

**POLITECNICO DI MILANO**

**Facoltà di Ingegneria dei Processi Industriali**

**Corso di Laurea Specialistica in Ingegneria Elettrica**

**Dipartimento di Elettrotecnica**



**STUDIO E PROGETTO DI UN CONVERTITORE DC/DC PER  
LA GESTIONE DI SUPERCAP SU VEICOLI ELETTRICI**

Relatore: Prof. Francesco Castelli Dezza

Correlatore: Ing. Matteo Maglio

Tesi di Laurea Specialistica di:  
Donato Molteni  
Matr. 725838

Anno Accademico 2009-2010



# *Indice*

<b>INTRODUZIONE.....</b>	<b>1</b>
<b>CAPITOLO 1 .....</b>	<b>3</b>
<b>VEICOLI ELETTRICI .....</b>	<b>3</b>
1.1    VEICOLI ELETTRICI IBRIDI E PURI (OVERVIEW) .....	3
1.2    VEICOLI IBRIDI .....	5
1.2.1    Ibrido Serie .....	9
1.2.2    Ibrido Parallelo .....	10
1.2.3    Ibrido Misto .....	11
1.3    VANTAGGI E SVANTAGGI .....	12
1.3.1    Vantaggi .....	12
1.3.2    Svantaggi .....	13
1.4    FRENATURA A RECUPERO.....	14
<b>CAPITOLO 2.....</b>	<b>17</b>
<b>SISTEMA BATTERIA + UCAP .....</b>	<b>17</b>
2.1    SISTEMA BATTERIA + SUPERCONDENSATORE .....	17
2.1.1    Convertitore DC/DC .....	18
2.1.2    Funzionamento.....	19
2.1.3    Vantaggi .....	20

2.2	BATTERIA .....	21
2.2.1	Batteria acida al piombo .....	24
2.2.2	Batteria al nichel-metallo idruro .....	25
2.2.3	Batteria al litio .....	25
2.2.4	Pila zinco-aria .....	26
2.3	SUPERCONDENSATORE .....	28
2.3.1	Vantaggi .....	31
2.3.2	Svantaggi .....	32
2.3.3	Confronto Batterie – Supercondensatori .....	32
 <b>CAPITOLO 3.....</b>		<b>33</b>
 <b>PROGETTO DEL CONVERTITORE.....</b>		<b>33</b>
3.1	OBBIETTIVI.....	35
3.2	SCHEMA .....	36
3.3	PROGETTAZIONE.....	38
3.3.1	Induttore .....	38
3.3.2	Condensatore .....	42
3.3.3	Diodi e Valvole .....	43
3.3.4	Perdite e Rendimento .....	46
3.4	FUNZIONAMENTO DEL CONVERTITORE .....	48
 <b>CAPITOLO 4.....</b>		<b>52</b>
 <b>CONTROLLO .....</b>		<b>52</b>

4.1	TEORIA DEL CONTROLLO.....	53
4.1.1	Controllore PID.....	55
4.1.2	Controllore PI .....	58
4.2	MODELLO DEL CONVERTITORE.....	59
4.3	PROGETTO DEL SISTEMA DI CONTROLLO .....	62
4.3.1	Sistema di controllo in Corrente .....	64
4.3.2	Scelta del Regolatore.....	66
4.4	FILE MATLAB.....	68
 <b>CAPITOLO 5.....</b>		<b>70</b>
<b>SIMULAZIONI .....</b>		<b>70</b>
5.1	SCHEMA CIRCUITALE .....	70
5.2	FUNZIONAMENTO.....	73
5.2.1	Funzionamento Tipico.....	74
5.2.2	Funzionamento Limite .....	77
5.3	RISULTATI DELLE SIMULAZIONI .....	77
5.3.1	Caso Tipico.....	77
5.3.2	Caso Limite.....	80
 <b>CONCLUSIONI.....</b>		<b>83</b>
 <b>BIBLIOGRAFIA.....</b>		<b>85</b>

## *Introduzione*

L'aumento crescente del costo del combustibile e il problema legato alle tematiche del riscaldamento globale hanno riportato un forte interesse nello studio e nello sviluppo delle automobili elettriche. Negli ultimi anni i veicoli elettrici si sono molto diffusi grazie soprattutto all'innovazione tecnologica delle batterie e degli altri sistemi di accumulo e alla possibilità di usufruire di finanziamenti statali. Queste automobili hanno molti vantaggi rispetto ai tradizionali veicoli a combustione interna (benzina, diesel). I principali sono: riduzione dei consumi di carburante, basse emissioni inquinanti e funzionamento silenzioso. Inoltre questi veicoli possono sfruttare la frenatura a recupero. La frenatura a recupero è quel sistema che converte l'energia cinetica di una frenata in energia elettrica per ricaricare le batterie installate a bordo del veicolo. Questo sistema quindi è un ottimo metodo per migliorare l'autonomia energetica del veicolo. Per recuperare efficientemente questa energia però deve essere utilizzato un sistema composto da una batteria e da un supercondensatore. Le recenti ricerche sui veicoli ibridi hanno dimostrato che la combinazione di supercondensatori e batterie realizza migliori prestazioni rispetto ai tradizionali sistemi con solo batterie. Inoltre la combinazione di batterie e supercondensatori fa sì che il volume occupato ed il costo del sistema di accumulo sia ridotto. Per interfacciare questi due elementi di accumulo però è richiesta la presenza di un convertitore DC/DC. Il principale compito del convertitore è quello di controllare i flussi di energia tra la batteria e il supercondensatore e di trasportare energia al carico. L'inserimento del convertitore salvaguarda il sistema e protegge la batteria dai picchi di energia del carico, aumentandone così la durata utile.

Lo scopo di questa tesi è di presentare il progetto ed il controllo di un convertitore DC/DC bidirezionale usato per applicazioni automobilistiche. Le richieste principali sono quelle di ottenere un'alta efficienza dell'intero sistema e di controllare il trasferimento di energia tra la batteria ed il supercondensatore. Il convertitore ha una potenza nominale di 20 KW. La batteria ha una tensione nominale di 200V, con valori di tensione minima di 150 V e massima di 210 V. La tensione del supercondensatore invece varia a seconda del suo stato di carica (SoC) tra 190 V e 335 V. Ogni fase di progetto del convertitore diventa cruciale. Bisogna scegliere per

esempio la tipologia da utilizzare, le modalità di funzionamento, la frequenza di switching, i componenti del convertitore e fare considerazioni termiche e per la sicurezza. Guardando i valori delle tensioni di batteria e supercondensatore si può capire che il convertitore deve funzionare in entrambe le direzioni ed in entrambe le modalità di funzionamento (Buck e Boost). Inoltre un convertitore costruito per queste applicazioni deve rispettare ulteriori richieste, in particolare un basso costo ed un numero ridotto di componenti. E' richiesto un funzionamento a frequenza di commutazione costante in modo da ridurre i disturbi elettromagnetici ed avere quindi un'ottima efficienza sull'intero range di funzionamento. Il convertitore funzionerà con una frequenza di switching elevata in modo da ridurre il peso e le dimensioni degli elementi magnetici presenti nel convertitore stesso (induttore e trasformatore). Queste richieste sono molto difficili da realizzare con i tradizionali schemi Buck e Boost. Per questo motivo si è scelto di adottare uno schema di quattro valvole a ponte in modo da realizzare tutte le quattro possibili modalità di funzionamento. Lo studio del circuito di controllo è un'altra importante richiesta per il progetto del convertitore. Una strategia di controllo è necessaria per regolare i flussi di energia e per mantenere una adeguata riserva di energia negli elementi di accumulo. Il controllo si basa essenzialmente sulla regolazione della corrente di batteria: la corrente in ingresso ed in uscita dalla batteria non può superare un certo livello di riferimento e viene quindi limitata in modo da aumentarne la durata utile. Nella prima parte di questo lavoro vengono presentati, oltre ad una breve descrizione del sistema di frenatura a recupero, i veicoli elettrici ibridi e puri. Nella seconda parte viene invece spiegato il funzionamento del sistema batteria + supercondensatore, ormai diffuso a bordo dei veicoli, con una descrizione dei vantaggi e degli svantaggi di questi due elementi di accumulo. Nella terza parte sono descritte le caratteristiche, la tipologia, il funzionamento e le scelte di progettazione del convertitore bidirezionale DC/DC. Nella quarta parte viene mostrata la tecnica di controllo in corrente, con una breve descrizione delle scelte del regolatore e dei parametri di controllo. Infine per ultimo vengono mostrati gli schemi ed i grafici delle simulazioni del sistema studiato, realizzati grazie al programma di simulazione Simulink.

# ***VEICOLI ELETTRICI***

### ***1.1 VEICOLI ELETTRICI IBRIDI E PURI (OVERVIEW)***

Il veicolo elettrico è un'automobile con motore elettrico che utilizza l'energia chimica immagazzinata in un "serbatoio" energetico costituito da una o più batterie ricaricabili.

Le prime auto elettriche sono nate all'inizio del XIX secolo insieme alle automobili a combustione poiché quegli anni l'energia elettrica era ormai di uso comune ed era uno tra i metodi più diffusi per la trazione delle automobili, fornendo un elevato livello di comfort e semplicità di funzionamento.

Gli anni successivi hanno visto però una crescita sempre più importante dei motori a combustione che hanno preso il sopravvento sulle macchine elettriche, sebbene la trazione elettrica sia rimasta di uso comune su altri tipi di veicoli, ad esempio i treni, filobus e tram. I veicoli elettrici sono differenti dai veicoli a combustibile in quanto possono ricevere energia da un vasto campo di sorgenti, compresi i combustibili fossili, energia nucleare e le fonti di energia rinnovabili (ad esempio quella solare, eolica o una combinazione di esse). In qualsiasi modo sia prodotta, questa energia viene trasferita al veicolo attraverso un normale cavo elettrico. L'energia può quindi essere immagazzinata all'interno del veicolo utilizzando diversi sistemi di accumulo, per esempio una batteria o un supercondensatore.

Agli inizi del XXI secolo un aumento crescente della problematica sull'impatto ambientale ed un aumento del costo del petrolio hanno riportato maggiore interesse all'uso dell'energia elettrica per la trazione.

Infatti in questi ultimi anni sono diventati molto popolari i veicoli ibridi elettrici e i veicoli ibridi plug-in poiché possono essere alimentati da entrambe le fonti di energia.

Quando si parla di veicoli elettrici non si parla solo di automobili, ma anche di piccoli autocarri, scooter elettrici, veicoli per campi da golf e carrelli elevatori.



Gli accumulatori sono poco adatti per applicazioni che hanno bisogno di una grande potenza e capacità di carico, ma ora grazie ad un loro miglioramento e all'innovazione tecnologica si possono realizzare camion, moto e pullman con motore elettrico.

Oggi molte delle vetture elettriche sono capaci di prestazioni in accelerazione che eccedono quelle dei veicoli a benzina della stessa potenza.

I veicoli elettrici possono utilizzare una configurazione diretta motore-ruota che aumenta l'efficienza nell'erogazione di potenza. Il fatto che possano avere molteplici motori collegati direttamente alle ruote permette a ciascuna di essere sia propulsiva che frenante, permettendo un miglioramento della trazione.

Come per tutti i dispositivi elettrici ed elettronici, anche i veicoli elettrici a batteria hanno il vantaggio di poter essere smantellati facilmente e riciclati, ad esempio, in seguito ad incidenti stradali. A differenza dei componenti a bordo delle macchine a benzina che tendono a incendiarsi (specie quando i tubi rotti dell'iniezione soffiavano benzina sulla marmitta catalitica o sul turbocompressore rovente), le celle delle batterie tendono a mantenersi integre e funzionanti per poter essere poi recuperate e riutilizzate. Dal momento che non hanno materiali infiammabili (eccetto alcuni accumulatori di tipo litio-ione) in caso di incidente questi veicoli possono essere considerati molto più sicuri rispetto a quelli a combustione.

La potenza di un veicolo a motore elettrico, come in altri veicoli, è misurato in kilowatt (kW). 100 kW è approssimativamente equivalente a 134 cavalli, anche se la maggior parte dei motori elettrici erogano una coppia completa su una vasta gamma di giri al minuto, per cui le prestazioni non sono equivalenti, ma superano di gran lunga i 134 CV (cavalli) dei motori alimentati a combustibile. I motori elettrici quindi non hanno bisogno dell'uso di marce e hanno una curva di coppia migliore rispetto a quella dei motori a benzina, i quali hanno una curva di coppia limitata.

Solitamente si usa un motore asincrono trifase alimentato da un inverter che converte la corrente continua in ingresso in corrente alternata.

Esistono fondamentalmente due tipi di veicoli elettrici:

- *Veicoli elettrici "puri"*: hanno solo il motore elettrico e un sistema di batterie;

- *Veicoli elettrici "ibridi"*: utilizzano sia motori elettrici che motori a combustione interna (ICE: Internal Combustion Engine).

## ***1.2 VEICOLI IBRIDI***

Un veicolo ibrido, più propriamente veicolo a propulsione ibrida, è un veicolo dotato di due sistemi di propulsione, ad esempio motore elettrico e motore termico. Alcuni definiscono come ibrido anche il veicolo termico policarburante (benzina/gpl, benzina/metano, gasolio/kerosene, benzina/idrogeno).

Discutiamo allora dei veicoli ibridi più comuni, cioè con motore elettrico e motore a combustione interna.

I due propulsori sono adatti a coesistere in quanto hanno caratteristiche complementari. Il motore a combustione interna trasforma l'energia chimica del combustibile (di notevole densità energetica e facilmente approvvigionabile dalla rete di rifornimento) con una efficienza accettabile, in particolare in alcuni punti di funzionamento. Il motore elettrico invece converte con maggiore efficienza e versatilità una piccola quantità di energia presente a bordo del veicolo. Ogni macchina elettrica è in grado di lavorare in trazione e generazione (nonché nei due sensi di marcia) e quindi ogni veicolo ibrido cerca di sfruttare nei rallentamenti la capacità di "frenare" con il motore elettrico, generando energia altrimenti dissipata nei freni.

In base al grado di ibridazione (potenza del propulsore elettrico rispetto alla potenza totale installata) e alla capacità del sistema di propulsione ibrido di immagazzinare energia elettrica, si definiscono informalmente tre livelli di ibridazione:

- *Ibridazione piena (full hybrid)*: il sistema elettrico è in grado da solo di far avanzare il veicolo su un ciclo di guida normalizzato, prescindendo dall'autonomia delle batterie;
- *Ibridazione leggera (mild hybrid)*: il modo di funzionamento puramente elettrico non è in grado di seguire per intero un ciclo di guida normalizzato;
- *Ibridazione minima (minimal hybrid)*: normalmente confusa con la propulsione tradizionale munita di funzione *stop and start*, è caratterizzata da una limitata percorrenza in modalità elettrica pura e da un minor grado di ibridazione.

I veicoli con funzione *stop and start* vengono anche impropriamente chiamati "micro hybrids", ma questa funzione, tipica anche di molti veicoli ibridi, è ottenuta con componenti tradizionali e non certo con un sistema di propulsione diverso.

Una speciale famiglia dei veicoli elettrici ibridi sono i così detti veicoli elettrici plug-in, cioè dei veicoli elettrici con batterie ricaricabili che possono essere pienamente ricaricate semplicemente collegandole ad una presa elettrica esterna come quelle presenti in casa.

Questo veicolo accomuna le principali caratteristiche dei convenzionali veicoli ibridi con motore elettrico/termico e dei veicoli elettrici puri cioè con la possibilità di connettersi direttamente alla rete elettrica.

Confrontate con i veicoli tradizionali, queste automobili possono ridurre l'inquinamento dell'aria, la dipendenza dal petrolio, dai combustibili fossili e non generano i gas serra inquinanti che contribuiscono al riscaldamento globale. Inoltre eliminano il problema dei veicoli elettrici puri in quanto il motore a combustione lavora come riserva solo nel caso in cui le batterie siano scariche. Questi veicoli non utilizzano combustibili fossili quando lavora il motore elettrico e non producono i gas serra pericolosi se sono ricaricate da fonti di energia rinnovabili. Altri due vantaggi sono un minor numero di rifornimenti di benzina alle stazioni di servizio e la comodità di ricaricare l'automobile semplicemente dall'alimentazione di casa.

Negli Stati Uniti la maggior parte delle macchine ibride plug-in sono conversioni delle tradizionali automobili ibride, soprattutto conversioni delle Toyota Prius alle quali sono state aggiunte la ricarica da rete e ulteriori batterie per estendere l'uso del solo motore elettrico.

Molte nazioni, tra cui gli Stati Uniti, hanno introdotto leggi per facilitare la vendita di questi veicoli attraverso agevolazioni fiscali, pubblicità, finanziamenti alla ricerca e allo sviluppo di batterie e/o altre tecnologie.

Indipendentemente dalla struttura, i veicoli ibridi plug-in possono essere divisi in due modalità: *a carica ridotta* ed *a carica sostenuta*. La combinazione di queste due modalità è denominata mista.

Queste modalità gestiscono l'energia di scarica delle batterie del veicolo e influenzano direttamente le dimensioni ed il tipo delle batterie utilizzate.

Spieghiamo brevemente le diverse modalità:

- *Modalità a carica ridotta (svuotata)*: consente a un veicolo pienamente ricaricato di funzionare esclusivamente trasferendo energia elettrica fino a quando lo stato di carica delle sue batterie ha raggiunto un predeterminato livello oltre il quale si impiegherà il motore a combustione. Questa modalità è normalmente impiegata dai veicoli che non hanno abbastanza energia elettrica per sostenere alte velocità senza l'aiuto di un motore a combustione. Per esempio le nuove Toyota Prius possono funzionare senza l'uso del motore meccanico fino alla velocità di 70 Km/h. A velocità elevate può essere ancora utilizzata l'energia elettrica anziché quella meccanica, diminuendo così il consumo di combustibile;
- *Modalità a carica sostenuta*: consente al veicolo di funzionare indipendentemente con le due sorgenti di energia per realizzare la massima efficienza possibile senza permettere allo stato di carica della batteria di andare al di sotto di un determinato livello. E' la modalità con la quale funzionano i tradizionali veicoli ibridi. Una volta che un veicolo

elettrico ha esaurito il suo range nella modalità a carica ridotta può passare automaticamente nella modalità a carica sostenuta;

- *Modalità mista*: consente al veicolo di funzionare con una combinazione delle due modalità. All'interno di un percorso misto (strade cittadine e autostrade), un controllo automatico varia le modalità in modo da realizzare la massima efficienza possibile.

I veicoli plug-in ibridi richiedono, di solito, per le loro batterie cicli di carica e scarica completi al contrario dei tradizionali veicoli ibridi.

Poiché il numero di cicli completi influenza la vita e le prestazioni della batteria, le batterie di questi veicoli avranno prestazioni peggiori rispetto ai veicoli ibridi convenzionali in quanto questi ultimi non scaricano completamente le loro batterie. La gestione dei flussi di energia fra i vari convertitori (motore a combustione interna, motore elettrico, trasmissione) ed accumulatori (batterie, supercondensatori), per rispondere ad una data richiesta di potenza (coppia e velocità) da parte del conducente, è svolta dal controllore di supervisione. Tale controllore, tipico dei veicoli ibridi, si colloca, rispetto ad una struttura di controllo in coppia tradizionale, in posizione intermedia tra gli algoritmi di interpretazione della volontà del conducente (trasformazione della posizione dei pedali di accelerazione e freno in richiesta di coppia) e quelli di controllo dei singoli componenti (motori, trasmissione, freni). Gli algoritmi di gestione dell'energia sono ispirati a criteri di minimizzazione del consumo energetico globale (combustibile e elettricità) vincolati al rispetto di un'evoluzione mediamente costante dello stato di carica delle batterie, oltreché dai limiti fisici dei componenti e dei vincoli dettati dalle esigenze di guida piacevole (*driveability*).

Esistono fondamentalmente due schemi costruttivi per l'integrazione di un motore termico e di un motore elettrico: *ibrido serie* e *ibrido parallelo*. La combinazione dei due dà origine all'*ibrido misto*.

### **1.2.1 Ibrido Serie**

Questa tecnologia è molto simile a quella utilizzata nelle locomotive diesel-elettriche. In questa tipologia il motore termico non è collegato alle ruote; esso ha il compito di generare la corrente per alimentare il motore elettrico che la trasforma in movimento, mentre l'energia superflua viene utilizzata per ricaricare le batterie.

Nei momenti in cui viene richiesta una grande quantità di energia, essa viene attinta sia dal motore termico che dalle batterie. Poiché i motori sono in grado di operare su un grande numero di regimi di rotazione, questa struttura permette di rimuovere o ridurre la necessità di una trasmissione complessa. L'efficienza dei motori a combustione interna cambia al variare del numero di giri; nei sistemi ibrido serie i giri del motore termico vengono impostati per ottenere sempre la massima efficienza non dovendo subire né accelerazioni né decelerazioni. Data questa condizione e per compensare l'ulteriore trasformazione energetica, si può usare un motore termico (generatore) che abbia una fascia di funzionamento molto stretta rispetto ai regimi totali e che per questo abbia un rendimento più elevato dei motori termici classici, per lo meno in quella fascia di regimi.

In alcuni prototipi sono installati piccoli motori elettrici per ogni ruota. Il notevole vantaggio di questa configurazione è di poter controllare la potenza erogata ad ogni ruota. Un possibile scopo potrebbe essere quello di semplificare il controllo della trazione o inserire/disattivare la trazione integrale.

Il grande svantaggio di questa configurazione è la consistente riduzione di efficienza rispetto ai motori termici puri in condizioni di velocità elevate e costanti (esempio i 130 Km/h in autostrada).

Tale riduzione è causata dal fatto che nella conversione termico-elettrico-moto parte dell'energia viene persa, cosa che non accade invece con una trasmissione diretta. Questo inconveniente è presente solo negli ibridi serie e non è presente nelle altre configurazioni. Gli ibridi serie sono molto efficienti per veicoli che necessitano di continue frenate e ripartenze come, ad esempio, le auto ad uso urbano, autobus e taxi.

Molti modelli ibridi serie hanno in dotazione un pulsante per lo spegnimento del motore termico. La funzione viene utilizzata specialmente per la circolazione nelle

zone a traffico limitato o nel centro città dove si susseguono continue partenze e frenate. L'autonomia del veicolo dipende solamente dall'energia immagazzinata e quindi dalla carica delle batterie. Il motore termico, comunque, può essere riattivato con la pressione del medesimo pulsante e viene inoltre spento automaticamente durante le soste.

### ***1.2.2 Ibrido Parallelo***

Tale architettura è tra le più usate nelle auto ibride. E' caratterizzata da un nodo meccanico di accoppiamento della potenza, per cui entrambi i motori (elettrico ed il termico) forniscono coppia alle ruote. Il motore termico può inoltre essere utilizzato per ricaricare le batterie in caso di necessità. La realizzazione costruttiva del nodo meccanico e la sua posizione nell'ambito del sistema di propulsione servono a distinguere ibridi paralleli pre-trasmissione (motore elettrico a monte del cambio), post-trasmissione (motore elettrico a valle del cambio) e post-ruote (i due assiali hanno due motorizzazioni meccanicamente indipendenti, l'accoppiamento è dunque costituito dalla strada). Gli ibridi parallelo possono ulteriormente essere classificati in base al bilanciamento dei due motori nel fornire potenza motrice. Nella maggior parte dei casi il motore a combustione interna è la parte dominante ed il motore elettrico ha la semplice funzione di fornire una maggiore potenza nei momenti di necessità (principalmente in partenza, in accelerazione ed alla velocità massima).

La maggior parte dei progetti combinano un grande generatore elettrico ed un motore in una singola unità, solitamente situata tra il motore a combustione interna e la trasmissione, nel posto del volano, rimpiazzando sia il motorino di avviamento che l'alternatore. Solitamente il cambio è automatico.

Il vantaggio sta nell'eliminazione delle marce basse (quelle che consumano più carburante) e del consumo a ruote ferme o a passo d'uomo. Inoltre permette automobili con cilindrata più basse in quanto alla massima velocità il motore termico può essere supportato da quello elettrico (anche se solo per qualche chilometro).

### ***1.2.3 Ibrido Misto***

Un particolare tipo di veicolo ibrido è quello misto, una via di mezzo tra l'ibrido serie ed il parallelo. Gli ibridi misti sono caratterizzati da un nodo meccanico, come negli ibridi paralleli, e da un nodo elettrico, come negli ibridi serie. Come questi ultimi, presentano due macchine elettriche.

La modalità costruttiva per la realizzazione del doppio accoppiamento può variare. Un esempio relativamente semplice è dato dall'architettura della Toyota Prius, che realizza l'accoppiamento meccanico tra il motore termico, le due macchine elettriche e l'albero di trasmissione finale attraverso la combinazione di un rotismo epicicloidale ed un riduttore.



### **1.3 VANTAGGI E SVANTAGGI**

Negli ultimi anni l'opinione pubblica si è molto divisa sull'importanza dei veicoli elettrici. E' ancora difficile tirare delle conclusioni sull'efficacia o meno di tali veicoli, ma un miglioramento tecnologico, soprattutto dei materiali utilizzati, spinge i costruttori di automobili verso la loro produzione. Sicuramente nei prossimi anni si potrà vedere un aumento di automobili elettriche sulle nostre strade, ma per arrivare a competere con le prestazioni delle macchine a benzina bisognerà aspettare ancora qualche anno.

Per comprendere meglio l'importanza o meno dei veicoli elettrici, qui di seguito sono menzionati i principali vantaggi e svantaggi.

#### **1.3.1 Vantaggi**

- *Efficienza energetica*: i motori elettrici hanno un rendimento di oltre il 90% (solo 28% nei motori a benzina e 40% nei motori diesel), sono più facili da controllare e sono meccanicamente più semplici rispetto ai motori a benzina. Offrono una coppia elevata particolarmente importante nelle accelerazioni e non hanno bisogno di marce, semplificando così la trasmissione ed il convertitore di coppia. Solo col motore elettrico si può sfruttare il sistema di frenatura a recupero;
- *Inquinamento*: i veicoli elettrici non producono né fumi di scarico particolarmente pericolosi per l'effetto serra, né vapori d'acqua. Possono produrre un inquinamento praticamente nullo se riforniti con energia prodotta da fonti rinnovabili;
- *Silenziosità*: i veicoli elettrici sono molto più silenziosi e hanno meno vibrazioni rispetto ai motori a combustione;
- *Risparmio economico*: si prevede un costo di 2 cents/Km con l'uso di energia elettrica rispetto ai 12 cents/Km con l'uso di benzina. Si può raggiungere un ulteriore riduzione di costo se si ricaricano le batterie

nelle ore non di punta, ad esempio di notte quando l'energia costa meno;

- *Distanza raggiunta*: i nuovi modelli possono viaggiare per centinaia di chilometri con una sola ricarica, anche dopo 160.000 Km di impiego delle stesse batterie;
- *Incentivi statali*: pur nell'incertezza economica attuale, la proposta pubblica dovrebbe ricoprire il fattore decisivo per favorire lo sviluppo del mercato dell'auto elettrica, invogliando i costruttori e gli automobilisti a percorrere tale via.

### **1.3.2 Svantaggi**

- *Batterie*: il tempo di ricarica e la scarsa durata di carica delle batterie riduce di molto l'autonomia del motore elettrico e quindi la percorrenza. Negli ultimi anni studi su nuovi tipi di batteria ricaricabile e nuove tecnologie di carica (e di scarica) ne hanno incrementato l'autonomia e la vita utile, riducendone contemporaneamente il tempo di carica. Inoltre l'utilizzo di batterie aumenta il peso complessivo del veicolo;
- *Costo del veicolo*: il costo principale delle moderne automobili elettriche dipende principalmente, dal tipo e dalle capacità delle batterie, che sono fondamentali nella determinazione di molti fattori come l'autonomia di viaggio, la velocità massima, il tempo di vita utile della batteria ed il tempo di ricarica. Un altro problema è che all'inizio della loro produzione, le automobili elettriche costeranno circa il 50-100% in più rispetto a quelle a combustione interna, ma si prevede che, col passare degli anni, una maggiore produzione porti ad una diminuzione dei costi.

## ***1.4 FRENATURA A RECUPERO***

Un vantaggio chiave dei veicoli elettrici è la capacità di recuperare energia attraverso la frenatura e di immagazzinarla poi a bordo del veicolo o rimandarla in rete come succede nella trazione ferroviaria ( si recupera circa il 15% dell'energia totale spesa).

La frenatura a recupero è un sistema che cattura parte dell'energia cinetica, che altrimenti andrebbe persa, in calore quando il veicolo compie una frenata. Nei freni tradizionali questa energia è convertita in calore attraverso la frizione e poi dissipata nello spazio circostante.

I veicoli trainati da motori elettrici usano il motore come un generatore quando è in atto la frenatura a recupero: l'energia recuperata dalla frenata è trasferita e poi salvata in un sistema di batterie ed usata successivamente per aumentare la potenza del motore elettrico durante un'accelerazione.

I freni rigenerativi non sono delle novità degli ultimi anni e non riguardano solo automobili. La tecnologia è nata 40 anni fa e si trova spesso anche su altri mezzi di trasporto, come treni e grossi camion nei quali il risparmio di combustibile è fondamentale. Un primo prototipo di questo sistema fu sviluppato nel 1967. Questo prototipo consisteva di un'automobile completamente trainata da delle grosse batterie le quali erano ricaricate grazie alle frenate, aumentando l'autonomia del veicolo. La frenatura a recupero quindi rallenta la macchina e recupera parte di questa energia "persa", ma questo sistema non riesce a frenare completamente il veicolo. Per questo motivo il freno meccanico tradizionale viene ancora usato in parallelo al sistema elettrico per il recupero in frenatura. Qui di seguito è presentato qualche motivo di questa scelta:

- l'effetto rigenerativo è trascurabile a basse velocità, perciò il freno meccanico è ancora richiesto per portare il veicolo ad una completa frenatura;
- il freno tradizionale è un necessario back-up nel caso di guasto del freno rigenerativo;

- molti dei veicoli con freno rigenerativo hanno la trazione solo su due ruote, e quindi in condizioni difficoltose (esempio su strada bagnata) è necessario il freno tradizionale per migliorare la frenatura agendo anche sulle altre due ruote;
- l'effetto della frenata di recupero non può avvenire se un altro componente elettrico sullo stesso sistema di fornitura non sta estraendo energia nello stesso momento e se la batteria o i condensatori sono già carichi. Per questa ragione, è necessario introdurre la frenatura meccanica per assorbire questo eccesso di energia;
- in condizioni di frenate di emergenza è auspicabile che la forza di frenatura estratta sia massima in modo da eseguire una trazione tra ruote e asfalto senza slittamento, sull'intero range di velocità tra la velocità massima del veicolo fino a zero. La forza massima disponibile per le accelerazioni è minore rispetto a quella di frenatura, eccetto per il caso di veicoli sportivi. Perciò la potenza richiesta dal sistema frenante per dissipare questa energia, in condizioni di frenata di emergenza, può essere molte volte maggiore rispetto a quello di accelerazione. Anche per questo caso la frenatura tradizionale è richiesta per assorbire il surplus di energia e per consentire una buona frenatura di emergenza.

La presenza di due sistemi di frenatura porta un vantaggio nei confronti della sicurezza, ma le azioni di questi due sistemi devono essere coordinate per avere un buon recupero di energia. I tradizionali sistemi frenanti sono idraulici ed usano la potenza del fluido per generare e controllare la forza frenante richiesta. Questi freni, a tamburo o a disco, sono collegati direttamente alle ruote attraverso ganasce altamente resistenti al calore. Le ganasce vengono forzate verso i freni in modo da fermare le ruote e rallentare il veicolo. Nei veicoli elettrici, il coordinamento dei due sistemi frenanti richiede dei sistemi di controllo altamente precisi. I componenti meccanici non sono abbastanza veloci da fornire controlli di frenatura efficienti. Per questo motivo è molto usata una rete di sensori ed attuatori elettronici che

vengono distribuiti sull'intero veicolo. Il controllo elettronico di frenatura è una scoperta fondamentale per il perfezionamento della frenatura ed aiuta altre tecniche di frenatura (frenatura correttiva) e va a vantaggio della sicurezza (detenzione di conflitti). All'interno di questo sistema elettromeccanico di frenatura, un insieme di sensori controlla la velocità delle ruote, la posizione del pedale del freno e del freno d'emergenza, le azioni del sistema sterzante, la posizione ed i movimenti del veicolo. Inoltre si impiegano altri sensori per misurare la forza da applicare e l'accumulo di calore sui freni. Il sistema frenante deve conoscere tutte queste informazioni nello stesso istante. Inoltre deve decidere quando impiegare i meccanismi di sicurezza, come il sistema anti bloccaggio delle ruote (ABS), e deve collaborare con gli altri sistemi progettati per la stabilità del veicolo in occasione di improvvise situazioni di emergenza. In conclusione il sistema a recupero di energia può quindi diminuire l'usura dei componenti meccanici di frenatura e può aumentare il risparmio di carburante. Questo sistema può essere usato solo sui veicoli elettrici perché sui convenzionali veicoli a combustione può essere installato un altro sistema chiamato "stop-start", il quale spegne il motore quando la macchina è ferma e lo riavvia immediatamente appena si è schiacciato l'acceleratore.



**Fig.1.1\_Sistema per il recupero di energia**

## *Capitolo 2*

### ***SISTEMA BATTERIA + UCAP***

#### ***2.1 SISTEMA BATTERIA + SUPERCONDENSATORE***

La gestione dell'energia nei veicoli elettrici è molto importante, e può determinare se un veicolo elettrico è efficiente o meno, non solo dal punto di vista economico ma anche da un punto di vista del comfort di guida.

La gestione di energia consiste nel trasferimento di energia da un sistema di accumulo ad un altro ed include sia la quantità di energia sia il tempo con la quale è realizzato.

In questo capitolo verrà presentato un recente sistema batteria e supercondensatore impiegato ormai su molte auto elettriche.

I veicoli elettrici, come molti altri sistemi elettrici, hanno una caratteristica comune nei loro profili di carico; questi carichi sono pulsanti, cioè sono costituiti da impulsi di potenza. La durata tipica di questi impulsi va di solito dalle centinaia di millisecondi a qualche secondo. Un sistema provvisto di batterie e supercondensatori può gestire questi impulsi di potenza in modo migliore rispetto ad un sistema di sole batterie. Ricerche sui veicoli elettrici hanno dimostrato che la combinazione di supercondensatori e batterie realizza una maggior autonomia e una miglior efficienza di accumulo rispetto al sistema di sole batterie.

I supercondensatori non sono capaci di immagazzinare sufficiente energia rispetto alle batterie, ma, al contrario, sono capaci di accettare energia durante la frenatura a recupero e rigenerarla subito dopo per un'accelerazione. Inoltre i supercondensatori hanno dinamiche e densità di potenza elevate, sono cioè capaci di assorbire e dare potenza molto velocemente e molto efficacemente rispetto alle

batterie e possono essere caricati/scaricati più di un milione di volte. Le batterie al contrario hanno un numero di cicli ridotto, ma riescono ad immagazzinare elevati livelli di energia e quindi la loro funzione principale è fornire energia al supercondensatore per mantenerlo carico.

Si può quindi dire che il supercondensatore è responsabile per le domande transitorie di potenza, mentre la batteria è responsabile per richieste di energia costante. Questo sistema, composto da batteria e supercondensatore, consente accelerazioni e decelerazioni con le minime perdite di energia e permette di ridurre gli stress sulla batteria poiché i picchi ad elevata potenza vengono assorbiti dal supercondensatore. Inoltre consente una maggior vita utile della batteria in quanto l'estrazione di corrente avviene a bassi livelli.

### 2.1.1 Convertitore DC/DC

I tradizionali sistemi installati a bordo dei veicoli elettrici utilizzano una connessione diretta (in parallelo) tra batteria e supercondensatore. Il principale svantaggio di questo sistema è che la potenza condivisa tra i due sistemi di accumulo è determinata dalle loro rispettive resistenze serie. Quindi la tensione in uscita da questo sistema non è regolata e, poiché segue la curva di scarica della batteria, può variare considerevolmente tra il valore di piena carica e quello di piena scarica. Il sistema qui presentato incorpora invece un convertitore DC/DC tra i due elementi di accumulo, come mostrato in Figura 2.1.

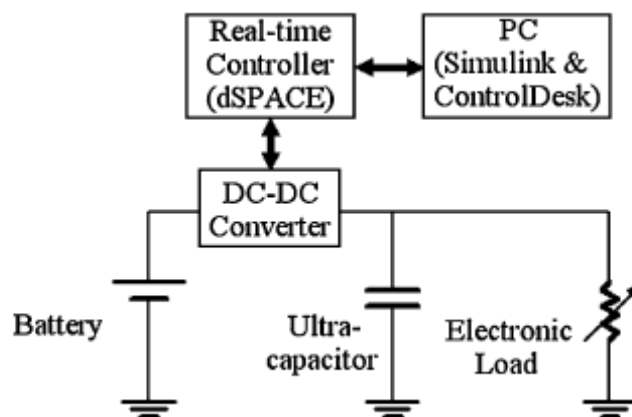


Fig.2.1\_Sistema con la presenza del convertitore DC/DC

Il convertitore è usato rigorosamente per controllare il flusso di energia tra la batteria e il supercondensatore/carico, migliorando così l'efficienza energetica. Quindi il convertitore, regolando i flussi di energia, va a proteggere la batteria allungandone la vita utile. Studi dimostrano che le perdite totali di un sistema col convertitore DC/DC possono essere ridotte di un terzo rispetto alle perdite di un sistema formato da sole batterie e supercondensatori di pari dimensioni.

### **2.1.2 Funzionamento**

Il principio di funzionamento di questo sistema dipende essenzialmente dalla situazione del carico, qui brevemente descritto:

- quando la corrente del *carico* è *bassa*, il convertitore è controllato in modo che la batteria si scarichi a valore costante indipendentemente dalla sua tensione e vada a ricaricare il supercondensatore. La velocità di scarica è determinata dal valore medio del carico ed è controllata attraverso un determinato sistema di retroazione. La corrente viene controllata in modo da non superare i limiti di sicurezza e proteggere quindi la batteria. A questo punto il supercondensatore è caricato a corrente costante, ma il livello di corrente è maggiore di quello della batteria e dipende dal duty cycle del convertitore.
- quando la potenza da fornire al *carico* è *alta*, sia la batteria che il supercondensatore forniscono corrente al carico. Anche in questo caso la corrente fornita dalla batteria è controllata ad un livello costante così che il resto della corrente sarà fornito dal supercondensatore. Il controllo della corrente di batteria ad un valore costante sia per i cicli di carica che di scarica, fa sì che la batteria funzioni sempre a regime costante, cioè in un regime elettricamente e termicamente preferito per la sicurezza e la vita utile della batteria. Il sistema può quindi fornire potenze elevate senza estrarre alte correnti dalla batteria.



### ***2.1.3 Vantaggi***

L'inserimento del supercondensatore e del convertitore rispetto al sistema di sole batterie porta a questi vantaggi:

- Minori perdite e quindi miglior rendimento del sistema, soprattutto a fronte di picchi di carico;
- Maggior sicurezza ed estensione della vita utile per le batterie;
- La tensione sul supercondensatore può differire da quella della batteria;
- I livelli di potenza possono essere più elevati rispetto a quelli del sistema senza convertitore (senza superare i limiti di corrente massima di batteria);
- I livelli di tensione sono tenuti costanti;
- Il convertitore DC/DC serve anche come regolatore di carica per la batteria.

L'aggiunta del convertitore DC/DC porta anche degli svantaggi, come quello delle maggior perdite dovute alla conduzione e alla commutazione delle valvole inserite all'interno del convertitore. Inoltre il convertitore aumenta il costo e il peso dell'intero sistema, soprattutto per colpa dell'induttore che diventa elevato quando sono richiesti alti trasferimenti di potenza.

E' sfida per i progettisti di automobili degli ultimi anni studiare convertitori con i più alti livelli di efficienza possibile ed allo stesso tempo cercare di ridurre il peso ed il costo.

## ***2.2 BATTERIA***

Rispetto al tempo di vita, un'altra importante differenza tra i veicoli elettrici e quelli a combustione interna consiste nell'utilizzo di consistenti batterie di accumulatori. I moderni accumulatori hanno dimostrato di poter superare in durata gli stessi veicoli elettrici su cui sono installati. Ad esempio gli accumulatori provati da Toyota hanno mostrato solo un minimo calo di risultati dopo aver percorso 240.000 chilometri. Certamente nell'utilizzo reale i dati mostrano risultati peggiori. Così se si fanno 240.000 chilometri su una pista di test si possono confermare i dati rilevati da Toyota ma se, in un utilizzo reale, si percorrono all'anno 10.000 chilometri, le batterie di accumulatori andranno sostituite dopo 30.000 chilometri con una spesa di circa 20.000 Euro e con un costo pari a 0,67 €/km. Trattandosi però di una tecnologia recente i futuri progressi porteranno sicuramente ad avere batterie con una durata utile maggiore.

Le batterie di cui si parla in questo tipo di applicazioni sono le normali batterie ricaricabili.

Le batterie ricaricabili sono batterie la cui carica può essere completamente ristabilita mediante l'applicazione di un'adeguata quantità di energia elettrica.

Esse sono tipicamente il componente più costoso delle automobili elettriche. Sebbene il costo di fabbricazione della batteria sia elevato, l'aumento della loro produzione porterà ad un enorme abbassamento dei costi qualora la produzione dei veicoli elettrici raggiunga le stesse dimensioni dell'attuale produzione dei veicoli a combustione interna. Le nuove tecnologie di produzione delle batterie, competitive in termini di costo con i motori a combustione interna, consentiranno un importante abbassamento dei costi nel momento in cui decadranno i relativi e molto costosi brevetti.

Le batterie delle vetture elettriche devono essere ricaricate periodicamente, solitamente dalla rete elettrica.

La carica viene di solito eseguita in due fasi. In una prima fase la carica è realizzata a corrente costante fino al raggiungimento di una tensione pari a 2,4V per elemento (per le batterie Pb-acido). Successivamente si completa la carica a tensione costante

e si introduce una corrente di mantenimento che è dell'ordine di 1 mA per ogni Ah di capacità.

La durata della ricarica, comunque, sarà sempre tale da non permettere alcun paragone con l'operazione di rifornimento di un veicolo a combustione.

Il tempo di ricarica viene determinato principalmente dalla corrente trasmissibile da parte della connessione alla rete elettrica.

Per sorgenti di potenza di 10 KW, anche ricaricare una piccola batteria di 250 Ah richiede circa un'ora.

Tuttavia a molte persone non serve una ricarica veloce perché ad una certa ora della giornata dispongono di sufficiente tempo (da 6 a 8 ore), di giorno nel parcheggio dove lavorano, oppure di notte nel garage di casa. Siccome durante la ricarica l'auto non deve essere vigilata, ci vuole meno di mezzo minuto per attaccare la presa oppure staccare il proprio veicolo. Molti conducenti di automobili elettriche però preferirebbero rifornirsi a casa, evitando la congestione ed il viaggio alla stazione di servizio. Per questo motivo, in questi ultimi anni, alcune grandi aziende dell'energia (Enel) hanno abilitato alcuni parcheggi con prese elettriche di corrente, provviste di sistemi di ricarica automatizzati, in modo da ricaricare facilmente le automobili: le così dette "colonnine".

Il trasporto di corrente dalla "colonnina" all'auto può avvenire in due modi:

- Per *via conduttiva*: una presa di corrente più o meno normale, attraverso un trasformatore ed un raddrizzatore, fornisce alla batteria l'energia necessaria alla ricarica;
- Per *via induttiva*: l'avvolgimento primario (adeguatamente protetto) viene inserito in una fessura del veicolo, dove si accoppia con l'avvolgimento secondario. Con una connessione di questo tipo si elimina il rischio di folgorazione dal momento che non vi sono parti accessibili sotto tensione.

Mentre nel primo caso la circuiteria di regolazione per la carica può essere tutta dal lato della colonnina, nel secondo caso buona parte della circuiteria dovrebbe

necessariamente essere a bordo del veicolo (con conseguente complicazione ed appesantimento del veicolo stesso).

Un sistema creato in modo da nascondere gli elettrodi può rendere il sistema conduttivo sicuro quasi quanto quello induttivo. In questo modo il sistema conduttivo tende ad essere meno costoso ed anche molto più efficiente per la presenza di una minore quantità di componenti.

Una alternativa ai lunghi tempi di ricarica è quella di sostituire rapidamente le batterie di accumulatori scarichi con altri già carichi. Queste batterie (spesso alloggiare in un doppio fondo sotto l'abitacolo, tra le ruote, oppure sotto il bagagliaio) possono scorrere ed essere rapidamente sostituite dal personale della stazione di servizio oppure da sistemi robotizzati.

Queste batterie scariche potrebbero essere sostituite con altre cariche in stazioni di servizio, rivendite di auto, grandi magazzini oppure parcheggi. Con una dimensione standard, comode maniglie, un peso ridotto a 20-40 Kg e rotelline, il cambio di uno o più moduli è molto più veloce (nessun tempo di ricarica) che una normale ricarica. Tuttavia il costo totale di tale operazione si rivela molto antieconomico rispetto alla più semplice ricarica.

La modalità di ricarica varia a seconda del tipo di batteria. Gli accumulatori NiMH, Li-ion e Li-pol possono essere ricaricati immediatamente, le batterie NiCd, ora non più usate, devono essere prima scaricate completamente allo 0% e poi ricaricate per impedire l'effetto memoria. La pila zinco-aria (che non può essere ricaricata in modo semplice), deve essere portata in un centro industriale e "rigenerata" con un procedimento elettro-chimico.

Un'altra importante proprietà delle batterie è la quantità di carica che possono accumulare.

Infatti l'effettiva autonomia di un veicolo elettrico dipende sia dal numero e dal tipo di batterie utilizzate sia dalle prestazioni richieste dal guidatore del veicolo. Il peso e la tipologia delle batterie, e quindi del veicolo, hanno un forte impatto sull'autonomia energetica come avviene per i tradizionali veicoli a benzina. Le batterie utilizzate sono solitamente le normali batterie al piombo-acido facilmente reperibili e poco costose. Con questo tipo di batterie si raggiungono normalmente autonomie comprese tra 30 e 80 km, ma il miglioramento tecnologico degli ultimi

anni ha portato questa distanza ad oltre 100 Km. Le batterie NiMH hanno una maggiore densità di energia e possono consentire autonomie dell'ordine dei 200 km, mentre le auto elettriche equipaggiate con le nuove batterie al litio consentono autonomie dell'ordine dei 400-500 km.

Le singole batterie sono di solito raggruppate in grandi gruppi a varia tensione e capacità per ottenere l'energia richiesta. La durata delle batterie dovrebbe essere considerata quando si calcola il costo di investimento, in quanto le batterie si consumano e devono essere sostituite. Il decadimento delle batterie dipende da numerosi fattori, tra cui stress ed impulsi di corrente, che riducono la vita utile e le prestazioni della batteria stessa.

Nell'utilizzo quotidiano in strade di città e campagna alcuni veicoli, utilizzando batterie NiMH, hanno avuto durate operative eccedenti i 160.000 km, con poca o nessuna degradazione della capacità di carica e della tensione fornita nell'ambito del loro tragitto quotidiano.

Ne esistono di vari tipi, con diverse capacità elettriche, differenti composizioni chimiche, forme e dimensioni.

Qui di seguito sono presentate le batterie ricaricabili maggiormente utilizzate nei veicoli elettrici: l'accumulatore piombo-acido, la batteria NiMH, la litio-ione e la pila zinco-aria.

### ***2.2.1 Batteria acida al piombo***

La cella piombo-acida è il costituente fondamentale dei comuni accumulatori per auto. Utilizzano un anodo fatto di polvere di piombo (Pb) spugnosa ed un catodo di diossido di piombo (PbO<sub>2</sub>).

L'elettrolita è una soluzione di acido solforico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). La differenza di potenziale (a circuito aperto) ai poli è di 2,12 V. Generalmente, infatti, negli accumulatori per automobili troviamo sei celle piombo-acide in serie, che generano una differenza di potenziale complessiva di 12,70 V.

Negli accumulatori moderni, infine, si utilizza una lega di piombo che inibisce l'elettrolisi dell'acqua, potenzialmente pericolosa in quanto producendo idrogeno e ossigeno gassosi è a rischio di esplosioni.

*Vantaggi:* Eroga correnti molto elevate, affidabile e di lunga vita, funziona bene anche a basse temperature.

*Svantaggi:* Il piombo è un metallo pesante e tossico, perdita di capacità dovuta a stress meccanici.

### **2.2.2 Batteria al nichel-metallo idruro**

Le batterie NiMH sono un'evoluzione di quelle nichel-cadmio (NiCd) e rispetto a queste ultime presentano il vantaggio di avere una densità energetica (Wh/kg o Wh/dm<sup>3</sup>) del 30-40% in più, e di aver eliminato l'uso del cadmio, un metallo pesante e pericoloso. In particolare, le leghe metalliche impiegate sono in grado di immagazzinare e successivamente rilasciare una quantità d'idrogeno un migliaio di volte superiore al proprio volume. L'elettrolita impiegato è una soluzione diluita di idrossido di potassio (KOH) cui sono aggiunti, in minor quantità, altri composti chimici per migliorare le prestazioni della batteria. Il separatore tra anodo e catodo, che impedisce il contatto elettrico tra gli elettrodi ma ne permette un efficiente scambio ionico, è costituito da un sottile film a base di nylon. La differenza di potenziale ai poli è di 1,2 V. Le batterie al nichel-metallo idruro (NiMH) stanno ormai sostituendo le vecchie batterie al nichel-cadmio (NiCd), più tossiche e meno efficienti.

*Vantaggi:* Leggera e potente, si ricarica velocemente

*Svantaggi:* Si scarica anche se non utilizzata, leggero effetto memoria (*lazy battery*).

### **2.2.3 Batteria al litio**

Gli accumulatori al litio hanno densità energetica, numero di cicli di carica-scarica e prestazioni complessive parecchio maggiori rispetto a quelle possedute dalle batterie commerciali precedentemente descritte, ma anche costi più elevati.

Questa batteria utilizza soluzioni non acquose di solventi ad elevata permittività elettrica come il carbonato di propilene, carbonato di etilene, dimetilsolfossido, ecc., nei quali vengono disciolti sali di litio (LiPF<sub>6</sub>, LiBF<sub>4</sub>, LiClO<sub>4</sub> e LiAsF<sub>6</sub>) e

successivamente aggiunti altri composti organici (tetraidrofurano, dietilcarbonato ecc.) per incrementare la conducibilità ionica delle soluzioni. All'anodo abbiamo degli atomi di litio "immersi" in strati di grafite, il catodo è un suo sale (solitamente  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ ) e l'elettrolita è una soluzione di perclorato di litio ( $\text{LiClO}_4$ ) in etilencarbonato ( $\text{C}_2\text{H}_4\text{CO}_3$ ), un solvente organico. La differenza di potenziale ai poli è di 3,7 V.

Esiste una variante: batteria al litio-polimero che ha caratteristiche simili, ma in cui la densità energetica è maggiore del 20% rispetto ad una Litio-Ione classica con un ciclo di vita leggermente inferiore.

Il suo grande vantaggio è dato dalla possibilità di avere batterie di qualsiasi forma e dimensione e, fatto non secondario, più sicure, in quanto l'elettrolita allo stato solido in caso di rottura accidentale delle batterie non fuoriuscirebbe scongiurando così possibili danni al caricabatteria o all'apparecchio utilizzatore.

*Vantaggi:* estremamente potente e leggera, nessun *effetto memoria*.

*Svantaggi:* piuttosto costosa, pericolosa, il solvente può essere infiammabile.

#### **2.2.4 Pila zinco-aria**

Gli accumulatori zinco-aria appartengono alla categoria delle celle a combustione, dove lo zinco è il combustibile e l'ossigeno è il comburente. Quando le superfici degli elettrodi di zinco metallico si sono ossidate, diventando ossido di zinco, la batteria può considerarsi scarica. La batteria non può essere ricaricata dall'utente, ma deve essere sostituita da un altro nuovo pacchetto di queste batterie. Il vecchio pacchetto viene "ricaricato" a parte (in realtà il diossido di zinco viene "rigenerato", con una procedura elettro-chimica viene deossidato a zinco metallico) nell'industria o nella stazione di servizio automatizzata che si occuperà di questo ciclo industriale. Un Kg di batteria zinco-aria fornisce circa 110-200 Wh, che è circa dalle 6 alle 10 volte la densità energetica di un comune accumulatore piombo-acido (il più utilizzato nelle odierne automobili). In base a calcoli teorici e perfezionamenti tecnologici si potrebbe arrivare a densità energetiche fino a 1000 Wh/Kg. Il costo di produzione è inferiore a quello degli accumulatori piombo-acido.

*Vantaggi:* maggior rapporto carica/peso, no presenza di metalli pesanti tossici, totale inesistenza dell' effetto memoria, maggior durata e soprattutto maggior sicurezza (non hanno alcuna tendenza ad incendiarsi se danneggiate).

*Svantaggi:* risentono molto della bassa temperatura, dell'umidità e dell'inquinamento che porta ad una riduzione della reattività dell'ossigeno atmosferico. Non è possibile ricaricare queste batterie in casa e tanto meno impiegarle nel recupero dell'energia in frenatura.



### **2.3 SUPERCONDENSATORE**

Un discorso da fare a parte è per i supercondensatori che sono particolari condensatori che hanno la caratteristica di accumulare una quantità di carica elettrica eccezionalmente grande rispetto ai condensatori tradizionali; possono arrivare ad oltre 1000 F (farad). I supercondensatori sono prevalentemente utilizzati come accumulatori di energia elettrica caratterizzati da elevate potenze specifiche ed energie di gran lunga superiori rispetto ai condensatori convenzionali. Rispetto agli accumulatori chimici (batterie) presentano il vantaggio di poter essere caricati o scaricati istantaneamente, garantendo così un'elevatissima potenza specifica. Lo svantaggio più rilevante, sempre rispetto alle batterie, è la bassa energia immagazzinata.

I supercondensatori sono di solito costituiti da due elettrodi di materiale vario (in genere alluminio) ricoperti da carbone attivo ad elevata area superficiale (fino a 2000 m<sup>2</sup>/g), un separatore ed un elettrolita. Il separatore ha la funzione di indirizzare meglio il flusso di ioni soprattutto ad alta densità di corrente. In alcuni dispositivi gli elettrodi possono essere costituiti da ossidi di metalli (es. ossido di rutenio) o polimeri conduttori; in questo caso la reazione di carica/scarica del supercapacitore non è di tipo elettrostatico ma bensì faradico (induzione di corrente elettrica), sono cioè reazioni elettriche di velocità confrontabile con quelle di tipo elettrostatico.

L'energia immagazzinata è superiore rispetto ad un condensatore classico poiché la separazione di carica si ha nel doppio strato elettrolitico, avviene cioè a distanze di scala molecolare.

Di seguito sono scritte le equazioni di un condensatore a facce piane e parallele:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r S/d \quad (2.1)$$

$$W = \frac{1}{2}CV^2 \quad (2.2)$$

dove  $C$  è la capacità,  $\varepsilon_0$  ed  $\varepsilon_r$  rispettivamente costante dielettrica del vuoto (8,859 pF/m) e relativa (o del mezzo),  $S$  è l'area superficiale della piastra piana,  $d$  è lo spessore del materiale dielettrico,  $W$  è l'energia accumulata e  $V$  è la tensione di lavoro del condensatore. Da tali equazioni è evidente che un aumento dell'energia

accumulata è ottenibile intervenendo sul valore della capacità o sulla tensione applicata. L'aumento della capacità può essere conseguito quindi in due modi:

- scegliendo materiali dielettrici con un'elevata costante dielettrica (per questo motivo sono stati prodotti condensatori a dielettrico ceramico, ossidi di titanio-stronzio e titanio-bario con una  $\epsilon_r$  che può arrivare anche a 200000);
- oppure cercando di aumentare il rapporto  $S/d$ .

In un tradizionale condensatore, l'energia è immagazzinata grazie allo spostamento degli elettroni (portatori di carica) da una lastra di metallo all'altra. Questa separazione di cariche crea un potenziale tra le due lastre, il quale può essere convogliato in un circuito esterno.

L'energia totale immagazzinata è in questo modo proporzionale sia alla quantità di carica immagazzinata sia al potenziale tra le due lastre. La carica immagazzinata è prevalentemente funzione delle dimensioni e delle proprietà dei materiali di cui sono costituite le lastre, mentre il potenziale è dato dal break down del dielettrico o della sostanza che separa le piastre. La variazione del materiale separatore tra le lastre porta ad una diversa produzione di tensioni che possono essere immagazzinate.

Quindi ottimizzando e migliorando questi materiali si ricavano elevate densità di energia a pari dimensione del condensatore.

I supercondensatori non usano un tradizionale dielettrico. Questi condensatori infatti usano lastre formate da due strati, le cui loro proprietà elettriche portano ad una effettiva separazione delle superfici veramente piccola (nell'ordine dei nanometri).

La mancanza di un dielettrico voluminoso permette alle lastre una superficie di contatto molto maggiore, la quale porta ad elevate capacità in ridotti spazi.

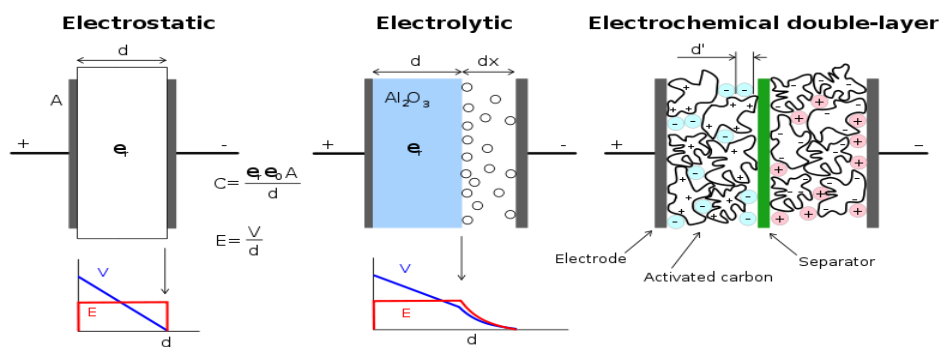
In un supercondensatore ogni strato è abbastanza conduttivo, ma il modo con i quali sono messi in contatto non consente il passaggio di alte correnti tra gli strati. Non si può inoltre modificare di molto la tensione di lavoro nominale, che è limitata dai bassi valori di potenziale di decomposizione dell'elettrolita (che nella maggior parte delle soluzioni può raggiungere approssimativamente i 3 V); per avere

dispositivi con elevate tensioni di lavoro bisogna perciò connettere in serie un numero elevato di celle unitarie, con il doppio svantaggio di avere una riduzione della capacità totale ed un altrettanto aumento della resistenza di serie.

Per superare questi problemi sono nati allora supercondensatori con una struttura fisica e chimica particolarmente interessante.

In particolare i supercondensatori migliorano la densità di immagazzinamento attraverso l'utilizzo di materiali nano porosi, ad esempio i carboni attivi, anziché i tradizionali dielettrici.

I carboni attivi sono materiali, contenenti principalmente carbonio sottoforma di microcristalli di grafite, trattati in modo da ottenere una struttura porosa con una vasta area superficiale interna.



**Fig.2.2\_Confronto tra condensatori tradizionali e supercondensatori**

Non sono però materiali perfetti per queste applicazioni. Gli elettroni sono abbastanza grossi, specialmente quando sono circondati da solventi, rispetto ai buchi lasciati dal carbonio e quindi non riescono a riempire i buchi, limitando così l'immagazzinamento. Recenti ricerche sui supercondensatori si sono focalizzate sul miglioramento dei materiali in modo da offrire la massima superficie utilizzabile. Un prototipo sviluppato alla MIT ha rimpiazzato i carboni attivi con dei nanotubi di carbone, i quali grazie alla loro struttura fisica, possono immagazzinare la stessa energia dei carboni attivi, ma con il vantaggio di una maggior area disponibile.

La presenza di molti vuoti e canali tra i grani di questo film suggerisce una elevata porosità e quindi una bassa densità di energia.

Inoltre l'alta capacità di immagazzinamento elettrostatico nei supercondensatori non produce cambiamenti nel volume, cosa invece presente nelle ossidoriduzioni delle batterie. Questi cambiamenti di volume sono la principale causa del numero limitato di cicli di vita delle batterie: circa mille cicli per una batteria acida al piombo, milioni di cicli per i supercondensatori.

Le batterie, le quali sono basate sul movimento di cariche in un liquido, hanno elevati tempi di carica e scarica.

I condensatori, al contrario, possono essere caricati e scaricati ad un valore che è limitato solamente dalla corrente massima ammissibile dagli elettrodi. Così mentre i supercondensatori hanno una densità di energia che è circa un decimo di quella delle batterie, la loro potenza specifica è generalmente tra le 100 e 1000 volte più grande.

Per concludere si elencano brevemente vantaggi e svantaggi dei supercondensatori. La Tabella 2.1 mostra un confronto diretto tra le batterie ed i supercondensatori.

### **2.3.1 Vantaggi**

- Lunga durata, migliaia di cicli;
- Elevata potenza specifica;
- Tempi di scarica e carica brevissimi;
- Bassissimo valore della resistenza interna;
- Miglior sicurezza data dall'assenza di elettroliti corrosivi e materiali a bassa tossicità;
- Effetto memoria totalmente assente e assenza di problemi causati da eventuali sovraccarichi in quanto, come si sa dalla natura dei condensatori, una volta terminato il processo di carica non viene più accettata energia;
- Alta efficienza energetica.

### 2.3.2 Svantaggi

- Bassa energia specifica, cioè non sono in grado di accumulare tanta energia;
- Tempi di auto scarica (scarica in circuito aperto) brevissimi, cioè si scaricano molto velocemente se non utilizzate;
- Basse tensioni per singole celle (1-3V per cella). Per ottenere alti livelli di tensione bisogna collegare in serie un elevato numero di celle, quindi è richiesto un bilanciamento delle tensioni tra le celle.

### 2.3.3 Confronto Batterie - Supercondensatori

	BATTERIE	SUPERCONDENSATORI
Energia Specifica	30 - 45 Wh/Kg	4 – 5 Wh/Kg
Potenza specifica	60 - 300 W/Kg	5000 W/Kg
Cicli di Carica/Scarica	1000 cicli	500.000 cicli
Tempo di Ricarica	Ore	Minuti
Rendimento	70% - 90%	90% - 97%

**Tabella 2.1\_Confronto diretto tra vantaggi e svantaggi di Batterie e Supercondensatori**

### ***PROGETTO DEL CONVERTITORE***

In questo capitolo verrà presentata la progettazione del convertitore DC/DC studiato.

I convertitori DC-DC sono convertitori elettronici che hanno come scopo principale la regolazione di tensione, offrono cioè un metodo di generare diversi livelli di tensione controllati.

Sono convertitori switch (così chiamati a causa dell'utilizzo di valvole controllate che commutano in apertura e chiusura) utilizzati per convertire una tensione continua in un'altra sempre in corrente continua. Questi circuiti tipicamente compiono la conversione fornendo una tensione continua ad un induttore. Nella prima parte del periodo (di solito in un range di frequenza tra 1 kHz e 100 kHz) una corrente elettrica fluisce nell'induttore il quale immagazzina energia magnetica; nella seconda parte viene aperto l'interruttore (viene azzerata la corrente) in modo che l'induttore trasferisce automaticamente l'energia immagazzinata al carico in maniera controllata. Agendo sul duty cycle, cioè sul rapporto tra lo stato attivo ON e il periodo di commutazione  $\left( D = \frac{T_{on}}{T_{sw}} \right)$ , la tensione d'uscita viene regolata anche

se la corrente d'uscita continua a cambiare. Questo metodo di conversione è molto efficiente (compreso tra 85% e il 98%). Per questo motivo, grazie cioè all'elevato rendimento, si può aumentare l'autonomia del veicolo e recuperare efficacemente l'energia dalla frenatura a recupero.

La maggior parte dei convertitori DC/DC è unidirezionale, può cioè trasferire energia in una sola direzione, tipicamente dall'ingresso all'uscita.

Comunque tutti i convertitori possono diventare bidirezionali rimpiazzando semplicemente tutti i diodi con valvole controllate (IGBT e MOSFET). Il convertitore bidirezionale trova largo impiego in molte applicazioni, soprattutto quelle che richiedono l'uso della frenatura a recupero.

Esistono due tipi di convertitori: quelli isolati e quelli NON isolati.

I convertitori DC-DC isolati si basano sullo stesso principio di funzionamento di quelli non isolati, ma mantengono isolati elettricamente ingresso e uscita tramite un trasformatore di isolamento (offrono cioè isolamento galvanico). Ciò permette di avere tensioni nell'ordine delle centinaia o migliaia di volt e con grandi potenze. Tuttavia questa configurazione avrà un costo maggiore a causa della presenza del trasformatore ed un rendimento minore a causa delle perdite sugli avvolgimenti del trasformatore stesso. I convertitori possono inoltre essere suddivisi in base alle loro caratteristiche.

In base alla commutazione e alle perdite si dividono in:

- *Convertitori Hard-Switched*: le valvole commutano istantaneamente con tensioni e correnti diverse da zero (maggiori perdite);
- *Convertitori Soft-Switched (risonanti)*: l'introduzione di un circuito L-C fa in modo che le valvole commutino quando la tensione o la corrente passa per lo zero (riduce notevolmente le perdite di commutazione).

In base alla corrente che attraversa l'induttore:

- *Modalità Discontinua*: la corrente che fluisce nell'induttore va a zero e vi permane prima della fine del periodo;
- *Modalità Continua*: la corrente non va mai a zero durante l'intero periodo.

Di solito per elevate potenze si tende ad utilizzare il convertitore in modalità continua, mentre per basse potenze è preferito usarlo in modalità discontinua.

L'uscita del convertitore è progettata per avere una tensione livellata e costante. Sfortunatamente tutti i convertitori producono una tensione in uscita diversa dal reale valore atteso. Questa variazione di tensione è chiamata rumore d'uscita e nei convertitori DC/DC si somma al rumore dato dalle valvole alla frequenza di commutazione e alle sue armoniche.

Come detto prima un convertitore può diminuire o aumentare la tensione nella sua uscita ed in base a questo varia lo schema del convertitore:

- *Convertitore BUCK*: è un convertitore abbassatore, cioè la tensione d'uscita ha un valore minore od uguale a quello di ingresso e ha la seguente funzione di trasferimento  $V_o = D * V_i$  ;
- *Convertitore BOOST*: funziona da convertitore elevatore in cui la posizione della valvola e del diodo sono invertite in modo da produrre una tensione in uscita maggiore di quella in ingresso. La sua funzione di trasferimento è  $V_o = \frac{1}{(1-D)} * V_i$  .
- *Convertitore BUCK-BOOST*: è una combinazione dei modelli precedenti; oltre ad aumentare e a diminuire la tensione, può invertire il segno. La sua funzione di trasferimento è  $V_o = \frac{-D}{(1-D)} * V_i$

### **3.1 OBIETTIVI**

Il lavoro in esame consiste nella progettazione e nel controllo di un convertitore bidirezionale con potenza nominale di 20 KW e con l'obiettivo di migliorare l'efficienza energetica e lo scambio di energia. Il sistema come detto nel capitolo precedente consiste di una batteria e di un supercondensatore.

La batteria ha un valore di tensione nominale di 200 V. Il valore massimo da non superare è 210 V e la minima tensione di scarica è 150 V.

Il supercondensatore invece ha una tensione nominale di 320 V, con tensione massima di 335 V e tensione minima di 190 V (60% della tensione nominale).

Le correnti circolanti nelle valvole possono quindi arrivare a circa 100 A nelle condizioni peggiori. Per questo motivo devono essere presi in considerazione vari accorgimenti per il raffreddamento delle valvole e altri per la protezione e la sicurezza del convertitore e delle persone.

Per raggiungere un buon rendimento dell'intero sistema bisogna basarsi principalmente sulla riduzione delle perdite del convertitore. I convertitori nella loro pratica hanno inevitabilmente delle perdite e delle cadute di tensione causate da vari fattori, tra i quali la resistenza negli avvolgimenti di induttore e trasformatore,



per la resistenza nello stato “on” dei Mosfet, caduta di tensione diretta nei diodi, correnti parassite e perdite per isteresi nell’induttore e trasformatore. E’ dunque obiettivo del progettista ridurre al minimo tutte queste perdite in modo da realizzare il convertitore con la più alta efficienza possibile. Per esempio nei moderni convertitori possono essere usate nuove ed innovative tecnologie, come quella dei diodi Schottky al posto dei tradizionali diodi in silicio. Questi diodi sono costituiti da una giunzione metallo-semiconduttore e hanno il grande vantaggio di avere bassissime perdite, quindi di ridurre ulteriormente le perdite dell’intero sistema, e di avere tempi di commutazione molto brevi. Hanno d’altra parte lo svantaggio di un costo elevato, molto maggiore rispetto ai tradizionali diodi in silicio. Nel 2001 la Siemens Semiconductor ha presentato un nuovo diodo Schottky in carburo di silicio (SiC) con ottime prestazioni e perdite ridotte.

Dopo aver riassunto i principali obiettivi si può procedere alla progettazione vera e propria del convertitore. I prossimi paragrafi saranno quindi focalizzati sullo schema, sul calcolo dei vari componenti e sul principio di funzionamento del convertitore.

### **3.2 SCHEMA**

Il primo vincolo per la scelta dello schema di un convertitore è quello legato all’unidirezionalità o meno della corrente. Il convertitore in esame deve essere inevitabilmente bidirezionale in modo da poter utilizzare l’energia recuperata dal sistema di frenatura. I tradizionali convertitori elevatore e abbassatore nella loro forma base sono capaci di trasferire energia in una sola direzione e per questo motivo non possono essere usati in questa applicazione. Non si può neanche

utilizzare un convertitore buck-boost perché inverte la tensione di ingresso. Una possibilità può essere quella di usare un convertitore isolato (ad esempio un Half-bridge od un Full-bridge) il quale risponde a tutte le nostre richieste. Ciò nonostante si è scelto di non utilizzare questa tipologia poiché non è richiesto un isolamento tra la parte a monte e a valle del convertitore e, poiché la batteria, supercondensatore e motore sono messi a terra, non c'è nessun rischio di scariche. Altri motivi che confermano questa scelta sono le elevate perdite prodotte e la difficoltà di progettazione del trasformatore (alto rischio che vada in saturazione il nucleo ferromagnetico). Prendendo spunto dallo schema di un convertitore Full-Bridge si è arrivati all'attuale modello del convertitore. Lo schema mostra la disposizione a ponte di 4 valvole, due per ogni ramo (due superiori e due inferiori). Si può facilmente notare che questo ponte è abilitato a trasferire energia in entrambe le direzioni nel quale sia la tensione che la corrente possono essere invertite. Questo convertitore può quindi aumentare e diminuire la tensione in entrambe le direzioni e non solo in una direzione come avviene nei tradizionali convertitori. Per far sì che il convertitore sia bidirezionale, ogni valvola del circuito deve avere in anti-parallelo un diodo in modo così da far scorrere la corrente in direzione opposta.

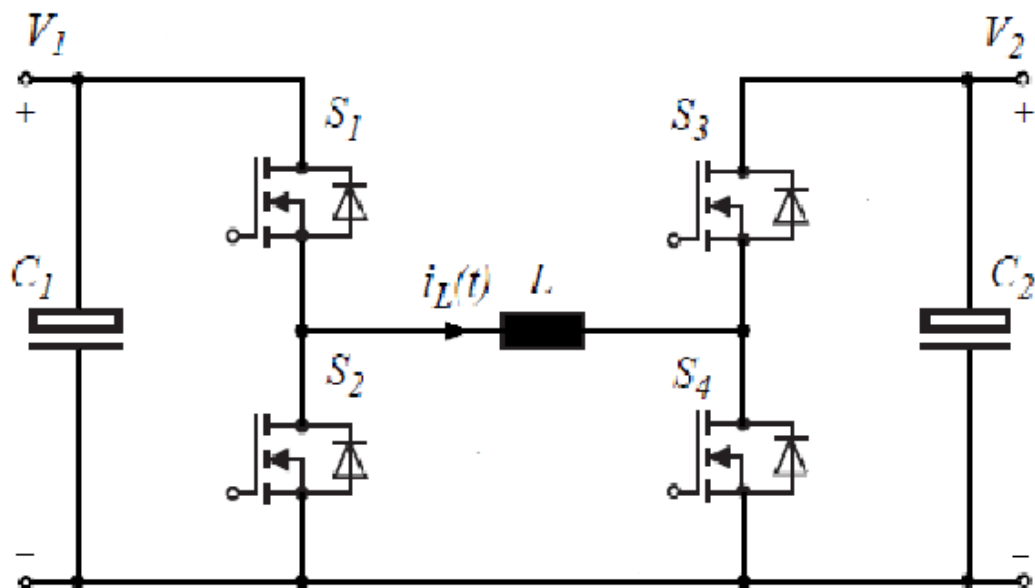


Fig.3.1\_Topologia del convertitore

### **3.3 PROGETTAZIONE**

Verrà adesso presentata la parte centrale e più importante di questo lavoro.

Per evidenziare le complessità della progettazione, qui di seguito è presentata una analisi dettagliata e il calcolo dei principali componenti.

Per un corretta progettazione del convertitore sono richiesti quattro parametri fondamentali.

#### **3.3.1 Induttore**

Il calcolo dell'induttanza  $L$  è la parte più critica per la progettazione del convertitore. La sua scelta è considerata particolarmente difficile siccome il suo calcolo può influire pesantemente sulle prestazioni del convertitore quali l'efficienza, stabilità, l'incompatibilità elettromagnetica EMI, la tipologia e la struttura del circuito.

Il calcolo dell'induttanza viene eseguito in due fasi.

La prima fase è relativa alla modalità di funzionamento. In questo caso viene scelto il funzionamento del circuito in modalità continua (CCM), modalità tipicamente utilizzata per questo tipo di applicazioni. La modalità continua, come precedentemente spiegato, implica che l'induttore non si scarichi completamente nel periodo di OFF ( $T_{OFF}$ ), cioè non raggiunga mai lo zero. Prima di tutto bisogna trovare il valore minimo di induttanza in modo da funzionare in modalità continua. Questo valore è stato calcolato utilizzando le formule della modalità continua e discontinua. Bisogna però trovare l'induttanza nelle due modalità di funzionamento, cioè sia come abbassatore Buck che come elevatore Boost. Per funzionare in modalità continua bisogna rispettare la condizione  $I > \Delta I$ .

Dalle formule, presenti ormai su qualsiasi libro di elettronica di potenza, la corrente  $I$  risulta

$$I = \frac{V_{out}}{R},$$

mentre il ripple di corrente  $\Delta I$  è uguale a:

$$\Delta I = \frac{V_{in} - V_{out}}{2L} D * T_{sw} = \frac{V_{out} * (1 - D) * T_{sw}}{2L}$$

L'induttanza  $L$  viene calcolata nelle peggiori condizioni, cioè quando il duty cycle è il minimo. Il minimo duty cycle teorico è zero, ma in pratica il convertitore funzionante in modalità Buck ha un duty cycle compreso tra  $D=0.468 - 1$ , e quindi il minimo duty cycle da utilizzare sarà  $D=0.468$ :

$$L > \frac{R * T_{sw} * (1 - D)}{2} = 53.2 \mu H . \quad (3.1)$$

dove  $T_{sw}$  è il tempo di switching (inverso della frequenza di switching),  $D$  è il duty cycle,  $V_{in}$  è la tensione di ingresso e  $V_{out}$  è la tensione d'uscita.

Questo vale per il caso di convertitore Buck. Per il convertitore Boost le cose sono leggermente diverse. La formula è quasi simile, ma la corrente  $I$  nel caso di convertitore Boost è uguale a

$$I = \frac{V_{out}}{(1 - D) * R}$$

L'induttanza, come nel caso Buck, viene calcolata quando il duty cycle è minimo. In questo caso il duty cycle teorico risulta  $D=1/3$  (ottenuto facendo la derivata prima dell'equazione qui sotto e ponendola poi a zero), che corrisponde esattamente al duty cycle pratico dato che il convertitore in questa fase funziona con un duty cycle compreso tra  $D=0 - 0.531$ . Può quindi essere calcolata l' induttanza in modalità Boost:

$$L > \frac{1}{2} * (1 - D)^2 * D * R * T_{sw} = 14.37 \mu H . \quad (3.2)$$

Il valore di induttanza finale è dato dal maggiore tra i due risultati.

Quindi, per non funzionare in modalità discontinua, il valore dell'induttanza deve essere maggiore di  $53,2 \mu H$ .

La seconda e più importante fase per il calcolo dell'induttanza è quella riferita al calcolo del ripple di corrente.

Un ben progettato convertitore dovrebbe avere un ripple di corrente compreso tra il 15% e il 20% della corrente di induttore. Perciò fissato il massimo ripple della corrente si può calcolare facilmente il valore minimo dell'induttore da inserire all'interno del circuito.

In questo studio si è scelto un ripple massimo di 15%.

Viene assunto inizialmente che le valvole siano ideali (resistenza di on  $R_{ON}$  uguale a zero, resistenza di off  $R_{OFF}$  infinita e nessun ritardo di commutazione) e diodo ideale. Anche in questo caso il valore finale dell'induttore sarà scelto come il massimo valore nei funzionamenti da Buck e da Boost.

Si calcola dapprima l'induttore nel funzionamento Buck:

$$\Delta I < \frac{V_{out}}{L} * (1 - D) * T_{sw} \quad L > \frac{V_{out}}{\Delta I} * (1 - D) * T_{sw} = 707 \mu H \quad (3.3)$$

e in seguito nel funzionamento Boost

$$\Delta I < \frac{V_{in}}{L} * D * T_{sw} \quad L > \frac{V_{in}}{\Delta I} * D * T_{sw} = 211 \mu H \quad (3.4)$$

Quindi, per mantenere un ripple di corrente sotto il 15%, deve essere un induttore con un valore minimo di 707  $\mu H$ .

Tenendo conto delle equazioni (3.1) e (3.2) sul vincolo della modalità continua e le equazioni (3.3) e (3.4) sul ripple di corrente, si è scelto così un induttore di  $L=707 \mu H$ .

Una altra importante scelta in fase progettuale può essere quella legata alla costruzione fisica dell'induttore.

Per ottenere un buon induttore bisogna ridurre il suo peso e volume e la sua resistenza serie deve essere minimizzata. Possono essere utilizzati dei conduttori laminati in modo da minimizzare l'effetto pelle alle alte frequenze pur mantenendo un piccolo volume. Potrebbero essere utilizzati conduttori in alluminio e non in rame in modo da avere un maggior rapporto conduttività/peso. Le equazioni dalla (3.5) alla (3.7) mostrano le relazioni tra il valore dell'induttanza, la riluttanza del nucleo ferromagnetico, la densità del flusso magnetico e le caratteristiche fisiche (lunghezza e sezione) dell'induttore.

$$L = \frac{N^2}{R} \quad (3.5)$$

$$R = \frac{l}{\mu r \cdot \mu o \cdot A} \quad (3.6)$$

$$B = \frac{N \cdot I}{R \cdot A} \quad (3.7)$$

dove  $L$  è il valore dell'induttanza in Henry [H],  $N$  è il numero di avvolgimenti,  $R$  è il valore della riluttanza del nucleo,  $l$  è la lunghezza del nucleo in metri [m],  $A$  è la sezione del nucleo in metri quadri [m<sup>2</sup>],  $\mu_0$  è la permeabilità magnetica dell'aria,  $\mu_r$  è la permeabilità magnetica relativa del nucleo,  $B$  è la densità del flusso magnetico in Tesla [T] e  $I$  è la corrente che fluisce nell'induttore [A].

Queste equazioni sono valide solo per induttori con nuclei ferromagnetici toroidali. Esiste un compromesso tra il numero di avvolgimenti e la riluttanza del nucleo: dall'Eq. (3.7) si può notare che questi due parametri sono legati al volume e al peso dell'induttore. Per raggiungere un desiderato valore dell'induttanza bisogna quindi tenere conto di tutte queste relazioni. D'altra parte questi parametri influenzano anche la densità del flusso magnetico  $B$ , il quale deve essere mantenuto al di sotto di un certo valore per non provocare la saturazione del nucleo ferromagnetico. La saturazione del nucleo porta ad una diminuzione dell'efficienza del convertitore e ad un aumento della temperatura dell'induttore stesso, delle valvole e dei diodi. Questo problema è causato da picchi di corrente che attraversano l'induttore. Per evitare la saturazione del nucleo, la quale dipende dal numero di avvolgimenti e dalla dimensione dell'induttore, bisogna scegliere quindi una corrente di saturazione massima che, in molti casi, viene presa di valore abbastanza elevato per compensare le tolleranze del circuito e la differenza tra valori effettivi e calcolati. La soluzione di questo problema non sarà qui discussa, ma una descrizione generale può essere realizzata. L'uso di un nucleo in aria elimina il problema del flusso magnetico di saturazione (l'aria non satura), perciò l'equazione (3.7) può essere trascurata. Questo svincola i parametri  $l$  e  $A$ , sebbene la variabile  $l$  è ancora legata alla larghezza del conduttore. Osservando l'eq. (3.5) è facile notare che il numero di avvolgimenti ha una relazione quadratica con il valore dell'induttanza mentre la riluttanza ha una relazione lineare inversa. Perciò, fino ad un certo punto, è più efficiente aumentare il numero degli avvolgimenti che aumentare la sezione del nucleo. Inoltre, come suggerito prima, per migliorare l'efficienza bisogna minimizzare la resistenza dell'induttore.

Gli induttori sono sede di perdite e quindi si assume solitamente che nel loro modello sia presente una resistenza serie DC. Induttori di queste dimensioni e correnti hanno solitamente una resistenza DC massima tra i 5 mΩ e 8 mΩ. Bisogna quindi scegliere un induttore con la più bassa resistenza serie possibile in modo da minimizzare le perdite. Sebbene le specifiche dei datasheet variano tra i vari venditori è consigliabile, per un corretto progetto dell'induttore, utilizzare sempre la resistenza massima piuttosto che i valori nominali in modo da garantire la protezione del componente a fronte delle peggiori condizioni di funzionamento.

### ***3.3.2 Condensatore***

Un altro importante parametro da calcolare è il condensatore in uscita dal convertitore. Il condensatore di uscita  $C_{out}$  è richiesto per minimizzare le sovratensioni e il ripple presenti sulla tensione in uscita dal convertitore. Ampie sovratensioni sono causate da un insufficiente capacità, mentre elevati ripple sono causati sia dalla bassa capacità che dall'elevata resistenza serie equivalente ESR presente nel condensatore. I valori massimi di sovratensioni e ripple consentiti sono di solito specificati durante il progetto del convertitore. Perciò per rispettare le specifiche di progetto, il progettista deve inserire nel circuito un condensatore di uscita con elevata capacità e bassa resistenza ESR. Il problema delle sovratensioni, le quali si verificano quando il carico è improvvisamente staccato dall'uscita, richiede che la capacità del condensatore di uscita sia abbastanza grande in modo da impedire che l'energia immagazzinata nell'induttore superi la tensione d'uscita massima scelta.

Un convertitore ben progettato dovrebbe avere un ripple di tensione minore del 2% della tensione d'uscita. Quindi fissato il massimo ripple di tensione si può calcolare facilmente il condensatore minimo da inserire all'interno del circuito.

In questo progetto si è scelto un ripple massimo di 1.5%.

Anche in questo caso il valore del condensatore è il massimo tra il funzionamento

nella modalità Buck e nella modalità Boost.

Si calcola per prima il condensatore nel funzionamento Buck:

$$\Delta V_{out} < \frac{\Delta I}{8 * C_{out}} * T_{sw} \quad C_{out} > \frac{\Delta I}{8 * \Delta V_{out}} * T_{sw} = 3 \mu F \quad (3.8)$$

e poi nel funzionamento come elevatore Boost:

$$\Delta V_{out} < \frac{V_{out}}{R * C_{out}} * D * T_{sw} \quad C_{out} > \frac{V_{out}}{R * \Delta V_{out}} * D * T_{sw} = 71 \mu F \quad (3.9)$$

dove  $T_{sw}$  è il tempo di swithcing (inverso della frequenza di switching),  $D$  è il duty cycle,  $R$  è la resistenza del carico e  $\Delta I$  è il ripple di corrente nell'induttore.

Il condensatore sarà il massimo tra i risultati delle Eq. (3.8) e (3.9) ed avrà quindi il valore di  $C=71 \mu F$ . In questi calcoli una variabile molto importante è la frequenza di switching  $F_{sw}$ . La variazione del ripple di corrente e tensione è legata principalmente alla frequenza di switching mentre il duty cycle  $D$  è tenuto costante a causa del rapporto tra tensione d'uscita e d'ingresso del convertitore. Anche la frequenza di switching non può essere spinta a valori elevati poiché è legata alle perdite di commutazione delle valvole. Per queste applicazioni si utilizza solitamente una frequenza che va dai 10 KHz ai 100 KHz. Per questi calcoli e per il convertitore in esame si è scelto una frequenza di 50 KHz.

### **3.3.3 Diodi e Valvole**

In questo paragrafo saranno presentati i principali componenti semiconduttori (ad esempio Diodi, MOSFET, IGBT) sedi di perdite e fondamentali per un corretto funzionamento del convertitore.



### DIODO:

Il diodo è un componente semiconduttore che conduce corrente quando viene polarizzato direttamente da una piccola tensione (solitamente 1-1.5 V) e viene messo in blocco quando viene polarizzato inversamente (una corrente trascurabile fluisce in direzione opposta). Nel passaggio allo stato ON, il diodo può essere considerato come un interruttore ideale poiché commuta in un tempo velocissimo rispetto ai normali transistori di un circuito di potenza. A seconda dell'applicazione richiesta esistono vari tipi di diodo:

1. *Diodo Schottky*: questi diodi sono utilizzati quando basse cadute di tensioni sono necessarie (tipicamente 0.3 V rispetto ai 0.7 V dei tradizionali diodi in silicio). Queste valvole però allo svantaggio di una bassa tensione inversa di solo 50-100 V e da un alto costo;
2. *Diodo Fast-Recovery*: questi diodi sono progettati per funzionare in combinazione con valvole controllabili in circuiti ad alta frequenza dove è richiesto un basso tempo di recupero. Per circuiti di centinaia di volt e ampere, questi diodi hanno un tempo di recupero inverso  $t_{rr}$  di poche decine di nanosecondi.

Un altro fattore fondamentale nella scelta del diodo è il valore delle perdite di conduzione. La potenza media persa dal diodo, nelle peggiori condizioni, può essere così calcolata:

$$P_d = \left(1 - \frac{V_{out}}{V_{in}}\right) * I_{out} * V_d$$

dove  $V_d$  è la caduta di tensione sul diodo quando è attraversato da una corrente di uscita  $I_{out}$ . Bisogna quindi assicurarsi che il diodo selezionato sia in grado di dissipare questa potenza.

### MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor):

I primi MOSFET sono nati negli anni 70' e sono usati come transistor nei circuiti di elettronica di potenza. Questi dispositivi sono controllati in tensione e non in

corrente semplificandone così il controllo. La resistenza di stato ON  $R_{ds}(ON)$  non ha un limite teorico, quindi è possibile spingere questo valore a livelli molto bassi. Di solito i MOSFET sono provvisti di un diodo di ricircolo connesso in antiparallelo che diventa particolarmente utile nel caso delle correnti di ritorno. Il MOSFET richiede la continua applicazione della tensione tra gate e source ( $V_{gs}$ ) di opportuna ampiezza in modo da ottenere lo stato di ON. Nessuna corrente di gate scorre eccetto durante le transizioni tra gli stati di ON e OFF, quando la capacità del gate viene caricata o scaricata. I periodi di commutazione tra gli stati di ON e OFF sono molto veloci (da poche decine a qualche centinaia di nanosecondi) a seconda del tipo di valvola. Quindi valvole con tempi di commutazione di questo ordine possono funzionare con frequenze molto elevate mantenendo così le perdite di commutazione basse (e quindi trascurabili) come si vede dall'Eq.3.10 qui di seguito:

$$P_{sw} = \frac{1}{2} * V_d * I_{out} * F_{sw} * (T_{on} + T_{off}) \quad (3.10)$$

La resistenza  $R_{ds}(ON)$  tra il drain e il source aumenta rapidamente con la tensione di blocco della valvola. Il valore della resistenza di ON in funzione della tensione di blocco  $V_{dss}$  può essere espressa come:

$$R_{ds}(ON) = k * V_{dss}^{2.5-2.7} \quad (3.11)$$

dove  $k$  è una costante che dipende dalla geometria fisica del componente.

Per questo motivo solo MOSFET con basse  $V_{dss}$  hanno bassi valori di  $R_{ds}(ON)$  e quindi piccole perdite di conduzione. Le perdite di conduzione, principali fattori di perdite in questo tipo di valvole, dipendono dal quadrato della corrente oltre che dalla resistenza  $R_{ds}(ON)$  come qui sotto presentato:

$$P_{cond} = R_{ds}(ON) * I_{out}^2 \quad (3.12)$$

Quindi, a pari resistenza  $R_{ds}(ON)$ , se la corrente è metà le perdite vengono ridotte ad un quarto. Questi dispositivi competono con i tradizionali BJT solo se funzionano a frequenze di commutazione superiori ai 30 kHz. I MOSFET sono disponibili con tensioni che superano i 1000 V, ma con piccole correnti (massimo 100 A). La massima tensione di controllo  $V_{gs}$  è di  $\pm 20$  V, sebbene esistono valvole controllate a 5 V. Siccome la loro resistenza di ON ha un coefficiente di temperatura positivo

possono essere facilmente connessi in parallelo. La connessione di più valvole in parallelo porta alla conduzione di correnti elevate senza disturbare le prestazioni dei singoli MOSFET.

#### IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor):

Le prime versioni dell'IGBT hanno fatto la loro comparsa intorno agli anni 80'. Questa valvola è una combinazione di un BJT e un MOSFET connessi in cascata. Infatti come i MOSFET hanno un'alta impedenza di gate la quale richiede una piccola energia per commutare la valvola. Al contrario, come i BJT, hanno basse tensioni allo stato ON anche con elevate tensioni di funzionamento (per esempio,  $V_{on}=2-3$  V per una valvola di 1000 V). Questo unisce il vantaggio di tenere alte correnti e di avere un semplice controllo in tensione. Gli IGBT hanno tempi di commutazione nell'ordine dei microsecondi e sono disponibili in moduli da 1700 V e 1200 A. Queste valvole funzionano quindi per applicazioni di alta potenza dove non è richiesta un'alta frequenza di commutazione, perché al contrario dei MOSFET le perdite di commutazione sono più elevate.

### **3.3.4 Perdite e Rendimento**

In questo breve paragrafo sono descritte velocemente le principali formule per il calcolo delle perdite e dell'efficienza. La riduzione completa delle perdite del convertitore può estendere la durata delle batterie e ridurre la dissipazione di calore. Le seguenti equazioni sono descritte nella [5] e servono per calcolare le perdite in ogni sezione del convertitore.

Perdite sulla Resistenza ESR del Cond. ingresso:  $P_{c\_in} = I_{in}^2 * ESR$

Perdite sulla Resistenza DCR dell'Induttore:  $P_l = (I_{out} + \Delta I * \sqrt{2})^2 * DCR$

Perdite sulla Resistenza ESR del Cond. uscita  $P_{c\_out} = (\Delta I * \sqrt{3})^2 * ESR$

Perdite Diodo:  $P_d = \left(1 - \frac{V_{out}}{V_{in}}\right) * I_{out} * V_d$

Perdite di conduzione MOSFET:  $P_{cond} = R_{ds(ON)} * I_{out}^2$

Perdite di commutazione MOSFET:  $P_{sw} = \frac{1}{2} * V_d * I_{out} * F_{sw} * (T_{on} + T_{off})$

Ci sarebbe inoltre da aggiungere le perdite date dalla resistenza dei conduttori e dalle piste di rame del circuito stampato, ma essendo veramente piccole e difficili da calcolare vengono trascurate. La seguente espressione mostra le perdite totali

$$P_{tot} = P_{c\_in} + P_l + P_{c\_out} + P_d + P_{sw} + P_{cond}$$

dalla quale si ricava il rendimento del convertitore:

$$\eta = \frac{V_{out} * I_{out}}{V_{out} * I_{out} + P_{tot}}$$

Per aumentare il rendimento e l'efficienza del convertitore si potrebbe ricorrere al metodo soft-switching, nel quale le valvole commutano quando ai loro capi è presente una tensione uguale a zero (ZVS) o quando non sono attraversati da corrente (ZCS). Con questo metodo si realizzano quindi meno perdite e una maggiore efficienza. Si è scelto di non utilizzare questo metodo poiché l'incremento del rendimento è di solo il 3-4% ed inoltre una strategia del genere comporta una maggiore complicazione del circuito dovuta all'incremento del numero di condensatori ed induttori impiegati. Nella Tabella 3.1 sono sintetizzate le tipiche perdite percentuali di un convertitore DC/DC con un rendimento di circa il 92%.

PERDITE	Percentuale (%)
Conduzione	66%
Commutazione	15%
Avvolgimenti Induttore	11%
Nucleo Induttore	5%
Filtri	3%

**Tabella 3.1\_Tipica distribuzione delle perdite in un convertitore DC/DC**

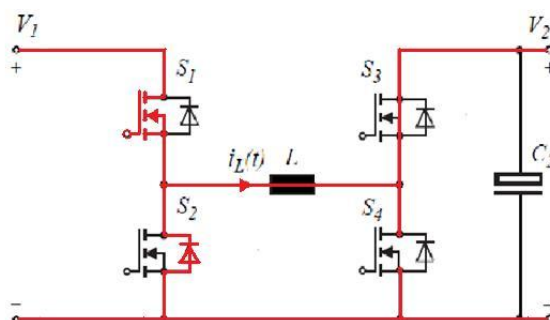
### ***3.4 FUNZIONAMENTO DEL CONVERTITORE***

In questo paragrafo è descritto il principio di funzionamento del convertitore. Come spiegato prima in questo schema sono presenti 4 MOSFET comandabili in accensione e spegnimento. Per realizzare le quattro modalità di funzionamento, il MOSFET può essere impostato come cortocircuito, circuito aperto, diodo e valvola comandata in modalità PWM (Pulse Width Modulation). In questo convertitore a ponte solo uno dei due rami è controllato in modalità PWM, mentre alle valvole dell'altro ramo sono applicati segnali di controllo statici (sempre accese o sempre spente). Se sono presenti valvole sullo stesso ramo, bisogna sempre evitare di avere uno shoot-through. Lo shoot-through è la condizione di funzionamento nel quale entrambe le valvole sullo stesso ramo sono attive (si trovano cioè nello stato ON), provvedendo così alla corrente un sentiero preferenziale, altamente pericoloso, tra la terra (GND) e la tensione di ingresso o di uscita ( $V_{in}$  o  $V_{out}$ ). Per eliminare questo problema si ricorre alla tecnica dei "tempi morti" (in inglese dead-time) nella quale si crea un certo ritardo nell'accensione di uno dei due MOSFET, avendo così un periodo in cui entrambe le valvole dello stesso ramo sono spente (tutte e due nello stato di OFF). Questa tecnica è semplice e di solito molto efficace, ma soffre di

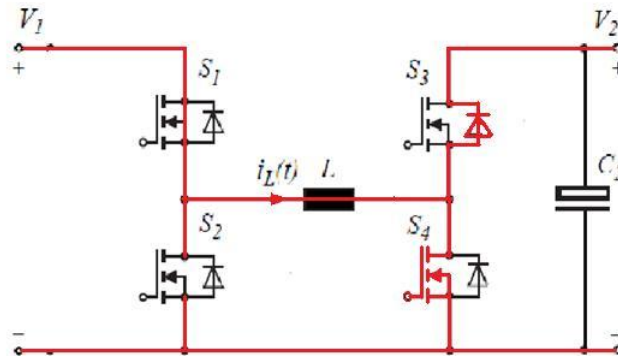
flessibilità se grosse capacità di gate devono essere usate con un dato controllore. Un buon dead-time non deve essere né troppo corto per evitare lo shoot-through né troppo lungo per aumentare le perdite di conduzione. Si sceglie così un dead-time in modo da scaricare completamente le grosse capacità di gate ( $C_{gs}$ ) prima di attivare il MOSFET complementare.

In questo schema la batteria sarà posta sul lato 1 (quindi la tensione  $V_1$  corrisponderà alla tensione di batteria), mentre il supercondensatore sarà posto sul lato 2. Spieghiamo brevemente i quattro casi di funzionamento:

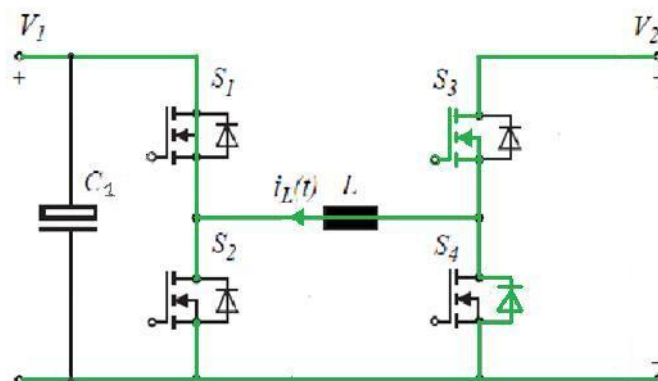
- *Funzionamento BUCK (Accelerazione)*: in questo schema la valvola  $S_1$  è comandata in PWM, la valvola  $S_2$  è un diodo (cioè è complementare alla valvola  $S_1$ ), la  $S_3$  è in corto circuito (cioè la tensione di controllo è una tensione costante) e la valvola  $S_4$  è in circuito aperto (la tensione di controllo non è presente o è pari a zero). La modalità Buck funziona quando la tensione sulla batteria è al massimo 210 V, mentre la tensione sul supercondensatore può variare solo tra 190 e 210 V. Il duty cycle che comanda la valvola  $S_1$  può variare quindi tra 0,904 e 1. Nel caso dell'accelerazione il controllo di corrente viene riferito alla tensione sul supercondensatore (tensione di riferimento uguale a 320 V).



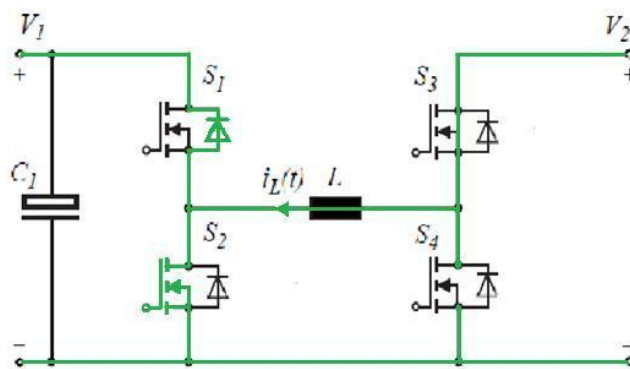
- *Funzionamento BOOST (Accelerazione)*: in questo schema la valvola S1 è in corto circuito, la valvola S2 è sempre un circuito aperto, la S3 funziona da diodo e la valvola S4 è controllata con la tecnica PWM. In questo caso la tensione di batteria può variare tra 150 V e 210 V. La tensione sul supercondensatore può invece variare tra un minimo di 210 V ed un massimo di 320 V. Il duty cycle quindi è compreso tra 0 e 0,531.



- *Funzionamento BUCK (Frenatura)*: in questo schema la valvola S1 è in corto circuito, la valvola S2 è sempre in circuito aperto, la S3 è controllata con la tecnica PWM e la valvola S4 funziona da diodo. Anche in questo caso la tensione della batteria varia tra 150 e 210 V, mentre la tensione sul supercondensatore tra 190 e 320 V. Il duty cycle in questo caso è controllato tra 0,468 e 1.



- *Funzionamento BOOST (Frenatura)*: in questo schema la valvola S1 funziona da diodo, la valvola S2 è controllata in PWM, la S3 è in cortocircuito e la valvola S4 è un circuito aperto. In questa modalità il funzionamento è attivo tra la tensione di 190 e 210 V del supercondensatore e tra i 190 e 210 V della batteria. Il duty cycle può variare quindi tra un minimo di 0 ad un massimo di 0,095. Il controllo di corrente nel caso della frenatura è riferito alla tensione massima di batteria. Nei due casi di frenatura studiati quindi il riferimento di tensione sarà 210 V.



Queste presentate sono le quattro modalità di funzionamento. In realtà solo due di esse vengono usate. Per esempio nella quarta configurazione (dove la tensione sul supercondensatore è minore di quella della batteria) non conviene ricaricare la batteria, bensì aspettare una successiva frenatura che vada a ricaricare e quindi ad aumentare la tensione del supercondensatore. Pertanto saranno soprattutto studiate la seconda e la terza configurazione nelle quali la tensione sulla batteria è sempre minore od uguale a quella presente sul supercondensatore.



## *Capitolo 4*

### **CONTROLLO**

In questo capitolo verranno discusse le principali strategie che si possono utilizzare per gestire in modo efficiente la carica e la scarica della batteria. Esistono due strategie di controllo per questo tipo di convertitore: un controllo diretto del convertitore che ne regola la tensione e la corrente attraverso il duty cycle ed un controllo secondario, deciso attraverso una logica esterna, che comanda l'attivazione o meno del convertitore.

Il secondo dei due controlli non è stato affrontato in questo lavoro ed è quindi spieghiamo brevemente qui di seguito.

Attraverso il controllo esterno si gestisce il funzionamento del convertitore, si decide cioè quando e come deve funzionare, se deve ricevere un'accelerazione o una frenatura, quale configurazione deve seguire ed altri usi simili.

Il controllo viene realizzato attraverso sensori applicati sul pedale dell'accelerazione e sullo stato di carica della batteria e del supercondensatore. Oltre a tutto questo un controller collegato ad un GPS, che conosce l'area circostante e il tragitto da percorrere, immagazzina dati sulla storia delle percorrenze abituali e segue un grafico programmato delle ultime accelerazioni e decelerazioni. Il sistema diventa così molto efficiente. Per esempio quando si è fermi ad un semaforo, la batteria potrebbe ricaricare il supercondensatore per prepararsi alla partenza successiva; se invece si sta per affrontare una lunga discesa si potrebbe puntare direttamente alla batteria principale, contando sulla possibilità di una carica lunga e costante.

Si discute ora del principale controllo del convertitore, cioè della regolazione di tensione e corrente.

## 4.1 TEORIA DEL CONTROLLO

Il controllo automatico di un dato sistema si prefigge di modificare il comportamento del sistema da controllare (ovvero le sue *uscite*) attraverso la manipolazione delle grandezze d'ingresso. Ad esempio può richiedersi che l'uscita rimanga costante ad un valore prefissato al variare dell'ingresso (controllo semplice) oppure segua fedelmente la dinamica dell'ingresso stesso, a meno di amplificazioni e ritardi. Il controllo del sistema in esame viene affidato ad un altro sistema costruito appositamente, detto sistema controllante o *controllore*, che viene progettato dopo uno studio preliminare del sistema da controllare per individuarne il modello matematico esatto, servendosi degli strumenti messi a punto dalla teoria dei sistemi.

Ormai in ogni applicazione esiste un sistema di controllo, che può semplicemente essere quello della temperatura di casa o quello molto più difficile del controllo in trazione dei autoveicoli fino ad altre infinite applicazioni.

Un sistema automatico di controllo può funzionare essenzialmente in due modi:

- *Ad anello aperto*: questo controllo si basa su una elaborazione degli ingressi eseguita senza conoscere il valore dell'uscita del sistema controllato, essendo note alcune proprietà del sistema da controllare. In questo caso è fondamentale avere un buon modello matematico che descriva in maniera abbastanza precisa il comportamento del sistema. Tanto più il modello matematico su cui si basa l'azione del controllo in anello aperto è esatto, tanto più questo tipo di controllo è affidabile. Questa modalità però può essere utilizzata solo con sistemi che sono già stabili ed è quindi usata in un campo molto ristretto di applicazioni. Se chiamiamo  $C(s)$  la funzione di trasferimento del controllore e  $G_1(s)$  quella del sistema da controllare, la funzione di trasferimento del sistema complessivo sarà quindi:  
$$G(s) = C(s) * G_1(s).$$

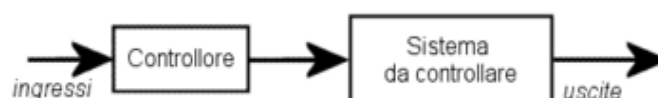
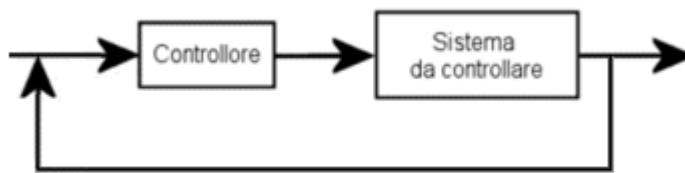


Fig.4.1\_Diagramma a blocchi di un sistema ad anello aperto

- *Ad anello chiuso (retroazionato)*: più complesso ma molto più flessibile del primo, può rendere stabile un sistema che di per sé non lo è affatto. In questo caso l'anello di controllo riporta, all'ingresso del processo che si vuole controllare (o rendere stabile), una funzione dell'uscita che va sottratta algebricamente al segnale già presente in ingresso. Se chiamiamo  $Y_{ref}$  il segnale in ingresso al sistema prima dell'innesto della retroazione,  $Y_{out}$  il segnale in uscita dal sistema da controllare,  $Y_{fb}$  il segnale in uscita dal controllore (che quindi dipende da  $Y_{out}$  e dalla struttura dello stesso controllore), si può distinguere in: *retroazione positiva* nella quale al segnale  $Y_{ref}$  viene sommato  $Y_{fb}$ , e la somma viene inviata in ingresso al sistema e *retroazione negativa* nella quale al segnale  $Y_{ref}$  viene sottratto  $Y_{fb}$ , in modo da avere in ingresso al sistema il cosiddetto segnale errore  $e_f$ . A seconda della tipologia della retroazione, si possono fare considerazioni diverse circa la stabilità del sistema complessivo ottenuto (oscillazioni ed energia del segnale in uscita). In generale si può affermare che la retroazione positiva porta a sistemi instabili, mentre la retroazione negativa apre la strada a strategie di controllo molto efficaci per il raggiungimento della stabilità del sistema. In questo caso la funzione di trasferimento sarà 
$$G(s) = \frac{C(s) * G_1(s)}{1 \pm C(s) * G_1(s)}$$
 con l'opportuno segno a seconda che si tratti di retroazione positiva o negativa.



**Fig.4.2\_Schema a blocchi di un sistema in retroazione**

Esistono diverse tecniche per sintetizzare controllori in anello chiuso. Di seguito saranno illustrate le soluzioni più note.

### **4.1.1 Controllore PID**

Il controllore PID (Proporzionale-Integrativo-Derivativo) è un sistema in retroazione negativa ampiamente impiegato nei sistemi di controllo. E' il sistema di controllo in retroazione di gran lunga usato nei sistemi industriali.

Il funzionamento del controllore è molto semplice ed è qui descritto.

Il controllore acquisisce in ingresso un valore da un processo e lo confronta con un valore di riferimento. La differenza, il cosiddetto segnale di errore, viene quindi usata per determinare il valore della variabile in uscita dal controllore, che è la variabile manipolabile del processo.

Il PID regola l'uscita in base a:

- il valore del segnale di errore (azione proporzionale);
- i valori passati del segnale di errore (azione integrale);
- quanto velocemente il segnale di errore varia (azione derivativa).

I controllori PID sono relativamente semplici da comprendere, installare e tarare al contrario dei più complessi algoritmi basati sulla teoria del controllo ottimo o del controllo robusto.

I regolatori PID sono molto diffusi a causa della loro semplicità di realizzazione, sono molto efficaci, affidabili ed economici ed hanno la possibilità di una taratura semplice ed automatica dei parametri.

La taratura dei parametri avviene di solito attraverso semplici regole empiriche, come i metodi di Ziegler-Nichols, che risultano in controllori stabilizzanti di buone prestazioni per la maggior parte dei processi.

Molto spesso l'azione derivativa viene rimossa, riducendosi così al comunissimo controllore PI.

I controllori PID sono spesso sufficienti a controllare processi industriali anche complessi, ma la loro semplicità risulta in una serie di limiti che è bene tener presente:

- Non sono in grado di adattarsi a cambiamenti dei parametri del processo;
- Non sono veramente stabili, a causa della presenza dell'azione integrale;
- Alcune regole di taratura, come quelle di Ziegler-Nichols, reagiscono male in certe condizioni;

- Sono intrinsecamente monovariabili, non possono quindi essere usati in sistemi multi variabili.

Le tre azioni di un PID vengono calcolate separatamente e poi sommate algebricamente  $u(t) = u_p + u_I + u_D$ :

- *Azione proporzionale*: l'azione proporzionale è ottenuta moltiplicando il segnale d'errore  $e$  con un'opportuna costante:  $u_p = k_p * e(t)$   
E' perfettamente possibile regolare un processo con un simile controllore, che risulta anche in grado di stabilizzare processi instabili.

- *Azione integrale*: l'azione integrale è definita come il prodotto tra l'integrale nel tempo del segnale di errore ed una costante  $K$  (la stessa dell'azione proporzionale) e diviso per una costante di tempo integrale  $\tau_I$ :

$$u_I = \frac{k_I}{\tau_I} * \int e(t) * dt$$

Questa definizione dell'azione integrale fa sì che il controllore si "ricordi" dei valori passati del segnale d'errore; in particolare, il valore dell'azione integrale non è necessariamente nullo se è nullo il segnale d'errore. Questa proprietà dà al PID la capacità di portare il processo esattamente al punto di riferimento richiesto, dove la sola azione proporzionale risulterebbe nulla. L'azione integrale è anche l'elemento metastabile di un PID, cioè se il sistema subisce sollecitazioni sufficientemente grandi la condizione di equilibrio si perde a favore di un'altra condizione di equilibrio. Il fenomeno del *windup* (anomala sovranelongazione non lineare) è dovuto alla presenza dell'integratore.

- *Azione derivativa*: per migliorare le prestazioni del controllore si può aggiungere l'azione derivativa:  $u_D = k_D * \tau_D * \frac{de(t)}{dt}$

L'idea è quella di compensare rapidamente le variazioni del segnale di errore: se l'errore  $e$  sta aumentando, l'azione derivativa cerca di compensare questa deviazione in ragione della sua velocità di cambiamento, senza aspettare che l'errore diventi significativo (azione proporzionale) o che persista per un certo tempo (azione integrale). L'azione derivativa è spesso tralasciata nelle implementazioni dei PID perché li rende troppo "nervosi". Un PID con azione derivativa, per esempio, "scalcerebbe" nel momento in cui il riferimento venisse cambiato istantaneamente da un valore ad un altro, risultando in una derivata di  $e$  infinita o comunque molto elevata. Ciò sconsiglia l'applicazione dell'azione derivativa in tutti i casi in cui l'attuatore fisico non dovrebbe essere sottoposto a sforzi eccessivi. Se ben tarata e se il processo è abbastanza "tollerante", comunque, l'azione derivativa può dare un contributo determinante alle prestazioni del controllore.

Quindi il regolatore PID esercita un'azione di controllo dipendente dall'errore attraverso la seguente legge:

$$u(t) = u_p + u_i + u_d = K_p * e(t) + K_i * \int e(t) * dt + K_D * \frac{de(t)}{dt} \quad (4.1)$$

I tre guadagni che compaiono nella legge di controllo vengono chiamati guadagno proporzionale ( $K_p$ ), guadagno integrale ( $K_i$ ) e guadagno derivativo ( $K_D$ ).

Alternativamente, la legge di controllo si può scrivere come segue:

$$u(t) = K_p \left[ e(t) + \frac{1}{T_I} \int e(t) * dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (4.2)$$

dove  $T_I = \frac{K_p}{K_i}$  è detto *tempo integrale* e  $T_D = \frac{K_D}{K_p}$  è detto *tempo derivativo*.

Dal caso generale della legge di controllo PID è poi possibile derivare altre leggi di controllo, annullando una o più delle azioni di controllo. Sono di particolare interesse le leggi di controllo:

P (proporzionale);

PD (proporzionale-derivativa);

PI (proporzionale-integrale).

### 4.1.2 Controllore PI

Il controllore PI (proporzionale- integrativo) è un controllore retroazionato che controlla un impianto attraverso una somma pesata tra l'errore (differenza tra il reale valore d'uscita e un riferimento prefissato) e l'integrale di questo errore. E' un caso speciale del comune controllore PID nel quale la funzione derivativa (D) dell'errore non è usata. Questo controllore ha dei vantaggi e svantaggi rispetto ad agli altri controllori:

- L'azione integrale porta a zero l'errore a regime, il quale non è presente nel convertitore proporzionale P;
- La mancanza dell'azione derivativa rende il sistema più stabile a regime nei confronti del rumore. Questo succede dal momento che l'azione derivativa è più sensibile alle alte frequenze presenti negli ingressi;
- D'altra parte, l'assenza dell'azione derivativa porta il controllore PI ad essere meno reattivo alle variazioni veloci e quindi porta il sistema ad essere più lento a raggiungere il punto di funzionamento (set point) e a rispondere ad una perturbazione.

Quindi senza l'azione derivativa, l'azione di controllo del PI sarà:

$$u(t) = u_p + u_I = K_p * e(t) + K_I * \int e(t) * dt$$

Dalle leggi di controllo si può passare, applicando la trasformata di Laplace, alle funzioni di trasferimento. Sapendo dall'analisi matematica che la trasformata di Laplace di una derivata è uguale a  $s$  e che la trasformata di un integrale è uguale ad  $1/s$ , si può allora scrivere la funzione di un regolatore PID :

$$R(s) = K_p + \frac{K_I}{s} + sK_D = K_p \left( 1 + \frac{s}{T_I} + sT_D \right) \quad (4.3)$$

mentre per il regolatore PI risulterà:

$$R(s) = K_p + \frac{K_I}{s} = K_p \left( 1 + \frac{s}{T_I} \right) \quad (4.4)$$

## 4.2 MODELLO DEL CONVERTITORE

Come spiegato nei paragrafi precedenti il sistema di controllo è formato principalmente da due blocchi: il *controllore* e il *sistema da controllare* (o sistema sotto controllo). In questo paragrafo verrà spiegato il secondo dei due blocchi, cioè il sistema da controllare.

Le applicazioni di elettronica di potenza con convertitore richiedono solitamente un sistema di controllo retro azionato. Per esempio, in un tipico convertitore DC/DC la tensione d'uscita deve essere tenuta costante, senza badare ai cambiamenti della tensione di ingresso  $V_{in}$  o dell'effettiva resistenza del carico. Questo è realizzato costruendo un circuito che varia il controllo in ingresso al convertitore (duty cycle) nello stesso modo nel quale la tensione d'uscita è regolata per essere uguale al desiderato valore di riferimento. Un tipico sistema che comprende un convertitore Buck e il diagramma a blocchi dell'anello di retroazione è mostrato in Fig.4.3. Si desidera progettare questo sistema di retroazione in modo che la tensione d'uscita sia regolata con precisione e sia insensibile ai disturbi nella tensione di ingresso e nella corrente di carico. Inoltre il sistema di retroazione deve essere stabile e deve rispettare certe specifiche come le sovratensioni transitorie, tempi di assestamento e la regolazione a regime.

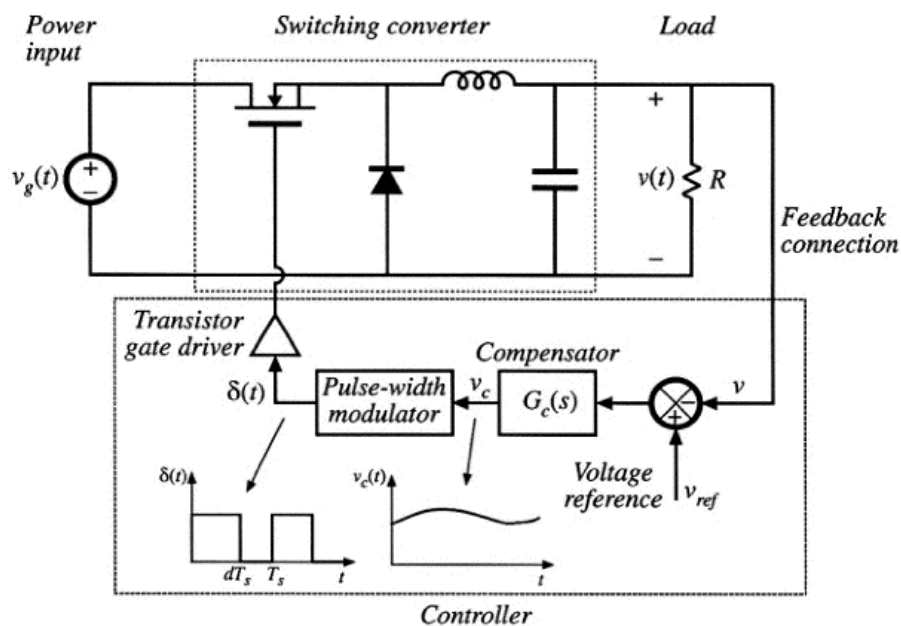


Fig.4.3\_Esempio di sistema di retroazione



Per progettare il sistema di Fig.4.3 bisogna quindi trovare un modello dinamico del convertitore. Un modello è semplicemente la rappresentazione di particolari fenomeni fisici attraverso formule matematiche. In ingegneria si desidera modellizzare i comportamenti più importanti del sistema, trascurando gli altri insignificanti fenomeni. Il modello semplificato dà un significato fisico al comportamento del sistema il quale aiuta l'ingegnere a progettare il sistema in modo da funzionare nella maniera richiesta. Perciò il processo di modellizzazione implica l'uso di approssimazioni per trascurare piccoli ma significativi fenomeni, mantenendo invece quelli più importanti. Una volta che questo passaggio è realizzato, può essere consigliabile rifinire attentamente il modello prendendo in considerazione i precedenti fenomeni trascurati. Modelli troppo complessi però sono difficili da realizzare e possono portare ad un inutile confusione di calcoli.

Per trovare il modello, quindi la funzione di trasferimento del convertitore, esistono varie tecniche, ma la più utilizzata è quella delle variazioni di piccoli segnali AC. Infatti, come discusso nel capitolo precedente, il ripple di tensione è piccolo se il convertitore è ben progettato e se funziona in modalità continua (CCM). Per questo motivo si trascura il ripple e si modellizzano solo le principali variazioni AC nelle forme d'onda del convertitore. Da questi modelli si ricavano poi le funzioni di trasferimento. La funzione di trasferimento  $G_{vg}(s)$  si trova ponendo la variazione del duty cycle a zero  $\hat{d}(s)$ , risolvendo quindi la funzione di trasferimento tra ingresso ed uscita:

$$G_{vg}(s) = \left. \frac{\hat{V}(s)}{\hat{V}_{in}(s)} \right|_{\hat{d}(s)=0} \quad (4.5)$$

Questa funzione di trasferimento descrive come variazioni o disturbi nella tensione di ingresso si ripercuotono sulla tensione di uscita, ed è quindi usata per determinare gli effetti di queste armoniche sulla tensione di uscita del convertitore. Un'altra importante funzione di trasferimento è  $G_{vd}(s)$  che si trova ponendo la variazione della tensione di ingresso  $\hat{V}_{in}(s)$  a zero e risolvendo poi il circuito del modello equivalente in funzione del duty cycle:

$$Gvd(s) = \frac{\hat{V}(s)}{\hat{d}(s)} \Big|_{\hat{V}in(s)=0} \quad (4.6)$$

Questa funzione descrive come variazioni del duty cycle influenzano la tensione d'uscita.  $Gvd(s)$  è una funzione chiave per il guadagno dell'anello ed ha una forte influenza sulle prestazioni del regolatore.

Dopo vari passaggi algebrici si ricavano le equazioni finali che mettono direttamente in relazione le funzioni di trasferimento con i vari componenti del circuito (induttore, condensatore, resistenza, ecc.)

$$Gvd(s) = Gdo * \frac{\left(1 - \frac{s}{\omega_z}\right)}{\left(1 + \frac{s}{Q\omega_o} + \left(\frac{s}{\omega_o}\right)^2\right)} \quad (4.7)$$

$$Gvg(s) = Ggo * \frac{1}{\left(1 + \frac{s}{Q\omega_o} + \left(\frac{s}{\omega_o}\right)^2\right)} \quad (4.8)$$

Queste funzioni variano a seconda della tipologia del convertitore utilizzata. Le varie relazioni sono riassunte nella Tabella 4.1.

Converter	$G_{g0}$	$G_{d0}$	$\omega_0$	$Q$	$\omega_z$
Buck	$D$	$\frac{V}{D}$	$\frac{1}{\sqrt{LC}}$	$R\sqrt{\frac{C}{L}}$	$\infty$
Boost	$\frac{1}{D}$	$\frac{V}{D}$	$\frac{D}{\sqrt{LC}}$	$D R \sqrt{\frac{C}{L}}$	$\frac{D^2 R}{L}$
Buck-boost	$-\frac{D}{D'}$	$\frac{V}{DD'}$	$\frac{D}{\sqrt{LC}}$	$D R \sqrt{\frac{C}{L}}$	$\frac{D^2 R}{DL}$

**Tabella 4.1\_Caratteristiche delle funzioni di trasferimento dei principali convertitori DC/DC**

I convertitori Boost e Buck-Boost hanno funzioni di trasferimento  $Gvd(s)$  contenenti 2 poli e uno zero (nel semi-piano destro), mentre il convertitore Buck ha 2 poli e

nessun zero. Le funzioni di trasferimento  $Gvg(s)$  tra ingresso ed uscita contengono 2 poli e nessun zero per tutte e tre le tipologie di convertitore.

### 4.3 PROGETTO DEL SISTEMA DI CONTROLLO

Consideriamo nuovamente il sistema di controllo in retroazione:

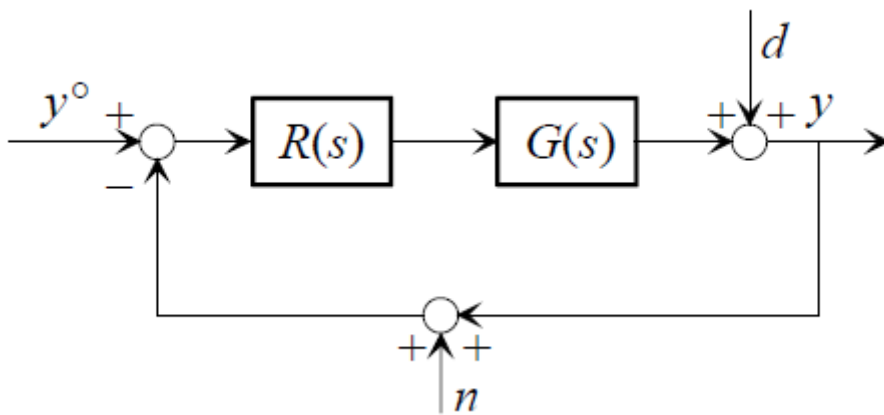


Fig4.4\_Esempio di controllo in retroazione

Si suppongono assegnate le funzioni di trasferimento  $Gvd(s)$  e  $Gvg(s)$  e si pone l'obiettivo della progettazione della funzione di trasferimento  $R(s)$  del controllore, sulla base di un certo numero di specifiche.

Il metodo che segue è basato sul criterio di Bode e come tale prevederà il rispetto, da parte della funzione di trasferimento d'anello  $L(s) = R(s)G(s)$ , delle ipotesi necessarie per l'applicabilità del criterio. Ciò comporta, in particolare, che il metodo non sarà applicabile se  $G(s)$  ha poli a parte reale positiva. Infatti tali poli, che non possono essere cancellati da corrispondenti zeri nella funzione di trasferimento  $R(s)$ , si presentano anche in  $L(s)$ , violando così una condizione del criterio.

Le specifiche con le quali tipicamente si imposta il progetto sono le seguenti:

- *Stabilità asintotica*: in base al criterio di Bode questa specifica implica che il margine di fase sia:  $\Phi_m > 0$

- *Grado di stabilità e robustezza:* la stabilità deve essere garantita con un certo margine rispetto alle inesattezze nella modellistica del sistema sotto controllo. Inoltre si vuole che il sistema di controllo, sollecitato da ingressi canonici (scalino, impulso), esibisca risposte ben smorzate. Entrambe queste condizioni sono all'incirca soddisfatte se il margine di fase dell'anello è superiore ad un valore limite, di volta in volta specificato:

$$\Phi_m > \bar{\Phi}_m.$$

- *Velocità di risposta:* Il sistema di controllo deve reagire prontamente a variazioni nel segnale di riferimento o sui disturbi. Sappiamo che, se il margine di fase è sufficientemente elevato, i transienti del sistema in anello chiuso sono governati da una costante di tempo pari all'inverso della pulsazione critica  $\omega_c$ . Imporre un valore massimo alla durata dei transienti equivale quindi ad imporre un valore minimo alla pulsazione critica:  $\omega_c \geq \bar{\omega}_c$
- *Precisione statica:* a seguito dell'imposizione di assegnati segnali canonici agli ingressi, l'errore tra il riferimento e variabile controllata deve essere, a transitorio esaurito, nullo o inferiore in modulo ad una assegnata soglia:

$$|e_\infty| \leq e_\infty.$$

In un sistema a convertitore non ci si può aspettare di semplificare il duty cycle ad un singolo valore ed ottenere così una tensione d'uscita costante per ogni condizione di funzionamento. Lo scopo della retroazione negativa è aggiustare automaticamente il duty cycle per ottenere una desiderata tensione d'uscita con alta precisione, senza badare ai disturbi nella tensione  $V_{in}(t)$ , nella corrente di carico  $i_{LOAD}(t)$  o variazioni dei componenti del circuito.

Nei sistemi elettrici si possono controllare essenzialmente due grandezze: la tensione e la corrente. Come ripetuto nei capitoli precedenti il convertitore DC/DC ha il compito di regolare i flussi di energia in modo che la batteria sia protetta contro i picchi di corrente dovuti alle improvvise accelerazioni o frenature. Per questo motivo nelle applicazioni di trazione elettrica, o dove sia presente una batteria, si usa un controllo in corrente.

### 4.3.1 Sistema di controllo in Corrente

L'inserimento di un regolatore di corrente in un circuito porta alcuni vantaggi ma anche qualche svantaggio.

Per prima cosa occorre decidere quale corrente controllare: la corrente nel condensatore o nella batteria sono molto disturbate e sono quindi molto difficili da campionare. Al contrario la corrente nell'induttore intermedio è abbastanza continua, è facile da campionare ed è indice, comunque, della potenza trasferita. Per questi motivi la corrente misurata sarà quella che scorre nell'induttore. L'aggiunta della limitazione di corrente al regolatore di tensione porta però ad un rallentamento della risposta dinamica (è più lento a raggiungere il valore di regime), ma la corrente è così sotto controllo. Il solo regolatore di tensione, senza controllo di corrente, potrebbe richiedere un duty cycle tale da far circolare negli interruttori statici e nell'induttore una corrente troppo elevata. Perciò l'inserzione di un regolatore di corrente è necessario per saturare tale valore (attraverso la saturazione dell'uscita del regolatore di tensione) salvaguardando così il sistema.

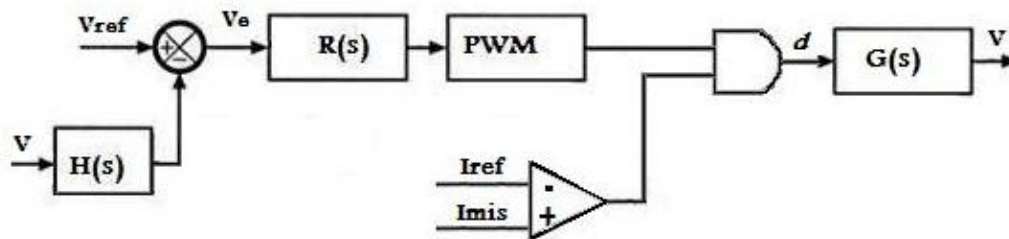


Fig.4.5\_Sistema di controllo in corrente

Il diagramma a blocchi di questo sistema è presentato in Figura 4.5. La tensione d'uscita è misurata usando un sensore con guadagno  $H(s)$ . Nei sistemi con regolatore di tensione il sensore è di solito un divisore di tensione, al cui interno è presente un resistore di precisione. Il segnale  $v \cdot H(s)$  in uscita dal sensore è confrontato con un segnale di riferimento  $V_{ref}$ . L'obiettivo del sistema è avere un segnale  $v \cdot H(s)$  uguale a  $V_{ref}$  così che  $v$  abbia il valore prefissato da  $V_{ref}$ , anche in presenza di disturbi e di variazioni dei componenti del circuito. La differenza tra l'uscita del sensore  $v \cdot H(s)$  e il segnale di riferimento  $V_{ref}$  è chiamato segnale di

errore  $V_e$ . Se l'anello di retroazione funziona bene ( $v \cdot H(s) = V_{ref}$ ), il segnale di errore sarà nullo. In pratica non esiste mai un errore nullo, ma sarà molto piccolo. Dopo di questo si introduce un regolatore  $R(s)$ . L'uscita del regolatore  $R(s)$  entra poi nel modulatore PWM che dà al duty cycle la tipica onda quadra. Quello fino a qui discusso è il tradizionale sistema per la regolazione di tensione. Per ottenere la regolazione di corrente bisogna aggiungere un comparatore che confronta la corrente misurata sull'induttore (come detto prima sull'induttore perché il segnale di corrente è più preciso) e la corrente di riferimento che corrisponde alla corrente limite da non superare. Infine è inserita una porta AND i cui ingressi sono l'uscita del comparatore e l'uscita del regolatore di tensione. L'uscita della porta AND è poi mandata come duty cycle al gate della valvola controllata. Il funzionamento del regolatore di corrente è molto semplice. Quando la corrente misurata supera la corrente di riferimento, l'uscita del comparatore commuta ad 1 (corrisponde ad un livello alto) e quindi la porta AND comanda l'interruttore in chiusura (l'uscita della porta AND diventa 0). Al contrario, quando la corrente torna sotto al limite imposto, l'uscita del comparatore torna a 0 e quindi l'interruttore torna ad essere comandato dal modulatore PWM con duty cycle deciso dal regolatore di tensione.

E' da notare che la tensione d'uscita  $v$  è uguale all'errore  $V_e$  moltiplicata per i guadagni del regolatore, del modulatore PWM e del sistema convertitore. Se quindi il guadagno del regolatore è abbastanza elevato, l'errore diventa piccolo e può produrre la tensione d'uscita richiesta  $v = V$  con buona precisione.

### 4.3.2 Scelta del Regolatore

Dopo aver elencato le varie specifiche si passa alla progettazione vera e propria del regolatore. Il progetto del controllore consiste essenzialmente nel determinare i poli e gli zeri della funzione  $R(s)$ , in modo tale da soddisfare le specifiche dinamiche su margine di fase e velocità di risposta. Si procede per mezzo di una serie, ragionata, di tentativi di sintesi.

I modelli dei vari convertitori studiati nel precedente paragrafo sono adesso utilizzati per trovare l'effetto della retroazione sulle funzioni di trasferimento del regolatore. Il guadagno dell'anello di tensione  $T(s)$  è definito come:

$$T(s) = \frac{H(s) * R(s) * G(s)}{V_M(s)} \quad (4.9)$$

dove  $1/V_M$  è il guadagno del modulatore PWM (solitamente uguale ad 1).

Si trova quindi che la funzione di trasferimento tra un disturbo e l'uscita è moltiplicata per un fattore  $\frac{1}{(1+T(s))}$ . Quindi se il guadagno ad anello è elevato,

l'influenza dei disturbi sull'uscita è piccola. Il guadagno dell'anello  $T$  diventa così una misura di quanto è efficiente il sistema di retroazione. Tutti questi guadagni possono essere facilmente calcolati usando il metodo dell'algebra sul grafico. Questo metodo consente una veloce ed efficiente soluzione per la valutazione delle prestazioni dell'anello retro azionato e della tensione d'uscita.

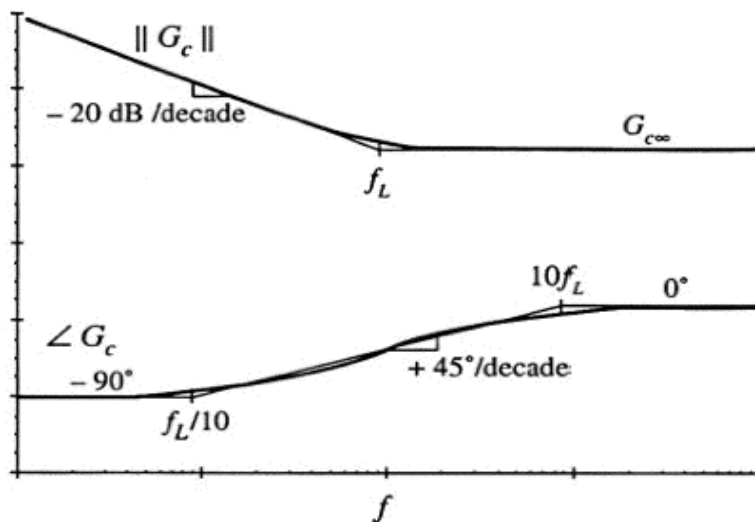
La stabilità è una altra importante caratteristica dei sistemi retro azionati. L'aggiunta di un anello retro azionato può causare effetti indesiderati (sovratensioni ed oscillazioni) ad un sistema inizialmente stabile, cioè può rendere instabile un sistema che di norma non lo è. Per aumentare la stabilità del circuito si agisce sul margine di fase dell'anello. Se il margine di fase dell'anello  $T$  è positivo, il sistema è definito *stabile*. Inoltre l'aumento del margine di fase porta ad una miglior risposta del sistema, con meno sovratensioni ed oscillazioni.

Un altro parametro importante per la scelta del regolatore dipende dal tipo di azioni che esso può esercitare. I regolatori PI sono molto utilizzati nella regolazione di tensione e corrente. Essi sono usati soprattutto per aumentare il guadagno alle basse frequenze, il quale migliora la risposta nei confronti dei disturbi e nei confronti degli errori di regime. L'azione derivativa è molto sensibile al rumore alle

alte frequenze e sconsiglia così l'uso del regolatore PID. Inoltre il derivativo non è facile da realizzare attraverso un microcontrollore che deve campionare grandezze elettriche altamente disturbate. In questo caso l'azione derivativa può dare problemi e viene quindi tralasciata. Dall'Equazione (4.10) e come illustrato in Figura 4.6, uno zero inverso (zero con parte reale negativa) è aggiunto al guadagno ad anello.

$$G_c(s) = G_{c\infty} \left( 1 + \frac{\omega_L}{s} \right) = G_{c\infty} \left( \frac{s + \omega_L}{s} \right) \quad (4.10)$$

Lo zero inverso è utile perché alle basse frequenze porta il regolatore ad integrare il segnale d'errore. Il regolatore PI è utile in quasi tutti i sistemi retro azionati, ma è un approccio veramente semplice ed efficiente per i sistemi che contengono un singolo polo.



**Fig.4.6** Funzioni di trasferimento di Ampiezza e Fase del regolatore PI

Per un corretta progettazione del regolatore PI bisogna prendere in considerazione due specifiche: la frequenza di taglio e il margine di fase.

La frequenza di taglio  $f_c$  deve essere scelta minore della frequenza di switching  $F_{sw}$  in modo che il filtro faccia passare solamente le componenti DC della tensione  $V_{in}(t)$ . Di solito si sceglie una frequenza di taglio tra  $1/10$  e  $1/20$  della frequenza di switching. La scelta del margine di fase invece è poco più complessa. Come detto prima la condizione minima per non avere instabilità è  $\Phi_m > 0$ . Un piccolo margine



di fase però può far nascere poli risonanti ed alti fattori  $Q$  nelle vicinanze della frequenza di taglio. La risposta del sistema mostrerà quindi sovra elongazioni ed oscillazioni le quali, in molte applicazioni di potenza, sono inaccettabili. Al contrario il margine di fase non può essere troppo elevato perché i poli a bassa frequenza inducono una risposta lenta del sistema. Si sceglie solitamente un margine di fase compreso tra i  $60^\circ$  e  $70^\circ$ . Per mantenere così questo adeguato margine di fase bisogna scegliere una  $f_L$  molto minore della frequenza di taglio  $f_c$ .

In questo studio si è scelto un regolatore PI che ha la seguente funzione di trasferimento:

$$G_C(s) = 100 \left( \frac{s + 1/100}{s} \right) = \frac{100s + 1}{s} \quad (4.11)$$

dove la  $f_L$  è circa uguale a  $10^{-3}$  Hz, mentre la frequenza di taglio è stata scelta a 1 KHz. Con queste caratteristiche il sistema è stabile e può raggiungere il valore di regime con una dinamica abbastanza veloce e senza oscillazioni.

#### **4.4 FILE MATLAB**

Nella conclusione del capitolo viene mostrato un semplice esempio di listato tratto dal programma Matlab. Grazie a Matlab si possono progettare le funzioni di trasferimento del convertitore e del regolatore PI, i guadagni ad anello compensato e non compensato e verificare attraverso i grafici (diagrammi di Bode) le principali funzioni di trasferimento. Inoltre grazie a questo listato si possono passare i valori del regolatore PI al programma di simulazione Simulink.

```
%Parametri Convertitore BUCK
Vg = 320;      %Tensione ingresso
V = 200;      %Tensione uscita
Vref = 20;    %Riferimento di Tensione
D = V/Vg;    %Duty cycle
R = 10;      %Resistenza [ohm]
```



## Capitolo 5

### ***SIMULAZIONI***

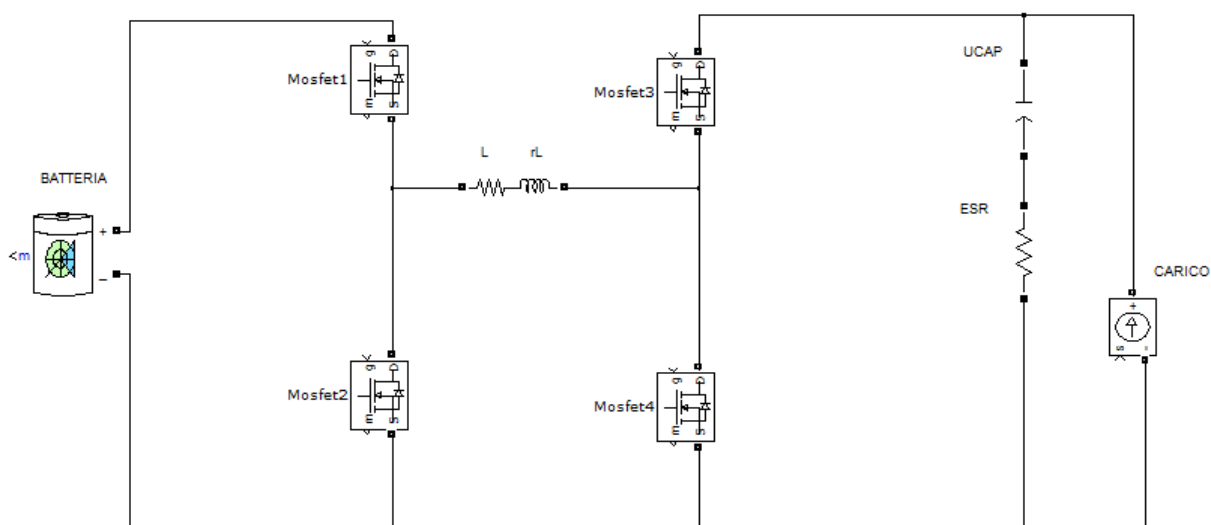
In questo quinto ed ultimo capitolo saranno presentati gli schemi circuitali e i risultati delle simulazioni del sistema batteria + supercondensatore studiato. Le simulazioni sono state eseguite attraverso il programma di simulazione Simulink. Simulink è un software sviluppato dalla compagnia statunitense MathWorks ed è utilizzato per la modellazione, simulazione e l'analisi di sistemi dinamici. E' largamente utilizzato nella teoria di controllo, per lo studio e lo sviluppo di sistemi di elaborazione digitale e per la progettazione di sistemi multi dominio. I principali vantaggi sono la sua semplicità (grazie ad un interfaccia diretta attraverso diagrammi a blocchi) e la flessibilità (possibilità di usufruire di una serie di librerie anche personalizzabili dall'utente). Questo programma è strettamente legato ed integrato all'ambiente Matlab e può essere programmato direttamente da quest'ultimo.

#### ***5.1 SCHEMA CIRCUITALE***

Attraverso il programma Simulink si è costruito lo schema del sistema studiato. Nello schema presentato in Figura 5.1 possono essere distinte 4 zone:

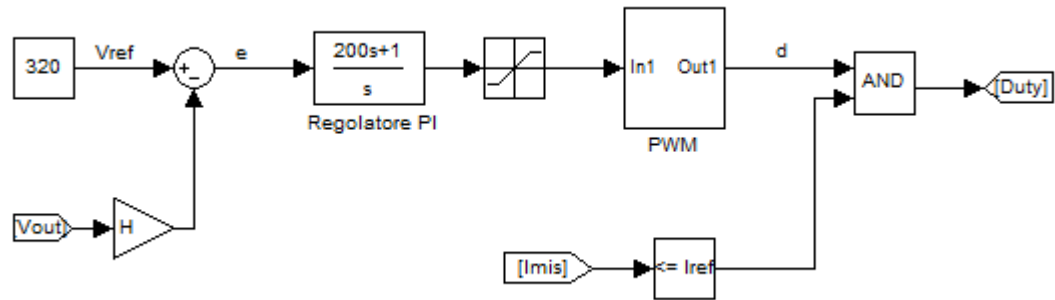
- *Batteria*: presente nella parte sinistra, in ingresso al convertitore. Per la batteria si è preso un modello già esistente in Simulink nel quale si è cambiato qualche parametro. Si è scelto così una Capacità Nominale di 4 Ah e una Resistenza Interna di 20 m $\Omega$ ;

- *Convertitore*: il convertitore, posto nella parte centrale dello schema, è formato da 4 Mosfet disposti a ponte e dall'induttore con in serie la sua resistenza interna. Per i Mosfet si è scelto una resistenza di stato ON di  $R_{ON}=20\text{ m}\Omega$ , mentre la resistenza del diodo presente al suo interno è stata scelta  $R_d=1\text{ m}\Omega$ . L'induttore invece ha un valore di  $707\text{ }\mu\text{H}$  e la sua resistenza serie è  $r_L=8\text{ m}\Omega$ ;
- *Supercondensatore*: si trova nella parte destra, in uscita dal convertitore e collegato al carico. Il supercondensatore è stato modellizzato con un condensatore ed una sua resistenza in serie equivalente. Il valore del condensatore è  $C=1,4\text{ F}$ , mentre la sua resistenza ESR è uguale a  $20\text{ m}\Omega$ ;
- *Carico*: il carico è stato modellizzato con impulsi di corrente positivi e negativi. I picchi positivi corrispondono alle accelerazioni, mentre i picchi negativi corrispondono alle decelerazioni. Perciò, attraverso un generatore di impulsi, sono stati creati impulsi di corrente di  $+30\text{ A}$  per l'accelerazione e di  $-60\text{ A}$  per la frenatura con una larghezza dell'impulso rispettivamente del 20% e 10%. Questo perché la frenata è molto più veloce e violenta e fornisce quasi la stessa quantità di energia di una accelerazione in metà tempo.



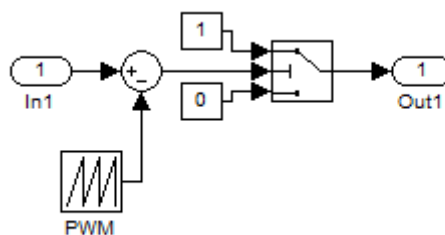
**Fig.5.1\_Schema del sistema Batteria + Supercondensatore in Simulink**

Per controllare il sistema, precisamente la corrente della batteria, si è costruito il sistema di controllo presentato in Figura 5.2. Dallo schema si può notare come ogni singolo blocco sia stato creato seguendo lo schema di un qualsiasi sistema di controllo in corrente, ad esempio quello presentato in Figura 4.5 del capitolo precedente.



**Fig.5.2\_Schema del sistema di controllo in Simulink**

Come si nota, il segnale di riferimento è preso uguale alla tensione teorica che si vorrebbe in uscita, cioè 320 V, ed è confrontata istante per istante col reale valore della tensione in uscita. Poi questo segnale di errore è moltiplicato per la funzione di trasferimento del regolatore PI e viene limitato attraverso un blocco di saturazione tra 0,05 e 0,95 per non creare problemi all'intero sistema. Questo segnale viene poi modulato attraverso il blocco PWM presentato in Figura 5.3, il quale dà a questo segnale la tipica forma ad onda quadra per formare il duty cycle. Nel blocco PWM viene impostata la frequenza di switching del sistema pari a 50 kHz.

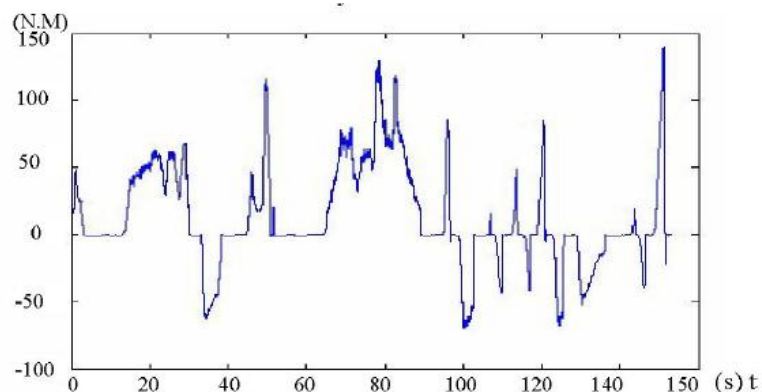


**Fig.5.3\_Schema del modulatore PWM**

Il duty cycle viene poi inviato alla porta AND la quale passa il valore del duty cycle alle valvole se la corrente rimane sotto il limite prescelto, altrimenti dà in uscita un segnale basso (chiude l'interruttore) quando la corrente misurata sull'induttore supera la corrente limite di batteria. Il segnale duty cycle è poi passato grazie al tag "duty" al gate della valvola interessata. Si spiega ora il funzionamento delle simulazioni.

## 5.2 FUNZIONAMENTO

Per prima cosa bisogna scegliere la durata delle simulazioni. Sapendo che la frenatura ed l'accelerazione durano in media da 1 a 3 secondi e, sapendo che nella presente simulazione sono presenti 3 impulsi, si è scelta una durata di simulazione totale di 25 secondi. Dopo aver scelto la durata complessiva bisogna creare il diagramma di carico del motore. Il diagramma di carico deve essere simile alla Figura 5.4.



**Fig.5.4\_ Tipico Diagramma di Carico (Coppia del Motore)**

Esistono essenzialmente due modalità di funzionamento: un funzionamento tipico e un funzionamento limite molto pericoloso, ma anche poco probabile.

### **5.2.1 Funzionamento Tipico**

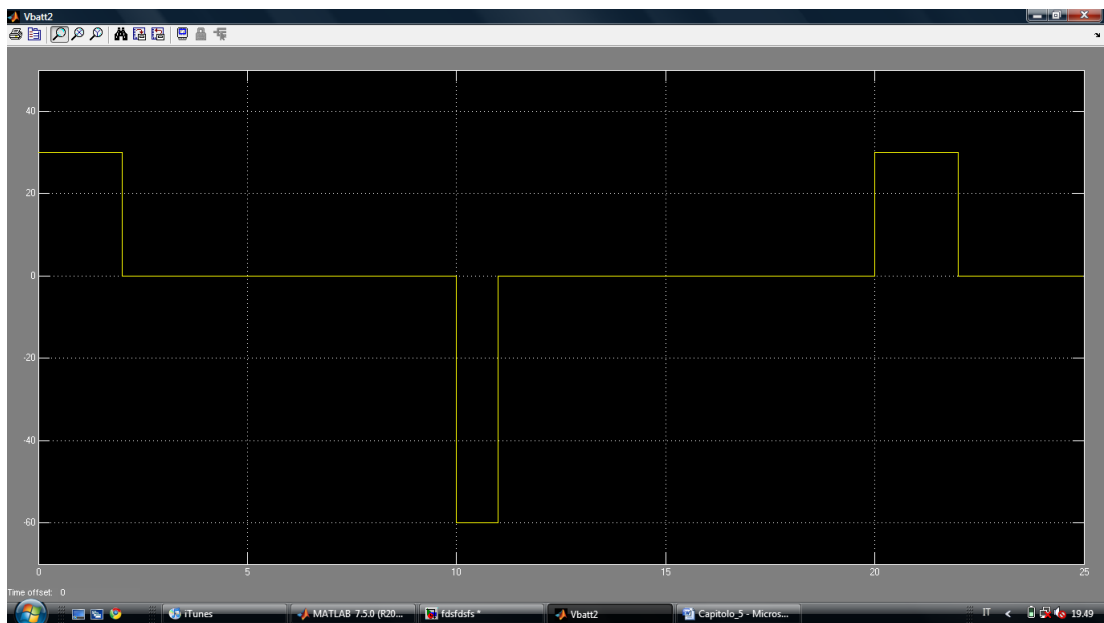
Nel caso di funzionamento tipico dopo ogni frenatura segue un'accelerazione. Dalla Figura 5.5 si può notare che l'impulso che si presenta tra il tempo  $t=0$  e il tempo  $t=2s$  corrisponde ad una accelerazione, l'impulso negativo tra  $t=10 - 11s$  corrisponde ad una frenatura e l'ultimo impulso tra  $t=20 - 22s$  corrisponde ad un'ulteriore accelerazione. Perciò a seconda della corrente presente sul carico si possono individuare sei intervalli di funzionamento:

- *1° Intervallo ( $t_1 = 0 - 2 \text{ sec}$ ):* è presente un'accelerazione. Il carico richiede al sistema (cioè ai due elementi di accumulo) una certa quantità di corrente. Il supercondensatore e la batteria iniziano a fornire corrente al carico. La corrente di batteria viene limitata al suo valore prestabilito: la batteria fornirà quindi la sua massima corrente, mentre la restante parte sarà estratta dal supercondensatore. Le tensioni del supercondensatore e della batteria iniziano a diminuire. Si può notare come la tensione della batteria cali in maniera molto più lenta rispetto a quella del supercondensatore. Questo è dovuto alla maggiore capacità (energia specifica) della batteria rispetto a quella del supercondensatore e da una minor corrente estratta dalla batteria rispetto a quella estratta dal supercondensatore;
- *2° Intervallo ( $t_2 = 2 - 10 \text{ sec}$ ):* la corrente del carico è nulla, cioè non è presente nessuna accelerazione né frenatura (è come se il carico fosse staccato dal resto del sistema). In questo intervallo la batteria continua a fornire corrente al supercondensatore per ricaricarlo fino al valore nominale. Il supercondensatore riceve quindi corrente dalla batteria (si può notare che la corrente è negativa perché entrante). La tensione della batteria continua a scendere con la stessa pendenza del primo intervallo (in quanto continua a fornire costantemente la corrente massima), mentre la tensione del supercondensatore inizia a salire con una certa pendenza che dipende dalla corrente estratta dalla batteria;

- *3° Intervallo ( $t_3 = 10 - 11 \text{ sec}$ ):* è presente una frenatura. In questo caso è il carico che fornisce corrente al sistema. Sia la batteria che il supercondensatore assorbono corrente (infatti sono tutte e due negative), ma il livello di corrente che la batteria può ricevere dipende dal limite massimo di corrente prescelta. Le tensioni dei due elementi di accumulo salgono con la stessa pendenza (in questo caso positiva) dell'accelerazione precedente;
  
  - *4° Intervallo ( $t_4 = 11 - 20 \text{ sec}$ ):* anche in questo caso il sistema funziona in modalità ordinaria. La batteria continua a fornire corrente al supercondensatore fino all'istante  $t=15 \text{ sec}$  nel quale diventa zero siccome la tensione sul supercondensatore ha raggiunto il suo valore nominale (il supercondensatore è totalmente carico). Dopo questo istante il sistema è quindi bloccato, cioè le due correnti sono nulle e le tensioni sulla batteria e sul supercondensatore rimangono al valore che esisteva prima di questo istante (non c'è nessun elemento che fornisce o assorbe energia);
  
  - *5° Intervallo ( $t_5 = 20 - 22 \text{ sec}$ ):* in questo intervallo è presente un'altra accelerazione. Come nel primo intervallo, batteria e supercondensatore forniscono corrente al motore. La tensione della batteria continua a scendere, mentre la tensione del supercondensatore si stacca dal valore di tensione nominale e cala anche lei;
  
  - *6° Intervallo ( $t_6 = 22 - 25 \text{ sec}$ ):* nell'ultimo intervallo il carico funziona ancora in modalità ordinaria. La batteria fornisce corrente per ricaricare il supercondensatore fino alla sua tensione nominale.
- Il sistema continua ad andare avanti con continue accelerazioni e frenature e per ognuna di queste modalità il sistema si comporta come nei casi sopra presentati.



Per ognuno di questi intervalli il convertitore deve comandare il gate dei suoi MOSFET in modo da realizzare la modalità di funzionamento voluta. Per esempio, quando si è in accelerazione o si sta andando a ricaricare il supercondensatore, il convertitore deve essere posizionato in modalità BOOST ( $M_1=ON$ ,  $M_2=OFF$ ,  $M_3=OFF$ ,  $M_4=PWM$ ) in modo da far scorrere una corrente dalla batteria al supercondensatore. Al contrario, nel caso di una frenatura o quando si vuole ricaricare la batteria, il convertitore deve essere controllato in modalità BUCK ( $M_1=ON$ ,  $M_2=OFF$ ,  $M_3=PWM$ ,  $M_4=OFF$ ) in modo da far scorrere una corrente verso la batteria.



**Fig.5.5\_Programma di carico usato in queste simulazioni**

### **5.2.2 Funzionamento Limite**

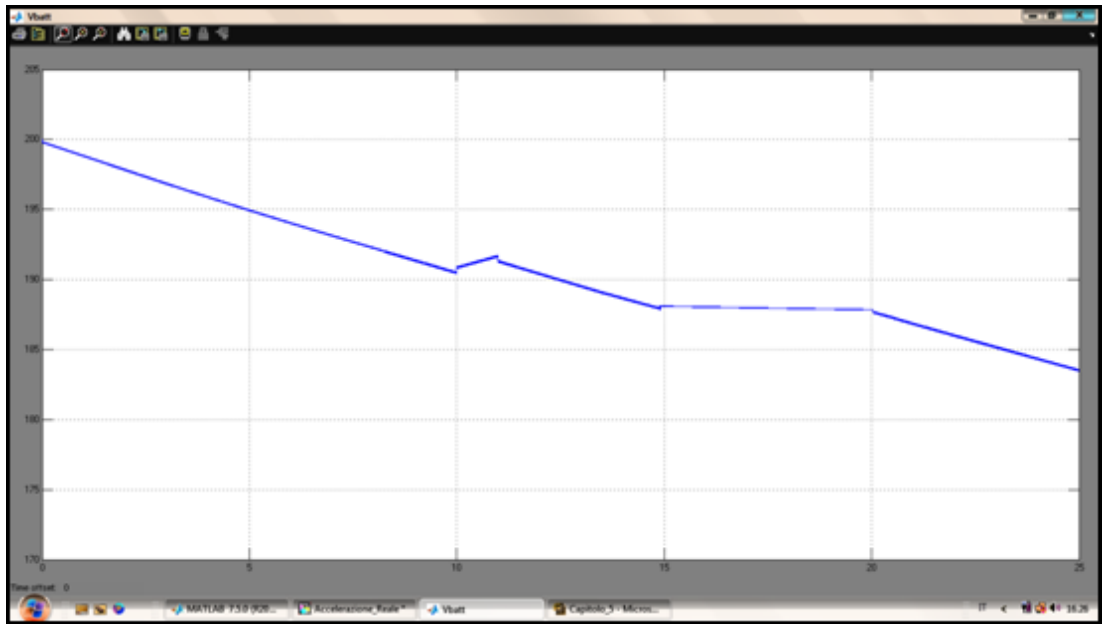
Esiste però un'altra modalità di funzionamento limite che presenta due frenature consecutive, una in successione all'altra. Questo caso è molto pericoloso e si verifica quando, dopo una prima frenatura, la tensione sul supercondensatore si trova al suo valore nominale (320 V). A questo punto non è più possibile accettare una seconda frenatura perché l'elevata quantità di energia immagazzinata sul supercondensatore potrebbe distruggerlo o farlo esplodere. Per ovviare a questo problema ci sono tre alternative: la prima consiste nel ricaricare la batteria (abbassando quindi il livello di tensione sul supercondensatore) nell'intervallo che intercorre tra una frenatura e l'altra, la seconda invece utilizza solo la frenatura tradizionale meccanica (il sistema non riceve più la frenatura a recupero), mentre nella terza il sistema scarica questa energia superflua su un reostato appositamente attivato quando si supera il valore massimo della tensione del supercondensatore (335 V). In questo lavoro si è utilizzata la terza soluzione, cioè scaricare la corrente in eccesso su un reostato di valore 5  $\Omega$ . Come si vedrà poi dai grafici, durante la frenatura ( $t=20-21$  s) entrambi il supercondensatore ed il carico si scaricheranno sul reostato con una certa pendenza, mentre nell'intervallo successivo alla frenatura (dopo l'istante  $t=21$  s) solo il supercondensatore si scaricherà sul reostato con una corrente molto più elevata rispetto al intervallo di frenatura.

## **5.3 RISULTATI DELLE SIMULAZIONI**

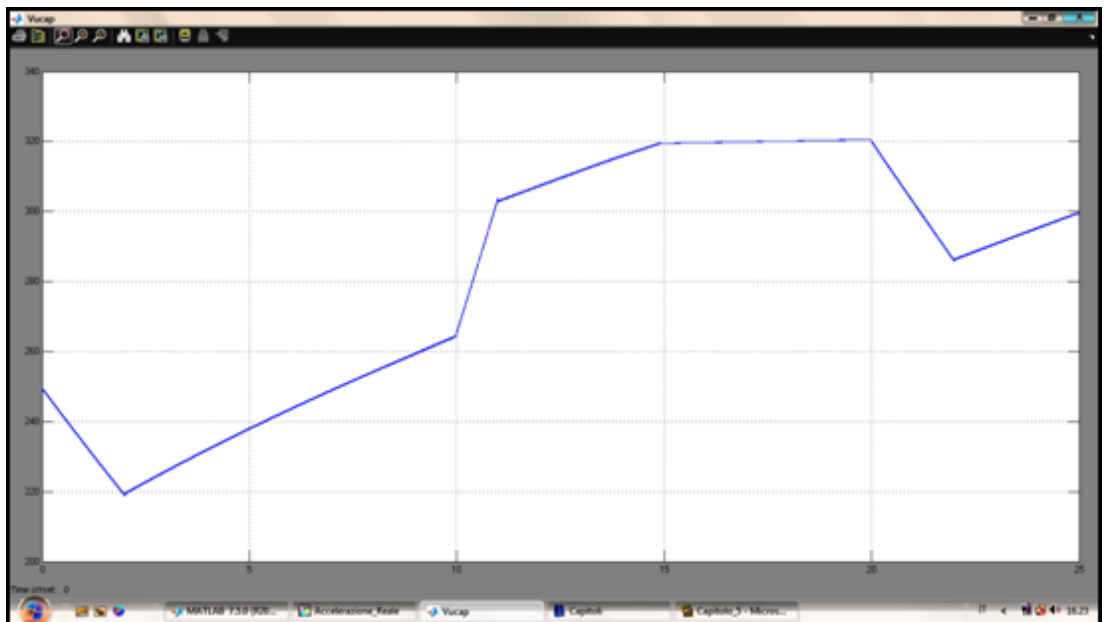
### **5.3.1 Caso Tipico**

In questo paragrafo sono presentati i risultati delle simulazioni. Per prima cosa bisogna scegliere le condizioni iniziali di funzionamento. La batteria si trova carica al suo valore nominale (200 V), mentre il supercondensatore si trova circa all'80% della sua carica, cioè a 250 V. Il convertitore è già predisposto per una accelerazione, si trova quindi in modalità BOOST. Come spiegato precedentemente, nel primo intervallo ( $t_1=0-2$ s) si verifica un'accelerazione. La tensione sul supercondensatore scende fino a circa 220 V, mentre la tensione sulla batteria passa da 200 V a 198 V. La corrente di batteria è limitata a 10 A, quindi il resto della

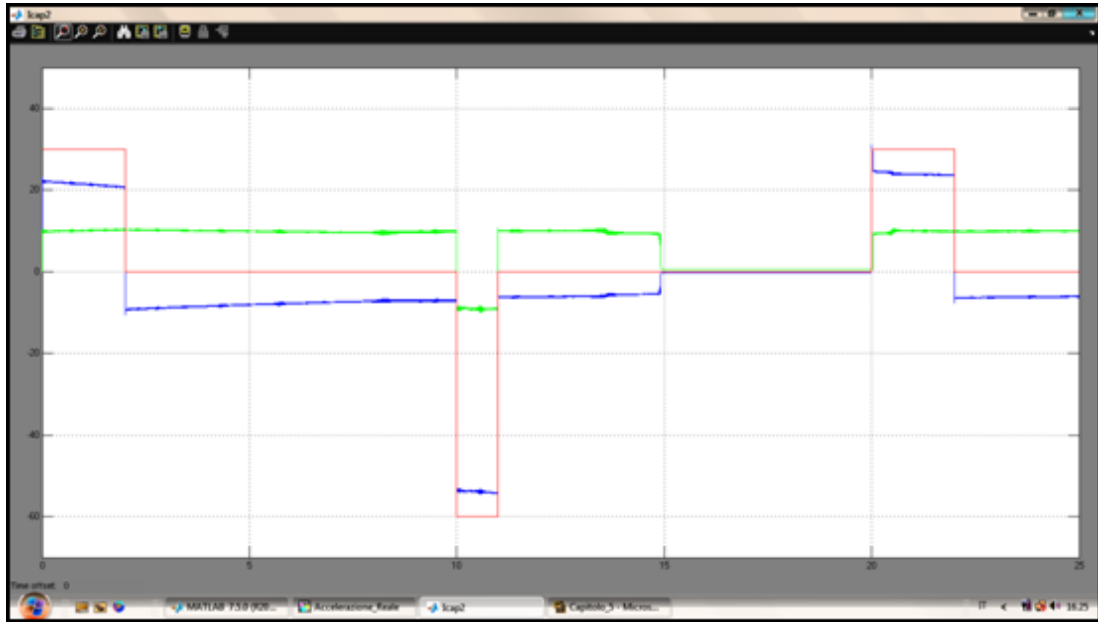
corrente è fornita dal supercondensatore ( $30-10= 20A$ ). Nel secondo intervallo ( $t_2=2-10$  s) la corrente del carico è nulla, la batteria continua a fornire 10 A e il supercondensatore riceve questi 10 A ( $10-10= 0A$ ). Il supercondensatore si ricarica e la sua tensione passa da 220 V a 265 V, mentre la batteria continua a scaricarsi con la stessa pendenza passando da 198 V a 191 V. Nel terzo intervallo ( $t_3=10-11$  s) il sistema riceve una frenatura. La corrente del carico in questo caso è negativa (-60A) e i due elementi di accumulo se la spartiscono (batteria=-10A, supercondensatore=-50A). Sia la batteria che il supercondensatore si ricaricano; le rispettive tensioni quindi aumentano passando da 191 V a 193 V e da 265 V a 303 V. Anche nel quarto intervallo ( $t_4=11-20$  s) il carico è staccato, cioè il sistema funziona normalmente. La corrente del carico è nulla, mentre la batteria continua a ricaricare il supercondensatore con una corrente di 10A. La tensione della batteria cala leggermente da 193 V a 188 V, mentre la tensione del supercondensatore sale da 300 V al suo valore nominale di 320 V. In questo istante (circa 15 s) il supercondensatore è completamente carico e quindi la batteria termina di fornire energia al supercondensatore. Questo porta ad avere tutte e due le correnti del sistema pari a zero, mantenendo così costante il valore di tensione sia sulla batteria che sul supercondensatore. Questo funzionamento si mantiene fino alla successiva accelerazione che avviene nell'istante  $t=20$  s. In questo quinto intervallo le forme d'onda delle tensioni e delle correnti sono simili al primo intervallo. Infatti la tensione di batteria si mantiene quasi stabile, passando da 188 V a 187 V, mentre la tensione del supercondensatore lascia il suo valore nominale di 320 V e scende fino a 288 V. Nel sesto ed ultimo intervallo il sistema è nuovamente in modalità ordinaria nel quale la batteria riporta la tensione del supercondensatore verso la sua piena carica. Tutto quello descritto è rappresentato nei grafici che seguono. In figura 5.6 è rappresentata la tensione sulla batteria, in Figura 5.7 è mostrata la tensione sul supercondensatore e in Figura 5.8 sono evidenziate le forme d'onda delle tre correnti (in rosso i picchi di Carico, in color verde la corrente di Batteria e in blu la corrente sul Supercondensatore).



**Fig.5.6\_Tensione sulla Batteria**



**Fig.5.7\_Tensione sul Supercondensatore**

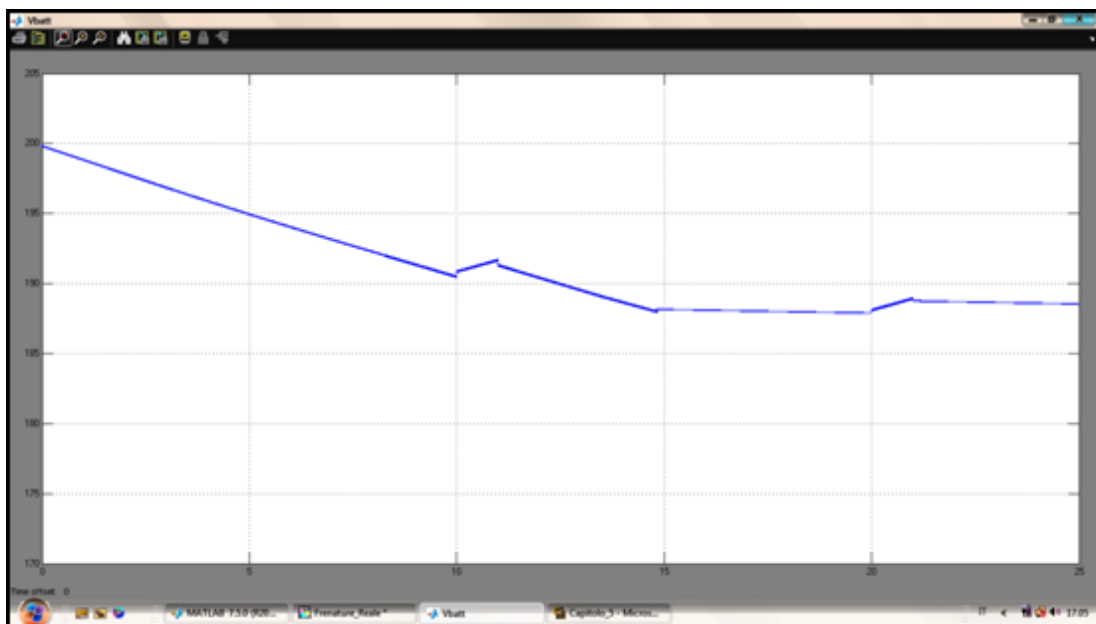


**Fig.5.8\_Grafico delle Correnti. Corrente di Batteria (color verde), Corrente del Supercondensatore (color blu) e Corrente del Carico (color rosso)**

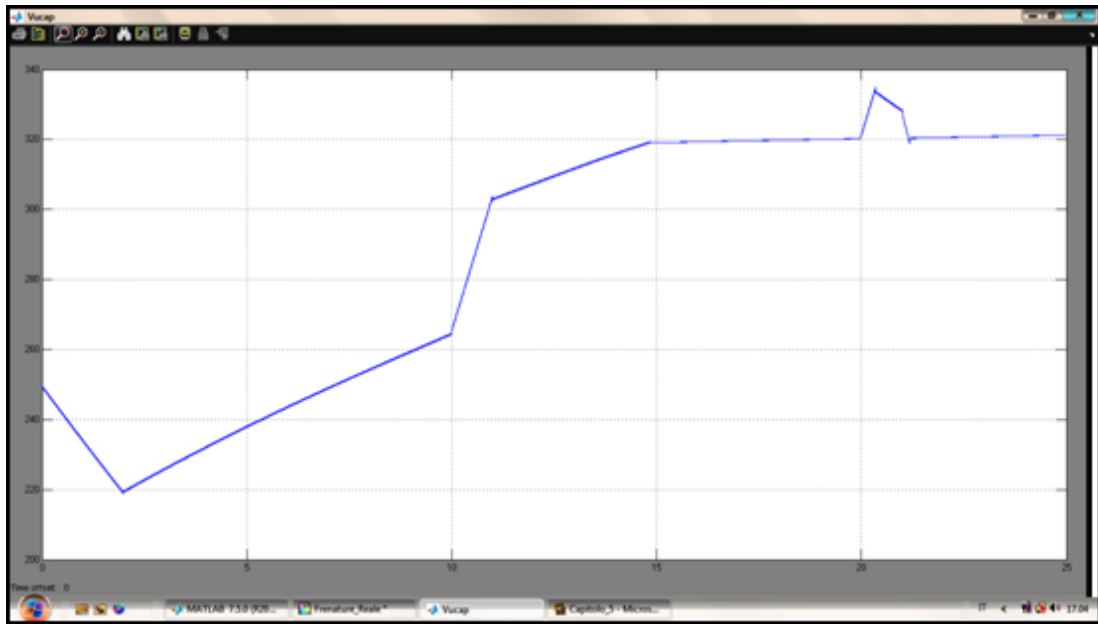
### **5.3.2 Caso Limite**

Il funzionamento nel caso limite è molto simile al caso tipico, ad eccezione dell'ultimo impulso presente nell'intervallo  $t=20-21$  s. In questo intervallo, come si può notare dalla Figura 5.9, è presente un secondo impulso frenante di durata 1 s e ampiezza -60A. La corrente del carico è quindi uguale a 60A negativi (la corrente va verso il sistema), la corrente della batteria è sempre limitata a 10A e la corrente del supercondensatore è -50A. Sia la tensione della batteria che quella del supercondensatore aumentano passando rispettivamente da 188 V a 189 V e da 320 V a 335 V. In questo istante ( $t=21$  s) entra però in atto il sistema di controllo sullo stato di carica del supercondensatore. Questo controllo chiude il carico e il supercondensatore su un reostato scaricando così le proprie correnti e salvaguardando il funzionamento del supercondensatore. La corrente del supercondensatore si scarica con una certa pendenza fino all'istante  $t=21$  s e poi molto più velocemente (solo il supercondensatore fornisce corrente) fino all'istante  $t=21,2$  s nel quale la tensione raggiunge il valore nominale di 320 V. Dopo questo istante sia la tensione della batteria che quella del supercondensatore rimangono costanti al loro valore poiché non forniscono più corrente al sistema. Tutto quello

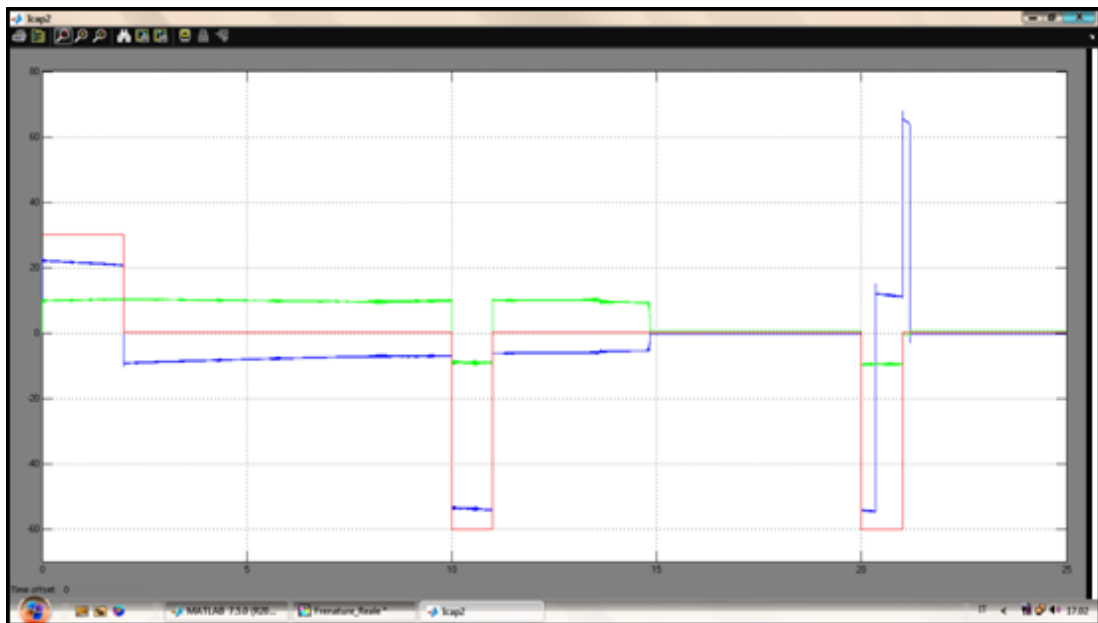
descritto è rappresentato nei grafici che seguono. In figura 5.9 è rappresentata la tensione sulla batteria, in Figura 5.10 è mostrata la tensione sul supercondensatore, mentre in Figura 5.11 sono evidenziate le forme d'onda delle tre correnti. Come si può benissimo notare dalla Figura 5.10, la tensione sul supercondensatore al tempo  $t=20,3$  s si ferma a 335 V e poi scende fino a 320 V. Si può inoltre notare dalla Figura 5.11 che nell'intervallo  $t=20-11$  s la corrente di carico, evidenziata in rosso, diventa negativa a causa della seconda frenatura.



**Fig.5.9\_Tensione sulla Batteria**



**Fig.5.10\_Tensione sul Supercondensatore**



**Fig.5.11\_Grafico delle Correnti di Batteria, di Carico e del Supercondensatore**

## *Conclusioni*

Questo lavoro ha presentato lo studio di un convertitore DC/DC impiegato per la trazione dei veicoli elettrici. Si è sperimentato che il sistema di batteria e supercondensatori ne aumenta l'efficienza e la durata di vita utile delle batterie stesse. La connessione di batterie e supercondensatori è una perfetta combinazione tra alta energia specifica ed elevata potenza specifica. L'aggiunta dei supercondensatori porta quindi benefici, in particolare, la riduzione degli stress sulla batteria durante gli elevati transitori di corrente dovuti alle accelerazioni e decelerazioni. Dopo un confronto tra i vantaggi e gli svantaggi dei veicoli elettrici ed una breve descrizione del funzionamento delle batterie e dei supercondensatori, si è giunti al progetto del convertitore. Il funzionamento del convertitore DC/DC è abbastanza semplice ed il suo compito principale è quello di trasferire energia in entrambe le direzioni nel modo più efficiente possibile (deve essere quindi bidirezionale). Dopo aver scelto le tensioni di batteria e supercondensatore e gli altri parametri, sono stati calcolati i principali componenti del convertitore: induttore e condensatore. Per rispettare i limiti imposti dal ripple di corrente e tensione, l'induttore ed il condensatore avevano rispettivamente un valore maggiore di  $L=707 \mu\text{H}$  e  $C=71 \mu\text{F}$ . Il convertitore deve funzionare in tutte e quattro le configurazioni (Buck e Boost in entrambe le direzioni) ma, per semplicità, ne sono state studiate solo le due più importanti: la modalità Boost in accelerazione e la modalità Buck in frenatura. Dopo aver descritto brevemente il calcolo delle potenze e del rendimento del convertitore, è stata trattata la tecnica di controllo in corrente in modo da limitare la corrente della batteria. Per realizzare questa tecnica si è dovuto studiare e progettare un regolatore PI (Proporzionale - Integrale). Per un buon progetto del regolatore PI sono state prese in considerazione le specifiche sulla frequenza di taglio e sul margine di fase. Infine nel quinto ed ultimo capitolo sono mostrate le simulazioni del sistema batteria e supercondensatore studiato. Il diagramma di carico del motore è stato modellizzato con impulsi di corrente,



positivi se in accelerazione e negativi se in frenatura. Sono state studiate così le due modalità di funzionamento corrispondenti a due diversi diagrammi di carico: un funzionamento tipico ed un funzionamento limite. Nel funzionamento tipico sono state simulate in sequenza un'accelerazione, una frenatura e poi ancora un'altra accelerazione, mentre in quello limite sono state simulate due frenate consecutive. Il secondo funzionamento è stato definito caso limite e pericoloso a causa dell'elevata energia accumulata sul supercondensatore (dovuta alle due decelerazioni). Per ognuna delle due configurazioni si è così controllato se la tensione e la corrente di batteria e supercondensatore avessero rispettato le richieste. I risultati ottenuti dalle simulazioni sono molto buoni e confermano quanto esposto negli obiettivi fissati all'inizio di questo lavoro: migliorare l'efficienza energetica e lo scambio di energia tra i due sistemi di accumulo. Questi obiettivi sono stati realizzati grazie all'utilizzo di un supercondensatore che assorbe i picchi di carico proteggendo così la batteria.

Si sono studiate inoltre altre soluzioni e tecniche per migliorare il comportamento del sistema. Per esempio l'impiego di diodi Schottky (con tecnologia al carburo di silicio) può portare ad una diminuzione delle perdite e quindi ad una maggiore efficienza del convertitore. Un altro metodo, che non è stato trattato in questo lavoro, è quello di utilizzare una tecnica Soft-Switching la quale fa sì che l'interruttore commuti a tensione o corrente uguali a zero. Questa tecnica è molto utile e può minimizzare ulteriormente le perdite, ma allo stesso tempo ha lo svantaggio di una implementazione complessa e di un costo elevato. Questo lavoro può diventare utile per lo studio e la progettazione di sistemi con batteria e supercondensatore. Uno studio futuro potrebbe essere quello di costruire di un prototipo del convertitore (per esempio un convertitore di 200 W nel quale le correnti e le tensioni sono ridotte a 1/10) per verificare e confrontare sperimentalmente i risultati ottenuti dalle simulazioni.

## ***Bibliografia***

- [1] H. Farzanehfard, D.S. Beyragh, E. Adib. "A bidirectional soft switched ultracapacitor interface circuit for hybrid electric vehicle". J Energy Convers Manage 2008;
- [2] L. Gao, R.A. Dougal, S. Liu. "Power enhancement of an actively controlled battery/ultracapacitor hybrid". IEEE Trans. Power Electron. 2005;
- [3] A.J. Forsyth, S.V. Mollov. "Modelling and control of DC-DC converters". Power Engineering Journal. 1998;
- [4] J.P. Aditya, M. Ferdowsi. "Comparison of NiMH and Li-ion Batteries in Automotive Applications". Vehicle Power and Propulsion Conference. 2008;
- [5] D. Schelle, J. Castorena. "Buck Converter Design Demystified". Power Electronics Technology 2006;
- [6] R.W. Erickson, D. Maksimovic: Fundamentals of Power Electronics / Springer, 2nd edition 2001;
- [7] N. Mohan, T. M. Undeland, W. P. Robbins: Power Electronics: Converters, Applications and Design / Wiley & Sons, 2nd Edition 1995;
- [8] Documentazione integrativa: <http://it.wikipedia.org/wiki>;
- [9] Appunti del Corso di "Complementi di Elettronica Industriale di Potenza I+II".

