Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie,
l'Energia e lo Sviluppo Economico Sostenibile

Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Accumulo elettrico con supercondensatori nell'industria: realizzazione di un tool di progettazione per il dimensionamento su basi statistiche e validazione sperimentale della modellistica atta a descrivere le performance di tali sistemi di accumulo

E. Tironi, L. Piegari, V. Musolino

Report RdS/2010/228

ACCUMULO ELETTRICO CON SUPERCONDENSATORI NELL'INDUSTRIA: REALIZZAZIONE DI UN TOOL DI PROGETTAZIONE PER IL DIMENSIONAMENTO SU BASI STATISTICHE E VALIDAZIONE SPERIMENTALE DELLA MODELLISTICA ATTA A DESCRIVERE LE PERFORMANCE DI TALI SISTEMI DI ACCUMULO

E. Tironi, L. Piegari, V. Mugolino (Dipartimento di Elettrotecnica del Politecnico di Milano)

Settembre 2010

Report Ricerca di Sistema Elettrico
Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA
Area: Usi finali
Tema: Elettrotecnologie innovative per i settori produttivi: applicazioni su scala reale

Responsabile Tema: Ennio Ferrero, ENEA

Brevi note sugli autori sono riportate a fine rapporto

Indice

1) I SISTEMI DI ACCUMULO DELL'ENERGIA 5

1.1) INTRODUZIONE 5

1.2) CARATTERISTICHE E PERFORMANCE DI DIVERSE TIPOLOGIE DI SISTEMI DI ACCUMULO DI ENERGIA ELETTRICA: CAMPI DI APPLICAZIONE. 6

2) REALIZZAZIONE DI UN TOOL DI PROGETTAZIONE PER IL DIMENSIONAMENTO SU BASI STATISTICHE DI UN SISTEMA DI ACCUMULO A SUPERCONDENSATORI 9

3) I SUPERCONDENSATORI: STRUTTURA E MODELLI 14

3.1) STRUTTURA DEI SUPERCONDENSATORI 14

3.2) MODELLISTICA DEI SUPERCONDENSATORI PRESENTE IN LETTERATURA 15

3.3) MODELLO DI SUPERCONDENSATORE SVILUPPATO 16

3.3.1) Identificazione dei parametri del primo ramo. 17

3.3.2) Identificazione dei parametri del secondo ramo. 20

3.3.3) Identificazione dei parametri del terzo ramo. 21

4) VALIDAZIONE DEL MODELLO PROPOSTO ATTRAVERSO IL SUPPORTO ALLA SPERIMENTAZIONE EFFETTUATA CON UNA CAMPAGNA DI MISURE PRESSO I LABORATORI ENEA. 22

4.1) MISURA DEI PARAMETRI CARATTERISTICI DEL MODULO 22

4.2) MISURA DI EFFICIENZA IN FAST CHARGE 24

4.3) MISURA DI EFFICIENZA IN FAST DISCHARGE 26

BIBLIOGRAFIA 27

BIOGRAFIA 28

1) I SISTEMI DI ACCUMULO DELL'ENERGIA

1.1) INTRODUZIONE

Negli ultimi anni lo sviluppo tecnologico e industriale ha portato la nascita di nuove esigenze nella produzione e utilizzo di energia. Queste spaziano dall'esigenza di poter disaccoppiare la produzione dall'uso di energia elettrica, dalla necessità di garantire un maggior livello qualitativo e di affidabilità nella fornitura dell'energia stessa, sino alla necessità di un prelievo di energia caratterizzato da picchi di potenza molto maggiori rispetto al valore di potenza media. Le principali tecnologie atte all'accumulo di energia sono riassunte in Figura 1.

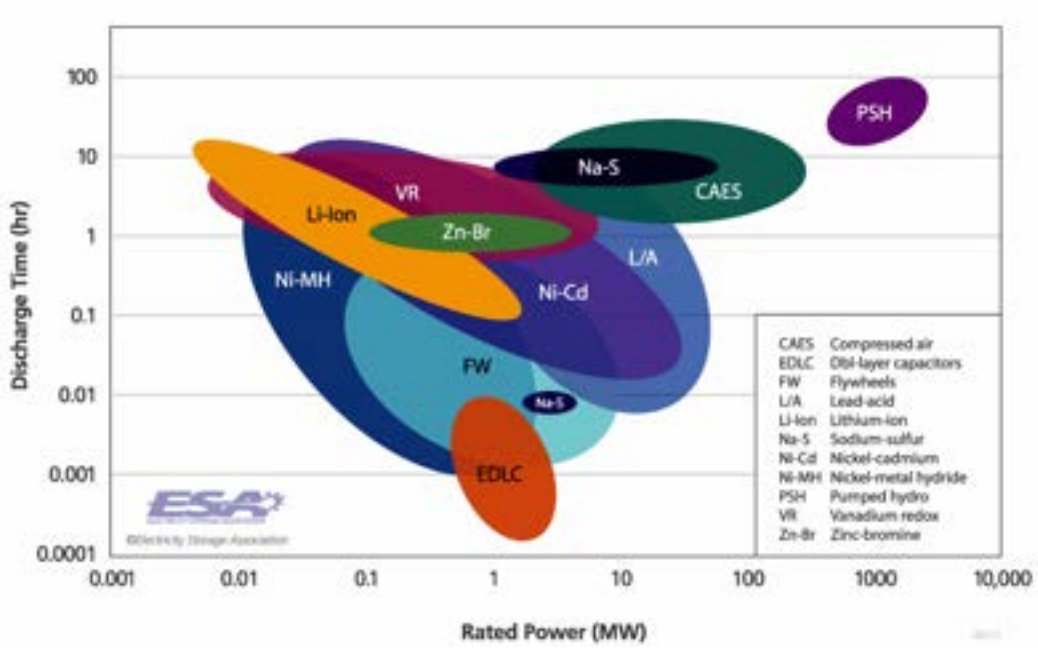


Figura 1 Confronto tra diversi sistemi di accumulo in relazione alla potenza nominale e tempo di scarica di utilizzo tipico.

Nell'ambito di tutte le applicazioni che richiedono un accumulo di energia per intervalli di tempi che spaziano dal millisecondo alle decine di secondi, i sistemi di accumulo a supercondensatore giocano un ruolo preponderante. A titolo di esempio alcune applicazioni riguardano gli UPS di potenza [1]-[2] al fine di garantire la continuità di servizio, gli stabilizzatori attivi [3] al fine di migliorare il livello di qualità sino a tutte le applicazioni di livellamento dei picchi (peak shaving) e/o recupero energetico nell'ambito degli azionamenti industriali [4]-[5].
A tal fine è indispensabile esplorare le performance di tali sistemi, in confronto con altre tecnologie, e disporre di una corretta modellazione al fine di possedere uno strumento di simulazione atto a un rapido e corretto dimensionamento di tali sistemi.

In aggiunta in tale documento sarà preso in analisi un criterio di dimensionamento di tali sistemi su base statistica per tutte le applicazioni in cui più utilizzatori, i cui profili di prelievo di potenza sono noti e uguali tra loro mentre aleatorio risulta l'istante di inizio del ciclo, fanno capo a un unico sistema di accumulo centralizzato. Il criterio permette di ottimizzare il tornaconto economico in una visione di sistema e non limitatamente alla massimizzazione del recupero energetico.

1.2) CARATTERISTICHE E PERFORMANCE DI DIVERSE TIPOLOGIE DI SISTEMI DI ACCUMULO DI ENERGIA ELETTRICA: CAMPI DI APPLICAZIONE.

Lo sviluppo tecnologico ha portato alla nascita di numerose tecnologie atte all'accumulo sotto forma di energia elettrica, Figura 1, e, in particolare negli ultimi anni, si è vista una grande diffusione e attenzione verso le batterie al litio nelle sue diverse forme (litio, litio-ione, litio-polimeri…). Molto attuale è il confronto tra tali sistemi di accumulo con i supercondensatori i quali permettono un accumulo di tipo elettrostatico.
Le due tecnologie, in linea di principio, sono lo specchio di due diverse esigenze nell'accumulare energia elettrica; la bontà di un sistema di accumulo non è solo funzione della densità di energia che lo caratterizza, ma anche della densità di potenza che permette di esprimere la capacità dello stesso di erogare o assorbire diversi quantitativi di energia in tempi più o meno limitati. Questi due aspetti devono poi essere correlati con l'efficienza e la durata in termini di cicli di vita del sistema stesso.
Un'immagine rappresentativa delle diverse tecnologie atte all'accumulo di energia elettrica è riportata in Figura 2, che mostra il diagramma di Ragone per diverse batterie elettrochimiche, fuel cells, supercondensatori e condensatori convenzionali.

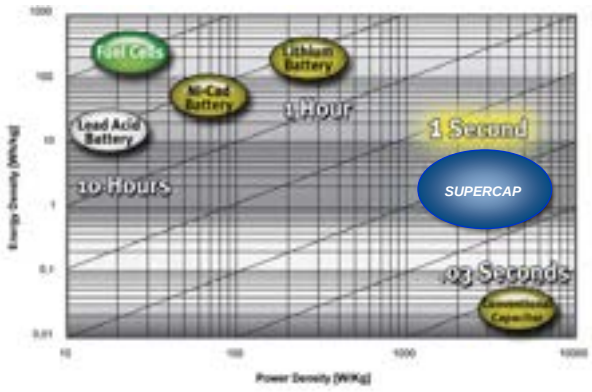


Figura 2 Diagramma di Ragone per diverse tecnologie di accumulatori elettrochimici ed elettrostatici

La necessità di identificare le performance e caratteristiche delle diverse tecnologie è di primaria importanza al fine di identificare la soluzione corretta in funzione dell'applicazione in esame.
Il confronto tra supercondensatori (SC) e batterie al litio-polimero ad alta potenza è quanto mai attuale poiché non sono ben definiti i rispettivi reali limiti

operativi e poiché sono molteplici le applicazioni in cui il sistema di accumulo richiederebbe idealmente performance tipiche di una o l'altra tecnologia. In aggiunta la comparazione è non facilmente conducibile poiché si trattano due differenti tecnologie e, di conseguenza, anche i relativi risultati devono essere opportunamente letti non come singole voci ma in ottica di sistema e delle relative applicazioni d'impiego.
Come riportato in [6] si sono indagate nel dettaglio le diverse performance di un banco supercondensatori da 20F a 15V della Maxwell Technologies e di un pacco batteria litio-polimero ad alta densità di potenza da 7.2Ah a 30V della Kokam al fine di fornire una guida per la scelta del giusto dispositivo in funzione dell'applicazione. In particolare il modulo supercondensatore in esame (BPAK0020 P015 B01) consiste i 6 celle collegate in serie per una massa totale di 230g, mentre la batteria al litio (SLPB 45205130P) consiste in 8 celle in serie per una massa totale di 1800g.
Le attività sperimentali illustrate in [6] hanno in particolar modo permesso di evidenziare le seguenti caratteristiche peculiari per i due dispositivi di accumulo.
Batterie al litio ad alta densità di potenza:

- potenza specifica sino a 2100 W/kg in scarica
- potenza specifica sino a 300 W/kg in carica
- energia specifica nominale di 118 Wh/kg

Supercondensatori:

- potenza specifica sino a 10000 W/kg in scarica
- potenza specifica sino a 10000 W/kg in carica
- energia specifica nominale di 3.6 Wh/kg

Limitandosi a questa prima analisi le batterie al litio ad alta densità di potenza sembrano vincenti sui supercondensatori dal momento in cui l'applicazione è energivora . A queste prime informazioni vanno correlate le performance del numero di cicli di vita, efficienza e comportamento termico.
Batterie al litio ad alta densità di potenza:

- 10000 cicli di vita a condizione di utilizzare in ogni ciclo solo il 20% dell'energia immagazzinata
- efficienza compresa tra 82% e 88%
- limite operativo di 60°C
- possibilità di impiego con densità di potenza di 2100W/kg e duty cycle di 0.025 (rapporto di 1 a 40 tra utilizzo e pausa) al fine di evitare una eccessiva sovratemperatura delle stesse.

Supercondensatori:

- 500.000 cicli di vita a corrente nominale e utilizzando il dispositivo tra la tensione nominale e la sua metà
- efficienza compresa tra 85% e 99% nelle stesse condizioni di utilizzo delle batterie elettrochimiche
- limite operativo di 65°C
- possibilità di impiego con densità di potenza di 2100W/kg e duty cycle di 0.1 (rapporto di 1 a 10 tra utilizzo e pausa) al fine di evitare una eccessiva sovratemperatura delle stesse

Questo secondo set d'informazioni permette di collocare meglio le due tecnologie e rende quindi evidente come le batterie al litio-polimero anche ad alta densità di potenza siano destinate ad applicazioni ben differenti rispetto ai supercondensatori. La famiglia delle batterie elettrochimiche è destinata alle applicazioni di tipo "energia", mentre i supercondensatori per quelle di tipo "potenza".
All'interno delle batterie elettrochimiche vi è poi un'ampia gamma di tecnologie costruttive che permette di realizzare batterie più o meno orientate alle applicazioni stazionarie di energia piuttosto che di potenza per la trazione. I supercondensatori, invece, sono tipicamente utilizzati per tutte le applicazioni cicliche di accumulo dell'energia elettrica.
Un parametro identificativo delle due tecnologie è la costante di tempo tipica di impiego per la carica scarica degli stessi: 1-2 s per i supercondensatori, ore per le batterie elettrochimiche. Riguardo la Figura 2 la costante di tempo rappresenta il tempo necessario per scaricare il dispositivo caratterizzato da una certa densità di energia con il corrispondente valore di densità di potenza indicato sul diagramma di Ragone stesso. In altri termini il diagramma di Ragone indica come i supercondensatori siano adatti per tutte quelle applicazioni in cui si voglia caricare/scaricare l'accumulo in tempi compresi tra le decine di millisecondi e le decine di secondi, mentre le batterie elettrochimiche, a seconda della tecnologia, nell'ordine dei tempi compresi tra i minuti e le ore.
Questo riflette molto il comportamento termico dei due sistemi di accumulo in esame, infatti a pari densità di potenza i supercondensatori mostrano in [6] una sovratemperatura di sistema sempre nettamente inferiore a quella raggiunta dalle batterie al litio ad alta densità di potenza.
Tali informazioni, unite al numero dei cicli di vita del sistema, permettono di scegliere correttamente la tecnologia in funzione dell'applicazione. A titolo d'esempio, per un'applicazione di trazione puramente elettrica la tecnologia corretta per l'accumulo di energia elettrica sono le batterie elettrochimiche (es. litio-polimero), mentre in una trazione ibrida (termica ed elettrica) la tecnologia corretta per l'erogazione dei picchi di potenza è quella a supercondensatori. Nel primo caso, infatti, l'accumulo sarà caratterizzato da cicli dell'ordine delle ore, mentre nel secondo caso nell'ordine dei secondi. Contestualmente nel primo caso il numero di cicli di carica è scarica sarà almeno uno o due ordini di grandezza inferiori rispetto alla seconda applicazione a parità di vita del sistema di trazione stesso.
Come illustrato in [6] il confronto economico tra i due sistemi di accumulo perde di significato dal momento in cui le due tecnologie risultano complementari e non concorrenziali per le diverse applicazioni. In termini di densità di energia nominali i supercondensatori sono molto più costosi delle batterie al litio ad alta densità di potenza (50 €/Wh vs 1.2€/Wh), ma dal momento in cui il confronto viene fatto a pari cicli di vita il costo delle batterie al litio và moltiplicato per un fattore 200; un fattore 50 per tenere conto del rapporto tra i numeri di cicli di vita nominali riportati dai datasheet (500.000

per i supercondensatori e 10.000 per le celle al litio) e un fattore 5 per tenere conto che il numero di cicli di vita delle batterie analizzate (10.000) si ha condizione di utilizzare solo il 20% dell'energia nominale immagazzinata (per i supercondensatori il costo riportato tiene già conto di utilizzare il dispositivo tra la tensione nominale e la sua metà, quindi di sfruttare ad ogni ciclo il 75% circa dell'energia immagazzinata). Quest'ampia forbice di costo mostra ancora chiaramente come le due tecnologie di accumulo siano profondamente differenti e, di conseguenza, il confronto deve essere analizzato principalmente per capire i reali limiti e campi di utilizzo delle due tecnologie.

2) REALIZZAZIONE DI UN TOOL DI PROGETTAZIONE PER IL DIMENSIONAMENTO SU BASI STATISTICHE DI UN SISTEMA DI ACCUMULO A SUPERCONDENSATORI

E' stata definita una formalizzazione di tipo probabilistico del problema del dimensionamento di sistemi di accumulo associati a numerosi azionamenti identici con frenatura a recupero energetico. Si è analizzato in particolare il caso in cui l'energia scambiata da ciascun azionamento segue ripetutamente un ciclo fissato, ma in modo sfasato e casuale rispetto agli altri azionamenti, cosicché l'energia recuperata accumulabile in un ciclo diviene una variabile aleatoria.
Volendo limitarsi al solo aspetto dell'energia recuperabile tramite il sistema di accumulo e trascurando quindi ogni considerazione relativa ai costi delle batterie e dei convertitori durante la vita utile del sistema stesso, è sufficiente analizzare un periodo di tempo di durata pari al ciclo caratteristico di un azionamento, giacché esso contiene tutte le informazioni necessarie. I risultati riportati nel seguito sono stati ottenuti tramite simulazione Monte Carlo.
La prima questione da esaminare riguarda l'eventualità stessa che il sistema di accumulo possa venire utilizzato in funzione delle possibili combinazioni dei cicli dei diversi azionamenti: se la probabilità che in un ciclo si produca dell'energia di recupero è trascurabile, allora non è ovviamente opportuno dotarsi di un sistema di accumulo. Prendendo a titolo di esempio il ciclo di potenza riportato in Figura 3 troviamo che la probabilità che vi sia un recupero di energia durante un ciclo è apprezzabile anche con un numero di apparecchi relativamente elevato quando al contrario ci si potrebbe aspettare che, in tali condizioni, l'energia di recupero proveniente da alcuni azionamenti venga immediatamente utilizzata da altri apparecchi in contemporanea fase di assorbimento (si veda la Figura 4).

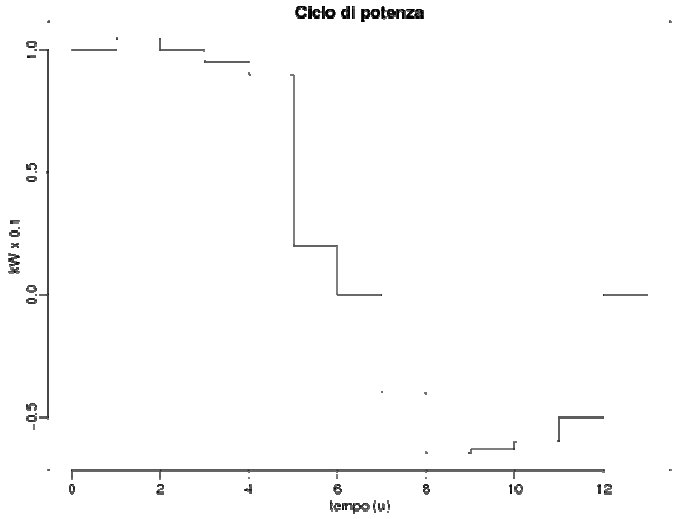


Figura 3 Ciclo di potenza di un azionamento. L'unità di tempo è 10 secondi.

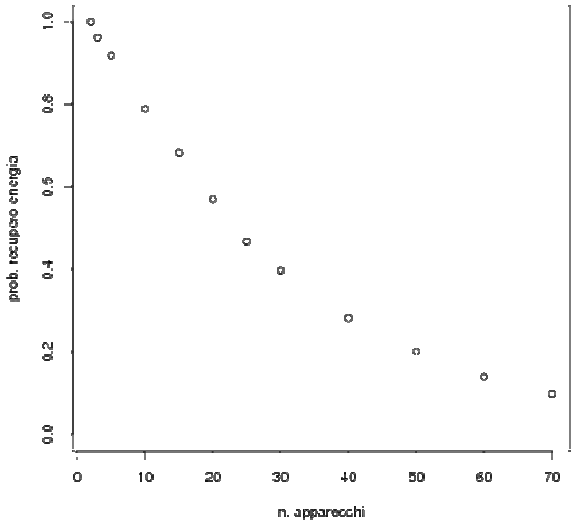


Figura 4 Probabilità che vi sia energia recuperabile in funzione del numero di azionamenti (apparecchi).

La seconda questione, una volta rilevato che il recupero energetico durante un ciclo non è infrequente, riguarda la quantità di energia recuperata. In Figura 5 riportiamo le curve della quantità media e mediana di energia recuperata in funzione del numero di azionamenti, sia con un accumulo di capacità finita, sia con un accumulo di capacità infinita, con convertitori di potenza nominale infinita. L'energia immagazzinata è espressa in kW disponibili nell'unità di tempo base, che nel caso specifico è di 10 secondi, in altri termini ogni unità .

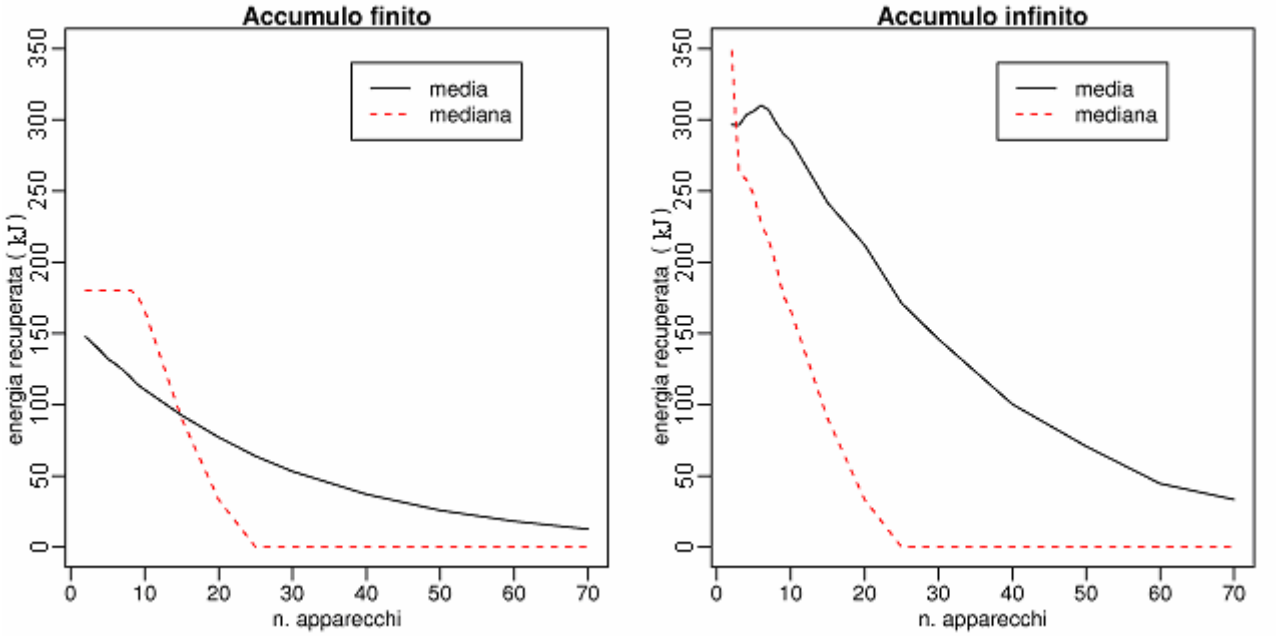


Figura 5 Energia recuperata nel corso di un intervallo di durata pari a un ciclo di potenza in funzione del numero di azionamenti con un accumulo di capacità di 20 kJ (a sinistra) e con un accumulo di capacità infinita (a destra) .

La Figura 5, nel pannello di sinistra, mostra ad esempio che con un accumulo con una capacità di 200 kJ, l'energia media recuperabile in un ciclo, con dieci azionamenti, è di circa 110 kJ (ipotizzando un rendimento del 90%) ed è essenzialmente equivalente all'energia utilizzata da un azionamento alla massima potenza nel medesimo intervallo di tempo. Viene quindi confermata l'indicazione che può essere opportuno dotare l'impianto di un sistema di accumulo anche con riferimento alla quantità di energia recuperabile. Questa ed altre analisi riguardanti esclusivamente l'aspetto energetico (e non anche quello economico) si possono trovare in [7], compreso un criterio di prima approssimazione per determinare la taglia dell'accumulo con un dato numero di azionamenti.
In [8], mantenendo le medesime ipotesi sul meccanismo di sfasamento degli azionamenti, il problema dell'ottimizzazione del sistema di accumulo viene affrontato anche dal punto di vista dei costi. In quest'ottica appare chiaro come sia necessario riferirsi ad un periodo di tempo pari alla vita utile del sistema di accumulo, in modo da poter verificare che il risparmio derivante dal recupero di energia controbilanci i costi del sistema di accumulo stesso. Il periodo di vita del sistema di accumulo viene suddiviso in intervalli di lavoro di uguale lunghezza e, in ciascuno di questi, viene selezionata casualmente una sfasatura tra gli azionamenti: in tal modo si ricopre un ampio ventaglio di situazioni, partendo da quella in cui una sfasatura tra azionamenti determinata all'inizio della vita non cambia fino alla fine, fino a quella in cui una nuova sfasatura viene selezionata ad intervalli di tempo di durata pari a quella di due cicli caratteristici (sono necessari due cicli perché ogni azionamento deve avere il tempo di completare il proprio ciclo indipendentemente dalla fase ad esso assegnata).
Facendo riferimento ad uno schema di impianto come quello riportato in Figura 6, l'ottimizzazione del sistema di accumulo è stata condotta rispetto al convertitore C3 e alla taglia A dell'accumulo, mentre la potenza nominale del raddrizzatore C1 viene fissata in funzione dell'assorbimento massimo di potenza da parte degli azionamenti, eventualmente escludendo valori molto elevati di assorbimento che si presentino con probabilità trascurabile.

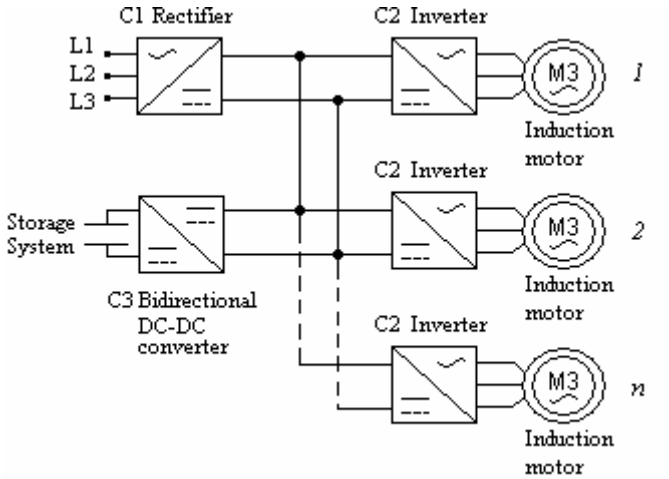


Figura 6 Schema di impianto utilizzato per l'ottimizzazione di C3 e della taglia dell'accumulo avendo fissato preventivamente C1.

Il profilo di potenza utilizzato per il funzionamento dei motori rappresentati in Figura 6 è qualitativamente simile a quello di Figura 3, anche se in versione semplificata. In Figura 7 appare tale profilo, di durata di 120 secondi, replicato per due volte e con una fase pari a 50 secondi.

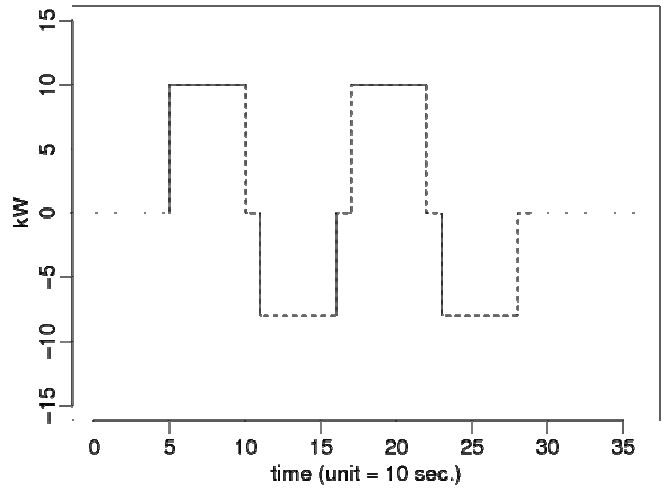


Figura 7 Profilo di potenza di un azionamento durata 120 secondi, replicato per due volte, con una fase di 50 secondi.

La funzione di costo da ottimizzare è formata da una parte costante e da una parte aleatoria: la parte costante contiene i costi relativi al contratto di fornitura (dove la potenza impegnata è direttamente collegata alla taglia del raddrizzatore C1 di Figura 6) e alle componenti del sistema di accumulo; la parte aleatoria consiste nel valore dell'energia recuperata durante la vita utile del sistema di accumulo. I diversi coefficienti di costo sono stati ricavati da [9]. Come detto, il periodo di vita utile del sistema di accumulo è stato suddiviso in intervalli di lavoro indipendenti, dunque il valore complessivo dell'energia recuperata durante la vita utile è la somma delle energie recuperate in ciascun intervallo. Dato il gran numero di intervalli, la distribuzione di probabilità della funzione di costo è ben approssimata da una distribuzione gaussiana ed è sufficiente confrontare le medie di distribuzioni corrispondenti a diverse coppie (C3,A) per decidere quale sia la configurazione migliore. In Figura 8 si riporta il grafico della funzione di costo media sopra un opportuno dominio per (C3,A), con dieci azionamenti e una potenza nominale per C1 di 87 kW. Quest'ultimo valore è stato scelto in seguito all'osservazione che la probabilità che il complesso degli azionamenti richieda una potenza ad esso superiore è dello 0,13%.

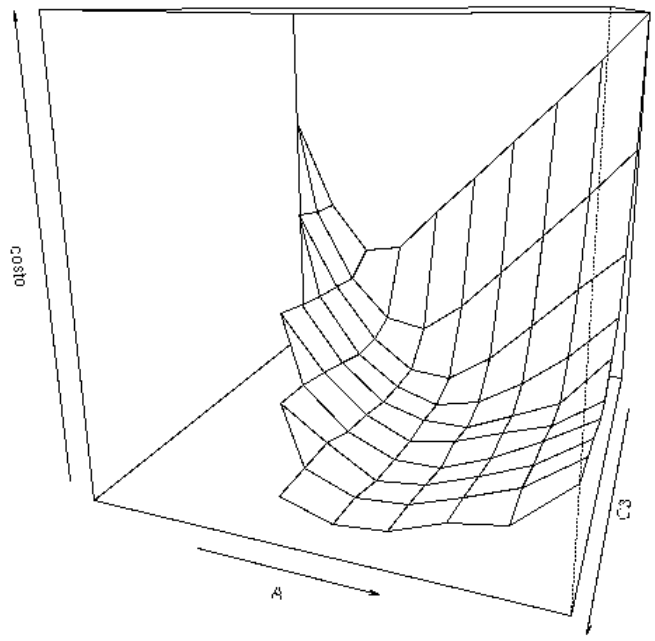


Figura 8 Superficie della funzione di costo al variare dell apotenza nominale del convertitore tra accumulo e carico (C3) e della taglia dell'accumulo (A).

Il punto di minimo della funzione in figura 6 si trova in un intorno del punto (C3; A) = (32 kW; 0,24 kWh). Il costo di tale soluzione, comprensivo dei risparmi economici derivanti dalla quota di energia elettrica recuperata e quindi non acquistata, considerando una vita utile dell'accumulo di 16 anni e un milione di cicli è di circa 43400 €, contro un costo di un impianto identico ma senza sistema di accumulo di 46106 €. Un diverso tipo di confronto, che tende a favorire più nettamente l'impianto con sistema di accumulo, è quello dove il raddrizzatore C1, nell'impianto senza accumulo, ha una potenza nominale di 100 kW (cioè quella necessaria ad alimentare tutti e 10 gli azionamenti alla massima potenza). Questa scelta trova giustificazione nel fatto che, con dell'energia di riserva, si può sotto-dimensionare C1 (appunto a 87 kW) nella speranza che vi sia energia accumulata per alimentare il carico durante i rari picchi massimi. In tal caso il costo dell'impianto senza accumulo sarebbe di 52530 €. E` tuttavia necessario un approfondimento per valutare quale sia il metodo di confronto più adeguato.

3) I SUPERCONDENSATORI: STRUTTURA E MODELLI

3.1) STRUTTURA DEI SUPERCONDENSATORI

Ai fini di un corretto dimensionamento dei sistemi di accumulo a supercondensatore la disponibilità di una adeguata modellistica è di elevata importanza. I supercondensatori, a differenza delle batterie elettrochimiche, accumulano energia in un campo elettrostatico. Costruttivamente sono caratterizzati da due elettrodi e un separatore permeabile agli ioni, posto tra gli elettrodi, che contiene l'elettrolita, Figura 9.

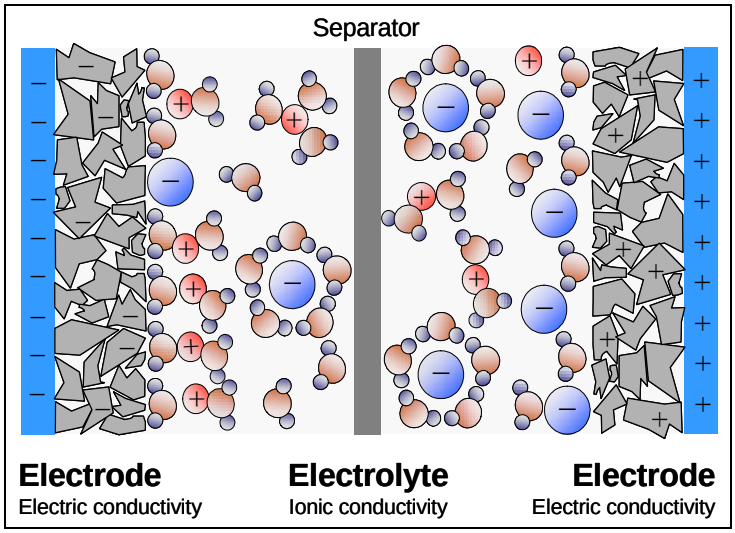


Figura 9 Struttura interna del supercondensatore

Gli elettrodi porosi sono immersi in una soluzione elettrolitica. Applicando una piccola differenza di potenziale ai capi degli elettrodi si innesca un processo di separazione di carica indotto dalla presenza di un campo elettrico. La zona in cui sono concentrate tali cariche è chiamata anche doppio strato, proprio da qui che il supercondensatore prende il nome di "double layer". I capacitori elettrochimici immagazzinano dunque energia nel doppio strato detto anche strato di Helmholtz che si viene a formare all'interfaccia elettrodo-elettrolita. Qui ioni carichi positivamente o negativamente si accumulano all'interfaccia elettrodo-elettrolita e sono compensati da elettroni che si dispongono sulla superficie dell'elettrodo. Lo spessore di tale strato dipende dalla concentrazione dell'elettrolita e dalla dimensione degli ioni. Tipicamente, come si osserva anche dalla Figura 10, si hanno spessori dell'ordine dei 2-10 Angstrom (Å) [10][11].

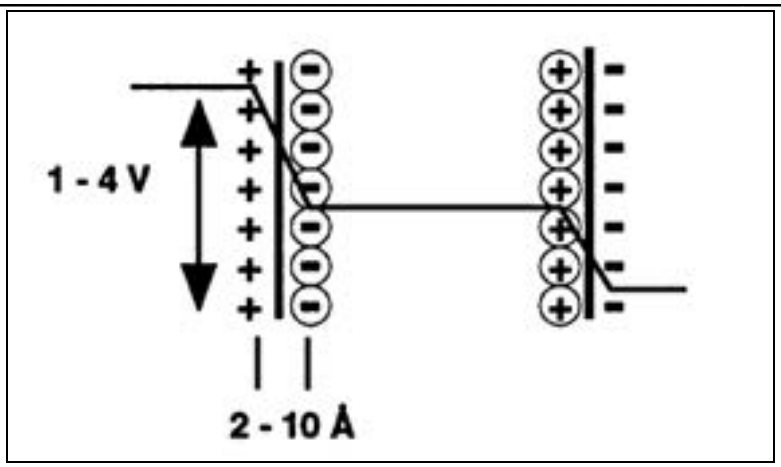


Figura 10 Distanza della separazione di carica all'interfaccia elettrodo-elettolita

Gli elettrodi sono concepiti in modo da costituire un'elevata superficie e sono realizzati con materiale poroso avente pori del diametro dell'ordine dei nanometri in modo tale da massimizzare la superficie del doppio strato. L'area superficiale dei materiali impiegati negli elettrodi dei supercap è assai maggiore di quella degli elettrodi tradizionali, difatti nelle applicazioni attuali si ottengono anche superfici dell'ordine di migliaia di metri quadri, equiparabili addirittura con la superficie di un campo da calcio.
I supercondensatori sono dotati di elevata capacità specifica, che dipende dall'alta area superficiale del carbone; in aggiunta però alla capacità derivante dalla separazione di cariche che si ottiene nel doppio strato si ha un contributo anche da reazioni che possono avvenire sulla superficie del carbone. Tali reazioni, di natura elettrochimica, danno origine ad un ulteriore accumulo di energia elettrica. Nel supercondensatore a doppio strato, disponibili commercialmente, si vogliono proprio evitare tali reazioni che offrono una pseudo capacità aggiuntiva al prezzo di una significativa riduzione dei cicli di vita del sistema stesso; non sono quindi presenti reazioni redox prossime a quelle di una comune cella elettrochimica ma caratterizzate da cinetiche più veloci.

3.2) MODELLISTICA DEI SUPERCONDENSATORI PRESENTE IN LETTERATURA

Ai fini di una corretta modellazione, fruibile alla progettazione e dimensionamento, risulta difficile interpretare e rappresentare fenomeni fisici complessi che avvengono nei microfori presenti negli elettrodi, quindi la modellistica presente tiene conto del comportamento a livello macro del sistema. I modelli presenti in letteratura sono caratterizzati da due approcci distinti; il primo segue un approccio elettrotecnico e cerca di modellizzare il comportamento basandosi esclusivamente sulla risposta in frequenza rilevabile ai morsetti esterni del dispositivo, il secondo, invece, modellizza le caratteristiche del supercondensatore basandosi su considerazioni di tipo fisico-chimico legate alla struttura dello stesso.

In [12] è riportato un modello che caratterizza il supercapacitore dai morsetti esterni attraverso la spettroscopia dell'impedenza elettrochimica (EIS). Tale modello, che si presta a tenere conto del reale comportamento del supercondensatore in un range di frequenze compreso da poche decine di mHz sino a circa 1kHz, è caratterizzato da soli tre parametri indipendenti la cui determinazione deriva dall'analisi in frequenza del dispositivo stesso. Limite di tale modellazione, oltre a richiedere una strumentazione dedicata per realizzare la EIS è che non è in grado di rappresentare i fenomeni di redistribuzione delle cariche all'interno della struttura porosa che caratterizza gli elettrodi, ne tantomeno i fenomeno di autoscarica.
In [13] si riporta un modello di supercondensatori a rami paralleli la cui struttura a parametri concentrati cerca di tenere strettamente conto della fisica del dispositivo. Il modello, capace di rappresentare i fenomeni di autoscarica e redistribuzione, è caratterizzato da parametri determinabili attraverso semplici misure di tensione e corrente ai terminali del supercondensatore. Limite di tale modello risiede nella capacità di rappresentare la corretta dinamica nel range che va dalla continua sino a poche decine di mHz. In [14] è trattato un modello semplificato di supercondensatori a rami paralleli che a differenza del precedente è caratterizzato da una procedura di identificazione dei parametri semplificata basata su di una sola prova di carica a corrente costante. I limiti di tale modello sono gli stessi del precedente. In [15], infine, si riporta un modello che segue sempre un approccio fisico per modellizzare il comportamento del supercondensatore e, in particolare il modello vuole tenere conto delle caratteristiche del supercondensatore in ogni sua parte modellizzando il comportamento tra anodo-membrana e membrana-catodo considerando inoltre che le proprietà variano nello spazio in maniera non uniforme. A tal fine si giunge a un modello costituito da rete complessa di circuiti *RC* in cui le capacità sono non lineari. La complessità del modello implica una difficile applicabilità dello stesso alle applicazioni reali, anche per la notevole difficoltà insita nella determinazione dei diversi parametri.

3.3) MODELLO DI SUPERCONDENSATORE SVILUPPATO

Il modello di supercondensatore preso in esame per l'attività e riportato in [16] è stato sviluppato presso il dipartimento di elettrotecnica del politecnico di Milano.
La peculiarità di tale modello sono:

- capacità di rappresentazione della dinamica dei dispositivi in un ampio range di frequenze di utilizzo: dalla continua sino a 1kHz;
- determinazione dei diversi parametri attraverso una semplice prova di carica a corrente costante e tramite le informazioni contenute nei datasheet del costruttore;
- corretta rappresentazione delle perdite interne e quindi del complessivo rendimento di sistema.

Il modello, Figura 11, è costituito da 3 rami paralleli i cui rami R-C sono caratterizzati da costanti di tempo almeno di un ordine di grandezza differenti; il primo ramo modellizza la dinamica veloce del dispositivo nel range di

frequenze 100mHz-1kHz, il secondo ramo tiene conto del fenomeno della redistribuzione delle cariche, ed infine il terzo ramo modellizza il fenomeno di autoscarica.

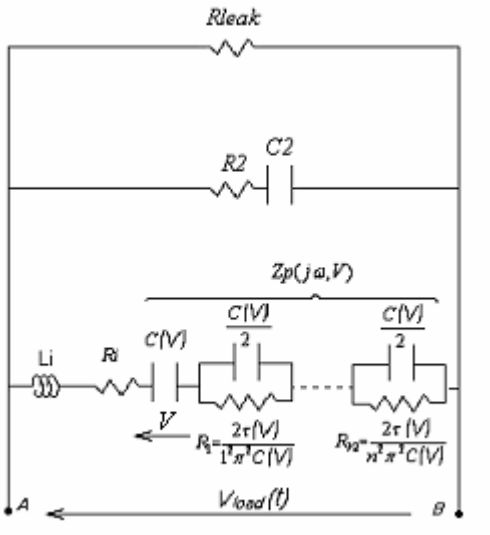


Figura 11 Modello del supercondensatore

Tale modello deriva da un'attenta analisi di quelli introdotti in [12] e [14]. La possibilità di correlare analiticamente diversi parametri dei due modelli apparentemente distinti, ha permesso di realizzare un unico modello "ibrido" che unisce le peculiarità dei due distinti.

3.3.1) Identificazione dei parametri del primo ramo.

Il primo ramo permette di modellizzare la risposta in frequenza del supercondensatore nel range di frequenze che spazia da poche decine di mHz sino a 1kHz. In tale range di frequenze l'impedenza del dispositivo mostra un andamento che è funzione sia della frequenza che della tensione di polarizzazione applicata ai morsetti del dispositivo stesso.

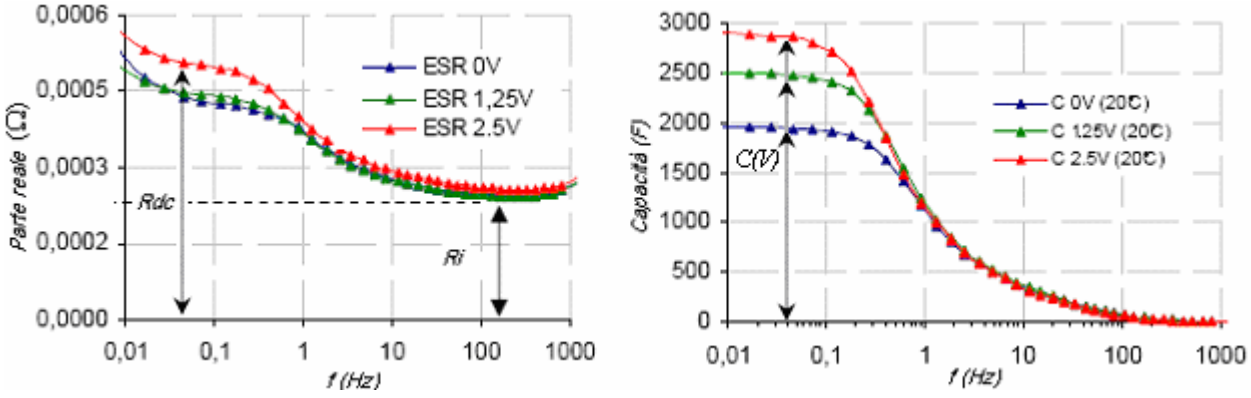


Figura 12 Risposta in frequenza del supercondensatore Maxwell BCAP0010 da 2600F ricavata dalla letteratura [3].

Come evidenziato in Figura 12 sia la capacità che la resistenza del dispositivo diminuiscono all'aumentare della frequenza, tanto che la capacità tende ad annullarsi per frequenze maggiori di 100Hz, mentre la resistenza tende a dimezzarsi rispetto ai valori misurabili a poche decine di mHz. Si evidenzia inoltre una variazione dei parametri, soprattutto per la capacità, al variare della tensione di polarizzazione, solo nel range delle basse frequenze.
Come mostrato in [12] in questo range di frequenze il comportamento del dispositivo può essere rappresentato attraverso i parametri del primo ramo del modello completo. In particolare:

- L_i: rappresenta l'induttanza interna e il suo contributo risulta evidente per frequenze maggiori di alcune centinaia di Hz. Essendo tale parametro dell'ordine dei nH, è normalmente trascurato nelle applicazioni caratterizzate da frequenze di carica/scarica minori di 100Hz;
- R_i: rappresenta la resistenza interna del dispositivo alle alte frequenze. Tale parametro è di norma riportato nei datasheet del costruttore;
- $Z_p(j\omega,V)$: rappresenta la funzione di trasferimento capace di rappresentare la variazione dell'impedenza al variare della tensione V e pulsazione ω.

La funzione $Z_p(j\omega,V)$ analiticamente pari a

$$Zp(j\omega,V)=\frac{\tau(V)\cdot\coth\left(\sqrt{j\omega\tau(V)}\right)}{C(V)\cdot\sqrt{j\omega\tau(V)}} \tag{0.1}$$

è caratterizzata da 2 soli parametri indipendenti $\tau(V)$ e $C(V)$ che assumono la seguente forma:

$$\begin{aligned} C(V) &= C_0 + k\,V; \\ \tau(V) &= \tau_0 + k_\tau V. \end{aligned} \tag{0.2}$$

L'antitrasformata, come indicato in [12] e in Figura 11, è rappresentabile da una capacità $C(V)$ in serie a infiniti parametri R-C dove:

$$\begin{aligned} C &= \frac{C(V)}{2} \\ R &= \frac{2\cdot\tau(V)}{n^2\cdot\pi^2\cdot C(V)} \quad con\ 1<n<\infty. \end{aligned} \tag{0.3}$$

La determinazione dei parametri della funzione di trasferimento $Z_p(j\omega,V)$ ed il loro significato diventa semplice e chiaro se come illustrato in [16] si studiano i limiti di tale funzione:

$$\lim_{\omega\to 0}\Re e\left\{Z_p(\,j\omega,V\,)+R_i\right\}=\sum_{n=1}^{\infty}\frac{2\tau(V)}{n^2\pi^2C(V)}+R_i=\frac{\tau(V)}{3C(V)}+R_i=R_{dc}$$
$$\lim_{\omega\to 0}\Im m\left\{\,\omega Z_p(\,j\omega,V\,)+R_i\right\}=-\frac{1}{C(V)} \tag{0.4}$$

dove *C(V)* rappresenta la capacità del dispositivo al variare della tensione di polarizzazione alle basse frequenze nel range dei 50mHz, mentre R_{dc} rappresenta la resistenza del dispositivo alle basse frequenze nel range dei 50mHz con l'approssimazione di considerarla costante al variare della tensione di polarizzazione. Tale approssimazione, come illustrato in Figura 12, risulta accettabile.
In altri termini conoscendo la resistenza del dispositivo e la dipendenza della capacità al variare della tensione di polarizzazione nel range dei 50 mHz e il valore della resistenza interna ad alte frequenze, sono noti dalla (0.4) i parametri $\tau(V)$ e *C(V)* che identificano completamente la funzione di trasferimento $Z_p(j\omega,V)$.
Come illustrato in [14] e [16] per determinare i valori di resistenza R_{dc} e *C(V)* non è necessario effettuare una risposta in frequenza del dispositivo, ma è sufficiente una prova di carica a corrente costante il cui profilo sia caratterizzato da armoniche significative nel range di frequenze compreso tra 10mHz e 100mHz, il che si traduce in una carica, partendo dal dispositivo completamente scarico, in un tempo dell'ordine di 20s. Raggiunta la tensione nominale la corrente di carica I_c viene posta a 0, in tale istante è possibile misurare una caduta di tensione ai morsetti del dispositivo per effetto della resistenza interna R_{dc} che è ricavabile come:

$$R_{dc}=\frac{\Delta V_{fine-carica}}{I_c}. \tag{0.5}$$

Per la determinazione dei parametri C_0 e *k* e quindi della *C(V)* è sufficiente osservare che nel range delle basse frequenze la tensione ai capi della capacità C(V) per effetto della corrente di carica costante I_c è esprimibile come:

$$I_c=(C_o+k*V(t))\frac{dV(t)}{dt} \tag{0.6}$$

e quindi risolvendo la (0.6) risulta:

$$t=\frac{C_o}{I_c}*V+\frac{1}{2}*\frac{k}{I_c}*V^2 \tag{0.7}$$

ossia interpolando opportunamente il profilo di tensione ai capi del dispositivo durante la carica a corrente costante, a meno della caduta resistiva sulla resistenza interna R_{dc}, con una funzione quadratica, è possibile ricavare i due parametri C_o e *k*.

3.3.2) Identificazione dei parametri del secondo ramo.

Terminata la carica a corrente costante si ha il fenomeno di redistribuzione delle cariche con l'effetto ai terminale esterni di una riduzione della tensione e, da un punto di vista di modello, una carica della capacità C_2 del secondo ramo. Terminata la redistribuzione dopo un tempo pari a circa 3 volte la costante di tempo τ_2 del secondo ramo, si ha che la capacità *C(V)* del primo ramo e la capacità C_2 del secondo si trovano ad essere alla stessa tensione, è quindi possibile scrivere il seguente bilancio di carica.

$$Q_{TOT} = I_C * T_C = C_2 * V + (C_0 + \frac{k}{2} * V) * V \tag{0.8}$$

dove:
Q_{TOT}: carica totale immagazzinata nel supercondensatore;
I_C: corrente di carica costante;
Tc: tempo di carica
V: tensione ai capi del supercap misurata dopo 3 volte τ_2.

Per la determinazione della costante di tempo τ_2 si seguono i seguenti passi:

- si effettua la carica del supercondensatore portandolo alla sua tensione nominale;
- si misura l'andamento della tensione ai capi del supercondensatore per un periodo di 30 minuti;
- si individua in questo periodo dove termina il fenomeno di redistribuzione e inizia l'effetto della resistenza di leakage osservando un cambio di pendenza nell'andamento della tensione;
- si divide per tre l'intervallo di tempo che si considera quello più rappresentativo del cambio di pendenza ottenendo dunque la costante di tempo.
- si può poi verificare la bontà della scelta della costante di tempo effettuando una simulazione software con i valori ottenuti e confrontando questa con l'andamento reale della tensione ai capi del supercondensatore.

Si precisa che la scelta dell'istante di tempo in cui si osserva il cambiamento di pendenza non deve essere necessariamente effettuata con un'ottima accuratezza in quanto la variazione di qualche decina del valore della costante si tempo non modifica sostanzialmente i valori determinabili successivamente.
Agevolmente si ricava la (1.9):

$$C_2 = \frac{Q_{TOT}}{V} - C_0 - \frac{k}{2} * V \tag{0.9}$$

Si procede nel calcolare la resistenza R_2 con un semplice passaggio aritmetico a seguito della definizione della costante di tempo. La resistenza del secondo ramo si determina come:

$$R_2 = \frac{\tau_2}{C_2} \tag{0.10}$$

3.3.3) Identificazione dei parametri del terzo ramo.

Rimane infine il calcolo della resistenza del terzo ramo, R_{leak}, responsabile del fenomeno di autoscarica del supercondensatore. Tale resistenza può essere determinata dalla conoscenza della corrente di leakage fornita dai datasheet. Tale valore di corrente rappresenta la massima corrente di autoscarica alla tensione nominale. Risulta quindi:

$$R_{leak} = \frac{V_N}{I_{leakage}} \tag{0.11}$$

dove:
V_N: tensione nominale del supercondensatore;
$I_{leakage}$: corrente di autoscarica.

4) VALIDAZIONE DEL MODELLO PROPOSTO ATTRAVERSO IL SUPPORTO ALLA SPERIMENTAZIONE EFFETTUATA CON UNA CAMPAGNA DI MISURE PRESSO I LABORATORI ENEA.

Tale attività ha lo scopo di valutare le performance, con particolare riguardo all'efficienza, del sistema di accumulo a supercondensatori e validare la modellistica degli stessi nel completo campo d'impiego. La modellistica, sviluppata presso il dipartimento di elettrotecnica del Politecnico di Milano, [16], [17] è stata effettuata analizzando la singola cella mentre la validazione prevede l'analisi del modulo costituito dalla connessione di diverse celle in serie. Il sistema di accumulo a supercondensatori analizzato consiste in un modulo Maxwell Technologies da 63F alla tensione nominale di 125V.
Le principali caratteristiche del modulo sono:

Tensione nominale [V]	125
Capacità nominale [F]	63
Corrente massima continuativa con ventilazione attiva [A]	150
Corrente massima [A]	750
Temperatura minima operativa [°C]	-40
Temperatura massima operativa [°C]	+65
Altezza [mm]	265
Lunghezza [mm]	762
Profondità [mm]	425
Massa [kg]	59.5

Le caratteristiche di dettaglio sono riportate nel datasheet allegato.
Il modulo consiste di 48 celle da 3000F@2.7V (BCAP3000) collegate in serie.

4.1) MISURA DEI PARAMETRI CARATTERISTICI DEL MODULO

Il primo set di prove è stato realizzato per valutare la capacità del modulo in funzione di diverse condizioni di utilizzo. Il modulo è sottoposto a un profilo di corrente assegnato (profilo verde in Figura 13) e la conseguente tensione ai morsetti è misurata (profilo blu in Figura 13).

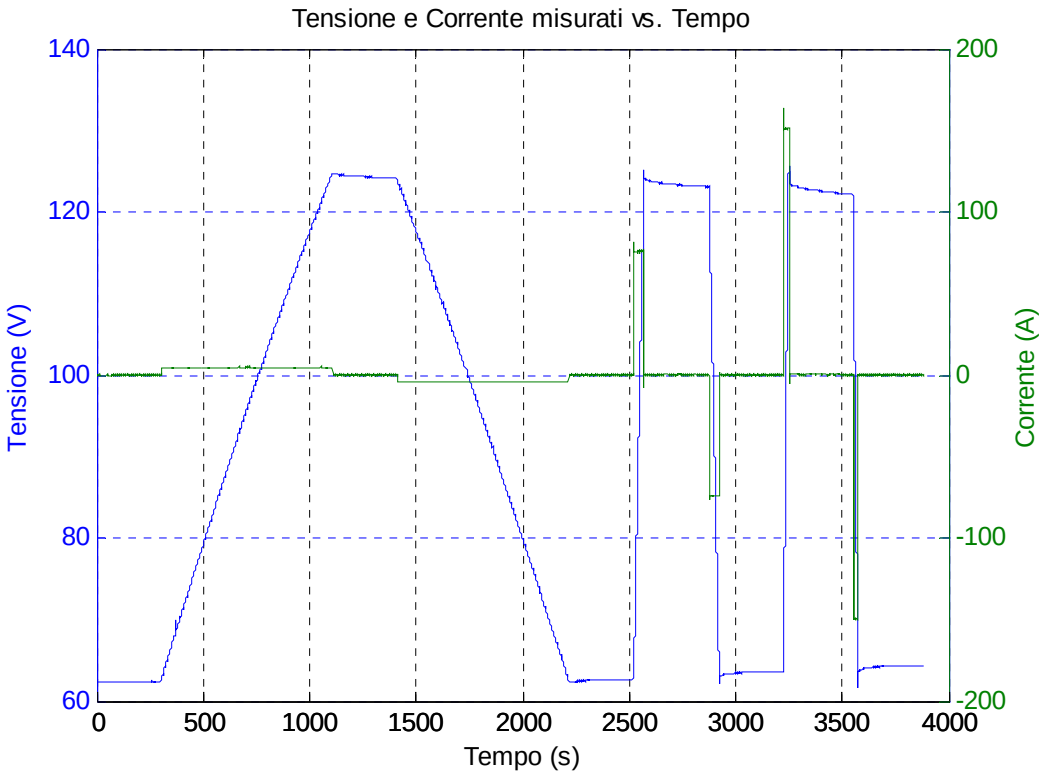


Figura 13 Prove di capacità

Riguardo la modellistica introdotta è possibile identificare i seguenti parametri:

R_{dc} [mΩ]	16
Ri [mΩ]	10
C_0 [F]	45
k [F/V]	0.158
R_2 [Ω]	216
C_2 [F]	2.3
R_{leak} [Ω]	24000

Tabella 1 Parametri del modulo BMOD0063P125 in analisi

Con i parametri identificati il confronto tra i risultati misurati e simulati è riportato in Figura 14

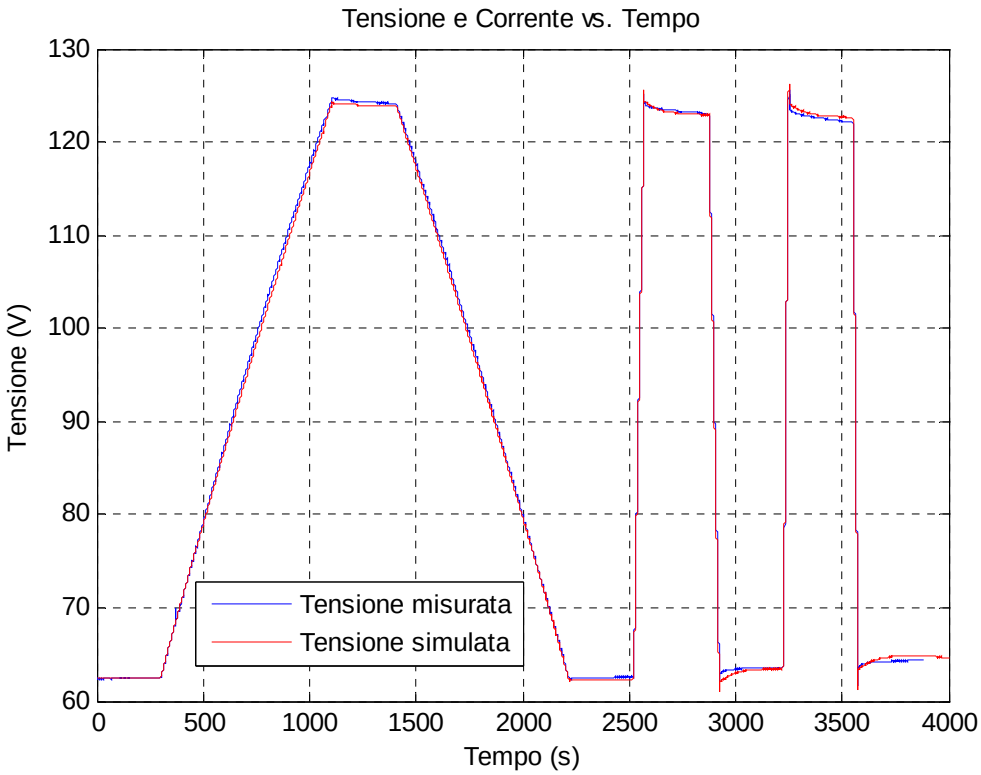


Figura 14 Confronto tra valori misurati e simulati

Si nota come la modellistica introdotta sia in grado di simulare correttamente il profilo di tensione misurato ai capi del dispositivo sia durante le dinamiche di carica e scarica, sia nelle fasi di pausa in cui si evidenzia il fenomeno della redistribuzione. In queste fasi, infatti si misura una riduzione di tensione a fine carica e dualmente un aumento a fine scarica.
Le successive prove mirano a determinare la capacità del modello di tenere correttamente in conto delle perdite interne del sistema, infatti non è condizione che un modello capace di rappresentare correttamente la dinamica sia anche in grado di rappresentarne correttamente l'efficienza.

4.2) MISURA DI EFFICIENZA IN FAST CHARGE

Tale set di prova è stato predisposto per verificare il comportamento e l'efficienza del modulo quando sottoposto ad un profilo di carica veloce seguito da scariche lente. Le cariche hanno durate variabili da 5 a 15s, mentre le scariche riportano sempre il modulo alla tensione minima di 62.5 V, Figura 15.

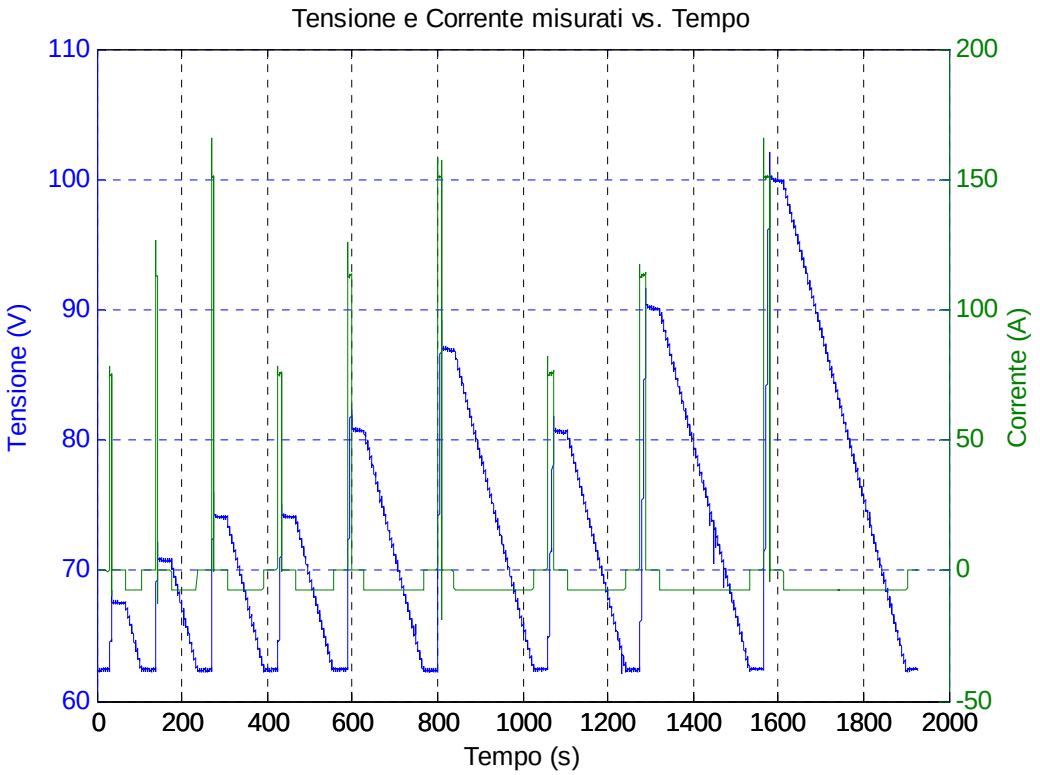


Figura 15 Cicli di Fast Charge

Anche in questo caso il confronto con la simulazione mostra la validità del modello sviluppato a simulare i risultati misurati.

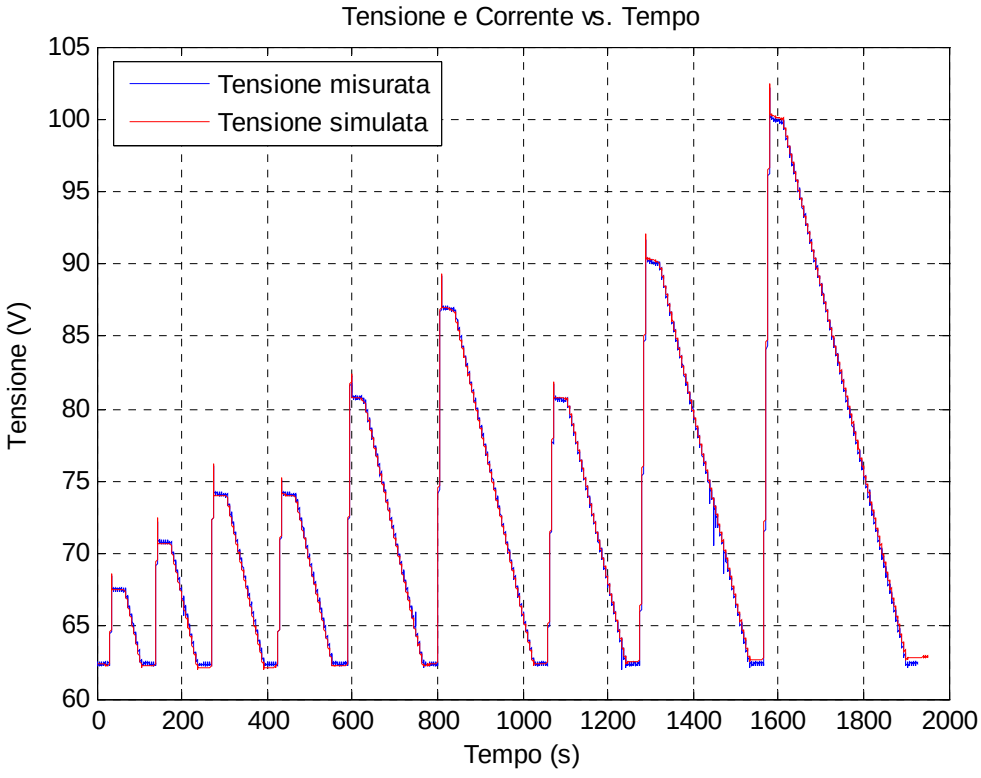


Figura 16 Confronto tra valori misurati e simulati in fast charge

I dati misurati e simulati sono stati utilizzati per calcolare il rendimento del modulo in tale condizione di funzionamento. I valori sono riassunti in tabella:

Rendimento misurato	Rendimento simulato
96.0 %	96.4 %

Tabella 2 Rendimento del modulo misurato e simulato in fast charge

Anche in questo caso il confronto tra misura e simulazione mostra come effettivamente il modello sia in grado di simulare correttamente anche il rendimento del sistema. I diversi fenomeni dissipativi e di redistribuzione delle carche descritti nella sezione della modellistica tengono effettivamente conto di fenomeni fisici riscontrabili anche dalle prove sperimentali.

4.3) MISURA DI EFFICIENZA IN FAST DISCHARGE

Tale set di prova è stato predisposto per verificare il comportamento e l'efficienza del modulo quando sottoposto ad un profilo di scarica veloce seguito da cariche lente. Le scariche hanno durate variabili da 5 a 15s, mentre le ccariche riportano sempre il modulo alla tensione nominale di 125 V, Figura 17.

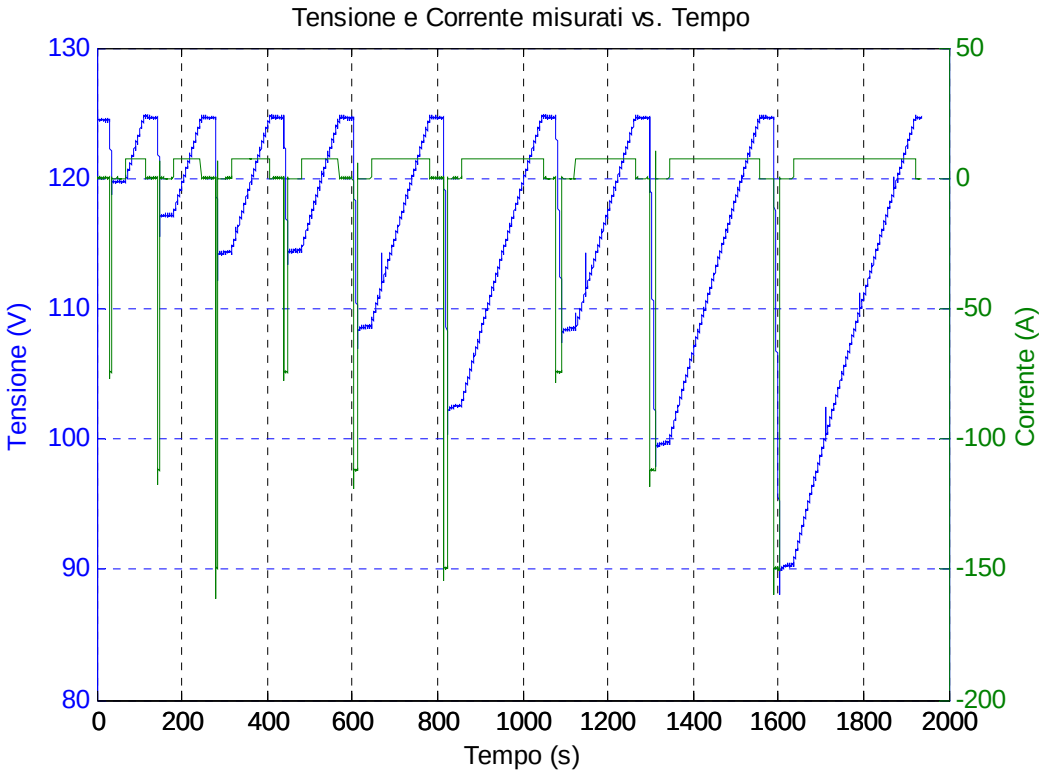


Figura 17 Cicli di Fast Discharge

Il confronto con la simulazione mostra i seguenti risultati:

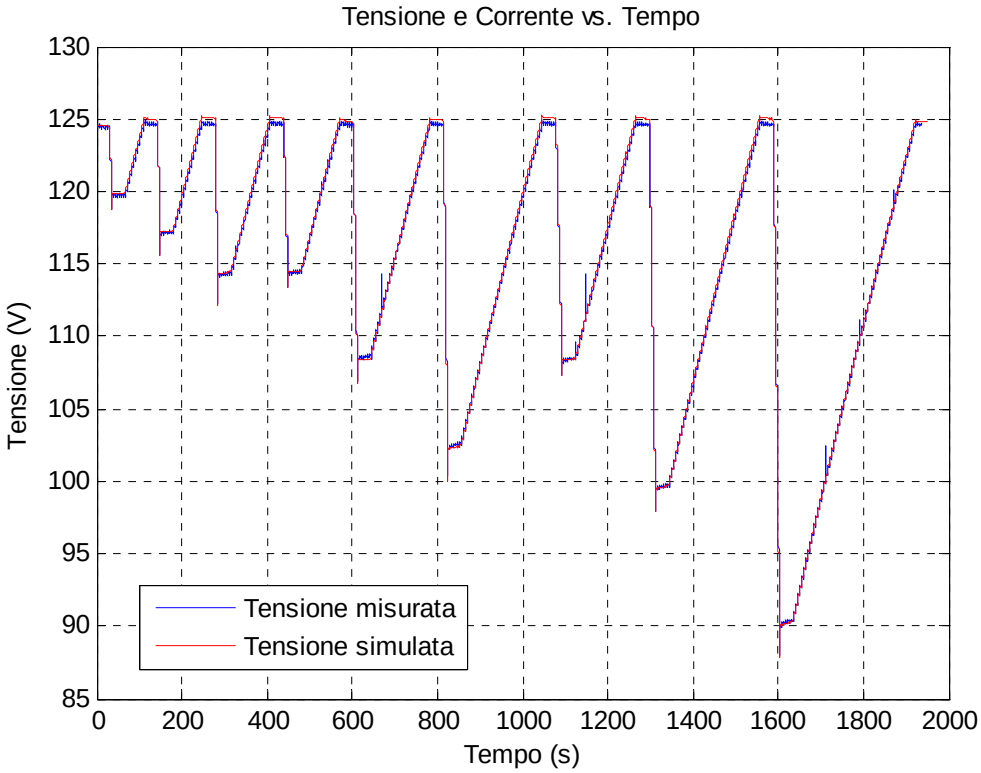


Figura 18 Confronto tra valori misurati e simulati in fast discharge

I rendimenti misurati e simulati sono:

Rendimento misurato	Rendimento simulato
97.9 %	97.9 %

BIBLIOGRAFIA

[1] K. Hidese, T. Monai, I. Takano, H. Nishikawa; "A collaborative operation method of UPFC type dispersed power supply system using fuel cell and electric double layer capacitor", IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2003, Vol. 2, pp. 711-716

[2] U.K. Madawala, D. J. Thrimawithana, K. Nihal; "An ICPT-Supercapacitor Hybrid System for Surge-Free Power Transfer", IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, Vol. 54, Issue 6, pp. 3287-3297

[3] J. Yan, K. Oti, N. Yamamura, M. Ishida; "A Study on Electric Power Smoothing System for Lead-acid Battery of Stand-alone Natural EnergyPower System Using EDLC", Power Conversion Conference (PCC), Nagoya, 2007, pp. 236-242

[4] Sang-Min Kim, Seung-Ki Sul: "Control of Rubber Tyred Gantry Crane With Energy Storage Based on Supercapacitor Bank" Power Electronics, IEEE Transactions on, Pages: 1420 – 1427 Vol. 21

[5] D. Iannuzzi, P. Tricoli:" Integrated storage devices for ropeway plants: useful tools for peak shaving"; 33rd Annual Conf. of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON), Tapei, Taiwan (2007).
[6] Musolino V., Tironi, E; "A Comparison of Supercapacitor and high-power Lithium Batteries". International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion, 2010. ESARS, Bologna, (IEEE sponsored) 19-21 October 2010.
[7] Pievatolo A. "Dimensionamento, su basi statistiche, di sistemi di accumulo in azionamenti con frenatura a recupero". Convegno ANAE 21° Seminario Interattivo Azionamenti Elettrici, Bressanone, 22-23 Marzo 2010.
[8] Musolino V., Pievatolo A., Tironi, E; "Design of a Supercapacitor Storage Unit with Multiple Bi-Directional Electric Drives using a Statistical Method". (Articolo ultimato, in attesa di pubblicazione su rivista scientifica)
[9] Tironi, E., Musolino V.; "Valutazione tecnica economica del costo del sistema di accumulo a Supercondensatori in applicazioni industriali di recupero energetico: Carroponti". Convegno ANAE 20° Seminario Interattivo Azionamenti Elettrici, Bressanone, 23-24 Marzo 2009.
[10] R. Kotz, M. Carlen, "Principles and applications of electrochemical capacitors", Electrochimica Acta Volume 45, Issues 15-16, 3 May 2000, Pages 2483-2498
[11] Juergen Auer, Dr John Miller, "Ultracapacitor-based energy management strategies for eCVT hybrid vehicles", Automotive Electronics, 2007 3rd Institution of Engineering and Technology Conference on, Warwick, 28-29 June 2007.
[12] S. Buller, E. Karden, D. Kok, R.W. De Doncker: "Modeling the dynamic behaviour of supercapacitors using impedance spectroscopy", IEEE Transaction on industry applications, Vol 38, No. 6, November/December 2002.
[13] L Zubieta, R. Bonert; "Characterization of double layer capacitors for power electronics applications", IEEE Transaction on industry applications, Vol 36, No. 1, January/February 2000.
[14] Faranda R.; Gallina M.; Son D.T., "A new simplified model of Double-Layer Capacitor", Clean Electrical Power, 2007, ICCEP '07. On pages: 706-710.
[15] F.Belhachemi, S. Rael, B. Davat; "A physical based model of power electric double- layer supercapacitors", Green-Inpl-Cnrs (Upresa 7037), France.
[16] Tironi E., Musolino V.; "Supercapacitor characterization in power electronic applications: Proposal of a new model". International Conference on Clean Electrical Power, 2009. ICCEP, Capri, (IEEE sponsored) 9-11 June 2009, pages 376 – 382.
[17] Musolino V., Piegari L., Tironi E., "A new full frequency range supercapacitor model with a very easy identification procedure". (Articolo ultimato, in attesa di pubblicazione su rivista scientifica)

BIOGRAFIA

Enrico Tironi è nato a Bergamo nel 1946.Ha conseguito la laurea in Ingegneria Elettrotecnica presso il Politecnico di Milano. Attualmente è professore ordinario della Cattedra di Impianti Elettrici del Dipartimento di Elettrotecnica del Politecnico di Milano. Dal 1996 al 2001 ha ricoperto il ruolo di Presidente del Consiglio di Corso di Studi di Ingegneria Elettrica del Politecnico di Milano. Dal novembre del 2002 al dicembre 2008 ha ricoperto la carica di Direttore del Dipartimento di Elettrotecnica. Dal novembre del 2002 è Preside Vicario della Terza Facoltà di Ingegneria del Politecnico di Milano. Ha partecipato in qualità di docente e/o di Direttore, a corsi di formazione sulla Sicurezza Elettrica, sulla Gestione dell'Energia Elettrica, sulla Qualità dell'Energia Elettrica, sui Sistemi Elettronici di Potenza e sugli Impianti di Illuminazione. E' membro dei comitati 210/77A, 11/20, vicepresidente del comitato 64A e presidente del SC 311B del Comitato Elettrotecnico Italiano (CEI).E' consigliere dell'AEIT (Federazione Italiana di Elettrotecnica, Elettronica, Automazione, Informatica e Telecomunicazioni). E' membro del Consiglio Direttivo dei Gruppi tematici Distribuzione e Impianti Elettrici Utilizzatori dell'AEIT. L'attività scientifica, documentata da oltre 140 pubblicazioni, è stata essenzialmente imperniata su problematiche attinenti agli impianti

elettrici, alla conversione ed alla regolazione statica dell'energia elettrica, all'impatto dell'elettronica di potenza sulle reti elettriche (disturbi indotti nelle reti e provvedimenti per contenerli), alle applicazioni elettriche, alla sicurezza degli impianti elettrici, allo studio di reti di distribuzione innovative in corrente continua e allo studio di sistemi di accumulo dell'energia elettrica. Attualmente l'attività di ricerca è particolarmente incentrata su tematiche relative alla generazione distribuita, alla qualità del servizio elettrico e al recupero dell'energia di frenatura di azionamenti elettrici in dispositivi di accumulo innovativi. Nell'ambito delle tematiche di ricerca di cui sopra è stato titolare di contratti con enti pubblici e privati tra cui ENEL, A2A (ex AEM), ERSE (Ex CESI Ricerche), MURST, CNR, ANSALDO, CEA, LOGIC. Ha coperto inoltre numerosi incarichi in qualità di consulente tecnico d'ufficio e di parte in cause relative all'impiantistica elettrica e alla qualità della fornitura di energia elettrica.

Luigi Piegari si è laureato nel febbraio del 1999 in Ingegneria Elettrica presso l'Università di Napoli Federico II dove ha conseguito il titolo di Dottorato in Ingegneria Elettrica nel febbraio del 2003. E' stato assegnista di ricerca presso il Dipartimento di Ingegneria Elettrica del medesimo ateneo dal 2003 al 2008. Dal dicembre del 2009 è ricercatore presso il Politecnico di Milano. Negli anni 2000 – 2001 ha partecipato al progetto Atena (Ambiente Traffico TElematica NApoli) cui hanno preso parte, oltre all'Università di Napoli Federico II il Comune di Napoli, FIAT, ELASIS, Centro Ricerche Fiat e CNR Istituto Motori ed ha partecipato ad alcuni PRIN finanziati dal ministero dell'Università e della Ricerca. Ha partecipato al comitato di organizzazione di diverse conferenze internazionali (RTS 2001, SPEEDAM 2006, SPEEDAM 2008) ed è stato conference secretary per tre conferenze internazionali (SPRTS 2005, ICCEP 2007, ICCEP 2009). E' attualmente revisore per molte delle conferenze internazionali del suo settore oltre che per le riviste: "IEEE Transactions on Power Electronics", "IEEE Transactions on Industrial Electronics", "Elsevier - Electric Power Systems Research", "Electrical Engineering Research Report"

Vincenzo Musolino si è laureato nel dicembre 2007 in Ingegneria Elettrica presso il Politecnico di Milano. Attualmente è dottorando in Ingegneria Elettrica presso la stessa Università. I suoi ambiti di ricerca riguardano lo studio e la caratterizzazione dei sistemi di accumulo a supercondensatori e batterie elettrochimiche e l'integrazione a livello di sistema delle diverse forme di accumulo tramite convertitori di interfaccia. Da gennaio 2008 svolge attività di consulenza presso l'azienda Dimac Red specializzata in attività di distribuzione e progettazione di sottostistemi.