



Ricerca di Sistema elettrico

Sperimentazione in scala ridotta di un sistema di ricarica ibrido per travaso di supercondensatori per TPL

F. Ortenzi, M. Pasquali, G. Pede, S. Constà, F. Sacco

SPERIMENTAZIONE IN SCALA RIDOTTA DI UN SISTEMA DI RICARICA IBRIDO PER TRAVASO DI SUPERCONDENSATORI PER TPL

F. Orteni, M. Pasquali, G. Pede, S. Constà, F. Sacco (ENEA)

Settembre 2017

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2016

Area: Trasmissione e distribuzione dell'energia elettrica

Progetto: Sistemi di accumulo di energia per il sistema elettrico

Obiettivo: B.1 Sperimentazione su un prototipo da banco in scala di un sistema di ricarica "flash" per TPL

Responsabile del Progetto: Pierpaolo Prosini, ENEA

Indice

SOMMARIO.....	5
1 INTRODUZIONE.....	6
2 DESCRIZIONE DEL SISTEMA DI RICARICA	7
3 L'APPARATO SPERIMENTALE	9
3.1 SISTEMA DI BORDO	10
3.2 SISTEMA A TERRA (STAZIONE DI RICARICA)	11
3.3 INDUTTANZA	13
3.4 STRUMENTAZIONE DI MISURA	14
4 RISULTATI DELLE PROVE.....	16
4.1 CONFIGURAZIONE 1 CON 24 V INIZIALE A BORDO E INDUTTANZA 8 MH	16
4.2 CONFIGURAZIONE 1 CON 24 V INIZIALE A BORDO E INDUTTANZA 4 MH	18
4.3 CONFIGURAZIONE 2 CON 24V INIZIALE A BORDO E INDUTTANZA 4 MH	19
4.4 CONFIGURAZIONE 3 CON 24V INIZIALE A BORDO E INDUTTANZA 4 MH	19
4.5 CONFIGURAZIONE 3 CON 36V INIZIALE A BORDO E INDUTTANZA 4 MH	19
4.6 CONFIGURAZIONE 3 CON 42V INIZIALE A BORDO E INDUTTANZA 4 MH	20
4.7 ANALISI DEI RISULTATI SPERIMENTALI	20
5 IL SIMULATORE	22
5.1 IMPOSTAZIONE DEL SIMULATORE	22
5.2 IMPLEMENTAZIONE IN SIMULINK	24
5.3 VALIDAZIONE DEL SIMULATORE	25
5.3.1 <i>Configurazione 1 ed intera induttanza</i>	26
5.3.2 <i>Configurazione 1 metà induttanza</i>	28
5.3.3 <i>Sensibilità del sistema</i>	29
5.3.4 <i>Ricarica in un solo step</i>	31
6 CONFIGURAZIONI E STRATEGIE DI RICARICA	32
7 CONCLUSIONI.....	34
8 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	35

Sommario

Il lavoro ha affrontato il tema della ricarica veloce di un veicolo elettrico, alimentato da un sistema di supercondensatori in grado di accettare cariche veloci di altissima potenza, ma di una quantità di energia limitata. Il sistema di ricarica di terra è anche esso costituito da un accumulo realizzato con i supercondensatori: al passaggio del veicolo questi si scaricano in breve tempo, decine di secondi, per poi essere ricaricati a bassa potenza ed alto rendimento in un tempo più lungo (dell'ordine dei minuti).

Per approfondire la fattibilità dell'idea sono state realizzate una stazione prova da laboratorio, costituita da un sistema reale, in scala ridotta ma significativa rispetto a quella reale, ed un simulatore in ambiente Matlab/Simulink e si è poi definita la strategia ottimale di ricarica da utilizzare in funzione dell'energia residua nell'accumulo di bordo.

Il lavoro ha mostrato la fattibilità dell'idea, che è interessante in quanto un sistema simile permette di alimentare veicoli come tram o bus elettrici senza gravare sulla potenza di rete.

I costi di realizzazione sono contenuti e l'affidabilità è molto alta, come anche il rendimento di trasmissione dell'energia.

Il prosieguo di questa attività dovrebbe essere la realizzazione del sistema reale in scala 1:1, con un dimostrativo o di tipo stazionario (i soli condensatori di bordo del veicolo) o costituito dalla stazione ed un veicolo reale.

1 Introduzione

Il presente lavoro presenta la sperimentazione di un sistema di ricarica veloce per un veicolo elettrico di tipo bus o tram con ricarica ad ogni fermata o ad un intervallo predefinito di poche fermate. Il veicolo viene ricaricato in poco tempo durante la sosta, eseguendo una ricarica veloce ad alta potenza: il sistema proposto è innovativo e non richiede particolari controlli di tipo elettronico.

Il tema della ricarica veloce, a bassa energia ma alta potenza, è stato introdotto da Enea nell'ambito della ricerca di sistema [1][2][3] ed è collegato allo sviluppo di sistemi di trazione elettrica in cui nell'accumulo a bordo siano presenti dei supercondensatori, elementi che presentano una bassa energia specifica, ma una altissima potenza specifica, una grande affidabilità ed una lunga durata di vita.

In [1] [2][3] è stato eseguito uno studio preliminare per il dimensionamento di un sistema di ricarica di un piccolo bus urbano, in questo studio se ne presenta una realizzazione in scala ridotta, ma rappresentativa del comportamento di quello reale. Il concetto della ricarica ad alta potenza per sistemi di trasporto di questo tipo consiste nel trasferire al sistema di accumulo di bordo la sola energia necessaria per arrivare alla fermata successiva, e di farlo con potenze altissime e tempi brevi, dell'ordine della decina di secondi o poco più, compatibili con la discesa e la salita dei passeggeri alla fermata;

Per questo tipo di applicazioni sono necessari sistemi di accumulo di bordo con una elevata potenza specifica, mentre la capacità non risulta essere un vincolo importante, in quanto le distanze da percorrere sono dell'ordine delle centinaia di metri e l'energia necessaria per percorrerle risulta essere dell'ordine di 1 kWh o anche meno, da qui nasce la scelta dei supercondensatori.

Il sistema che ci si propone di studiare utilizza dei supercondensatori anche nel lato 'terra': l'idea è che la rete elettrica primaria carichi in bassa potenza ed alta efficienza i condensatori lato terra e che questi successivamente si scarichino, ad alta potenza su quelli di bordo, senza che la carica di quest'ultimi richieda potenza alla rete primaria.

Il vantaggio di questa soluzione è evidente, in quanto si evita di dover potenziare la rete di alimentazione e si opera comunque ad alta efficienza.

Lo studio presenta la sperimentazione del sistema, la costruzione di un suo simulatore numerico e l'elaborazione di strategie di gestione che ne aumentano le prestazioni.

2 Descrizione del sistema di ricarica

Per introdurre il concetto che si vuole seguire è possibile fare riferimento alla figura 1

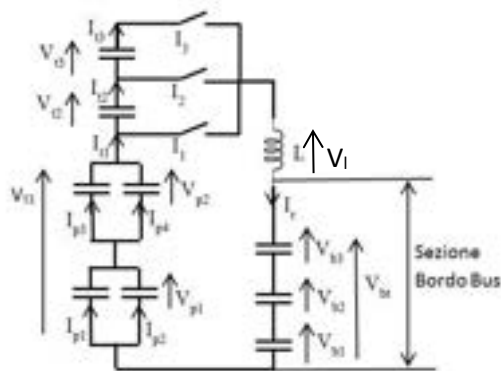


Figura 1. Configurazione del sistema di ricarica CF1

In Figura 1 è rappresentata una possibile configurazione del sistema di ricarica: a terra sono presenti tre banchi di supercondensatori (individuati dal pedice t e da quello p per le coppie poste in parallelo), che vengono caricati alla loro tensione nominale a bassa potenza dalla rete elettrica, che successivamente si separa dal sistema, mentre a bordo sono presenti tre banchi di supercondensatori in serie che alimentano il veicolo dandogli l'energia necessaria per muoversi tra le due stazioni di ricarica. La parte di circuito installata a terra presenta anche una induttanza di spianamento posta in serie agli SC, scopo dell'induttanza è limitare i valori massimi di corrente che si hanno alla chiusura degli interruttori.

La ricarica avviene "per travaso" in tre fasi successive, con modalità analoghe a quelle utilizzate nel riempimento di bombole ad alta pressione.

Alla chiusura dell'interruttore I_1 scorre una corrente di ricarica i_r , che si annulla quando le tensioni V_{t1} e V_{bt} divengono uguali tra di loro e pari alla tensione di equilibrio V_{e1} .

Se C_{t1} è la capacità equivalente del primo banco di SC a terra e C_b quella del banco di SC di bordo, considerando la conservazione della carica elettrica ed indicando con il pedice i le tensioni iniziali del sistema si avrà:

$$(1) \quad C_{t1}(V_{t1i} - V_{e1}) = C_b(V_{e1} - V_{bi})$$

Se si apre I_1 e si chiude I_2 si introduce il banco t2 e si avrà quindi una nuova circolazione di corrente, fino ad una tensione di equilibrio V_{e2} che è calcolabile in modo simile al precedente, alla apertura di I_2 e chiusura di I_3 si raggiungerà la tensione finale di carica dei condensatori di bordo: ad ogni chiusura di interruttore si registra uno scorrimento di corrente impulsiva con il relativo picco.

Il sistema proposto quindi esegue la ricarica dei condensatori di bordo in tre passi ed adotta una induttanza di spianamento della corrente: se si fosse chiuso il solo interruttore I_3 la tensione di ricarica sarebbe stata pari alla somma delle tensioni dei singoli banchi a terra, ed il picco di corrente risultante sarebbe stato molto maggiore dei tre corrispondenti alla procedura descritta precedentemente, escludendo l'induttanza il valore massimo della corrente sarebbe salito ancora.

Oltre alla configurazione proposta in figura 1, di seguito sono presentate altre combinazioni serie/parallelo dei supercondensatori a terra (vedi Figura 2):

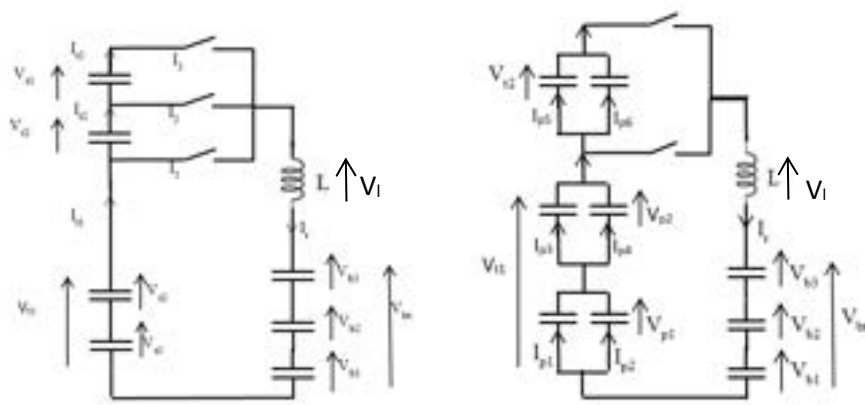


Figura 2. Configurazioni alternative del sistema di ricarica

Lo studio è stato effettuato operando sulla base di un dimensionamento preliminare del sistema [1] [2][3], si è realizzato un apparato sperimentale in scala ridotta rispetto a quello di riferimento, ma la scala è comunque significativa rispetto a quella reale e permette quindi di eseguire un lavoro di indagine sperimentale, con il sistema sono stati eseguiti test di laboratorio.

3 L'Apparato sperimentale

Per il lavoro sperimentale sono stati adottati SC della Maxwell, modello BMOD0250 con le seguenti specifiche (Figura 3):

PRODUCT SPECIFICATIONS		
ELECTRICAL	BMOD0110	BMOD0250
Rated Capacitance ¹	110 F	250 F
Minimum Capacitance, initial ¹	110 F	250 F
Maximum ESR _{DC} , initial ¹	5.6 mΩ	4.1 mΩ
Rated Voltage	16 V	16 V
Absolute Maximum Voltage ¹⁵	17 V	17 V
Maximum Continuous Current ($\Delta T = 15^{\circ}\text{C}$) ²	47 A _{RMS}	68 A _{RMS}
Maximum Continuous Current ($\Delta T = 40^{\circ}\text{C}$) ²	77 A _{RMS}	110 A _{RMS}
Maximum Peak Current, 1 second ³	500 A	1,000 A
Leakage Current, maximum (B01 Suffix - VMS 2.0) ⁴	1.5 mA	3.0 mA
Leakage Current, maximum (B02 Suffix - Passive Balancing) ⁴	N/A	N/A
Maximum Series Voltage	750 V	750 V
TEMPERATURE		
Operating Temperature (Ambient temperature)		
Minimum	-40°C	-40°C
Maximum	65°C	65°C
Storage Temperature (Stored uncharged)		
Minimum	-40°C	-40°C
Maximum	70°C	70°C

Figura 3. Specifiche dei moduli dei Supercondensatori utilizzati

I moduli presentano una tensione nominale di 16 V, 250 F di capacità, una resistenza interna di 4.1 mΩ ed accettano una corrente massima di 1000 A.

Nel normale esercizio i supercondensatori si considerano completamente carichi a tensione nominale, e scarichi a metà della stessa: per sicurezza si evita di portare i componenti alla loro tensione di lavoro massima. In Figura 4 viene mostrato il sistema montato in laboratorio, che è composto da due sezioni separate: nella sezione a sinistra sono ospitati i supercondensatori che schematizzano gli accumuli di bordo e di terra, in quella a destra è ospitata l'induttanza di spianamento, composta da due elementi identici (a meno delle tolleranze di lavorazione) posti in serie tra di loro.



Figura 4. Apparato sperimentale testato: supercondensatori di bordo (in basso a sinistra), supercondensatori della stazione di ricarica (in alto a sinistra) e induttanze (a destra)

3.1 Sistema di bordo

La configurazione di bordo è composta da 3 moduli posti tutti in serie, per una tensione nominale di 48 V ed una energia accumulabile di circa 27 Wh.

Come detto i supercondensatori si ritengono completamente scarichi se la tensione scende al di sotto di $\frac{V_{nom}}{2}$ e completamente carichi se la tensione diventa V_{nom} : con queste assunzioni l'energia effettiva immagazzinata/erogata dai supercondensatori si riduce al 75% della massima possibile, ma si preservano i componenti e se ne rende migliore la gestione.



Figura 5. Banco di supercondensatori rappresentativi del sistema di bordo

In Figura 5 si nota il collegamento in serie dei 3 banchi di SC, collocati in basso, sul piano del rack utilizzato per il fissaggio di tutti i componenti dell'apparato sperimentale.

3.2 Sistema a terra (stazione di ricarica)

Per quanto riguarda lo schema dell'accumulo rappresentativo della stazione di ricarica, si è realizzata una configurazione di ricarica senza controllo elettronico nella quale avviene un travaso diretto di carica/energia tra i supercondensatori a terra (carichi) e quelli a bordo (scarichi), il travaso è gestito in tre passi tramite la chiusura degli interruttori I_1 , I_2 ed I_3 .

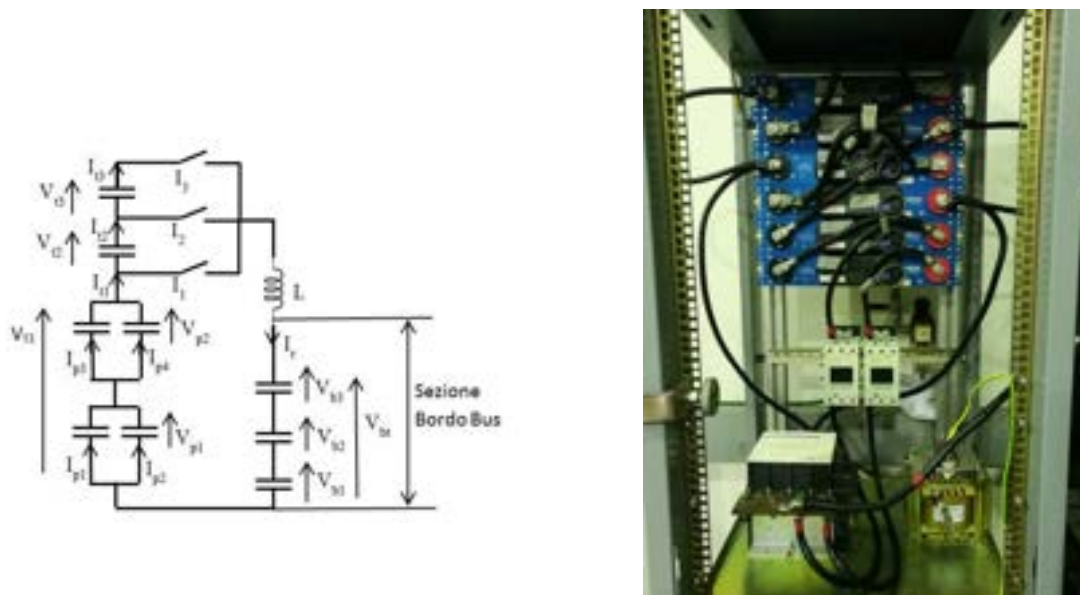


Figura 6 Configurazione di ricarica n.1

La configurazione di ricarica numero 1 viene adottata quando la tensione a bordo risulta essere $\frac{V_{nom}}{2}$, il primo step avviene quando si chiude l'interruttore "I1" (e gli altri due rimangono aperti) travasando quindi la carica tra i 4 SC in configurazione 2S-2P (2 in serie e 2 in parallelo) che sono posti alla tensione di 32 V verso i supercondensatori 'di bordo' che sono a 24 V, la tensione di fine carica, ricavabile con la (1) è circa 28 V (in generale V_e dipende dalle tensioni iniziali dei due blocchi contrapposti); la durata di tale fase è strettamente dipendente dall'induttanza installata e può variare da poco più di un secondo in caso di assenza di induttanza

fino a circa 15 secondi con una induttanza di 8 mH. Nello schema di figura 6 si vede come il parallelo/serie tra i quattro supercondensatori sia stato eseguito inserendo un nodo intermedio tra di essi, collegando in parallelo sia quelli attraversati dalle correnti I_{p1} e I_{p2} che quelli attraversati da I_{p3} e I_{p3} ; questo accorgimento permette di ridurre la possibile disegualizzazione di tensioni e correnti fra i quattro SC, disegualizzazione possibile in un sistema senza controllo dello stato di carica. Il problema della disegualizzazione viene comunque risolto in questa fase delle attività ricaricando singolarmente ogni banco in modo che a fine ricarica siano tutti carichi allo stesso modo.

Il secondo step consiste nella chiusura dell'interruttore I_2 (con gli altri due interruttori aperti): alla prima serie/parallelo ($2s+2p$) si aggiunge quindi un banco di supercondensatori in serie aumentando così sia la tensione totale di ricarica che la capacità del sistema a terra, la tensione di ricarica sarà così circa $(28+16)V=46$ V; al termine di questo step, la cui durata è circa simile a quella del primo, si apre I_2 e si chiude l'interruttore I_3 portandosi così al terzo step e con esso gli SC di bordo fino alla carica completa.

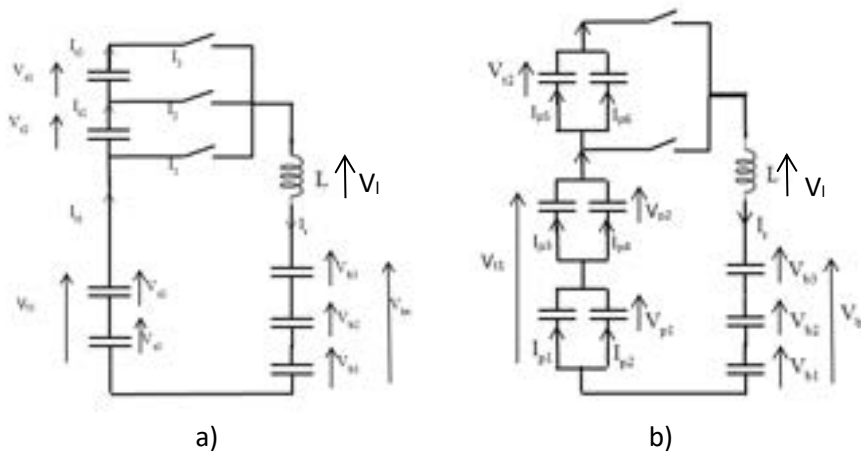


Figura 7. Configurazioni alternative di ricarica a) CF2 e b) CF3

Nell'ipotesi in cui i supercondensatori di bordo si presentino alla stazione non completamente scarichi, esiste il rischio che con la configurazione di Figura 6 la loro tensione finale di carica superi quella massima ammissibile: nel caso limite di arrivo del veicolo con i supercondensatori completamente carichi, con la configurazione 1 si può raggiungere una tensione di bordo di 60 V, contro il massimo ammissibile di 48V. Una possibile soluzione può essere quella di rilevare la tensione iniziale a bordo e sulla sua base modificare la configurazione di ricarica di terra.

In Figura 7 a), configurazione CF2, si nota come per diminuire l'energia trasferibile a bordo sia stato eliminato il parallelo del primo step, mentre in CF3 sia stato eliminato il terzo step e utilizzato il banco associato ad esso per realizzare un parallelo nello step 2: operando in questo modo le tensioni finali di carica vengono ridotte e non si supera quindi il limite di sicurezza degli SC. A seconda della tensione iniziale V_{bi} le diverse configurazioni possono consentire anche un miglior trasferimento di carica rispetto a quella di figura 6 e la stessa CF1 può essere più efficiente o funzionale se non si esegue il primo step (nel caso in cui la tensione di bordo sia maggiore di 32V, ovvero la tensione massima del primo banco di SC) o il terzo step (per non superare i 48 V).

3.3 Induttanza

Il componente utilizzato per la limitazione delle correnti massime circolanti nel circuito è costituito dall'induttanza: si noti che in sua assenza, essendo le resistenze interne dei singoli SC estremamente basse ($4\text{ m}\Omega$) le correnti di picco del sistema risultano essere molto elevate, per esempio in configurazione 1, assumendo $V_{t1}=32\text{ V}$ e $V_{bt}=24\text{ V}$ alla chiusura di I_1 si avrebbe una corrente di circa 500 A .

E' possibile limitare la corrente massima o inserendo una resistenza aggiuntiva o utilizzando una induttanza serie, soluzione quest'ultima adottata nel sistema di ricarica in studio.

L'induttanza influenza anche la costante di tempo del circuito: maggiore è L minore è il picco di corrente, ma i tempi di ricarica divengono più lunghi, ed al limite di valori di induttanza molto "grandi" il sistema può prendere ad oscillare risultando instabile, per questo va scelto un opportuno valore di L [4].



Figura 8. Una delle due induttanze da 4 mH utilizzate per la sperimentazione.

Nella presente sperimentazione sono state utilizzate due induttanze da 4 mH realizzate dalla ELTRA inserendole a seconda dei casi singolarmente o in coppia, poste in serie, per un valore totale di 8 mH .

I valori di induttanza e della resistenza ad essa associata sono stati misurati tramite un ponte elettronico e sono risultati essere per la singola 3.97 mH e $8.84\text{ m}\Omega$, per la serie 8.06 mH e $18\text{ m}\Omega$.

3.4 Strumentazione di misura

I valori di induttanza e della resistenza ad essa associata sono stati misurati tramite un ponte HP 4262A LCR Meter (Figura 9)



Figura 9 Ponte di misura elettronico HP 4262A LCR Meter (in alto), alimentatore per la ricarica dei supercondensatori (al centro) e carico elettronico per la scarica degli stessi (in basso).

Per poter effettuare le cariche e le scariche preliminari dei supercondensatori ovvero portarli alla tensione nominale per quelli rappresentativi della stazione di ricarica e a $\frac{V_{nom}}{2}$ (o tensioni superiori) quelli del veicolo, ci si è serviti di un carico elettronico e di un alimentatore da banco riportati in figura 9.

Le misure e la registrazione in tempo reale delle tensioni e correnti di ogni singolo step di ricarica sono state effettuate tramite un oscilloscopio digitale Yokogawa DL716 a 16 canali.



Figura 10 Strumentazione per la misura delle tensioni delle correnti e tensioni

Il rate di acquisizione è di 10 Hz, che rispetto alla dinamica del sistema si può considerare tempo reale: la Figura 11 mostra l'andamento della corrente registrato tramite l'oscilloscopio con i relativi intervalli di campionamento.

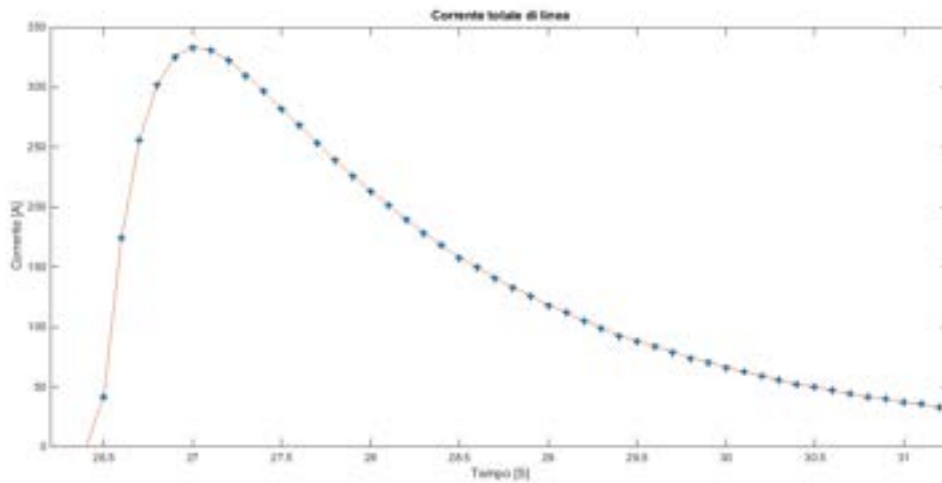


Figura 11 Campionamento della corrente

L'errore di misura sui valori di tensione è pari ad un massimo di 0.2 V, mentre per le correnti si sono utilizzate due pinze a sonda di Hall con un fondo scala rispettivamente di 200 A (misura I_{p1}) e 2000 A (per I_r) ed un errore di misura pari al 3% del fondo scala.

4 Risultati delle prove

In questo capitolo si riportano i risultati di tutte le prove effettuate sull'apparato sperimentale descritto nel precedente capitolo.

Le prove sono state effettuate inizialmente sulla configurazione riportata in Figura 6, CF1 , con supercondensatori di terra totalmente carichi (16 V ognuno) e quelli di bordo scarichi (8 V): per l'induttanza sono state fatte prove sia adottando l'intero banco con 8 mH che metà, 4 mH.

Successivamente sono state effettuate prove con tensione di bordo crescente adottando quindi le configurazioni CF2 e CF3 di Figura 7 ed una induttanza di 4 mH, tali prove sono poi state utilizzate per la calibrazione di un modello matematico implementato in un simulatore in ambiente Matlab/Simulink e con esso si sono prodotti i risultati relativi ai test non effettuati sperimentalmente.

4.1 Configurazione 1 con 24 V iniziale a bordo e induttanza 8 mH

Per la prima prova è stato simulato il banco di bordo completamente scarico (8 V ad elemento, 24 V totali), i banchi a terra sono invece completamente carichi ($V_{t1}=32$ V, $V_{t2}=16$ V, $V_{t3}=16$ V), l'induttanza serie è di 8.06 mH con una resistenza interna valutata di 18 m Ω , la configurazione adottata è la CF1.

La figura 12 riporta l'andamento delle principali grandezze di interesse.

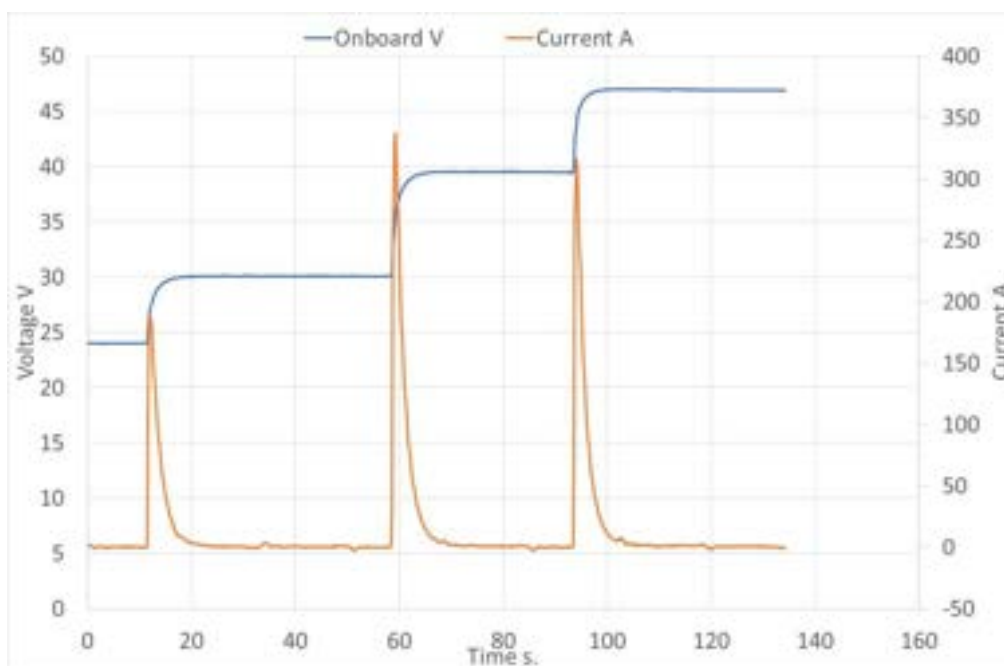


Figura 12. Corrente e Tensione di bordo durante i 3 step di ricarica della Configurazione 1 L=8 mH

In Figura 12 i tre picchi di corrente corrispondono all'inizio di ogni step di ricarica, con un massimo di circa 350 A in corrispondenza dell'inizio del secondo, mentre nel primo e nel terzo si rilevano picchi di 200 A e 300 A rispettivamente: si noti che i supercondensatori accettano una corrente massima di 1000 A, quindi decisamente superiore a quella di prova. Al termine di ogni step la tensione di bordo sale e si stabilizza nei tre gradini a valori di circa 30V, 40 V e 47 V, la nominale è di 48 V, quindi si sta operando in sicurezza.

Il picco di corrente è estremamente veloce (circa 1 s) e tutto il transitorio associato alla chiusura di un interruttore dura circa 12 s, per una durata totale del processo di ricarica ricalcolata in 36 secondi.

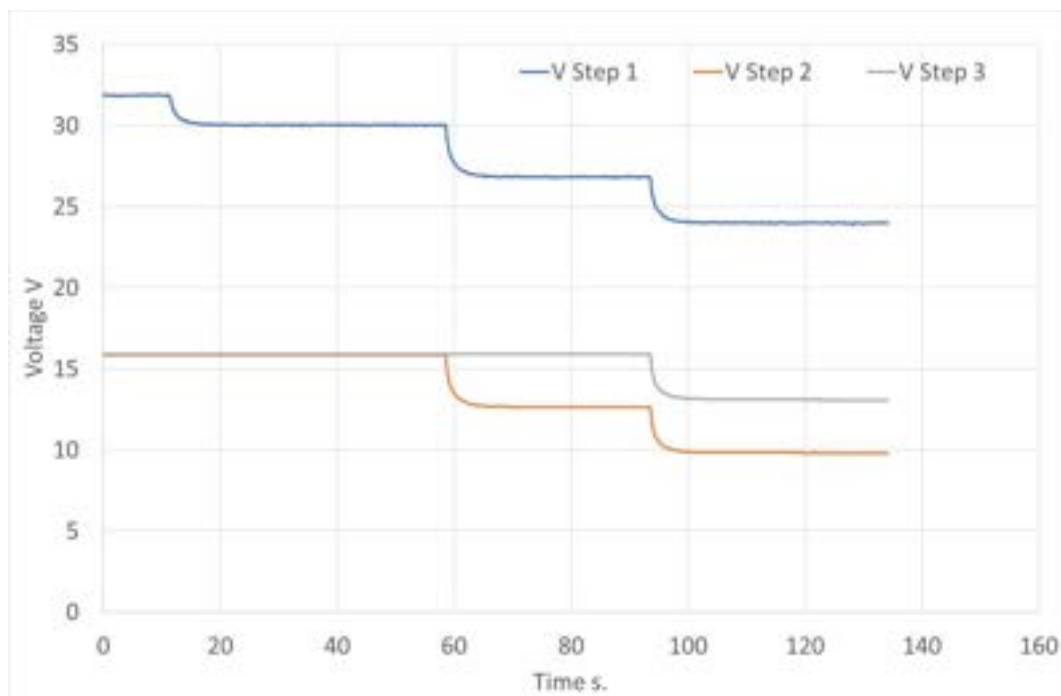


Figura 13. Andamento della tensione dei supercondensatori degli Step 1, 2 e 3 durante la ricarica.

La Figura 13 fissa l'attenzione su blocco di ricarica a terra: in particolare mostra la caduta di tensione che si rileva ad ogni step di ricarica negli SC di terra. I supercondensatori che sono sempre coinvolti in ogni step di ricarica sono i 4 relativi allo step 1, che passano dai 32 V a inizio ricarica fino a circa 23 V finali, mentre gli altri 2 vengono coinvolti nel loro relativo step, al termine della ricarica il valore più basso di tensione viene raggiunto dal banco relativo allo Step 2 ed è circa 10 V, anche questo compatibile con il buon funzionamento dei componenti.

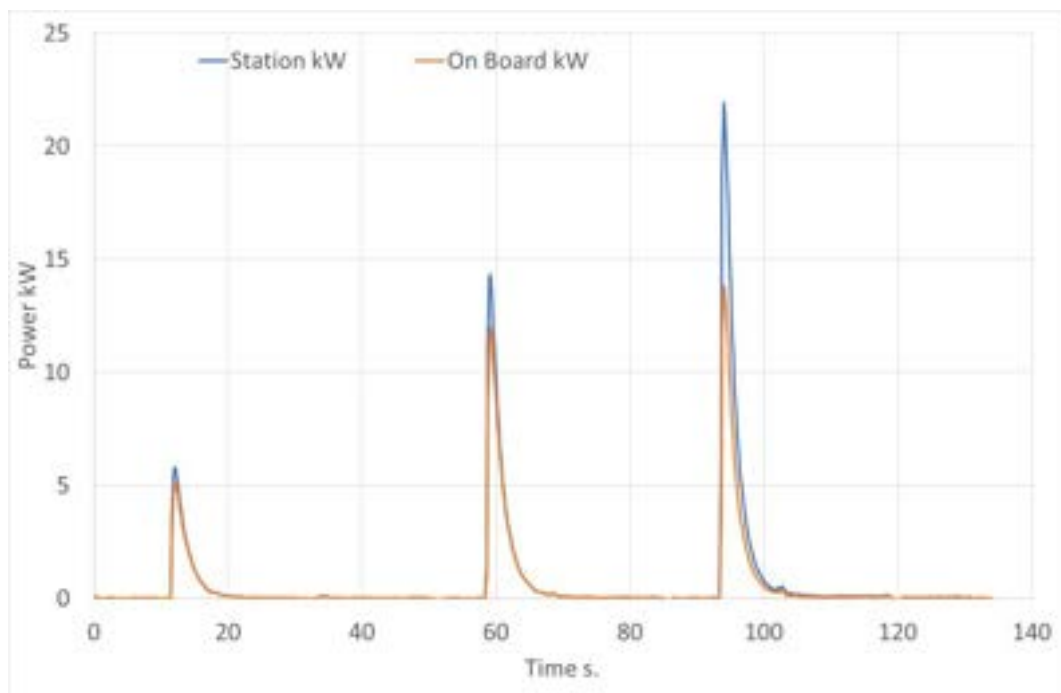


Figura 14. andamento della potenza lato stazione di ricarica e lato veicolo durante la ricarica

Per quanto riguarda le potenze istantanee erogate: dalla Figura 14 si nota come lato stazione la potenza erogata arrivi fino a circa 22 kW, mentre ai capi dei supercondensatori di bordo la massima potenza assorbita è di circa 14 kW.

La potenza perduta viene dissipata nelle resistenze interne dei supercondensatori e dell'induttanza, ed il rendimento di ricarica è abbastanza al di sotto dell'unità, risulta essere 0.798.

Al termine della ricarica il sistema ha trasferito a bordo 21.3 Wh di energia, con una energia totale (ricarica+già presente) disponibile di 25.6 Wh: essendo la massima energia accumulabile di 26.6 Wh si può considerare un coefficiente di "riempimento" della ricarica, che nel caso presente è di circa 0.96.

4.2 Configurazione 1 con 24 V iniziale a bordo e induttanza 4 mH

Di tutte le possibili combinazioni tra configurazioni di ricarica, valori dell'induttanza di spianamento e tensione di partenza della ricarica dal lato veicolo, la più problematica dal punto di vista della corrente massima è quella che prevede la CF1, metà induttanza (4 mH) e 24 V di tensione di bordo: infatti in questo caso si ha la più alta differenza di tensione fra bordo e stazione e la minima induttanza di linea.

Di seguito si riportano gli andamenti di corrente e tensione registrati durante la prova.

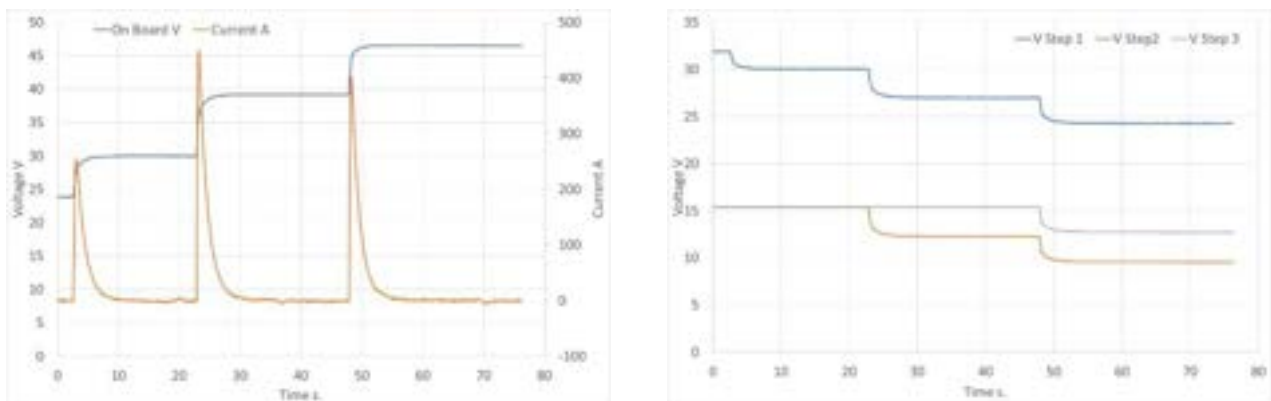


Figura 15. Andamenti della corrente e tensioni di ricarica per CF1 con L=4 mH, Vb=24 V

In Figura 15 si osserva che la corrente di picco passa dai 200 A, 330 A e 320 A registrati nel caso di L=8 mH a 250 A, 450 A e 400 A attuali. Le correnti registrate in questa prova sono certamente più elevate del caso precedente, di circa 120 A per il secondo picco, ma rimangono ampiamente nella zona di sicurezza dei componenti, il tempo di ricarica è più veloce (circa 7 s a step contro 12 s) ed il costo del sistema, utilizzando metà induttanza del caso precedente, è minore. La durata della prova, ricalcolata considerando il momento in cui si annulla la I_r , risulta essere di 21 s contro i 36 s del caso L=8 mH: questo valore è più compatibile con i tempi relativi ad una fermata con discesa e risalita dei passeggeri. In base a quanto visto, per il proseguo del lavoro si è scelto di utilizzare questo valore di induttanza, che consente tempi minori di ricarica senza compromettere la stabilità del sistema a causa della massima corrente.

Di seguito vengono brevemente presentati le registrazioni relative ad alcuni test: l'insieme delle prove verrà poi organizzato e raccolto in una tabella riassuntiva.

4.3 Configurazione 2 con 24V iniziale a bordo e induttanza 4 mH

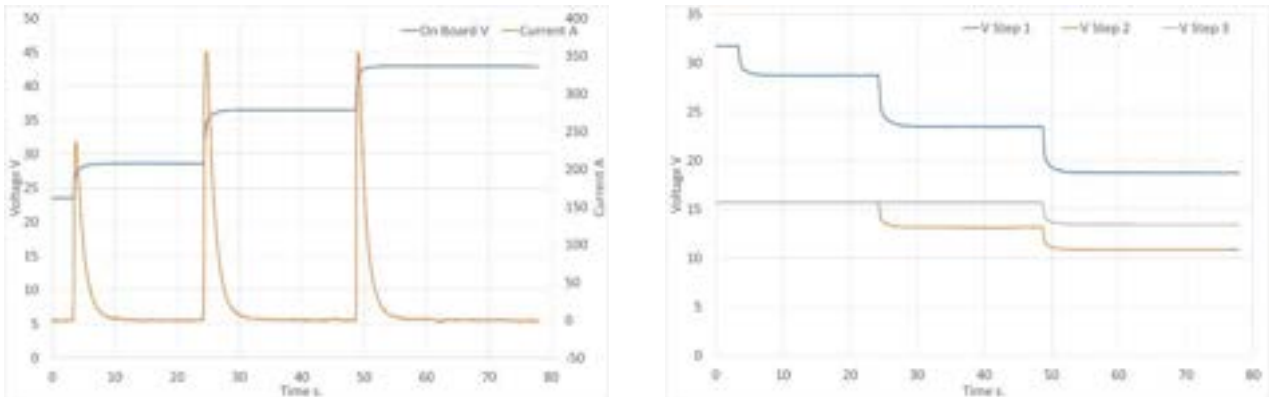


Figura 16. Andamenti della corrente e tensioni di ricarica per CF2 con $L=4$ mH, $V_b=24$ V

La corrente di picco risulta essere di 350 A, il tempo di ricarica 22 S, il rendimento 0.82

4.4 Configurazione 3 con 24V iniziale a bordo e induttanza 4 mH

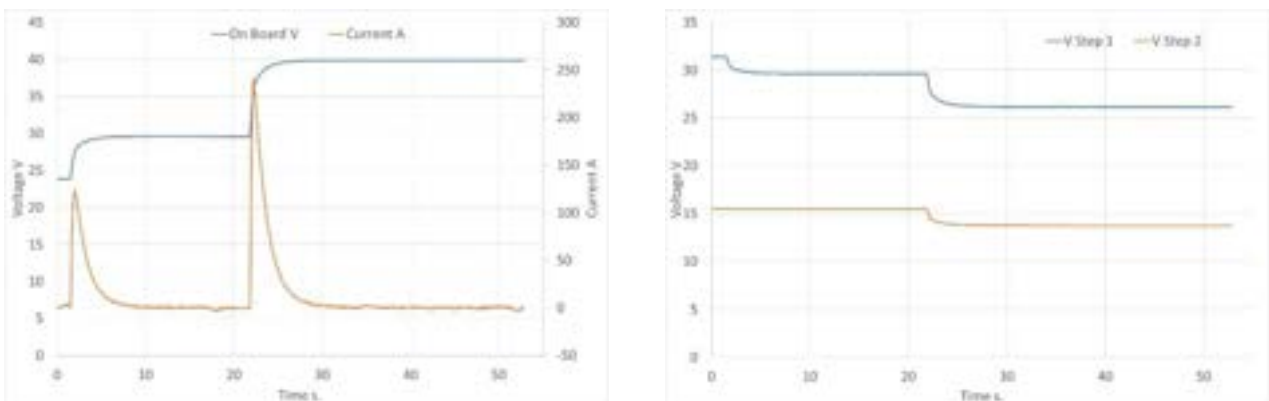


Figura 17. Andamenti della corrente e tensioni di ricarica per CF3 con $L=4$ mH, $V_b=24$ V

In questo caso occorre eseguire i due step di ricarica: si rileva una corrente massima di 240 A, una durata totale di 15 s, un rendimento di 0.84

4.5 Configurazione 3 con 36V iniziale a bordo e induttanza 4 mH

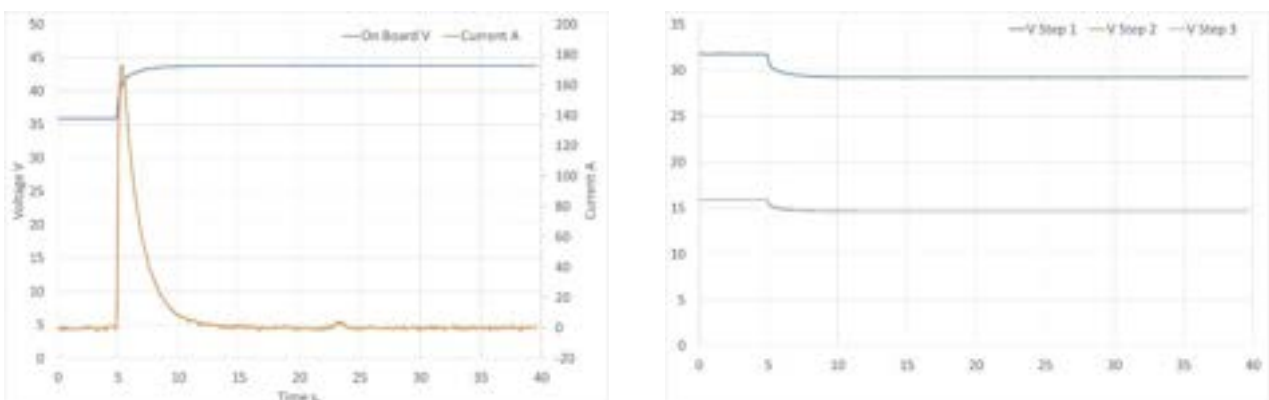


Figura 18 Andamenti della corrente e tensioni di ricarica per CF3 con $L=4$ mH, $V_b=36$ V

In questo caso il veicolo è parzialmente carico, di conseguenza con un solo step si esegue la ricarica completa. Per questi motivi la corrente di picco risulta essere minore di 180 A, il tempo di ricarica 7 S, il rendimento 0.88

4.6 Configurazione 3 con 42V iniziale a bordo e induttanza 4 mH

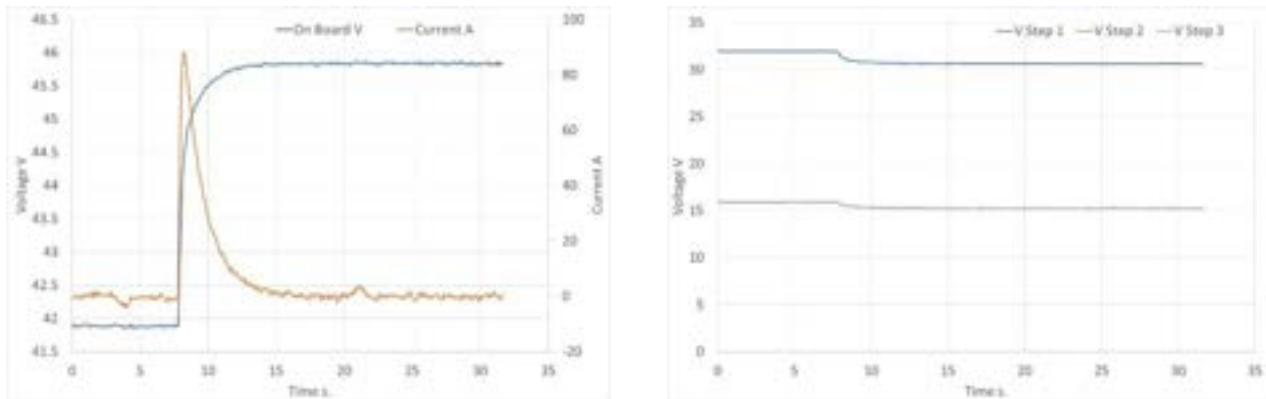


Figura 19 Andamenti della corrente e tensioni di ricarica per CF3 con L=4 mH, Vb=42 V

Al crescere della carica residua nel veicolo diminuisce la corrente di picco (ora 86 A) e si riducono i tempi di ricarica (ora 5 s), nel contempo sale il rendimento di tutto il processo (0.92)

4.7 Analisi dei risultati sperimentali

La tabella 1 esegue una sintesi dei risultati sperimentali presentati precedentemente, è uno strumento che permette di capire il comportamento generale del sistema di ricarica e di comparare direttamente alcune soluzioni: per esempio nel caso di veicolo completamente scarico ($V_b=24$ V, casi evidenziati in rosso) la ricarica più efficiente avviene in configurazione 3, che ha anche la minor durata e la minor corrente massima rispetto alle altre, per contro l'energia trasmessa è inferiore, ed il coefficiente di riempimento, pari a 0.69, è molto più basso che con le altre opzioni (0.69 contro 0.8-0.96)

Tabella 1. Sintesi dei risultati sperimentali

Configurazione e	Induttanza [mH]	Massima Corrente [A]	Durata [S]	Vb Iniziale [V]	Efficienza	Energia trasmessa [Wh]	Energia disponibile [Wh]	Coefficiente di riempimento
1	8	350	36	24	0.798	21.35	25.58	0.96
1	4	450	21	24	0.820	19.56	25.07	0.94
1	4	412	21	30	0.570	14.20	24.20	0.90
2	4	350	22	24	0.818	15.87	21.38	0.80
3	4	240	15	24	0.840	13.24	18.40	0.69
3	4	180	7	36	0.886	15.80	22.25	0.83
3	4	86	5	43	0.920	4.20	24.35	0.91

In generale dalla tabella si evince che il sistema di ricarica ha una efficienza mediamente alta (a parte la configurazione 1 con $V_b=30$ V), correnti di circolazione contenute, essendo la massima di 450 A contro i 1000 A accettabili dal sistema di accumulo, tempi di carica veloci (massimo 36 S) ed una buona, a volte ottima, efficienza di trasmissione dell'energia, nel senso espresso dai coefficienti di riempimento della capacità. Il calcolo dei rendimenti energetici è stato effettuato considerando le FEM iniziali e finali, a riposo, dei singoli banchi di condensatori.

Calcolando, dalla tabella suddetta, la potenza media di ricarica P ottenuta nei diversi casi, nota l'energia massima accumulabile nel banco "on board" ($E = 27 \text{ Wh}$), dal rapporto P/E tra le due grandezze risulta quanto segue:

Tabella 2. Rapporto P/E per la flash charge

Config.	Durata [S]	Energia trasmessa [Wh]	Potenza media [W]	P/E [1/h]
1	36	21,35	2135,00	79
1	21	19,56	3353,14	124
1	21	14,20	2434,29	90
2	22	15,87	2596,91	96
3	15	13,24	3177,60	118
3	7	15,80	8125,71	301
3	5	4,20	3024,00	112

Questi valori, tipici dei supercondensatori, corrisponderebbero nel caso di un accumulo di bordo costituito da batterie a correnti di ricarica multiple centinaia di volte la capacità nominale della batteria (fino a 300 C), in pratica non realizzabili, a dimostrazione dell'impossibilità di realizzare la "flash charge" per autobus equipaggiati di sole batterie, anche le più evolute.

5 Il simulatore

Per estendere i risultati della sperimentazione sul sistema in scala e per disporre di uno strumento di analisi e di dimensionamento del sistema reale si è deciso di sviluppare un programma di simulazione implementato in ambiente Matlab/Simulink, i dati dei test sperimentali hanno permesso di tararlo e validarlo.

5.1 Impostazione del simulatore

Si riprenda in considerazione lo schema di ricarica di Figura 20.

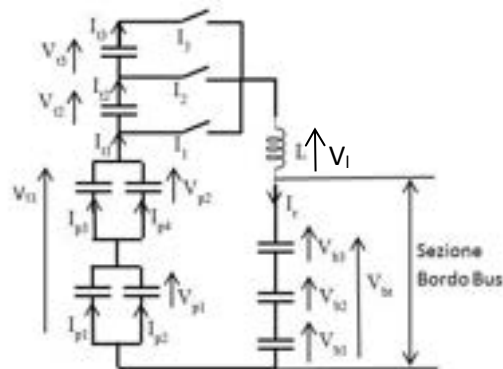


Figura 20. Configurazione del sistema di ricarica CF1

Si vuole costruire un modello matematico del sistema da implementare in Matlab/Simulink e per farlo occorre decidere per prima cosa come schematizzare i singoli elementi del circuito: nel caso in esame essendo la dinamica del sistema molto lenta rispetto a quella dei componenti che lo costituiscono ed essendo sicuri a priori di non sollecitarli oltre la zona di lavoro non lineare, è possibile schematizzare i supercondensatori e l'induttanza di linea come se fossero componenti ideali con associata una resistenza interna di tipo serie.

La Figura 21 mostra la schematizzazione di un supercondensatore, il segno della corrente ed i versi delle tensioni sono coerenti con la fase di scarica, dove il SC è visto come un generatore

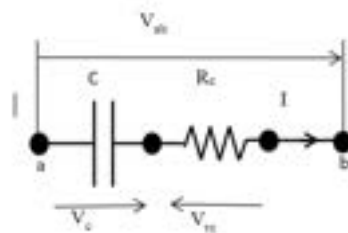


Figura 21 Rappresentazione di un Supercondensatore

Per esso valgono le relazioni

$$(2) \quad V_{ab}(t) = V_c - V_{rc} = \frac{Q_0 - \int i(t)dt}{C} - R_c i(t); \quad Q_0 = V_{c0}C$$

che possono essere interpretate come quelle di un sistema lineare, dove la variabile in ingresso è la corrente, lo stato è rappresentato dalla carica o dalla tensione iniziale, l'uscita dalla tensione del condensatore ed i parametri sono la capacità e la resistenza interna.

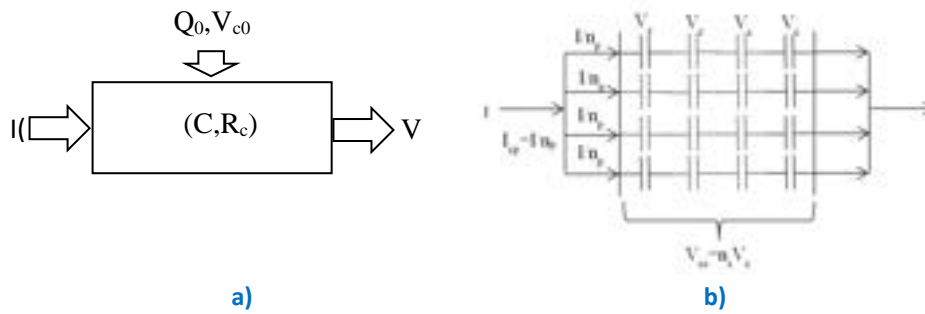


Figura 22. a) SC visto come sistema b) analisi della disposizione serie parallelo

Come illustrato in Figura 22 una disposizione in parallelo e serie di condensatori identici tra di loro può essere trattata come se fosse un singolo SC con in ingresso una corrente data dalla totale divisa per il numero di componenti in parallelo ed in uscita una tensione pari a quella del singolo componente moltiplicata per il numero di componenti in serie. L'induttanza può essere schematizzata in modo analogo alla capacità:

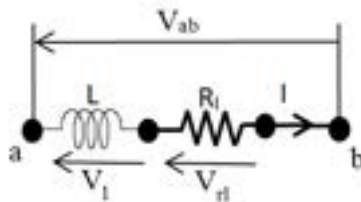


Figura 23 Rappresentazione di un induttore

Per essa valgono le relazioni (con la convenzione da utilizzatore)

$$(3) \quad V_{ab}(t) = V_l - V_{rl} = L \frac{di(t)}{dt} - R_l i(t)$$

Anche in questo caso si può vedere l'induttore come un sistema, dove l'ingresso è la corrente e l'uscita è la tensione, in caso di configurazioni parallelo/serie valgono le considerazioni precedenti.

Per la scrittura del modello Simulink si decide di ragionare nel modo seguente: si consideri il circuito in Figura 24, che schematizza lo step 1 dello schema di ricarica.

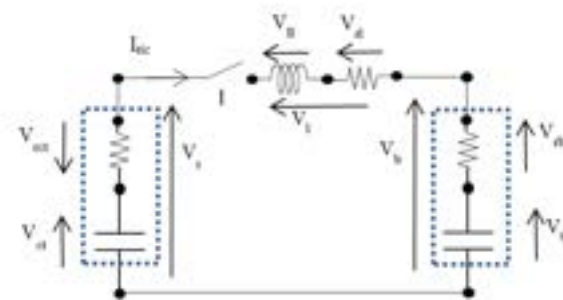


Figura 24. Scarica tra condensatori

All'istante $t=0$ l'interruttore è aperto e sono quindi note tutte le cadute di tensione del circuito: in particolare le uniche non nulle sono V_{ct} e V_{bt} , che costituiscono le condizioni iniziali dell'equazione da integrare.

Se a $t=t^*$ viene chiuso l'interruttore I, dato che la V_{ll} è nulla si può assumere: $I_{ric_{t^*=0}} = \frac{(V_t - V_b)}{R_l}$ (4) e con il passaggio della corrente di ricarica sorge una caduta di tensione induttiva pari a $V_{ll} = L \frac{dI_{ric}}{dt}$ (5).

Il modello che si è realizzato calcola di volta in volta le V_t e V_b in un sottoblocco condensatore che contiene le equazioni (2), mentre distingue tra la caduta di tensione sull'induttanza considerando separatamente i

termini relativi alla V_{ll} e V_{rl} : in particolare calcola V_{rl} come $V_{rl} = V_t - (V_b + V_{ll})$ (5) e da questa ricava la nuova corrente come :

$$(6) \quad I_{ric} = \frac{V_{rl}}{R_l} = \frac{V_t - (V_b + V_{ll})}{R_l}$$

La procedura può essere facilmente generalizzata quando si vuole rappresentare la chiusura degli interruttori I_2 ed I_3

5.2 Implementazione in Simulink

La Figura 25 presenta la schermata iniziale del modello Simulink

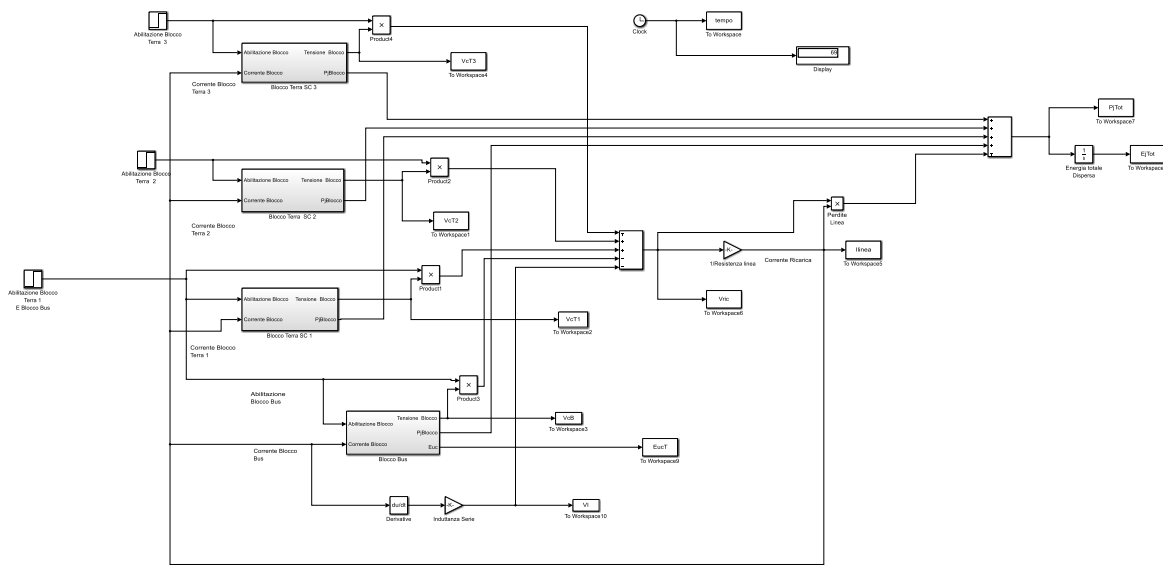


Figura 25. Schermata iniziale del modello Simulink

I supercondensatori vengono descritti tramite un blocco che contiene le (2) mentre l'induttanza non è modellata come un unico blocco ma, coerentemente con la (3) si distinguono la caduta di tensione legata alla parte induttiva da quella legata alla parte resistiva.

Gli interruttori vengono simulati tramite l'adozione di tre segnali di abilitazione (step) che intervengono nei tempi t_1, t_2, t_3 corrispondenti all'inserzione dei vari blocchi di SC. Il modello fornisce le potenze e le energie che vengono trasferite dai condensatori carichi, lato terra, a quelli da ricaricare, è possibile quindi calcolare il rendimento del processo.

Nella figura 25 viene mostrato il blocco di calcolo della tensione dei supercondensatori

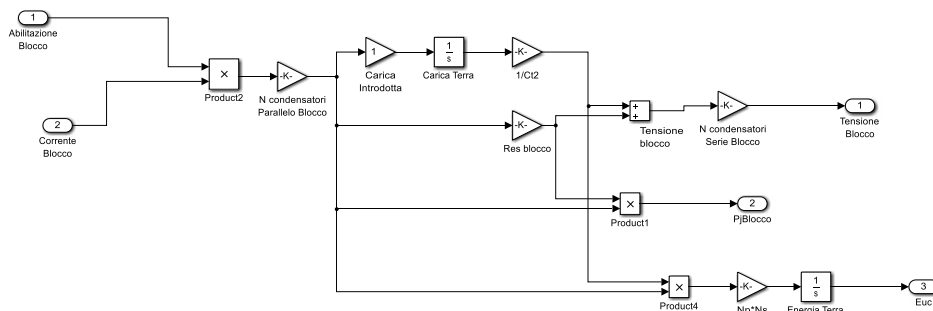


Figura 26. Blocco di calcolo della Vsc

che opera nel modo descritto precedentemente e calcola anche l'energia ceduta/immagazzinata nella capacità e la potenza dispersa per effetto Joule.

L'errore di calcolo del modello dipende essenzialmente da quello di stima dei parametri del circuito e da quello di misura sulle condizioni iniziali di tensione dei SC e può essere ricavato differenziando le relazioni che lo costituiscono e sostituendo alle derivate gli errori di misura, in questo caso, senza entrare nelle procedure, è massimizzabile nell'ordine dei 50 A sulla corrente di linea corrispondenti ai massimi picchi.

Le tensioni finali dipendono solo dalle condizioni iniziali e dall'errore di stima delle capacità degli SC, nel caso presente l'errore di calcolo sulle tensioni finali è sicuramente inferiore a 0.2 V.

5.3 Validazione del simulatore

I parametri del modello di SC sono i seguenti:

Capacità= 250 F

Resistenza=4.1 m Ω

L'induttanza totale misurata con il ponte è pari a L=8.1 mH, la resistenza associata è R_i=18 m Ω , nel caso di prove a metà induttanza si ha invece L=4.1 mh e R_i=9 m Ω .

Come si è detto precedentemente è possibile stimare un errore massimo di calcolo sulla corrente pari a 50 A: in realtà nelle prove con l'intera l'induttanza di linea si è riscontrato un errore massimo di 6 A su 330 A ed in quelle a metà induttanza di 35 A su 250 A, entrambi inferiori alla precisione dello strumento di misura sul suo fondo scala.

Di seguito si fornisce la comparazione tra le grandezze calcolate e misurate in due prove distinte: una ricarica completa eseguita adottando la configurazione 1 e l'intera induttanza ed una con la CF 1 e metà induttanza di linea.

5.3.1 Configurazione 1 ed intera induttanza

Per la configurazione 1 e l'intera induttanza posta in serie si hanno le seguenti condizioni iniziali di tensione dei blocchi dei Supercondensatori:

$$V_{bt}=24.58 \text{ V}$$

$$V_{t1}=31.85 \text{ V}$$

$$V_{t2}=15.81 \text{ V}$$

$$V_{t3}=15.81 \text{ V}$$

L'interruttore T_1 viene chiuso al tempo $t_1=3.6 \text{ s}$, l'interruttore T_2 al tempo $t_2=26.4$ e T_3 a $t=56.6 \text{ s}$, il picco massimo di corrente è pari a 333 A e si riscontra nel secondo step.

Di seguito viene mostrata la comparazione tra l'andamento di corrente reale e quello previsto con il modello matematico.

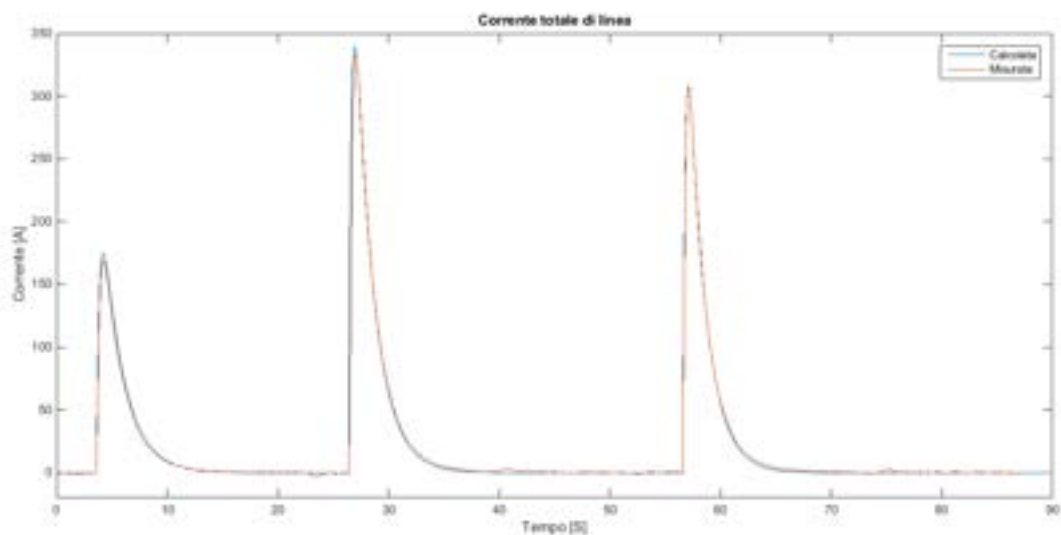


Figura 27. Corrente totale reale e calcolata

Segue il dettaglio del primo step, dove si verifica il massimo scostamento tra la previsione e la misura, che è di 6 A .

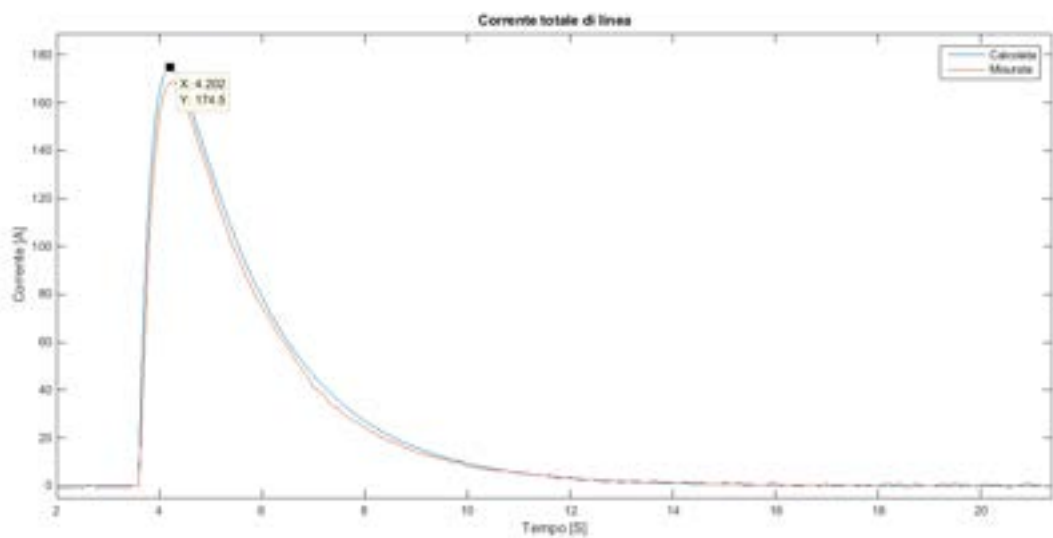


Figura 28. Dettaglio del primo step di ricarica

Anche nel secondo step, a cui corrisponde la massima corrente, lo scostamento massimo tra le due correnti si mantiene di 6 A (in realtà leggermente inferiore ai 6 A).

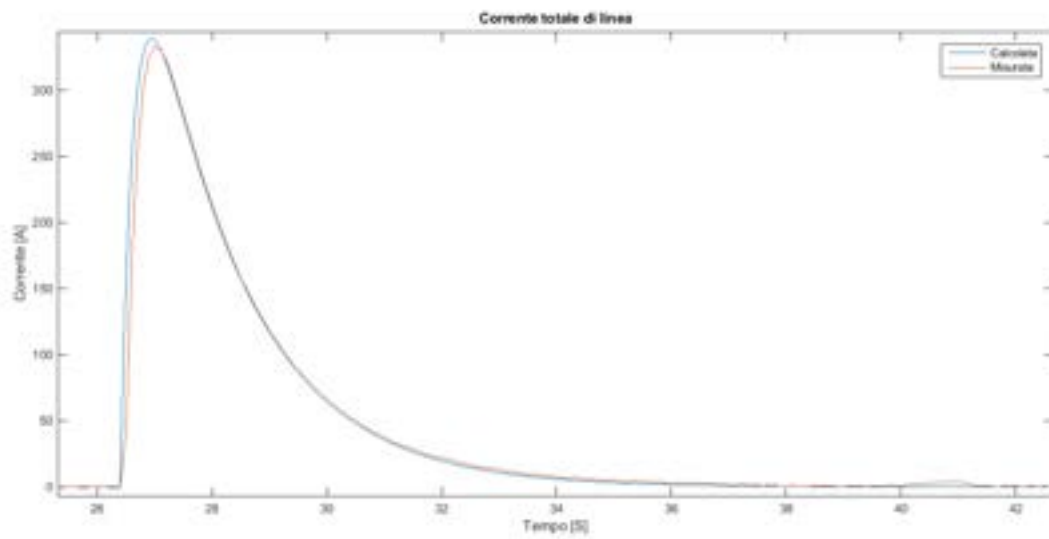


Figura 29. Dettaglio del secondo step di ricarica

La tensione dei condensatori di bordo sale in funzione dei tre step di ricarica, nella Figura 30 vengono comparate la reale e quella calcolata dal modello.

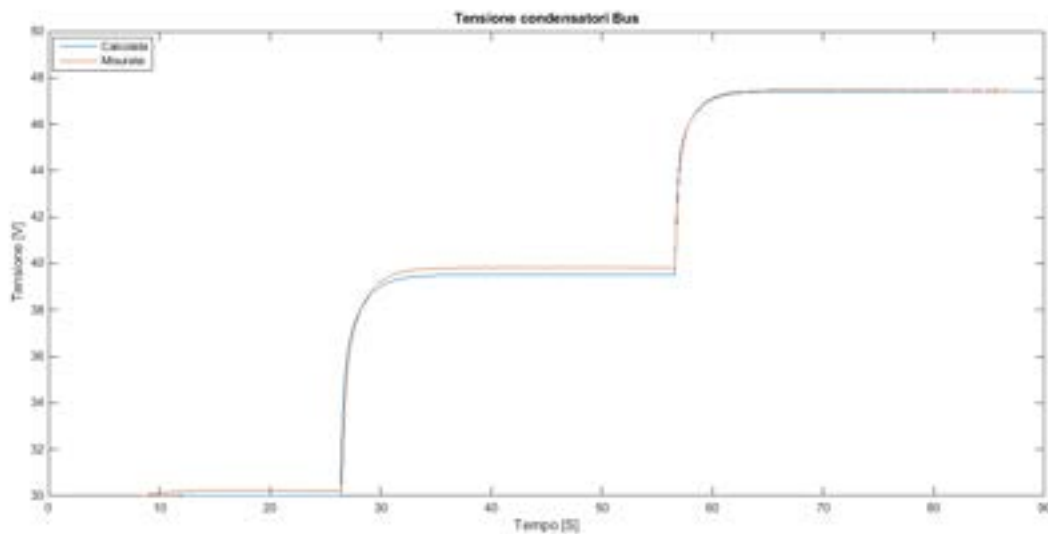


Figura 30. Comparazione tra le tensioni di bordo reale e calcolata

Lo scostamento massimo tra le due grandezze è di 0.2 V.

5.3.2 Configurazione 1 metà induttanza

Dati della prova a metà induttanza, con tre condensatori serie per il bus, un blocco a terra composto da due SC parallelo messi in serie ad altri due parallelo, e due blocchi composti da due singoli SC.

$$V_{bt}=24.25 \text{ V}$$

$$V_{t1}=31.90 \text{ V}$$

$$V_{t2}=15.82 \text{ V}$$

$$V_{t3}=15.81 \text{ V}$$

L'interruttore T_1 viene chiuso al tempo $t_1=3.0 \text{ s}$, l'interruttore T_2 al tempo $t_2=22.5 \text{ s}$ e T_3 a $t=45.5 \text{ s}$. In questa prova il massimo discostamento tra corrente reale e calcolata è pari a 22 A, 251 A calcolati contro 221 A misurati, e si riscontra al primo step, mentre il picco massimo di corrente pari a 451 A si riscontra nel secondo step ed è coincidente con le previsioni del modello.

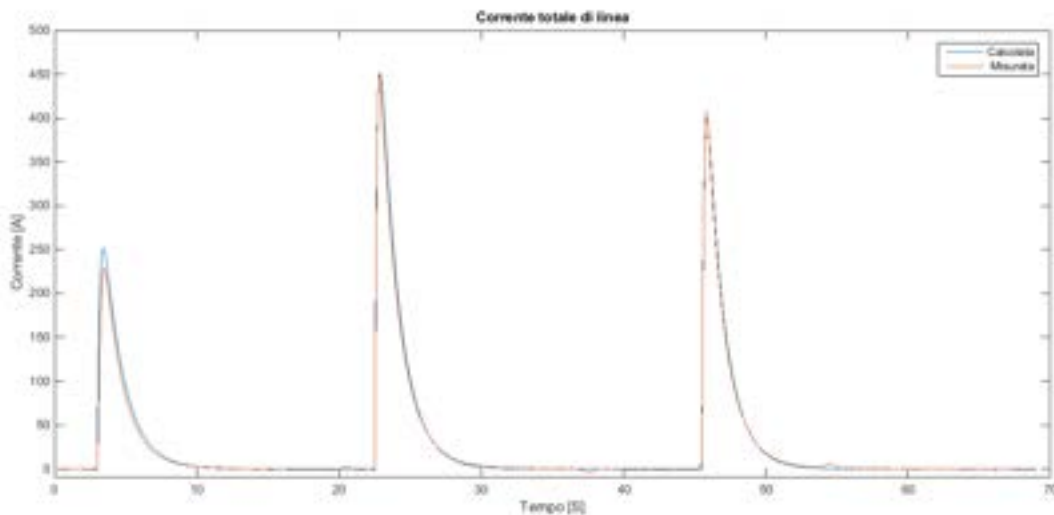


Figura 31. Comparazione tra corrente totale reale e calcolata

Segue il dettaglio del primo step, a cui corrisponde il massimo errore (22 A, 251 calcolati, 221 misurati).

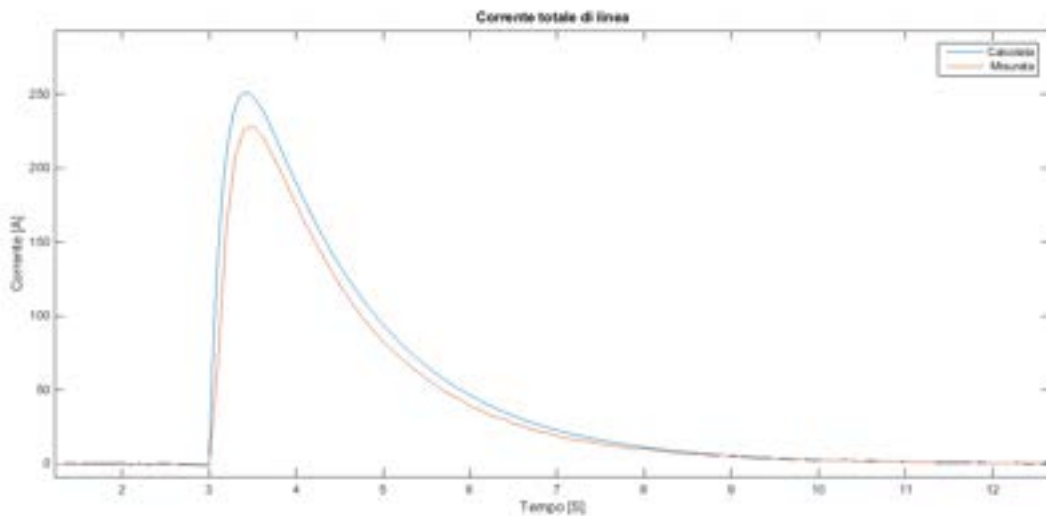


Figura 32. Dettaglio del confronto tra correnti nel primo step, massimo scostamento nella prova

Al secondo step, a cui corrisponde invece la massima corrente

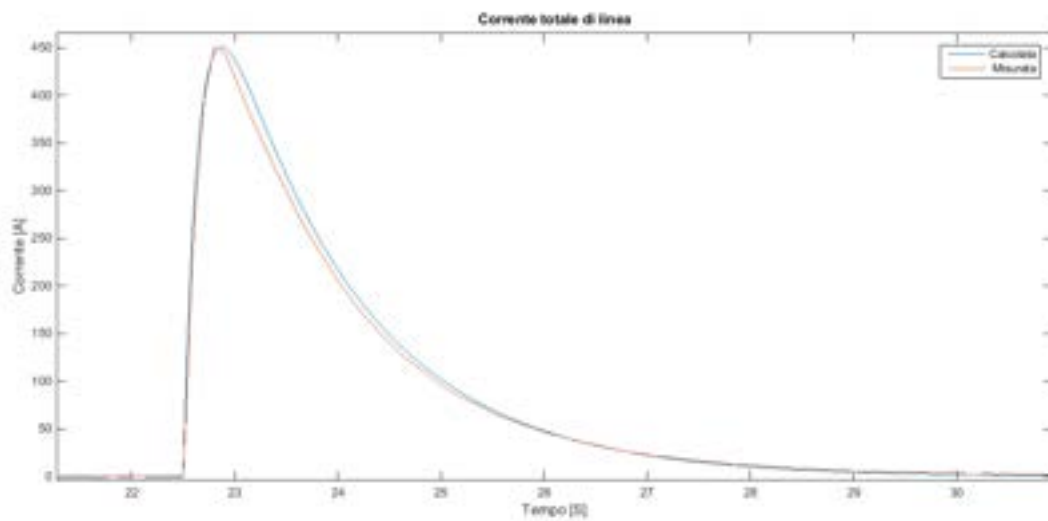


Figura 33. Dettaglio del secondo step

Di seguito viene mostrata la comparazione tra la tensione misurata e calcolata del blocco Bus.

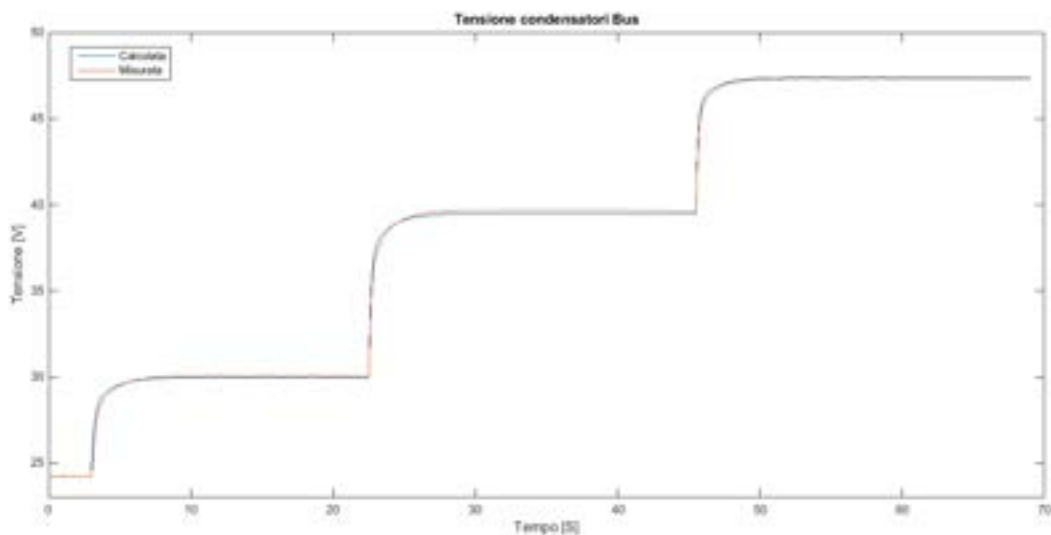


Figura 34. Comparazione tra le tensioni di bordo reale e calcolata

La massima differenza che si registra tra le due grandezze è di 0.8 V, questo avviene nel transitorio, l'errore finale è inferiore a 0.2 V.

5.3.3 Sensibilità del sistema

I risultati evidenziano l'affidabilità del simulatore, ma anche il fatto che se nella prima prova si è registrato uno scostamento assoluto massimo di correnti reale e prevista di 6 A, nella seconda tale valore è salito a 22 A, differenza accettabile rispetto alla scala di valori in esame (220 A, 14 %) ma che merita un approfondimento che riguarda anche la ripetibilità delle prove reali e la futura gestione del sistema di ricarica effettivo.

Si consideri di nuovo la Figura 35:

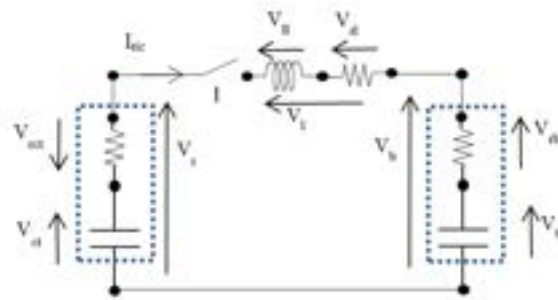


Figura 35. Scarica tra condensatori

Nel circuito equivalente alla stazione di ricarica i valori numerici degli elementi ‘smorzatori’ di corrente, ovvero delle resistenze interne dei condensatori e dell’induttanza, e dell’induttanza stessa, devono essere relativamente bassi rispetto alle capacità del sistema, perché si vogliono limitare le perdite di energia da una parte, ed i tempi di ricarica dall’altra.

Da quanto detto ne consegue che, se le tensioni statiche, finali, di equilibrio dei condensatori, sono ricavabili a priori semplicemente considerando la conservazione della carica elettrica che si sposta da terra a bordo ed il fatto che le tensioni finali di scarica e ricarica delle due sezioni devono essere equilibrate, non altrettanto si può dire delle correnti transitorie, che sono invece molto sensibili ai parametri del circuito ed alle condizioni iniziali di tensione nel momento della chiusura degli interruttori.

Piuttosto che addentrarsi in una analisi di dettaglio, si vuole invece mostrare in modo qualitativo il fenomeno: si immagini di variare le condizioni iniziali delle tensioni del blocco a terra di un valore contenuto, inferiore al volt, e di registrare la conseguente variazione di corrente nel circuito di ricarica.

Il simulatore, considerando la prova in configurazione 1 a metà induttanza, e variando le condizioni iniziali come mostrato in tabella 3, restituisce la corrispondente variazione massima di corrente.

Tabella 3. Perturbazione delle condizioni iniziali

$V_{t1} = 31.90$ [V]	$V_{t2} = 15.82$ [V]	$V_{t3} = 15.81$ [V]	$ \Delta I_{ric} $ [A]
$V_{t1} + 0.6$	$V_{t2} - 0.3$	$V_{t3} + 0.2$	20
$V_{t1} - 0.6$	$V_{t2} + 0.3$	$V_{t3} - 0.2$	26

A fronte di una variazione totale di 0.5 V delle tensioni di ricarica si assiste ad una variazione di corrente di 26 A, questo rende in termini numerici la sensibilità del sistema alle variazioni delle condizioni iniziali di lavoro e l’affidabilità delle previsioni del simulatore e degli stessi rilievi sperimentali.

Il progettista di un sistema in scala 1:1 (che verrà analizzato in un lavoro successivo) deve considerare, per valutare le correnti massime di linea, anche l’incertezza numerica nel valore della tensione iniziale dei singoli condensatori inseriti nel circuito, in realtà l’importante non è valutare modo assoluto con precisione le correnti, ma essere sicuri che il range di lavoro sia compatibile con il buon funzionamento del sistema, cosa appurata in questo studio e confermata dal modello matematico, che è sicuramente uno strumento affidabile per questo scopo.

5.3.4 Ricarica in un solo step

Si è detto in precedenza che la ricarica in più passi permette di limitare le correnti di linea del circuito: con l'ausilio del simulatore si vuole effettuare un confronto tra la ricarica completa, in configurazione 1, con induttanza di 4 mH eseguita in un solo step, con la chiusura dell'interruttore I3, e quella già vista precedentemente, eseguita in tre step. La Figura 36 riporta la comparazione degli andamenti della corrente di linea e della tensione del blocco bus.

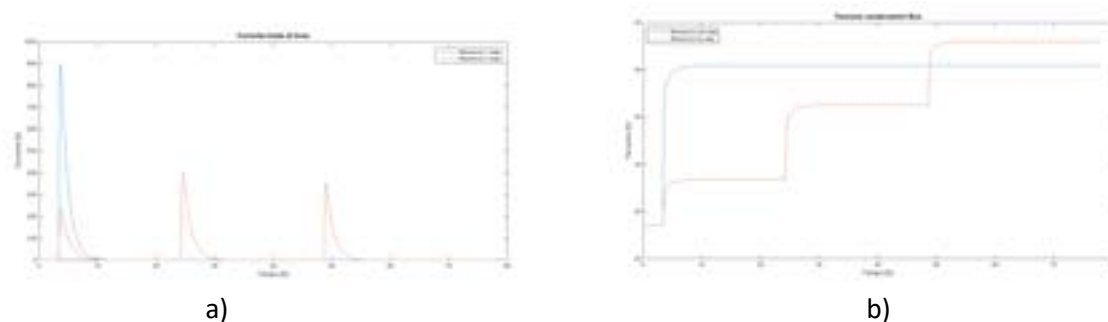


Figura 36. Comparazione tra ricarica in uno e tre step nella CF1, L=4 mH, Vb=24 V
a) corrente di linea b) tensione del blocco bus

A parità di condizioni iniziali la massima corrente prevista per la ricarica in tre step è di 398 A, mentre per quella in un solo step risulta essere di 899 A; la tensione finale dei condensatori di bordo è di 43 V per la ricarica in tre passi e di 40.48 V per la ricarica in un solo passo.

L'unico vantaggio della ricarica in un solo passo è rappresentato dal tempo di carica, pari a circa 8 s contro i 24 s del caso in tre passi, ma questo non basta a giustificare l'adozione di tale procedura.

6 Configurazioni e Strategie di ricarica

Si riprenda in esame la Figura 1

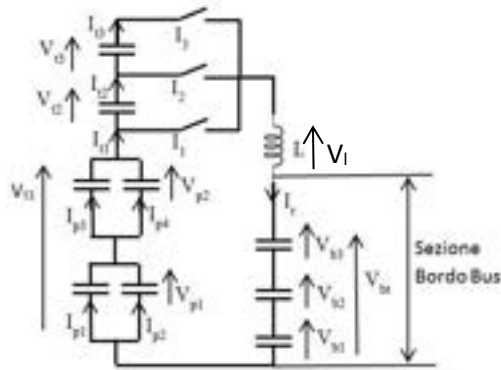


Figura 37. Configurazione del sistema di ricarica CF1

Alla chiusura di I_1 il sistema si porta in equilibrio, ed i condensatori del blocco 1 di terra e quelli di bordo raggiungono la stessa tensione, espressa dalla (1).

$$(1) \quad C_{t1}(V_{t1i} - V_{e1}) = C_b(V_{e1} - V_{bi})$$

Dove C_{t1} è la capacità equivalente del blocco 1.

Per comodità di notazione consideriamo per il blocco 1 le tensioni V_{t11} a riposo, $V_{t12}=V_{e1}$ a fine della prima scarica, V_{t13} a fine della seconda V_{t14} a fine della terza, per il blocco 2 la tensione V_{t21} prima della seconda scarica, V_{t22} a fine della seconda scarica, V_{t23} a fine della terza, per il blocco 3 V_{t31} e V_{t32} , a terra si avranno V_{bt} , V_{e1} , V_{e2} , V_{e2} .

Al secondo step si avranno le nuove condizioni di equilibrio

$$(7) \quad C_{t1}(V_{t12} - V_{t13}) = C_{t2}(V_{t21} - V_{t22}) = C_b(V_{e2} - V_{e12})$$

$$V_{t13} + V_{t22} = V_{e2}$$

Al terzo step si avrà un nuovo equilibrio

$$(8) \quad C_{t1}(V_{t13} - V_{t14}) = C_{t2}(V_{t22} - V_{t23}) = C_{t3}(V_{t32} - V_{t31}) = C_b(V_{e3} - V_{e2})$$

$$V_{t14} + V_{t23} + V_{t32} = V_{e3}$$

Le (1),(7),(8) sono scritte considerando di volta in volta che la tensione iniziale del blocco di bordo sia inferiore a quella dei blocchi di ricarica: potrebbe però accadere che, in configurazione 1, il veicolo si presenti alla fermata con una tensione $V_{bi} > V_{t11}$ oppure che la V_{bi} iniziale e le capacità dei banchi di ricarica siano tali che la V_{e3} risulti maggiore della tensione nominale del blocco Bus, $V_{e3} > V_{b\text{ nom}}$.

In base a queste considerazioni sono state introdotte le configurazioni CF2 e CF3.

Quello che si vuole fare ora è definire una strategia di ricarica del sistema di accumulo di bordo che associ ad ogni possibile valore di tensione iniziale del blocco bus una configurazione di riferimento per la ricarica.

La tabella 1 indica le grandezze su cui è possibile istituire un confronto per definire tale strategia, le (1),(7),(8) possono essere generalizzate a qualunque caso ed utilizzate per prevedere le tensioni finali dei singoli componenti del sistema e con esse i rendimenti ed efficienze di ricarica, il simulatore può fornire il dettaglio degli andamenti di ogni singola grandezza di interesse.

In base a quanto detto si stabilisce una strategia di ricarica ottimale in funzione della tensione residua nei condensatori lato veicolo, la figura 34 sintetizza i risultati ottenuti nello studio.

In figura 35 si evidenziano le tensioni finali di ricarica del bus ottenibili in funzione di quella iniziale e della configurazione adottata, si considera come tensione desiderata, obiettivo, quella nominale del blocco bus (48 V), anche se è possibile lavorare fino alla massima (51 V). La linea evidenziata in marrone corrisponde alla strategia, o configurazione di ricarica, da utilizzare per ottenere il miglior risultato possibile.

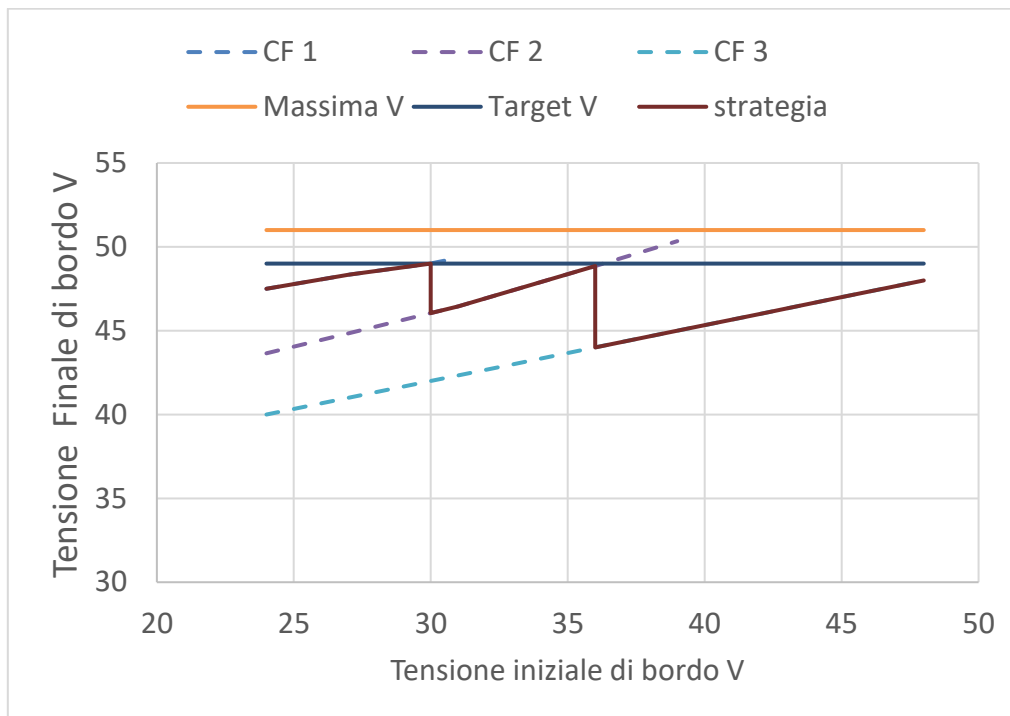


Figura 38. Strategia ottimale di ricarica

Utilizzando i risultati mostrati in Figura 38 è possibile ipotizzare un sistema automatico che legga la tensione del sistema di accumulo di bordo, colleghi i componenti dell'accumulo di terra nella configurazione più adatta a quella ricarica, ed operi poi sugli interruttori I_1 , I_2 , I_3 .

7 Conclusioni

Il lavoro ha dimostrato la fattibilità dell'idea di alimentare un veicolo equipaggiato con supercondensatori tramite una stazione di ricarica anche essa equipaggiata con degli SC.

La scelta di utilizzare a terra ed a bordo degli accumuli di bassa capacità ma altissima potenza ed efficienza permette di fatto di disaccoppiare il veicolo dalla rete di alimentazione, riducendo l'impatto in potenza del sistema di ricarica sulla rete stessa.

I prodotti dello studio sono stati la stazione prova, rappresentativa in scala ridotta del sistema reale, il simulatore in ambiente Matlab/Simulink e la definizione di una strategia ottimale di ricarica.

La sperimentazione ha messo in evidenza come i componenti della stazione di ricarica e del veicolo non vengano mai sollecitati oltre le loro tensioni minime e massime di lavoro, e le correnti massime che ci circolano non superino la metà della nominale, e sono di tipo impulsivo.

Il proseguo di questa attività dovrebbe essere la realizzazione del sistema reale in scala 1:1, con un dimostrativo o di tipo stazionario (con il solo sistema di accumulo di bordo del veicolo) o costituito dalla stazione ed un veicolo reale.

8 Riferimenti bibliografici

- [1]. Fernando Ortenzi, Giovanni Pede, Silvia Orchi “Analisi delle prestazioni di un sistema di ricarica ibrido per TPL”, report RDS/2015
- [2]. F Ortenzi, S Orchi, G Pede, Technical and economical evaluation of hybrid flash-charging stations for electric public transport, Industrial Technology (ICIT), 2017 IEEE International Conference on, 549-554
- [3]. Fernando Ortenzi, Silvia Orchi, Pede Giovanni, Technical And Economical Evaluation Of Hybrid Fast-Charging Stations For Electric Public Transport, 2017, Evs30 - Electric Vehicle Symposium & Exhibition
- [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/2016
- [5]. Di Rienzo, F. Baronti, F. Vellucci, F. Cignini, F. Ortenzi, G. Pede, R. Roncella, and R. Saletti, Experimental Analysis of an Electric Minibus with Small Battery and Fast Charge Policy, ESARS-ITEC 2016
- [6]. 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