



Ricerca di Sistema elettrico

Prova su sistema di accumulo misto per bus con ricarica flash

A. Genovese, F. Ortenzi, M. Pasquali, V. Sglavo
M. Pierini, A. Alessandrini, L. Berzi, L. Pugi, R. Barbieri, F. Cignini

PROVE SU SISTEMA DI ACCUMULO MISTO PER BUS CON RICARICA FLASH

Antonino Genovese, Fernando Ortenzi, Manlio Pasquali, Vincenzo Sglavo (ENEA)

Marco Pierini, Adriano Alessandrini, Lorenzo Berzi, Luca Pugi, Riccardo Barbieri, Fabio Cignini (Università di Firenze)

Settembre 2018

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2017

Area: Efficienza energetica e risparmio di energia negli usi finali elettrici e interazione con altri vettori energetici

Progetto: D.7 Mobilità elettrica sostenibile

Obiettivo: a. Scenari di Mobilità elettrica

Responsabile del Progetto: Maria Pia Valentini, ENEA

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 PREPARAZIONE DELL'ACCUMULO DI BORDO	6
3 ATTIVITÀ DI TEST A BANCO PRESSO UNIVERSITÀ DI FIRENZE.....	9
3.1 TEST PRELIMINARI E MESSA A PUNTO DEL SISTEMA DI CONTROLLO	9
4 TEST SUI SUPERCAPACITORI IN ENEA	17
5 PROVE SUL SISTEMA DI ACCUMULO.....	23
5.1.1 <i>Prova n°1: Scarica della batteria per caratterizzazione.</i>	24
5.1.2 <i>Prova n°2: Scarica della batteria su ciclo di marcia</i>	26
5.1.3 <i>Prova n°3: Scarica della batteria su ciclo di marcia scalato</i>	28
5.1.4 <i>Prova n°4: Scarica dei SC per caratterizzazione</i>	30
5.1.5 <i>Prova n°5: Scarica dei SC su ciclo di marcia</i>	34
5.1.6 <i>Prova n°6: Scarica di batteria e SC in uso combinato</i>	36
6 CONCLUSIONI.....	39

Sommario

Il report si configura all'interno del programma di ricerca di sistema elettrico 2017/2018 dell'ENEA con il progetto mobilità sostenibile. L'obiettivo è verificare un prototipo di minibus che possa disporre di un sistema di accumulo misto con batterie e supercapacitori per consentire la ricarica ultraveloce in modo da poter realizzare un servizio secondo la ricarica frequente in linea.

L'obiettivo del progetto è dimostrare che è possibile gestire supercondensatori e batterie in parallelo in modo che i primi possano prendere le correnti di picco in accelerazione e frenatura e le seconde garantire la base per un lento decadimento che non ne causi un invecchiamento precoce. A fianco di questo obiettivo primario si innesta un secondo altrettanto importante che è quello di rendere i supercondensatori di bordo indipendenti dal resto per ricevere una ricarica ultrarapida per contatto con un banco di supercondensatori carichi.

Per realizzare tale sistema e prototiparlo si sono dapprima definite le specifiche tecniche del sistema di comune accordo con i committenti e con i ricercatori che hanno gestito la stazione di ricarica quindi si sono effettuati gli acquisti per realizzare il prototipo e quindi si sono testati i singoli pezzi singolarmente, poi il sistema intero a bassa tensione ed infine il prototipo integrato al ciclatore su un ciclo di marcia misurato sperimentalmente.

1 Introduzione

Quanto descritto nel presente documento si colloca nell'obiettivo a.1 Strumenti di supporto al TPL che prevedeva la realizzazione di un simulatore HW per verificare la possibilità di attuare servizi di trasporto urbano con bus tramite l'adozione di architetture di linea elettrificate di tipo C ossia a ricarica frequente in concomitanza con le fermate di servizio. Il lavoro illustra quanto svolto per la verifica del sistema basato su un accumulo misto batterie - supercapacitori rappresentante il sistema energetico di un bus di 5 metri appositamente trasformato ed attrezzato per lo svolgimento del servizio di trasporto pubblico con ricariche frequenti. L'Università di Firenze si è fatta carico del processo di progettazione del sistema di accumulo e della realizzazione del relativo sistema di gestione dei flussi di potenza, nonché della progettazione della meccanica necessaria alla trasformazione del bus per il servizio dedicato. ENEA ha contribuito alla fase di progettazione dell'accumulo, la fase realizzativa delle strutture meccaniche di bordo e del sistema di ricarica a terra nonché della esecuzione delle prove al banco del sistema di accumulo come previsto. Inoltre ENEA ha provveduto all'integrazione del sistema di ricarica flash previsto per l'esecuzione della carica ultrarapida del sistema di Supercapacitori.

Il Report prodotto dall'Università di Firenze descrive ampiamente le fasi di dettaglio relative alle azioni di Sua competenza, quali la progettazione del sistema di accumulo, del sistema di gestione delle potenze e delle trasformazioni meccaniche necessarie all'installazione sul bus del sistema di ricarica flash. Nel presente report sono riportate le indagini relative ai test eseguiti in parte presso la sede dell'Università di Firenze ed in parte presso i laboratori ENEA della Casaccia per verificare al banco, in condizioni controllate, l'effettiva rispondenza alle esigenze di progetto ed alla positiva risposta per l'esecuzione del ciclo di lavoro. Questo, per quanto previsto ed indicato, è il lavoro prodromico alla implementazione sul bus del sistema di accumulo ed alla esecuzione delle prove di ricarica flash su strada.

Il report, per la natura del lavoro svolto, è presentato in modalità congiunta con i contributi del personale dell'Università di Firenze che hanno seguito le diverse fasi di sviluppo del sistema di accumulo e di gestione e che per la natura sperimentale non poteva essere disgiunto dal lavoro di verifica e test svolto dal personale ENEA.

Il veicolo è messo a disposizione da UNIFI essendo già in possesso di due unità tipo minibus da 30 posti e 5 metri di lunghezza a trazione elettrica, e tali autobus rappresentano un laboratorio per installare e testare nuove tecnologie elettriche. I veicoli sono presenti presso il Centro ENEA della Casaccia.

Il problema affrontato con questa opportunità di ricerca è la ricarica rapida senza che si vada a diminuire l'aspettativa di vita del sistema di accumulo. Ad oggi aumentare la velocità della ricarica per sistemi a batteria implica un accorciamento della aspettativa di vita delle stesse al punto da metterne in dubbio la convenienza economica e/o l'esigenza di utilizzare idonee batterie al litio capaci di lavorare con correnti di ricarica sino a 10C. La soluzione con accumulo misto supercapacitori-batterie che lasci ai supercapacitori la ricarica rapida, oltre agli spunti ad elevata potenza, e mantenga le batterie per i servizi e per le fasi di moto meno impegnative può garantire le prestazioni auspiccate senza deteriorare le batterie.

In particolare si può preconizzare un servizio in cui il bus abbia poche batterie sufficienti a garantire l'energia minima per servizi e ausiliari nonché quella per le fasi di crociera da capolinea a capolinea. In questo modo batterie che si ricarichino a 2C in bassa tensione (fino a 43 kW) per alcuni minuti ad ogni capolinea sono applicabili con minor dispendio economico e maggiore durata della vita operativa. Per le fasi di erogazione in accelerazione e salita o di recupero in discesa e frenatura, l'energia può essere immagazzinata da un banco di supercapacitori. Tale banco verrà ricaricato inoltre in una o più fermate prestabilite in decine di secondi tramite ricarica per contatto o con altra infrastruttura esistente per la ricarica rapida.

Un servizio di siffatta specie consentirà di ottenere:

1. Autonomia illimitata ai bus elettrici con un'infrastruttura di ricarica molto meno invasiva dei filobus
2. Applicabilità dei bus elettrici su qualsiasi percorso, anche in presenza di salite e altre fasi energivore in quanto basterà ricaricare i supercapacitori prima dei tratti energivori
3. Estensione della vita del pacco batterie fino ad arrivare ai 5 anni di servizio con pacchi batteria piccoli che rappresenterebbero il breakeven finanziario sia sui bus elettrici convenzionali che su quelli a gasolio

Per quanto concerne la carica rapida (flash) a cui si fa riferimento, questa è oggetto di un'altra ricerca del PAR2017 che prevede la realizzazione di una stazione di ricarica flash per ricaricare un veicolo alimentato da supercapacitori appositamente adeguato al servizio con un sistema di contatto a pantografo. Questa due ricerche sono complementari tra loro e si scambiano requisiti e informazioni.

L'obiettivo del presente progetto è dimostrare la fattibilità di gestire supercondensatori e batterie in parallelo in modo che i primi possano lavorare sul picco di potenza in accelerazione e frenatura e le seconde garantire la base per un lento decadimento che non ne causi un invecchiamento precoce. A fianco di questo obiettivo primario se ne innesta un secondo altrettanto importante che è quello di rendere i supercondensatori di bordo indipendenti dal resto per ricevere una ricarica ultrarapida per contatto con un banco di supercondensatori carichi.

2 Preparazione dell'accumulo di bordo

Le attività di progettazione del sistema di accumulo a SC hanno portato ad individuare la sua dimensione : tre SC da 63 F collocati in serie per una capacità totale di 31 F ed una tensione di lavoro massima di 375 V. Con tale configurazione l'energia utile estraibile nelle condizioni di tensione minima utile pari alla metà della massima è di 307 Wh. Dalle simulazioni svolte dall'Univ. di Firenze e dalle precedenti misure su strada il veicolo in esame a pieno carico presenta un consumo di 480 Wh/km per cui l'autonomia con i SC sarebbe intorno ai 650 metri. Ad accompagnare i SC sono presenti alcuni accumulatori per 120 Ah a 72 V con il compito di alimentare i servizi ausiliari e garantire la potenza di crociera. Allo scopo sono state utilizzate batterie al piombo precedentemente acquisite che hanno facilitato la realizzazione del set up sperimentale in quanto maggiormente robuste alla sovraccarica che potrebbero verificarsi in queste fasi sperimentali. In Fig.1 è riportato il rendering del nuovo alloggiamento del sistema di accumulo che ha preso il posto del precedente.

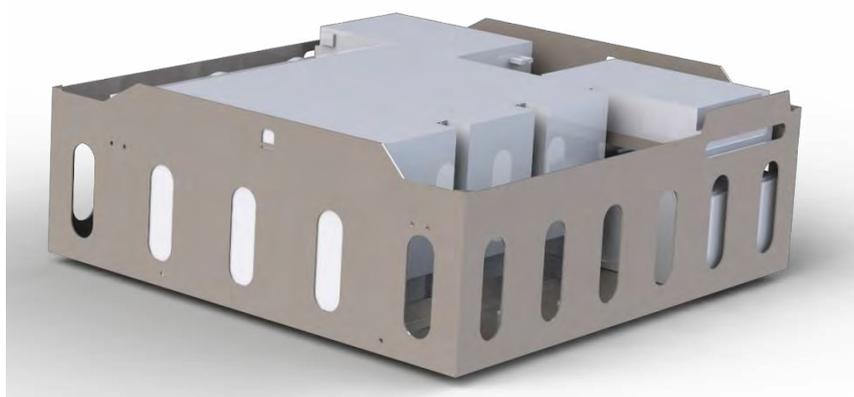


Figura 1 : rendering cassone per alloggiamento accumulo

Il sistema di accumulo ibrido e tutti i sistemi di controllo e comando sono alloggiati a bordo del bus nell'apposito vano batterie, pertanto è stato progettato un cassone personalizzato. Esso è stato costruito in base alle dimensioni e peso degli apparati installati, rispettando gli ingombri e ancoraggi dell'alloggiamento sul bus. La realizzazione delle lavorazioni è stata interamente sostenuta presso le officine meccaniche ENEA.



Figura 2 : cassone con sistemi di accumulo



Figura 3 : alloggiamento sul bus

Questa soluzione ha sfruttato gli spazi preesistenti nel veicolo non richiedendo ulteriori trasformazioni di carrozzeria. Il cassone contenente i due sistemi di accumulo è estraibile attraverso lo scorrimento di ruote metalliche solidali al cassone poggianti sui due longheroni di supporto del bus.

Il sistema di accumulo a supercondensatori è gestito attraverso una logica di controllo ed un sistema di conversione bi-direzionale del tipo buck-boost che in relazione alle intensità ed ai versi delle correnti provvede ad invertire il senso di trasformazione ed il funzionamento. Pertanto il sistema dei SC è interfacciato al bus DC del veicolo attraverso il convertitore DC/DC bidirezionale controllato in corrente. In figura 4 è riportato lo schema a blocchi del sistema in cui sono evidenziati i diversi componenti.

Il sistema di regolazione lavora per fornire alla batteria una corrente di ricarica pari al valore idoneo che la batteria può accettare nelle condizioni di Stato di carica in cui si trova. Questa corrente corrisponde ad una determinata potenza P_{br} che deve essere quindi fornita alla batteria attraverso il prelievo di energia dai SC e tramite il DC/DC. La potenza in uscita dal blocco A è quindi la potenza erogata dai SC per ricaricare la batteria. La presenza del carico viene interpretata come un disturbo d'anello che innesca una reazione del controllo per compensare questo disturbo e quindi invita i SC ad erogare maggiore/minore potenza per coprire questo disturbo.

Al nodo di inserzione del disturbo possiamo ricavare le equazioni di equilibrio delle potenze :

$$(P_{br} - \beta P_b)A - P_L = P_b$$

$$(P_{br} - \beta P_b)A = P_{SC}$$

da cui ricaviamo la potenza di batteria

$$P_b = P_{br} \frac{A}{1 + A\beta} - P_L \frac{1}{1 + A\beta}$$

e quella dei SC

$$P_{SC} = P_{br} \frac{A}{1 + A\beta} + P_L \frac{A\beta}{1 + A\beta}$$

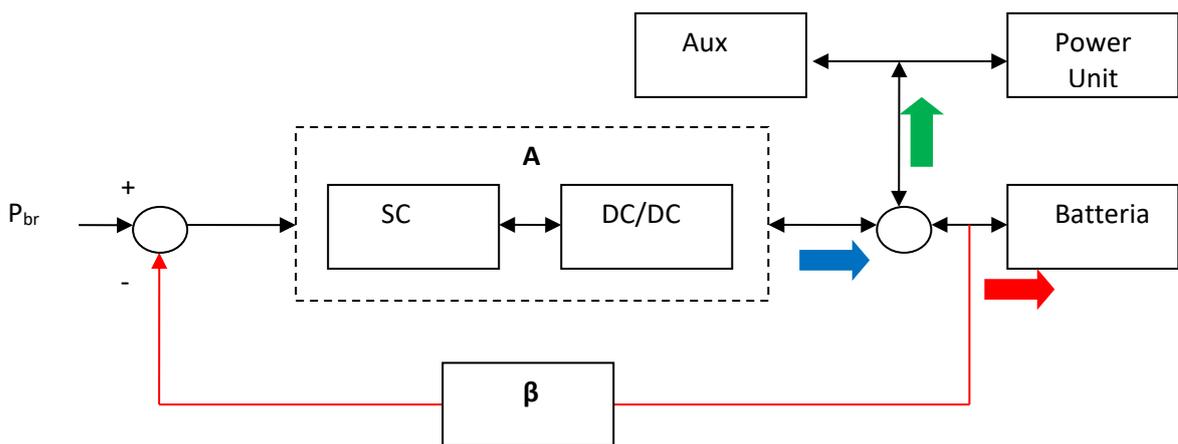


Figura 4 : schema a blocchi del sistema controllato

In condizioni di corrente di ricarica richiesta nulla la potenza di batteria è negativa ossia la batteria eroga una potenza dipendente dal guadagno di anello mentre i supercapacitori coprono la maggior parte della potenza richiesta.

3 Attività di test a banco presso Università di Firenze

La Figura 5 riporta il layout d'impianto semplificato, in cui ci sono tutti i dispositivi importanti, il motore dell'autobus (nello schema semplificato viene omesso il chopper utilizzato per il suo controllo), il sistema di accumulo misto costituito da batterie e supercap, questi ultimi collegati in parallelo con l'interposizione di un convertitore DCDC, il body computer o CPU che contiene il sistema di controllo e l'intelligenza con la logica di gestione programmata al suo interno, i supercapacitori (SC), un relay principale (PR) e un sensore di corrente (LEM).

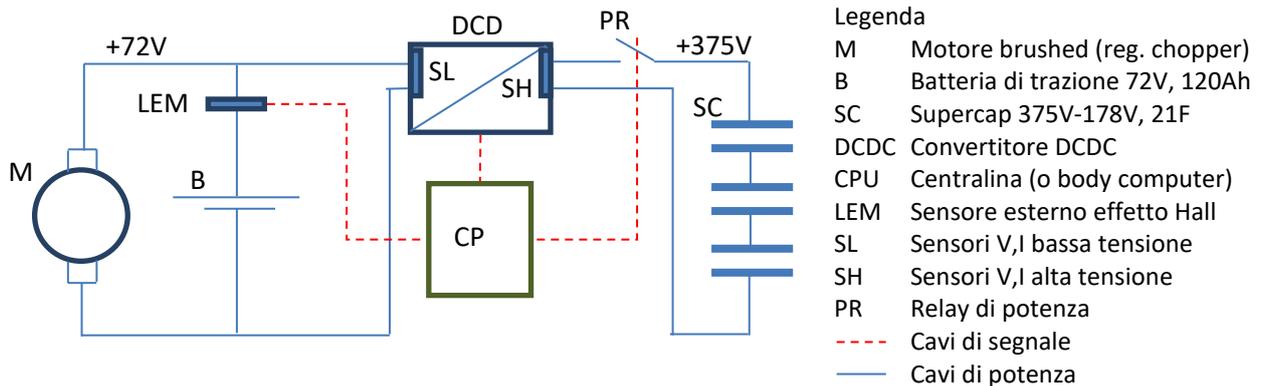


Figura 5 Layout d'impianto con focus sui sensori

3.1 Test preliminari e messa a punto del sistema di controllo

Per verificare il corretto funzionamento del sistema in condizioni vicine a quelle reali sono quindi necessarie prove di laboratorio che consentano di riprodurre condizioni di carico prossime a quelle reali. Questo è particolarmente importante per la sperimentazione del sistema sia nelle configurazioni di buck sia in quella di boost.

Per semplificare la trattazione si utilizza l'espressione stadio High per descrivere lo stadio dell'azionamento da connettere sull'impianto finale ai supercondensatori dell'autobus (200-400V). Lo stadio LOW corrisponde al DC bus alimentato dalle batterie dell'autobus (72V) e quindi agli apparati di trazione.

Per quanto riguarda la connessione dello stadio HIGH del convertitore presso i laboratori di università di presente è disponibile un'unità composta da Variac (variazione del livello di tensione AC) raddrizzatori (ponte passivo stabilizzato da opportune capacità e resistenze di scarica) che consente di implementare una sorgente di tensione continua regolabile tra 0 e 300V (correnti massime 32A).

Sul lato "LOW" è stato invece realizzato un piccolo circuito che consente l'inserimento di un limitato carico reversibile (circa 300W di potenza continuativa su batterie ampiamente sovraccaricabile per brevi intervalli di tempo fino a 1-2kW) affiancato da un carico puramente resistivo corrispondente a circa 1200W (Figura 6). Gli Azionamenti sono controllati via CAN utilizzando una scheda di prototipazione rapida MICROLABBOX ed un host PC per funzionalità HMI.

L'azionamento è protetto da un sistema di resistenze di precarica azionato manualmente per verificare e calibrare preliminarmente il sistema a protezione degli stadi HIGH e LOW del convertitore come richiesto dal costruttore secondo la sequenza indicata in figura.

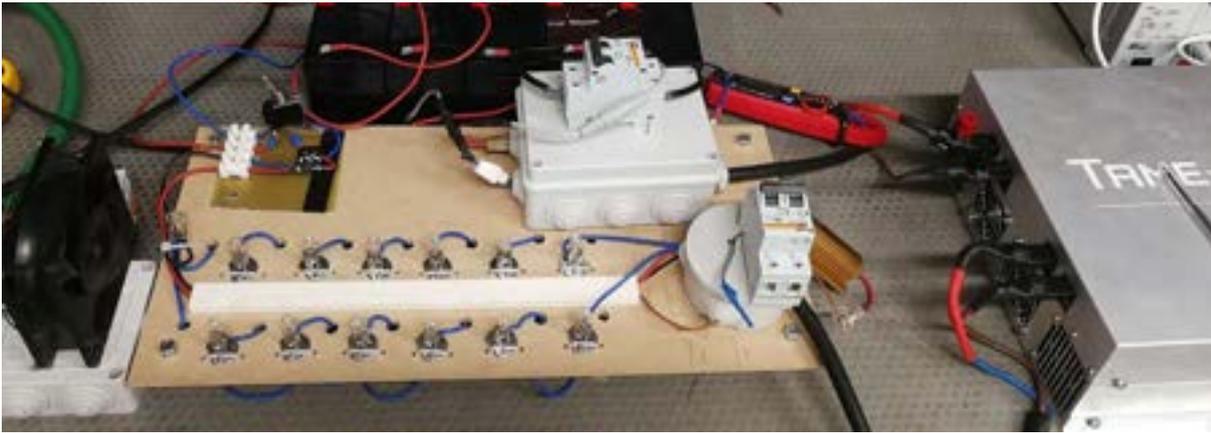
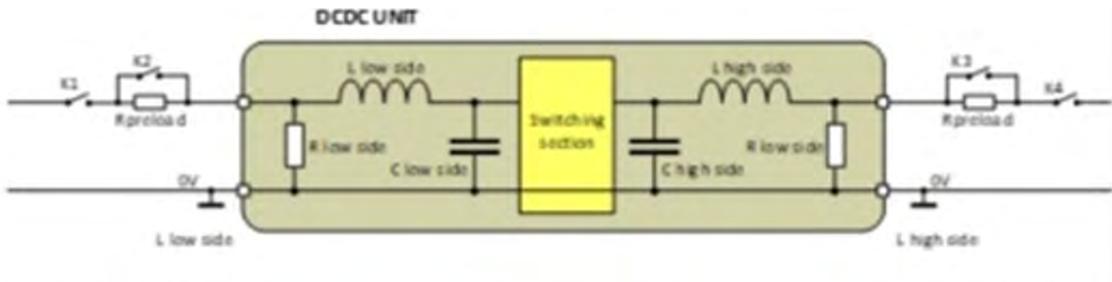


Figura 6 DC-DC al banco con carico passivo lato LOW



Comment	K1	K2	K3	K4
Initial state.				
Start the DCDC Communicate with the DCDC through CAN bus until setup is OK.	OPEN	OPEN	OPEN	OPEN
Preload low side. Wait until the CAN measure of V _{low} side is approximately equal to the external low side voltage source, Or Wait until 3 consecutives measures of V _{low} side are approximately equal.	OPEN	OPEN	OPEN	CLOSED
Preload high side. Wait until the CAN measure of V _{low} high is approximately equal to the external high side voltage source, Or Wait until 3 consecutives measures of V _{low} side are approximately equal.	CLOSED	OPEN	OPEN	CLOSED
Full power high side.	CLOSED	OPEN	CLOSED	CLOSED
Full power low side. The DCDC is ready for full use.	CLOSED	CLOSED	CLOSED	CLOSED

Figura 7 Procedura di protezione da INRUSH currents dell'azionamento TAME

Configurato l'azionamento in modalità buck ed il controllo in corrente (il controllo in corrente è indispensabile per poter connettere in parallelo gli azionamenti su bus DC) si è provveduto a verificare il controllo in corrente. I test effettuati hanno fornito risultati ottimi con controllo dei DCDC avvenuto nei limiti della precisione dei sensori e del controllo di potenze che non superano il 10% della potenzialità del sistema a bordo del veicolo. Si è testata quindi prima ad azionamento singolo e poi agli azionamenti in parallelo l'erogazione di una corrente nota.

La funzionalità del sistema è stata verificata anche per la corretta ripartizione delle correnti tra carichi e convertitori rispetto al riferimento assegnato. Ridondando le misure di corrente e tensione si verifica la precisione delle stime effettuate dalla logica di azionamento.

I risultati sono stati soddisfacenti, nei limiti della precisione dichiarata dei vari sensori utilizzati (complessivamente 0.1 A su quelli di corrente) e della limitata potenza pilotata (massimo 5-10% della massima gestibile dagli azionamenti) il sistema garantisce buoni margini di precisione statica (nell'ordine di 0.1A anche nei casi più gravosi).

In questo caso non si ritiene opportuno fare valutazione su prontezza dinamica o sui margini di stabilità del sistema in quanto i carichi connessi e le potenze gestite sono relativamente diverse e nella fattispecie minori di quelle finali installate. L'attuale frequenza di aggiornamento del sistema è intorno ai 10Hz (100ms) aumentabili al massimo a 20Hz (50ms). Si può ritenere quindi la banda passante del sistema in termini di inseguimento di un riferimento paragonabile a quanto sopra detto (10-20Hz). Per quanto riguarda la reiezione di un disturbo esterno con riferimento fisso sono necessarie specifici test.

Verificata la corretta configurazione ed il funzionamento dei convertitori è stata ideata una logica di controllo basilare implementata su scheda di prototipazione rapida DSPACE Microlabbox.

Come visibile dallo schema di Figura 8 la connessione tra SC e batterie attraverso il DC/DC è regolato attraverso una specifica procedura di controllo dello stato delle tensioni in modo da procedere in sicurezza alla chiusura dei contattori ed evitare correnti elevate-

Il sistema prevede la generazione di un riferimento comune di corrente di ricarica da fornire alle batterie del veicolo prelevandola dai SC . Il riferimento di corrente di ricarica delle batterie viene deciso e generato a partire dallo stato di carica stimato di batterie e supercondensatori. Il riferimento di corrente viene imposto a due anelli di regolazione del tutto identici che controllano separatamente uno dei due azionamenti TAME. In questo modo l'algoritmo risultante può essere implementato con modeste risorse computazionali su due microcontrollori o su due thread indipendenti realizzati implementati sulla scheda di prototipazione DSPACE Microlabbox. La funzionalità del sistema viene continuamente monitorata ed assicurata con logica "2 su 2": viene continuamente verificata la coerenza di azioni tra i due anelli. Se questa non viene verificata si arresta l'esecuzione mettendo il sistema in sicurezza.

Indipendentemente dal tipo di implementazione realizzata (micro-controllore o scheda di prototipazione rapida DSPACE) il codice di controllo viene inizialmente realizzato in ambiente Matlab-Simulink™ e quindi compilato per lo specifico target con poche minime modifiche inerenti soprattutto l'accesso a periferiche e canali I/O che su target diversi devono essere necessariamente adattati. L'idea che guida questa metodologia di sviluppo è quella di generare codice che possa essere facilmente utilizzato su diverse fasi di progetto (prove preliminari al banco UNIFI, prove su ciclatore e prototipo finale ENEA) e per l'implementazione e l'integrazione all'interno di ulteriori piattaforme di simulazione e sperimentazione Hardware In the Loop.

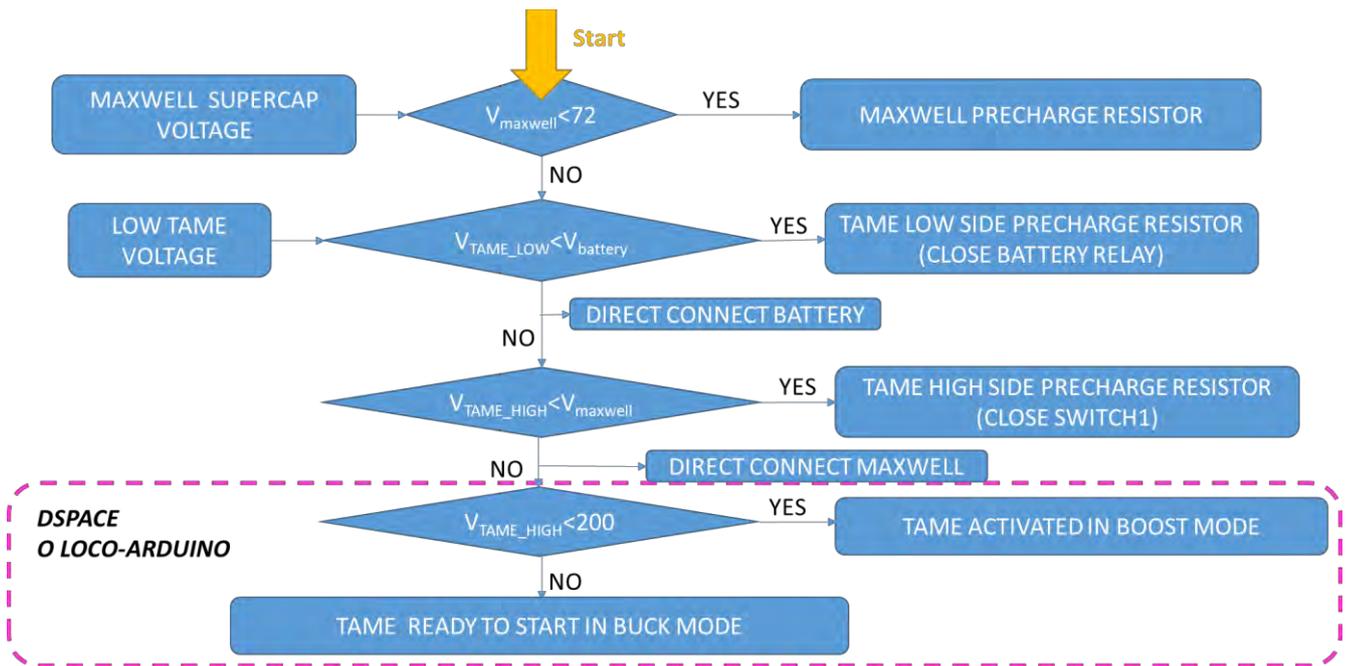


Figura 8 Schema a blocchi della logica di gestione

In Figura 9 è riportata la logica di controllo con il funzionamento in marcia mentre in Figura 10 la stessa logica in durante la fase di ricarica.

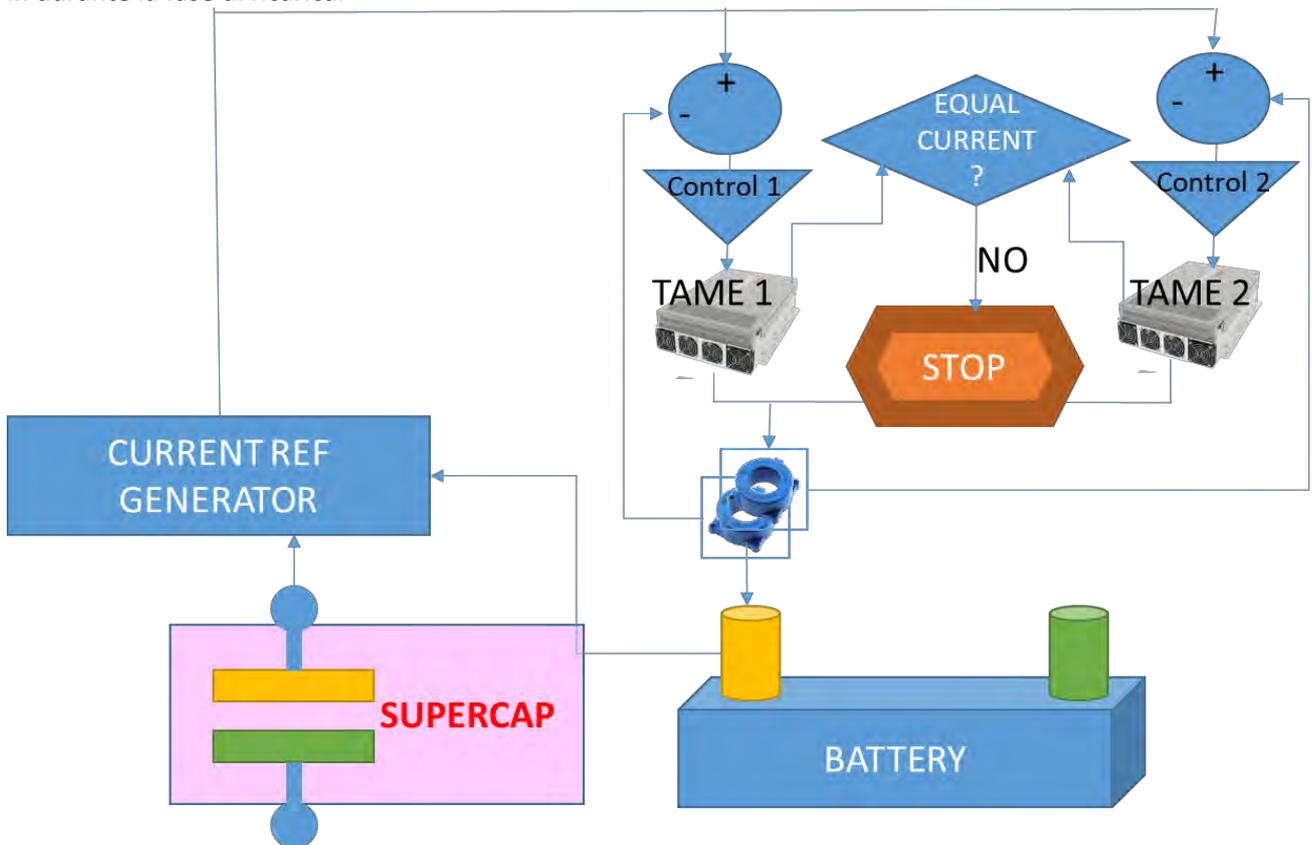


Figura 9 Run mode

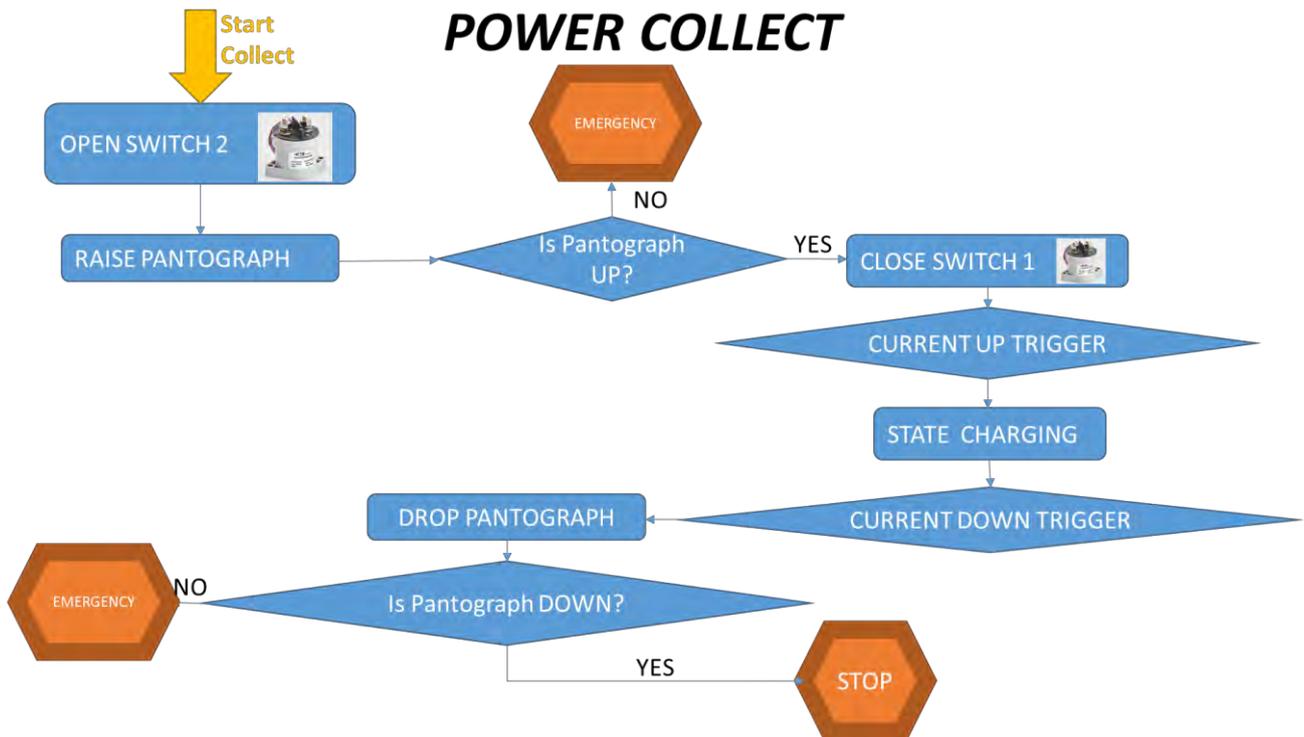


Figura 10 Charge mode

I test elettrici sono stati suddivisi in test ad alta tensione (per cui tutto quello che riguarda i supercapacitori) e in test elettrici del sistema di controllo e test di bassa tensione.

Caratteristiche del sistema di controllo

Le principali funzioni implementate nel “body computer” installato per l’interfacciamento dei diversi sistemi di potenza comprendono:

- il controllo dell’erogazione della potenza da parte degli supercapacitori sul DC-bus a bassa tensione durante il funzionamento del veicolo, con logica prevista di tipo proporzionale e tesa alla minimizzazione delle correnti di batteria compatibilmente con lo stato di carica dei SC
- il controllo della sequenza di collegamento delle parti in bassa ed in alta tensione del veicolo durante le diverse modalità di funzionamento
 - in marcia: collegamento dei convertitori buck-boost sia agli SC che al DC bus mediante teleruttori ad alta corrente
 - in fase di ricarica dal pantografo: isolamento dei SC e del pantografo - soggetti ad alimentazione esterna - rispetto al resto dell’impianto del veicolo
 - in presenza di errori, segnali di fault, stato di carica dei SC insufficiente: isolamento dell’impianto aggiuntivo rispetto al DC-bus per permettere la marcia del veicolo secondo le modalità convenzionali
 - in fase di cambiamento di stato: esecuzione di una procedura di controllo delle tensioni di tutti gli elementi dell’impianto, che prevede l’allineamento delle tensioni attraverso l’uso di resistori di precarica, gestiti anche in questo caso di teleruttori (di capacità inferiore ai precedenti) per rendere la procedura automatizzata

- il controllo di tutti gli ingressi aggiuntivi (switch che segnalano la posizione del pantografo, comandi dell'utente, segnali di errore e/o di warning da parte di altri nodi dell'impianti) e la gestione delle funzionalità di sicurezza anche in caso di carenza parziale di informazioni attendibili (ad esempio per presenza di errori di comunicazione sulla linea CANbus)

La Tabella1 riassume le principali informazioni raccolte dal body computer prototipale.

Tabella 1

Componente	Informazione	Sorgente	Funzionalità
Supercap (SC)	Stato di carica dei SC	Messaggio CANbus	Regolazione della precarica dei SC in modalità "Boost" Verifica ad ogni ciclo di lavoro della correttezza delle tensioni dei singoli elementi
	Temperatura dei SC	Messaggio CANbus	Azionamento del sistema di refrigerazione "on demand"
Pantografo	Posizione del pantografo: a) Abbassato b) In attesa c) Connesso alla campana di carica	Segnale analogico a 2 livelli (0-1) campionati dal body computer	Abilitazione dei ruttori corrispondenti alla fase di utilizzo del veicolo, isolamento del veicolo, preparazione per l'erogazione della ricarica sui SC
Convertitori Buck-Boost	Tensioni DC-bus alta e bassa tensione Correnti effettive erogate Errori, warning, temperature	Messaggio CANbus	Abilitazione delle funzioni richieste compatibilmente con lo stato del componente
Pannello di controllo utente	Movimentazione del pantografo Avvio/arresto del sistema Abbassamento del pantografo in modalità di emergenza	Segnale analogico a 2 livelli (0-1) campionato dal body computer	Ricezione dei comandi dell'utente e gestione del motore di azionamento del pantografo
Misure di corrente	Correnti entranti/uscenti dalla batteria	Segnale analogico 0-5V campionato dal body computer	Esecuzione dell'anello di controllo della corrente per l'azionamento dei convertitori Buck-Boost
	Correnti entranti/uscenti dal pantografo	Segnale analogico 0-5V campionato dal body computer	Abilitazione della movimentazione solo in presenza di valori prossimi allo zero
	Correnti	Messaggio CANbus da	Comparazione in tempo reale della

	entranti/uscenti dalla batteria - misura ridondante	nodo di misura	lettura proveniente da un secondo nodo della rete, in grado di campionare direttamente un sensore di corrente identico al primo ed interrompere il funzionamento del sistema in caso di incoerenza
--	---	----------------	--

Per ogni funzione elencata in tabella è stato sviluppato un software di controllo in ambiente Matlab-Simulink in grado di gestire i diversi ingressi presenti e coordinare i segnali di azionamento (via CANbus e via uscite analogiche a bassa tensione) necessari per la loro implementazione. Tale approccio è stato scelto al fine di:

- accedere, almeno a livello potenziale, a librerie di controllo e condizionamento del segnale estese ed affidabili
- realizzare il sistema in modalità multiplatforma, in quanto l'ambiente di sviluppo permette la compilazione diretta in linguaggio C o C++ delle logiche di controllo realizzate e il caricamento del software così realizzato su un grande numero di periferiche diverse sia per architettura di calcolo che per potenza e prestazioni. Per il caso studio considerato si sono adottate due diverse architetture:
 - DSPACE, un sistema real-time ad alte prestazioni di comune impiego nella ricerca applicata e nello studio di sistemi mecatronici ed automobilistici
 - piattaforma prototipale basata su microcontrollore ATmega2560, di basso costo e di semplice reperibilità.

Parallelamente allo sviluppo del sistema di controllo, è stata realizzata una apposita interfaccia di comunicazione che attraverso un interprete CAN bus (potenzialmente, qualsiasi hardware supportato da Matlab-Simulink può essere idoneo) permetta non solo la diagnostica del veicolo, ma anche attività funzionali allo sviluppo ed all'incremento della "robustezza" del sistema stesso. Le funzioni di diagnostica possono essere seguita in modalità real-time e controllate attraverso una interfaccia grafica GUI (Figura 11), anch'essa sviluppata in ambiente Matlab-Simulink.

Le funzioni previste sono:

- Diagnostica e monitoraggio: lettura dei messaggi presenti sulla linea CAN bus per il monitoraggio delle performance del sistema in tempo reale
 - informazioni dai convertitori di potenza (elementi TAME1-TAME2)
 - informazioni dai SC
 - informazioni dal Body computer (stato dei pin analogici, comandi impartiti agli altri nodi etc.)
- Emulazione: in assenza dei nodi di potenza e degli altri nodi del sistema, il software caricato sul Body computer può essere verificato "offline" prima dell'installazione sul veicolo e/o sul testbench grazie alla possibilità di inviare i segnali attesi secondo le necessità stabilite dall'utente. L'interfaccia grafica (mediante casella di testo o barra "slider" a seconda del tipo di ingresso) prevede di regolare gli ingressi attraverso l'immissione diretta dei valori di:
 - tensione di batteria
 - tensione di SC
 - tensione DC-bus di alta e bassa tensione
 - corrente misurata dal primo anello di misura
 - corrente misurata dal secondo anello di misura (ridondante)

4 Test sui Supercapacitori in ENEA

I Supercapacitori del banco di accumulo ibrido debbono sostenere una ricarica di tipo impulsivo secondo il criterio della flash-charge per travaso da altrettanti supercapacitori posti nella stazione di terra. Mentre debbono trasferire minori correnti in condizioni di alimentazione del drivetrain. Al fine di verificare i SC nel ciclo di lavoro così diverso tra carica e scarica si sono eseguiti alcuni test preliminari nelle due condizioni operative. Questi test coinvolgono i supercapacitori, chiamati anche moduli nel proseguo, collegati in serie per una una tensione di lavoro massima di 375 V e capacità complessiva equivalente di 21 F . La corrente massima in ricarica è di 500 A.

I dati nominali dei supercap riportano correnti massime di picco per il singolo capacitore di 1800 A, ma per il progetto sono state fissati tutti i parametri affinché la corrente massima sia di 500 A, tale limite interessa: il dimensionamento termico dei cavi, l'elettronica e i dispositivi di controllo.

Pertanto state eseguite delle prove di trasferimento di energia tra i supercap e un ciclatore, in particolare la macchina AVL in dotazione all'ENEA, il quale ha i seguenti limiti di funzionamento:

- Tensione 800 V
- Corrente 600 A
- Potenza 250 kW

Il profilo di prova è stato progettato sulla base delle tensioni di lavoro e delle simulazioni fatte da Enea e Università di Roma Tre nell'ambito della realizzazione del sistema di ricarica "Flash charge". In Figura 12 è rappresentato lo schema della prova sotto forma di andamento della corrente di carica e di scarica in funzione del tempo.

In sintesi il profilo è composto di:

- Carica. Divisa in tre impulsi di ampiezza e durata variabile
- Scarica. Divisa in due mini-cicli ognuno dei quali composto da un picco di potenza più elevata e un valore costante per un tempo maggiore.

I vincoli della prova sono costituiti da:

- La quantità di carica scambiata in carica che deve essere la stessa di quella in scarica;
- La massima corrente in carica non può in nessun caso superare 600 A, limite hardware del ciclatore;
- La massima corrente in scarica non può superare 100 A in quanto da progetto è installato un convertitore DC-DC da 10 kW che non può superare quel limite di corrente;
- Durante la prova devono essere rispettate le temperature di esercizio di cavi, delle giunzioni, dei connettori e dei supercap stessi.
- La tensione massima di lavoro è stata fissata sul ciclatore in 375 V (corrispondente alla tensione di 125 V dei singoli moduli collegati in serie).
- La tensione minima di lavoro è stata fissata sul ciclatore in 188 V (corrispondente alla tensione di 63 V dei singoli moduli collegati in serie).
- La procedura di carica e scarica deve essere controllata in tempo (per trasferire la quantità d'energia prefissata), ma per ragioni di sicurezza deve essere controllata in tensione (limite imposto dal costruttore).

L'esecuzione delle prove è stata fatta impostando questi cicli di carica e scarica. Lasciando al ciclatore il compito di modulare la tensione non appena questa si avvicina al valore limite superiore in carica, e in scarica a quello inferiore. Al fine di valutare lo squilibrio energetico e il disallineamento in tensione dei tre moduli è stato ripetuto il ciclo per uno numero di volte compatibile con un impiego giornaliero di un bus. L'energia utilizzabile a bordo dei supercap è di 309 Wh, corrispondente all'energia compresa tra la tensione massima e la loro metà. Il bus ha un consumo medio di 500 Wh/km, per cui necessita di almeno 2 ricariche ogni km. Se la velocità commerciale del bus è 10 km/h, in 9 ore di lavoro al giorno (le ore di punta, la mattina dalle 6

alle 10 e il pomeriggio dalle 15 alle 20), tale autobus compirà 90 km di percorrenza giornaliera e dovrà essere ricaricato circa 180 volte in un giorno. Delle 180 ricariche giornaliere per ragioni di tempo sono state eseguite circa 1/3, quindi 60 volte.

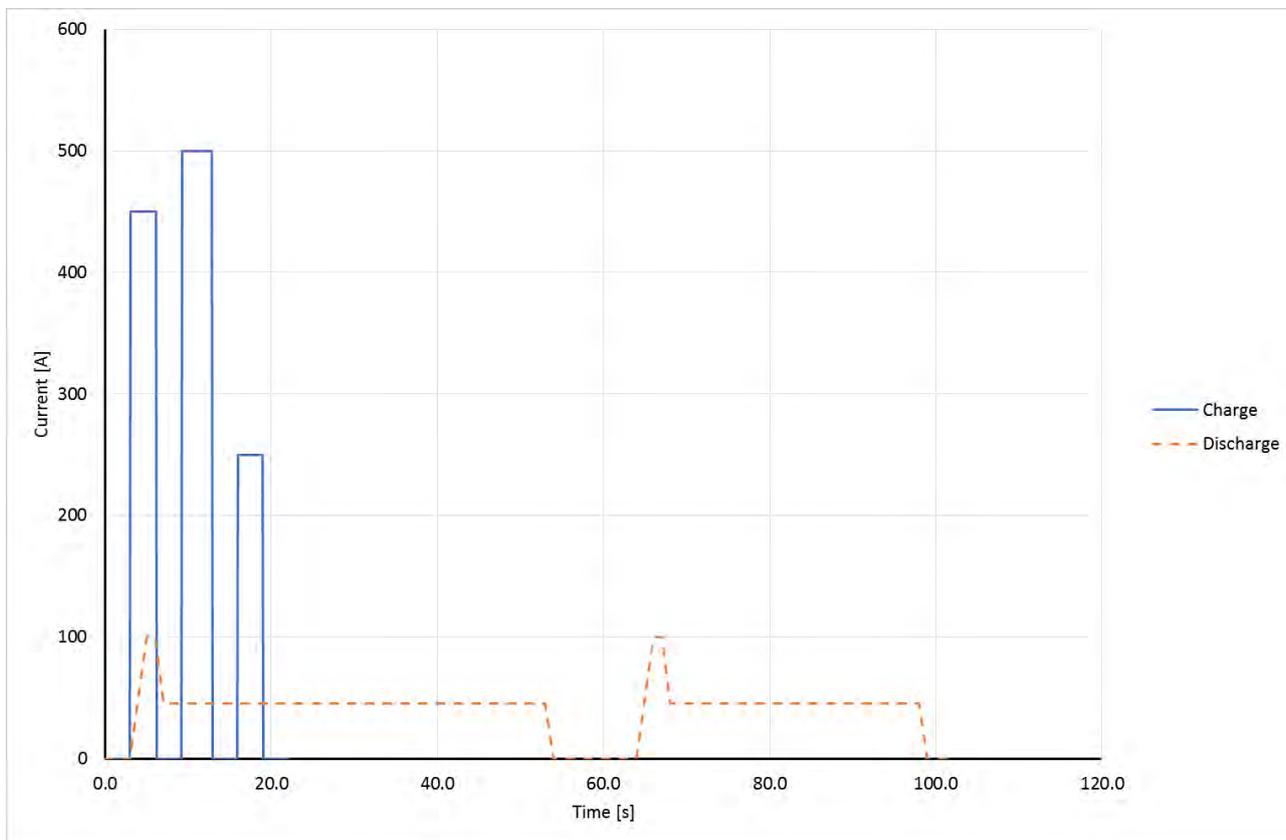


Figura 12 : profilo della corrente di carica e scarica per i test sui SC

La scarica ovviamente dovrà esser fatta per altrettante volte, ma per esigenze di tempo e in virtù della necessità di usare lo stesso ciclatore per la scarica, si è optato per velocizzare questa fase rispetto alla realtà e di approssimare ad una scarica a corrente costante.

Prima di connettere i tre moduli in serie questi dovevano essere ad una stessa tensione di partenza, quindi in una situazione equalizzata. La tensione dei tre moduli collegati in serie può oscillare all'interno del range 188 V – 375 V, si è cercato di ottenere la situazione equalizzata alla massima tensione di ognuno ovvero a 125 V. Pertanto, i moduli sono stati caricati singolarmente ad una tensione di 125 V, ma dovendo fare questa operazione modulo per modulo ed essendo il ciclatore unico, la carica dei moduli avveniva con un certo intervallo di tempo tra uno e l'altro.

In questo intervallo di tempo, l'effetto di autoscarica agiva scaricando parzialmente il modulo appena caricato come dimostrato in Figura 13, per cui impostando lo stesso limite di tensione sul modulo successivo si aveva subito una differenza di tensione. In 80 secondi la tensione subisce un calo di 0.7 V e dopo 400 secondi 2.75 V.

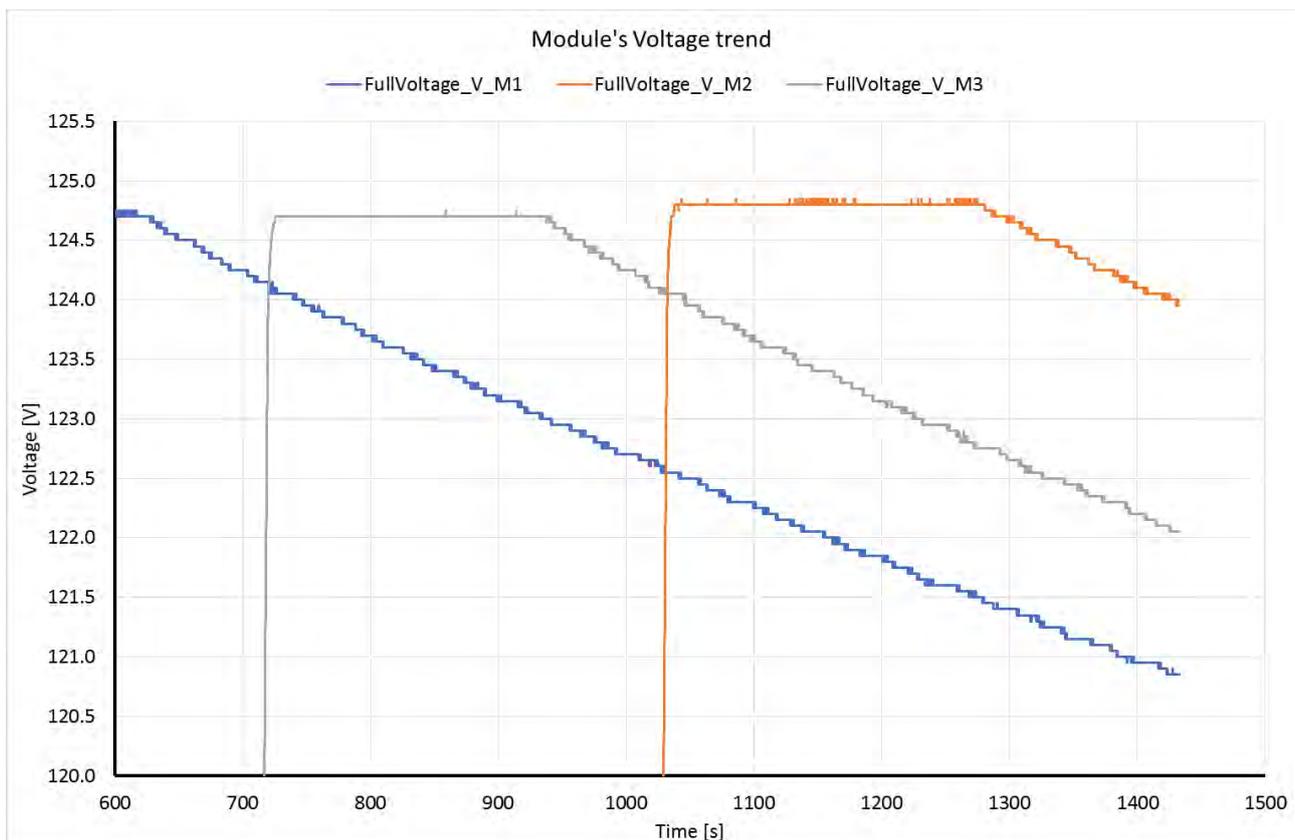


Figura 13 :auto scarica dei moduli in funzione del tempo

Per ovviare a questo effetto, la tensione impostata sul ciclatore per equalizzare i moduli, era quella raggiunta dal modulo precedente al momento della carica del secondo modulo.

Ad esempio, una volta portato il modulo 1 alla tensione massima, il modulo 2 è stato portato alla tensione a cui è arrivato il modulo 1 nell'istante in cui la carica del 2 è stata impostata, analogamente il modulo 3 è stato portato alla tensione media dei moduli 1 e 2 all'istante in cui è stata impostata la carica del 3. Con questo meccanismo è stata ridotta la disegualizzazione tra i moduli a 0.15 V.

Dopo la fase di equalizzazione della stringa fatta in prossimità della massima tensione, i supercapacitori sono stati scaricati sino al raggiungimento della tensione minima di lavoro per iniziare con i cicli successivi di carica e scarica.

In Figura 14 è riportato l'andamento della tensione dei singoli moduli, a confronto con la corrente di carica (positiva) e scarica (negativa) durante la prova. In Figura 15 è invece rappresentato l'andamento della massima differenza di tensione tra i moduli durante la prova a confronto con la corrente di carica e scarica. La cose più importanti che si notano da entrambe le figure predette sono:

- All'inizio della prova, quando la tensione dei moduli è circa 63 V per modulo, esiste uno scostamento massimo di 1.6 V;
- Alla fine della carica (tempo tra 70 e 80 secondi), la massima differenza di tensione è inferiore a 0.4 V;
- Alla fine della scarica la differenza di tensione risale fino a 1.6 V.

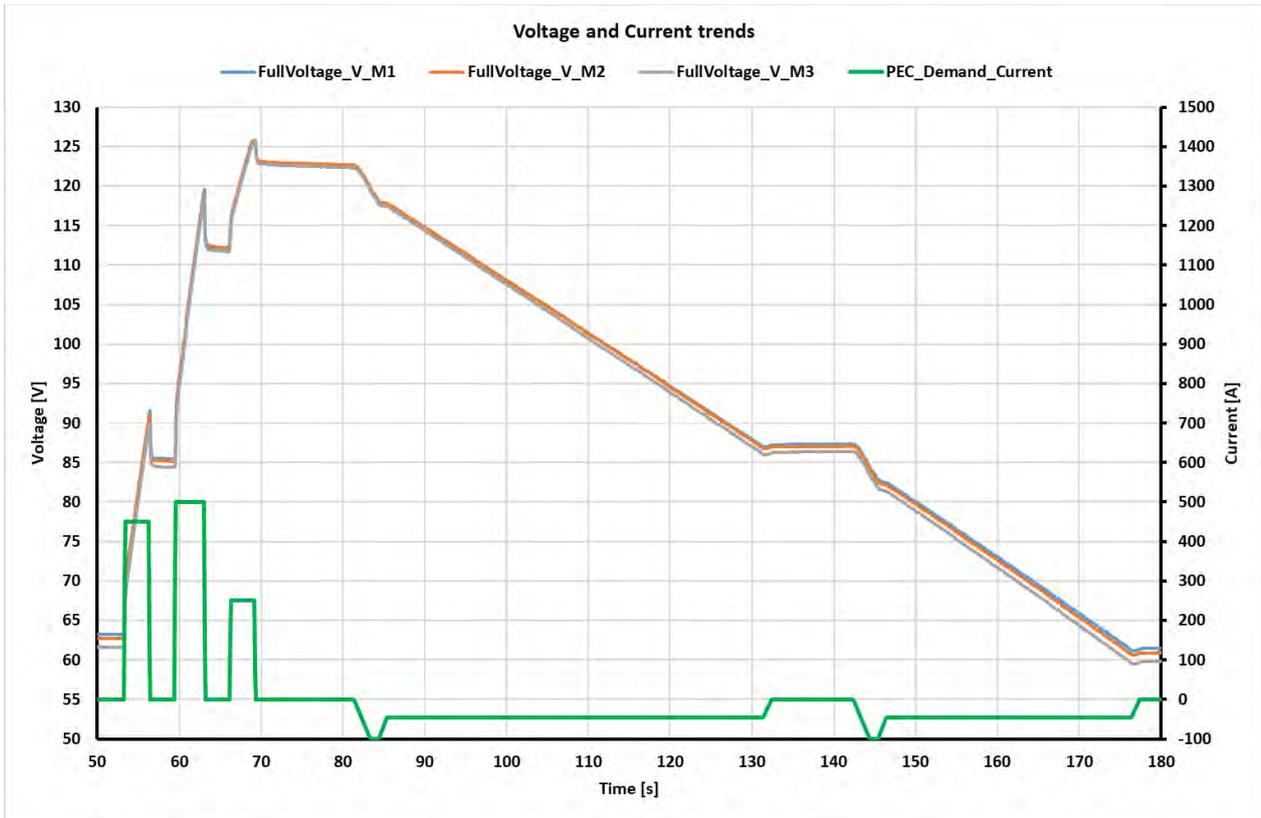


Figura 14: ciclo unitario di carica-scarica

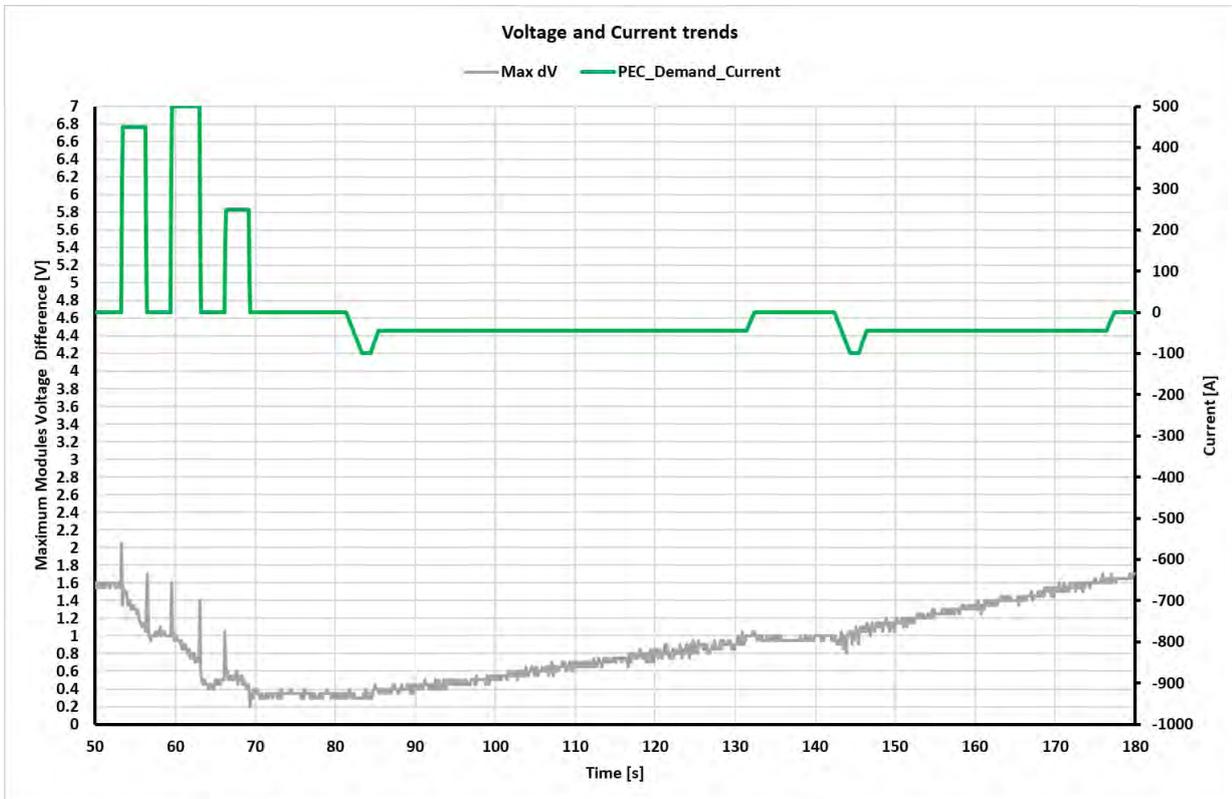


Figura 15: massima differenza di tensione tra i moduli nel ciclo unitario

La minore differenza ad inizio scarica è dovuta alla operazione di equalizzazione eseguita alla massima tensione di modulo. Alla fine della scarica a corrente costante le differenze tra i moduli (e quindi tra le celle dei singoli moduli) offrono una maggiore entità dovuta al diverso stato di carica delle celle collegate in serie (sia per una tolleranza di fabbricazione che per un diverso invecchiamento).

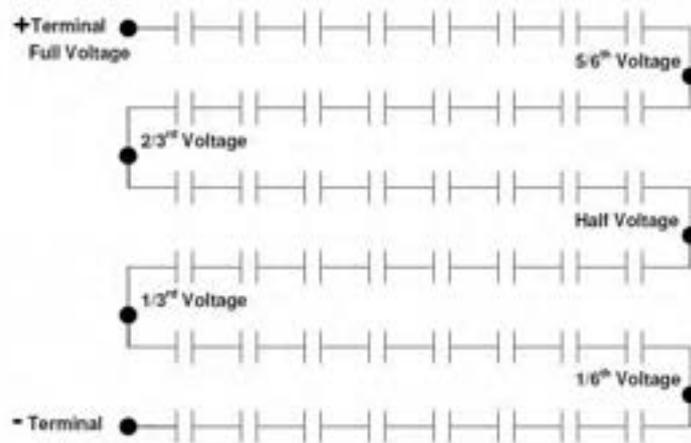


Figura 16: composizione tipo di un modulo supercapacitori

In figura 17 è mostrato l'ultimo ciclo di prova in cui si nota come gli scarti in fase di scarica siano simili ai cicli iniziali. Viceversa durante le fasi di ricarica impulsiva gli squilibri tendono a crescere ed a distribuirsi in modo non coerente. Nella figura 18 sono mostrati alcuni cicli intermedi della prova in cui si evidenzia la variabilità dello scarto massimo in fase di ricarica.

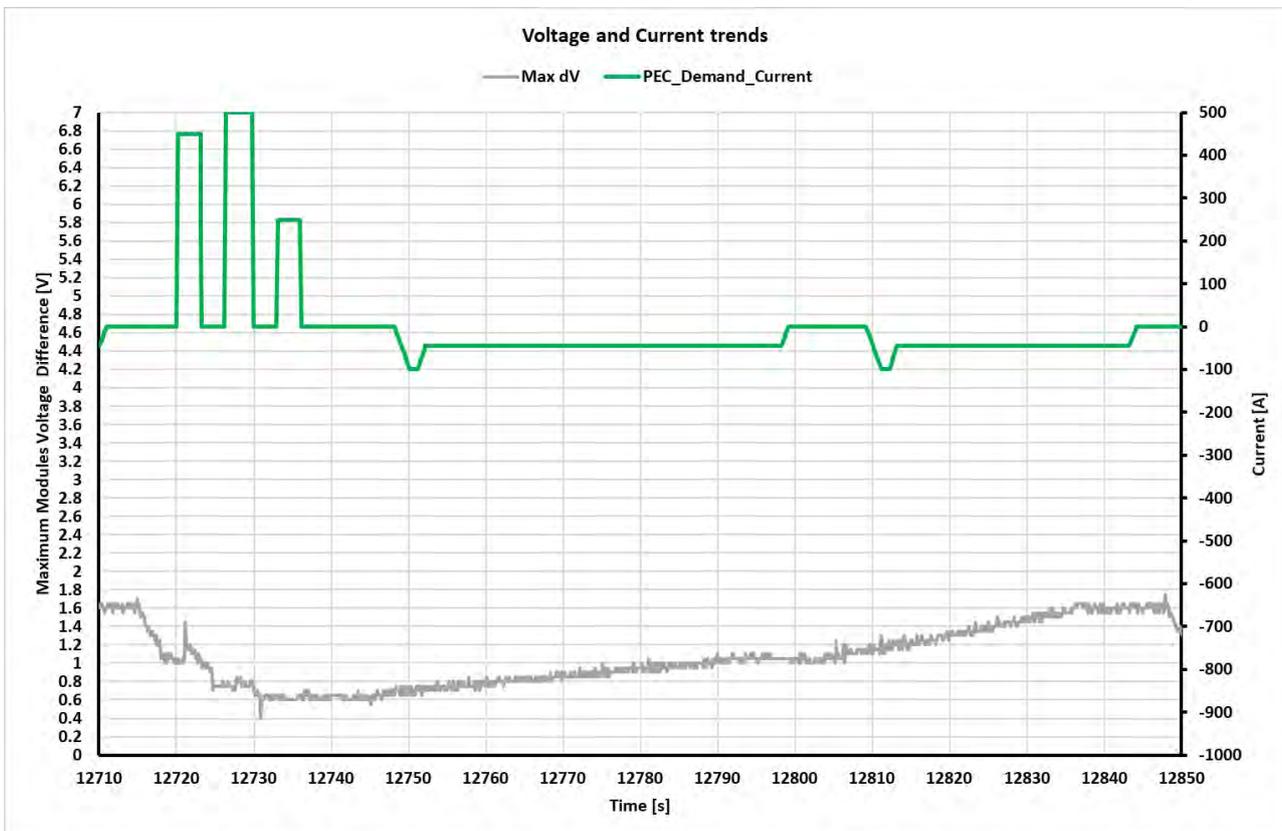


Figura 12: ultimo ciclo (numero 60) di prova

In ricarica l'impulsività genera scarti maggiori che possono dipendere dalla variabilità della corrente

Le prove condotte in modo sequenziale hanno evidenziato alcuni aspetti per la loro gestione. Il monitoraggio dei moduli eseguito attraverso la rete CAN di controllo ha permesso di ricevere i messaggi generati dal controllore interno dei moduli.

Durante le prove sono stati acquisiti messaggi di "Peak_delta_voltage" (massima differenza di tensione interna al modulo) oltre il limite di targa di 3 V, e i campioni precedenti e successivi tutti massima. Tale campione si è presentato al 25° ciclo, quindi è stato necessario fermare la prova per valutare tale fenomeno. La pausa è durata circa un'ora, dopo la quale la ripetizione dei cicli è ripartita.

Dopo la lunga pausa fatta tra il 37° ciclo e il 38° ciclo, anche se la tensione dei moduli era prossima alla tensione minima impostata per il lavoro, il massimo squilibrio è rimasto costante e pari ad 1.6 V.

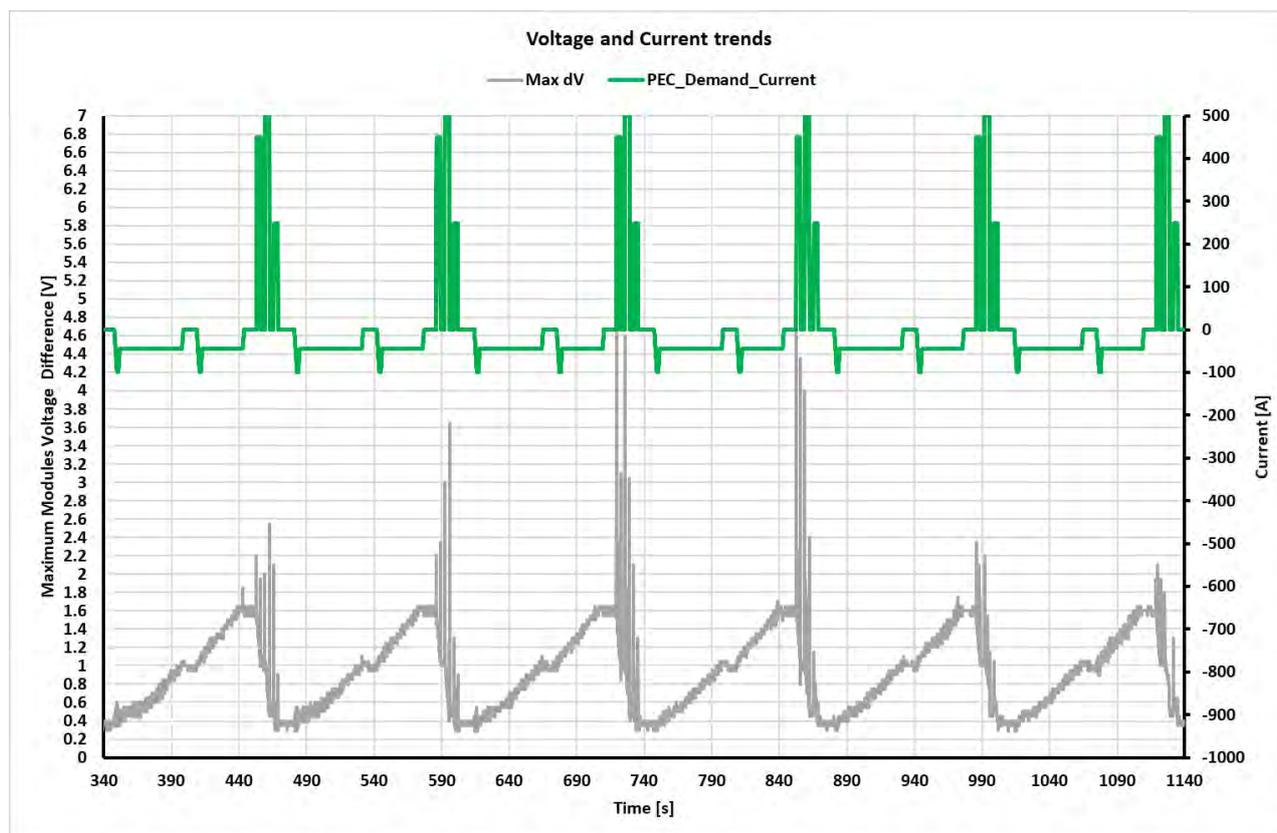


Figura 18: Differenza di tensione massima tra i moduli durante dei cicli intermedi alla prova

Al fine di correggere il fenomeno annotato dal messaggio di errore, è stato eseguito il reset di modulo, inviando un opportuno segnale via linea CAN così come prescritto dal manuale del costruttore, ma già a valle della pausa la massima differenza intramodulo era scesa entro la tolleranza prescritta dal costruttore di 1 V e pari esattamente a 0.2 V. Per questo motivo non è stato necessario compiere una procedura di equalizzazione così come prescritto dal manuale

Uno degli scopi dei test qui descritti era dimostrare che dopo una ripetizione dei cicli di carica e scarica paragonabile all'uso reale e giornaliero la massima disequalizzazione e le tensioni di lavoro di tutti i moduli rientrino entro i limiti previsti dal costruttore. Tale verifica ha dato esito positivo, essendo la massima disequalizzazione dell'ultimo ciclo pari a quella del primo. L'energia ricaricata ad ogni ciclo è in media 329 Wh, l'energia scaricata 297 Wh. Come mostrato in Figura 19 l'efficienza energetica della serie di supercap tende a stabilizzarsi intorno al 90 %.

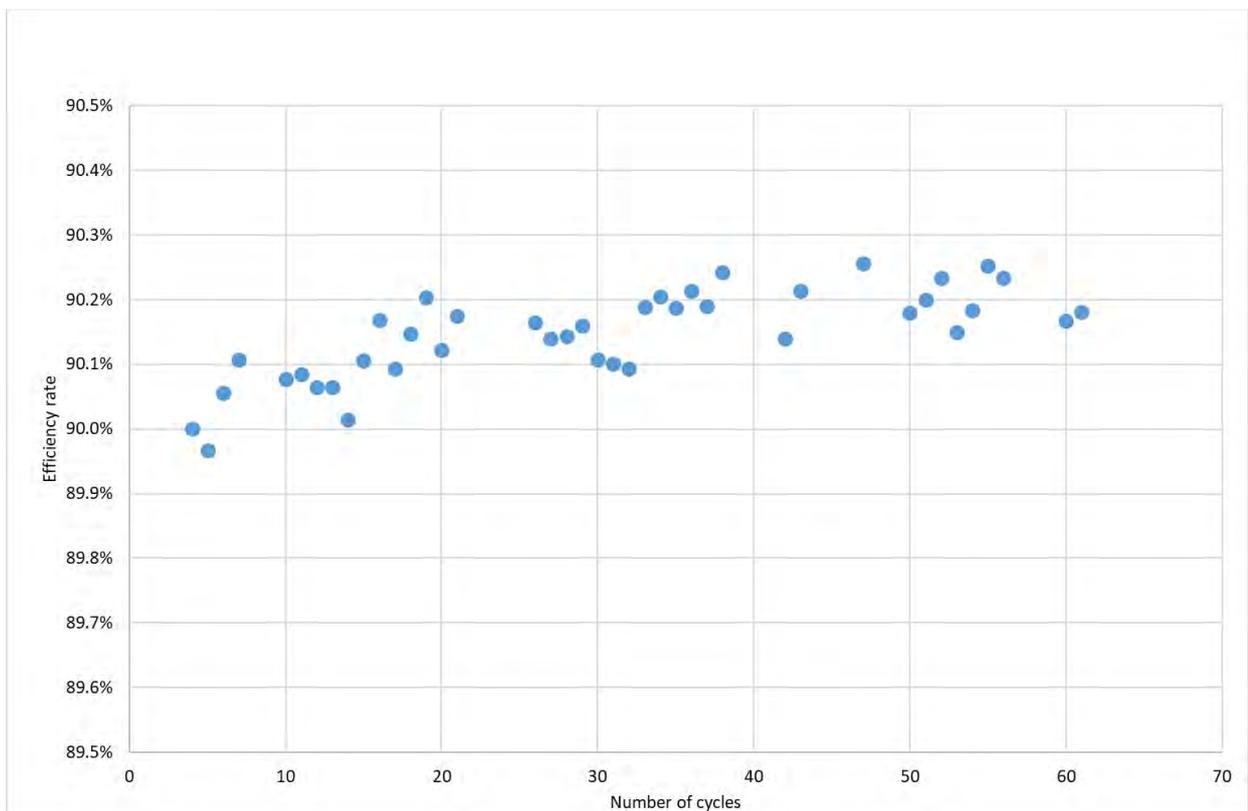


Figura 139: efficienza carica-scarica per i singoli cicli

5 Prove sul sistema di accumulo

Le prove previste avevano come primo scopo la caratterizzazione parziale dei componenti presenti nel sistema di accumulo realizzato e, come secondo scopo, la verifica delle funzionalità previste durante l'uso del sistema combinato di sorgenti ad alta e bassa tensione. Per queste prove si è utilizzato un diverso ciclatore .



Figura 14: ciclatore ELTRA 8619

Costruttore ELTRA			
Modello			E-8619
Tensione	Campo di lavoro "basso"	Nominale	/
		Minima	/
		Massima	/
	Campo di lavoro "alto"	Nominale	6 ÷ 560
		Minima	3 V
		Massima	600 V
Corrente	Minima		0 A
	Massima continuativa		±175 A
	Massima di picco per 1'		±250 A

La convenzione della corrente è negativa quando assorbita dalle batterie ed erogata dal ciclatore (carica) e negativa quando erogata dalle batterie verso il ciclatore (scarica). Tra una scarica ed un'altra della batteria l'energia in essa deve essere ripristinata con una carica intermedia, analogamente si deve fare per la scarica dei supercapacitori.

Le prove sono state organizzate per verificare il comportamento dei due sistemi di accumulo in condizioni di lavoro simulanti un ciclo di lavoro urbano acquisito attraverso una serie di campagne di misura espletate in passato sullo stesso veicolo alimentato con accumulo a batteria.

I test sono stati di due tipologie :

- Test di caratterizzazione
- test di verifica di sostenibilità dei cicli di lavoro

Il programma è stato articolato nelle seguenti prove:

1. Scarica della batteria per caratterizzazione: erogazione di 800 Wh attraverso la successione di una serie di tratti a corrente costante, crescente ad intervalli di tempo pari a 30s. Ampiezza: da 25 fino a 250A
2. Scarica della batteria su ciclo di marcia: erogazione di potenza attraverso un ciclo di potenza ottenuto da rilievo su veicolo operante su un percorso tipico. Caratteristiche principali: durata 500s, energia netta 515 Wh, energia per la fase di trazione 560 Wh, energia per la fase di rigenerazione 45 Wh.
3. Scarica della batteria su ciclo di marcia, riducendo l'ampiezza delle correnti in modo da diminuire la richiesta di potenza dalla batteria di una quota paragonabile a quella fornita dal gruppo SC (circa 264Wh per ogni intervallo compreso tra due ricariche rapide)
4. Scarica dei SC per caratterizzazione, partendo dalla tensione limite superiore di 375 V, prelievo di correnti crescenti, a tratti costanti, per un totale di circa 290Wh fino a raggiungere la tensione limite inferiore di 170 V.
5. Scarica dei SC su ciclo di marcia, applicando ai SC un ciclo controllato in potenza complementare a quello di batteria ridotto
6. Scarica di batteria e SC in uso combinato, attraverso il controllo dei convertitori Buck-boost.

5.1.1 Prova n°1: Scarica della batteria per caratterizzazione.

Prima di iniziare la prova le batterie sono state caricate con una carica lenta, così come prescritto dal costruttore per le batterie al Pb-gel, ovvero ad un "rate" di 0.1 C (12 A in ragione della capacità nominale di 120 Ah) sino al raggiungimento della tensione massima di 86.4 V per l'intera stringa (6 batterie collegate in serie con tensione massima di 14.4 V ciascuna).

La sequenza in Figura 15 illustra l'andamento delle correnti in scarica, e l'energia estratta dalla batteria. Tale test aveva l'obiettivo di acquisire dati relativamente alle cadute di tensione attese dalla batteria, per valutarne le potenzialità e lo stato di salute.

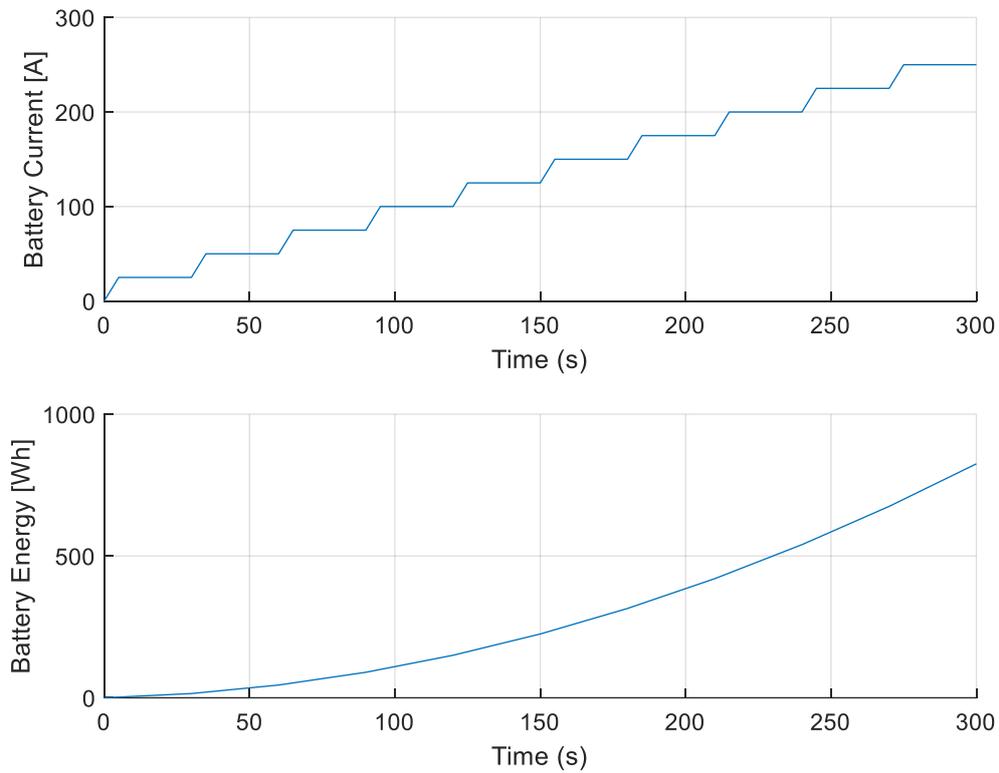


Figura 15: correnti di scarica e energia di batteria impostate

In Figura e Figura 16 si riportano rispettivamente la corrente e la tensione misurate e filtrate.

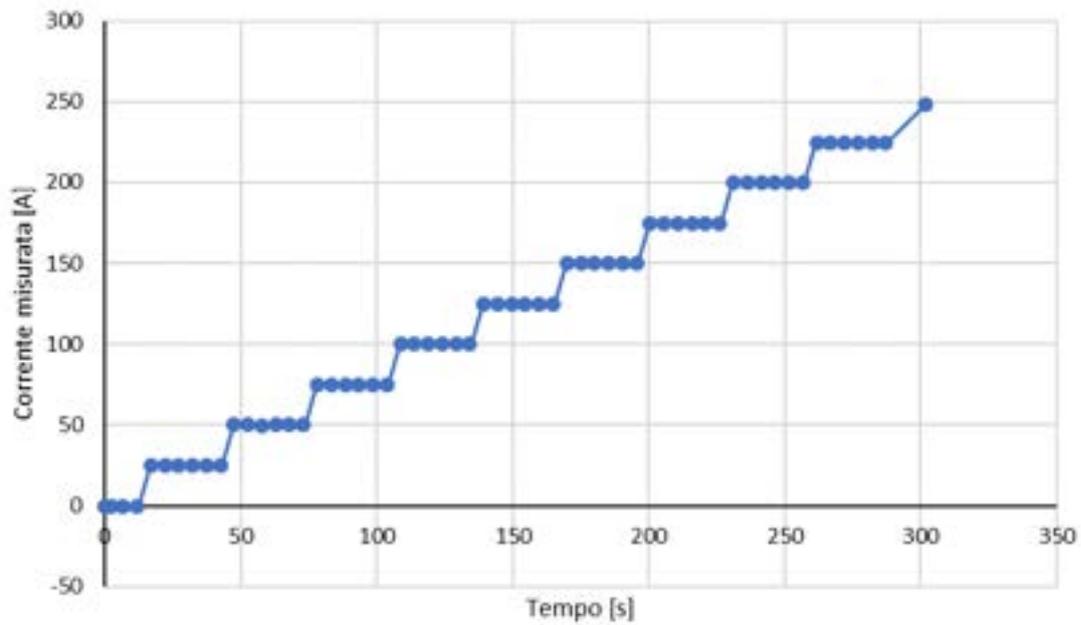


Figura 22: Corrente misurata

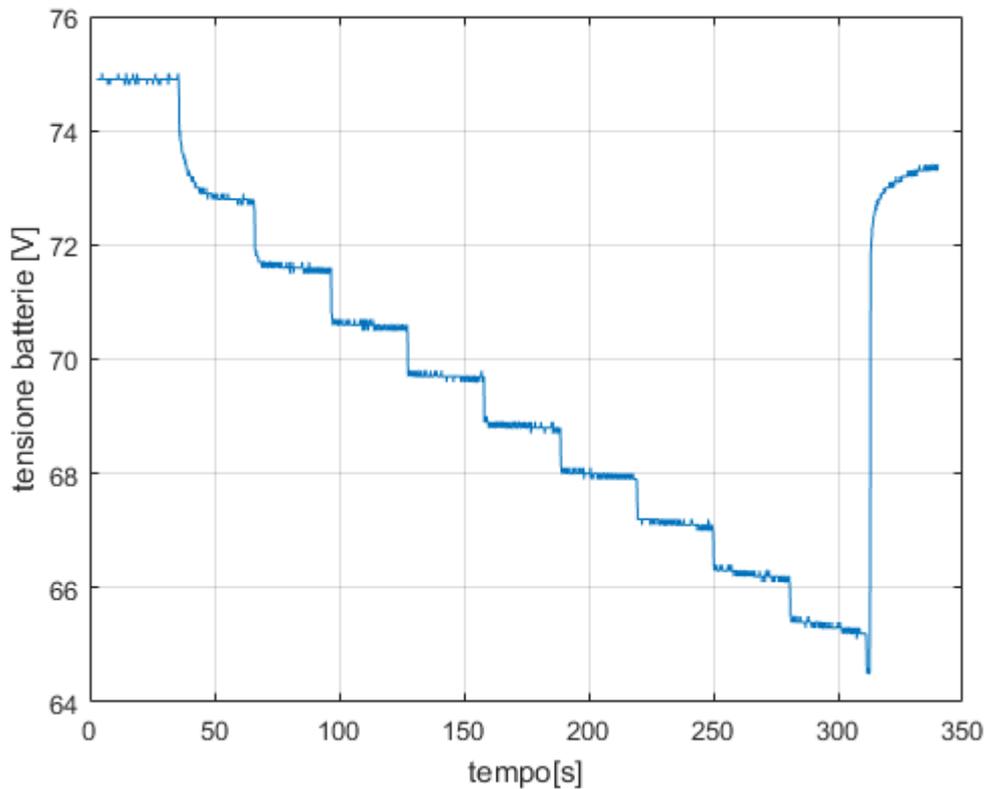


Figura 16 Tensione misurata

5.1.2 Prova n°2: Scarica della batteria su ciclo di marcia

Prima di iniziare la prova le batterie sono state nuovamente caricate per ripristinare l'energia disponibile. Per la particolare applicazione considerata è stato utilizzato un ciclo reale ottenuto da precedenti rilievi effettuati sul veicolo stesso all'interno di un percorso tipico.

Il rilievo offriva un segnale tempo – velocità, tensione, corrente, potenza sincronizzati. La figura 24 illustra l'andamento della potenza e la cumulata dell'energia utilizzata dal veicolo, espressa in Wh. In totale, la percorrenza utilizzata come riferimento richiede l'utilizzo di circa 515Wh nell'arco di 500 secondi.

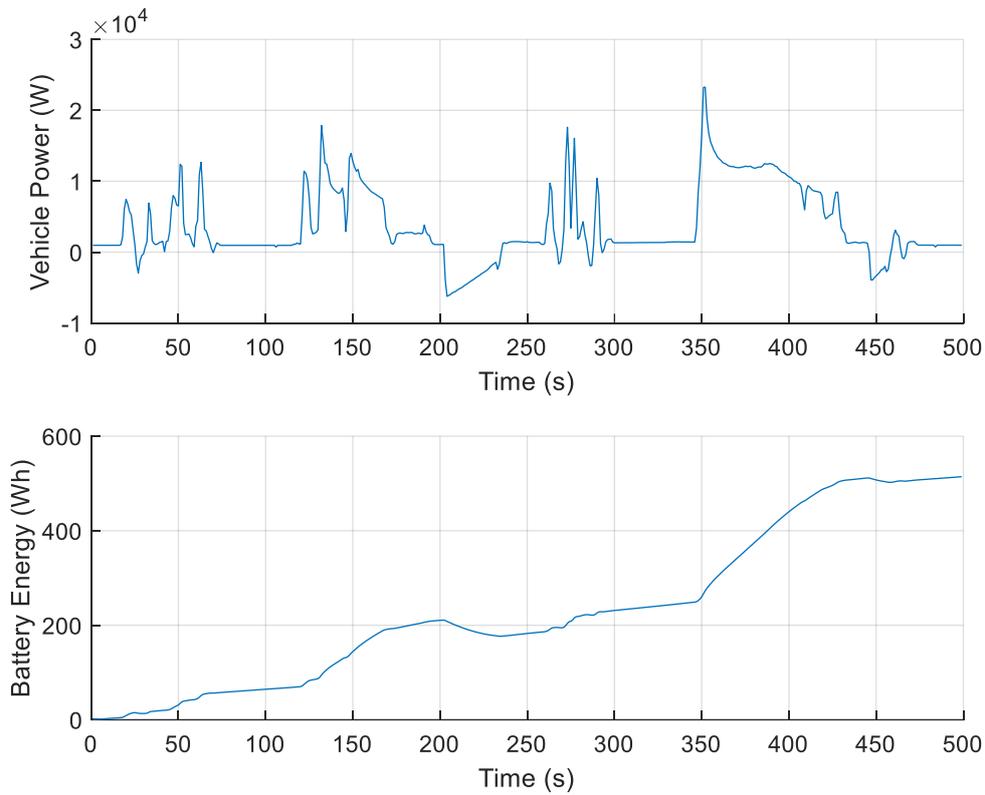


Figura 24 : Ciclo di marcia

Per ragioni legate all'uso del ciclatore ed alla tipologia di batteria utilizzata per la prova si è preferito riportare questo ciclo in termini di segnale Tempo-Ampere invece che Tempo- Potenza, effettuando una opportuna modulazione tale che il consumo finale previsto sia sempre all'interno del range 510-520Wh. Il ciclo di riferimento ottenuto è illustrato in Figura , mentre in Figura e Figura 17 vi sono le correnti e le tensioni misurate direttamente durante la prova

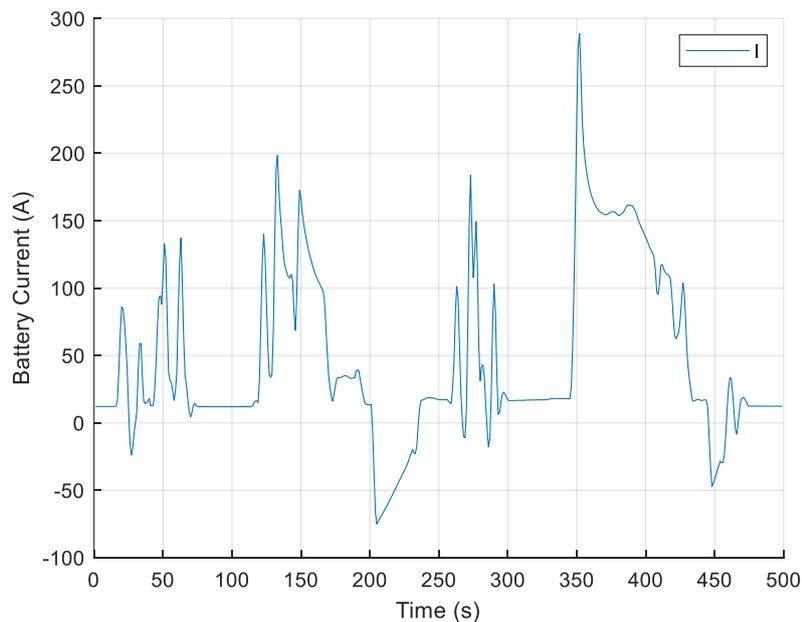


Figura 25: Grafico di corrente impostato al ciclatore

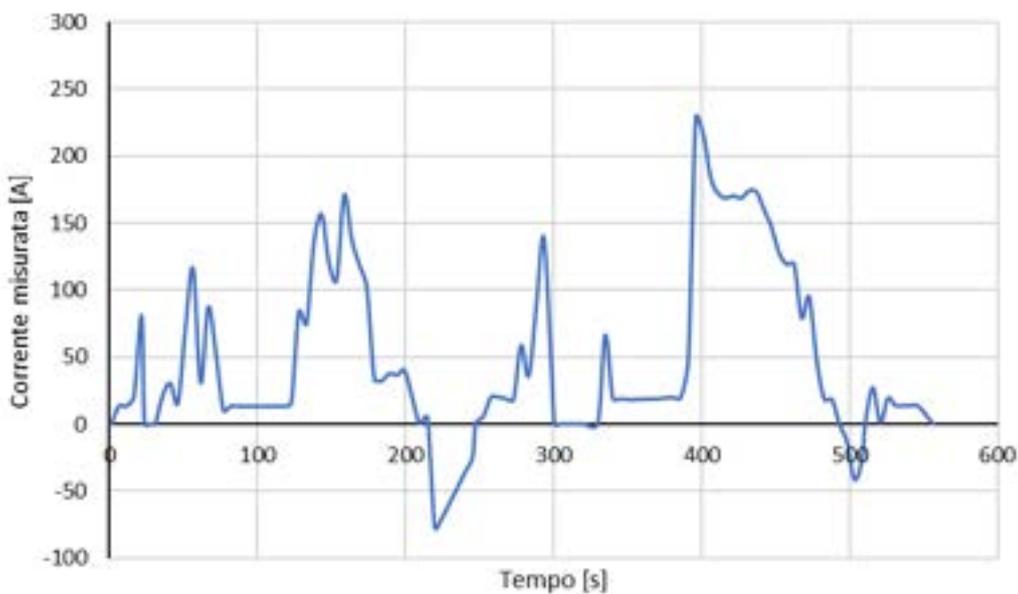


Figura 26: Corrente misurata

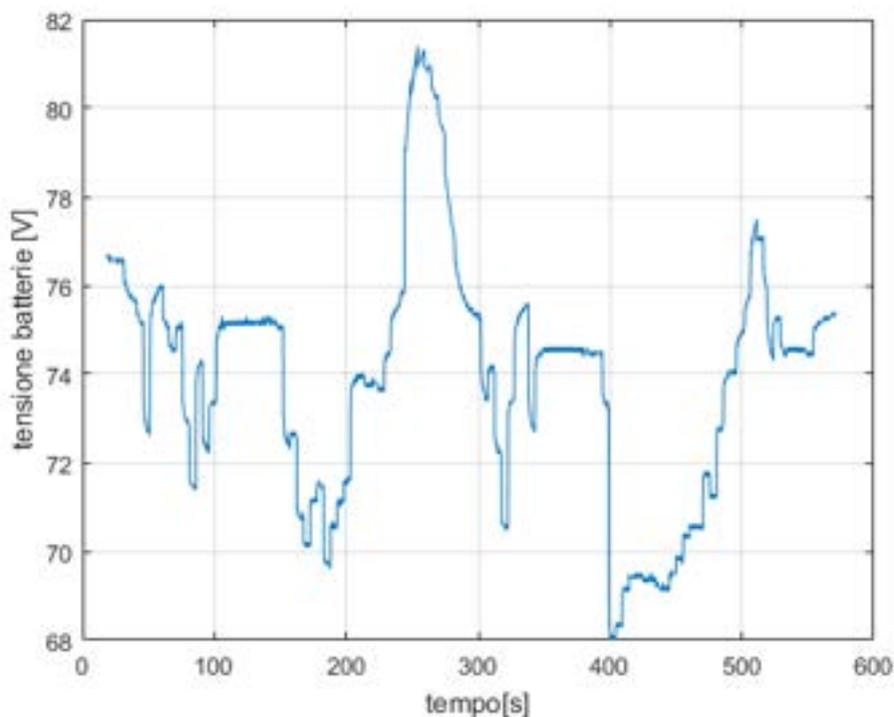


Figura 177: Tensione misurata

5.1.3 Prova n°3: Scarica della batteria su ciclo di marcia scalato

Tale prova mirava a stabilire se il ciclo di marcia poteva essere alleggerito grazie all'impiego dei supercap e del convertitore di potenza installato sul bus.

Quindi, si è reso necessario stimare l'energia effettivamente utilizzabile nelle condizioni di lavoro corrispondenti all'inizio della percorrenza dopo una ricarica alla fermata e sino al valore limite di tensione

imposto all'arrivo ad una fermata successiva (200V). Per questo si è tenuto presente una efficienza delle conversioni buck-boost prudenzialmente stimata al 90%.

```
Vmin=200; %V
Vmax=375; %V
C_SC=21; %F
eff=0.90; % efficiency of the system
SC_E= eff*(0.5*C_SC)*(Vmax^2-Vmin^2) /3600;
```

Ne risulta una energia utilizzabile al DC-bus sul lato in bassa tensione pari a 264 Wh, vale a dire il 50% circa del ciclo considerato per un consumo totale presunto di 515Wh. Per tale ragione, applicando una logica proporzionale nell'erogazione delle correnti necessarie da parte della batteria e del SC, si è quindi ottenuto un ciclo notevolmente ridotto, corrispondente alla sola energia non prelevata dal sistema SC. La corrente impostata al ciclatore è la "I smooth combined" mostrata in Figura8. Questo valore di corrente servirà a valutare la corrente del supercapacitore sul ciclo e quindi ad impostare la prova di esso su queste ampiezze.

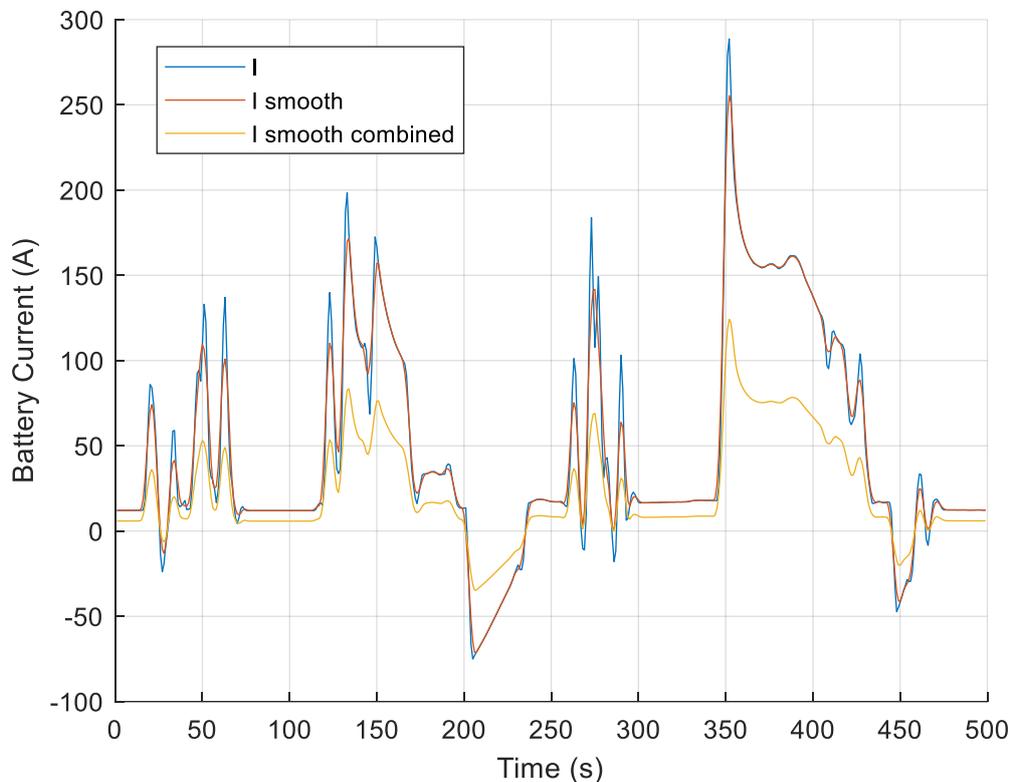


Figura 28: Corrente imposta al ciclatore nei tre cicli

Nella figura 29 e 30 sono riportati gli andamenti della corrente e della tensione di batterie misurate.

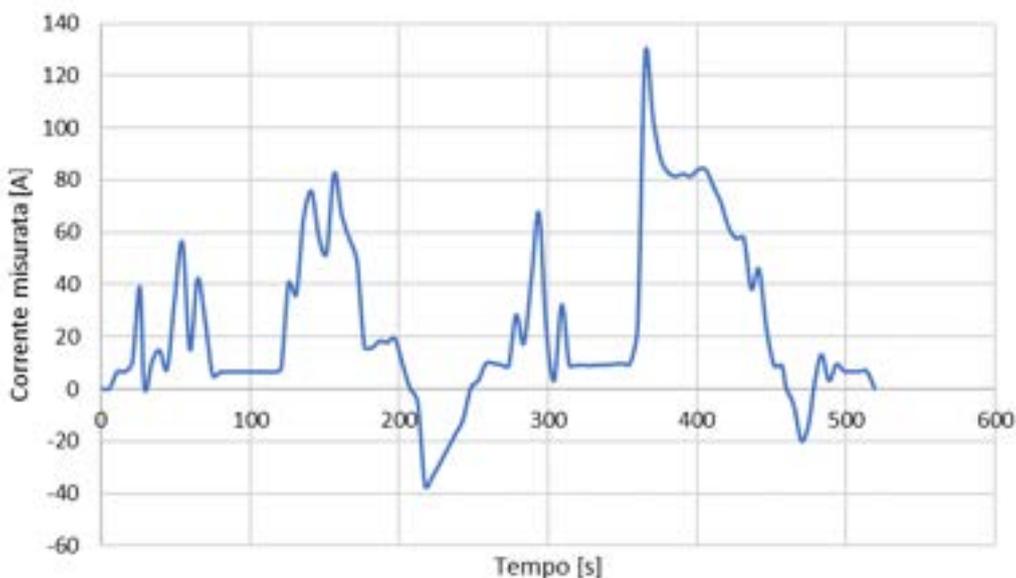


Figura 189: misura dell’effettiva corrente erogata dal sistema di accumulo durante il ciclo “smooth combined”

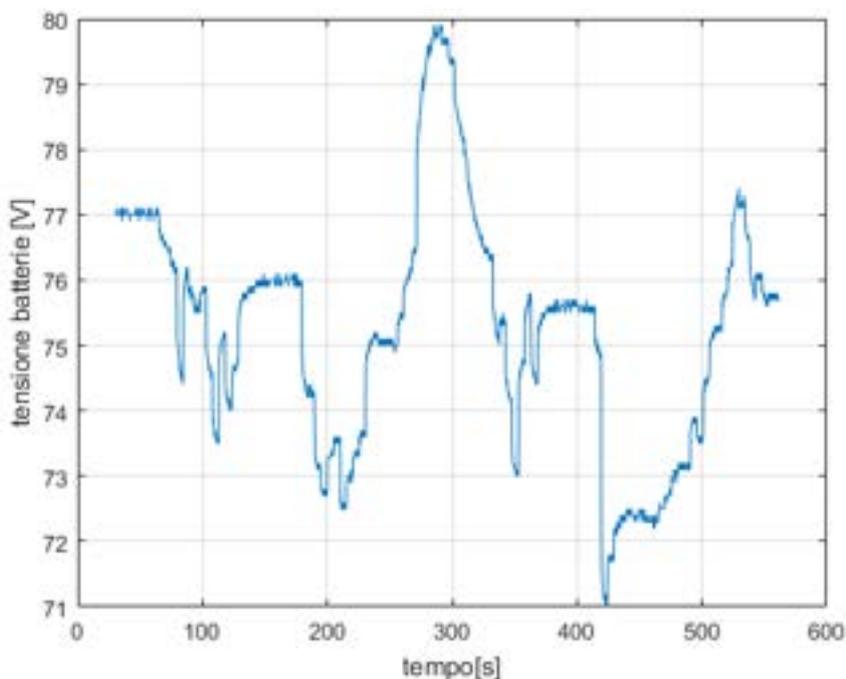


Figura 19 misura dell’effettiva tensione del lato batteria durante il ciclo “smooth combined”

5.1.4 Prova n°4: Scarica dei SC per caratterizzazione

Prima di iniziare la prova i SC si dovevano trovare alla tensione di lavoro massima 375V.

La prova prevede una sequenza di tratti a corrente costante effettuati sul DC-bus ad alta tensione, con crescita fino a 60 A (Figura 20). Le notevoli variazioni di tensione degli SC durante l’uso fanno sì che a parità di corrente si modifichi notevolmente la potenza espressa. Le prove sono state pertanto svolte partendo dalla tensione massima fino al raggiungimento delle tensioni limite inferiori (160V).

In Figura è mostrato l’andamento della tensione durante la prova della serie di tre supercap, in Figura 21 l’andamento della tensione dei singoli elementi. Mentre in Figura e Figura vi sono le tensioni dell’intero pacco di supercap e dei singoli durante la fase di ricarica.

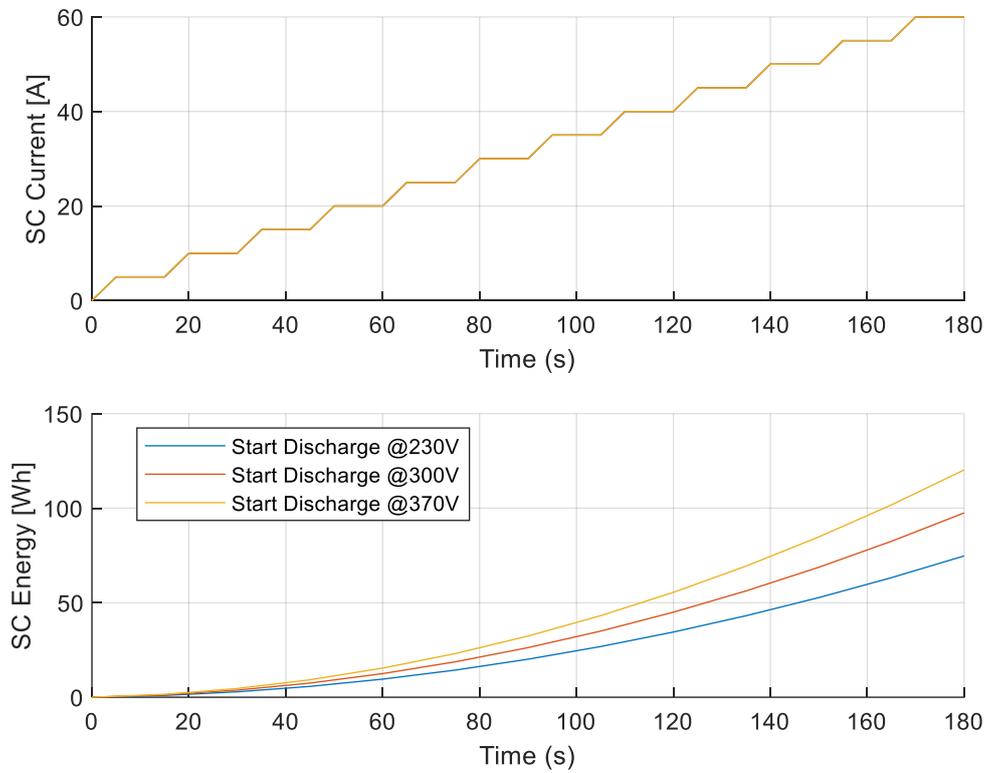


Figura 20 prova a gradini per i supercondensatori

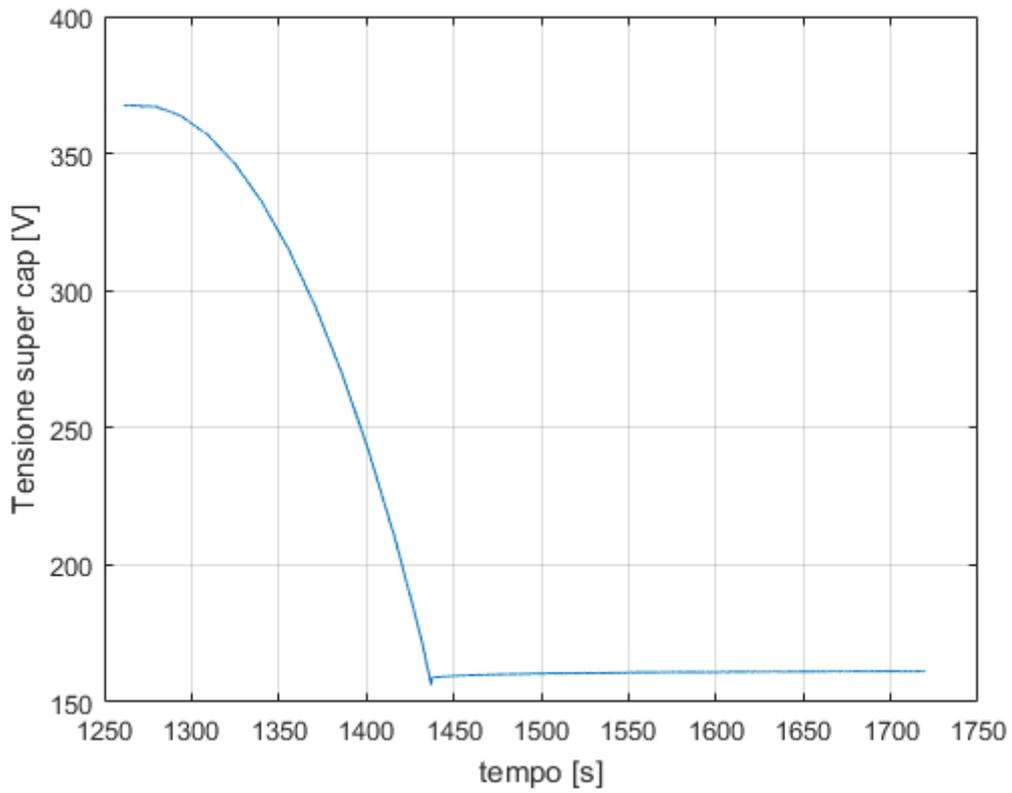


Figura 32: tensione durante la prova della serie di tre supercap

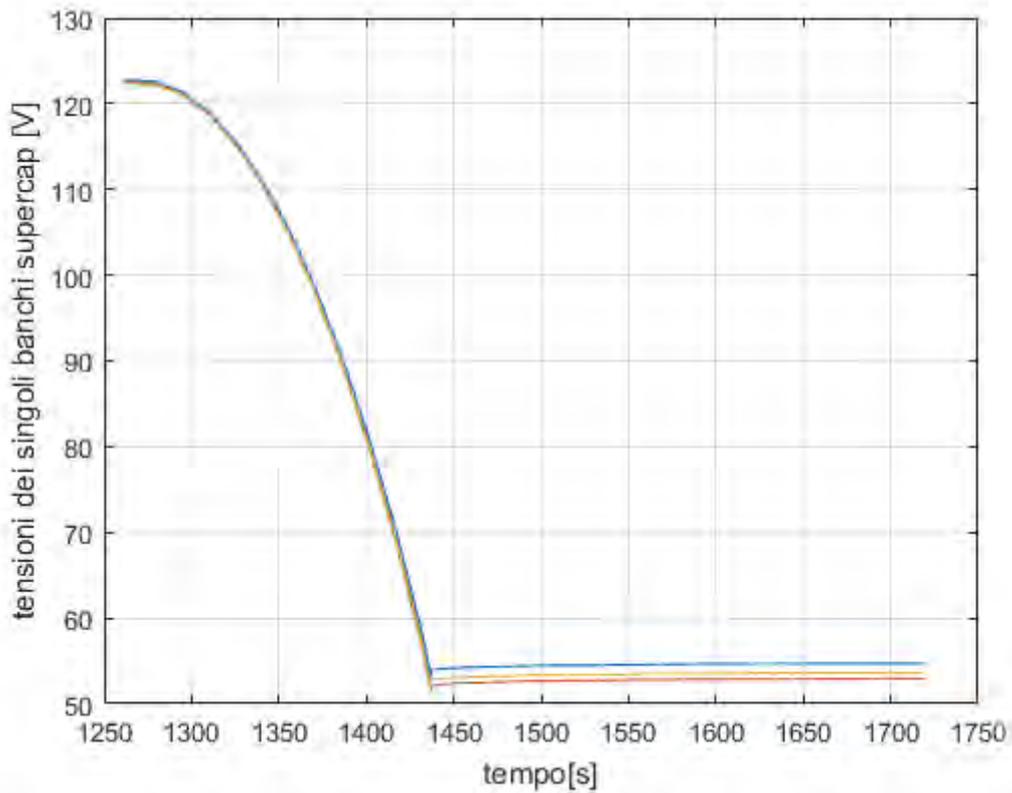


Figura 21 l'andamento della tensione dei singoli elementi

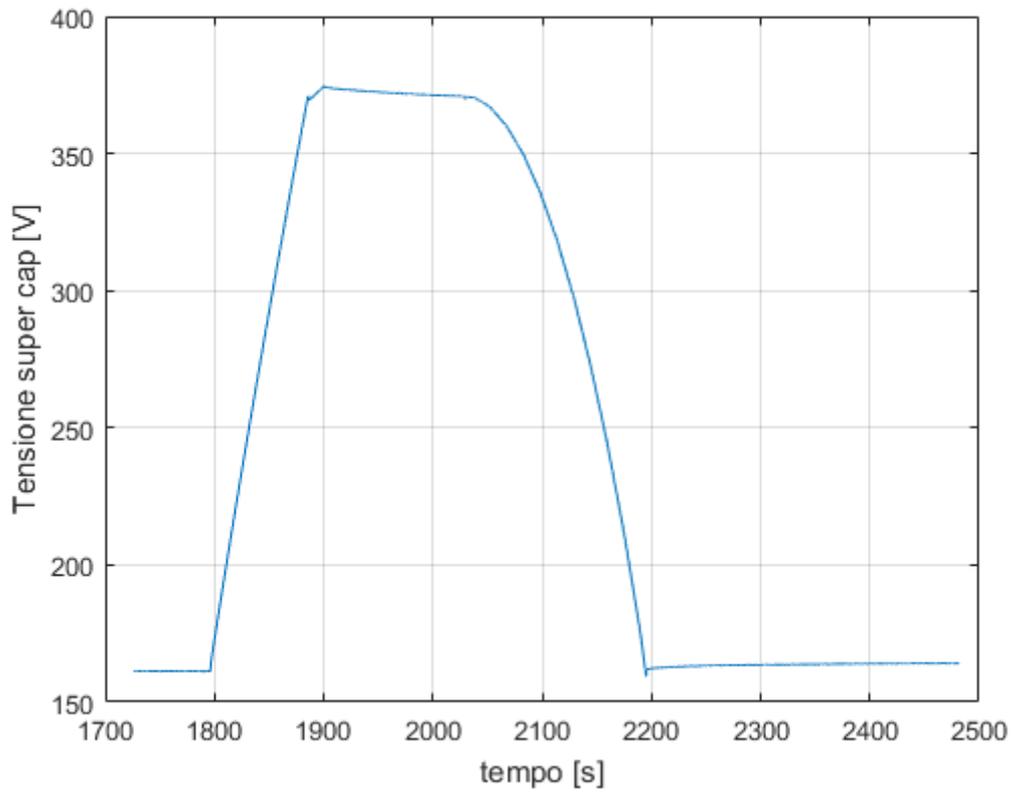


Figura 34: tensione del pacco in ricarica e scarica

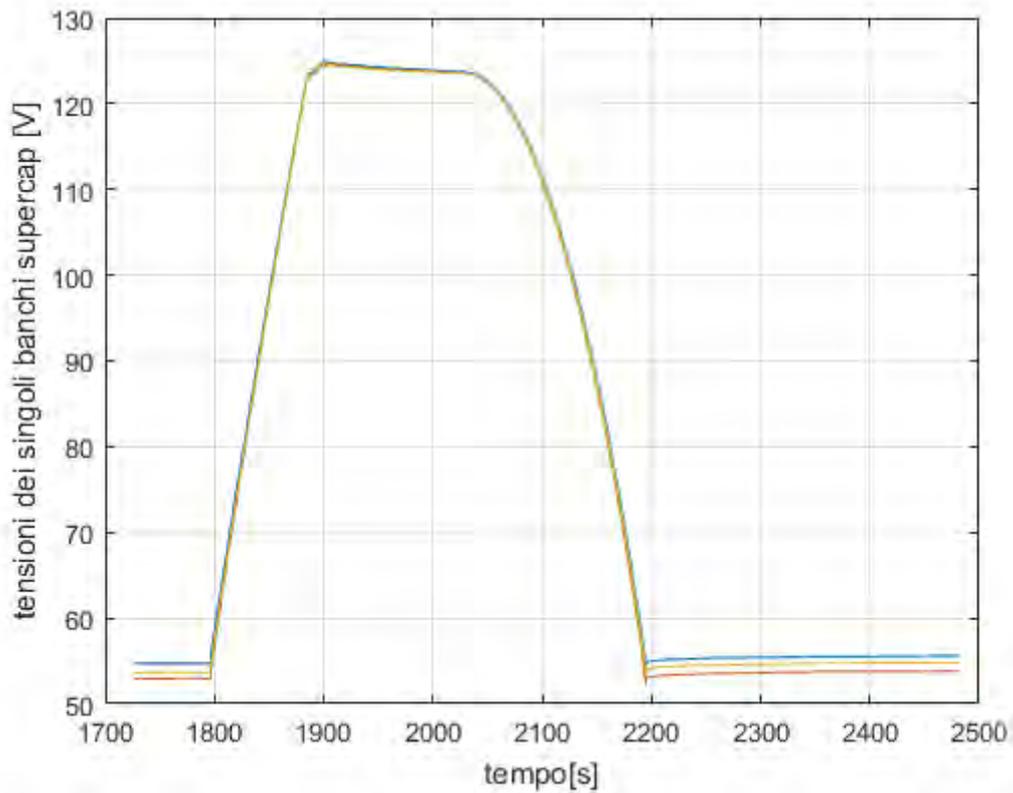


Figura 35: tensione dei singoli elementi in ricarica e scarica

5.1.5 Prova n°5: Scarica dei SC su ciclo di marcia

In linea con le prove descritte per l'uso combinato, è stato richiesto al sistema SC un ciclo in potenza complementare a quella erogata dalla batteria. Tale prova è illustrata in Figura sia per la potenza erogata da SC . La Figura 36 illustra l'andamento delle correnti e la caduta di tensione durante l'impiego dei SC.

In Figura 37 sono riportate le misure effettuate con il ciclatore durante la prova, la quale è stata ripetuta 3 volte, ognuna quindi scaricando secondo il ciclo di marcia e poi ricaricando sino a tensione massima. Si evidenzia la ripetitività nella esecuzione del ciclo senza riduzioni di potenza erogata e quindi dell'energia estraibile lungo quel tipo di percorso tra una ricarica e la successiva.

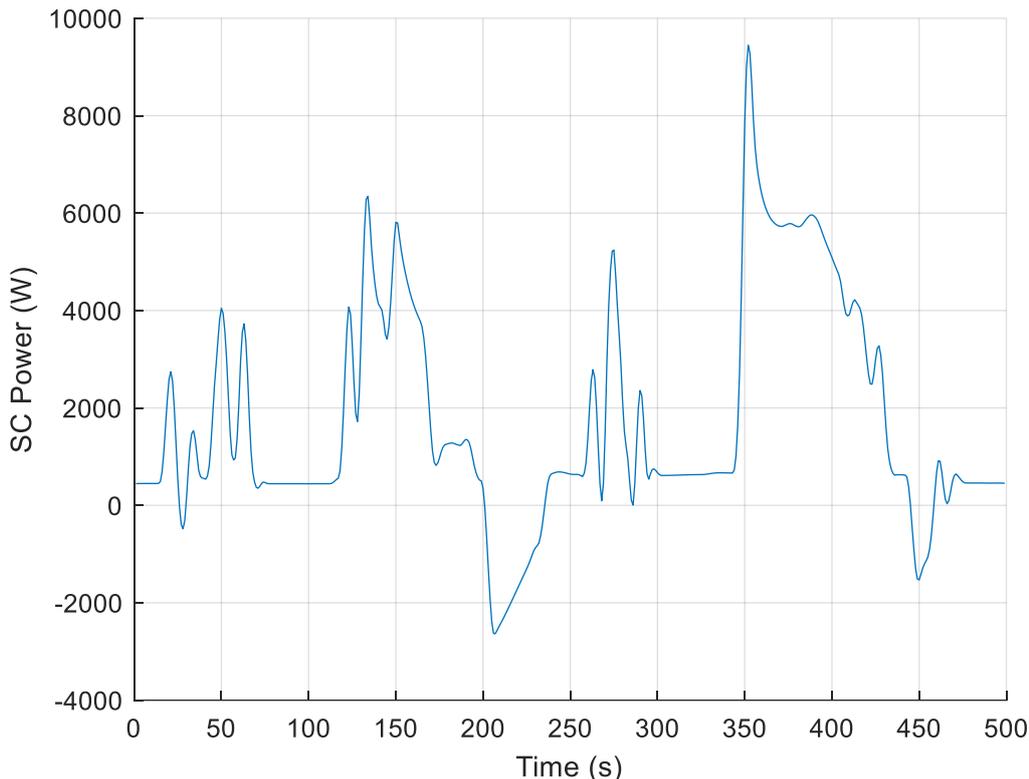


Figura 36: Prova su ciclo di marcia dei sistemi di accumulo in uso combinato

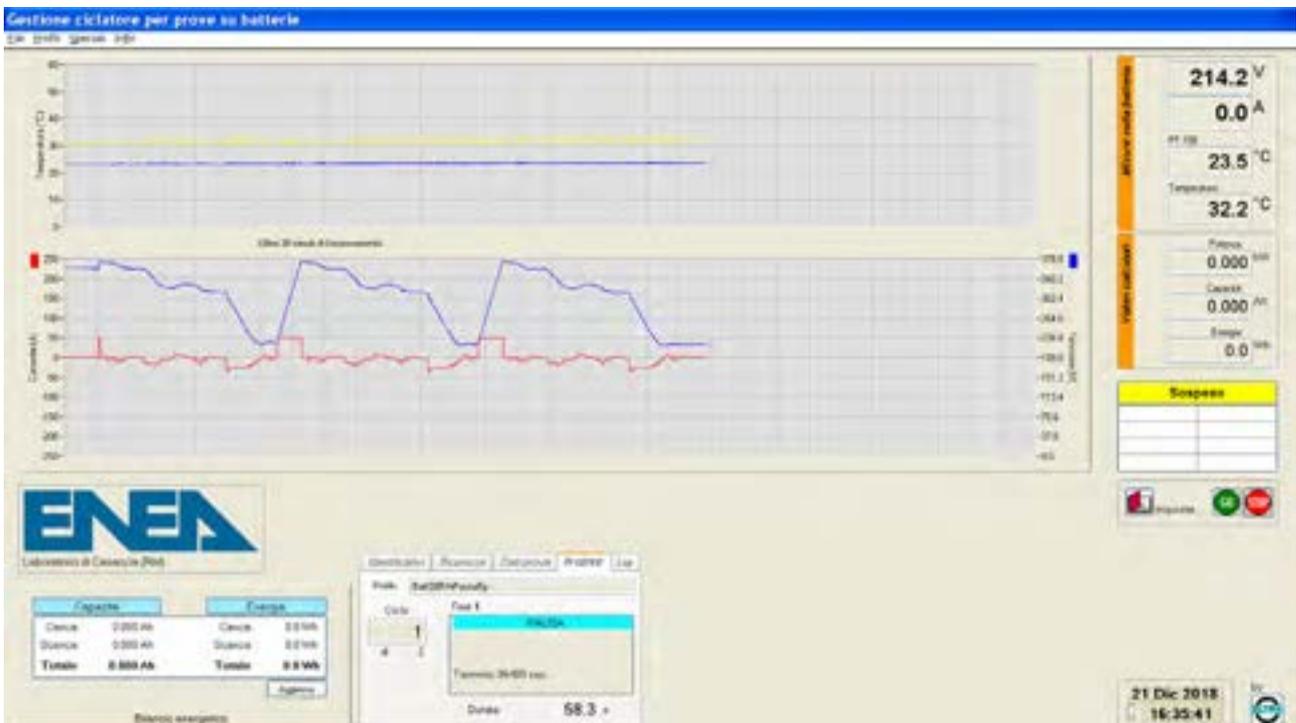
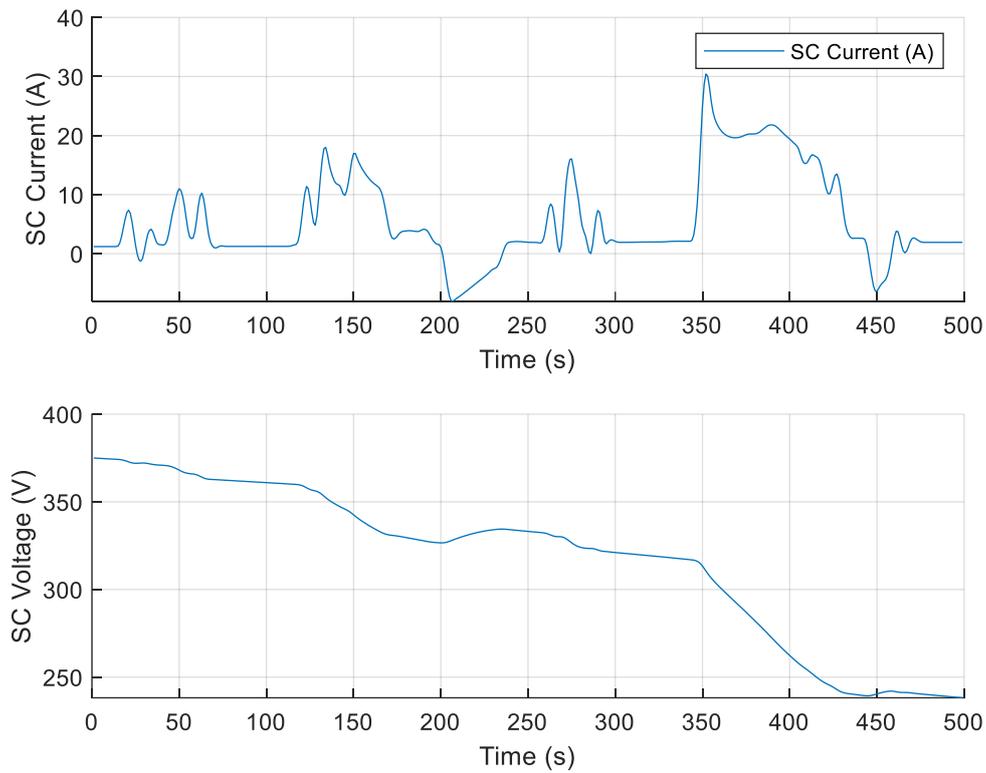


Figura 228: misure del ciclatore ENEA

La Figura 39 e la Figura 40 mostrano rispettivamente l'andamento della corrente e della tensione misurate durante la prova di carica e scarica.

La carica dei supercap (che sul grafico ha corrente negativa) è stata fatta con corrente costante e con durate elevata, al fine di non stressare il sistema e i cablaggi. Nelle fasi successive verranno fatte usando i tempi previsti in fase di progetto.

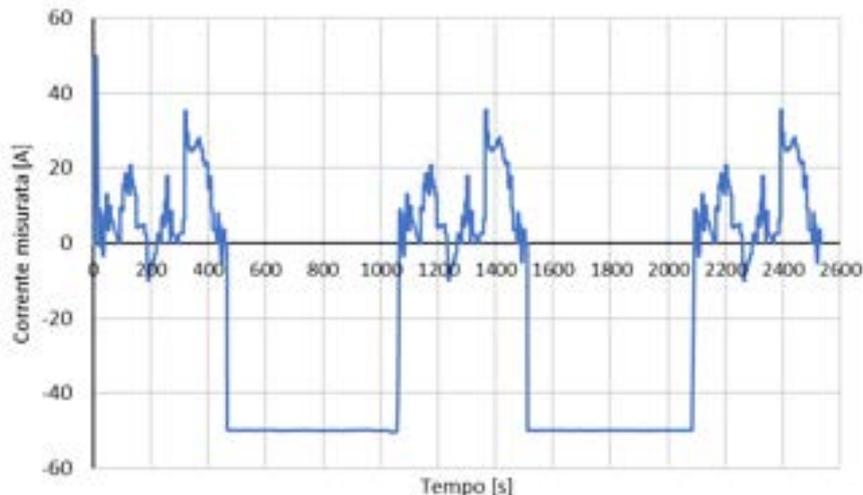


Figura 23: corrente rilevata

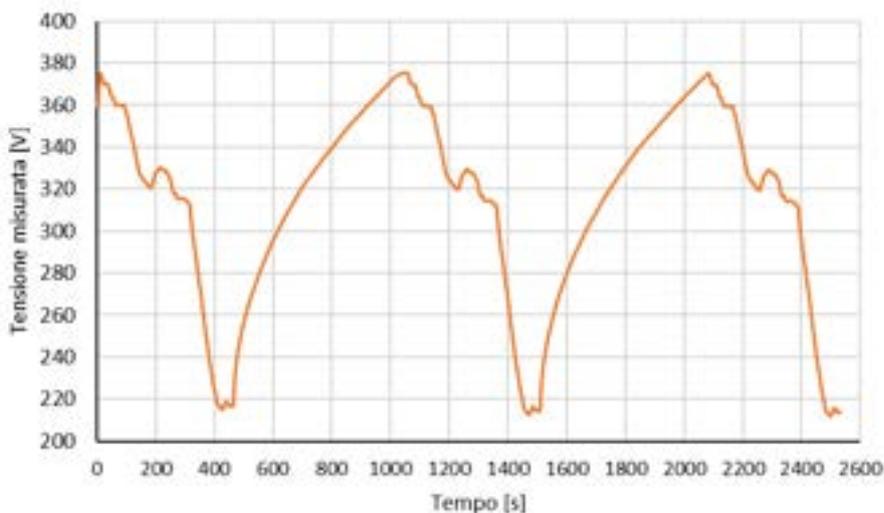


Figura 40: tensione misurata

5.1.6 Prova n°6: Scarica di batteria e SC in uso combinato

Quest’ultima prova mirava a validare tutto il set di prove sostenuto in precedenza, quindi alla possibilità di sostenere il ciclo di marcia mediante il sistema di accumulo misto progettato. In Figura è mostrato l’andamento della corrente di scarica (linea rossa) e della tensione di lavoro della batteria con l’ausilio dei supercapacitori questa volta collegati tramite il DCDC. Tali dispositivi hanno trasferito un’energia pari a 294 Wh durante la marcia, scaricandosi da 375 V da cui erano partiti ai circa 210 V a cui sono arrivati, e riducendo il consumo diretto dalla batteria da 515 Wh a circa 220 Wh. Questo risultato è il linea con quanto previsto con le prove separate e testimoniano la correttezza del lavoro basato sull’interazione tra SC e batteria con l’anello di controllo attivo.

In Figura 41 è mostrato il layout in cui si è posta l’attenzione sul nodo di potenza “N” indicato in rosso, e la convenzione delle correnti entranti ed uscenti.

Nel nodo suddetto avviene il collegamento elettrico tra il motore, la batteria e il DCDC; pertanto vi convergono la corrente richiesta del motore “ I_m ” e le correnti fornite dal sistema di accumulo “ I_b ” (batteria) e “ I_{sc} ” (supercap). La convenzioni dei segni è la seguente:

- La corrente richiesta dal motore è positiva quando uscente dal nodo verso il motore (situazione tipica della trazione), negativa quando entrante nel nodo (caso della frenata rigenerativa)
- La corrente della batteria e dei SC è considerata positiva quando erogata da questi ed entrante nel nodo suddetto (fase di trazione del bus), negativa quando uscente dal nodo verso la batteria e verso i SC rispettivamente

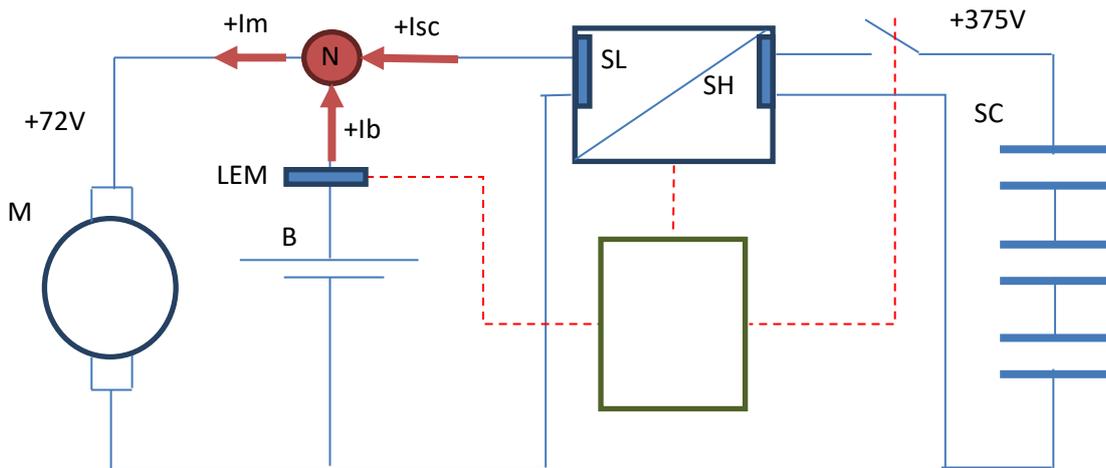


Figura 24 : schema del circuito del sistema ibrido di accumulo

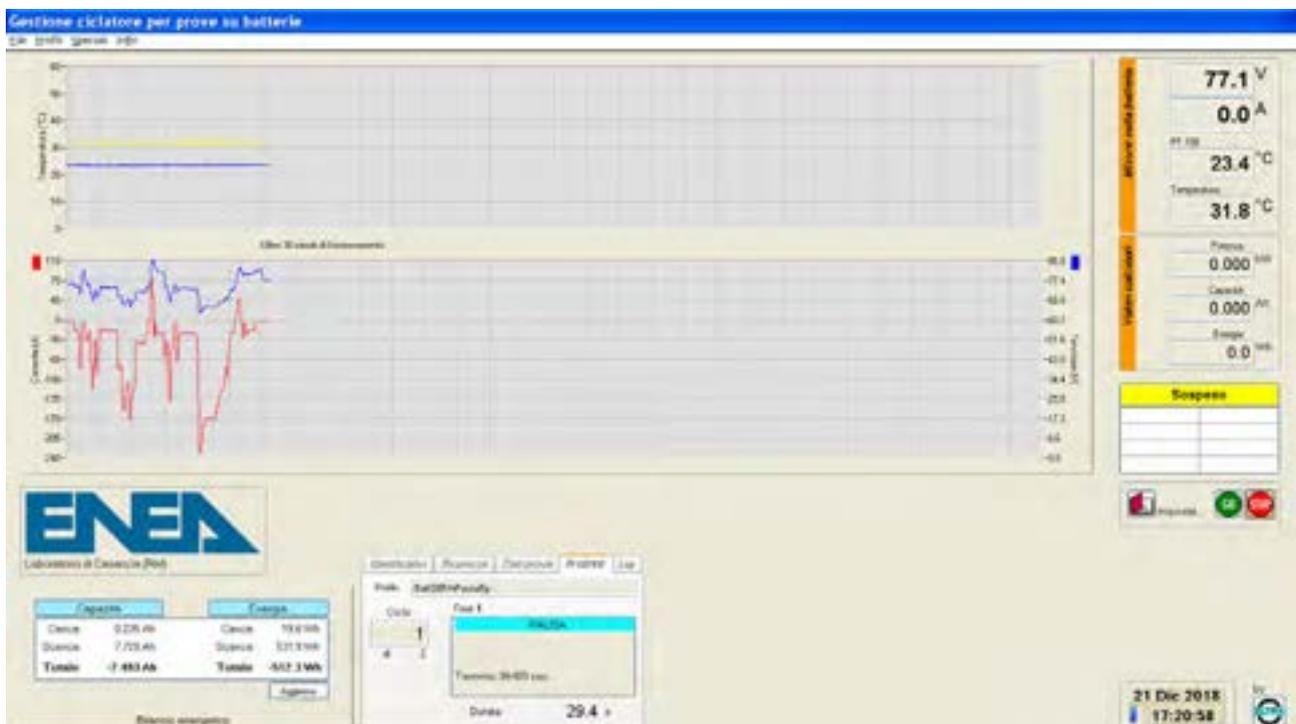


Figura 42: corrente e tensione di batteria misurate dal ciclatore ENEA nella prova combinata sul link DC

La richiesta di potenza del motore viene suddivisa in parte dalle batterie e in parte dai supercapacitori. Infatti in base alla richiesta di potenza il DCDC opportunamente controllato in corrente, trasforma parte dell’energia ad alta tensione contenuta nei SC in energia a bassa tensione per ridurre la corrente erogata dalla batteria.

La Figura 43 mostra le tre correnti separate e la Figura 44 il confronto tra la corrente richiesta dal motore e la somma algebrica della corrente fornita da batterie e DCDC (quindi dal sistema di accumulo misto).

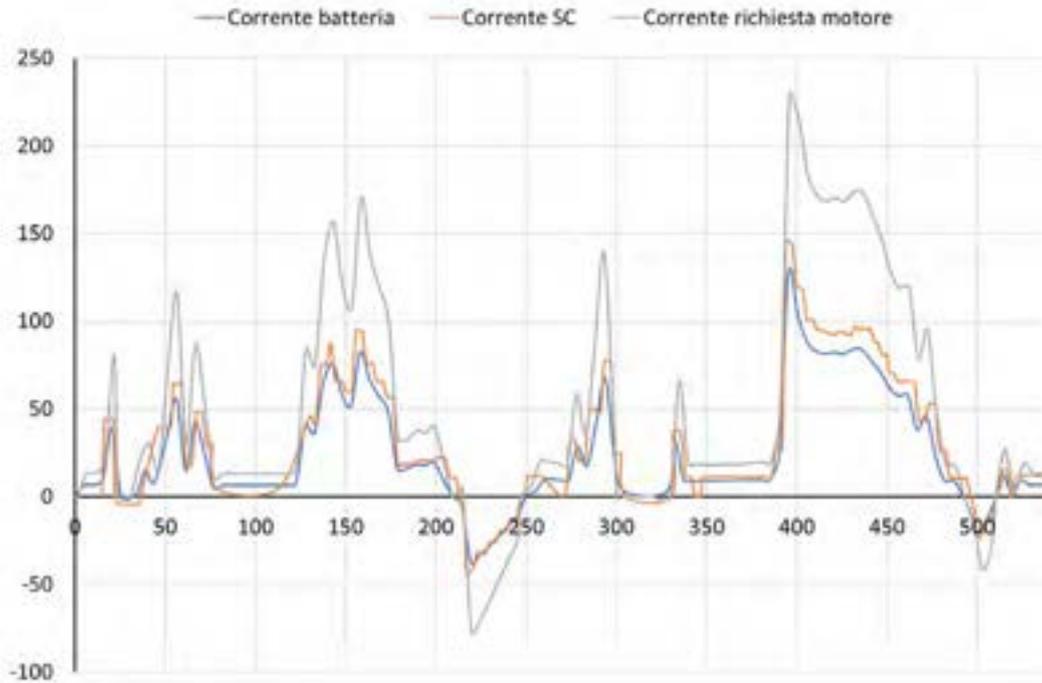


Figura 25 : correnti del sistema di accumulo

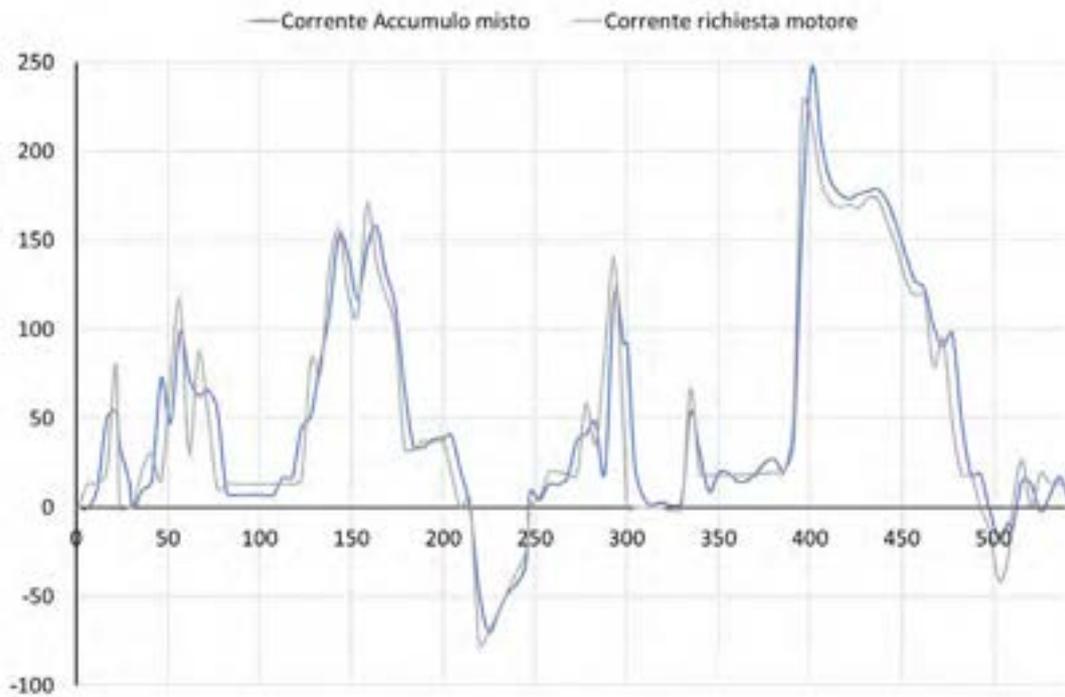


Figura 44 : corrente rilevata in erogazione ed in richiesta

6 Conclusioni

L'obiettivo del progetto era dimostrare che fosse possibile gestire supercondensatori e batterie in parallelo in modo che i primi potessero prendere le correnti di picco in accelerazione e frenatura e le seconde garantire la base per un lento decadimento che non ne causi un invecchiamento precoce.

A fianco di questo obiettivo primario si innesta un secondo altrettanto importante di rendere i supercondensatori di bordo indipendenti dal resto per ricevere una ricarica ultrarapida per contatto con un banco di supercondensatori carichi.

Per realizzare tale sistema e prototiparlo si sono dapprima definite le specifiche tecniche del sistema di comune accordo con i committenti e con i ricercatori che hanno gestito la stazione di ricarica (deliverable 1 del progetto) quindi si sono effettuati gli acquisti per realizzare il prototipo e quindi si sono testati i singoli pezzi singolarmente, poi il sistema intero a bassa tensione ed infine il prototipo integrato al cicalatore su un ciclo di marcia misurato sperimentalmente.

Il progetto si è concluso con successo.

Si è realizzato un nuovo cassone capace di alloggiare batterie, supercondensatori e elettronica di controllo nel vano batterie del bus.

Quindi si sono realizzati un prototipo dell'elettronica di gestione ed una prima release del software che gestisce il controllo dell'elettronica di potenza.

Il tutto è stato testato dapprima nei laboratori UNIFI a bassa tensione e poi in quelli ENEA sia per parti che assieme.

Le prove hanno verificato il corretto dimensionamento degli accumuli in relazione alle autonomie previste tra una fermata e la successiva. Inoltre sulla base delle prove eseguite al banco l'accoppiamento attraverso la logica di controllo ipotizzata ha consentito di ridurre le correnti di batteria grazie all'intervento dei SC nel momento di maggiore richiesta.