



Ricerca di Sistema elettrico

Procedura di prova RSE-ENEA per supercondensatori

R. Lazzari, E. Micolano, M. Conte, F. Vellucci



PROCEDURA DI PROVA RSE-ENEA PER SUPERCONDENSATORI

R. Lazzari, E. Micolano (RSE)
M. Conte (ENEA), F. Vellucci (ENEA)

Settembre 2013

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA
Piano Annuale di Realizzazione 2012

Area: Governo, gestione e sviluppo del sistema elettrico nazionale

Progetto: Sistemi avanzati di accumulo dell'energia

Obiettivo: Progettazione, realizzazione e caratterizzazione di celle al litio con materiali innovativi

Responsabile del Progetto: Mario Conte, ENEA



Questa procedura è stato uno dei primi risultati del lavoro del Gruppo di Coordinamento "Ricerche su reti attive, generazione distribuita e sistemi di accumulo di energia elettrica" costituito da CNR, ENEA e RSE su indicazione del Ministero dello Sviluppo Economico nell'ambito del programma sulla Ricerca del Sistema Elettrico.

Indice

SOMMARIO.....	4
SUMMARY	5
RIASSUNTO ESTESO	6
1 INTRODUZIONE	8
2 DOCUMENTI DI RIFERIMENTO	10
3 GLOSSARIO.....	11
4 PRESCRIZIONI GENERALI DI PROVA	12
4.1 CIRCUITO DI PROVA	12
4.2 STRUMENTAZIONE DI PROVA	13
4.3 METODI DI MISURA E REGISTRAZIONE	13
4.3.1 <i>Parametri da controllare e registrare</i>	13
4.3.2 <i>Strumentazione di misura</i>	13
4.3.3 <i>Accuratezza degli strumenti di misura</i>	14
4.3.4 <i>Taratura degli strumenti di misura</i>	14
4.4 PARAMETRI CARATTERISTICI DEI SUPERCONDENSATORI	14
4.5 PARAMETRI FISICI	15
5 ASPETTI DI SICUREZZA	17
6 DISPOSIZIONI GENERALI.....	18
6.1 MODALITÀ DI CARICA	18
6.1.1 <i>Carica a fondo</i>	18
6.2 MODALITÀ DI SCARICA.....	18
6.3 CICLI DI CARICA E SCARICA	18
6.4 PROCEDURA DI EQUALIZZAZIONE	18
7 PROVE DI CARATTERIZZAZIONE DI BASE.....	19
7.1 MISURA DELLA CAPACITÀ E DELLA CORRENTE DI RIFERIMENTO	19
7.2 MISURA DELL'ENERGIA DI RIFERIMENTO	19
7.3 MISURA DELLA CAPACITÀ FARADICA	20
7.4 CICLI DI CARICA E SCARICA A CORRENTE COSTANTE	21
7.4.1 <i>Misura del rendimento energetico</i>	22
7.4.2 <i>Misura della resistenza interna serie media Rm</i>	23
7.5 CICLI DI CARICA E SCARICA A POTENZA COSTANTE	23
7.5.1 <i>Costruzione del diagramma di Ragone</i>	23
7.6 MISURA DELL'AUTOSCARICA.....	24
8 PROVE SPECIALISTICHE PER VEICOLO ELETTRICO IBRIDO.....	25
8.1 PROVA PER IL CALCOLO DEL PICCO DI POTENZA (HPPC TEST).....	25
8.2 PROVA DI AVVIAMENTO A FREDDO PER VEICOLI IBRIDI (COLD CRANKING TEST)	27
8.3 CARICA RAPIDA (FRENATURA RIGENERATIVA)	28
8.4 SCARICA RAPIDA (ACCELERAZIONE)	30

Sommario

Il documento descrive la procedura di prova per la caratterizzazione di una batteria di supercondensatori al variare delle condizioni di lavoro. Il documento si compone di una parte introduttiva in cui sono descritti il circuito, la strumentazione di prova, gli aspetti gestionali e di sicurezza da rispettare per eseguire in sicurezza le prove sulla tecnologia e da un corpo centrale in cui vengono dettagliate le prove da eseguire.

La procedura descrive in particolare due serie di prove:

- Le prove di caratterizzazione di base che hanno lo scopo di verificare le prestazioni dei supercondensatori al variare delle condizioni di lavoro (regime e temperatura), mediante l'identificazione di alcuni parametri caratteristici.
- Le prove di caratterizzazione specifiche per l'applicazione veicolare che hanno lo scopo di analizzare il comportamento e misurare le prestazioni dei componenti in cicli di lavoro che simulano una specifica applicazione, quale l'alimentazione di un veicolo ibrido.

SUMMARY

The document describes the procedure for the characterization of a battery of supercapacitors in different working conditions. The document consists of an introductory part which describes the test circuit and instrumentation and the main characteristics of the device under test, focusing on the management and safety aspects, moreover some documents and regulations are reported.

- The core of the document is the actual procedure, divided into two main sections:
- The first section describes the basic characterization tests for the determination of the characteristic parameters of supercapacitors in different working conditions.
- The second section concerns the vehicular characterizations tests for an hybrid electric vehicle.

RIASSUNTO ESTESO

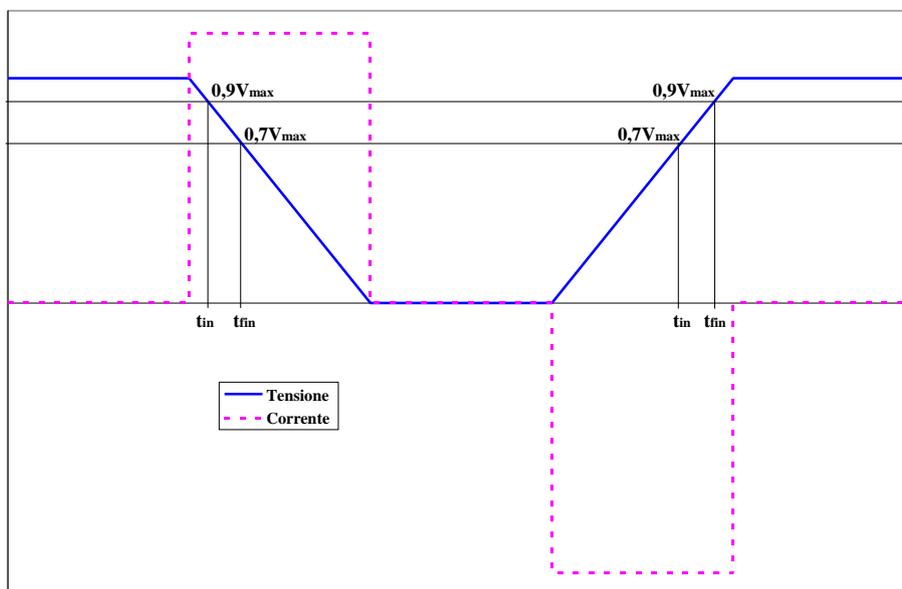
I supercondensatori sono dispositivi in grado di accumulare energia elettrica in forma elettrostatica e di erogare picchi molto elevati di potenza per breve tempo con tempi di risposta molto rapidi. Hanno un contenuto energetico ridotto ma una potenza specifica che può arrivare a 5000 W/kg. Un ulteriore punto di forza rispetto agli accumulatori elettrochimici è una vita attesa molto elevata che può arrivare a oltre 500000 cicli di carica/scarica.

Da un punto di vista funzionale sono simili ai comuni condensatori, da cui si differenziano principalmente per le prestazioni più elevate. Grazie all'utilizzo di materiali di elettrodo con elevata superficie utile e a una distanza tra gli elettrodi dell'ordine degli Angström (10^{-10} m) hanno una capacità che può raggiungere migliaia di Farad. La massima tensione di lavoro è piuttosto ridotta, i singoli elementi infatti hanno una tensione massima tipicamente compresa tra 2,5 e 2,7 V.

Sono adatti ad applicazioni che richiedono prestazioni in potenza quali le applicazioni di power quality e in ambito veicolare si prestano all'impiego per la propulsione di veicoli ibridi in cui il motore elettrico è utilizzato nelle fasi di accensione e accelerazione e per la frenatura rigenerativa o in accoppiamento a sistemi di accumulo elettrochimici per fornire il picco di potenza.

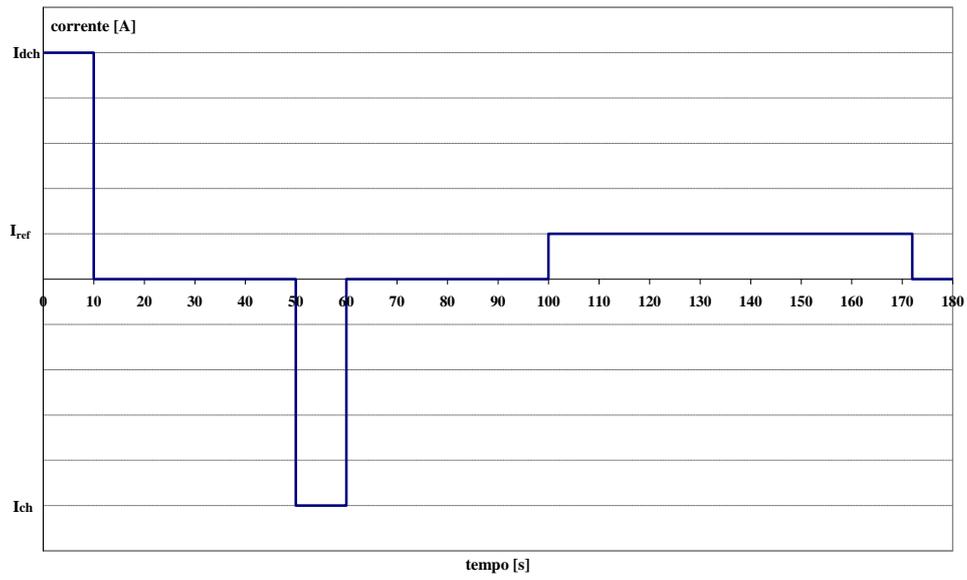
La procedura di prova presentata nel seguito si compone di una parte introduttiva che descrive il circuito e la strumentazione di prova, soffermandosi in particolare sugli aspetti generali di gestione e sugli aspetti di sicurezza. Vengono definiti alcuni parametri caratteristici dei supercondensatori (capacità, energia, rendimento energetico e amperometrico ecc.) che sono utili per valutare le prestazioni dei diversi componenti.

Il corpo centrale della procedura è diviso in due parti, la prima relativa alle prove di caratterizzazione di base, il cui obiettivo è identificare i parametri caratteristici dei supercondensatori al variare delle condizioni di lavoro tramite semplici cicli di carica e scarica a corrente o potenza costante in condizioni di temperatura controllate.



Esempio di ciclo di prova per la misura della capacità faradica

La seconda parte della procedura descrive una serie di prove specialistiche il cui obiettivo è la verifica dell'attitudine della batteria ad essere utilizzata per l'applicazione veicolare. In questo tipo di applicazione i supercondensatori sono infatti sottoposti a continui cicli di carica e scarica con elevati valori di corrente e devono essere in grado di assorbire un'elevata corrente di ricarica nelle fasi di frenatura rigenerativa. Le prove specialistiche descritte nella procedura sono state messe a punto sulla base delle procedure di test per supercondensatori della FreedomCar, dell'EUCAR e sulle norme IEC.



Esempio di ciclo di prova per la misura del picco di potenza (HPPC test)

1 Introduzione

I supercondensatori (SC), spesso chiamati condensatori elettrochimici o condensatori a doppio strato, sono dispositivi in grado di accumulare energia elettrica in forma elettrostatica. Si distinguono dai condensatori elettrolitici tradizionali per l'utilizzo di materiali di elettrodo con un'elevata superficie utile, e per la distanza tra i due elettrodi che è dell'ordine degli Angström (10^{-10} m).

La struttura elementare di un supercondensatore è costituita da due elettrodi, depositati su supporti di alluminio che svolgono la funzione di collettori di corrente, separati da un materiale dielettrico ed immersi in una soluzione elettrolitica. Gli elettrodi sono realizzati con materiali porosi, generalmente a base di carbonio, al fine di incrementare la superficie di contatto disponibile con l'elettrolita, arrivando a superfici di migliaia di metri quadri. Il separatore dielettrico, generalmente realizzato con carta, plastica o ceramica, è necessario per impedire il passaggio degli elettroni all'interno del supercondensatore, garantendo allo stesso tempo un'elevata permeabilità al passaggio degli ioni dell'elettrolita.

Applicando una differenza di potenziale ai terminali di un supercondensatore s'innescia un processo di separazione degli ioni dell'elettrolita che porta alla formazione di un doppio strato di carica alle interfacce elettrodo – elettrolita, come mostrato in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** In particolare la tensione applicata determina l'accumulo di elettroni all'elettrodo positivo e la deposizione di cariche ioniche negative all'interfaccia con l'elettrolita. Allo stesso modo, si verifica un eccesso di cariche positive all'elettrodo negativo e la deposizione di cariche ioniche negative all'interfaccia con l'elettrolita.

Nei supercondensatori l'accumulo di energia elettrica avviene dunque mediante un processo fisico facilmente reversibile e molto rapido di carica e scarica del doppio strato e non si hanno processi chimici di ossidoriduzione. Questo permette di poter caricare e scaricare in modo molto rapido i supercondensatori per un numero di cicli di vita molto maggiore rispetto a quella degli accumulatori elettrochimici.

La piccolissima distanza tra i due elettrodi porta tuttavia a lavorare con intensi campi elettrici che possono raggiungere i valori di rigidità dielettrica del materiale dielettrico, ed è pertanto necessario limitare la tensione tra gli elettrodi, e di conseguenza l'energia in essi immagazzinabile.

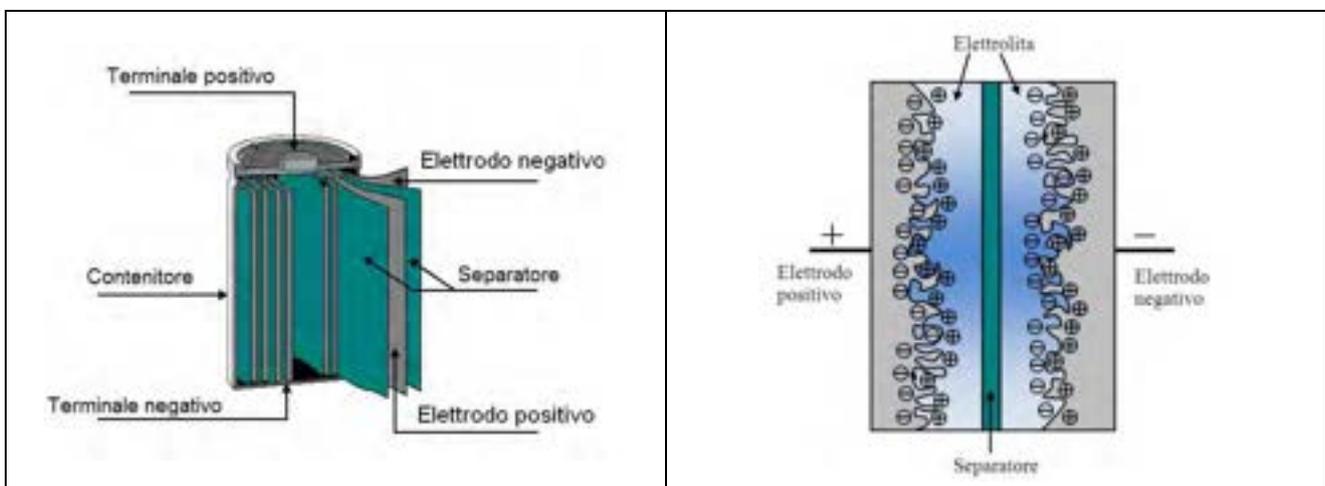


Figura 1. Supercondensatore cilindrico e schematizzazione della formazione del doppio strato di carica.

I supercondensatori possono essere realizzati con tecnologie degli elettrodi e dell'elettrolita differenti. Il processo di accumulo delle cariche nel doppio strato è un processo superficiale e conseguentemente le caratteristiche superficiali degli elettrodi influenzano le prestazioni della cella.

La scelta dell'elettrolita per un SC è importante quanto lo è la scelta del materiale usato per l'elettrodo, poiché la tecnologia dell'elettrolita influenza la resistenza interna della cella e la massima tensione di lavoro, e quindi l'energia accumulabile e la massima potenza di carica e scarica.

Nella tabella 1 sono presentati i parametri prestazionali tipici di un supercondensatore.

Tabella 1. Parametri prestazionali tipici di un supercondensatore.

Parametro	Valore Tipico	Commento
Tensione nominale di cella [V]	1 – 2,7	La tensione nominale di cella dipende dalla tecnologia costruttiva del componente. I supercondensatori con elettrolita organico presentano una tensione maggiore di quelli con elettrolita acquoso.
Capacità faradica delle celle [F]	1 – 5000	La capacità è espressa in Farad.
Potenza specifica [W/kg]	300 – 10000	
Energia specifica [Wh/kg]	1 – 10	L'energia specifica è molto bassa, essendo dispositivi di potenza.
Efficienza energetica [%]	85 – 98	
Efficienza amperometrica [%]	100	
Corrente di perdita [mA]	0,1 – 150	Questo parametro incide sull'autoscarica dei SC, essendo una perdita presente anche quando i SC sono lasciati a circuito aperto.
Vita attesa [cicli]	500000 – 1000000	Questo valore è ottenuto per cicli di lavoro compresi tra la tensione massima e metà di quest'ultima.
Corrente continua di scarica e carica [A]	1 – 250	
Massima corrente di picco in scarica e in carica [A]	5 – 2500	Per scariche impulsive della durata di pochi secondi.
Range di temperatura di lavoro	-40 – 65°C	
Ausiliari necessari	Sistema di bilanciamento	

I supercondensatori, come appena visto, sono dispositivi di accumulo elettrico in grado di fornire in modo rapido valori di potenza elevata, con autonomie molto brevi e con cicli di carica e scarica elevati. Queste caratteristiche lo rendono un componente molto interessante per le applicazioni nel campo della trazione elettrica, nelle applicazioni di potenza nello stazionario e in accoppiamento con ulteriori accumulatori elettrochimici per aumentarne la vita utile.

2 Documenti di Riferimento

La procedura di prova descritta in questo documento è il risultato dell'analisi e sintesi di diverse procedure di prova sviluppate negli anni per la caratterizzazione di supercondensatori per applicazioni prevalentemente veicolari sia a livello europeo che americano.

1. CEI EN 50110-1 (2004-11) "Esercizio degli impianti elettrici".
2. CEI EN 50191 (2001-09) "Installazione ed esercizio degli impianti elettrici di prova".
3. FreedomCAR Ultracapacitor Test Manual, DOE/NE-ID-11173 ,Settembre 2004.
4. IEC 62576/CDV, "Electric Double-Layer Capacitors for Use in Hybrid Electric Vehicles – Test Methods for Electrical Characteristics", 2008.
5. EUCAR Traction Battery Working Group "Specification of test procedures for Supercapacitors in Electric Vehicle Application", Maggio 2003
6. IEC- 62391-1:2006 – "Fixed Electric Double-layer Capacitors For Use In Electronic Equipment Part 1: Generic specification".
7. IEC- 62391-2:2006 – "Fixed Electric Double-layer Capacitors For Use In Electronic Equipment - Part 2: Sectional specification – Electric double-layer capacitors for power application"
8. J. R. Miller e A. F. Burke, "Electric Vehicle Capacitor Test Procedures Manual ", DOE/ID-10491, Ottobre 1994

3 Glossario

C_F	Capacità Faradica della batteria di supercondensatori [F].
C_{Qn}	Capacità amperometrica scaricata in n ore [Ah]
C_{Qref}	Capacità amperometrica di riferimento
CC	Corrente costante: modalità di lavoro in cui la corrente è mantenuta costante
CV	Tensione costante: modalità di lavoro in cui la tensione è mantenuta costante
DC	Corrente continua
E_{max}	Energia massima teorica
E_{ref}	Energia di riferimento
E_u	Energia massima utile
I_{ch}	Corrente di carica
I_{dch}	Corrente di scarica
I_{max}	Corrente massima continuativa di carica/scarica
I_{ref}	Corrente di scarica di riferimento, corrispondente a $5C_{Qref}$
I_{peak}	Corrente massima istantanea di carica/scarica
P_{ch}	Potenza di picco in carica
P_{dch}	Potenza di picco in scarica
P_{diss}	Potenza dissipata per effetto Joule
P_{max}	Potenza massima continuativa di carica/scarica
P_{min}	Potenza minima continuativa di carica/scarica
P_{peak}	Potenza massima istantanea di carica/scarica
R_{ch}	Resistenza interna in carica
R_{dch}	Resistenza interna in scarica
R_m	Resistenza interna media
V_{max}	Tensione di esercizio suggerita dal Costruttore come la massima tensione a cui il campione può lavorare normalmente nello stato di carica completa senza subire danneggiamenti
V_{min}	Tensione minima
SC	Supercondensatore
SOC	State of Charge, definisce il livello di carica della batteria di SC rispetto al valore massimo
η_{amp}	Rendimento amperometrico
η_e	Rendimento energetico

4 Prescrizioni generali di prova

Le prove possono essere condotte su singoli elementi, su moduli (pacchi sigillati composti da diversi elementi comprensivi di cablaggio e di circuito di bilanciamento) e su batterie di più moduli o elementi.

Le connessioni delle singole celle dovrebbero essere fatte dal costruttore prima della consegna del pacco. Nel caso in cui sia necessario realizzare il cablaggio delle celle il costruttore deve fornire tutte le informazioni in modo da consentire la realizzazione di un sistema in grado di funzionare correttamente ed ottenere risultati affidabili.

Gli stress termici durante le prove possono determinare l'indebolimento dei serraggi delle connessioni tra i diversi componenti del circuito di prova e tra le celle che costituiscono la batteria. I serraggi delle connessioni vanno registrati prima di ciascuna prova, per ridurre al minimo le perdite dovute a falsi contatti.

I test devono essere eseguiti a temperatura controllata all'interno di una camera termica. Se non diversamente specificato, prima di ciascuna prova è necessario condizionare l'oggetto in prova alla temperatura prevista, fino al raggiungimento della stabilità termica. La stabilizzazione termica si raggiunge quando la differenza tra la temperatura di test e la temperatura misurata in ciascun punto è inferiore a $\pm 2^\circ\text{C}$.

Le prove in camera climatica devono essere effettuate nel corretto intervallo di temperatura ambiente, indicato nel datasheet di ciascuna tecnologia e in condizioni di bassa umidità. Deve essere inoltre evitata la formazione di ghiaccio e condensa.

La temperatura ambiente di riferimento è pari a $25^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$.

4.1 Circuito di prova

Il circuito di prova per batterie di supercondensatori, mostrato in Figura 2, è costituito da un alimentatore con funzionamento a tensione o a corrente costante, da un carico, e da uno strumento di acquisizione dati.

La batteria in prova, posta in camera climatica, è collegata in parallelo ad un alimentatore CC/CV programmabile, e ad un carico elettronico o ad un carico puramente resistivo. Entrambi gli strumenti devono poter essere sezionati ed esclusi dal circuito di prova, qualora si verificano situazioni di pericolo, mediante l'utilizzo di teleruttori.

La Figura 2 schematizza il circuito realizzato per l'esecuzione delle prove.

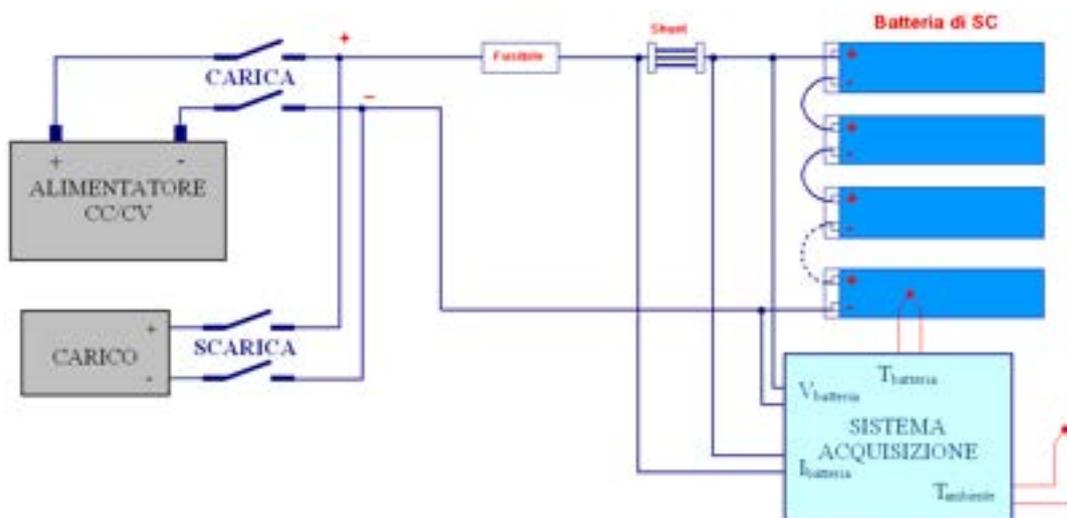


Figura 2. Schema del circuito di prova.

4.2 Strumentazione di prova

- a) Alimentatore programmabile in DC con funzionamento a tensione costante e corrente costante (CV/CC), di taglie opportune.
- b) Carico elettronico programmabile in DC di taglia opportuna, con funzionamento a corrente, potenza e resistenza costante.
- c) Camera climatica con intervallo minimo di temperatura compreso tra -40°C e $+60^{\circ}\text{C}$ e controllo dell'umidità.
- d) Set di resistenze, di dimensione opportuna, assemblabili in serie e in parallelo.

4.3 Metodi di misura e registrazione

4.3.1 Parametri da controllare e registrare

Nelle prove sono da controllare i seguenti parametri:

- Tensione di batteria e, se possibile, di cella
- Corrente
- Temperatura di batteria
- Temperatura ambiente
- Tempo

La registrazione dei dati durante le prove deve avere una frequenza di campionamento sufficientemente alta da acquisire le variazioni rilevanti di tutti i parametri da controllare ed utili per la successiva elaborazione dei dati ed interpretazione dei risultati. La frequenza di campionamento minima è di 1 Hz per le prove di determinazione della capacità e prove dinamiche. Per le misure di resistenza interna è suggerito l'uso dell'oscilloscopio (comunque una frequenza di campionamento minima di 100 Hz). Per quanto riguarda le variazioni di temperatura sono sufficienti 4 registrazioni al minuto.

La frequenza di campionamento può scendere a 0,1 Hz per le pause e le fasi di acclimatazione.

In modo più specifico il numero minimo dei parametri da registrare e la posizione delle sonde di misura dipende dal tipo di prova.

Nel caso di prove su singole celle si dovranno acquisire i seguenti dati:

Temperatura: una misura sul corpo della cella, isolata dall'ambiente;

una misura della temperatura ambiente;

Tensione: misura direttamente sui connettori esterni del campione;

Corrente: misura della corrente di cella.

Nel caso di prove realizzate su un pacco (o modulo):

Temperatura: una misura su un collettore di corrente della batteria;

una misura sul corpo di una cella periferica, se accessibile (isolata dall'ambiente);

una misura della temperatura ambiente;

Tensione: misura della tensione totale;

Corrente: misura della corrente di batteria, se ci sono più rami in parallelo misura della corrente di ciascun ramo.

4.3.2 Strumentazione di misura

Gli strumenti utilizzati devono permettere la corretta misura dei valori di tensione e corrente e temperatura. La portata di questi strumenti e i metodi di misura devono essere scelti in modo da assicurare l'accuratezza specifica per ciascuna prova. Può essere utilizzato qualsiasi strumento di misura, ammesso che permetta una certa accuratezza.

Nel caso specifico sono utilizzati:

- a) Data Logger per l'acquisizione della tensione, corrente e temperatura della batteria in prova. Il dispositivo deve garantire almeno la misura della tensione e corrente di batteria e, nel caso in cui i terminali siano accessibili, anche la misura della tensione di modulo o di elemento, oltre che la temperatura dei punti critici.
- b) Oscilloscopio con canali isolati tra loro e sollevati da terra, con almeno due canali per la misura dei transitori veloci di corrente e tensione.

4.3.3 Accuratezza degli strumenti di misura

L'accuratezza totale della catena di misura dei segnali deve essere almeno all'interno delle seguenti tolleranze:

- Tensione: ± 1 %;
- Corrente: ± 1 %;
- Temperatura: ± 2 °C;
- Tempo: ± 0.1 %;
- Massa: ± 0.1 %;
- Dimensione: ± 0.1 %.

Tutti i valori (temperatura, corrente e tensione), devono essere misurati almeno ogni 5% del tempo stimato di carica e scarica, eccetto i casi indicati nella procedura di prova.

4.3.4 Taratura degli strumenti di misura

La taratura degli strumenti di acquisizione dati (data logger, oscilloscopio) e dei trasduttori di tensione e corrente (Shunt, Sonde ad effetto Hall, ecc..) deve essere effettuata con cadenza annuale.

4.4 Parametri caratteristici dei supercondensatori

- **Capacità Faradica C_F^1** : è un parametro caratteristico dei condensatori, espresso in Farad, e rappresenta la quantità di carica elettrica accumulata da un condensatore in rapporto alla differenza di potenziale applicata ai suoi capi.
- **Capacità amperometrica C_{Qn}^2** , nel seguito capacità: è un parametro che caratterizza in generale gli accumulatori elettrochimici ed esprime la quantità di carica che si può estrarre dall'oggetto in prova durante una scarica completa, ovvero fino al raggiungimento della condizione di fine scarica, con un valore di corrente tale da scaricarlo in n ore. Ad esempio C_{Q1} è la capacità al regime dell'ora. Tale parametro è espresso in amperora.
- **Capacità di riferimento C_{Qref}** : è la quantità di carica che si riesce ad estrarre dal SC durante una scarica al regime dei 12 minuti, cioè con un valore di corrente pari a $5 * C_{Q1}$. Questa capacità può essere assunta come capacità amperometrica nominale in mancanza di una dichiarazione alternativa da parte del costruttore. Il calcolo deve essere eseguito preliminarmente alle prove di caratterizzazione e dopo aver condizionato l'oggetto in prova a 25 °C in camera termica.
- **Energia massima teorica**: è l'energia teoricamente immagazzinabile, espressa in Wh, in una batteria di SC, funzione della capacità faradica e della tensione massima applicabile ai morsetti, data dalla seguente espressione:

¹ La capacità faradica di elemento è pari a $n * C_F$ capacità faradica di batteria per una batteria di n elementi collegati in serie

² La capacità amperometrica di elemento e di batteria sono coincidenti per una batteria di n elementi collegati in serie

$$E_{\max} = \frac{\frac{1}{2} C_F V_{\max}^2}{3600} \quad (4.1)$$

- **Energia massima utile:** è l'energia estraibile dall'oggetto in prova tenendo conto anche dell'intervallo della tensione di lavoro del componente. L'energia utile, espressa in Wh, è calcolabile tramite la seguente formula:

$$E = \frac{\frac{1}{2} C_F (V_{\max}^2 - V_{\min}^2)}{3600} \quad (4.2)$$

dove V_{\min} e V_{\max} sono i limiti inferiore e superiore della tensione di lavoro. L'energia utile coincide con quella ideale se il SC è scaricato fino a 0 V.

- **Energia di riferimento:** è la quantità di energia che si riesce ad estrarre dall'oggetto in prova durante la prova di scarica per la misura della capacità di riferimento, con corrente pari a $5 * C_{Q1}$ e ad una temperatura ambiente di 25 °C. Tale parametro può essere assunto come energia nominale in mancanza di una dichiarazione alternativa da parte del costruttore.
- **Energia specifica:** si ottiene dividendo il valore dell'energia scaricata per il peso della batteria di supercondensatori.
- **Resistenza interna media R_m :** è un parametro che permette di tener conto della dissipazione termica su tutte le resistenze interne che caratterizzano i SC, tiene conto quindi delle resistenze dei contatti, della conducibilità dell'elettrolita, della resistenza di perdita.
- **Potenza di picco:** è la massima potenza in scarica/carica erogabile/assorbibile dalla batteria di supercondensatori.
- **Potenza specifica:** si ottiene dividendo il valore di potenza di scarica per il peso della batteria di supercondensatori.
- **Rendimento energetico η_e** di carica/scarica: è il rapporto tra l'energia erogata durante una scarica e quella assorbita durante la successiva ricarica. Perché la misura sia corretta è necessario che il contenuto energetico della batteria alla fine della prova sia uguale a quello iniziale, nel caso specifico è necessario che la tensione della batteria di SC all'inizio e al termine della prova sia di uguale valore.
- **Rendimento amperometrico η_{amp}** di carica/scarica: è il rapporto tra la carica estratta durante una scarica e quella assorbita durante la successiva ricarica. Perché la misura sia corretta è necessario che il SOC della batteria alla fine della prova sia uguale a quello iniziale, nel caso specifico è necessario che la tensione della batteria di SC all'inizio e al termine della prova sia di uguale valore.

4.5 Parametri fisici

All'inizio e al termine dell'esecuzione delle prove devono essere misurati i seguenti parametri fisici.

- Forma: descrizione della cella/pacco e documentazione con un disegno e/o foto.
- Dimensioni: in base alla forma. Tutte le dimensioni devono essere espresse in mm.
- Volume: considerare il volume del più piccolo parallelepipedo in grado di contenere l'elemento/modulo. Per il volume del modulo bisogna includere anche i connettori interni.

- Peso della singola cella (in kg): peso della singola cella includendo le viti usate per le connessioni. La tolleranza è ± 1 gr.
- Peso del modulo: peso globale del pacco di supercondensatori includendo tutti i connettori. Se il modulo è sigillato dal Costruttore, il contenitore è incluso nel peso globale; se il pacco è stato assemblato in laboratorio usando singole celle, il peso di un eventuale contenitore non è incluso, ma ciò deve essere specificato.

Nel caso in cui le prove siano condotte su singole celle tutte le misure di tipo fisico devono essere condotte su un grande numero di celle (almeno 10) ed il risultato è il valore medio di quelli misurati.

5 Aspetti di sicurezza

I supercondensatori risentono dei fenomeni della sovratensione e sovratemperatura, pertanto è necessario monitorare queste grandezze per evitare il superamento dei limiti di corretto funzionamento. Il superamento della massima tensione di lavoro può portare alla distruzione dei componenti qualora il campo elettrico tra i morsetti del SC superi il valore della rigidità dielettrica. Il collegamento in serie dei SC richiede la realizzazione di un circuito di bilanciamento che provvede a ridistribuire la corrente in modo da ridurre lo squilibrio nelle tensioni ai capi dei SC. Tale squilibrio è dovuto alla non perfetta uniformità delle capacità degli elementi e può portare, se non corretto, al superamento da parte di un elemento della serie della massima tensione di lavoro ammissibile.

I SC possono essere scaricati fino a 0 V, ma possono essere danneggiati in modo irreversibile dall'applicazione di una tensione inversa. È necessario pertanto monitorare la tensione oltre che la corrente di batteria per evitare il superamento dei limiti di corretto funzionamento.

Bisogna tenere da conto che nel datasheet sono indicati spesso due valori di corrente massima, la I_{max} è la corrente che può essere applicata al componente a tempo indeterminato, sempre mantenendo tensione e corrente entro i limiti corretti, la I_{peak} , che si ricava dalla potenza di picco P_{peak} , è una corrente di tipo impulsivo che può essere applicata solo per brevi periodi ed è in generale maggiore della I_{max} .

Uno degli aspetti più critici per i supercondensatori è la sensibilità alla temperatura di funzionamento, che ha influenza sia sulla prospettiva di vita dei componenti che sulle prestazioni degli stessi. Il funzionamento in presenza di alte temperature determina una netta diminuzione della vita dei componenti. Bisogna tener conto che la temperatura dei supercondensatori tende a crescere durante i cicli di lavoro, a causa della dissipazione termica dovuta alle perdite per effetto Joule sulla resistenza interna. Durante le prove è pertanto necessario monitorare la temperatura dei punti critici in modo continuativo per evitare che possa superare il limite massimo (riportato nel datasheet) e interrompere la prova se si verifica questa situazione. I serraggi delle connessioni tra i diversi componenti del circuito di prova e tra le diverse celle che costituiscono la batteria di SC vanno registrati prima di ciascuna prova.

Le prove in camera climatica devono essere effettuate nel corretto intervallo di temperatura ambiente, riportato nel datasheet di ciascuna tecnologia e in condizioni di bassa umidità. Deve essere inoltre evitata la formazione di ghiaccio e condensa.

6 Disposizioni generali

6.1 Modalità di carica

La carica avviene collegando i SC in parallelo ad un alimentatore in DC di taglia opportuna. Durante la ricarica, indipendentemente dalle modalità con cui si svolge, è necessario monitorare la tensione della batteria e, se disponibile, di modulo o di elemento, la corrente di batteria e la temperatura nei punti critici, per evitare il superamento dei limiti di corretto funzionamento il cui valore è reperibile nei datasheet dell'oggetto in prova.

La carica può avvenire secondo diverse modalità:

- a tensione costante
- a corrente costante
- a potenza costante

6.1.1 Carica a fondo

La carica a fondo dei SC si compone di una fase a corrente costante o a potenza costante, con un valore di corrente sempre inferiore al limite massimo di corrente I_{max} fino al valore massimo di tensione V_{max} , seguita da una fase a tensione costante pari a V_{max} fino a quando la corrente di carica scende al di sotto di un valore pari all'1% della corrente di riferimento ($C_{Q1}/20$).

6.2 Modalità di scarica

La scarica avviene collegando i SC ad un carico elettronico in DC di taglia opportuna o in alternativa ad un carico resistivo di valore ohmico opportuno. La scarica ha termine al raggiungimento della tensione di fine scarica. Il valore della tensione di fine scarica è scelto in base al tipo di prova e al contenuto energetico e al SOC a cui si vogliono portare i componenti. Si ha una scarica a fondo quando la tensione di fine scarica è pari a V_{min} . Durante la scarica, indipendentemente dalle modalità con cui si svolge, è necessario monitorare la tensione della batteria e, se disponibile, di modulo o di elemento, la corrente di batteria e la temperatura nei punti critici, per evitare il superamento dei limiti di corretto funzionamento il cui valore è reperibile nei datasheet dell'oggetto in prova.

6.3 Cicli di carica e scarica

Per effettuare cicli con fasi alterne di scarica e carica è necessario collegare in parallelo la batteria in prova con un alimentatore CV/CC e un carico e programmarli opportunamente, instaurando la dovuta sincronizzazione tra i due strumenti.

Entrambi i rami del circuito devono essere sezionabili, come mostrato in Figura 2.

6.4 Procedura di equalizzazione

La procedura di equalizzazione ha lo scopo di portare tutti gli elementi della batteria di SC nella stessa condizione elettrica, prima di iniziare la prova. È necessario effettuare questa procedura prima di una sessione di prove ed è consigliabile ripeterla periodicamente per evitare che eventuali disomogeneità tra gli elementi influenzino i risultati di prova.

La procedura si compone delle seguenti fasi:

1. carica a fondo secondo la procedura descritta in § 6.1.1
2. pausa per permettere la stabilizzazione della tensione
3. scarica a corrente costante fino ad una tensione inferiore a 100 mV/elemento
4. corto circuito della batteria e, se possibile, di ciascun modulo o cella per 12 ore.

La procedura di equalizzazione deve essere effettuata alla temperatura di riferimento pari a 25 °C.

7 Prove di caratterizzazione di base

7.1 Misura della capacità e della corrente di riferimento

Per misurare la capacità di riferimento C_{Qref} la batteria di SC (o il singolo SC) è sottoposta ad una scarica a corrente costante di valore pari a $5C_{Q1}$, dove C_{Q1} è la capacità (in Ah) al regime dell'ora.

Durante la prova è necessario misurare la tensione di batteria e, quando possibile, di modulo o di elemento, con una frequenza di campionamento minima di 1 Hz.

Prima di effettuare la prova è necessario procedere, dopo l'acclimatazione della batteria di SC in camera termica ad una temperatura di 25 °C, ad una carica a fondo secondo la modalità descritta nel § 6.1.1.

La batteria di SC è sottoposta ad una scarica con corrente pari a $5C_{Q1}$ fino alla scarica completa, identificata dal raggiungimento della tensione di fine scarica pari a V_{min} . Il valore di corrente è tale da determinare la scarica completa della batteria in 12 minuti.

Il valore di corrente da utilizzare durante la prima prova può essere calcolato a partire dalla stima della carica teorica che può essere estratta dal SC, utilizzando la seguente formula:

$$C'_{Q1} = \frac{C_F (V_{max} - V_{min})}{3600} \quad (7.1)$$

La procedura può essere riassunta nei seguenti punti:

1. acclimatazione in camera termica a 25 °C
2. carica a fondo della batteria di SC.
3. stima del valore di corrente $I'_{ref} = 5C'_{Q1}$ da utilizzare nella prova di scarica a corrente costante.
4. scarica a corrente costante fino alla tensione di fine scarica V_{min} , con corrente pari a I'_{ref}
5. calcolo della capacità amperometrica di riferimento della batteria, pari alla carica estratta durante la prova di scarica a corrente costante, data dalla seguente formula:

$$C_{Qref} = \int_{t_{in}}^{t_{fin}} i'_{ref1}(t) dt \quad (7.2)$$

6. calcolo della corrente di riferimento effettiva, $I_{ref} = 5C_{Qref}$, dove C_{Qref} è la capacità di riferimento calcolata al punto 5, utilizzando la formula (9.2).

7.2 Misura dell'energia di riferimento

L'energia di riferimento è l'energia estratta dalla batteria di SC durante la prova di scarica a corrente costante a $I_{ref} = 5C_{Qref}$ descritta al § 7.1 che permette il calcolo della capacità di riferimento.

Tale grandezza è calcolata mediante l'integrazione della potenza di scarica durante la fase di scarica, utilizzando gli stessi dati acquisiti nella prova descritta al § 7.1, secondo la formula:

$$\Delta E = \int_{t_{in}}^{t_{fin}} p(t) dt = I_{ref} \int_{t_{in}}^{t_{fin}} v(t) dt \quad (7.3)$$

7.3 Misura della capacità faradica

La capacità faradica dei SC, oltre a definire le prestazioni del componente, è un parametro diagnostico che permette di misurare lo stato di salute dello stesso, e tende a diminuire con l'invecchiamento. Una riduzione del 20 % della capacità faradica corrisponde alla fine della vita del SC.

La misura della capacità faradica si ottiene dalla misura dell'andamento della tensione e della corrente del SC (o di un pacco di SC) durante una scarica o una carica.

La procedura per la misura della capacità faradica dei SC si articola nei seguenti punti:

1. acclimatazione dei SC alla temperatura ambiente di riferimento, pari a 25 °C
2. carica a fondo secondo la procedura descritta nel § 6.1.1
3. acclimatazione dei SC alla temperatura di prova
4. scarica a corrente costante fino a V_{min}
5. pausa per permettere la stabilizzazione della tensione
6. carica a corrente costante fino a V_{max}

La Figura 3 mostra l'andamento della tensione e corrente erogata dalla batteria durante la fase di scarica e carica.

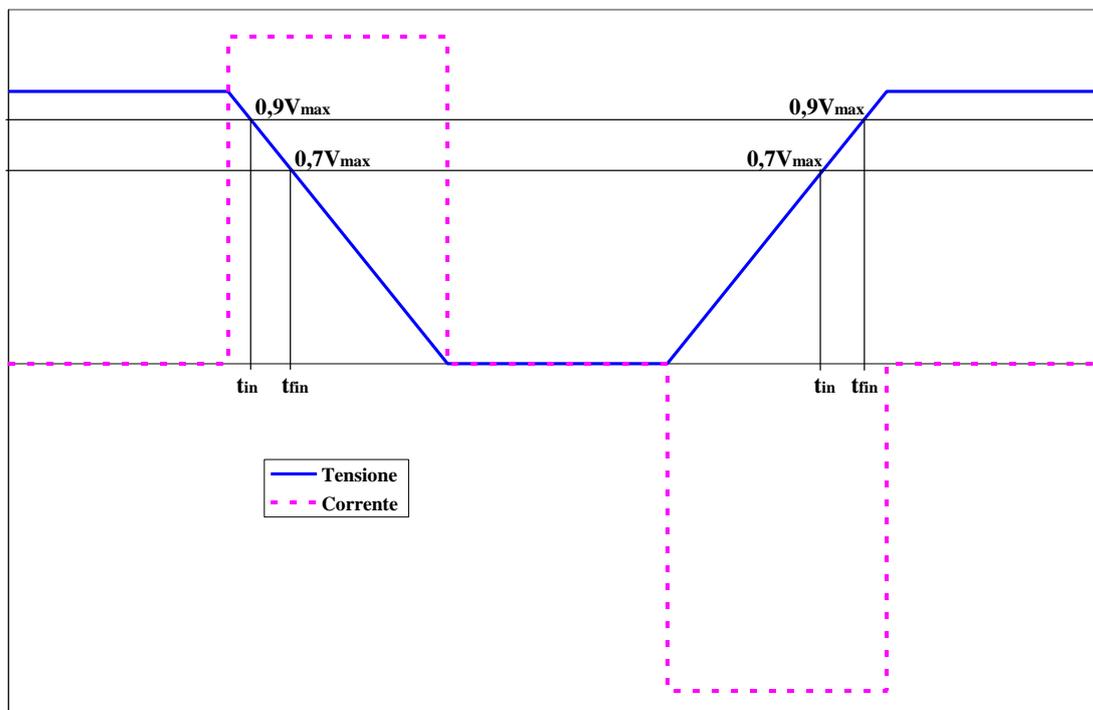


Figura 3. Ciclo di prova per la misura della capacità faradica.

Nel corso della prova devono essere acquisite la tensione e la corrente di batteria, la temperatura nei punti critici della batteria e, se possibile, la tensione di elemento o di modulo.

La frequenza di campionamento minima deve essere di 1 Hz nelle fasi di carica/scarica, può scendere a 0,1 Hz nelle fasi di acclimatazione e stand-by.

La prova sarà ripetuta per i seguenti valori di corrente, uguali sia nella fase di carica che di scarica a corrente costante:

- I_{ref} (valore calcolato secondo la modalità descritta nel § 7.1)
- $0,2I_{max}$
- $0,4I_{max}$
- $0,6I_{max}$
- $0,8I_{max}$
- I_{max}

Nel caso in cui la strumentazione di prova non permetta di raggiungere la massima corrente del componente, che in alcuni casi può essere molto elevata, si assumerà come I_{\max} il massimo valore di corrente consentito dalla strumentazione. Tale valore sarà utilizzato quindi per il calcolo dei valori di corrente da utilizzare nella prova.

La prova sarà ripetuta inoltre per 4 valori di temperatura ambiente, pari a -20, 5, 25, 45 °C.

A partire dai dati registrati si può calcolare la capacità faradica della batteria e/o dei singoli SC. Il calcolo può essere effettuato con due diverse modalità.

Metodo 1

Si parte dal presupposto che l'energia immagazzinata in una batteria di SC è legata alla capacità faradica e alla tensione ai morsetti, secondo la relazione (5.2). La misura della capacità faradica del SC in scarica e in carica si ottiene utilizzando le seguenti formule:

$$C_{Fdch} = \frac{2\Delta E}{(0,9V_{\max})^2 - (0,7V_{\max})^2} \quad (7.4)$$

$$C_{Fch} = \frac{2\Delta E}{(0,7V_{\max})^2 - (0,9V_{\max})^2} \quad (7.5)$$

dove

$$\Delta E = \int_{t_{in}}^{t_{fin}} p(t)dt = \int_{t_{in}}^{t_{fin}} v(t) \cdot i(t)dt \quad (7.6)$$

t_{in} e t_{fin} sono i tempi iniziali e finali corrispondenti alle fasi di carica e scarica, illustrati in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**

Metodo 2

La misura della capacità faradica del SC è ottenuta dalla seguente relazione

$$C_{Fdch} = \frac{\Delta Q}{\Delta V} = \frac{\int_{t_{in}}^{t_{fin}} i(t)dt}{0,9V_{\max} - 0,7V_{\max}} \quad (7.7)$$

$$C_{Fch} = \frac{\Delta Q}{\Delta V} = \frac{\int_{t_{in}}^{t_{fin}} i(t)dt}{0,7V_{\max} - 0,9V_{\max}} \quad (7.8)$$

7.4 Cicli di carica e scarica a corrente costante

La prova consiste nel sottoporre i componenti ad un ciclo composto da fasi alterne di carica e scarica a corrente costante di valore uguale in entrambe le fasi, ripetuto un numero prefissato di volte. Le fasi di carica e scarica del ciclo devono essere intervallate da una pausa di dieci secondi, per permettere alla tensione di stabilizzarsi. Le prove sono effettuate per quattro valori di corrente e per quattro diverse temperature ambiente. Lo scopo della prova è l'analisi delle prestazioni dei SC, attraverso la misura dell'efficienza energetica di carica/scarica e della resistenza interna media dei SC al variare della temperatura ambiente e con diversi regimi di corrente.

Il ciclo base è ripetuto per 30 volte, in ogni caso durante la prova viene costantemente monitorata la temperatura nei punti critici della batteria di SC e la prova sarà immediatamente interrotta in caso di superamento della massima temperatura di lavoro, dichiarata nel datasheet dell'oggetto in prova.

Per la misura dell'efficienza energetica è necessario che la condizione elettrica dei SC all'inizio e al termine della prova sia uguale, per questo motivo la prova ha inizio e termina con una carica a fondo.

La procedura di prova si compone dei seguenti punti:

1. Acclimatazione dei SC alla temperatura di riferimento di 25 °C.
2. Carica a fondo secondo la procedura descritta nel § 6.1.1.
3. Acclimatazione dei SC alla temperatura di prova in camera climatica (se diversa dalla temperatura di riferimento).
4. I SC sono sottoposti al ciclo di prova che viene ripetuto 10 volte. Il ciclo di prova si compone di scarica a corrente costante fino alla tensione minima V_{min} , una pausa di 30 s per la stabilizzazione della tensione, una carica a corrente costante fino alla tensione massima V_{max} , una pausa di 10 s per la stabilizzazione della tensione.
5. Acclimatazione dei SC alla temperatura di riferimento di 25 °C.
6. Carica a fondo dei SC secondo la modalità indicata in § 6.1.1.

Il tempo di attesa tra le diverse fasi della prova deve essere limitato al minimo necessario, per evitare che il fenomeno dell'autoscarica possa influenzare i risultati di prova. Per lo stesso motivo durante le fasi di acclimatazione in camera climatica è necessario mantenere a vuoto i SC, interrompendo l'acquisizione della tensione dei SC e scollegandoli dal sistema di acquisizione dati e di prova. Nel corso della prova devono essere acquisite la tensione e la corrente di batteria, la temperatura nei punti critici della batteria e, se possibile, la tensione di elemento o di modulo.

La frequenza di campionamento minima deve essere di 1 Hz nelle fasi di carica/scarica, può scendere a 0,1 Hz nelle fasi di acclimatazione e stand-by.

La prova sarà ripetuta per i seguenti valori di corrente, uguali sia nella fase di carica che di scarica a corrente costante:

- I_{ref} (valore calcolato secondo la modalità descritta nel § 7.1)
- $0,2I_{max}$
- $0,4I_{max}$
- $0,6I_{max}$
- $0,8I_{max}$
- I_{max}

Nel caso in cui la strumentazione di prova non permetta di raggiungere la massima corrente del componente, che in alcuni casi può essere molto elevata, si assumerà come I_{max} il massimo valore di corrente consentito dalla strumentazione. Tale valore sarà utilizzato quindi per il calcolo dei valori di corrente da utilizzare nella prova.

La prova sarà ripetuta inoltre per 4 valori di temperatura ambiente, pari a -20, 5, 25, 45 °C.

A partire dai dati registrati nelle prove si possono calcolare il rendimento energetico e la resistenza interna media della batteria di SC al variare della corrente e della temperatura ambiente.

7.4.1 Misura del rendimento energetico

Il rendimento energetico della batteria è ottenuto dal rapporto tra l'energia scaricata durante la prova di scarica e l'energia caricata durante la ricarica seguente, secondo la seguente formula:

$$\eta_e = \frac{E_{dch}}{E_{ch}} \cdot 100 = \frac{\int_{t_{in}}^{t_{fin}} v_{dch}(t) \cdot i_{dch}(t) dt}{\int_{t_{in}}^{t_{fin}} v_{ch}(t) \cdot i_{ch}(t) dt} \quad (7.9)$$

Dove t_{in} è il tempo di inizio della fase descritta al punto 4 della procedura riportata nel § 7.4 (ripetizione dei 10 cicli di carica e scarica) e t_{fin} è il tempo di fine della fase 6.

7.4.2 Misura della resistenza interna serie media R_m

La resistenza interna media è responsabile delle perdite di energia per effetto Joule durante la carica e la scarica della batteria di SC. La resistenza interna media è calcolata per ciascuna prova, utilizzando la formula:

$$R_m = \frac{P_{diss}}{I_{rms}^2} = \frac{E_{ch} - E_{dch}}{I_{rms}^2 \cdot T} \quad (7.10)$$

dove I_{rms} è il valore efficace della corrente durante la prova e P_{diss} è la potenza dissipata durante i cicli di carica/scarica pari alla differenza tra l'energia caricata E_{ch} e quella scaricata E_{dch} divisa per il tempo T totale della prova.

7.5 Cicli di carica e scarica a potenza costante

La procedura della prova è analoga a quella descritta nel §7.4, con la differenza che le fasi di carica e di scarica del ciclo descritto nel punto 4 della procedura sono a potenza costante e di uguale valore.

Lo scopo della prova è l'analisi delle prestazioni dei SC, attraverso la costruzione del diagramma di Ragone, come specificato di seguito.

Durante la prova devono essere acquisite la tensione e corrente di batteria, quando possibile la tensione di modulo o di cella e la temperatura dei punti critici. La frequenza di campionamento minima deve essere di 1 Hz nelle fasi di carica/scarica, può scendere a 0,1 Hz nelle fasi di acclimatazione e stand-by.

La prova sarà ripetuta per i seguenti valori di potenza, uguali sia nella fase di carica che di scarica a corrente costante:

- P_{min}
- $0,2P_{max}$
- $0,4P_{max}$
- $0,6P_{max}$
- $0,8P_{max}$
- P_{max}

dove $P_{min} = I_{ref} \cdot V_{min} = 5C_{Qref} \cdot V_{min}$ e $P_{max} = I_{max} \cdot 0,5V_{max}$, in assenza di indicazioni riportate nel datasheet del costruttore.

Nel caso in cui la strumentazione di prova non permetta di raggiungere la massima corrente del componente, che in alcuni casi può essere molto elevata, si assumerà come I_{max} il massimo valore di corrente consentito dalla strumentazione. Tale valore sarà utilizzato quindi per il calcolo della P_{max} e dei valori di potenza da utilizzare nella prova.

La prova sarà ripetuta inoltre per 4 valori di temperatura ambiente, pari a -20, 5, 25, 45 °C

7.5.1 Costruzione del diagramma di Ragone

Il diagramma di Ragone è un diagramma tipico dei sistemi di accumulo in cui si rappresenta l'energia specifica in funzione della potenza specifica delle diverse tecnologie di accumulo in scala logaritmica. Tale

diagramma permette di rappresentare l'energia che si può estrarre dalla batteria al variare del regime di scarica ed è uno strumento di aiuto nella scelta della tecnologia più adatta per ogni applicazione.

Il diagramma si può costruire a partire dai dati registrati durante la prova descritta del § 7.5. In dettaglio:

1. si misura l'energia scaricata durante la fase 1 (scarica da V_{max} fino a V_{min} a potenza costante) della prima ripetizione del ciclo.
2. Si calcola l'energia specifica dividendo il valore di energia misurato al punto 1 per il peso dell'oggetto in prova.
3. Si calcola la corrispondente potenza specifica dividendo il valore di potenza utilizzato nella fase di scarica del ciclo di lavoro per il peso dell'oggetto in prova.
4. Si ripete tale procedimento per tutte le diverse prove al variare della potenza di scarica e a pari temperatura ambiente.

Il diagramma si costruisce mettendo in relazione l'energia specifica estratta dalla batteria di SC in ciascuna prova e la potenza specifica di scarica nella prova corrispondente, a pari temperatura ambiente.

Si possono ottenere diversi diagrammi di Ragone al variare della temperatura ambiente della prova di scarica.

7.6 Misura dell'autoscarica

L'autoscarica della batteria di SC consiste nella riduzione dell'energia immagazzinata all'interno della batteria di SC a seguito di un periodo più o meno lungo di immagazzinamento e può portare alla scarica completa della batteria di SC.

La misura dell'autoscarica nei SC è complessa, questo perché dato il contenuto energetico ridotto dei componenti può essere influenzata dalle perdite sull'impedenza di ingresso dello strumento di misura. Per tale motivo è necessario minimizzare il numero di misure e il tempo di registrazione.

La procedura per la misura dell'autoscarica della batteria di SC è la seguente:

1. Acclimatazione della batteria in camera climatica a 25 °C.
2. Carica a fondo della batteria secondo la procedura riportata nel §6.1.1, al termine della quale i SC devono essere immediatamente scollegati dal sistema di acquisizione dati e dalla strumentazione di prova per evitare che le perdite sull'impedenza di ingresso dello strumento possano aumentare l'autoscarica.
3. Acclimatazione della batteria di SC alla temperatura di test.
4. Misura della tensione di batteria e, se possibile, dei singoli moduli o elementi. La misura dovrà essere effettuata nel tempo più rapido possibile ed è necessario scollegare la strumentazione di misura al termine.
5. La batteria dovrà essere tenuta in camera climatica alla temperatura di prova e scollegata da qualsiasi strumento di misura della tensione per 72 h.
6. Misura della tensione di batteria e, qualora possibile, dei moduli o elementi e calcolo del contenuto energetico dei SC.
7. Acclimatazione della batteria a 25 °C e carica a fondo.

L'autoscarica è quantificata tramite il seguente parametro, dato dal rapporto tra la diminuzione di energia causata dall'autoscarica e l'energia massima ideale:

$$\text{tasso di autoscarica} = 1 - \left(\frac{V(t)}{V_{max}} \right)^2 \quad (7.11)$$

La prova sarà ripetuta inoltre per 4 valori di temperatura ambiente, pari a -20, 5, 25, 45 °C.

8 Prove specialistiche per veicolo elettrico ibrido

8.1 Prova per il calcolo del picco di potenza (HPPC test)

L'HPPC test è una prova che consiste nella ripetizione a intervalli prestabiliti di un ciclo caratterizzato da una fase di scarica e una di ricarica a corrente costante con elevati valori di corrente. Il ciclo è stato progettato con lo scopo di simulare il comportamento di una batteria di SC utilizzata per la propulsione di un veicolo ibrido, per cui la fase di ricarica simula la frenatura rigenerativa e il valore di corrente e la durata delle fasi sono caratteristici di quel tipo di applicazione.

L'obiettivo dell'HPPC test è misurare il picco di potenza in carica e scarica, a diversi valori del SOC e diverse temperature ambiente. La prova permette di stimare inoltre la resistenza interna istantanea di carica e scarica a diversi valori del SOC.

Il ciclo base si compone delle seguenti fasi:

1. una fase di scarica a corrente costante pari a I_{dch} della durata di 10 s
2. una pausa della durata di 40 s
3. una fase di carica a corrente costante pari a I_{ch} della durata di 10 s
4. una pausa della durata di 40 s
5. una scarica con corrente I_{ref} della durata di 72 s, che determina una riduzione del SOC del 10%

La corrente di scarica I_{dch} è scelta come la minore tra la corrente massima di scarica fornita dal costruttore I_{max} e la corrente che per valori del SOC prossimi al 10% garantisce una scarica della durata di 10 s, senza raggiungere il valore di tensione di fine scarica.

Analogo discorso vale per la corrente di carica I_{ch} , che è scelta come la minore tra I_{max} e la corrente che per valori del SOC prossimi al 90% garantisce una carica della durata di 10 s, senza raggiungere il valore di tensione massimo di batteria.

La Figura 4 mostra l'andamento della corrente erogata dalla batteria durante un ciclo di lavoro.

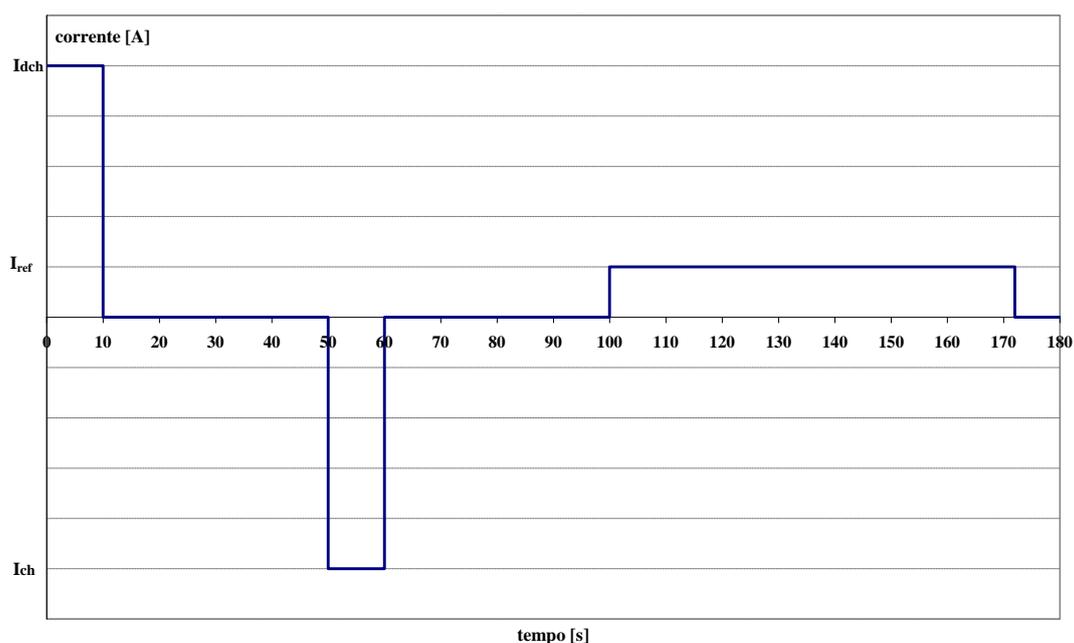


Figura 4. Ciclo base per l'HPPC test.

Il ciclo base viene ripetuto per diversi valori del SOC. Più dettagliatamente la prova complessiva si compone delle seguenti fasi:

1. acclimatazione della batteria di SC in camera climatica alla temperatura ambiente di riferimento pari a 25 °C
2. carica a fondo secondo la procedura descritta in § 6.1.1;
3. acclimatazione alla temperatura di prova e pausa per permettere alla tensione di stabilizzarsi al termine della carica. Questa fase deve durare il tempo minimo necessario alla stabilizzazione della tensione per evitare che l'autoscarica influenzi i risultati di prova;
4. esecuzione del ciclo base secondo la procedura sopra descritta;
5. pausa per permettere la stabilizzazione della tensione, questa fase deve durare il tempo minimo necessario alla stabilizzazione della tensione per evitare che l'autoscarica influenzi i risultati di prova;
6. ripetizione delle fasi 4,5 per dieci volte o fino al raggiungimento della scarica completa della batteria di SC, ovvero della tensione di fine scarica V_{min} ;
7. carica a fondo secondo la procedura descritta in § 6.1.1.

La prova deve essere interrotta inoltre in caso di superamento del limite massimo di tensione e/o della massima temperatura di lavoro.

Durante la prova devono essere registrate la tensione e corrente di batteria, quando possibile la tensione di modulo o di cella e la temperatura dei punti critici della batteria. La minima frequenza di campionamento dovrà essere pari a 100 Hz durante i picchi di scarica e di carica, può scendere a 1 Hz nella scarica a Iref effettuata per ridurre il SOC del 10%.

La prova deve essere ripetuta per quattro diversi valori di temperatura, pari a -20, 5, 25, 45 °C

La prova permette di effettuare una stima del picco di potenza in scarica/carica al variare dello stato di carica della batteria e della temperatura ambiente di lavoro a partire dal calcolo della resistenza interna di scarica e carica per i diversi valori del SOC.

La resistenza interna di scarica della batteria può essere calcolata utilizzando la seguente formula:

$$R_{dch_K} = \frac{|V(T_K) - V(0)|}{|I(T_K) - I(0)|} \quad (8.1)$$

dove $V(0)$, $I(0)$ sono rispettivamente la tensione e corrente della batteria di SC misurate all'istante 0 del ciclo di lavoro di **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**, e $V(T_K)$, $I(T_K)$ sono la tensione e corrente della batteria di SC misurate all'istante T_K , che assume i valori 0,1; 2; 10 s.

A partire dalla misura della resistenza interna di scarica si può ricavare la stima del picco di potenza in base alla seguente formula:

$$P_{dch_K} = \frac{V_{dch} \cdot (OCV - V_{dch})}{R_{dch_K}} \quad (8.2)$$

dove V_{dch} è pari al valore maggiore tra V_{min} e $OCV/2$ e OCV è la tensione a circuito aperto della batteria di SC misurata immediatamente prima dell'inizio della fase di scarica del ciclo base.

Ripetendo il calcolo per ciascuna iterazione del ciclo base di **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** è possibile ottenere la stima della resistenza interna di scarica e della potenza di picco per diversi valori del SOC della batteria di SC.

La resistenza interna di carica può essere calcolata utilizzando la seguente formula:

$$R_{ch_K} = \frac{|V(50 + T_K) - V(50)|}{|I(50 + T_K) - I(50)|} \quad (8.3)$$

dove $V(50)$, $I(50)$ sono rispettivamente la tensione e corrente della batteria di SC misurate all'istante 58 del ciclo di lavoro di **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**, ovvero all'istante di inizio della fase di scarica, mentre $V(50+T_K)$, $I(50+T_K)$ sono la tensione e corrente della batteria di SC misurate all'istante $50+T_K$. A partire dalla misura della resistenza interna di scarica per le diverse durate temporali di scarica T_K si può ricavare la stima del picco di potenza in base alla seguente formula:

$$P_{ch_K} = \frac{V_{max} \cdot (V_{max} - OCV)}{R_{ch_K}} \quad (8.4)$$

dove V_{max} è la tensione massima della batteria di SC, il cui valore è riportato nel datasheet del costruttore, e OCV è la tensione a circuito aperto della batteria misurata immediatamente prima della fase di carica.

Ripetendo il calcolo per ciascuna iterazione del ciclo base di **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** è possibile ottenere la stima della resistenza interna di carica e della potenza di picco di carica per diversi valori del SOC della batteria di SC.

La prova permette di ottenere quindi una stima della resistenza interna in carica e scarica e della potenza di picco in carica e scarica per intervalli temporali pari a 0,1; 2; 10 secondi, a varie temperature ambiente.

8.2 Prova di avviamento a freddo per veicoli ibridi (cold cranking test)

Il cold cranking test è una prova tipica delle applicazioni veicolari e si propone di verificare la capacità del sistema di accumulo di garantire la partenza del veicolo elettrico anche a bassa temperatura di lavoro. Il ciclo di prova è costruito in modo da simulare il profilo di potenza richiesto alla batteria in fase di avviamento del veicolo. L'obiettivo della prova è verificare la capacità della batteria di SC di fornire picchi di potenza a temperature di lavoro molto basse. Il ciclo di prova si compone di una fase di scarica a potenza costante della durata di 2 s, alternata ad una pausa di 10 s, ed è ripetuto per 3 volte, come mostrato in Figura 5. La prova ha inizio con batteria di SC pienamente carica (SOC = 100%), il valore di potenza è uguale per tutte e tre le fasi di scarica e si può calcolare utilizzando la seguente formula

$$P_{test} [W] = \frac{E_{ref} [J]}{3 * 6 s} \quad (8.5)$$

dove l'energia di riferimento è calcolata utilizzando il metodo descritto nel § 7.2. Nel caso in cui la corrente erogata dalla batteria di SC durante la prova determini il superamento del valore massimo di corrente, riportato nel datasheet della batteria, si dovrà abbassare il set-up di potenza, portandolo ad un valore tale da garantire che tale limite non sia superato. Tale valore è pari a $I_{max} * V_{test}$, dove V_{test} è il valore maggiore tra V_{min} e $0,5V_{max}$.

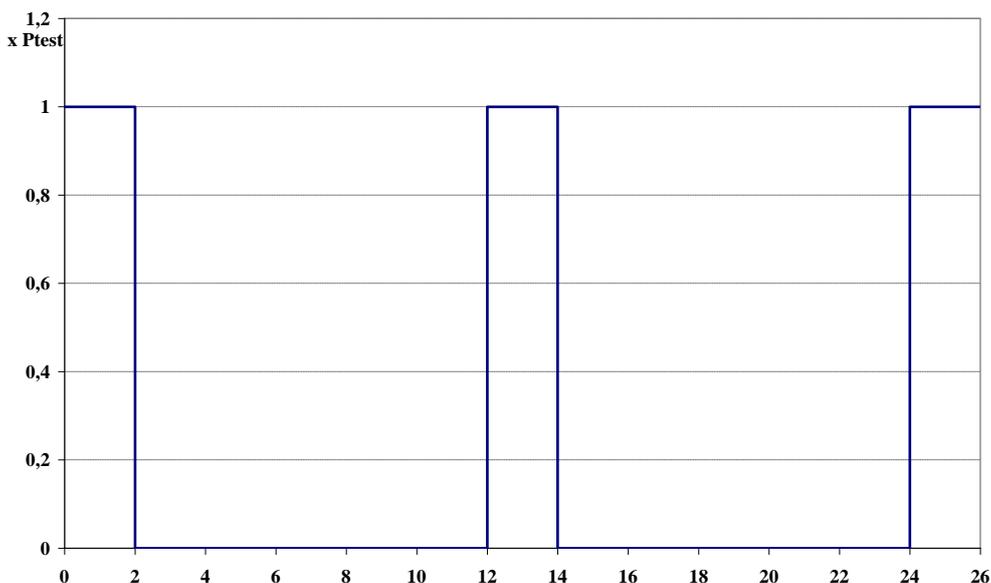


Figura 5. Ciclo di lavoro per il Cold Cranking test.

La prova complessiva si compone delle seguenti fasi:

1. carica a fondo della batteria secondo la procedura descritta in § 6.1.1, alla temperatura di riferimento di 25 °C
2. acclimatazione della batteria in camera termica alla temperatura di -30 °C
3. esecuzione del ciclo di prova sopra descritto, impostando un set-up di potenza pari a P_{test} .
4. acclimatazione della batteria fino alla temperatura ambiente di 25 °C
5. carica a fondo della batteria, secondo la procedura descritta in § 6.1.1

La prova deve essere interrotta nel caso in cui la tensione di batteria scenda al di sotto del valore di fine scarica V_{min} .

8.3 Carica rapida (frenatura rigenerativa)

La prova ha come obiettivo verificare le prestazioni della batteria di SC durante una carica rapida che simula la fase di frenatura rigenerativa di un veicolo elettrico e consiste nel sottoporre la batteria di SC ad una carica a corrente costante con valori crescenti di corrente e di durata, partendo da batteria parzialmente scarica (con un valore del SOC pari a circa il 30%).

Nel corso della prova la tensione dei SC non deve scendere al di sotto di un valore pari a $0,3V_{max}$, inoltre in fase di carica deve essere limitata a V_{max} .

La procedura si compone delle seguenti fasi:

1. acclimatazione in camera climatica alla temperatura ambiente di riferimento, pari a 25°C
2. carica a fondo secondo la procedura descritta nel § 6.1.1
3. scarica a corrente costante pari a I_{ref} fino a raggiungere una tensione pari a $0,3V_{max}$
4. pausa di 30 s
5. carica a corrente costante, con i valori di corrente e di durata temporale riportati in Tabella 2
6. pausa di 30 s
7. ripetizione delle fasi 3,4,5,6 per 9 volte, variando i set-up di corrente e durata della fase di carica secondo i valori riportati in Tabella 2. La tensione di batteria durante le fasi di carica non deve superare il limite massimo pari a V_{max} .
8. scarica a corrente costante pari a I_{ref} fino a raggiungere una tensione pari a $0,3V_{max}$

Se la corrente di carica non è in linea con le caratteristiche del campione, si devono considerare differenti livelli di corrente, scelti in accordo con le specifiche del Costruttore.

Tabella 2. set-up di corrente e durata della fase di ricarica della prova di carica rapida

N° ciclo	Corrente [A]	Durata [s]
1	$0,5 * I_{max}$	5
2	$0,75 * I_{max}$	5
3	I_{max}	5
4	$0,5 * I_{max}$	10
5	$0,75 * I_{max}$	10
6	I_{max}	10
7	$0,5 * I_{max}$	15
8	$0,75 * I_{max}$	15
9	I_{max}	15

L'intera prova deve essere ripetuta completamente a partire dalla fase 3 (escludendo quindi la fase di acclimatazione alla temperatura di prova) per tre volte senza interruzioni. La terza ripetizione è quella considerata per l'acquisizione dei dati.

In Figura 6 è mostrato il profilo di prova.

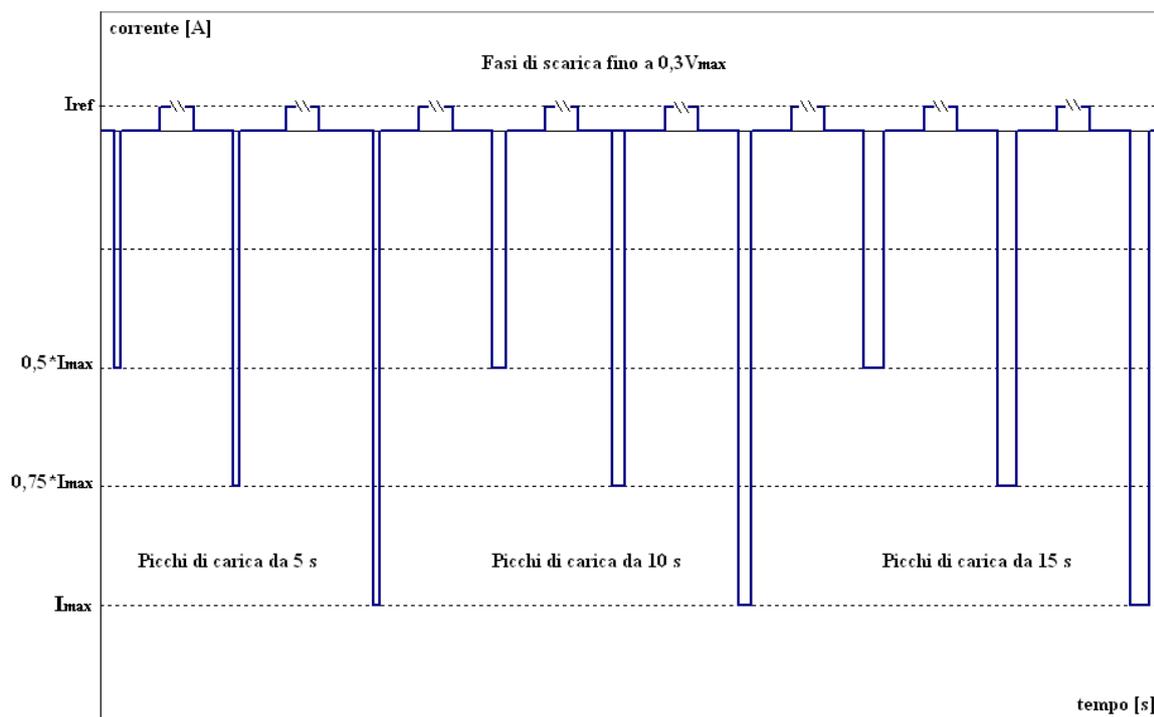


Figura 6. Profilo di corrente della prova di carica rapida.

Durante la prova devono essere acquisite la tensione e corrente di batteria, quando possibile la tensione di modulo o di cella e la temperatura dei punti critici. La frequenza di campionamento minima deve essere di 1 Hz nelle fasi di carica/scarica, può scendere a 0,1 Hz nelle fasi di acclimatazione e stand-by.

Il risultato della prova è espresso dal seguente parametro, dato dal rapporto tra l'energia fornita al campione nella fase di carica rapida e l'energia massima del SC, secondo le seguenti formule:

$$EnergyLevelFastCharge[\%] = \frac{E_{stored} * 100}{E_{max}} \quad (8.6)$$

$$E_{max} = \frac{1}{2} C_F V_{max}^2 \quad (8.7)$$

$$E_{stored} = \frac{1}{2} C_F OCV^2 \quad (8.8)$$

Dove OCV è la tensione al termine di ciascuna fase di carica rapida. Il calcolo deve essere ripetuto per ciascuna fase di scarica.

8.4 Scarica rapida (accelerazione)

La prova ha come obiettivo verificare le prestazioni della batteria di SC durante una scarica rapida che simula la fase di accelerazione di un veicolo elettrico e consiste nel sottoporre la batteria di SC ad una scarica a corrente costante, partendo da batteria carica, con valori crescenti di corrente e di durata. Nel corso della prova la tensione dei SC non deve scendere al di sotto di un valore pari a V_{min} , inoltre in fase di carica deve essere limitata a V_{max} .

La procedura si compone delle seguenti fasi:

1. acclimatazione in camera climatica alla temperatura ambiente di riferimento, pari a 25°C
2. carica con corrente pari a $10I_{ref}$ fino al raggiungimento della tensione massima V_{max}
3. pausa di 30 s
4. scarica a corrente costante, con i valori di corrente e di durata temporale riportati in Tabella 3. La tensione di batteria in ciascuna fase di scarica non deve superare il limite minimo V_{min}
5. pausa di 30 s.
6. ripetizione delle fasi 2,3,4,5 per 9 volte variando i set-up di corrente e durata della fase di scarica secondo quanto riportato in Tabella 3. La tensione di batteria durante le fasi di carica non deve superare il limite minimo V_{min} .
7. carica con corrente pari a $10I_{ref}$ fino al raggiungimento della tensione massima V_{max}

Se la corrente di scarica non è in linea con le caratteristiche del campione, si devono considerare differenti livelli di corrente, scelti in accordo con le specifiche del Costruttore.

Tabella 3. Set-up di corrente e durata della fase di scarica della prova di scarica rapida.

N° ciclo	Corrente [A]	Durata [s]
1	$0,5 * I_{max}$	5
2	$0,75 * I_{max}$	5
3	I_{max}	5
4	$0,5 * I_{max}$	10
5	$0,75 * I_{max}$	10
6	I_{max}	10
7	$0,5 * I_{max}$	15
8	$0,75 * I_{max}$	15
9	I_{max}	15

L'intera prova deve essere ripetuta completamente a partire dalla fase 2 (escludendo quindi la fase di acclimatazione alla temperatura di prova) per tre volte senza interruzioni. La terza ripetizione è quella considerata per l'acquisizione dei dati. La Figura 7 mostra il profilo di corrente durante la prova di scarica rapida.

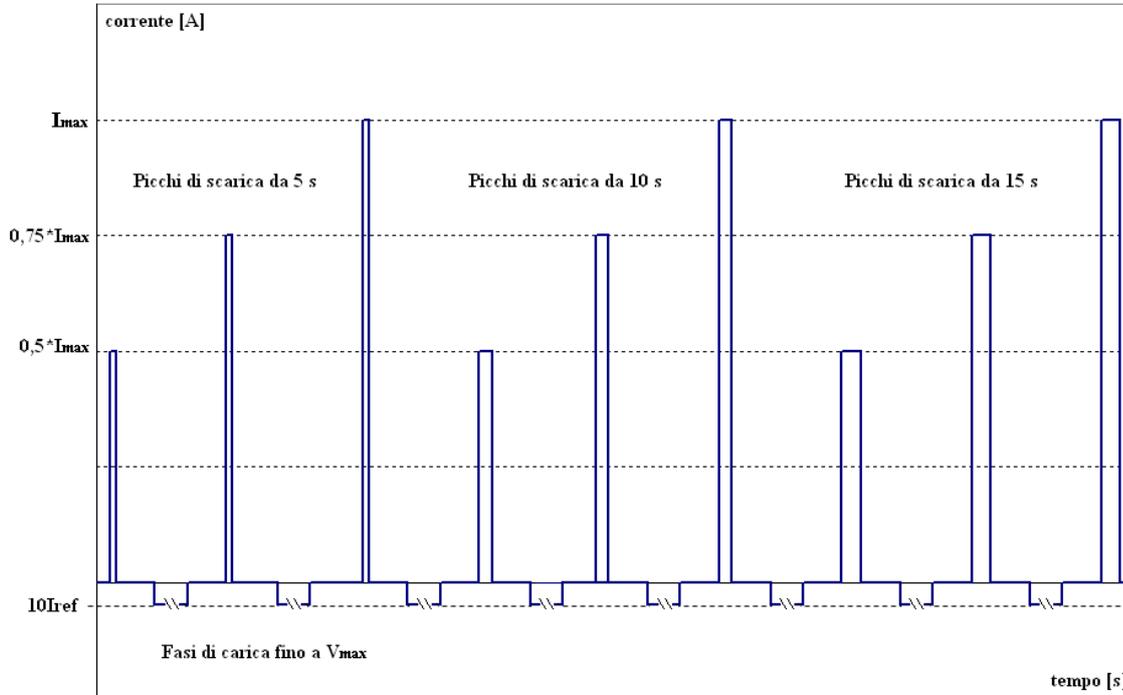


Figura 7. Profilo di corrente della prova di scarica rapida.

Il risultato della prova è espresso dal seguente parametro, pari alla percentuale di energia utilizzata nella scarica rapida, riferito all'energia massima del SC. Il parametro è calcolabile utilizzando le seguenti formule:

$$EnergyLevelFastDisch \text{ arg } e[\%] = \frac{E_{\max} - E_{\text{residual}}}{E_{\max}} * 100 \quad (8.9)$$

$$E_{\max} = \frac{1}{2} C_F V_{\max}^2 \quad (8.10)$$

$$E_{\text{residual}} = \frac{1}{2} C_F OCV^2 \quad (8.11)$$

dove OCV è la tensione a vuoto al termine di ciascuna fase di scarica. Il calcolo deve essere ripetuto per ciascuna fase di scarica.