



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

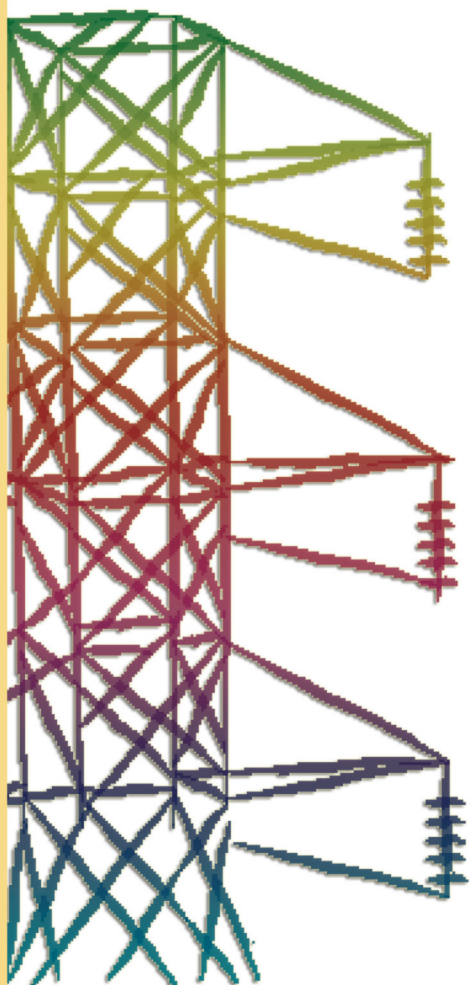


Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA SISTEMA ELETTRICO

**Accumulo elettrico con supercondensatori nell'industria:
definizione delle strategie di controllo e gestione e
partecipazione alla sperimentazione per l'applicazione ad un
carro ponte**

Augusto Di Napoli





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



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA SISTEMA ELETTRICO

Accumulo elettrico con supercondensatori nell'industria: definizione
delle strategie di controllo e gestione e partecipazione alla
sperimentazione per l'applicazione ad un carro ponte

Augusto Di Napoli



ACCUMULO ELETTRICO CON SUPERCONDENSATORI NELL'INDUSTRIA: DEFINIZIONE DELLE STRATEGIE DI CONTROLLO E GESTIONE E PARTECIPAZIONE ALLA SPERIMENTAZIONE PER L'APPLICAZIONE AD UN CARRO PONTE

Augusto Di Napoli (Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Industriale dell'Università Roma Tre)

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 sull'autore sono riportate a fine rapporto

INDICE

Premessa	4
Definizione del dimensionamento delle specifiche del sistema.	4
Dimensionamento dei supercondensatori	7
Definizione delle strategie di controllo e gestione dei dispositivi del sistema	11
Dimensionamento dei convertitori	14
CONVERTITORE DC-DC	14
INVERTER DI TRAZIONE.....	15
PONTE RADDRIZZATORE A DIODI.....	16
Collaborazione alla messa a punto del sistema d'accumulo ed alla sua validazione sperimentale.	18
Bibliografia	24
Biografia	25

Premessa

La presente relazione descrive il programma di attività, il cui titolo è riportato in testa, effettuato presso il Dipartimento di ingegneria Meccanica ed Industriale dell'Università degli studi di Roma TRE, esso si inserisce nell'ambito del tema "Promozione delle tecnologie elettriche innovative negli usi finali".

Nella prima parte viene descritto e discusso il dimensionamento dell'accumulo per un carro ponte industriale con riferimento ad un diagramma di carico reale, successivamente si è fatto riferimento all'azionamento in scala acquisito presso il laboratorio della Casaccia ed il simulatore costruito è stato testato rispetto a questa apparecchiatura.

Definizione del dimensionamento delle specifiche del sistema.

Il sistema di riferimento riguarda un azionamento per carro ponte con accumulo a supercondensatori; si è stabilito innanzitutto il layout di impianto previsto.

A partire dalla rete elettrica trifase, l'alimentazione del sistema è ottenuta tramite un ponte raddrizzatore trifase a diodi con relativo condensatore di link che provvede a garantire una tensione continua sul dc-link. La presenza di opportuni filtri in ingresso al ponte raddrizzatore garantisce il rispetto dei limiti normativi nel punto di interconnessione alla rete di distribuzione dell'energia elettrica.

L'azionamento elettrico preposto alla movimentazione del carro ponte si compone di una macchina trifase ad induzione, con controllo vettoriale ad orientamento di campo, e di un inverter trifase.

Il banco di supercondensatori (UC: Ultracapacitor) provvede ad alimentare l'azionamento elettrico durante la fase di sollevamento dei carichi (conseguente scarica degli UC) e a recuperare l'energia che si rende disponibile durante la fase di discesa dei carichi (conseguente ricarica degli UC). Per

interfacciare il sistema di accumulo con il dc-link è necessario un convertitore elettronico di potenza dc-dc bidirezionale del tipo innalzatore/abbassatore.

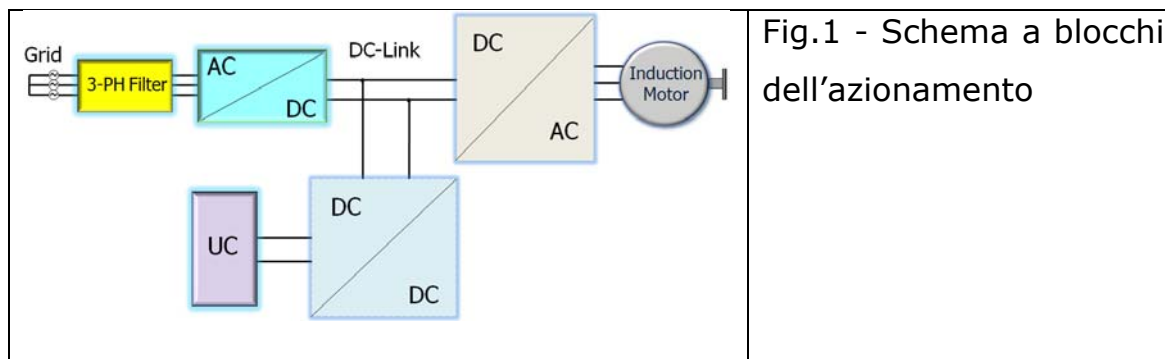


Fig.1 - Schema a blocchi dell'azionamento

Allo scopo può essere utilizzata una configurazione a ponte con tre rami, ognuno costituito da due switch con diodi in antiparallelo e induttori in ingresso; l'impiego di due rami in parallelo permette di avere correnti di esercizio sufficientemente contenute e l'eventuale funzionamento in interleaving con la conseguente riduzione dell'ingombro degli induttori di ingresso. Il terzo ramo della configurazione che si propone, può essere utilizzato per alimentare una resistenza di frenatura da utilizzare in un caso di emergenza, quale per es. quello in cui il sistema di accumulo è ancora carico e non può assorbire ulteriore quantità di energia.

Il convertitore proposto è mostrato in fig.2, i due induttori di ingresso servono per garantire un'ondulazione di corrente picco-picco massima pari ad una percentuale della corrente nominale, mentre il condensatore in uscita deve essere dimensionato in modo da limitare l'ondulazione della tensione di uscita del convertitore e per garantire la corrente richiesta sul dc-link durante la fase di conduzione degli switch dei due rami.

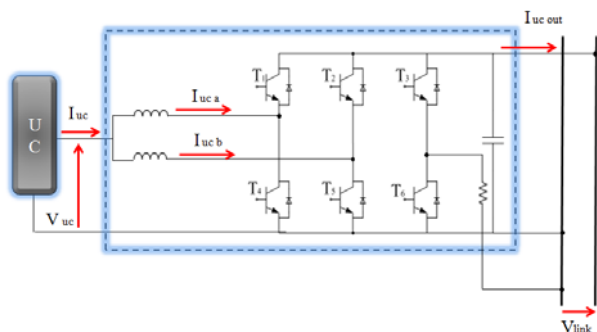
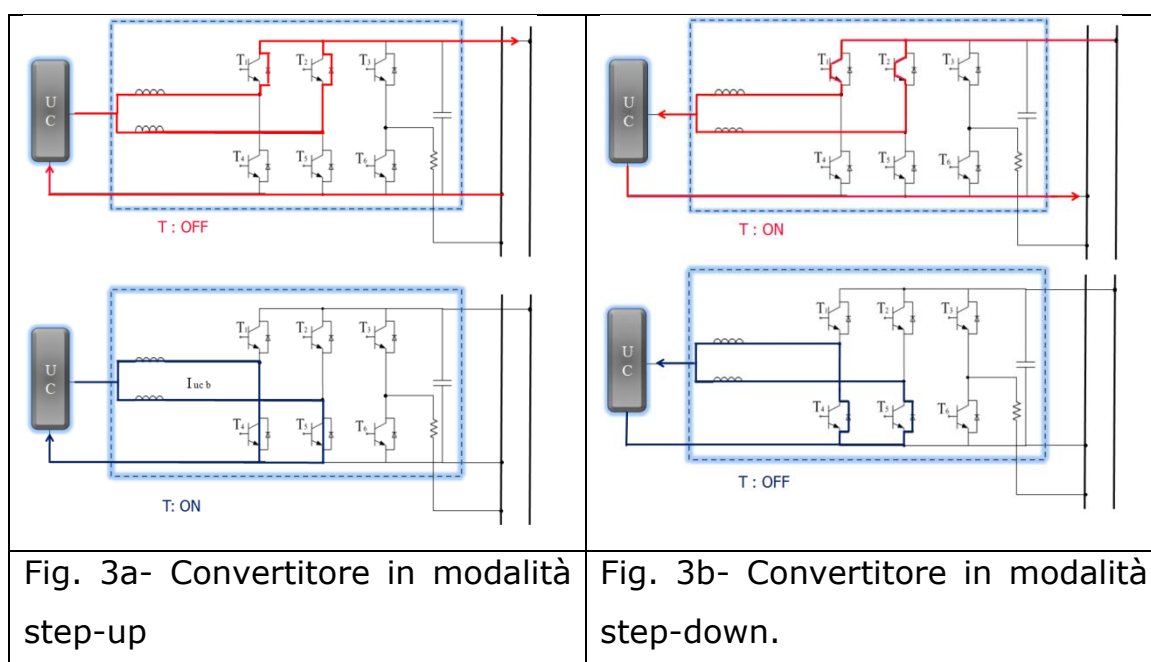


Fig.2 - Convertitore dc/dc bidirezionale per la regolazione del blocco di Ultra Capacitors (UC)

Per evitare un eccessivo numero di supercondensatori connessi in serie, con la conseguente diminuzione di affidabilità, il convertitore di interfaccia, allorché il sistema è in sollevamento, eroga energia sul link in continua e dovrà essere di tipo innalzatore (boost: o step-up, fig. 3a), invece nelle fasi di discesa del carro ponte il sistema recupera energia ed il convertitore sarà nella fase di ricarica del banco di supercondensatori ed avrà una topologia di tipo abbassatore (buck o step down : fig. 4b).



Facendo riferimento allo schema circuitale del convertitore dc-dc (fig. 2), per ogni ramo, durante il funzionamento da BOOST (sollevamento del carro ponte e scarica dei supercondensatori) al fine di implementare la configurazione da innalzatore (Fig. 3a) viene utilizzato lo switch inferiore ed il diodo superiore; viceversa, nel funzionamento da BUCK (discesa dei carichi, "frenatura rigenerativa" e ricarica dei supercondensatori) vengono scambiati tra loro ingresso ed uscita utilizzando lo switch superiore ed il diodo inferiore (configurazione fig. 3b).

Per il dimensionamento dei convertitori elettronici di potenza (inverter di trazione e convertitore dc-dc bidirezionale dei supercondensatori), del ponte

raddrizzatore a diodi e dei componenti esterni (induttanze e condensatori) si rimanda alle pagine successive.

Dimensionamento dei supercondensatori

Il punto di partenza per il dimensionamento dell'impianto, una volta definita la sua architettura, sono i dati del carico, che possono sinteticamente riassumersi come :

- ✓ Entità della massa da trasportare: m [kg];
- ✓ Resistenza specifica all'avanzamento (dotato di segno): w_f ;
- ✓ Coefficiente di attrito dinamico: B [Nms];
- ✓ Periodo del ciclo di moto: T [s];
- ✓ Distanza che deve essere percorsa (dotata di segno): L [m];
- ✓ Valore della massima velocità dell'asse: v_{max} [m/s];
- ✓ Valore della massima accelerazione o decelerazione richiesta nel raggiungimento della velocità di regime: a_m [m/s²].

Da questi valori è possibile costruire la traiettoria di carico, la costruzione della curva di moto ed il ciclo di carico per il motore preposto alla movimentazione meccanica.

Tra i parametri principali da tenere in considerazione per la selezione dell'unità di accumulo vi sono infatti:

l'energia richiesta dall'azionamento, la tensione e la corrente di esercizio.

Per garantire un buon funzionamento del convertitore dc-dc (per la gestione dei supercondensatori) in termini di efficienza e di efficacia del controllo, è opportuno che la tensione operativa di massima carica del banco di supercondensatori sia non troppo distante dal valore della tensione del dc-link, un valore di circa 500V (V_{max}) è stato ritenuto adeguato al caso in esame.

I supercondensatori hanno un buon comportamento quando lo stato di carica è compreso fra 1 e 0.5; di conseguenza si ipotizza per il banco un valore di tensione pari a 250V (V_{min}) nelle condizioni di massima scarica.

Si considerano inoltre rendimenti di conversione pari a circa 0.85 per l'azionamento elettrico e 0.95 per il convertitore dc-dc bidirezionale.

Come unità di accumulo, sono stati individuati moduli di supercondensatori preassemblati forniti da Maxwell (modello BMOD0063 P125) da collegare in parallelo e in serie per soddisfare le specifiche in termini di tensione, corrente e valore di capacità.

Ogni modulo ha le caratteristiche riportate nella seguente Tab. 1.

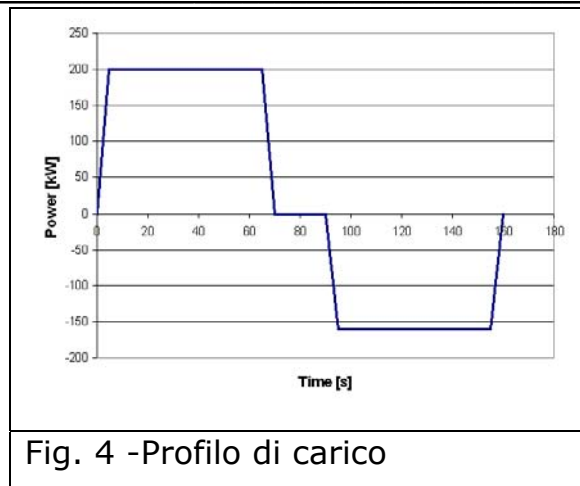
Tab. 1 Caratteristiche modulo supercondensatori Maxwell BMOD0063 P125

Tensione nominale [V]	125
Capacità nominale C _{mod} [F]	63
Resistenza DC serie [mΩ]	18
Energia disponibile [Wh]	101.7
Massima corrente continuativa [A]	150
Massima corrente [A]	750
Temperatura minima di esercizio [°C]	-40
Massima temperatura di esercizio [°C]	+65
Massima temperatura ambiente [°C]	+50
Peso [Kg]	58
Dimensioni LxPxA [mm x mm x mm]	762 x 425 x 265

Essendo la tensione massima dei supercondensatori pari a 500V, ed avendo moduli da 125V, si prevede l'utilizzo di diversi blocchi da porre in parallelo (per raggiungere i desiderati valori di capacità) ognuno dei quali è costituito da 4 moduli da porre in serie e la cui capacità complessiva è pari a:

$$C_{\text{unit}} = \frac{C_{\text{mod}}}{N_s} = \frac{63}{4} = 15.75 \text{ F}$$

Per il dimensionamento dei supercondensatori sono stati analizzati principalmente tre casi. Si è preso come riferimento il ciclo di carico del carro ponte, mostrato in fig.4.



Sono state individuate tre situazioni distinte, in modo da soddisfare le richieste di:

- 1) Energia massima E1 richiesta nel corso di un ciclo di scarica;
- 2) Energia minima E2 fornita nel corso di un ciclo di carica;
- 3) Energia media E3 = (E1 + E2) / 2.

In una prima fase, per effettuare un dimensionamento di massima, sono stati trascurati i rendimenti dell'azionamento elettrico (0.85) e del convertitore dc-dc (0.95); per tenerne conto, è necessario inserire nel modello simulato dei fattori di scala, nel calcolo delle energie.

1) ENERGIA MASSIMA

L'energia E1 richiesta nel corso di un ciclo di scarica è pari a circa 13000 kJ (integrale del primo tratto del ciclo, v.fig.4); ne risulta una capacità necessaria massima per il banco di supercondensatori circa pari a:

$$C_{tot1} = \frac{2 \cdot E_1}{(V_{max}^2 - V_{min}^2)} = 138.6 \cong 139F$$

Il numero di blocchi di supercondensatori da porre in parallelo per ottenere il desiderato valore di capacità è:

$$N_{p1} = \frac{C_{tot1}}{C_{unit}} = \frac{139}{15.75} = 8.8 \cong 9$$

In questo caso il numero totale di componenti da utilizzare è:

$$n_1 = N_{p1} N_s = 9 \cdot 4 = 36$$

per un valore di capacità complessivo:

$$C_{p1} = N_{p1} C_{unit} = 9 * 15.75 = 141.75 \text{ F} \cong 142 \text{ F}$$

2) ENERGIA MINIMA

L'energia E2 fornita nel corso di un ciclo di carica è pari a circa 10400 kJ (integrale del secondo tratto del ciclo); ne risulta una capacità necessaria massima per il banco di supercondensatori circa pari a:

$$C_{tot2} = \frac{2 \cdot E_2}{(V_{max}^2 - V_{min}^2)} = 110.9 \cong 111 \text{ F}$$

Il numero di blocchi di supercondensatori da porre in parallelo per ottenere il desiderato valore di capacità è:

$$N_{p2} = \frac{C_{tot2}}{C_{unit}} = \frac{110.9}{15.75} = 7$$

In questo caso il numero totale di componenti da utilizzare è:

$$n_2 = N_{p2} N_s = 7 * 4 = 28$$

per un valore di capacità complessivo:

$$C_{p2} = N_{p2} C_{unit} = 7 * 15.75 = 110.25 \text{ F} \cong 110 \text{ F}$$

3) ENERGIA MEDIA

L'energia media E3 è pari a $(E1+E2)/2 = 11700 \text{ kJ}$; ne risulta una capacità necessaria massima per il banco di supercondensatori circa pari a:

$$C_{tot3} = \frac{2 \cdot E_3}{(V_{max}^2 - V_{min}^2)} = 124.8 \cong 125 \text{ F}$$

Il numero di blocchi di supercondensatori da porre in parallelo per ottenere il desiderato valore di capacità è:

$$N_{p3} = \frac{C_{tot3}}{C_{unit}} = \frac{125}{15.75} = 7,9 \cong 8$$

In questo caso il numero totale di componenti da utilizzare è:

$$n_3 = N_{p3} N_s = 8 * 4 = 32$$

per un valore di capacità:

$$C_{p3} = N_{p3} C_{unit} = 8 * 15.75 = 126 \text{ F}$$

I valori di capacità complessiva del banco di supercondensatori sono stati calcolati:

nel caso 1 (ENERGIA MASSIMA) per soddisfare le esigenze durante la fase di sollevamento del carro ponte (scarica dei supercondensatori)

e nel caso 2 (ENERGIA MINIMA) per soddisfare i requisiti richiesti nel corso della fase di discesa del carro ponte (carica dei supercondensatori).

I valori di capacità complessiva individuati mettono in luce un conseguente sovradimensionamento del banco di condensatori per la fase di carica nel caso in cui si scegliesse un valore di capacità che soddisfi le specifiche della fase di scarica, oppure il sottodimensionamento del banco di condensatori per la fase di scarica quando si scegliesse un valore di capacità che soddisfa le specifiche della fase di carica.

In entrambi i casi la rete elettrica sarebbe chiamata a erogare potenza verso il sistema di diverso valore durante i due sottocicli considerati; nel primo caso sarebbe necessario incrementare la potenza di ricarica dei supercondensatori in modo da ripristinarne lo stato di carica iniziale, mentre nel secondo caso sarebbe maggiore la potenza erogata dalla rete durante la scarica dei supercondensatori in modo da compensare l'energia non sufficiente immagazzinata nel banco di accumulo.

Ponendo come obiettivo quello di assorbire una potenza praticamente costante dalla rete durante i due sottocicli, è necessario conoscere il valore dell'energia richiesta o ceduta dall'azionamento elettrico del carro ponte, nel corso delle due fasi esaminate, e dimensionare il banco di accumulo per il valore di energia calcolato come media dei due (caso 3: ENERGIA MEDIA).

Definizione delle strategie di controllo e gestione dei dispositivi del sistema

La determinazione della logica di controllo per la gestione dei flussi di potenza del sistema deve necessariamente tenere in considerazione che la tensione del dc-link è imposta dalla rete tramite il ponte raddrizzatore non controllato,

mentre l'azionamento elettrico è controllato in velocità, con modalità vettoriale, con anello interno di regolazione in corrente, sia durante il funzionamento da motore che nel caso di funzionamento da generatore.

Il convertitore di interfaccia dei supercondensatori, trovando valori di tensione imposti sia lato supercondensatori, dalle condizioni dello stato di carica degli stessi, sia lato dc-link, dovrà essere regolato in corrente sia nella fase di carica che in quella di scarica.

Per evitare un inappropriato accumulo di carica sui condensatori del dc-link, con possibile eccessivo aumento della tensione del link stesso, il convertitore dc-dc bidirezionale sarà chiamato ad erogare una corrente pari all' 80% della corrente richiesta dall'inverter dell'azionamento elettrico (che dovrà quindi essere monitorata) durante la fase di sollevamento, mentre sarà controllato con un riferimento di corrente di ricarica in ingresso pari al 120% della corrente fornita al dc-link dall'azionamento elettrico stesso nel corso del funzionamento in rigenerazione.

Le percentuali del riferimento di corrente potranno essere opportunamente modificate, in entrambe le situazioni, nel corso del funzionamento in base al valore attuale della tensione del dc-link rispetto al valore di riferimento di 513V. In tale modo, la rete è chiamata sempre a fare il saldo del nodo in corrente fornendo di volta in volta all'azionamento elettrico o al sistema di accumulo la quota parte di corrente mancante e pari a circa il 20% della corrente nominale del sistema nelle condizioni di tensione nominale sul dc-link. Tale percentuale di corrente fornita dalla rete, potrà aumentare in maniera proporzionale all'aumentare della tensione del dc-link rispetto al valore di riferimento, come pure potrà diminuire proporzionalmente alla diminuzione della tensione del dc-link rispetto sempre alla tensione di riferimento di 500V. Infatti, se la tensione di link aumenta (o diminuisce), aumenterà (o diminuirà) anche il duty cycle del convertitore boost; questo porta ad una diminuzione (o ad un aumento) della corrente fornita dai supercondensatori che implica necessariamente l'aumento (o la diminuzione) della corrente fornita dalla rete

elettrica che fa sempre il saldo tra la corrente richiesta dall'azionamento e la corrente fornita dai supercondensatori.

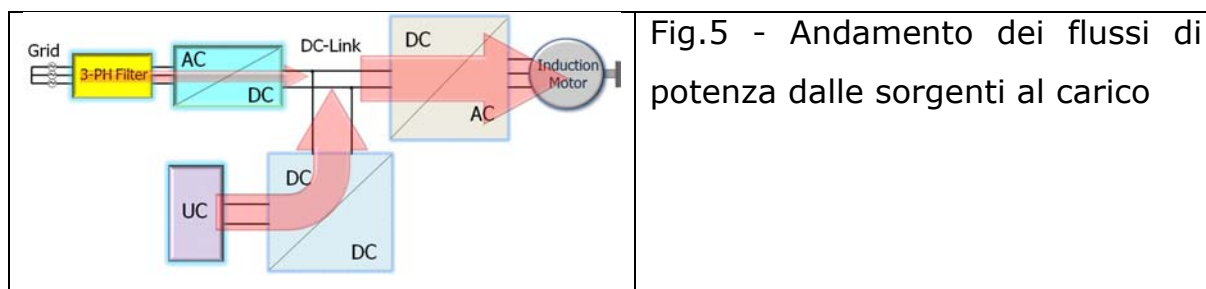
Per ognuno dei tre casi (energia massima, minima e media), sono state quindi analizzate due situazioni:

- A) caso QUASI-SIMMETRICO con assorbimento da rete quasi costante nei due cicli di carica e scarica dei supercondensatori;
- B) caso NON SIMMETRICO con assorbimenti diversi da rete in fase di carica e di scarica.

I riferimenti di corrente impiegati in forma percentuale per la gestione del banco di accumulo dovranno essere necessariamente riveduti nel corso delle attività sperimentali sia sulla base dei rendimenti effettivi dei dispositivi elettrici ed elettronici impiegati sia sulla base dell'efficienza in carica e scarica del banco di supercondensatori.

Inoltre al fine di garantire un corretto dimensionamento ed ottimizzare le prestazioni del sistema è stato costruito un apposito modello che simuli il funzionamento dell'impianto nelle diverse condizioni operative, ciò ha consentito inoltre di caratterizzare il sistema (in termini di massime correnti e tensioni di esercizio) e selezionare i dispositivi.

La determinazione della logica di controllo per la gestione dei flussi di potenza del sistema ha inoltre tenuto in considerazione che la tensione del dc-link è imposta dalla rete tramite il ponte raddrizzatore, e l'azionamento elettrico è controllato in velocità e con modalità vettoriale, sia durante il funzionamento da motore che nel caso di funzionamento da generatore.



Il convertitore di interfaccia dei supercondensatori (fig.5), trovando valori di tensione imposti sia lato supercondensatori dalle condizioni dello stato di carica

degli stessi sia lato dc-link, è stato regolato in corrente sia durante la fase di carica che in quella di scarica.

Dimensionamento dei convertitori

CONVERTITORE DC-DC

Il convertitore dc-dc per la gestione del sistema di accumulo deve essere in grado di adattare il livello della tensione dei supercondensatori (variabile) con quello della tensione del dc-link (costante). Si tratta necessariamente di un convertitore bidirezionale in configurazione boost/buck (o step-up/step-down) che permette il funzionamento su due quadranti del piano V-I (tensione sempre positiva e corrente sia positiva che negativa) e consente la possibilità di recupero di energia nella fase di discesa dei carichi del carro ponte (ricarica dei supercondensatori).

E' possibile determinare il campo di variazione del duty cycle a partire dalla caratteristica di trasferimento del convertitore boost, ricordando i valori massimo e minimo della tensione dei supercondensatori ($V_{UCmax} = 500V$, $V_{UCmin} = 250V$) e della tensione di link ($V_{LINK} = 513V$).

$$\delta = 1 - \frac{V_{UC}}{V_{LINK}}$$

Ne risulta che il duty cycle dovrà essere compreso tra 0,02 e 0,5.

Per calcolare la massima corrente I_{UCmax} che può essere erogata dai supercondensatori, deve essere preso in considerazione il caso peggiore, ovvero quando questi sono chiamati ad erogare il picco di potenza in corrispondenza del loro minimo stato di carica.

Nota la I_{UCmax} , data l'architettura del convertitore dc-dc (due rami in parallelo), la corrente che circolerà in ciascun induttore è $I_L = 1/2 I_{UCmax}$. Avendo imposto un'ondulazione di corrente massima intorno al valore nominale pari al 20%, si può scrivere $\Delta I_L = 0,2 I_L$.

Per dimensionare l'induttore e il condensatore del convertitore dc-dc bidirezionale, si fa riferimento al funzionamento da boost nella fase di

sollevamento del carro ponte (condizione a potenza maggiore). È quindi possibile calcolare il minimo valore dell'induttanza su ogni ramo del convertitore dc-dc tramite la seguente relazione:

$$L_{\min} = \frac{(1-\delta_{\max}) \delta_{\max} V_{\text{LINK}}}{\Delta I_L f_{\text{SW}}}$$

dove f_{sw} è la frequenza di commutazione.

Per quanto riguarda il condensatore di uscita del convertitore dc-dc

$$C_{\text{out_min}} = \frac{\delta_{\max} I_{\text{LINK}}}{\Delta V_{\text{LINK_max}} f_{\text{SW}}}$$

dove I_{LINK} è la massima corrente erogata dai supercondensatori e $\Delta V_{\text{LINK_max}}$ è il massimo ripple ammesso sulla tensione di link (pari all'1% del valore nominale).

Dimensionando il banco di supercondensatori in modo da fornire la potenza richiesta dall'azionamento per il sollevamento del carro ponte, nelle condizioni di massima scarica del sistema di accumulo (condizione peggiore) si prevede l'erogazione di massimo 800A complessivi ($P_{\text{mecc/VUCmin}} = 200 \text{ kW}/250\text{V}$). Per la realizzazione del convertitore dc-dc bidirezionale si può prevedere l'impiego di dispositivi a tecnologia IGBT da 1200V – 500A per ciascuno dei 3 rami.

INVERTER DI TRAZIONE

L'inverter dell'azionamento per la movimentazione del carro ponte dovrà garantire un sovraccarico in corrente del 50% per la macchina elettrica; per tale ragione anche per tale apparecchiatura si prevede l'impiego di dispositivi a tecnologia IGBT da 1200V – 900A. Infatti, dovendo garantire un sovraccarico del 50%, la potenza richiesta sul link P_{LINKmax} è pari a 300kW (invece dei 200kW nominali) e può essere espressa in funzione dei valori efficaci di corrente e tensione di fase ($I_{f,\text{eff}}$ e $U_{f,\text{eff}}$):

$$P_{\text{LINK}}^{\max} = 3 U_{f,\text{eff}} I_{f,\text{eff}}$$

Utilizzando per l'inverter una modulazione PWM ed ipotizzando un indice di modulazione in ampiezza ma unitario, la tensione di fase massima (valore di picco) è:

$$U_{f,pk} = \frac{V_{LINK}}{2}$$

Il valore efficace della tensione di fase risulta quindi pari a:

$$U_{f,eff} = \frac{U_{f,pk}}{\sqrt{2}} = \frac{V_{LINK}}{2\sqrt{2}} = 181V$$

Il valore efficace della corrente di fase è quindi:

$$I_{f,eff} = \frac{P_{LINK}^{max}}{3 U_{f,eff}} = 552A$$

Il suo valore di picco:

$$I_{f,pk} = \sqrt{2}I_{f,eff} = 780A$$

PONTE RADDRIZZATORE A DIODI

Il ponte raddrizzatore a diodi può essere dimensionato per il 20% della potenza del sistema e quindi impiegare dispositivi da circa 80A per la tensione di rete; volendo però garantire la possibilità di ricarica da rete del banco di supercondensatori in tempi sufficientemente brevi (3 min. circa) i dispositivi del ponte raddrizzatore dovrebbero essere scelti con corrente continuativa pari ad almeno 100A.

Le percentuali del riferimento di corrente potranno essere opportunamente modificate in entrambe le situazioni nel corso del funzionamento, in base al valore attuale della tensione del dc-link rispetto al valore di riferimento. In tale modo, la rete è chiamata sempre a fare il saldo del nodo in corrente fornendo di volta in volta all'azionamento elettrico o al sistema di accumulo la quota parte di corrente mancante e pari a circa il 20% della corrente nominale del sistema nelle condizioni di tensione nominale sul dc-link.

I riferimenti di corrente impiegati in forma percentuale per la gestione del banco di accumulo sono stati necessariamente riveduti nel corso delle attività sperimentali sia sulla base dei rendimenti effettivi dei dispositivi elettrici ed elettronici impiegati sia sulla base dell'efficienza in carica e scarica del banco di

supercondensatori; questo ha consentito una migliore sintonizzazione dei regolatori di corrente del convertitore dc-dc. Il modello per la simulazione è stato messo a punto ed analizzato per tre valori di capacità del banco di Ultracapacitori rispettivamente per $C= 31F$, $C=66F$, $C=93F$ (minima, media e massima energia riferita al profilo di carico) e la simulazione ha prodotto per il profilo di carico fissato del tipo di fig. 4 i risultati di tensione, di corrente e di potenza, mostrati in figg. 6,7,8 per i tre valori di capacità degli UC, sopra calcolati.

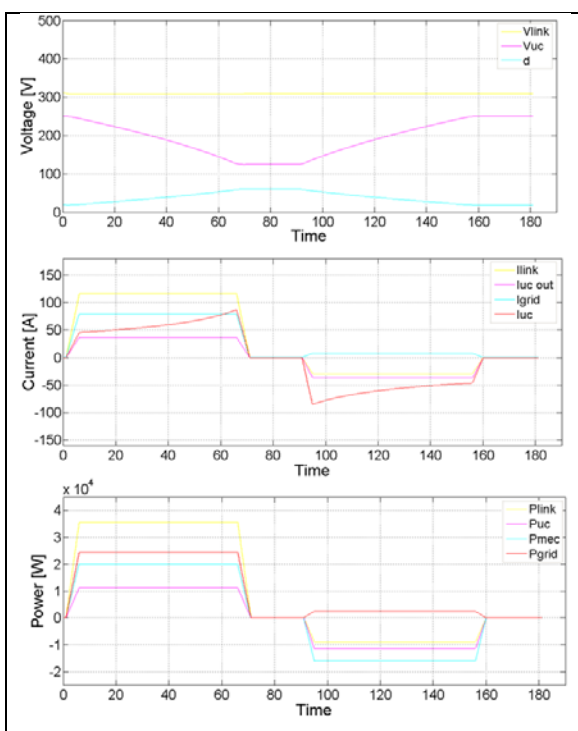
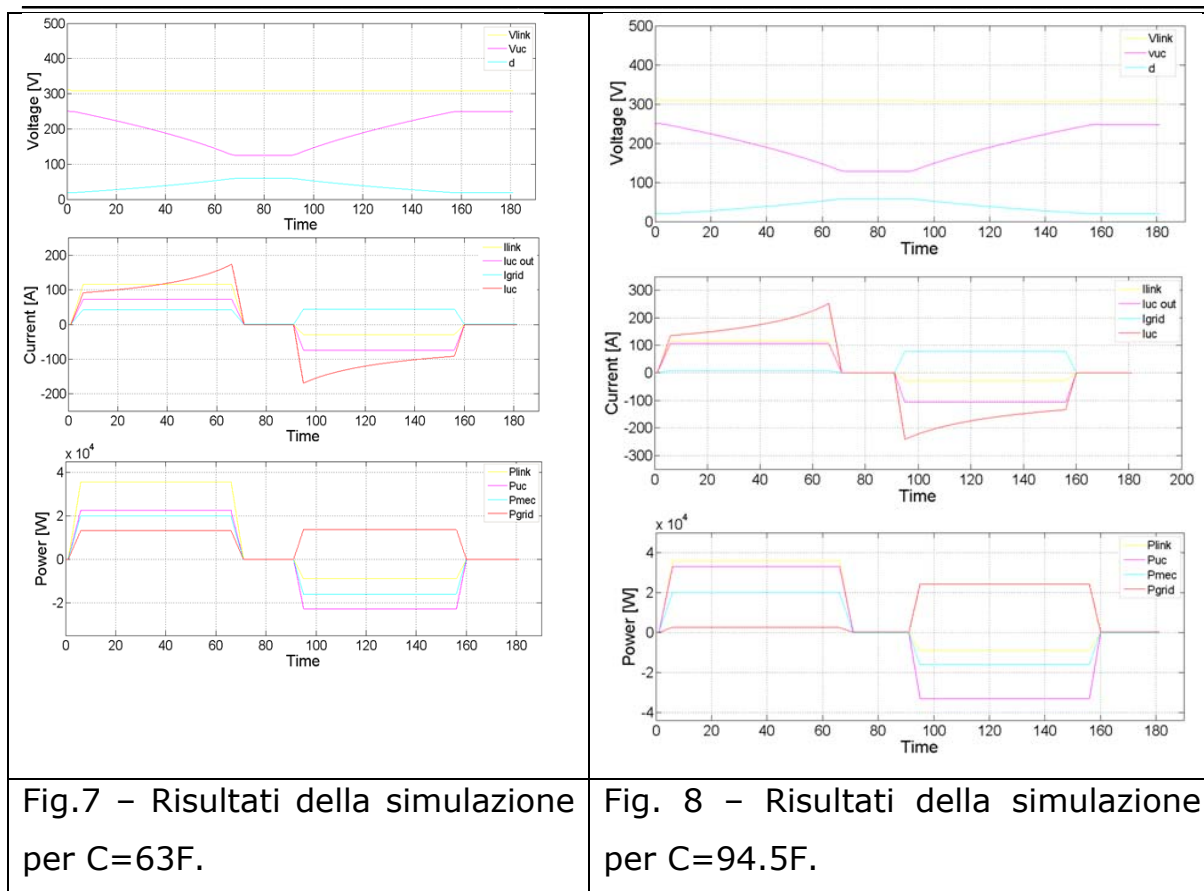


Fig.6 – Risultati della simulazione per $C=31F$.



Collaborazione alla messa a punto del sistema d’accumulo ed alla sua validazione sperimentale.

Il prototipo è stato realizzato presso i laboratori ENEA Casaccia (Dip.. Energia) in cui è presente un banco freno in grado di simulare le diverse condizioni di carico in cui si trova a lavorare un azionamento di un carro ponte. D’altro canto, l’azionamento tenendo conto di quanto sopra descritto deve:

- essere interfacciato alla rete mediante un azionamento bidirezionale per consentire che eventuale energia in eccesso possa essere ceduta alla rete elettrica in alternata;
- essere dotato dei sistemi d’accumulo collegati al dc-link mediante convertitori che ne consentano sia le operazioni di scarica che di ricarica;

essere in grado di eseguire una regolazione di velocità del motore dell'azionamento in modo che possa funzionare nei due quadranti C positivo e negativo ed n sempre positivo

Tenendo presente i tre punti precedenti, la potenza del banco prova ed i risultati ottenuti dal programma di simulazione messo a punto presso l'Università di ROMA TRE, è stato acquisito e montato in ENEA un azionamento in grado di simulare un azionamento in scala ridotta del carro ponte (Fig.9).

Tale azionamento ha una potenza di 20 kW ed una tensione sul link in continua di 375 V.

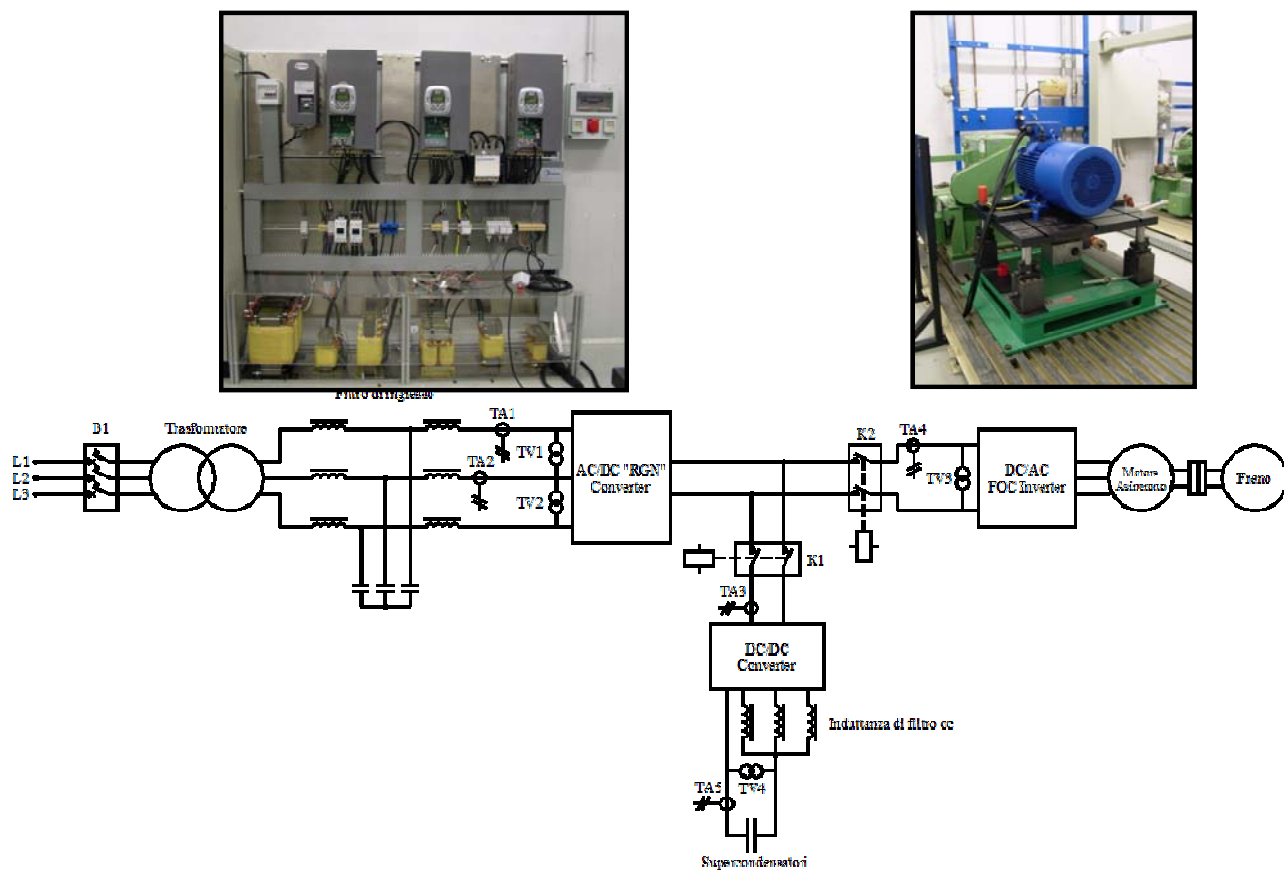


Fig. 9. Allestimento del simulatore presso il laboratorio ENEA

Attraverso la sperimentazione al banco è stata effettuata la validazione del modello utilizzato per il dimensionamento e la simulazione del sistema.

Gli obiettivi principali delle prove sperimentali hanno riguardato l'analisi delle prestazioni ottenute tramite l'impiego dei supercondensatori come unità di

accumulo; in particolare sono state analizzate le capacità dei supercondensatori di:

- gestire i picchi di potenza in modo da ridurre l'erogazione dalla rete di distribuzione dell'energia elettrica durante la fase di sollevamento dei carichi;
- recuperare l'energia cinetica resa disponibile durante la discesa dei carichi.

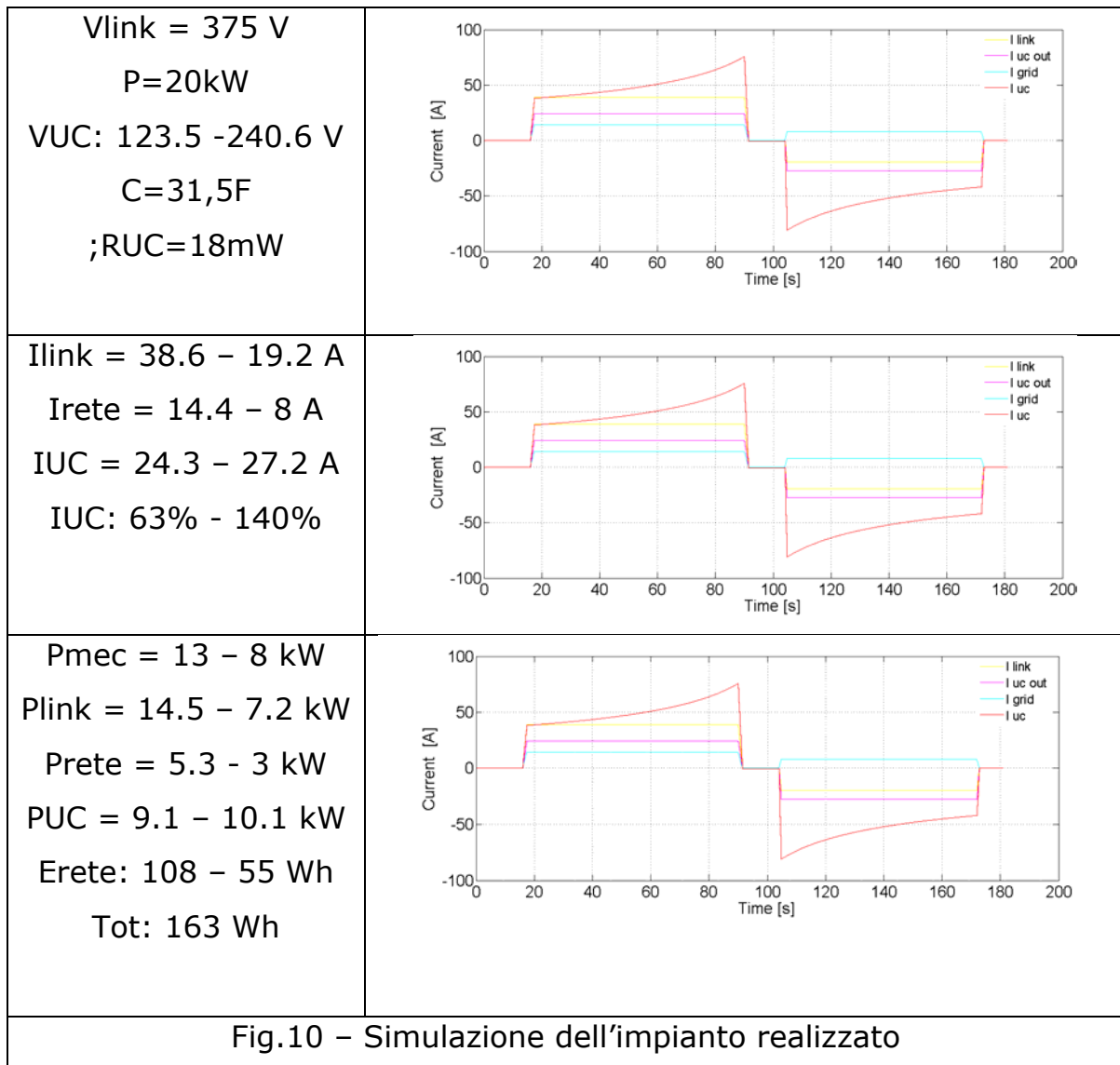


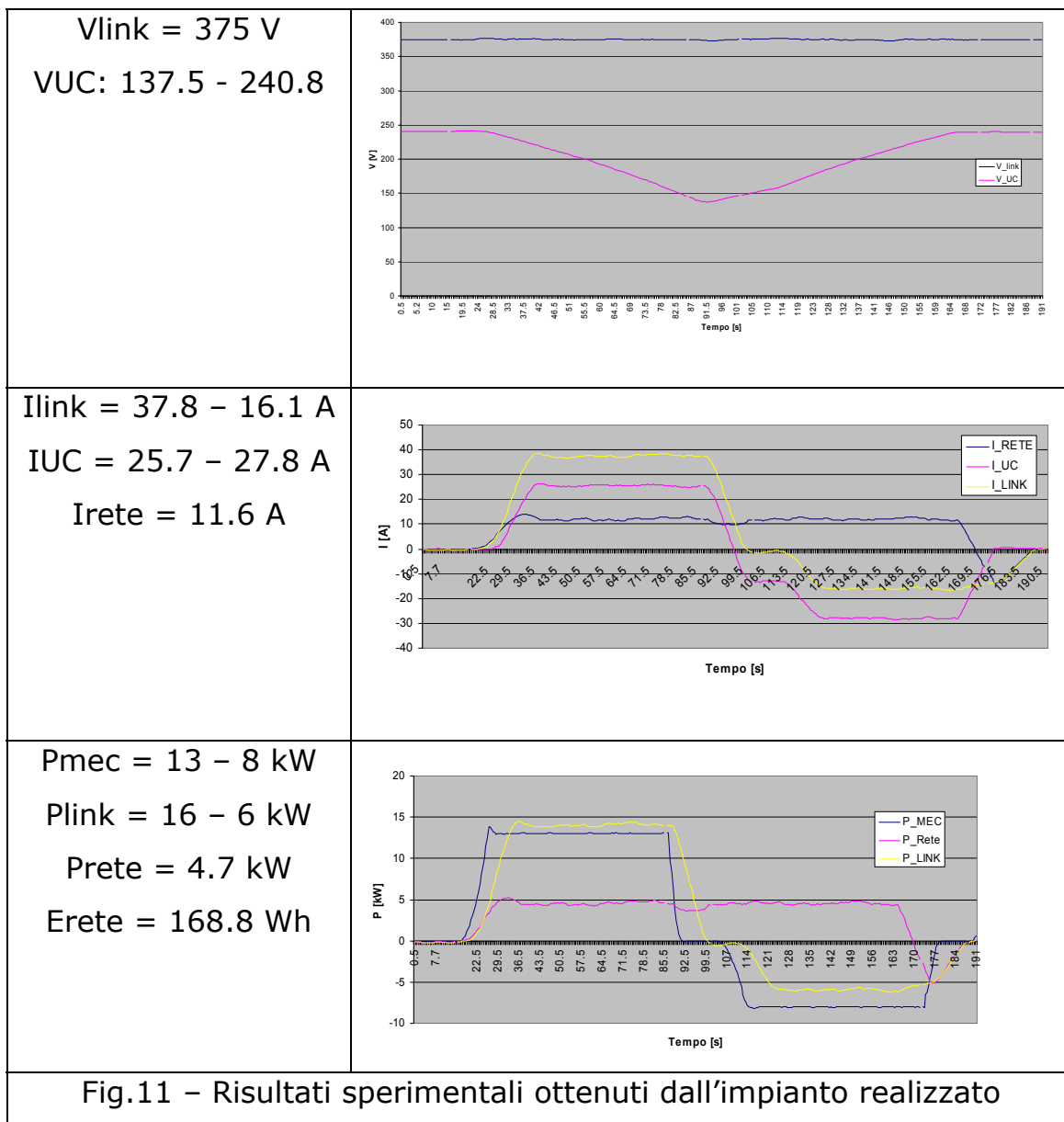
Modulo Maxwell BMOD0063 P125
64F/125 V

Al fine di eseguire un confronto tra i dati sperimentali e quelli simulati è stata effettuata una ulteriore simulazione fissando la tensione di link uguale a quella effettivamente realizzata di 375 V.

In fig. 10 e 11 sono riportati rispettivamente i risultati simulati relativi al sistema acquisito ed i risultati sperimentali.

Sulla destra sono riportate le grandezze graficate, mentre sulla sinistra vi sono i range di variazione delle rispettive grandezze graficate. E' quindi possibile effettuare un confronto fra i risultati misurati e quelli ottenuti con simulazione ed osservare come tali risultati non si discostino in modo rilevante.





Infine in fig. 12 e 13 sono riportati i risultati sperimentali che indicano lo scambio di energia con la rete, nel caso in cui sono presenti gli UC e nel caso in cui questi componenti sono assenti.

Il recupero energetico realizzato nel primo caso, nell'ipotesi di un rendimento meccanico complessivo del 60% (valore utilizzato nel settaggio del freno), è del 40%; questo porta ad un valore del rendimento elettrico complessivo (convertitori, azionamento e supercondensatori) del 70% circa.

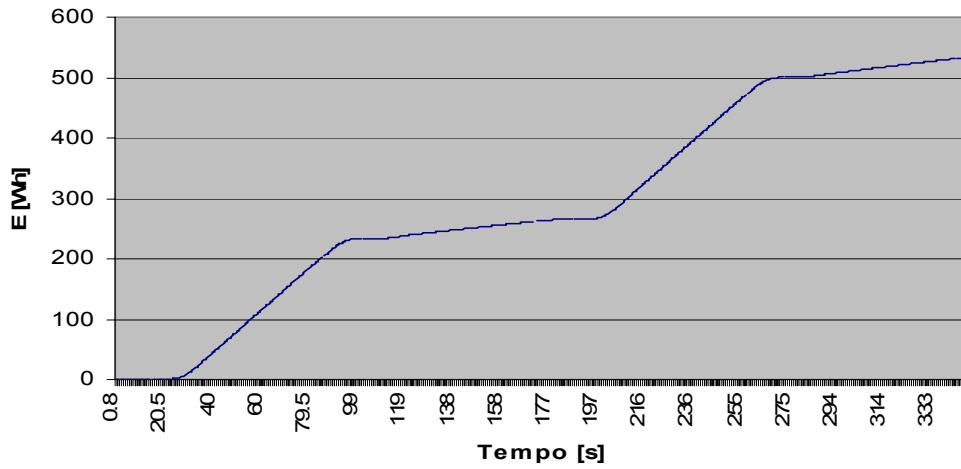


Fig.12 – Energia scambiata con la rete senza UC, il valore finale 533 wh

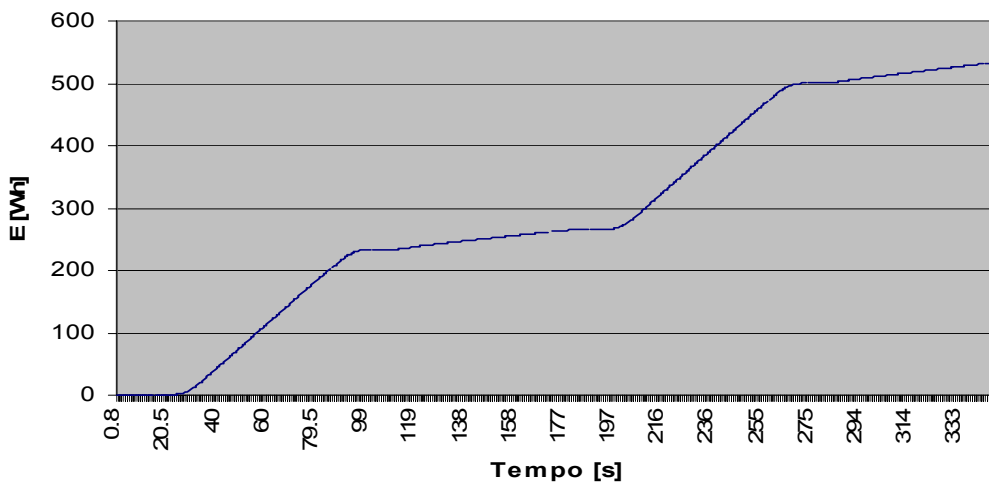


Fig.13 – Energia scambiata con la rete in presenza di UC, il valore finale è di 337 wh

Bibliografia

- [1] A. Di Napoli, G. Pedè “Hybrid Storage System: an optimisation case” raccolto in “Hydrogen and its future as a Transportation Fuel, Progress in Technology Series, PT-95, SAE February 2003.
- [2] M. Corley, J. Locker, S. Dutton, and R. Spè: “Ultracapacitor-Based Ride-Through System for Adjustable Speed Drives”; Power Electronics Specialists Conference, 1999. PESC 99. 30th Annual IEEE Volume 1, 27 June-1 July 1999 Page(s):26 - 31.
- [3] A. Di Napoli, F. Crescimbeni, L. Solero, A. Lidozzi, V. Serrao, “Convertitore ad Ingressi Multipli per la Generazione di Energia da Fonti Rinnovabili” Rendiconti Riunione Annuale AEIT, Capri (Italy), 16-20 settembre 2006, cd-rom.
- [4] A. Lidozzi, V. Serrao, L. Solero, F. Crescimbeni; “Power Electronic Converters Distribution in HOST Hybrid Propulsion System”; Proceedings of the 12th European Conference on Power Electronics and Applications 2 - 5 September 2007, Aalborg, Denmark, cd-rom (e IEEE Xplore).
- [5] F. Caricchi, F. Crescimbeni, A. Di Napoli, “Ultracapacitor Based Design Bidirectional DC-DC Converter Prototype for Recovery of the Braking Energy in EV Motor Drives” EPE 95 (Sevilla), September 18-21 1995.

Biografia

Augusto Di Napoli è professore ordinario di Azionamenti Elettrici dal 1986, prima presso l'Università degli Studi di Roma "La Sapienza" e dal 1992 presso l'Università di Roma "TRE" – Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Industriale, di cui è stato direttore nel quadriennio 2004- 2007.

Il Prof. Di Napoli ha oltre 25 anni di esperienza nel settore degli azionamenti elettrici per automotive e dell'elettronica di potenza, è autore di oltre 110 memorie scientifiche pubblicate su riviste ed in atti di Conferenze di livello mondiale. Nell'ultimo decennio sono numerosi i progetti di ricerca che il prof. Di Napoli ha diretto o nei quali ha partecipato, per progetti finanziati dal MIUR, dal CNR "Progetto Finalizzato Trasporti 2", dall'ENEA o dall'U.E "Progetto HOST (Human Oriented Sustainable Transport) del 6th. Programma U.E..

Il prof. Di Napoli è membro del WG2 dell'IEC_TC69 Electrical Vehicles, membro del CEI_CT301 Azionamenti Elettrici del Comitato Elettrotecnico Italiano, nonché delle Commissioni Tecniche IMQ "Apparecchiatura e attrezzatura di bassa tensione" e "Compatibilità Elettromagnetica"