

ВИКОРИСТАННЯ СУПЕРКОНДЕНСАТОРІВ НА ОСНОВІ ВЕРТИКАЛЬНО ВИРОЩЕНОГО ГРАФЕНУ ДЛЯ ДЕКАРБОНІЗАЦІЇ КОМУНАЛЬНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

¹Вінницький національний технічний університет

Анотація

Робота присвячена критичній проблемі стабілізації електромереж в умовах прискореного впровадження відновлюваних джерел енергії, таких як сонячна та вітрова генерація. Мінливість відновлюваних джерел енергії вимагає технологій накопичення енергії для потреб комунальної енергетики. Традиційні літій-іонні акумулятори, незважаючи на високу щільність енергії, обмежені за швидкістю зарядки/розрядки та мають недостатній термін служби для високоциклічних комунальних застосувань. Мета дослідження полягає у вивченні потенціалу суперконденсаторів на вертикально вирощеному графені, як рішення для накопичення енергії. Суперконденсатори пропонують надзвичайно високу питому потужність та циклічну довговічність, що є незамінним для демпфування пікових навантажень. Вертикально вирощений графен має унікальну 3D-наноархітектуру, що максимізує доступну площу поверхні та створює відкриті канали для швидкого іонного транспорту, що збільшує як питому ємність, так і швидкість заряду/розряду. Незважаючи на технічну придатність, головним бар'єром для масового впровадження є високий початковий капітал, що значно перевищує вартість літій-іонних акумуляторів. Проте, низькі експлуатаційні витрати технологій накопичення енергії на основі суперконденсаторів та вертикально вирощеного графену забезпечують нижчу загальну вартість у довгостроковій перспективі.

Ключові слова: суперконденсатори, вертикально вирощений графен, відновлювані джерела енергії, системи накопичення енергії, низьковуглецева економіка.

Abstract

The work is devoted to the critical problem of stabilizing power grids in the conditions of accelerated implementation of renewable energy sources, such as solar and wind generation. The variability of renewable energy sources requires energy storage technologies for the needs of municipal energy. Traditional lithium-ion batteries, despite their high energy density, are limited in charge/discharge speed and have insufficient service life for high-cycle utility applications. The aim of the research is to study the potential of supercapacitors on vertically grown graphene as an energy storage solution. Supercapacitors offer extremely high specific power and cyclic durability, which is indispensable for damping peak loads. Vertically grown graphene has a unique 3D nanoarchitecture that maximizes the available surface area and creates open channels for rapid ion transport, which increases both specific capacitance and charge/discharge rate. Despite the technical feasibility, the main barrier to mass adoption is the high initial capital, which significantly exceeds the cost of lithium-ion batteries. However, the low operating costs of supercapacitors and vertically grown graphene-based energy storage technologies ensure a lower overall cost in the long term.

Keywords: supercapacitors, vertically grown graphene, renewable energy sources, energy storage systems, low-carbon economy.

Вступ

Глобальні кліматичні імперативи вимагають прискореного переходу до низьковуглецевої економіки, що, своєю чергою, стимулює масове впровадження відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) у комунальному енергетичному секторі. Зростання частки ВДЕ, таких як сонячна та вітрова генерація, створює суттєві виклики для стабільності електромереж. Мінливість виробництва ВДЕ, спричинена, наприклад, швидкою зміною вітрових потоків або появою хмарності, генерує високочастотні коливання та транзйентні умови, що можуть призвести до нестабільності живлення, особливо в ізольованих мікромережах. Ефективна інтеграція ВДЕ вимагає систем накопичення енергії (СНЕ), які можуть не лише зберігати енергію протягом тривалого часу, але й забезпечувати потужність для підтримки якості електроенергії та регулювання частоти. Це вимагає від СНЕ надзвичайно високої щільності потужності та здатності до мільйонів циклів заряд/розряд.

Існуючі технології накопичення, зокрема літій-іонні (Li-ion) акумулятори, хоча і мають високу щільність енергії, часто обмежені щодо швидкості зарядки/розрядки та мають скінченний термін

служби, зазвичай витримуючи лише 2000 – 3000 циклів, перш ніж їхня ефективність почне суттєво знижуватися.

Суперконденсатори (СК) займають унікальну нішу як міст між звичайними конденсаторами та акумуляторними батареями. Вони пропонують вищу питому потужність (потенційно понад 100 Вт/г), здатність заряджатися та розряджатися за секунди, а також винятково довгий термін служби, що часто перевищує 1 млн. циклів та до 20 років експлуатації. Ці характеристики роблять СК незамінними для демпфування пікових навантажень та забезпечення миттєвої потужності в критичних сферах застосування, наприклад у системах безперебійного живлення. Основним технічним обмеженням комерційних СК залишається їх порівняно низька щільність енергії. Для розширення застосування СК та підвищення їх конкурентоспроможності критично важливим є розробка інноваційних електродних матеріалів, які можуть збільшити питому ємність без шкоди для швидкості.

Вертикально вирощений графен (ВВГ) є перспективним кандидатом для вирішення цієї проблеми. ВВГ має унікальну тривимірну (3D) пористу мережу, сформовану вертикально стоячими наноаркушами графену. Ця архітектура максимізує доступну площу поверхні та створює відкриті канали для іонного транспорту. Суперконденсатори на ВВГ можуть забезпечити необхідне поєднання високої питомої ємності та швидкості.

Результати дослідження

Суперконденсатори, також відомі як іоністори, функціонують за принципом електрохімічного накопичення заряду. Основний механізм, характерний для більшості вуглецевих СК, ґрунтується на явищі подвійного електричного шару (ПЕШ, EDLC). Заряд накопичується на межі розділу фаз між високопористим електродом і електролітом. На відміну від акумуляторів, де енергія зберігається у хімічних зв'язках, СК зберігають енергію в електростатичному полі. Накопичення заряду відбувається на ідеально поляризованому електроді, на якому не протікають фарадєєвські процеси, пов'язані з масоперенесенням. Ця фізична, а не хімічна природа зберігання заряду є фундаментальною причиною, чому СК мають феноменальну циклічну стабільність (понад 1 мільйон циклів) та надзвичайно швидко кінетику зарядки і розрядки.

Для підвищення енергетичної щільності СК використовується механізм псевдоємності, заснований на швидких і оборотних поверхневих фарадєєвських реакціях, які зазвичай досягаються шляхом інтеграції оксидів металів або провідних полімерів (наприклад, PEDOT:PSS) в електродний матеріал.

Переваги СК є критично важливими для комунальної енергетики:

1. Щільність потужності: СК забезпечують миттєву потужність, необхідну для інерційної підтримки. Їх питома потужність значно вища, ніж у літій-іонних батареях.
2. Довговічність: Тривалий термін служби (до 20 років) та стійкість до мільйонів циклів мінімізують витрати на обслуговування.
3. Ефективність: Високий ККД, що досягає 98%.
4. Безпека: СК демонструють високу термічну стабільність і менш схильні до перегріву та теплового розгону порівняно з Li-ion.

Незважаючи на ці переваги, СК мають недоліки, включаючи низьку питому енергію (1,5 – 3,9 Вт/кг) та низьку робочу напругу на комірку (до 2.85 В), що вимагає додаткових систем активного балансування елементів у великих модулях.

Вертикально орієнтований графен (ВВГ) являє собою інноваційну 3D-наноархітектуру, що складається з аркушів графену товщиною 2–10 шарів перпендикулярно до субстрату. Ця унікальна морфологія забезпечує видатні електрохімічні характеристики, необхідні для високопродуктивних СК.

Ключові властивості ВВГ, що оптимізують роботу СК:

- високе співвідношення площі поверхні до об'єму, що критично важливо для максимізації ємності ПЕШ;
- відкрита пориста мережа забезпечує мінімальний опір іонному транспорту, оскільки електроліт має прямі канали для швидкого доступу до всіх активних ділянок. Це безпосередньо прискорює кінетику переносу заряду, забезпечуючи надвисоку щільність потужності, ідеальну для FFR;
- висока електро- та теплопровідність ВВГ;
- гострі краї ВВГ-аркушів можуть сприяти збільшенню електрохімічної активності.

Контрольований синтез ВВГ є ключовим для досягнення бажаної морфології. Плазмово-посилене хімічне осадження з парової фази (PECVD) визнано одним із найбільш придатних методів.

PECVD забезпечує:

- високу швидкість росту;
- можливість каталізатор-вільного росту на великій площі;

– використання електричного поля, що сприяє вертикальній орієнтації.

ВВГ успішно вирощують на різноманітних субстратах, включаючи гнучкі матеріали, такі як вуглеволокно та пінонікель. Хоча ріст можливий при низьких температурах (наприклад, 225 °C), це може негативно вплинути на ступінь графітизації та відкритість морфології, які необхідні для забезпечення оптимальної швидкості заряду/розряду.

Для промислового впровадження існує суперечність між бажаною архітектурою ВВГ та економічною доцільністю. Виробництво високоякісних графенових листів (на відміну від графенових пластівців, які можна отримати електрохімічною ексfolіацією) є складним, вимагає використання складних машин, багатоетапних хімічних реакцій та високого контролю параметрів процесу. Це призводить до високої собівартості виробництва.

Дослідження підтверджують високу електрохімічну продуктивність ВВГ як електродного матеріалу. Композити на основі ВВГ досягли надзвичайно високої питомої ємності до 815 Ф/г при густині струму 3А/г. Ці значення є значно вищими, ніж у типових EDLC, що працюють за принципом ПЕШ.

Для комунальних мереж, що вимагають багаторазового використання, довговічність є критичним фактором. ВВГ-СК демонструють стійкість, яка значно перевершує акумулятори. Наприклад, було підтверджено утримання 79% ємності асиметричного пристрою після 12000 циклів, а також збереження 91,5% ємності після 10 тис. циклів для активованого графенового суперконденсатора. Така стабільність навіть у жорстких умовах тестування робить ВВГ-СК ідеальними для високоциклічних мережевих застосувань, де часта заміна обладнання призводить до високих експлуатаційних витрат.

Для задоволення широкого спектра вимог мережі, що включає як миттєву потужність, так і триваліше зберігання, стратегія гібридизації є найбільш перспективною. Гібридні СК поєднують високу потужність СК (використовуючи ВВГ) з високою енергією літій-іонних батарей або псевдоємнісних матеріалів. Наприклад, композити відновленого оксиду графену з PEDOT:PSS демонструють високу питому ємність (434 Ф/г) та виняткову стабільність. Гібридні системи дозволяють мінімізувати необхідність заміни обладнання, одночасно покриваючи потреби мережі у короткостроковому (секунди) та середньостроковому (хвилини) регулюванні. Проте, практична реалізація гібридних систем вимагає подальшого розвитку систем керування та силової електроніки.

Декарбонізація міського транспорту, зокрема, електрифікація автобусних парків, вимагає інфраструктури для ультрашвидкої зарядки. Ці зарядні станції, якщо вони підключені безпосередньо до мережі, створюють високі пікові навантаження. СК є ідеальним рішенням для буферизації такого навантаження. На зарядній станції СК виступають як буферний накопичувач: вони повільно беруть енергію з мережі, уникаючи пікових навантажень, а потім швидко (за 30 секунд) розряджають її в електромобіль. Ця схема дозволяє заряджати міський громадський транспорт, забезпечуючи запас ходу до 10 км, без дестабілізації розподільчої мережі. Висока питома потужність та довговічність ВВГ-СК особливо цінні для цього застосування, оскільки вони витримують мільйони інтенсивних циклів, які є типовими для міських транспортних систем.

Основним технологічним викликом є масштабування виробництва високоякісного ВВГ. Методи, що використовуються для отримання унікальної 3D-архітектури, такі як CVD, є складними. Ці процеси можуть бути дорогими, вимагають контролю забруднення та використання небезпечних хімічних речовин, що створює значні перешкоди для масового виробництва. Необхідно розробити економічно доцільні методи синтезу, які б підтримували високу продуктивність.

Для інтеграції ВВГ-СК у комунальну енергетику необхідно підвищити обізнаність про їхні унікальні переваги. Важливо включити СК у загальногалузеві обговорення технологій накопичення енергії та фінансувати демонстраційні проекти, які можуть довести їхню конкурентоспроможність у реальних сценаріях FFR та управління піковими навантаженнями. Також потрібні подальші дослідження та інвестиції в силову електроніку та системи контролю, необхідні для ефективного практичного застосування гібридних СНЕ, що поєднують ВВГ-СК і високоенергетичні накопичувачі.

Висновки

Суперконденсатори на основі вертикально вирощеного графену є високопотужним рішенням, яке може відігравати ключову роль у декарбонізації комунальної енергетики. Унікальна 3D-наноархітектура ВВГ забезпечує швидку кінетику переносу заряду, необхідну для інерційної підтримки та FFR, що є критично важливим для стабілізації мереж з високою часткою ВДЕ. ВВГ-СК демонструють високу питому ємність та циклічну довговічність, підтверджуючи їхню технічну придатність для вимогливих комунальних застосувань, включаючи буферні системи для міського електротранспорту. Для повного розкриття потенціалу ВВГ-СК необхідні подальші цілеспрямовані дослідження.

дження, зокрема, розробка масштабованих та економічних методів створення низькотемпературних, високопродуктивних і екологічно чистих процесів для вирощування високоякісного ВВГ, що знизить бар'єри CAPEX та вирішить проблеми масштабування. Дослідження мають бути зосереджені на інженерії гібридних пристроїв, які ефективно поєднують високу щільність потужності ВВГ-СК з високоенергетичними компонентами для створення систем, здатних покривати як короткочасні, так і середньострокові потреби мережі. Поглиблене вивчення впливу таких факторів, як специфічна площа поверхні, ступінь допінгу (особливо азотом) та розподіл пор за розмірами, для максимального підвищення питомої ємності та швидкості іонної дифузії.

Кватернюк Сергій Михайлович – д.т.н., професор, професор кафедри екології, хімії та технологій захисту довкілля, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: serg.kvaternuk@gmail.com.

Петрук Василь Григорович – д.т.н., професор, професор кафедри екології, хімії та технологій захисту довкілля, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: petrukvg@gmail.com.

Добровольська Альона Миколаївна – студентка групи ЕКО-22б, факультет будівництва, цивільної та екологічної інженерії, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: alyonadobro12@gmail.com.

Serhii M. Kvaterniuk – Dr. Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Ecology, Chemistry and Environmental Protection Technologies, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: serg.kvaternuk@gmail.com.

Vasyl G. Petruk – Dr. Sc. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Ecology, Chemistry and Environmental Protection Technologies, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: petrukvg@gmail.com.

Alyona M. Dobrovolska – student of ECO-22b group, Faculty of Construction, Civil and Environmental Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail : alyonadobro12@gmail.com.