

**ENEA**

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



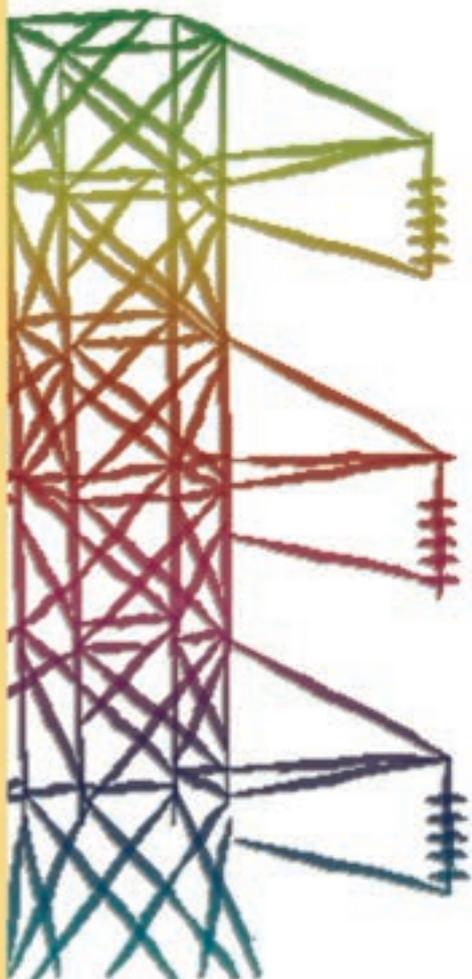
*Ministero dello Sviluppo Economico*

## **RICERCA SISTEMA ELETTRICO**

---

# **Applicazione dei sistemi di accumulo elettrici in ambito industriale**

**D. Iannuzzi, E. Pagano, P. Tricoli**





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



*Ministero dello Sviluppo Economico*

## RICERCA SISTEMA ELETTRICO

Applicazione dei sistemi di accumulo elettrici in ambito industriale

*D. Iannuzzi, E. Pagano, P. Tricoli*



## APPLICAZIONE DEI SISTEMI DI ACCUMULO ELETTRICI IN AMBITO INDUSTRIALE

D. Iannuzzi, E. Pagano, P. Tricoli (Dipartimento di Ingegneria Elettrica dell'Università di Napoli Federico II)

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

## **Indice**

A. Valutazione preliminare tecnico-economica.....	4
B. Progettazione dell'esperienza: dimensionamento del sistema.....	8
C. Realizzazione del software di gestione del sistema.....	13
D. Collaborazione alla messa a punto del software di gestione ed alla sua validazione sperimentale.....	16
Allegato 1 - Offerta di Elettronica Santerno per la realizzazione del prototipo di carro ponte...21	
Allegato 2 - Schema dettagliato per il montaggio delle apparecchiature costituenti il prototipo di carro ponte.....	26
Schema elettrico di connessione per la realizzazione di un banco prova con supercondensatori e recupero di energia in rete per un azionamento di un carro ponte.....	27
Distinta dei componenti.....	28

## **A. Valutazione preliminare tecnico-economica**

Gli impianti di sollevamento costituiscono un interessante settore, nel quale è possibile realizzare significativi risparmi energetici mediante l'impiego di sistemi di accumulo di energia. Detti impianti prevedono, infatti, operazioni ripetitive nel tempo, caratterizzate da presa, sollevamento, spostamento, abbassamento, rilascio di oggetti, il cui peso è, generalmente, molto consistente. Tutte le operazioni sono realizzate con l'ausilio di azionamenti elettrici, che muovono congegni meccanici. Esse comportano, pertanto, conversione di energia elettrica in meccanica. Una parte di quest'ultima viene continuamente dissipata in calore per vincere le forze frenanti, generate dall'attrito tra organi in movimento. Invero, però, la parte più consistente di energia elettrica, richiesta alla rete di alimentazione, è convertita in energia meccanica ed impiegata per il sollevamento dei carichi: una parte dell'energia meccanica richiesta si ritrova, però, convertita in energia potenziale, connessa alle altezze alle quali sono stati sollevati gli oggetti da trasportare. Se il sistema di trasmissione meccanica è bidirezionale, l'energia potenziale, convertita in energia cinetica durante l'abbassamento, può essere riconvertita in energia elettrica. Il suo recupero può avvenire in rete, mediante l'impiego di azionamenti elettrici di sollevamento bidirezionale. Appare, tuttavia, più conveniente in pratica l'immagazzinamento dell'energia recuperata in sistemi di accumulo di energia elettrica: questa soluzione consente, infatti, di ridurre considerevolmente le punte di potenza, richieste alla rete di alimentazione durante le operazioni di sollevamento.

I sistemi elettrici, che consentono l'accumulo di energia recuperata, hanno attualmente caratteristiche pienamente soddisfacenti dal punto di vista pratico. Essi devono essere caratterizzati da strutture idonee a gestire due flussi di energia: un flusso entrante, durante le operazioni di recupero ed un flusso uscente, durante le operazioni di restituzione. Devono, inoltre, provvedere all'immagazzinamento dell'energia in ingresso (cfr. fig. 1). I supercondensatori e le batterie elettrochimiche rappresentano, oggi, i componenti di accumulo di energia elettrica più diffusi: entrambi realizzano l'accumulo di energia elettrica, fornita da una rete in corrente continua. L'immagazzinamento di energia elettrica in questi componenti può avvenire, pertanto, solo quando la tensione continua della rete elettrica intermedia è maggiore della tensione ai morsetti del componente di accumulo. Viceversa, la restituzione di energia elettrica avviene soltanto quando la tensione ai morsetti degli elementi di accumulo è maggiore di quella della rete elettrica intermedia. Gli apparecchi per la gestione dei flussi di energia nei sistemi di accumulo devono costituire strutture capaci di convertire una rete rigida (con tensione e frequenza fisse) mono- o trifase in corrente alternata in una rete flessibile in corrente continua (con valore della tensione variabile). Questi apparecchi sono oggi tutti felicemente realizzati con l'ausilio dell'Elettronica di Potenza: si tratta di convertitori statici bidirezionali (cfr. fig. 2).

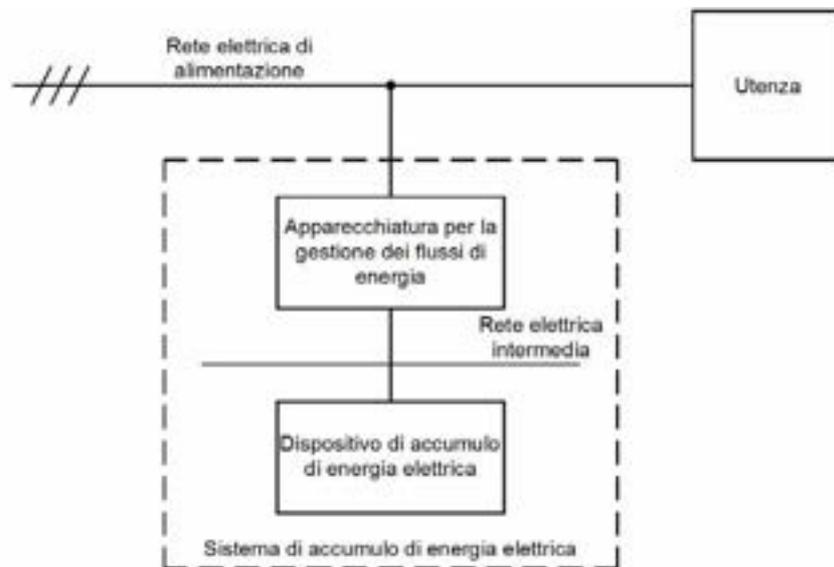


Fig. 1. Schema a blocchi di un sistema di accumulo di energia elettrica

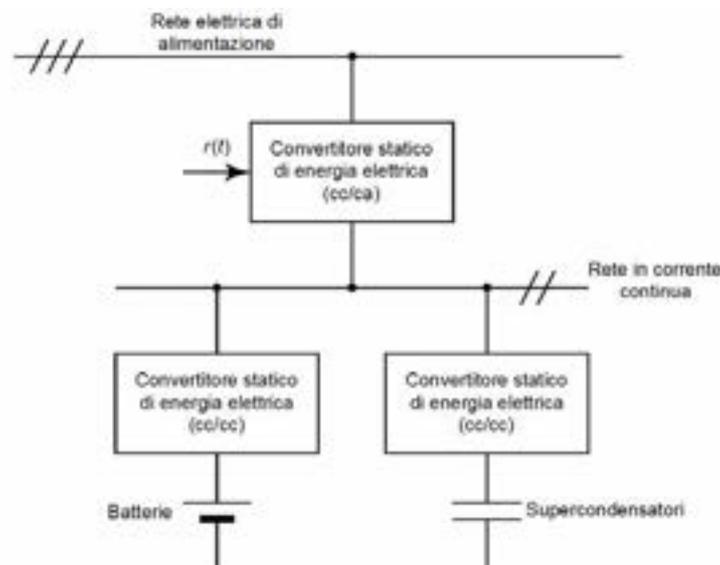


Fig. 2. Schema di collegamento dei convertitori statici per l'interfacciamento dei sistemi di accumulo con la rete elettrica di alimentazione

È ovvio che l'energia recuperata è sempre maggiore dell'energia restituita, perché i rendimenti dei sistemi di accumulo sono minori dell'unità. Essi sono definiti dal prodotto di quattro rendimenti:

$$\eta_{sa} = \eta_c \cdot \eta_a \cdot \eta_c \cdot \eta_a \quad (1)$$

Se si indica con  $\eta_{sa}$  il rendimento elettrico del sistema di accumulo e  $\eta_c$  ed  $\eta_a$  si riferiscono rispettivamente ai rendimenti del convertitore e del sistema di accumulo nella fase di immagazzinamento e di restituzione di energia elettrica.

I semiconduttori di potenza, attualmente in commercio, consentono di realizzare apparecchiature di conversione statica di energia elettrica che hanno rendimenti molto elevati.

I rendimenti dei componenti di accumulo sono differenti a seconda che si tratti di supercondensatori o di batterie elettrochimiche. I rendimenti dei primi sono in genere superiori a quelli delle seconde e si possono ritenere, inoltre, indipendenti dalle loro condizioni di carica. I rendimenti delle batterie elettrochimiche dipendono, invece, significativamente dalle loro condizioni di carica.

Si ritiene che per realizzare il risparmio energetico in impianti di sollevamento sia opportuno impiegare sistemi di accumulo a supercondensatori, perché gli intervalli di tempo, durante i quali può avvenire il recupero, sono relativamente brevi.

Lo studio dello stato dell'arte della problematica in questione ha portato alla conclusione che il recupero energetico negli impianti di sollevamento non sia ancora diffuso nella pratica corrente, così come le relative considerazioni teoriche preliminari. Si è ritenuto, pertanto, utile ed opportuno condurre un'analisi di prefattibilità, rilevando le potenze istantanee assorbite da due impianti di sollevamento di costruzione tradizionale. Supponendo, poi, che gli stessi siano realizzati con cinematismi capaci di reversibilità per il recupero di energia elettrica si è effettuato un dimensionamento dimostrativo di un sistema di accumulo di energia elettrica a batterie e supercondensatori.

Le configurazioni circuitali di connessione del motore di sollevamento alla rete di alimentazione sono principalmente due. La prima, schematicamente indicata in fig. 3, è usata negli impianti di sollevamento tradizionali e consiste nella connessione del motore di sollevamento alla rete attraverso un sistema di contattori, opportunamente interbloccati. Il motore tradizionalmente usato è di tipo asincrono con rotore a gabbia, provvisto di doppio avvolgimento nel caso in cui siano richieste due diverse velocità di sollevamento. Il sistema di contattori assicura l'inversione del verso del moto, cambiando la sequenza ciclica delle fasi. Il motore è avviato a piena tensione ed assorbe la corrente di spunto ad ogni avviamento. Le accelerazioni del carico sono ovviamente non controllate. Il sistema di accumulo deve essere inserito direttamente in parallelo alla rete di alimentazione del motore attraverso un convertitore di tipo front-end attivo sincronizzato con la tensione di rete. La funzione del sistema di accumulo è duplice: esso contribuisce a limitare gli assorbimenti dei picchi di potenza durante le fasi di avviamento del motore e consente di recuperare energia durante la fase di abbassamento dei carichi.

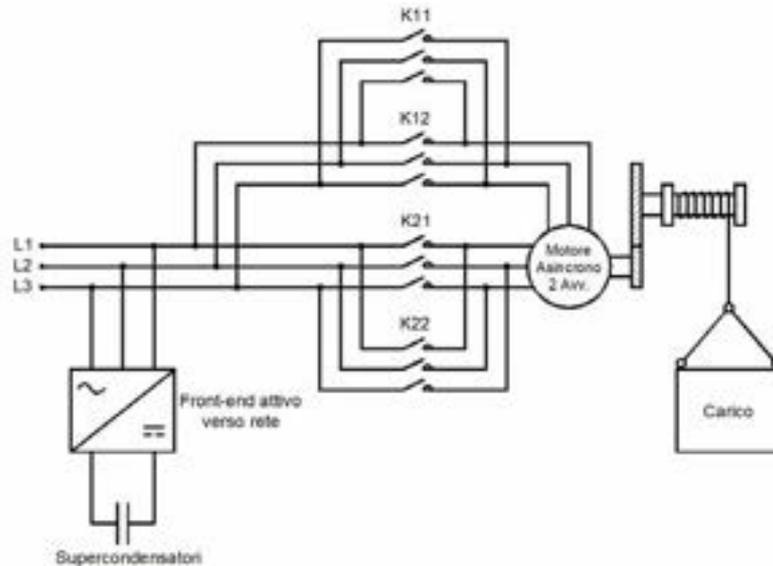


Fig. 3. Schema di inserimento di un sistema di accumulo con motore di sollevamento azionato da contattori

La seconda configurazione, che prevede l'alimentazione del motore di sollevamento tramite inverter, realizza in maniera semplice sia l'inversione del moto, sia la variazione di velocità. Il controllo del momento della coppia all'avviamento può inoltre consentire di ridurre le accelerazioni del carico e, di conseguenza, le sollecitazioni delle funi di sollevamento. A differenza della soluzione tradizionale, la configurazione con inverter consente di mantenere elevato il rendimento della conversione elettromeccanica dell'energia anche con velocità ridotte. In tal caso, il sistema di accumulo è collegato alla rete intermedia in corrente continua e, perciò, il convertitore di interfaccia impiegato è del tipo dc/dc bidirezionale in corrente, come schematicamente indicato in fig. 4.

La completa reversibilità dell'azionamento può essere ottenuta impiegando un convertitore rigenerativo reversibile verso rete. Questa configurazione di impianto lascia ampia libertà di decisione sulle strategie di controllo da adottare per ottimizzare il rendimento energetico del carro ponte. L'energia recuperata può infatti essere immagazzinata nel sistema di accumulo o riconsegnata alla rete, consentendo di effettuare il dimensionamento del sistema di accumulo in funzione del risparmio sul costo complessivo dell'impianto, tenendo conto delle spese di investimento e di esercizio.

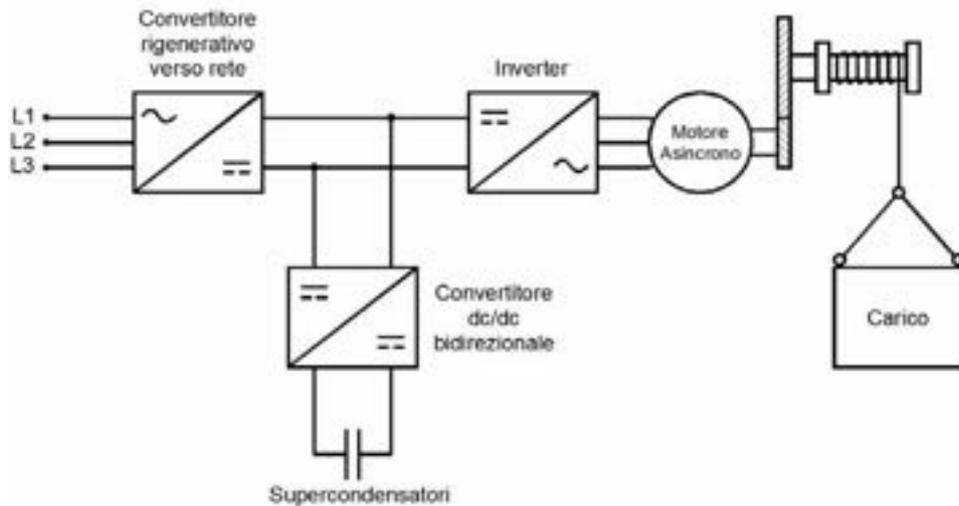


Fig. 4. Schema di inserimento di un sistema di accumulo con regolazione di velocità del motore di sollevamento

## B. Progettazione dell'esperienza: dimensionamento del sistema

I sistemi di accumulo di energia elettrica sono attualmente costituiti da un convertitore statico di potenza e da componenti di accumulo (batterie elettrochimiche e supercondensatori). Il convertitore statico assicura la bi-direzionalità del flusso di potenza elettrica che lo attraversa. Per il dimensionamento dei sistemi di accumulo si fa nel seguito unicamente riferimento ad impianti di sollevamento, dotati di convertitori statici per l'alimentazione di tutti i loro motori elettrici. Come già detto in precedenza, questa soluzione consente, infatti, di eliminare le punte di assorbimento di corrente, richieste all'avviamento dei motori elettrici non controllati. La scelta del tipo di impianto è fondamentale innanzitutto per valutare se impiegare batterie, supercondensatori o entrambi, come dispositivi di accumulo di energia. È noto, infatti, che le prime si devono prevalentemente considerare come sorgenti di energia, mentre i secondi come sorgenti di potenza. Si deve, inoltre, tenere presente che il rendimento di carica e scarica delle batterie è elevato quando le correnti coinvolte durante entrambe le operazioni sono costanti e di valore ridotto rispetto al nominale. Il rendimento dei supercondensatori è, invece, elevato anche quando si hanno intensità di corrente fortemente variabili.

I dati di riferimento per il dimensionamento del sistema di accumulo sono i seguenti:

- peso del carico da sollevare,  $mg$ ;
- altezza del sollevamento,  $h$ ;
- velocità dell'abbassamento,  $v$ ;
- coefficiente di attenuazione per effetto delle forze di attrito e dei fenomeni dissipativi presenti all'interno del motore,  $a = f(mg)$ .

Dalle prove sperimentali condotte è emerso chiaramente che l'azione delle forze d'attrito influenza fortemente la capacità di recupero energetico e sembra che esse agiscano in maniera non proporzionale al peso sospeso, presentando una "dead zone" per carichi bassi.

In funzione dei dati assegnati, l'energia potenziale del carico, sollevato all'altezza  $h$ , vale  $mgh$ ; di questa energia, soltanto  $amgh$  è effettivamente disponibile per il recupero. La velocità di abbassamento, supposta costante durante tutta la discesa, definisce il tempo di durata della discesa,  $T = h/v$ , e, quindi, del recupero. Dalla conoscenza dell'energia e del tempo è allora nota la potenza media disponibile per ricaricare il sistema di accumulo, ossia  $P = amgv$ .

Si supponga che si desideri dimensionare un sistema di accumulo misto con batterie elettrochimiche e supercondensatori. Sia  $\beta$  la frazione di potenza, variabile tra 0 e 1, che le batterie devono recuperare durante la discesa del carico:

$$\begin{aligned} P_b &= \beta P ; \\ P_{sc} &= (1-\beta)P . \end{aligned} \quad (2)$$

Se si suppone che durante la ricarica la tensione della batteria,  $V_b$ , si mantenga costante, la potenza di ricarica della batteria consente immediatamente la determinazione della corrente di ricarica. La capacità della batteria può essere individuata a partire dal tempo di ricarica e dalla corrente. Nelle applicazioni tipiche degli impianti di sollevamento, il tempo di ricarica è dell'ordine dei secondi; la capacità della batteria non può essere quindi calcolata moltiplicando semplicemente il valore di corrente per il tempo di ricarica. Ciò perché il tempo di ricarica usuale di una batteria è di diverse ore, per consentire la completa riconversione delle materie attive sulle piastre. Per poter accumulare tutta l'energia di ricarica disponibile durante la fase di discesa è necessario sovradimensionare la batteria, in modo da aumentare la sua massima corrente di ricarica ammissibile. Un possibile approccio per tenere in conto del rapporto tra il tempo effettivo di ricarica ed il tempo di riferimento può essere fornito dalla legge di Peukert:

$$Q_b = R \left( \frac{T}{R} \right)^{\frac{1}{k}} I_b , \quad (3)$$

nella quale  $R$  è il valore convenzionale della durata della ricarica, assunto generalmente pari a 5 o 10 ore;  $k$  è un coefficiente che varia a seconda del tipo di coppia elettrochimica impiegata nella batteria: per le batterie al piombo-acido  $k$  è compreso tra 1.1 e 1.5;  $I_b$  è la corrente assorbita dalla batteria durante la ricarica. Come si evince dall'eq. (3), il sovradimensionamento è tanto più grande quanto più breve è l'intervallo di ricarica, ossia quanto più elevata è la velocità di abbassamento del carico. Ritenendo costante la tensione ai capi della batteria, l'eq. (3) consente di valutare anche l'energia che deve essere immagazzinata nella batteria:

$$W_b(\beta) \cong Q_b V_b = R \left( \frac{T}{R} \right)^{\frac{1}{k}} V_b I_b = R \left( \frac{T}{R} \right)^{\frac{1}{k}} P_b \quad (4)$$

Come è noto, i supercondensatori presentano invece una maggiore attitudine ad erogare elevati picchi di corrente per alcuni secondi. Per essi non è, infatti, determinante il valore della

---

potenza da erogare durante la discesa, bensì è fondamentale che tale potenza possa essere erogata per tutto l'intervallo  $T$ . Nella procedura di dimensionamento è pertanto necessario garantire che l'energia immagazzinata nei supercondensatori sia almeno pari al prodotto  $P_{sc}T$ . La capacità di accumulo dei supercondensatori può allora essere determinata direttamente con l'ausilio dell'eq. (2):

$$W_{sc}(\beta) = P_{sc} T . \quad (5)$$

Con l'ausilio dell'eq. (5) è possibile determinare la capacità dei supercondensatori con riferimento ai valori minimi e massimi ammissibili della loro tensione di lavoro. Normalmente la tensione operativa massima dei supercondensatori è uguale alla nominale,  $V_{sc,n}$ , mentre la tensione minima è dell'ordine della metà di quest'ultima,  $1/2 V_{sc,n}$ . Si ottiene pertanto:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} C \left[ V_{sc,n}^2 - \left( \frac{1}{2} V_{sc,n}^2 \right) \right] &= W_{sc}(\beta); \\ C &= \frac{8 W_{sc}(\beta)}{3 V_{sc,n}^2} . \end{aligned} \quad (6)$$

Una volta note le energie dei due sistemi di accumulo, è possibile valutare la funzione costo complessivo del sistema di accumulo, secondo quanto riportato in [6]:

$$C_{sa}(\beta) = c_b W_b(\beta) \left( \left[ \frac{n_{cicli}}{n_b} \right] + 1 \right) + c_{sc} W_{sc}(\beta) \left( \left[ \frac{n_{cicli}}{n_{sc}} \right] + 1 \right) \quad (7)$$

nella quale  $c_b$  e  $c_{sc}$  sono rispettivamente i costi unitari delle batterie e dei supercondensatori, espressi in €/Wh;  $n_b$  e  $n_{sc}$  sono rispettivamente il numero di cicli vita delle batterie e dei supercondensatori;  $n_{cicli}$  è il numero di cicli per il quale si vuole far funzionare l'impianto. L'eq. (6) esprime il costo complessivo del sistema di accumulo in funzione della frazione di potenza delle batterie.

A titolo di esempio, si è considerato il caso del carrozzone n. 1 in dotazione al Dipartimento di Ingegneria Elettrica dell'Università di Napoli Federico II. La massa è di 5 tonnellate, pari alla portata nominale del carrozzone, sospesa ad un'altezza di 3 m. La velocità di spostamento è stata variata in modo che il tempo di discesa sia compreso tra 10 e 60 secondi. Il dimensionamento è stato ripetuto considerando percentuali di recupero  $\alpha$  uguali al 10%, 20%, 30%, 40% e 50%. Sono state scelte batterie al piombo aventi un costo unitario  $c_b = 0.20$  €/Wh, un numero di cicli vita  $n_b = 250$ , una durata di scarica nominale di 10 ore e una costante di Peukert uguale a 1.5. I supercondensatori scelti hanno un costo unitario  $c_{sc} = 40$  €/Wh, un numero di cicli vita  $n_{sc} = 100000$ . Il numero di cicli vita considerato è stato  $n_{cicli} = 5000$ , corrispondenti ad un utilizzo medio annuale di 20 cicli al giorno.

Il risultato della procedura di dimensionamento è riportato in fig. 5. Essa pone in evidenza che il costo del sistema di accumulo cresce proporzionalmente con la percentuale di energia recuperata. Inoltre, fino ad una durata di circa 40 secondi, il sistema di accumulo economicamente più conveniente è costituito da soli supercondensatori. Per durate superiori, risultano invece più convenienti le batterie elettrochimiche. Inoltre il costo del sistema di accumulo diminuisce perché, a parità di energia da recuperare, si riduce progressivamente la

potenza di ricarica delle batterie. Ciò comporta infatti la riduzione del coefficiente di sovradimensionamento della capacità di batteria, perché la durata della ricarica aumenta avvicinandosi a quella di riferimento di 10 ore.

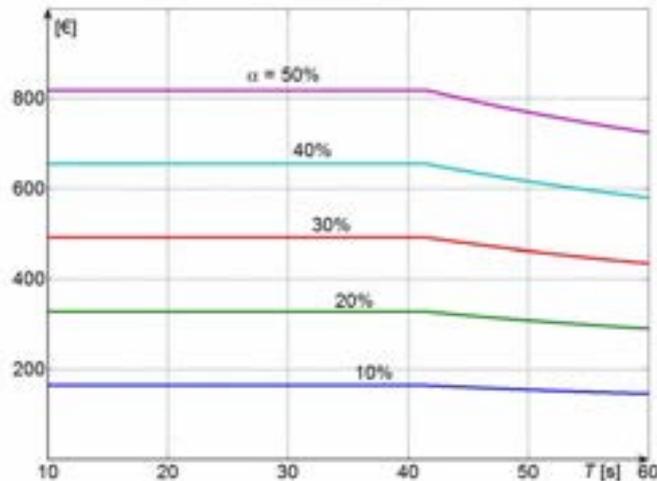


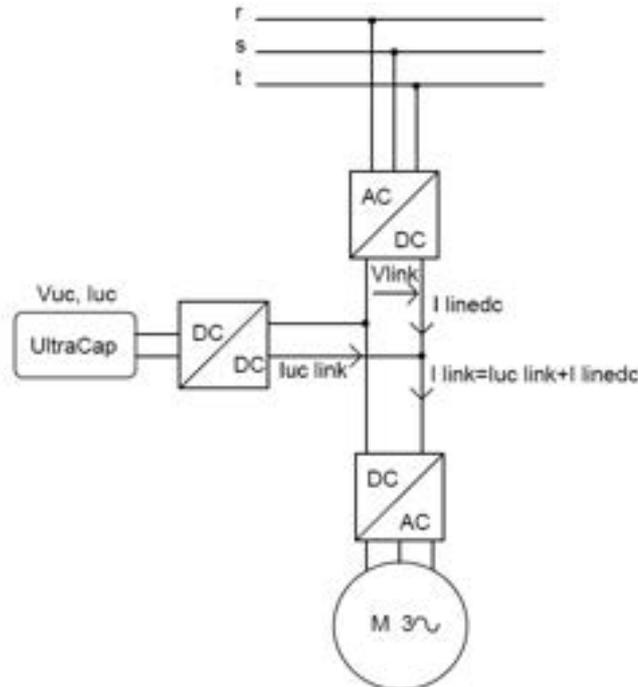
Fig. 5. Costo del sistema di accumulo in funzione della durata del ciclo e della percentuale di energia recuperata

Come si è detto parte dell'attività è stata dedicata alla progettazione e al supporto per la realizzazione di un prototipo in scala di un sistema carroponete equipaggiato con opportuni sistemi di accumulo per il risparmio energetico e per la riduzione dei costi di installazione e potenza contrattuale impegnata.

Il prototipo di azionamento deve presentare le seguenti caratteristiche:

- deve essere interfacciato alla rete mediante un azionamento bidirezionale in maniera da rendere possibili condizioni di funzionamento durante le quali eventuale energia in eccesso è ceduta alla rete elettrica in alternata;
- deve essere dotato dei sistemi di accumulo interfacciati con il resto dell'impianto mediante convertitori bidirezionali che ne consentano sia le operazioni di scarica che di ricarica;
- deve essere in grado di operare una regolazione di velocità del motore dell'azionamento prevedendo anche le fasi in cui il motore funzioni da generatore elettrico trasformando l'energia meccanica del carico in energia elettrica da cedere al sistema di accumulo o alla rete primaria.

Lo schema elettrico dell'azionamento che soddisfa i suddetti requisiti è riportato in fig. 6.



*Fig. 6. Schema del prototipo di carro ponte dotato di sistema di accumulo*

È da osservare che al fine di simulare differenti cicli di lavoro e differenti condizioni di carico del sistema è necessario poter controllare il funzionamento del convertitore DC/AC direttamente connesso al motore dell'azionamento. Inoltre, per rendere possibile lo studio e l'implementazione di opportune strategie di controllo per la gestione dei flussi di energia scambiati tra il carico, la rete primaria ed il sistema di accumulo anche i convertitori che interfacciano la rete primaria e il sistema di accumulo con il bus in continua devono essere completamente controllabili. In particolare è auspicabile la possibilità di programmazione della logica di controllo degli stessi.

Per l'acquisto delle apparecchiature necessarie per la realizzazione del prototipo è stata eseguita una dedicata analisi di mercato. Durante questa analisi, la possibilità di programmare i convertitori ha rappresentato un elemento molto importante per la scelta. Infatti la maggioranza dei convertitori presenti attualmente sul mercato non consentono un completo controllo del comando dei componenti in quanto sono realizzati per applicazioni specifiche e realizzano già al loro interno tutte le logiche di controllo necessarie per la specifica applicazione. Inoltre, è da tenere presente che il gruppo di lavoro dell'Università di Napoli ha già in precedenza acquisito le competenze necessarie per la programmazione dei convertitori forniti da Elettronica Santerno. Si è allora scelto di richiedere un'offerta specifica ad Elettronica Santerno per la realizzazione del prototipo. L'offerta ricevuta è riportata nell'allegato 1.

A valle della ricezione dell'offerta è stata verificata la congruità della stessa con i prezzi di mercato. Si è poi scelto di acquistare le apparecchiature separatamente (cfr. allegato 1) per motivi essenzialmente legati all'attuale configurazione dei laboratori di ENEA presso cui deve essere realizzato il prototipo. Contestualmente a questa scelta il gruppo di lavoro dell'unità di

Napoli ha offerto la propria disponibilità per fornire un supporto tecnico durante l'assemblaggio delle diverse apparecchiature. La fase iniziale di tale supporto si è espletata nella definizione dello schema dettagliato di montaggio delle apparecchiature dal quale è possibile individuare:

- tutti i componenti necessari per l'assemblaggio non compresi nell'offerta;
- le sezioni di tutti i cavi necessari per il collegamento delle diverse apparecchiature;
- il dimensionamento degli apparecchi di manovra e di protezione da inserire nel circuito all'atto del montaggio.

Tale schema è riportato nell'allegato 2. L'attività di programmazione dei convertitori sarà, ovviamente, espletata dopo il montaggio dell'hardware del prototipo.

### **C. Realizzazione del software di gestione del sistema**

Nella strategia di controllo suggerita, i supercondensatori elettrochimici assolvono la funzione di unità di accumulo di supporto per limitare la corrente erogata dalla rete,  $i_{rete}$ , durante picchi di potenza di breve durata. Essi devono, cioè, intervenire scaricandosi quando la corrente richiesta dal carico è maggiore della corrente limite di riferimento della rete  $I_{rete,L}$ . Il contributo di corrente dei supercondensatori elettrochimici  $i_{sc}$  deve compensare proprio la differenza tra la corrente richiesta dal carico e  $I_{rete,L}$ . Quando la richiesta di potenza del carico diminuisce, il sistema di controllo deve provvedere a ripristinare il massimo stato di carica dei supercondensatori in modo che essi abbiano energia sufficiente per la successiva azione di supporto.

La limitazione della corrente prelevata dalla rete costituisce una condizione ottimale di funzionamento per ridurre il valore quadratico medio della potenza impegnata. Essa deve, però, essere subordinata allo stato di alcune grandezze fisiche (tensione sui supercondensatori, corrente dei condensatori elettrochimici, tensione sul bus dc) che potrebbero determinare l'instaurarsi di condizioni critiche o di malfunzionamento. Il sistema di controllo deve, cioè, adeguarsi a specifici vincoli imposti sullo stato di queste grandezze con una predefinita sequenza di priorità.

Con primo livello di priorità, il sistema di controllo deve garantire che la corrente in uscita dai supercondensatori  $i_{sc}$ , sia minore della corrente massima ammissibile specificata dal costruttore  $I_{sc,Max}$  (sia in fase di carica sia in fase di scarica).

$$|i_{sc}| < I_{sc,Max}$$

La condizione di sovracorrente si produce quando la corrente richiesta dal carico è particolarmente intensa e/o quando i supercondensatori sono abbastanza scarichi. L'algoritmo di controllo deve intervenire commutando da un controllo sulla corrente di rete ad un controllo sulla corrente dei supercondensatori con riferimento uguale a  $I_{sc,Max}$ .

Con secondo livello di priorità, l'algoritmo di controllo deve imporre che la tensione sui supercondensatori  $v_{sc}$  si mantenga entro un predeterminato intervallo delimitato dai limiti di tensione superiore  $V_{sc,Max}$  e inferiore  $V_{sc,Min}$ .

$$V_{sc,Min} < v_{sc} < V_{sc,Max}$$

Il limite di tensione superiore è specificato dal costruttore, mentre il limite di tensione inferiore deve essere stabilito sia in funzione del massimo rapporto di elevazione del convertitore (4–5 per i convertitori dc/dc standard) sia in base a considerazioni di efficienza energetica. Per una scarica a potenza costante, infatti, l'efficienza dei supercondensatori diminuisce al decrescere della tensione poiché aumentano la corrente di scarica e, conseguentemente, le perdite ohmiche. Per tensioni operative troppo basse, il rendimento di carica–scarica potrebbe, quindi, divenire insoddisfacente. L'esistenza di un limite inferiore riduce parzialmente l'energia utile disponibile durante la scarica ma, poiché l'energia accumulata dipende dal quadrato della tensione, l'energia residua inutilizzata è, in genere, una frazione abbastanza modesta della capacità. Quando la tensione  $v_{sc}$  raggiunge una delle due tensioni limite, l'algoritmo di controllo deve intervenire disconnettendo temporaneamente i condensatori elettrochimici dal bus in corrente continua. In particolare, se  $v_{sc} = V_{sc,Min}$ , i supercondensatori potranno essere riconnessi quando la potenza richiesta dal carico diviene sufficientemente bassa perché possano essere ricaricati. In modo duale, se  $v_{sc} = V_{sc,Max}$ , i supercondensatori potranno essere riconnessi quando la potenza richiesta dal carico diviene sufficientemente alta perché debbano essere scaricati.

Per soddisfare i vincoli imposti, si può ricorrere ad un algoritmo di controllo con struttura gerarchizzata, realizzato come un sistema a stati discreti. L'algoritmo di controllo può essere configurato con una struttura a quattro stati, dove ognuno degli stati corrisponde ad una specifica azione di controllo. Il diagramma funzionale degli stati e delle transizioni tra gli stati è riportato in fig. 7. Il primo stato corrisponde al controllo della corrente di rete. Tale corrente è controllata regolando la tensione impressa dal convertitore dc/dc sul bus dc. Il controllo è realizzato tramite un regolatore di tipo proporzionale integrale con retroazione della corrente di rete in fase sia di carica sia di scarica. Il segnale di errore di corrente è, cioè, portato in ingresso a un blocco PI, il cui segnale di uscita costituisce il duty cycle di riferimento per il convertitore.

Un secondo stato implementa un analogo controllo con retroazione sulla corrente dei supercondensatori. Il controllo è ancora realizzato con un regolatore di tipo proporzionale integrale. La transizione dal controllo sulla corrente di rete al controllo sulla corrente dei supercondensatori avviene quando la corrente dei supercondensatori diviene maggiore della loro corrente massima ammissibile:

$$|i_{sc}| > I_{sc,Max}$$

La transizione inversa avviene, invece, quando il carico si riduce e la corrente ritorna minore della corrente limite:

$$|i_{sc}| < I_{sc,Max}$$

Per impedire che le naturali fluttuazioni sulla corrente  $i_{sc}$  possano determinare un comportamento instabile con oscillazione permanente del sistema tra i due stati, le due transizioni avvengono per due valori di soglia leggermente diversi; più specificamente, la transizione dal controllo della corrente di rete al controllo della corrente dei supercondensatori deve avvenire per un valore di corrente leggermente maggiore di  $I_{sc,Max}$  ( $I_{sc,Max}^+$ ) mentre la seconda per un valore leggermente minore ( $I_{sc,Max}^-$ ).

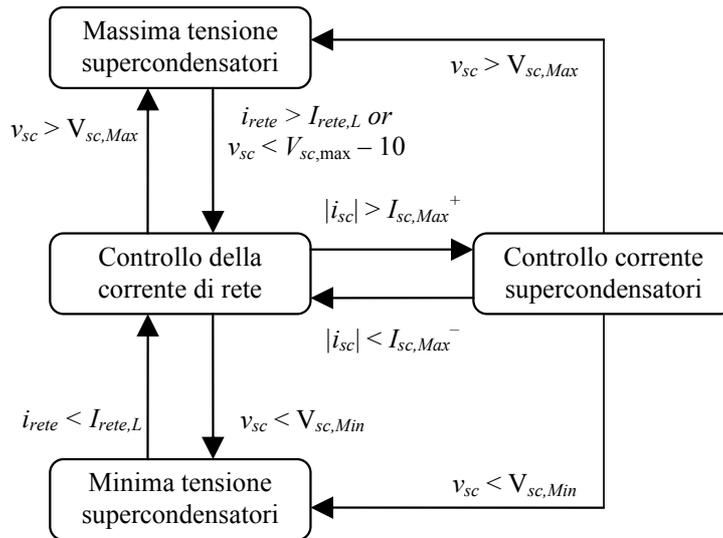


Fig.7. Diagramma degli stati e delle transizioni per l'algoritmo di controllo dei supercondensatori

I due stati rimanenti consentono, invece, il controllo sulla tensione dei supercondensatori. Entrambi assolvono la stessa funzione di disconnettere i supercondensatori dal bus in continua per impedire che la tensione possa assumere valori esterni al predefinito intervallo di funzionamento. La transizione dal controllo sulla corrente di rete allo stato di massima tensione dei supercondensatori avviene quando la tensione sui supercondensatori  $v_{sc}$  eguaglia la tensione di soglia superiore  $V_{sc,Max}$ . La transizione tra lo stato di controllo della corrente di rete allo stato di minima tensione dei supercondensatori avviene, invece, quando la tensione  $v_{sc}$  eguaglia la tensione limite inferiore  $V_{sc,Min}$ . Le transizioni inverse vengono, invece, stabilite con riferimento ai valori assunti dalla corrente di rete. In particolare, la transizione dalla massima tensione sui supercondensatori avviene quando i supercondensatori possono essere scaricati e, cioè, quando la corrente di rete diviene maggiore del riferimento ( $I_{rete} > I_{rete,L}$ ). La transizione dallo stato di minima tensione dei supercondensatori avviene quando i supercondensatori possono essere ricaricati, ovvero quando la corrente di rete diviene minore della corrente di riferimento ( $I_{rete} < I_{rete,L}$ ).

Se i supercondensatori rimangono disconnessi per un intervallo di tempo sufficientemente lungo, i naturali fenomeni di autoscarica potrebbero rendere l'energia disponibile insufficiente per supportare la rete durante le punte di potenza richieste dal carico. L'algoritmo di controllo

deve, perciò, prevedere la possibilità di ricarica quando la tensione  $v_{sc}$  sia diminuita fino ad un predeterminato limite  $V_{sc,Max}$ . La transizione dallo stato di massima tensione dei supercondensatori allo stato di controllo della corrente di rete deve, cioè, avvenire anche con la condizione:

$$V_{sc} < V_{sc,Max} - 10$$

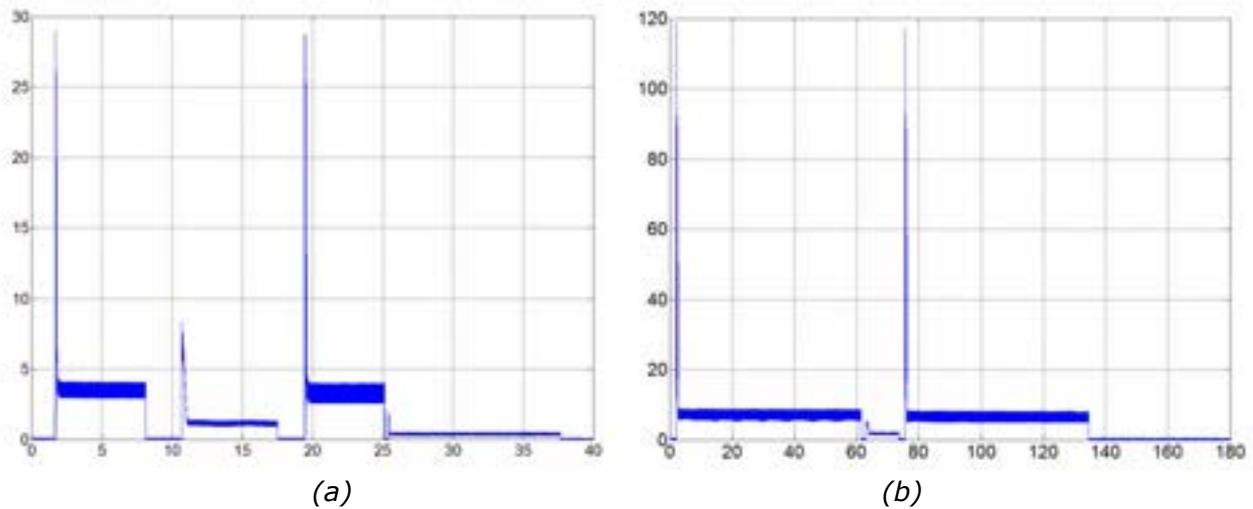
avendo considerato una soglia di autoscarica di 10 V.

#### **D. Collaborazione alla messa a punto del software di gestione ed alla sua validazione sperimentale**

Per definire il più correttamente possibile il programma di ricerca, destinato a stabilire la possibilità di realizzare un risparmio energetico negli impianti di sollevamento, valutandone anche la fattibilità e quantificandone i benefici attesi, si è ritenuto utile ed opportuno condurre una serie di prove sperimentali su due impianti di carroponte di costruzione tradizionale, i quali sono in dotazione al Dipartimento di Ingegneria Elettrica dell'Università di Napoli Federico II. Si è, pertanto, proceduto alla determinazione dei diagrammi di potenza assorbita nel tempo, contemplando il sollevamento di carichi di differente peso. Le peculiari caratteristiche dei due carriponte sono riassunte nella Tab. I. I diagrammi delle potenze assorbite durante le differenti operazioni sono riportati in figg. 8a e 8b.

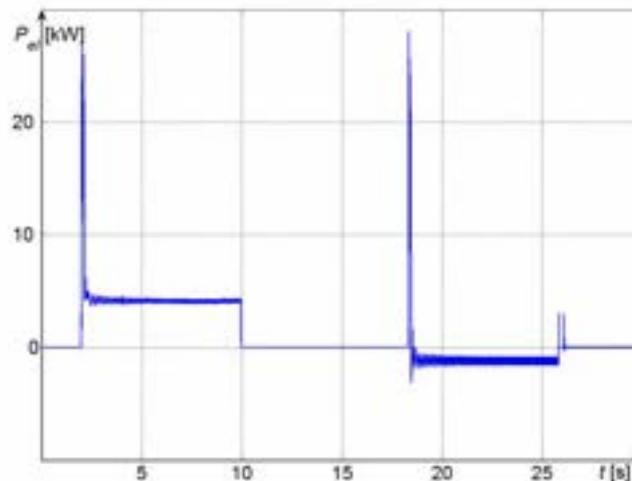
*Tab. I. Caratteristiche dei carriponte in dotazione al Dipartimento di Ingegneria Elettrica dell'Università di Napoli Federico II*

<b>Specifiche</b>	<b>Carroponte n. 1</b>	<b>Carroponte n. 2</b>
Costruttore	Demag	F.O.M.
Anno di costruzione	1967	1977
Portata massima dichiarata	5000 kg	10000 kg
Potenza del motore sollevamento	8.0 kW	11.0 kW
Potenza del motore di traslazione	2×0.85 kW	2×1.3 kW
Potenza del motore del carrello	0.35 kW	0.75 kW
Sistema di riduzione	Ingranaggi cilindrici	Ingranaggi cilindrici
Freno	Disco	Elettromagnetico
Dispositivo di arresto automatico in mancanza di forza motrice	Istallato	Istallato
Diametro puleggia motrice	33.5 cm	33.2 cm



*Fig. 8. Potenze assorbite durante un ciclo di sollevamento, traslazione e discesa dal carroponete n. 1 con un carico di 500 kg (a) e dal carroponete n. 2 con un carico di 1000 kg (b)*

Sul carroponete n. 1 è stata anche eseguita una prova con un carico di circa 2100 kg, pari al 42% della portata nominale dello stesso. Il risultato di questa prova è riportato in fig. 9. Come si vede, a differenza dei casi precedenti, il carroponete recupera in rete durante la fase di discesa circa il 30% dell'energia assorbita durante la fase di sollevamento.



*Fig. 9. Potenza assorbita durante un ciclo di sollevamento e discesa dal carroponete n. 1 con un carico di 2100 kg*

I risultati ottenuti pongono chiaramente in evidenza che:

- la potenza richiesta per gli spostamenti è di gran lunga inferiore alla potenza richiesta per l'innalzamento;
- la potenza richiesta per l'innalzamento non è direttamente proporzionale al peso del carico sollevato;
- durante l'abbassamento dei carichi gli impianti assorbono energia elettrica dalla rete di alimentazione solo per carichi di modesta entità.

Dai risultati ottenuti si evince immediatamente che:

- l'impiego di sistemi di recupero di energia può risultare molto utile in pratica, perché la presenza di sistemi di accumulo a restituzione di energia elettrica può comportare il duplice vantaggio economico di diminuire la potenza contrattuale richiesta per l'esercizio di un carroponte e migliorare il rendimento energetico del sistema con l'utilizzo dell'energia recuperabile in fase di abbassamento dei carichi;
- il risparmio energetico può essere ottenuto solo negli impianti dotati di cinematismi reversibili per le operazioni di sollevamento ed abbassamento dei carichi sospesi. I vantaggi ottenibili in pratica dal risparmio energetico sono tanto maggiori quanto minori sono le forze di attrito messe in gioco dai succitati cinematismi;
- i sistemi di accumulo hanno la sola funzione di risparmio energetico nel caso di azionamenti elettrici di sollevamento dotati di inverter. Negli altri casi essi possono risultare d'ausilio anche per coprire le punte di potenza riducendo i picchi di corrente richiesti alla rete di alimentazione nelle fasi di avviamento dei motori asincroni.

Per valutare l'effettiva convenienza economica, realizzata da un impianto di sollevamento, progettato e realizzato per il recupero energetico, rispetto ad un impianto gemello di tipo tradizionale di pari dati di targa, è utile condurre uno studio teorico preliminare, destinato a stabilire le direttive di dimensionamento di sistemi di accumulo elettrico in funzione dell'energia messa a disposizione durante le fasi di recupero. I costi di questi sistemi, sommati ai costi dei cinematismi di nuova concezione, perché destinati a garantire il recupero energetico ed eventualmente anche ai costi delle apparecchiature aggiuntive, necessarie al rispetto della Normativa vigente, dovranno essere confrontati con i costi dei cinematismi tradizionali per valutare come e quando il recupero energetico sia effettivamente conveniente in pratica dal punto di vista economico.

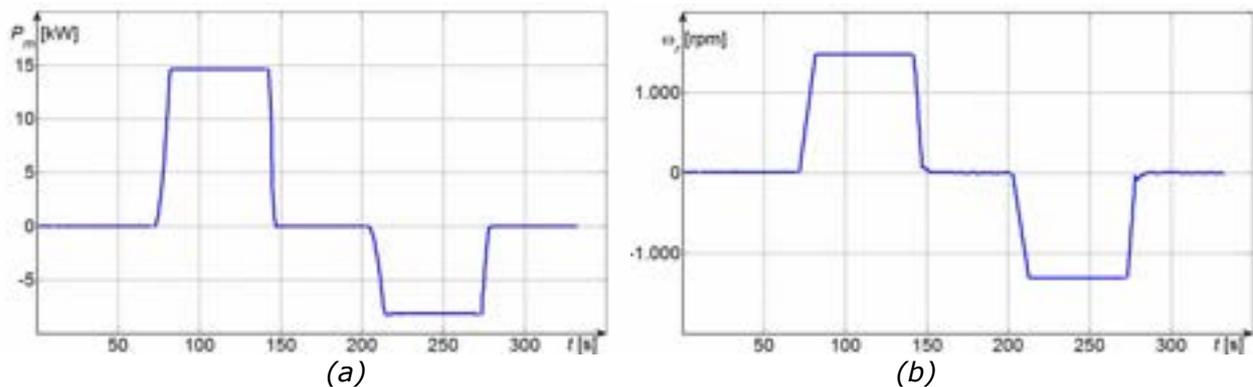
L'unità di Napoli ha infine collaborato alla realizzazione e alla messa a punto del prototipo di carroponte assemblando i componenti acquistati dall'Elettronica Santerno. Un'immagine del prototipo costruito è rappresentata in fig. 10.



*Fig. 10. Vista di insieme del prototipo costruito presso l'ENEA*

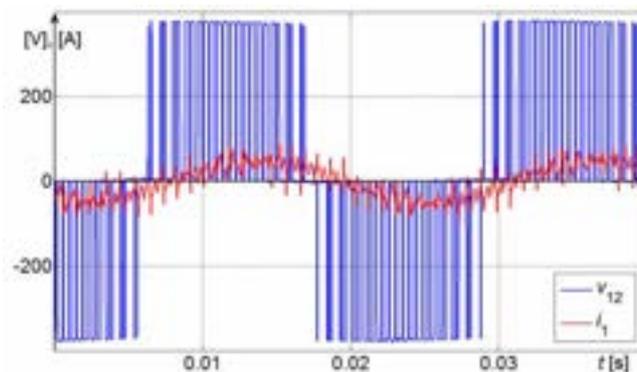
Ci si è occupati poi della programmazione del convertitore dc/dc, implementando sul DSP dello stesso il software descritto nei paragrafi precedenti. Il software, scritto in linguaggio C, è stato scaricato sulla memoria flash della scheda di controllo del convertitore tramite porta seriale. La messa a punto del sistema è stata eseguita sfruttando il sistema di comunicazione ModScan: questo software consente infatti di rilevare le grandezze di interesse (tensioni e correnti in diversi punti dell'impianto) e di modificare il valore di alcuni parametri caratteristici del funzionamento del convertitore dc/dc.

È stata eseguita la validazione sperimentale del prototipo attraverso un ciclo tipo di prova. Questo ciclo è consistito nel simulare la salita, la traslazione e la discesa di un carico di circa 8 tonnellate. Il profilo di potenza meccanica richiesto all'asse del motore è rappresentato in fig. 11a, mentre l'andamento della velocità di rotazione nella fig. 11b. Come si vede dalle figure nella fase di salita la potenza meccanica è ceduta al carico e la macchina elettrica funziona da motore; nella fase di traslazione la macchina elettrica è ferma ed il carico è tenuto in sospensione attraverso un freno meccanico; durante la fase di discesa la potenza elettrica è negativa e la macchina elettrica funziona da generatore verso rete.



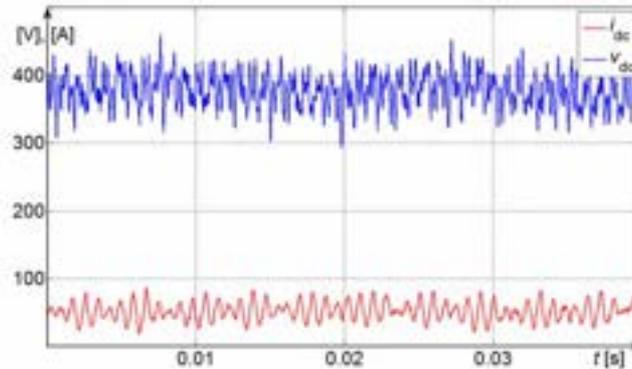
*Fig. 11. Diagrammi sperimentali della potenza meccanica assorbita dal motore di sollevamento (a) e della velocità di rotazione dell'asse del motore (b)*

Nelle figure 12, 13 e 14 sono poi riportati i diagrammi delle forme d'onda in differenti punti dell'impianto. La fig. 12 mostra la tensione concatenata di alimentazione del motore e la corrente assorbita da una fase. È evidente la modulazione PWM a circa 3 kHz della tensione, mentre la corrente presenta un contenuto armonico ridotto per l'effetto filtrante del motore.



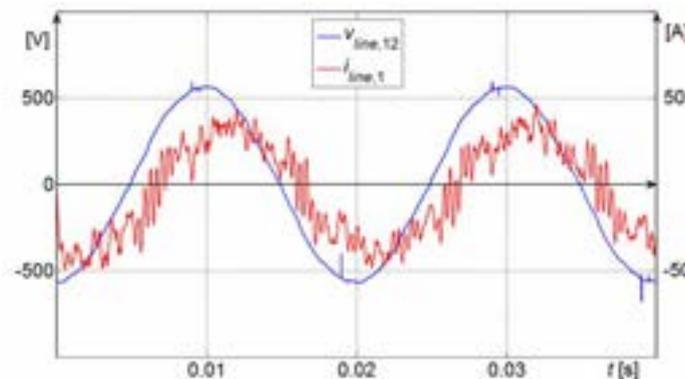
*Fig. 12. Andamento sperimentale della tensione concatenata di alimentazione del motore (tecnica PWM unipolare) e della corrente di una fase durante la fase di sollevamento*

In fig. 13 è invece riportato l'andamento della tensione e della corrente del dc bus. La tensione è mantenuta costante ad un valore di circa 400 V dal controllo presente sul convertitore rigenerativo verso rete.



*Fig. 13. Andamento sperimentale della tensione e della corrente del bus in continua durante la fase di sollevamento*

La fig. 14 riporta poi la tensione concatenata di rete e la corrente assorbita da una fase. La presenza del convertitore rigenerativo verso rete consente di assorbire una corrente avente un contenuto armonico molto ridotto e sfasata di circa  $30^\circ$  in ritardo rispetto alla corrispondente tensione concatenata. Questo significa che l'assorbimento di potenza dalla rete avviene con fattore di potenza praticamente unitario.



*Fig. 14. Andamento sperimentale di una tensione concatenata di rete e di una corrente di fase durante il sollevamento*

*Relazione sull'attività svolta dall'unità di Napoli nell'ambito del progetto CERSE per il primo anno di attività.*

## **Allegato 1**

### **Offerta di Elettronica Santerno per la realizzazione del prototipo di carro ponte**

Accordo di Programma MSE-ENEA:  
Applicazione dei sistemi di accumulo elettrici in ambito industriale

**Electronica Santerno S.p.A.**  
Strada Statale Selice 47  
40026 Imola (Bo) Italia  
t: +39 0542 489711  
f: +39 0542 489722  
sales@electronicasanterno.it  
www.electronicasanterno.com



ENEA  
Lungotevere Thaon di Revel 76  
Roma  
Tel:06 30484312  
Fax:06 30484327  
C.a.  
Ing. PedeGiovanni  
Ing. Pagano  
Ing. Iannuzzi Diego  
[mailto:giovanni.pede@casaccia.enea.it](mailto:malto.giovanni.pede@casaccia.enea.it)  
[mailto:andieppo@unina.it](mailto:malto.andieppo@unina.it)  
[mailto:enrico@unina.it](mailto:malto.enrico@unina.it)

Imola 27/06/2008  
Prot. 080-UIE-CO1-OF-1148

**Sede Legale**  
Via Olmo, 37  
35071 Campolungo  
PD Italia  
t: +39 049 9219113  
f: +39 049 9289113

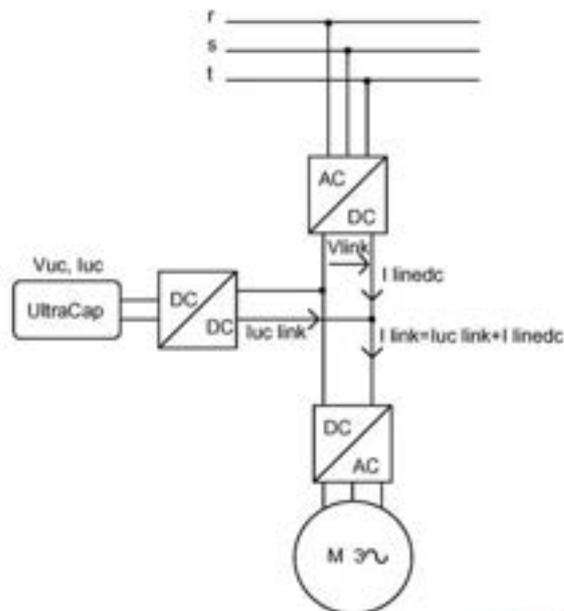
Cap. Soc. € 2.500.000 i.r.  
Codice Fiscale e Partita Iva  
0388440294  
R.E.A. PD 328951  
Cod. Merc. PD 054138  
Cod. Ident. IVA Intracom.  
IT0388440294

Electronica Santerno S.p.A.  
Società soggetta all'attività  
di direzione e coordinamento  
di Carraro S.p.A.

**Premessa:**

Gentile Cliente, come da Vs. richiesta, per la quale Vi ringraziamo siamo a proporre le apparecchiature idonee alla realizzazione della Vs. commessa relativa al banco prova "Super Condensator" ad immagazzinamento dell'Energia rigenerata da un carico verticale tipo Carroponte.

**Architettura Vs. sistema:**



Accordo di Programma MSE-ENEA:

Applicazione dei sistemi di accumulo elettrici in ambito industriale

Electronica Santerno S.p.A.  
 Strada Statale Selice 47  
 40028 Imola (Bo) Italia  
 t. +39 0542 489711  
 f. +39 0542 489722  
 sales@electronicasanterno.it  
 www.electronicasanterno.com



Offerta economica in soluzione Cabinet comprensivo di accessori necessari all'applicazione da Voi documentata e precedentemente riportata.

CABINET IP42-Nema2 Enclosure		LIGHT Overload up to 144%					Net price
Code	Size	Model	Motor power 200-240Vac		Inom.	Imax1*	
			kW	HP	A	A	A
<b>AC/DC "RGN" CONVERTER</b>							
A		Circuit Breaker + release contact + auxiliary contact 51E 125 F FCR100					
D		Three phase contactor AC1/AC3 - A50					
****		Trasformatore 10 Kva (400/230)					
S20C		SINUS CABINET PENTA 0060 2T BIK300	28	38	88	88	112 134,4
T		Input regenerative filter 153A (L+L+C+Regenerative Interface)					
<b>DC/AC "FOC" INVERTER</b>							
S20C		SINUS CABINET PENTA 0060 2T BIK300	28	38	88	88	112 134,4
Z20095834		Encoder card E5836 for SINUS K-PENTA					
N		Output inductance L2 142A - 0.156mH					
<b>DC/DC CONVERTER</b>							
Z20F086A00 00003	S20C	SINUS CABINET PENTA 0086 2T BIK300	45	60	135	135	155 198
Q		Fuse 165A					
****		Filter DC inductance (106A 0,3 mH)					
D1		Three phase contactor AC1/AC3 - A85					
Q1		Front door operation + 5 push buttons-selectors and terminals					
<b>MOTORE ASINCRONO SERIE MA</b>							
		MA 180 L 4 B3 1500 RPM	22	30	72		
		J) Encoder 132-136					
		Servoventilazione trifase 180					
Totale							€ 30.850,00

- Esclusione dalla fornitura: quanto non esplicitamente riportato in offerta.
- Le apparecchiature della serie SINUS PENTA potranno da Voi essere implementate di Sw necessari alla realizzazione dell'Applicazione.

Accordo di Programma MSE-ENEA:  
 Applicazione dei sistemi di accumulo elettrici in ambito industriale

Electronica Santerno S.p.A.  
 Strada Statale Selice 47  
 40028 Imola (BO) Italia  
 t: +39 0542 489711  
 f: +39 0542 489722  
 sales@electronicasanterno.it  
 www.electronicasanterno.com



Offerta economica dei componenti necessari alla realizzazione del cabinet di cui sopra.

CABINET IP42-Nema2 Enclosure			LIGHT Overload up to 144%						Net price
Code	Size	Model	Motor power 200-240Vac			Inom. A	Imax1* A	Imax2** A	
			kW	HP	A				
<b>AC/DC "RGN" CONVERTER</b>									
	****	Trasformatore 30 Kva (400/230V)							
Z20102024	S20C	SINUS PENTA 0660 2T BIK2	28	38	88	86	112	134,4	
IM0128204		THREE PHASE INDUCTANCE "LR" 4T-IP00 103A - 0,7mH							
IM0128804		THREE PHASE INDUCTANCE "LF" 4T-IP00 103A - 0,35mH							
Z20120025		Regenerative interface 0967 4T							
<b>DC/AC "FOC" INVERTER</b>									
Z20102024	S20C	SINUS PENTA 0660 2T BIK2	28	38	88	86	112	134,4	
Z20095834		Encoder card ES836 for SINUS K-PENTA							
IM0128204		THREE PHASE INDUCTANCE "L2" 4T-IP00 142A - 0,156mH							
<b>DC/DC CONVERTER</b>									
Z20102030	S20C	SINUS PENTA 0660 2T BIK2	45	60	135	135	155	180	
	****	Filter DC inductance (100A 0,3 mH)							
<b>MOTORE ASINCRONO SERIE MA</b>									
		MA 180 L 4 B3 1500 RPM	22	30	72				
		3 Encoder 132-180							
		Servoverdizione trifase 180							
									Totale € 19.500,00
Tensione di alimentazione 200-240Vac +10%-15% - Power supply 200-240Vac +10%-15%									
Tastiera di programmazione inclusa - Integrated programming keypad									
Comunicazione seriale RS 485 protocollo Modbus RTU con SW di programmazione da PC e di teleassistenza via Internet									
REMOTE DRIVE - Built in Serial communication Modbus RTU with programming software via PC and Remote Service via Internet Remote Drive									
Modulo di frenatura integrato fino a S30 - Braking chopper built in up to size S30									
Inom. = corrente massima continuativa alla quale può lavorare l'inverter (la corrente nominale del motore applicabile non deve essere superiore del 5% rispetto la "Inom.") - Inom. = Rated current which can be provided to the motor ( the motor rated current shall not exceed 5% the Inom)									
I max1* Sovraccarico di corrente-coppia per 120sec. ogni 20 min. - Current-Torque overload for 120sec. every 20 min.									
I max2** Sovraccarico di corrente-coppia per 3sec. - Current-Torque overload for 3sec.									

- Esclusione dalla fornitura: quanto non esplicitamente riportato in offerta (organi di sezionamento, protezione, quadro elettrico, cablaggio ecc...)
- Le apparecchiature della serie SINUS PENTA potranno da Voi essere implementate di Sw necessari alla realizzazione dell'Applicazione.

Accordo di Programma MSE-ENEA:  
*Applicazione dei sistemi di accumulo elettrici in ambito industriale*

---

Electronica Santerno S.p.A.  
Strada Statale Selice 47  
40026 Imola (BO) Italia  
t. +39 0542 489711  
f. +39 0542 489722  
sales@electronicasanterno.it  
www.electronicasanterno.com



**Condizioni di fornitura:**

Pagamento da concordare.

Consegna: 12 settimane da ricevimento ordine.  
6 settimane soluzione componenti IP20

Resa: porto assegnato.

Imballo: compreso su pallet avvolto in pellicola.

Garanzia: 36 mesi per gli inverter, 24 mesi per soft-starter, 12 mesi  
quadro, elettromeccanica, accessori e motori secondo ns.  
condizioni di vendita.

La garanzia è da considerarsi f.co ns. sede a norme ANIE  
vigenti.

Messa in servizio: Esclusa.

Modifiche Sw: Escluse dalla fornitura, a Vs. cura

Validità presente offerta: 60 gg.

Dotazioni: nella fornitura è compresa n° 1 copia del manuale di  
manutenzione e d'uso.

In attesa di ricevere Vs. gradito riscontro, cogliamo l'occasione per porgerVi  
i ns. più cordiali saluti.

## Electronica Santerno SPA

Mirko Marchetti

Drives Area Manager  
Centro Sud Italia

Electronica Santerno S.p.A  
Strada Statale Selice 47  
40026 Imola (BO)  
<http://www.electronicasanterno.com/>  
Tel. +39 0542 489711  
Mobile +39 340 7444305  
Fax +39 0542 489799  
<mailto:mirko.marchetti@electronicasanterno.it>  
Carraro Group  
Business Unit Power Controls

Relazione sull'attività svolta dall'unità di Napoli nell'ambito del progetto CERSE per il primo anno di attività

## **Allegato 2**

### **Schema dettagliato per il montaggio delle apparecchiature costituenti il prototipo di carro ponte**

### Schema elettrico di connessione per la realizzazione di un banco prova con supercondensatori e recupero di energia in rete per un azionamento di un carroponete

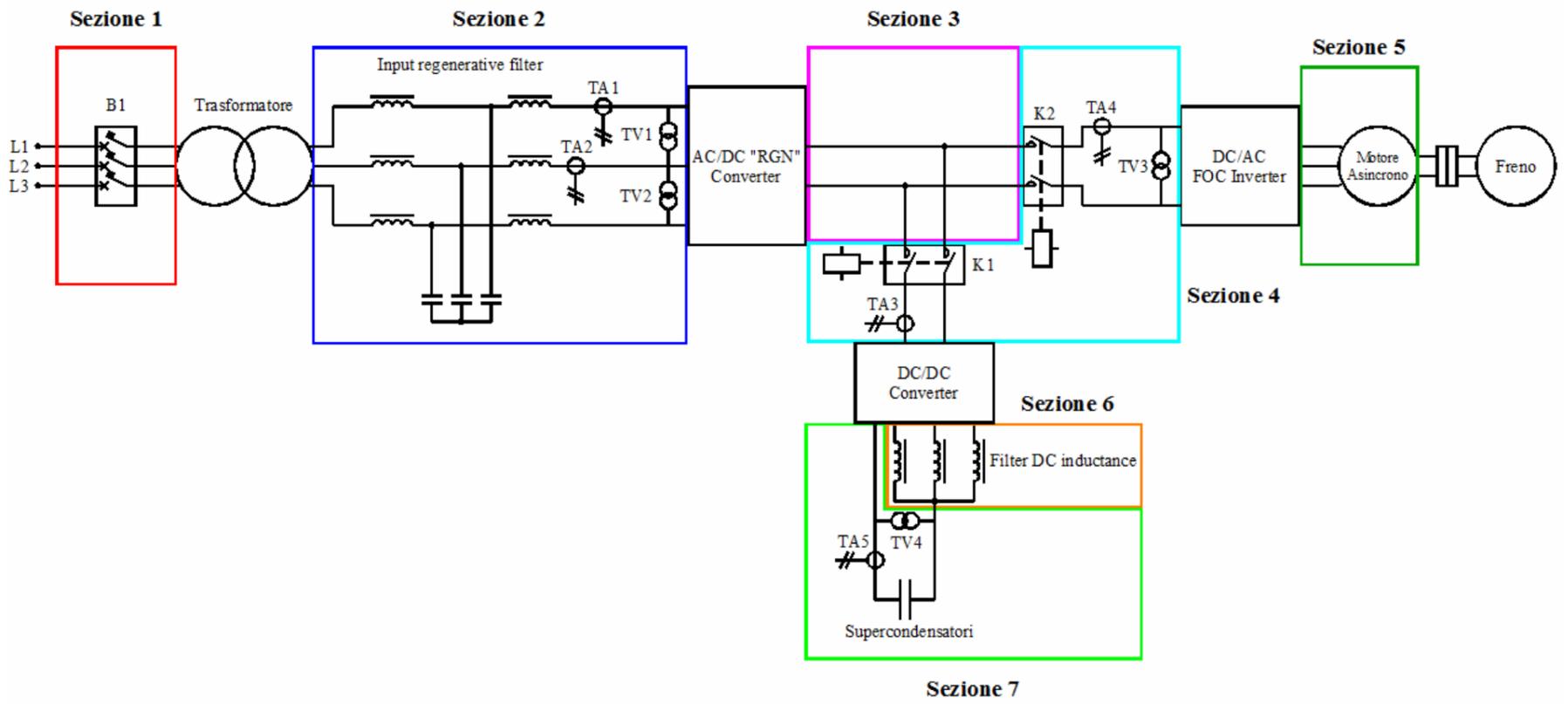


Fig. 1. Schema elettrico di connessione dell'impianto sperimentale da realizzare

## **Distinta dei componenti**

### **Apparecchi di manovra**

- Interruttore B1: n. 1 interruttore automatico tripolare per fissaggio a scatto su guida DIN con corrente nominale di 63 A, tensione nominale 400 V in corrente alternata;
- Contattore K1: n. 1 contattore per interruzione di correnti continue già disponibile presso ENEA;
- Contattore K2: n. 1 contattore per interruzione di correnti continue da 100 A, tensione nominale di 300 V in corrente continua; circuito di comando in corrente alternata, tensione nominale 220 V.

### **Trasduttori**

- Trasduttore di corrente TA1: Trasduttore a effetto Hall, corrente primaria 100 A, corrente secondaria 50 mA (tipo LA 100-P)
- Trasduttore di corrente TA2: Trasduttore a effetto Hall, corrente primaria 100 A, corrente secondaria 50 mA (tipo LA 100-P)
- Trasduttore di corrente TA3: Trasduttore a effetto Hall, corrente primaria 150 A, corrente secondaria 50 mA (tipo LA 150-P)
- Trasduttore di corrente TA4: Trasduttore a effetto Hall, corrente primaria 150 A, corrente secondaria 50 mA (tipo LA 150-P)
- Trasduttore di corrente TA5: Trasduttore a effetto Hall, corrente primaria 200 A, corrente secondaria 50 mA (tipo LA 200-P)
- Trasduttore di tensione TV1: Trasduttore a effetto Hall, tensione primaria di ingresso 1000 V, provvista di resistenza di carico, tensione di uscita [ $\square$ 10 V, 10 V]
- Trasduttore di tensione TV2: Trasduttore a effetto Hall, tensione primaria di ingresso 1000 V, provvista di resistenza di carico, tensione di uscita [ $\square$ 10 V, 10 V]
- Trasduttore di tensione TV3: Trasduttore a effetto Hall, tensione primaria di ingresso 500 V, provvista di resistenza di carico, tensione di uscita [ $\square$ 10 V, 10 V]

### **Cavi elettrici**

Il tipo di cavo elettrico per il collegamento delle apparecchiature è il N07V-K. In accordo con lo schema di fig. 1, si riportano le sezioni da adottare:

- Sezione 1: 16 mm<sup>2</sup>;
- Sezione 2: 25 mm<sup>2</sup>;
- Sezione 3: già precedentemente realizzata presso l'ENEA;
- Sezione 4: 35 mm<sup>2</sup>;
- Sezione 5: 25 mm<sup>2</sup>;
- Sezione 6: 16 mm<sup>2</sup>;
- Sezione 7: 50 mm<sup>2</sup>.

### **Guide DIN**

Le guide per il collegamento dei morsetti e delle apparecchiature di manovra sono le guide DIN 35 mm. Ne occorrono n. 3 x 1m.

### **Morsettiere**

Morsetti per guida DIN da 35 mm:

- n. 3 morsetti da 16 mm<sup>2</sup>;
- n. 8 morsetti da 25 mm<sup>2</sup>;
- n. 4 morsetti da 35 mm<sup>2</sup>;
- n. 2 morsetti da 50 mm<sup>2</sup>.

### **Canaline posacavi**

n. 10 canaline per cablaggio in PVC a slot aperti 35x45 mm, lunghezza 1 m

### **Isolatori BT**

n. 2 isolatori per bassa tensione in poliammide con altezza di 25 mm