



Ricerca di Sistema elettrico

Costruzione di un ciclo di prova per il test di vita di un accumulo per la metropolitana di Bergamo e sua esecuzione

Manlio Pasquali

COSTRUZIONE DI UN CICLO DI PROVA PER IL TEST DI VITA DI UN ACCUMULO PER LA METROPOLITANA DI BERGAMO E SUA ESECUZIONE

Manlio Pasquali (ENEA)

Settembre 2014

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2013

Area: Governo, gestione e sviluppo del sistema elettrico nazionale

Progetto: Sistemi avanzati di accumulo dell'energia

Obiettivo: Analisi sperimentali di identificazione di cicli rappresentativi e di sicurezza di sistemi di accumulo elettrochimico

Responsabile del Progetto: Mario Conte, ENEA



Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE	5
2 COSTRUZIONE DI UN CICLO DI TEST PER LA METROPOLITANA LEGGERA DI BERGAMO	7
2.1 DIMENSIONAMENTO DI UN SISTEMA DI ACCUMULO PER LA METRO DI BERGAMO.....	7
2.2 CARATTERIZZAZIONE DEL CICLO DI RIFERIMENTO	11
2.3 STRUTTURA DEL CICLO DI RIFERIMENTO E SUA COSTRUZIONE	13
2.4 IMPLEMENTAZIONE DEL CICLO DI RIFERIMENTO PER UN TEST DI LABORATORIO	21
2.5 ESECUZIONE DEL TEST.....	23
3 CONCLUSIONI.....	27
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	28

Sommario

Il presente documento illustra la procedura di sviluppo di un ciclo di laboratorio concepito per eseguire una prova di vita per un accumulo elettrochimico: in particolare la procedura permette, partendo da un qualsiasi profilo temporale di corrente di batteria, di crearne uno ad esso equivalente in termini di profondità di scarica, valori di picco e dissipazione termica sulle resistenze.

Il ciclo è costituito da soli gradini ed è quindi facilmente implementabile in laboratorio, può essere caratterizzato con semplicità ed associato ad una 'classe' di cicli test aventi la stessa struttura e caratteristiche simili.

La procedura di costruzione del ciclo di test ha validità del tutto generale: nel lavoro viene considerato come esempio applicativo quello dell'installazione di un sistema di accumulo nella metropolitana di Bergamo, per esso si definisce il ciclo di test e si verifica la correttezza di quanto fatto tramite una prova preliminare di laboratorio.

1 Introduzione

L'introduzione di sistemi di accumulo di tipo elettrochimico nelle reti elettriche consente di migliorarne le possibilità di gestione e l'efficienza complessiva: la valutazione economica di questi vantaggi è un tema complesso che non può, tra le altre considerazioni, prescindere da una stima della vita operativa dell'accumulo stesso. La vita di una batteria non viene espressa in termini temporali ma di cicli: in genere il costruttore fornisce una stima della durata di vita considerando dei cicli standard di carica e scarica completa della stessa, questa informazione però non è utile quando il ciclo di lavoro effettivo si discosta sensibilmente da quello standard.

La vita di un sistema di accumulo dipende sia dalla tecnologia con cui è realizzato che dal suo utilizzo, i cicli di lavoro giornalieri, la profondità di scarica, la gestione della temperatura: per questo motivo occorre sviluppare strumenti teorici e di laboratorio in grado di fornire una stima affidabile della sua durata e prestazioni per la particolare applicazione in cui verrà utilizzato [1].

Per una specifica applicazione è possibile eseguire una prova vita in laboratorio: la prova è composta da una successione di cicli equivalenti a quelli di lavoro inframmezzati da cicli standard di carica/scarica che permettono di valutare la capacità residua e la resistenza interna delle batterie.

In un'applicazione reale il ciclo di lavoro viene definito tramite una sequenza temporale di corrente o di potenza erogata/assorbita dalla batteria, una volta che lo si è definito non è detto a priori che esso sia riproducibile in laboratorio né che farlo sia effettivamente utile ai fini di una ricerca che voglia far parte di uno studio più ampio e non essere limitata al singolo caso in esame: per questo motivo diviene importante dotarsi di strumenti che permettano di costruire un ciclo equivalente a quello effettivo ma sia adatto alla implementazione in laboratorio e permetta di caratterizzare le batterie in modo semplice.

In generale si può pensare di definire una serie di cicli "Standard" equivalenti a quelli reali composti da sequenze di gradini di corrente che schematizzano sia i picchi di lavoro che quelli di carica/scarica continuativa a cui sono sottoposte le batterie: la realizzazione di questi cicli permette anche di rilevare con le procedure standard parametri come la resistenza ohmica o la potenza specifica e di poter pensare di realizzare 'famiglie' di cicli test comparabili tra di loro per caratterizzare determinate applicazioni.

La definizione del ciclo di lavoro reale può avvenire in modo deterministico o statistico in funzione dell'applicazione considerata, ad es. se si associa l'accumulo ad una macchina operatrice che esegue un lavoro sequenziale la definizione del ciclo sarà deterministica, se invece si considera il nodo di una rete elettrica di distribuzione pubblica l'approccio sarà necessariamente probabilistico [2].

Oltre ad una motivazione di ricerca la realizzazione di cicli standard permette, come detto, di ovviare ad eventuali problemi di implementazione in laboratorio di cicli di lavoro effettivi: infatti non sempre la strumentazione a disposizione è in grado di riprodurli.

Le macchine sviluppate per testare le batterie sono i ciclatori o i sistemi accoppiati alimentatore/carico elettronico (macchine che possono imporre una corrente da erogare/assorbire alle batterie): in genere queste macchine sono pensate per seguire dei profili di corrente/potenza/tensione caratterizzati da variazioni a gradino della stesse o, al contrario, eseguono variazioni continue ma con una dinamica lenta (es. ricarica a tensione costante).

Solo alcuni ciclatori dispongono di una funzione che accetta in ingresso un profilo temporale di corrente o potenza comunque variabile (all'interno di precisi limiti di campionamento e di variazione dinamica della potenza e/o corrente) per riprodurlo in un test specifico.

In generale anche in uno strumento predisposto per seguire un profilo temporale di corrente o potenza che non sia una semplice successione di gradini ma sia in grado di seguire un andamento come quello mostrato in Figura 1.

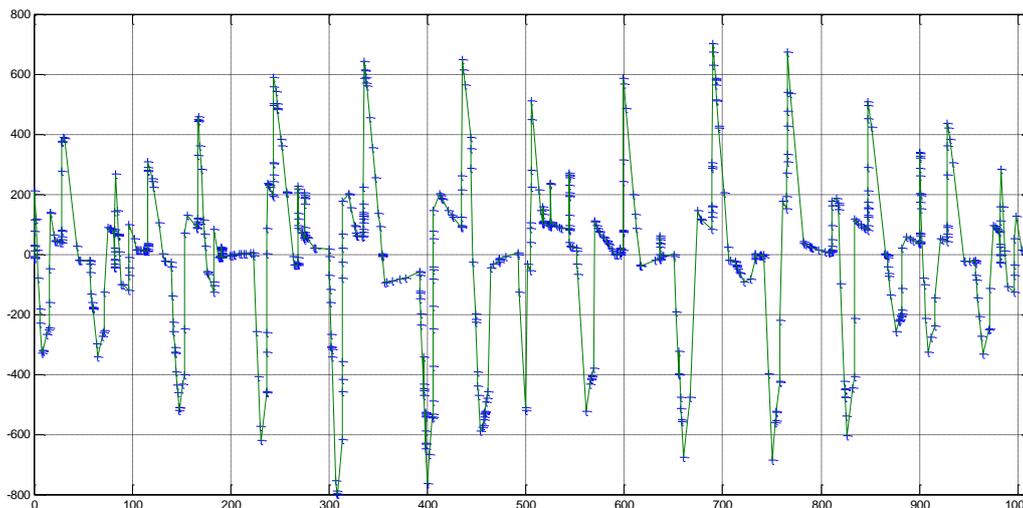


Figura 1. Andamento di corrente

Si possono avere problemi di instabilità causati dal sistema di controllo, tali problemi possono insorgere anche dopo mesi di lavoro: infatti in una prova vita cambiano nel tempo i parametri dinamici della batteria (resistenze ed impedenze interne) e di conseguenza anche il controllo si deve adattare.

Per i suddetti motivi il tema della realizzazione di cicli 'standard' di prova equivalenti ai cicli reali di lavoro di un accumulo elettrochimico è un tema di interesse nella ricerca [2]: nel presente lavoro si vuole fornire un esempio pratico di realizzazione di un tale ciclo, in questo caso per una applicazione stazionaria di tipo ferroviario.

L'Enea e l'Università di Pisa hanno realizzato, nell'ambito della ricerca di sistema, uno studio volto alla installazione di un sistema di accumulo di tipo stazionario nella metropolitana leggera di Bergamo: scopo del sistema è recuperare l'energia in frenata prodotta dai treni e renderla disponibile allo stesso treno o ad uno diverso nella fase di accelerazione, in questo modo oltre a recuperare l'energia cinetica dei convogli si riducono anche le correnti della linea di alimentazione e le variazioni di tensione e potenza della stessa. Per valutare la convenienza dell'adozione delle batterie è stato realizzato da Pisa un simulatore della tranvia che ricostruisce gli andamenti di corrente e potenza erogati o assorbiti dalle sottostazioni di alimentazione della metro in funzione del numero di treni in servizio, la loro posizione e velocità: i dati di lavoro sono stati forniti dalla TEB di Bergamo che gestisce l'impianto, e il simulatore è stato validato installando degli strumenti di misura nelle sottostazioni in esame [3]. Il simulatore ha permesso di esaminare diverse configurazioni di sistema mettendo in evidenza che la migliore scelta tecnico/economica è quella di installare tre moduli batterie in tre sottostazioni della tranvia: per ognuno di questi moduli è possibile ricavare l'andamento delle correnti erogate ed assorbite in funzione dell'esercizio della linea.

Lo scopo del presente lavoro è quello di ricavare da un profilo di corrente comunque variabile nel tempo un ciclo di test ad esso equivalente pensato per sviluppare delle prove vita di laboratorio.

Il lavoro verrà svolto considerando l'esempio della metropolitana di Bergamo, utilizzando un approccio che può essere generalizzato ad ogni altro caso applicativo.

2 Costruzione di un ciclo di test per la metropolitana leggera di Bergamo

2.1 Dimensionamento di un sistema di accumulo per la metro di Bergamo

La metropolitana leggera di Bergamo è costituita da una linea lunga dodici chilometri che collega le stazioni di Bergamo ed Albino centro (Figura 2).



Figura 2. Metropolitana leggera di Bergamo

I tram che percorrono questa linea sono del modello Sirio, prodotto dalla Ansaldo, la linea è alimentata in corrente continua tramite dieci sottostazioni (Figura 3).



Figura 3. Sottostazioni di alimentazione della linea

Le caratteristiche delle sottostazioni sono le seguenti:

- Tensione a vuoto: 796v
- Potenza nominale: 1800kw
- Corrente nominale: 2400a
- Resistenza equivalente: 0.01327 Ω (legata alle induttanze della rete a monte)

Il sistema viene esercito con tutte le sottostazioni in parallelo e le SSE ammettono sovraccarichi del 50% per 2 ore e del 100% per un minuto.

Il singolo tram che percorre la linea assorbe potenza dalla rete nella fase di accelerazione ed è in grado di restituirne una parte nella fase di frenatura (Figura 4).

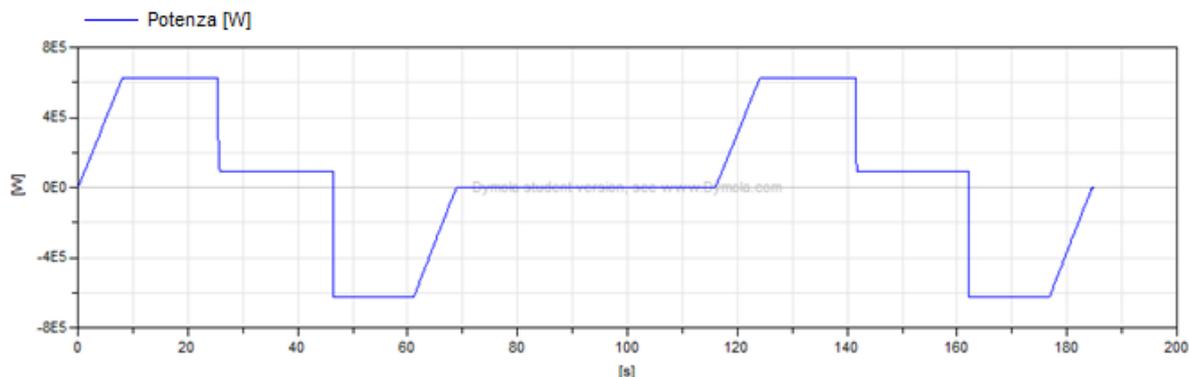


Figura 4. Andamento della potenza assorbita/erogata dal convoglio durante il ciclo

Attualmente il recupero in rete è limitato e la maggior parte dell'energia viene dissipata su resistenze. Come detto precedentemente l'Enea e l'Università di Pisa hanno avviato uno studio per valutare i costi ed i possibili vantaggi economici derivanti dalla installazione di uno o più sistemi di accumulo, distribuiti nelle varie sottostazioni di alimentazione della rete, che possano recuperare l'energia messa a disposizione dai treni: a questo scopo l'Università ha realizzato un simulatore della tranvia in grado di fornire l'andamento delle grandezze elettriche di ogni componente del sistema, accumulo compreso, in funzione della condizione di esercizio della linea [4].

L'utilizzo del simulatore ha permesso di analizzare diverse soluzioni di installazione delle batterie con i relativi dimensionamenti: una soluzione di interesse consiste nell'installare tre moduli di batterie al litio nelle sottostazioni 1, 4 e 9 aventi queste caratteristiche:

- Numero di celle: 220
- Tensione nominale di cella: 3,7 V
- Tensione del pacco: 814 V
- Capacità nominale: 100 Ah
- Corrente di picco: 10C

I parametri di batteria utilizzati per costruire il modello dell'accumulo derivano dalle celle Kokam da 100 Ah.

Il simulatore permette di ricavare l'andamento delle correnti di batteria in funzione delle condizioni di lavoro della rete, la presenza di tram, della loro posizione, velocità ed accelerazione.

La TEB, la società che gestisce la linea, ha fornito le tabelle orarie dei tram, relative a tutte le condizioni di lavoro annuali (giorno feriale, festivo, stagione invernale, estiva e così via), in particolare, considerando la presenza contemporanea di cinque tram sulla linea per tutto il periodo giornaliero, le batterie associate alle sottostazioni dovranno erogare i profili di corrente mostrati nelle Figure 4-6.

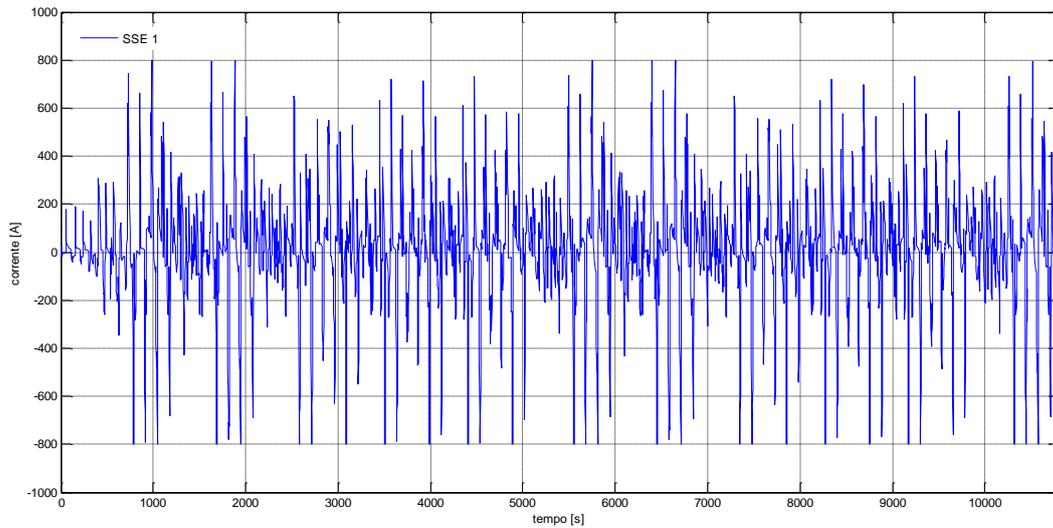


Figura 4. Corrente erogata/assorbita dall'accumulo della sottostazione uno

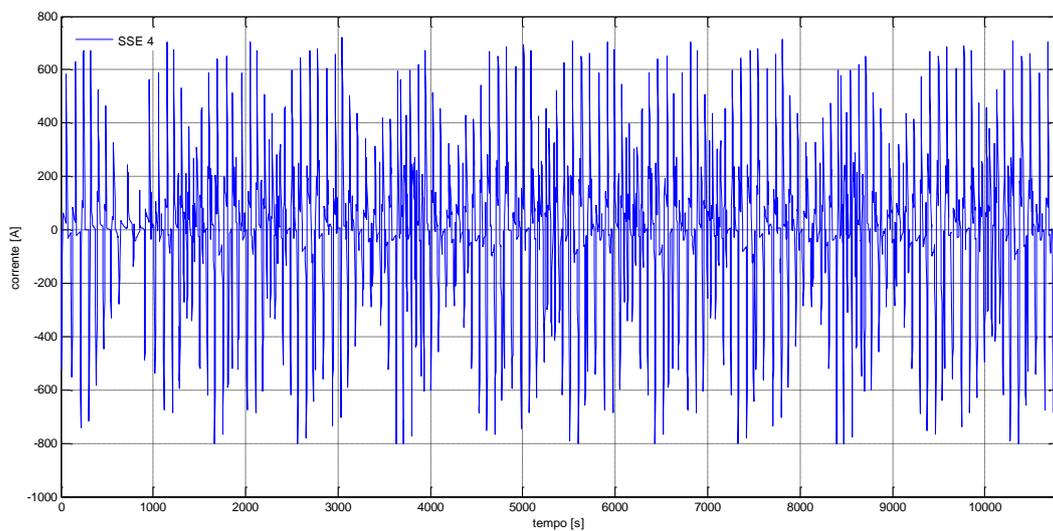


Figura 5. Corrente erogata/assorbita dall'accumulo della sottostazione quattro

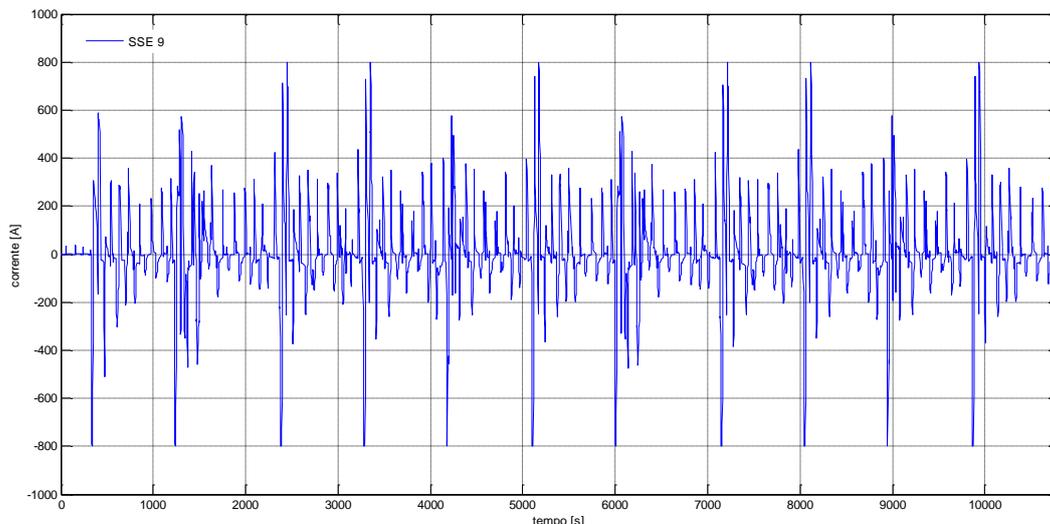


Figura 6. Corrente erogata/assorbita dall’accumulo della sottostazione nove

Le Figure 4-6 mostrano che il sistema di accumulo viene utilizzato come una riserva di potenza più che come una riserva di energia ed esegue cicli caratterizzati dalla erogazione ed assorbimento di correnti impulsive legate alle fasi di accelerazione e frenatura dei veicoli.

Nel seguito dello studio per caratterizzare i cicli di lavoro non ci si riferirà all’intero modulo batterie ma ad una delle singole celle che lo compongono: nel caso in esame il modulo è costituito dalla serie di 220 celle elementari, di conseguenza la corrente sarà uguale per tutte mentre la potenza erogata o assorbita da una di esse è 1/220 di quella totale.

Per la singola cella estrapolando i valori massimi dei picchi di corrente si ricava la Tabella 1.

Tabella 1. Correnti e Potenze massime erogate/assorbite da una cella del pacco batterie

Sottostazione	Corrente Massima [A]	Corrente Minima [A]	Potenza Massima [kW]	Potenza Minima [kW]	EJoule [kJ]
SS1	800	-800	2.52	-2.20	1762
SS4	720	-800	2.24	-2.18	2188
SS9	800	-800	2.5	-2.18	1057

Con E_{Joule} si intende l’energia totale dispersa a causa delle perdite Joule sulla resistenza interna della cella in una intera giornata di lavoro:

$$E_{Joule} = \int_0^T ri^2 dt \tag{1}$$

Le perdite per effetto Joule sono responsabili dell’innalzamento della temperatura di cella e costituiscono quindi un parametro fondamentale di caratterizzazione del ciclo: per il calcolo si è assunta una resistenza interna di cella pari a 3 mΩ. L’idea base che si vuole seguire nella costruzione del ciclo di riferimento per il test di vita è che esso debba essere equivalente a quelli di lavoro anche da un punto di vista termico e non solo in termini di correnti di picco ed energia erogata.

La Tabella 2 riporta per le tre SSE le variazioni massime dello stato di carica durante l'intero ciclo giornaliero e la differenza tra gli stati di carica iniziale e finale con i corrispondenti Amperora.

Tabella 2. Variazioni di stato di carica tra inizio e fine giornata

Sottostazione	SOC max	SOC min	Δ SOC	Δ SOC _{if}	Δ Ah _{if}
SSE 1	0.56	0.48	0.08	-0.04	-4.3
SSE 4	0.71	0.5	0.21	-0.18	-18.7
SSE 9	0.55	0.47	0.08	-0.03	-3.19

Si noti che la variazione di SOC tra inizio e fine giornata è praticamente nulla in due dei tre casi esaminati.

2.2 Caratterizzazione del ciclo di riferimento

Dalle Figure 4, 5 e 6 si evince anche che l'andamento della corrente è approssimabile con uno periodico, legato alle frequenze periodiche del passaggio dei tram: anche se l'operazione non è rigorosa è possibile estrapolare un 'periodo' di funzionamento del sistema di accumulo comune a tutte e tre le sottostazioni ed i relativi tre 'cicli' di lavoro.

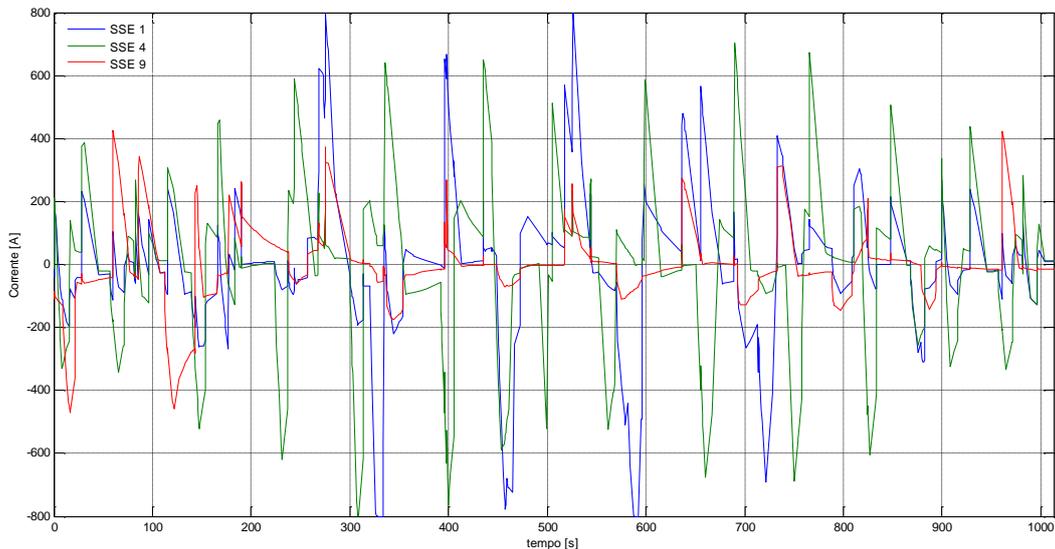


Figura 7. Correnti erogate dall'accumulo in un periodo di funzionamento

Gli andamenti riportati in Figura 7 sono la base per la costruzione di un ciclo di riferimento con cui eseguire una prova vita delle batterie.

Per costruire il ciclo si considerano le seguenti grandezze:

1. L'andamento delle correnti
2. L'andamento dello stato di carica
3. Le potenze dissipate nelle resistenze interne delle celle

La Figura 8 mostra l'andamento dello stato di carica per i tre cicli di lavoro.

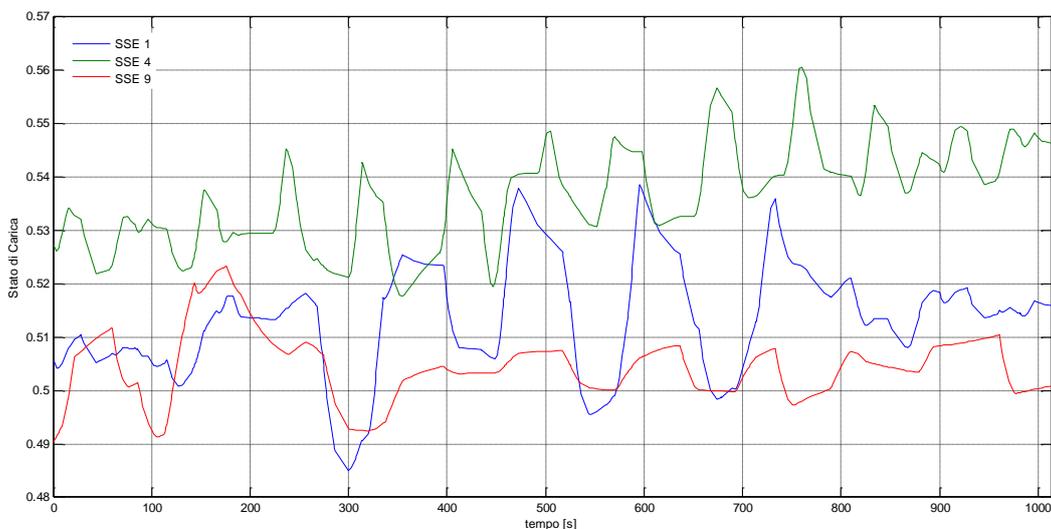


Figura 8. Andamento dello stato di carica

Nel caso in esame ipotizzando di lavorare con batterie Kokam da 100 Ah e, come detto, assumendo per semplicità per esse una resistenza interna pari a 3 mΩ, è possibile calcolare le perdite Joule associate ai tre cicli e da esse l'energia dissipata durante il funzionamento (Figura 9).

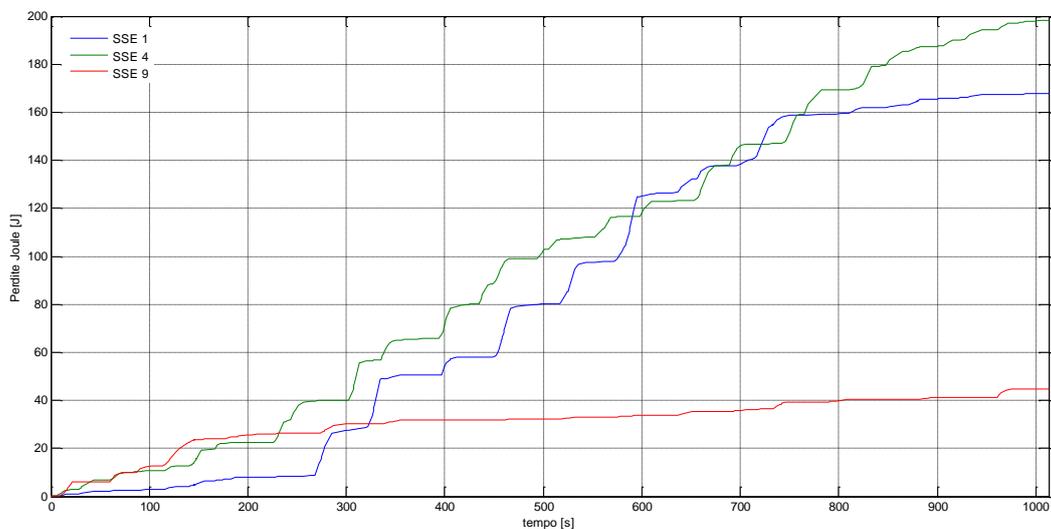


Figura 9. Perdite Joule

La Tabella 3 sintetizza quanto mostrato sopra.

Tabella 3. Parametri di caratterizzazione del ciclo di lavoro

Sottostazione	Corrente Massima [A]	Corrente Minima [A]	ΔSOC_{if}	ΔSOC_{max}	Ejoule [kJ]
SSE 1	800	-800	-0.01	-0.04	168
SSE 4	701	-800	-0.02	-0.03	198
SSE 9	426	-470	-0.01	-0.03	45

2.3 Struttura del ciclo di riferimento e sua costruzione

Dalle Tabelle 1 e 2 relative ad una intera giornata di esercizio della linea si evince che i tre andamenti esaminati sono simili ma non equivalenti fra di loro: infatti per la SSE 4 c'è una piccola differenza con le altre sottostazioni in termini di corrente massima erogata e variazione dello stato di carica. La tabella 3 mostra invece che nel periodo considerato come riferimento per il lavoro di costruzione del ciclo test la SSE 1 è quella che eroga la massima corrente in trazione ma la SSE 4 è quella che presenta le maggiori perdite Joule, mentre la SSE 9 è la sottostazione meno impegnata.

Per stimare il tempo di vita dell'accumulo in questa applicazione tramite un test di vita è necessario considerare il complesso dei tre cicli di lavoro e costruirne uno che massimizzi le sollecitazioni a cui le batterie sono sottoposte da ognuno di essi, quindi un ciclo di prova dovrà presentare:

- 1) Lo stesso numero di picchi di corrente a cui sono sottoposte le batterie o un numero maggiore
- 2) La corrente massima uguale o superiore alla massima erogata dalle batterie
- 3) La stessa variazione di stato di carica o una maggiore
- 4) La stessa potenza dissipata o una maggiore

Il ciclo che si vuole proporre è costituito da una serie di scariche e cariche a gradino, costruite in modo da rappresentare delle correnti di picco ed una corrente continuativa di carica/scarica (Figura 10).

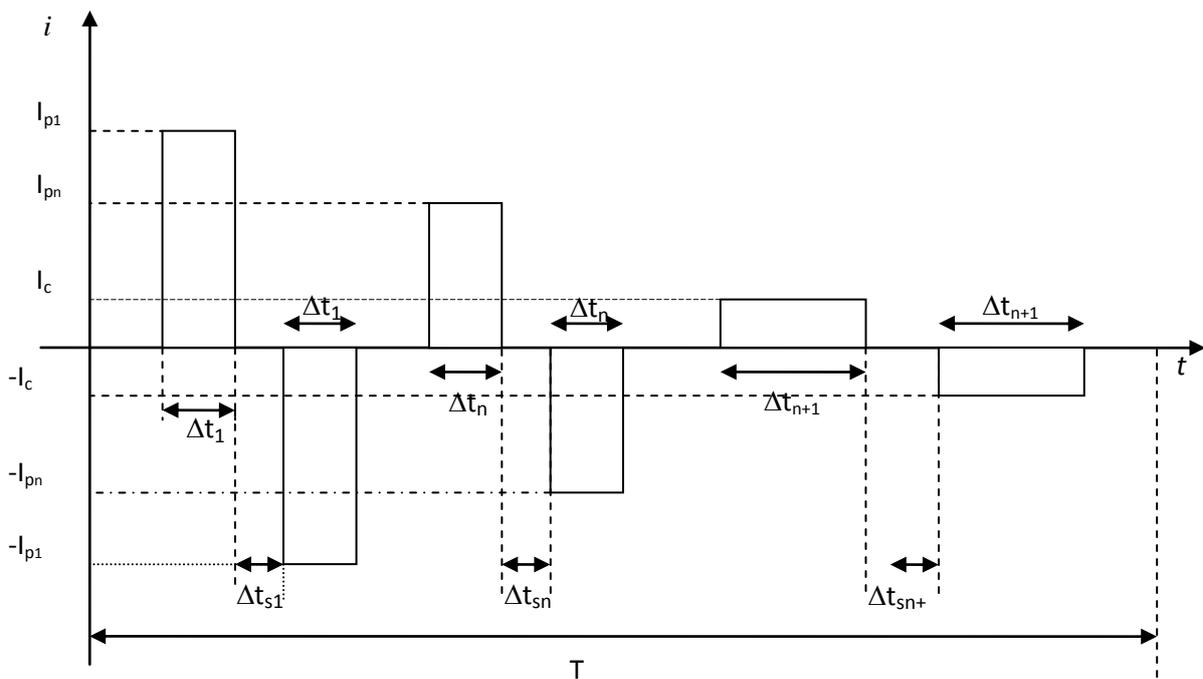


Figura 10. Struttura base del ciclo di riferimento

Le correnti di picco rappresentano la parte di potenza del ciclo originale, mentre la continuativa viene utilizzata per far variare lo stato di carica delle celle: il ciclo può essere ripetuto periodicamente in quanto lo stato di carica iniziale e finale della batteria coincidono tra di loro.

Nel caso in esame il numero di picchi di corrente è identico per le tre sottostazioni, ed è pari a quindici in scarica e quindici in carica (Figura 11)

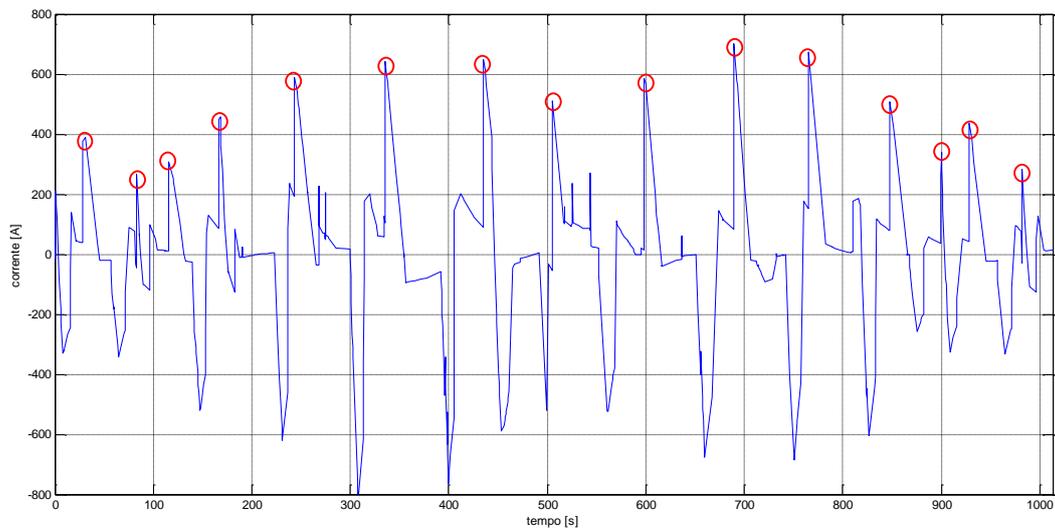


Figura 11. Picchi di corrente nella SSE 4

Nell’intervallo di tempo considerato, come si evince dalla Tabella 3 la sola SSE 1 raggiunge la corrente massima di 800 A sia in carica che in scarica e lo fa in due occasioni (Figura 12).

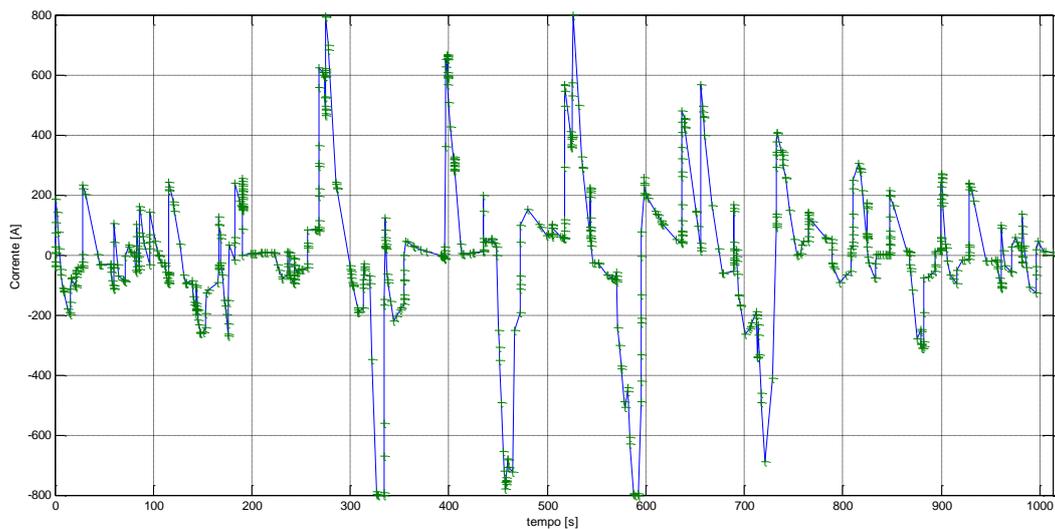


Figura 12. Corrente erogata dalla SSE 1

Se si considera un dettaglio della fase di scarica si osserva che in realtà essa può essere assimilata ad un impulso, preceduto da un gradino di corrente della durata di 5 secondi e del valore di circa 600 A e seguito da un decadimento costante (Figura 13).

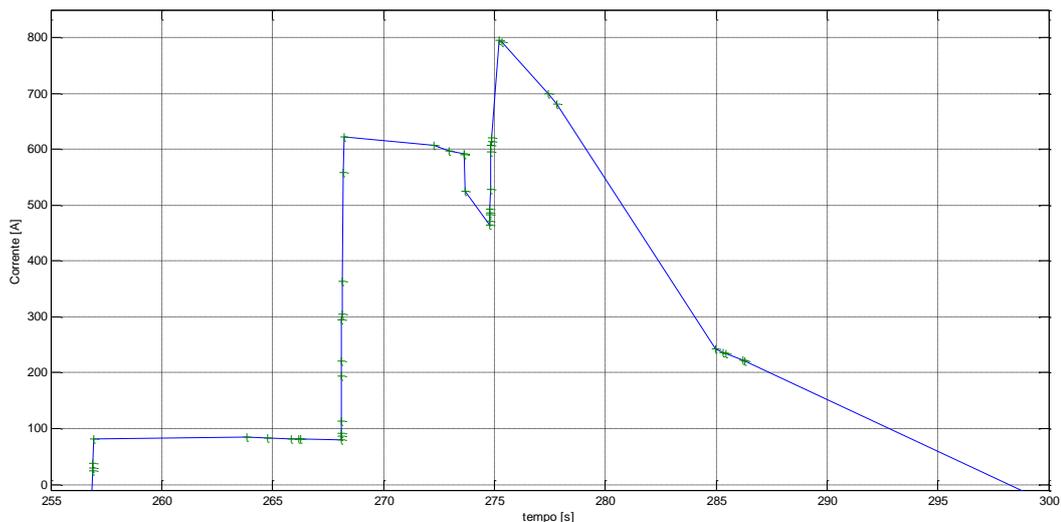


Figura 13. Picco della corrente erogata dalla SSE 1

E' possibile calcolare le perdite per effetto Joule associate a questa fase: considerando l'intervallo di tempo compreso tra il secondo 268 ed il secondo 285 esse risultano essere pari a 5.6 kJ.

Si vogliono confrontare le perdite con quelle che si avrebbero sovrapponendo due gradini di corrente della durata di 10 secondi ed aventi rispettivamente i valori di 400 A ed 800 A come mostrato in figura 14:

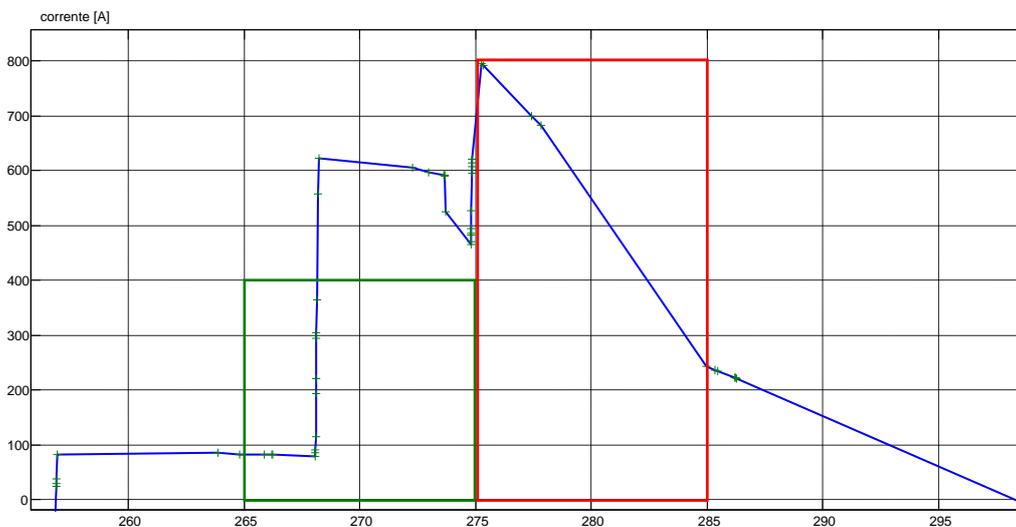


Figura 14. Gradini di corrente

In questo caso le perdite sono pari a 15.6 kJ mentre la corrente di picco viene mantenuta per dieci secondi invece che per uno solo.

La costruzione del ciclo di riferimento presenta diversi gradi di libertà, legati alla scelta dei tempi di durata dei gradini ed ai valori di corrente che essi devono avere, la scelta di questi valori non avviene però a caso: nasce dall'esame degli andamenti di corrente di batteria reali o simulati e dalla considerazione che si devono rispettare le condizioni elencate precedentemente.

L'analisi del complesso dei profili di corrente associati alle tre sottostazioni e delle relative perdite Joule ha portato a definire tre valori di riferimento per la corrente 'impulsiva' ed a stabilire una durata di 10 secondi per ognuno di essi: i valori sono 300 A, 400 A e 800 A, ad ogni impulso è associata una dissipazione di energia nelle resistenze ed una variazione di carica della cella.

Tabella 4. Valori delle correnti di picco e loro influenza sul ciclo

Corrente-tempo [As]	Energia dissipata [kJ]	ΔAh [Ah]
300 A 10 s	2.7	0.83
400 A 10 s	4.8	1.11
800 A 10 s	19.2	2.22

La corrente di picco di 800 A viene raggiunta due volte e dalla sola SSE 1, per il ciclo test si decide di ripeterla quattro volte: fissata questa condizione e considerando i tre profili si arriva a definire la seguente sequenza temporale di picchi di corrente

$\pm 300; \pm 400; \pm 300; \pm 800; \pm 300; \pm 300; \pm 800; \pm 300; \pm 300; \pm 800; \pm 300; \pm 400; \pm 300; \pm 800; \pm 300$

Si decide di non inserire una corrente ‘continuativa’ di carica/scarica da utilizzare per variare lo SOC in quanto, come mostrato nella Tabella 3, il ΔSOC dei tre cicli è estremamente limitato.

Il periodo di lavoro T del ciclo è pari a 1000 secondi: sottraendo ad esso la durata totale delle sequenze di impulsi, pari a 300 s, e considerando un intervallo di pausa iniziale e finale pari a 5 secondi si ha che gli impulsi stessi sono intervallati da un tempo di pausa di 23 s.

La Tabella 5 riporta la descrizione completa delle fasi del ciclo.

Tabella 5. Descrizione del ciclo di riferimento

Fase	Corrente [A]	Durata fase [s]	Durata complessiva ciclo [s]
Pausa	0	5	5
I costante	300	10	15
Pausa	0	23	38
I costante	-300	10	48
Pausa	0	23	71
I costante	400	10	81
Pausa	0	23	104
I costante	-400	10	114
Pausa	0	23	137
I costante	300	10	147
Pausa	0	23	170
I costante	-300	10	180
Pausa	0	23	203
I costante	800	10	213
Pausa	0	23	236
I costante	-800	10	246
Pausa	0	23	269
I costante	300	10	279
Pausa	0	23	302
I costante	-300	10	312
Pausa	0	23	335
I costante	300	10	345
Pausa	0	23	368
I costante	-300	10	378
Pausa	0	23	401
I costante	800	10	411
Pausa	0	23	434
I costante	-800	10	444
Pausa	0	23	467
I costante	300	10	477
Pausa	0	23	500
I costante	-300	10	510
Pausa	0	23	533
I costante	300	10	543
Pausa	0	23	566
I costante	-300	10	576
Pausa	0	23	599
I costante	800	10	609
Pausa	0	23	632
I costante	-800	10	642
Pausa	0	23	665
I costante	300	10	675
Pausa	0	23	698
I costante	-300	10	708
Pausa	0	23	731
I costante	400	10	741
Pausa	0	23	764
I costante	-400	10	774
Pausa	0	23	797
I costante	300	10	807
Pausa	0	23	830
I costante	-300	10	840
Pausa	0	23	863
I costante	800	10	873
Pausa	0	23	896
I costante	-800	10	906
Pausa	0	23	929
I costante	300	10	939
Pausa	0	23	962
I costante	-300	10	972
Pausa	0	23	995
Pausa	0	5	1000

La Figura 15 rappresenta il ciclo.

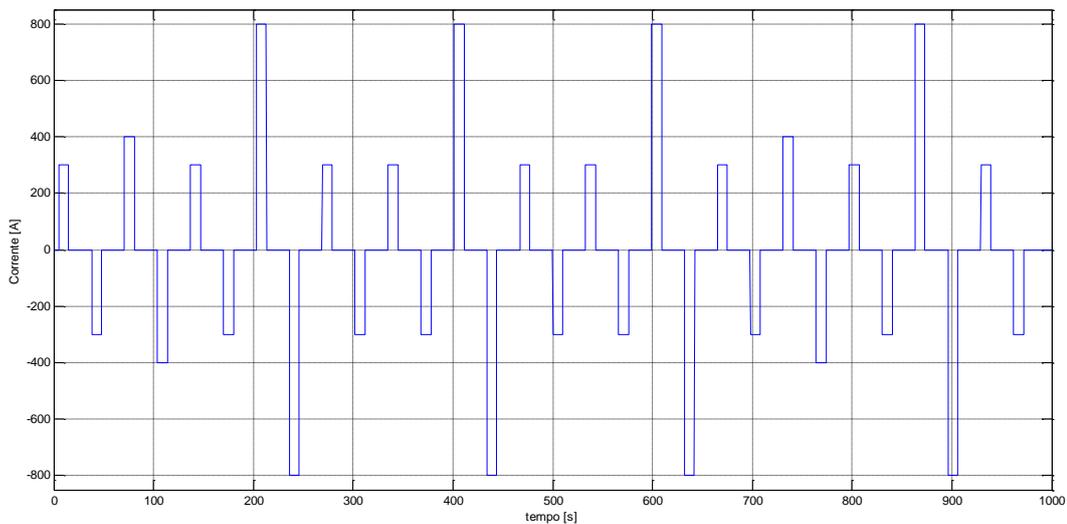


Figura 15. Ciclo di riferimento

La Figura 16 permette di confrontare il ciclo di test con l'andamento della corrente della SSE 4, che tra le tre sottostazioni è quella che presenta la maggiore erogazione e dispersione di energia.

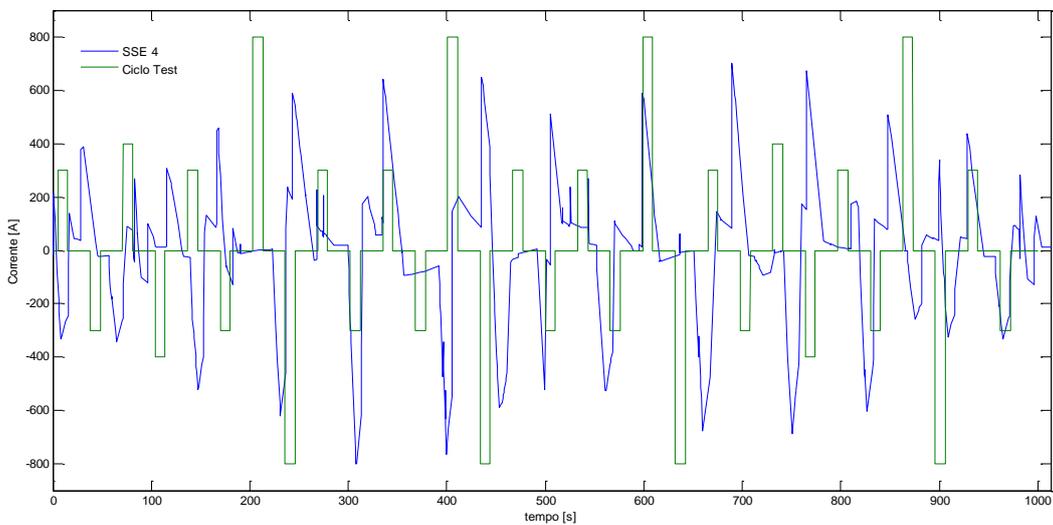


Figura 16. Confronto tra il ciclo test e l'andamento di corrente della SSE 4

Le Figure 17 e 18 mostrano le variazioni di stato di carica e le perdite di energia dovute all'effetto Joule per tutte le sottostazioni e per il ciclo di test.

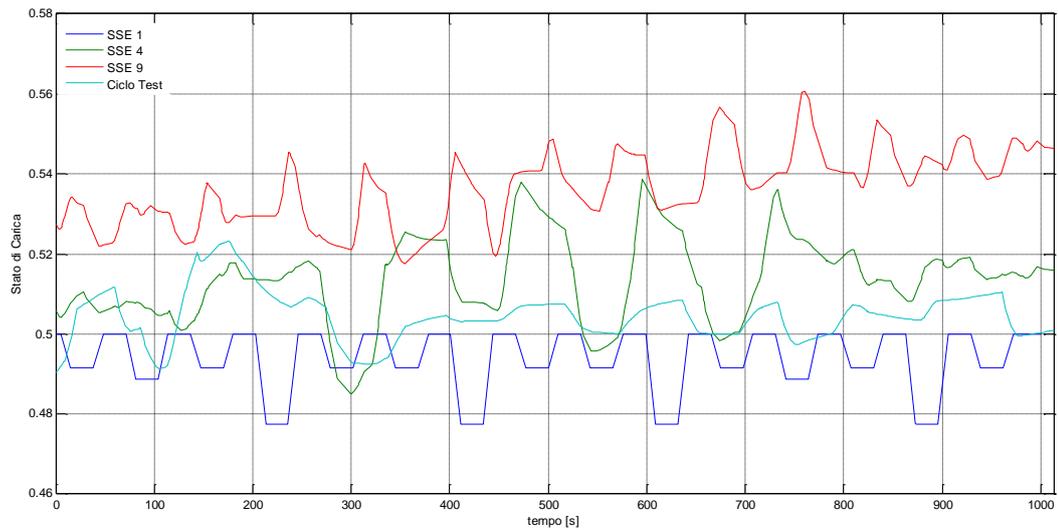


Figura 17. Variazioni di stato di carica

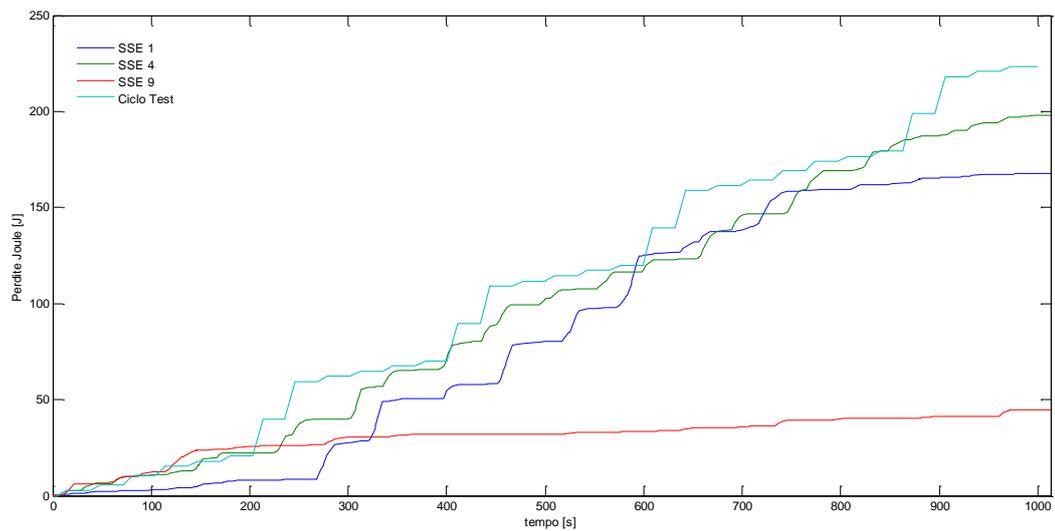


Figura 18. Energia dispersa per effetto Joule nei quattro cicli

La Tabella 7 sintetizza quanto mostrato sopra.

Tabella 7. Parametri di caratterizzazione dei cicli

Sottostazione	Corrente Massima [A]	Corrente Minima [A]	ΔSOC_{if}	ΔSOC_{max}	Ejoule [kJ]
SSE 1	800	-800	-0.01	-0.04	168
SSE 4	701	-800	-0.02	-0.03	198
SSE 9	426	-470	-0.01	-0.03	45
Ciclo Test	800	-800	0.00	-0.02	224

Come detto in precedenza si è trascurato di inserire una corrente continuativa di carica e scarica che maggiorasse la variazione di stato di carica delle batterie: il motivo è legato al fatto che questa variazione è trascurabile anche nelle condizioni di lavoro reali e che le perdite Joule associate al ciclo di prova sono

molto maggiori di quelle associate agli altri tre, inserendo una corrente aggiuntiva esse sarebbero state troppo elevate.

Il ciclo di test che si è realizzato è quindi adatto a fornire una stima della vita operativa delle batterie, stima che sarà conservativa rispetto alla realtà: esso infatti costituisce una maggiorazione delle sollecitazioni imposte alle batterie.

Ricapitolando la procedura che si è seguita è la seguente:

- 1) Si individua un periodo T del ciclo o pseudo ciclo reale di lavoro
- 2) Si calcola la variazione di stato di carica tra inizio e fine del periodo individuato
- 3) Si identificano i picchi di corrente 'impulsiva' del ciclo
- 4) Si identificano le correnti continuative medie di scarica
- 5) Si calcola la massima variazione di stato di carica all'interno del ciclo
- 6) Si calcolano le perdite Joule associate all'intero ciclo
- 7) Dai punti 1-6 deriva sia la scelta delle correnti di picco che di quelle continuative del ciclo test e del numero di ripetizioni delle stesse
- 8) Si verifica la coerenza di quanto ottenuto

2.4 Implementazione del ciclo di riferimento per un test di laboratorio

Tramite il simulatore l'Università di Pisa ha effettuato il dimensionamento del sistema di accumulo considerando diverse tipologie di celle elementari con cui realizzarlo: nel lavoro è stato preso come riferimento il caso delle Kokam da 100 Ah ma attualmente in laboratorio si dispone delle Winston da 40 Ah le cui caratteristiche sono riportate in Figura 19.



温斯顿牌稀土锂钇动力电池性能说明 SPECIFICATION FOR WINSTON RARE EARTH LITHIUM YTTRIUM POWER BATTERY

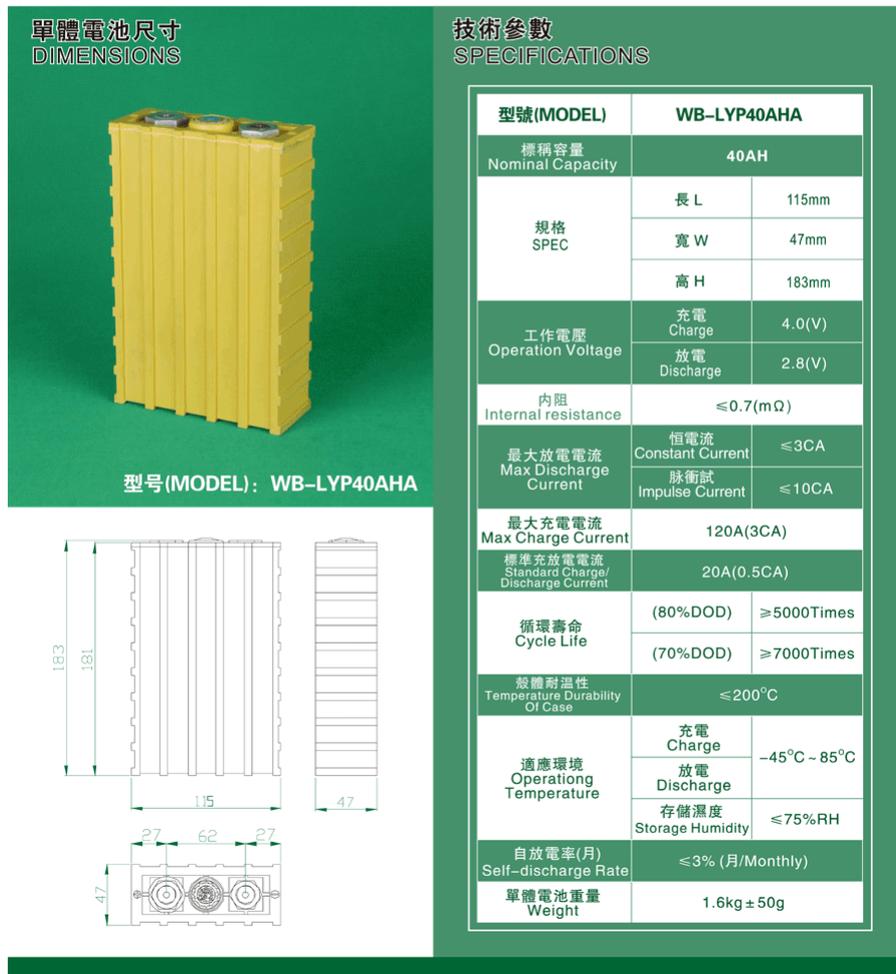


Figura 19. Caratteristiche delle batterie sottoposte a test

Si vuole eseguire una prova di laboratorio il cui scopo non è quello di studiare la vita delle batterie ma solo di verificare la validità del lavoro fatto.

Nel caso delle Winston per realizzare un sistema di accumulo equivalente a quello costruito con le Kokam si pongono in parallelo quattro celle elementari, come mostrato nella Figura 20.

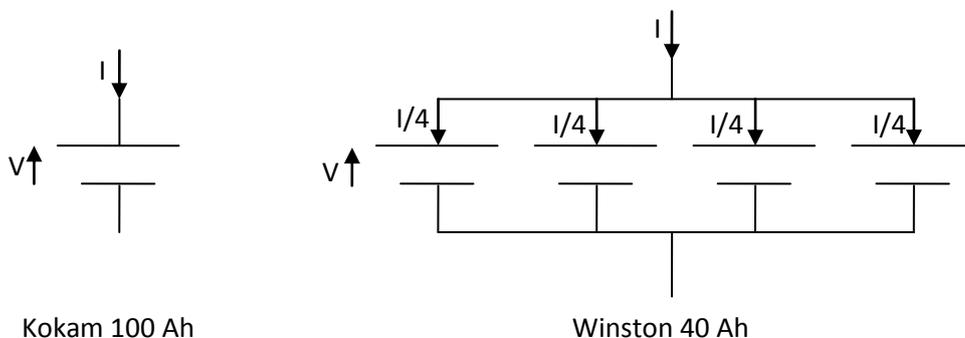


Figura 20. Costruzione del modulo batterie con celle da 100 Ah e con celle da 40 Ah

L’accumulo risultante ha una capacità di 120 Ah, per esso il profilo di corrente nelle sottostazioni rimane praticamente invariato, il singolo elemento che lo compone però erogherà o assorbirà una corrente quattro volte inferiore a quella del caso delle Kokam, di conseguenza per ottenere il ciclo di prova per le Winston basta dividere per quattro la corrente di quello costruito per le Kokam.

Il nuovo ciclo è rappresentato nella Figura 21.

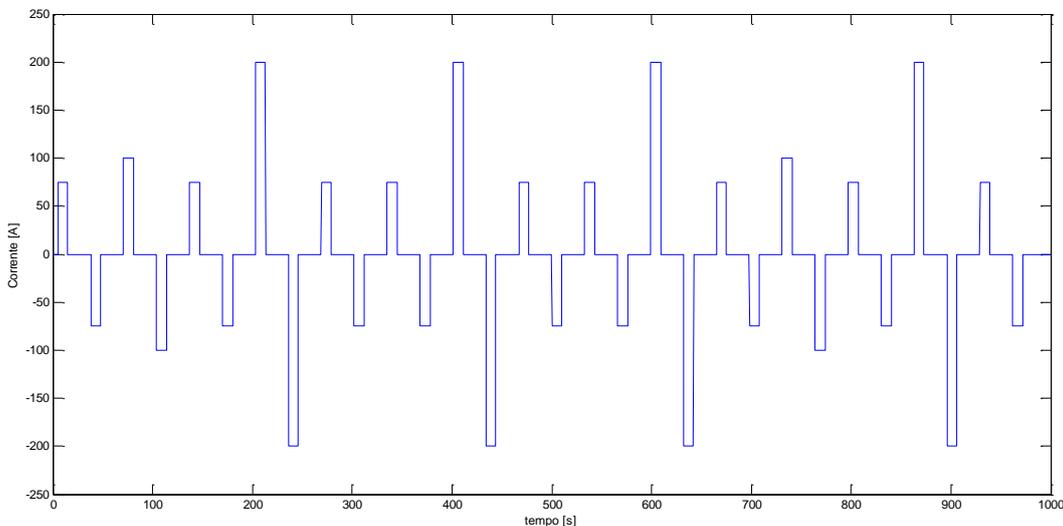


Figura 21. Ciclo Test per le batterie da 40 Ah

La Tabella 8 riporta i parametri di caratterizzazione del nuovo ciclo e li raffronta con i tre cicli base.

Tabella 8. Parametri di caratterizzazione del ciclo realizzato con le batterie da 40 Ah

Sottostazione	Corrente Massima [A]	Corrente Minima [A]	Ejoule [kJ]
SSE 1	200	-200	10.5
SSE 4	175	-200	12.4
SSE 9	107	-118	2.8
Ciclo Test	200	-200	14

2.5 Esecuzione del test

La Figura 22 mostra l'andamento della corrente registrato ai capi della batteria per un periodo T di esecuzione del ciclo: il segno delle correnti è opposto rispetto a quello utilizzato nel presente lavoro.

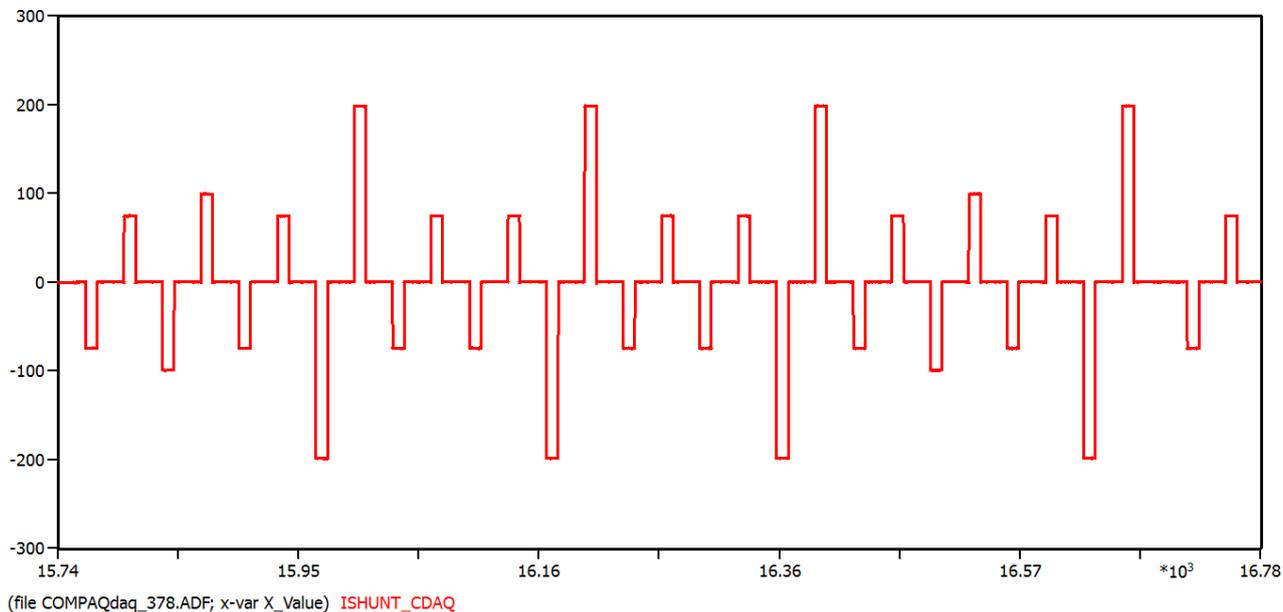


Figura 22. Particolare dell'andamento della corrente nella prova di laboratorio

La tensione segue l'andamento periodico della corrente e rimane confinata nei valori limite di lavoro della cella (Figura 23).

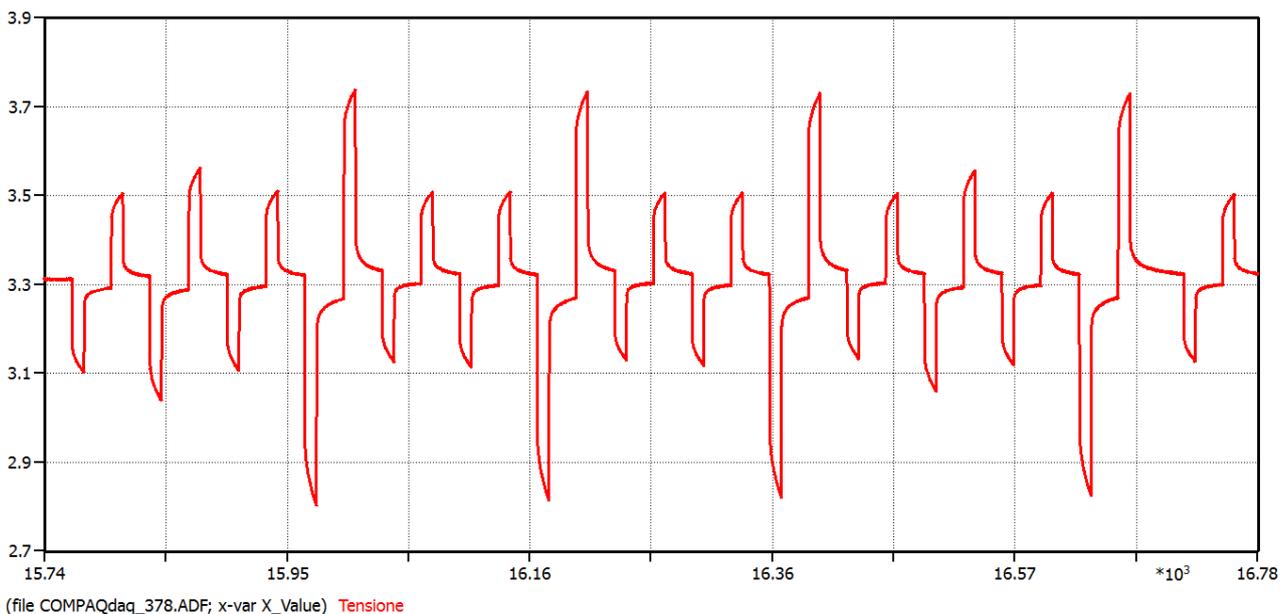


Figura 23. Particolare dell'andamento della tensione di cella

Considerando l'andamento della corrente è possibile stimare l'energia dispersa per effetto Joule nella resistenza della batteria (Figura 24).

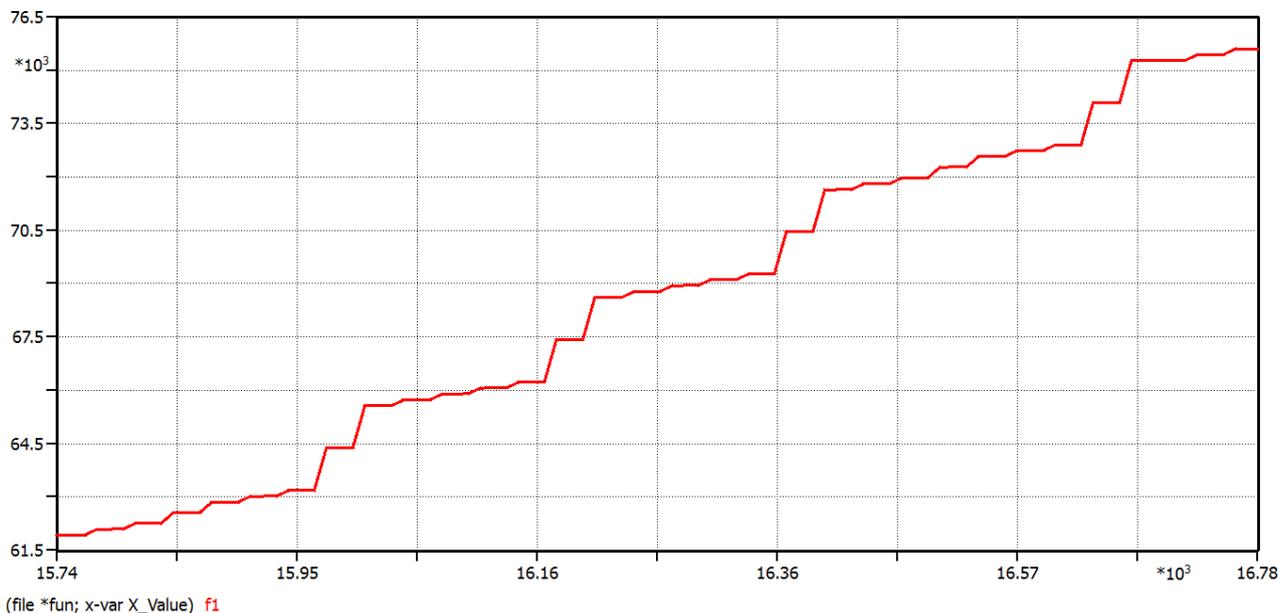


Figura 24. Energia dispersa per effetto Joule

Il risultato, 14 kJ è in accordo con quanto previsto in tabella 8, ma questo era prevedibile in quanto il calcolo è sviluppato sulla sola corrente, e la corrente viene imposta al sistema dal ciclatore. E' interessante invece analizzare l'andamento della potenza erogata (negativa) o assorbita dalle batterie (Figura 25).

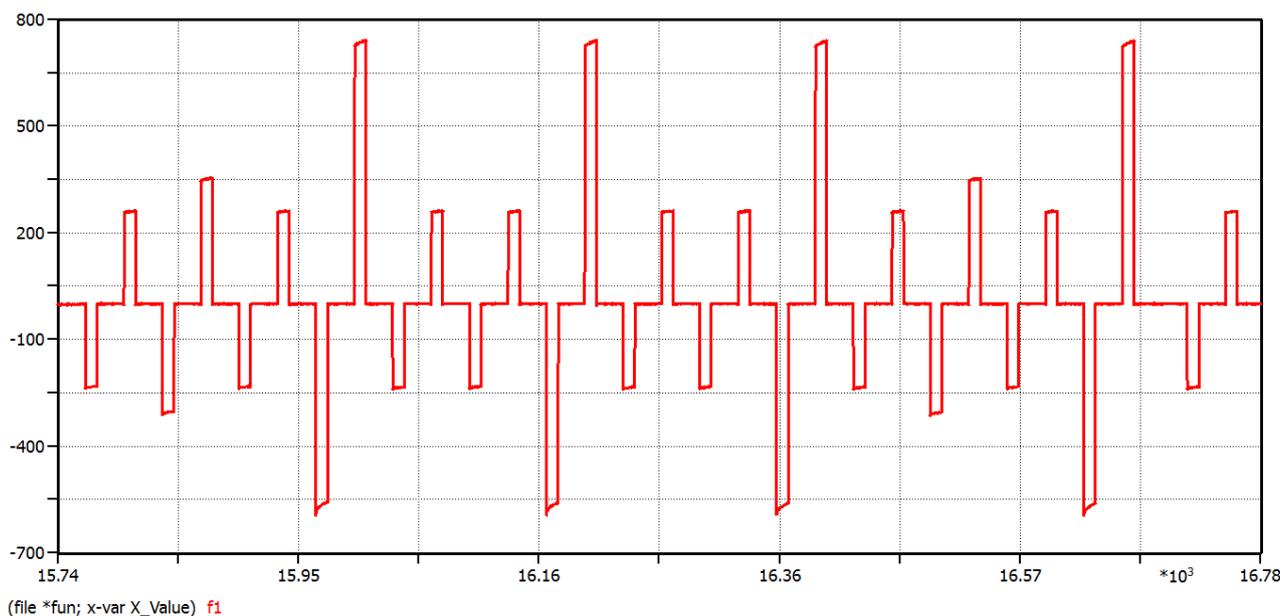


Figura 25. Potenza erogata ed assorbita

La Tabella 9 mostra il calcolo delle potenze erogate ed assorbite dalle batterie nel caso di una cella elementare della Kokam, le potenze sono state ricavate tramite il simulatore: con le approssimazioni fatte è

possibile ricavare lo stesso dato per le celle Winston e verificarne la coerenza tramite i risultati della prova sperimentale.

Tabella 9. Correnti e Potenze massime erogate/assorbite da una cella da 40 Ah

Sottostazione	Corrente Massima [A]	Corrente Minima [A]	Potenza Massima [W]	Potenza Minima [W]	EJoule [kJ]
SS1	200	-200	630	-550	10.5
SS4	175	-200	560	-545	12.4
SS9	107	-118	625	-545	2.8
Ciclo test	200	-200	740	-584	14.0

La costruzione del ciclo di riferimento non conclude il lavoro, infatti i parametri che caratterizzano l'invecchiamento di una batteria sono la capacità, la resistenza interna e l'impedenza $z(j\omega)$, con l'invecchiamento la prima diminuisce e la seconda aumentano: si consideri che aumentando la resistenza interna diminuisce anche la potenza erogabile.

Durante una prova vita occorre quindi fare un check periodico dell'andamento di queste grandezze, in particolare del degrado della capacità e della resistenza ohmica: per farlo occorre prevedere di inframmezzare le prove sul ciclo test con un ciclo di carica/scarica standard.

Il ciclo standard è composto da una carica di tipo I/V (corrente costante fino al raggiungimento della tensione massima di lavoro e successiva carica a tensione costante fino all'annullarsi della corrente di carica) e da una successiva scarica a corrente costante che si interrompe al raggiungimento della tensione minima di lavoro: le Figure 26 27 rappresentano l'andamento temporale della corrente e della tensione misurate in laboratorio durante l'esecuzione del ciclo standard.

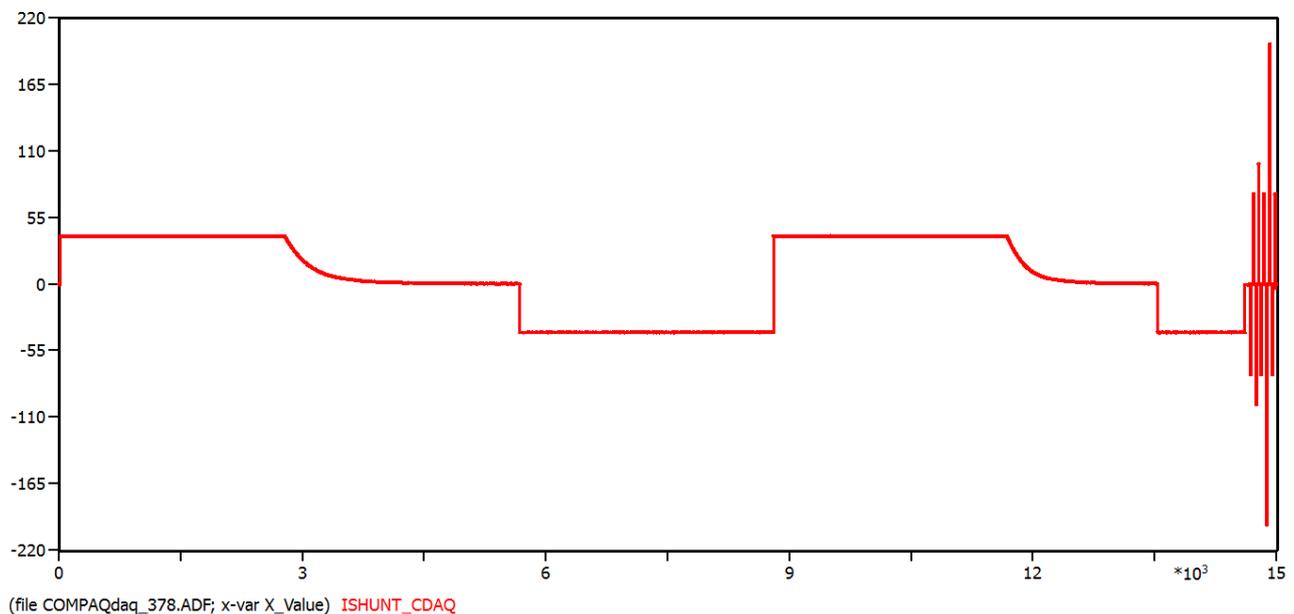


Figura 26. Ciclo di carica e scarica per la misura della capacità – andamento della corrente

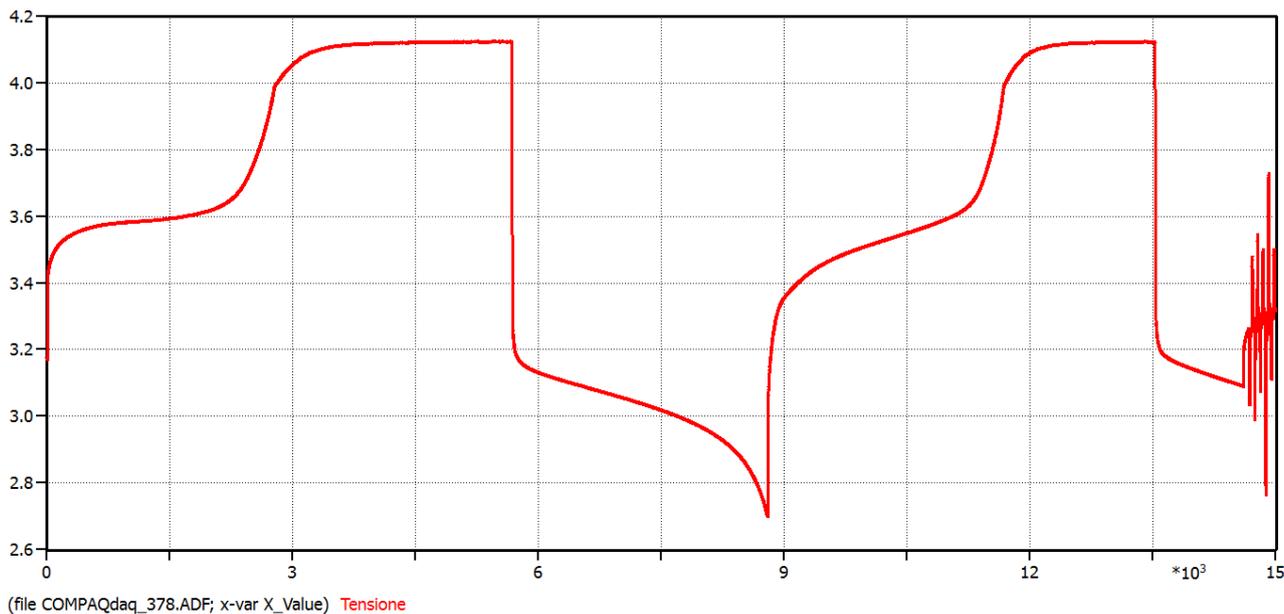


Figura 27. Andamento delle tensioni nel ciclo di carica e scarica standard

La prova di laboratorio ha mostrato la validità dell'approccio adottato nel lavoro: la tabella 9 permette anche una prima validazione del modello batteria adottato da Pisa in quanto i valori di potenza ottenuti nel ciclo di test sono congruenti con quelli previsti dal simulatore.

Non è stata eseguita una intera prova di vita sulla cella in quanto non essenziale ai fini del presente lavoro e non compatibile con l'attuale impegno della sala prove, si prevede però di eseguirla come proseguimento del lavoro.

3 Conclusioni

Lo studio ha fornito una procedura per la costruzione di un ciclo di test, derivato da un profilo di corrente di una applicazione reale ed ad esso equivalente, adatto ad eseguire prove vita su sistemi di accumulo elettrochimici: come caso applicativo si è scelto quello della installazione di un sistema di accumulo nella metropolitana di Bergamo e si è giunti fino alla implementazione in laboratorio del ciclo di prova.

Una particolarità dello studio è consistita nell'aver caratterizzato i cicli di riferimento non solo in rapporto agli andamenti delle correnti continuative e di picco del ciclo reale, o delle equivalenti potenze, ma anche in base alla dispersione di energia per effetto Joule: il ciclo di prova realizzato costituisce quindi anche un equivalente termico di quello reale.

Alcuni possibili utilizzi dei sistemi di accumulo sono stati catalogati in base al rapporto tra la potenza di picco e l'energia richiesta dalla particolare applicazione, ad es. una caratterizzazione simile è stata introdotta per le funzioni svolte all'interno delle reti elettriche, come il peak shaving, la regolazione di tensione ecc. [5]: la standardizzazione delle funzioni non porta in modo immediato alla creazione di cicli di riferimento standard per ognuna di esse, tuttavia sarebbe possibile pensare a 'classi' di cicli test associati alle varie funzioni di accumulo a cui il progettista potrebbe riferirsi per il suo utilizzo specifico, in seguito si potrebbe anche valutare se da queste classi si possa derivare un solo ciclo di riferimento.

Per quanto concerne l'attività di Bergamo, una volta stabilite quali celle in commercio adottare per la costruzione del modulo batterie o aver individuato un numero ristretto di alternative, si potrà eseguire la prova vita utilizzando il ciclo test che è stato qui sviluppato.

4 Riferimenti bibliografici

1. A. Nuhic, T. Terzimehic, T. Soczka-Guth, M. Buchholz, K. Dietmayer, "Health diagnosis and remaining useful life prognostics of lithium-ion batteries using data-driven methods" *Journal of Power Sources* 239 (2013) pp 680-688
2. Jens Groot, "State-of-Health Estimation of Li-ion Batteries: Cycle Life Test Methods", Division of Electric Power Engineering Department of Energy and Environment CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY Göteborg, Sweden 2012
3. M. Ceraolo, M. Conte, R. Giglioli, G. Lutzenberger, M. Pasquali, "Use of electrochemical storage in substations to enhance energy and cost efficiency of tramways", AEIT Annual Conference, 3-5 Oct. 2013, Mondello (PA)
4. Rapporto di Ricerca di Sistema: M. Ceraolo, R. Giglioli, D. Poli, "Individuazione delle sollecitazioni e criterio di dimensionamento di un accumulatore al litio inserito in una stazione di conversione di una tranvia metropolitana", RdS/2013/251
5. M. Conte, "Lo stoccaggio dell'energia: potenzialità e prospettive", *Trasporto e Stoccaggio dell'Energia: Come diventare "Smart"*, Milano, 11 Luglio 2011