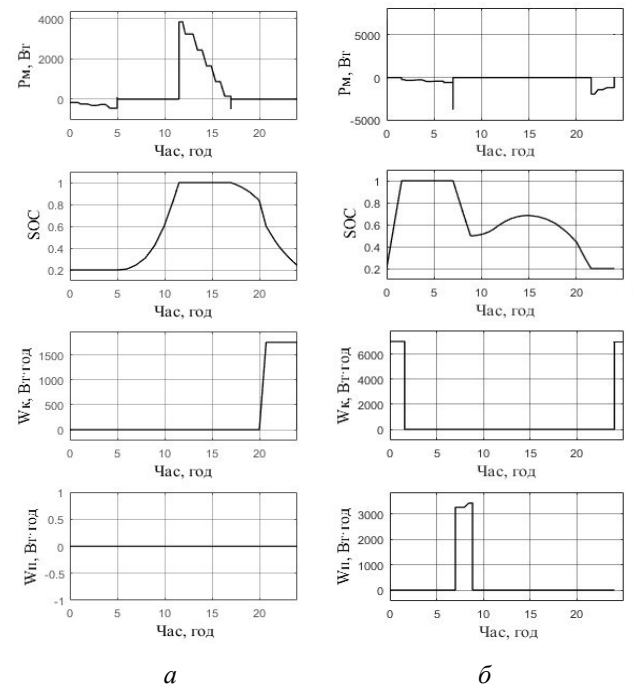


Рисунок 6 – Робота вузла просьюмера:
а) в літній період, б) в зимовий період

Рис. 6,б відображає роботу вузла СМ взимку, коли СМ використовує АС для здобуття максимального прибутку від перенесення навантаження між годинами доби. З 0:00 до 6:30 СМ працює в режимі 5. СМ купує енергію з мережі за зниженим тарифом для повного заряду АС та покриття незначного навантаження будинку. В період з 6:30 до 8:00 СМ переходить в режим 3 та перепродає частину купленої вночі енергії за більш вигідним тарифом в часи ранкового піку в ОЕС. З 8:00 до 10:30 СМ працює в режимі 2, навантаження будинку покривається розрядженням АС. В період з 10:30 до 18:00 СМ працює в режимі 1. Генерація з ФЕС перевищує ене навантаження будинку, та додатково забезпечує заряджання АС. В період з 18:00 до 0:00 СМ працює в режимі 4, коли навантаження будинку покривається за рахунок розряджання АС та покриття дефіциту з мережі.

Як видно, вузол просьюмера купує та продає енергію з мережі в основному за планом, невелике балансування споживання енергії відбувається лише в часи вечірнього максимуму. АС використовується для

перенесення навантаження будинку на ніч та перепродажу енергії в години піку.

Висновки. Розроблена математична модель вузла просьюмера в смарт-мережі дозволяє досліджувати режими його роботи протягом доби. На прикладі котеджного селища в Харківській області запропоновано алгоритм керування роботою вузла та вибрано ємність акумуляторної системи зберігання енергії, які забезпечують власне навантаження споживача-просьюмера й дозволяють продавати енергію до мережі, надаючи системні послуги ОЕС. В літній період СМ котеджного селища майже не споживає енергію з мережі і продає її в години максимуму навантаження в ОЕС. В зимовий період СМ збільшує споживання в години нічного мінімуму навантаження та приймає участь у покритті навантаження в години максимуму. Така стратегія забезпечує високий рівень автономності споживачів-просьюмерів та доходу від володіння фотоелектричною системою з акумуляторною системою зберігання енергії.

Список літератури

1. Diaz, N.L.; Luna, A.C.; Vasquez, J.C. Centralized Control Architecture for Coordination of Distributed Renewable Generation and Energy Storage in Islanded AC Microgrids. *IEEE Trans. Power Electron.* 2017, 32, 5202–5213.
2. Rathnayaka, A.J.D. Development of a Community-Based Framework to Manage Prosumers in Smart Grid. Ph.D. Thesis, Curtin University, Perth, Australia, 2014
3. Rathnayaka, A.J.D.; Potdar, V.M.; Dillon, T.; Hussain, O.; Kuruppu, S. Analysis of energy be have our profiles of prosumers. In Proceedings of the IEEE 10th International Conference on Industrial Informatics (INDIN), Beijing, China, 25–27 July 2012; pp. 236–241
4. Mahmood, A.; Butt, A.R.; Mussadiq, U.; Nawaz, R.; Zafar, R.; Razzaq, S. Energy sharing and management for prosumers in smart grid with integration of storage system. In Proceedings of the 5th International Istanbul Smart Grid and Cities Congress and Fair (ICSG), Istanbul, Turkey, 19–21 April 2017; pp. 153–156.
5. Rathnayaka, A.D.; Potdar, V.M.; Kuruppu, S.J. Evaluation of wireless home automation technologies. In Proceedings of the IEEE 5th International Conference on Digital Ecosystems and Technologies (DEST), Daejeon, Korea, 31 May–3 June 2011; pp. 76–81.
6. Jarnut, M.; Wermi'nski, S.; Wa'skowicz, B. Comparative analysis of selected energy storage technologies for prosumer-owned microgrids. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2017, 74, 925–937.
7. Nefedov, E.; Sierla, S.; Vyatkin, V. Towards electric vehicles integration to distributed energy resources of prosumer. In Proceedings of the 15th International Conference on Industrial Informatics (INDIN), Emden, Germany, 24–26 July 2017; pp. 769–772.31.
8. Parag, Y.; Sovacool, B.K. Electricity market design for the prosumer era. *Nat. Energy* 2016, 1, 1–6.
9. Tesla Motors, Inc. Powerwall Product Homepage, 2015. Available at: http://www.teslamotors.com/de_DE/powerwall (accessed on 16.05.19).

10. Renewable Energy Based Micro Grid Power Management System. Available at: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/68299-renewable-energy-based-micro-grid-power-management-system>. (accessed 20.05.19)

11. Simplified Model of a Small Scaled Micro-Grid. Available at: <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/examples/simplified-model-of-a-small-scale-micro-grid.html> (accessed 20.05.2019)

12. Nosratabadi, S. M.; Hooshmand, R. A.; Gholipour, E. A comprehensive review on microgrid and virtual power plant concepts employed for distributed energy resources scheduling in power systems. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2017, 67, 341–363.

References

1. Diaz, N.L.; Luna, A.C.; Vasquez, J.C. Centralized Control Architecture for Coordination of Distributed Renewable Generation and Energy Storage in Islanded AC Microgrids. *IEEE Trans. Power Electron.* 2017, 32, 5202–5213.
2. Rathnayaka, A.J.D. Development of a Community-Based Framework to Manage Prosumers in Smart Grid. Ph.D. Thesis, Curtin University, Perth, Australia, 2014
3. Rathnayaka, A.J.D.; Potdar, V.M.; Dillon, T.; Hussain, O.; Kuruppu, S. Analysis of energy be have our profiles of prosumers. In Proceedings of the IEEE 10th International Conference on Industrial Informatics (INDIN), Beijing, China, 25–27 July 2012; pp. 236–241
4. Mahmood, A.; Butt, A.R.; Mussadiq, U.; Nawaz, R.; Zafar, R.; Razzaq, S. Energy sharing and management for prosumers in smart grid with integration of storage system. In Proceedings of the 5th International Istanbul Smart Grid and Cities Congress and Fair (ICSG), Istanbul, Turkey, 19–21 April 2017; pp. 153–156.
5. Rathnayaka, A.D.; Potdar, V.M.; Kuruppu, S.J. Evaluation of wireless home automation technologies. In Proceedings of the IEEE 5th International Conference on Digital Ecosystems and Technologies (DEST), Daejeon, Korea, 31 May–3 June 2011; pp. 76–81.
6. Jarnut, M.; Wermi'nski, S.; Wa'skowicz, B. Comparative analysis of selected energy storage technologies for prosumer-owned microgrids. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2017, 74, 925–937.
7. Nefedov, E.; Sierla, S.; Vyatkin, V. Towards electric vehicles integration to distributed energy resources of prosumer. In Proceedings of the 15th International Conference on Industrial Informatics (INDIN), Emden, Germany, 24–26 July 2017; pp. 769–772.31.
8. Parag, Y.; Sovacool, B.K. Electricity market design for the prosumer era. *Nat. Energy* 2016, 1, 1–6.
9. Tesla Motors, Inc. Powerwall Product Homepage, 2015. Available at: http://www.teslamotors.com/de_DE/powerwall (accessed on 16.05.19).
10. Renewable Energy Based Micro Grid Power Management System. Available at: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/68299-renewable-energy-based-micro-grid-power-management-system>. (accessed 20.05.19)
11. Simplified Model of a Small Scaled Micro-Grid. Available at: <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/examples/simplified-model-of-a-small-scale-micro-grid.html> (accessed 20.05.2019)
12. Nosratabadi, S. M.; Hooshmand, R. A.; Gholipour, E. A comprehensive review on microgrid and virtual power plant concepts employed for distributed energy resources scheduling in power systems. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2017, 67, 341–363.

Надійшла (received) 21.06.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Махотіло Костянтин Володимирович (Makhotilo Kostiantyn Volodymyrovych) – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри електричних станцій, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7081-071X>; e-mail: kvmahotilo@gmail.com

Кулапін Олександр Валентинович (Kulapin Olexander Valentinovich) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», студент; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9283-6910>; e-mail: sasha.kulapin@gmail.com