



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



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Applicazione di un sistema di accumulo a supercondensatori in un
carroponte industriale: sintesi delle strategie di gestione energetica
e dei cicli sperimentali per la verifica delle prestazioni

M. Pasquali, C. Villante, E. Pagano, P. Tricoli

APPLICAZIONE DI UN SISTEMA DI ACCUMULO A SUPERCONDENSATORI IN UN CARROPONTE
INDUSTRIALE: SINTESI DELLE STRATEGIE DI GESTIONE ENERGETICA E DEI CICLI
SPERIMENTALI PER LA VERIFICA DELLE PRESTAZIONI

M. Pasquali, C. Villante (Enea) E. Pagano, P. Tricoli (Università di Napoli)

Settembre 2011

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Area: Governo, gestione e sviluppo del sistema elettrico nazionale

Progetto: Sistemi avanzati di accumulo di energia

Responsabile Progetto: Mario Conte, ENEA

INDICE

1	INTRODUZIONE.....	4
2	ATTIVITÀ SVOLTA E RISULTATI OTTENUTI	5
	2.1 Impostazione del lavoro	5
	2.2 Descrizione dettagliata delle tecniche di gestione dell'accumulo	
	2.2.1 Algoritmo A4	11
	2.2.2 Algoritmo A6	11
	2.2.3 Algoritmo A8 - introduzione	12
	2.2.4 Algoritmo A8 – formulazione	13
	2.2.5 Algoritmo A8 – simulazioni	
	2.3 Sviluppo dei cicli di test	16
	2.4 Esecuzione delle prove e risultati sperimentali	17
	2.5 Analisi dei dati	22
	2.6 Conclusioni	24
3	Breve descrizione del set sperimentale	25
4	Ambiente di sviluppo software	26
5	Bibliografia	27

1 INTRODUZIONE:

L'attività relativa all'utilizzo di supercondensatori come sistema di accumulo energetico in un carro ponte è stata sviluppata nell'arco di tre annualità nelle quali ci si è concentrati di volta in volta su problematiche diverse, in particolare:

- 1) Il dimensionamento del sistema di accumulo e dell'hardware necessario a realizzare un carro ponte con capacità di recupero energetico da attuarsi sia in rete che nell'accumulo di cui sopra
- 2) La stesura di un primo algoritmo per la gestione del sistema
- 3) La realizzazione di un banco prova in cui questo hardware potesse essere testato con la massima flessibilità di utilizzo
- 4) L'esecuzione dei primi test dell'impianto
- 5) L'ideazione di cicli test che schematizzino le condizioni di lavoro più impegnative per la gestione del sistema di accumulo
- 6) Il raffinamento degli algoritmi di gestione del sistema
- 7) La realizzazione di campagne di prova che permettessero di valutare le prestazioni degli algoritmi di gestione, i cui risultati hanno permesso una ulteriore evoluzione degli stessi.

Oltre a queste attività era prevista la installazione di un sistema analogo a quello sviluppato per i laboratori di Enea Casaccia presso un utente finale (Thyssen) ma il partner si è ritirato e non è stato possibile realizzare l'obiettivo.

Le attività relative ai punti 1-5 sono state relazionate nelle passate annualità ed anche il rapporto con Thyssen è stato documentato nel report relativo alla seconda annualità.

Nella terza annualità si è continuato a sviluppare il punto 5 e da questo si è potuto passare ai punti 6 e 7.

Lo sviluppo e la valutazione delle prestazioni dei nuovi algoritmi di gestione sono state attività congiunte tra l'Enea e l'Università di Napoli: dai test sul campo emergevano informazioni che permettevano di raffinare la formulazione dell'algoritmo di gestione dei supercondensatori, e dalla necessità di testare un particolare algoritmo ne derivava quella di sviluppare cicli adatti a questo scopo.

2 ATTIVITÀ SVOLTA E RISULTATI OTTENUTI

2.1 IMPOSTAZIONE DEL LAVORO

L'attività di sviluppo del software e dei cicli di test era già stata portata ad uno stato avanzato nella seconda annualità: nella terza si è raffinato il lavoro sia seguendo i principi base del lavoro precedente che impostando un approccio totalmente nuovo.

Con riferimento alla figura 1

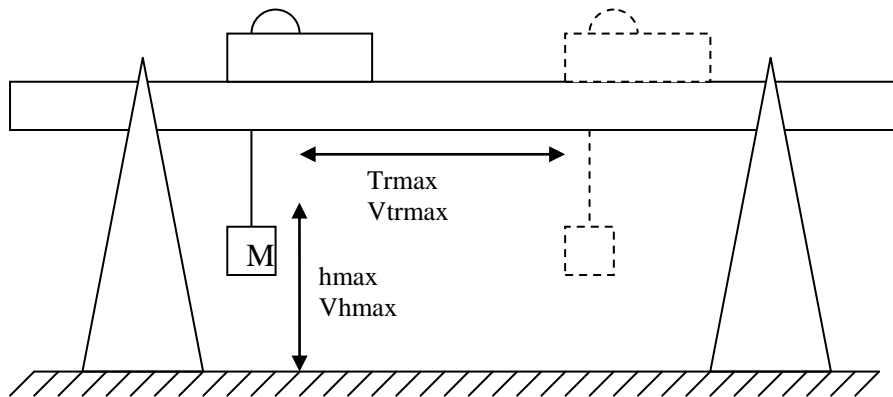


Fig. 1 Funzionamento del carro ponte

È possibile fissare i criteri di costruzione dei cicli di test per il carro ponte, in particolare si distinguono tre fasi di lavoro:

- 1) Sollevamento di una massa M da terra fino ad una altezza h , eseguito con velocità V_h
- 2) Spostamento della massa, con movimento orizzontale a velocità V_{tr}
- 3) Posa della massa a terra

Si noti che non è necessariamente richiesto che la massa trasportata sia la stessa nella fase di sollevamento e di discesa del carico, e lo stesso vale per le altezze di partenza ed arrivo, si consideri ad esempio una gru, essa potrebbe:

- 1) Sollevare da terra un carico di massa M_1 fino ad una altezza h_1
- 2) Traslare in orizzontale per una distanza T_r
- 3) Posare il carico ad una altezza h_2 , minore di h_1 ma maggiore di terra (ad es. un palazzo)
- 4) Traslare in orizzontale fino a tornare al punto di partenza
- 5) Tornare a terra

Con queste operazioni la gru ha eseguito un ciclo fortemente sbilanciato.

Le attività del primo e del secondo anno di lavoro hanno portato alla realizzazione di algoritmi di gestione dei supercondensatori particolarmente adatti a massimizzare il rendimento del sistema su di un ciclo equilibrato.

Gli algoritmi sviluppati nella prima e seconda annualità sono stati essenzialmente due, e sono stati descritti nei relativi report, in questa terza annualità sono stati proposti altri approcci: gli approcci sono stati identificati con la lettera A (algoritmo) seguita da un numero (la versione).

Alla fine della seconda annualità erano quindi stati sviluppati A1 ed A2, alla terza A3, A4, A5, A6, A7, A8 ma A3 A5 ed A7 rappresentano solo fasi intermedie per la realizzazione dei successivi: tramite queste versioni si sono evidenziati e corretti i difetti della scrittura del software e identificati i valori dei parametri di lavoro, per cui i test sono stati condotti su A4, A6 ed A8.

Si noti che nel report dello scorso anno non erano stati presentati i test su A2, causa mancanza di tempo per la loro esecuzione

La differenza tra i vari software è relativa alla gestione dello stato di carica dei condensatori e delle correnti/potenze di ricarica richieste alla rete: l'energia accumulata nei supercondensatori ed il loro stato di carica sono facilmente identificabili con la tensione a vuoto degli stessi, tensione che può variare per l'applicazione considerata da un valore V_{min} ad uno V_{max} .

In generale il valore massimo della tensione di lavoro può dipendere sia dalle caratteristiche fisiche del sistema di accumulo che da quelle di funzionamento del convertitore ad esso associato, mentre per il valore minimo il limite è dovuto esclusivamente alla necessità di far lavorare il convertitore in zone ad alto rendimento.

I parametri che influenzano l'algoritmo di gestione dell'accumulo sono:

- 1) Il livello di energia che l'accumulo ha a disposizione per poter contribuire al sollevamento del carico e quello che invece può assorbire da esso e dalla rete
- 2) I tempi di sollevamento, spostamento e posa del carico
- 3) La potenza massima che si vuole assorbire/erogare verso rete

La potenza che può essere utilizzata per ricaricare l'accumulo dipende dai tempi di spostamento e di posa: infatti nota la massima energia da immagazzinare dal tempo è possibile ricavare la potenza.

Una alternativa è stabilire la potenza di ricarica in modo che essa non superi un certo valore massimo indipendentemente dalla carica degli UC, ma così ci si potrebbe imbattere in situazioni in cui gli UC potrebbero essere scarichi.

La formulazione degli algoritmi può essere identificata in funzione della modalità con cui viene gestita la tensione dei supercondensatori e la potenza di ricarica:

A0 = Se la potenza richiesta dal carico è ≤ 0 allora ricarica con $P_{rete} = \text{costante}$ fino a V_{ucmax}

A2 = Se la potenza richiesta dal carico è ≤ 0 e $V_{uc} < V_{ucrif}$ allora ricarica con $P_{rete} = \text{costante}$ fino a V_{ucrif}

A4 = Se la potenza richiesta dal carico è ≤ 0 e $V_{uc} < V_{ucmax}$ allora ricarica con $P_{rete} = \text{costante}$ fino a V_{ucrif}

A6 = Se la potenza richiesta dal carico è ≤ 0 e allora ricarica con $P_{rete} = \text{costante}$ fino a V_{ucrif} (hcarico)

A8 = Ricarica fino a V_{ucrif} (hcarico) in funzione della massa del carico

Quindi la novità dell'algoritmo A6 è costituita dal far variare la tensione di riferimento con l'altezza del carico, quella di A8 di far variare la potenza impegnata dalla rete tramite una stima della massa da spostare. Si noti che passando dagli approcci A0 ad A8 le considerazioni relative alla fisica del problema si fanno sempre più importanti.

L'anno scorso era stata illustrata la formulazione dell'algoritmo A2, considerando la introduzione di una V_{uc} di riferimento che, partendo dalle relazioni:

$$\begin{cases} E_{sc} = \frac{1}{2}C(V_{ucrif}^2 - V_{ucmin}^2); \\ E_{ric} = \frac{1}{2}C(V_{ucmax}^2 - V_{ucrif}^2) \end{cases} \quad (1)$$

Verificasse la condizione che dalla tensione di riferimento il supercondensatore fosse in grado di assorbire/erogare tutta l'energia necessaria, ovviamente in concomitanza con la rete, per sollevare o depositare il carico.

L'algoritmo A2 assumeva che il carico da spostare fosse invariante in trazione ed in recupero, e quindi non si poneva il problema di scaricare i condensatori verso V_{rif} per non sprecare l'energia in essi accumulata rinviandola verso la rete.

Si è però visto che è possibile avere situazioni in cui il sistema di accumulo riceve maggiore energia di quanta ne fornisca: in quel caso non scaricando a bassa potenza i condensatori verso rete si avrebbe che essi si sovraccaricano fino a V_{max} e, non potendo più assorbire energia, si escluderanno, inviando quindi in rete una potenza non limitata.

L'algoritmo A4 risponde a questo problema ed è essenzialmente la prosecuzione di A2 con l'introduzione di un nuovo stato di funzionamento (scarica fino a V_{rif}).

A6 rappresenta una novità, ed utilizza l'approccio di legare la carica del condensatore alla posizione del carico, si parte da queste considerazioni:

- 1) Se il carico è posto a terra allora i condensatori devono solo erogare
- 2) Se il carico è posto alla massima altezza allora i condensatori devono solo assorbire
- 3) Nelle condizioni intermedie è possibile definire una V di riferimento che li renda sempre in grado di assorbire/erogare l'energia richiesta per il sollevamento o la posa

E' possibile dimostrare che con un approccio simile si può ridurre notevolmente (almeno di un terzo) la capacità dei supercondensatori: infatti l'accumulo viene utilizzato, ad es, per la trazione, dal valore massimo della tensione di lavoro al minimo, vale a dire che si utilizza tutta l'energia che esso può mettere a disposizione.

Lo stesso approccio è stato proposto per i veicoli (a velocità nulla il veicolo può solo accelerare, ma velocità massima può solo frenare) ma nel campo veicolare la situazione è più complessa in quanto la resistenza alla marcia varia con il quadrato della velocità e quindi la potenza richiesta per accelerare da 100 a 110 km/h è molto maggiore di quella richiesta per portarsi da 20 a 30 km/h.

A8 è un algoritmo proposto a fine anno dall'Università di Napoli e non previsto all'inizio del lavoro, esso cerca di legare la potenza di ricarica degli SC alla altezza del carico, lo stato di carica e la massa da spostare: questo approccio è stato sviluppato solo parzialmente e merita sicuramente un ulteriore approfondimento.

2.2 DESCRIZIONE DETTAGLIATA DELLE TECNICHE DI GESTIONE DELL'ACCUMULO

2.2.1 ALGORITMO A4

L'attività condotta negli anni precedenti ha permesso di verificare come le modalità di utilizzo di un carro ponte o di una gru possano essere molto diverse tra di loro. Infatti i carichi possono essere movimentati tra punti ad altezze anche differenti, come avvenire nel caso del carico/scarico di merci da una nave, come schematicamente rappresentato in Fig. 1.

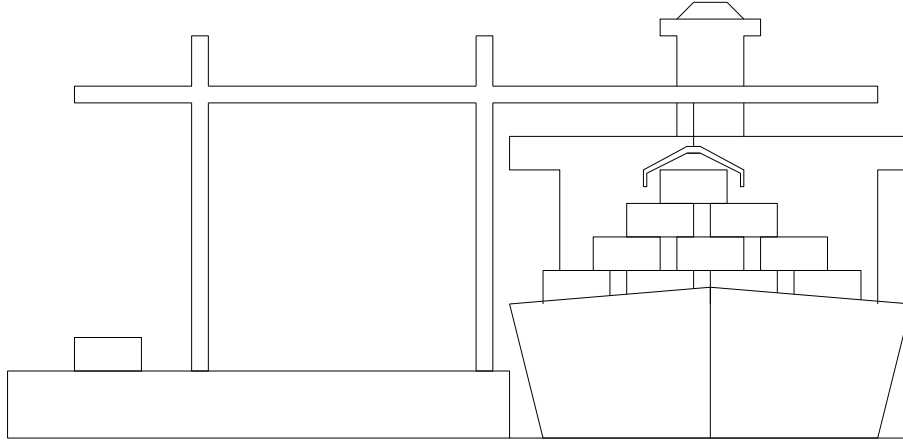


Fig. 2 Diagramma di carico dissimmetrico

In tal caso, è necessario prevedere che durante le fasi di scarico della nave si avrà una restituzione di energia maggiore di quella necessaria per il sollevamento. Dopo aver rilasciato il carico, infatti, il gancio risale a vuoto ed effettua un sollevamento per una lunghezza anche notevolmente inferiore rispetto all'abbassamento. Se i supercondensatori venissero ricaricati fino al loro stato di carica massimo alla fine del primo abbassamento, essi non potrebbero recuperare completamente l'energia disponibile nel ciclo successivo per l'esiguità dell'energia richiesta durante il sollevamento. I supercondensatori dovrebbero essere pertanto esclusi e di dovrebbe dissipare interamente l'energia recuperata dall'azionamento elettrico di sollevamento.

Per tenere in conto questa eventualità, l'algoritmo deve essere formulato prevedendo l'introduzione di uno stato aggiuntivo, che permetta ai supercondensatori di scaricarsi sulla rete se la modalità operativa del carro ponte tende a ricaricarli oltre le loro tensioni massime ammissibili. In questo modo è possibile reintrodurre energia in rete, anche se con potenza opportunamente ridotta al fine di limitare le perdite.

Nel nuovo stato di funzionamento, l'algoritmo di controllo riporta i supercondensatori ad un valore di tensione tale che essi possano offrire tutte le loro potenzialità in termini di scarica e di ricarica, indipendentemente dall'andamento del carico nel successivo ciclo di lavoro. Per garantire questa condizione, è necessario che si verifichino le seguenti uguaglianze:

$$\begin{cases} \frac{1}{2}C(V_{\text{int}}^2 - V_{\text{min}}^2) = \frac{k m_{\text{max}} g h_{\text{max}}}{\eta_{\text{mech}}\eta_{\text{em}}\eta_{\text{inv}}\eta_{\text{dc}}\eta_{\text{sc}}}; \\ \frac{1}{2}C(V_{\text{max}}^2 - V_{\text{int}}^2) = m_{\text{max}} g h_{\text{max}} \eta_{\text{mech}}\eta_{\text{em}}\eta_{\text{inv}}\eta_{\text{dc}}\eta_{\text{sc}}, \end{cases} \quad (2)$$

nelle quali C è la capacità equivalente dei moduli di supercondensatori, V_{min} la tensione minima dei moduli, V_{int} la tensione di riferimento dello stadio intermedio, V_{max} la tensione massima dei moduli, m_{max} la massima massa del carico che il carro ponte può sollevare, g l'accelerazione di gravità, h_{max} la massima altezza al quale il carico può essere sollevato, η_{em} , η_{inv} , η_{dc} , η_{sc} i rendimenti rispettivamente del motore elettrico, dell'inverter, del convertitore DC-DC e dei supercondensatori e k è un coefficiente che tiene conto del fattore di utilizzo della rete elettrica di alimentazione.

La prima equazione garantisce che il sistema di accumulo sia in grado contribuire a sollevare il carico più gravoso ammissibile per il carroponte senza che i supercondensatori si scarichino al di sotto della loro soglia di tensione minima. Il contributo dei supercondensatori è tanto più grande quanto più il coefficiente k tende all'unità. La seconda equazione garantisce invece che i supercondensatori siano in grado di accumulare tutta l'energia disponibile in fase di discesa a partire dallo stato di carica definito dalla tensione intermedia V_{int} .

Tenendo presente che, normalmente, la tensione minima dei supercondensatori è pari alla metà della tensione massima, è possibile ricavare il valore al quale deve essere fissata la tensione intermedia:

$$V_{int} = \sqrt{\frac{2 m_{max} g h_{max}}{3C} \left(\frac{4k}{\eta} + \eta \right)} \quad (3)$$

dove si è posto per semplicità $\eta = \eta_{mech} \eta_{em} \eta_{inv} \eta_{dcdc} \eta_{sc}$. Considerando i rendimenti pari ai rispettivi valori nominali, si può considerare che $\eta_{mech} = 0.98$, $\eta_{em} = 0.90$, $\eta_{inv} = 0.95$, $\eta_{dcdc} = 0.95$ e $\eta_{sc} = 0.9$, ottenendo infine $\eta = 0.72$. Se si considera per esempio un carroponte da 10 tonnellate, avente un'escursione massima di 5 metri rispetto al livello del suolo, si ottiene che la massima energia potenziale del carico ammonta a 136.25 Wh. Considerando il rendimento complessivo η ne consegue che la massima energia elettrica recuperabile nei supercondensatori vale 98.1 Wh. Nel caso siano impiegati supercondensatori della Maxwell, le cui caratteristiche sono riportate in Tab. 1, è sufficiente impiegare due moduli connessi in serie. Ne consegue che $V_{max} = 250$ V, $V_{min} = 125$ V e $C = 31.5$ F. La connessione serie serve per ridurre il rapporto di amplificazione del convertitore DC-DC ed aumentare, quindi, il suo rendimento. Tenendo presente che la linea di alimentazione è di 220 V, la tensione del DC link è circa 310 V.

Capacità [F]	63
Resistenza interna in dc [Ω]	0.018
Corrente nominale [A]	150
Tensione nominale [V]	125
Energia disponibile [Wh]	102.5
Numero di cicli vita [-]	100 000

Tab. 1 Principali caratteristiche dei supercondensatori impiegati

Questo implica che il rapporto di amplificazione del convertitore DC-DC varia nell'intervallo 1.24-2.48, nel quale il convertitore prescelto rispetta i valori di rendimento ipotizzati. Nella Tab. 2 sono riportati alcuni valori di tensione intermedia per diversi valori del parametro k . Naturalmente, all'aumentare del valore di k diminuisce progressivamente la quota di energia disponibile per il recupero energetico, siccome la rete è usata sempre meno per la fase di sollevamento.

k	0	0.25	0.5	0.52	0.75	1
Tensione intermedia V_{int} [V]	125	176	197	197.64	208	216
Energia utilizzabile per il sollevamento [Wh]	0	67.2	101.4	102.5	120.8	135.7
Energia utilizzabile per il recupero [Wh]	205.0	137.8	103.6	102.5	84.2	69.3

Tab. 2 Livelli di tensione intermedia al variare del coefficiente di utilizzo della rete

Dalla tabella si evince inoltre che, quando k è uguale a η^2 le due energie sono identiche. In tal caso, infatti, la rete è chiamata unicamente a compensare le perdite del sistema e la tensione intermedia è proprio uguale al valore corrispondente allo stato di carica del 50% dei supercondensatori.

Il nuovo software di controllo è stato sviluppato in armonia con le considerazioni svolte nel paragrafo precedente. Il convertitore DC-DC dei supercondensatori tende a far permanere il sistema di accumulo sempre nell'intorno del suo stato di carica di riferimento. Lo stato di carica deve essere scelto con i criteri indicati nel paragrafo precedente. In questo modo, è garantito che alla fine di una qualsiasi salita o discesa il sistema di accumulo si mantenga all'interno dell'intervallo di stato di carica ammissibile. Durante la pausa di funzionamento, sempre presente per consentire la traslazione del carico o le operazioni di presa o rilascio, il sistema di accumulo è riportato nel suo stato di carica di riferimento scambiando energia con la rete elettrica di distribuzione. Operando in questo modo, il livellamento della richiesta di potenza è garantito per qualsiasi sequenza di operazioni dell'impianto di sollevamento. Si è allora progettato e sviluppato il software a stati finiti riportato in Fig. 3.

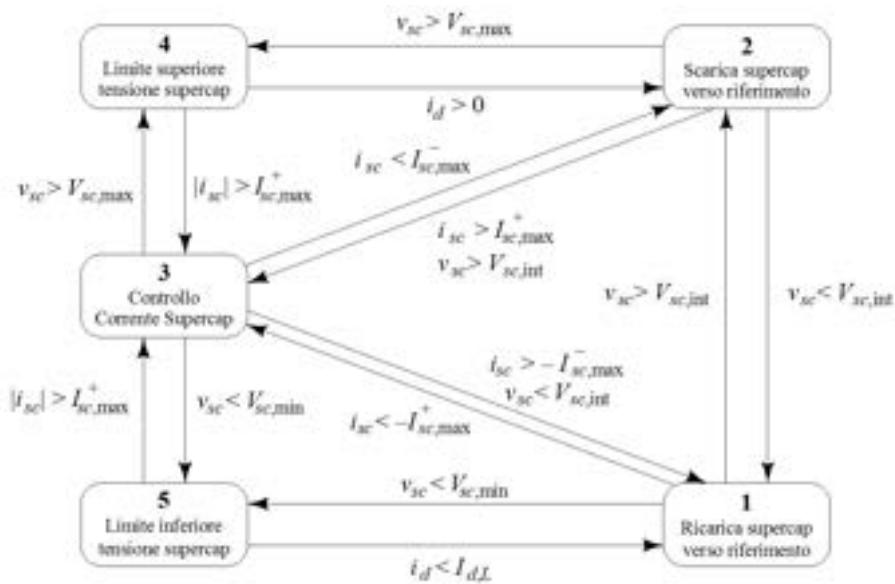


Fig.3 Diagramma degli stati del controllore progettato

Nello stato 1, chiamato “Ricarica supercap verso riferimento”, la corrente della rete è limitata ad un valore massimo prefissato, $i_d = I_{d,L}$, anche se il carico richiede una corrente maggiore. Infatti, i supercondensatori forniscono la quota-parte eccedente dell'energia richiesta durante il sollevamento mentre, durante le fasi di discesa, accumulano l'energia disponibile. Le transizioni dallo stato 1 sono subordinate alle condizioni operative dei supercondensatori. Se la corrente dei supercondensatori supera il valore massimo consentito (negativo perché i supercondensatori si scaricano), il controllore passa nello stato 3, denominato “Controllo Corrente Supercap”. In questo stato, il convertitore DC-DC cerca di evitare che la corrente dei supercondensatori ecceda il valore massimo e possa, quindi, danneggiarli. Se invece la tensione dei supercondensatori oltrepassa il valore di riferimento, ossia $v_{sc} > V_{sc,int}$, il controllore passa nello stato 2 (“Scarica supercap verso riferimento”) e la corrente di riferimento della rete è posta ad un valore negativo, ossia $i_d = -I_{d,L}$. In questo stato, i supercondensatori sono scaricati fino alla tensione di riferimento e finché non c'è una nuova fase di sollevamento o di abbassamento. In tal modo, i supercondensatori possono sia scaricarsi di nuovo, nel caso in cui si sia una nuova fase di sollevamento, oppure ricaricare energia nel caso in cui ci sia una fase di abbassamento. Quando $v_{sc} > V_{sc,max}$, il controllore passa nello stato 4 (“Limite superiore tensione supercap”) e disabilita tutti i dispositivi di potenza del convertitore DC-DC. Se infine la tensione dei supercondensatori oltrepassa il valore limite inferiore, ossia $v_{sc} \leq V_{sc,min}$, il controllore passa nello stato 5 (“Limite inferiore tensione supercap”) e i supercondensatori sono disconnessi dal bus DC mediante interdizione di tutti i dispositivi di potenza del convertitore DC-DC. Quando il controllore è nello stato 4, i supercondensatori sono completamente carichi e la transizione allo stato 2 può avvenire soltanto se la corrente di rete è di nuovo positiva, ossia è iniziata una nuova fase di sollevamento. Quando, invece, il controllore è

nello stato 5, i supercondensatori sono completamente scarichi e la transizione allo stato 1 avviene soltanto se la corrente di rete scende al di sotto del riferimento, ossia è iniziata la fase di discesa. Vale la pena notare che l'algoritmo è strutturato in modo che la tensione dei supercondensatori si trovi sempre nell'intorno della tensione intermedia $V_{sc,int}$, proprio per garantire la funzionalità del sistema di accumulo anche in caso di condizioni di carico in salita ed in discesa notevolmente dissimmetriche.

2.2.2 ALGORITMO A6

L'algoritmo A6 costituisce la logica evoluzione dell'algoritmo A4 e la premessa alla scrittura dell'algoritmo A8 che verrà illustrato in seguito.

L'osservazione alla base della sua formulazione è quella che in un carroponete in cui il carico è posto alla minima altezza da terra l'unica condizione di funzionamento possibile è quella del sollevamento, per cui è desiderabile che il sistema di accumulo sia completamente carico, viceversa nel caso in cui il carico è posto alla massima altezza possibile per il carroponete allora l'unica condizione di funzionamento da attendersi è il recupero di energia dovuto alla posa del carico.

L'algoritmo A6 introduce quindi una tensione di riferimento per i condensatori legata alla altezza a cui si trova il carico: questa tensione viene calcolata (vedi il seguito, relazione (2)) considerando l'energia potenziale che avrebbe il massimo carico manipolabile dal carroponete a quella altezza.

2.2.3 ALGORITMO A8 - introduzione

Le strategie di controllo di sistemi di accumulo per impianti industriali reali possono essere di tipo "general purpose", oppure orientate alla specifica applicazione. Le prime non richiedono generalmente la conoscenza delle grandezze caratteristiche del sistema che si vuole controllare, ma sfruttano le capacità intrinseche del sistema fisico di realizzare determinati obiettivi. Lo sviluppo di metodologie di controllo "general purpose" è sicuramente molto semplice e presenta validità generale, ma richiede necessariamente di trascurare gli aspetti specifici del comportamento del sistema. Pur raggiungendo gli obiettivi che ci si era posti in fase di progetto, le prestazioni dell'azionamento così controllato non possono, pertanto, ritenersi completamente soddisfacenti. Le prestazioni del sistema possono essere decisamente migliorate se si fa riferimento a strategie di controllo che siano specificatamente orientate all'applicazione che si sta considerando. Lo sviluppo della strategia di controllo richiede, in tal caso, la conoscenza dei modelli matematici che descrivono il comportamento fisico del sistema. Nel caso in esame di un azionamento elettrico con motore asincrono corredato da un sistema di accumulo a supercondensatori, tali modelli sono già noti nella letteratura tecnica e possono essere utilizzati con successo nella definizione delle strategie di controllo. Non altrettanto noto è, però, il modo in cui impiegare il modello matematico per fare in modo che il sistema fisico funzioni nelle condizioni operative desiderate.

A tal fine si deve tenere presente che, per ottimizzare il recupero energetico del carroponete, è necessario in primo luogo individuare una relazione biunivoca tra la tensione dei moduli di supercondensatori e la posizione occupata dal carico sollevato. Questa relazione sarebbe immediatamente ricavabile nel caso in cui fossero noti a priori i rendimenti dei dispositivi coinvolti impiegando il principio di conservazione dell'energia. In realtà, soltanto una quota parte dell'energia potenziale del carico sospeso può essere effettivamente immagazzinata come energia elettrostatica dei supercondensatori. La relazione deve essere allora stimata facendo riferimento ai rendimenti presunti dell'azionamento o a rendimenti stimati mediante misurazione delle tensioni e delle correnti effettivamente presenti durante il funzionamento.

In secondo luogo è necessario considerare che la corrente erogata dai supercondensatori deve essere in relazione con il carico da sollevare, che non è noto a priori. Tuttavia, il problema può essere agevolmente superato stimando la massa del carico, per esempio a partire dalla misura del momento della coppia resistente. In definitiva, si può affermare che la potenza erogata dai supercondensatori

deve essere quindi dipendente dalla potenza richiesta dal carico. Tale dipendenza non deve necessariamente essere di proporzionalità diretta (condizione più semplice), ma può essere ricavata da una condizione ausiliaria aggiuntiva che ottimizzi il funzionamento del sistema (per esempio il non superamento di una soglia di corrente per la linea di alimentazione).

Sulla base delle precedenti considerazioni, è stata quindi sviluppata una strategia di controllo ottimizzata che sia in grado di massimizzare il recupero energetico in funzione dell'effettivo carico da sollevare, senza che siano noti a priori né la massa, né il ciclo che deve essere percorso.

2.2.4 ALGORITMO A8 – formulazione

L'obiettivo principale della strategia di controllo è il recupero dell'energia potenziale accumulata nei carichi sospesi e la limitazione della corrente di rete durante le fasi di sollevamento. Il riferimento di tensione dei supercondensatori può essere determinato dalla considerazione che tale tensione deve essere una funzione decrescente dell'altezza raggiunta dal carico sospeso, che è direttamente legata all'energia potenziale accumulata. Quando l'altezza bassa, è più logico pensare che il carico sarà sollevato, piuttosto che abbassato. Inoltre, l'energia potenziale di un carico che si trova a bassa quota è modesta. Per questo motivo, lo stato di carica dei supercondensatori in tale situazione deve essere prossimo al valore massimo. Al contrario, quando il carico è sospeso ad un'altezza prossima a quella massima è logico aspettarsi che il carico sarà abbassato e, perciò, i supercondensatori dovranno avere uno stato di carica prossimo al minimo. Siccome soltanto una parte dell'energia potenziale può essere effettivamente accumulato a causa degli attriti e delle perdite elettriche, è possibile scrivere la seguente equazione:

$$\frac{1}{2} C_{sc} (V_{sc,max}^2 - v_{sc,ref}^2) = k m g h \quad (2)$$

dove $V_{sc,max}$ è la massima tensione dei supercondensatori, k è una costante che tiene conto delle perdite per attrito e per effetto Joule, g è l'accelerazione di gravità, m è la massa del carico sospeso e h la sua altezza rispetto al suolo. Risolvendo l'eq. (2) rispetto a $v_{sc,ref}$, si ottiene il riferimento di tensione dei supercondensatori:

$$v_{sc,ref} = V_{sc,max} \sqrt{1 - \frac{2k m g h}{C_{sc} V_{sc,max}^2}}. \quad (3)$$

L'errore tra il valore effettivo di tensione dei supercondensatori ed il valore di riferimento è compensato da un anello di controllo sulla tensione dei supercondensatori. L'uscita di tale regolatore fornisce la corrente di riferimento per l'anello interno di regolazione della corrente:

$$\begin{aligned} v_{sc,err} &= v_{sc,ref} - v_{sc} \\ i_{sc,ref} &= k_{p,v} v_{sc,err} + k_{i,v} \int v_{sc,err} dt \end{aligned} \quad (4)$$

dove $k_{p,v}$ e $k_{i,v}$ sono le costanti dei regolatori di tensione e v_{sc} è la tensione effettiva sui supercondensatori, rilevata dal trasduttore di tensione. Il riferimento di corrente dato dalla seconda delle eq. (3) è impiegato nel regolatore di corrente, che fornisce l'uscita y :

$$\begin{aligned} i_{sc,err} &= i_{sc,ref} - i_{sc} \\ y &= k_{p,i} i_{sc,err} + k_{i,i} \int i_{sc,err} dt \end{aligned} \quad (5)$$

dove $k_{p,i}$ e $k_{i,i}$ sono le costanti del regolatore di corrente e i_{sc} è la corrente effettiva dei supercondensatori, rilevata dal trasduttore di corrente. La grandezza y di uscita dal regolatore di corrente consente la determinazione del segnale di comando del convertitore DC-DC, dato dal duty-cycle ρ :

$$\rho = 2 \frac{v_{sc} - y}{v_{dc}} - 1, \quad (6)$$

dove v_{dc} è la tensione del DC-link ottenuta dal trasduttore di tensione. Il comando ρ è 1 quando il componente superiore del convertitore DC-DC è sempre in stato di ON ed è invece uguale a -1 quando è il componente inferiore ad essere sempre in stato di ON. Il comando ρ è infine processato da un blocco di modulazione PWM che lo confronta con un'onda portante triangolare. L'uscita del modulatore PWM è costituita quindi da due segnali TTL per i componenti superiore ed inferiore del convertitore DC-DC.

Lo schema di controllo è rappresentato nel diagramma a blocchi di Fig. 4: l'altezza del carico sospeso rappresenta l'anello esterno del controllo, perché da essa dipende la tensione di riferimento dei supercondensatori. La massa del carico sospeso è invece stimata a partire dal momento di coppia resistente, tramite la conoscenza del rapporto del riduttore meccanico, τ , e del raggio della puleggia, R_p . Questa stima fornisce una buona approssimazione della massa, siccome durante il sollevamento l'accelerazione del carico è trascurabile. Il momento di coppia resistente è impiegato dal controllore dell'inverter del motore per realizzare un controllo tradizionale a orientamento di campo.

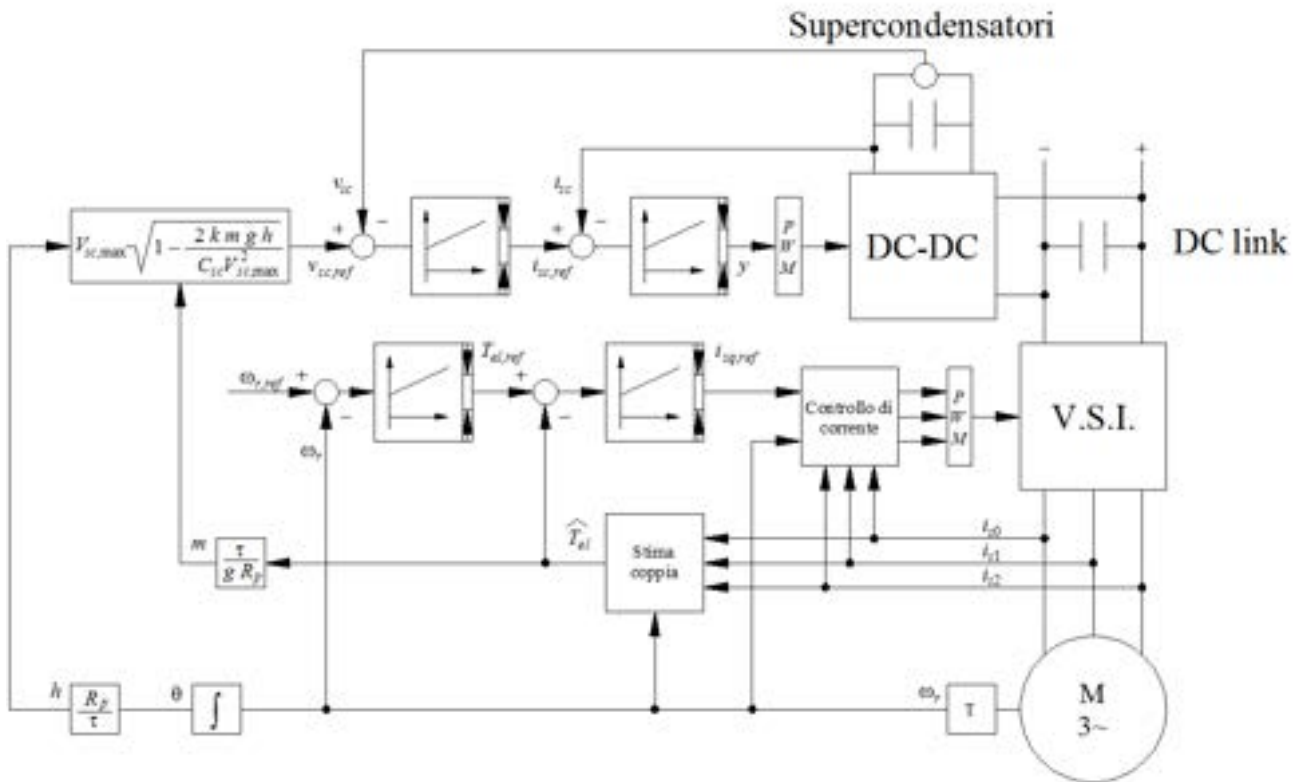
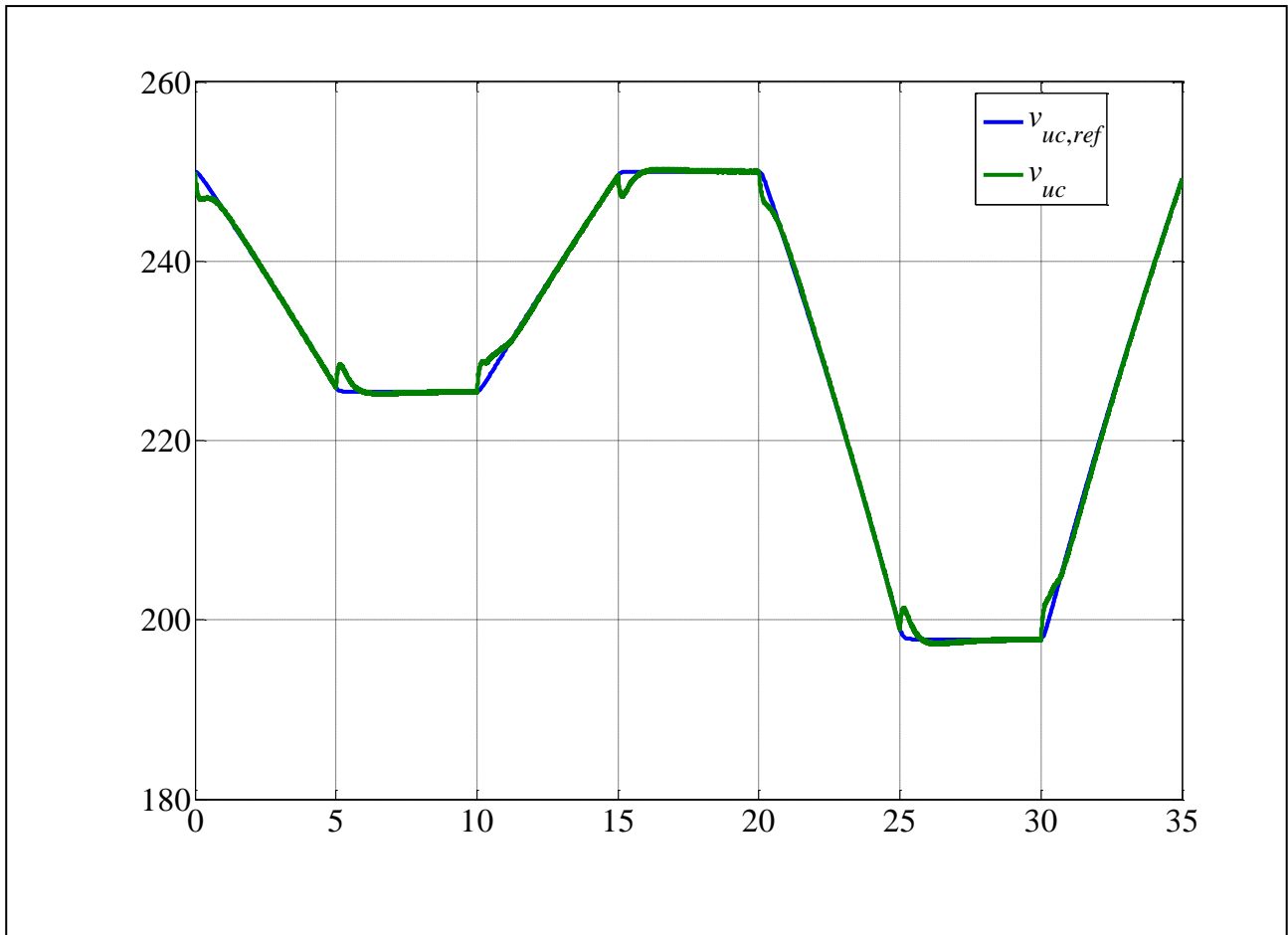


Fig.4 Diagramma a blocchi dello schema di controllo

2.2.5 ALGORITMO A8 – simulazioni

La tecnica di controllo è stata simulata con un programma al calcolatore realizzato in ambiente Matlab/Simulink. Il banco di supercondensatori è costituito da quattro moduli della Maxwell, i cui dati sono riportati nel report precedente, collegati in parallelo di due stringhe di due moduli a loro volta collegati in serie. La capacità equivalente è, dunque, pari a 63 F. Si è ipotizzato di sollevare prima un carico di 22.5 tonnellate, poi uno da 45 tonnellate. La velocità di sollevamento è di 20 m/min ed il tempo di sollevamento di 5 secondi. Ogni ciclo è stato intervallato con una pausa di 5 secondi.

Come si vede dalla Fig. 5, la tensione dei supercondensatori segue fedelmente il riferimento di tensione fornito dall'eq. (3). Tale riferimento dipende dalla quota istantanea del carico sospeso e dalla massa. Infatti, mentre durante il sollevamento della massa da 22.5 tonnellate la tensione finale dei supercondensatori si attesta su un valore prossimo ai 225 V, durante il sollevamento della



massa da 45 tonnellate essa vale circa 200 V.

Fig. 5 Andamento della tensione ai capi dei supercondensatori

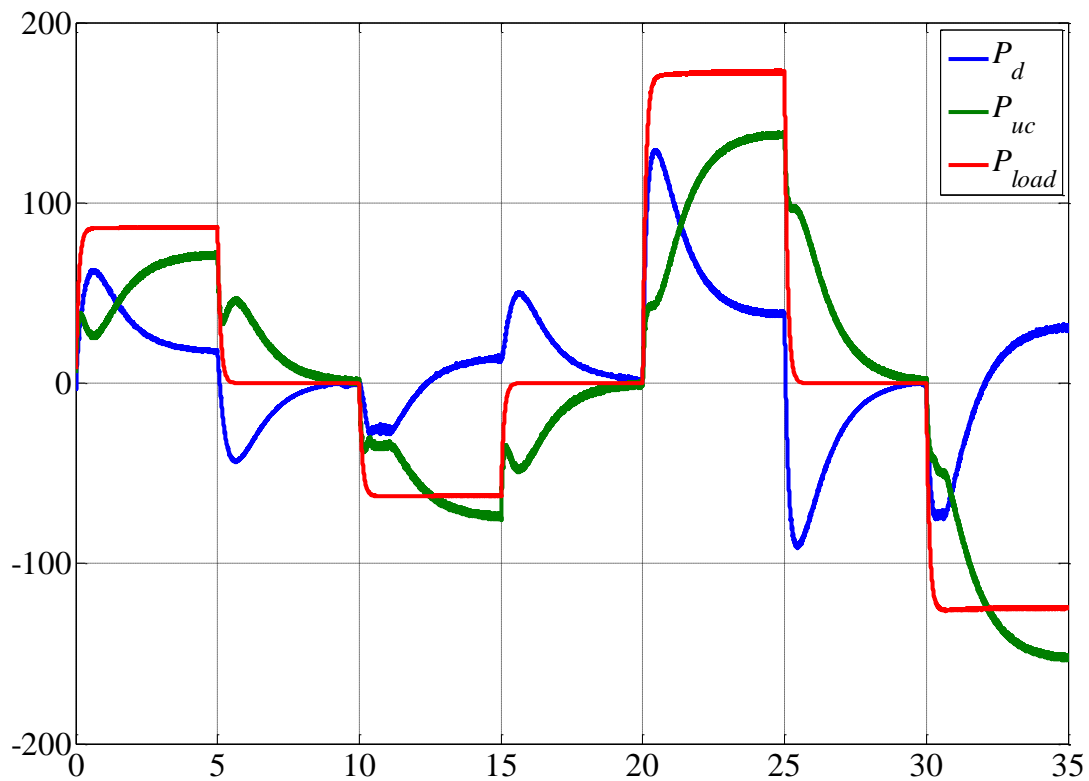


Fig. 6 Diagramma delle potenze erogate dalla rete e dai supercondensatori

Come è inoltre evidenziato dalla Fig. 6, i supercondensatori contribuiscono in maniera significativa all'alimentazione del carico, riducendo di molto la corrente erogata dalla rete. Le simulazioni consentono quindi di affermare che la tecnica di controllo proposta è in grado di soddisfare i requisiti di riduzione dei picchi di corrente e di recupero energetico anche con carichi non noti a priori, grazie alla scelta del riferimento di tensione dato dall'eq. (3). La sperimentazione sul carrozzone prototipo costruito presso i Laboratori dell'ENEA consentirà nella fase finale di validare definitivamente la tecnica di controllo proposta.

2.3 SVILUPPO DEI CICLI DI TEST

I cicli di riferimento sono stati sviluppati a partire dal ciclo base dello scorso anno, qui riportato per semplicità di lettura:

Il ciclo base, con riferimento alla programmazione del banco è il seguente:

- 1) Fase di minimo: durata 5 s (mette in sicurezza il sistema fermando freno e motore)
- 2) Pausa: durata 40 s
- 3) Trazione: coppia 80 Nm, giri motore 1500 g/min durata 40 s (schematizza il sollevamento)
- 4) Pausa: durata 40 s (schematizza la traslazione)
- 5) Recupero: coppia -50 Nm, giri motore 1500 g/min durata 40 s (schematizza la deposizione)
- 6) Pausa: durata 40 s
- 7) Ripeti le fasi da 2 a sei per altre sei volte
- 8) minimo: durata 5 s
- 9) Fine

Durante l'esecuzione del ciclo vengono misurate le potenze assorbite/erogate dalla rete, dai supercondensatori ed all'asse del motore del carroponete secondo lo schema seguente:

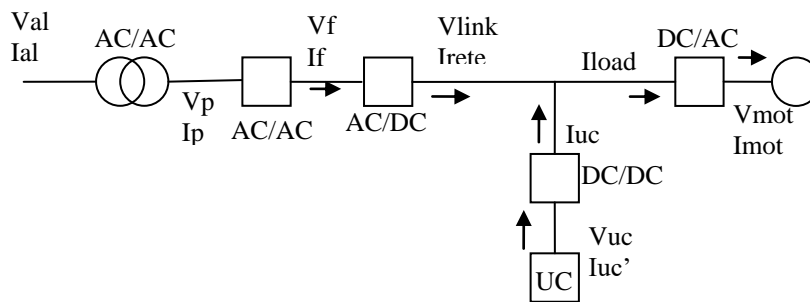


Fig. 7 Nomenclatura delle grandezze elettriche di interesse

Il ciclo viene ripetuto sette volte sia per minimizzare l'eventuale errore di misura della energia assorbita dalla rete, dovuto ad uno start non contemporaneo dei vari strumenti di misura sia per cercare di raggiungere un regime di funzionamento periodico del sistema. In particolare questo approccio ha permesso di mostrare bene come i supercondensatori potessero tendere a scaricarsi o caricarsi più del dovuto.

Le varie condizioni di lavoro in cui può operare il carroponete sono state schematizzate considerando sei cicli, con riferimento agli step mostrati precedentemente:

- 1) Pesante base: equilibrato – identificato come PB
- 2) Pesante non rigenerativo: al punto 5 la coppia di recupero è nulla – identificato come PN
- 3) Pesante rigenerativo: al punto 3 la coppia di trazione è nulla – identificato come PR
- 4) Leggero base: al punto 3 la coppia è 50, al punto 5 è -30 – identificato come LB
- 5) Leggero non rigenerativo: come LB ma al punto 5 la coppia di recupero è nulla – identificato con LN
- 6) Leggero rigenerativo: come LB ma al punto 3 la coppia di trazione è nulla – identificato con LR

Utilizzare un carico ridotto rispetto a quello nominale porta il sistema a lavorare in zone a minor rendimento, questa è la motivazione per cui si sono introdotti un ciclo leggero ed uno pesante.

Non sono stati variati i tempi di sosta e si considera di portare il carico alla stessa altezza di quella a cui lo si posa: questo può sembrare in contrasto con quanto detto finora ma va considerato che il tempo di traslazione è molto piccolo rispetto a quello presumibilmente richiesto per spostare un carico di grande massa in un carroponete da 22 kW come quello in studio, di conseguenza il tempo di ricarica, legato a quello di traslazione, è molto più di quello che è stato previsto nei cicli in esame. Con gli algoritmi presentati il tempo di ricarica effettivo permetterebbe di superare i problemi legati alla differenza di livello di altezza tra il sollevamento e la posa del carico, di conseguenza si è voluto chiudere il gap rispetto alla situazione reale di lavoro massimizzando la somma dei tempi di traslazione+recupero, lasciando però inalterata la condizione di massimo impegno in trazione, ovvero portare il carico da terra alla massima altezza possibile.

2.4 ESECUZIONE DELLE PROVE E RISULTATI SPERIMENTALI

La figura seguente mostra l'andamento delle potenze (riferito al link in continua vale a dire a Vlink, Irete, Iload, Iuc) registrato durante la prova del ciclo pesante base gestito tramite l'algoritmo A8, prova identificata come PBA8:

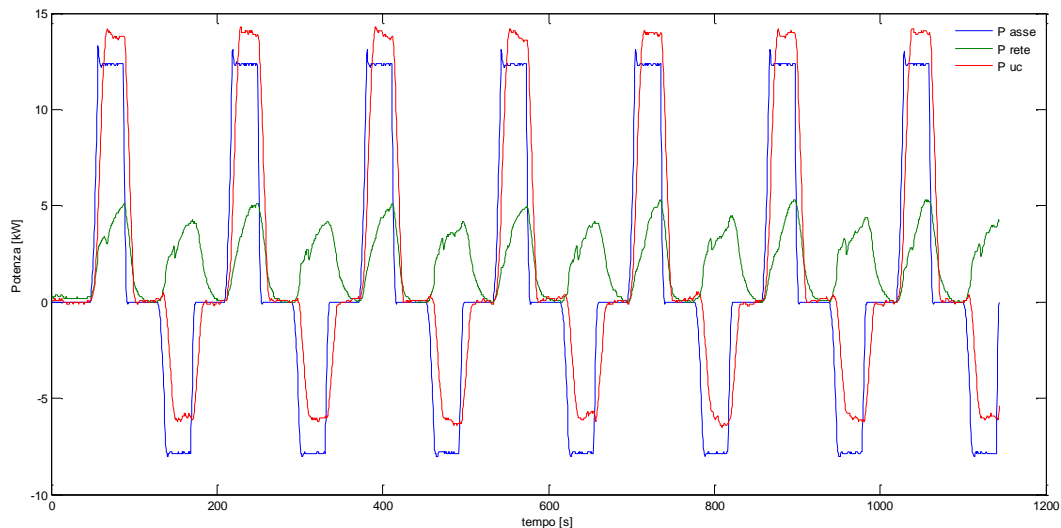


Fig. 8 Andamento delle potenze nella prova dell'algoritmo A8 su ciclo pesante base PBA8

Di seguito è presentato l'andamento della tensione dei supercondensatori (Vlink è costante ndr) ed un dettaglio di quello delle potenze:

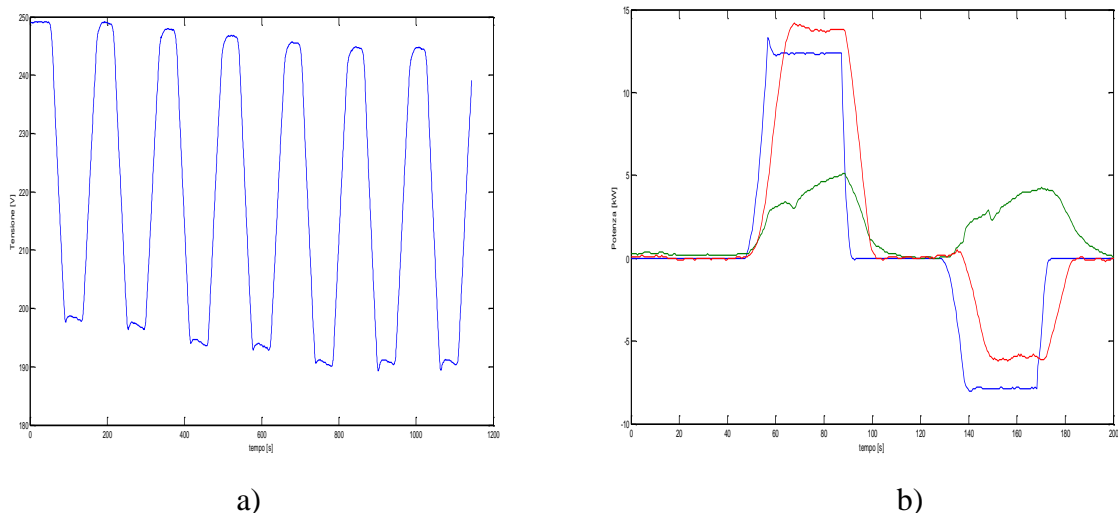


Fig. 9 a) Andamento della tensione dei supercondensatori nella prova PBA8 b) Potenze

Durante la prova la tensione dei supercondensatori è variata nel tempo fino a raggiungere un andamento periodico: l'andamento della tensione dipende sia dalla potenza richiesta/erogata dal carico che dall'altezza a cui esso si trova.

Con riferimento alla fig. 9 b) è possibile illustrare i principi di funzionamento generali del sistema: nella fase di trazione i supercondensatori intervengono erogando potenza (infatti la loro tensione si abbassa Fig. 9a)) di conseguenza si limita la potenza richiesta alla rete, nella fase di recupero i condensatori assorbono energia sia dalla rete che dal carico.

Quindi la rete fornisce al sistema solo l'insieme delle perdite meccaniche/elettriche che si hanno nei vari passaggi di energia di conseguenza la potenza di picco è estremamente ridotta rispetto a quella richiesta dal sistema privo di accumulo.

Il ciclo base utilizzato nelle prove è lo stesso delle annualità precedenti, si riporta pertanto una tabella già pubblicata nella scorsa annualità che permette il paragone tra il carro ponte dotato di sistema di accumulo ed uno privo di esso:

Ciclo	Recupero	SC	Max P <traz </traz [kW]	Max Prec [kW]	Erete [Wh]
Max load	no	no	15.40	0	1.260
Max load	no	si	3.9	0	1.317
Max load	si	no	15.40	-5.54	0.748
Max load	si	si	3.9	0	0.862
½ load	no	no	10.08	0	0.917
½ load	no	si	3.9	0	1.004
½ load	si	no	10.08	1.9	0.651
½ load	si	si	3.9	0	0.745

Tab. 3 Risultati sperimentali seconda annualità

La tabella era stata poi elaborata per evidenziare i benefici dell'utilizzo dell'accumulo:

Ciclo	Recupero	SC	Ptr/Pt base	$\Delta\%$ Ebase
Max load	no	no	1	0
Max load	no	si	0.25	+4.52
Max load	si	no	1	-40.63
Max load	si	si	0.25	-31.58
1/2 load	no	no	1	0
1/2 load	no	si	0.38	+9.48
1/2 load	si	no	1	-29.00
1/2 load	si	si	0.38	-18.76

Tab. 4 Elaborazione dei dati sperimentali

Nel ciclo base l'utilizzo dell'accumulo comporta una riduzione della potenza richiesta alla rete che passa da un valore massimo di 15.4 kW ad uno di 3.9 kW, mentre l'energia richiesta alla rete viene ridotta del 31.6 %: si noti che se il convertitore del sistema 'tradizionale' fosse bidirezionale escludendo i condensatori si risparmierebbe il 40.6 % di energia, ma si richiederebbe alla rete la potenza totale di trazione, ed inoltre non è detto che l'energia restituita sia effettivamente utilizzabile dalla rete o contabilizzata.

Come detto l'attività del terzo anno di lavoro ha permesso di mettere in evidenza i limiti dell'approccio seguito negli anni precedenti, e che era sintetizzato nell' algoritmo A2: in particolare nel ciclo pesante solo rigenerativo i condensatori si ricaricano con continuità finendo per autoescludersi dal sistema.

E' possibile comparare l'andamento delle tensioni negli algoritmi A2 ed A4 per evidenziarne il diverso comportamento nelle identiche condizioni di lavoro. Nella figura seguente in particolare si considerano i cicli pesante base e pesante rigenerativo:

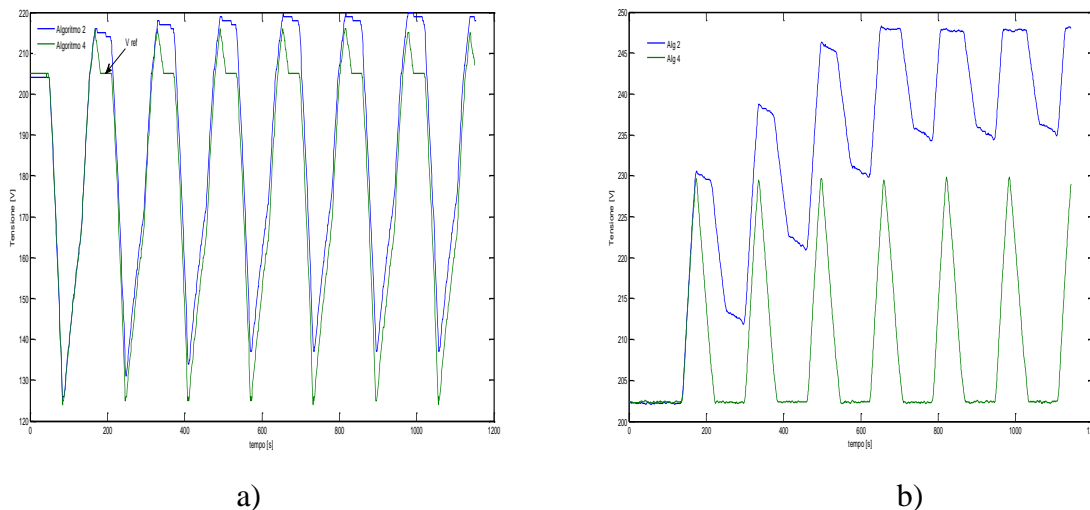


Fig. 10 Vuc con gli algoritmi A2 ed A4 a) Ciclo pesante base b) Ciclo pesante rigenerativo

Nel primo caso il comportamento di A2 è migliore di quello di A4, perché non scaricando i condensatori in rete limita i transiti (e quindi le dissipazioni) di energia, ma nel secondo caso A2 porta i condensatori ad una tensione di lavoro troppo alta e li esclude di fatto dal funzionamento. Quindi il miglior algoritmo possibile non è necessariamente quello che massimizza il rendimento su di un determinato ciclo.

La tabella seguente riporta il comportamento dei tre algoritmi (A8 è stato analizzato solo parzialmente in quanto non era previsto nel progetto ed è arrivato alla scadenza del lavoro) nel ciclo rigenerativo:

	A2	A4	A6
Wh asse	-482.622	-482.204	-482.622
Wh sc	-57.19	-11.02	-6.39
Wh rete	52.68	14.92	-36.3
Pmax rete	2700	3000	3100
Pmax asse	1700	1700	1700
Pmin rete	-5400	0	-3600
Pmin asse	-8000	-8100	-8100

Tab. 3 Comportamento su ciclo pesante rigenerativo

Nella tabella è segnato in rosso il valore della potenza che l'algoritmo A2 ha rinvio in rete a causa della esclusione del sistema di accumulo: tale valore può sembrare basso in questa applicazione, ma su un carroponete di un impianto industriale si potrebbe arrivare a centinaia di kW (porti, cantieri navali), per cui è importante evitare questa condizione di lavoro.

Nella tabella precedente i dati relativi alle potenze ed energie all'asse del motore sono naturalmente identici per tutti gli approcci, di conseguenza non hanno importanza ai fini del confronto tra le prestazioni relative degli algoritmi.

Nel ciclo pesante equilibrato si ha (A8 compreso):

	A2	A4	A6	A8
Wh rete	859.24	827.9	765	800
Wh uc	-6.63	10.24	43.6	-30.1
Pmax rete	4200	4500	5500	5300
Pmin rete	0	-3800	-3300	0

Tab. 5 Comportamento su ciclo pesante equilibrato

Per valutare in modo corretto le prestazioni dei i vari algoritmi occorre fare un confronto tra i valori di potenza richiesti o inviati alla rete e tra le energie assorbite, per queste ultime occorre considerare che:

- 1) Wh rete > 0 = assorbita dalla rete < 0 = erogata sulla rete
- 2) Wh uc > 0 = erogata dai supercondensatori <= assorbita dagli SC

Nel caso di cicli rigenerativi molto lunghi (ad es. lo scarico delle merci di una portacontainer) è possibile avere sia Wh rete che Wh uc < 0.

Per chiarezza di esposizione di mostra il comportamento del sistema nel caso del ciclo rigenerativo pesante gestito con l'algoritmo A6:

Di seguito l'andamento delle potenze misurate al banco (asse e link in continua):

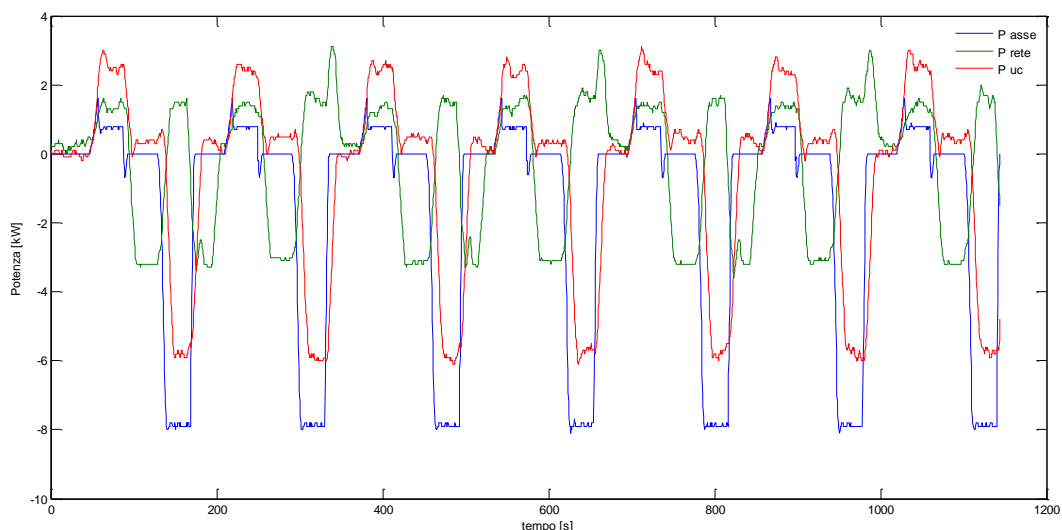


Fig. 11 Andamento delle potenze nella prova dell'algorithm A6 su ciclo pesante rigenerativo PRA6

In queste condizioni l'energia è rinviata in rete e nell'accumulo,

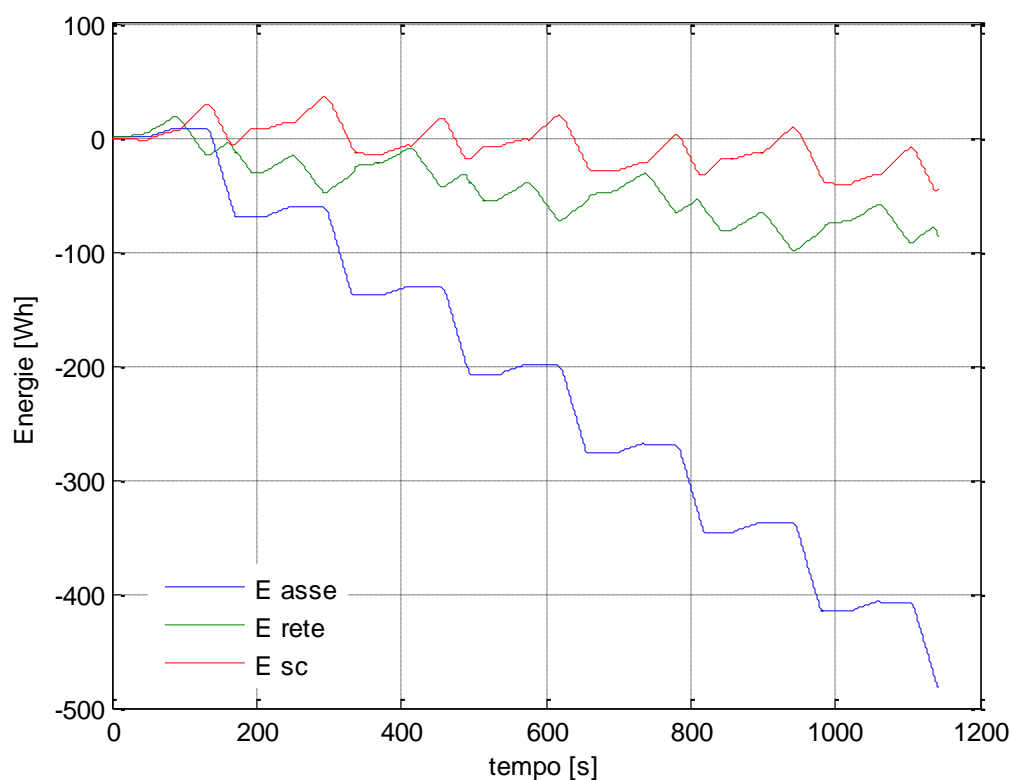


Fig. 12 Andamento delle energie nella prova dell'algorithm A6 su ciclo pesante rigenerativo PRA6

I dati di potenza ed energia rappresentati nelle figure 11 e 12 sono misurati, con riferimento alla figura 7 nel link in continua del sistema: questo è stato fatto per renderli omogenei fra di loro, ma il bilancio globale va fatto considerando l'ingresso in alternata ($V_p I_p$) e le grandezze all'asse del motore ed ai capi dei supercondensatori come riportato nella precedente tabella 5.

2.5 ANALISI DEI DATI

Se si esegue il ciclo pesante base abilitando la rigenerazione verso rete ed escludendo l'accumulo si ha che l'energia restituita è la massima possibile, avendo escluso le perdite dovute al passaggio per i supercondensatori ed il loro convertitore: tale valore è 748 Wh.

Come detto precedentemente se è vero che operando in questo modo si è massimizza l'energia restituita alla rete è anche vero che non si limitano le potenze, e che questa energia va perduta per il nostro sistema: detto questo il valore 748 Wh è un valore limite di potenza assorbita dalla rete che nessun algoritmo, per quanto evoluto, potrà mai raggiungere.

Nello stesso ciclo gli algoritmi proposti assorbono:

	A2	A4	A6	A8
Wh rete	859.24	827.9	765	800
Wh uc	-6.63	10.24	43.6	-30.1

Tab. 6 Energie assorbite su ciclo pesante equilibrato

Un criterio corretto di confronto tra il dato di energia assorbita senza utilizzare alcun accumulo e gli altri prevederebbe che Wh uc tra inizio e fine ciclo sia nulla: infatti in questo modo si può pensare che tutta l'energia assorbita dalla rete sia stata utilizzata dal carico o dissipata nei convertitori o negli scambi con l'accumulo, mentre se $Wh_{uc} > 0$ allora una parte dell'energia al carico è stata fornita dai condensatori, viceversa la rete ha caricato anche il sistema di accumulo immagazzinando in esso energia che potrà essere riutilizzata in seguito.

Questa condizione non è facilmente realizzabile con prove di laboratorio, di conseguenza per eseguire un confronto tra i vari algoritmi occorre individuare un criterio diverso.

L'aver fatto eseguire al sistema sette cicli di lavoro completi ha permesso di massimizzare l'energia assorbita dalla rete rispetto a quella immagazzinata/ceduta dai supercap, che risulta essere minore della prima di un ordine di grandezza: a questo punto ipotizzando un rendimento unitario del sistema di accumulo + convertitore è possibile confrontare i risultati tra di loro.

Ovviamente una tale ipotesi è favorevole al sistema dotato di accumulo rispetto a quello che ne è privo, perché non è possibile caricare/scaricare i condensatori senza perdere una parte dell'energia che si impegna per questa operazione, è invece una ipotesi più accettabile se la si utilizza per confrontare tra di loro i quattro approcci in quanto la ricarica/scarica degli sc avviene con rendimenti paragonabili.

Definendo quindi come Energia 'utile' la somma algebrica tra quella assorbita dalla rete e quella erogata dai condensatori si ha sul ciclo pesante base:

Algoritmo	A2	A4	A6	A8
Wh asse	317.8806	318.5722	317.906	318.0233
E util	852.61	837.24	808.6	769.9
Pmax rete	4200	4500	5500	5300
Pmin rete	0	-3800	-3300	0
'eta'	0.372832	0.380503	0.393156	0.413071
E util/Eut A8	1.10743	1.087466	1.050266	1

Tab. 7 Introduzione di Eutil per il confronto delle prestazioni

La E util di 769.9 Wh dell' algoritmo A8 non è paragonabile direttamente ai 748 Wh del ciclo senza condensatori per i motivi appena detti, ma è comunque un numero che mostra come l' inserimento del sistema di accumulo possa avvenire con un altissimo rendimento se il ciclo è ben gestito.

Il valore di 'eta' in tabella 6 è riferito alla Wh asse del ciclo ed è, sempre per i motivi illustrati sopra, un numero abbastanza omogeneo nei vari casi, per cui l' ultima riga mostra effettivamente il miglioramento relativo ottenuto con i vari approcci. Il risultato del confronto mostra che tra l' approccio A2 e quello A8 si è avuto un progressivo miglioramento delle prestazioni del sistema: infatti nell' ultimo caso si è risparmiato il 10 % di energia rispetto al primo.

La tabella 7 evidenzia sia le prestazioni relative tra i vari algoritmi che quelle assolute, facendo un confronto con un carroponete privo di recupero e considerando con le ipotesi dette sopra la Eutil come l' energia totale assorbita dalla rete si hanno i seguenti valori di assorbimento:

Sistema	E rete [Wh]
non rigenerativo privo di accumulo:	1260
rigenerativo con accumulo gestito da A2	853
rigenerativo con accumulo gestito da A4	837
rigenerativo con accumulo gestito da A6	808
rigenerativo con accumulo gestito da A8	770

Tab. 8 Assorbimenti dalla rete

L' inserimento dei condensatori ha portato ad una significativa riduzione della energia richiesta alla rete, pari al 31.58 %, mentre l' evoluzione degli stessi ha incrementato questo valore portandolo al 38.88 %, risultato ottenuto senza variare in alcun modo l' hardware utilizzato in A2, quindi senza alcuna spesa aggiuntiva.

Si vuole ora fare un confronto tra le prestazioni del sistema nel caso di un ciclo pesante rigenerativo: la tabella seguente riporta i risultati dei test, manca il test sull' algoritmo A8 che come detto non è stato ancora studiato in dettaglio.

	A2	A4	A6
Wh asse	-482.622	-482.204	-482.622
Wh sc	-57.19	-11.02	-6.39
Wh rete	52.68	14.92	-36.3
E util	-4.51	3.9	-42.69

Tab. 9 Prestazioni su ciclo pesante rigenerativo

In questo caso il sistema rigenera verso i condensatori e la rete, dalla tabella si evince che l' algoritmo A4 assorbe energia dalla rete per caricare i condensatori mentre A2 riesce a caricare i condensatori restituendo anche energia in rete: si ricorda però che A2 restituisce l' energia in rete a piena potenza mentre A4 limita la potenza ad un valore prefissato ed è stato concepito proprio per questo scopo. Dalla tabella 9 appare evidente che A6 è il miglior algoritmo, in quanto restituisce alla rete energia a potenza ridotta, e soprattutto riesce a fare questo caricando i supercondensatori.

2.6 CONCLUSIONI

In base all'analisi dei risultati effettuata precedentemente appare evidente il vantaggio di introdurre un sistema di accumulo all'interno dell'azionamento elettrico di una gru o di un carro ponte: infatti l'accumulo permette di ridurre la potenza di trazione richiesta alla rete ad una piccola frazione di quella necessaria in sua assenza ed anche di ottenere un significativo risparmio di energia.

Si pensi che le grandi gru ed i carroponti di impianti portuali o industriali possono richiedere alla rete centinaia di kW con consumi di migliaia di kWh al giorno e, come si è visto, un sistema di accumulo ben dimensionato e gestito può permettere di ridurre ad un quarto la potenza di picco richiesta alla rete e al sessanta per cento l'energia.

Se l'attività nel suo complesso ha permesso di mettere in evidenza i vantaggi derivanti dall'introduzione dell'accumulo a supercondensatori questa annualità ha invece mostrato come sia possibile migliorare le prestazioni di questo accumulo ottimizzandone la gestione.

Le tabelle 7 ed 8 mostrate precedentemente sintetizzano il progressivo miglioramento dell'approccio utilizzato per la gestione del sistema di accumulo: si sottolinea che l'algoritmo otto ha ancora notevoli margini di sviluppo, ma per poter operare su di esso è necessario approfondire maggiormente le metodologie di simulazione del ciclo.

Tale attività può essere eseguita senza alcuna acquisizione di materiale aggiuntivo rispetto a quello attuale, ovviamente ci deve essere l'impegno del personale.

Il lavoro di questo anno ha quindi permesso di gestire al meglio il sistema utilizzando degli approcci di complessità via via crescente e sempre più vicini alla natura fisica del problema: si è passati da una impostazione generica di un sistema di controllo realizzato tramite un algoritmo impostato con una programmazione a stati finiti ad una impostazione legata alle caratteristiche del sistema di accumulo, del carico da trasportare, della altezza a cui viene portato e della eventuale variazione della massa spostata (per simulare casi reali di carichi e scarichi di oggetti ad altezze diverse).

Si noti che per un carro ponte della taglia considerata i supercondensatori sono l'elemento di accumulo ideale, presentando un rapporto potenza specifica/ Energia specifica che è quello richiesto dalla natura dell'applicazione, una elevata affidabilità ed una semplicità notevole di gestione.

L'attività nel suo complesso ha dimostrato le potenzialità della soluzione proposta sia in termini di affidabilità che di convenienza economica.

3 BREVE DESCRIZIONE DEL SET SPERIMENTALE

Il sistema di laboratorio utilizzato per realizzare le prove sperimentali è già stato descritto nella prima annualità della attività, in questa sede se ne vogliono brevemente ricordare le caratteristiche principali.

Il sistema che si è realizzato è più di un simulatore propriamente detto: infatti esso consiste nell'accoppiamento tra un azionamento reale di un carrozzone ed un freno di laboratorio a sua volta costituito da un motore in corrente continua.

L'azionamento è stato realizzato tramite tre inverter della Santerno, della potenza di 22 Kw ciascuno ed un motore asincrono della stessa potenza.

La scelta iniziale del progetto è stata quella di utilizzare materiale disponibile sul mercato e non realizzato ad hoc per questa esperienza, in questo modo non solo si sono limitati i costi del lavoro ma si è mostrato come sia possibile eseguire le modifiche necessarie per l'introduzione dei supercondensatori anche su impianti industriali già esistenti, e come il sistema sia estremamente flessibile.

Gli inverter forniti dalla Santerno appartengono alla serie Sinus Penta ed hanno una potenza di 22 kW: Santerno prevede normalmente di accoppiare due inverter non reversibili per realizzarne uno reversibile mettendo in comune le due uscite controllabili tramite IGBT ed utilizzando una delle due come ingresso lato AC. Il terzo inverter è stato collegato in configurazione DC/DC al bus in continua dei primi due e programmato in modo da poter gestire l'accumulo a supercondensatori.

Il sistema è collegato ad un freno motore da 30 kW, parte della stazione prova azionamenti dell'edificio F33 della Casaccia, il freno è programmato per riprodurre all'asse del motore elettrico la stessa coppia che darebbe un carico di una determinata massa (come si è visto precedentemente si considerano anche masse variabili). Operando in questo modo è possibile riprodurre qualunque situazione di lavoro del carrozzone.

La foto mostra la configurazione della stazione prova:



Fig. 13 Stazione prova ENEA

4 AMBIENTE DI SVILUPPO SOFTWARE

Il software che implementa operativamente gli algoritmi descritti nel lavoro è realizzato in C, ed è stato scritto dall'Università di Napoli in accordo con la Santerno. Si sottolinea che per modificare il software degli inverter Santerno nelle applicazioni industriali e non perdere la rispondenza alla normativa CEI occorre l'approvazione della ditta stessa.

Il software è realizzato in C, su piattaforma Texas Instruments, tramite il compilatore Code Composer C33, il processore di destinazione è un DSP Texas TMS 320C30.

Il software è disponibile in Enea.

Le routine sono state scritte da Pietro Tricoli dell'Università di Napoli modificando il programma standard messo a disposizione da Santerno. Tricoli ha realizzato il lavoro in collaborazione con Villante e Pasquali di Enea.

5 BIBLIOGRAFIA

Si riportano di seguito i principali lavori che sono serviti come riferimento per lo sviluppo di questa attività:

- [1] Sang-Min Kim; Seung-Ki Sul: *Control of rubber tyred gantry crane with energy storage based on supercapacitor bank*. IEEE Trans. Power Electron., vol. 21, no. 5, pp. 1420-1427, Sept. 2006.
- [2] Luri, S.; Etxeberria-Otadui, I.; Rujas, A.; Bilbao, E.; González, A.: *Design of a supercapacitor based storage system for improved elevator applications*. Proc. IEEE Energy Conversion Congr. and Exposition ECCE 2010 - Atlanta (Georgia-USA), 12-16 Sep. 2010, pp. 4534-4539.
- [3] Rizzo, R.; Tricoli, P.: *Power flow control strategy for electric vehicles with renewable energy sources*. Proc. 1st Int. Power and Energy Conf. PECon 2006 - Putrajaya (Malaysia), 28-29 Nov. 2006, pp. 34-39.
- [4] Duran-Gomez, J. L.; Enjeti, P. N.; Jouanne, A.: *An approach to achieve ride-through of an adjustable-speed drive with flyback converter modules powered by supercapacitors*. IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 38, no. 2, pp. 514-522, Mar./Apr. 2002.
- [5] Iannuzzi, D.; Tricoli, P.: *Integrated storage devices for ropeway plants: useful tools for peak shaving*. Proc. 33rd Ann. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc. IECON' 07 - Taipei (Taiwan), 5-8 Nov. 2007 pp. 396-401.
- [6] Iannuzzi, D.; Piegari, L.; Tricoli, P.: *Use of supercapacitors for energy saving in overhead travelling crane drives*. Proc. Int. Conf. Clean Elect. Power ICCEP' 09 - Capri (Italy), 9-11 Jun. 2009, pp. 562-568.
- [7] Rizoug, N.; Bartholomeüs, P.; Le Moigne, P.: *Modeling and characterizing supercapacitors using an online method*. IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 57, no. 12, pp. 3980-3990, Dec. 2010
- [8] Linzen, D.; Buller, S.; Karden, E.; De Doncker, R. W.: *Analysis and evaluation of charge-balancing circuits on performance, reliability, and lifetime of supercapacitor systems*. IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 41, no. 5, pp. 1135-1141, Sep./Oct. 2005.
- [9] Marie-Francoise, J.-N.; Gualous, H.; Berthon, A.: *Supercapacitor thermal- and electrical-behaviour modelling using ANN*. IEE Proc. - Electr. Power Appl., vol. 153, no. 2, pp. 255-262, Mar. 2006.
- [10] EUCAR Traction Battery Working Group (BMW, DaimlerChrysler, FIAT, Opel, PSA, Renault, Volkswagen, Volvo), *Specification of Test Procedures for Supercapacitors in Electric Vehicle Application*. ECE Contract ENK6-CT2000-00088.
399

