

ENEA

Ente per le Nuove tecnologie,
l'Energia e l'Ambiente



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA SISTEMA ELETTRICO

Accumulo elettrico con supercondensatori nell'industria: studio di sistema e valutazioni tecnico-economiche per l'applicazione ad un carro ponte

**E. Tironi, L. Piegari, V. Musolino
S. Pagnoncelli**





Ente per le Nuove tecnologie,
l'Energia e l'Ambiente



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA SISTEMA ELETTRICO

Accumulo elettrico con supercondensatori nell'industria: studio di sistema e valutazioni tecnico-economiche per l'applicazione ad un carro ponte

*E. Tironi, L. Piegari, V. Musolino
S. Pagnoncelli*



ACCUMULO ELETTRICO CON SUPERCONDENSATORI NELL'INDUSTRIA: STUDIO DI SISTEMA E
VALUTAZIONI TECNICO-ECONOMICHE PER L'APPLICAZIONE AD UN CARRO PONTE

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

S. Pagnoncelli (Aros, Cormano Mi)

Aprile 2009

Report Ricerca Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Area: Usi finali

Tema: Promozione delle tecnologie elettriche innovative negli usi finali

Responsabile Tema: Ennio Ferrero, ENEA

Brevi note sugli autori sono riportate a fine rapporto

Indice

1. VALUTAZIONE PRELIMINARE TECNICO-ECONOMICA DELLE APPLICAZIONI DEGLI ACCUMULI ELETTRICI IN AMBITO INDUSTRIALE E DEI TRASPORTI.....	4
1.1 INTRODUZIONE.....	4
1.2 APPLICAZIONI DEI SUPERCONDENSATORI.....	5
2. DEFINIZIONE DELLE SPECIFICHE DI PROGETTO.....	11
2.1 TOPOLOGIA DEL SISTEMA	11
2.2 CICLI DI LAVORO.....	13
2.3 DIMENSIONAMENTO IN ENERGIA DEL SISTEMA DI ACCUMULO E FUNZIONE COSTO.....	15
2.4 DIMENSIONAMENTO IN POTENZA DEL SISTEMA DI ACCUMULO E FUNZIONE COSTO.....	18
2.5 CARATTERIZZAZIONE DEL SISTEMA DI ACCUMULO.....	21
2.6 ANALISI DI CONVERTITORI PRESENTI SUL MERCATO E FUNZIONE CHE NE STIMA IL COSTO MINIMO DI ACQUISTO.....	23
2.7 DAL COSTO MINIMO DI ACQUISTO DEGLI UPS AL COSTO MINIMO DEI CONVERTITORI DC/DC PER SUPERCONDENSATORI.....	25
2.8 COSTO MINIMO DI ACQUISTO DI UN RADDRIZZATORE CONTROLLATO A TIRISTORI.....	26
2.9 CORREZIONE ALLE FUNZIONI DI COSTO MINIMO DEL RADDRIZZATORE CONTROLLATO PER TENERE CONTO DELLA PRESENZA DEL TRASFORMATORE.....	27
2.10 COSTO MINIMO DI ACQUISTO DI UN RADDRIZZATORE CONTROLLATO A TIRISTORI CON TRASFORMATORE DI INGRESSO.....	29
2.11 PREZZI DI ACQUISTO DEL CONVERTITORE IN FUNZIONE DELLA POTENZA.....	29
2.12 VALUTAZIONE DEL RITORNO DELL'INVESTIMENTO LEGATO AL RISPARMIO ENERGETICO.....	30
3. ANALISI DEI RISULTATI SPERIMENTALI ED ESTENSIONI DELL'APPLICAZIONE A SISTEMI INTEGRATI	34
3.1 IMPOSTAZIONE PROBABILISTICA.....	35
BIBLIOGRAFIA.....	42
BIOGRAFIA.....	44

1) VALUTAZIONE PRELIMINARE TECNICO-ECONOMICA DELLE APPLICAZIONI DEGLI ACCUMULI ELETTRICI IN AMBITO INDUSTRIALE E DEI TRASPORTI

1.1) INTRODUZIONE

Lo studio sulla possibilità di introdurre nei carroporti, dispositivi idonei ad attuare il recupero energetico, durante la fase di abbassamento del carico si inquadra nella tematica più ampia della introduzione dell'accumulo energetico.

Diverse sono le modalità di attuazione e le tecnologie impiegate: si hanno sistemi di accumulo elettrochimico, accumulo in campi elettrostatici e in campi magnetici, accumulo idraulico, accumulo sotto forma di aria compressa ecc.

Da tempo i dispositivi di accumulo energetico trovano largo impiego nei sistemi elettrici: basterà allo scopo richiamare l'utilizzo degli accumulatori negli UPS e più in generale la moltitudine di applicazioni nell'alimentazione di apparecchiature domestiche e similari.

Allo stato attuale si vanno dischiudendo nuovi scenari e si stanno manifestando nuove esigenze che lasciano intravedere per il futuro una sempre maggiore diffusione dei sistemi di accumulo anche in considerazione dei progressi tecnologici in corso in tale settore.

Particolarmente promettenti sono i supercondensatori che potranno sostituire in molte applicazioni gli accumulatori tradizionali o essere utilizzati in combinazione con gli stessi per conseguire le prestazioni richieste in energia e in potenza con un dimensionamento ottimale dell'intero sistema di accumulo ed un allungamento della vita delle batterie al piombo.

Il parallelo tra supercondensatori e batterie va comunque attuato prestando attenzione al fatto che i due dispositivi sono caratterizzati da diverse dinamiche.

La tecnologia dei supercondensatori sembra essere molto promettente in quelle applicazioni in cui siano richieste erogazioni di potenza consistenti per intervalli di tempo limitati: in questo caso infatti, si conseguono i risultati voluti con ingombri contenuti e perdite limitate.

Delimitando il confronto tra supercondensatori ed accumulatori tradizionali, attualmente i più diffusi, si può in sintesi evidenziare come i primi siano sostanzialmente caratterizzati da densità di potenza accumulabile, rendimenti e numero di cicli di carica e scarica largamente superiori e, nel contempo, consentano tempi di carica molto ridotti, dell'ordine di alcuni minuti. Di contro, gli accumulatori al piombo sono caratterizzati da densità di energia accumulabili decisamente più elevate.

Infine, l'impiego di supercondensatori, sembra essere attrattivo rispetto alle più tradizionali batterie al piombo, in quanto queste ultime presentano problemi di manutenzione superiori e difficoltà di monitoraggio dell'effettivo stato di carica, monitoraggio invece agevole nei supercondensatori.

1.2) APPLICAZIONI DEI SUPERCONDENSATORI

In quanto segue verrà fornita una sintetica panoramica delle possibili applicazioni dei supercondensatori nei sistemi elettrici e negli usi finali [1], [2].

- Frenatura con recupero di convogli metropolitani

L'energia cinetica dei convogli in frenatura può essere immessa direttamente nella linea di contatto per alimentare i convogli in accelerazione e la eventuale parte eccedente può essere, invece che dissipata, accumulata in batterie di supercondensatori disposti nelle stazioni elettriche di alimentazione dell'impianto per alimentare le utenze di stazione e/o per essere utilizzata in fasi successive in cui più convogli siano in accelerazione.

I vantaggi conseguibili sono rappresentati dal recupero di energia, con conseguente risparmio energetico e dalla riduzione dei picchi di potenza richiesti dagli apparati di alimentazione della linea di contatto [3]-[6].

L'attuazione del recupero evita inoltre di scaldare i tunnel, come accade invece in frenature di tipo dissipativo, col conseguente ulteriore vantaggio di non dover spendere energia per asportare calore dal tunnel stesso.

Le batterie di supercondensatori potrebbero, in alternativa, venire alloggiare sugli stessi convogli metropolitani accumulando energia in frenatura e erogandola al convoglio in fase di accelerazione e per l'alimentazione dei servizi di bordo.

In fig. 1 è riportato uno schema di principio dell'applicazione di sistemi di accumulo su convogli metropolitani.

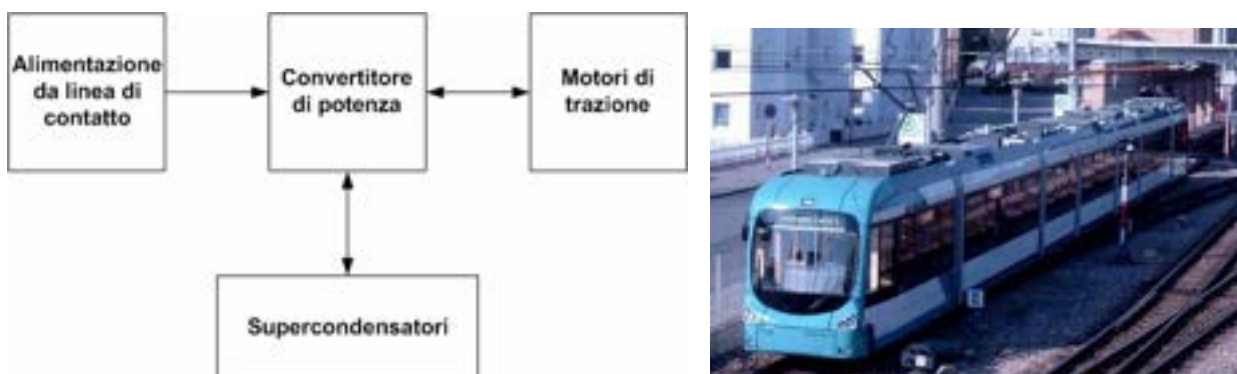


Fig. 1. Schema di sistema impiegante supercondensatori su convogli metropolitani

- Livellamento dei carichi nei veicoli ibridi

I sistemi di trazione ibridi costituiscono una fase intermedia nella progettazione dei sistemi di propulsione dei veicoli tra i convenzionali veicoli utilizzando

carburanti derivati dal petrolio e la pura trazione elettrica non ancora matura per quanto attiene i dispositivi di accumulo.

La presenza di sistemi di accumulo consente di far lavorare il motore termico in condizioni ottimali sotto il profilo del rendimento consentendo nel contempo il recupero di energia in frenatura e la riduzione della potenza sviluppata dal diesel durante le fasi di accelerazione del veicolo [7]-[11].

In fig. 2 è riportato uno schema di principio dell'applicazione di sistemi di accumulo su veicoli ibridi per il livellamento dei carichi

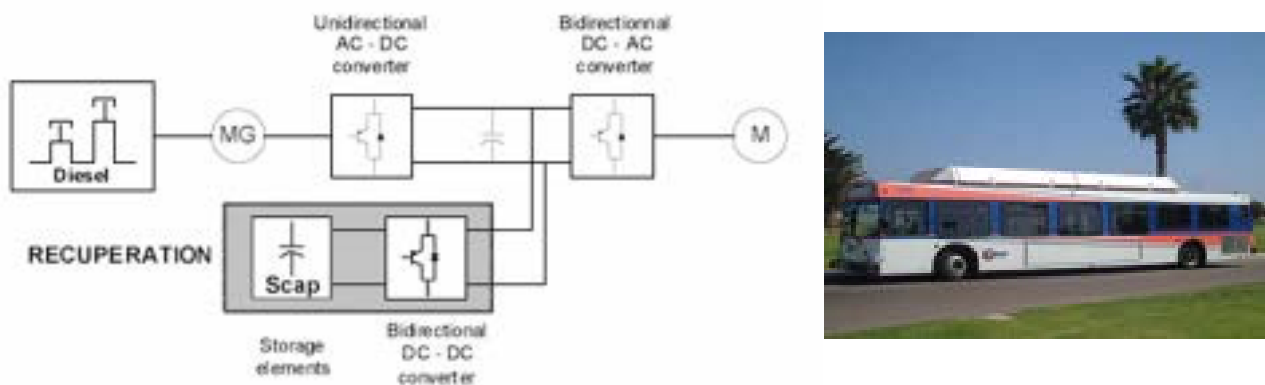


Fig. 2. Schema di sistema impiegante supercondensatori su veicoli ibridi per il livellamento dei carichi

- Biberonaggio di mezzi di trasporto su strada

In linea di principio il sistema è costituito da batterie di supercondensatori installate in corrispondenza delle pensiline che si caricano nell'intervallo di tempo che intercorre tra il passaggio di due mezzi e da batterie di condensatori installate sul mezzo di trasporto, che tramite una "proboscide" si caricano prelevando energia dai condensatori fissi. L'energia prelevata è commisurata con quella necessaria a far compiere la tratta tra due stazioni successive.

I brevi tempi di carica e di scarica rendono i supercondensatori particolarmente adatti a questo tipo di applicazione [12]-[13].

In fig. 3 è riportato uno schema di principio dell'applicazione di sistemi di accumulo per il "biberonaggio" di mezzi di trasporto stradali.

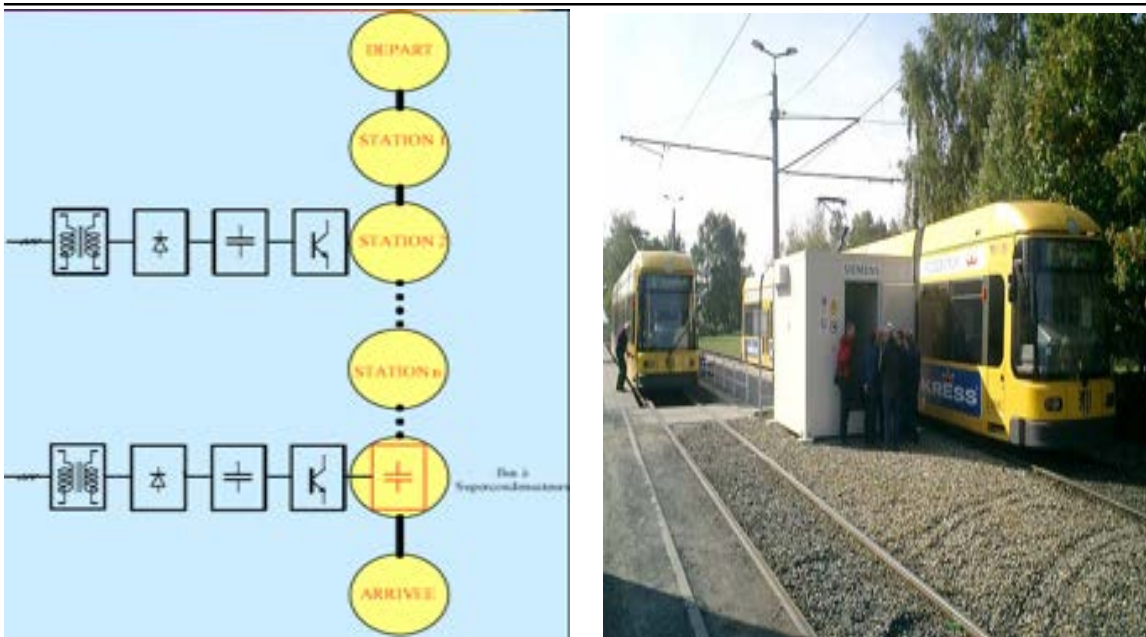


Fig. 3. Schema di sistema per il biberonaggio di mezzi di trasporto stradali.

- Recupero di energia in impianti di sollevamento, centrifughe ecc.

In queste applicazioni l'elevata frequenza di accelerazioni e frenature rende di particolare interesse l'attuazione del recupero durante la discesa delle cabine o la frenatura delle centrifughe [7],[14].

La possibilità di buttare direttamente in rete la potenza in fase di frenatura, se da un lato consentirebbe il conseguimento in modo più immediato del recupero energetico, dall'altro non permetterebbe di attuare "il peak shaving" cioè non permetterebbe il contenimento dei picchi di potenza prelevati dalla rete e del flicker associato alle continue variazioni di tensione correlate appunto ai bruschi prelievi di potenza [15].

Il contenimento dei disturbi correlati con le fluttuazioni di potenza può richiedere un sovradimensionamento dell'impianto elettrico a monte del dispositivo.

Un'ultima considerazione di tipo economico è rappresentata dal fatto che l'eventuale invio di energia in rete proprio per le modalità con cui è disponibile, sarebbe remunerato in maniera modesta.

In fig. 4 è riportato uno schema di principio dell'applicazione di sistemi di accumulo per il recupero di energia in impianti di sollevamento.

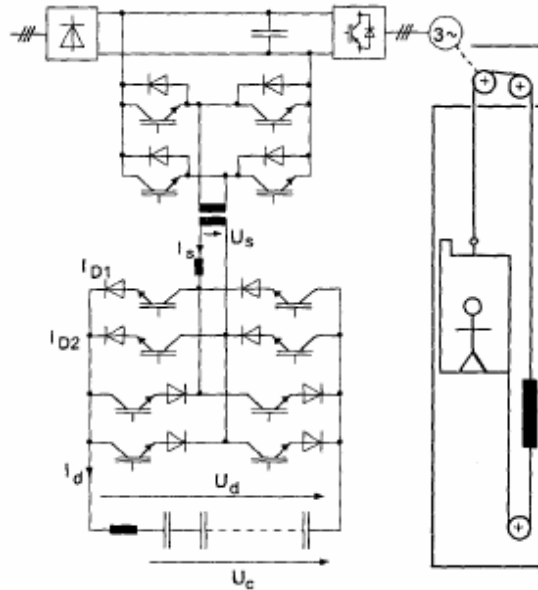


Fig. 4. Schema di sistema per il recupero di energia in impianti di sollevamento.

- Apparecchiature di diagnostica ospedaliera.

Molte apparecchiature di tipo radiologico sono caratterizzate da grossi assorbimenti di potenza nei brevi intervalli in cui viene effettuato l'esame sul paziente, intervallati da periodi ad assorbimento modesto.

L'esame della costituzione di tali macchine pone in evidenza che spesso sono caratterizzate da uno stadio di ingresso c.a./c.c. che raddrizza la corrente alternata. Si potrebbe allora ipotizzare di inserire sul lato in c.c. di tali apparecchiature delle batterie di supercondensatori idonee a contenere i picchi di potenza prelevati dalla rete e, quindi ad evitare sovradimensionamenti degli impianti di alimentazione delle apparecchiature diagnostiche, resi necessari per consentire il regolare funzionamento delle apparecchiature alimentate dalla stessa rete.

Tale sovradimensionamento sarebbe poco economico visto il basso numero di ore di utilizzazione della potenza installata.

Un'ulteriore ipotesi da analizzare potrebbe essere addirittura quella di introdurre reti distributive in c.c. invece che in c.a. col vantaggio di evitare lo stadio di conversione all'ingresso degli apparati diagnostici ed ottimizzare il dimensionamento delle batterie di supercondensatori asservendole a più apparecchiature diagnostiche.

Anche se l'idea può essere di interesse, il discorso è tutto da approfondire sotto il profilo tecnico ed economico anche in considerazione del fatto che l'introduzione di una rete distributiva in c.c. richiederebbe comunque una riprogettazione almeno parziale delle apparecchiature diagnostiche.

In fig. 5 sono riportati due esempi di apparecchiature di diagnostica ospedaliera che sarebbe possibile alimentare attraverso l'uso di supercondensatori.



Fig. 5. Apparecchiature di diagnostica ospedaliera.

- Applicazioni dei supercondensatori nella generazione distribuita.

Un argomento che attualmente sta riscuotendo un certo interesse è costituito dalla cosiddetta Generazione Distribuita è cioè dall'introduzione di piccoli sistemi di generazione ubicati in prossimità dell'utenza ed allacciati a reti in media e bassa tensione.

Tra le motivazioni che spingono in questa direzione assume importanza la possibilità di utilizzare a livello locale, fonti energetiche pulite quali il sole ed il vento.

Anche in questa applicazione l'introduzione dei supercondensatori sembra essere di interesse in relazione alla discontinuità delle fonti energetiche primarie [16].

Ad esempio, l'abbinamento dei supercondensatori nella produzione di energia elettrica tramite turbine eoliche sembrerebbe essere attraente in quanto rinforzando la sbarra intermedia in c.c. del sistema di generazione, durante i transitori, consentirebbe in particolare di livellare le rapide variazioni di potenza della turbina eolica [17]-[19].

In fig. 6 è riportato uno schema di principio dell'applicazione di supercondensatori in sistemi di generazione distribuita.

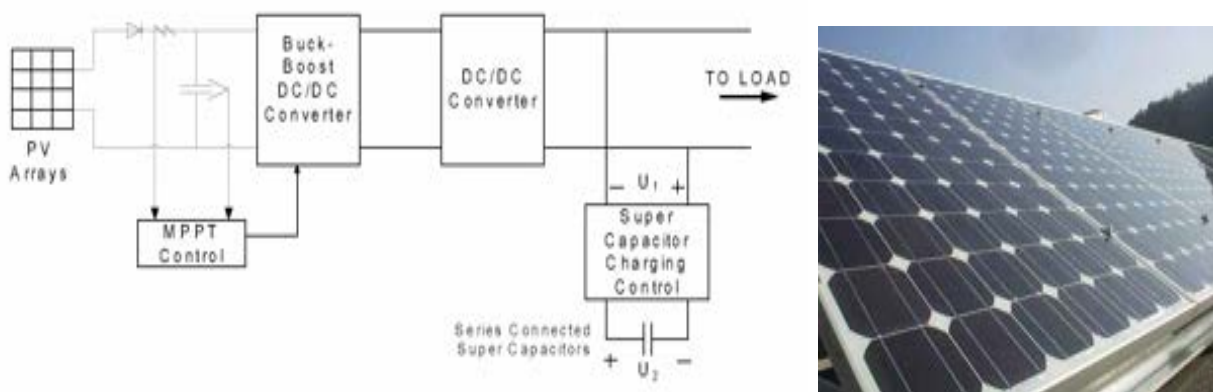


Fig. 6. Applicazione di supercondensatori in sistemi di generazione distribuita.

- Compensazione della c.d.t. in sistemi elettrici deboli.

L'installazione di banchi di supercondensatori alla estremità delle linee di distribuzione deboli consente di compensare le c.d.t. evitando l'introduzione di onerose stazioni di trasformazione.

Tra le possibili applicazioni rientranti in questa campo, basterà qui solo menzionare la stabilizzazione della tensione all'estremità di una linea di alimentazione per trolley-busses in fase di accelerazione del mezzo, la mitigazione degli abbassamenti di tensione nei sistemi di distribuzione in continua dei sottomarini o ai morsetti dei carichi nei sistemi di distribuzione in c.c. degli aeromobili a fronte dei crescenti assorbimenti di corrente nei moderni attuatori presenti [20]-[23].

In fig. 7 è riportato un esempio di applicazione di supercondensatori per la compensazione delle c.d.t..

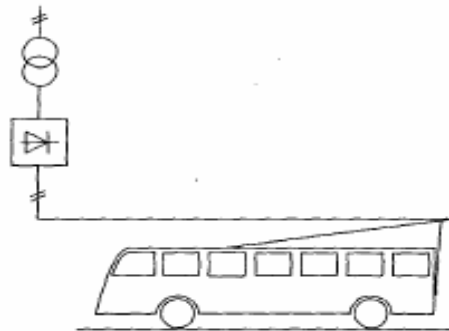


Fig. 7. Impiego di supercondensatori come stabilizzatori della tensione all'estremità di una linea di alimentazione per trolley busses.

- Miglioramento della qualità della fornitura.

L'introduzione di banchi di supercondensatori nella sezione in c.c. dei gruppi di continuità sta suscitando un certo interesse in alcune applicazioni particolari.

L'abbinamento di batterie tradizionali con supercondensatori nei gruppi di continuità potrebbe essere infatti di interesse, ad esempio, in presenza di carichi con prelievi di potenza intermittenti caratterizzati da picchi di potenza di breve durata.

Ancora una volta l'abbinamento delle batterie tradizionali con i supercondensatori consentirebbe di ottimizzare l'utilizzo delle batterie tradizionali senza essere costretti ad un loro sovradimensionamento per far fronte all'erogazione delle potenze richieste anche se per brevi intervalli di tempo.

Più in generale l'uso dei supercondensatori abbinato ad opportuni convertitori potrebbe essere promettente in diverse apparecchiature atte a migliorare la Power Quality del sistema laddove sono richieste iniezioni di potenza in brevi intervalli di tempo per consentire la continuità dell'alimentazione a fronte di

buchi di tensione od interruzioni di breve durata. Sono questi, infatti, disturbi presenti nelle reti elettriche che possono provocare l'arresto di interi processi produttivi con danni spesso ingenti e lunghi tempi di riavviamento dell'impianto.

In fig. 8 è riportato uno schema di principio dell'applicazione di supercondensatori per il miglioramento della qualità della fornitura di energia elettrica.

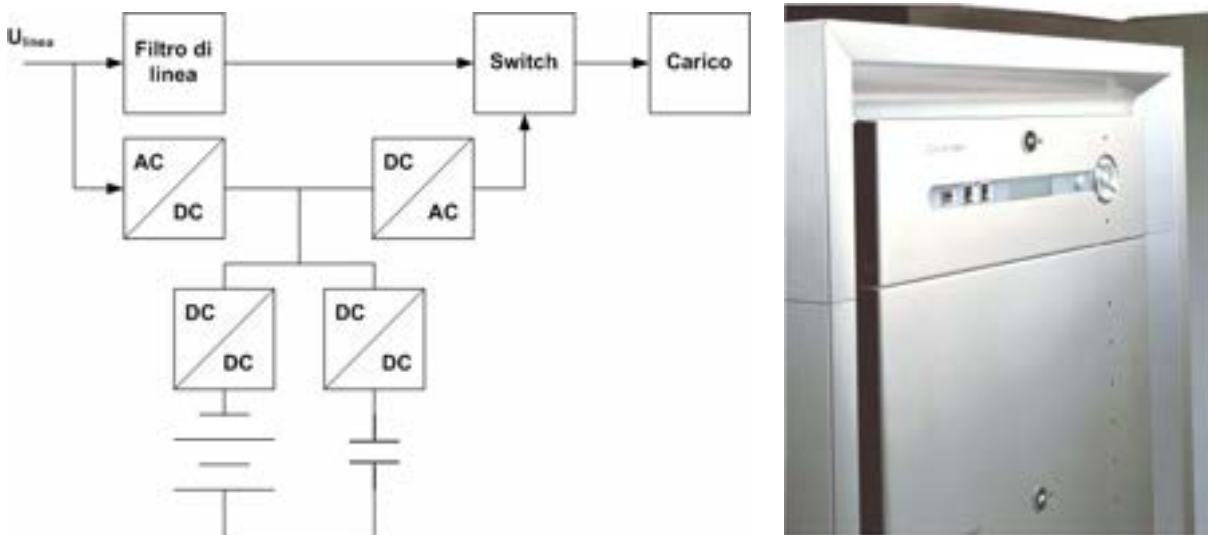


Fig. 8. Schema di principio di applicazione di supercondensatori per il miglioramento della qualità della fornitura di energia elettrica.

Quanto esposto fornisce un'ampia anche se non esaustiva panoramica delle possibilità di impiego delle batterie di supercondensatori nei sistemi elettrici. I motivi di interesse sono diversi, soprattutto sotto il profilo di un migliore utilizzo delle risorse energetiche e del dimensionamento dell'impianto elettrico. Non va naturalmente sottaciuto il fatto che l'introduzione dei supercondensatori e dei relativi convertitori di interfacciamento con la rete implica un costo aggiuntivo che va analizzato e valutato caso per caso. In particolare la possibilità di conseguire risparmi energetici è legata alla frequenza con cui si susseguono i cicli di accelerazione e frenatura dei dispositivi alimentati dall'impianto elettrico. E' quindi necessario svolgere un'analisi di tipo tecnico-economico [24]-[27].

Il risparmio di energia comporta usualmente costi di impianto crescenti al crescere dei risparmi conseguibili. Attualmente l'ottimizzazione tecnico-economica può portare a privilegiare soluzioni caratterizzate da tempi di ritorno piuttosto brevi, in prima approssimazione dell'ordine dei tre - cinque anni. La gravità del problema dell'energia e dell'inquinamento del pianeta (esigenza ad esempio di contenere l'immissione in atmosfera dell'anidride carbonica) potrà portare però in un futuro non molto lontano ad adottare scelte che implicano sotto il profilo economico di avere tempi di ritorno dell'investimento più lunghi. Un esempio in tal senso è oggi rappresentato dagli impianti fotovoltaici che pur usufruendo degli incentivi statali hanno tempi di ritorno dell'ordine dei dieci anni.

Nel seguito verrà mostrato un metodo di analisi al fine di valutare da un punto di vista tecnico-economico i benefici derivanti dall'adozione di un sistema di accumulo a supercondensatore. L'applicazione in esame è un carro ponte industriale nel quale il sistema di accumulo verrà analizzato al fine di comprendere i benefici derivanti sia dal recupero dell'energia potenziale di discesa dei container movimentati, sia dalla funzione di peak shaving dell'assorbimento dalla rete di alimentazione. Il risultato finale di tale analisi è la valutazione del tempo di ritorno dell'investimento al variare della dimensione del sistema di accumulo.

2) DEFINIZIONE DELLE SPECIFICHE DI PROGETTO

Nell'ambito del recupero energetico in ambito industriale e, nel caso specifico, in quello dei carroponti, si vuole andare a determinare il costo del sistema di accumulo a supercondensatore. In riferimento allo schema di principio riportato in figura 9, l'analisi vuole stimare il costo dei moduli supercondensatori e del convertitore di interfaccia con il bus DC.

2.1) TOPOLOGIA DEL SISTEMA

Il sistema in esame può essere così schematizzato:

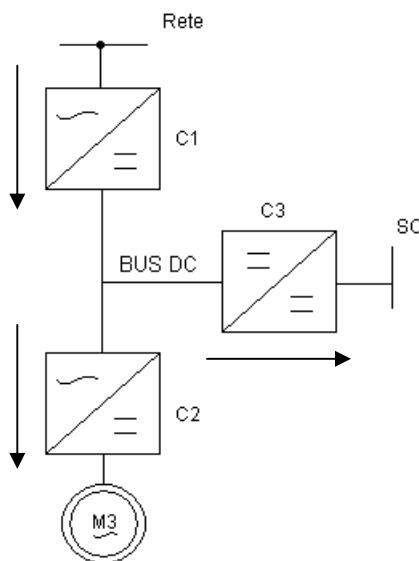


fig.9

dove:

C1: Convertitore alternata-continua

C2: Convertitore continua-alternata bidirezionale

C3: Convertitore continua continua bidirezionale

SC: Banco di accumulo a supercondensatori

M3: Motore asincrono di movimentazione.

2.2) CICLI DI LAVORO

Il ciclo di lavoro del motore M3, interfacciato con il convertitore C2 è del tipo rappresentato in figura 10.

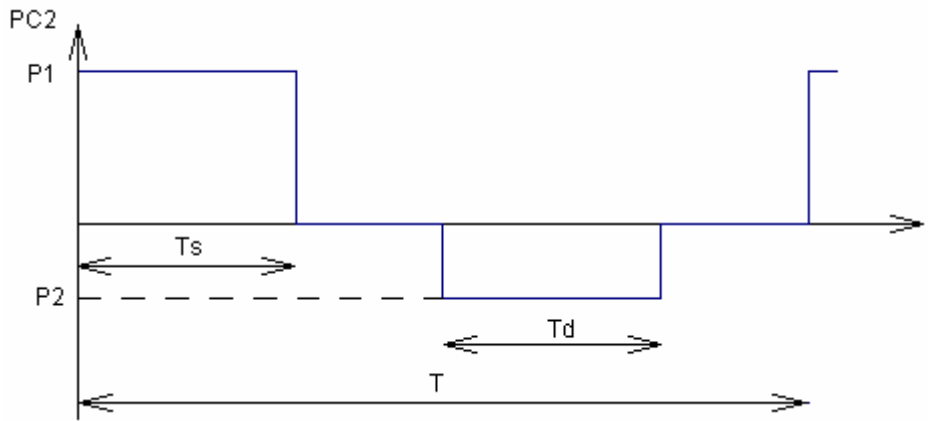


fig.10

Dove:

$T_s = T_d = T_0$; T_s = Tempo salita, T_d = Tempo discesa.

P_1 = Potenza assorbita dal motore in salita

P_2 = Potenza assorbita dal motore in discesa

L'energia assorbita e generata rispettivamente durante la fase di salita e discesa è pari a:

$$W_1 = P_1 * T_0$$

$$W_2 = P_2 * T_0$$

Il sistema di accumulo verrà dimensionato in funzione dell'energia recuperabile in fase di discesa e del profilo di potenza che si vuole assorbire dalla rete.

In particolare tutta l'energia di discesa deve essere recuperata dal sistema di accumulo, mentre la potenza assorbita dalla rete potrà avere un profilo più o meno piatto a seconda delle dimensioni del sistema di accumulo. In relazione alla figura 11 il profilo di potenza visto dal convertitore C1 risulta:

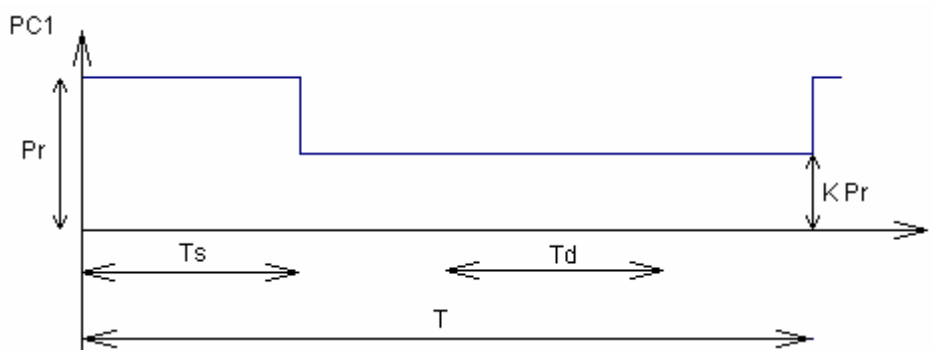


fig.11

dove:

Pr: Massima potenza prelevata dalla rete

K: costante di valore compreso tra 0 e 1.

A seconda delle dimensioni del sistema di accumulo il valore di K varierà tra 0 e 1; in particolare K=0 se prelevo potenza dalla rete solo nell'intervallo di tempo T_s , mentre $K = 1$ se dimensiono il sistema di accumulo per prelevare dalla rete una potenza costante pari a quella media del ciclo. Nel caso di $K=0$ il sistema d'accumulo è dimensionato per immagazzinare il solo volume di energia W_2 relativo alla fase di recupero nel tempo T_d . In via del tutto generale, in relazione alle figura 10 e 11 e, ricordando che $T_s=T_d=T_0$, possiamo scrivere:

$$W_1 - W_2 = Pr (1-K) T_0 + K Pr T = Pr [T_0(1-K) + K T] \quad (1)$$

$W_1 - W_2$ rappresenta l'energia assorbita in ogni singolo ciclo. Da cui:

$$Pr = PC_1 = \frac{W_1 - W_2}{T_0(1-K) + K T} \quad (2)$$

Il valore di Pr rappresenta la potenza di dimensionamento del convertitore C1. La potenza vista dal convertitore C3 risulta:

$$PC_3 = PC_1 - PC_2 \quad (3)$$

e in particolare:

$$PC_3 = P_1 - Pr \quad \text{nell'intervallo } T_s$$

$$PC_3 = P_2 + KPr \quad \text{nell'intervallo } T_d$$

A seconda del valore di K, l'energia immagazzinata nei supercondensatori vale:

$$WSC = W_2 + K Pr (T - T_0) = W_2 + \frac{(W_1 - W_2)(T - T_0)}{T_0(1-K) + K T} K \quad (4)$$

Da tale relazione è quindi possibile procedere al dimensionamento del serbatoio di energia. Nei due casi estremi di $K=0$ e $K=1$ abbiamo:

$$K = 0 \rightarrow WSC = W_2$$

$$K = 1 \rightarrow WSC = W_2 + (W_1 - W_2) \frac{T - T_0}{T}$$

Per $K=1$ l'energia da accumulare è maggiore rispetto a $K=0$ in quanto al fine di assorbire dalla rete una potenza costante pari alla P media del ciclo il banco di supercondensatori deve assorbire potenza in tutto l'intervallo di tempo $T - T_s$ e non solo nell'intervallo T_d .

2.3) DIMENSIONAMENTO IN ENERGIA DEL SISTEMA DI ACCUMULO E FUNZIONE COSTO

Al fine di semplificare la trattazione si considera la capacità di un supercondensatore costante e pari al valore nominale. In realtà la capacità è una funzione lineare della tensione applicata ai morsetti del dispositivo stesso[28]-[30].

Ai fini pratici l'energia immagazzinata viene utilizzata in un range di tensione compreso tra la nominale e la sua metà. Questo perché, considerando costante la potenza estratta dall'accumulo, si ha che a un dimezzamento della tensione ai morsetti corrisponde un raddoppio della corrente erogata. Sfruttare quindi il contenuto energetico al di sotto della metà della tensione nominale significa dover dimensionare il convertitore di interfaccia per delle correnti troppo elevate tenendo inoltre presente che tra la tensione nominale e la sua metà si utilizza il 75% dell'energia totale accumulata in una capacità.

L'energia utilizzata, per un condensatore di capacità C scaricato da una tensione iniziale V_i sino a V_f , è pari a:

$$W_u = \frac{1}{2} C (V_i^2 - V_f^2) = \int_{t_1}^{t_2} p(t) dt \quad (5)$$

dove:

p : rappresenta la potenza con cui scarico il dispositivo in funzione del tempo

t : è la variabile tempo

Il costo del sistema d'accumulo è funzione, oltre che del volume d'energia, anche della tipologia di cella adottata. Al fine di compiere un'analisi che fornisca delle indicazioni adeguate in merito al miglior compromesso in termini tecnici-economici relativamente alla scelta del sistema di accumulo basato su una determinata tipologia di cella piuttosto che un'altra, si è deciso di compiere un'analisi di costo andando a prendere in considerazione le seguenti variabili: tensione nominale del sistema di accumulo, tipologia di cella.

Inoltre l'analisi è stata condotta prendendo in considerazione celle elementari la cui taglia più piccola è pari a 650F in quanto celle di capacità inferiori non sono adeguate in termini di energia e potenza per l'applicazione in esame.

In figura 12 si sono riportate diverse curve, interpolate a partire da costi reali, che mostrano il costo specifico al Wh dell'energia immagazzinata nei moduli supercondensatori andando a considerare diverse tipologie di celle e diverse tensioni nominali. Il sistema di accumulo si considera costituito da una unica stringa di celle in serie. Non si considera la soluzione costituita da più stringhe in parallelo in quanto da un punto di vista economico tale scelta risulta controproducente rispetto a considerare una stringa costituita da celle elementari di taglia superiore.

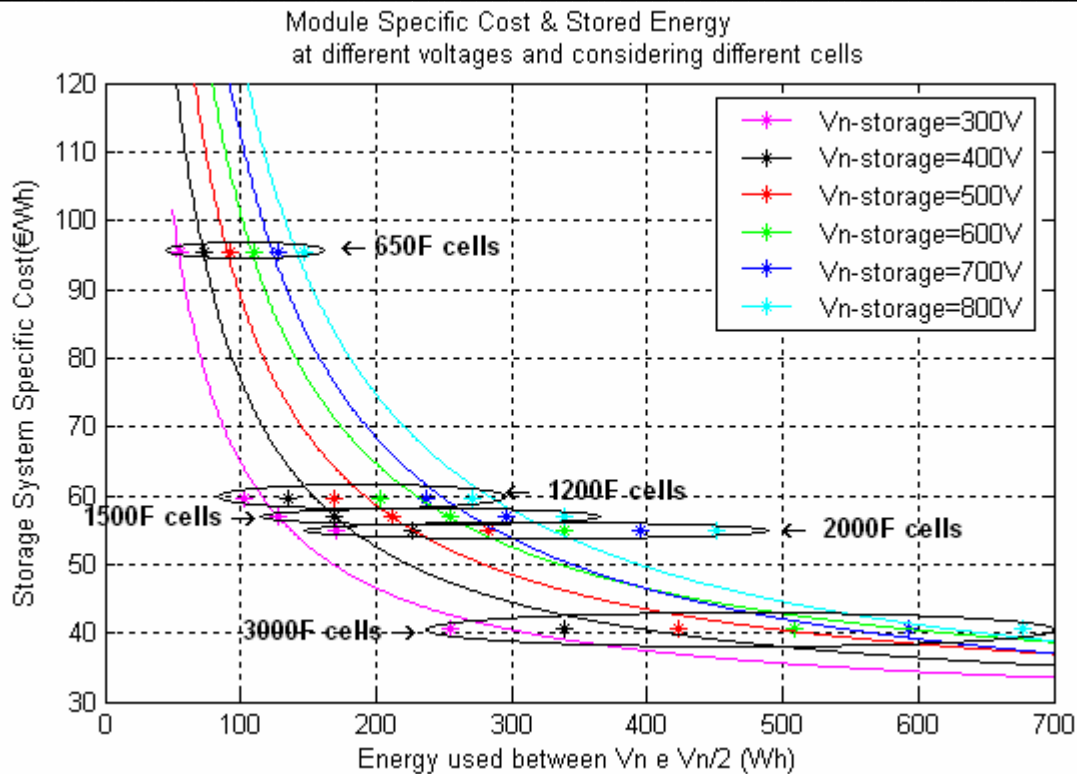


fig.12

L'analisi dei costi effettuata in figura 12 permette di scrivere una funzione *Costo Specifico* del sistema di accumulo che tenga conto sia dell'energia immagazzinata che della tensione nominale del sistema stesso. In particolare risulta:

$$\text{Spec. W Cost (1)} = 12.44 \frac{V}{W} + 34.09 \frac{1}{W} + 27.49 \quad (6)$$

dove:

Spec. W Cost (1): Costo dell'accumulo a supercondensatore per unità di energia accumulata espresso in [€/Wh];

V: Tensione nominale del sistema di accumulo espressa in [V];

W: Energia accumulata e utilizzabile tra Vn e Vn/2 espressa in [Wh].

Con questa funzione è quindi possibile andare a stimare il costo specifico dell'accumulo a supercondensatore fissando le variabili tensione ed energia. Il costo che si viene così a determinare corrisponde a un punto interpolato sulla curva e non a un costo riferito a una cella realmente disponibile (punti indicati con "*"). Se per esempio si sceglie di immagazzinare un'energia di 300Wh a 500V, si determina un punto sulla curva non indicato con "*"; questo significa che per immagazzinare quel quantitativo di energia a quella tensione bisognerà scegliere una tipologia di cella di taglia superiore e, in questo caso, si ricadrà su una tipologia di cella di 3000F che alla tensione di 500V permetterà di

accumulare circa 425 Wh. Se tale surplus di energia dovesse essere elevato si potrà optare per due soluzioni: la prima è quella di utilizzare sempre celle da 3000F con una tensione totale del sistema di accumulo inferiore (accumulo a 400V con celle da 3000F con un totale di energia immagazzinata di circa 340 Wh), la seconda prevede invece di aumentare la tensione del sistema di accumulo utilizzando quindi delle celle elementari di capacità inferiore (per esempio accumulo a 600V con celle elementari da 2000F per immagazzinare circa 340Wh). La seconda scelta prevede un costo specifico dell'accumulo sicuramente maggiore della soluzione 1, la scelta sarà poi un compromesso di tipo tecnico-economico.

Da notare come all'aumentare dell'energia immagazzinata o meglio, della capacità elementare della singola cella, i costi specifici dell'intero sistema di accumulo tendono asintoticamente a un unico valore al variare della tensione nominale del sistema.

Il grafico illustrato in figura 12 permette inoltre di definire da un punto di vista economico la scelta ottimale di cella costituente il modulo al fine di accumulare un determinato quantitativo di energia senza trascurare il livello di tensione del sistema stesso. Questo aspetto è di fondamentale importanza in quanto il sistema di accumulo, al fine di essere utilizzato, dovrà poi essere interfacciato con un convertitore DC/DC.

I costi tracciati in funzione dell'energia immagazzinata e utilizzabile tra la tensione nominale e la sua metà, tengono conto del modulo completo, in particolare i pesi percentuali dei valori che compongono il prezzo di vendita del sistema di accumulo possono essere così suddivisi:

Costi Parziali	Incidenza percentuale sul totale
Celle	55% S. Cost 1
Case, meccanica ed elettronica	30% S. Cost 1
Sistema di ventilazione	5% S. Cost 1
Manodopera	10% S. Cost 1

Tab. 1

Nel caso in cui, per le particolari condizioni di utilizzo, il sistema di ventilazione non dovesse risultare necessario, si ha che il costo finale del sistema di accumulo risulta circa il 90% del costo indicato in (6), quindi:

$$\text{Spec. W Cost (2)} = 11.19 \frac{V}{W} + 30.68 \frac{1}{W} + 24.74 \quad (7)$$

e i pesi percentuali dei valori che compongono il prezzo di vendita del sistema di accumulo risultano:

Costi Parziali	Incidenza percentuale sul totale
Celle	65% S. Cost 2
Case, meccanica e elettronica	25% S. Cost 2
Sistema di ventilazione	0% S. Cost 2
Manodopera	10% S. Cost 2

Tab. 2

2.4) DIMENSIONAMENTO IN POTENZA DEL SISTEMA DI ACCUMULO E FUNZIONE COSTO

Analogamente a quanto fatto precedentemente si vuole a questo punto andare a fornire delle indicazioni relativamente al costo specifico del sistema di accumulo in funzione della potenza.

L'indicazione relativamente alla potenza erogabile o assorbibile dal sistema di accumulo deve però essere contestualizzata alle condizioni operative di utilizzo. Una prima distinzione dovrà essere effettuata tra sistema di accumulo dotato di ventilazione e dispositivi senza ventilazione. Il sistema di ventilazione, in particolare permette, a pari gradiente termico, di aumentare la potenza di utilizzo del 50%.

Oltre a questo, bisogna prendere in considerazione il ciclo di utilizzo del dispositivo. La massima potenza di scarica o carica di un supercondensatore, infatti, è molto maggiore (in un rapporto sino a 30:1) rispetto alla potenza che in un continuo ciclo di carica e scarica determina una sovratemperatura minore o uguale a quella massima ammissibile.

Questo significa che, in funzione del ciclo di impiego, la massima potenza di utilizzo del sistema di accumulo è legata al corrispondente valore di corrente efficace tale per cui, tenendo conto della resistenza termica del dispositivo, la sovratemperatura registrata sia inferiore alla massima ammissibile.

Si riporta di seguito il costo specifico del sistema di accumulo, dotato di ventilazione, in funzione della potenza. Questa massima potenza è calcolata andando a considerare un ciclo di lavoro simmetrico costituito da un intervallo di scarica seguito da uno di carica e tale per cui la sovratemperatura di cella non superi a regime un valore di 15°C. Non si prevede un intervallo di riposo a potenza nulla (figura 13).

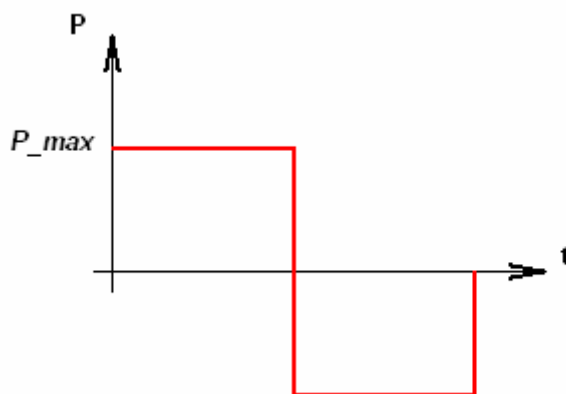


fig.13

La sovratemperatura di 15°C è presa in considerazione a partire dalle indicazioni del costruttore; la massima temperatura ammissibile di lavoro delle celle è di 65°C, considerando quindi una temperatura ambiente di 40°C e una sovratemperatura di 15°C si ha ancora un margine di lavoro di 10°C.

Con tali assunzioni in figura 14 sono riportate diverse curve, interpolate a partire da costi reali, che mostrano il costo specifico per unità di potenza erogata dai moduli supercondensatori andando a considerare diverse tipologie di celle e diverse tensioni nominali.

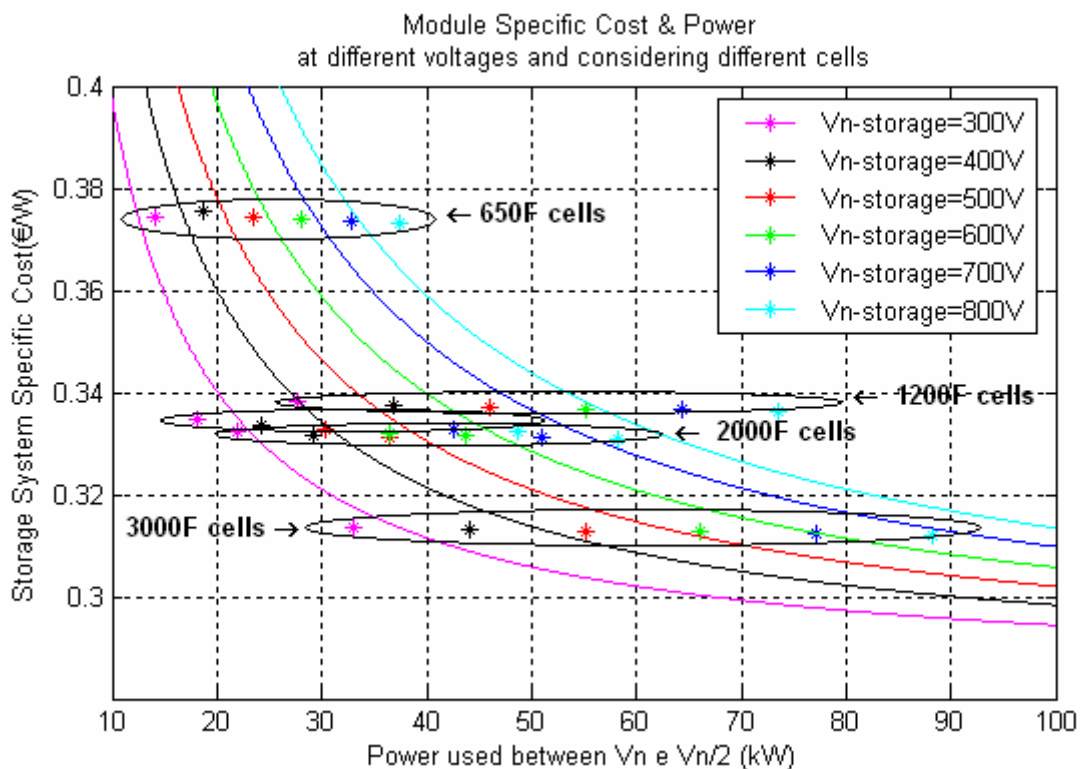


fig. 14

Analiticamente tali curve possono essere espresse tramite la seguente funzione:

$$\text{Spec. P Cost}(1) = \frac{4.99}{1000} \frac{V}{P} - \frac{877}{1000} \frac{1}{P} + 0.283 \quad (8)$$

dove:

- Spec. P Cost (1): Costo dell'accumulo a supercondensatore per unità di potenza in [€/W];
 V: Tensione nominale del sistema di accumulo espressa in [V];
 P: Potenza utilizzabile tra V_n e $V_n/2$ espressa in [kW].

Si ribadisce che questo rappresenta il più alto costo specifico per unità di potenza in quanto la potenza erogabile è stata definita considerando il ciclo più gravoso da un punto di vista termico. La massima potenza erogabile, come detto sopra, è pari a un valore fino a 30 volte superiore rispetto a quelli indicati in figura 14 il che significa un costo specifico per unità di potenza 30 volte inferiore.

Per uniformità di trattazione il dato significativo su cui andare a confrontare le diverse tipologie di celle non è quindi la potenza erogabile, ma la massima corrente efficace che il sistema di accumulo è in grado di sopportare durante l'intero ciclo di lavoro.

In figura 15 sono riportate diverse curve, interpolate a partire da costi reali, che mostrano il costo specifico per unità di corrente andando a considerare diverse tipologie di celle e diverse tensioni nominali.

In (9) è riportata la funzione analitica, interpolante i valori reali, che esprime il costo specifico in funzione della tensione del sistema di accumulo e della corrente efficace che attraversa i moduli.

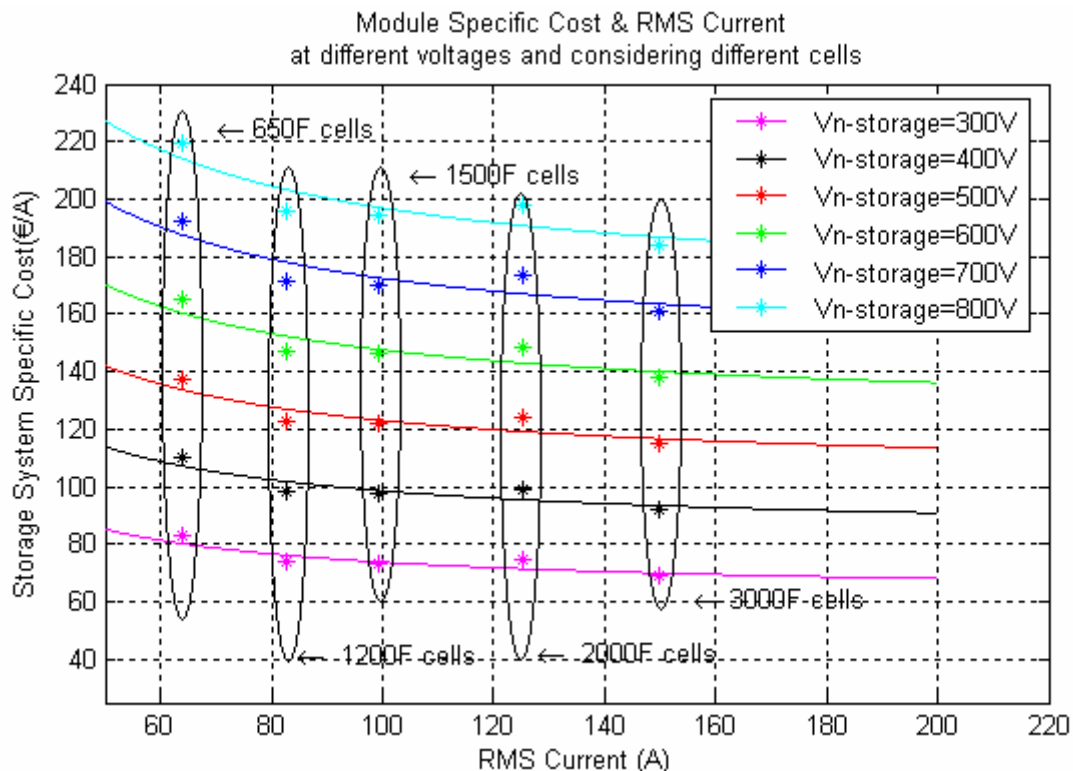


Fig. 15

$$\text{Spec. I Cost}(1) = 4.99 \frac{V_n}{I_{\text{eff}}} - 877 \frac{1}{I_{\text{eff}}} + 0.208 V_n \quad (9)$$

dove:

Spec. I Cost (1): Costo dell'accumulo a supercondensatore per unità di corrente in [€/A];

V: Tensione nominale del sistema di accumulo espressa in [V];

I: Corrente efficace massima espressa in [A].

In assenza del sistema di ventilazione i costi specifici, analogamente a prima, si riducono di un fattore 0.9, mentre la massima corrente efficace si riduce di un fattore 0.68. Le funzioni indicate in (8) e (9) risultano rispettivamente:

$$\text{Spec. P Cost}(2) = \frac{4.491}{1000} \frac{V}{P * 1.47} - \frac{789.3}{1000} \frac{1}{P * 1.47} + 0.2547 \quad (10)$$

$$\text{Spec. I Cost}(2) = 4.491 \frac{V_n}{I_{\text{eff}} * 1.47} - 789.3 \frac{1}{I_{\text{eff}} * 1.47} + 0.187 V_n; \quad (11)$$

questo significa aver compresso l'asse delle ascisse di un fattore 0.9 e aver traslato i diversi punti delle curve verso sinistra di un fattore 0.68. Questo significa che in assenza del sistema di ventilazione, a pari corrente efficace o potenza erogabile, il costo specifico del sistema di accumulo aumenta di un fattore 0.9/0.68, quindi del 34% circa.

2.5) CARATTERIZZAZIONE DEL SISTEMA DI ACCUMULO

Si vuole a questo punto andare a determinare la condizione operativa del sistema di accumulo nell'applicazione in esame.

Dalla relazione indicata in (4) è possibile ricavare la dimensione del sistema di accumulo in termini di energia, mentre dalla relazione indicata in (15) è possibile ricavare il valore di corrente efficace durante il ciclo di lavoro andando a considerare i diversi intervalli a potenza costante P.

Il legame tensione corrente con la convenzione degli utilizzatori per un condensatore ideale è:

$$i(t) = C \frac{dv(t)}{dt} \quad (12)$$

dove:

i(t): rappresenta la corrente assorbita in funzione del tempo;

v(t): la tensione ai capi del dispositivo in funzione del tempo;

C: la capacità equivalente del dispositivo di accumulo.

Dalla precedente relazione e considerando una potenza costante P ai morsetti del dispositivo si può scrivere:

$$v(t) = \sqrt{\frac{2Pt}{C} + V_0^2} \quad (13)$$

La corrente $i(t)$ risulta quindi:

$$i(t) = \frac{P}{\sqrt{\frac{2Pt}{C} + V_0^2}} \quad (14)$$

Si ricava quindi il valore efficace di corrente come:

$$i_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{\Delta T} \int_{t_1}^{t_2} \frac{P^2}{\frac{2Pt}{C} + V_0^2} dt} = \sqrt{\frac{1}{\Delta T} \frac{P \cdot C}{2} \ln \frac{2P \cdot t_2 + V_0^2 \cdot C}{2P \cdot t_1 + V_0^2 \cdot C}} \quad (15)$$

dove :

- i_{eff} : corrente efficace nell'intervallo considerato ;
- ΔT : periodo del ciclo di lavoro;
- P : potenza costante con cui scarico il dispositivo;
- C : capacità equivalente del sistema di accumulo (considerata costante);
- V_0 : tensione iniziale del sistema di accumulo
- t_1 e t_2 : estremi di integrazione.

Per le caratteristiche del ciclo di lavoro si ha che i valori di correnti efficaci più gravosi per il sistema di accumulo si hanno nell'intervallo di tempo T_s .

Al variare della potenza P di carica o scarica, ma a pari intervallo ΔT , la corrente efficace rimane costante in quanto varia proporzionalmente la capacità equivalente C . In queste condizioni, infatti, al variare di P varia linearmente l'energia totale da accumulare e quindi la capacità C (a pari variazione di tensione). Considerando il ciclo di lavoro di riferimento caratterizzato dai parametri indicati in tabella 3 si riportano in tabella 4 i dati caratterizzanti il sistema di accumulo considerando le diverse tipologie di celle e i due casi estremi di K pari a 0 e 1.

T	T0	P1	P2
(s)	(s)	(kW)	(kW)
160	60	19	9

Tab. 3

Tipologia di cella	W SC		N° celle		Vn		Costo Specifico	I eff	
	(Wh)				(V)			(A)	
	K=0	K=1	K=0	K=1	K=0	K=1	(€/Wh)	K=0	K=1
650 F	150	254	304	515	821	1390	86.2	13	12
1200F	150	254	165	279	445	753	58.1	24	22
1500 F	150	254	132	224	356	605	51.5	30	27
2000 F	150	254	99	168	267	454	44.8	40	36
3000 F	150	254	66	112	178	302	38.2	59	55

Tab. 4

I dati riportati in tabella 4 sono stati determinati andando a considerare un sistema di accumulo caratterizzato da un'unica stringa di celle supercondensatori collegati in serie. Nel caso di cella da 650F e K=1 questo comporta una tensione nominale del sistema di accumulo di 1390V, la quale è sicuramente elevata per i convertitori in commercio. Anche scegliendo di realizzare il modulo con due stringhe in parallelo per abbassare la tensione a circa 700V, il numero di celle impiegate, il costo specifico e il valore di corrente efficace rimangono gli stessi di quelli determinati considerando un'unica stringa serie; i dati significativi rimangono quindi gli stessi.

2.6) ANALISI DI CONVERTITORI PRESENTI SUL MERCATO E FUNZIONE CHE NE STIMA IL COSTO MINIMO DI ACQUISTO.

Allo scopo di pervenire a delle semplici equazioni che permettano di stimare il costo minimo di acquisto dei convertitori elettronici relativi all'applicazione in oggetto, è stata svolta un'analisi (non certo esaustiva) dei prezzi minimi di apparati ormai consolidati e prodotti in serie.

In particolare sono stati esaminati gruppi di continuità (privi di trasformatore) di potenza compresa tra 10 e 80kVA.

Nel prendere in considerazione i dati si tenga conto che le macchine in oggetto sono tipicamente formate da un inverter di ingresso, un inverter di uscita, un convertitore bidirezionale di batteria e di un commutatore statico.

Dopo aver tabulato i dati raccolti si è provveduto a ricavare una funzione in grado di approssimare correttamente l'andamento dei costi minimi di vendita nell'intervallo considerato.

La funzione ottenuta è la seguente:

$$\text{Costo_Min} = (8000 + 124 \cdot (P - 10)) / 2 \quad (16)$$

dove:

Costo_Min: è il costo minimo di acquisto stimato

P: è la potenza del convertitore espressa in kW.

In figura 16 è riportato l'andamento dei costi reali rispetto a quelli stimati: la serie identificata con ■ rappresenta i valori stimati, mentre la serie di dati identificata con ♦ rappresenta i prezzi reali.

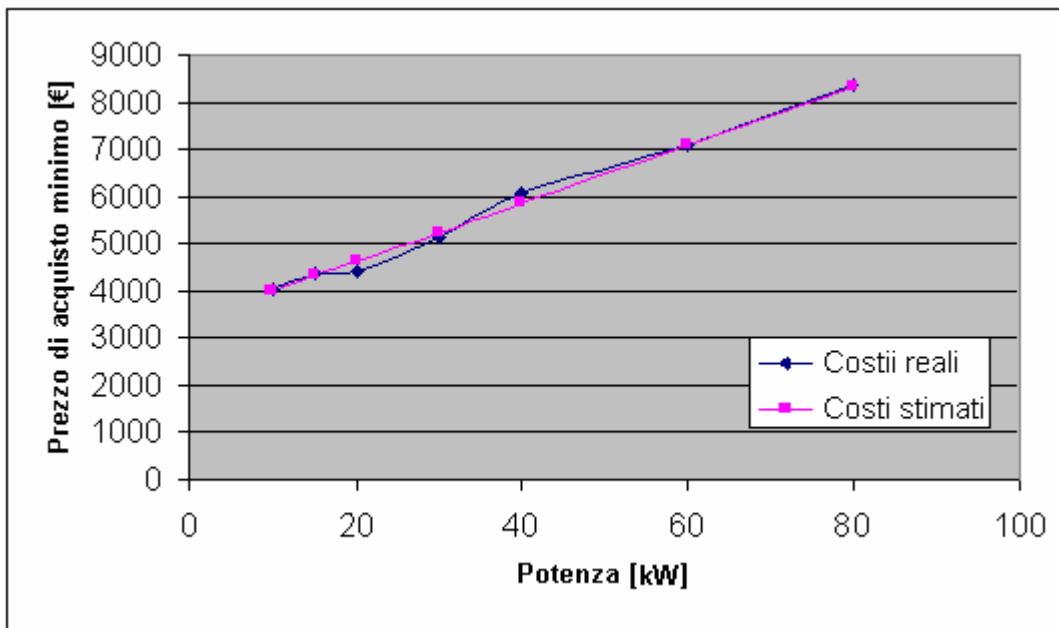


Fig. 16: Confronto tra costi degli apparati stimati tramite l'equazione 1) e valori reali.

Dalla (16) si ricava un costo per ogni kW pari a:

$$\text{Costo_kW} = (8000 + 124 \cdot (P - 10)) / 2P \quad (17)$$

dove:

Costo_kW: è il prezzo di acquisto (Espresso in €/kW)

P: è la potenza del convertitore espressa in kW.

In figura 17 è riportato l'andamento del costo incrementale a kW reale rispetto a quello stimato: la serie identificata con ■ rappresenta i valori stimati, mentre la serie di dati identificata con ◆ rappresenta i valori reali.

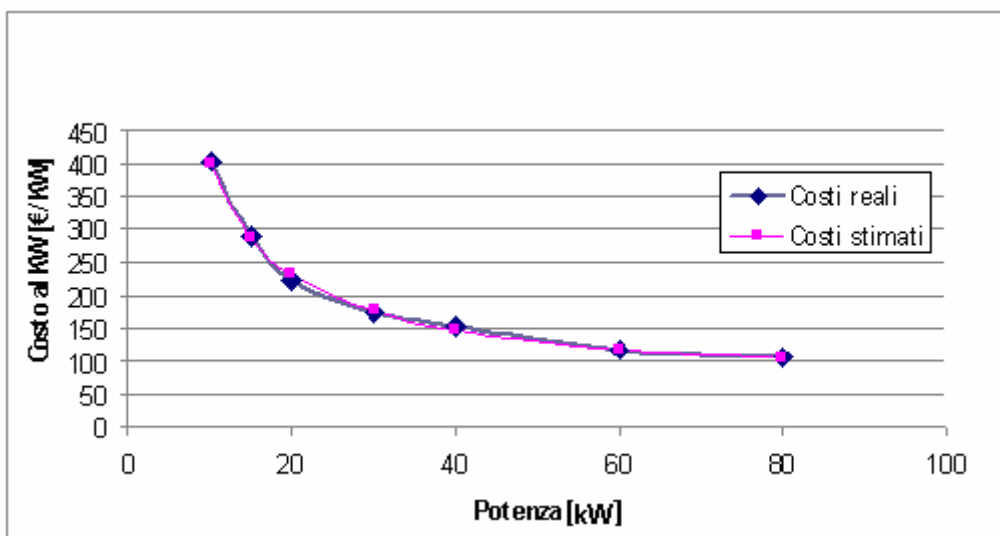


Fig. 17: Confronto tra costo a kW stimato tramite l'equazione 2) e valori reali.

2.7) DAL COSTO MINIMO DI ACQUISTO DEGLI UPS AL COSTO MINIMO DEI CONVERTITORI DC/DC PER SUPERCONDENSATORI.

Allo scopo di ricavare, dall'analisi svolta sugli apparati di riferimento, i costi minimi di acquisto dei convertitori allo studio si è proceduto ad attribuire dei pesi percentuali ai valori che compongono il prezzo di vendita minimo di queste tipologie di gruppi di continuità (Tabella 5).

Costi parziali	Incidenza percentuale sul totale	Costo minimo di acquisto
Manodopera	10%	0,1 Costo_Min
Meccanica	15%	0,15 Costo_Min
Inverter di uscita	20%	0,2 Costo_Min
Inverter di ingresso	20%	0,2 Costo_Min
Convertitore reversibile di batteria	10%	0,1 Costo_Min
Commutatore statico	5%	0,05 Costo_Min
Altro	20%	0,2 Costo_Min
Totale	100%	Costo_Min

Tab. 5, Ripartizione percentuale dei costi e quota parte dei costi relativi ad ogni sottoinsieme

dove:

1. Manodopera: comprendente il montaggio e il collaudo.
2. Meccanica: comprendente la carpenteria e il barrame, con l'esclusione dei dissipatori dei semiconduttori di che vengono computati nei singoli sottoinsiemi.
3. Inverter di uscita: comprendente i moduli di potenza, le schede di controllo e i componenti magnetici (senza trasformatore di potenza)
4. Inverter di ingresso: comprendente i moduli di potenza, le schede di controllo e i componenti magnetici (senza trasformatore di potenza)
5. Convertitore reversibile di batteria: comprendente i moduli di potenza, le schede di controllo e i componenti magnetici.
6. Commutatore statico: comprendente i moduli di potenza, le schede di controllo
7. Altro: Tutti i componenti non compresi nelle voci precedenti.

In sostanza per valutare il costo del convertitore tra barre DC-Bus e supercondensatori si verifica quale impatto ha il costo del singolo sottoinsieme rispetto ad un gruppo di continuità completo.

Manodopera: La manodopera di montaggio e collaudo di un convertitore di questo genere è stimabile a circa il 30% rispetto a quella di un gruppo di continuità completo.

La meccanica viceversa subisce una riduzione sostanziale (simile a quella dei ponti raddrizzatori: 50%).

Evidentemente i costi relativi ai due inverter ed al commutatore statico non devono essere conteggiati.

Il costo del commutatore reversibile di batteria, viceversa deve essere incrementato almeno del 30% per tener conto del fatto che, in questo caso, a differenza del convertitore di interfacciamento con la batteria, la corrente di scarica dei supercondensatori è del tutto simile a quella di carica.

La voce "altro" subisce una variazione modesta dato che comprende, tra l'altro, gli interruttori di ingresso/uscita, tutta la parte di strumentazione, di diagnostica, di interfaccia uomo-macchina e, in questo caso, di controllo e misura della potenza scambiata con i supercondensatori.

Nell'ipotesi che queste considerazioni siano corrette si può ricavare la tabella 6 e, in definitiva, ipotizzare il costo di questo convertitore come percentuale del costo di un gruppo di continuità di pari potenza.

Costi parziali	Costo minimo di acquisto
Manodopera	0,07 Costo_Min
Meccanica	0,075 Costo_Min
Convertitore reversibile di batteria	0,13 Costo_Min
Altro	0,15 Costo_Min
Totale	0,42 Costo_Min

Tab. 6, Composizione e costo totale del convertitore tra DC-Bus e supercondensatori

In definitiva si può scrivere.

$$\text{Costo_DC_DC} = 0.42 \text{Costo_Min} \quad (18)$$

e dalla (17)

$$\text{Costo_DC_DC} = 0.21 \cdot (8000 + 124 \cdot (P - 10)) \quad (19)$$

dove Costo_DC_DC è il costo, espresso in Euro, del convertitore reversibile tra DC-Bus e supercondensatori e P è la sua potenza espressa in kW.

2.8) COSTO MINIMO DI ACQUISTO DI UN RADDRIZZATORE CONTROLLATO A TIRISTORI

Manodopera: La manodopera di montaggio e collaudo di un raddrizzatore non controllato è stimabile a non più del 20% rispetto a quella di un gruppo di continuità completo.

La meccanica viceversa non subisce la stessa drastica riduzione in quanto, pur semplificata, deve comunque soddisfare dei minimi requisiti di sicurezza e

solidità: è quindi ragionevole stimare un dimezzamento del suo costo rispetto alla carpenteria dell'equivalente apparato di riferimento.

Evidentemente i costi relativi ai due inverter e al convertitore reversibile di batteria non devono essere conteggiati.

Il costo di commutatore statico è invece del tutto equivalente a quello di un raddrizzatore e quindi viene completamente conteggiato.

La voce "altro" non subisce una diminuzione proporzionale dato che comprende, tra l'altro, gli interruttori di ingresso/uscita, tutta la parte di strumentazione, di diagnostica, di interfaccia uomo-macchina e di controllo e pilotaggio dei tiristori; in sostanza si può considerare un dimezzamento del suo costo.

Nell'ipotesi che queste considerazioni siano corrette si può ricavare la tabella 7 e, in definitiva, ipotizzare il costo di un raddrizzatore controllato pari a circa il 25% del costo di un gruppo di continuità di pari potenza.

Costi parziali	Costo minimo di acquisto
Manodopera	0,02 Costo_Min
Meccanica	0,075 Costo_Min
Commutatore statico (ponte tiristori)	0,05 Costo_Min
Altro	0,1 Costo_Min
Totale	0,24 Costo_Min

Tab. 7, Composizione e costo totale di un raddrizzatore totalcontrollato privo di trasformatore.

In definitiva si può scrivere.

$$\text{Costo_Raddr_Ty} = 0.24 \text{Costo_Min} \quad (20)$$

E dalla (19)

$$\text{Costo_Raddr_Ty} = 0.12 \cdot (8000 + 124 \cdot (P - 10)) \quad (21)$$

Dove Costo_Raddr_Ty è il costo, espresso in Euro, del raddrizzatore controllato e P è la sua potenza espressa in kW.

2.9) CORREZIONE ALLE FUNZIONI DI COSTO MINIMO DEL RADDRIZZATORE CONTROLLATO PER TENERE CONTO DELLA PRESENZA DEL TRASFORMATORE

Per apportare le necessarie correzioni alle funzioni di costo minimo fin qui ricavate occorre effettuare una stima di una funzione interpolante il costo di acquisto (da parte del costruttore) dei trasformatori trifasi a 50Hz in funzione della loro potenza.

Da una rapida indagine sul mercato sono stati rilevati i punti indicati con il simbolo ♦ in figura 10.

Da tali dati si può ricavare la funzione di costo del trasformatore:

$$\text{Costo_PR_TF} = (62,458 + 49,335 \cdot P) \cdot 0,6 \quad (22)$$

Dove Costo_PR_TF è il costo di cessione tra i due costruttori e P è la potenza del trasformatore.

L'andamento di questa funzione è mostrato col simbolo ■ in figura 18.

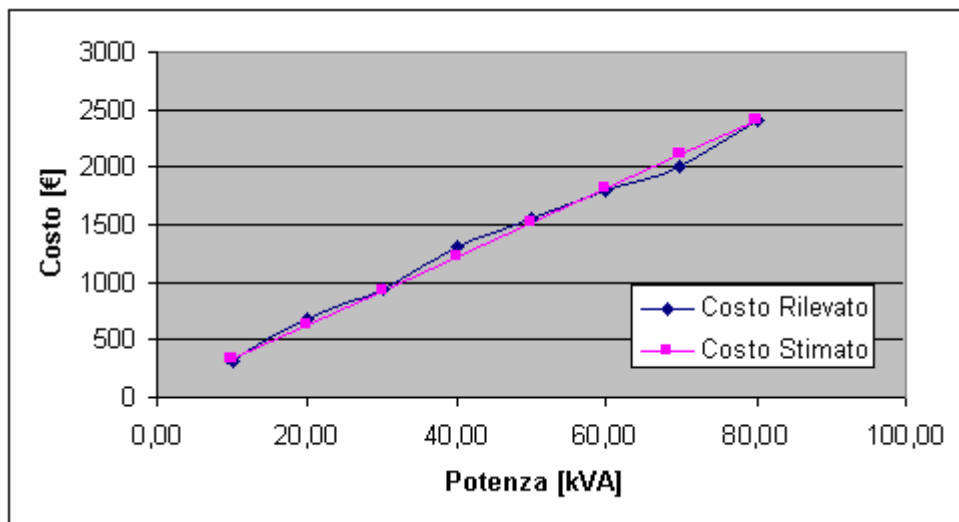


Fig. 18, Confronto tra costi dei trasformatori stimati tramite l'equazione (22) e valori reali.

Il costo del componente deve venire incrementato di almeno il 30% nel calcolo del costo finale minimo di vendita del convertitore (tale incremento tiene conto di tutte le spese generali non direttamente imputabili ai componenti, alla manodopera, nonché dell'utile del costruttore).

In considerazione del fatto che il rendimento del convertitore non è unitario la potenza del trasformatore deve essere divisa per il rendimento del convertitore (considerato, in prima approssimazione, pari a 0,9).

In sostanza la funzione (22) deve venire modificata come segue:

$$\text{Costo_TF} = (62,458 + 54,817 \cdot P) \cdot 0,78 \quad (23)$$

Dove Costo_TF è la quota parte di costo, espresso in Euro, minimo di vendita del convertitore imputabile alla presenza del trasformatore e P è la potenza del trasformatore. Nel calcolo del costo minimo di vendita dei convertitori la presenza del trasformatore in pratica incide solamente sul costo della carpenteria, senza influenzare sensibilmente le altre voci.

Sembra sensato ipotizzare un incremento del costo della carpenteria del 20%.

2.10) COSTO MINIMO DI ACQUISTO DI UN RADDRIZZATORE CONTROLLATO A TIRISTORI CON TRASFORMATORE DI INGRESSO

In base a quanto fin qui detto la tabella 7 viene modificata nella tabella 8.

Costi parziali	Costo minimo di acquisto
Manodopera	0,02 Costo_Min
Meccanica	0,09 Costo_Min
Commutatore statico (ponte tiristori)	0,05 Costo_Min
Altro	0,1 Costo_Min
Totale	0,26 Costo_Min

Tab. 8, Composizione e costo totale di un raddrizzatore totalcontrollato con trasformatore di ingresso (escluso il costo del trasformatore).

A questo costo minimo di acquisto deve essere sommato il costo del trasformatore, ottenendo così l'equazione (24).

$$\text{Costo_Raddr_Ty_TF} = 0.13 \cdot (8000 + 124 \cdot (P - 10)) + (62,458 + 54,817 \cdot P) \cdot 0,78 \quad (24)$$

Che può essere semplificata nella (25)

$$\text{Costo_Raddr_Ty_TF} = 927,52 + 58,88 \cdot P \quad (25)$$

2.11) PREZZI DI ACQUISTO DEL CONVERTITORE IN FUNZIONE DELLA POTENZA

In tabella 9 sono riportati i prezzi minimi di acquisto dei vari convertitori in funzione della loro potenza.

Potenza (kW)	Costo conv Supercond.	Costo raddr controllato (Senza TRAF0)	Costo raddr controllato (Con TRAF0)
10	1680	960	1516,32
20	1940,4	1108,8	2105,12
30	2200,8	1257,6	2693,92
40	2461,2	1406,4	3282,72
50	2721,6	1555,2	3871,52
60	2982	1704	4460,32
70	3242,4	1852,8	5049,12
80	3502,8	2001,6	5637,92

Tab. 9, Prezzi minimi di acquisto dei convertitori (espressi in Euro)

2.12) VALUTAZIONE DEL RITORNO DELL'INVESTIMENTO LEGATO AL RISPARMIO ENERGETICO.

Si vuole a questo punto andare a determinare il tempo di ritorno dell'investimento del sistema di accumulo, valutando il risparmio in termini economici del costo dell'energia elettrica consumata. L'ammontare del risparmio energetico è naturalmente funzione anche della frequenza di impiego (duty cycle) del sistema in esame (carroponte in questo caso).

La trattazione prenderà come riferimento il ciclo di lavoro di figura 13, il che significa considerare di recuperare la sola energia potenziale nella fase di discesa dei container movimentati. In molte applicazioni, però, vi è un'altra quota di energia recuperabile e per nulla trascurabile, ossia quella relativa al recupero dell'energia cinetica nella fase di frenata dell'intera struttura carroponte/gru portuale.

Premessa questa condizione di minimo recupero energetico, la valutazione è fatta considerando inoltre un numero di cicli giornalieri N variabili tra un minimo di 62 a un massimo di 500 cicli al giorno per un totale di 240 all'anno. Questo significa un numero d'ore di lavoro continuative variabili tra 2.75 h/giorno sino a 22.2 h/giorno. Si considera inoltre un tempo di vita d'impianto pari a 20 anni.

Il costo dell'energia elettrica è determinato tramite una tariffazione binomia; il costo dell'energia elettrica, infatti, tiene conto della potenza contrattuale impegnata oltre che dell'energia consumata. A tal fine si è fatto riferimento ai prezzi medi dell'energia elettrica, per il I trimestre 2009, ai clienti finali in bassa tensione per altri usi (né per usi domestici, né per illuminazione pubblica) [31]. Tale analisi ha permesso di andare a identificare la seguente funzione costo per la fornitura di energia elettrica:

$$\text{Costo_W_elettrica} = 27.20 \cdot P_c + 0.1537 \cdot W + 137.10 \quad (26)$$

dove:

Costo_W_elettrica: costo per la fornitura di energia elettrica espressa in [€/anno];

P_c: potenza contrattuale espressa in [kW];

W: energia consumata in un anno espressa in [kWh].

Dalla funzione costo indicata in (26) si vanno a valutare le seguenti funzioni sensitivity

$$\frac{\partial \text{Costo_W_elettrica}}{\partial P} \quad \text{e} \quad \frac{\partial \text{Costo_W_elettrica}}{\partial W}$$

al fine di valutare il risparmio in termini economici legati ad una variazione della potenza contrattuale impegnata e dell'energia elettrica consumata. In particolare risulta:

$$\frac{\partial \text{Costo}_{W_{\text{elettrica}}}}{\partial P} = 27.20 \text{ [€/(kW} \cdot \text{anno)]}$$

$$\frac{\partial \text{Costo}_{W_{\text{elettrica}}}}{\partial W} = 0.1537 \text{ [€/(kWh} \cdot \text{anno)]}$$

La valutazione economica del tempo di ritorno economico dell'investimento (Pay back period) deve inoltre tenere conto del costo del denaro (*tasso i*), e della variazione del costo dell'energia elettrica per effetto del mercato (*tasso j*). L'analisi, in particolare, terrà conto di due scenari: il primo in cui si considererà il solo costo del denaro *i* e, un secondo in cui si considereranno entrambi i tassi.

Tutti i costi/risparmi verranno attualizzati, su base annua, al tempo 0 dell'investimento. Questo significa che il costo dell'investimento del sistema di recupero dell'energia di frenatura corrisponde alla somma dei costi attuali esposti nei precedenti paragrafi, mentre i risparmi futuri vengono attualizzati al tempo 0 con la seguente espressione:

$$R_0 = R(n) \cdot \frac{1}{(1+i)^n} = R_{\text{rif}} \cdot (1+j)^n \frac{1}{(1+i)^n} \quad (27)$$

dove:

R_0 : risparmio calcolato al tempo 0;

R_{rif} : risparmio di riferimento calcolato andando a considerare i costi attuali dell'energia elettrica;

n : numero di anni

$(1+j)^n$: per attualizzare, per effetto delle variazioni del mercato, il risparmio di riferimento al tempo n ;

$(1+i)^n$: per attualizzare, per effetto del costo del denaro, il risparmio $R(n)$ al tempo 0;

Indipendentemente dal valore dei tassi di attualizzazione, i costi di investimento iniziale del sistema di recupero dell'energia di frenatura sono comuni, in particolare i risultati possono essere riassunti in figura 19.

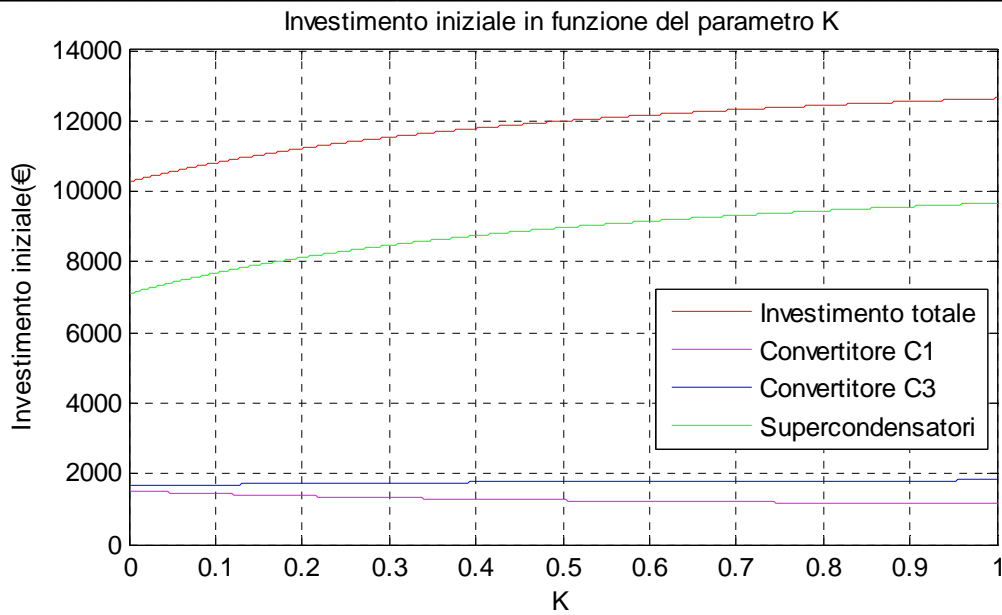


Fig. 19

SCENARIO 1

Il primo scenario va a considerare i seguenti valori dei tassi i e j.

tasso i: 3%;
tasso j: 0%.

In figura 20 e 21 si riportano rispettivamente il risparmio attualizzato al tempo 0 a fine vita d'impianto e il tempo di ritorno dell'investimento iniziale al variare del parametro K. Si riportano più curve parametrizzate per diversi valori di N (numero di cicli al giorno).

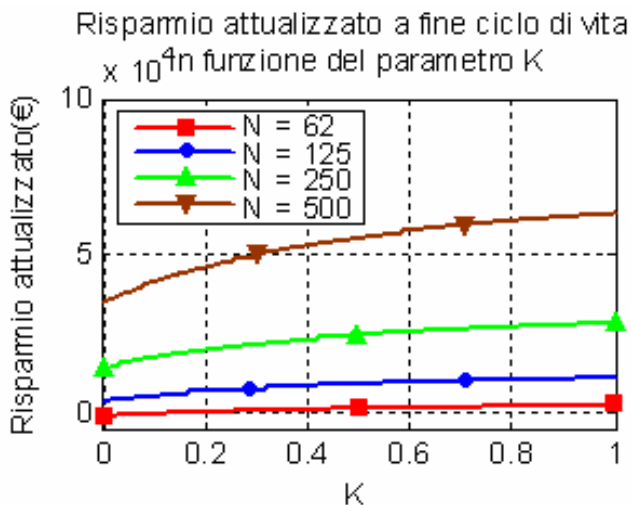


Fig. 20

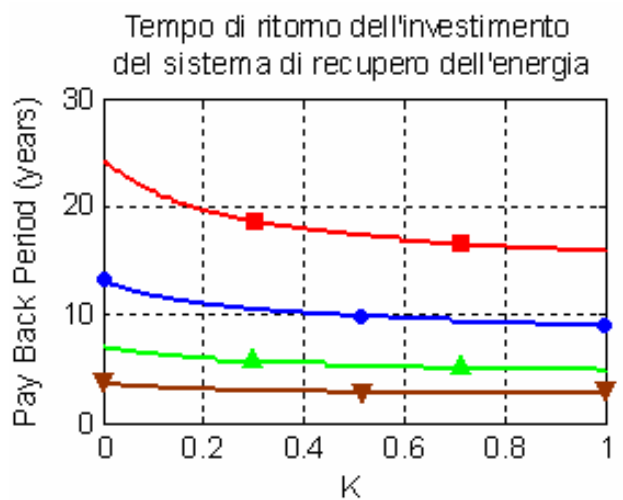


Fig.21

SCENARIO 2

Il secondo scenario va a considerare i seguenti valori dei tassi i e j .

tasso i : 3%;

tasso j : 10%.

In figura 22 e 23 si riportano rispettivamente il risparmio attualizzato al tempo 0 e il tempo di ritorno dell'investimento iniziale al variare del parametro K . Si riportano sempre più curve parametrizzate per diversi valori di N .

Il tasso j è stato valutato andando a considerare l'andamento del prezzo unico nazionale dell'energia elettrica nel periodo gennaio 2004 – gennaio 2009 [32]. Tali dati mettono in luce un tasso di crescita del PUN pari al 10% annuo.

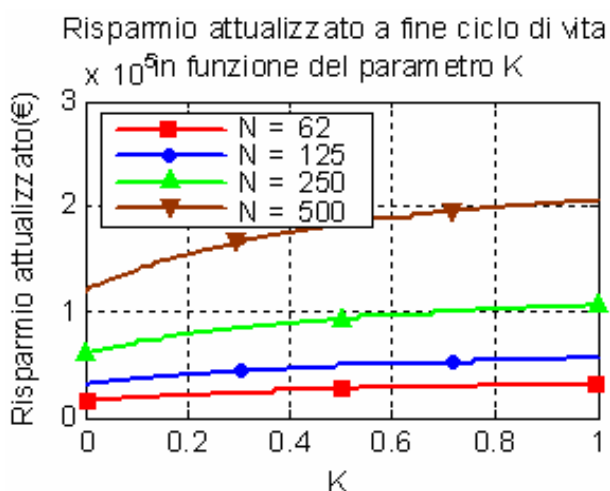


Fig. 22

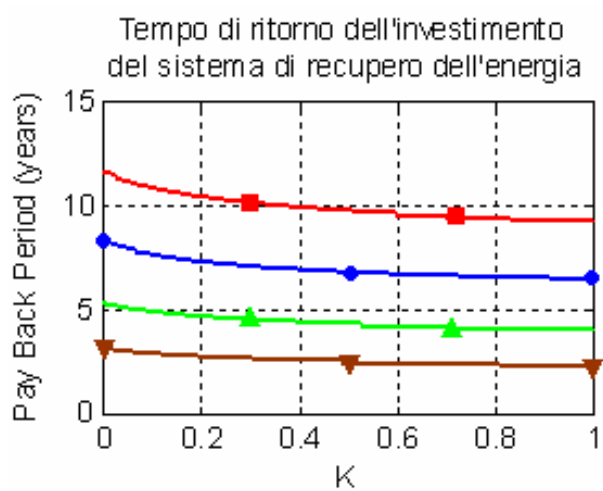


Fig.23

SCENARIO 3

Il terzo scenario va a considerare i seguenti valori dei tassi i e j .

tasso i : 5%;

tasso j : 10%.

In figura 24 e 25 si riportano gli andamenti analoghi alle figure 22 e 23.

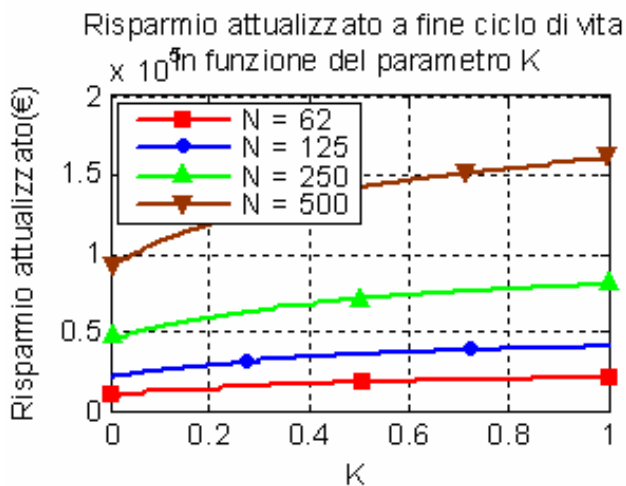


Fig. 24

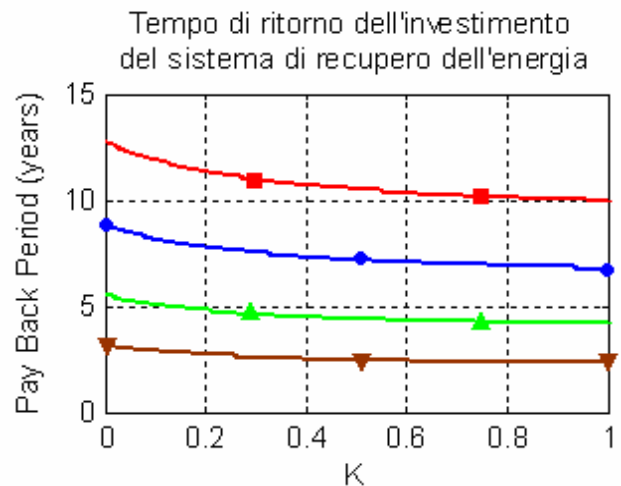


Fig.25

Nella situazione analizzata il tempo di ritorno dell'investimento, con le ipotesi fatte relativamente al ciclo di lavoro e ai tassi del costo del denaro e di aumento del costo dell'energia elettrica, è compreso tra 3 e 13 anni nello scenario più promettente (Scenario 2), per arrivare sino a un valore compreso tra 4 e 24 anni in uno scenario in cui non si ha un aumento del costo dell'energia elettrica rispetto a oggi (Scenario 1). Lo scenario più plausibile, probabilmente, è quello indicato in 3, in cui a fine vita impianto il risparmio attualizzato al tempo 0 (risparmi totali del costo dell'energia attualizzati al tempo zero diminuiti dell'investimento iniziale) sono compresi tra 8000€ e 170000€ (a seconda della dimensione del sistema di accumulo, ossia del valore di K, e al variare del numero dei cicli di utilizzo giornalieri, ossia il valore N) a fronte di un investimento iniziale compreso tra 10000€ e 13000€.

Si ribadisce che l'analisi ha preso in considerazione di recuperare la sola energia potenziale nella fase di discesa dei container movimentati e non anche quella relativa alla fase di frenata dell'intera struttura carroponte/gru portuale. In questo caso il ritorno dell'investimento è sicuramente relativo a un intervallo temporale più breve che può arrivare sino a dimezzarsi.

Questo significa che tutti i risultati esposti in questa relazione, in particolare i costi del sistema di accumulo e degli apparati di conversione, sono coerenti alla situazione attuale, ma il tempo di ritorno dell'investimento e quindi i risparmi reali attualizzati sono funzione del ciclo di lavoro in esame. L'analisi economica descritta in questo paragrafo va quindi ripetuta al variare delle condizioni operative del reale ciclo di lavoro.

Nel prosieguo, al fine di completare il metodo d'analisi relativo alla valutazione tecnico - economica del sistema d'accumulo per il recupero dell'energia cinetica di frenatura e/o potenziale di discesa, viene illustrato il dimensionamento di un sistema d'accumulo centralizzato, nel caso in cui vi siano più utilizzatori (es. carroponi/gru) alimentati da un'unica rete d'alimentazione. L'analisi si basa su di un approccio probabilistico e non su di un concetto cronologico: che un valore di potenza, necessario ad alimentare tutti gli utilizzatori, sia richiesto al sistema di accumulo, è solo un concetto statistico. L'analisi, in particolare, considera che i

diversi eventi (assorbimenti di potenza) siano statisticamente indipendenti, quindi la probabilità che si verifichino un certo assorbimento di potenza globale dal sistema di accumulo è data dalla produttoria delle probabilità che si verifichino i singoli assorbimenti da parte dei diversi carichi. La sommatoria di tutte le produttorie è 1 in quanto nel suo insieme l'evento assorbimento di un certo valore di potenza è un evento certo.

Con quest'approccio il sistema d'accumulo sarà dimensionato al fine di soddisfare la totalità degli eventi che hanno una probabilità di verificarsi maggiore, o uguale, ad un valore definito in fase di progetto. Il sistema d'accumulo sarà tanto più piccolo quanto minore è il valore della probabilità definito in fase progettuale.

3) ANALISI DEI RISULTATI SPERIMENTALI ED ESTENSIONI DELL'APPLICAZIONE A SISTEMI INTEGRATI

Nel presente capitolo si affronta il problema del dimensionamento dei convertitori e del sistema di accumulo nell'ipotesi che nell'impianto siano presenti più carroporti che lavorino contemporaneamente.

Nel seguito verrà suggerito un possibile approccio metodologico al problema che si prefigge lo scopo di fornire le linee guida per la scelta dei principali componenti del sistema.

In via del tutto generale, mentre alcuni carroporti stanno assorbendo potenza dalla rete di alimentazione, altri sarebbero nelle condizioni di poterla restituire in virtù dell'energia accumulata nella fase precedente, sotto forma di energia potenziale dei carichi sollevati. In tal modo l'energia restituita da alcuni carroporti potrebbe essere direttamente utilizzabile da quelli che si trovano in fase di sollevamento riducendo la potenza assorbita dalla rete e, la potenza eventualmente disponibile in eccesso in certi intervalli di tempo, potrebbe essere momentaneamente immagazzinata in dispositivi idonei a restituirla in fasi successive.

Particolarmente adatti a questa operazione sembrano essere i supercondensatori per gli stessi motivi per cui se ne è già previsto l'impiego nel caso esaminato di un solo carroporte. Ovviamente il prelievo dalla rete non può essere annullato per la presenza delle inevitabili perdite nel sistema.

Di fatto, il risultato che si può conseguire è duplice: da un lato si evita lo spreco di energia che è, e sempre più lo sarà nel futuro, preziosa e dall'altro, si può conseguire un livellamento dei prelievi di potenza dalla rete, fatto come ben noto favorevole al dimensionamento dell'intero sistema di alimentazione. Naturalmente il punto di ottimo sarà individuato dalla soluzione economicamente più vantaggiosa.

L'argomento si presta ad essere affrontato mediante considerazioni di tipo probabilistico portando al dimensionamento dei componenti del sistema non in base al caso peggiore in cui tutti i carroporti siano in fase di sollevamento o abbassamento del carico, poco probabile, ma prendendo come riferimento la situazione che ha una elevata probabilità di manifestarsi, diciamo superiore ad un certo valore, da determinarsi col procedimento che sarà illustrato di seguito. Così facendo si può pervenire alla soluzione ideale che ottimizza, sotto

il profilo economico il costo complessivo inteso come costo impianto da un lato e risparmio conseguibile sulla bolletta elettrica dall'altro, in via del tutto generale, risparmio in termini di energia assorbita e di potenza impegnata. L'approccio economico al problema potrà poi essere diverso a seconda che si voglia trovare la soluzione che corrisponde ad un tempo di ritorno dell'investimento sufficientemente breve, ad esempio tre/cinque anni, oppure dia luogo ad un'ottimizzazione economica dell'impianto durante l'intera vita dell'impianto stesso: tale soluzione, di fatto tenderebbe a privilegiare la soluzione sotto il profilo del risparmio energetico conseguibile.

3.1) IMPOSTAZIONE PROBABILISTICA

Supponiamo di avere un numero N di carroporti caratterizzati dallo stesso ciclo di lavoro di periodo T con un assegnato profilo di potenza di valore positivo o negativo a seconda che il dispositivo stia sollevando o abbassando il carico.

Supporremo inoltre che tutti i carroporti, figura 26, siano alimentati da una rete di distribuzione in c.c. e siano dotati, ciascuno di un convertitore c.c./c.a. reversibile preposto all'alimentazione del motore del carroporte; la rete in continua si ritiene poi interfacciata con la rete di distribuzione pubblica attraverso un convertitore c.a./c.c.

Infine un convertitore c.c./c.c. è interposto tra rete in c.c. e sistema di accumulo costituito, come detto, da batterie di supercondensatori.

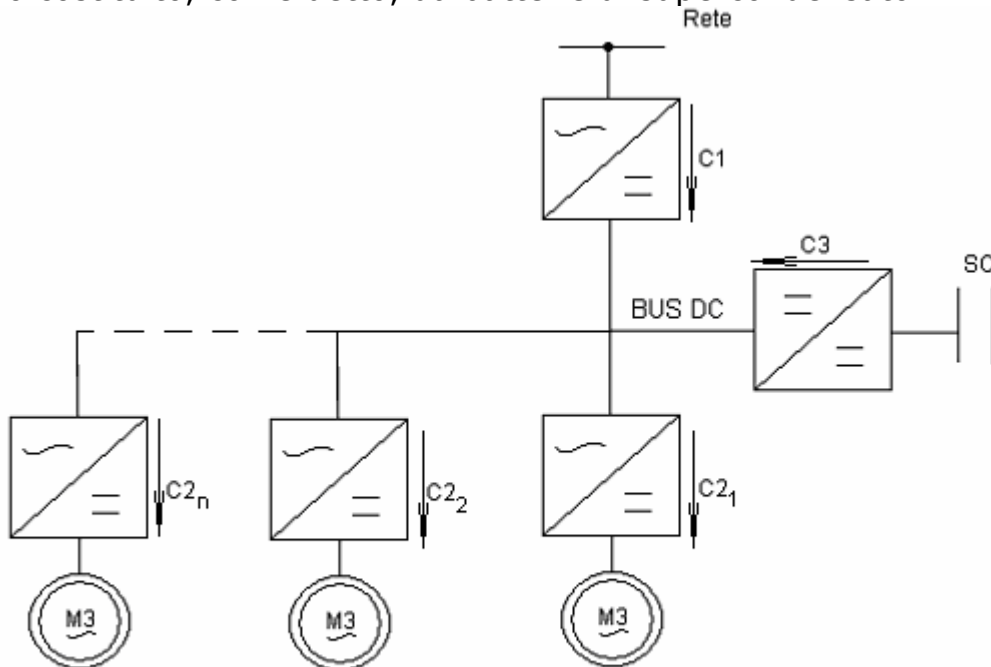


fig. 26

Per introdurre il metodo proposto, prendiamo in considerazione il diagramma di carico del primo carroporte (figura 27). Supponiamo di suddividere in S intervalli uguali il periodo T di lavoro ed assumiamo come potenza associata

all'intervallo generico DT , contenuto in T e di durata pari a T/S , il valore medio della potenza assorbita od erogata dal carro ponte (positiva se assorbita, negativa se erogata).

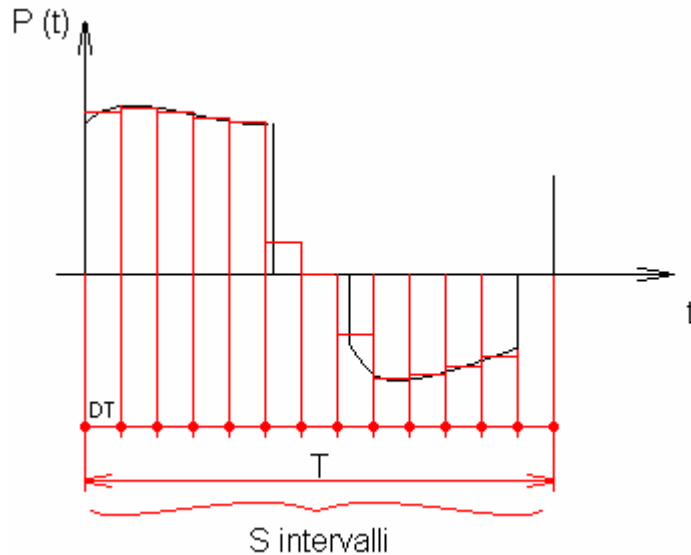


fig. 27

In tal modo si trasforma il diagramma di carico effettivo in un istogramma, senza alterare le aree sottese e quindi, senza alterare i valori delle energie scambiate nei vari intervalli di tempo.

La probabilità che ci si trovi a lavorare in un certo intervallo elementare, è data da DT/T ed è la medesima per ciascun intervallo: non vi è infatti alcun motivo per cui un intervallo del ciclo di lavoro, abbia maggiori probabilità di manifestarsi rispetto ad altri.

In definitiva lo stato di carico, in termini probabilistici di un carro ponte è esprimibile mediante una matrice di S righe e due colonne in cui la prima riporta le potenze medie nei generici intervallini, mentre la seconda la probabilità con cui si possono manifestare, che, per quanto detto, sono le stesse per tutte le righe.

La somma delle probabilità che rappresentano le condizioni di assorbimento o cessione della potenza in cui può trovarsi il carro ponte, è ovviamente pari all'unità in quanto evento statisticamente certo.

Tale rappresentazione è avulsa dal tempo in quanto non contiene l'informazione relativa all'istante temporale in cui un determinato valore di potenza si verificherà.

Discorso perfettamente analogo può essere fatto per il secondo carro ponte, il terzo e così via: anche per questi si supporrà di suddividere il periodo in S intervalli di durata pari a T/S .

Per semplicità di esposizione ipotizziamo inizialmente la presenza di due soli carroponti lavoranti simultaneamente, ma in maniera completamente scorrelata l'uno rispetto all'altro cosicché tutte le possibili combinazioni hanno

la stessa probabilità di presentarsi; sono cioè equiprobabili tutti gli sfasamenti temporali tra i diagrammi di potenza dei due dispositivi di sollevamento.

Possiamo allora costruire una sequenza di S matrici a quattro colonne in cui, nelle prime due, mettiamo le potenze medie assorbite dal primo carro ponte con le relative probabilità mentre nella terza e nella quarta le potenze medie del secondo carro ponte, con le relative probabilità. Ogni matrice differisce dalla successiva effetto dello sfasamento pari a DT del profilo di potenza del secondo carro ponte rispetto a quello del primo tenuto fisso.

Ogni matrice rappresenta un possibile scenario, con una probabilità di manifestarsi pari ad $1/S$. Ogni matrice può essere poi integrata da due ulteriori colonne in cui, in corrispondenza di ognuna delle S righe si riporta la potenza complessiva assorbita od erogata dai due carro ponti, pari alla somma algebrica delle potenze relative all'intervallo elementare corrente e, la probabilità con cui tale potenza può manifestarsi, pari al prodotto delle probabilità elementari, cioè a $(DT/T)^2$, nel caso in esame (la probabilità di ogni singolo evento associata ad ogni singola riga è pari alla produttoria delle due probabilità elementari nell'ipotesi che gli eventi che originano l'evento complessivo siano statisticamente indipendenti).

Ancora una volta giova ricordare come la somma delle probabilità che si manifestino le potenze complessive associate ad ogni riga per tutti gli S scenari è pari all'unità.

In sintesi, per ogni scenario è possibile determinare con i mezzi propri della statistica la curva delle probabilità cumulate delle potenze assorbite dai due carro ponti e delle potenze erogate in fase di recupero e cioè le curve che riportano la probabilità che una data potenza complessiva, positiva o negativa, sia inferiore o uguale al corrispondente valore riportato sulle ascisse.

La somma delle probabilità che la potenza assorbita od erogata sia inferiore alle potenze massime in un dato scenario non è, per quanto detto, pari ad uno ma ad $1/S$.

Ad ogni matrice che caratterizza un dato scenario si può anche associare una funzione, integrale della potenza complessiva nel tempo, che rappresenta l'evoluzione dell'energia assorbita dai due carro ponti a partire dall'istante assunto arbitrariamente come tempo zero che è quello in cui inizia il ciclo di lavoro del primo carro ponte e che, come detto, teniamo fisso per tutte le S matrici al solo fine di valutare sotto il profilo probabilistico i parametri elettrici d'interesse ossia le potenze e l'energia accumulabile nel banco di supercondensatori.

Gli intervalli in cui la funzione integrale è positiva crescente corrispondono a periodi in cui il complesso dei due carro ponti assorbe potenza dalla rete di alimentazione in continua, quando è positiva decrescente implica che l'energia complessiva assorbita va decrescendo e cioè si è in una fase in cui prevale l'energia recuperata rispetto a quella assorbita dal carro ponte in fase di sollevamento. L'inversione di segno ad un certo istante della funzione integrale, infine, implica che l'energia complessivamente recuperata dall'istante iniziale è maggiore di quella assorbita.

L'energia complessivamente generata dai due carroporti può essere utilizzata prevedendo un convertitore c.a./c.c. reversibile atto ad attuare il recupero in rete, oppure accumulata in appositi "serbatoi energetici".

Non prenderemo in considerazione la prima soluzione, anche se circuitalmente più semplice, in quanto l'energia buttata in rete sarebbe comunque poco remunerata dal distributore pubblico, vista l'aleatorietà della sua disponibilità, ed inoltre non consentirebbe di conseguire un livellamento del carico con i ben noti vantaggi energetici e di progettazione della rete elettrica di alimentazione del sistema di sollevamento.

Prendendo invece in considerazione la seconda ipotesi, per ogni scenario elementare, possiamo valutare la massima capacità di accumulo richiesta per recuperare tutta l'energia disponibile; questa risulta data dalla massima delle differenze tra valore positivo e valore negativo della funzione integrale della potenza negli intervalli, del periodo T , in cui la funzione integrale ha pendenza negativa e cioè in cui il complesso dei due carroporti sta erogando potenza.

Ovviamente alla fine del periodo T in tutti gli S scenari la funzione integrale nell'istante finale dovrà necessariamente assumere valore positivo per il fatto che i rendimenti non unitari dei vari componenti dell'impianto di sollevamento richiedono comunque sempre un assorbimento di energia dalla rete in continua.

Per ognuno degli S scenari è possibile determinare un'energia di dimensionamento del sistema di accumulo e un'energia totale recuperata nell'intero ciclo di lavoro, entrambi caratterizzati da una probabilità elementare pari ad $1/S$. Per ogni scenario la dimensione del sistema di accumulo, WSC , è pari al modulo della differenza tra il massimo e il minimo della funzione integrale della potenza complessiva nel tempo, mentre l'energia totale recuperata nel ciclo di lavoro corrisponde alla somma delle energie recuperate in un ciclo di lavoro. E' così possibile costruire una matrice a tre colonne e S righe, ognuna delle quali identifica uno scenario. Per ogni scenario si trova cioè la capacità minima del serbatoio energetico che consentirebbe di accumulare tutta l'energia in fase di recupero.

Eventuali righe caratterizzate da uguali valori di dimensione del sistema di accumulo e energia recuperabile, possono essere sostituite da una sola riga caratterizzata dagli stessi valori di energia e probabilità pari alla somma delle probabilità delle righe accorpate. Chiameremo matrice delle energie la matrice così realizzata.

Il criterio ora esposto per due carroporti è facilmente estendibile, al caso in cui si abbiano più dispositivi di sollevamento lavoranti contemporaneamente a fronte certamente di un appesantimento computazionale.

A questo punto si deve evidenziare un concetto di base sulla scelta di capacità del serbatoio di accumulo e delle potenze dei convertitori: va già fin d'ora posto l'accento che energia accumulabile e potenze dei convertitori non sono indipendenti tra loro.

Analizzando la topologia generalizzata del sistema (figura 26) caratterizzata da n carroporti facenti capo ad un unico convertitore $C1$ di interfaccia con la rete

e ad un unico sistema di accumulo centralizzato SC, possiamo dire che la potenza totale assorbita dagli n azionamenti e indicata come $PC2_{tot}$ è pari a:

$$PC2_{tot}(t) = \sum_{i=1}^n PC2_i(t) = PC1(t) + PC3(t) \quad (28)$$

dove:

$PC2_i$: Potenza assorbita dal convertitore $C2_i$,

$PC1$: Potenza erogata dal convertitore $C1$,

$PC3$: Potenza erogata dal convertitore $C3$.

La potenza erogabile dal convertitore $C3$ nelle diverse condizioni di funzionamento è funzione dell'energia disponibile nel sistema di accumulo. In particolare facendo l'ipotesi che il sistema deve essere sempre in grado di alimentare qualsiasi condizione di carico richiesta, significa che i diversi dispositivi devono essere progettati per poter alimentare gli n azionamenti anche nel caso in cui tutti questi dovessero avviarsi contemporaneamente. In tale condizione la potenza massima erogabile dal convertitore $C3$ per tutto il tempo di salita T_s degli n azionamenti, che per semplicità e senza perdere di generalità abbiamo supposto tutti uguali tra loro, è funzione dell'energia massima WSC immagazzinabile nel sistema di accumulo stesso. In particolare possiamo scrivere che:

$$PC3_{max} = \frac{WSC}{T_s} \quad (29)$$

La potenza minima di dimensionamento del convertitore $C1$ di interfaccia con la rete risulta quindi:

$$PC1_{min} = \sum_{i=1}^n PC2_{i-max} - PC3_{max} \quad (30)$$

dove:

$PC2_{i-max}$: Potenza assorbita in fase di salita dell'azionamento i .

Da questo discorso risulta quindi chiaro che per ogni dimensione del sistema di accumulo risultano univocamente determinate le potenze di dimensionamento dei convertitori $C1$ e $C3$. La potenza di dimensionamento dei convertitori C_i , invece, risulta determinata dal ciclo di lavoro dell'azionamento stesso.

Il costo dei diversi convertitori, che è funzione della potenza di dimensionamento, quindi, risulta univocamente determinato dal ciclo di lavoro degli n azionamenti e dalla dimensione del sistema di accumulo WSC.

A questo punto, in riferimento alla matrice delle energie precedentemente costruita, è possibile determinare per ogni taglia del sistema di accumulo WSC disponibile il numero di eventi (ossia energie recuperate) che è possibile soddisfare pienamente senza sfiorare energia in eccesso e il numero di eventi per i quali tale sfioro avviene. E' così possibile riaggiornare la matrice delle

energie dove tutte le righe nelle quali l'energia recuperata supera il limite del sistema di accumulo vengono sostituite dai rispettivi valori di energia effettivamente recuperabili in conformità alla dimensione del sistema di accumulo scelto.

La matrice così costruita permette di andare a determinare l'ammontare dell'energia risparmiata considerando un intervallo temporale di riferimento T_{rif} . In particolare risulta:

$$W_{risparmiata} = T_{rif} \cdot \sum_{i=1}^l W_i \cdot p_i$$

dove:

l : numero di righe della matrice delle energie

W_i : energia risparmiata associata alla riga i

p_i : probabilità associata all'evento della riga i .

A valle di tutto questo ragionamento è quindi possibile dire che per ogni dimensione del sistema di accumulo WSC variabile tra 0 e la dimensione massima corrispondente alla massima energia recuperabile nel caso di frenata contemporanea degli n carroporti è possibile determinare:

- il costo del sistema di accumulo a supercondensatore,
- la potenza di dimensionamento dei diversi convertitori e quindi:
 - il costo dei diversi convertitori,
 - la potenza minima contrattuale con la rete.
- l'ammontare dell'energia risparmiata grazie al recupero su supercondensatore nel periodo di riferimento T_{rif} .
- l'ammontare del risparmio economico della bolletta elettrica sia legato al risparmio di energia che di potenza legato ad un minor dimensionamento del convertitore C1.

In definitiva, anche nel caso di n carroporti, con lo stesso approccio illustrato nel capitolo 2), relativo all'analisi tecnica economica del costo di un sistema di accumulo a supercondensatore riferita a un solo carroporte, è possibile tracciare le diverse curve di costo degli apparati e dei risparmi conseguibili nell'intervallo di riferimento, in funzione della dimensione del sistema di accumulo e dello scenario che si va così a configurare. E' così possibile determinare il punto di ottimo, ossia il punto che determina un risparmio economico maggiore a fine vita d'impianto, ossia il ritorno economico dell'investimento più rapido.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Schneuwly, R. Gallay, "Properties and applications of supercapacitors. From the state of the art to future trends," Proceeding PCIM 2000, International Conference on Power Electronics, Intelligent Motion and Power Quality, Nürnberg, Germany, 6-8 June 2008, [pp.1-10].
- [2] L. M. Palma Fanjul, "Some applications of supercapacitors in power electronic systems," Thesis submitted to Texas A & M University in partial fulfilment of the requirements for the degree of Master of Science, August 2003.
- [3] C. R. Akli, X. Roboam, B. Sareni, A. Jeunesse, " Energy management and sizing of a hybrid locomotive," in EPE 2007, 12th European Conference on Power Electronics and Applications, Aalborg, Denmark, 2-5 September 2007, [pp. 1-10].
- [4] M. Steiner, M. Klhor, S. Pagiela, "Energy storage system with ultracaps on board of railway vehicles," in EPE 2007, 12th European Conference on Power Electronics and Applications, Aalborg, Denmark, 2-5 September 2007, [pp. 1-10].
- [5] L. Latkovskis, V. Brazis, "Simulation of the regenerative energy storage with supercapacitors in tatra T3A type trams," in UKSIM 2008, Proceedings of the Tenth International Conference on Computer Modeling and Simulation, Cambridge, England, 1-3 April 2008, pp. 398-403.
- [6] A. Lohner, W. Evers, "Intelligent power management of a supercapacitor based hybrid power train for light-rail vehicles and city busses," in 2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference, Aachen, Germany 20-25 June 2004, pp. 672-676.
- [7] P. Barrade, A. Rufer, "Supercapacitors as energy buffers: a solution for elevators and for electric busses supply," in PCC-Osaka 2002, Proceedings of the Power Conversion Conference, Osaka, Japan, 2-5 April 2002, vol. 3, pp. 1160-1165.
- [8] B. Destraz, P. Barrade, A. Rufer, M. Klohr, "Study and simulation of the energy balance of an urban transportation network," in EPE 2007, 12th European Conference on Power Electronics and Applications, Aalborg, Denmark, 2-5 September 2007, [pp. 1-10].
- [9] T. Wei, S. Wang, Z. Qi, "A supercapacitor based ride-through system for industrial drive applications, " in IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Harbin, China, 5-8 August 2007, pp. 3833-3837
- [10] M. B. Camara, H. Gualous, F. Gustin, A. Berthon, "Control strategy of hybrid sources for transport applications using supercapacitors and batteries," in IPERC 2006, 5th International Power Electronics and Motion Control Conference, Shanghai, China, 13-16 August 2006, [pp.1-5].
- [11] J. W. Dixon, M. E. Ortúzar, "Ultracapacitors + DC-DC converters in regenerative braking system," IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, vol.17, n. 8, pp. 16-21, Aug. 2002.
- [12] P. Barrade, A. Rufer, "High-power fast energy exchange between storage systems: supercapacitors as energy buffer in transportation systems," in EVS-18, The 18th International Vehicle Symposium, Berlin, Germany, 20-24 October 2001, [pp. 1-12].
- [13] A. Rufer, "Power-electronic interface for a supercapacitor-based energy storage substation in DC-transportation networks," in EPE 2003, 10th European Conference on Power Electronics and Applications, Toulouse, France, 2-4 September 2003, [pp. 1-9].
- [14] A. Rufer, P. Barrade, "A supercapacitor- based energy storage system for elevators with soft commutated interface," IEEE Transactions on industry applications, vol. 38, n. 5, pp.1151-1159, Sept./Oct. 2002.

-
- [15] D. Iannuzzi, P. Tricoli, "Integrated storage devices for ropeway plants: useful tools for peak shaving," in IECON 2007, 33rd annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Taipei, Taiwan, 5-8 November 2007, pp. 396-401.
- [16] N. Li, J. Zhang, Y. Zhong, "A novel charging control scheme for super capacitor energy storage in photovoltaic generation system," in DRPT2008, Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, Nanjing, China, 6-9 April 2008, pp. 2671-2675
- [17] C. Abbey, G. Joos, "Supercapacitor energy storage for wind energy applications," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 43, n. 3, pp. 769-776, May/June 2007.
- [18] M. Becherif, M. Y. Ayad, A. Djerdir, A. Miraou, "Electrical train feeding by association of supercapacitors, photovoltaic and wind generators," in ICCEP 2007, International Conference on Clean Electrical Power, Capri (Italy), 21-23 May 2007, pp. 55-60
- [19] J.P. Thounthong, S. Rael, B. Davat, "Control strategy of fuel cell and supercapacitors association for a distributed generation system," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 54, Issue 6, pp. 3225-3233, Dec. 2007.
- [20] M. K. Kazmierczuk, R. C. Cravens, "Application of super capacitors for voltage regulation in aircraft distributed power systems," in PESC'96 record, 27th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, Baveno (VB), Italy, 23-27 June 1996, pp. 835-841.
- [21] J. E. Finley, D. I. Taylor, J. M. Klein, C. Byrne, N. Hochstrasser, H. L. Hess, B. K. Johnson, J. D. Law, A. R. Griffiths, "Electrochemical capacitor voltage supplement for large-scale naval submarines," in NAPS'07, 39th North American Power Symposium, Las Cruces, New Mexico, 30 Sept.-2 Oct. 2007, pp.148-152
- [22] A. Rufer, D. Hotellier, P. Barrade, "A supercapacitor-based energy-storage substation for voltage-compensation in weak transportation networks," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 19, n. 2, pp. 629-636, April 2004.
- [23] A. Szabo, "Electrically powered steering using a supercapacitor power boost unit," in PEMD 2008, The 4th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives, York (UK), 2-4 April 2008, pp. 350-351.
- [24] P. Srithorn, M. Summer, L. Yao, R. Parashar, "A statcom with supercapacitors for enhanced power system stability," in PEMD 2008, The 4th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives, York (UK), 2-4 April 2008, pp. 96-100.
- [25] D. Casadei, G. Grandi, C. Rossi, "A supercapacitor-based power conditioning system for power quality improvement and uninterruptible power supply," in IEEE International Symposium on Industrial Electronics, IEEE-ISIE, L'Aquila (IT), 8-11 July 2002, pp. 1247-1252.
- [26] A. Stepanov, I. Galkin, L. Bisenieks, "Implementation of supercapacitors in uninterruptible power supplies," in EPE 2007, 12th European Conference on Power Electronics and Applications, Aalborg, Denmark, 2-5 September 2007, [pp. 1-7].
- [27] J. Wang, J. Zhang, Y. Zhong, "Study on a super capacitor energy storage system for improving the operating stability of distributed generation system," in DRPT2008, Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, Nanjing, China, 6-9 April 2008, pp. 2702-2706
- [28] L. Zubieta, R. Bonert, Characterization of Double-Layer Capacitors for power electronic applications, IEEE Transaction on industry application, vol. 36, no. 1, Gennaio/Febraio 2000, pag. 199-204.
- [29] 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.

[30] F.Belhachemi, S. Rael, B. Davat: A physical based model of power electric double-layer supercapacitors, Green-Inpl-Cnrs (Upresa 7037), France.

[31] www.acquirenteunico.it.

[32] www.autorita.energia.it

BIOGRAFIA

Enrico Tironi si è laureato in ingegneria elettrica al Politecnico di Milano nel 1972. Dal 1972 lavora presso il dipartimento di elettrotecnica del Politecnico di Milano dove ricopre attualmente il ruolo di professore ordinario.

I suoi maggiori ambiti di interesse riguardano l'elettronica di potenza, la Power Quality e la generazione distribuita. E' membro del Comitato Elettrotecnico Italiano (CEI), della Federazione Italiana di Elettrotecnica, Elettronica, Automazione, Informatica e Telecomunicazione (AEIT) e del gruppo dei Sistemi Elettrici di Potenza del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR).