



Ricerca di Sistema elettrico

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

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

A. Lidozzi, M. Di Benedetto, V. Sabatini, M. Di Giacomo
(Dipartimento di Ingegneria, Università degli Studi Roma TRE)

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: Studi sulla realizzazione di sistemi ibridi

Responsabile del Progetto: Pier Paolo Prosini, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione “Studio di fattibilità di un
sistema di ricarica “Flash” per TPL con trasferimento di energia tra supercondensatori”

Responsabile scientifico ENEA: Manlio Pasquali

Responsabile scientifico Università di Roma TRE: Prof. Alessandro Lidozzi

Indice

SOMMARIO.....	5
INTRODUZIONE	6
1 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	6
1.1 PRIMA FASE DI PROGETTO	6
1.2 TIPOLOGIA DI RICARICA: RICARICA PER BIBERONAGGIO	8
2 ARCHITETTURA DEL SISTEMA PER TRAVASO ENERGIA TRA SC.....	8
2.1 CONFIGURAZIONE DEI BANCHI	9
2.2 SCELTA DEI BANCHI	11
3 MODELLO DEL SISTEMA ELETTRICO.....	14
3.1 STRUTTURA DEL MODELLO REALIZZATO	15
3.1.1 <i>Modulo circuitale</i>	15
3.1.2 <i>Modulo per la gestione della fase di ricarica rapida</i>	16
3.1.3 <i>Modulo di output</i>	17
3.1.4 <i>Input e Output</i>	18
4 RISULTATI	19
4.1 INIZIALIZZAZIONE.....	19
Configurazione Low-Voltage (scala ridotta ma significativa)	19
Configurazione High-Voltage (scala reale)	20
4.2 RISULTATI DELLE SIMULAZIONI	20
4.2.1 <i>Low-Voltage - Esempi significativi</i>	20
Prima combinazione	20
Seconda combinazione	22
Terza combinazione.....	23
4.2.2 <i>Prestazioni del sistema di ricarica Low-Voltage</i>	24
4.2.3 <i>High-Voltage - Esempi significativi</i>	27
Prima combinazione	27
Seconda combinazione	28
Terza combinazione.....	29
4.2.4 <i>Prestazioni del sistema di ricarica High-Voltage</i>	30
5 ANALISI DELLE POTENZE RICHIESTE PER LA RICARICA DEL BANCO DI TERRA.....	34
6 TRATTAZIONE ANALITICA.....	36
6.1 PRIMA SCARICA.....	37
6.2 SECONDA SCARICA	42
6.3 TERZA SCARICA	44
6.4 ANDAMENTO COMPLESSIVO DELLA CORRENTE	45
7 DIMENSIONAMENTO DELL INDUTTORE.....	46
7.1 CALCOLO DEL VALORE EFFICACE DELLA CORRENTE	49
7.2 DIAGRAMMA DI FLUSSO DELL ALGORITMO DI DIMENSIONAMENTO	49
7.3 DIMENSIONAMENTO DELL INDUTTORE E RISULTATI	51

7.3.1	Configurazione Low-Voltage.....	51
7.3.2	Configurazione High-Voltage.....	53
8	CONCLUSIONI	55
9	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	55

Sommario

Una efficiente pianificazione del sistema di trasporto pubblico locale si configura come la chiave di volta per la risoluzione di molte problematiche che oggi affliggono i grandi centri abitati. L'adozione di veicoli a trazione elettrica per il trasporto pubblico locale su gomma è una prospettiva ogni giorno resa più plausibile dai costanti progressi nell'ambito dello sviluppo della tecnologia dei sistemi di accumulo. Sono diverse le realtà cittadine che procederanno all'intera sostituzione del parco veicoli a favore di veicoli elettrici nei prossimi anni, in virtù degli innumerevoli vantaggi che una scelta di questo tipo può comportare. Questa attività si propone di indagare un sistema di ricarica alternativo che prevede l'impiego di supercondensatori (SC) al posto dei più comuni accumulatori elettrochimici. Le consistenti differenze fra i due sistemi di accumulo suggeriscono l'intera riprogettazione della linea di trasporto; i lunghi processi di ricarica delle batterie tradizionali, effettuati al capolinea, vengono sostituiti da ricariche molto più brevi e frequenti, ideali per essere eseguite in corrispondenza della fermata del veicolo.

Nello specifico, l'attività oggetto del presente report si focalizza sulla modulazione del processo di ricarica, in maniera tale che quest'ultimo risulti compatibile con il trasbordo dei passeggeri e che non contempli l'impiego di correnti troppo elevate. A tale scopo è stato ideato un modello fisico, poi implementato tramite il software Matlab/Simulink, che ha permesso l'esecuzione delle simulazioni esposte nel Capitolo 4. Vengono proposte pertanto diverse possibili rimodulazioni del processo di scarica, in maniera tale da poter soddisfare esigenze diverse, a seconda del tipo di linea di trasporto in questione.

L'obiettivo di questa attività di ricerca si compone dello studio di fattibilità tecnico-scientifica, della simulazione e della progettazione di un sistema di accumulo stazionario a super condensatori con trasferimento diretto verso l'accumulo a bordo veicolo, riferito ad un caso reale allo scopo di ottimizzarne il dimensionamento tecnico esecutivo per diverse possibili condizioni di esercizio.

Le analisi effettuate grazie all'apposito modello Matlab/Simulink hanno permesso di valutare sia le correnti che le potenze durante il processo di ricarica nel banco di SC a bordo del veicolo. Questo ha portato alla definizione delle specifiche esecutive su cui poi sarà basata l'attività di sperimentazione atta a validare l'approccio modellistico al problema. Il risultato sarà un modello di simulazione affidabile e riconfigurabile per le diverse tipologie di veicoli e sistemi e capacità del accumulo a terra e sul veicolo stesso.

Introduzione

Lo studio di sistemi di ricarica alla fermata per il trasporto elettrico urbano è di grande interesse in quanto la sua applicazione comporterebbe l'ottimizzazione del dimensionamento tecnico-economico in diverse condizioni di esercizio.

Un veicolo progettato per essere ricaricato alla fermata ha a bordo una ridotta capacità di accumulo a vantaggio di costi, pesi e ingombri. D'altro canto però, una ricarica alla fermata richiederebbe potenze di picco molto elevate, per poter ricaricare il mezzo nel limitato tempo a disposizione, fornendo quindi l'energia necessaria per arrivare alla fermata successiva. In questo caso l'adozione di supercondensatori si rende necessaria, in quanto le batterie non sono in grado di gestire le potenze tipiche di questo genere di ricarica rapida.

Il sistema che viene simulato avrà sia a terra (nelle fermate selezionate) che a bordo, due distinti bank di supercondensatori. L'obiettivo è la verifica della fattibilità tecnica, la realizzazione di un modello di simulazione che possa essere configurato secondo le esigenze specifiche e la progettazione degli elementi principali di tale sistema.

Lo studio si suddivide in due parti: la prima relativa alla modellazione del sistema elettrico, mentre la seconda tratterà il dimensionamento delle grandezze in gioco.

Il caso che viene esaminato ipotizza un sistema composto da supercondensatori disposti in una configurazione serie/parallelo, da una ipotetica alimentazione da rete a 400V trifase con potenza nominale 21 kW (32 A) e da un ipotetico convertitore AC/DC in grado di caricare il banco di terra fornendo quindi una potenza media relativamente bassa. Non è presente il convertitore switching tra stazione e veicolo, la ricarica avviene per travaso diretto SC-SC, con limitazione di corrente effettuata dalla presenza di un solo induttore.

Quanto investigato ha il vantaggio di non avere convertitori elettronici ad alta potenza e quindi è certamente la soluzione più economica; ma ha delle criticità dovute alle alte correnti di scarica che si hanno durante l'operazione di travaso.

Nella prima fase di modellazione, è stato realizzato un simulatore per la ricarica alla fermata comprendente il sottoinsieme accumulo (modello supercondensatori). Per contenere la corrente massima è stata inserita un induttore in serie ai due bank di SC. Nel modello è inclusa anche la resistenza parassita dell'induttore che sarà di valore controllato.

Nella seconda parte del lavoro sono state effettuate varie simulazioni per dimensionare tali elementi circuitali.

Il dimensionamento degli elementi passivi è stato effettuato considerando di dover ricaricare i supercondensatori a bordo del mezzo nelle decine di secondi come da specifica, tempo impiegato in genere per la discesa e la salita dei passeggeri dal mezzo.

1 Descrizione delle attività svolte e risultati

1.1 Prima fase di progetto

Durante la prima fase di questo progetto, è stata esaminata la ricarica di un sistema di accumulo basato su SC, lungo una linea di trasporto pubblico. Tale ricarica avviene durante il periodo in cui il mezzo si trova ad una fermata. Per riuscire ad effettuare una ricarica in breve tempo, si rende necessaria la gestione di potenze di picco molto elevate, in quanto si deve fornire al sistema di trasporto l'energia sufficiente per arrivare alla stazione successiva.

I SC presentano una elevata densità di potenza e sono molto più resistenti degli accumulatori elettrochimici, anche se la quantità di carica accumulabile in un SC è limitata alla superficie di interfaccia tra elettrodo ed elettrolita. Esistono diverse tipologie di SC, classificati in base alle differenti tipologie di elettrodo ed

elettrolita. Quelli maggiormente utilizzati e commercializzati, utilizzano elettroliti in soluzione acquosa o organica ed elettrodi a base di carbonio e sono realizzati in maniera tale da massimizzare la superficie di contatto tra elettrodo ed elettrolita. Come accennato, i SC rispetto, agli accumulatori elettrochimici, sono molto meno soggetti ad usura, sopportando più di 500000 cicli di carica e scarica con una durata in servizio di minimo 10 anni, senza che la capacità si modifichi sensibilmente nel tempo. Il fatto che riescano ed essere caricati e scaricati con correnti molto elevate ed in tempi estremamente ridotti, li rende particolarmente interessanti per gli scopi prefissati da questa attività di ricerca.

Per quanto appena detto, in questa prima parte del progetto è stato modellato un sistema in cui sono presenti sistemi di accumulo basati su SC sia alla fermata (a terra) che a bordo del veicolo. In particolare il sistema di accumulo è composto da SC disposti in serie, da una alimentazione da 21 kW, erogante una corrente di 32 A, e da un convertitore AC/DC da 21 kW. Non è presente il convertitore posto tra la stazione ed il veicolo e la ricarica avviene attraverso il travaso di energia tra il componente di accumulo e l'altro. Questo processo è mitigato da un induttore caratterizzato da un'elevata induttanza. Come precedentemente accennato, l'assenza di convertitori ad elevata potenza introduce un ingente vantaggio economico, ma comporta delle criticità individuate dalle elevate correnti di scarica e dalle alte temperature raggiungibili dal banco di SC. Infatti, sebbene l'idea di attrezzare gli autobus del trasporto pubblico locale esclusivamente con dei SC come dispositivi di accumulo sia innovativa e comporti numerosi vantaggi, la progettazione di tali sistemi presenta ancora numerose problematiche.

La temperatura dei dispositivi di accumulo deve essere accuratamente monitorata, questo per evitare che correnti piuttosto elevate, dovute alle grandi potenze di ricarica, causino aumenti di temperatura troppo consistenti per permettere il corretto funzionamento del sistema. Non sono d'interesse solamente le correnti in gioco, ma anche la capacità dei dispositivi di smaltire, fra una fermata e l'altra, gli innalzamenti di temperatura dovuti al processo di ricarica: questo non è un problema banale, specie se si considerano l'elevata frequenza con cui avvengono tali scariche in virtù della ristretta distanza fra le varie stazioni di ricarica e le possibili alte temperature urbane di impiego. Infatti correnti che risultano sopportabili dal sistema per le prime fermate della linea, potrebbero non esserlo per le ultime.

Per mitigare i picchi di corrente viene inserito un induttore in corrispondenza della fermata ed in serie al banco capacitivo a bordo del veicolo. Simulazioni effettuate hanno stimato, per un processo di ricarica dei banchi di bordo costituito da una singola scarica (singolo travaso), un dimensionamento dell'induttanza pari a frazioni di Henry (0.1 H). Simili valori dell'induttanza comportano problemi in termini di peso, ingombro e costi non indifferenti, che di certo comprometterebbero la fattibilità tecnica ed economica del progetto. Di conseguenza questa soluzione è stata scartata poiché avrebbe reso il progetto tecnicamente ed economicamente non realizzabile.

Si è pensato pertanto di riformulare il processo di ricarica secondo una struttura modulare. Il frazionamento dell'unica scarica relativa al progetto originario in tre scariche diverse, permetterebbe la riduzione delle correnti di picco e quindi l'adozione di un dispositivo induttivo molto meno invasivo di quello appena menzionato. Il primo problema relativo a questo approccio è rappresentato dall'aumento del tempo di ricarica complessivo, che ne risulta quasi triplicato: si ricordi che il tempo di esecuzione del processo di ricarica è una variabile fondamentale nella progettazione di questo tipo di sistema a ricarica rapida, in quanto l'intero processo deve avvenire in contemporanea col trasbordo dei passeggeri onde evitare inutili e fastidiose attese.

L'unica soluzione che rende fattibile l'adozione di un frazionamento della scarica è quella di interrompere le singole scariche ben prima che sia trascorso il canonico intervallo di tempo pari alle cinque costanti di tempo tipiche di un sistema RC, oltre il quale la corrente nel circuito viene considerata approssimativamente nulla in virtù dell'andamento esponenziale decrescente. Il modello presentato in questo elaborato si propone pertanto la definizione di un sistema di modulazione delle scariche compatibile con i vincoli di durata del processo di trasferimento. Il criterio secondo il quale queste scariche vengono modulate è applicato mediante la definizione di tre correnti di soglia, ognuna relativa ad ogni scarica, che definiscono la minima corrente oltre la quale interrompere la scarica stessa.

In particolare, lo studio è stato guidato dalle seguenti ipotesi:

- la distanza presa in considerazione tra le fermate ha una lunghezza media 0.33 km. Nelle simulazioni è stata esaminata una sola fermata, in quanto si ipotizza che tutte le eventuali altre fermate restituiscano risultati identici alla prima;
- la ricarica alla fermata fornisce solamente l'energia dovuta alla trazione (0.757 kWh/km) e non quella relativa ai servizi ausiliari;
- il sistema di accumulo per la trazione, posto a bordo del veicolo oggetto di studio, possiede una capacità di erogazione della potenza maggiore di 0.757 kWh;
- il sistema di alimentazione previsto è a bassa tensione, con una potenza in uscita pari a 21 kW costanti;
- le tensioni del sistema di accumulo a terra ed a bordo del veicolo raggiungono il valore massimo rispettivamente di 96 V e di 48 V;
- la ricarica avviene per travaso di carica dalla stazione al veicolo, interponendo tra i due sistemi un componente che limita la corrente massima verso il veicolo: come detto, un induttore ad elevata induttanza.



Fig. 1. Ricarica alla fermata.

Quanto appena esposto è schematizzato in Fig. 1, dove è rappresentata un modello di stazione di economica realizzazione. Questo perché non è presente uno stadio di conversione tra i SC ed il veicolo che sta sostando per la ricarica. Tuttavia potrebbero verificarsi eventi di scarica diretta, con potenze e correnti elevatissime, danneggiando l'intero sistema.

1.2 Tipologia di ricarica: ricarica per biberonaggio

La ricarica per *biberonaggio* delinea una soluzione per la mobilità pubblica con un sistema di alimentazione elettrico ad alta velocità di ricarica. Tale sistema non comporta la necessità di accumulo elettrochimico a bordo del mezzo di tutta l'energia elettrica necessaria alla missione del veicolo stesso, demandando al territorio la funzione di fornire l'energia necessaria ai mezzi, limitando così il problema dell'autonomia.

Con il termine *biberonaggio* si indica quindi la tecnica di ricarica parziale del sistema di accumulo che equipaggia un mezzo di locomozione elettrico autonomo. Dal momento che in questa fase del progetto sono stati analizzati i SC come unico sistema di accumulo presente a bordo del mezzo, è possibile prevedere tempi di ricarica estremamente ridotti rendendoli compatibili con i tempi necessari ai passeggeri per salire o scendere dal mezzo in fermata, durante il trasporto pubblico urbano. In questo modo, il concetto di autonomia viene trasferito dal veicolo al territorio.

2 Architettura del sistema per travaso energia tra SC

In questa sezione viene descritto il modello che rappresenta il sistema in analisi, ovvero il processo di ricarica per travaso. Il suddetto modello simula solamente il processo di ricarica dei banchi di bordo,

considerando il banco di terra completamente carico sin dall'inizio della simulazione. L'intero modello è stato concepito allo scopo di simulare il frazionamento del processo in tre moduli o scariche differenti: l'output atteso sul grafico dell'intensità di corrente in funzione del tempo, risulta essere una serie di tre curve che seguiranno un andamento esponenzialmente decrescente, concordemente con la curva caratteristica di scarica di un condensatore. Questo determinerà un simile andamento della potenza associata al processo di travaso. Quando l'intensità di corrente diviene tale da rendere il processo di carica inefficiente, viene aperto l'interruttore corrente e chiuso il successivo, in maniera tale da incrementare la tensione ai morsetti del banco di terra di una quantità pari alla tensione nominale del singolo modulo capacitivo incluso con la chiusura del relativo interruttore.

In Fig. 2 sono riportate le configurazioni adottate per i banchi di terra e di bordo.

Allo scopo di validare il modello, si affianca alla normale configurazione una configurazione di riferimento a bassa tensione. Si hanno pertanto due configurazioni, entrambe racchiuse nello stesso modello, ma inizializzate da file diversi:

- Configurazione Low-Voltage (LV), caratterizzata da banchi capacitivi la cui tensione nominale è di 16 V;
- Configurazione High-Voltage (HV), caratterizzata da banchi capacitivi la cui tensione nominale è di 125 V.

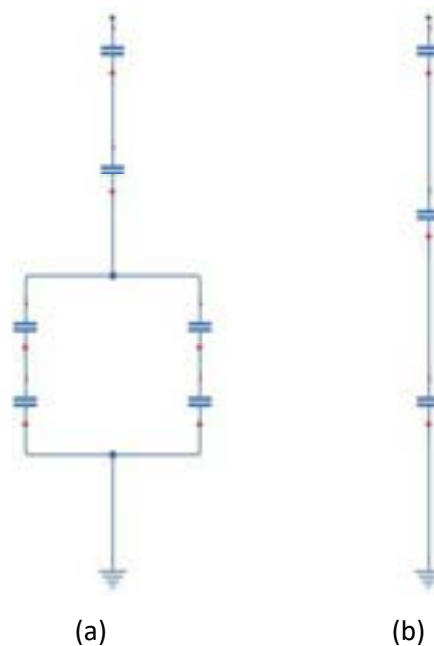


Fig. 2. modello del banco di terra (a); modello del banco di bordo (b).

2.1 Configurazione dei banchi

Il processo di ricarica frazionata in tre moduli è ampiamente influenzato dalla disposizione dei banchi di terra e di bordo: in questa sezione viene descritta la loro configurazione, motivandone la scelta. Si tenga a mente che tutte le configurazioni di seguito esposte presuppongono l'utilizzo di un solo tipo di modulo capacitivo, pertanto tutti i singoli SC impiegati sono caratterizzati da eguali valori di capacità e di tensioni nominali.

La configurazione del banco di terra è strettamente modulata sul processo di frazionamento triplo della scarica, pertanto lo stesso banco risulta diviso in tre moduli, da ognuno dei quali viene prelevata una delle tre scariche. La configurazione scelta per il banco di terra prevede l'utilizzo, nel primo modulo, di un parallelo di due serie di SC, mentre gli altri due moduli risultano composti da un singolo banco.

Allo scopo di giustificare tale scelta, si può confrontare la suddetta configurazione con altre possibili alternative. Tuttavia per limitare le innumerevoli possibili configurazioni, vengono considerate solamente quelle che presentano i seguenti requisiti:

- la tensione presente sul primo modulo, deve essere pari a due volte quella nominale del singolo banco. Questo è fondamentale in quanto il processo di travaso viene innescato solamente se la tensione che cade sul primo modulo risulti maggiore di quella inizialmente misurata ai morsetti del banco di bordo. Quest'ultima, se il modulo di bordo fosse composto da tre SC in serie, risulterebbe pari ad una volta e mezzo la tensione nominale del singolo banco ($V = 3/2 V_n$);
- deve essere utilizzato un numero pari o inferiore di moduli capacitivi rispetto a quello scelto, in maniera tale da confrontare soluzioni con lo stesso impatto economico.

Con le suddette premesse le configurazioni individuate per il primo modulo del banco di terra sono tre, escludendo altre configurazioni diverse ma equivalenti in termini di capacità. Le configurazioni in questione sono:

- il parallelo di due serie di due banchi l'una, la cui capacità equivalente è $2/2 C=C$ (configurazione adottata);
- triplo parallelo composto da singoli banchi in serie ad un ulteriore banco, la cui capacità equivalente è $3/4 C$;
- due singoli banchi in serie, la cui capacità equivalente è $1/2 C$.

Con C è indicata la capacità del singolo banco capacitivo. Quanto appena esposto è riassunto in Fig. 3.

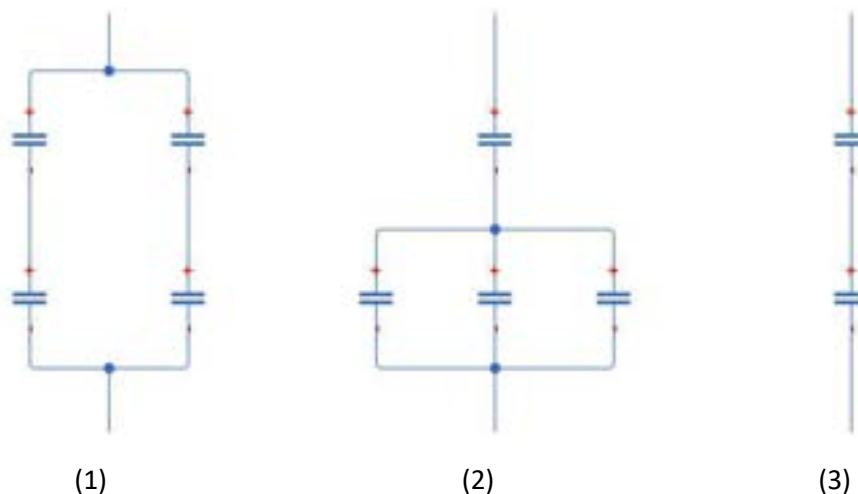


Fig. 3. Le tre configurazioni per il primo modulo del banco di terra messe a confronto.

La capacità più piccola rende l'ultima configurazione esposta la più rapida, in quanto si riduce drasticamente la costante di tempo del circuito (che convenzionalmente in un circuito ohmico-capacitivo risulta essere pari a RC). Per lo stesso motivo, la prima configurazione risulta la più lenta in termini di tempo di ricarica. Tuttavia una maggiore capacità permette, a parità di tensione, di immagazzinare una maggiore quantità di energia. Avendo dimensionato il sistema sulla base della prima configurazione, le altre due soluzioni non raggiungono una capacità tale da poter ricaricare sufficientemente il banco di bordo. Quest'ultima conclusione è stata confermata da simulazioni eseguite in merito al confronto di queste tre configurazioni, i cui risultati sono esposti in Fig. 4. A tal proposito, si noti che la prima configurazione è quella che consente un avvicinamento maggiore alla tensione nominale del banco di bordo nella configurazione a bassa tensione.

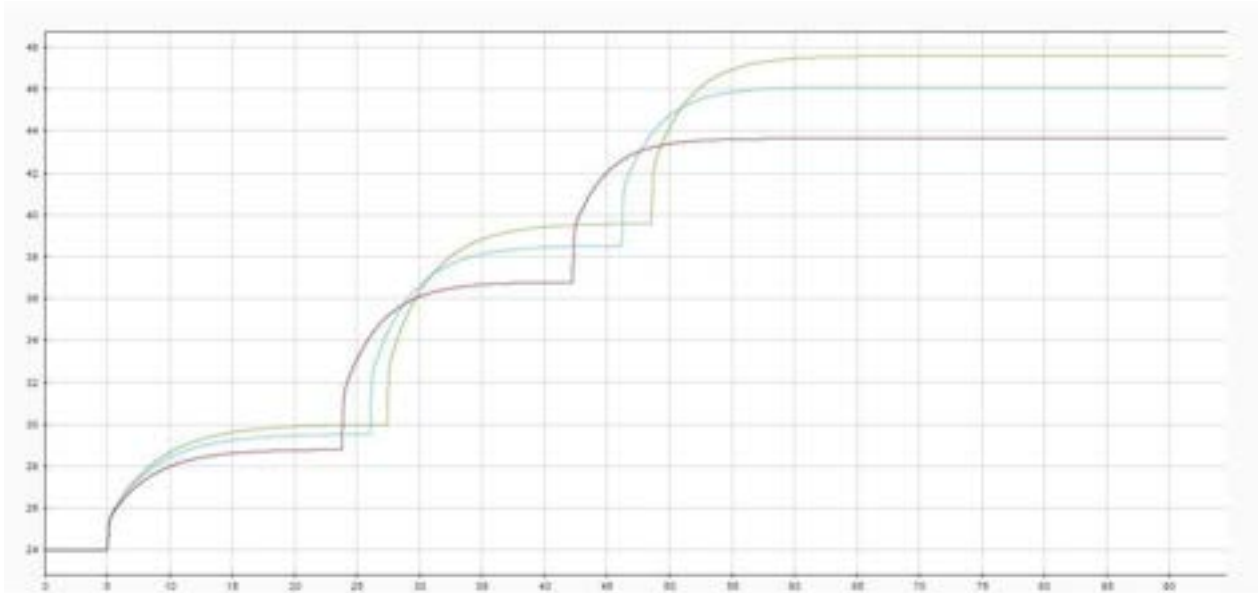


Fig. 4. Andamento della tensione ai morsetti del banco di bordo durante il processo di ricarica: in verde è riportata la tensione simulata sulla prima configurazione, in celeste quella sulla seconda ed in rosso quella relativa alla terza configurazione.

Per gli altri due moduli del banco di terra, risulta sufficiente la configurazione che li vede entrambi composti da un unico banco, in quanto durante le ultime due scariche viene sfruttata non solo la tensione relativa al modulo della scarica, ma anche le tensioni residue sui banchi dei moduli scarichi.

Il banco di bordo si compone semplicemente di tre moduli capacitivi disposti in serie, i quali rappresentano il vero e proprio sistema di accumulo del veicolo.

2.2 Scelta dei banchi

La scelta dei banchi è stata effettuata conformemente all'offerta proposta nel catalogo della Maxwell, azienda californiana che si occupa dal 1965 della progettazione, produzione e distribuzione di supercondensatori.

Ovviamente per le configurazioni LV e HV sono stati scelti banchi con tensioni nominali e capacità differenti. La configurazione a bassa tensione è caratterizzata da una capacità maggiore, contrariamente a quella ad alta tensione, per la quale si è scelto un valore di capacità più basso. Nello specifico i due modelli scelti sono, rispettivamente:

- il banco BMOD0250P016, caratterizzato da una tensione nominale di 16 V e una capacità di 250 F;
- il banco BCAP0063P125, caratterizzato da una tensione nominale di 125 V e una capacità di 63 F.

Sono di seguito riportate le grandezze più significative dei due banchi in questione, estratte dai relativi datasheet, nonché gli schemi relativi ai due banchi appena menzionati.

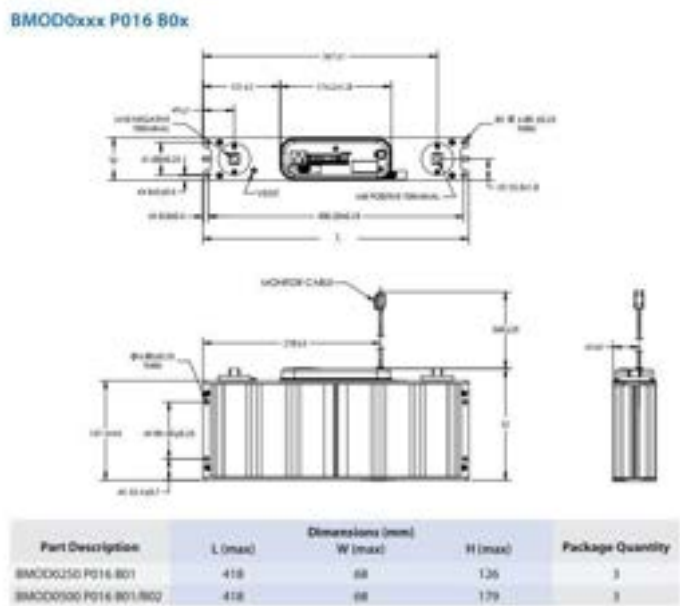


Fig. 5. Banco Maxwell BMOD0250P016 e le relative dimensioni.

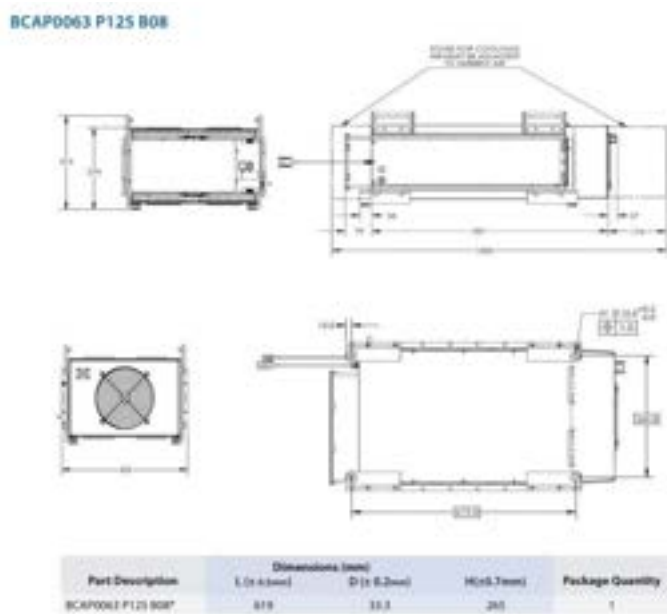


Fig. 6. Banco Maxwell BCAP0063P125 e le relative dimensioni.

PRODUCT SPECIFICATIONS

ELECTRICAL		BMOD0250
Rated Capacitance ¹		250 F
Minimum Capacitance, initial ¹		250 F
Maximum ESR _{oc} , initial ¹		4.1 mΩ
Rated Voltage		16 V
Absolute Maximum Voltage ¹⁵		17 V
Maximum Continuous Current ($\Delta T = 15^{\circ}\text{C}$) ²		68 A _{max}
Maximum Continuous Current ($\Delta T = 40^{\circ}\text{C}$) ²		110 A _{max}
Maximum Peak Current, 1 second ³		1,000 A
Leakage Current, maximum (B01 Suffix - VMS 2.0) ⁴		3.0 mA
Leakage Current, maximum (B02 Suffix - Passive Balancing) ⁴		N/A
Maximum Series Voltage		750 V
TEMPERATURE		
Operating Temperature (Ambient temperature)		
Minimum		-40°C
Maximum		65°C
Storage Temperature (Stored uncharged)		
Minimum		-40°C
Maximum		70°C
POWER & ENERGY		
Usable Specific Power, P _u ⁵		1,800 W/kg
Impedance Match Specific Power, P _{im} ⁶		3,700 W/kg
Specific Energy, E _{max} ⁷		2.1 Wh/kg
Stored Energy ⁸		8.9 Wh
LIFE		
High Temperature ⁹ (at Rated Voltage & Maximum Operating Temperature)		
		1,500 hours
Capacitance Change (% decrease from minimum initial value)		
		20%
ESR Change (% increase from maximum initial value)		
		100%
Room Temperature ⁹ (at Rated Voltage & 25°C)		
		10 years
Capacitance Change (% decrease from minimum initial value)		
		20%
ESR Change (% increase from maximum initial value)		
		100%
Cycle Life ¹⁰		
		1,000,000 cycles
Capacitance Change (% decrease from minimum initial value)		
		20%
ESR Change (% increase from maximum initial value)		
		100%
Test Current		
		100 A
Shelf Life ¹¹ (Stored uncharged up to a maximum storage temperature)		
		2 years

Fig. 7. Datasheet del banco Maxwell BMOD0250P016.

PRODUCT SPECIFICATIONS	
ELECTRICAL	
BMOD0063 P125 B08	
Rated Capacitance ¹	63 F
Minimum Capacitance, initial ¹	63 F
Maximum Capacitance, initial ¹	76 F
Maximum ESR _{DC} , initial ¹	18 mΩ
Test Current for Capacitance and ESR _{DC} ²	100 A
Rated Voltage	125 V
Absolute Maximum Voltage ³	136 V
Absolute Maximum Current	1900 A
Leakage Current at 25°C, maximum ⁴	10 mA
Maximum Series Voltage	1500 V
Capacitance of Individual Cells ¹¹	3000 F
Maximum Stored Energy, Individual Cell ¹¹	3.0 Wh
Number of Cells	48
TEMPERATURE	
Operating temperature range (Cell case temperature)	
Minimum	-40°C
Maximum	65°C
Storage temperature range (Stored uncharged)	
Minimum	-40°C
Maximum	70°C
POWER & ENERGY	
Usable Specific Power, P _u ⁶	1,700 W/kg
Impedance Match Specific Power, P _{max} ⁶	3,600 W/kg
Specific Energy, E _{max} ⁶	2.3 Wh/kg
Stored Energy, E _{stored} ⁷	140 Wh
LIFE	
DC Life at High Temperature ⁸ (at Rated Voltage & Maximum Operating Temperature)	
	1,500 hours
Capacitance Change (% decrease from minimum initial value)	
	20%
ESR Change (% increase from maximum initial value)	
	100%
Projected DC Life at 25°C ⁹ (field continuously at Rated Voltage)	
	10 years
Capacitance Change (% decrease from minimum initial value)	
	20%
ESR Change (% increase from maximum initial value)	
	100%
Projected Cycle Life at 25°C ^{10,12}	
	1,000,000 cycles
Capacitance Change (% decrease from minimum initial value)	
	20%
ESR Change (% increase from maximum initial value)	
	100%
Test Current	
	100 A
Shelf Life (Stored uncharged at 25°C)	
	4 years

Fig. 8. Datasheet del banco Maxwell BCAP0063P125.

3 Modello del sistema elettrico

Il modello fisico e la relativa configurazione precedentemente esposti sono stati implementati nel software Simulink, valido ambiente di lavoro integrato in MATLAB, ambedue sviluppati dalla compagnia statunitense Mathworks. Simulink, più specificamente, è un programma che consente la progettazione e la simulazione di sistemi dinamici governati da equazioni differenziali, per la cui risoluzione fornisce diversi algoritmi, sia a passo fisso che a passo variabile. Simulink sfrutta la versatilità di MATLAB nell'esecuzione di calcoli tecnici, la cui programmazione da parte dell'utente è resa molto più agevole rispetto ai convenzionali linguaggi di programmazione, combinandola con un ambiente grafico estremamente intuitivo che permette la

programmazione modulare dei sistemi dinamici in oggetto, che facilita la lettura e l'interpretazione stessa del sistema a livello puramente visivo.

3.1 Struttura del modello realizzato

Questa sezione introduce la struttura del modello del sistema in esame, dividendola per semplicità in tre moduli:

- Il modulo circuitale, composto da tutti gli elementi circuitali come condensatori, induttori, diodi, resistenze, interruttori e strumenti di misura;
- Il modulo gestionale, che si occupa della gestione e della temporizzazione del modello stesso, nonché degli interruttori che governano il comportamento del circuito;
- Il modulo di output, che raccoglie ed espone le rilevazioni effettuate dai vari strumenti di misura impiegati nel circuito.

In Fig. 9 viene riportata l'immagine rappresentante l'intero modello appena introdotto. La simulazione è generata dall'interazione dei tre moduli fra loro secondo le rispettive inizializzazioni.

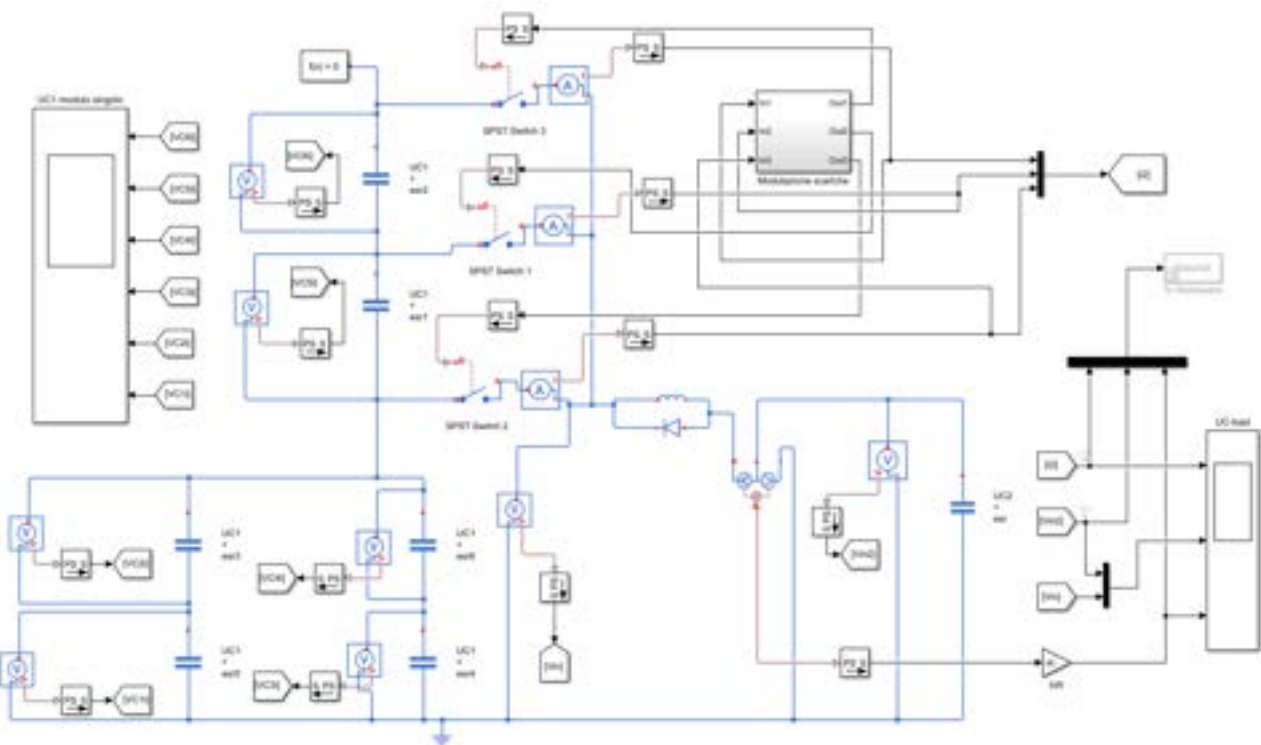


Fig. 9. modello dell'intero sistema in esame, in ambiente Simulink.

3.1.1 Modulo circuitale

Il modulo circuitale è strettamente calibrato secondo quella che è la modalità di frazionamento tripla del processo di carica. In esso si distinguono:

- il banco di terra, posizionato sulla sinistra del modello, è diviso in tre moduli ognuno relativo ad una specifica scarica. Il primo modulo è composto dal parallelo fra due serie composte rispettivamente da due banche di condensatori dal quale viene prelevata la prima scarica in ordine temporale. Gli altri due moduli, relativi alla seconda e alla terza scarica sono composti da un singolo banco. Tutti e tre i moduli risultano collegati, intervallati da rami attraverso i quali vengono prelevate le rispettive scariche. Lungo i suddetti rami vengono disposti diodi, interruttori ed amperometri. Lo scopo dei diodi è quello di permettere unicamente un flusso di corrente che va dai banche di terra ai banche di bordo, per evitare pertanto che si vengano a creare delle correnti di ritorno fra i banche di terra. Gli interruttori gestiscono

la modulazione delle scariche e la loro programmazione è affidata al modulo gestionale, che li apre in corrispondenza delle correnti di soglia. Infine gli amperometri rilevano l'intensità di corrente delle singole scariche comunicandole al modulo di output;

- l'induttore ed il circuito di soppressione. Il primo ha lo scopo di smussare i picchi di corrente ed il secondo è atto a sopprimere l'inerzia induttiva del circuito (garantisce un percorso per la corrente in caso di aperture non volute o a corrente non nulla);
- il banco di bordo, posizionato sulla destra del modello, si compone da un unico modulo composto dalla serie di tre banchi di condensatori, nel modello rappresentato più convenientemente da un unico condensatore equivalente la cui capacità risulta un terzo di quella relativa al singolo banco.

In Fig. 10 viene riassunto quanto appena detto, riportando la parte corrispondente del modello Simulink.

Nonostante il processo di ricarica rapida sia più ampio e comprenda fasi co-me quella di ricarica dei banchi di terra e di attesa dell'arrivo del veicolo, il modello realizzato si concentra esclusivamente sul processo di travaso, ossia sulla fase di ricarica dei banchi di bordo. A livello operativo, la rete elettrica di alimentazione è sostituita, nel modello, dall'inizializzazione del valore della tensione ai capi dei morsetti dei banchi di terra, che in questo modo risultano già carichi dall'inizio della simulazione.

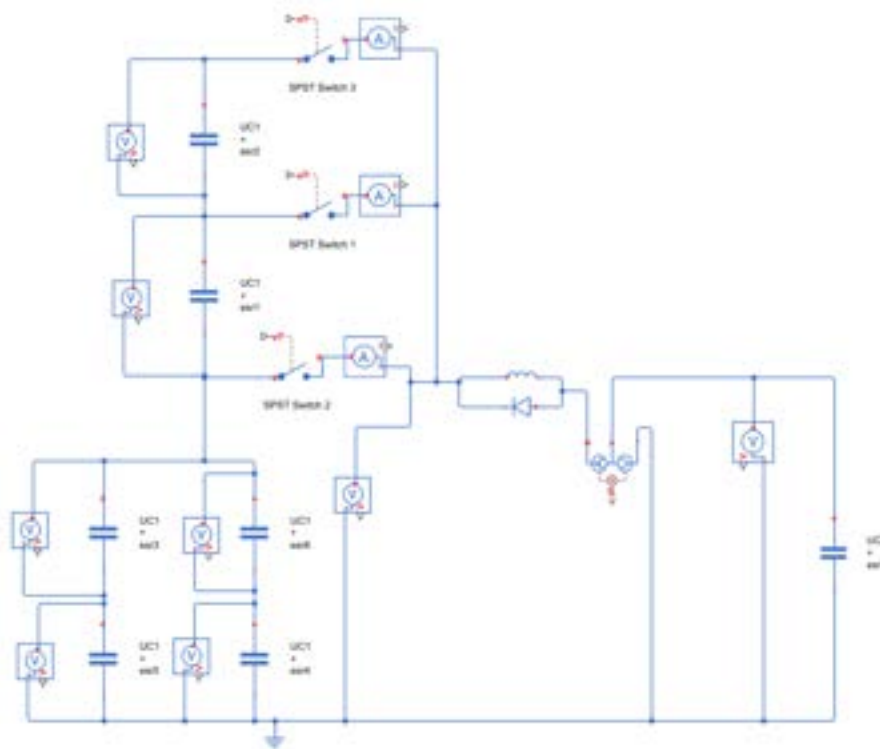


Fig. 10. Ricostruzione semplificata del circuito realizzato.

3.1.2 Modulo per la gestione della fase di ricarica rapida

Il modulo gestionale è un *subsystem*, ossia un modulo la cui complessità giustifica la creazione ad hoc di un sottosistema per svolgere determinate funzioni. Si compone di svariati operatori logici connessi fra loro, il cui compito principale è quello di aprire e chiudere gli interruttori al giusto momento, consentendo in questo modo la modulazione delle scariche.

Il blocco gestionale è programmato in maniera tale da troncare le tre scariche non appena l'intensità di corrente delle stesse scende sotto dei valori specifici, i quali possono essere diversi a seconda della scarica in questione. Sono stati pertanto impiegati dei *memory loop* affinché la condizione per l'interruzione della scarica sia non solo l'intensità di corrente al di sotto di una certa soglia, ma anche che questa avvenga con un andamento decrescente, in modo tale da evitare che i valori nulli iniziali inibiscano la scarica successiva.

I *memory loop* hanno pertanto lo scopo di immagazzinare dati circa l'intensità di corrente per poi confrontarli con i dati immediatamente successivi, in maniera tale da comprendere se l'intensità di corrente segue un andamento crescente o decrescente. Solo in quest'ultimo caso l'interruttore è chiamato ad intervenire aprendo il circuito. Il diagramma di flusso che rappresenta concettualmente il processo di modulazione delle scariche è illustrato in Fig. 11.

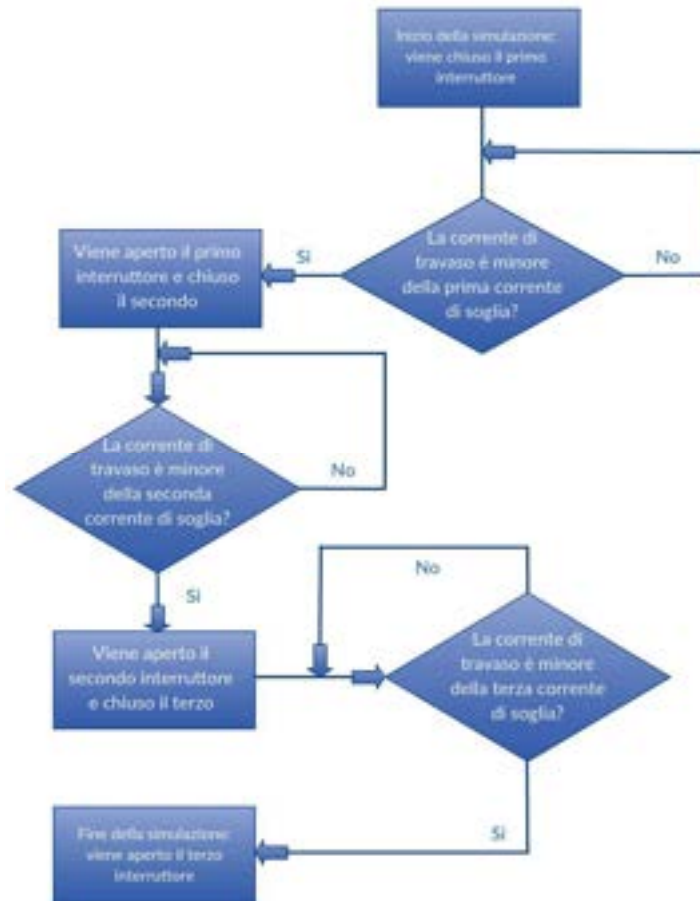


Fig. 11. Diagramma di flusso relativo al modulo gestionale.

3.1.3 Modulo di output

Il modulo di output raggruppa in un'unica interfaccia le misure rilevate dagli strumenti di misura lungo il circuito, agevolando così il processo di esame delle simulazioni effettuate. È composto da due blocchi *Scope*, come si può osservare in Fig. 9, i quali permettono la visualizzazione dell'andamento delle grandezze in esame in funzione del tempo.

Il primo dei due blocchi *Scope*, posto sulla sinistra nel modello, è deputato a raccogliere e a mostrare in output le tensioni residue al termine della scarica relative ai singoli banchi di terra, che di norma risulteranno diverse fra loro in quanto le scariche vengono troncate arbitrariamente dall'utente a seconda delle correnti di soglia impostate in input. Mediante la relativa interfaccia è possibile osservare l'andamento di tutte le suddette tensioni, relative ad ogni singolo banco.

Il secondo e ultimo blocco *Scope* fornisce informazioni circa l'intensità di corrente delle singole scariche, la tensione del banco di bordo, la tensione relativa ai morsetti del banco di terra e la potenza istantanea associata al processo di carica del banco di bordo.

In Fig. 12 è riportato l'esempio di un grafico restituito dal primo blocco *Scope*, in particolare la lettura della potenza istantanea associata al processo di carica del banco di bordo.

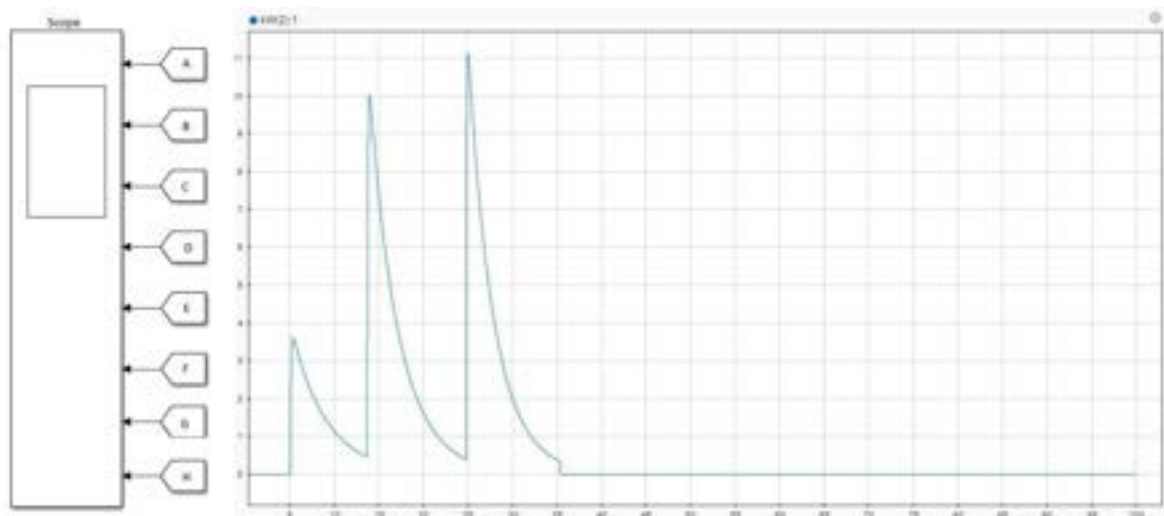


Fig. 12. Il primo blocco Scope ed un esempio del tipico output fornito.

3.1.4 Input e Output

Gli input di cui il modello necessita per la corretta esecuzione della simulazione sono ottenuti da un apposito *m-file* di inizializzazione, aperto ed eseguito in ambiente MATLAB, il cui scopo è quello di inizializzare le variabili circuitali del modello. Nello specifico queste ultime sono:

- la capacità del singolo modulo capacitivo [F];
- la resistenza in serie equivalente del singolo modulo capacitivo o ESR [m Ω];
- l'induttanza dell'induttore [H];
- la resistenza in serie equivalente dell'induttore [m Ω];
- le tensioni nominali dei singoli moduli capacitivi [V];
- la prima corrente di soglia [A];
- la seconda corrente di soglia [A];
- la terza corrente di soglia [A];
- il tempo di attesa che precede la prima scarica [s].

Le grandezze in output sono grandezze dinamiche rilevate dal modulo di output precedentemente descritto e sono:

- l'intensità della corrente di travaso [A];
- la tensione ai morsetti del banco di terra [V];
- la tensione ai morsetti del banco di bordo [V];
- la potenza associata al processo di ricarica [kW];
- le tensioni ai capi delle armature di ogni singolo modulo componente il banco di terra [V].

4 Risultati

In questo paragrafo vengono esposti i risultati delle simulazioni effettuate mediante l'utilizzo del modello esposto nel paragrafo precedente. La descrizione quantitativa dei parametri di inizializzazione precede l'esposizione dei risultati, dopo la quale si procede all'analisi ed al commento degli stessi.

L'obiettivo ultimo di questo elaborato è quello di dimensionare un sistema di ricarica frazionata in tre moduli che sia in grado di ricaricare in un tempo sufficientemente breve il banco di bordo. Tale tempo non deve eccedere consistentemente i trenta secondi, in quanto quest'ultimo è considerato sufficiente per effettuare il trasbordo della totalità dei passeggeri. È evidente che nell'analisi dei risultati i parametri che più determinano l'efficienza del sistema di ricarica sono:

- il tempo di ricarica: in quanto un suo valore eccessivo diminuirebbe consistentemente la velocità commerciale del sistema di trasporto in questione, compromettendo di fatto l'intera fattibilità del progetto;
- l'entità della ricarica: poiché i supercondensatori sono caratterizzati da una bassa energia specifica di accumulo e pertanto una ricarica parziale di questi ultimi accentuerebbe ancor più il loro principale difetto, compromettendo la competitività del sistema di accumulo.

Come è facile immaginare, quanto più il tempo di ricarica diminuisce, tanto minore è la carica immagazzinata nei banchi di bordo tramite il processo di travaso. L'obiettivo appena esposto si traduce nello studio della relazione fra questi due parametri, effettuato mediante l'analisi di diversi frazionamenti del processo di ricarica, in maniera tale da definire la configurazione più vantaggiosa. Le configurazioni prese in considerazione sono quelle che garantiscono una durata del processo di ricarica compresa approssimativamente fra i 20 ed i 30 secondi. È bene tenere a mente che l'intero processo di ricarica ha una durata maggiore di quella dell'effettivo processo di travaso, in quanto comprende l'abbassamento e l'innalzamento del pantografo di ricarica in modo da garantire il collegamento del veicolo al banco di terra. La valutazione dei tempi di predisposizione e di scollegamento del pantografo non è stato approfondito in questa fase del progetto.

4.1 Inizializzazione

Il modello utilizzato necessita di essere correttamente inizializzato mediante la compilazione di un file in ambiente MATLAB, allo scopo di introdurre le informazioni esposte in questo paragrafo. Nello specifico, sono stati creati pertanto due file di inizializzazione in relazione alle due configurazioni precedentemente esposte (LV e HV).

Configurazione Low-Voltage (scala ridotta ma significativa)

Capacità del singolo modulo: 250 F

Resistenza serie equivalente (ESR) del singolo modulo: 4 m

Induttanza: 5 mH

Resistenza serie equivalente (ESR) dell'induttore: 50 m

Tensione nominale del singolo modulo: 16 V

Prima corrente di soglia: 15 A, 20 A, 35 A

Seconda corrente di soglia: 10 A, 20 A, 30 A

Terza corrente di soglia: 7 A, 15 A, 30 A

Tempo di attesa 10 s

Configurazione High-Voltage (scala reale)

Capacità del singolo modulo: 63 F

Resistenza serie equivalente (ESR) del singolo modulo: 18 m

Induttanza: 5.4 mH

Resistenza serie equivalente (ESR) dell'induttore: 155 m

Tensione nominale del singolo modulo: 125 V

Prima corrente di soglia: 25 A, 40 A, 60 A

Seconda corrente di soglia: 15 A, 30 A, 50 A

Terza corrente di soglia: 10 A, 25 A, 50 A

Tempo di attesa 10 s

4.2 Risultati delle simulazioni

Molteplici combinazioni delle tre correnti di soglia sono state valutate e simulate, tuttavia per brevità, la descrizione dettagliata dei risultati di output è limitata solo alla selezione più significativa. Altre simulazioni saranno invece sinteticamente esposte in tabelle riassuntive in modo da fornire un'idea globale dell'andamento delle principali grandezze. Per rendere significativo il confronto fra queste, le combinazioni sono state scelte in maniera tale da risultare eterogenee fra loro: alcune privilegiano la rapidità del processo di carica, altre mirano al riempimento completo dei banchi di bordo ed altre ancora possiedono caratteristiche intermedie fra quelle appena enunciate. Si è verificato che, a parità della somma delle tre correnti di soglia, le combinazioni che garantiscono migliori prestazioni del sistema sono quelle caratterizzate da un ordine delle correnti di soglia decrescente.

4.2.1 Low-Voltage - Esempi significativi

Vengono di seguito riportate tre combinazioni di correnti di soglia, ritenute più significative rispetto a tutte le simulazioni effettuate. Nello specifico, le combinazioni prese in considerazione sono:

prima combinazione: 15 A, 10 A e 7 A;

seconda combinazione: 20 A, 20 A e 15 A;

terza combinazione: 35 A, 30 A e 30 A.

Prima combinazione

Le tre correnti di soglia per la prima combinazione proposta sono rispettivamente 15 A, 10 A e 7 A. Di seguito vengono riportati i grafici ed i risultati ottenuti con questa combinazione.

La prima combinazione è quella che garantisce il maggiore livello di carica entro i tempi proposti, prolungandosi per poco più di 30 secondi. La percentuale di ricarica raggiungibile è pari al 96.3%, che è considerato un ottimo risultato poiché il limite asintotico per un processo di ricarica infinita si assesta attorno al 98.35%. Inoltre, fra le combinazioni prese in considerazione, è quella caratterizzata dal minore picco di corrente. La durata del processo si configura pertanto come l'unica caratteristica sfavorevole della combinazione in questione.

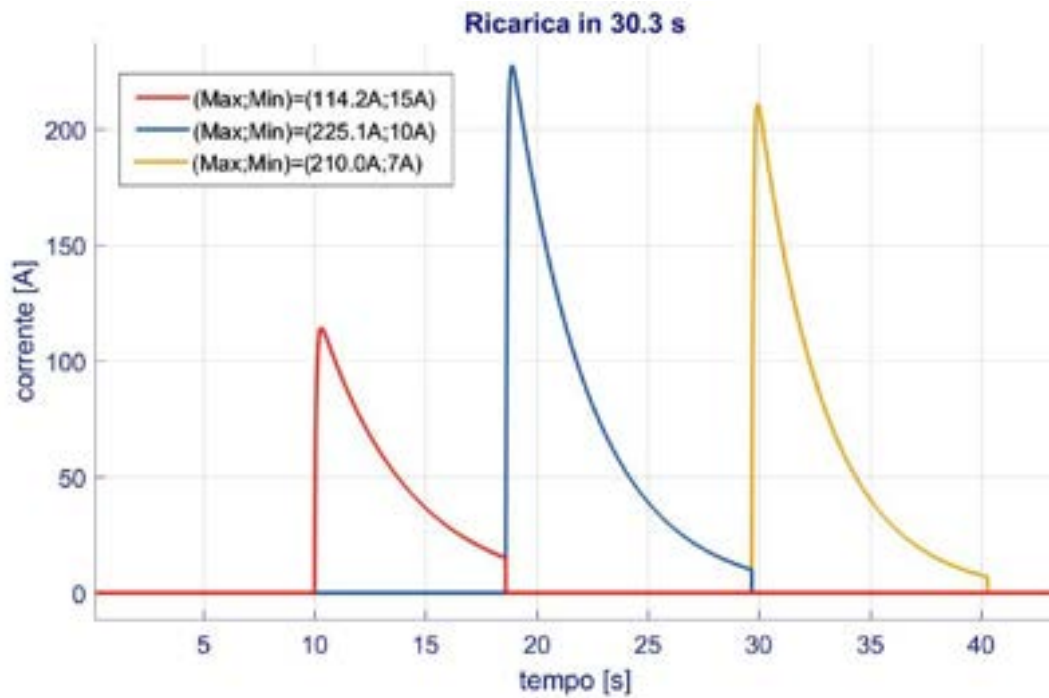


Fig. 13. Andamento della corrente di travaso nel processo di ricarica relativo alla prima combinazione.

Tab. 1 - Riassunto delle prestazioni relative alla prima combinazione

Prima combinazione	
Correnti di soglia [A]	15 10 7
Tempo di ricarica [s]	30.30
Tensione finale [V]	47.10
Percentuale di ricarica %	96.26
Corrente di picco [A]	225.1

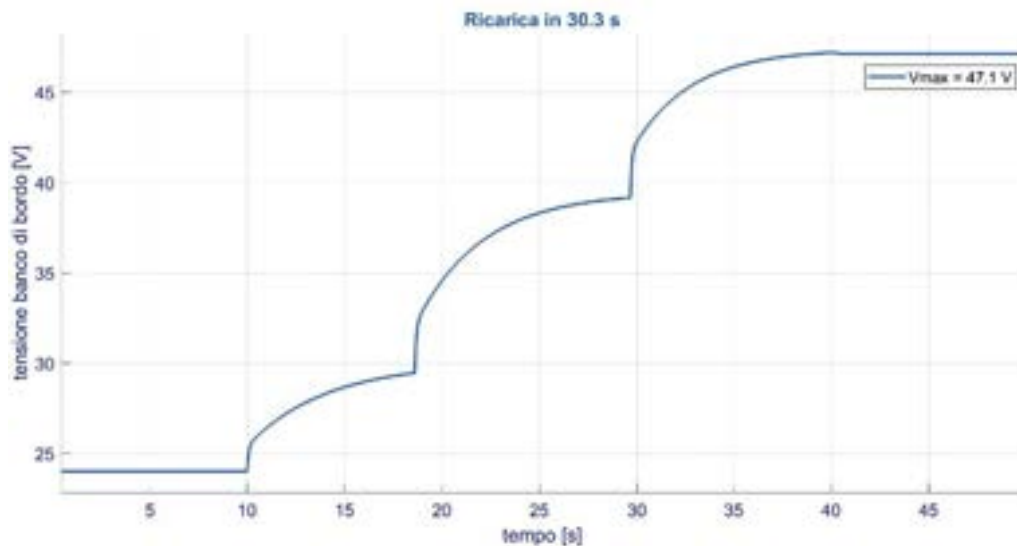


Fig. 14. Andamento della tensione ai capi del banco di bordo durante il processo di ricarica relativo alla prima combinazione.

Seconda combinazione

Le correnti di soglia per la seconda combinazione proposta sono rispettivamente 20 A, 20 A e 15 A. Di seguito vengono riportati i grafici ed i risultati ottenuti con questa combinazione.

La seconda combinazione, se confrontata alla prima, riduce il tempo di ricarica quasi del 20% (poco meno di 6 secondi) a fronte di una perdita del livello di carica di un punto e mezzo percentuale: questo può essere un compromesso accettabile a seconda delle condizioni di impiego. L'aumento della prima corrente di soglia rispetto alla prima combinazione comporta un aumento della corrente di picco del 2.6%. La combinazione in oggetto si presenta come una via di mezzo fra le altre due presentate.

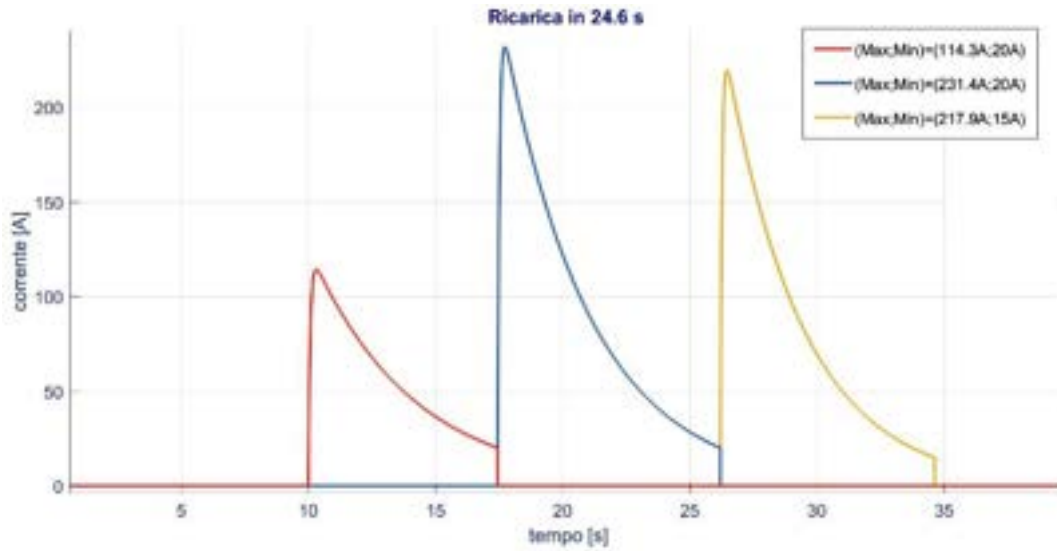


Fig. 15. Andamento della corrente di travaso nel processo di ricarica relativo alla seconda combinazione.

Tab. 2 - Riassunto delle prestazioni relative alla seconda combinazione

Prima combinazione	
Correnti di soglia [A]	20 20 10
Tempo di ricarica [s]	24.60
Tensione finale [V]	46.70
Percentuale di ricarica %	94.65
Corrente di picco [A]	231.4

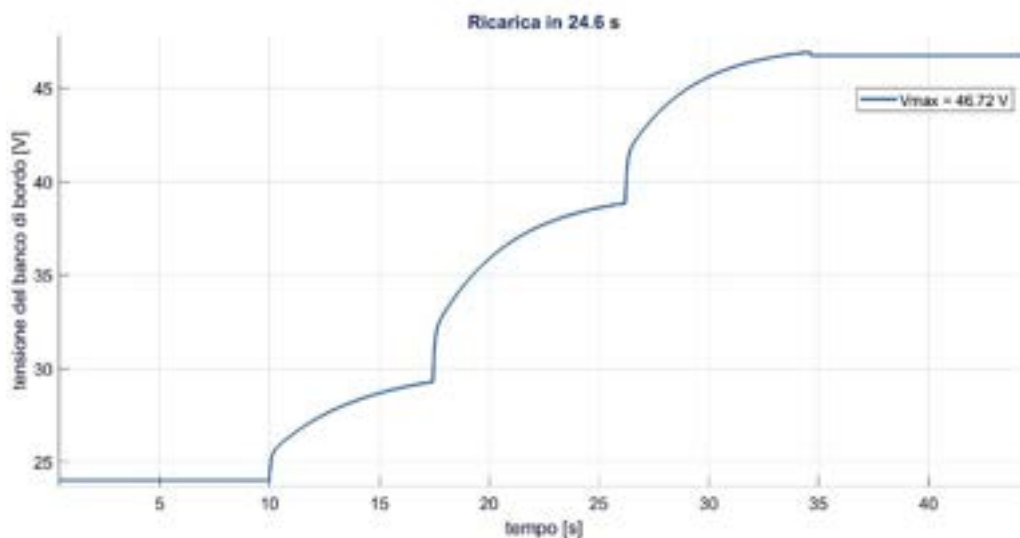


Fig. 16. Andamento della tensione ai capi del banco di bordo durante il processo di ricarica relativo alla seconda combinazione.

Terza combinazione

Le correnti di soglia per la terza combinazione proposta sono rispettivamente 35 A, 30 A e 30 A. Di seguito vengono riportati i grafici ed i risultati ottenuti con questa combinazione.

La terza combinazione è la più rapida fra quelle proposte: se paragonata alla prima, permette una diminuzione superiore al 30% del tempo di ricarica (oltre 10 s in meno) fornendo un livello di carica inferiore di quattro punti percentuali, che si traduce in più di 1 V di differenza fra le tensioni finali relative alle due combinazioni suddette. La corrente di picco registra invece un aumento dell'8.2% rispetto al picco relativo alla prima combinazione. Il guadagno di tempo è estremamente consistente e, sebbene siano possibili anche configurazioni più rapide, non si ritiene opportuno scegliere un livello di carica inferiore a quello della terza combinazione. In ogni caso non è detto che le condizioni di impiego permettano di adottare anche una combinazione di questo tipo a causa della possibile inadeguatezza del livello di carica fornito.

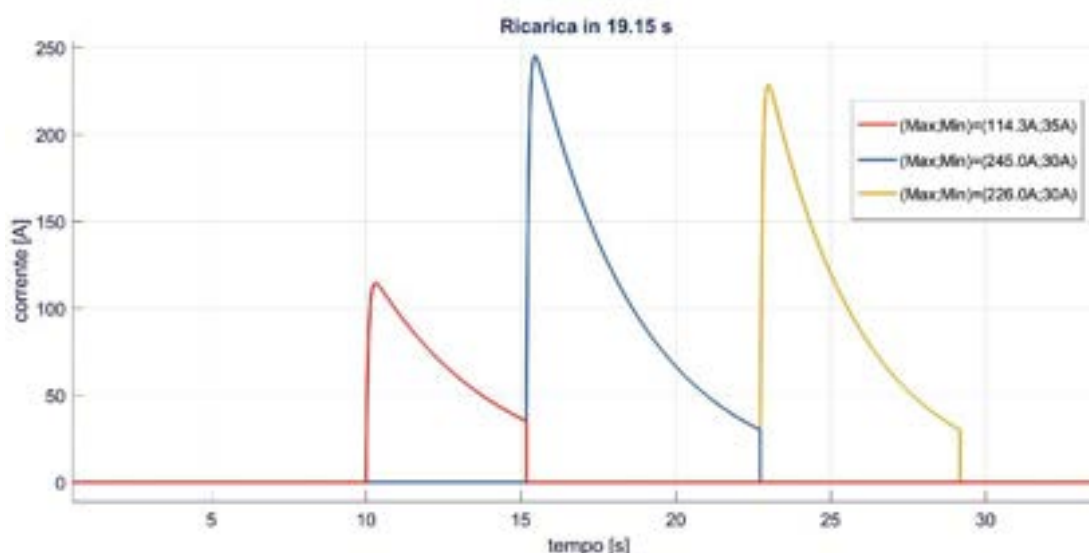


Fig. 17. Andamento della corrente di travaso nel processo di ricarica relativo alla terza combinazione.

Tab. 3 - Riassunto delle prestazioni relative alla seconda combinazione

Prima combinazione	
Correnti di soglia [A]	35 30 30
Tempo di ricarica [s]	19.15
Tensione finale [V]	46.00
Percentuale di ricarica %	91.84
Corrente di picco [A]	245.0

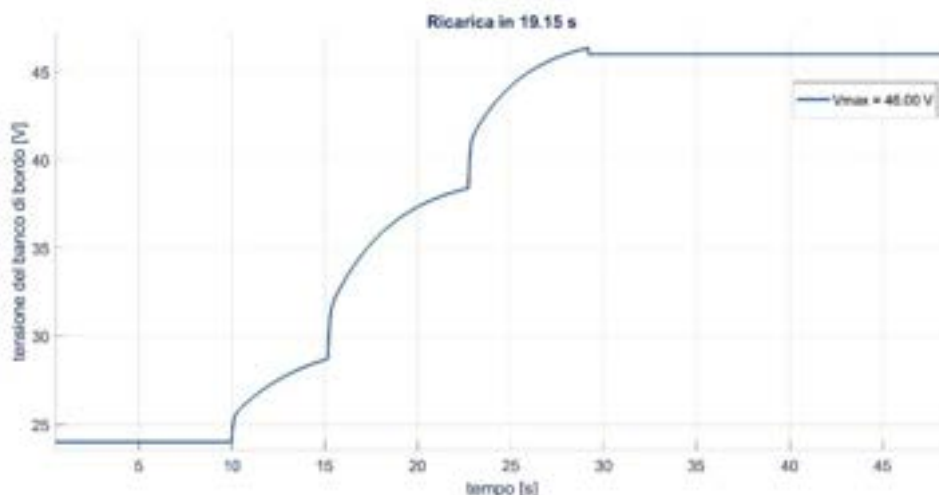


Fig. 18. Andamento della tensione ai capi del banco di bordo durante il processo di ricarica relativo alla terza combinazione.

4.2.2 Prestazioni del sistema di ricarica Low-Voltage

Si riportano di seguito alcune delle altre combinazioni simulate e le relative prestazioni, grazie alle quali è stato possibile costruire i grafici seguenti. Alle varie combinazioni simulate vengono associati i tempi di ricarica, le tensioni finali del banco di bordo, la percentuale di ricarica del banco di bordo e la corrente massima registrata durante la simulazione. Le combinazioni evidenziate sono quelle esposte precedentemente.

Tab. 4 - Tabella riassuntiva delle prestazioni del sistema LV

Correnti di soglia [A]	Tempo di ricarica [s]	Tensione nominale [V]	Percentuale di ricarica %	Picco di corrente [A]
10 ⁻² 10 ⁻² 10 ⁻²	~100	47.60	98.34	214.5
5 5 5	38.00	47.35	97.31	218.9
10 7 5	34.00	47.30	97.10	223.2
15 10 7	30.35	47.10	96.28	225.1
15 15 10	27.50	47.00	95.87	227.5
20 20 15	24.60	46.70	94.65	231.4
25 20 20	22.90	46.50	93.84	236.2
30 25 25	20.90	46.20	92.64	240.6
35 30 30	19.15	46.00	91.84	245.0

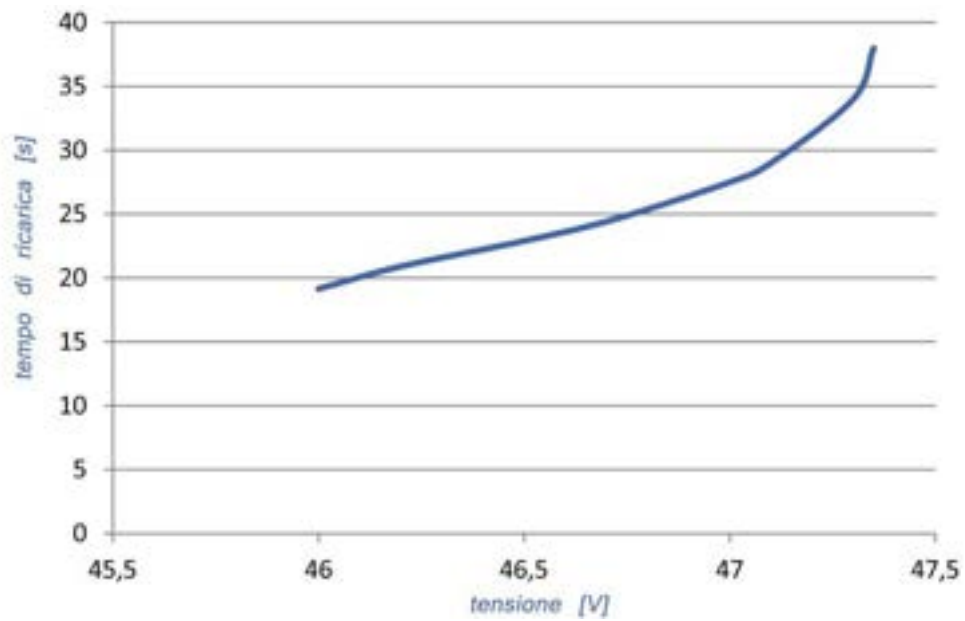


Fig. 19. Grafico che associa il tempo di ricarica alla tensione dei banchi di bordo alla fine del processo.

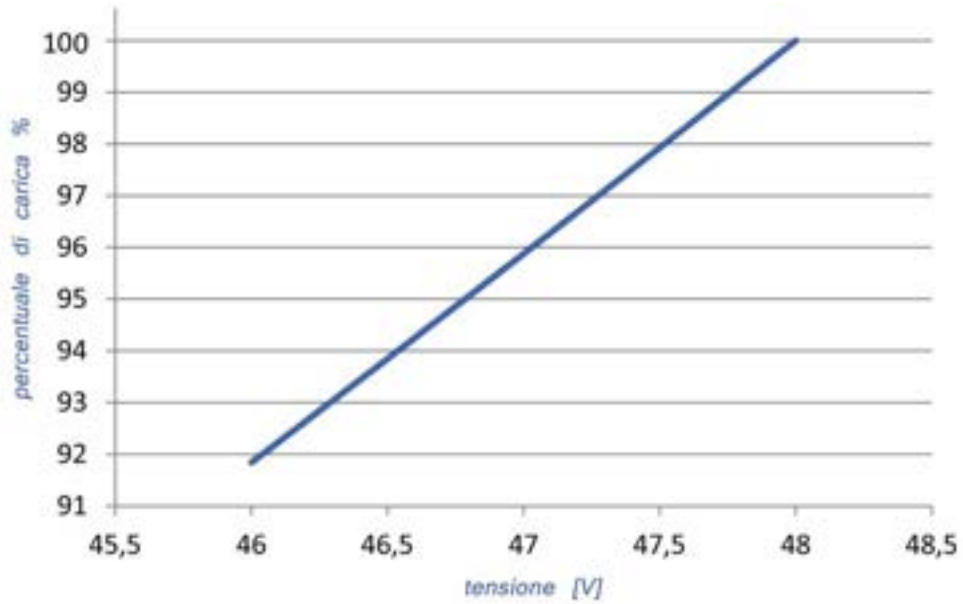


Fig. 20. Grafico che associa la percentuale di ricarica alla tensione ai capi di una serie di tre condensatori da 16 V.

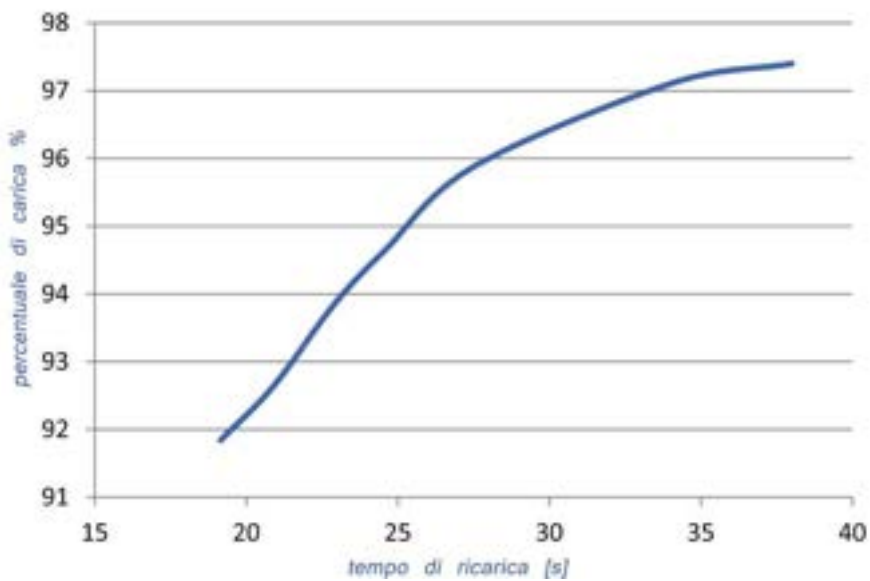


Fig. 21. Grafico che associa il tempo di ricarica alla percentuale di carica alla fine del processo per una serie di tre condensatori da 16 V.

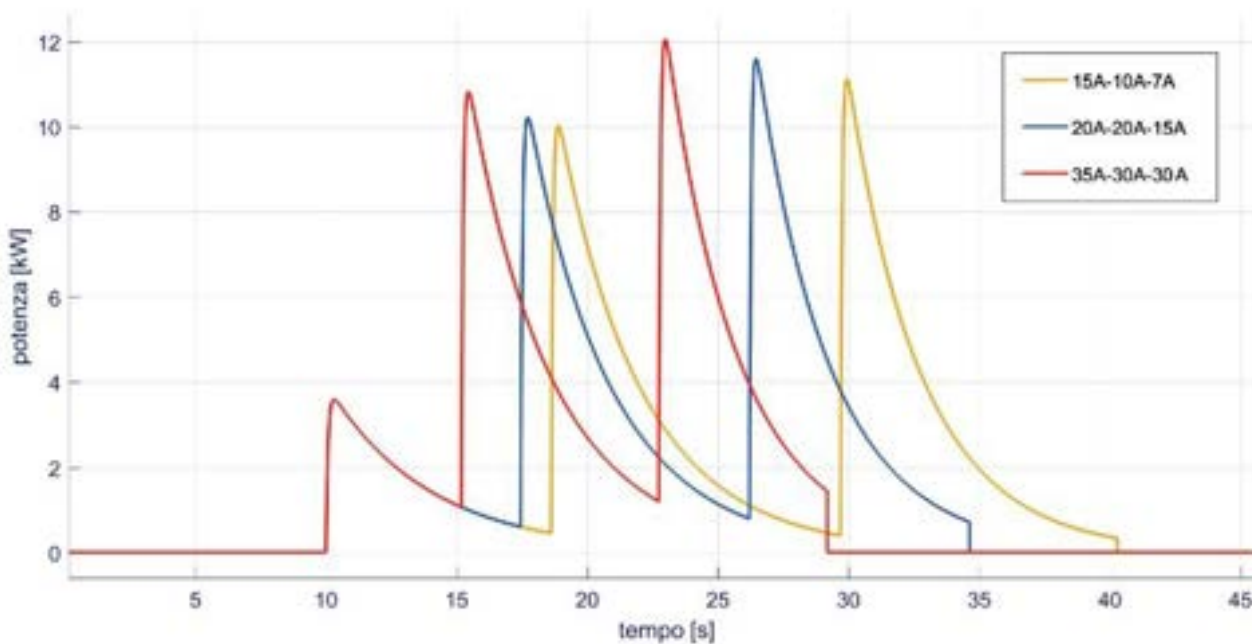


Fig. 22. Andamento della potenza nel tempo nelle simulazioni relative alle tre combinazioni LV proposte.

Tab. 5 - Picchi di potenza registrati nelle simulazioni relative alle tre combinazioni LV proposte

Combinazione delle correnti di soglia [A]	Primo picco [kW]	Secondo picco [kW]	Terzo picco [kW]
15 10 7	3.7	10.0	11.0
20 20 15	3.7	10.2	11.6
35 30 30	3.7	10.7	12.1

4.2.3 High-Voltage - Esempi significativi

Vengono di seguito riportate tre combinazioni di correnti di soglia, ritenute più significative rispetto a tutte le simulazioni effettuate. Nello specifico, le combinazioni prese in considerazione sono:

- prima combinazione: 25 A, 15 A e 10 A;
- seconda combinazione: 40 A, 30 A e 25 A;
- terza combinazione: 60 A, 50 A e 50 A.

Prima combinazione

Le correnti di soglia per la prima combinazione proposta sono rispettivamente 25 A, 15 A e 10 A. Di seguito vengono riportati i grafici ed i risultati ottenuti con questa combinazione.

Analogamente alla configurazione LV, questa prima combinazione è la più performante dal punto di vista del livello di carica (97.11%), il quale è garantito entro i 30 secondi stabiliti. Il limite asintotico per un processo di ricarica di durata infinita è fissato attorno al 98.35%; questo rende di fatto la prima combinazione la più performante dal punto di vista dell'efficacia del processo di carica. La corrente di picco risulta inoltre la più piccola fra le tre combinazioni proposte.

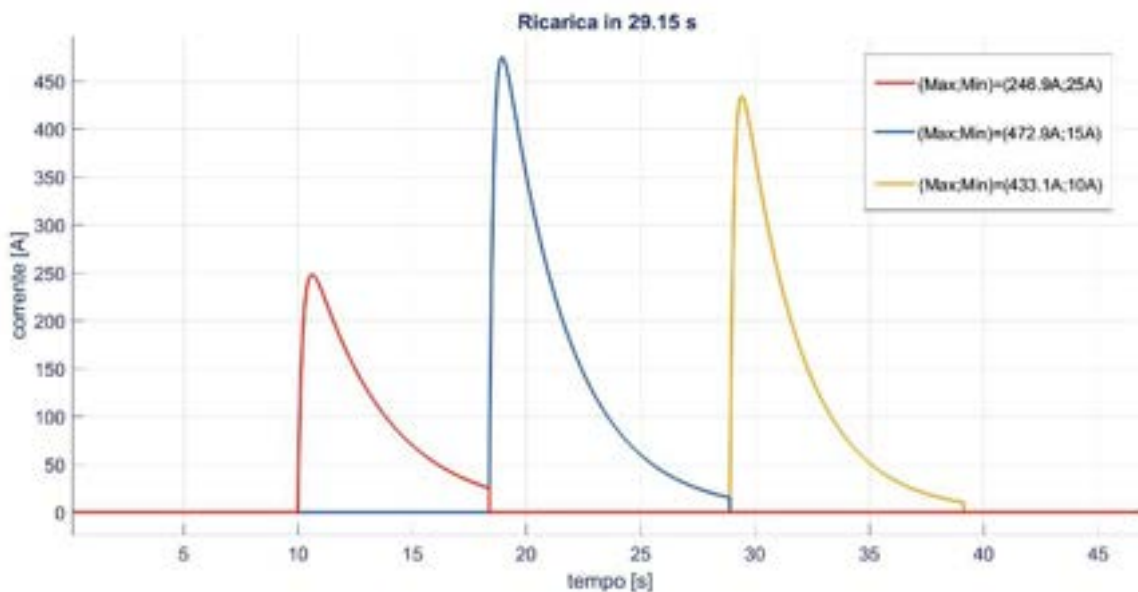


Fig. 23. Andamento della corrente di travaso nel processo di ricarica relativo alla prima combinazione.

Tab. 6 - Riassunto delle prestazioni relative alla prima combinazione

Prima combinazione	
Correnti di soglia [A]	25 15 10
Tempo di ricarica [s]	29.15
Tensione finale [V]	369.55
Percentuale di ricarica %	97.11
Corrente di picco [A]	472.9

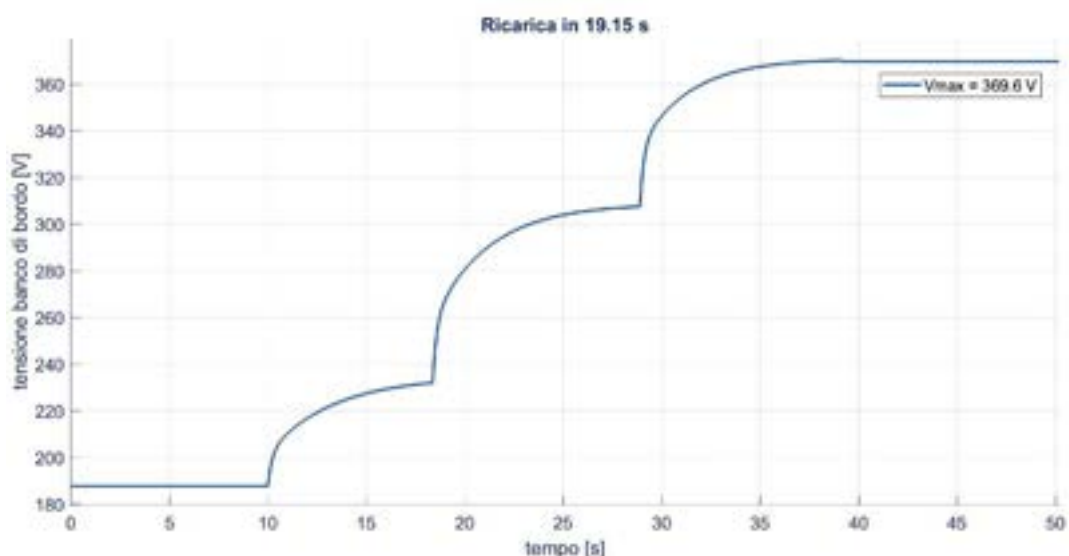


Fig. 24. Andamento della tensione ai capi del banco di bordo durante il processo di ricarica relativo alla prima combinazione.

Seconda combinazione

Le correnti di soglia per la seconda combinazione proposta sono rispettivamente 40 A, 30 A e 25 A. Di seguito vengono riportati i grafici ed i risultati ottenuti con questa combinazione.

La seconda combinazione proposta risulta anch'essa estremamente valida: il processo di travaso viene effettuato in meno di 24 secondi a fronte di un livello di ricarica del 95.75%. Nel confronto con le prestazioni della prima combinazione il tempo viene ridotto di quasi 6 secondi (più precisamente viene ridotto del 19.66%) e la perdita di carica si attesta sull'1.36%. Il consistente guadagno di tempo a spese di una diminuzione non eccessiva del livello di carica rende la combinazione in questione particolarmente vantaggiosa qualora i 30 secondi richiesti dal processo di ricarica relativo alla prima combinazione dovessero essere incompatibili con le esigenze operative della linea di trasporto. La corrente di picco registra invece un aumento del 2.73% rispetto al picco della prima combinazione. La seconda combinazione si presenta quindi come la combinazione più equilibrata fra le tre proposte, in quanto garantisce prestazioni soddisfacenti sia in termini di qualità della ricarica, sia in termini di durata della stessa.

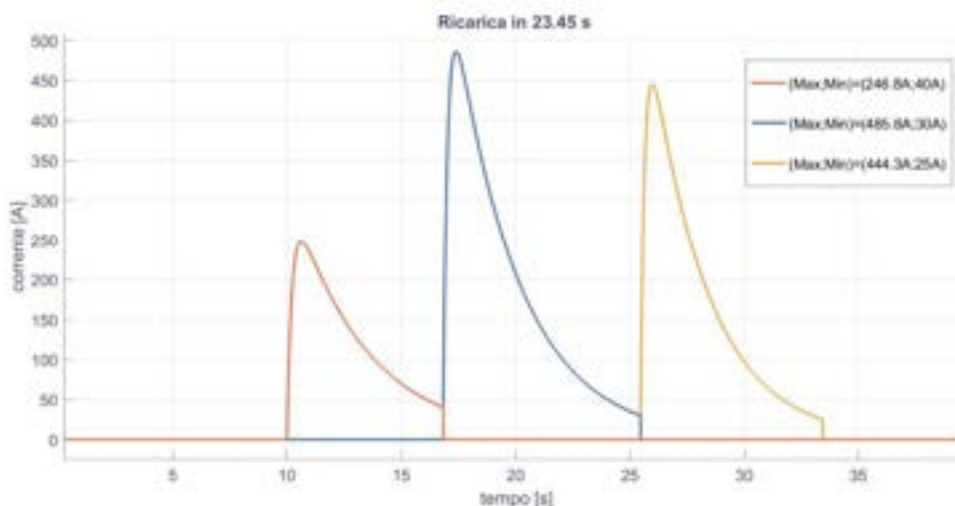


Fig. 25. Andamento della corrente di travaso nel processo di ricarica relativo alla seconda combinazione.

Tab. 7 - Riassunto delle prestazioni relative alla seconda combinazione

Seconda combinazione	
Correnti di soglia [A]	40 30 25
Tempo di ricarica [s]	23.45
Tensione finale [V]	366.95
Percentuale di ricarica %	95.75
Corrente di picco [A]	485.8

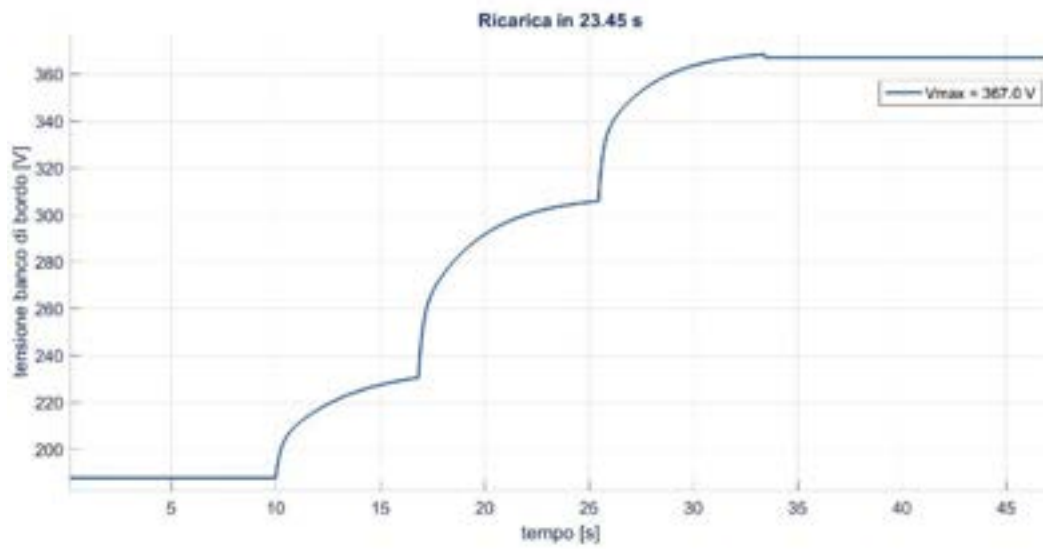


Fig. 26. Andamento della tensione ai capi del banco di bordo durante il processo di ricarica relativo alla seconda combinazione.

Terza combinazione

Le correnti di soglia per la terza combinazione proposta sono rispettivamente 60 A, 50 A e 50 A. Di seguito vengono riportati i grafici ed i risultati ottenuti con questa combinazione.

La terza combinazione è la più rapida fra le tutte le configurazioni esposte: i 19.10 secondi di durata fanno registrare una diminuzione del tempo di ricarica del 35.50% e del 19.66%, se paragonata rispettivamente alla prima e alla seconda combinazione. Nonostante l'estrema rapidità del processo il livello di carica fornito è pari al 93.65%, che si traduce nelle perdite di 3.46 e 2.10 punti percentuali rispetto alla capacità di accumulo totale, sempre se confrontata alle due precedenti combinazioni proposte. La corrente di picco risulta invece la più alta fra le configurazioni analizzate, risultando superiore del 10.00% in confronto alla prima combinazione e del 3.85% rispetto alla seconda.

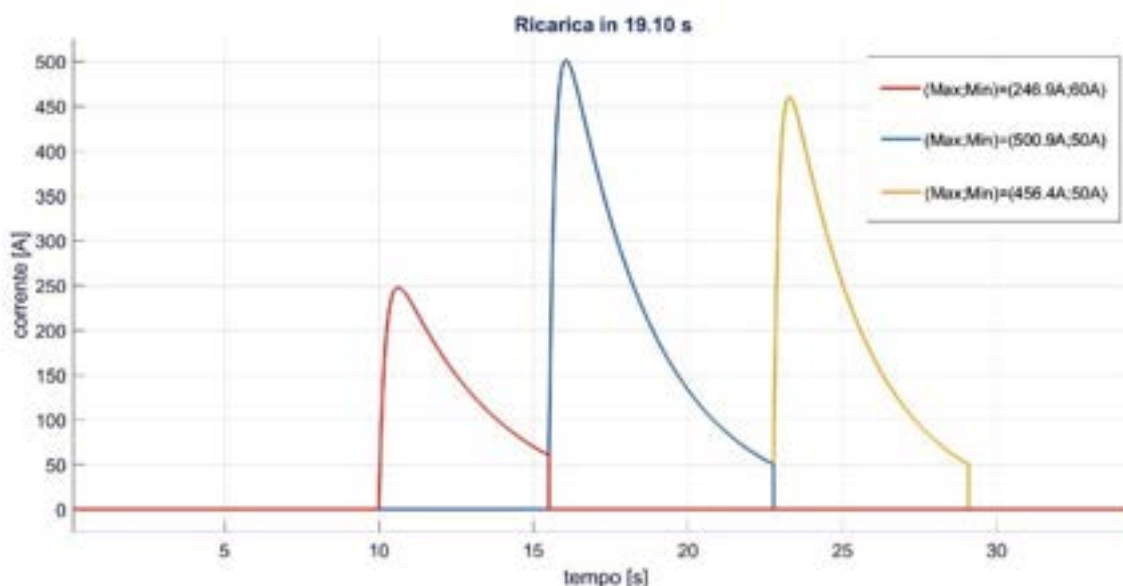


Fig. 27. Andamento della corrente di travaso nel processo di ricarica relativo alla terza combinazione.

Tab. 8 - Riassunto delle prestazioni relative alla prima combinazione

Terza combinazione	
Correnti di soglia [A]	60 50 50
Tempo di ricarica [s]	19.10
Tensione finale [V]	362.90
Percentuale di ricarica %	93.65
Corrente di picco [A]	500.9

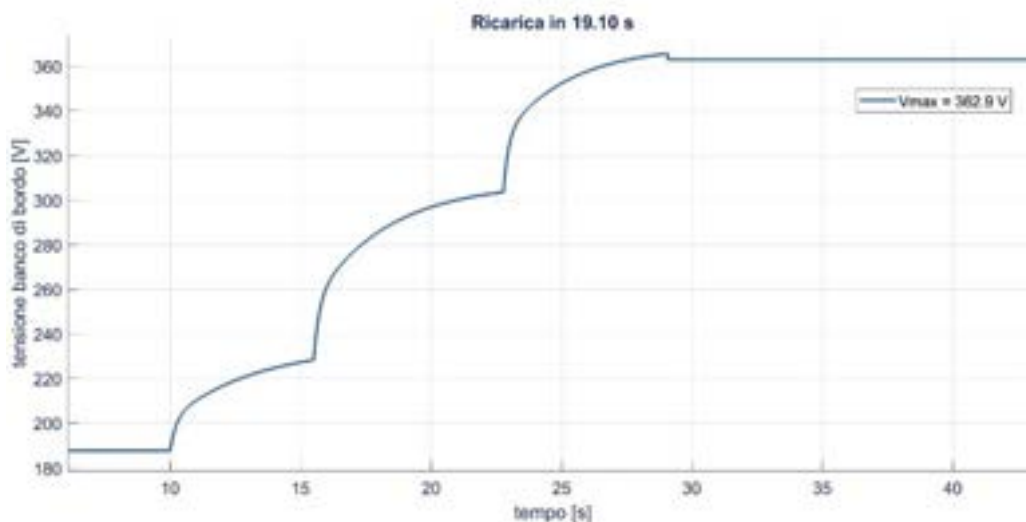


Fig. 28. Andamento della tensione ai capi del banco di bordo durante il processo di ricarica relativo alla terza combinazione.

4.2.4 Prestazioni del sistema di ricarica High-Voltage

Come precedentemente fatto per la soluzione LV, anche per la configurazione HV sono state eseguite molteplici simulazioni, ognuna con una differente combinazione delle tre correnti di soglia. I risultati più significativi ottenuti vengono raccolti nella tabella seguente: da essi è stato possibile costruire i grafici successivamente esposti. Alle varie combinazioni simulate vengono associati i tempi di ricarica, le tensioni finali del banco di bordo, la percentuale di ricarica del banco di bordo e la corrente massima registrata durante la simulazione. Le combinazioni evidenziate sono quelle esposte precedentemente.

Tab. 9 - Tabella riassuntiva delle prestazioni del sistema HV

Correnti di soglia [A]	Tempo di ricarica [s]	Tensione nominale [V]	Percentuale di ricarica %	Picco di corrente [A]
10^{-2} 10^{-2} 10^{-2}	~ 95	371.90	98.35	455.3
20 10 5	32.70	369.70	97.19	470.3
25 15 10	29.15	369.55	97.11	472.9
30 20 15	26.75	368.70	96.67	478.2
35 25 20	24.90	367.80	96.20	482.0
40 30 25	23.45	366.95	95.75	485.8
45 35 30	22.20	366.10	95.31	488.8
50 40 40	20.80	364.60	94.53	493.5
60 50 50	19.10	362.90	93.65	500.9
75 65 65	17.10	360.25	92.29	512.5
85 75 65	16.30	359.75	92.03	520.2

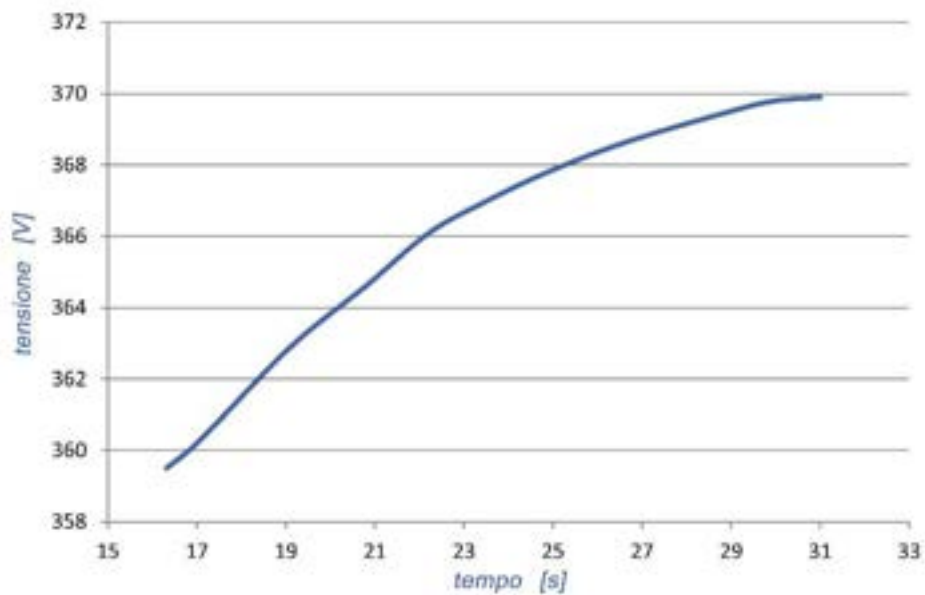


Fig. 29. Andamento del tempo di ricarica in funzione della tensione finale dei banchi di bordo.

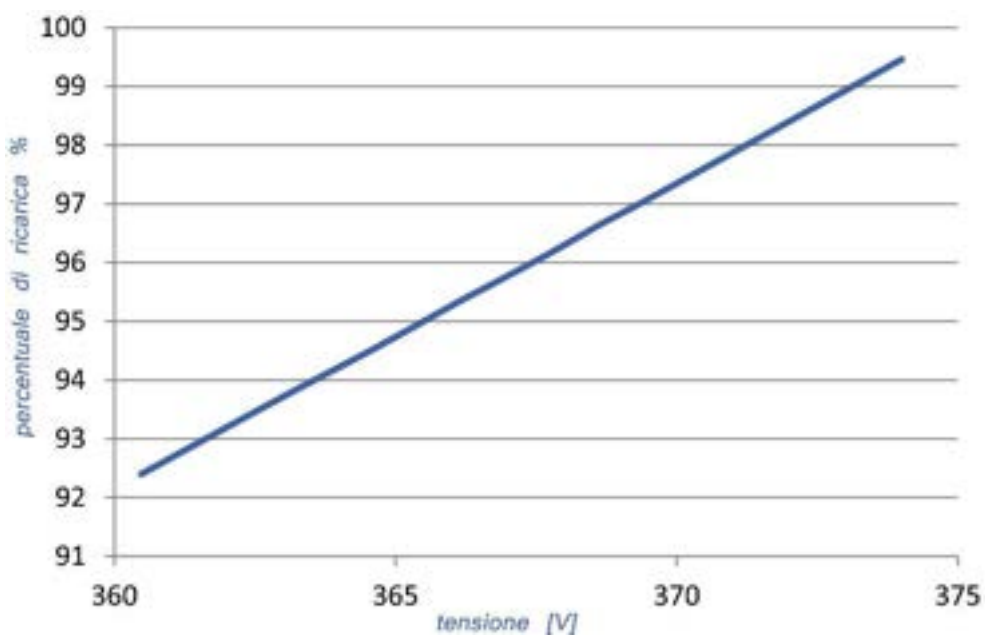


Fig. 30. Andamento della percentuale di carica in funzione della tensione di una serie di tre condensatori da 125 V.

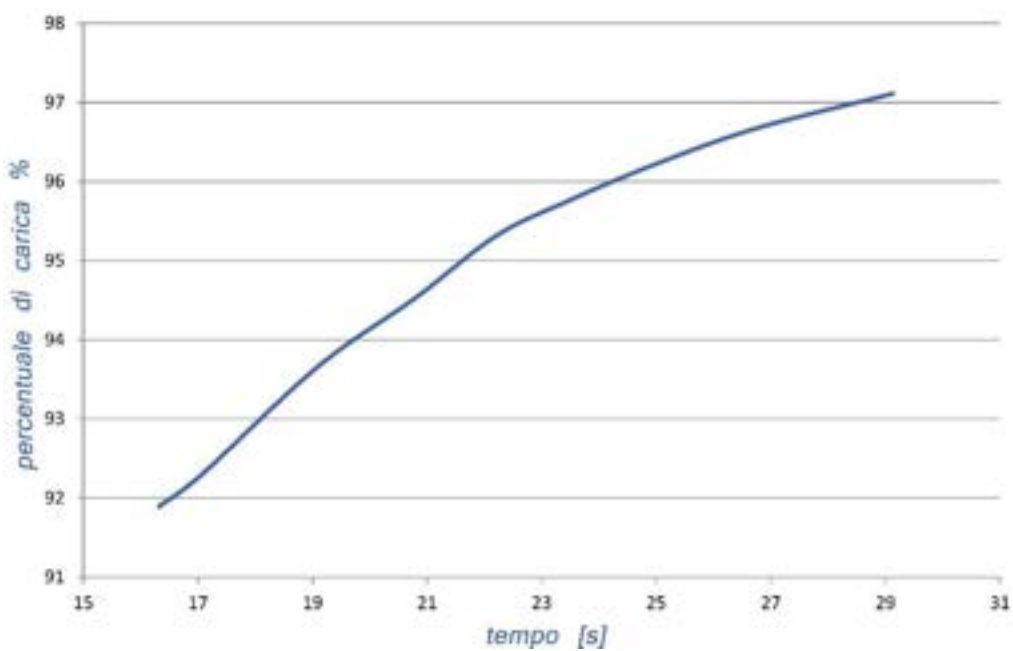


Fig. 31. Andamento della percentuale di carica in funzione della tensione per la serie di tre condensatori da 125 V costituenti il banco di bordo.

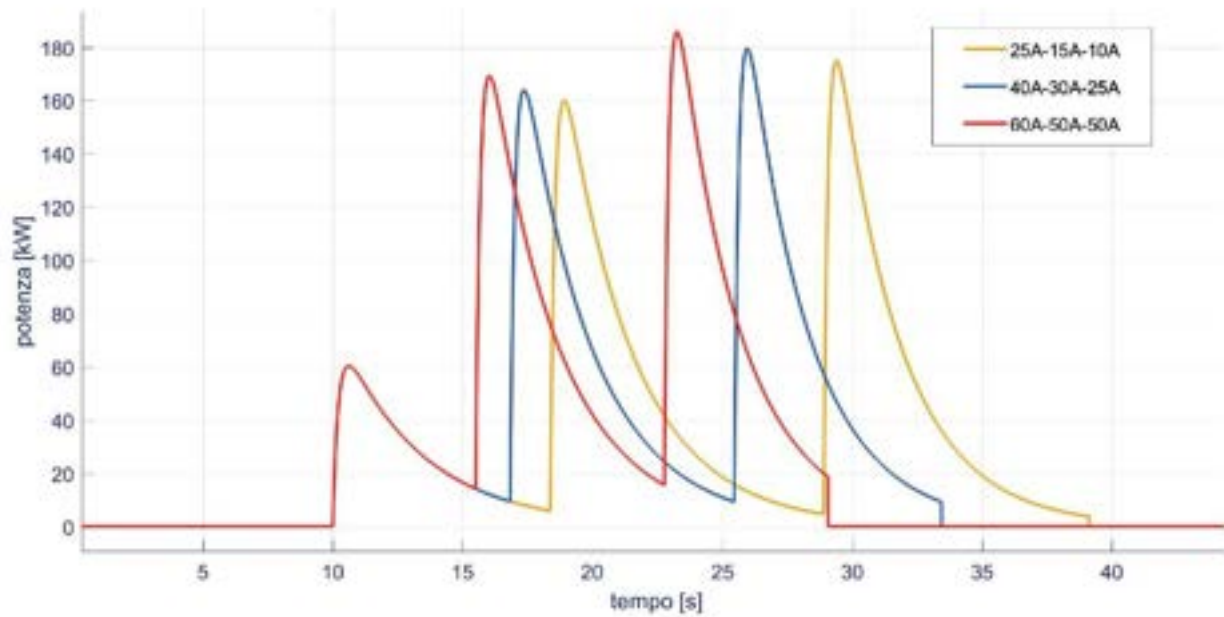


Fig. 32. Andamento della potenza nel tempo nelle simulazioni relative alle tre combinazioni HV proposte.

Tab. 10 - Picchi di potenza registrati nelle simulazioni relative alle tre combinazioni HV proposte

Combinazione delle correnti di soglia [A]	Primo picco [kW]	Secondo picco [kW]	Terzo picco [kW]
25 15 10	60.1	159.9	176.2
40 30 25	60.1	164.1	178.6
60 50 50	60.1	169.4	185.3

5 Analisi delle potenze richieste per la ricarica del banco di terra

L'analisi ed i risultati che verranno mostrati in questo paragrafo, sono relativi al solo caso High-Voltage, ovvero al caso applicativo di un sistema reale, dimensionato per una taglia in scala 1:1.

I risultati qui presentati serviranno per dare una idea di base, non lontana dalla realtà, delle potenze richieste alla linea AC trifase per la ricarica del banco di supercondensatori di terra nei circa 180 secondi ipotizzati. Infatti, sono stati assunti circa 3 minuti come il tempo medio tra due ricariche (travasi) successivi corrispondenti al passaggio di due automezzi [1].

I calcoli e le simulazioni effettuate sono riferiti ad una prima scarica effettuata con i parametri riportati in Fig. 23, ovvero con correnti di soglia pari a 25 A, 15 A e 10 A. Per facilità di comprensione, è stato riportato nuovamente in Fig. 33 il riferimento ai vari moduli di SC; a titolo di esempio la grandezza VC6 è la tensione ai capi del modulo SC denominato C6 come mostrato in figura. Oppure, PC6 è la potenza durante la fase di ricarica associata sempre allo stesso modulo SC.

La ricarica dei vari SC è stata realizzata a corrente costante, immaginando questo il limite del sistema di conversione statica tra la rete AC e i SC stessi.

La Fig. 34a mostra le potenze richieste durante la fase di ricarica frazionata per gruppi, i supercondensatori C6 e C5 sono ricaricati singolarmente mentre il gruppo C1-C3 e C2-C4 è ricaricato senza la separazione dei singoli moduli. L'andamento delle tensioni sui singoli moduli è invece mostrato in Fig. 34b, le varie ricariche si arrestano non appena la tensione misurata singolarmente raggiunge il valore nominale riportato sul data-sheet del componente. Una accurata ed ottimizzata gestione della ricarica del banco di terra, tenendo quindi conto dell'evoluzione temporale della potenza di ricarica, porterà ad una curva di assorbimento praticamente piatta, indice che la potenza assorbita dalla rete sarà praticamente costante. Infine, l'analisi qui presentata mostra che la potenza di ricarica del banco di SC stazionario è ampiamente gestibile da un sistema di illuminazione pubblica.

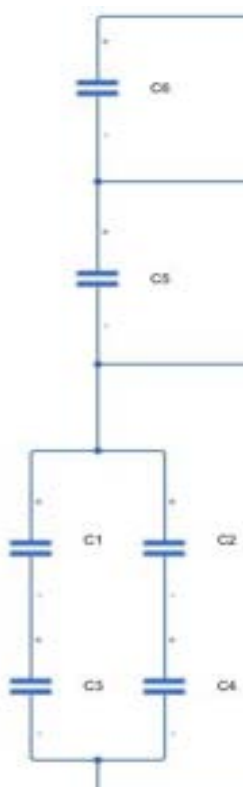


Fig. 33. Configurazione del banco SC di terra.

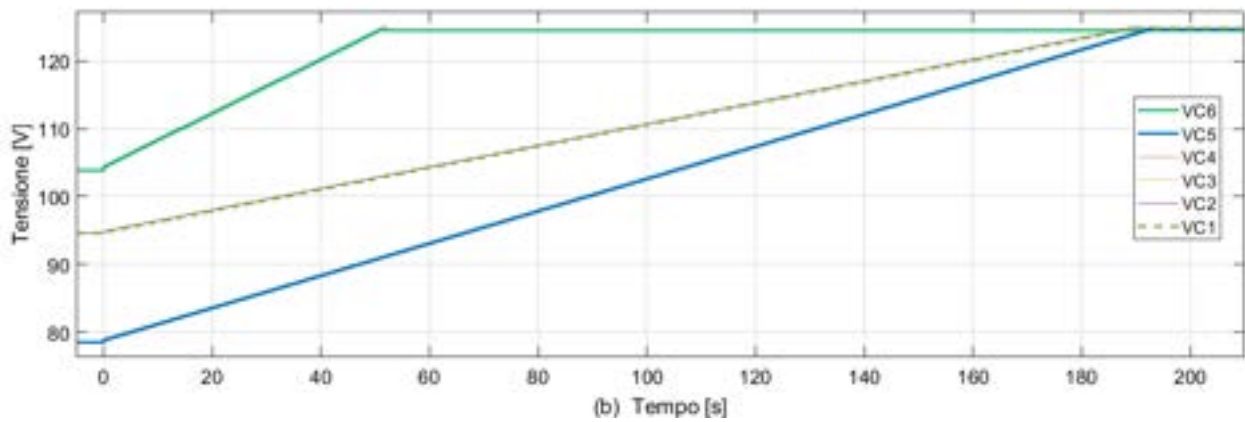
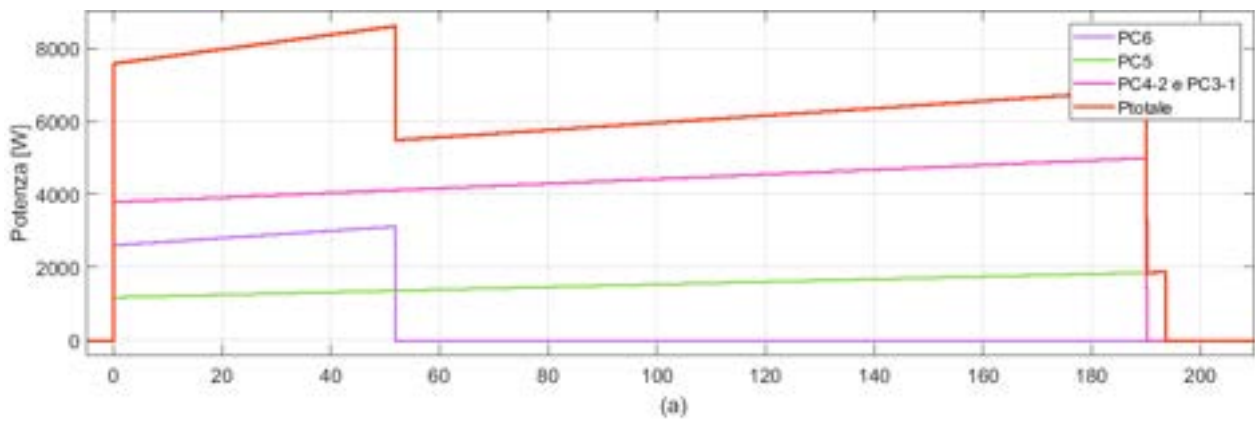


Fig. 34. Potenza di ricarica e tensione relative ai vari moduli SC di terra.

6 Trattazione analitica

Viene riportato in Fig. 35, il modello semplificato del sistema oggetto di studio. Questo per rendere più immediate le considerazioni che vengono di seguito introdotte attraverso l'analisi matematica dello stesso (trattazione analitica).

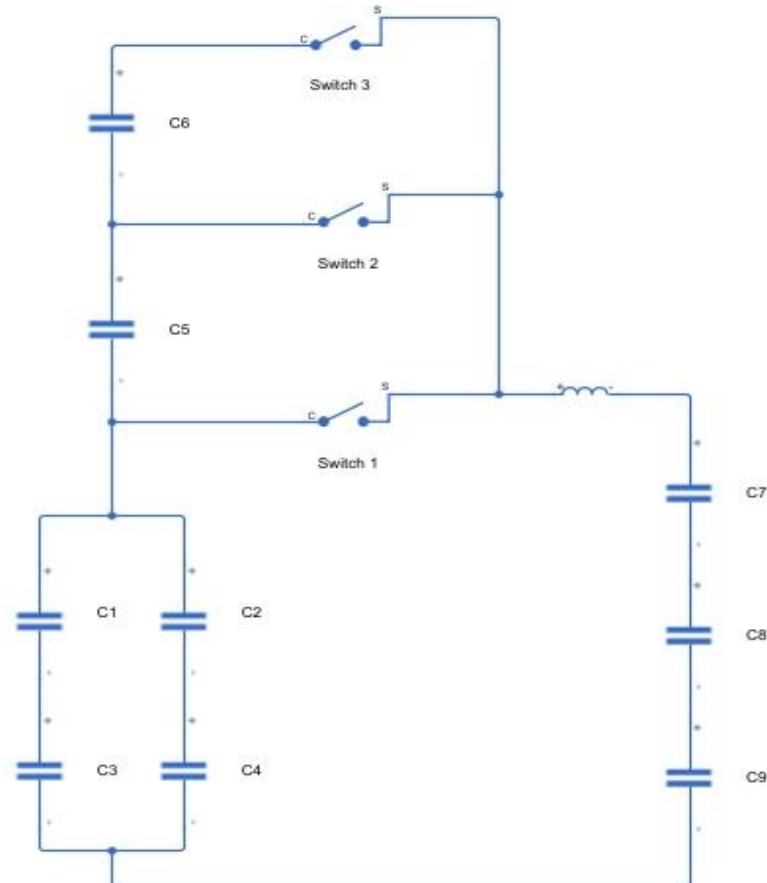


Fig. 35. Modello semplificato del sistema oggetto di studio.

La scelta di utilizzare un sistema di interruttori e di condensatori così costituito, tale cioè che all'inizio della fase di ricarica non tutti i condensatori sulla fermata partecipino contemporaneamente al trasferimento di potenza, è stata fatta tenendo conto del fatto che, in caso contrario, il tempo necessario alla carica completa dei condensatori a bordo del bus sarebbe stato eccessivamente lungo rispetto agli obiettivi di progetto. Pertanto, i condensatori del modulo di terra posti nella parte superiore del modello intervengono in un istante successivo all'inizio della ricarica e ciascuno solo dopo che siano soddisfatte determinate condizioni.

Si è preferito dividere il tempo di ricarica in tre intervalli, essendo per ogni intervallo diversi i valori di alcuni parametri del circuito, ovvero la corrente di soglia e la differenza di potenziale ai capi del banco di condensatori di terra e quella ai capi del banco di condensatori di bordo. Per determinare l'andamento della corrente nel tempo e ricavare successivamente i valori dei picchi di corrente, si è proceduto quindi alla trattazione analitica del problema facendo riferimento a un circuito con differenti parametri e condizioni iniziali per ognuno dei tre intervalli temporali.

Nell'analisi sono state assunte le seguenti ipotesi:

- tutti i condensatori presentano le stesse caratteristiche in termini di: capacità, tensione nominale e resistenza interna (ESR);
- i condensatori del banco di terra si assumono completamente carichi;
- i condensatori del banco di bordo si assumono carichi al 50%.

Tab. 11 - Tabella riassuntiva dei parametri considerati ed i loro valori (LV)

Parametro	Descrizione	Valore
V_N	Tensione nominale del condensatore	16 V
V_1	Tensione ai capi del banco di condensatori di terra	
V_2	Tensione ai capi del banco di condensatori di bordo	
C	Capacità del condensatore	250 F
ESR	Resistenza parassita del condensatore	0.004 Ω
L	Induttanza	0.005 H
ESL	Induttanza parassita	0.05 Ω
	Corrente di soglia per la prima scarica	15 A
	Corrente di soglia per la seconda scarica	10 A
	Corrente di soglia per la terza scarica	7.5 A

6.1 Prima scarica

Dal momento in cui l'autobus giunge alla fermata, la prima scarica avviene dopo un intervallo di tempo di 5 secondi, necessario per l'avvicinamento del pantografo al mezzo di trasporto. All'istante di tempo $t = 5$ s viene chiuso l'interruttore che individua il primo circuito, contenente i condensatori del primo modulo del banco di terra. Si ha quindi un passaggio di carica dal sistema di condensatori di terra, tutti completamente carichi, verso il sistema di condensatori di bordo, carichi solo al 50%.

I quattro condensatori del primo modulo del banco di terra, formano un sistema di condensatori serie-parallelo e possono pertanto essere ricondotti ad un unico condensatore di capacità equivalente C_{1eq} . Lo stesso vale per i tre condensatori del banco montato sull'autobus, i quali, essendo disposti in serie, possono essere ridotti al condensatore di capacità C_{2eq} . I condensatori relativi ai due moduli superiori del banco di terra, non partecipano alla ricarica durante in questa prima fase, in quanto i relativi interruttori sono entrambi aperti. Quanto appena esposto è riassunto nel circuito equivalente della Fig. 36.

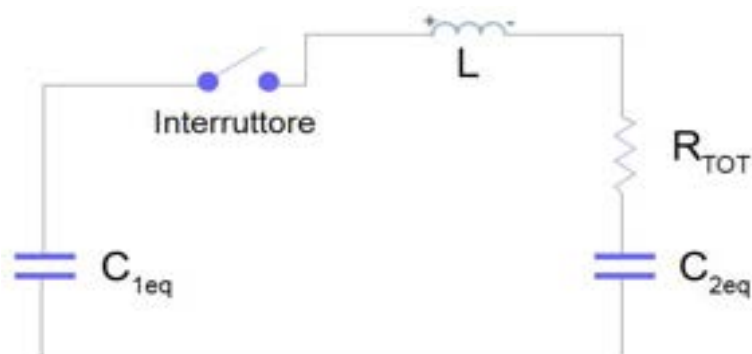


Fig. 36. Circuito equivalente relativo alla prima fase di ricarica.

L'obiettivo di questa prima fase è quello, quindi, di calcolare l'andamento della corrente dal momento di chiusura del primo interruttore, fino all'istante di tempo in cui la corrente raggiunge il valore di soglia fissato a 15 A. Il primo passo da compiere è quello di calcolare le capacità equivalenti dei condensatori C_{1eq} e C_{2eq} . Come precedentemente accennato, considerando i quattro condensatori che formano il primo

modulo del banco di terra, si individuano due rami in parallelo ciascuno contenente due condensatori disposti in serie come in Fig. 37.

Ogni ramo contiene, quindi, un condensatore di capacità $C/2$, dato dalla serie dei due condensatori, ed una resistenza $2 \times ESR$ data dalla serie delle due resistenze interne dei due condensatori considerati. Si noti che ogni condensatore viene considerato come un condensatore ideale in serie con una resistenza interna. Quindi, per ognuno dei due rami in parallelo, si avrebbero una capacità pari a $C/2$, data dalla serie dei due condensatori presenti su quel ramo, e la resistenza $2 \times ESR$, data dalla somma delle due resistenze in serie. Non sarebbe dunque possibile fare il parallelo dei condensatori sui due rami, mostrati in Fig. 37(a). Tuttavia, poiché si ipotizza che i condensatori siano tutti uguali tra loro, si considerano uguali anche i valori delle resistenze interne. Di conseguenza, la corrente si ripartisce allo stesso modo sui due rami. Si ha pertanto che la caduta di tensione ai capi della resistenza sul ramo di sinistra è esattamente uguale a quella della resistenza sul ramo di destra e stessa cosa si può dire della caduta di tensione ai capi del condensatore su ciascuno dei due rami. I punti P e P', evidenziati in Fig. 37(b), hanno quindi lo stesso potenziale e risulta pertanto possibile calcolare la resistenza e la capacità equivalente come se fossero in parallelo a due a due, ottenendo il ramo in Fig. 37(c).

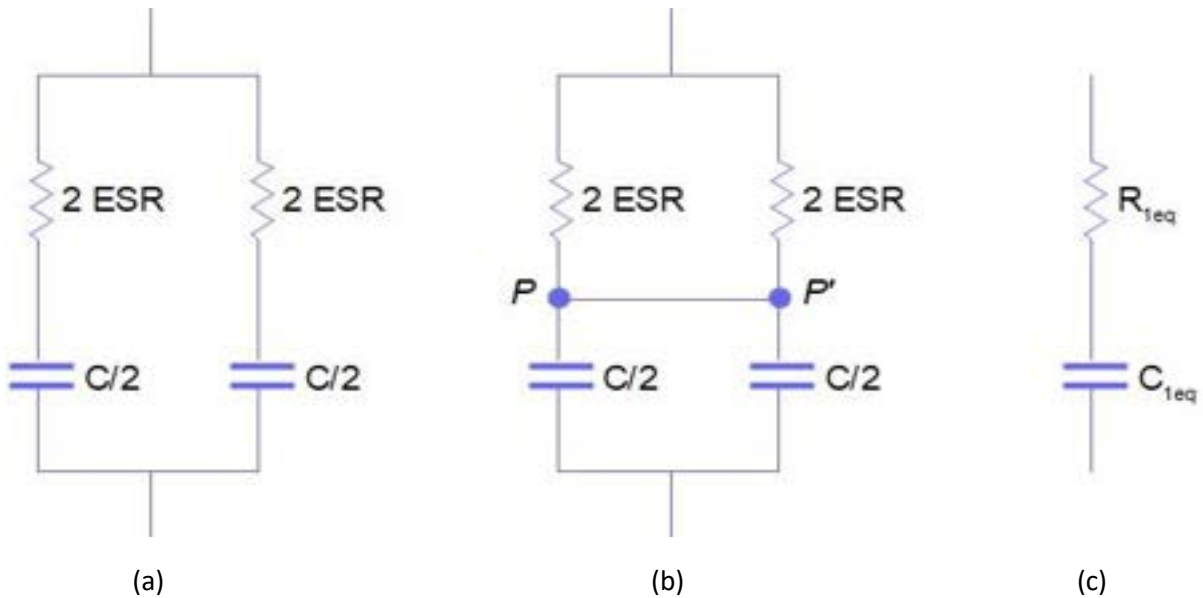


Fig. 37. Costruzione della capacità equivalente del primo modulo del banco di terra.

La capacità equivalente del primo modulo del banco di condensatori di terra vale dunque:

$$C_{1eq} = \left(\frac{C^2}{2C} \right) + \left(\frac{C^2}{2C} \right) = \frac{C}{2} + \frac{C}{2} = C = 250F \quad (1)$$

La resistenza equivalente del banco di condensatori risulta essere pari a:

$$\frac{1}{R_{1eq}} = \frac{1}{2 ESR} + \frac{1}{2 ESR} = \frac{4 ESR}{4 ESR^2} = \frac{1}{ESR} = \frac{1}{0.004} \rightarrow R_{1eq} = R = 4m\Omega \quad (2)$$

Per quanto riguarda invece la capacità la resistenza equivalenti del banco di condensatori di bordo, si ha:

$$C_{2eq} = \frac{1}{\frac{1}{C} + \frac{1}{C} + \frac{1}{C}} = \frac{C}{3} = \frac{250}{3} \approx 83.33 F \quad (3)$$

$$R_{2eq} = 3R = 12m\Omega \quad (4)$$

Considerando C_{1eq} e C_{2eq} come due condensatori in serie, il circuito in Fig. 36 diventa un RLC serie, quindi un circuito del secondo ordine. Verrà ora illustrata la trattazione analitica con riferimento alla prima scarica, che sarà tuttavia valida anche per le due scariche successive, dove cambieranno solo le condizioni iniziali del problema ed il valore di alcuni parametri del circuito elettrico.

Per completezza, si riportano le equazioni di stato di un condensatore e di un induttore, rispettivamente (5) e (6).

$$C \frac{dv}{dt} = i \quad (5)$$

$$L \frac{di}{dt} = v_L \quad (6)$$

Indicando con C_{TOT} la capacità complessiva del circuito, data dalla serie dei due condensatori C_{1eq} e C_{2eq} :

$$C_{TOT} = \frac{1}{\frac{1}{C_{1eq}} + \frac{1}{C_{2eq}}} = \frac{C}{4} = \frac{250}{4} = 62.5 F \quad (7)$$

e con R_{TOT} la resistenza complessiva del circuito, data dalla somma di R_{1eq} del banco di terra, R_{2eq} del banco di bordo e della resistenza parassita dell'induttore (ESL):

$$R_{TOT} = R_{1eq} + R_{2eq} + ESL = R + 3R + 0.05 = 0.066 \Omega \quad (8)$$

si può applicare la seconda legge di Kirchhoff alla maglia del circuito rappresentato in Fig. 36:

$$v_{C_{1eq}} = v_{C_{2eq}} + R_{TOT}i + v_L \quad (9)$$

Dalla quale si ottiene:

$$V_{1iniz} - \int_{t_i}^{t_f} \frac{1}{C_{1eq}} i dt = V_{2iniz} + \int_{t_i}^{t_f} \frac{1}{C_{2eq}} i dt + R_{TOT}i + L \frac{di}{dt} \quad (10)$$

E quindi:

$$0 = V_{2iniz} - V_{1iniz} + \left(\frac{1}{C_{2eq}} + \frac{1}{C_{1eq}} \right) \int_{t_i}^{t_f} i dt + R_{TOT}i + L \frac{di}{dt} \quad (11)$$

Nella quale V_{1iniz} rappresenta la tensione iniziale del banco di condensatori sulla fermata, mentre V_{2iniz} rappresenta la tensione iniziale del banco di condensatori sull'autobus. Derivando rispetto al tempo, si ottiene l'equazione differenziale del secondo ordine:

$$\frac{d^2i}{dt^2} + \frac{R_{TOT}}{L} \frac{di}{dt} + \frac{i}{LC_{TOT}} = 0 \quad (12)$$

Per procedere con la risoluzione di questa equazione, è necessario fissare le condizioni iniziali. Considerando come inizio del processo, il tempo $t_i=5$ s, si ottiene:

$$I_0 = 0$$

$$V_{1iniz} = V_{2iniz} + R_{TOT} I_0 + L \frac{di}{dt} \Rightarrow \frac{di}{dt} = \frac{(V_{1iniz} - V_{2iniz} - R_{TOT} I_0)}{L} \quad (14)$$

L'equazione della corrente viene, pertanto, ottenuta risolvendo il seguente problema di Cauchy:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d^2 i}{dt^2} + \frac{R_{TOT}}{L} \frac{di}{dt} + \frac{i}{LC_{TOT}} = 0 \\ i|_{t_i} = I_0 \\ \frac{di}{dt} \Big|_{t_i} = \frac{(V_1 - V_2 - R_{TOT} I_0)}{L} \end{array} \right. \quad (15)$$

La cui equazione caratteristica associata risulta essere:

$$\lambda^2 + \frac{R_{TOT}}{L} \lambda + \frac{1}{LC_{TOT}} = 0 \quad (16)$$

Le cui radici valgono:

$$\lambda_{1,2} = \frac{-\frac{R_{TOT}}{L} \pm \sqrt{\left(\frac{R_{TOT}}{L}\right)^2 - 4\frac{1}{LC_{TOT}}}}{2} = -\alpha \pm \sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2} \quad (17)$$

Dove, con α viene indicato il fattore di smorzamento e con ω_0 la pulsazione di risonanza

$$\alpha = \frac{R_{TOT}}{2L} \quad [s^{-1}] \quad (18)$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (19)$$

I casi possibili sono i seguenti:

- Sovra smorzamento: $\alpha > \omega_0$
- Smorzamento critico: $\alpha = \omega_0$
- Sotto smorzamento: $\alpha < \omega_0$
- Assenza di smorzamento $\alpha = 0$

Se ai parametri del sistema il esame venissero assegnati i valori ottenuti dal calcolo eseguito in precedenza, la risposta del circuito risulterebbe sovra smorzata. Infatti si avrebbe:

$$\frac{R_{TOT}}{2L} > \frac{1}{\sqrt{LC_{TOT}}} \rightarrow C > \frac{4L}{R_{TOT}^2} \quad (20)$$

Perciò le radici dell'equazione caratteristica $\lambda_{1,2}$ risultano essere reali e distinte.

$$\lambda_{1,2} = -\alpha \pm \sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2} \quad (21)$$

E l'integrale generale dell'equazione differenziale risulta essere il seguente:

$$i = A_1 e^{\lambda_1 t} + A_2 e^{\lambda_2 t} \quad (22)$$

Dove i valori assunti dalle costanti A_1 ed A_2 si potranno ricavare dal sistema delle condizioni iniziali, relative alla corrente ed alla sua derivata, calcolate nell'istante iniziale, rispettivamente:

$$I_0 = A_1 e^{\lambda_1 t_i} + A_2 e^{\lambda_2 t_i} \quad (23)$$

$$\left. \frac{di}{dt} \right|_{t_i} = \lambda_1 A_1 e^{\lambda_1 t_i} + \lambda_2 A_2 e^{\lambda_2 t_i} \quad (24)$$

Nella seguente tabella sono riassunte le condizioni iniziali relative alla prima scarica.

Tab. 12 - Condizioni iniziali relative alla prima scarica

Condizioni iniziali		
$V_{1 \text{iniz}}$	Tensione iniziale ai capi della capacità equivalente C_{1eq}	32 V
$V_{2 \text{iniz}}$	Tensione iniziale ai capi della capacità equivalente C_{2eq}	24 V
I_0	Valore iniziale della corrente	0 A

Per semplicità di calcolo, si considera il tempo $t=0$ come istante di inizio della scarica. Successivamente, per tener conto del fatto che la scarica ha inizio a un istante di tempo diverso da 0, sarà sufficiente effettuare una semplice traslazione temporale. In queste condizioni, i valori assunti da λ_1 , λ_2 , A_1 ed A_2 , risultano quindi essere:

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= 0.247 & \lambda_2 &= 12.953 \\ A_1 &= 125.93 & A_2 &= 125.93 \end{aligned}$$

L'equazione della corrente durante la prima scarica è allora:

$$i = 125.93 e^{-0.247 t} - 125.93 e^{-12.953 t} \quad (25)$$

L'andamento risultante, può essere rappresentato graficamente come in Fig. 38.

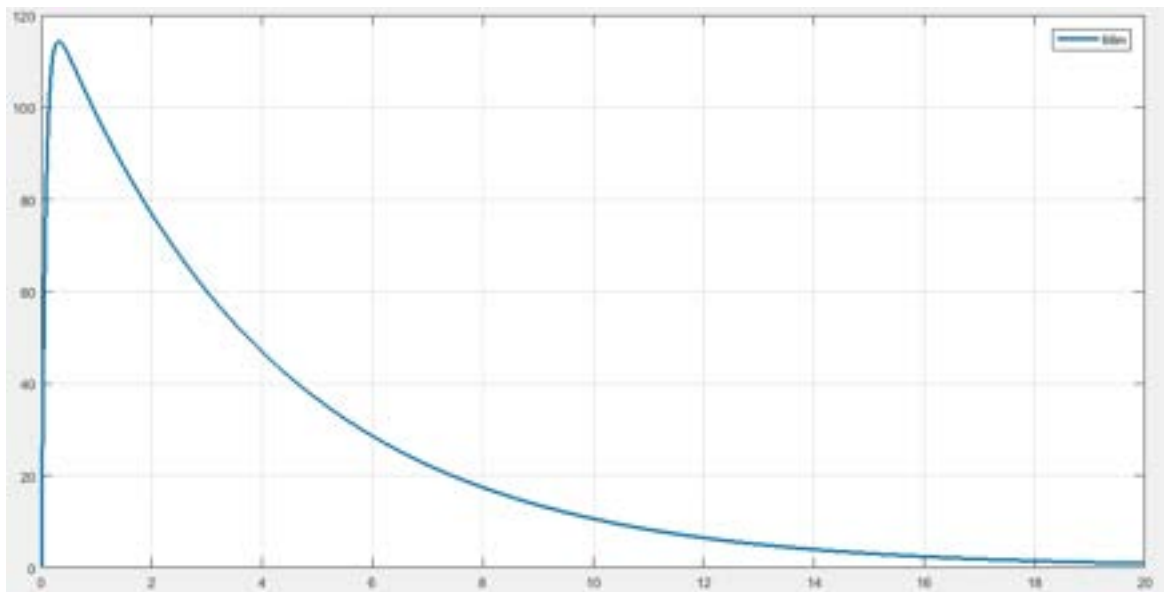


Fig. 38. Andamento della corrente calcolata durante la prima scarica.

La scarica termina quando la corrente raggiunge il valore della prima soglia $i = 15$ A ed ha quindi una durata complessiva di 8.61 s.

Tramite i risultati ottenuti dalle equazioni (10), (22) e (25), può essere calcolata ora la tensione riscontrabile ai capi del primo modulo del banco di condensatori di terra, e la tensione riscontrabile ai capi del banco di condensatori a bordo del veicolo, al termine del periodo che comprende la prima scarica. Considerato che l'istante di tempo finale è $t_f = 8.61$ s, istante nel quale l'intensità della corrente vale 15 A, possono essere calcolati gli integrali che determinano le tensioni appena menzionate. Rispettivamente si ottiene:

$$\begin{aligned}
 V_{1\text{ finale}} &= V_{1\text{ iniz}} - \int_{t_i}^{t_f} \frac{1}{C_{1eq}} i dt = V_{1\text{ iniz}} - \frac{1}{C_{1eq}} \left[\frac{A_1}{\lambda_1} e^{\lambda_1 t} + \frac{A_2}{\lambda_1} e^{\lambda_2 t} \right]_{t_i}^{t_f} = \\
 &= 32 - \frac{1}{250} \left[-\frac{125.926}{0.247} e^{-0.247 t} + \frac{125.926}{12.953} e^{-12.953 t} \right]_0^{8.614} \approx 30.24 \text{ V}
 \end{aligned}
 \tag{26}$$

$$\begin{aligned}
 V_{2\text{ finale}} &= V_{2\text{ iniz}} + \int_{t_i}^{t_f} \frac{1}{C_{2eq}} i dt = V_{2\text{ iniz}} + \frac{1}{C_{2eq}} \left[\frac{A_1}{\lambda_1} e^{\lambda_1 t} + \frac{A_2}{\lambda_1} e^{\lambda_2 t} \right]_{t_i}^{t_f} = \\
 &= 24 + \frac{1}{83.3333} \left[-\frac{125.926}{0.247} e^{-0.247 t} + \frac{125.926}{12.953} e^{-12.953 t} \right]_0^{8.614} \approx 29.27 \text{ V}
 \end{aligned}
 \tag{27}$$

6.2 Seconda scarica

La seconda scarica ha inizio quando la corrente assume il valore di 15 A, all'istante di tempo $t = 13.61$ s (tenendo conto del fatto che la prima scarica inizia in realtà all'istante di tempo $t = 5$ s ed ha una durata di 8.61 s). Per semplicità, viene considerato, come fatto precedentemente, che il tempo sia nullo all'inizio della scarica.

Per la trattazione analitica della seconda scarica si farà riferimento al circuito rappresentato in Fig. 36 e al problema di Cauchy precedentemente considerato per la risoluzione della prima scarica, solo utilizzando diversi valori di alcuni parametri del circuito e delle condizioni iniziali.

Nella scrittura delle condizioni iniziali va tenuto conto della chiusura del secondo interruttore e quindi dell'intervento del condensatore relativo al secondo modulo del banco di terra. La capacità equivalente dei condensatori di terra sarà allora C_{1eq} , data dalla serie dei condensatori C_{1eq} ed il condensatore del secondo modulo, mentre la tensione ai capi di tale condensatore equivalente sarà uguale alla somma tra la tensione ai capi di C_{1eq} e quella ai capi del condensatore del secondo modulo. Resterà invece invariata C_{2eq} .

Diversa sarà anche la resistenza complessiva del circuito R_{TOT} , ricavabile dalla somma tra resistenza totale calcolata precedentemente R_{TOT} e della resistenza interna del condensatore in oggetto.

Di seguito vengono riportati i calcoli relativi a quanto appena esposto.

$$C'_{1eq} = \frac{1}{\frac{1}{C_{1eq}} + \frac{1}{C_5}} = \frac{C}{2} = 125 \text{ F}
 \tag{28}$$

$$C'_{TOT} = \frac{1}{\frac{1}{C'_{1eq}} + \frac{1}{C_{2eq}}} = \frac{C}{5} = \frac{250}{5} = 50 \text{ F}
 \tag{29}$$

$$R'_{TOT} = R_{TOT} + ESR = 0.066 + 0.004 = 0.07 \Omega
 \tag{30}$$

Per quanto detto, il valore della tensione ai capi del banco di condensatori di terra risulta essere pari a:

$$V_{1\text{ iniz}} = 30.24 + 16 = 46.24 \text{ V}
 \tag{31}$$

Nella seguente tabella sono riassunte le condizioni iniziali relative alla seconda scarica.

Tab. 13 - Condizioni iniziali relative alla seconda scarica

Condizioni iniziali		
$V_{1\text{ iniz}}$	Tensione iniziale ai capi della capacità equivalente C_{1eq}	46.24 V
$V_{2\text{ iniz}}$	Tensione iniziale ai capi della capacità equivalente C_{2eq}	29.27 V
I_0	Valore iniziale della corrente	15 A

Come già detto, considerando per semplicità il tempo nullo all'inizio della scarica e tenendo conto delle condizioni iniziali nella risoluzione del problema di Cauchy, i valori assunti da λ_1 , λ_2 , A_1 ed A_2 , risultano essere:

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= 0.2917 & \lambda_2 &= 13.708 \\ A_1 &= 252.65 & A_2 &= 237.65 \end{aligned}$$

L'equazione della corrente durante la seconda scarica risulta quindi essere pari a:

$$i = 252.65 e^{-0.2917t} - 237.65 e^{-13.708t} \quad (32)$$

Il cui andamento è rappresentato in Fig. 39.

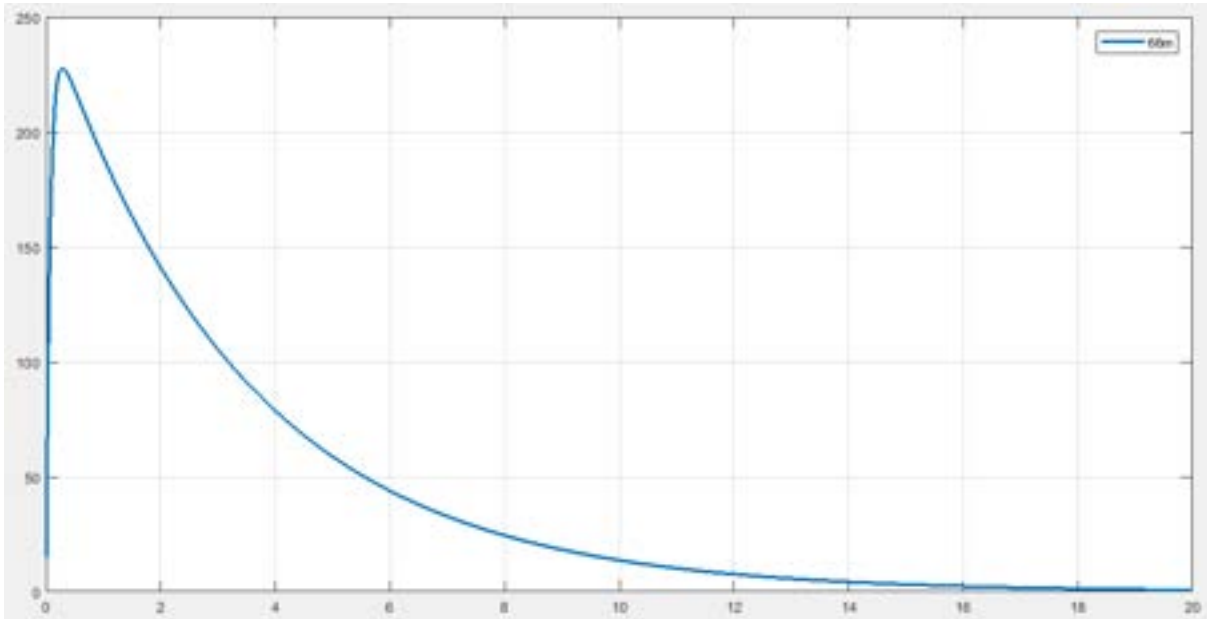


Fig. 39. Andamento della corrente calcolata durante la seconda scarica.

La scarica termina quando la corrente raggiunge il secondo valore di soglia $i = 10$ A ed ha quindi una durata complessiva di 11.08 s.

Tramite i risultati ottenuti dalle equazioni (10), (22) e (32), può essere calcolata ora la tensione riscontrabile ai capi dei primi due moduli del banco di condensatori di terra, e la tensione riscontrabile ai capi del banco di condensatori a bordo del veicolo, al termine del periodo che comprende la seconda scarica. Considerato che l'istante di tempo finale è $t_f = 11.08$ s, istante nel quale l'intensità della corrente vale 10 A, possono essere calcolati gli integrali che determinano le tensioni appena menzionate. Rispettivamente si ottiene:

$$\begin{aligned} V_{1_finale} &= V_{1_iniz} - \int_{t_i}^{t_f} \frac{1}{C_{1eq}} i dt = V_{1_iniz} - \frac{1}{C_{1eq}} \left[\frac{A_1}{\lambda_1} e^{\lambda_1 t} + \frac{A_2}{\lambda_2} e^{\lambda_2 t} \right]_{t_i}^{t_f} = \\ &= 46.2425 - \frac{1}{125} \left[-\frac{252.648}{0.2917} e^{-0.2917t} + \frac{237.648}{13.7082} e^{-13.7082t} \right]_{t_i}^{t_f} \approx 39.72 V \end{aligned} \quad (33)$$

$$\begin{aligned} V_{2_finale} &= V_{2_iniz} + \int_{t_i}^{t_f} \frac{1}{C_{2eq}} i dt = V_{2_iniz} + \frac{1}{C_{2eq}} \left[\frac{A_1}{\lambda_1} e^{\lambda_1 t} + \frac{A_2}{\lambda_2} e^{\lambda_2 t} \right]_{t_i}^{t_f} = \\ &= 29.2725 + \frac{1}{83.3333} \left[-\frac{252.648}{0.2917} e^{-0.2917t} + \frac{237.648}{13.7082} e^{-13.7082t} \right]_{t_i}^{t_f} \approx 39.048 V \end{aligned} \quad (34)$$

6.3 Terza scarica

La terza scarica ha inizio quando la corrente assume il valore di 10 A, all'istante di tempo $t=24.68$ s (tenendo conto del fatto che la prima scarica inizia nell'istante di tempo $t = 5$ s e dura 8.61 s, mentre la seconda scarica inizia appena terminata la prima scarica e finisce all'istante di tempo $t = 24.68$ s). Per semplicità consideriamo, come fatto precedentemente, il tempo nullo all'inizio della scarica.

Nella scrittura delle condizioni iniziali va tenuto conto della chiusura del terzo interruttore e quindi dell'intervento dell'ultimo modulo di condensatori del banco di terra. La capacità equivalente dei condensatori di terra risulta essere C_{1eq} , e viene ottenuta dalla serie dei condensatori C_{1eq} e quello dell'ultimo modulo del banco di terra. La tensione ai suoi capi sarà uguale alla somma tra la tensione ai capi di C_{1eq} e quella ai capi del condensatore in oggetto. Resterà invece invariata C_{2eq} .

Diverso risulta essere anche il valore della resistenza complessiva del circuito R_{TOT} , ricavabile dalla somma della resistenza totale calcolata precedentemente R_{TOT} e della resistenza interna del condensatore dell'ultimo modulo.

Per la trattazione analitica della terza scarica si farà riferimento al circuito rappresentato in Figura 34 e al problema di Cauchy precedentemente considerato, solo con diversi valori di alcuni parametri del circuito e delle condizioni iniziali.

Di seguito vengono riportati i calcoli relativi quanto appena esposto.

$$C'_{1eq} = \frac{1}{\frac{1}{C_{1eq}} + \frac{1}{C_6}} = \frac{C}{3} = 83.33 F \quad (35)$$

$$C'_{TOT} = \frac{1}{\frac{1}{C'_{1eq}} + \frac{1}{C_{2eq}}} = \frac{C}{6} = \frac{250}{6} = 41.66 F \quad (36)$$

$$R''_{TOT} = R'_{TOT} + ESR = 0.07 + 0.004 = 0.074 \Omega \quad (37)$$

Per quanto detto, il valore della tensione ai capi del banco di condensatori di terra risulta essere pari a:

$$V_{1iniz} = 39.72 + 16 = 55.72 V$$

Nella seguente tabella sono riassunte le condizioni iniziali relative alla terza scarica.

Tab. 14 - Condizioni iniziali relative alla terza scarica

Condizioni iniziali		
V_{1iniz}	Tensione iniziale ai capi della capacità equivalente C_{1eq} "	55.72 V
V_{2iniz}	Tensione iniziale ai capi della capacità equivalente C_{2eq}	39.048 V
I_0	Valore iniziale della corrente	10 A

Come già detto, considerando per semplicità il tempo nullo all'inizio della scarica e tenendo conto delle condizioni iniziali nella risoluzione del problema di Cauchy, i valori assunti da τ_1 , τ_2 , A_1 ed A_2 , sono i seguenti:

$$\begin{aligned} \tau_1 &= 0.3314 & \tau_2 &= 14.47 \\ A_1 &= 235.71 & A_2 &= 225.71 \end{aligned}$$

L'equazione della corrente durante la seconda scarica risulta quindi essere pari a:

$$i = 235.71e^{-0.3317t} - 225.71e^{-14.4682t} \quad (39)$$

Il cui andamento è rappresentato in Fig. 40.

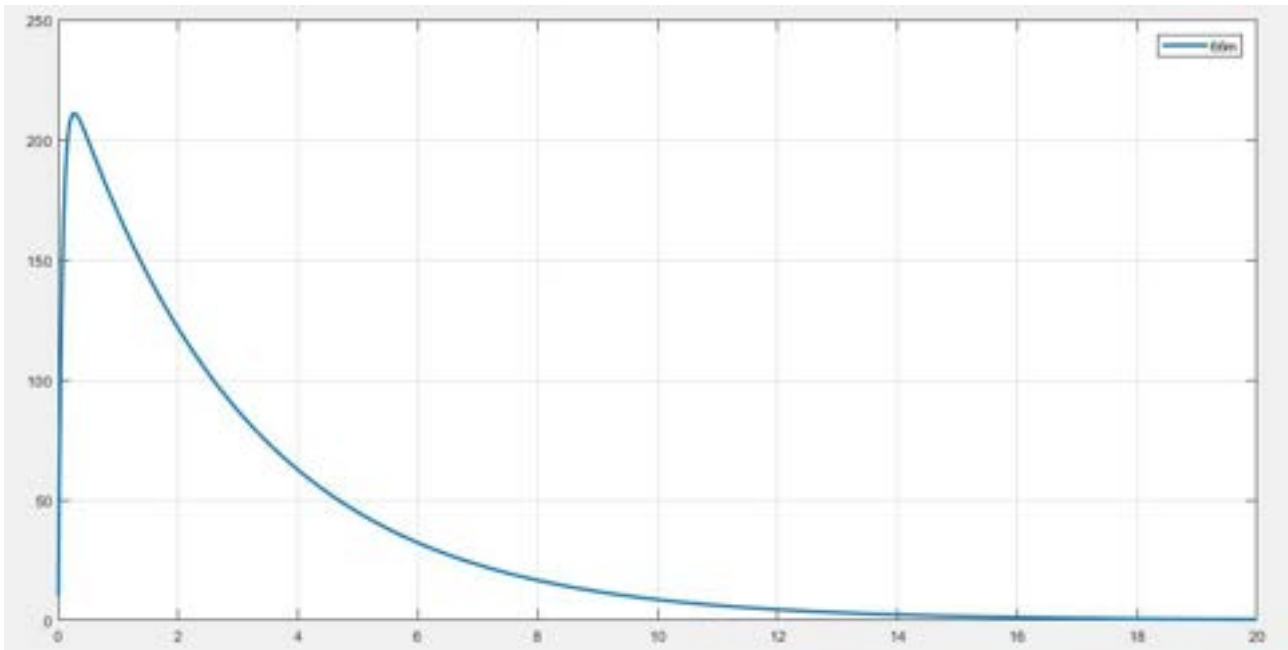


Fig. 40. Andamento della corrente calcolata durante la terza scarica.

La scarica termina quando la corrente raggiunge il terzo valore di soglia $i = 7.5$ A ed ha quindi una durata complessiva di 10.39 s.

Tramite i risultati ottenuti dalle equazioni (10) (22) e (39), può essere calcolata ora la tensione riscontrabile ai capi di tutto il banco di condensatori di terra, e la tensione riscontrabile ai capi del banco di condensatori a bordo del veicolo, al termine del periodo che comprende la terza scarica. Considerato che l'istante di tempo finale è $t_f = 10.39$ s, istante nel quale l'intensità della corrente vale 7.5 A, possono essere calcolati gli integrali che determinano le tensioni appena menzionate. Rispettivamente si ottiene:

$$\begin{aligned}
 V_{1\text{ finale}} &= V_{1\text{ iniz}} - \int_{t_i}^{t_f} \frac{1}{C_{1eq}} i dt = V_{1\text{ iniz}} - \frac{1}{C_{1eq}} \left[\frac{A_1}{\lambda_1} e^{\lambda_1 t} + \frac{A_2}{\lambda_2} e^{\lambda_2 t} \right]_{t_i}^{t_f} = \\
 &= 55.7255 - \frac{1}{83.3333} \left[-\frac{235.715}{0.3317} e^{-0.3317 t} + \frac{225.715}{14.4682} e^{-14.4682 t} \right]_{0}^{10.3922} \approx 47.66V
 \end{aligned} \tag{40}$$

$$\begin{aligned}
 V_{2\text{ finale}} &= V_{2\text{ iniz}} + \int_{t_i}^{t_f} \frac{1}{C_{2eq}} i dt = V_{2\text{ iniz}} + \frac{1}{C_{2eq}} \left[\frac{A_1}{\lambda_1} e^{\lambda_1 t} + \frac{A_2}{\lambda_2} e^{\lambda_2 t} \right]_{t_i}^{t_f} = \\
 &= 39.048 + \frac{1}{83.3333} \left[-\frac{235.715}{0.3317} e^{-0.3317 t} + \frac{225.715}{14.4682} e^{-14.4682 t} \right]_{0}^{10.3922} \approx 47.12V
 \end{aligned} \tag{41}$$

6.4 Andamento complessivo della corrente

L'andamento complessivo della corrente durante l'intera ricarica del veicolo si ottiene dalle seguenti equazioni: (25), nell'intervallo di tempo tra $t_i = 5$ s e $t_f = 13.61$ s; (32), nell'intervallo di tempo tra $t_i = 13.61$ s e $t_f = 24.69$ s ed infine (39), nell'intervallo di tempo tra $t_i = 24.69$ s e $t_f = 35.09$ s, istante di tempo in cui si conclude la ricarica del veicolo.

In Fig. 41 è riportato l'andamento complessivo della corrente durante l'intera fase di ricarica, dove l'asse delle ascisse parte direttamente dall'istante di tempo $t = 5$ s.

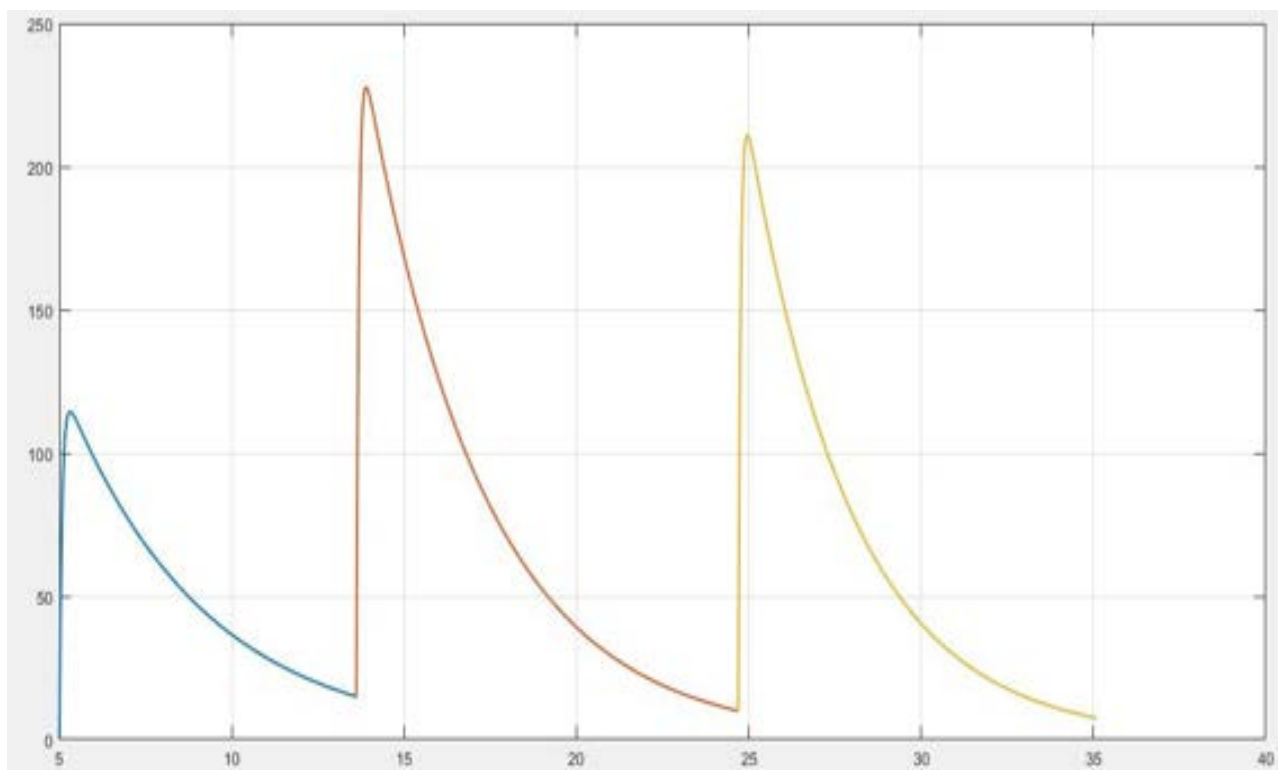


Fig. 41. Andamento complessivo della corrente durante le 3 scariche.

7 Dimensionamento dell'induttore

Il dimensionamento è stato eseguito seguendo il metodo del prodotto delle aree A_p .

Sono stati assegnati i parametri di progetto: il valore dell'induttanza $L_{progetto}$, della corrente di picco I_{max} ed il valore efficace della corrente I_{RMS} , K_u . Prendendo in considerazione i valori tipici che la densità massima di corrente può assumere: 4, 6 e 8 A/mm², è stata calcolata per ognuno la rispettiva area della sezione del cavo:

$$A_c = I_{max} / J_{max} \quad [mm^2]$$

Sulle tabelle del costruttore si sceglie dunque il cavo avente area della sezione maggiore o al limite uguale a quella appena trovata: $A_{cScelto}$. Scelta l'area della sezione del conduttore, può essere valutato il valore efficace della densità di corrente:

$$J_{RMS} = \frac{I_{RMS}}{A_{cScelto}} \quad \left[\frac{A}{mm^2} \right]$$

Nel caso in esame è stato impiegato un avvolgimento costituito da una bandella avente spessore 0.5 mm e larghezza calcolata di volta in volta in funzione dell'area del conduttore scelto.

$$altezzaConduttore = \frac{A_{cScelto}}{spessoreConduttore} \quad [mm]$$

Poiché l'induttore si troverà a lavorare in bassa frequenza, come materiale ferromagnetico è stato selezionato un acciaio al silicio perché particolarmente idoneo per tale tipo di applicazioni e per l'elevato valore di induzione a saturazione che offre (tra 1.9 T e 2 T, nel caso di acciai al silicio con percentuale di Si < 2.7%).

Si calcola il prodotto delle aree:

$$A_p = A_w A_n = (L_{\text{progetto}} I_{\text{RMS}} I_{\text{max}}) / (J_{\text{RMS}} K_u B_{\text{max}}) \quad [\text{mm}^4]$$

dove il fattore di riempimento K_u è stato assunto uguale a 0,5, L_{progetto} è espresso in [W/A] mentre B_{max} è espresso in [Wb/mm²]. Come valore di induzione massima è stato ipotizzato 1.56 T, 20% inferiore rispetto alla densità di flusso a saturazione 1.95 T, allora il valore di B_{max} da utilizzare nell'espressione del prodotto delle aree è: 1.56×10^{-6} Wb/mm².

Noto A_p , si sceglie dalle tabelle del costruttore il nucleo idoneo alla realizzazione dell'induttore avente prodotto delle aree A_p Nucleo maggiore o al limite uguale a quello precedentemente trovato.

$A_{p\text{Nucleo}}$ è dato dal prodotto dell'area della finestra del nucleo $A_{w\text{Nucleo}}$ [mm²] e dell'area della sezione trasversale dello stesso $A_{n\text{Nucleo}}$ [mm²].

K_u è un parametro che può assumere valori compresi tra 0.3 e 0.6 e che spesso si assume per ipotesi uguale a 0.5 o 0.4. Nella presente trattazione si è cercato di trovare un valore più preciso di K_u tramite metodo iterativo: partendo dal valore inizialmente assegnato di K_u , è stato calcolato il numero di spire N tramite la relazione:

$$N = \frac{K_u A_{w\text{Nucleo}}}{A_{c\text{Scelto}}}$$

che sarà, molto probabilmente, un numero razionale.

Dal valore di N si determina il valore dell'induttanza L_N :

$$L_N = \frac{N A_{n\text{Nucleo}} B_{\text{max}}}{I_{\text{max}}} \quad \left[H = \frac{Wb}{A} \right]$$

dove la massima densità di flusso B_{max} è sempre espressa in Wb/mm².

Se risulta che $L_N > L_{\text{progetto}}$, allora si diminuisce K_u di 1%, si calcola N corrispondente al nuovo valore assunto da K_u e successivamente L_N e lo si confronta con il valore dell'induttanza di progetto L_{progetto} . L'iterazione viene ripetuta finché non si ottiene $L_N \approx L_{\text{progetto}}$, con errore piccolo a piacere (nel programma di calcolo è stato imposto errore minore del 2%).

Poiché il numero di spire deve essere un numero intero, si sceglie il numero intero immediatamente maggiore rispetto al valore di N calcolato precedentemente. Tale valore intero del numero di spire sarà indicato con N_{int} .

Scelto N_{int} , poiché il fattore di riempimento K_u deve essere:

$$K_u \geq \frac{N_{\text{int}} A_{c\text{Scelto}}}{A_{w\text{Nucleo}}}$$

Si assume inoltre come fattore di riempimento:

$$K_{u\text{Scelto}} = \frac{N_{\text{int}} A_{c\text{Scelto}}}{A_{w\text{Nucleo}}}$$

Calcolato la lunghezza del traferro tramite la formula:

$$l_g = \frac{A_{n\text{Nucleo}} \mu_0 N_{\text{int}}^2}{L_{\text{progetto}}} \quad [\text{mm}]$$

dove μ_0 è la permeabilità magnetica dell'aria espressa in [Wb/mm²A]:

$$1.257 \times 10^{22} \frac{?}{?} = 1.257 \times 10^{22} \frac{? ?}{? ?} = \frac{1.257}{1000} \times 10^{22} \frac{? ?}{? ? ?}$$

è possibile, sempre tramite metodo iterativo, valutare con maggior precisione la dimensione del traferro. Trovato infatti il valore di l_g , si valuta l'induttanza corrispondente L_{lg} :

$$L_{lg} = \frac{l_g A_{nNucleo} B_{max}^2}{\mu_{(0)} I_{max}^2} \left[\frac{Wb}{A} \right]$$

Se il valore dell'induttanza di progetto $L_{progetto} < L_{lg}$, allora si sceglie un nuovo valore del numero di spire pari a $N = N_{int} + 1$.

Per N trovato, il traferro sarà uguale a:

$$l_g = \frac{A_{nNucleo} \mu_0 N^2}{L_{progetto}} \quad [mm]$$

si valuta L_{lg} per il valore scelto del numero di spire e lo si mette a confronto con $L_{progetto}$. Il processo iterativo viene ripetuto finché non viene trovato un valore di N Scelto al quale corrisponde un'induttanza $L_{lg} = L_{progetto}$.

Nel caso in cui sia stato selezionato come nucleo un nucleo UU oppure UI, allora il valore del traferro dovrà essere ripartito tra le due colonne del nucleo dando come valore effettivo del traferro:

$$l_g = \frac{l_g}{2}$$

Si calcola ora il numero di spire per ciascuno strato:

$$N_{spire/strato} = \frac{G}{altezzaConduttore}$$

dove G è l'altezza della finestra (Fig. 42) e *altezzaConduttore* è, nel caso in cui si sia utilizzato una bandella o piattina, l'altezza del cavo conduttore. Nel caso in cui sia stato impiegato un filo a sezione tonda, l'altezza del conduttore coincide col diametro dello stesso. Se $N_{spire/strato}$ risultasse essere un numero razionale, va scelto il numero intero immediatamente minore al valore ricavato.

Dal numero di spire contenute in ogni strato è poi possibile valutare il numero di strati:

$$N_{strati} = \frac{N}{N_{spire/strato}}$$

anch'esso deve essere un numero intero e, nel caso in cui non lo fosse, va scelto il numero intero immediatamente maggiore rispetto al valore ricavato.

La lunghezza media di ciascuna spira l_{MLT} (*mean length turn*) tramite la relazione:

$$l_{MLT} = 2(E + F) + 2(F + D) \quad [mm]$$

con a = larghezza della colonna, b = larghezza della finestra del nucleo, c = spessore del nucleo (Fig. 42).

Noto il valore di l_{MLT} è possibile determinare la lunghezza complessiva dell'avvolgimento:

$$l = N \cdot l_{MLT} \quad [mm]$$

la cui resistenza complessiva è pari a

$$R = \rho_T \frac{N \cdot l_{MLT}}{A_{cScelto}} = \rho_T \frac{l}{A_{cScelto}} \quad [\Omega]$$

nella quale γ_T è la resistività del materiale alla temperatura di lavoro T che potrà essere ricavata in funzione delle perdite nel nucleo e di quelle nell avvolgimento.

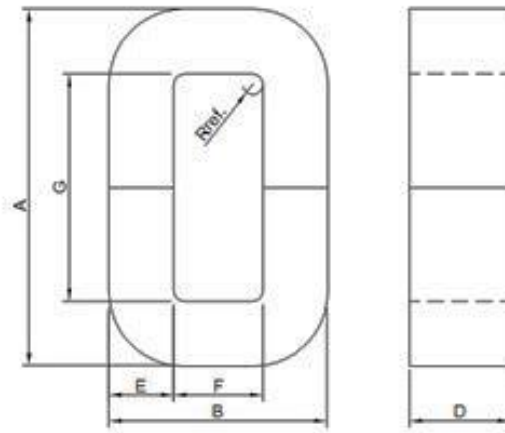


Fig. 42. Dimensioni geometriche di un nucleo CC.

7.1 Calcolo del valore efficace della corrente

Il valore efficace della corrente in un periodo T è definito come il valore costante da assegnare alla corrente continua per produrre la stessa energia della corrente periodica ed è dato dalla relazione:

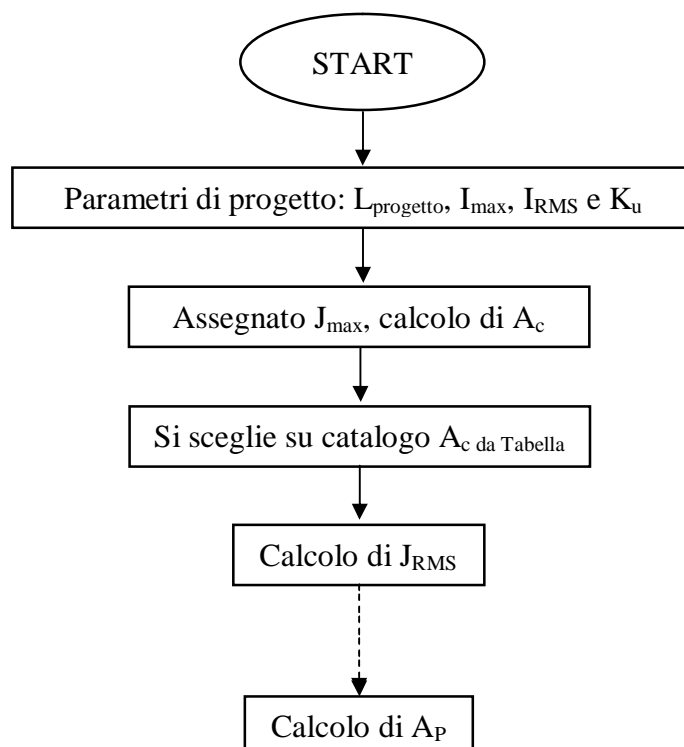
$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt}$$

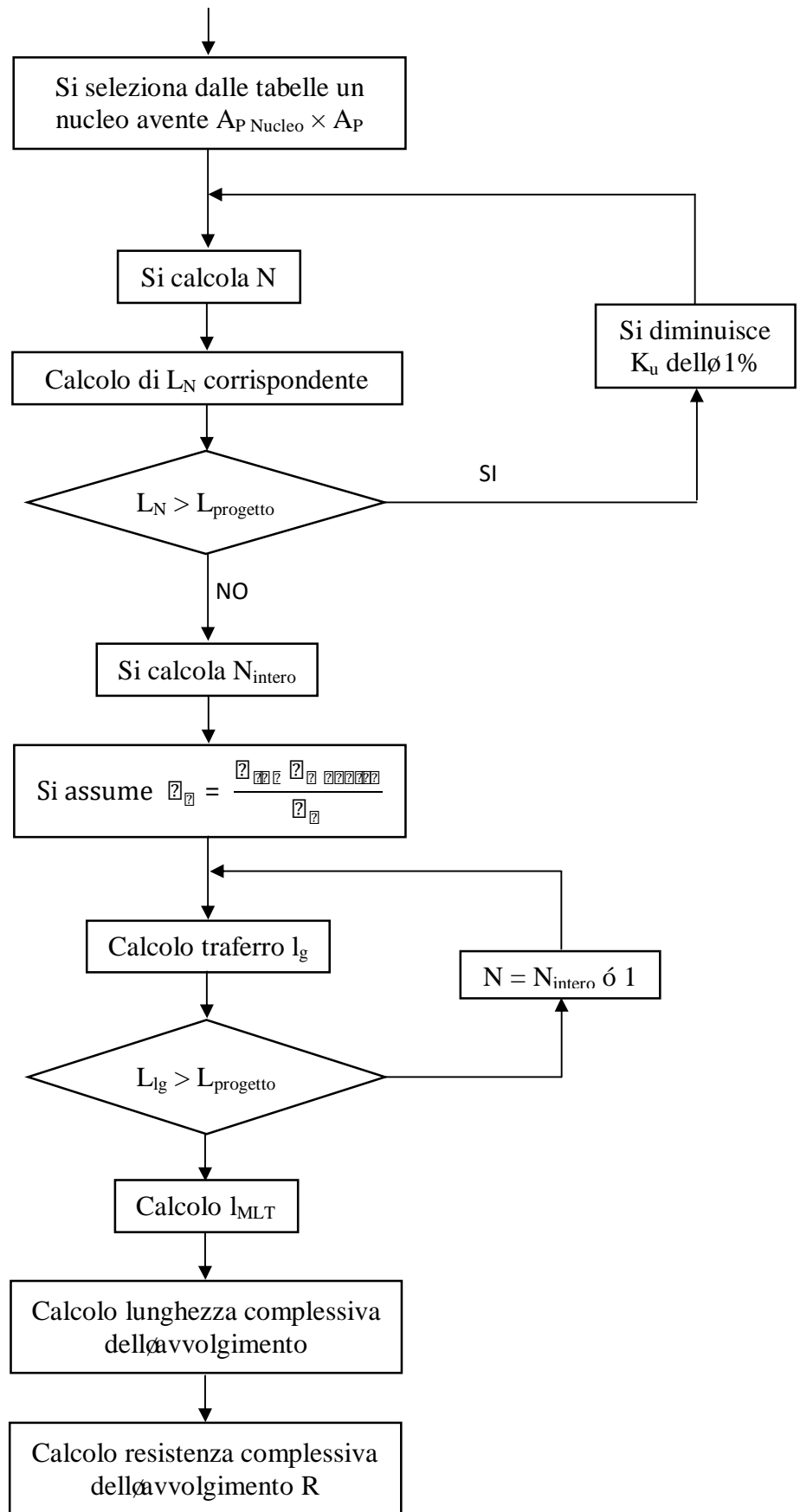
Considerando le equazioni della corrente, ottenute durante la trattazione analitica del problema, e gli intervalli di tempo di inizio e fine di ciascuna scarica, il valore efficace vale:

$$I_{RMS} = 85.53A$$

7.2 Diagramma di flusso dell algoritmo di dimensionamento

Si illustra di seguito l algoritmo di calcolo, espresso come procedura da applicarsi step-by-step:





La procedura qui descritta è stata tradotta in un apposito software realizzato in linguaggio C che effettua il dimensionamento dell'induttore e la successiva verifica di fattibilità rispetto al nucleo selezionato ed ai parametri di input richiesti.

7.3 Dimensionamento dell'induttore e risultati

7.3.1 Configurazione Low-Voltage

Di seguito sono mostrati i risultati ottenuti nel caso di dimensionamento dell'induttore relativo alla configurazione Low-Voltage. Inizialmente sono riportate le specifiche di progetto:

- $L_{\text{progetto}} = 0.005 \text{ H}$
- Resistenza ESL di progetto = 0.05 Ω
- $I_{\text{max}} = 227.72 \text{ A}$
- $K_u = 0.5$
- $I_{\text{RMS}} = 85.53 \text{ A}$

I calcoli sono stati effettuati ipotizzando tre distinti valori per la densità di corrente nel conduttore da utilizzare per l'avvolgimento. Questo perché l'induttore opera in modalità fortemente discontinua, essendo quindi percorso da corrente solamente durante l'operazione di travaso che ha una durata di qualche decina di secondi, seguita da un tempo più o meno importante in cui non si ha passaggio di corrente. La Fig. 43 mostra le dimensioni in pollici del nucleo selezionato per la configurazione Low-Voltage.

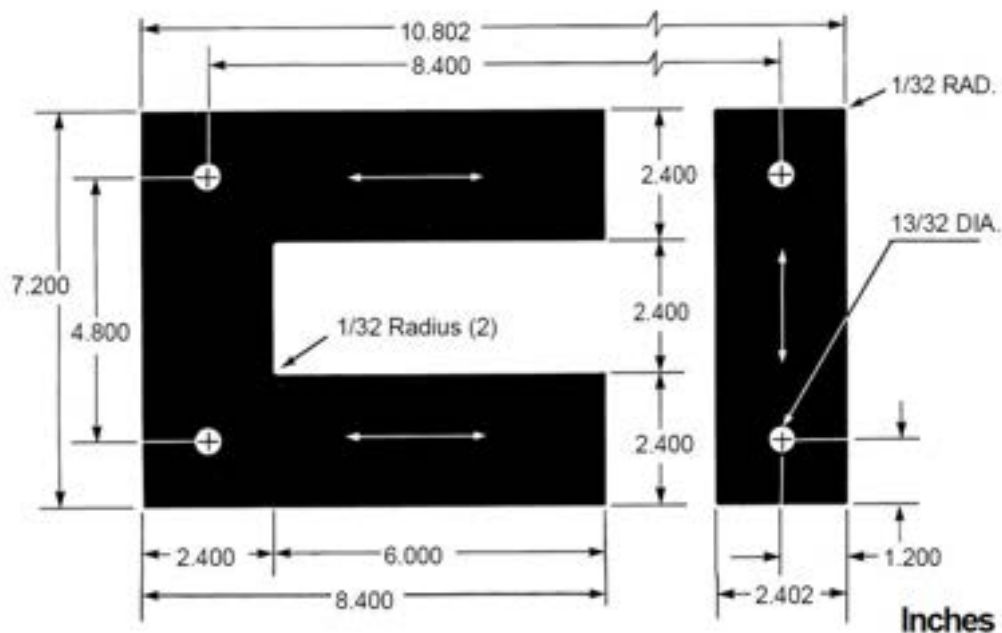


Fig. 43. Dimensioni del nucleo UI scelto per l'induttore della configurazione Low-Voltage (Tempel Transformer Lamination).

La Tab. 15 riassume il dimensionamento per tre distinti casi di densità di corrente relativi all'avvolgimento dell'induttore, mentre il nucleo UI selezionato è prodotto da *Tempel Transformer Lamination*. Per soddisfare i requisiti di induttanza, non saturazione del nucleo e che sia possibile avere il numero di spire richieste; il valore della resistenza complessiva potrebbe risultare al di fuori della specifica richiesta, soprattutto nel caso in cui si considerino densità di corrente basse. Comunque, se si tiene conto anche della resistenza distribuita lungo i conduttori dell'impianto finale, di quella inerente il contatto del pantografo, dei contatti elettrici, si riuscirà facilmente a rientrare all'interno dei requisiti della R richiesta. Questo avalla la fattibilità tecnica del sistema, poiché consentirebbe di utilizzare un conduttore di sezione maggiore per

l'avvolgimento e quindi ridotte perdite e minore innalzamento della temperatura dell'induttore, evitando l'impiego di sistemi forzati di raffreddamento. Inoltre, l'utilizzo di conduttori di sezione maggiore per la realizzazione dell'avvolgimenti consentirebbe di ridurre le perdite durante l'operazione di ricarica, aumentando l'energia complessivamente trasferita.

Tab. 15 Esempi di calcolo per il dimensionamento dell'induttore del caso LV

	$J_{max} = 4 \text{ A/mm}^2$ $J_{RMS} = 1.5 \text{ A/mm}^2$	$J_{max} = 6 \text{ A/mm}^2$ $J_{RMS} = 2.25 \text{ A/mm}^2$	$J_{max} = 8 \text{ A/mm}^2$ $J_{RMS} = 3 \text{ A/mm}^2$
Valore di A_p calcolato	$8.31025 \times 10^7 \text{ mm}^4$	$5.54016 \times 10^7 \text{ mm}^4$	$4.15512 \times 10^7 \text{ mm}^4$
Nucleo scelto	3 nuclei UI 240 H4		
$A_{wNucleo}$	9290.3 mm^2		
$A_{nNucleo}$	$3 \times 3716.1 = 11148.3 \text{ mm}^2$		
$A_{pNucleo}$	$10.3571 \times 10^7 \text{ mm}^4$		
Spessore bandella	0.5 mm		
Larghezza bandella	114 mm	76 mm	57 mm
A_c	57 mm^2	38 mm^2	28.5 mm^2
$K_{uScelto}$	0.40696	0.26996	0.20247
N	65	65	65
Lunghezza traferro l_g	5.92067 mm	5.92067 mm	5.92067 mm
$N_{spire/strato}$	1	1	2
N_{strati}	65	65	33
MLT = 2(E + F) + 2(F + D)	609.6 mm	731.52 mm	731.52 mm
Lunghezza avvolgimento l	39624 mm	47548.8 mm	47548.8 mm
Resistenza avvolgimento Rame: 20 °C 70°C Alluminio: 20 °C 70°C	0.012 \$ 0.0145 \$ 0.0236 \$ 0.0285 \$	0.035 \$ 0.043 \$	0.0472 \$ 0.057 \$

La Tab. 16 mostra la verifica sui risultati ottenuti con la procedura iterativa di dimensionamento. Come si potrà notare, l'induttore progettato soddisfa pienamente i requisiti tecnici iniziali.

Tab. 16 Verifica dei risultati ottenuti da Tabella 15

	$J_{max} = 4 \text{ A/mm}^2$ $J_{RMS} = 1.5 \text{ A/mm}^2$	$J_{max} = 6 \text{ A/mm}^2$ $J_{RMS} = 2.25 \text{ A/mm}^2$	$J_{max} = 8 \text{ A/mm}^2$ $J_{RMS} = 3 \text{ A/mm}^2$
$l_g = \frac{2 \cdot l_{g0} \cdot \frac{A_{p0}}{A_p}}{2 \cdot \frac{A_{p0}}{A_p}}$	11228.7	11228.7	11228.7
$l = \frac{l_g \cdot \frac{A_{p0}}{A_p}}{\frac{A_{p0}}{A_p}}$	9138.26	9138.26	9138.26
Verifica energetica $\frac{1}{2} \cdot \frac{I^2 \cdot l}{A_p} = \frac{1}{2} \cdot \frac{I^2 \cdot l_{g0} \cdot \frac{A_{p0}}{A_p}}{A_p}$	129.64 = 127.789 (~1.43 %)	129.64 = 127.789 (~1.43 %)	129.64 = 127.789 (~1.43 %)
$\Delta T = \frac{I^2 \cdot l \cdot R}{A_p}$	0.05	0.05	0.05
$\Delta T_c = \frac{I^2 \cdot l \cdot R_c}{A_p}$	6.00642 (~1.43 %)	6.00642 (~1.43 %)	6.00642 (~1.43 %)

7.3.2 Configurazione High-Voltage

Lo stesso procedimento è stato utilizzato per il caso relativo al sistema in configurazione High-Voltage. Di seguito sono mostrati i risultati ottenuti in base alle seguenti le specifiche di progetto:

- $L_{\text{progetto}} = 0.0054 \text{ H}$
- Resistenza ESL di progetto = 0.155 Ω
- $I_{\text{max}} = 500.9 \text{ A}$
- $K_u = 0.5$
- $I_{\text{RMS}} = 187 \text{ A}$

L'induttore richiede l'utilizzo di 26 nuclei a U del tipo riportato in Fig. 43. Si noter  che nel caso di induttore HV, la resistenza dell'avvolgimento   decisamente al di fuori della specifica, risultando inferiore al valore richiesto. Questo comunque non rappresenta un problema per i motivi precedentemente esposti, ed inoltre poich  si potrebbe pensare di inserire un resistore aggiuntivo qualora la resistenza complessiva non fosse ancora sufficiente. Tra l'altro, il resistore aggiuntivo avrebbe il vantaggio di spostare parte delle perdite fuori dall'induttore con la possibilit  di un migliore e pi  efficace smaltimento.

Tab. 17 Esempi di calcolo per il dimensionamento dell'induttore del caso HV

	$J_{\text{max}} = 4 \text{ A/mm}^2$ $J_{\text{RMS}} = 1.5 \text{ A/mm}^2$	$J_{\text{max}} = 6 \text{ A/mm}^2$ $J_{\text{RMS}} = 2.25 \text{ A/mm}^2$	$J_{\text{max}} = 8 \text{ A/mm}^2$ $J_{\text{RMS}} = 3 \text{ A/mm}^2$
Valore di A_p calcolato	$4.34251 \times 10^8 \text{ mm}^4$	$2.89501 \times 10^8 \text{ mm}^4$	$2.17126 \times 10^8 \text{ mm}^4$
Nucleo scelto	13 nuclei U 240 H4 + 13 nuclei U 240 H4		
$A_{w\text{Nucleo}}$	$2 \times 9290.3 = 18580.6 \text{ mm}^2$		
$A_{n\text{Nucleo}}$	$13 \times 3716.1 = 48309.3 \text{ mm}^2$		
$A_{p\text{Nucleo}}$	$8.97616 \times 10^8 \text{ mm}^4$		
Larghezza nucleo	182.88 mm		
Altezza nucleo	$2 \times 213.36 = 426.72 \text{ mm}$		
Profondit� nucleo	$13 \times 60.96 = 792.48 \text{ mm}$		
Larghezza colonna	60.96 mm		
Larghezza finestra	60.96 mm		
Altezza finestra	$2 \times 152.4 = 304.8 \text{ mm}$		
Spessore bandella	0.5 mm		
Larghezza bandella	251 mm	167 mm	126 mm
Area conduttore A_c	125.5 mm^2	83.5 mm^2	63 mm^2
$K_{u\text{Scelto}}$	0.243	0.162	0.122
N	36	36	36
Lunghezza traferro l_g	7.287 mm	7.287 mm	7.287 mm
$N_{\text{spire/strato}}$	1	1	2
N_{strati}	35	35	18
MLT, lunghezza media spira	1724.88 mm	1724.88 mm	1715.88 mm
Lunghezza avvolgimento l	62095.7 mm	62095.7 mm	61771.7 mm
Resistenza avvolgimento Alluminio: 20 �C 70 �C	0.014 Ω 0.0169 Ω	0.021 Ω 0.0254 Ω	0.028 Ω 0.0336 Ω

Tab. 18 Verifica dei risultati ottenuti da Tabella 17

	$J_{max} = 4 \text{ A/mm}^2$ $J_{RMS} = 1.5 \text{ A/mm}^2$	$J_{max} = 6 \text{ A/mm}^2$ $J_{RMS} = 2.25 \text{ A/mm}^2$	$J_{max} = 8 \text{ A/mm}^2$ $J_{RMS} = 3 \text{ A/mm}^2$
$l_p = \frac{2 \cdot l_{spire} \cdot l_{strati} \cdot l_g}{2 \cdot l_{spire} \cdot l_{strati}}$	48163.5 (~0.3%)	48163.5 (~0.3%)	48163.5 (~0.3%)
$l_p = \frac{2 \cdot l_{spire} \cdot l_{strati}}{2 \cdot l_{spire} \cdot l_{strati}}$	18539.9 (~0.22%)	18576.9 (~0.02%)	18163.5 (~0.615%)
Verifica energetica $\frac{1}{2} \cdot l_{spire} \cdot l_{strati} = \frac{1}{2} \cdot l_{spire} \cdot l_{strati} \cdot l_g$	677.432 = 681.541 (~0.6%)	677.432 = 681.541 (~0.6%)	677.432 = 681.541 (~0.6%)
$l_g = \frac{2 \cdot l_{spire} \cdot l_{strati} \cdot l_g}{2 \cdot l_{spire} \cdot l_{strati}}$	0.054 (~0%)	0.054 (~0%)	0.054 (~0%)
$l_g = \frac{2 \cdot l_{spire} \cdot l_{strati} \cdot l_g}{2 \cdot l_{spire} \cdot l_{strati}}$	7.287 (~0.6%)	7.287 (~0.6%)	7.287 (~0.6%)

Da notare che per il caso $J_{max}=8 \text{ A/mm}^2$, sarebbe possibile impiegare la seguente configurazione che offre un A_p più prossimo a quello calcolato, un risparmio in termini di volume e un K_u più elevato rispetto a quello calcolato precedentemente (Tab. 19):

Tab. 19 Induttore High-Voltage nel caso di densità di corrente pari a 8 A/mm^2

	$J_{max} = 8 \text{ A/mm}^2$ $J_{RMS} = 3 \text{ A/mm}^2$
Valore di A_p calcolato	$2.17126 \times 10^8 \text{ mm}^4$
Nucleo scelto	13 nuclei UI 240 H4
$A_{wNucleo}$	9290.3 mm^2
$A_{nNucleo}$	$13 \times 3716.1 = 48309.3 \text{ mm}^2$
$A_{pNucleo}$	$4.48808 \times 10^8 \text{ mm}^4$
Larghezza nucleo	182.88 mm
Altezza nucleo	213.36 mm
Profondità nucleo	$13 \times 60.96 = 792.48 \text{ mm}$
Larghezza colonna	60.96 mm
Larghezza finestra	60.96 mm
Altezza finestra	152.4 mm
Spessore bandella	0.5 mm
Larghezza bandella	126 mm
Area conduttore A_c	63 mm^2
$K_{uScelto}$	0.244
N	36
Lunghezza traferro l_g	7.287 mm
$N_{spire/strato}$	1
N_{strati}	35
MLT, lunghezza media spira	1724.88 mm
Lunghezza avvolgimento l	62095.7 mm
Resistenza avvolgimento Alluminio: 20 °C 70°C	0.028 \$ 0.0337 \$

8 Conclusioni

L'attività svolta ha consentito di individuare soluzioni promettenti per la ricarica rapida dell'accumulo a bordo veicolo nel caso di sistemi per il Trasporto Pubblico Urbano. Il modello di simulazione realizzato ha consentito di valutare la fattibilità tecnica di tale metodo consentendo inoltre di acquisire tutte quelle informazioni che si renderanno necessarie per la fase sperimentale.

Il modello è stato inoltre ideato e realizzato pensando che possa essere d'aiuto anche per sistemi di taglia diversa, rappresentando così una sorta di modello di valutazione *general purpose*. In aggiunta al modello, la trattazione analitica sviluppata, ed applicata al caso Low-Voltage, ha portato ad una trattazione in forma chiusa del problema, con risultati che confermano l'affidabilità del processo.

Dai risultati delle simulazioni è stata compresa ed illustrata l'evoluzione temporale della corrente di ricarica e della tensione sul banco di SC a bordo veicolo, valutandone inoltre anche l'energia effettivamente trasferita. Si è visto, ad esempio, che, effettuando la riconfigurazione dei bank ed operando delle scariche parziali, l'energia effettivamente trasferita è decisamente maggiore. Questo consente al veicolo una maggiore autonomia, che si traduce in una maggiore distanza tra le fermate o in una possibile riduzione dello storage a bordo.

Il dimensionamento finale degli induttori per i due casi analizzati, ha confermato la fattibilità tecnica di un tale approccio di ricarica, che, evitando l'impiego di convertitori elettronici di potenza dimensionati per la potenza di picco e quindi con un basso fattore di utilizzo, ha reso il sistema sufficientemente compatto da poter essere installato in prossimità della stazione di ricarica, con costo ridotto e elevata affidabilità.

9 Riferimenti bibliografici

1. F. Ortenzi, G. Pede, S. Orchi, Analisi delle prestazioni di un sistema di ricarica ibrido per TPL, ENEA 2015.
2. Amsterdam Roundtables Foundation, Electric vehicles in Europe: gearing up for a new phase? The Netherlands: Amsterdam Roundtable Foundation and McKinsey & Company, 2014.
3. <http://www.rinnovabili.it/mobilita/mercato-auto-elettriche-europa-usa-333/>. [Online]
4. <http://elmo.ee/charging-network/>. [Online] <http://elmo.ee/charging-network/>.
5. De Gennaro M., et al., Analysis and assessment of the electrification of urban road transport based on real-life mobility data. Barcelona: s.n., 2013. EVS 27.
6. Mauri, Giuseppe, Rapporto di sintesi delle attività del progetto: Mobilità Elettrica. Ricerca di sistema energetico, 2014.
7. G. Giuli, M. Mancini, Studio delle interrelazioni tra il sistema elettrico e quello dei trasporti urbani, Report RdS/2014/101, settembre 2014.
8. W. Su, H. Rahimi Eichi, W. Zeng, M.Y. Chow, "A Survey on the Electrification of Transportation in a Smart Grid Environment", IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol.8, no.1, pp. 1-10, February 2012.
9. E. Ragazzi, E. Bompard, A. Tenconi, "Electric Vehicles and Power Grids: Challenges and Opportunities", The Greening of the Automotive Industry, Editore: Palgrave Macmillan Ltd., Basingstoke (GBR), ISBN 978-0-2303-6909-2.
10. Lombardo G., Viaggiare in auto elettrica tra ostacoli e barriere cittadine, 2015, Veicoli Elettrici News, p. 19.
11. Joni Markkula, et al., The business case of electric vehicle quick charging - no more chicken or egg problem. Barcelona: s.n., 2013. EVS 27.

12. Hidure, M., Willingness to pay for electric vehicles and their attributes. 2011, Resource and Energy Economics, p. 686-705.
13. Van Kerkhov, M. and Boonen, A., Effective public policies for EV-dissemination. Barcelona: s.n., 2013. EVS 27.
14. Van den Hoed R., et al., Data analysis on the public charge infrastructure in the city of Amsterdam. Barcellona: s.n., 2013. EVS 27.
15. Markel, Tom, Plug-in Electric Vehicle Infrastructure: A Foundation for Electrified Transportation. Cambridge, Massachusetts: s.n., 2010. MIT Energy Initiative Transportation Electrification Symposium.
16. Kallas, Siim, The future of electromobility in Europe. European Commission. [Online] 18 February 2014. http://europa.eu/rapid/press-release_SPEECH-14-606_en.htm.
17. E. Croci, L'inserimento dell'auto elettrica nel contesto urbano , IEFE Bocconi, Convegno "Verso l'auto elettrica: prospettive incoraggianti ma anche problemi rilevanti", Milano 2010.
18. S. Stüdli, W. Griggs. E. Crisostomi, R. Shorten, On Optimality Criteria for Reverse Charging of Electric Vehicles , IEEE Trans. on Intelligent Transportation System, vol.15, no.1, pp.451-456, February 2014.
19. W. Su, H. Rahimi Eichi, W. Zeng, M.Y. Chow, "A Survey on the Electrification of Transportation in a Smart Grid Environment", IEEE Trans. on Ind. Informatics, vol.8, no.1, pp. 1-10, February 2012.