



Ricerca di Sistema elettrico

Sperimentazione in scala reale di un sistema di ricarica flash con pantografo, al banco e su strada

F. Orteni, M. Pasquali, F. Sacco

SPERIMENTAZIONE IN SCALA REALE DI UN SISTEMA DI RICARICA FLASH CON PANTOGRAFO, AL BANCO E SU STRADA

F. Orteni, M. Pasquali, F. Sacco (ENEA)

Settembre 2018

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2017

Area: Trasmissione e distribuzione dell'energia elettrica

Progetto: Sistemi di accumulo di energia per il sistema elettrico

Obiettivo: Studi sulla realizzazione di sistemi di accumulo ibridi. Sperimentazione su un prototipo da banco in scala di un sistema di ricarica "flash" per TPL

Responsabile del Progetto: Pier Paolo Prosini, ENEA

Si ringrazia la SCHUNK PAHN UND Industrie Technik GMBH per la collaborazione nella fornitura del pantografo che equipaggia il veicolo modificato da Enea.

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	6
2.1 SETUP SPERIMENTALE	6
2.2 CARATTERISTICHE DELL'ARMADIO	10
2.3 IMPOSTAZIONE DEI TEST	12
2.4 PROVE CON IL CICLATORE	14
2.5 TEST DI RICARICA DEI SUPERCONDENSATORI DI BORDO.	17
2.5.1 <i>Prova a tensione $V_{bus}=190$ V</i>	17
2.5.2 <i>Prova a tensione $V_{bus}=210$ V</i>	19
2.5.3 <i>Prova a tensione $V_{bus}=230$ V</i>	19
2.5.4 <i>Prova a tensione $V_{bus}=250$ V</i>	20
2.5.5 <i>Supercondensatori a bordo</i>	20
2.6 ALTRE CONSIDERAZIONI	21
2.6.1 <i>Possibili scenari di ricarica</i>	21
2.6.2 <i>Load leveling e interazione bidirezionale con la rete primaria</i>	23
2.6.3 <i>Gestione intelligente delle stazioni di ricarica</i>	25
3 CONCLUSIONI.....	26
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	27

Sommario

Il documento presenta lo studio sperimentale di un sistema di ricarica per bus elettrici detto 'Flash' che, sfruttando la presenza a bordo del bus ed a terra di banki di supercondensatori, permette la ricarica veloce degli SC di bordo ad ogni intervallo di una/due fermate. Il sistema di ricarica Flash presenta il vantaggio rispetto a quello normale installato nei capolinea o nelle rimesse di evitare il potenziamento della rete di alimentazione primaria e l'installazione di costosi convertitori di potenza: il lavoro mostra i test sperimentali di funzionamento eseguiti sul sistema completo, (negli studi correlati sono state presentate le simulazioni, il dimensionamento e le corrispondenti specifiche di progettazione) ed illustra possibili sviluppi futuri della attività.

1 Introduzione

La diffusione dei sistemi di trasporto elettrici a batterie implica quella delle colonnine di ricarica che ne costituiscono un supporto indispensabile, le colonnine a loro volta richiedono un potenziamento della rete elettrica di alimentazione primaria non solo in termini di produzione di energia, ma anche di disponibilità di potenza nel nodo che le alimenta.

Se si prende in considerazione un sistema di trasporto pubblico basato sull'utilizzo di Bus elettrici e si considera di ricaricare i mezzi al capolinea in un tempo limitato, dell'ordine di 10-15 minuti, risulta evidente che questo potrebbe portare a richieste di potenza alla rete dell'ordine anche dei MW nel caso di soste ad un capolinea molto affollato (per esempio si pensi ai grandi capolinea nei pressi delle stazioni ferroviarie), con la conseguente necessità di rinforzare il nodo della rete elettrica primaria e di investire nei convertitori di potenza associati alle colonne di ricarica, che dovranno essere di taglia elevata e non dovranno disturbare la rete con emissioni di armoniche.

Il presente lavoro investiga su una soluzione completamente diversa per l'alimentazione del veicolo: lo si vuole ricaricare con continuità ogni una/due fermate, ad alta potenza e bassa energia utilizzando un accumulo a terra costituito da supercondensatori. I supercondensatori sono componenti caratterizzati da un altissimo rapporto potenza/energia, normalmente disponibili in taglie che non permettono di accumulare molta energia, ma di caricarla e scaricarla in brevissimo tempo ad una potenza che le batterie non potrebbero sopportare: l'idea di lavoro è che la rete primaria ricarichi i condensatori a terra a bassa potenza in tempi dell'ordine dei minuti e che questi a loro volta, in tempi di 10-30 s, si scarichino su quelli del veicolo fornendogli l'autonomia necessaria per effettuare un breve tratto di strada fino alla prossima stazione di ricarica (800-1000 m). Anche bordo del veicolo devono essere presenti dei supercondensatori perché sono gli unici componenti che possono assorbire l'ingente potenza di ricarica erogata dalla stazione di terra. Il sistema completo di ricarica Flash è quindi costituito da un bus elettrico dotato di un accumulo misto formato da batterie (per alimentare gli ausiliari) e supercondensatori (per la trazione elettrica) e da un certo numero di stazioni di ricarica composte da supercondensatori posti a terra, il cui costo di realizzazione è contenuto e l'impatto della richiesta di potenza sulla rete praticamente nullo, l'affidabilità del complesso è molto alta.

Per limitare il valore massimo di corrente erogata dal cortocircuito tra SC di terra e di bordo è stata interposta tra di loro una induttanza di smorzamento della corrente, inoltre gli SC di terra sono formati da blocchi separati e posti tra di loro in serie in modo da poter realizzare una ricarica in più step, migliorando così l'efficienza del processo e limitando il valore di picco della corrente erogata.

Il lavoro svolto nel triennio della ricerca di sistema elettrico ha portato dallo studio di fattibilità dell'idea iniziale allo sviluppo di un dimostratore completo del sistema, composto da un Bus di piccola taglia ed una stazione di ricarica: in questo documento vengono illustrati i test preliminari condotti sul sistema di ricarica.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

In questo studio si presenta la sperimentazione in scala reale di un sistema di ricarica di un bus elettrico dotato di accumulo misto (batterie e supercondensatori) che viene ricaricato da un sistema di accumulo costituito da soli supercondensatori posti a terra e collegati alla rete primaria da un convertitore AC/DC di bassa potenza. Il bus in presentato nello studio è stato dotato sia di batterie che di supercondensatori perché le prime assicurano il funzionamento dei servizi ausiliari e garantiscono l'autonomia di un intero percorso in caso di mancata ricarica degli SC (per esempio per un black out di rete), a terra sono presenti i soli supercondensatori.

2.1 Setup sperimentale

Il bus utilizzato per la sperimentazione è il Gulliver, prodotto dalla Tecnobus: il bus è stato modificato sostituendo il sistema di accumulo originale con uno tipo misto costituito da 6 moduli di batterie al piombo da 100 Ah messi in serie fino ad ottenere una tensione di 72V e da 3 supercondensatori della MAXWELL da 125 V 63 F montati anche essi in serie (per un totale di 375 V , 20 F e circa 300 Wh di energia stoccata), le batterie alimentano gli ausiliari e partecipano alla trazione solo se i condensatori scendono sotto una soglia di carica prestabilita, nel caso in esame fissata al valore di $375/2=187.5$ V [3].

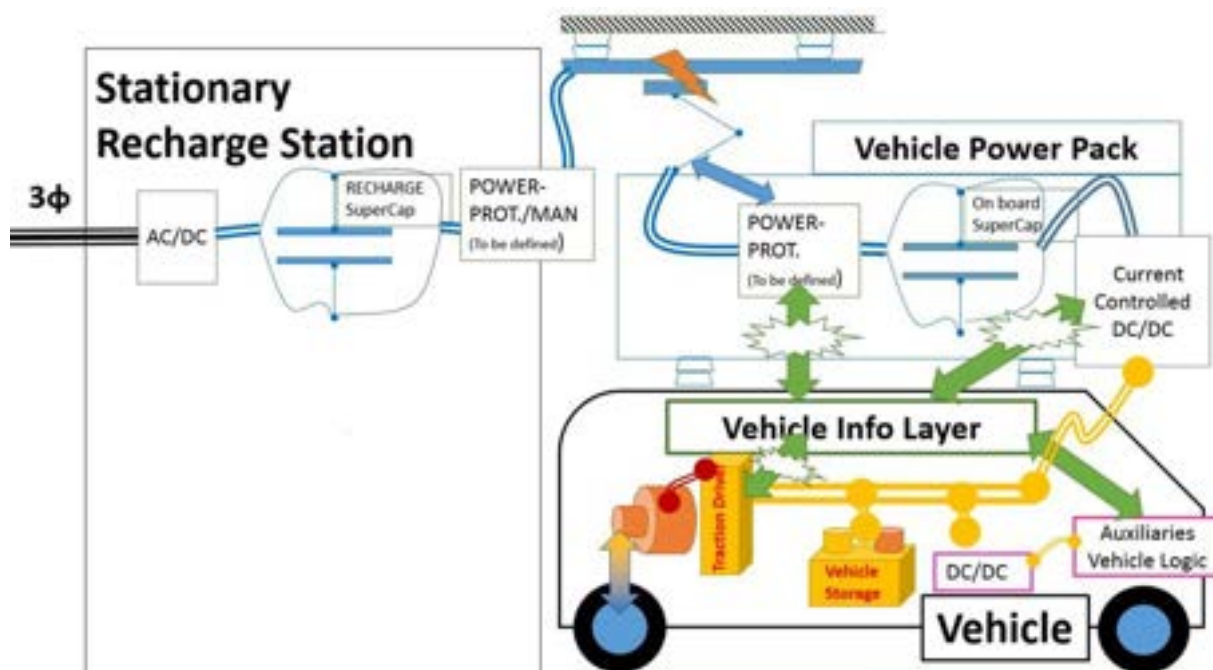


Figura 1. Architettura del powertrain di bordo del Tecnobus Gulliver.

La stazione di ricarica è invece composta da 6 moduli Maxwell BMOD125063 da 125V e 63 F collegati alla rete come mostrato in Figura 2.

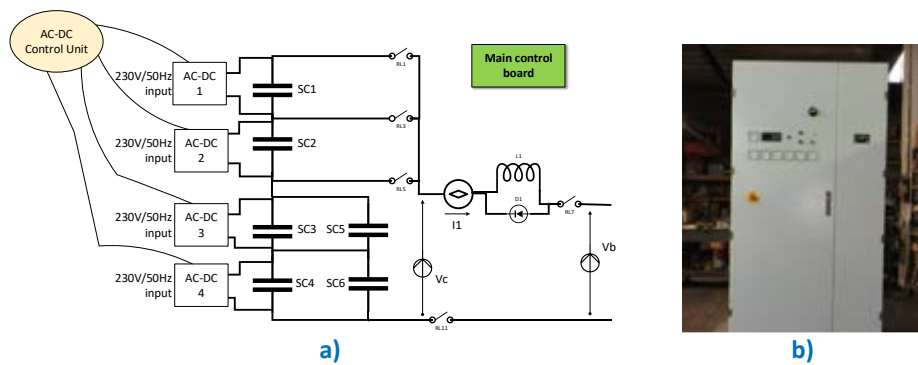


Figura 2 a) Schema della stazione di ricarica b) Armadio realizzato dalla Ditta ELTRA

Rispetto al sistema di base presentato nello studio di fattibilità [1] la stazione è sostanzialmente simile ma presenta (con riferimento alla Figura 2):

- L'aggiunta di un sistema di gestione delle fasi di ricarica automatizzato effettuato tramite pantografo
- Quattro alimentatori per la ricarica a bassa potenza dei supercondensatori (3 minuti circa)
- Un sistema di gestione degli step di ricarica che consente il passaggio dall'uno all'altro quando la corrente che scorre nel circuito sia minore di un valore predefinito, questa operazione consente di ridurre i tempi totali della ricarica e renderli compatibili con la discesa e la risalita dei passeggeri sull'autobus.
- L'induttore, ovvero il dispositivo che riduce la corrente massima nei primi istanti di ricarica di ogni step ha in questa configurazione le seguenti caratteristiche (Figura 3)
 - $L_{progetto} = 0.0054 \text{ H}$
 - Resistenza ESL di progetto = 0.155Ω
 - $I_{max} = 500.9 \text{ A}$
 - $K_u = 0.5$
 - $I_{RMS} = 187 \text{ A}$.

In parallelo all'induttore è presente un diodo di ricircolo che evita l'inversione della corrente.

Le caratteristiche della stazione sono descritte in [2].

La figura 3 presenta l'induttore realizzato per questo studio ed il pantografo Schunk, montato sul Bus, che permette il collegamento tra veicolo e stazione.



Figura 3. a) Induttore realizzato per la presente sperimentazione b) Pantografo SCHUNK e Bus

La figura 4 presenta invece il contenitore del sistema di accumulo misto batterie+supercondensatori

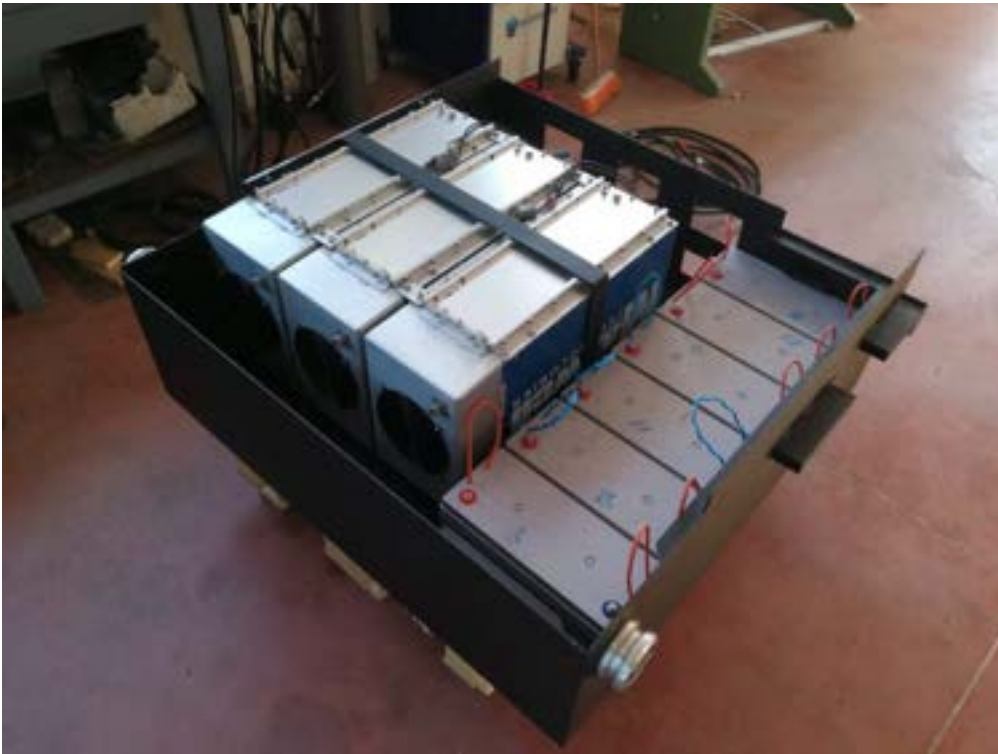


Figura 4. Sistema di accumulo misto di bordo

2.2 Caratteristiche dell'armadio

In figura 5 è riportato lo schema elettrico di potenza dell'armadio, realizzato dalla ditta Eltra su indicazioni di Enea e dell'Università di Roma Tre [2].

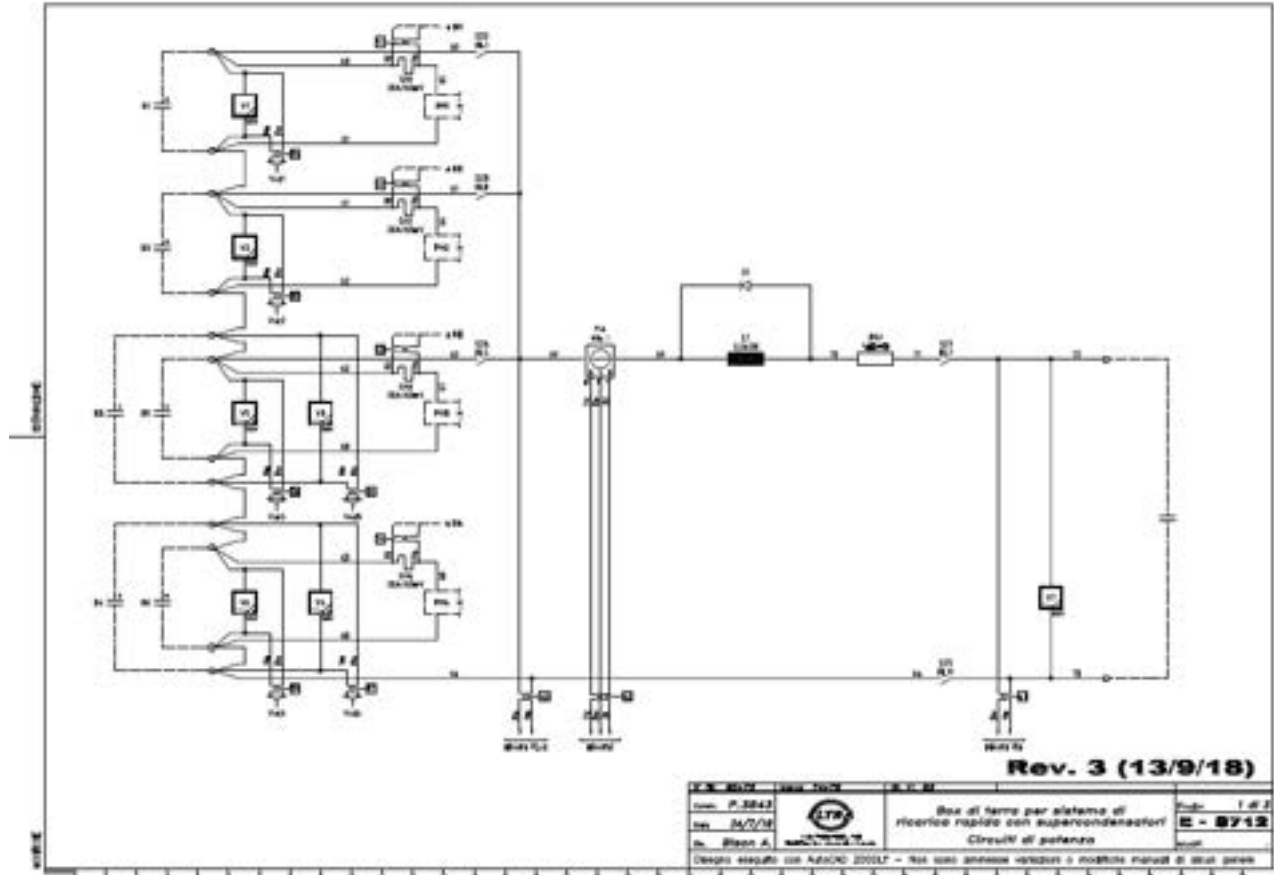


Figura 5. Schema di potenza dell'armadio realizzato dall'Eltra

Roma tre ha anche realizzato il software di interfaccia utente tra un PC di controllo e l'armadio stesso [2]. La figura 6 indica invece le dimensioni effettive dell'armadio (i condensatori di terra sono ospitati esternamente ad esso ndr) con gli indicatori spia e gli strumenti di misura di massima delle tensioni dei condensatori e della corrente.

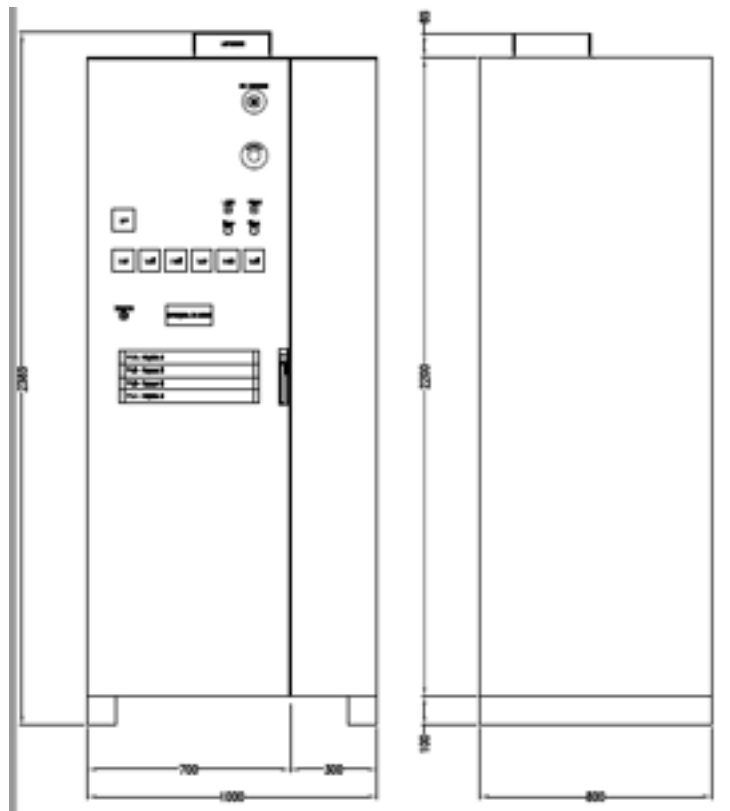


Figura 6. Dimensioni dell'armadio

La figura 7 riporta la sezione frontale di misura esterna all'armadio: vengono indicate tutte le tensioni dei condensatori lato terra, quella del pantografo lo stato della linea e se l'apparecchiatura sta operando. Per completezza in aggiunta alle indicazioni visive di massima è presente un tastierino che mostra le misure acquisite dal sistema di supervisione della stazione terra, oltre a questo sono presenti il sezionatore e l'interruttore di emergenza.



Figura 7. Indicatori e strumenti di misura

2.3 Impostazione dei test

La figura 8 riporta concettualmente l'andamento dei flussi di potenza del sistema di ricarica Flash Charge.

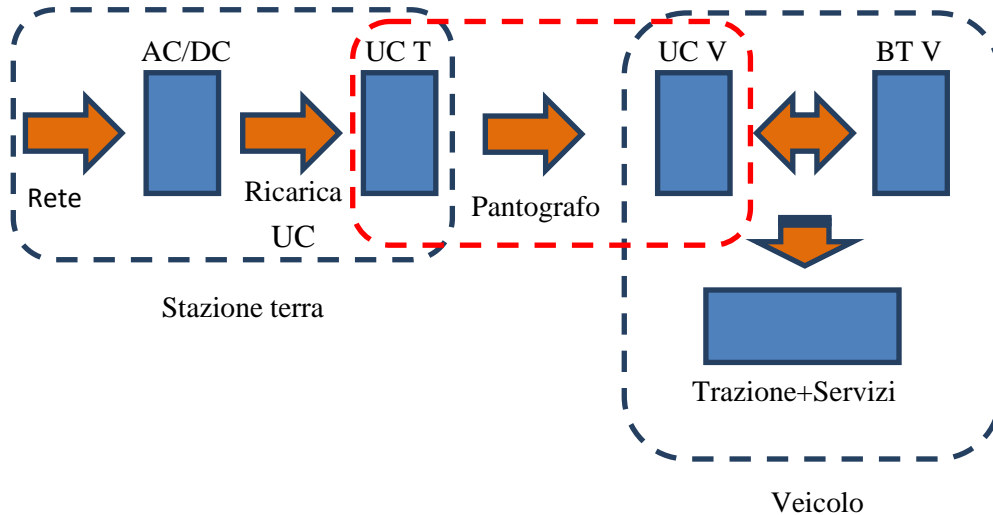


Figura 8. Flussi di potenza nel sistema Flash Charge

La rete alimenta a bassa potenza i convertitori AC/DC di figura 2a) che ricaricano i condensatori a terra: al passaggio del veicolo, tramite il pantografo, si connettono i due sistemi di accumulo e si esegue la ricarica dei soli condensatori di bordo. Una volta eseguita la ricarica il veicolo riparte e sono possibili eventuali scambi di energia tra i due sistemi di accumulo di bordo.

Ognuno dei sottosistemi che sono rappresentati nella figura va testato sia singolarmente che nel funzionamento integrato con il complesso dei sistemi di ricarica.

Nel presente lavoro vengono presentati i test di laboratorio eseguiti sulla sezione di terra e sull'accoppiamento tra gli SC di terra e quelli di bordo, in [3] vengono presentati i test sulle batterie e sugli interfaccia di connessione batterie-supercondensatori. Si è stabilito di fare una serie di test preliminari di funzionalità della stazione di ricarica utilizzando un carico controllato al posto dei condensatori del Bus, questo per operare in sicurezza sui componenti prima sottoporli alle condizioni operative: come carico controllato si è deciso di utilizzare un ciclatore e dopo le prove di funzionalità si è passati a quelle nelle effettive condizioni operative.

Un ciclatore è uno strumento che, se collegato a batterie o supercondensatori, può imporgli di seguire un profilo predefinito di corrente o di tensione, o in alternativa di potenza.

Nel caso specifico la macchina è stata programmata per eseguire una scarica a corrente costante fino a raggiungere una determinata tensione di lavoro e successivamente operare a tensione costante, cosa che fa riducendo la corrente di carico fino a che essa non diviene inferiore ad un valore predefinito, a quel punto la corrente viene azzerata.

La figura 9 chiarisce il modo di operare del ciclatore:

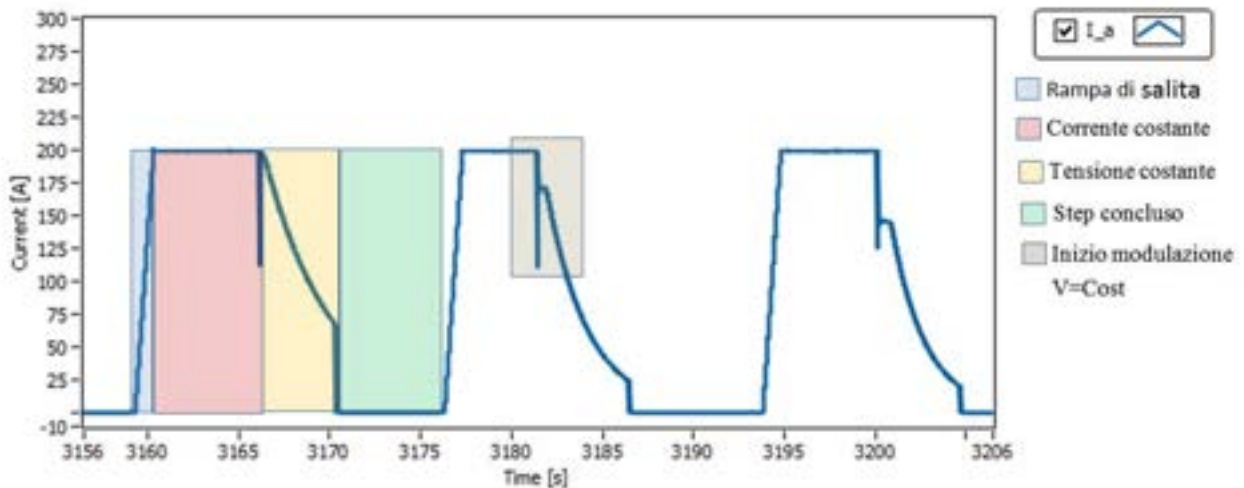


Figura 9. Fasi di funzionamento del ciclatore

La corrente raggiunge il valore prefissato (nel caso presente 200 A) e si stabilizza, quando la tensione dei supercondensatori scende fino ad un valore di soglia la macchina va in modulazione di corrente, ovvero riduce la corrente cercando di mantenere costante la tensione della batteria o SC: la corrente viene totalmente interrotta quando raggiunte un valore minore della soglia minima predefinita.

Nella figura è evidenziato il passaggio dal funzionamento a corrente costante a quello a tensione costante, essendo gli SC molto dinamici si rileva uno spike di corrente legato al sistema di controllo del ciclatore.

Dal momento che la ricarica avviene in tre step si sono realizzati tre step anche con il ciclatore, ponendo come tensioni di fine passo i valori $V_{step}=230-310-370$ V derivati da simulazioni precedenti [1,4]; per le rampe di corrente si sono scelti i valori di $I_{step}=200-350-480$ A, compatibili con le caratteristiche dei supercondensatori e, nel caso di $I_{step}=480$ A, con quelle effettive attese nel funzionamento reale.

Lo scopo delle prove non è quello di simulare il funzionamento reale del sistema, ma di testare, innalzando in modo graduale la massima corrente di lavoro e mantenendola per un tempo superiore a quello del funzionamento effettivo, la funzionalità dei suoi componenti in condizioni operative e la presenza di eventuali squilibri di tensione nei blocchi di SC, che sono idealmente uguali, ma potrebbero presentare difetti di realizzazione.

La prova del sistema completo SC terra+ SC bordo è stata invece effettuata considerando quattro diverse tensioni iniziali per gli SC di bordo $V_b=190-210-230-250$ V.

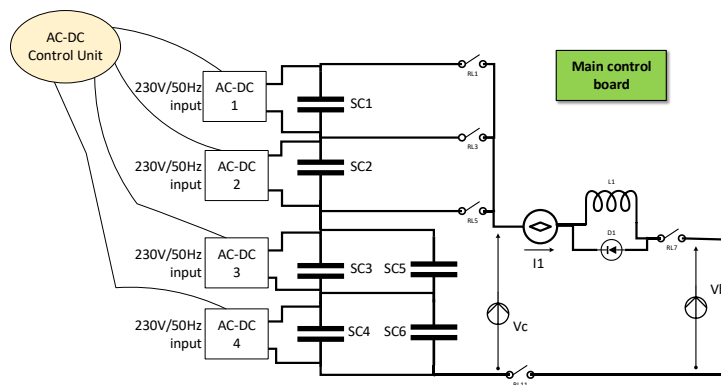


Figura 10. Schema della stazione di ricarica e nomenclatura corrispondente

La prova del sistema completo consente non solo di verificarne il funzionamento atteso in base alle simulazioni numeriche ma anche di indagare sulla presenza di eventuali squilibri di tensione all'interno dei moduli di SC, che sono composti dall'assemblaggio di elementi base posti in parallelo serie fra di loro.

La figura 10 riporta lo schema della stazione di ricarica con la corrispondente nomenclatura dei componenti, prima della effettuazione delle prove di scarica i quattro convertitori AC/DC ricaricano i corrispondenti supercondensatori portandoli alla loro tensione massima di lavoro $V_{sc}=125$ V.

La ricarica degli SC avviene a potenza costante invece che a corrente costante: ogni convertitore fornisce in uscita una potenza $P=2$ kW per giungere al valore totale assorbito dalla rete di $P=8$ kW.

Il tempo di ricarica dei componenti dipende dalla loro capacità e dalla tensione residua a fine scarica: in particolare gli AC/DC 3-4 saranno generalmente quelli che impiegheranno più tempo, mentre il numero 1 sarà quello che ne impiegherà di meno, infatti a fine prova SC1, essendo stato inserito al terzo step, presenterà una tensione residua superiore avendo nel contempo una capacità dimezzata rispetto a quella vista da 3 e 4, nelle prove in esame il tempo medio di ricarica della stazione terra è di circa 3 minuti.

2.4 Prove con il ciclatore

Per la prova di scarica con la corrente massima di $I=200$ A le tensioni iniziali dei condensatori sono rispettivamente $V_{c1}=123.9$ V, $V_{c2}=121.1$ V, $V_{c3}=V_{c5}=121.2$ V, $V_{c4}=V_{c6}=120.8$ V, gli errori di misura della tensione sono dell'ordine di 0.5 V.

La figura 9 riproposta di seguito (come figura 11) presenta l'andamento della corrente registrato durante la prova di scarica a $I=200$ A.

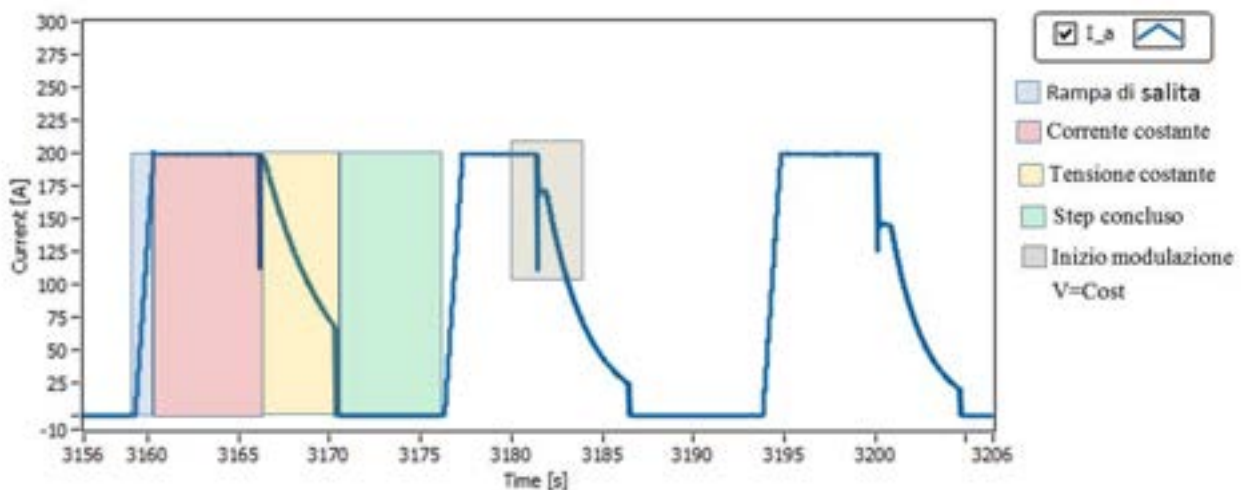


Figura 11. Andamento della corrente di linea nella prova a $I_{max}=200$ A

La prova viene eseguita nel modo descritto precedentemente, ed i tre step sono realizzati lasciando un tempo di pausa per ogni fase, a differenza del caso reale, nel quale è importante limitare il tempo di sosta del veicolo.

La figura 12 riporta l'andamento delle tensioni registrato partendo dalle condizioni iniziali dette precedentemente.

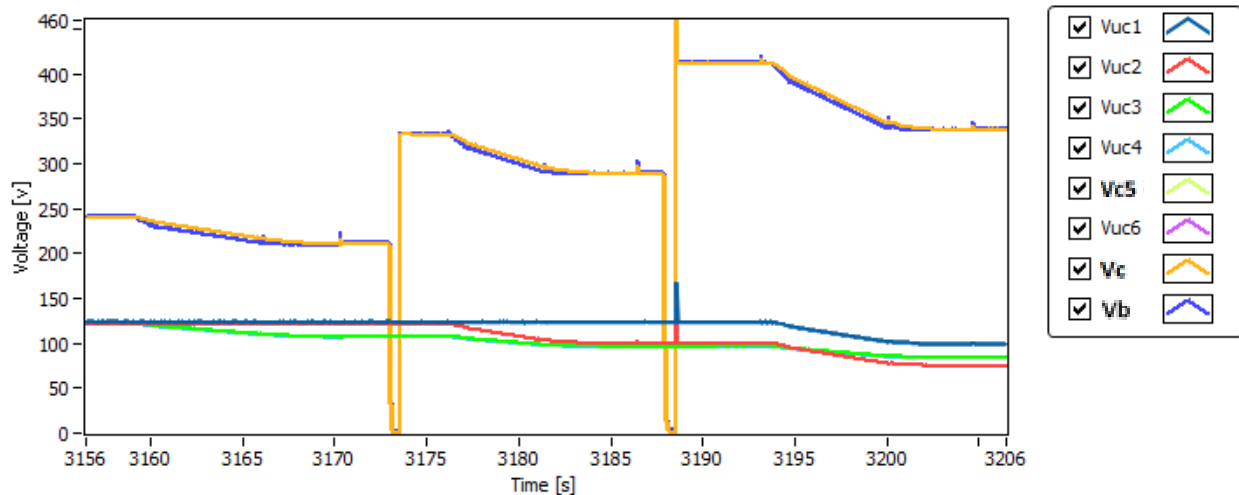


Figura 11. Andamento delle tensioni nella prova a $I_{max}=200\text{ A}$

Durante la prova la differenza tra le tensioni degli SC 3-5 e SC 4-6 si mantiene al di sotto dell'errore di misura, questo perché i componenti sono gemelli e lo scostamento tra le caratteristiche degli SC di una stessa serie è molto contenuto, mentre in passato la tolleranza sui valori di capacità e resistenza interna degli SC di una stessa serie era molto alta, anche del 30 %, cosa che avrebbe comportato una differenza di prestazioni nelle due coppie messe in parallelo/serie: di seguito le tensioni dei quattro SC 3,4,5,6 verranno indicate con V_{cp} .

Dopo il primo step la tensione dei quattro SC è pari a $V_{cp}=107.1\text{ V}$, dopo il secondo a $V_{cp}=95.3\text{ V}$, dopo il terzo a $V_{cp}=84.0\text{ V}$, SC2 passa dalla tensione iniziale a $V_{c2}=99.2\text{ V}$ nel secondo step ed a $V_{c2}=74.7\text{ V}$ nel terzo, SC1 varia dalla tensione iniziale a $V_{c1}=99.8\text{ V}$: la tensione finale del banco a fine prova risulta essere $V_{ct}=342.1\text{ V}$. L'induttanza $L1=5.4\text{ mH}$ posta in serie al circuito di ricarica ha lo scopo di limitare la corrente massima erogata dai supercondensatori e serve anche a stabilire la costante di tempo del circuito, la massima caduta di tensione riscontrata sull'induttanza è pari a $V_l=8.2\text{ V}$

La prova successiva è stata condotta a 350 A , le condizioni iniziali di tensione sono $V_{c1}=123.5\text{ V}$, $V_{c2}=122.2\text{ V}$, $V_{c3}=V_{c5}=120.9\text{ V}$, $V_{c4}=V_{c6}=120.6\text{ V}$, di seguito viene fornito l'andamento della corrente di scarica imposta dal ciclatore.

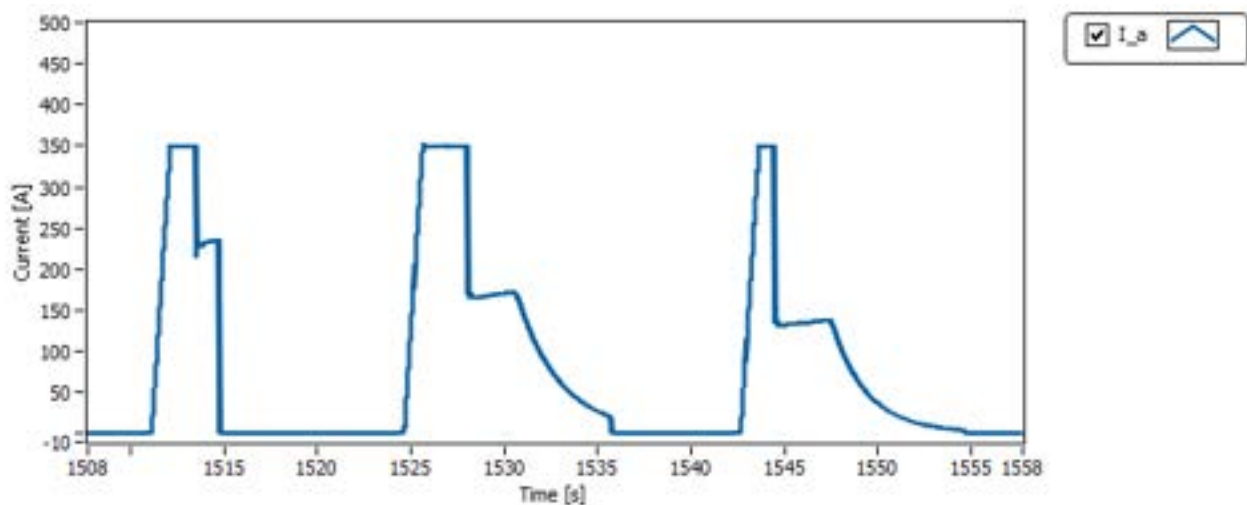


Figura 12. Andamento della corrente nella prova a $I_{max}=350\text{ A}$

Il profilo di corrente risulta diverso da quello registrato nella prova precedente, il motivo è legato alla dinamica del complesso sistema di ricarica+ciclatore, in particolare osservando il comportamento delle tensioni (figura 13) è possibile vedere come il contributo della induttanza sia ora più evidente.

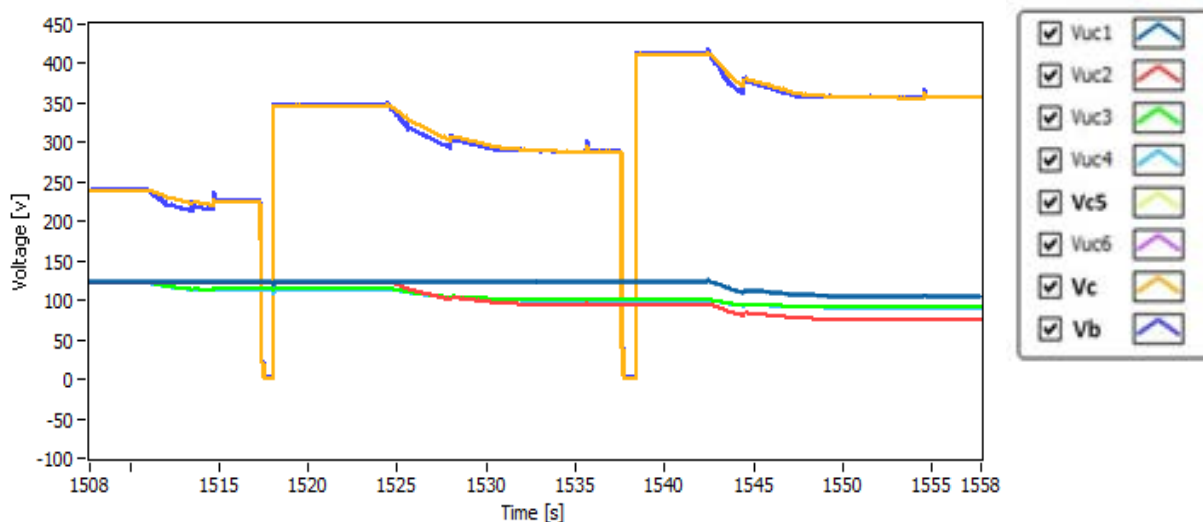


Figura 13. Andamento delle tensioni nella prova a $I_{max}=350\text{ A}$

La massima caduta di tensione sull'induttanza è ora pari a $V_l=12.1\text{ V}$, si ricorda che all'induttanza è associata anche una resistenza serie di $0.155\ \Omega$.

I valori di tensione raggiunti ad ogni step da Vc4, Vc6, Vc5 e Vc3 sono $V_{cp}=114.0\text{ V}$, $V_{cp}=99.6\text{ V}$, $V_{cp}=90.5\text{ V}$, mentre per Vc2 si ha $V_{c2}=93.5\text{ V}$ e $V_{c2}=74.9\text{ V}$, per Vc1 $V_{c1}=105.6\text{ V}$.

La prova finale utilizza una corrente di picco pari ad $I_{max}=480\text{ A}$, che corrisponde alla massima che, dalle simulazioni [1,4] ci si aspetta nel funzionamento reale del sistema: in figura 14 è riportato l'andamento della corrente di prova.

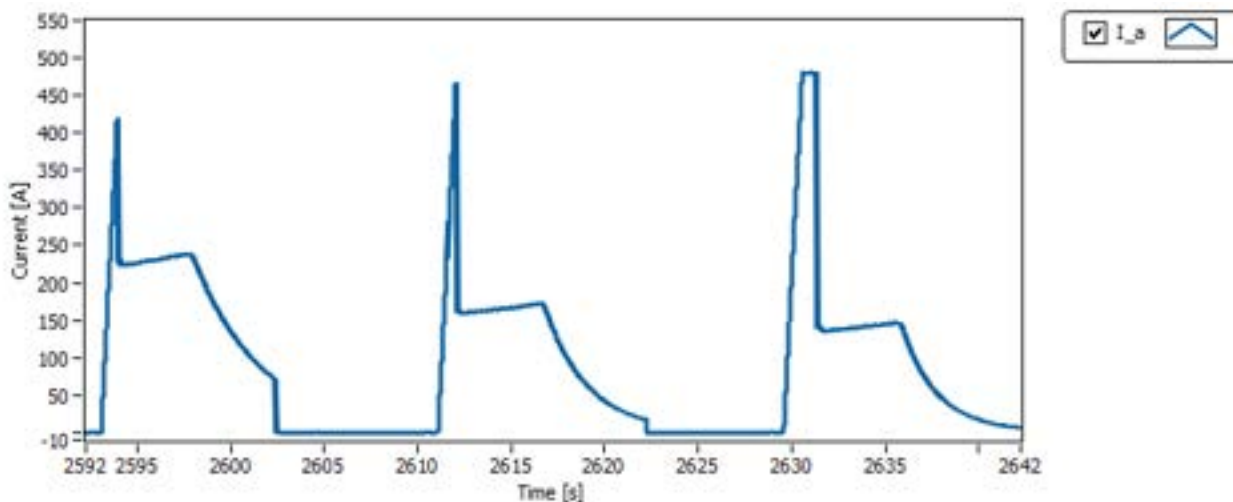


Figura 14. Andamento della corrente nella prova a $I_{max}=480\text{ A}$

La corrente tocca il suo valore di picco ed il sistema va subito in modulazione, la caduta di tensione sull'induttanza è ora più marcata (fig 15) e assume un valore massimo di $V_l=16.5\text{ V}$.

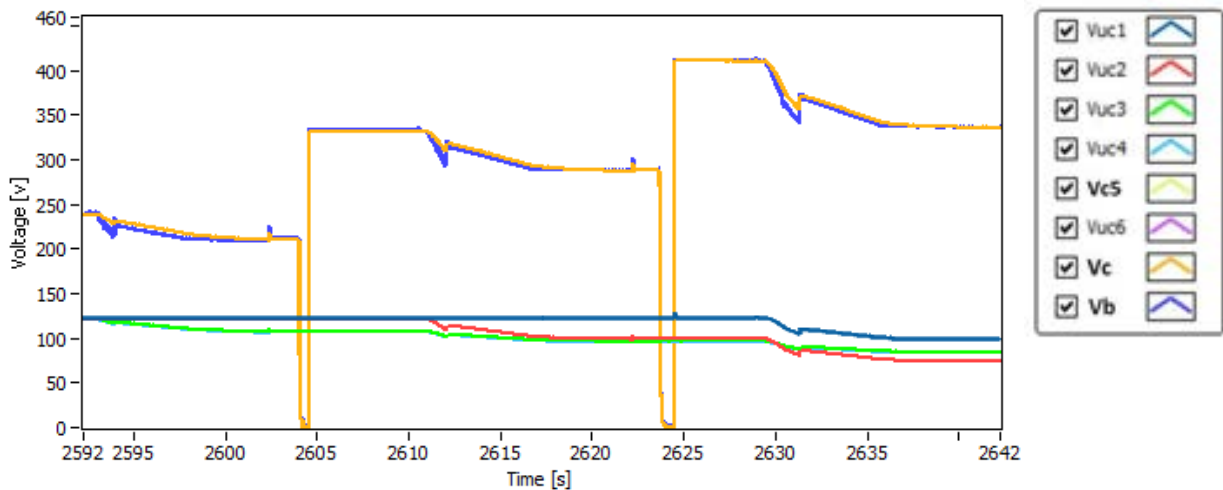


Figura 15. Andamento delle tensioni nella prova a $I_{max}=480$ A

Come nei casi precedenti le tensioni dei condensatori in parallelo serie rimangono equilibrate tra di loro, e raggiungono nei tre step i valori di $V_{cp}=106.7$ V, $V_{cp}=95.8$ V, $V_{cp}=83.2$ V, mentre SC2 nei due step raggiunge $V_{c2}=98.9$ V e $V_{c2}=73.74$ V, SC1 si porta a $V_{c1}=99.3$ V.

2.5 Test di ricarica dei supercondensatori di bordo.

La procedura di test prevede che vengano chiusi inizialmente i relè 11 e 7, successivamente si chiude RI5, RI5 viene riaperto nella fase di discesa della corrente, quando il suo valore residuo è minore uguale a 10 A [4], per quanto concerne RI3 ed RI1 si opera nello stesso modo.

Di seguito vengono presentati i risultati di alcuni test, verranno forniti gli andamenti di corrente e delle tensioni in alcuni casi significativi individuati tramite lo studio presentato negli anni precedenti: i risultati ottenuti sono stati conformi a quanto previsto con le simulazioni [1,4].

2.5.1 Prova a tensione $V_{bus}=190$ V

Il primo test viene eseguito considerando che gli SC di bordo si presentino scarichi alla fermata, con una tensione residua di $V_b=190.0$ V, questa è la condizione che richiede il massimo trasferimento di carica/energia al sistema: le condizioni di tensione iniziale per gli SC di terra sono $V_{c3}=V_{c5}=121.8$ V, $V_{c4}=V_{c6}=121.6$ V, mentre $V_{c2}=121.6$ V e $V_{c1}=124.4$ V.

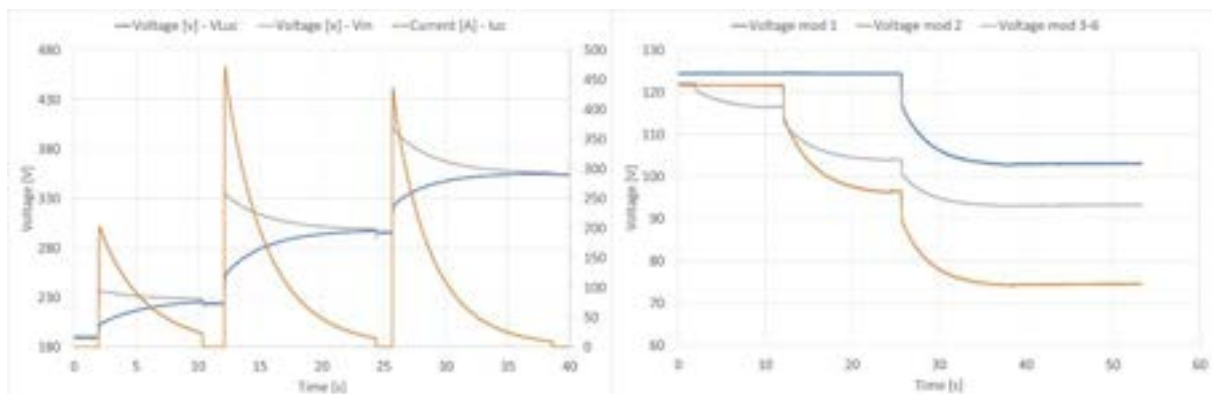


Figura 16. Ricarica con Tensione iniziale dei Supercondensatori a bordo di 190 V

Alla chiusura di RI5 scorre una corrente che arriva ad un valore massimo di $I_{st1}=202$ A e che viene interrotta quando il suo valore scende sotto i 10 A, dopo un tempo $\Delta T_1=8.44$ s, si osserva che dal momento che la

corrente viene interrotta aprendo RI5 ad un valore non nullo le tensioni tra il banco di terra e quello di bordo non sono equilibrate, permane infatti tra di esse una differenza di $\Delta V=10.2\text{ V}$

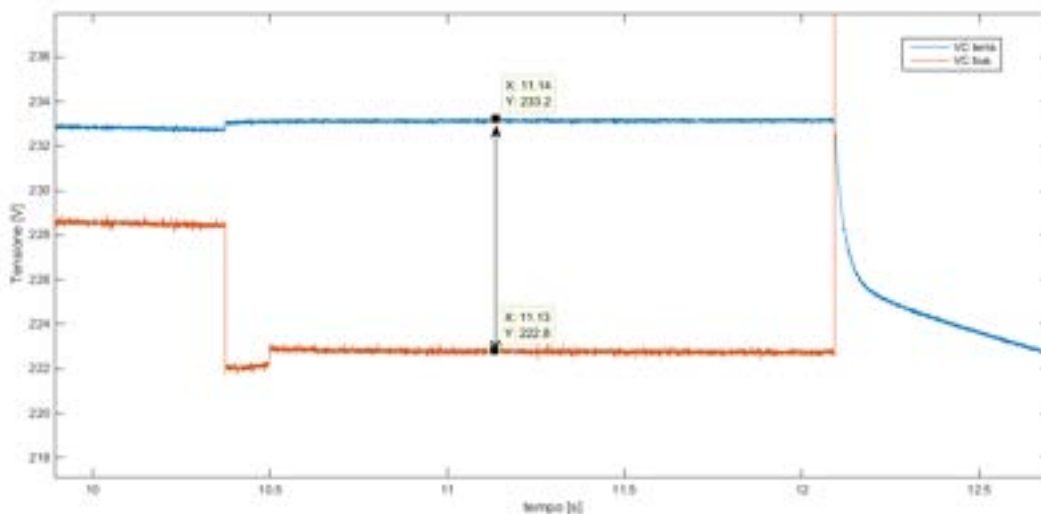


Figura 17. Differenza di tensione tra il banco di terra e quello del Bus allo step 1

In modo analogo si chiude RI3 e si ha la seconda scarica, dove la corrente arriva al suo valore massimo di $I_{st2}=472\text{ A}$, la durata di questa fase è $\Delta T2=12.3\text{ s}$. La successiva terza fase dura $\Delta T3=13.1\text{ s}$ e la corrente di picco raggiunge un valore di $I_{st3}=435\text{ A}$: togliendo le pause a corrente nulla la durata effettiva della prova risulta essere di $Tric=8.44+12.3+13.1= 33.84\text{ s}$ e la differenza di tensione tra banco a terra e banco sul bus inferiore al Volt, il valore finale della tensione dei due banchi è di $V=355.0\text{ V}$.

Gli andamenti di corrente e tensione riscontrati durante lo svolgimento della prova sono compatibili con quelli previsti dalla trattazione teorica [1] e dalle simulazioni [4], il dimensionamento dell'induttanza e della resistenza ad essa associata limita i valori di picco della corrente a 472 A , il tempo totale di ricarica, ottenuto eliminando le pause dalla prova è pari a $Tric =33.84\text{ s}$, si osservi come la corrente massima di lavoro dei supercondensatori sia di 1900 A e quindi il componente lavora ampiamente in sicurezza.

Come ultima osservazione si riporta in figura 18 l'andamento delle tensioni dei due banchi in parallelo: la loro differenza rimane costante durante tutta la prova. Come detto il fatto che le tensioni non si squilibrano è indice della omogeneità delle caratteristiche dei moduli ed anche della mancanza di squilibri interni nei componenti elementari che li costituiscono anche in presenza di correnti fortemente impulsive come quelle considerate.

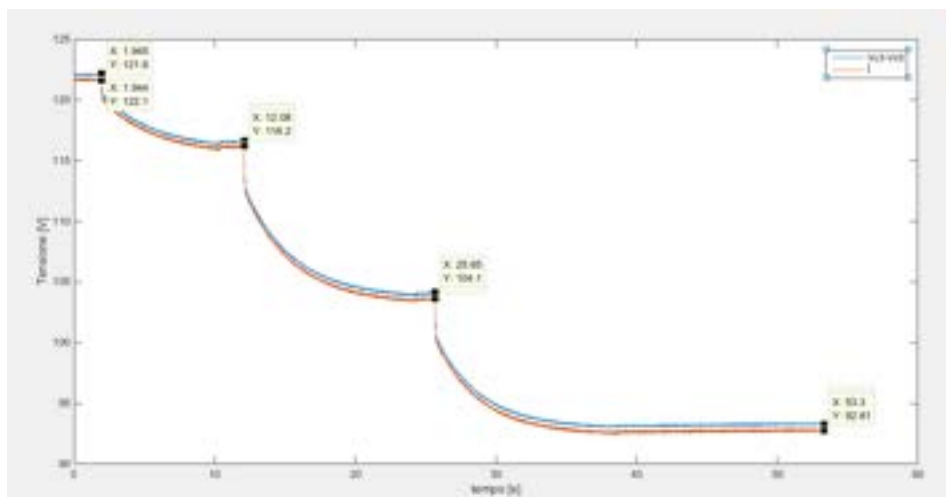


Figura 18. Andamento delle tensioni dei condensatori di bordo bus

2.5.2 Prova a tensione $V_{bus}=210\text{ V}$

La seconda prova viene eseguita partendo da una tensione iniziale degli SC di bordo pari a $V_b=210.0\text{ V}$,

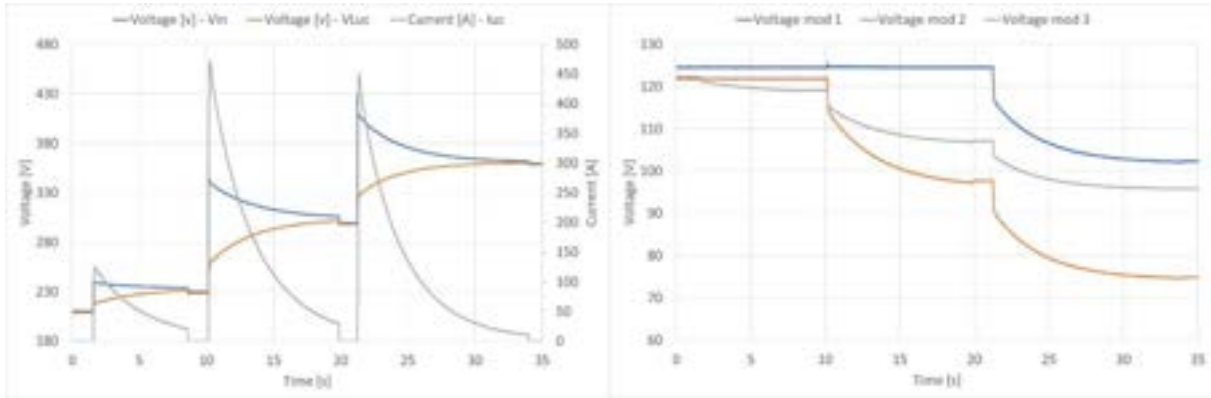


Figura 4. Ricarica con Tensione iniziale dei Supercondensatori a bordo di 210 V

i tempi di durata delle tre fasi sono rispettivamente di $\Delta T_1=14.4\text{ s}$, $\Delta T_2=14.2\text{ s}$ e $\Delta T_3=17.8\text{ s}$, per una durata totale della prova di $T_{ric}=46.4\text{ s}$, i valori di picco della corrente sono rispettivamente di $I_{st1}=201\text{ A}$, $I_{st2}=456\text{ A}$ e $I_{st3}=432\text{ A}$, le tensioni di equilibrio di $V_{bst1}=227.8\text{ V}$, $V_{bst2}=297.8\text{ V}$ e la finale di $V_{bst3}=353.4\text{ V}$.

2.5.3 Prova a tensione $V_{bus}=230\text{ V}$

Si è successivamente impostata una prova in cui la tensione residua sia paragonabile a quella del primo banco di SC per verificare il comportamento del sistema anche in questa condizione, si è posto $V_b=230.0\text{ V}$, mentre la tensione del primo banco è stata posta a $V_{c3}=V_{c5}=122.1\text{ V}$ e $V_{c4}=V_{c6}=121.5\text{ V}$, per le altre si ha $V_{c2}=121.1\text{ V}$ e $V_{c1}=124.3\text{ V}$ la prova viene sempre eseguita in tre step.

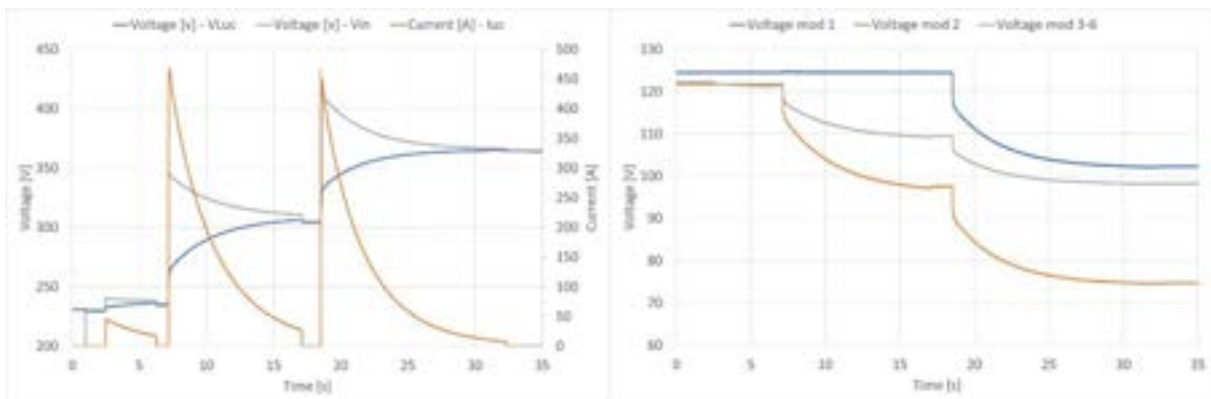


Figura 20. Ricarica con Tensione iniziale dei Supercondensatori a bordo di 230 V

Nel primo step la massima corrente è limitata al valore $I_{st1}=42\text{ A}$, la durata dello step è $\Delta T_1=4.2\text{ s}$ ed V_b si porta al valore $V_{bst1}=234\text{ V}$, nello step successivo si registra un picco di corrente di $I_{st2}=465\text{ A}$ mentre V_b sale a $V_{bst2}=303.4\text{ V}$, al terzo step la tensione finale è di $V_{bst3}=364.0\text{ V}$ mentre il picco di corrente è di $I_{st3}=445\text{ A}$.

2.5.4 Prova a tensione $V_{bus}=250\text{ V}$

Per completezza di indagine viene eseguita anche una prova a due step, ovvero partendo da una condizione in cui $V_b \geq 250.0\text{ V}$, nel caso in esame si setta $V_{c3}=V_{c4}=V_{c5}=V_{c6}=122.0\text{ V}$ e $V_b=248.0\text{ V}$, di conseguenza lo step 1 non viene eseguito.

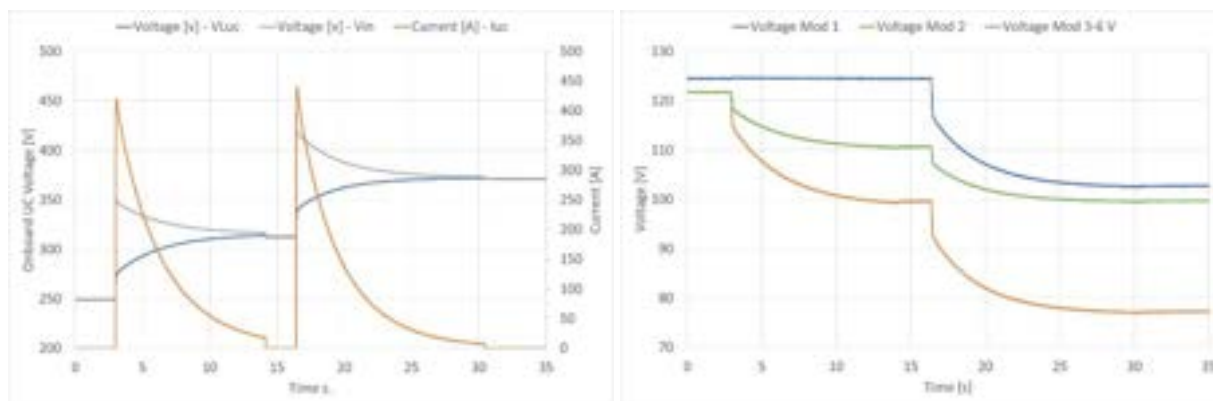


Figura 21 Ricarica in due step con $V_b=250\text{ V}$

Le figure mostrano gli andamenti delle tensioni e della corrente durante la prova, allo step 2 la corrente raggiunge il valore di picco di $I_{st2}=420\text{ A}$, allo step 3 di $I_{st3}=438\text{ A}$, la tensione di equilibrio finale è di $V_{bst3}=376.5\text{ V}$.

2.5.5 Supercondensatori a bordo

Finora si è posta l'attenzione sui supercondensatori lato terra, si vuole ora indagare sull'effetto dei picchi di corrente rispetto ai condensatori lato Bus, che sono i più sollecitati: la figura 22 mostra l'andamento delle tensioni dei tre moduli durante la prova di ricarica a $V_b=190.0\text{ V}$.

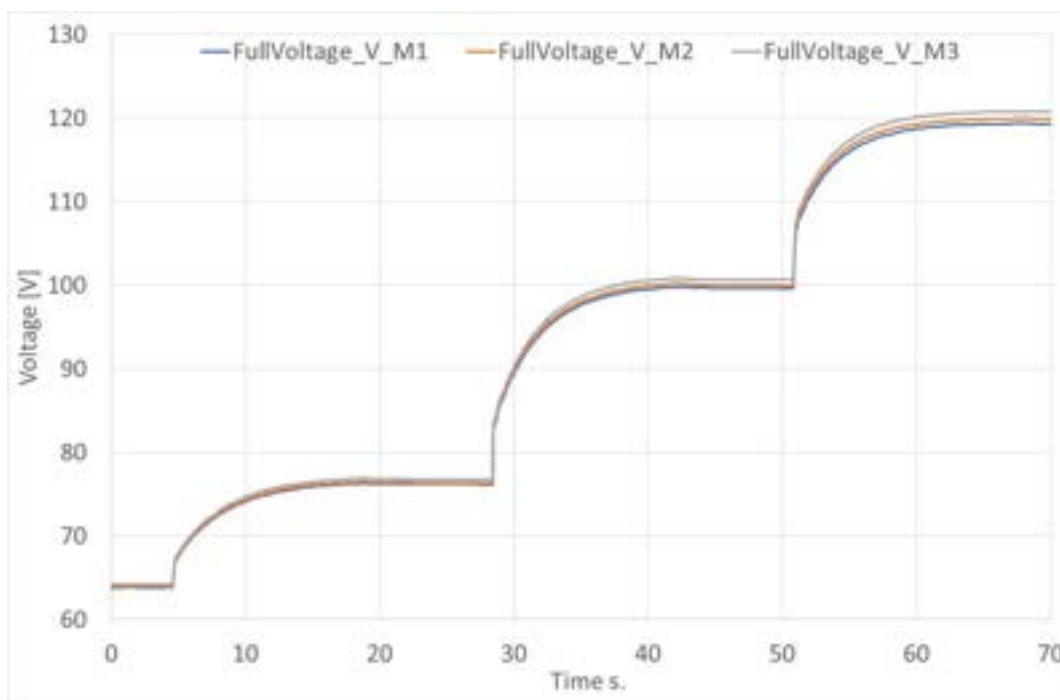


Figura 22. Andamento della Tensione nei supercondensatori di bordo

Durante la prova e fino alla fine lo squilibrio delle tensioni è contenuto, paragonabile all'errore di misura sulle stesse. E' possibile, tramite le informazioni inviate dal sistema di gestione dei moduli, indagare su eventuali squilibri di tensione che si possono verificare tra gli elementi che li costituiscono: la figura 23 mostra gli andamenti di tensione registrati sulle celle elementari che costituiscono il modulo 1 dell'accumulo di bordo.

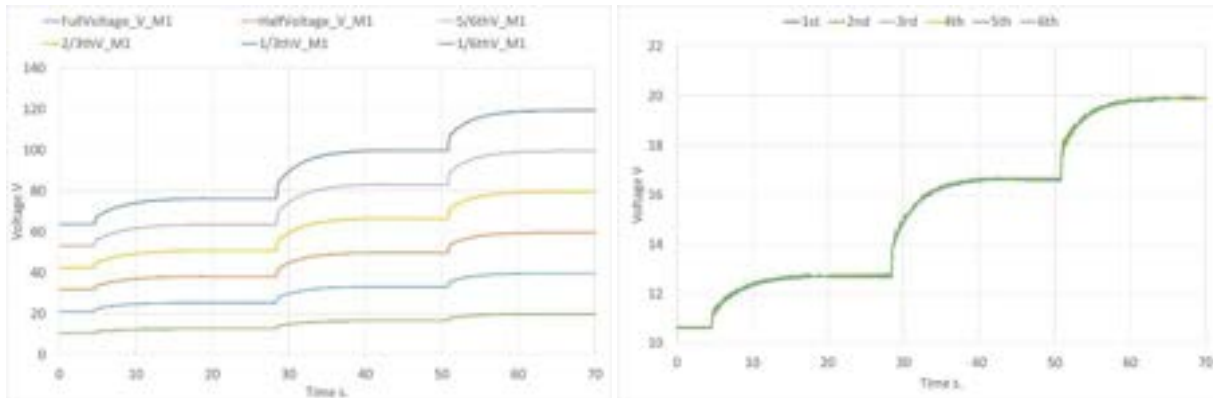


Figura 5. Valori di tensione interni al modulo 1

Durante la prova non si hanno problemi di squilibrio interno, e questo risultato è stato confermato nei test successivi, sempre durante le prove non si sono registrate variazioni significative delle temperature.

Per approfondire il tema è stato effettuato con il ciclatore un test di lunga durata nel quale gli SC sono stati sottoposti ad impulsi di corrente [3].

Durante le prove si è avuto un rendimento medio della ricarica, inteso come il rapporto fra l'energia uscita dai supercondensatori di terra e l'energia entrata nei supercondensatori a bordo del mezzo del 78% , mentre il rapporto fra l'energia uscita dai supercondensatori di terra e l'energia a valle dell'induttanza +resistenza è di circa l'83%. Per migliorare il rendimento si può operare in due modi, uno è non interrompere la corrente di linea quando risulta minore o uguale a 10 A, favorendo così il trasferimento della carica residua ad alta efficienza, l'altro è ridurre la resistenza posta in serie all'induttanza: la resistenza serie è stata introdotta per limitare la corrente che circola nel circuito, ma in via precauzionale è stata sovradimensionata, diminuendo il suo valore il rendimento effettivo ottenibile dal sistema può essere superiore a quello riscontrato in queste prove ed i tempi di prova risulteranno minori, occorre però trovare il giusto compromesso tra le prestazioni volute ed il costo dei componenti (teleruttori, interruttori) che verrebbero attraversati da correnti superiori a quelle considerate in questa prova.

2.6 Altre considerazioni

Le prove effettuate hanno permesso di testare la funzionalità del prototipo del sistema di ricarica flash, di seguito si vogliono fare delle considerazioni più generali su possibili ottimizzazioni del suo utilizzo e su possibili varianti della struttura del sistema proposto.

2.6.1 Possibili scenari di ricarica

Grazie ad un sistema di accumulo molto più piccolo di quello installato dal costruttore il veicolo pesa all'incirca 800 kg in meno rispetto alla versione originale, passando quindi da 4300 kg a vuoto fino a 3500 kg, di conseguenza a parità di passeggeri il peso massimo trasportato passerà quindi da 6300 kg a 5600 kg e l'autonomia su un circuito di riferimento, in questo caso interno al centro di ricerche Enea/Casaccia, potrà variare da 320 Wh/km fino a 450 Wh/km, in funzione appunto del numero di passeggeri trasportati (Figura 24).

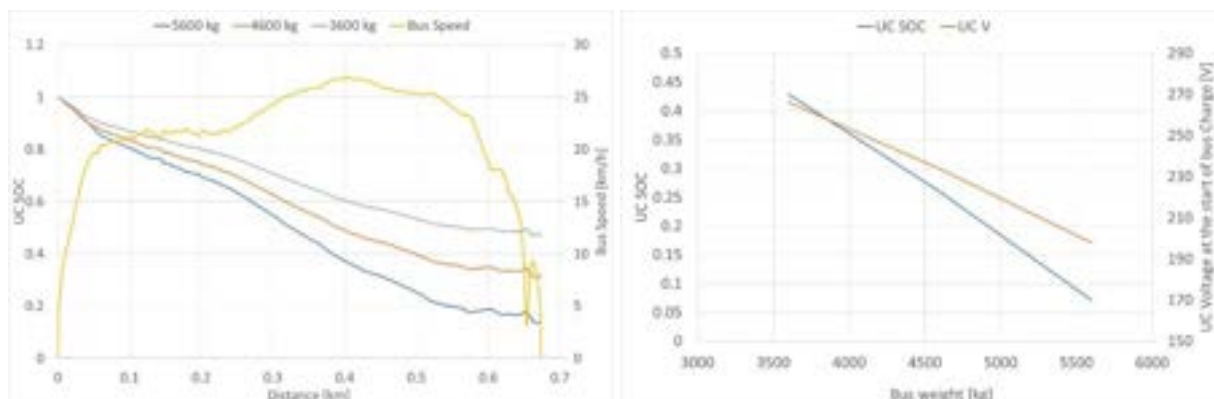


Figura 24. profilo di velocità in esame e variazione dello stato di carica e della Tensione dei supercondensatori in funzione del peso dell’autobus.

Quindi il bus potrà presentarsi alla fermata con una tensione residua dei condensatori variabile di caso in caso.

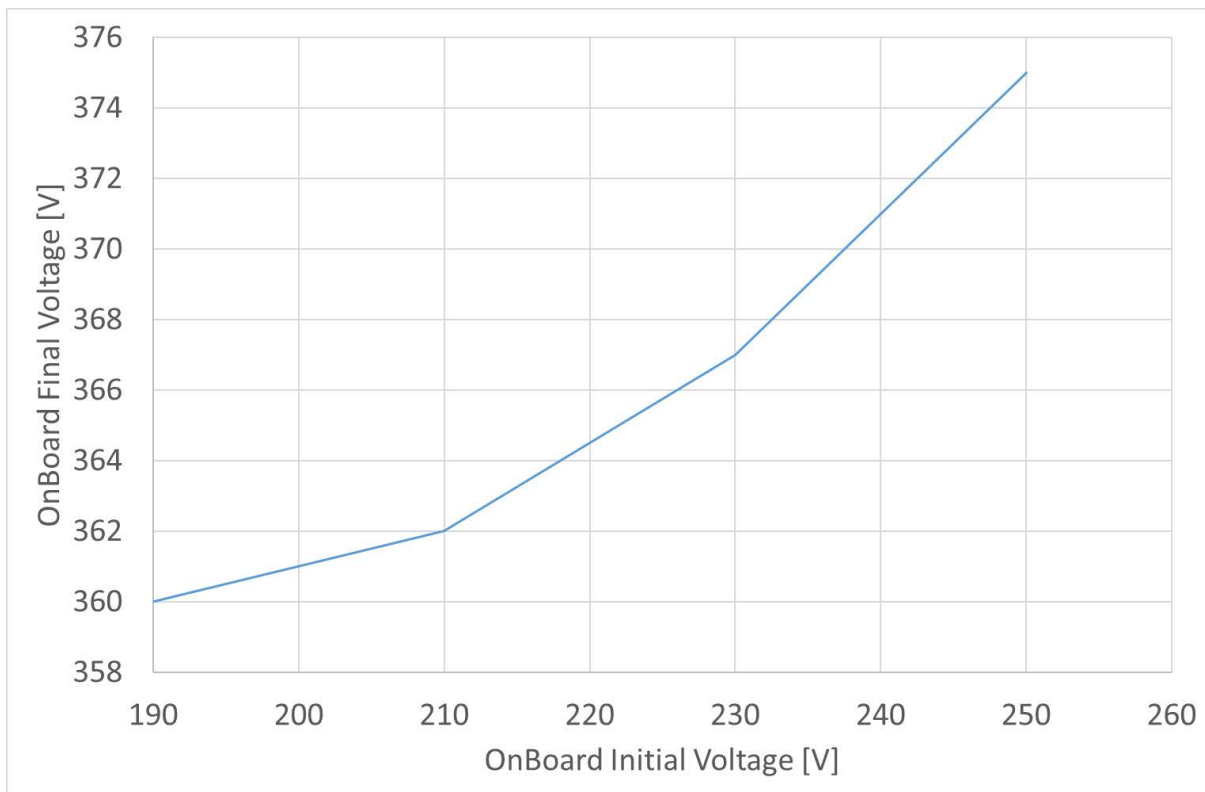


Figura 6. Tensione Finale dei Supercondensatori al variare della tensione iniziale prima della ricarica

Dalle prove effettuate (Figura 6) si nota come varia il valore finale della tensione di bordo in funzione di quello iniziale della ricarica: esso passa da $V_{bst3}=360$ V nel caso in cui l’autobus si presenti con i supercondensatori totalmente scarichi (190 V) fino a $V_{bst3}=375$ V nel caso in cui la V_b iniziale sia pari a $V_b=250$ V.

Il valore di $V_{bst3}=375$ V è da considerarsi come limite in quanto costituisce il valore nominale di tensione dei supercondensatori, di conseguenza occorre evitare che il mezzo si presenti alla stazione di ricarica con una tensione residua troppo alta, per fare questo si fanno interagire i condensatori e la batteria di bordo: se il carico stradale è limitato i condensatori verranno utilizzati anche per l’alimentazione degli ausiliari, in caso contrario le batterie parteciperanno alla fase di trazione.

2.6.2 Load leveling e interazione bidirezionale con la rete primaria

Il principale vantaggio dell'utilizzo dei supercondensatori a terra risiede nel fatto che essi permettono di disaccoppiare la rete di ricarica primaria dal Bus, ovvero di limitare la potenza richiesta alla rete primaria da parte della linea di trasporto.

La figura 26 mostra l'andamento della potenza assorbita dagli SC di bordo durante la fase di ricarica con tensione iniziale di $V_b=190$ V, nella elaborazione è mostrato il tempo effettivo dell'operazione, non quello della prova di laboratorio.

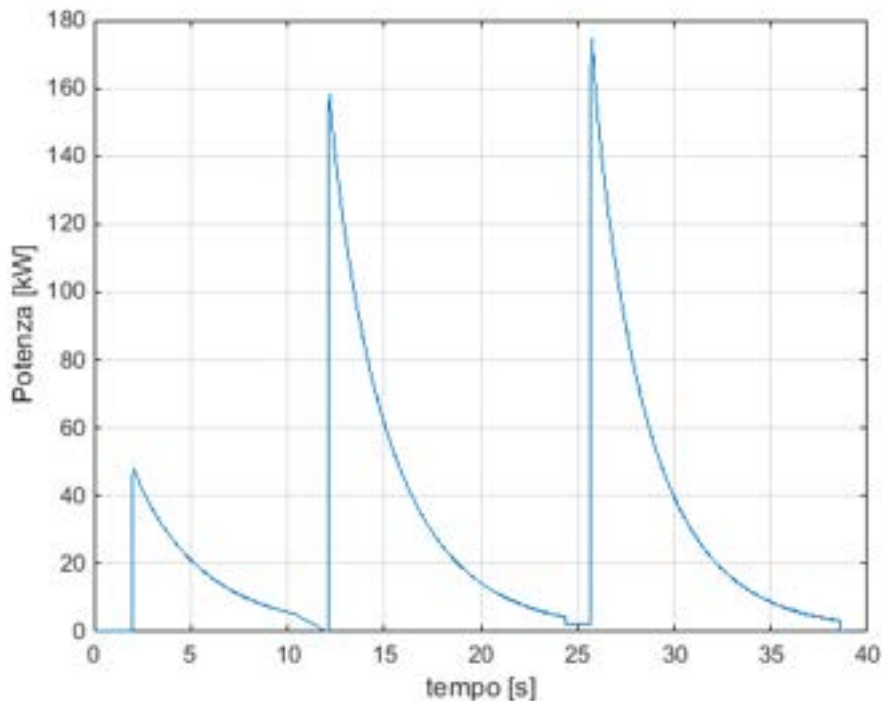


Figura 7 Potenza assorbita dagli SC di bordo nella ricarica a $V_b=190$ V

La potenza di punta erogata dalla stazione ed assorbita dagli SC di bordo risulta essere $P=175$ kW, si noti che operando in un solo step essa sarebbe stata molto maggiore a fronte di un rendimento più basso [1].

Nel tempo di prova viene trasferita una energia di $E_{ric}=324$ Wh, la potenza media che sarebbe stata impegnata dalla rete per alimentare direttamente gli SC risulta essere di $P_{rete}=E_{ric}/T_{prova}=31.79$ kW, considerando un rendimento complessivo di 0.8 per tutta la catena che va dalla trifase alternata ai supercondensatori di bordo essa diventa di $P_{rete}=39.7$ kW.

La presenza dei condensatori disaccoppia la rete dal veicolo e permette di limitare l'impatto di potenza della stazione di ricarica sulla rete stessa: per esempio supponendo di ricaricare i condensatori di terra in 3 minuti la potenza di ricarica richiesta per l'operazione è di $P_{rich}=8$ kW, che divengono 6 kW in 4' e così via.

Il sistema di ricarica così come è presentato quindi disaccoppia la rete dal Bus e permette di evitare l'adozione di convertitori elettronici di potenza.

Modificando la struttura della stazione di ricarica ed introducendo invece dei convertitori elettronici bidirezionali come illustrato in figura 27:

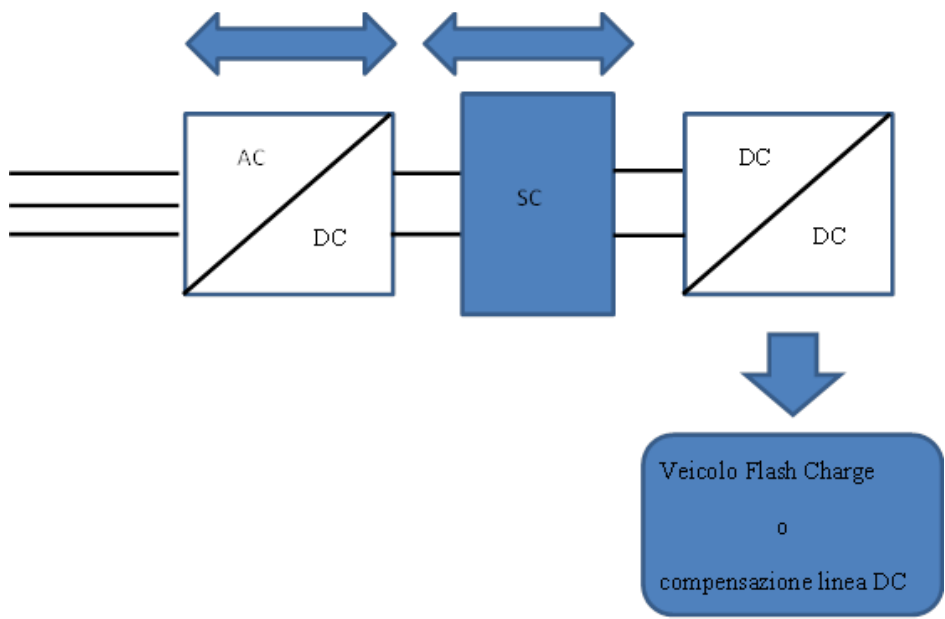


Figura 27. Interfacciamento con una linea in AC ed una DC

È possibile interagire con la rete primaria in AC, e quindi utilizzare i condensatori per compensare eventuali picchi di potenza richiesti alla stessa, operando per esempio una regolazione di frequenza.

Se si vuole mantenere bassa la potenza dell’inverter della singola stazione di ricarica, considerando l’insieme della rete di ricarica Flash si potrebbe comunque studiare una gestione organica delle sottostazioni che permetta di coordinarle e farle intervenire insieme a supporto della rete primaria.

In figura 27 è indicata la compensazione della linea DC: una linea DC ad alta potenza potrebbe essere quella che alimenta dei filobus e che in questo modo potrebbe vedere la sua integrazione con una rete Flash Charge. Per esemplificare quanto detto si consideri la registrazione della potenza richiesta al pantografo da un filobus A 330T della Van Hool, di 12 metri, registrata a Cagliari durante un esercizio a velocità media di 25 km/h riportata in figura 28.

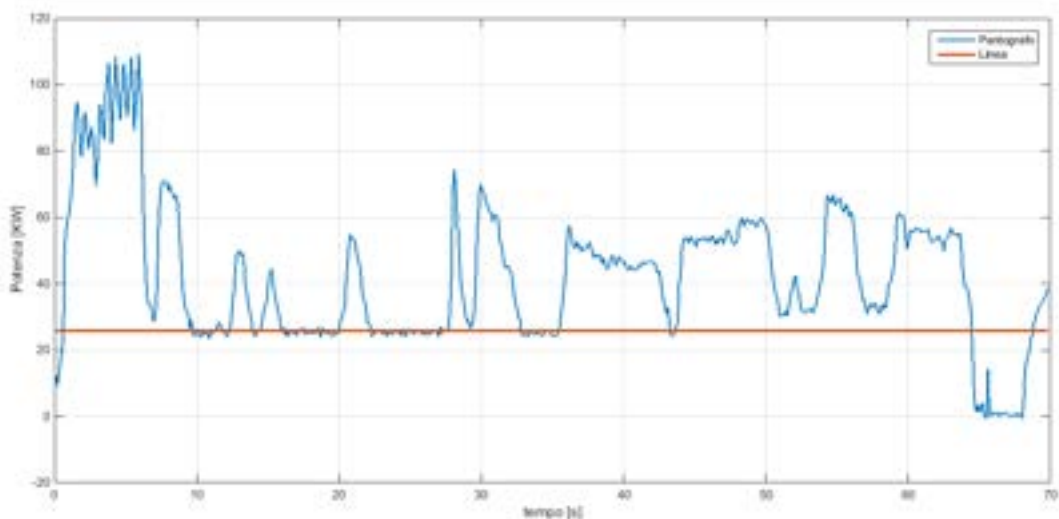


Figura 28. Filobus Van Hool A 330T Potenza assorbita dalla rete in continua

Nella figura è indicata la potenza richiesta dal pantografo, che coincide con quella della rete primaria: la linea rossa a potenza costante indica l’effetto sulla rete di una possibile compensazione dei picchi di potenza che potrebbe essere effettuata con l’inserzione dei condensatori a terra, con lo schema di figura

27, in questo caso quindi la presenza dei supercondensatori potrebbe servire a due scopi, livellare la potenza della rete di alimentazione di una linea di filobus e alimentare una linea separata di Bus equipaggiati per la flash charge.

2.6.3 Gestione intelligente delle stazioni di ricarica

Lo studio effettuato fino ad ora ha preso in considerazione la sola interazione tra un bus dotato di un accumulo misto ed una stazione di ricarica flash a sua volta equipaggiata con propri supercondensatori posti a terra, come si è visto allo stato attuale è stata svolta tutta l'attività preliminare che ha portato alla realizzazione sia della stazione di ricarica che del bus e alla loro sperimentazione su strada.

E' opportuno però considerare anche una estensione del lavoro che comprenda la gestione globale della rete di ricarica nel suo insieme, ovvero del complesso costituito dai bus che passano in una zona e l'insieme delle stazioni di ricarica lì presenti. La figura 29 illustra quanto detto.

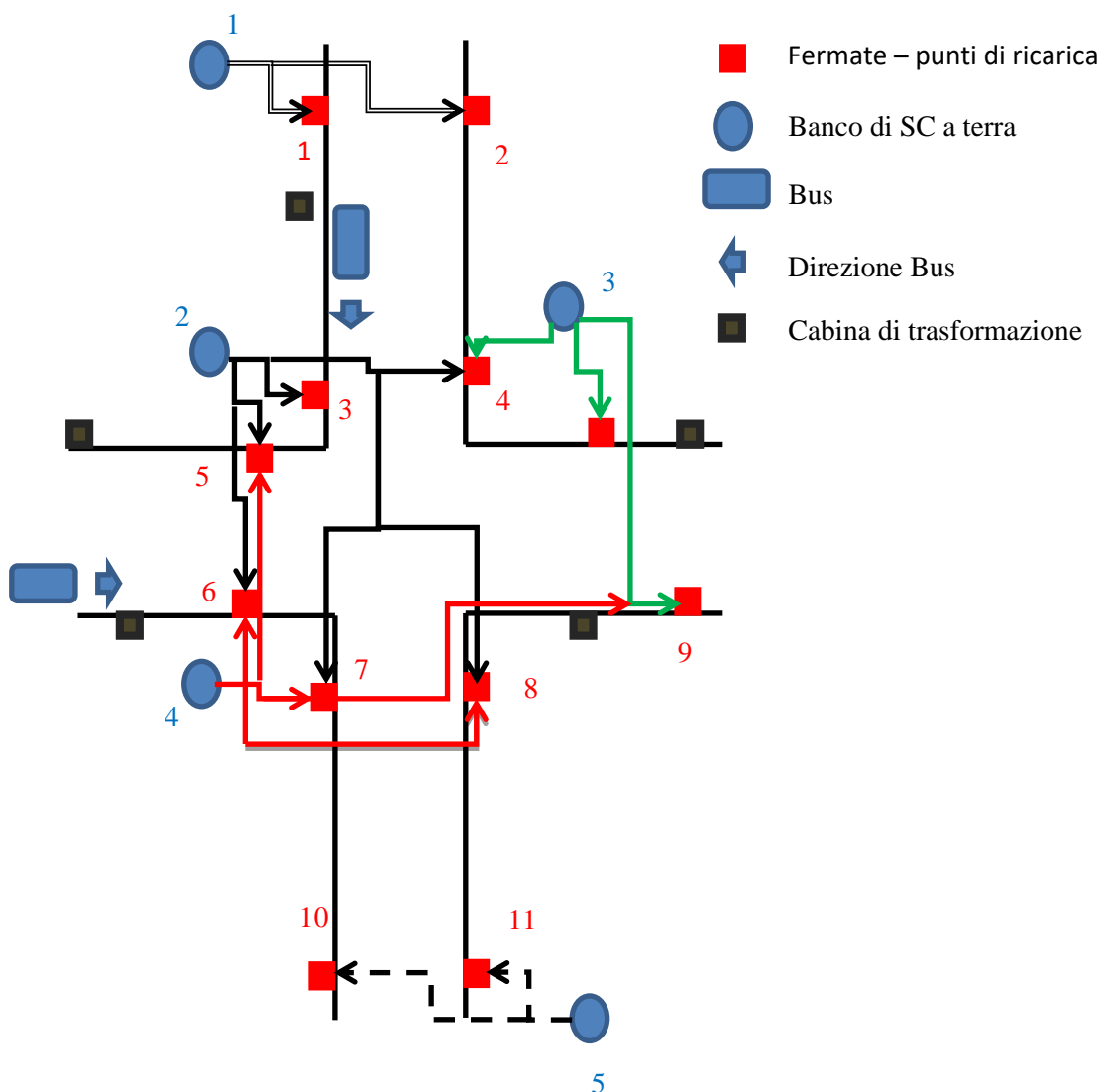


Figura 29. Rete di ricarica Flash

Nella figura si vede come sia possibile interconnettere un banco di SC di terra con più punti di ricarica, e quindi installare, a seconda della frequenza di passaggio dei mezzi e della potenza che si vuole richiedere alla rete primaria di alimentazione, un numero minore o maggiore di SC in relazione alle fermate dei Bus ed ai tempi di attesa nella fermata.

In base alla tabella oraria dei Bus è possibile gestire la potenza di ricarica dei convertitori dei condensatori a terra per ottimizzarla rispetto alla richiesta alla rete primaria di alimentazione. Questo tema sarà oggetto di un approfondimento in uno studio dedicato.

3 Conclusioni

E' stata presentata la sperimentazione preliminare di un sistema di ricarica Flash per un veicolo di trasporto pubblico caratterizzato dal presentare un accumulo misto costituito da batterie e supercondensatori. Il risultato delle prove ha confermato lo studio teorico, modellistico e sperimentale che è servito a portare al dimensionamento e alla realizzazione del sistema in scala 1:1. In questo lavoro in particolare ci si è concentrati sulla parte di test che riguarda la sezione della stazione che ricarica i supercondensatori, evidenziando come la ricarica avvenga ad alto rendimento ed in condizioni di sicurezza rispetto alle prestazioni dei componenti, il test sulla gestione dell'accumulo misto di bordo è invece presentato in [3]. Nella parte finale della relazione sono stati forniti suggerimenti per future evoluzioni del lavoro e per strutture e/o impieghi alternativi del sistema di accumulo misto.

4 Riferimenti bibliografici

1. F. Ortenzi, M. Pasquali, G. Pedè, S. Costà, F. Sacco "Sperimentazione in scala ridotta di un sistema di ricarica ibrido per travaso di supercondensatori per TPL" report RDS par 2016
2. A. Lidozzi, L. Bigarelli, V. Sabatini "Progettazione di un prototipo di sistema di ricarica "Flash" per travaso tra supercondensatori per TPL collegato alla rete elettrica" report RDS par 2017
3. A. Genovese, F. Ortenzi, M. Pasquali, V. Sglavo, M. Pierini, A. Alessandrini, L. Berzi, L. Pugi, R. Barbieri, F. Cignini "Prova su sistema di accumulo misto per bus con ricarica flash" report RDS par 2017
4. A. Lidozzi, M. Di Benedetto, M. Di Giacomo, V. Sabatini "Studio di fattibilità di un sistema di ricarica "Flash" per Trasporto Pubblico Urbano (TPL) con trasferimento di energia tra supercondensatori: progettazione e dimensionamento di un sistema in scala ridotta ma significativa ed in scala reale collegato alla rete elettrica di illuminazione pubblica" Report RDS par 2016
5. Fernando Ortenzi, Giovanni Pedè, Silvia Orchi "Analisi delle prestazioni di un sistema di ricarica ibrido per TPL", report RDS/2015
6. F. Ortenzi, S. Orchi, G. Pedè, Technical and economical evaluation of hybrid flash-charging stations for electric public transport, Industrial Technology (ICIT), 2017 IEEE International Conference on, 549-554
7. Fernando Ortenzi, Silvia Orchi, Pedè Giovanni, Technical And Economical Evaluation Of Hybrid Fast-Charging Stations For Electric Public Transport, 2017, Evs30 - Electric Vehicle Symposium & Exhibition
8. Di Rienzo, F. Baronti, F. Vellucci, F. Cignini, F. Ortenzi, G. Pedè, R. Roncella, and R. Saletti, Experimental Analysis of an Electric Minibus with Small Battery and Fast Charge Policy, ESARS-ITEC 2016
9. M. Conte, A. Genovese, F. Ortenzi, F. Vellucci, Hybrid battery-supercapacitor storage for an electric forklift: a life-cycle cost assessment, Journal of Applied Electrochemistry 44 (4), 523-532