



Ricerca di Sistema elettrico

Ottimizzazione di un ciclo di prova per il test di vita di un accumulo per la metropolitana di Bergamo

Manlio Pasquali

OTTIMIZZAZIONE DI UN CICLO DI PROVA PER IL TEST DI VITA DI UN ACCUMULO PER LA METROPOLITANA DI BERGAMO

Manlio Pasquali (ENEA)

Settembre 2015

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2014

Area: Governo, gestione e sviluppo del sistema elettrico nazionale

Progetto: Sistemi avanzati di accumulo dell'energia

Obiettivo: Dimensionamento di sistemi di accumulo al litio per una tranvia leggera

Responsabile del Progetto: Mario Conte, ENEA

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 COSTRUZIONE DI UNA SEQUENZA DI CICLI TEST PER LA METROPOLITANA DI BERGAMO.....	6
2.1 LA METRO DI BERGAMO ED IL SUO ESERCIZIO STAGIONALE.....	6
2.2 PARAMETRI DI INTERESSE PER IL TEST DI VITA DI UN ACCUMULO.....	8
2.3 STRUTTURA DEL CICLO DI RIFERIMENTO.....	11
2.4 CARATTERIZZAZIONE DEI CICLI DI LAVORO DELLA METRO DI BERGAMO.....	12
2.4.1 <i>Ciclo Holiday</i>	12
2.4.2 <i>Ciclo Rush</i>	17
2.4.3 <i>Ciclo Soft</i>	20
2.4.4 <i>Costruzione del ciclo di prova complessivo</i>	23
2.5 OSSERVAZIONI.....	27
3 CONCLUSIONI.....	30
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	31

Sommario

Il presente documento riprende ed approfondisce il tema dello sviluppo di cicli test per la prova vita di sistemi di accumulo già trattato nel documento *“Costruzione di un ciclo di prova per il test di vita di un accumulo per la metropolitana di Bergamo e sua esecuzione”*, in particolare approfondisce il dettaglio di analisi del caso studio della metropolitana di Bergamo, nel lavoro precedente l’interesse era incentrato nello sviluppo del metodo di sintesi del ciclo più che sulla sua applicazione, in questo invece si applica e raffina ulteriormente il metodo stesso ma l’attenzione è maggiormente incentrata sull’applicazione di riferimento.

I prodotti finali dello studio sono un ciclo test che tiene conto delle diverse modalità di gestione della tramvia, legate alla fruizione giornaliera e stagionale del servizio da parte degli utenti, ed uno strumento di sintesi delle prestazioni richieste al sistema di accumulo che può essere utilizzato per una eventuale revisione del dimensionamento dello stesso o delle logiche con cui è gestito.

1 Introduzione

Il documento *“Costruzione di un ciclo di prova per il test di vita di un accumulatore per la metropolitana di Bergamo e sua esecuzione”*, report della Ricerca di Sistema Elettrico RdS/PAR2013/189 [1], affronta il problema della sintesi di cicli test per la prova vita di sistemi di accumulatore elettrochimico, nel documento viene preso come esempio applicativo quello dello sviluppo di un ciclo test per un sistema di accumulatore che l’Università di Pisa ha dimensionato per la installazione nella metropolitana leggera di Bergamo.

Lo scopo del lavoro era definire una metodologia di sviluppo del ciclo di test ed applicarla ad un caso di studio, non veniva quindi approfondito in modo particolare il caso di studio quanto la tecnica di sviluppo del ciclo e per questo motivo il ciclo ‘reale’ di riferimento per lo studio era costituito dalla simulazione un generico ciclo di lavoro della Tramvia in una determinata condizione di carico.

Il presente documento si propone invece di approfondire il tema del reale esercizio della Tramvia, che è legato alla fruizione del servizio da parte degli utenti, variabile ora per ora sia nei giorni della settimana che nei vari periodi dell’anno, e di sintetizzare un ciclo di test che tenga conto delle differenze di assorbimento di potenza legate alle differenti condizioni di esercizio.

In base a quanto detto si evince che il tema del discorso si sposta dal metodo di sintesi dei cicli test alla applicazione di riferimento, nonostante questo proprio le esigenze specifiche della applicazione di riferimento richiederanno anche una evoluzione significativa del lavoro già esposto nel lavoro precedente.

Uno dei prodotti dello studio sarà uno strumento di analisi delle sollecitazioni richieste all’accumulatore durante l’esercizio annuale, strumento che può essere utilizzato dal progettista per rivedere il dimensionamento del sistema o le sue strategie di gestione.

2 Costruzione di una sequenza di cicli test per la metropolitana di Bergamo

2.1 La metro di Bergamo ed il suo esercizio stagionale

Per comodità di lettura si riportano le caratteristiche della metro leggera di Bergamo già presentate nello studio precedente.

La metro leggera di Bergamo è costituita da una linea lunga dodici chilometri che collega le stazioni di Bergamo ed Albino centro (Figura 1).

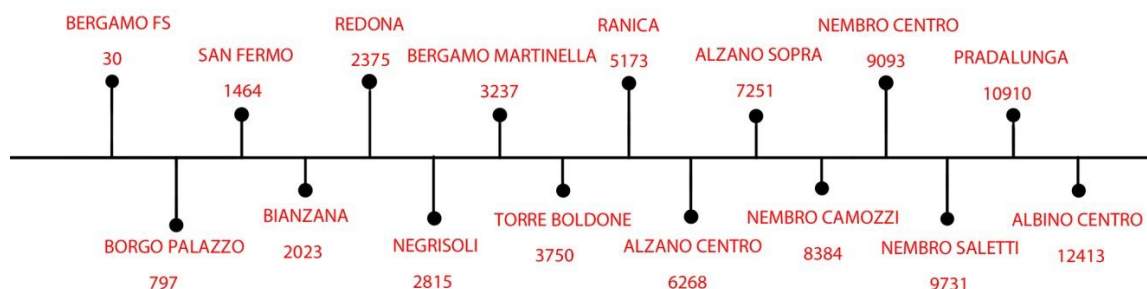


Figura 1. Metropolitana leggera di Bergamo

I tram che percorrono questa linea sono i Sirio della Ansaldo, la linea è alimentata in corrente continua da dieci sottostazioni (Figura 2).



Figura 2. Sottostazioni di alimentazione della linea

Le caratteristiche delle sottostazioni sono le seguenti:

- Tensione a vuoto: 796 V
- Potenza nominale: 1800 kW
- Corrente nominale: 2400 A
- 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.

L'Enea e l'Università di Pisa hanno avviato uno studio [2-5] volto a verificare se l'installazione di un sistema di accumulo nelle sottostazioni di alimentazione della rete possa portare, tramite il recupero energetico che può avvenire nella fase di frenatura dei mezzi, un vantaggio economico per il gestore della rete.

Lo studio ha mostrato che si ha un effettivo vantaggio economico ed il sistema di accumulo si ripaga in poco tempo, una soluzione di interesse consiste nell'installare tre pacchi 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 A/Ah

Per eseguire lo studio l'Università di Pisa ha realizzato un simulatore software della linea: esso permette di ricavare l'andamento delle correnti di batteria in funzione delle condizioni di esercizio della rete, quali la presenza ed il numero di tram, la loro posizione velocità ed accelerazione, i parametri di batteria utilizzati nel simulatore derivano dalle celle commerciali Kokam da 100 Ah.

La TEB, società che gestisce la linea, ha fornito le tabelle orarie di percorrenza dei tram relative a tutte le condizioni di lavoro annuali (giorno feriale, festivo, stagione invernale, estiva e così via): da una analisi di queste tabelle Uni Pisa ha individuato tre condizioni di esercizio che possono caratterizzare tutta la gestione della linea e le ha denominate 'Rush', 'Soft' ed 'Holiday'. Il ciclo Rush è quello a cui corrisponde la massima energia e potenza richiesta al sistema di accumulo, i cicli Soft ed Holiday hanno richieste di potenza massima ed energia comparabili tra di loro ma "forme d'onda" diverse.

La tabella 1 riassume l'esercizio annuale della rete secondo le tipologie date.

Tabella 1. Tipologia di esercizio annuale della metro di Bergamo

Mese	Rush [h]	Soft [h]	Holiday [h]
Gennaio	75	282	162.5
Febbraio	100	240	130
Marzo	75	265	178.75
Aprile	105	252	146.25
Maggio	110	264	146.25
Giugno	45	295	162.5
Luglio	0	391	130
Agosto	0	340	178.75
Settembre	50	290	146.25
Ottobre	115	276	130
Novembre	105	252	146.25
Dicembre	50	290	162.5

Per eseguire un test di vita sul sistema di accumulo si decide di costruire tre cicli di prova strutturati in modo che sia possibile implementarli in laboratorio e di combinarli tra di loro secondo quanto riportato in tabella 1, ognuno di essi massimizza il complesso delle prestazioni a cui sono sottoposti i tre moduli di accumulo delle sottostazioni.

Il test può essere eseguito su un modulo completo quanto su una sola cella, essendo il ciclo costituito da una sequenza temporale di corrente che è uguale per tutte le celle elementari che vengono connesse in serie per formare il modulo.

E' possibile pensare che la costruzione del ciclo di test si possa limitare a quella di un equivalente del ciclo Rush, massimizzando così la prestazione richiesta al sistema di accumulo e quindi essendo sicuri che la vita 'misurata' sarà sempre inferiore a quella reale: questo modo di procedere però è estremamente limitante, infatti non si ha un criterio per stimare di quanto la durata effettiva si discosti da quella ricavata con il test.

Un approccio più realistico consiste, come già detto, nel creare tre distinti cicli di prova, uno per ogni tipologia di esercizio, e di combinarli tra di loro in base alle informazioni fornite dalla tabella 1.

2.2 Parametri di interesse per il test di vita di un accumulatore

Per la costruzione dei tre cicli si può utilizzare la procedura esposta in [1], che viene riproposta brevemente per comodità di lettura: prima di farlo si vuole concentrare l'attenzione su quali siano le grandezze fisiche che influenzano l'invecchiamento di una batteria.

Si osservi l'andamento della corrente richiesta al modulo della SS4 nel caso del ciclo Soft.

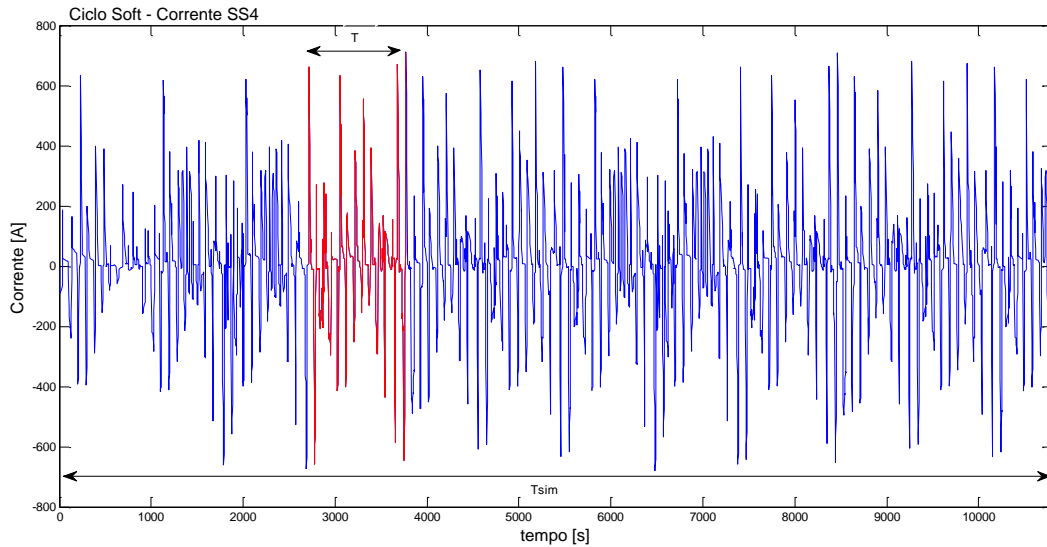


Figura 3. Andamento della corrente della SS4 nel caso di ciclo Soft

La figura 3 mostra che nell'andamento sono presenti dei picchi di corrente sia in erogazione che in assorbimento, l'andamento della corrente, pur non essendo rigorosamente periodico, ma 'pseudoperiodo' può essere assimilato ad un andamento periodico ed è quindi possibile individuarne il periodo T di ripetizione.

Ingrandendo la sezione in rosso di figura 3, relativa ad un periodo T, si ha la possibilità di individuare il numero di picchi di corrente che la caratterizzano con i loro relativi valori numerici (figura 4).

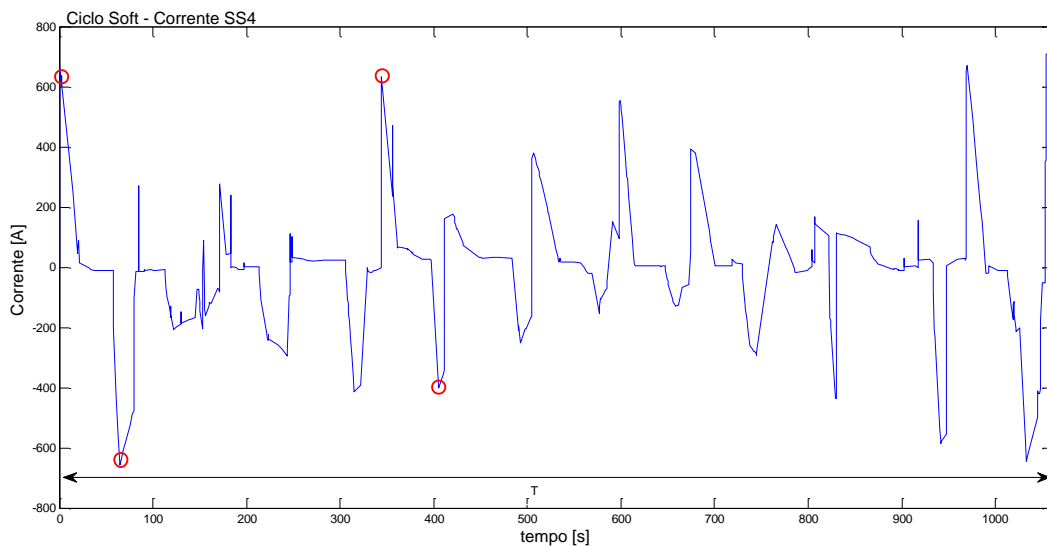


Figura 4. Dettaglio dell'andamento della corrente della SS4

Nella figura 5 viene rappresentato l'andamento dello stato di carica della batteria durante il periodo T considerato:

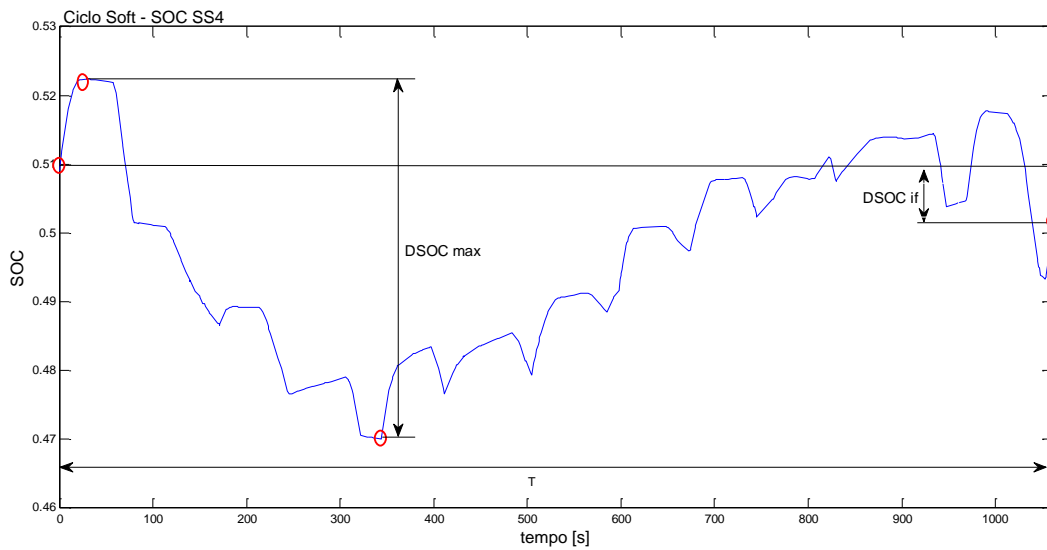


Figura 5. Andamento dello stato di carica nel pseudoperiodo T

Con $DSOC_{max}$ è indicato il ΔSOC (variazione di stato di carica della batteria) massimo che si rileva nel ciclo, $DSOC_{if}$ indica la differenza tra lo stato di carica iniziale e quello finale: se il ciclo fosse ideale e quindi periodico si avrebbe $DSOC_{if}=0$.

In figura 6 è rappresentato il modello semplificato di una batteria, nel quale vengono messe in evidenza le perdite per effetto Joule dovute al passaggio di corrente nella resistenza interna.

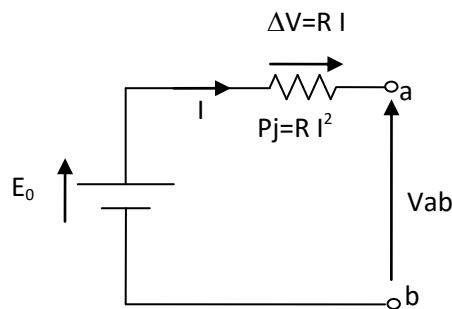


Figura 6. Modello semplificato di batteria

Le perdite per effetto Joule provocano l'innalzamento della temperatura interna delle celle che costituiscono il modulo di batteria: l'energia associata a queste perdite è dato dall'equazione:

$$E_{Joule} = \int_0^T ri^2 dt \quad [1]$$

Nell'esempio considerato l'andamento dell'energia E_j è illustrata in Figura 7.

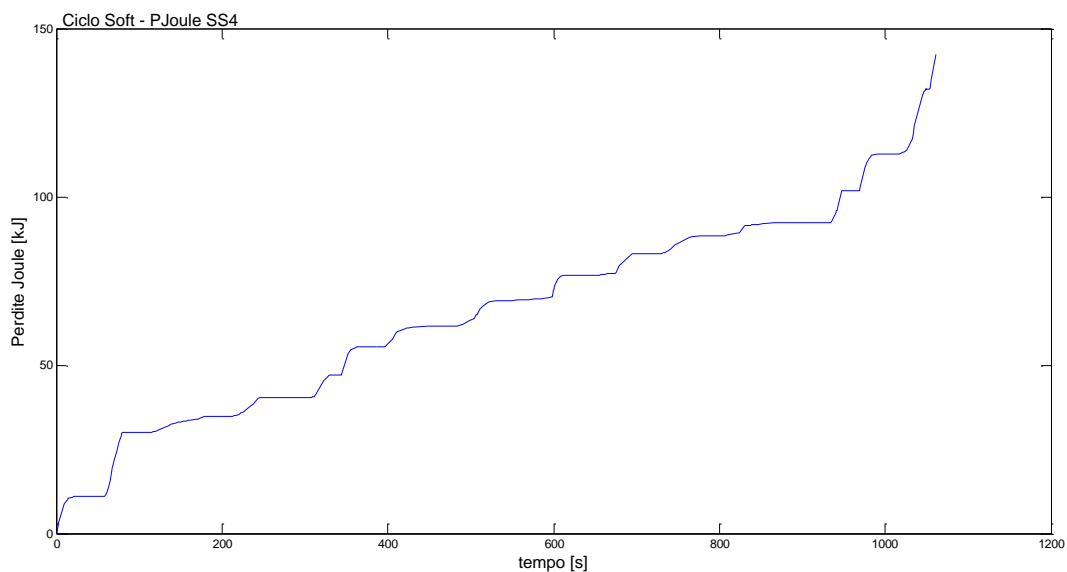


Figura 7. Energia dispersa per effetto Joule

I parametri che influenzano la vita della cella sono quindi il numero ed il valore delle correnti di picco a cui è sottoposta, la corrente 'continuativa' di scarica ed il valore e la variazione dello stato di carica rilevati durante l'esecuzione del ciclo.

Nel caso dell'applicazione considerata il dimensionamento e l'utilizzo del sistema di accumulo sono tali che la variazione dello stato di carica è estremamente limitata nell'arco del tempo, ed è quindi difficile ed anche superfluo definire una 'corrente continuativa' media di carica o scarica dello stesso.

Un parametro che non viene trattato nel presente studio ma che è fondamentale per la vita delle celle è la temperatura di lavoro, per questo il test deve considerare anche le condizioni ambientali in cui opera il sistema di accumulo.

2.3 Struttura del ciclo di riferimento

I cicli test che si vogliono costruire devono rispondere all'esigenza di essere facilmente implementabili con la maggior parte delle strumentazioni disponibili in laboratorio (ciclatori, alimentatori controllati), di essere caratterizzabili con semplicità (in termini di corrente massima di lavoro, potenza ed energia ecc.) e di massimizzare le sollecitazioni richieste al sistema di accumulo, essi devono presentare rispetto ai cicli reali:

- 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

La struttura che si vuole proporre è la seguente, già illustrata in [1]: è costituita da una serie di scariche e cariche a gradino, costruite in modo da rappresentare le correnti di picco ed una corrente continuativa di carica/scarica.

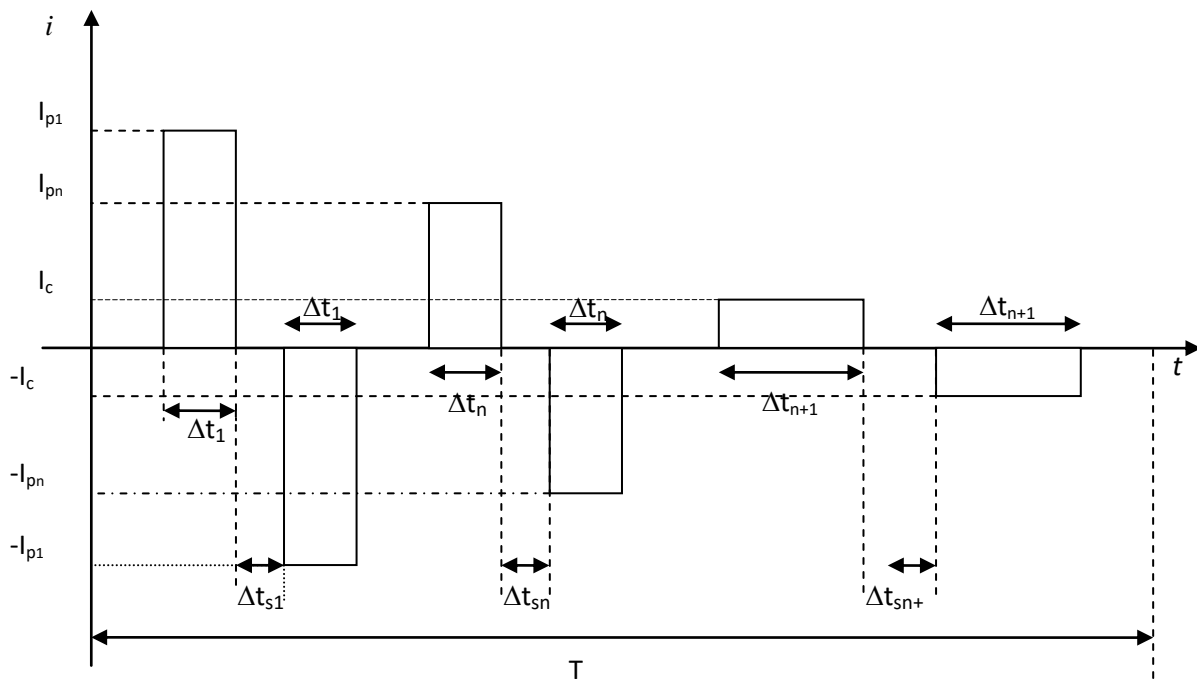


Figura 8. Struttura base del ciclo di riferimento

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

In generale il valore della corrente continuativa può essere ricavato considerando una corrente 'efficace' di scarica che compendia le perdite Joule del ciclo reale: come già detto nel caso in studio non ha senso proporre questa componente in quanto la variazione di stato di carica è estremamente limitata, si decide quindi di utilizzare soli 'gradini' di corrente della durata di dieci secondi.

2.4 Caratterizzazione dei cicli di lavoro della metro di Bergamo

Dopo aver descritto in modo sintetico la struttura dei cicli di test che si vogliono realizzare occorre caratterizzare le tre condizioni di esercizio della linea e costruire un ciclo di riferimento per ognuna di esse. Come già detto lo studio di UniPisa ha portato a dimensionare tre moduli di accumulo gemelli da installare in tre distinte sottostazioni di alimentazione della rete (1,4,5) e i cicli che si vogliono proporre devono massimizzare in una sola prova le prestazioni richieste ad ognuno dei moduli nelle tre condizioni di esercizio, per esempio: se in una determinata condizione uno dei moduli subirà il maggior numero di picchi di corrente impulsiva, un altro il massimo Δ SOC ed un altro ancora la massima dispersione di energia termica, il ciclo di riferimento, che è uno e non uno per ognuno dei tre moduli, dovrà massimizzare ognuna di queste distinte grandezze in un solo test.

L'ordine di esposizione del lavoro di costruzione dei cicli è stato scelto in modo da partire da quello più complesso da sintetizzare (e quindi più 'didattico') per finire a quello più semplice.

2.4.1 Ciclo Holiday

La figura 9 mostra gli andamenti delle correnti delle sottostazioni nel caso del ciclo Holiday.

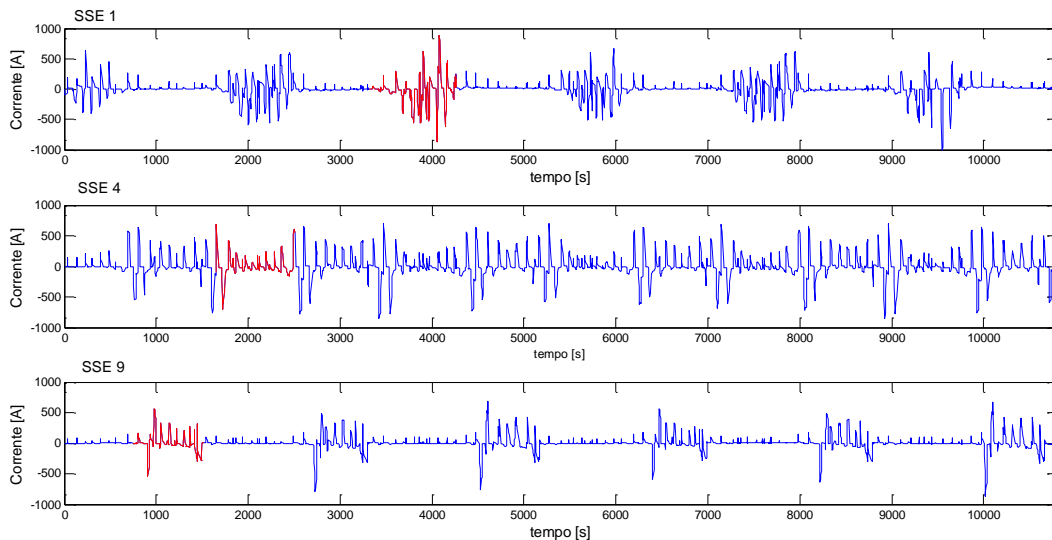


Figura 9. Andamenti delle correnti nel ciclo Holiday

E' importante notare come, pur essendo riconoscibile un andamento periodico delle correnti, con un identico periodo T per ogni sottostazione, la fase attiva dei cicli sia sfasata temporalmente in ognuna di esse.

Compensando lo sfasamento temporale e sovrapponendo i tre andamenti si ha il rprofilo di figura 10.

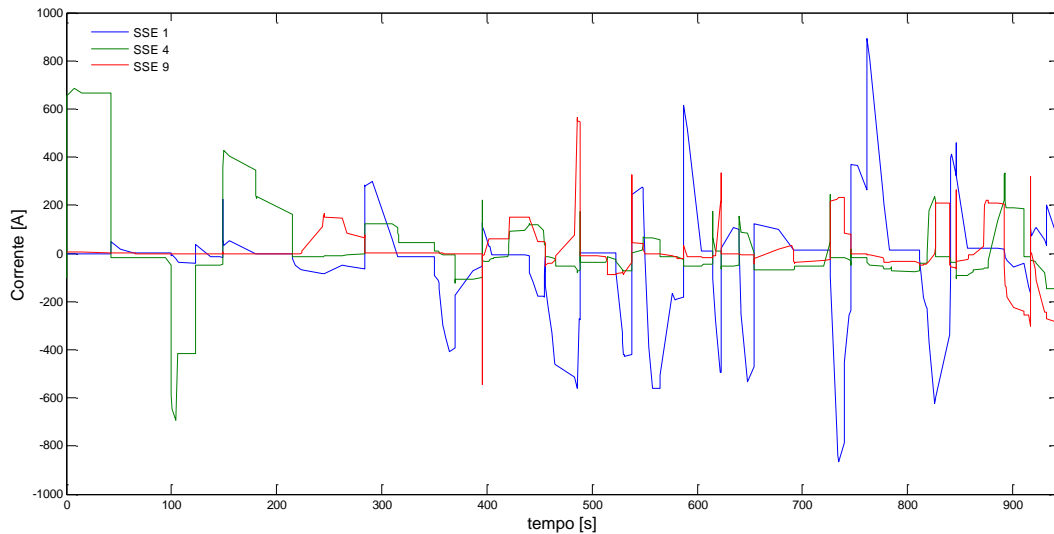


Figura 10. Comparazione diretta delle correnti

Per questo ciclo si stima un pseudo periodo T pari a 945 s e si esegue il conteggio del numero dei picchi di corrente e la misura dei valori degli stessi:

Sottostazione 1

+224 ; +300 ; -407 ; +128 ; -561 ; -421 ; +276 ; -560 ; + 614 ; -494 ; -534 ; +208 ; -864 ; +368 ; +892 ; -625 ; +458 ; -163 ; +251

19 picchi

Sottostazione 4

+686 ; -693 ; +426 ; -122 ; +122 ; +220 ; +122 ; +173 ; +173 ; +245 ; +237 ; +332 ; -160 ; +602

14 picchi

Sottostazione 9

+165 ; -545 ; +150 ; +565 ; -89 ; +325 ; +336 ; +234 ; +210 ; +262 ; +222 ; -302 ; +316 ; -287

14 picchi

La tabella 2 riassume i principali parametri di caratterizzazione dei tre cicli.

Tabella 2. Caratterizzazione dei cicli delle SSE per l'esercizio Holiday

Sottostazione	Corrente Massima [A]	Corrente Minima [A]	Numero picchi	ΔSOC_{if}	ΔSOC_{max}	Ejoule [kJ]
SSE 1	891	-864	19	-0.042	0.060	146
SSE 4	685	-693	14	0.010	0.033	104
SSE 9	566	-545	14	0.005	0.042	104

Il ciclo di lavoro che si vuole realizzare dovrà quindi presentare un numero di picchi di corrente non inferiore a 19, una corrente massima non inferiore a 891 A, una variazione di stato di carica non minore di 0.063 ed una energia dispersa per effetto Joule non inferiore a 146 kJ.

Pur dovendo rispettare i vincoli sopra esposti la scelta delle correnti con cui realizzare il ciclo è parzialmente libera: una delle correnti dovrà essere maggiore o uguale a 894 A e le altre compatibili con i valori trovati nell'analisi precedente e con la dispersione di energia per effetto Joule, si può far variare il ΔSOC lavorando sulla sequenza di successione dei gradini di corrente.

Nel caso presente si sceglie di utilizzare i seguenti valori di corrente per realizzare dei gradini della durata di 10 secondi l'uno, durata molto maggiore di quella che si verifica nel caso reale:

$\pm 895 ; \pm 700 ; \pm 600 ; \pm 500 \pm 400 ; \pm 200$

Per le correnti si utilizza la convenzione dei generatori, per la quale al segno positivo si associa la scarica delle batterie.

In base a questa scelta è possibile compilare la tabella 3 che mostra l'effetto di ogni gradino di corrente sul ciclo di prova.

Tabella 3. Scelta delle correnti per il ciclo test Holiday

Corrente-tempo [As]	Energia dissipata [kJ]	ΔSOC
895 * 10	24	0.025
700 * 10	15	0.019
600 * 10	11	0.017
500 * 10	8	0.014
400 * 10	5	0.011
200 * 10	1	0.006

Si noti come sia possibile incrementare il valore del ΔSOC semplicemente facendo eseguire più scariche o cariche dello stesso segno (figura 11).

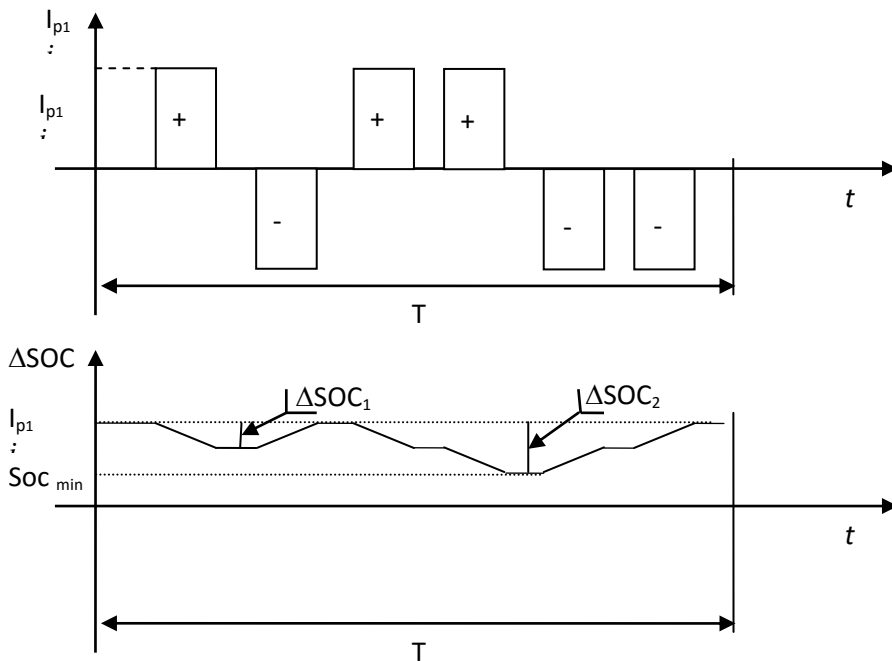


Figura 11. Variazione dello stato di carica in funzione della sequenza di segno delle correnti

La sequenza di corrente proposta per il ciclo Holiday è la seguente:

+895 , + 700, + 600 , -600 , +400 , -895, - 200 , +200, - 400, +200, - 200, +200, - 200, +200, - 200 , + 500, - 500, +500, - 500, -700

Il periodo T è pari a 940 s (il periodo del ciclo Holiday è di 944 s, quindi la condizione è leggermente più restrittiva) e l'intervallo tra i vari gradini è pari a 36 s. Il ciclo è rappresentato nella figura 12.

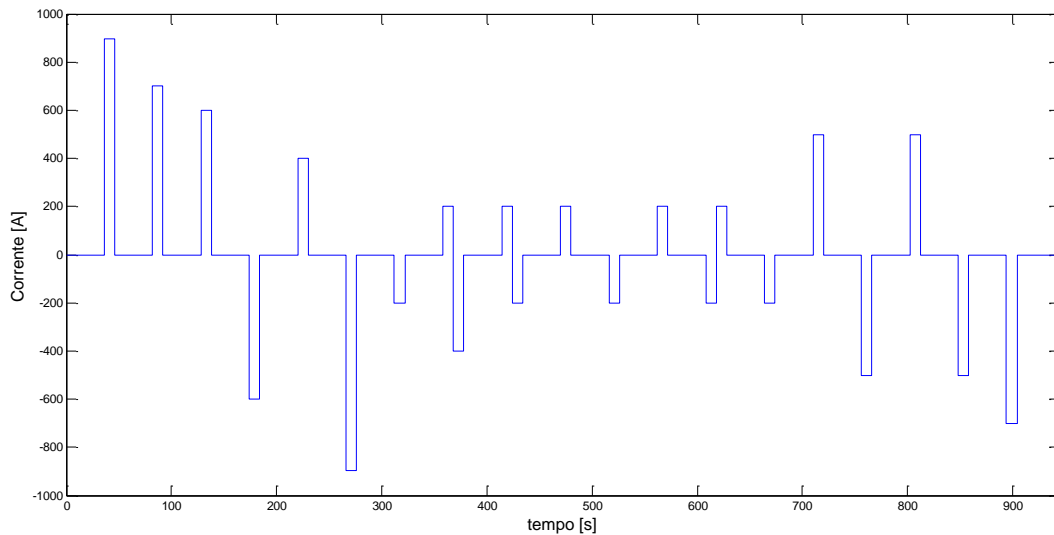


Figura 12. Ciclo Test Holiday

E' possibile comparare graficamente il ciclo test con quelli di riferimento che lo hanno generato: si inizia dall'andamento delle correnti (figura 13).

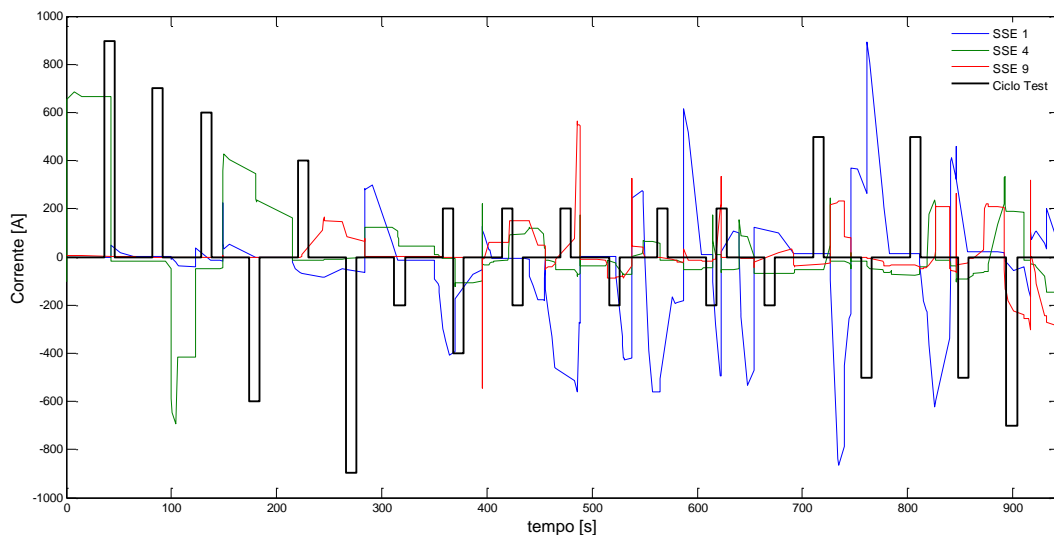


Figura 13. Comparazione dei cicli - Correnti

Nella figura 14 vengono comparate le variazioni di stato di carica.

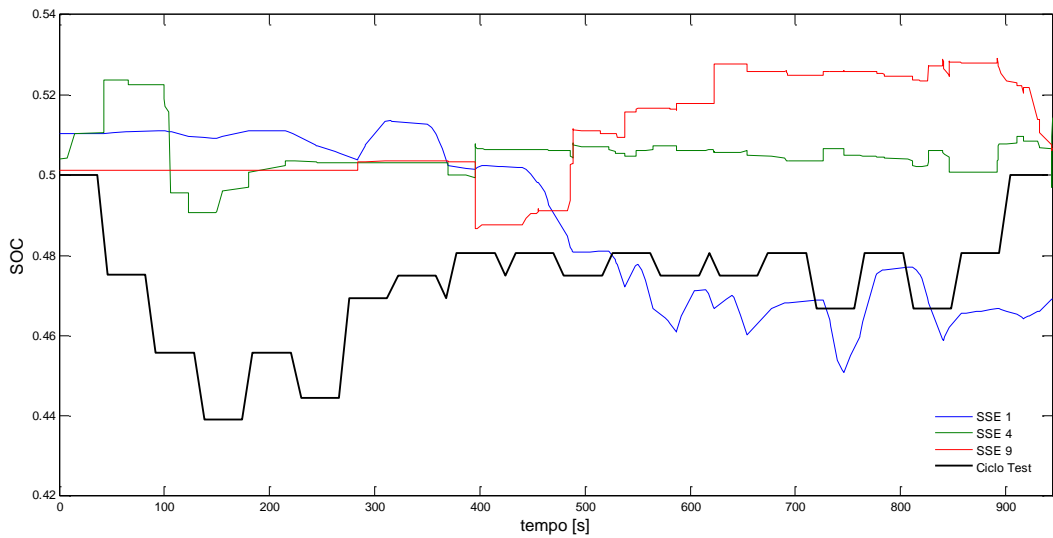


Figura 14. Comparazione dei cicli – Stati di Carica

Ed infine seguono le perdite Joule riportate in figura 15.

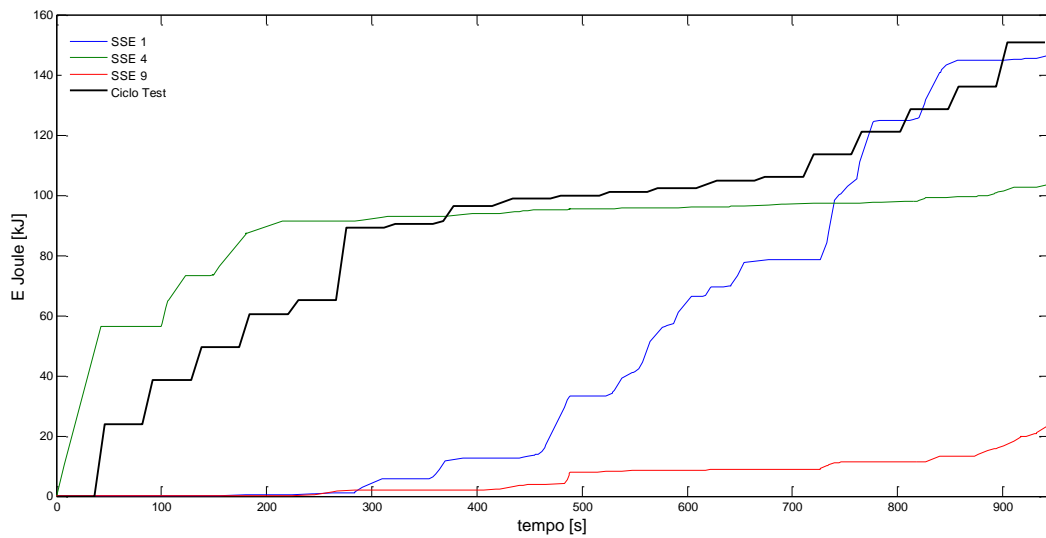


Figura 15. Comparazione dei cicli – Perdite Joule

Riprendendo la tabella 2 ed aggiornandola con i parametri del ciclo test è possibile fare una comparazione tra di esso e quelli da cui è derivato (tabella 4).

Tabella 4. Confronto tra il ciclo Test Holiday ed i cicli delle singole SSE

Sottostazione	Corrente Massima [A]	Corrente Minima [A]	Numero picchi	ΔSOC_{if}	ΔSOC_{max}	Ejoule [kJ]
SSE 1	891	-864	19	-0.042	0.060	146
SSE 4	685	-693	14	0.010	0.033	104
SSE 9	566	-545	14	0.005	0.042	104
Ciclo Test	895	-895	20	0.000	0.060	151

Si osserva che il ciclo test migliora le performance richieste dagli altri tre riferimenti ma non si allontana molto da esse: infatti lo scopo del test è quello di porsi nelle condizioni più vicine a quelle di funzionamento e non di sottoporre il sistema a condizioni di lavoro molto più stressanti di quelle operative.

2.4.2 Ciclo Rush

La figura 16 mostra gli andamenti di corrente nel ciclo rush.

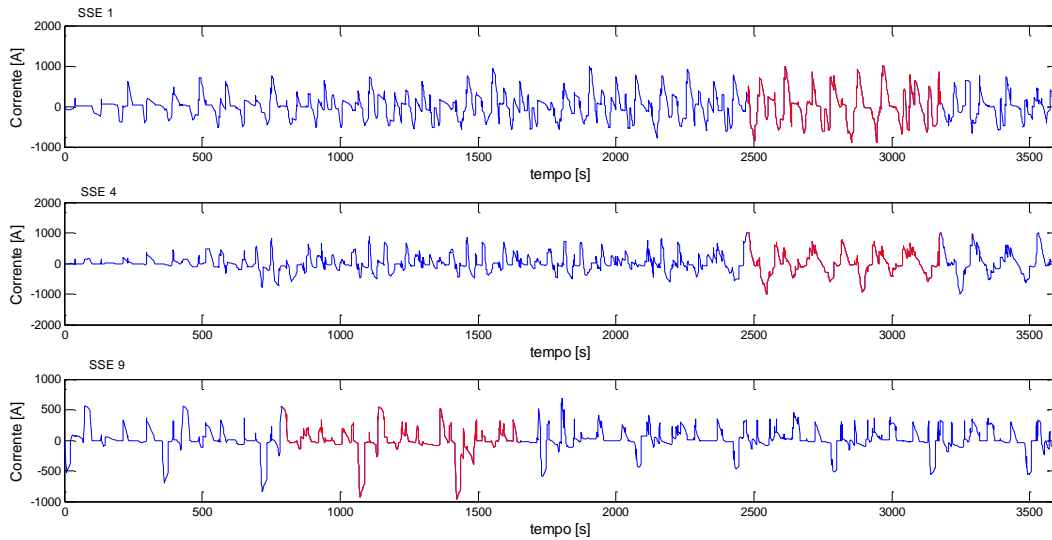


Figura 16. Andamenti delle correnti nel ciclo Rush

In questo caso ad essere sfasata temporalmente rispetto alle altre è la sola corrente della SSE 9, per questo ciclo il periodo di ripetitività stimato è pari a 706 s.

L’analisi dei picchi di corrente e dei loro valori porta ai seguenti risultati:

Sottostazione 1

+500 ; -843 ; +702 ; -320 ; +330 ; -590 ; +1000 ; -500 ; -660 ; +860 ; -630 ; -597 ; +730 ; -900 ; +918 ; -882 ; +1000 ; -692 ; +426 ; -600 ; +776 ; +651 ; -648 ; +500 ; -490 ; +846

26 picchi

Sottostazione 4

+1000 ; +200 ; -1000 ; +693 ; -460 ; +153 ; +728 ; -580 ; +780 ; +260 ; -930 ; +737 ; -424 ; +573 ; +678 ; + 531 ; -595 ; +1000

18 picchi

Sottostazione 9

+121 ; -139 ; +326 ; +345 ; +347 ; +455 ; +303 ; -521 ; +297 ; -162 ; +323 ; +336 ; +364 ; +377 ; +295 ; +322 ; -566 ; +332

18 picchi

Con i valori rilevati è possibile compilare la tabella 5.

Tabella 5. Caratterizzazione dei cicli delle SSE per l'esercizio Rush

Sottostazione	Corrente Massima [A]	Corrente Minima [A]	Numero picchi	ΔSOC_{if}	ΔSOC_{max}	Ejoule [kJ]
SSE 1	1000	-899	26	-0.013	0.035	379
SSE 4	1000	-1000	18	-0.004	0.060	310
SSE 9	553	-961	18	-0.025	0.061	91

Per omogeneità di lavoro si decide di scegliere per costruire il ciclo test le stesse correnti del caso del ciclo Holiday, ma con l'aggiunta di un altro picco da 1000 A e 10 secondi, le correnti scelte sono quindi:

± 1000 ; ± 895 ; ± 700 ; ± 600 ; ± 500 ; ± 400 ; ± 200

La tabella 3 si trasforma nella tabella 6.

Tabella 6. Scelta delle correnti per il ciclo test Rush

Corrente-tempo [As]	Energia dissipata [kJ]	ΔSOC
1000 * 10	30	0.028
895 * 10	24	0.025
700 * 10	14.7	0.019
600 * 10	10.8	0.017
500 * 10	7.5	0.014
400 * 10	4.8	0.011
200 * 10	1.2	0.006

La sequenza di corrente proposta per il ciclo test è la seguente:

+1000, - 1000, +895, + 700, + 700, -700, +600, -895, - 600, +500, - 500, +200, - 200, +500, - 500, +600, - 600, + 700, - 700, +500, - 500, -700, +895,-895, +895, - 895,

il periodo T è di 755 s, leggermente maggiore del caso di riferimento, l'intervallo tra un gradino e l'altro è 19 s.

La figura 17 mostra il ciclo così ricavato.

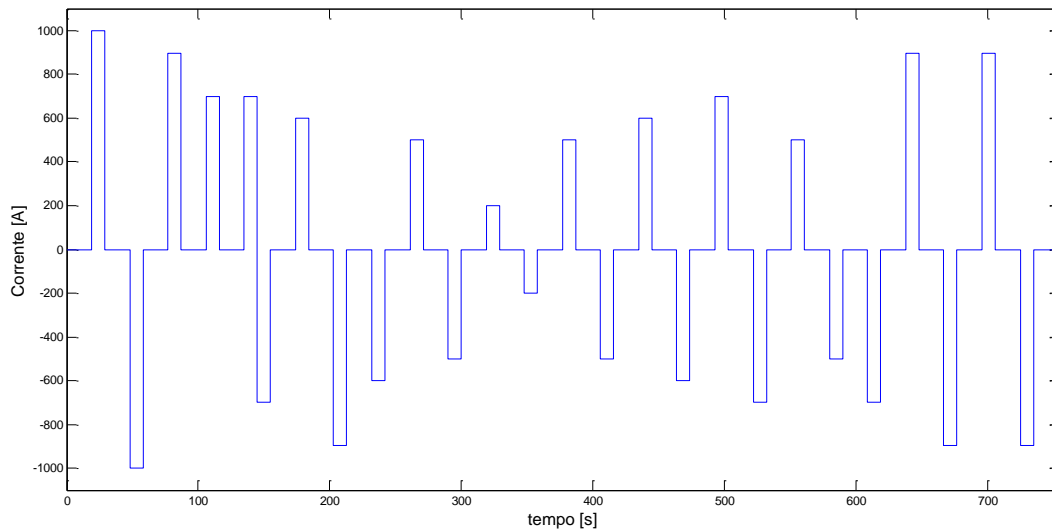


Figura 17. Ciclo Test Rush

Come nel caso precedente è possibile comparare il ciclo test con quelli che lo hanno generato, il risultato è riportato in tabella 7.

Tabella 7. Confronto tra il ciclo Test Rush ed i cicli delle singole SSE

Sottostazione	Corrente Massima [A]	Corrente Minima [A]	Numero picchi	Δ SOCif	Δ SOCmax	Ejoule [kJ]
SSE 1	1000	-899	26	-0.013	0.035	379
SSE 4	1000	-1000	18	-0.004	0.060	310
SSE 9	553	-961	18	-0.025	0.061	91
Ciclo Test	1000	-1000	26	0.000	0.064	383

La tabella 7 conferma che il ciclo rispetta i vincoli richiesti e costituisce una maggiorazione 'minima' delle prestazioni richieste al sistema di accumulo.

2.4.3 Ciclo Soft

La figura 18 presenta l'andamento delle correnti nel caso del ciclo soft.

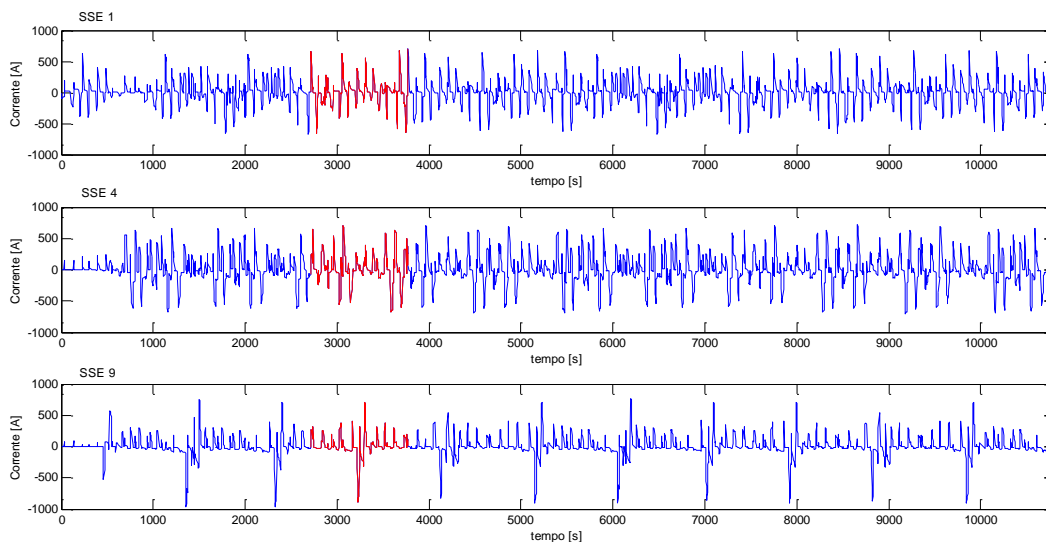


Figura 18. Andamenti delle correnti nel ciclo Soft

La prima cosa che si osserva è che in questo caso non è apprezzabile alcuno sfasamento temporale delle tre correnti.

Il dettaglio dei tre andamenti è riunito ed illustrato in un solo grafico nella figura 19.

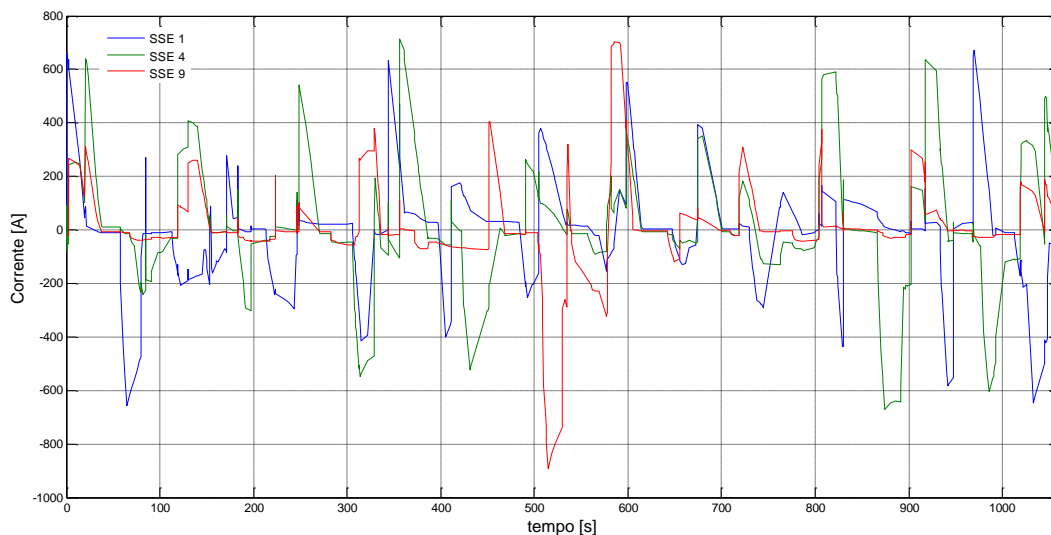


Figura 19. Andamenti delle correnti nel ciclo Soft - dettaglio

Il periodo T di ripetizione degli andamenti è pari a $T=1061$ s.

L'analisi dei picchi di corrente produce i seguenti risultati:

Sottostazione 1

+710 ; -658 ; +270 ; +277 ; +277 ; -295 ; -414 ; + 634 ; -401 ; -252 ; +383 ; -155 ; +553 ; +394 ; -292 ; -438 ; -574 ; +672 ; -646

19 picchi

Sottostazione 4

+252 ; +640 ; -226 ; +401 ; -300 ; +203 ; +541 ; -548 ; +193 ; +713 ; -518 ; +263 ; +385 ; +351 ; +590 ; -672 ; +640 ; -605 ; +335 ; +500

20 picchi

Sottostazione 9

+311 ; +261 ; +381 ; +406 ; - 894 ; +318 ; -321 ; +702 ; -102 ; +311 ; +375 ; +300 ; + 180 ; +180

14 picchi

I risultati vengono riassunti nella tabella 8.

Tabella 8. Caratterizzazione dei cicli delle SSE per l'esercizio Soft

Sottostazione	Corrente Massima [A]	Corrente Minima [A]	Numero picchi	$\bar{\Delta}SOC_{if}$	$\bar{\Delta}SOC_{max}$	Ejoule [kJ]
SSE 1	710	-658	19	-0.007	0.052	142
SSE 4	712	-672	20	0.027	0.039	188
SSE 9	703	-894	14	0.015	0.048	96

In base a quanto visto in precedenza ed utilizzando gli stessi valori di corrente del ciclo Holiday si arriva a definire la sequenza illustrata di seguito:

+895 , + 700, + 700 , -700 , +400 , -895, - 400 , +500, - 500, +200, - 200, +400, - 400, +200, - 200 , + 700, - 700, +500, - 500, -700

Il periodo del ciclo test è identico a quello dei cicli che lo hanno generato, ovvero $T=1061$ s, l'intervallo di tempo tra un gradino ed un altro risulta essere di 41 s.

La tabella 9 riprende e completa la tabella 8.

Tabella 9. Confronto tra il ciclo Test Soft ed i cicli delle singole SSE

Sottostazione	Corrente Massima [A]	Corrente Minima [A]	Numero picchi	ΔSOC_{if}	ΔSOC_{max}	Ejoule [kJ]
SSE 1	710	-658	19	-0.007	0.052	142
SSE 4	712	-672	20	0.027	0.039	188
SSE 9	703	-894	14	0.015	0.048	96
Ciclo Test	895	-895	20	0.000	0.064	190

Il ciclo quindi soddisfa le richieste, l'andamento temporale della corrente è rappresentato nella figura 20.

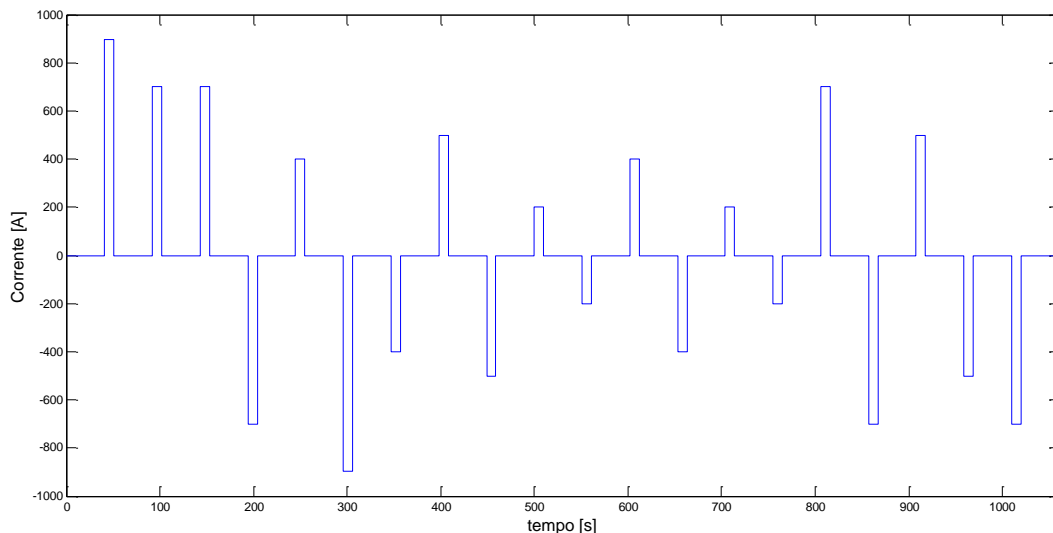


Figura 20. Ciclo Test Soft

In tabella 9 la SSE 4 risulta essere quella sottoposta alla maggiore richiesta di energia e picchi di corrente da parte della rete, è interessante quindi confrontare graficamente il ciclo test e quello della SSE 4:

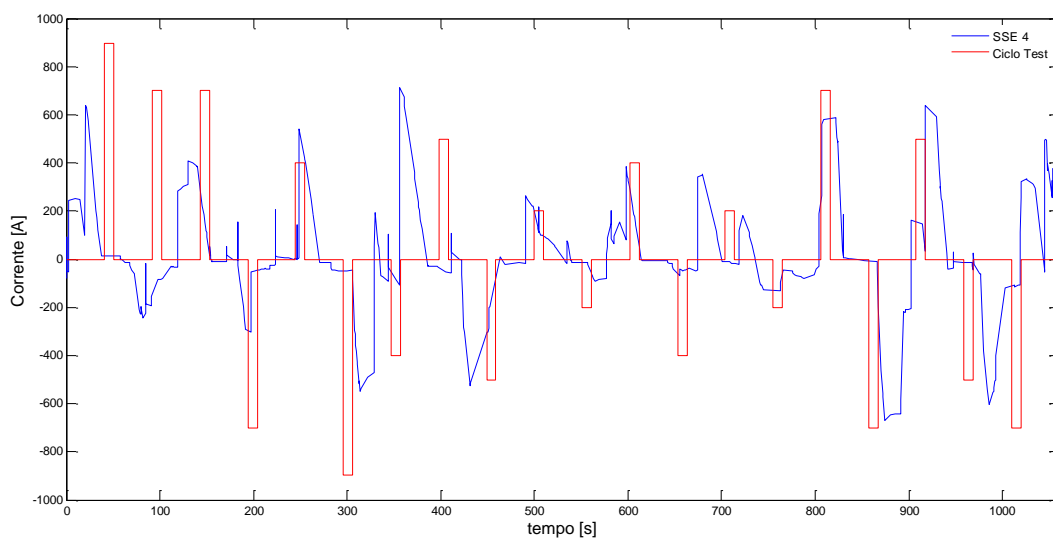


Figura 21. Confronto di cicli

A questo punto del lavoro si sono caratterizzate le tre condizioni principali di esercizio della linea e si sono sviluppati i relativi cicli rappresentativi: ora occorre assemblare questi cicli in una sequenza che permetta di definire un test vita costruito tenendo conto dell'utilizzo complessivo della rete tramviaria nell'arco di una intera annualità.

2.4.4 Costruzione del ciclo di prova complessivo

Come visto precedentemente la tabella 1 riporta mensilmente il numero di ore di esercizio della linea e la tipologia dello stesso:

Tabella 1. Tipologia di esercizio annuale della metro di Bergamo

Mese	Rush [h]	Soft [h]	Holiday [h]
Gennaio	75	282	162.5
Febbraio	100	240	130
Marzo	75	265	178.75
Aprile	105	252	146.25
Maggio	110	264	146.25
Giugno	45	295	162.5
Luglio	0	391	130
Agosto	0	340	178.75
Settembre	50	290	146.25
Ottobre	115	276	130
Novembre	105	252	146.25
Dicembre	50	290	162.5
Totale	830	3437	1820

La tabella 1 può essere convertita graficamente nella figura 22.

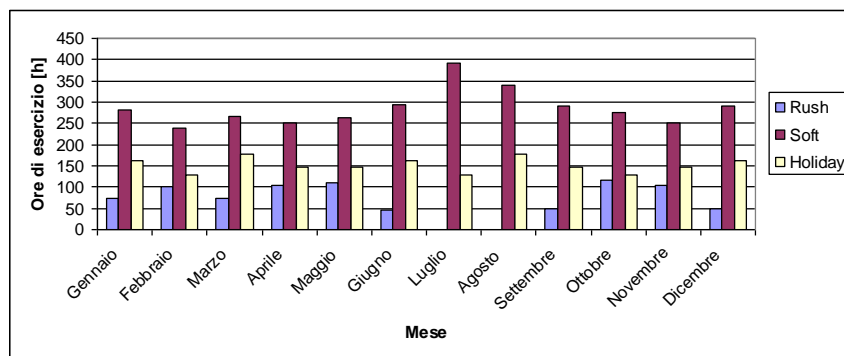


Figura 22. Ore di esercizio per tipologia di ciclo

E' interessante fare un confronto percentuale tra le diverse tipologie di esercizio ed il totale mensile:

Tabella 10. Confronto percentuale delle ore di esercizio

Mese	% Rush	% Soft	% Holi
Gennaio	14.44	54.28	31.28
Febbraio	21.28	51.06	27.66
Marzo	14.46	51.08	34.46
Aprile	20.86	50.07	29.06
Maggio	21.14	50.74	28.11
Giugno	8.96	58.71	32.34
Luglio	0.00	75.05	24.95
Agosto	0.00	65.54	34.46
Settembre	10.28	59.64	30.08
Ottobre	22.07	52.98	24.95
Novembre	20.86	50.07	29.06
Dicembre	9.95	57.71	32.34
Totale	13.64	56.46	29.90

Anche in questo caso è utile convertire la tabella in una rappresentazione grafica (figura 23).

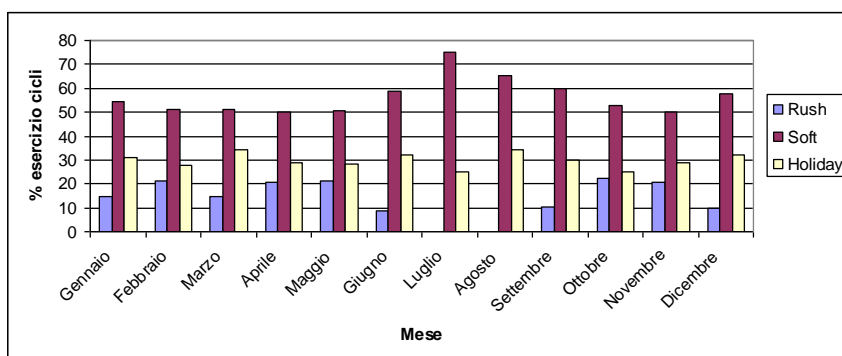


Figura 23. Percentuale mensile delle ore di esercizio

conoscendo il periodo di durata ogni ciclo è possibile trasformare le ore di esercizio nel numero di ripetizioni mensili dello stesso: basta dividere il numero di ore per il periodo considerato.

$$N_{cicli} = \frac{\text{Tempo di esercizio}}{\text{Periodo}} \quad [2]$$

Il risultato di questa trasformazione è riportato in tabella 11.

Tabella 11. Tipologia di esercizio annuale della metro di Bergamo espressa in numero di cicli

Mese	Rush [Cicli]	Soft [Cicli]	Holiday [Cicli]
Gennaio	358	957	622
Febbraio	477	814	498
Marzo	358	899	685
Aprile	501	855	560
Maggio	525	896	560
Giugno	215	1001	622
Luglio	0	1327	498
Agosto	0	1154	685

Settembre	238	984	560
Ottobre	548	936	498
Novembre	501	855	560
Dicembre	238	984	622
Totale	3958	11662	6970

Da essa è possibile ricavare la figura 24.

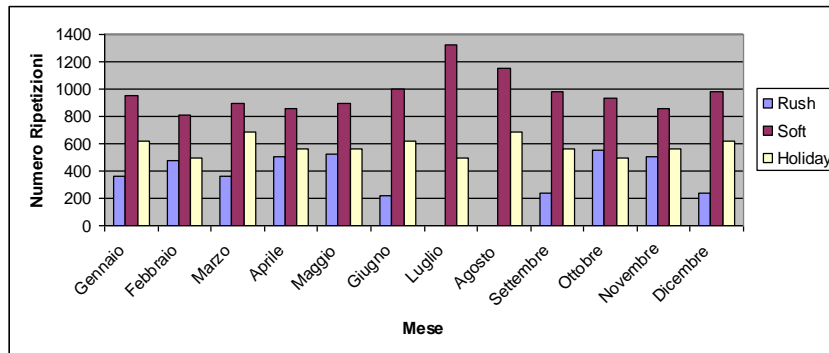


Figura 24. Numero di ripetizioni di ogni ciclo

Dal momento che il periodo di ripetizione dei cicli per le tre diverse tipologie di esercizio non è lo stesso ne consegue che le anche percentuali di ripetizione orarie e quelle di ripetizione dei cicli non coincidono fra di loro.

Tabella 12. Confronto percentuale tra le ripetizioni dei cicli

Mese	% Rush	% Soft	% Holiday
Gennaio	18.48	49.41	32.11
Febbraio	26.66	45.50	27.84
Marzo	18.43	46.29	35.27
Aprile	26.15	44.62	29.23
Maggio	26.50	45.23	28.27
Giugno	11.70	54.46	33.84
Luglio	0.00	72.71	27.29
Agosto	0.00	62.75	37.25
Settembre	13.36	55.22	31.43

Ottobre	27.65	47.23	25.13
Novembre	26.15	44.62	29.23
Dicembre	12.91	53.36	33.73
Totale	17.52	51.62	30.85

Anche in questo caso è possibile tradurre la tabella in una rappresentazione grafica (figura 25).

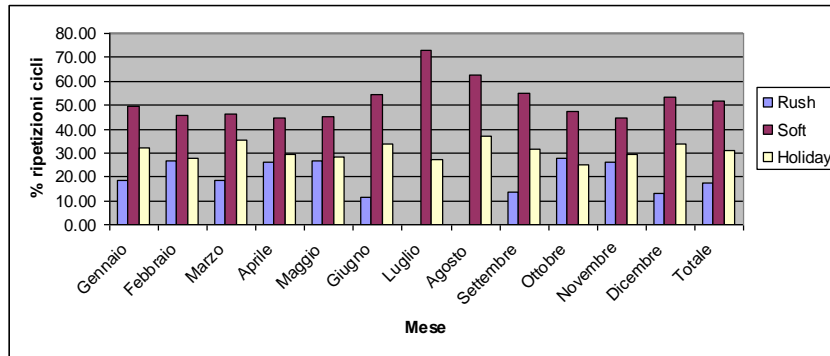


Figura 25. Percentuale mensile delle ripetizioni dei cicli

Con queste informazioni è possibile pensare di ‘assemblare’ i cicli test in modo di costruire una prova vita: per farlo basterebbe prendere in considerazione la tabella 11 e ripetere il numero di cicli indicato mensilmente, si sceglie però di operare in un modo diverso, illustrato di seguito.

Si consideri come esempio la prima riga della tabella 11.

Tabella 13. Numero di ripetizione dei cicli per il mese di Gennaio

Mese	Rush [Cicli]	Soft [Cicli]	Holiday [Cicli]
Gennaio	358	957	622

Nel mese di Gennaio il ciclo che presenta il numero di ripetizioni minimo è il Rush, si può calcolare la proporzione relativa delle ripetizioni dei cicli relativa al mese di Gennaio prendendo come base proprio il ciclo Rush, si ha:

$$N_{rip}^{Rush'} = \frac{N_{rip}^{Rush}}{N_{rip}^{Rush}}; N_{rip}^{Soft'} = \frac{N_{rip}^{Soft}}{N_{rip}^{Rush}}; N_{rip}^{Holiday'} = \frac{N_{rip}^{Holiday}}{N_{rip}^{Rush}} \quad [3]$$

Eseguendo questa operazione ed approssimando il risultato con numeri interi si ottiene:

$$N_{rip}^{Rush'} = 1; N_{rip}^{Soft'} = 2; N_{rip}^{Holiday'} = 3 \quad [4]$$

La sequenza 1-2-3 può essere utilizzata per comporre un ciclo base il cui periodo è pari a:

$$T_{bgen} = N_{rip}^{Rush'} T_{Rush} + N_{rip}^{Soft'} T_{Soft} + N_{rip}^{Holiday'} T_{Holiday} \quad [5]$$

In questo modo si è composto un ciclo elementare che rappresenta la base per rappresentare il mese di Gennaio, è immediato, conoscendo le ore totali di esercizio della tramvia nel mese considerato, ricavare il numero di ripetizioni del ciclo necessarie per simularlo:

$$N_{\text{rip gen}} = \frac{\text{Totale h Gennaio}}{T_{\text{bgen}}} \quad [6]$$

Estendendo questo approccio a tutte le righe della tabella 11 si ottiene la tabella 14.

Tabella 14. Costruzione della sequenza per la prova vita

Mese	Sequenza Base			Ripetizioni totali
	Nrush	N Soft	N Holiday	
Gennaio	1	3	2	321
Febbraio	1	2	1	443
Marzo	1	3	2	321
Aprile	1	2	1	475
Maggio	1	2	1	491
Giugno	1	5	3	204
Luglio	0	3	1	455
Agosto	0	2	1	610
Settembre	1	4	2	254
Ottobre	1	2	1	491
Novembre	1	2	1	475
Dicembre	1	4	3	231
Totale	1	4	3	3766

La tabella 14 permette sia di costruire delle prove che considerino l'esercizio mensile della rete che una sola prova che ne consideri l'esercizio annuale.

La tabella 14 consente anche di analizzare in modo semplice le sollecitazioni a cui il sistema di accumulo viene sottoposto nella sua vita operativa e può fornire indicazioni al progettista sia per impostare le prove vita che, eventualmente, per rivedere il dimensionamento del sistema infatti, tramite la tabella 15 che riporta i parametri caratteristici dei cicli test:

Tabella 15. Parametri caratteristici dei cicli Test

Ciclo	Corrente Massima [A]	Corrente Minima [A]	Numero picchi	ΔSOC_{if}	ΔSOC_{max}	Ejoule [kJ]
Rush	1000	-1000	26	0.000	0.064	383
Soft	895	-895	20	0.000	0.064	190
Holiday	895	-895	20	0.000	0.060	151

Si possono definire con facilità le sollecitazioni richieste al sistema di accumulo mese per mese.

Il lavoro svolto quindi non ha solo portato a definire le basi per realizzare un test sulla vita del sistema di accumulo, ma ha anche messo a disposizione del progettista un semplice strumento di esame delle prestazioni richieste al sistema stesso.

2.5 Osservazioni

Il lavoro sin qui svolto è consistito nella stesura di un ciclo di laboratorio che possa riprodurre in modo fedele le sollecitazioni che subirebbe un modulo di batterie installato nella metro di Bergamo: il ciclo eguaglia o maggiore queste sollecitazioni e permette quindi una stima affidabile della vita dell'accumulo, stima che in ogni caso sarà per difetto e quindi cautelativa.

La base della costruzione della prova è espressa dalla tabella 14: il progettista, in base alle sue esigenze, può decidere di costruire un test complessivo che rappresenti l'esercizio annuale del sistema di accumulo o

dei test più approfonditi che entrino nel dettaglio dei mesi di lavoro o delle prove parziali relative a determinati periodi di lavoro.

Una volta fatta questa scelta occorrerà procedere all'esecuzione della prova, inframmezzata periodicamente da test che permettano la stima del degrado dei parametri della batteria o più verosimilmente, di una cella in prova: capacità, resistenza interna e, se di interesse, analisi in frequenza, risposta al gradino, ecc. (figura 26).

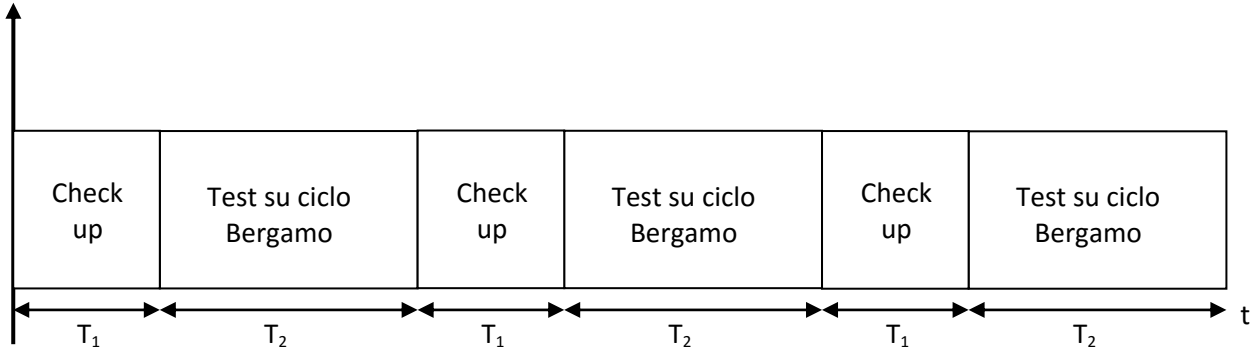


Figura 26. Struttura della prova vita

Quello che ci si aspetta dal sistema di accumulo è che esso nei primi cicli di lavoro presenti o delle prestazioni costanti o un miglioramento delle stesse, per poi rimanere stabile per un lungo periodo e successivamente iniziare a degradare: nella figura 27 è mostrato un possibile generico andamento della capacità nel tempo.

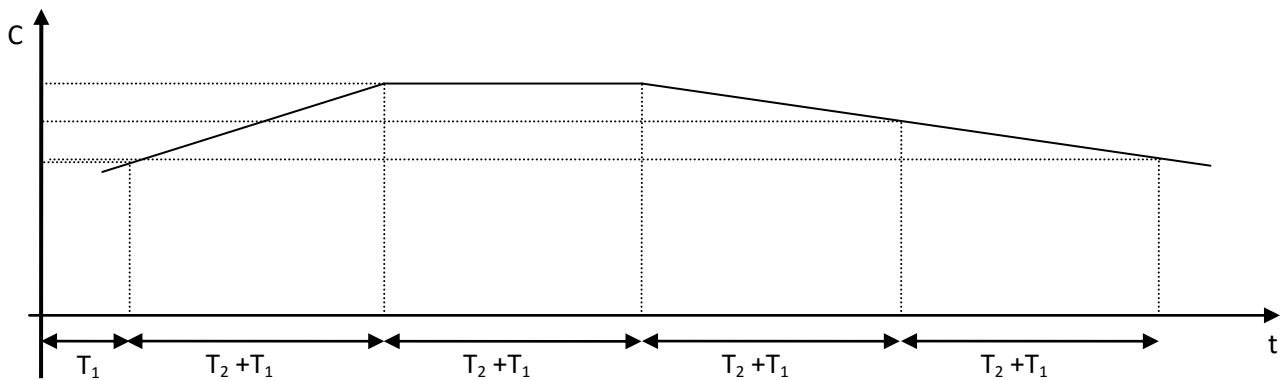


Figura 27. Possibile andamento della capacità

Scopo del progettista è di ottenere una vita delle batterie tale che esse non solo ripaghino il costo della loro installazione, ma producano un sensibile risparmio economico, conseguenza di quello energetico, per far questo ci si attende che la vita operativa sia dell'ordine degli anni e per lo stesso motivo ci si attende che la prova vita impostata, come indicato nella tabella 13, duri anni.

Non è detto in generale che si abbia a disposizione un tempo di anni per testare le celle, sorge quindi il problema di velocizzare la prova.

La figura 27 mostra che si può iniziare una previsione di vita quando il sistema inizia a degradare, provando per esempio ad interpolare i primi dati a disposizione per costruire una curva di previsione del degrado della capacità.

A priori non è certo che la curva di degrado non presenti una discontinuità che renda vano il processo di interpolazione: in generale però la discontinuità dovrebbe apparire quando ormai la cella ha perso le sue caratteristiche di resistenza interna e potenza specifica, ovvero quando la capacità è molto ridotta rispetto

a quella nominale (70/75 per cento della C nominale), condizioni nelle quali normalmente essa è stata già ritirata dal servizio.

Lo studio di prove di vita accelerata per batterie al Litio e dei fattori che possano relazionare queste prove con la vita effettiva delle batterie nella applicazione considerata è un tema di interesse della ricerca nel settore, un tema strategico proprio perché si dimensionano i sistemi di accumulo con l'obiettivo di farli durare anni.

Il presente lavoro non affronta direttamente il tema delle prove accelerate, esso è la base indispensabile per elaborare la prova vita, ma si può pensare di stressare le batterie sotto test ad esempio sottoponendole a temperature di lavoro elevate o a cicli derivati da quelli qui costruiti ma maggiorati dal punto di vista delle sollecitazioni richieste al sistema.

3 Conclusioni

Il presente lavoro ha ripreso ed approfondito il tema della costruzione di cicli per i test di vita sui sistemi di accumulo già affrontato in precedenza nell'ambito della ricerca di sistema elettrico, la differenza principale con l'attività passata è che in questo caso è stata caratterizzata in modo approfondito l'applicazione di riferimento: da questo approfondimento è nato anche uno sviluppo del metodo di sintesi presentato in passato.

Per quanto concerne l'applicazione considerata, la metropolitana leggera di Bergamo, il prosieguo di questa attività è l'esecuzione del test e la valutazione dei risultati, invece per lo sviluppo del metodo di sintesi dei cicli è possibile prendere altre applicazioni con caratteristiche diverse da quella di Bergamo, dove l'accumulo svolga la funzione di riserva di energia più che di potenza, ed applicare il metodo proposto e, se necessario, raffinarlo ancor di più.

Strettamente correlata all'attività di sviluppo di test di laboratorio equivalenti a quelli reali per le prove vita di un sistema di accumulo c'è quella dello studio delle prove accelerate, nelle quali il sistema viene forzato a degradare in tempi minori di quelli 'naturali' tramite, ad esempio, test realizzati ad alta temperatura: uno sviluppo possibile del lavoro è quello di studiare i legami tra il degrado accelerato e quello 'naturale'.

4 Riferimenti bibliografici

1. M. Pasquali, "Costruzione di un ciclo di prova per il test di vita di un accumulatore per la metropolitana di Bergamo e sua esecuzione", Report della ricerca di Sistema Elettrico RdS/PAR2013/189.
2. 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.
3. J. 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.
4. M. Ceraolo, M. Conte, R. Giglioli, G. Lutzemberger, 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).
5. 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", Report della ricerca di Sistema Elettrico RdS/2013/251.
6. M. Conte, "Lo stoccaggio dell'energia: potenzialità e prospettive", *Trasporto e Stoccaggio dell'Energia: Come diventare "Smart"*, Milano, 11 Luglio 2011.