

ЕНЕРГІЯ МАЙБУТНЬОГО

**Акумуляторні
системи накопичення
енергії:**

Розуміння ключових понять та
сфери застосування

Біла книга
Хасан Обаїд





Малюнок 1: Рішення Cummins BESS 1 MBm/1 MBm·год

Анотації

Системи накопичення енергії на основі акумуляторів (BESS) стали ключовою технологією в сучасному управлінні енергетикою, пропонуючи вирішення проблеми непостійності поновлюваних джерел енергії та підвищуючи стабільність енергосистеми. У цій статті представлено всебічний огляд BESS, включаючи їх переваги, сфери застосування та ключові параметри, які необхідно відстежувати для забезпечення оптимальної продуктивності. Крім того, у статті пояснюються основні поняття, такі як C-рейтинг (C-rate) та відмінність між кіловатами (кВт) та кіловат-годинами (кВт·год), які є фундаментальними для розуміння роботи та ємності акумуляторів.

З глобальним переходом на відновлювані джерела енергії потреба у надійному зберіганні енергії стала більш вираженою. BESS відіграють вирішальну роль у задоволенні цієї потреби, зберігаючи надмірну енергію, що виробляється в періоди низького попиту, та вивільняючи її в періоди пікового попиту. Ця можливість не тільки підвищує ефективність використання енергії, а й сприяє стабільності та надійності електромережі.

Переваги акумуляторних систем накопичення енергії

BESS пропонує багато переваг, які підвищують ефективність, надійність та економічну життєздатність сучасних електромереж. Ці системи відіграють важливу роль у вирішенні складнощів, пов'язаних з інтеграцією відновлюваних джерел енергії, підтримкою стабільності мережі та забезпеченням резервного живлення під час відключень. Нижче наведено деякі ключові переваги BESS, висвітлено їх вплив на різні аспекти управління енергією:

СТАБІЛІЗАЦІЯ МЕРЕЖІ

BESS може забезпечувати миттєвий відгук на порушення в мережі, сприяючи підтримці стабільності напруги та частоти. Це особливо важливо для мереж з високою часткою переривчастих відновлюваних джерел енергії, таких як вітряні та сонячні електростанції.

ЕНЕРГЕТИЧНИЙ АРБИТРАЖ

Енергетичний арбітраж передбачає зберігання енергії, коли вона дешева та в достатку (зазвичай у непікові години), і продаж її назад у мережу, коли ціни вищі (під час пікового попиту). Це може призвести до значної економії коштів та збільшення економічної віддачі для постачальників енергії.

ІНТЕГРАЦІЯ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ

BESS сприяє інтеграції відновлюваних джерел енергії, згладжуючи коливання у виробництві електроенергії. Вони можуть зберігати надлишок енергії в сонячні або вітряні періоди і віддавати її при зниженні виробництва, забезпечуючи постійне постачання відновлюваної енергії.

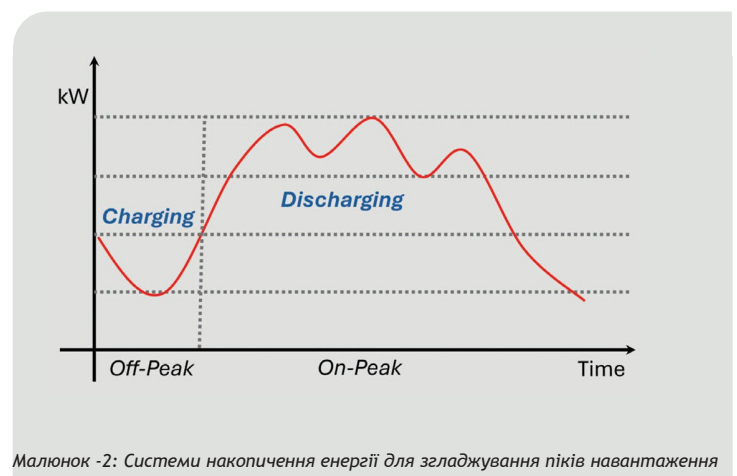
РЕЗЕРВНЕ ЖИВЛЕННЯ

У разі відключення мережі BESS може

надати надійне резервне джерело живлення. Це критично важливо для критичної інфраструктури, такої як лікарні, центри обробки даних та військові об'єкти, де безперебійне електропостачання є критично важливим.

ПІКОВЕ ЗГЛАДЖУВАННЯ

Здійснюючи розрядку в періоди пікового попиту, BESS може знизити навантаження на мережу, тим самим знижуючи витрати на енергію для споживачів і зменшуючи потребу комунальних служб інвестувати в додаткові генеруючі потужності. Дивіться малюнок 2



РЕГУЛЮВАННЯ ЧАСТОТИ

Регулювання частоти включає безперервне, посекундне коригування потужності для підтримки частоти системи на номінальному рівні (50 або 60 Гц) і забезпечення стабільності мережі.

Якщо попит перевищує пропозицію, частота системи знижується, що може призвести до часткових або повних відключень електроенергії (brownouts і blackouts). Навпаки, якщо виробництво електроенергії перевищує потребу, частота системи збільшується, що може пошкодити підключені електричні пристрої.

BESS здатні забезпечувати регулюючу потужність з реакцією на рівні часток секунди, що робить їх дуже цінними для балансування мережі.



Сфери застосування акумуляторних систем накопичення енергії

BESS має універсальні можливості застосування в різних секторах, забезпечуючи значні переваги як для окремих домогосподарств, так і для великих комунальних підприємств. Ці системи підвищують енергоефективність, покращують якість електроенергії та підтримують інтеграцію відновлюваних джерел енергії. Вирішуючи конкретні енергетичні потреби та виклики, BESS робить свій внесок у більш стійку енергетичну інфраструктуру. Нижче наведено основні сфери застосування BESS, що ілюструють їх вплив і корисність у різних контекстах:

- **Житлові системи (Residential):**

Домашні системи BESS дозволяють власникам житла накопичувати енергію, що виробляється сонячними панелями, знижуючи залежність від мережі та зменшуючи рахунки за електроенергію. Крім того, вони забезпечують резервне харчування у разі вимкнення.

- **Комерційні та промислові системи (Commercial and Industrial):**

У комерційних та промислових умовах BESS використовуються для управління піковими навантаженнями, зниження витрат на електроенергію та підвищення якості живлення. Вони також підвищують енергетичну безпеку, забезпечуючи резервне електропостачання.

- **Промисловий рівень (Utility-Scale):**

BESS промислового масштабу розгортаються енергетичними компаніями для балансування попиту та пропозиції, підтримки стабільності мережі та інтеграції відновлюваних джерел енергії у великих масштабах. Вони відіграють ключову роль у рішеннях зберігання енергії лише на рівні енергосистеми.

- **Мікромережі:** BESS є невід'ємною частиною мікромереж, що представляють собою локалізовані мережі, які можуть відключатися від традиційної мережі для автономної роботи. Це особливо корисно у віддалених районах та для критичної інфраструктури.

- **Автономні системи (Off-Grid):**

BESS стають все більш важливими для автономних рішень, забезпечуючи надійне та стійке енергопостачання у віддалених районах. Ці системи накопичують надмірну енергію, що виробляється відновлюваними джерелами, такими як сонячна та вітрова генерація, забезпечуючи стабільне енергопостачання навіть при переривчастому виробленні. Використання BESS в автономних системах знижує залежність від викопного палива та зменшує екологічну дію традиційних генераторів.

- **Відстрочка модернізації мережної інфраструктури (Transmission/Distribution System Deferral):**

Електромережа має бути спроектована з урахуванням пікового попиту, який зазвичай виникає лише кілька годин на рік. Якщо прогнозоване зростання пікового попиту перевищує пропускну спроможність існуючої мережі, потрібні значні інвестиції в оновлення обладнання та будівництво нової інфраструктури.

Ця проблема особливо актуальна через збільшення кількості станцій заряджання електромобілів, що потребує серйозного розширення електромережі для обробки додаткового навантаження. Розгортання BESS дозволяє знизити або повністю виключити необхідність у дорогих модернізаціях мережі, забезпечуючи покриття пікового попиту за рахунок накопиченої енергії. Такий підхід знижує навантаження на мережу та підвищує ефективність використання її передавальних та розподільчих потужностей.

Ключові компоненти акумуляторних систем накопичення енергії:

BESS є складними збірками різних компонентів, які працюють разом для зберігання та ефективної і безпечної подачі електричної енергії. Кожен компонент відіграє критичну роль у загальній функціональності та продуктивності системи. Розуміння цих основних компонентів є важливим для розуміння того, як працює BESS та які різноманітні переваги вона надає.

Нижче наведено опис основних компонентів, що складають BESS:

1. АКУМУЛЯТОРНІ ЕЛЕМЕНТИ/МОДУЛІ/СТОЙКИ:

Ядро Ядро BESS, акумуляторні комірки є основними одиницями, де енергія зберігається електрохімічно. Комірки об'єднуються в модулі для зручнішого управління та обробки. Потім кілька модулів збираються в стелажі для більш структурованої та ефективної конфігурації (див. малюнки 3.1 до 3.3). Поширеними типами є літій-іонні, свинцево-кислотні, нікель-кадмієві та нові технології, такі як твердотільні акумулятори.

Акумулятори мають різні форми, кожна з яких має свої унікальні характеристики, переваги та недоліки. Три поширені форми: циліндрична, призматична та мішкова.

2. СИСТЕМА УПРАВЛЕННЯ БАТАРЕЯМИ (BMS):

Ключовий компонент, який моніторить і управляє продуктивністю акумуляторних комірок. BMS працює

на трьох ієрархічних рівнях: рівень комірки, рівень модуля та рівень стелажа/стійки. Кожен рівень відіграє важливу роль у моніторингу, контролюванні та забезпеченні безпеки та ефективності всієї акумуляторної системи. Ефективно управляючи цими трьома рівнями, BMS забезпечує безпечну, надійну та ефективну роботу BESS, максимізуючи його продуктивність і термін служби.

Рівень комірки (Cell Level):

На рівні окремих акумуляторних комірок система управління батареєю (BMS) виконує такі основні функції:

- **Моніторинг напруги:** Безперервне вимірювання напруги кожної комірки для забезпечення роботи в безпечних межах.
- **Моніторинг температури:** Відстеження температури кожної комірки для запобігання перегріву та термічному розгону.
- **Балансування:** Забезпечення рівномірних процесів заряджання та розряджання всіх комірок для максимальної продуктивності та продовження терміну служби. Це досягається за допомогою пасивних або активних методів балансування.
- **Оцінка стану заряду (SoC) і стану здоров'я (SoH):** Розрахунок залишкової ємності та рівня деградації кожної комірки для надання точних даних для управління системою на вищому рівні.

Детальніший розгляд цих аспектів буде представлений далі в документі.



Малюнок -3.1 Призматичний елемент

Малюнок -3.2 Акумуляторний модуль

Малюнок -3.3 Акумуляторна стійка

РІВЕНЬ МОДУЛЯ (MODULE LEVEL):

На рівні модуля BMS управляє групою акумуляторних комірок, зібраних разом. Основні функції включають:

- **Агрегований моніторинг:** Збір та обробка даних з окремих комірок для надання комплексного огляду стану модуля.
- **Термальне управління:** Впровадження систем охолодження або обігріву для підтримання оптимального температурного діапазону для всього модуля.
- **Виявлення та управління несправностями:** Ідентифікація та реагування на будь-які аномалії або несправності в модулі, такі як перенапруження, недонапруження чи екстремальні температури.
- **Комунікація:** Передача інформації з рівня комірки на рівень стелажа для забезпечення скоординованого контролю та управління.

РІВЕНЬ СТЕЛАЖА (RACK LEVEL):

На рівні стелажа BMS контролює кілька модулів, зібраних у стелажі. Основні функції включають:

- **Інтеграція системи:** Координація роботи кількох модулів для забезпечення збалансованої продуктивності та оптимізації зберігання і доставки енергії.
- **Управління навантаженням:** Керування потоком електрики всередину і ззовні стелажа для задоволення попиту при збереженні стабільності системи.
- **Безпека та захист:** Впровадження протоколів безпеки для захисту від електричних несправностей, термічних проблем та інших небезпек. Це включає процедури аварійного вимкнення та ізоляції несправностей.
- **Енергетичне управління:** Оптимізація використання та зберігання енергії на основі попиту, доступності та ефективності.
- **Комунікація з вищими системами управління:** Інтерфейс із загальною системою управління енергією на об'єкті чи в мережі для надання даних і отримання команд управління.

3. СИСТЕМА ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ (PCS):

Ця система включає інвертори та випрямлячі, які перетворюють постійний струм (DC) від акумуляторів на змінний струм (AC) для використання в мережі,

та навпаки. PCS є важливим компонентом для інтеграції BESS з електричною мережею або іншими енергетичними системами. Інвертори можуть бути або "синхронізованими з мережею" (grid-following), або "підтримуючими мережу" (grid-firming). Інвертори, що синхронізуються з мережею, потребують вже існуючої системи змінної напруги або шин, з якою вони синхронізуються, що дозволяє їм постачати активну потужність (кВт) та реактивну потужність (кВАр). На противагу цьому, інвертори, що підтримують мережу, можуть створювати свою власну напругу та частоту змінного струму і підключатися до знеструмлених шин, що дає більшу гнучкість і підтримку для збереження стабільності мережі.

СИСТЕМА ТЕРМОМЕНЕДЖМЕНТУ:

Акумулятори повинні працювати в певних температурних діапазонах для збереження ефективності та довговічності. Система терморегулювання, включаючи механізми охолодження, а іноді і нагріву, гарантує, що батареї підтримують оптимальну температуру.

Системи накопичення енергії можуть охолоджуватися за допомогою повітря або рідини, кожна з цих технологій має свої переваги.

- **Повітряне охолодження** (air-cooled BESS) використовує систему опалення, вентиляції та кондиціонування повітря для циркуляції повітря навколо батарей, відводячи тепло за допомогою конвекції. Цей метод простіший, дешевший і вимагає менше обслуговування, але може бути менш ефективним у середовищі з високою температурою.
- **Рідинне охолодження** (liquid-cooled BESS) Застосовує охолоджуючу рідину, таку як вода або гліколь, для поглинання та розсіювання тепла від батарей. Цей метод більш ефективний при роботі з високими тепловими навантаженнями, забезпечує більш рівномірний розподіл температури, що підвищує продуктивність і продовжує термін служби акумулятора. Однак він складніший, дорожчий у впровадженні та вимагає більшого обслуговування.

4. СИСТЕМИ БЕЗПЕКИ ТА ЗАХИСТУ:

Ці системи включають різноманітні механізми безпеки, такі як запобіжники, автоматичні вимикачі, системи гасіння пожеж та протоколи аварійного вимкнення для захисту BESS від несправностей і небезпек, таких як короткі замикання, перенапруга та термічне згорання. Інші елементи захисту включають захист від перенапруги/недонапруги, захист від зміни частоти, синхронізацію перевірки та захист від пошкоджень заземлення.

5. БЕЗПЕРЕБІЙНЕ ЖИВЛЕННЯ (UPS):

Джерело безперебійного живлення (ДБЖ) може бути вбудоване в систему накопичення енергії (BESS) для забезпечення *black-start* (Запуск в автономному режимі), що дозволяє записувати дані та обробляти несправності в аварійних умовах.

Це доповнення забезпечує резервне живлення для підтримки критично важливих функцій і дозволяє системі перезавантажитися самостійно.

6. КОРПУС (ENCLOSURE):

Фізичний корпус, який захищає акумуляторні модулі та інші компоненти від зовнішніх факторів, таких як пил, волога та механічні пошкодження. Це також забезпечує безпеку системи для операторів та інших осіб.

7. ДОПОМІЖНІ СИСТЕМИ:

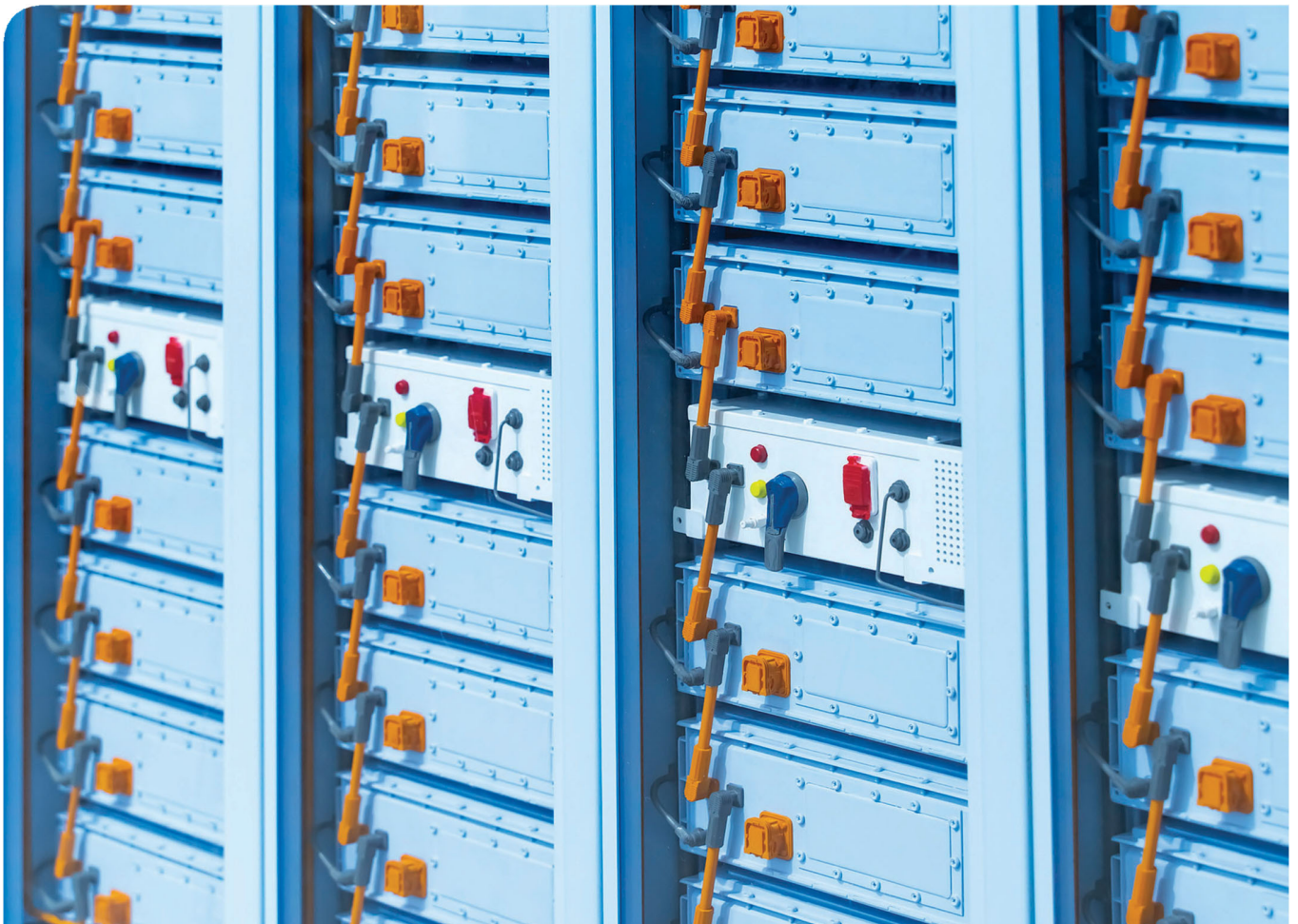
До них належать додаткові підтримуючі системи, такі як вентиляція,

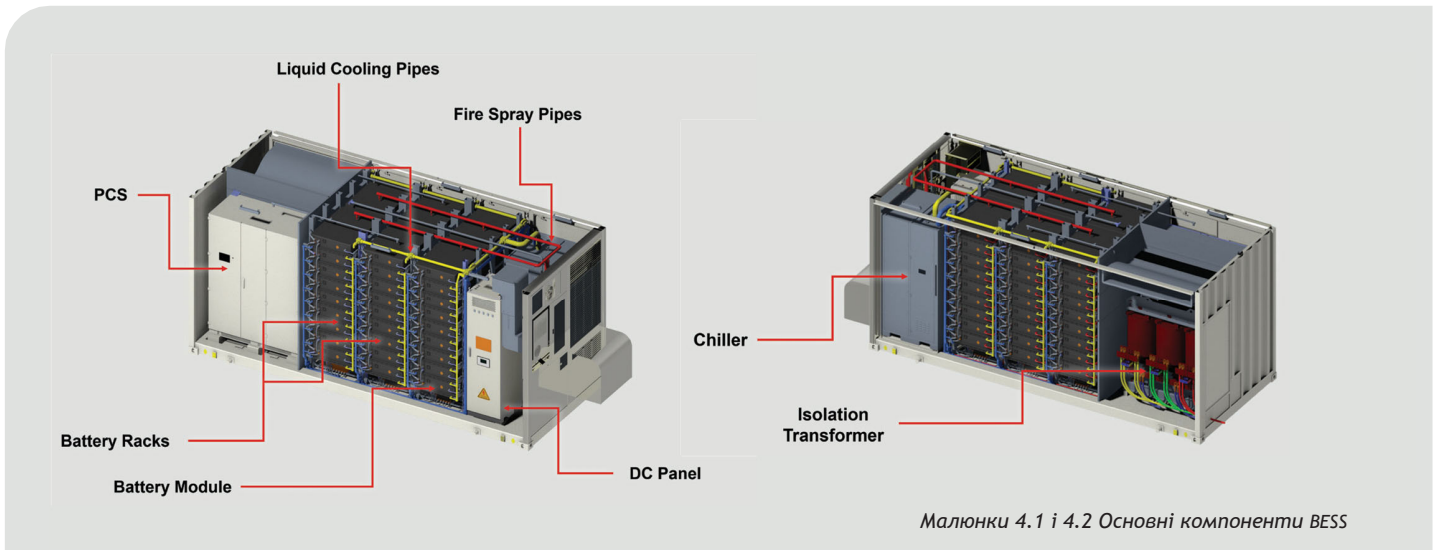
контроль вологості та резервні джерела живлення, щоб забезпечити надійну роботу BESS за будь-яких умов.

8. СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ BESS (BESS CONTROL SYSTEM):

Система управління BESS служить центральним вузлом, який інтегрує BESS з іншими частинами системи, такими як мережа, мікромережа або інші розподілені енергетичні ресурси. Консолідує інформацію від BMS PCS. Управління всім управлінням, моніторингом та комунікацією BESS здійснюється через цю централізовану систему контролю.

Кожен компонент відіграє важливу роль у забезпеченні ефективної, безпечної та надійної роботи BESS, що дозволяє їй надавати цінні послуги, такі як зберігання енергії для інтеграції відновлюваних джерел енергії, зниження пікового навантаження, балансування навантаження та резервне живлення.





Ключові особливості акумуляторних систем накопичення енергії:

Розуміння ключових характеристик BESS є необхідним для оптимізації їхньої роботи та забезпечення ефективної експлуатації. Ці характеристики визначають можливості та обмеження BESS, впливаючи на їхнє застосування та ефективність у різних сценаріях. Нижче наведені основні атрибути, які відіграють важливу роль у функціонуванні BESS:

- **Номінальна потужність:** це загальна можливість миттєвого розряду BESS в кВт або МВт, або максимальна швидкість розряду, яку BESS може досягти, починаючи з повністю зарядженого стану.
- **Енергетична ємність:** це максимальна кількість збереженої енергії, що зберігається або споживається в кВт·год або МВт·год.
- **Швидкість заряду/розряду (відомий як C-rate або тривалість зберігання):** C-rate вимірює швидкість, з якою акумулятор розряджається відносно своєї максимальної ємності. Він визначається як обернена величина часу (в годинах), необхідного для повного розряду акумулятора. Швидкість 1C вказує на те, що акумулятор буде повністю розряджений за одну годину. Наприклад, акумулятор з потужністю 1 МВт і енергетичною ємністю 2 МВт·год має тривалість розрядження дві години. Швидкість, з якою акумулятор заряджається або розряджається, значно впливає на його

продуктивність і термін служби. Швидке зарядження або розрядження може призвести до перегріву та зниження ефективності.

Примітка: Три раніше згадані характеристики будуть більш детально розглянуті далі в статті.

- **Рівень заряду (SoC):** Еквівалент індикатора заряду акумулятора. SoC показує поточний рівень заряду акумулятора або кількість енергії, доступної в акумуляторі на даний момент, у відсотках від його загальної ємності. Моніторинг SoC має важливе значення, щоб запобігти перезарядженню або глибокому розряду, який може пошкодити акумулятор. SoC не можна виміряти безпосередньо, його можна визначити за допомогою будь-якого з цих методів:
 - **Підрахунок Кулонів (Coulomb Counting):** Відстеження кількості заряду, який входить і виходить з акумулятора.
 - **Вимірювання Напруги:** Використання напруги акумулятора для оцінки стану заряду (SoC), часто в поєднанні з вимірюваннями температури та струму для точності.
 - **Оцінка на основі моделі:** Використання алгоритмів і моделей акумулятора для оцінки SoC на основі різних параметрів і історичних даних.

Точне вимірювання стану заряду (SoC) є критично важливим для ефективної та безпечної роботи BESS, забезпечуючи, що енергетичні накопичувачі надають оптимальну продуктивність та довговічність.

Стан здоров'я (SoH): вимірює залишкову потужність акумулятора протягом його життєвого циклу. Нові акумулятори мають SoH 100%, але цей показник зменшується з часом. Для акумуляторів електричних транспортних засобів (EV) SoH на рівні 70% або 80% вказує на кінець їхнього корисного терміну служби. Для стаціонарних систем SoH на рівні 60% або 70% вказує на кінець їхнього корисного терміну служби. Це є критичним фактором при розрахунку розміру BESS для планування навантаження та визначення його залишкової потужності після закінчення терміну служби. Кожен рік потужність BESS зменшується, тому важливо розуміти цю тенденцію для планування майбутнього навантаження. Часто системи BESS надмірно великі, щоб врахувати майбутні втрати потужності (деградація SoH).

SoH часто визначається через поточну загальну ємність та внутрішній опір. SoH є важливим параметром для оцінки продуктивності, ефективності та надійності акумуляторної системи з часом. SoH зазвичай виражається у відсотках, де 100% відповідає стану акумулятора, коли він був новим, а нижчі відсотки вказують на його деградацію.

Зниження ємності в BESS означає поступову втрату здатності батареї накопичувати та доставляти енергію з часом. Це явище виникає внаслідок різних факторів, серед яких:

- 1. Цикловий ресурс:** Кількість циклів заряджання та розряджання, через які пройшов акумулятор. Кожен цикл сприяє зношуванню матеріалів акумулятора, зменшуючи його загальну ємність з часом.
- 2. Глибина розряду (DoD):** Ступінь, до якого акумулятор розряджається відносно його загальної ємності. Вища DoD зазвичай прискорює деградацію. Питання DoD буде розглянуто в наступному розділі.
- 3. Температура:** Робоча температура значно впливає на стан акумулятора. Високі температури можуть прискорювати хімічні реакції, які руйнують матеріали акумулятора, тоді як низькі температури можуть знижувати ефективність акумулятора.
- 4. Швидкості заряджання/розряджання:** Швидкість, з якою акумулятор заряджається та розряджається. Високі швидкості можуть збільшувати внутрішній опір та тепло, що призводить до більш швидкої деградації.
- 5. Календарне старіння:** Природний процес старіння акумулятора з часом, незалежно від його використання. Це включає хімічні реакції всередині акумулятора, які відбуваються навіть коли він не використовується.

6. Управління напругою: Підтримка батареї в рекомендованому діапазоні напруги є важливою. Перезарядка або глибоке розряджання можуть спричинити значний стрес і зменшити термін служби батареї.

7. Внутрішній опір: У міру старіння батареї її внутрішній опір збільшується, що може призвести до зниження ефективності та збільшення виділення тепла під час роботи.

8. Якість виробництва: Відмінності у виробничих процесах можуть впливати на стабільність і надійність акумуляторів, впливаючи на їх початковий рівень SoH і довговічність.

9. Умови навколишнього середовища: Такі фактори, як вологість, вібрація та вплив корозійного середовища, також можуть впливати на здоров'я акумулятора.

10. Обслуговування та моделі використання: Регулярне технічне обслуговування та оптимальні схеми використання, включаючи уникнення екстремальних умов експлуатації, можуть допомогти зберегти SoH BESS.

Моніторинг SoH BESS має вирішальне значення для:

- **Превентивного технічного обслуговування:** передбачення та усунення потенційних збоїв до їх виникнення.
- **Оптимізації продуктивності:** забезпечення роботи акумуляторної системи на максимальній ефективності.
- **Безпеки:** запобігання небезпечним ситуаціям, таким як перегрів або тепловий розгін.
- **Управління витратами:** планування заміни та продовження терміну експлуатації акумулятора для оптимізації витрат.

SoH зазвичай моніториться за допомогою датчиків та діагностичного програмного забезпечення, інтегрованих у систему управління акумулятором (BMS), що забезпечує операторів системи даними та аналітикою в режимі реального часу.

- **Глибина розряду / Depth-of-Discharge (DoD):** це міра того, скільки енергії було використано батареєю по відношенню до її загальної ємності. Зазвичай вона виражається у відсотках, вказуючи на частку розрядженого акумулятора від загальної ємності. Наприклад, якщо BESS загальною ємністю 200 кВт-год розрядити до 50 кВт-год, то D3 буде розраховуватися як:

$$DoD = \left(\frac{50kWh}{200kWh} \right) \times 100 = 25\%$$

Це означає, що було використано 25% ємності акумулятора.

Ключові аспекти глибини розряду (DoD)

1. ЗВ'ЯЗОК З РІВНЕМ ЗАРЯДУ (SOC):

SoC (стан заряду): відображає залишок енергії в акумуляторі. Якщо батарея має 70% SoC, це означає, що 70% її ємності все ще доступна, а глибина розряду (DoD) становитиме 30%.

2. ВПЛИВ НА ТЕРМІН СЛУЖБИ АКУМУЛЯТОРА:

1. **Високий DoD:** Часта розрядка батареї до високого рівня DoD (наприклад, 80-100%) може прискорити знос і скоротити загальний термін служби батареї.
2. **Низький DoD:** Підтримка низького рівня DoD (наприклад, розрядка лише 20-30% ємності акумулятора) може продовжити термін служби батареї та з часом покращити її продуктивність.

Літій-залізо-фосфатні (LiFePO₄) акумулятори можуть розряджати до 100% глибини розряду, перевершуючи будь-яку іншу доступну технологію акумуляторів. Ця здатність дозволяє безпечно розряджати ці батареї до повної ємності. Однак для продовження терміну служби більшість виробників рекомендують витримувати глибину розряду в межах 80-95%. Навіть якщо іноді використовується повна 100% ємність, батарея не постраждає.

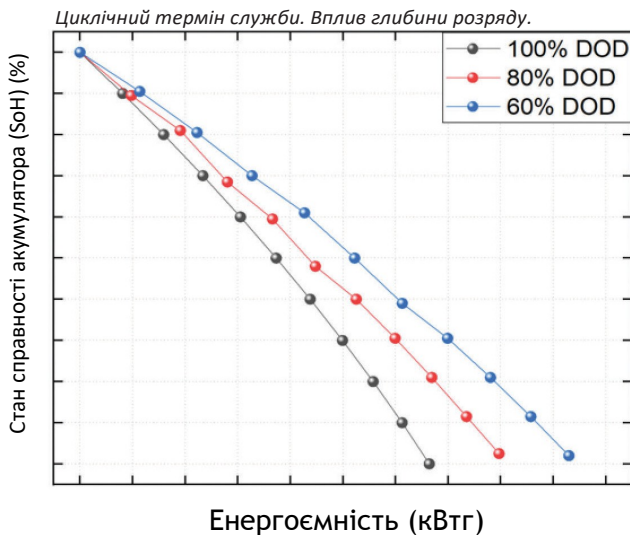
Свинцево-кислотні акумулятори мають найгірші показники DoD серед усіх типів батарей. Їх діапазон DoD становить 50-80% залежно від типу (наприклад, залиті чи глибокого циклу). Однак рекомендується уникати розряду нижче 50%, щоб запобігти прискореній деградації.

3. ОПТИМАЛЬНЕ ВИКОРИСТАННЯ:

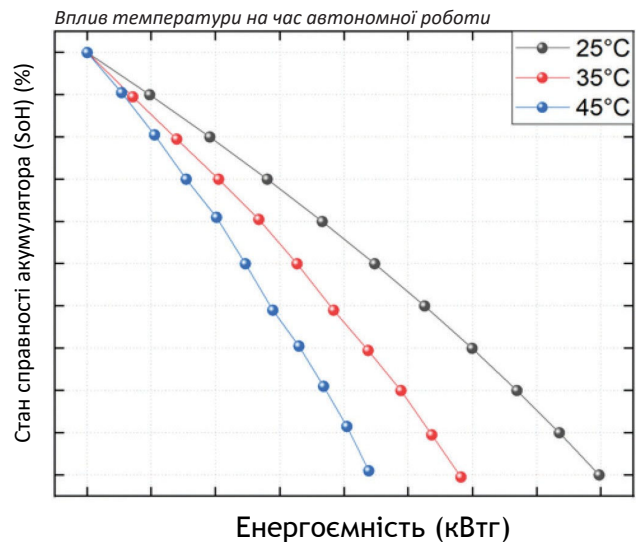
Балансування DoD: Щоб оптимізувати довговічність і продуктивність акумулятора, важливо балансувати рівень розряду. Це часто передбачає уникнення повного розрядження акумулятора та підтримку помірного рівня DoD під час регулярного використання.

4. ЗАСТОСУВАННЯ:

1. **Управління енергією:** Рівень розряду (DoD) є критичним параметром у системах управління енергією, допомагаючи ефективно планувати цикли заряджання та розряджання..
2. **Профілактичне обслуговування:** Моніторинг DoD допомагає прогнозувати потреби в обслуговуванні акумулятора та запобігати передчасному виходу з ладу. Моніторинг та управління рівнем розряду (DoD) є важливим для забезпечення ефективної та стабільної роботи систем зберігання енергії в акумуляторах. Правильне управління DoD може призвести до покращення продуктивності акумулятора, збільшення терміну його служби та кращої окупності інвестицій у системи зберігання енергії.
 - **Саморозряд:** Саморозряд у системах акумуляторного зберігання енергії (BESS) відбувається, коли енергія, що зберігається в акумуляторі, зменшується через внутрішні хімічні реакції, навіть коли акумулятор не використовується активно для мережі або споживача. Цей саморозряд, який вимірюється у відсотках втрати заряду за певний проміжок часу, знижує доступну енергію для розряду і є важливим фактором, який слід враховувати в акумуляторах, призначених для тривалого використання.
 - **Ефективність циклу заряду-розряду (RTE) (Round-Trip Efficiency):** RTE, виражений у відсотках, - це відношення енергії, що розряджається з акумулятора, до зарядженої в нього. Цей показник може відображати загальну ефективність системи акумуляторів DC-DC або AC-AC з урахуванням втрат на саморозряд та інших електричних неефективностей. У той час як виробники акумуляторів часто наголошують на ефективності DC-DC, комунальні служби зазвичай віддають перевагу ефективності AC-AC, оскільки вони зосереджуються на продуктивності батареї в точці підключення до системи живлення, яка працює від змінного струму. Вкрай важливо, щоб RTE включав всі компоненти системи BESS, такі як PCS, кабелі, розділові трансформатори та всі інші частини до точки підключення. ККД в обох напрямках повинен бути більше 85% в точці підключення, в залежності від умов, характерних для конкретного майданчика.
 - **Старіння акумулятора через цикли заряду-розряду:** Під циклічним старінням мається на увазі деградація, яка відбувається в акумуляторі, коли він проходить цикли заряду та розряду під час роботи. Цей процес з часом поступово знижує ємність і продуктивність акумулятора. На швидкість деградації впливають п'ять основних факторів (див. Рисунки 5.1 і 5.2):



Мал. 5.1. Термін служби: вплив глибини розряду



Мал. 5.2. Термін служби: вплив температури

Глибина розряду (DoD):

- **Вплив:** Більша глибина розряду означає, що акумулятор розряджається до нижчого рівня перед зарядкою, що може значно прискорити його деградацію.
- **Механізм:** Глибокі розряди спричиняють більше навантаження на матеріали акумулятора, що призводить до швидшого зносу та скорочення терміну служби.

Швидкість заряду та розряду (C-рейтинг):

- **Вплив:** Вищі C-рейтинги (швидка зарядка та розрядка) збільшують швидкість деградації.
- **Механізм:** Швидке заряджання або розряджання виділяє більше тепла та спричиняє механічні навантаження всередині елементів акумулятора, що призводить до швидшої деградації активних речовин та електроліту.

Температура:

- **Вплив:** Як високі, так і низькі температури можуть негативно вплинути на час автономної роботи.
- **Механізм:** Високі температури прискорюють хімічні реакції, які руйнують внутрішні компоненти акумулятора, тоді як низькі температури можуть збільшити внутрішній опір і уповільнити хімічні реакції, що призводить до зниження ефективності та потенційної шкоди.

Рівень заряду (SoC):

- **Вплив:** Експлуатація акумулятора при дуже високому або низькому рівні SoC може прискорити старіння батареї.
- **Механізм:** Утримання акумулятора повністю зарядженим або глибоко розрядженим протягом тривалого періоду часу збільшує навантаження на матеріали акумулятора, що призводить до втрати ємності та збільшення внутрішнього опору.

Частота циклів:

- **Вплив:** Чим частіше акумулятор проходить цикли заряду та розряду, тим швидше він деградує.
- **Механізм:** Кожен цикл заряду і розряду викликає фізичні та хімічні зміни в елементах акумулятора. Часті цикли призводять до накопичення цих змін, скорочуючи загальний термін служби акумулятора.

Розуміння BESS C-rate:

C-rate — це міра швидкості заряджання або розряджання батареї відносно її максимальної ємності. Наприклад, C-рейтинг 1C означає, що акумулятор буде повністю заряджено або розряджено за одну годину.

C-температура 0,5C означає, що для повної зарядки або розрядки знадобиться дві години, а C-коефіцієнт 2C означає лише півгодини. Формула така:

$T = \text{Time}$

$Cr = \text{C-Rate}$

$T = 1 / Cr$ (для перегляду в годинах), or $T = 60 \text{ Хв} / Cr$ (для перегляду в хвиликах). Наприклад: див. Малюнок -6 для прикладів кореляції C-rate до часу:

C-rate	Час
0.05c	20 годин
0.1 c	10 годин
0.2 c	5 годин
0.25c	4 годин
0.5c	2 годин
1C	1 година
2C	30 хвилин
5C	12 хвилин
10C	6 хвилин
20C	3 хвилин
120C	30 секунд

Малюнок-6 C-Rate та пов'язаний з ним час (заряд/розряд)

Акумулятори з низьким C-rate заряджаються довше, але можуть забезпечувати живлення протягом тривалого періоду. І навпаки, акумулятори з високим C-rate можуть швидко забезпечувати великий струм, що робить їх придатними для потужних короткочасних програм, таких як регулювання частоти мережі; однак вони не можуть підтримувати цю вихідну потужність так довго, як акумулятори з нижчим C-rate. Наприклад, при 5C-rate акумулятор забезпечує п'ятикратну номінальну потужність, але протягом 12 хвилин.

Існує два основних обмеження швидкості зарядки акумулятора:

- **Тепловий нагрів:** Надмірне виділення тепла може пошкодити акумулятор і скоротити термін його служби.
- **Обмеження масообміну:** Фізичний рух іонів усередині акумулятора може обмежити швидкість заряджання.

Моніторинг та керування C-rate має важливе значення для оптимізації продуктивності та довговічності акумулятора. Важливо зазначити, що хоча частоту C можна зменшити, вона не може перевищувати номінальну ємність акумулятора. Наприклад, якщо система має клас 1C, її можна заряджати або розряджати при нижчих значеннях C, таких як 0,5C або 0,25C, але вона не може працювати при більш високих значеннях C, таких як 2C або 3C.

Ефективне керування C-rate гарантує, що батарея працює в безпечних межах, запобігаючи пошкодженню та продовжуючи термін її служби.

C-RATE У ПЕРЕРАХУНКУ НА АМПЕР-ГОДИНУ (Ah):

C-Rate- може виражатися у вигляді функції заряду/розряду постійного струму від його ємності:

$\text{Струм (I)} = \text{CRate} \times \text{Ємність (Ah)}$

Наприклад, для акумулятора ємністю 100Ah:

1C ОЗНАЧАЄ:

- $100 \text{ Ah} * 1C = 100 \text{ A}$ доступний струм розряду
- $100 \text{ Ah} / 100 \text{ A} = \text{час розряду } 1 \text{ годин}$.
- **Батарея може працювати протягом 60 хвилин (1 година) при 100 амперах.**

2C ОЗНАЧАЄ:

- $100 \text{ Ah} * 2C = 200 \text{ A}$ доступний струм розряду
- $100 \text{ Ah} / 200 \text{ A} = \text{час розряду } 0,5 \text{ годин}$.
- **Акумулятор може працювати протягом 30 хвилин (0,5 години) при струмі навантаження 200 ампер.**

0.5C ОЗНАЧАЄ:

- $100 \text{ Ah} * 0.5C = 50 \text{ A}$ доступний струм розряду
- $100 \text{ Ah} / 50 \text{ A} = \text{час розряду } 2 \text{ годин}$.
- **Це означає, що батарея може працювати протягом 120 хвилин (2 годин) при струмі навантаження 50 ампер.**

5C ОЗНАЧАЄ:

- $100\text{ A h} * 5\text{C} = 500\text{A}$ доступний струм розряду
- $100\text{ A h} / 500\text{A} =$ час розряду 0,2 години
- Акумулятор може працювати протягом 12 хвилин (0,2 години) при струмі навантаження 500 А.

Резюме застосування C-rate в BESS:

- **Застосування в енергетиці:** Нижчі показники C (від 0,2C до 1C) зазвичай використовуються для стабільного та тривалого джерела живлення. Наприклад, зниження пікового навантаження та управління попитом,
- **Силкові застосування:** Більш високі C-rate (1C і вище) часто потрібні для швидких сплесків потужності. Наприклад, регулювання частоти.

Різниця між кВт і кВт·год

Розуміння різниці між кіловатами (кВт) і кіловат-годинами (кВт·год) має вирішальне значення для ефективного управління та оптимізації енергетичних систем, особливо в додатках BESS. Хоча ці одиниці пов'язані між собою, вони вимірюють різні аспекти потужності та енергії. Розуміння різниці необхідно для точної оцінки енергетичних

потреб, потужності системи, розмірів, сфер застосування та експлуатаційних витрат. Це також допомагає приймати обґрунтовані рішення щодо використання енергії, ефективності та сталого розвитку.

Кіловат (кВт) — це одиниця потужності, яка відображає швидкість споживання або генерації енергії. Вона вказує, як швидко використовується енергія в будь-який момент часу. Наприклад, система потужністю 10 кВт може миттєво забезпечити 10 кіловат потужності. По суті, кВт вимірює миттєву швидкість потоку енергії, показуючи, як швидко енергія може надходити або видаватися з акумуляторної системи.

Кіловат-година (кВт·год) — це одиниця енергії, яка відображає загальну кількість енергії, спожитої або згенерованої протягом певного часу. Вона вказує на сумарне використання або виробництво енергії. Наприклад, якщо система потужністю 10 кВт працює протягом однієї години, вона споживає або згенерує 10 кВт·год енергії. По суті, кВт·год вимірює загальний обсяг енергії, який може бути накопичений або переданий за певний проміжок часу, показуючи, скільки енергії здатна зберігати або видавати батарейна система.

Резюме:

- **кВт (Кіловат):** Вимірює миттєву швидкість потоку потужності. Це значення може змінюватися до максимального номіналу.
- **кВт·год (Кіловат-година):** Вимірює загальну кількість енергії за певний час. Це значення є фіксованим.



Малюнок 7. Аналогія кВт і кВт * год.

Пояснення аналогії

ПОТРЕБА (ВИТРАТА - кВт):

- Зліва кран тече зі швидкістю 1 галон на хвилину (gpm). Це пристрій з меншою потужністю, наприклад 1 кВт.
- Праворуч кран тече зі швидкістю 5 галонів на хвилину. Являє собою пристрій з більшою потужністю, наприклад 5 кВт.

СПОЖИВАННЯ (ЗАГАЛЬНИЙ ОБСЯГ – кВт·год):

- Обидва відра заповнюються однаковою кількістю води. Це і є загальна кількість спожитої енергії.

КЛЮЧОВІ ТЕЗИ:

- **Ліва сторона (1 галон на хвилину):** Незважаючи на те, що потік води (потреба) низький (1 галон на хвилину або 1 кВт), з часом він заповнить відро. Якщо цей кран працює 60 хвилин, він споживатиме 60 галонів, що еквівалентно 1 кВт під час роботи протягом 60 хвилин, що дорівнює 1 кВт/год.

Права сторона (5 галонів на хвилину): потік води (потреба) високий (5 галонів на хвилину або 5 кВт), але він працює коротший час. Якщо цей змішувач працює 12 хвилин, він також споживатиме 60 галонів, що еквівалентно 5 кВт під час роботи протягом 12 хвилин, що дорівнює 1 кВт·год.

Співвідношення потужності до енергії

Батарейні системи проектуються для максимізації або потужності, або енергетичної ємності в залежності від їх призначення. Співвідношення потужності до енергії батарейної системи дає краще розуміння її призначення та можливостей.

Для регулювання частоти, де батарея повинна заряджатися і розряджатися кілька разів за короткі проміжки часу, система проектується з більшою потужністю.

Натомість для таких застосувань, як зміщення пікових навантажень або надання резервного живлення під час відключень мережі, батарея повинна розряджатися протягом більш тривалого часу (наприклад, 2-5 годин), тому система проектується з більшою енергетичною ємністю.

Резюме:

Системи зберігання енергії на базі батарей (BESS) є важливою частиною сучасного енергетичного управління, вирішуючи проблему непостійності відновлювальних джерел енергії та підвищуючи стабільність енергетичних мереж.

Ця стаття надає детальний огляд BESS, підкреслюючи їх переваги, застосування та ключові параметри, необхідні для оптимальної роботи. Обговорення охоплювало технічні аспекти, такі як важливість С-ставки та відмінність між кВт і кВт·год, акцентуючи їх роль у роботі батарей та визначенні їх потужності.

BESS пропонують численні переваги, зокрема стабілізацію енергетичних мереж, енергетичний арбітраж, інтеграцію відновлювальних джерел енергії, резервне живлення, зниження пікових навантажень та регулювання частоти. Ці переваги демонструють важливу роль BESS у ефективному та сталому управлінні енергією. Їх застосування охоплює житлові, комерційні, промислові, масштабні енергетичні системи, мікромережі та автономні енергетичні рішення, що значно сприяють енергоефективності та стійкості.

Ключові компоненти BESS, такі як батарейні осередки/модулі, системи управління батареями (BMS), системи перетворення потужності (PCS), термічне управління, системи безпеки, корпуси, допоміжні системи та управління BESS, разом забезпечують ефективну, безпечну та надійну роботу цих систем зберігання енергії. Розуміння характеристик BESS, таких як номінальна потужність, ємність, ставка зарядки/розрядки, стан заряду (SoC), стан здоров'я (SoH), глибина розряду (DoD), саморозряд, ефективність циклу та старіння циклів, є критично важливим для оптимізації їх роботи та довговічності.

З посиленням глобального переходу до відновлювальної енергетики необхідність у надійних рішеннях для зберігання енергії, таких як BESS, стає дедалі важливішою. Вони не лише підвищують ефективність і надійність енергетичних мереж, але й підтримують ширшу мету переходу до сталого енергетичного майбутнього..

Про автора



Hassan Obeid

Нові рішення у сфері енергетики

Хассан Обейд є глобальним керівником відділу технічних продажів - нових енергетичних рішень у Cummins Inc., що спеціалізується на технічному баченні, бізнес-стратегії та вирішенні широкого спектру складних проблем. Хассан працює в Cummins з 2007 року на різних посадах, включаючи глобальний технічний консалтинг, енергетику, проектування та прикладну інженерію. Він розробив енергетичні системи, включаючи розподільні пристрої, керування, паралельне регулювання, водневі паливні елементи BESS, PEM, перемикачі трансмісії, генераторні установки, DER, мікромережі та цифрові рішення.

Крім того, Хассан розробив і провів майстер-класи з енергетики на кілька тем і продуктів, включаючи BESS, водневі паливні елементи PEM, паралельне регулювання, заземлення, системи електропостачання та управління. Він отримав ступінь бакалавра в галузі комп'ютерних наук і ступінь магістра в галузі електротехніки в Університеті Міннесоти, Манкато.



Cummins Inc.
Box 3005
Columbus, IN 47202-3005
U.S.A.

cummins.com

Bulletin 6582294 Produced in U.S.A. Rev. 11/24
©2024 Cummins Inc.