

Особливості побудови систем живлення і навантажень високої потужності

Переклад: Вадим Потапенко

Редагування: Віктор Бутирін, директор, Юнітест

E-mail: Victor_Butyrin@unitest.com

Супутники, гібридні електромобілі (ГЕМ), джерела безперебійного живлення (ДБЖ), альтернативні джерела енергії та низка інших сучасних систем електропостачання ґрунтуються на системах і пристроях двоспрямованого перетворення та рекуперації енергії. Багато з цих систем і пристроїв двоспрямованого перетворення енергії працюють, використовуючи рівні потужності, що вимірюються кількома кіловатами. Відповідно, під час розробки та виробництва цих систем потрібно забезпечити можливість подавати та споживати рівні потужності в діапазоні від кіловата та вище, що часто є складним завданням для фахівців із тестування.

ВСТУП

Супутники, гібридні електромобілі (ГЕМ, *Hybrid Electric Vehicles (HEVs)*), джерела безперебійного живлення (ДБЖ), альтернативні джерела енергії та низка інших сучасних систем електропостачання постачають електроенергію, коли це доцільно. Вони засновані на системах і пристроях двоспрямованого перетворення і рекуперації енергії, призначених для її накопичення, з метою забезпечення безперебійної подачі електроенергії на вимогу. Прикладами таких систем і пристроїв є:

- акумуляторні батареї;
- суперконденсатори
- генераторні установки
- двоспрямовані перетворювачі постійного струму
- системи керування акумуляторними батареями (Battery management systems, BMS)
- рекуперативні гальмівні системи

Багато з цих систем і пристроїв працюють, використовуючи багатокіловатні рівні потужності. Під час розробки та виробництва таких систем потрібно забезпечити можливість подавати та споживати рівні потужності в діапазоні від кіловата та вище, що часто є надзви-

чайно складним завданням для фахівців із тестування.

Зазвичай для подачі та споживання потужності використовуються вже наявні окремі прилади. Але цей підхід має недоліки, які можуть бути подолані тільки за наявності функцій подачі та споживання потужності, які повністю інтегровані в одному приладі або системі.

ПОРІВНЯННЯ ДВОКВАДРАНТНОГО І ЧОТИРЬОХКВАДРАНТНОГО РЕЖИМІВ РОБОТИ

Фахівці з тестування іноді неправильно розуміють, що їм необхідно для подачі та споживання потужності при тестуванні систем і пристроїв двоспрямованого перетворення та рекуперації енергії. Двоспрямовані джерела живлення часто представляють як біполярні, припускаючи, що для тестування потрібне біполярне джерело живлення. Насправді, це дві різні речі. Уніполярне двоспрямоване джерело живлення — це джерело, яке працює у квадрантах I та II чотирьохквадрантної вольт-амперної характеристики (струм-напруга), як показано на рисунку 1. Воно може видавати та спо-

живати струм, але тільки за позитивної напруги. Воно працює і як джерело постійного струму, і як електронне навантаження, тобто є двоквадрантним джерелом постійного струму.

На відміну від нього, біполярне джерело живлення може здійснювати перехід через нульове значення напруги та працювати з позитивною або негативною напругою. Воно може видавати потужність у квадрантах I і III та споживати потужність у квадрантах II і IV.

Оскільки системи та пристрої для двоспрямованого перетворення та рекуперації енергії видають і споживають струм та мають однополярну напругу, для їхнього тестування майже завжди можна використовувати уніполярне двоквадрантне джерело живлення, а іноді навіть бажано використовувати його.

Важливо зазначити, що двоквадрантне джерело живлення постійного струму має повністю керований безперервний режим роботи під час його використання як електронного навантаження у квадранті II. Однак його здатності швидкого зниження напруги за рахунок споживання струму (down-programming) недостатньо для належного тестування систем і пристроїв для двонаправленого перетворення енергії.

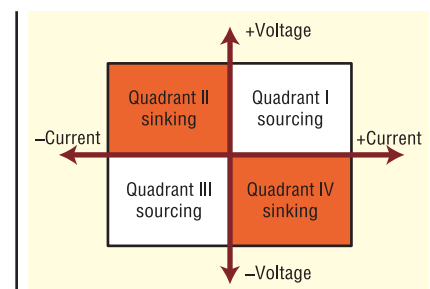


Рис. 1. Чотири квадранти вольт-амперної характеристики

СИСТЕМА ПОДАЧІ/СПОЖИВАННЯ ПОТУЖНОСТІ ІЗ ЗОНОЮ НЕЧУТЛИВОСТІ ЗА НАПРУГОЮ НА БАЗІ ОКРЕМОГО ДЖЕРЕЛА ЖИВЛЕННЯ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ТА ЕЛЕКТРОННОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Вибір відповідних двоквADRантних джерел живлення постійного струму, що працюють за багатокіловатних рівнів потужності, дуже обмежений. Інженери часто вдаються до використання окремих джерел живлення постійного струму та електронних навантажень, щоб забезпечити комбіноване технічне рішення подачі та споживання потужності, необхідне для тестування своїх систем і пристроїв двоспрямованого перетворення та рекуперації енергії.

Працюючи незалежно одне від одного, джерело живлення постійного струму та електронне навантаження добре підходять для подачі та споживання потужності, забезпечуючи водночас хорошу точність у режимі постійного струму, стабільність характеристик і швидкі динамічні характеристики, незалежно від тестованого пристрою (ТП). Для такої роботи це необхідно, оскільки ТП, що розглядаються, є активними та динамічними, поперемінно споживаючи або віддаючи потужність, залежно від їхнього стану та робочих умов.

Одну зі структурних схем установки, яка спільно використовує джерело живлення постійного струму та електронне навантаження для подачі/споживання потужності, показано на рисунку 2. Вона часто використовується як система імітації батарей (*Battery Simulator System, BSS*).

Система імітації батарей є переважно пристроєм, керованим напругою; і джерело живлення постійного струму, і електронне навантаження, як правило, працюють у режимі стабілізації напруги (*constant voltage, CV*). Їхні напруги зміщені для створення зони нечутливості за напругою, щоб робота цих пристроїв не перекривалася. Величина напруги електронного навантаження встановлюється дещо більшою, ніж напруга джерела живлення постійного струму. Найчастіше система імітації батарей використовується для тестування систем керування акумуляторними батареями але цю установку можна застосувати і для багатьох інших ТП, які мають бути протестовані з використанням уніполярного двоквADRантного джерела живлення постійного струму. Коли ТП живиться або споживає потужність, напруга підтримується джерелом живлення постійного струму. Коли ТП

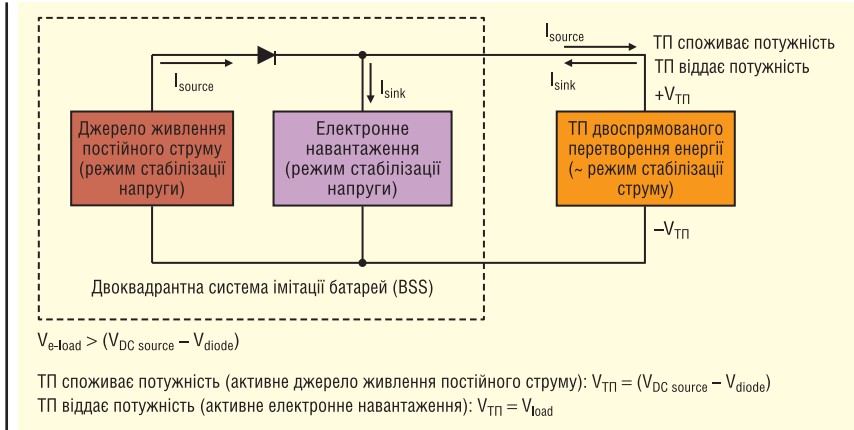


Рис. 2. Структурна схема системи імітації батарей, яка спільно використовує джерело живлення постійного струму та електронне навантаження

генерує або віддає потужність, напруга зростає, джерело живлення постійного струму відключається, і електронне навантаження починає активно працювати в режимі стабілізації напруги, фіксуючи напругу на дещо вищому рівні. Для ізоляції та запобігання протіканню зворотного струму в джерело живлення постійного струму, коли ТП буде активно віддавати потужність, на виході джерела живлення постійного струму часто потрібно встановити блокувальний діод. У цій конфігурації струм, що видається, потім зчитується безпосередньо з джерела живлення постійного струму, а струм, що споживається, — з електронного навантаження. Під час використання такого підходу існує кілька обставин, які призводять до погіршення робочих характеристик системи:

- Джерело живлення постійного струму має використовувати локальне вимірювання напруги на вихідних клеммах, оскільки блокувальний діод

дестабілізуватиме його роботу, якщо використовувати дистанційне вимірювання напруги на діоді.

- Зона нечутливості за напругою між подачею і споживанням потужності є високоімпедансною.
- Потрібно посилати команди для програмування рівнів напруги як до джерела живлення постійного струму, так і до електронного навантаження, для того, щоб вони були узгоджені, оскільки рівень напруги системи імітації батарей змінюється.
- Загалом для координації активності джерела живлення постійного струму та електронного навантаження під час тестування потрібен набагато вищий рівень складності системи.
- Електронне навантаження має перемикатися між вимкненим станом і активним режимом стабілізації напруги (CV), що погіршує його динамічні характеристики.

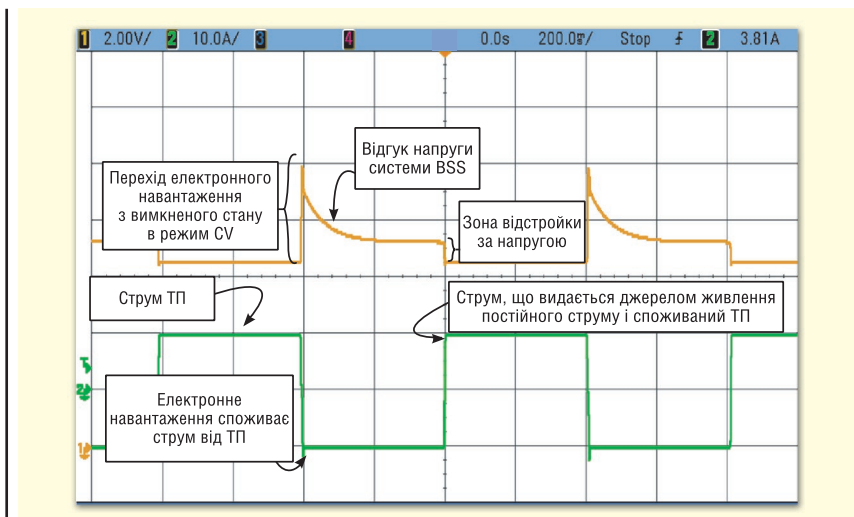


Рис. 3. Процеси перемикання між подачею/споживанням потужності в системі на базі окремого джерела живлення постійного струму та електронного навантаження із зоною відстройки за напругою

• Падіння напруги на блокувальному діоді є змінною величиною, що залежить від рівнів сили струму та температури, що призводить до необхідності використовувати суттєву величину зони нечутливості за напругою між рівнями напруги джерела живлення постійного струму та електронного навантаження, що обчислюється кількома сотнями мілівольт.

Зокрема, два останні пункти обмежують гнучкість, точність і загальну продуктивність цієї конфігурації з двоквADRANTНИМ джерелом живлення для роботи в статичному режимі. З метою коригування напруги зони нечутливості за напругою під час роботи в статичному режимі напругу системи імітації батарей можна програмно підіймати або опускати за потреби до досить близького рівня напруги. Однак, ступінь напруги зони нечутливості за напругою є невіддільною властивістю динамічних перемикань, яка ще більше посилюється швидким переходом електронного навантаження в режим стабілізації напруги, як показано на рисунку 3.

СИСТЕМА ПОДАЧІ/СПОЖИВАННЯ ПОТУЖНОСТІ З ПЕРЕКРИТТЯМ НА БАЗІ ОКРЕМОГО ДЖЕРЕЛА ЖИВЛЕННЯ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ТА ЕЛЕКТРОННОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Для усунення багатьох проблем, пов'язаних із тим, що робота джерела живлення постійного струму та електронного навантаження не перекриваються, як було описано раніше, можна використовувати режим роботи з повним перекриттям. У цьому разі джерело живлення постійного струму та електронне навантаження конфігуруються для роботи з повним перекриттям, як показано на рисунку 4. Тепер електронне навантаження працює не в режимі стабілізації напруги, а в режимі стабілізації струму (*constant current, CC*). Для встановлення сили струму електронного навантаження використовується величина, що перевищує максимальне значення, яке, як очікується, видаватиме ТП. Таким чином, електронне навантаження завжди залишається в режимі стабілізації струму, підтримуючи фіксований рівень сили струму і потужності. Електронне навантаження більше не зазнає впливу будь-яких проблем, пов'язаних із переходами в інший режим роботи. Джерело живлення постійного струму завжди залишається в режимі стабілізації напруги

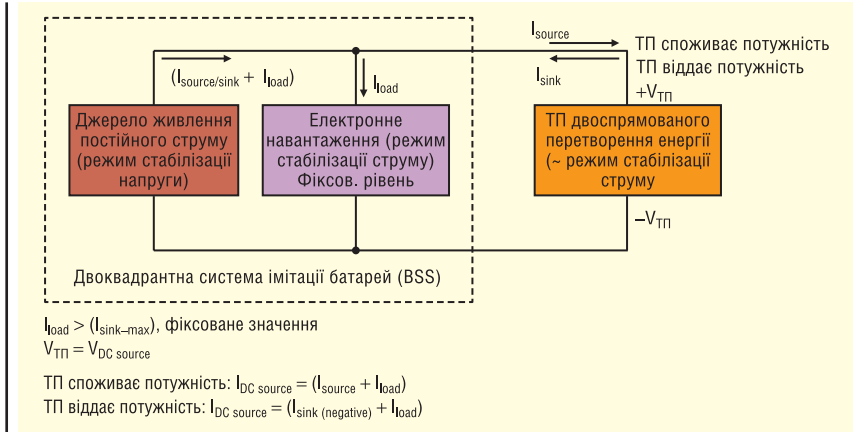


Рис. 4. Структурна схема системи імітації батарей (BSS), у якій джерело живлення постійного струму та електронне навантаження працюють із перекриттям

і завжди видає струм. Тому блокувальний діод більше не потрібен. У результаті ця конфігурація системи BSS завжди працює в режимі стабілізації напруги в усьому діапазоні подачі та споживання потужності, звільнена від переходів електронного навантаження з одного режиму роботи в інший і перехідних процесів напруги зони нечутливості за напругою, які впливають на роботу системи BSS з конфігурацією без перекриття. У результаті в цьому випадку можна відзначити низку недоліків.

Джерело постійного струму має бути значно потужнішим, щоб забезпечити максимальні значення сили струму та потужності, які вимагає ТП, плюс повну величину сили струму, яку безперервно споживає електронне навантаження. Наприклад, для забезпечення 100%-го споживання струму джерело живлення постійного струму має бути вдвічі потужнішим. Електронне навантаження постійно розсіює повну потужність, яка є значною величиною для великої системи.

Під час вимірювань потрібно зчитувати значення сили струму джерела напруги постійного струму та електронного навантаження і визначити різницю між ними, часто щоб із двох великих значень отримати одне мале значення. У результаті страждає точність вимірювань.

Інтегровані технічні рішення для подачі/споживання потужності

Недоліки конфігурування технічних рішень на базі окремого джерела живлення постійного струму та електронного навантаження усуваються, коли функції подачі та споживання потужності інтегровані в одному вимірювальному приладі.

Якщо ці функції інтегровані, вони працюють під керуванням системи зі зворотним зв'язком, щоб забезпечити безперервний, вільний від перехідних процесів, перехід між подачею і споживанням струму і потужності. У цьому випадку немає потреби постійно розсіювати велику величину потужності, щоб досягти цього. Точність вимірювань на постійному струмі та динамічні характеристики є тепер оптимізованими, а не отриманими в результаті компромісів. Технічні характеристики вимірювань значно покращуються за наявності єдиної системи вимірювань для всіх джерел струму.

Основна проблема полягала у відсутності доступних вимірювальних приладів, які б належним чином задовольняли потреби тестування сучасних систем і пристроїв двоспрямованого перетворення та рекуперації енергії. В результаті інженери не мали вибору, і вони змушені були використовувати системи на базі окремих джерел живлення постійного струму та електронних навантажень.

Джерела живлення постійного струму серій N6900/N7900 сімейства APS компанії Keysight з інтегрованими функціями подачі та споживання потужності

Джерела живлення постійного струму серій N6900A/N7900A сімейства APS (Advanced Power System — продуктивна система живлення), зображені на рисунку 5, розроблені для тестування сучасних систем і пристроїв двоспрямованого перетворення та рекуперації енергії (табл. 1). Їхніми відмінними властивостями є:



Джерело живлення з вихідною потужністю 2 кВт у корпусі висотою 2U



Модуль розсіювання потужності, призначений для використання з джерелом живлення з вихідною потужністю 1 кВт, у корпусі висотою 1U



Джерело живлення з вихідною потужністю 1 кВт у корпусі висотою 1U

Рис. 5. Сімейство APS джерел живлення постійного струму компанії Keysight

- Енергоємні моделі потужністю 1 кВт у корпусі висотою 1U і потужністю 2 кВт у корпусі 2U забезпечують високу потужність у мінімальних габаритних розмірах.
- Вбудована можливість споживання струму в діапазоні до 10% від номінальних вихідних значень. Можливість простого збільшення споживання струму в діапазоні до 100% від номінальних вихідних значень за допомогою опціонального модуля розсіювання потужності N7909A.
- Можливість широкого вибору вихідних напруг враховує різноманітність сучасних ТП і застосувань.
- Режим роботи з пріоритетом напруги або струму дають більшу гнучкість при тестуванні процесів подачі та споживання потужності, незалежно від типу ТП.
- Двоквадрантна вимірювальна система для точних вимірювань напруги, сили струму, рівня потужності, заряду та енергії.
- Розширені можливості подачі потужності та вимірювань динамічних джерел живлення постійного струму серії N7900 сімейства APS можна використовувати для створення динамічних вихідних подій, проведення вимірювань перехідних процесів, безперервної реєстрації напруги, сили струму, рівня потужності та багато чого іншого.
- Розширені можливості маршрутизації сигналів запуску з конфігурованою логікою для створення спеціалізованих функцій керування, запуску та захисту, корисних для спрощення вирішення особливо складних завдань тестування.

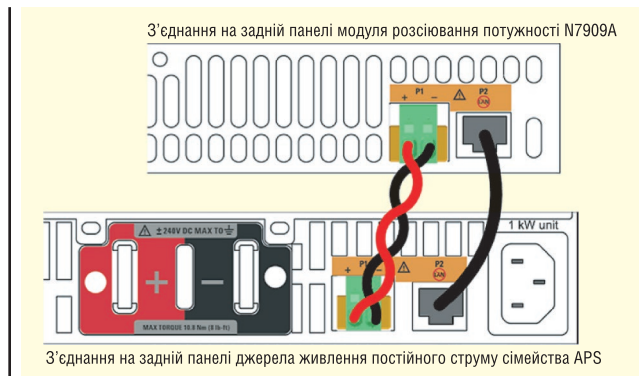
Таблиця 1. Моделі джерел живлення постійного струму серій N6900/N7900 сімейства APS компанії Keysight

	Джерела живлення постійного струму серії N6900A сімейства APS		Динамічні джерела живлення постійного струму серії N7900A сімейства APS	
	1 000 Вт	2 000 Вт	1 000 Вт	2 000 Вт
9 В	100 А	200 А	100 А	200 А
20 В	50 А	100 А	50 А	100 А
40 В	25 А	50 А	25 А	50 А
60 В	17 А	33 А	17 А	33 А
80 В	12.5 А	25 А	12.5 А	25 А

- Унікальна модульна архітектура, що забезпечує просте масштабування інтегрованих систем подачі/споживання потужності в діапазоні до 10 кВт, призначених для тестування пристроїв з великою потужністю.

ІНТЕГРОВАНІ ФУНКЦІЇ ПОДАЧІ ТА СПОЖИВАННЯ ПОТУЖНОСТІ ДЖЕРЕЛ ЖИВЛЕННЯ СІМЕЙСТВА APS, ЩО ЗАБЕЗПЕЧУЮТЬ БЕЗПЕРЕРВНІСТЬ ХАРАКТЕРИСТИК

При використанні окремих джерел живлення постійного струму та електронних навантажень користувач не має доступу до вбудованих можливостей споживання потужності. Джерела живлення сімейства APS мають інтегровану функцію споживання потужності в діапазоні до 10% від номінальних вихідних значень. Без зусиль можна наростити її для використання в діапазоні до 100% від номінальних вихідних значень за допомогою простого додавання одного або двох модулів розсіювання потужності N7909A, залежно від номінальних

**Рис. 6. Створення повністю інтегрованого технічного рішення, що використовує джерело живлення постійного струму серії APS і модуль розсіювання потужності N7909A**

КОНТРОЛЬНО-ВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИБАДИ

АВТОРИЗОВАНИЙ ДИСТРИБ'ЮТОР В УКРАЇНІ
продаж • навчання • сервіс

ТОВ "ЮНІТЕСТ"
вул. Олесь Гончара, 6
04053, м. Київ, Україна
тел: +38 (044) 272-60-94
тел./факс: +38 (044) 272-60-95
e-mail: web@unitest.com
http://www.unitest.com



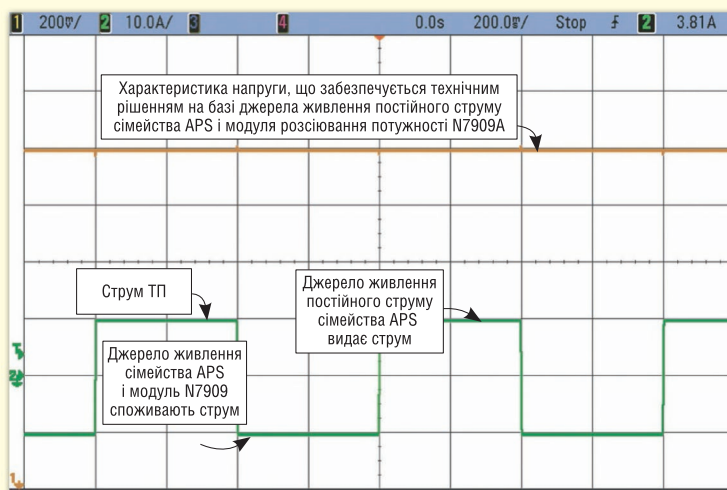


Рис. 7. Безперервна характеристика напруги під час переходів між подачею і споживанням потужності, що забезпечується технічним рішенням на базі джерела живлення постійного струму сімейства APS і модуля розсіювання потужності N7909A

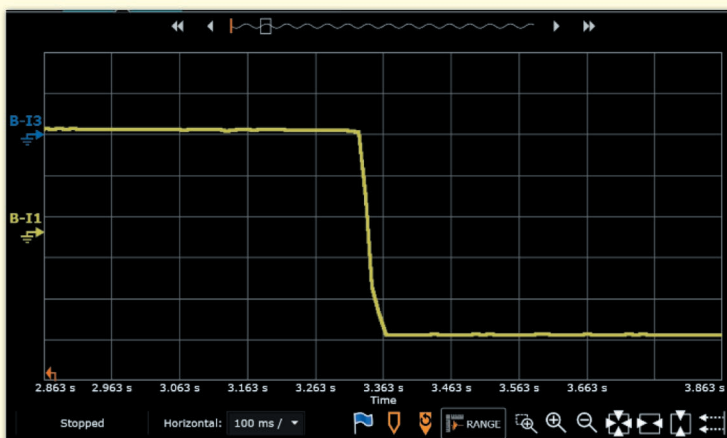


Рис. 8. Реакція джерела-споживача серії RP7900

значень параметрів потужності джерел живлення сімейства APS (1 або 2 кВт). Усе, що потрібно, це під'єднати кабель живлення і кабель керування між цими двома пристроями для створення повністю інтегрованого рішення, як показано на рисунку 6. Як можна побачити на рисунку 7, навіть під час вимірювання з роздільною здатністю за напругою в 100 разів вище джерело живлення постійного струму сімейства APS і модуль розсіювання потужності N7909A забезпечують безперервність і стабільність характеристик напруги під час переходів між подачею і споживанням потужності. Водночас умови тестування використовувалися ті самі, що й для системи імітації батарей на базі окремого джерела живлення постійного струму та електронного навантаження (рис. 2 і 3).

Що стосується серії RP7900, то вона безпосередньо поглинає до 100% но-

мінального струму протягом невизначеного часу безперервно без модуля розсіювання потужності. RP7900 також може забезпечити безперебійний перехід від джерела до споживача, як показано на рисунку 8.

ПОКРАЩЕНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВИМІРЮВАНЬ ДЖЕРЕЛ ЖИВЛЕННЯ СІМЕЙСТВА APS

Проведення точних вимірювань напруги, сили струму, потужності, заряду та енергії є необхідним складником тестування сучасних систем і пристроїв двоспрямованого перетворення та рекуперації енергії. Ці вимірювання є складними та важкими для реалізації в разі використання як бази технічного рішення для тестування характеристик подачі/споживання потужності окремих

джерел живлення постійного струму та електронних навантажень. Як мінімум, окремі значення сили струму, що зчитуються з джерела живлення постійного струму та електронного навантаження, повинні регулюватися і порівнюватися. Цілком ймовірно, джерело живлення постійного струму та електронне навантаження не матимуть достатніх можливостей для вимірювання величини накопиченого заряду та енергії, вимагаючи додавання зовнішніх пристроїв для реєстрації та вимірювань, що супроводжується відповідним ускладненням і проблемами.

Двоквадрантна інтегрована вимірювальна система джерел живлення постійного струму сімейства APS повністю доповнює їхні інтегровані функції подачі та споживання енергії. Проведення точних вимірювань напруги, сили струму, потужності, заряду та енергії спрощується під час використання джерел живлення постійного струму сімейства APS. Як приклад, рисунки 9 і 10 відображають процеси подачі сили струму, напруги та енергії з подальшим накопиченням енергії в суперконденсаторі. Джерело живлення постійного струму сімейства APS і модуль розсіювання потужності N7909A використовуються для заряду і розряду суперконденсатора з одночасним вимірюванням напруги, сили струму та енергії.

КОРОТКІ ВИСНОВКИ

Супутники, гібридні електромобілі, джерела безперебійного живлення, альтернативні джерела енергії та низка інших сучасних систем електропостачання ґрунтуються на системах і пристроях двоспрямованого перетворення та рекуперації енергії. Багато з цих систем і пристроїв двоспрямованого перетворення енергії працюють, використовуючи рівні потужності, що вимірюються кількома кіловатами. Відповідно, під час розробки та виробництва цих систем потрібно забезпечити можливість подавати та споживати рівні потужності в діапазоні від кіловата та вище, що часто є складним завданням для фахівців із тестування.

Найзагальніший підхід полягає у використанні окремого джерела живлення постійного струму та електронного навантаження для подачі та споживання потужності. Однак, на практиці це призводить до низки проблем і компромісів, оскільки процеси подачі та споживання потужності є незалежними. Тільки коли ці процеси повністю інтегровані в одній

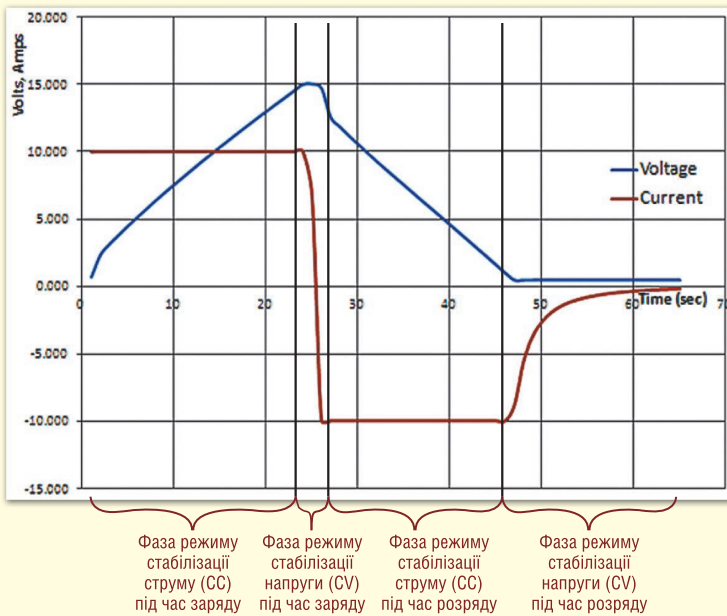


Рис. 9. Графіки напруги та струму під час заряду і розряду суперконденсатора

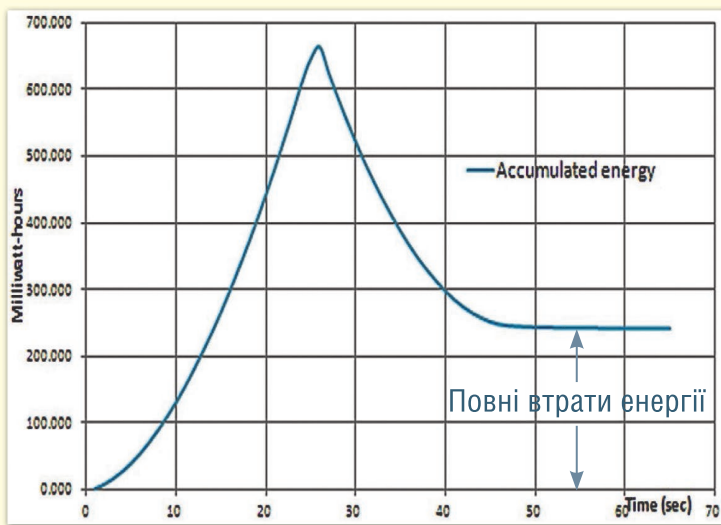


Рис. 10. Процес накопичення і витрати енергії суперконденсатором

системі, можна забезпечити оптимальні та безперервні характеристики. Джерела живлення постійного струму серій N6900A/N7900A сімейства APS мають інтегровані функції подачі та споживання потужності, розроблені для тестування сучасних систем і пристроїв двоспрямованого перетворення та рекуперації енергії. Унаслідок цього джерела живлення постійного струму серій N6900A/N7900A сімейства APS долають усі проблеми створення технічного рішення подавання/споживання високих рівнів потужності, забезпечуючи оптимальні характеристики, які можна отримати тільки за допомогою інтегрованого рішення, звільняючи ресурси тестування

для роботи над іншими проблемами, які потрібно розв'язати.

Щоб дізнатися більше про джерела живлення постійного струму серій N6900/N7900 сімейства APS та отримати додаткову детальну інформацію щодо продукції компанії Keysight Technologies, звертайтеся до її офіційного дистриб'ютора в Україні — компанії Юнітест:

**04053, м. Київ,
вул. Олесь Гончара, 6,
тел.: +38 (044) 272-60-94,
e-mail: web@unitest.com,
www.unitest.com**

ПРОБНИКИ ІЗ ГАЛЬВАНІЧНОЮ РОЗВ'ЯЗКОЮ

Компанія **Keysight Technologies** розробила сімейство оптично ізолюваних диференціальних пробників, призначених для підвищення ефективності та продуктивності тестування пристроїв, що швидко перемикаються, як-от напівпровідникові прилади з широкою забороненою енергетичною зоною GaN і SiC. Нові пробники напруги будуть представлені на конференції Applied Power Electronics Conference (APEC) 2025 на стенді компанії Keysight (#829) разом з осцилографами Keysight серій MXR B і HD3.

Для перевірки незаземлених напівмостових і повномостових схем, які широко використовують у пристроях перетворення електроенергії, електроприводах та інверторах, потрібно вимірювання слабких диференціальних сигналів за високих синфазних напруг. Ці вимірювання можуть бути складними через коливання напруги джерела відносно землі, шумові перешкоди та міркування безпеки. Ізолювані диференціальні пробники мають гальванічну розв'язку і подають синфазні напруги, що дає змогу інженерам із силової електроніки точно та безпечно вимірювати незаземлені ланцюги в умовах високої напруги та перешкод. Ця технологія сприятиме прогресу в тестуванні ефективності та комутаційних втрат у високовольтних системах.

Ізолювані диференціальні пробники Keysight забезпечують у 10 млрд разів більше подавлення синфазного сигналу, ніж стандартні диференціальні пробники, що робить їх ідеальними для вимірювань за високої напруги. Завдяки смузі пропускання до 1 ПГц і діапазону диференціальної напруги ± 2500 В ці пробники дають змогу проводити точний аналіз пристроїв GaN і SiC зі швидкою комутацією.

Компанія Keysight розуміє, що майбутнє силових інтегральних схем виходить за межі закону Мура і прагне надати своїм замовникам найкращі технології тестування силових пристроїв, щоб вони могли впевнено реалізувати свої інноваційні проекти. Нові пробники з оптичною розв'язкою доповнюють широкий набір рішень у галузі електроживлення, які дають змогу оптимізувати процеси тестування цілісності електроживлення, подачі електроенергії та ефективності.

www.keysight.com

CN