

Sommario

1	Introduzione	3
2	Le Minicar	5
2.1	Leggi e normative	5
2.2	Victoria Giotti Ginko	8
2.3	Specifiche di progetto	9
3	Calcoli energetici	13
3.1	Introduzione	13
3.2	Forza di trazione	14
3.2.1	Forza resistente al rotolamento	15
3.2.2	Forza resistente aerodinamica	15
3.2.3	Forza resistente alla pendenza	16
3.2.4	Forza di inerzia	16
3.3	Calcolo delle componenti delle forze	19
3.4	Potenza e Energia	24
3.4.1	Coppia motrice	24
3.4.2	Potenza elettrica	25
3.5	Energia elettrica	27
4	Le batterie	29
4.1	Introduzione	29
4.2	Circuito equivalente	30
4.3	Peukert	32
4.4	Specifiche, test e risultati	36
5	Dimensionamento dei supercondensatori e del chopper	43
5.1	Introduzione	43
5.2	Dimensionamento dei Supercondensatori	45
5.3	Convertitore bidirezionale cc/cc	52
5.4	Filtro	57
5.5	Resistenza di frenatura	62

5.6	Strategia di controllo	63
6	Componenti	67
6.1	Introduzione.....	67
6.2	Banco supercondensatori.....	68
6.3	Trasduttori	76
6.3.1	Trasduttori di corrente.....	77
6.3.2	Trasduttore di tensione.....	79
7	Bibliografia	83

1 Introduzione

La dipendenza dai combustibili fossili è un problema da affrontare proponendo soluzioni atte a limitarne l'uso e, connesso, i loro effetti negativi sull'ambiente. Una delle strade più promettenti è quella della propulsione elettrica per i veicoli stradali. L'auto elettrica nasce a metà dell'Ottocento, un po' prima dell'auto a benzina ed un po' dopo le carrozze a vapore. Se alla fine del secolo, invece di grandi giacimenti di petrolio si fosse scoperto un modo efficiente di immagazzinare l'energia elettrica, oggi forse viaggeremmo tutti su veicoli elettrici e magari si parlerebbe del motore a combustione interna come possibile, ma difficile alternativa. All'inizio il motore a combustione era sporco, rumoroso e difficile da far funzionare, e non può dunque stupire il fatto che la trazione elettrica (assieme a quella a vapore) sia stata competitiva almeno fino ai primi anni di questo secolo. Già a partire dal 1837 l'americano Davenport brevettò un primo veicolo a trazione elettrica e già allora erano evidenti gli effetti benefici sull'ambiente che tale propulsione comporta. La tecnologia di fine Ottocento permise al belga Camille Jenatzy di superare per primo il traguardo dei 100 km/h con un veicolo elettrico. Ma, come ci si rese conto dopo pochi anni di sviluppo, era stato raggiunto un limite: questo limite era la capacità energetica delle batterie. Tanto è vero che le successive sperimentazioni di veicoli elettrici stradali, continuate ancora negli anni Venti, non diedero i frutti sperati per quanto riguarda le automobili private. Tuttavia, la trazione elettrica con alimentazione ad accumulatori è stata (ed è) utilizzata sempre e comunque laddove non interessano autonomia e velocità, ma invece silenziosità ed assenza di gas di scarico. Il salto tecnologico dell'elettronica ha permesso di migliorare nell'ultimo decennio sia i record di velocità che quelli di autonomia. Ma i record di autonomia non sono ancora sufficienti, perché il problema non ancora risolto è quello di avere una batteria con capacità di immagazzinare energia in quantità non dissimile da quella dei combustibili liquidi. Tentativi di produrre automobili elettriche non sono mai mancati, ma solo i veicoli elettrici per uso industriale hanno continuato a prosperare per impieghi particolari ed a tutti ben noti, come i carrelli per il movimento nelle stazioni ferroviarie, i carrelli elevatori, le piccole auto per i campi da golf ed i veicoli per i servizi porta a porta. All'inizio degli anni '90 due soli erano i tipi di batteria utilizzabili sulle auto elettriche e cioè il tipo al piombo/acido (con i miglioramenti dettati dalla ricerca tecnica quale ad esempio l'acido gelificato) e quello al nichel/cadmio. Oggi giorno c'è una più ampia scelta, anche se per la trazione di veicoli leggeri sono sostanzialmente due le tipologie utilizzate: litio e piombo gel. Le prime sono batterie di ultima generazione, le cui prestazioni sono abbastanza

elevate[5] ma il costo non è accessibile a tutti. Le seconde sono l'evoluzione delle batterie al piombo acido, il cui prezzo è molto più abbordabile.

La capacità effetti e la vita di quest'ultima tipologia si riducono notevolmente se le correnti erogate sono di natura impulsiva. Un uso intelligente può essere quello di far erogare alla batteria una corrente il più possibile costante in modo da migliorare le prestazioni e allungare la loro vita. Tale funzionamento è lo scopo del "progetto *BUSAM*" discusso in questa tesi. Gli accumulatori di energia vengono associati ad un sistema di accumulo di potenza al fine di creare un sistema di accumulo misto batteria e Supercondensatore. I due sistemi vengono interfacciati per mezzo di un convertitore statico bidirezionale. Il "progetto *BUSAM*" è stato progettato ed è in fase di realizzazione presso il laboratorio di sistemi elettrici per l'automazione e la veicolistica. Il progetto prevede anche l'installazione di questo sistema a bordo di un veicolo leggero a 4 ruote (minicar). Nel capitolo 2 in particolare sono state esplicitate le normative tecniche che regolano questa tipologia di veicoli, ovvero la massima potenza erogabile, il peso e le dimensioni da rispettare. Come caso di studio è stata scelta una minicar presente in commercio e sono stati forniti tutti i parametri elettrici e meccanici di interesse, le specifiche di progetto richieste e gli schemi elettrici di principio. E' stato supposto di conoscere il ciclo di guida ed è stato preso come riferimento il ciclo di guida ECE- 15. Il capitolo 3 è dedicato al calcolo energetico. Partendo dalle forze di attrito e aerodinamiche è stata calcolata la coppia e la potenza meccanica, per poi passare al calcolo della potenza elettrica e dell'energia richiesta per effettuare un ciclo di guida. Nel capitolo 4 è stato svolto uno studio dettagliato sugli accumulatori utilizzati e come la teoria di Peukert può essere utilizzata per una stima dell'autonomia del veicolo. E' stato fatto un confronto tra le specifiche fornite dal costruttore e i risultati ricavati per via analitica e per emulazione. Nel capitolo 5 è stato dimensionato il banco dei supercondensatori tenuto conto del compito che essi devono svolgere e della loro interfaccia con il bus in continua. Si è calcolato l'induttanza del convertitore e sono stati evidenziati i vantaggi che comporta una struttura interleaved, il filtro LC necessario a ridurre sensibilmente il ripple sulla corrente di batteria e la resistenza su cui verrà dissipata, in determinate condizioni, la potenza proveniente dal motore elettrico durante le frenature elettriche. Infine è stata studiata la strategia di controllo del convertitore e sono stati forniti la flow chart e gli schemi a blocchi del sistema di controllo. Nel capitolo 6 sono state motivate le scelte commerciali adottate in merito al banco di supercondensatori, e dei trasduttori di corrente e tensione presenti nel sistema

2 Le Minicar



2.1 Leggi e normative

Da qualche anno a questa parte, la necessità di migliorare la qualità dell'aria delle nostre città ha ravvivato la discussione sull'introduzione di veicoli ecologici. A tal fine una soluzione attuata da diverse case costruttrici è quella della commercializzazione delle Minicar. Si tratta di particolari quadricicli a motore equiparati ai ciclomotori. Il codice della strada detta limiti precisi, superati i quali il veicolo non è più considerato un quadriciclo, ma un autoveicolo.

L'art 53, comma 1h del Codice della Strada definisce:

“I motoveicoli sono veicoli a motore, a due, tre o quattro ruote, dei quali fanno parte i quadricicli a motore cioè veicoli a quattro ruote destinati al trasporto di cose con al massimo una persona oltre al conducente nella cabina di guida, ai trasporti specifici e per uso speciale, la cui massa a vuoto non superi le 0,55 t, con esclusione della massa delle batterie se a trazione elettrica, capaci di sviluppare su strada orizzontale una velocità massima fino a 80 km/h. Le caratteristiche costruttive sono stabilite dal regolamento. Detti veicoli, qualora superino anche uno solo dei limiti stabiliti sono considerati autoveicoli “

Il comma deve essere integrato e modificato secondo quanto stabilito dall'art. 1, commi 2 e 3, del D.M. 31 gennaio 2003, in SOGU 29/5/2003, Recepimento della Direttiva n. 2002/24 del 18 marzo 2002, relativa all'omologazione dei veicoli a motore a due o tre ruote. Si distinguono:

- I quadricicli leggeri, la cui massa a vuoto è inferiore o pari a 350 kg (categoria L6e), esclusa la massa delle batterie per i veicoli elettrici, la cui velocità massima per costruzione è inferiore o uguale a 45 km/h. Inoltre deve rispettare una delle seguenti caratteristiche:

- 1) la cilindrata del motore è inferiore o pari a 50 c.c. per i motori ad accensione comandata;
- 2) la potenza massima netta è inferiore o uguale a 4 kW per gli altri motori a combustione interna;
- 3) la cui potenza nominale continua massima è inferiore o uguale a 4 kW per i motori elettrici.

Tali veicoli sono conformi alle prescrizioni tecniche applicabili ai ciclomotori a tre ruote della categoria L2e salvo altrimenti disposto da una direttiva CE particolare.

- I quadricicli diversi da quelli di cui sopra, la cui massa a vuoto è inferiore o pari a 400 kg (categoria L7e) (550 kg per i veicoli destinati al trasporto di merci), esclusa la massa delle batterie per i veicoli elettrici, e la cui potenza massima netta del motore è inferiore a 15 kW. Tali veicoli sono considerati come tricicli e sono conformi alle prescrizioni tecniche applicabili ai tricicli della categoria L5e salvo altrimenti disposto da una direttiva CE particolare.

Le dimensioni massime autorizzate dei veicoli a motore a due o tre ruote sono le seguenti:

- 1) lunghezza: 4,00 m;
- 2) larghezza: 1,00 m per i ciclomotori a due ruote;
- 3) larghezza: 2,00 m per gli altri veicoli;
- 4) altezza: 2,50 m.

La massa massima dei veicoli a motore a due ruote è la massa tecnicamente ammissibile dichiarata dal costruttore.

Le masse massime a vuoto dei veicoli a motore a quattro ruote sono le seguenti:

- 5) 350 kg per i quadricicli leggeri;
- 6) 400 kg per i quadricicli diversi da quelli leggeri, destinati al trasporto di persone;
- 7) 550 kg per i quadricicli diversi da quelli leggeri, destinati al trasporto di merci

(non sono prese in considerazione le masse delle batterie di propulsione dei veicoli elettrici).

Il limite di peso previsto dalla normativa vuole che per questi veicoli i telai siano necessariamente costruiti con metalli leggeri e che le carrozzerie, anch'esse votate alla massima leggerezza, siano necessariamente in materiali plastici o alluminio o simili, quali ad esempio la vetroresina.

Il carico utile¹ dichiarato del costruttore per i veicoli a motore a tre o quattro ruote non deve essere superiore a:

- 8) 200 kg per i quadricicli leggeri;
- 9) 1000 kg per i quadricicli diversi da quelli leggeri destinati al trasporto di merci;
- 10) 200 kg per i quadricicli diversi da quelli leggeri destinati al trasporto di persone.

I veicoli a motore a due, tre o quattro ruote possono essere autorizzati a rimorchiare una massa dichiarata dal costruttore che non deve essere superiore al 50 % della massa a vuoto del veicolo.

Rimanendo nell'ambito normativo è interessante rilevare che le minicar rientranti nella categoria dei quadricicli leggeri possono essere guidate a partire da quattordici anni con il Certificato di Idoneità alla Guida di ciclomotori (C.I.G, C.I.G.C o patentino). Rimane non consentito il trasporto di un eventuale passeggero fino al conseguimento della patente categoria A per il quale è richiesta la maggiore età. I quadricicli diversi da quelli leggeri (quadricicli pesanti) possono essere guidati con il possesso della patente sottocategoria A1 a partire dai sedici anni di età. Per il trasporto di un eventuale passeggero rimane il vincolo sopra citato. Tutti i nuovi modelli di Minicar sono omologati per il trasporto di 2 o di 4 persone. Per quest'ultime, il trasporto di più passeggeri è consentito solo con il possesso della patente di categoria B.

¹ in una automobile in viaggio su strada, il carico utile è costituito dai passeggeri e dal loro bagaglio, mentre l'automobile stessa viene spostata solo strumentalmente al trasporto del carico utile.

2.2 Victoria Giotti Ginko

Le minicar sono un'idea viaggiante, un'esemplificazione perfetta del concetto di dimensioni ridotte al minimo. Grazie a questa peculiarità il loro utilizzo è particolarmente indicato nelle grandi città, dove il traffico veicolare rappresenta un aspetto critico per la viabilità. Il primo modello di Minicar, attribuito ad un italiano, fu un veicolo a tre ruote chiamato Sulky e fece la sua prima apparizione al salone di Milano del 1969. Dal 1973 quel veicolo sbarcò anche in Francia e piacque al punto tale che vi aggiunsero una ruota per dar vita alle Minicar a quattro ruote del giorno d'oggi. Una di queste è la Ginko, city car della casa costruttrice Victoria Giotti ed illustrata in Figura 2-1. Caratterizzata da una apertura ad elitra delle porte è costruita con ben tre diversi sistemi di propulsione.



Figura 2-1. Victoria Giotti Ginko [1]

Un motore diesel da 440 c.c. di potenza 4 kW (quadriciclo leggero) a 3600 rpm in grado di sviluppare una coppia di 20 Nm a 1600 rpm. Una versione a benzina da 505 c.c. di potenza 15 kW (quadriciclo pesante) e coppia 32 Nm ad una velocità rispettivamente di 5100 rpm e 2150 rpm. L'ultimo modello in questione è la Ginko elettrica equipaggiata di un motore elettrico a corrente continua ad eccitazione separata con tensione di 48V. La potenza in gioco della Ginko elettrica consente l'omologazione del veicolo come quadriciclo leggero, cioè 4 kW a 3600 rpm. La coppia sviluppata è 34 Nm a 2260 rpm.

Un aspetto che non viene trascurato è quello della sicurezza. Un adeguato livello di protezione della cellula dell'abitacolo è stato raggiunto grazie all'introduzione del roll-bar annegato nella vetroresina (vedi Figura 2-2). Inoltre la scocca e l'autotelaio sono stati rinforzati in modo tale da garantire maggiore rigidità e una resistenza superiore alla torsione.

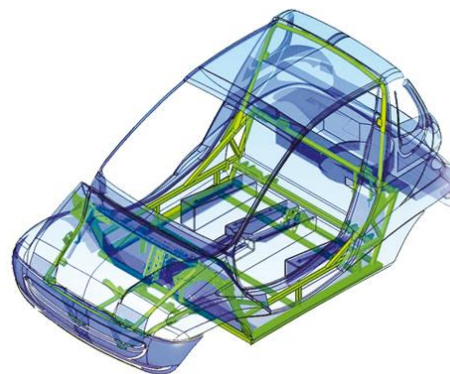


Figura 2-2. Roll bar inserito nell'autotelaio [1]

2.3 Specifiche di progetto

L'idea progettuale è quella di costruire un sistema di accumulo misto di energia elettrica per veicoli stradali, formato da un elemento di accumulo di energia (Batteria) e da un elemento di accumulo di potenza (Banco SuperCondensatore, banco SC) interfacciati per mezzo di un convertitore e finalizzato all'integrazione delle funzioni di gestione dei flussi di energia con quelli di potenza. Lo schema a blocchi del sistema di propulsione (SP) è mostrato in Figura 2-3.

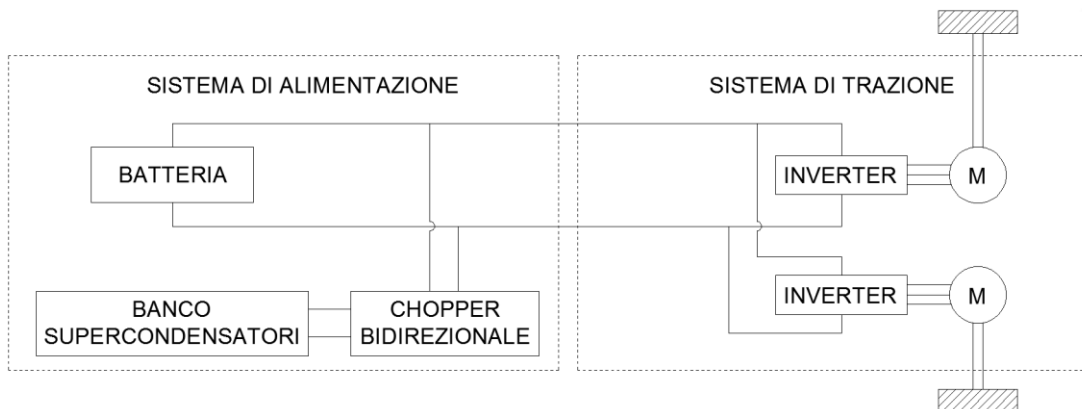


Figura 2-3. Schema di principio del veicolo.

La tensione nominale del SP è di 48V. La batteria fornisce la corrente media richiesta dal motore, mentre il banco di SC compensa gli eventuali picchi di corrente richiesti in fase di accelerazione e di immagazzinano il flusso di energia proveniente dal sistema di frenatura supposta rigenerativa. Il motore elettrico è collegato mediante inverter al bus in continua. Punto di partenza per il dimensionamento dei componenti del SP è il calcolo energetico, impostato sulla base della conoscenza di un ciclo di guida di riferimento. Con il termine ciclo di guida (*driving cycles*) intendiamo una serie di punti rappresentanti la velocità di un veicolo in funzione del tempo [4]. Tali cicli nascono dalla cooperazione di diversi Paesi, con l'obiettivo di uniformare i metodi di omologazione per i veicoli stradali. Dall'analisi di questi è possibile valutare, per diversi tipi di veicoli, i consumi di carburante e le loro emissioni. Ci sono sostanzialmente due tipologie di cicli di guida: la prima tipologia raggruppa i cosiddetti *transient driving cycles* ed è caratterizzata da cambi di velocità molto rapidi; l'altra tipologia invece si riferisce ai *modal driving cycles*, la quale è caratterizzata sia da accelerazioni modeste, sia da tratti a velocità costante. Si cerca in qualche modo di riprodurre fedelmente la classica situazione che si presenta in città, vale a dire un'accelerazione dopo una sosta al semaforo, il raggiungimento e il mantenimento, per un determinato intervallo di tempo, di una certa velocità e in fine un'ulteriore decelerazione fino alla completa fermata del veicolo. In Europa il ciclo di guida standard di riferimento è di tipo modal e viene chiamato NEDC che è l'acronimo di New European Driving Cycles.

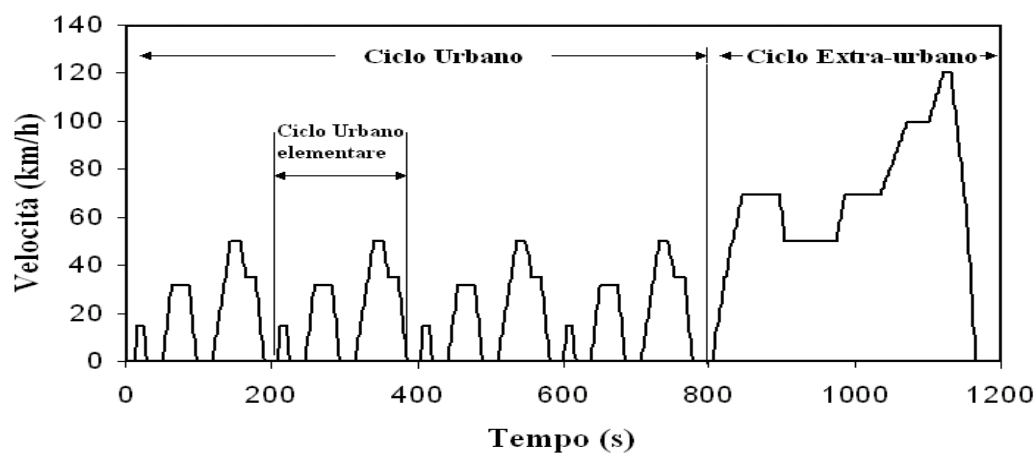


Figura 2-4. Ciclo di guida standard NEDC [4]

La Figura 2-4 mostra il ciclo di guida NEDC, il quale è composto da un ciclo urbano e un ciclo extra-urbano ed entrambi cercano di fornire una panoramica sugli stili di guida possibili dentro e fuori un centro abitato. Il ciclo urbano è composto a sua volta da quattro cicli elementari ciascuno dei quale è chiamato ciclo di guida ECE-15 ed è caratterizzato da una durata temporale di 200sec, una velocità massima di 50km/h, una velocità media di percorrenza di 19km/h e una distanza di circa 1km. Per rendere più uniforme il ciclo di guida NEDC vengono fornite anche le velocità a cui devono essere fatti i cambi dei rapporti di marcia in un veicolo non elettrico. Si passa dal primo al secondo rapporto ad una velocità di 15km/h, dal secondo al terzo a 35km/h; dal terzo al quarto a 50km/h; l'ultimo cambio di rapporto viene fatto ad una velocità di 70km/h. A norma di legge i veicoli vengono sottoposti a test di omologazione partendo da una temperatura del motore di circa 20°C. Alla luce del fatto che in corrispondenza di tali temperature i consumi e le emissioni raggiungono i valore massimi, all'interno di un ciclo urbano NEDC vengono inseriti quattro cicli ECE-15 per permettere al motore di raggiungere la temperatura di lavoro e ai consumi di stabilizzarsi sul valore di regime. Per i veicoli elettrici, si può assumere che siano nulle le emissioni e che i consumi non varino sensibilmente al variare della temperatura. Questo consente, al fine del calcolo dei consumi, di far riferimento non al ciclo di guida NEDC, ma semplicemente ad un ciclo di guida ECE-15. Nel caso di studio della minicar, la velocità massima del ciclo è limitata a 45km/h, quindi in seguito con il termine ECE-15 si intende il ciclo con velocità limitata. Oltre al ciclo di guida ECE-15 l'analisi energetica è fatta anche in riferimento ad un ciclo ECE-load, il quale presenta una accelerazione e decelerazione maggiore (in modulo) di quelle che caratterizzano il ciclo ECE-15.

I valori di velocità ed accelerazione che costituiscono il ciclo ECE-15 sono riportati Tabella 2-1.

CICLO					
Numero operazioni	Tipo operazioni	Accelerazione [m/s ²]	Velocità [km/h]	Durata operazioni [s]	Tempo totale [s]
1	Stop	0	0	11	11
2	Accelerazione	1,04	0-15	4	15
3	Velocità costante	0	15	8	23
4	Decelerazione	-0,83	15-0	5	28
5	Stop	0	0	21	49
6	Accelerazione	0,69	0-15	6	55
7	Accelerazione	0,79	15-32	6	61
8	Velocità costante	0	32	24	85
9	Decelerazione	-0,81	32-0	11	96
10	Stop	0	0	21	117
11	Accelerazione	0,69	0-15	6	123
12	Accelerazione	0,51	15-35	11	134
13	Accelerazione	0,46	35-45	6	140
14	Velocità costante	0	45	17,6	157,6
15	Decelerazione	-0,52	45-30	5,4	163
16	Velocità costante	0	35	15	178
17	Decelerazione	-0,97	35-0	10	188
18	Stop	0	0	7	195

Tabella 2-1. Fasi del ciclo ECE-15 non limitato

La Tabella 2-2 mostra velocità e accelerazioni del ciclo ECE-15 load.

CICLO					
Numero operazioni	Tipo operazioni	Accelerazione [m/s ²]	Velocità [km/h]	Durata operazioni [s]	Tempo totale [s]
1	Stop	0	0	11	11
2	Accelerazione	1,39	0-15	3	14
3	Velocità costante	0	15	9	23
4	Decelerazione	-1,04	15-0	4	27
5	Stop	0	0	22	49
6	Accelerazione	1,04	0-15	4	53
7	Accelerazione	1,18	15-32	4	57
8	Velocità costante	0	32	28	85
9	Decelerazione	-1,27	32-0	7	92
10	Stop	0	0	25	117
11	Accelerazione	1,04	0-15	4	121
12	Accelerazione	0,79	15-35	7	128
13	Accelerazione	0,69	35-45	4,07	132,07
14	Velocità costante	0	45	24,85	156,92
15	Decelerazione	-0,69	45-35	4,08	161
16	Velocità costante	0	35	17	178
17	Decelerazione	-1,39	35-0	7	185
18	Stop	0	0	10	195

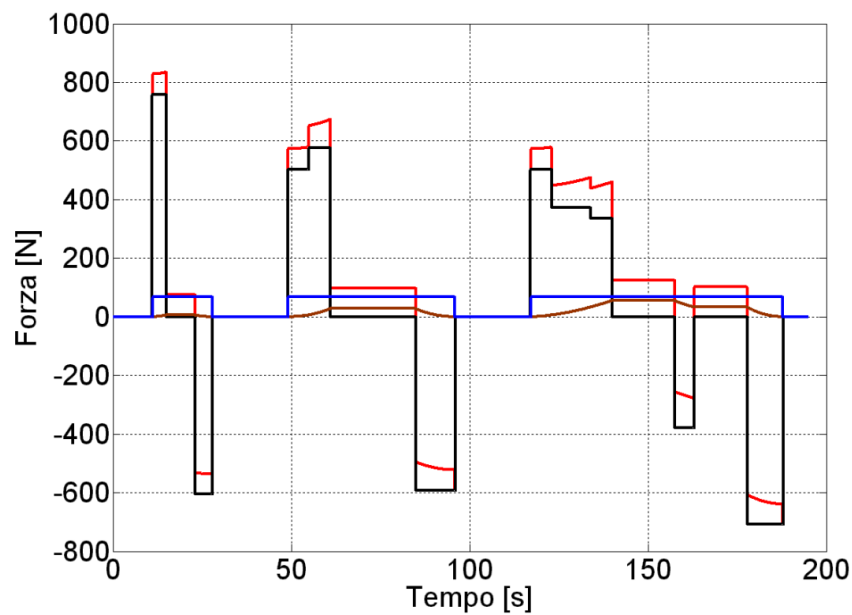
Tabella 2-2. Fasi del ciclo ECE-15 load

In Tabella 2-3 sono indicati gli altri parametri che descrivono le caratteristiche tecniche del veicolo.

Caratteristiche			
Peso a vuoto (senza motore)	297kg	Massa batterie di trazione	250kg
Peso a carico	450kg	Massa modulo Ucs	15kg
Potenza massima a 3600rpm	4kW		
Coppia massima a 1600rpm	20Nm		
Massa motore	53kg	Dimensioni	
Coeff. di resistenza aerodinamica Cx	0,28	Carreggiata anteriore	1340mm
Sezione frontale veicolo	2,10m ²	Carreggiata posteriore	1360mm
Coeff. di resistenza al rotolamento	0,01	Lunghezza massima	2740mm
Raggio di rotolamento ruota	0,28m	Larghezza massima	1550mm
Momento d'inerzia ruota	0,5kgm ²	Altezza massima	1480mm
Potenza elettrica media ausiliari	500W	Passo	1890mm
Rendimento totale trasmissione	0,92		
Rapporto di trasmissione totale	8,445:1	Pneumatici	R13
Trazione	anteriore	Tipo	145/70
Massa azionamento elettrico di trazione	30+14kg		
Momento d'inerzia motore/i trazione	0,022kgm ²		

Tabella 2-3. Caratteristiche tecniche della Minicar victoria Ginko

3 Calcoli energetici



3.1 Introduzione

Quando si parla di veicoli elettrici è molto importante riuscire a stimare a priori, sulla base della conoscenza del motore e quindi della sua potenza, le prestazioni e l'autonomia ottenibili. Sarà quindi importante avvalersi del supporto di software per le simulazioni e la conoscenza dei dati di targa di alcuni componenti fondamentali come ad esempio il tipo di batterie da utilizzare, il loro peso e le loro dimensioni. Con il termine prestazioni si intende l'accelerazione e la velocità massima, parametri che solitamente sono limitati nei veicoli elettrici. Il punto di partenza nella modellizzazione delle prestazioni di un veicolo è l'analisi dello sforzo di trazione, cioè la forza che spinge in avanti il veicolo e che viene trasmessa al suolo tramite i pneumatici. Tale forza dipende fortemente dal profilo di velocità del ciclo che il veicolo è chiamato a soddisfare. Dalla conoscenza della forza di trazione, è possibile passare al calcolo della potenza meccanica, della potenza elettrica e in fine l'energia elettrica richiesta al sistema di propulsione per compiere un intero ciclo di guida.

3.2 Forza di trazione

Analizzare l'energia elettrica, nel caso di veicoli elettrici, o meccanica, nel caso di veicoli ICE, richiede la conoscenza della forza che deve muovere l'intero sistema (veicolo compreso di carico da trasportare). Questo compito è affidato alla forza di trazione, ricavata dalla somma di altre forze più elementari ai quali è associato un determinato fenomeno [3]. Nello studio delle caratteristiche del moto dei veicoli vengono prese in considerazione le forze seguenti:

- Forza motrice o di trazione F_{tr} avente direzione e verso del vettore velocità \vec{v}_{tr} ;
- Forza frenante F_{fr} avente direzione concorde ma verso opposto del vettore velocità \vec{v}_{tr} ;
- Forza resistente al rotolamento F_{rr} (Rolling resistance force);
- Forza resistente aerodinamica F_{ad} (aerodynamic drag);
- Forza resistente dovuta alla pendenza del tracciato F_{hc} (hill climbing force);
- Forza richiesta per l'accelerazione lineare del veicolo quando la velocità non è costante F_{la} ;
- Forza richiesta per l'accelerazione angolare delle parti rotanti $F_{\omega a}$.

La forza motrice F_{tr} richiesta per spostare il veicolo è data dalla somma vettoriale di tutte le forze sopra elencate, cioè:

$$F_{tr} = F_{rr} + F_{ad} + F_{hc} + F_{la} + F_{\omega a} \quad (3.1)$$

Le forze $F_{\omega a}$ e F_{la} , la cui somma è chiamata forza di inerzia, sono negative in fase di decelerazione mentre la F_{hc} è negativa in presenza di percorsi con pendenza negativa. Una analisi in dettaglio di ciascuna componente della (3.1) è data in seguito.

Si consideri un veicolo dotato di massa m , velocità v , accelerazione a , area frontale A , e che percorra una tracciato caratterizzato da una pendenza di angolo ψ . La Figura 3-1 da una idea delle forze e delle loro direzioni nel caso preso in considerazione.

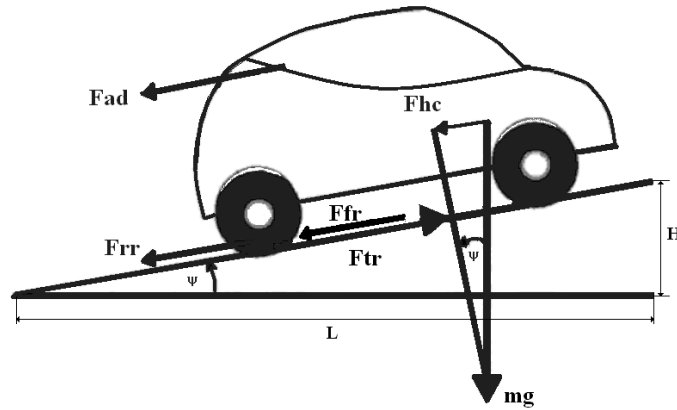


Figura 3-1. Forze agenti su un veicolo in movimento su un tracciato in pendenza [3]

3.2.1 Forza resistente al rotolamento

La forza resistente al rotolamento è dovuta principalmente all'attrito tra strada e ruota; mentre un ruolo, seppur marginale, è giocato dagli ingranaggi. Tale forza, approssimativamente costante e proporzionale alla massa del veicolo, è data da:

$$F_{rr} = \mu_{rr} mg \quad (3.2)$$

dove g è l'accelerazione di gravità e μ_{rr} è il coefficiente di resistenza al rotolamento. I principali parametri di influenza di tale coefficiente sono la pressione e il tipo dei pneumatici. Una misura del coefficiente μ_{rr} può essere fatta spingendo il veicolo ad una velocità molto bassa e misurando la forza richiesta. Valori tipici di sono $\mu_{rr} = (0.005 \div 0.015)$

3.2.2 Forza resistente aerodinamica

La forza resistente aerodinamica rappresenta la forza da fornire al veicolo per vincere l'attrito con l'aria e dipende sensibilmente dalla velocità di percorrenza. L'equazione è:

$$F_{ad} = \frac{1}{2} \rho A C_x v^2 \quad (3.3)$$

dove ρ è la densità dell'aria, e C_x è il coefficiente di resistenza aerodinamica che dipende molto dal design aerodinamico del veicolo. Valori tipici di C_x relativi a macchine commerciali variano entro un intervallo abbastanza stretto di 0.3 – 0.19. Valori prossimi a 0.7 vengono associati a motocicli e bus la cui area frontale è percentualmente maggiore. I valori della densità dell'aria variano molto con la temperatura, altitudine e umidità. Tuttavia in molti casi viene preso come buono il valore 1.2 kg m^{-3} .

3.2.3 Forza resistente alla pendenza

La forza resistente alla pendenza rappresenta la componente della forza necessaria per percorrere una strada con una determinata pendenza. Il suo valore può essere ricavato molto semplicemente con la seguente formula:

$$F_{hg} = mg \sin(\varphi) \quad (3.4)$$

dove φ è l'angolo di inclinazione della strada rispetto alla linea orizzontale. Molto spesso, nelle strade cittadine, in prossimità di salite, si possono trovare dei cartelli stradali che indicano un numero in percentuale. Tale valore non indica l'angolo della strada rispetto all'orizzontale, ma fornisce un valore della pendenza stessa. Ad esempio, se il valore indicato è 20%, questo indica che il rapporto tra il tratto verticale H e il tratto orizzontale L è pari a 0.02; ossia che per ogni km percorso si ha un dislivello di 20m.

3.2.4 Forza di inerzia

Un'altra componente, e forse anche quella di gran lunga più importante, è la forza richiesta in accelerazione. Tale forza, è data dalla ben nota seconda legge di Newton:

$$F_{in} = ma \quad (3.5)$$

dove m è la massa equivalente, ovvero la massa del veicolo addizionata alla massa ridotta delle parti in movimento soggette ad accelerazioni angolari. Deve essere considerata quindi oltre alla accelerazione lineare anche quella angolare delle parti in rotazione. Nel caso specifico il principale componente è il motore elettrico visto che ha una elevata velocità angolare. Con riferimento alla Figura 3-2, indicando con r il raggio della ruota, la coppia richiesta all'asse della ruota per muovere il veicolo è data da:

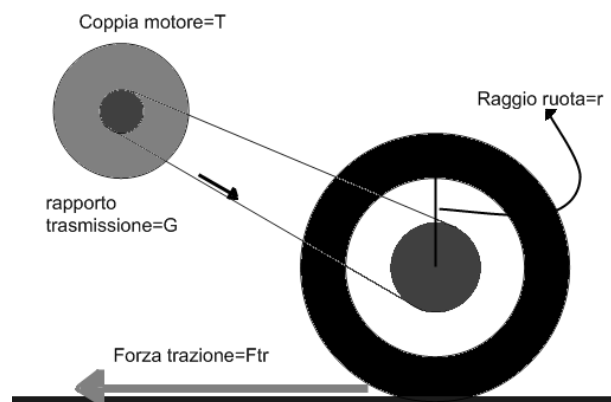


Figura 3-2. Accoppiamento tra motore e ruota [3]

$$C_r = F_{tr} r \quad (3.6)$$

Tenendo conto del rapporto di trasmissione G tra ruota e motore la coppia richiesta dal motore è:

$$C_m = \frac{F_{tr} r}{G} \quad (3.7)$$

esplicitando la forza di trazione dalla (3.7) si ha:

$$F_{tr} = \frac{C_m G}{r} \quad (3.8)$$

La velocità angolare all'asse della ruota e all'asse del motore sono rispettivamente:

$$\omega_r = \frac{v}{r} \quad (3.9)$$

$$\omega_m = \frac{v}{r} G \quad (3.10)$$

Derivando la (3.10) è possibile ricavare l'accelerazione angolare del motore:

$$\dot{\omega}_m = \frac{a}{r} G \quad (3.11)$$

e la coppia richiesta per tale accelerazione angolare è:

$$C_m = I G \frac{a}{r} \quad (3.12)$$

dove I è il momento di inerzia del rotore del motore. La forza da fornire alla ruota per avere una determinata accelerazione, con riferimento alla (3.8) si ha:

$$F_{\omega a} = \frac{G}{r} C_m = \frac{G}{r} I \frac{G}{r} a = I \frac{G^2}{r^2} a \quad (3.13)$$

Fino adesso si è assunto che il sistema di trasmissione con rapporto G abbia una efficienza del 100%. Nella realtà questi sistemi hanno dei rendimenti η_g . In conclusione la forza è:

$$F_{\omega a} = I \frac{G^2}{\eta_g r^2} a \quad (3.14)$$

Dal confronto della (3.5) con la (3.14) è possibile notare che il termine a secondo membro, fatta eccezione l'accelerazione, ha le dimensioni di una massa. Per tale motivo viene utilizzato il termine massa ridotta. Solitamente il rapporto tra la massa ridotta e la massa reale del veicolo è circa 0.05. Visto che molto spesso non si conosce il momento di inerzia I si può benissimo incrementare la massa totale del veicolo del 5% e trascurare la componente $F_{\omega a}$. Viene chiamata forza di inerzia la seguente somma:

$$F_{in} = F_{la} + F_{\omega a} \quad (3.15)$$

3.3 Calcolo delle componenti delle forze

Nel sistema di propulsione, di cui si vuole equipaggiare la minicar, l'energia è immagazzinata in un pacco di batterie. Esso è composto da 8 moduli collegati in serie ciascuno caratterizzato da una massa m_{modulo} . La massa complessiva del pacco batterie è:

$$m_{bat} = 32.2 * 8 = 257kg \quad (3.16)$$

In prima approssimazione si supponga che il banco di SC e il relativo convertitore dc/dc bidirezionale abbiano massa rispettivamente $m_{sc} = 20kg$ e $m_{ch} = 10kg$; ciascuno dei due motori elettrici, calettati alle ruote anteriori per mezzo di un giunto, abbiano massa $m_{mot} = 15.2kg$ e da azionamenti con massa $m_{dr} = 14kg$. Con riferimento alla Tabella 2-3 indicando con $m_{vv} = 297kg$ la massa del veicolo a vuoto, si può dire che la massa del veicolo è:

$$m_v = m_{vv} + m_{bat} + m_{sc} + m_{ch} + m_{dr} + 2m_{mot} = 629kg \quad (3.17)$$

Alla massa del veicolo va aggiunta la massa del pilota che mediamente è $m_{pil} = 75kg$. La massa del veicolo comprensivo di carico dunque diventa:

$$m_{vc} = m_v + m_{pil} = 704kg \quad (3.18)$$

Le masse ridotte delle parti rotanti ovvero ruota e motori elettrici sono rispettivamente:

$$m_{r,rid} = \frac{n_r j_r}{R_r^2} = 25.5kg \quad (3.19)$$

dove n_r , J_r e R_r sono rispettivamente il numero, il momento di inerzia e il raggio delle ruote, e:

$$m_{m,rid} = \frac{n_m j_m G^2}{\eta_t R_r^2} = 0.59kg \quad (3.20)$$

dove n_m e J_m sono numero e momento di inerzia dei motori elettrici, mentre G e η_t il rapporto di trasmissione e il suo rendimento. La massa totale del sistema è:

$$m_{tot} = m_{vc} + m_{r,rid} + m_{m,rid} = 730kg \quad (3.21)$$

Il calcolo delle singole componenti della (3.1) richiede la conoscenza del profilo di velocità che bisogna soddisfare. Il profilo di velocità del ciclo di guida ECE-15 è mostrato in Figura 3-3.

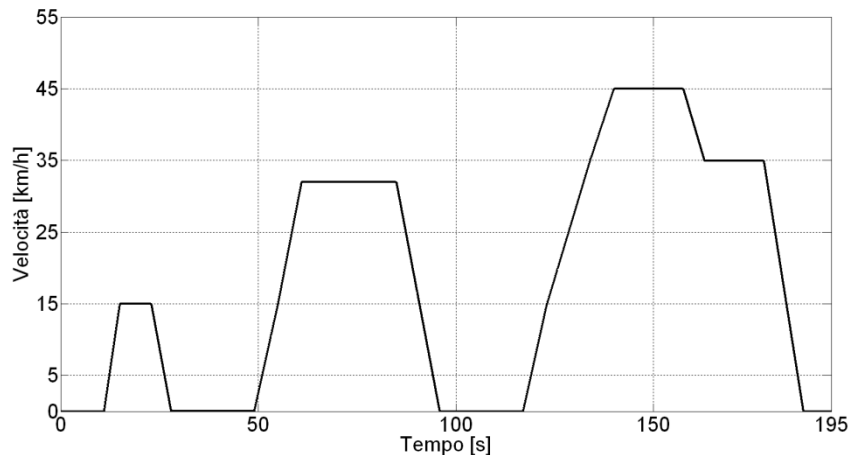


Figura 3-3. Ciclo ECE-15 limitato a 45km/h

A partire dai valori di velocità è possibile, mediante derivazione e integrazione, calcolare i valori istantanei rispettivamente di accelerazione (acc) e di spazio percorso (spa). Si assuma le seguenti condizioni iniziali:

```
acc=0;
```

```
vel=0;
```

```
spa=0;
```

Per un calcolo abbastanza preciso è scelto un passo di integrazione piccolo. Il tempo totale del ciclo è stato suddiviso in tanti intervalli, ciascuno pari al passo di integrazione stesso. Si ha:

```
dt=0.01;
```

```
t=0:dt:t_fine;
```

```
ind_camp=1;
```

```
ind_tempo=1;
```

Una volta definiti tutti i parametri è possibile ricavare lo spazio percorso, la velocità e l'accelerazione istante dopo istante.

```
for t_for=t
    if(t_for>=t_ciclo(ind_tempo))
        acc=a_ciclo(ind_tempo);
        ind_tempo=ind_tempo+1;
    end;
    acc_vet(ind_camp)=acc;
    spa_vet(ind_camp)=spa;
    vel=vel+acc*dt;
    spa=spa+vel_vet(ind_camp)*dt;
    ind_camp=ind_camp+1;
end;
```

Il profilo di accelerazione relativo al ciclo ECE-15 e riportato in Figura 3-4

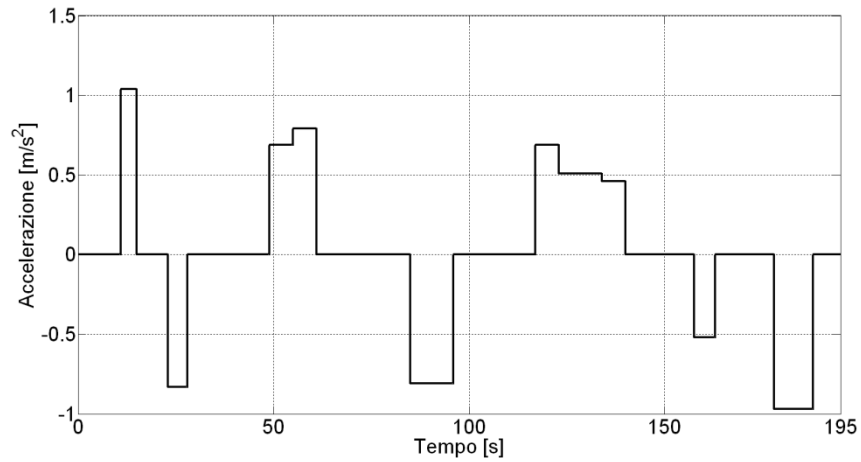


Figura 3-4. Profilo di accelerazione del ciclo ECE-15

La Figura 3-5 e la Figura 3-6 mostrano rispettivamente il profilo di velocità e di accelerazione del ciclo di guida ECE-15 load.

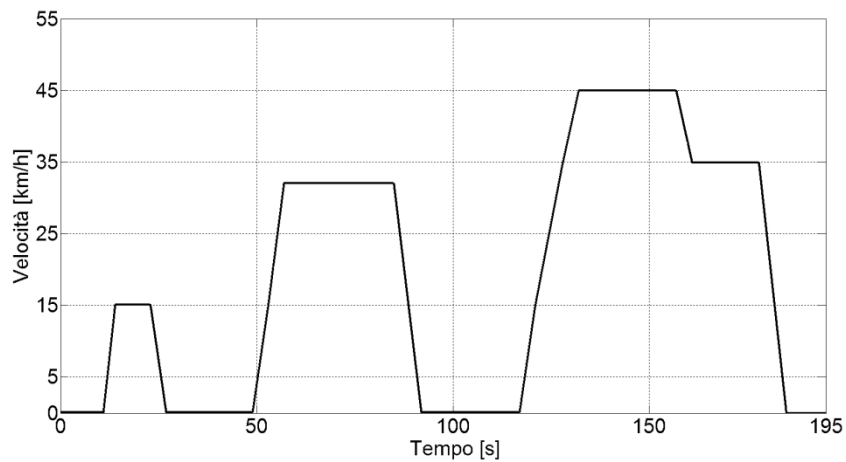


Figura 3-5. Profilo di velocità ciclo ECE-15 load

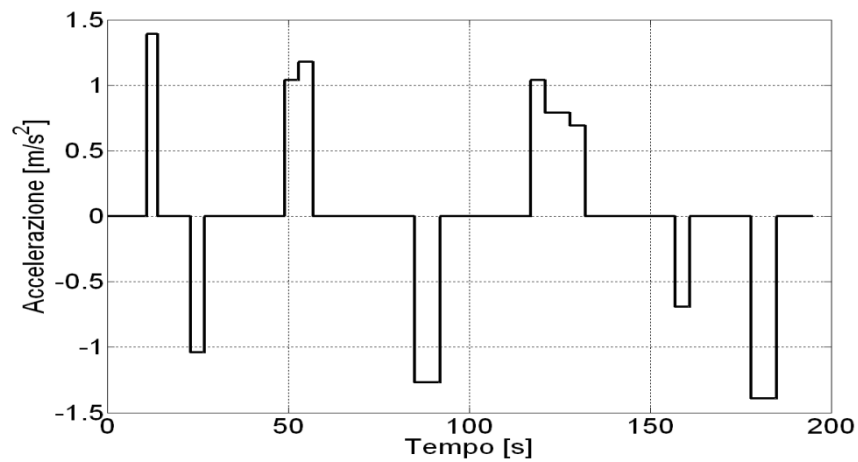


Figura 3-6. Profilo di accelerazione ciclo ECE-15 load.

La conoscenza dei valori di velocità e accelerazione permette il calcolo della (3.1).

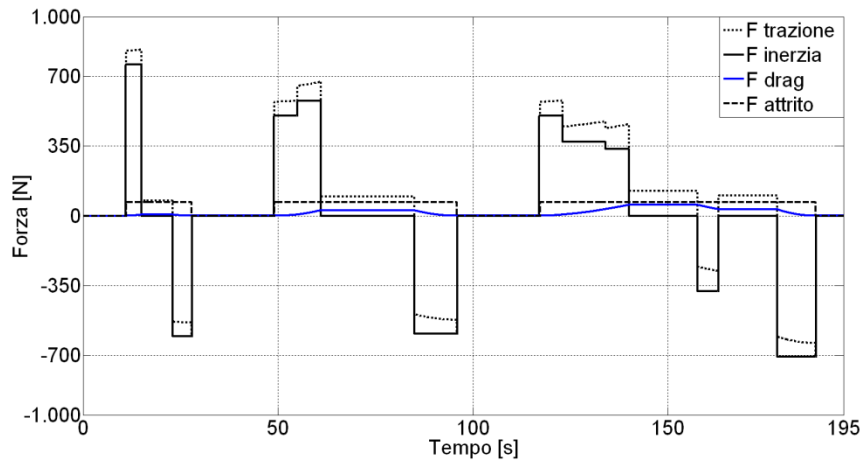


Figura 3-7. Andamento della forza di trazione, forza di inerzia, forza di attrito e forza aerodinamica

La Figura 3-7 mostra gli andamenti delle forze in gioco su cui è opportuno fare delle considerazioni. I calcoli sono riferite al ciclo ECE-15; successivamente verranno evidenziate le grandezze di maggior interesse ai fini del dimensionamento relative al ciclo ECE-15 load. La forza d' attrito è indipendente dalla velocità; quindi ha un valore costante:

$$F_{rr} = 0.01 * 704 * 9.81 = 69N \tag{3.22}$$

Quando il veicolo è fermo tale forza deve essere posta uguale a zero. Ecco spiegato l'andamento a gradino, con valore massimo non variabile, della forza di attrito in Figura 3-7. La forza resistente aerodinamica è la componente meno rilevante; situazione abbastanza prevedibile visto il basso valore del coefficiente di resistenza aerodinamica (0.28). Dato che tale forza dipende dal quadrato della velocità, il suo andamento assume tratti parabolici quando la velocità varia (cresce o diminuisce). Il picco della F_{ad} è in corrispondenza della velocità massima $v_{max} = 45km/h = 12.5m/s$ e vale:

$$F_{ad,max} = \frac{1}{2} * 1.2 * 2.1 * 0.28 * 12.5^2 = 55.16N \tag{3.23}$$

La componente che più di tutte contribuisce alla forza di trazione è la forza di inerzia. Tale forza raggruppa sia la (2.5) sia la (2.14) e dipende, come visto, dall'accelerazione e quando quest'ultima è nulla anche la forza è nulla. Il punto di massima forza di inerzia si ha in corrispondenza dell'accelerazione massima. Visto che il veicolo effettua sia delle accelerazioni sia delle decelerazioni allora si ha un valore $a_{max} = 1.04m/s^2$ e $a_{min} = -0.97m/s^2$.

In corrispondenza di tali punti, le forze di inerzia sono rispettivamente:

$$\begin{cases} F_{in,max} = m_{tot} a_{max} = 759.2N \\ F_{in,min} = m_{tot} a_{min} = -708.1N \end{cases} \tag{3.24}$$

La somma della forza di inerzia, di attrito e aerodinamica fornisce la forza di trazione. Quest'ultima, come la forza di inerzia, può essere sia positiva sia negativa. Visto e considerato che durante il ciclo la velocità non diventa mai negativa, allora con forza di trazione positiva il veicolo è in marcia e consuma energia elettrica, mentre con forza di trazione negativa (forza frenante), e quindi con verso della forza opposto al vettore velocità, il veicolo è in fase di frenata che si assume sia rigenerativa e si ha quindi il recupero di una parte dell'energia elettrica precedentemente fornita al sistema di trazione. La forza di trazione, in quest'ultimo caso, è in modulo minore della forza di inerzia in quanto parte del lavoro di frenatura viene fatto sia dalla forza di attrito sia dalla forza aerodinamica. Il valore massimo e minimo della forza di trazione è:

$$\begin{cases} F_{tr,max} = 834.44N \\ F_{fr} = F_{tr,min} = -639.13N \end{cases} \quad (3.25)$$

3.4 Potenza e Energia

3.4.1 Coppia motrice

Conoscendo la F_{tr} è possibile calcolare dalla (3.6) la coppia richiesta alla ruota. Tra questa e il motore c'è un sistema di trasmissione che può essere più o meno complesso. Esso è caratterizzato da un proprio rapporto di trasmissione e un proprio rendimento. Tali valori sono rispettivamente:

$$G=1 \quad \eta_{trasm} = 0.95 \tag{3.26}$$

Per calcolare la coppia meccanica che il motore elettrico deve fornire alla ruota, si deve tenere conto che con coppia C_r maggiore di zero il veicolo si trova nel funzionamento di marcia; mentre con C_r minore di zero, il veicolo si trova nella situazione di recupero dell'energia. e vale la seguente relazione:

$$\begin{cases} C_m = \frac{C_r}{\eta_{trasm} G} & (C_r > 0) \\ C_m = \frac{C_r}{G} \eta_{trasm} & (C_r < 0) \end{cases} \tag{3.27}$$

In Figura 3-8 sono mostrati gli andamenti sia di C_r sia di C_m . Le due curve differiscono di poco dato che il rapporto di trasmissione è 1 e il rendimento di trasmissione è alto.

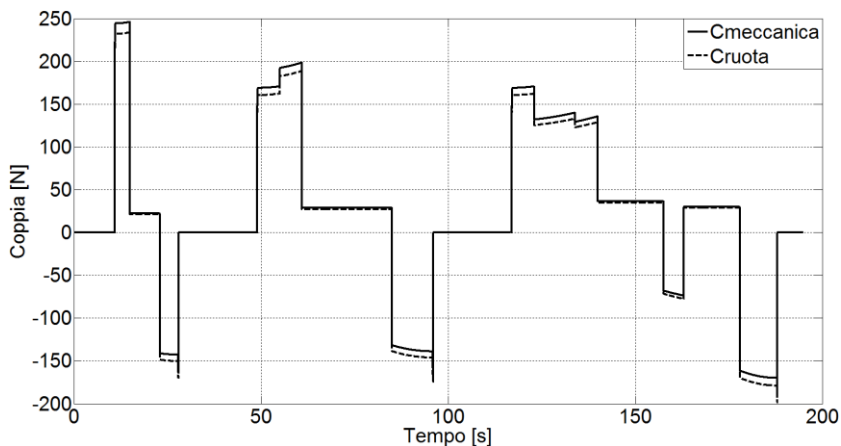


Figura 3-8 Andamento della coppia richiesta dalla ruota e fornita dal motore

La coppia meccanica massima e minima che il motore deve fornire alla ruota rispettivamente durante la marcia e la frenata sono:

$$\begin{cases} C_{m,max} = 256 N \cdot m \\ C_{m,min} = -170 N \cdot m \end{cases} \tag{3.28}$$

3.4.2 Potenza elettrica

La potenza che deve essere fornita alla ruota in ogni istante vale:

$$P_r = F_{tr} v \tag{3.29}$$

La potenza meccanica fornita dal motore alla ruota, tenendo conto del η_{trasm} , è:

$$\begin{cases} P_m = \frac{P_r}{\eta_{trasm}} & (P_r > 0) \\ P_m = P_r \eta_{trasm} & (P_r < 0) \end{cases} \tag{3.30}$$

La Figura 3-9 mostra l'andamento delle potenza meccanica richiesta alla ruota P_r durante tutto il ciclo di guida ECE-15. Nello stesso grafico è rappresentata la curva della potenza meccanica che deve essere fornita dal motore P_m .

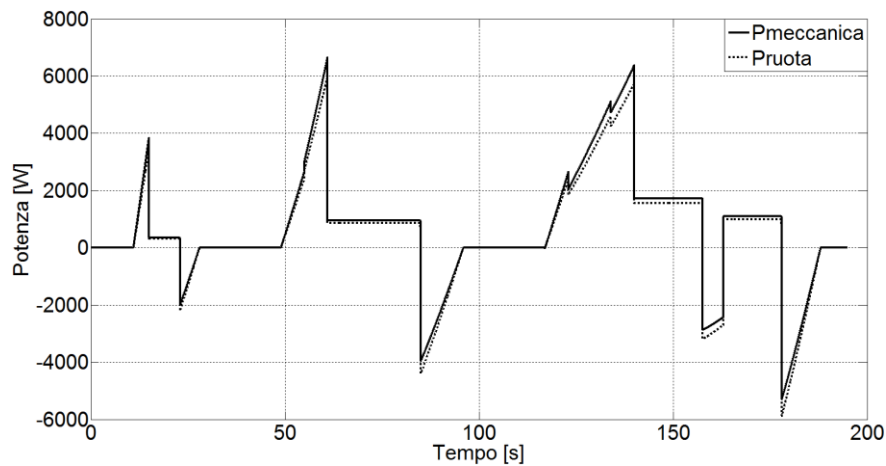


Figura 3-9. Andamento della potenza meccanica durante il ciclo ECE-15

La massima e la minima potenza che il motore deve fornire sono:

$$\begin{cases} P_{m,max} = 6300W \\ P_{m,min} = -5590W \end{cases} \tag{3.31}$$

Per calcolare la potenza elettrica P_e richiesta dal motore bisogna introdurre il rendimento di trazione. Il motore elettrico ha un rendimento η_{traz} quando il SP fornisce energia al sistema di trazione e il veicolo si torva nel funzionamento marcia avanti, mentre ha un rendimento η_{rec} quando il veicolo frena e si recupera energia che viene immagazzinata nel SP. Si assuma $\eta_{traz} = 0.82$ e $\eta_{rec} = 0.7$. Indipendentemente dal ciclo di guida ci sono degli ausiliari da alimentare la cui potenza è $P_{aus} = 500 W$ ed essi sono sempre attivi.

La potenza elettrica fornita al sistema di trazione è:

$$\begin{cases} P_e = \frac{P_m}{\eta_{traz}} + P_{aus} \\ P_e = P_m \eta_{rec} + P_{aus} \end{cases} \quad (3.32)$$

La massima e la minima potenza elettrica è:

$$\begin{cases} P_{e,max} = 8172W \\ P_{e,max} = -3413W \end{cases} \quad (3.33)$$

La Figura 3-10 mostra l'andamento della potenza elettrica durante il ciclo ECE-15. Sono ben visibili due picchi di massima potenza elettrica in corrispondenza, ovviamente, dei picchi di massima potenza meccanica. Si può notare anche che la potenza elettrica supera il valore $P_e = 6kW$ solo per 7 secondi nel peggiore dei casi, ossia in prossimità del secondo picco positivo.

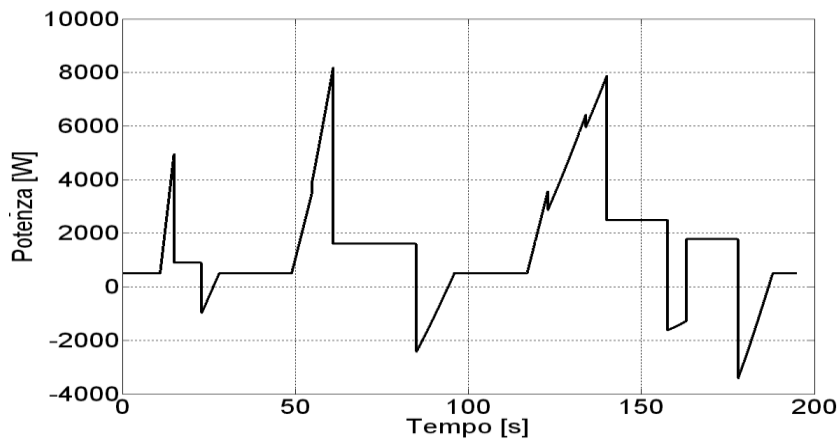


Figura 3-10. Andamento della potenza elettrica

3.5 Energia elettrica

Integrando la potenza elettrica su tutto il ciclo si ricava l'energia elettrica che bisogna fornire al sistema di trazione per effettuare un ciclo ECE-15 completo. Quindi si ha:

$$E_e = \int_0^t P_e dt = 275kJ = 76Wh \tag{3.34}$$

Una buona parte di questa energia viene assorbita dagli ausiliari, infatti si ha:

$$E_{aus} = \int_0^t P_{aus} dt = 27Wh \tag{3.35}$$

La Figura 3-11 mostra l'andamento dell'energia elettrica che il sistema di propulsione scambia con il sistema di trazione. L'energia assorbita dagli ausiliari è rappresentata da una retta dato che la P_{aus} rimane sempre costante.

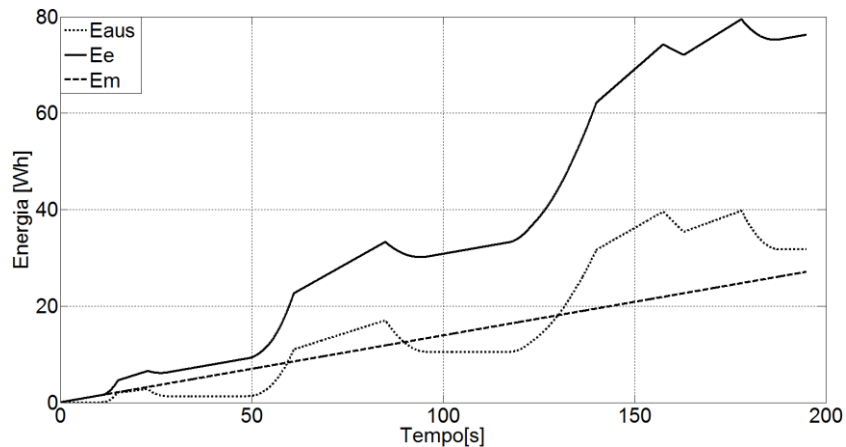


Figura 3-11. Energia elettrica, lavoro meccanico ed energia richiesta dagli ausiliari

La curva rimanente, invece, è il lavoro meccanico. Su queste curve posso essere fatte diverse considerazioni. Nel primo tratto, il veicolo è fermo, l'energia elettrica è pari all'energia elettrica degli ausiliari. Non appena il veicolo inizia a muoversi, all'energia degli ausiliari si somma il lavoro meccanico (tenuto conto di un opportuno rendimento). Quando il veicolo inizia a frenare, il lavoro meccanico diminuisce molto rapidamente mentre l'energia elettrica totale ne è impedita dalla presenza degli ausiliari. Con riferimento al ciclo ECE-15 load, la coppia meccanica massima, la potenza elettrica massima e l'energia elettrica sono:

$$\begin{cases} C_m = 322N \cdot m \\ P_e = 11400W \\ E_e = 79Wh \end{cases} \tag{3.36}$$

4 Le batterie



4.1 Introduzione

In questo capitolo l'attenzione è focalizzata sul sistema di propulsione del veicolo. La soluzione impiegata consente l'immagazzinamento l'energia elettrica all'interno di batterie al piombo gel. L'effettiva capacità di quest'ultime si riduce sensibilmente all'aumentare della corrente erogata. Inoltre correnti impulsive riducono drasticamente la vita operativa della batteria stessa. Una modalità di funzionamento che mira alla salvaguardia della batteria consiste nel ridurre il più possibile i picchi di corrente erogati verso il carico in modo da far lavorare le batterie con una corrente costante o variabile lentamente. Tale soluzione richiede la presenza di dispositivi che siano in grado di fornire i picchi di corrente richiesti dal carico. I componenti elettrici che più si addicono per soddisfare tale compito sono i supercondensatori.

In questo capitolo, si porrà l'attenzione su modelli circuitali delle batterie che consentono di analizzare l'energia elettrica residua immagazzinata nelle batterie e di stimare a priori l'autonomia sulla base della conoscenza di determinati parametri. A tal proposito è fatto riferimento alla teoria di Peukert con lo scopo di stimare il più fedelmente possibile la capacità, in Ah, che la batteria riesce a fornire al variare della corrente erogata.

4.2 Circuito equivalente

Il punto di partenza, per simulare le prestazioni di una batteria in diverse condizioni di funzionamento, è costruire un circuito equivalente della batteria per analizzare i vari fenomeni che entrano in gioco. Si prenda in considerazione una batteria connessa elettricamente ad un carico esterno. Quando la corrente fluisce verso il carico e la batteria si scarica, la tensione interna di quest'ultima è maggiore della tensione ai capi del carico; mentre quando la batteria è in carica la tensione applicata ai suoi terminali è maggiore di quella interna. Tale fenomeno viene visto come se la batteria avesse una sua resistenza interna e quindi su di essa c'è una caduta di tensione. Il circuito equivalente che rispecchia tale situazione è mostrato in Figura 4-1.

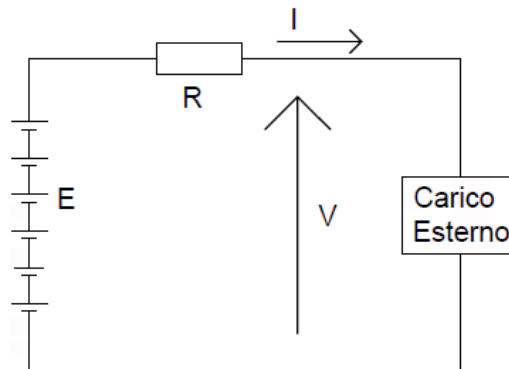


Figura 4-1. Circuito equivalente di una cella

La batteria è rappresentata come un f.e.m. di valore costante E , ma la tensione ai capi dei suoi terminali ha un valore differente V perché si ha una caduta di tensione sulla resistenza interna R . Se la batteria si sta scaricando sul carico, l'equazione che governa il sistema elettrico è la seguente:

$$V = E - Ri \quad (4.1)$$

La f.e.m. della batteria varia a seconda della tipologia della batterie, ossia a seconda se si tratti di batteria al piombo, o al nichel metallo idrato o agli ioni di litio. Il valore di R non è costante ma è funzione della vita e del modo con cui la batteria è stata utilizzata precedentemente. Dato che la resistenza interna è inversamente proporzionale alla superficie degli elettrodi, e che la capacità della batteria è approssimativamente proporzionale alla superficie degli stessi elettrodi, allora si può dire che la resistenza interna R diminuisce all'aumentare della capacità della batteria. Il valore di E , come quello di R , non è costante e dipende molto dallo stato di carica, ossia dalla profondità di scarica (Depth of Discharge, DOD) della batteria. La Figura 4-2 dà un'idea dell'andamento della tensione a vuoto di una cella al piombo acido in funzione della profondità di scarica. La relazione, f.e.m. e profondità di scarica DOD, è lineare ma in generale entrano in gioco delle relazioni abbastanza complesse e di difficile interpretazione.

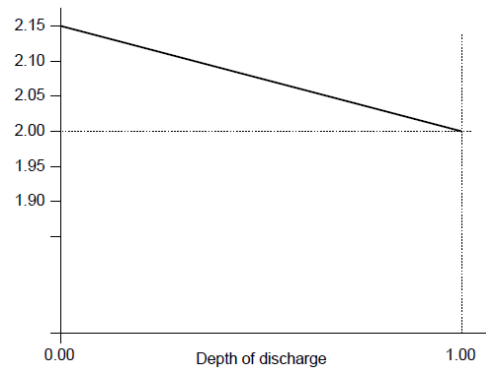


Figura 4-2. F.e.m. di una cella al piombo acido in funzione della DOD

Con riferimento alla curva di Figura 4-2 si può scrivere la seguente relazione:

$$E = n[2.15 - DoD(2.15 - 2.00)] \quad (4.2)$$

dove n è il numero di celle collegate in serie; 2.15 e 2 sono rispettivamente i valori iniziali e finali della tensione a vuoto. Un'accurata determinazione della tensione a vuoto di una batteria richiede un preciso calcolo della DOD.

4.3 Peukert

La carica elettrica che una batteria è in grado di fornire ad un carico è un parametro di vitale importanza. Nel sistema internazionale la carica viene misurata in Coulomb; tuttavia quando si parla di batteria è di uso comune la grandezza ampere per ora, indicata con A·h, per indicare la corrente, espressa in A, fornita dalla batteria per un determinato tempo espresso in h. La batteria è un elemento fortemente non lineare. Una batteria con una capacità nominale (capacità riportata nei dati di targa) di 100 A·h è in grado di fornire tale capacità se, e solo se, viene scaricata con una corrente costante ed in un certo tempo. Quest'ultimo viene chiamato tempo di scarica nominale. Se la batteria viene scaricata in un tempo minore di quello nominale allora la carica erogata è sicuramente minore di quella nominale. Diventa molto importante associare al valore della capacità anche il tempo a cui essa è riferita. La Figura 4-3 mostra come la capacità di una batteria varia molto a seconda se essa è scaricata lentamente o rapidamente.

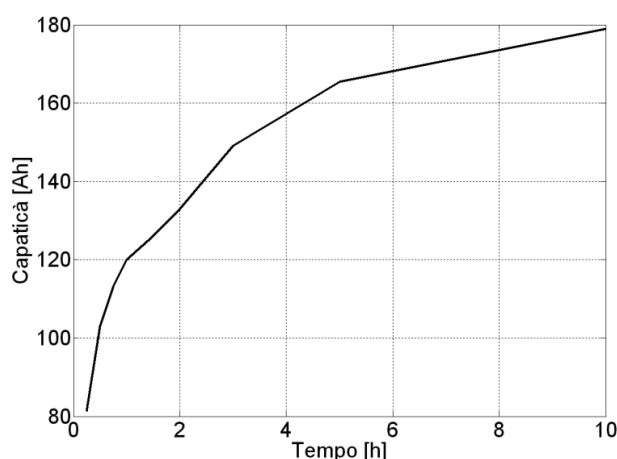


Figura 4-3. Curva della capacità di una cella al Pb gel in funzione del tempo di scarica

La curva fa riferimento ad una batteria al piombo gel 6V da 200A·h, con tempo nominale di 20h della HAZE. Ulteriori specifiche sulle batterie impiegate nel caso di studio sono riportate più avanti. E' facile notare come al decrescere del tempo di scarica si ha un consistente riduzione della capacità. Il fenomeno è più marcato con correnti di scarica elevate a cui corrispondono tempi di scarica minori. Riuscire a stimare l'andamento della capacità in funzione della corrente erogata assume un'importanza fondamentale nei veicoli elettrici. In questi casi infatti le correnti erogate sono molto elevate e l'energia fornita dalla batteria può essere notevolmente minore di quella nominale. La conoscenza della capacità residua dalla batteria permette anche di calcolare la DOD e quindi la tensione a vuoto. Il modello di Peukert [3] fornisce uno strumento per analizzare il comportamento della batteria. Peukert è stato il primo a mettere in luce che scaricare una batteria con correnti molto elevate riduce drasticamente la capacità della batteria stessa. Il punto di partenza di questo modello è che, per ogni batteria, esiste una capacità, chiamata capacità di Peukert, che è data dalla seguente relazione:

$$C_p = I^k T \quad (4.3)$$

dove k è una costante (tipicamente vale circa 1.2 per batteria al piombo) chiamata coefficiente di Peukert. La (4.3) è valida per qualsiasi valore di corrente e rispettivo tempo di scarica, e viene assunto che la batteria sia scaricata fino alla fine, con una corrente costante di I ampere impiegando un tempo T . La capacità di Peukert è definita come la capacità che una batteria è in grado di fornire quando viene scaricata con una corrente di 1 A. Ad esempio, la capacità di Peukert di una batteria da 200A·h corrisponde agli A·h che essa riesce a fornire erogando una corrente di 1 A. Per la tipologia di batteria a cui si fa riferimento, (piombo gel), 200A·h, con tempo nominale 20h (corrente nominale 10A), si è trovato un coefficiente di Peukert di 1.2. Dalla (4.3) si può ricavare la capacità di Peukert:

$$C_p = 10^{1.2} * 20 = 317 A \cdot h \quad (4.4)$$

Dalla (3.3) è possibile ricavare, per via inversa, il tempo di scarica:

$$T = \frac{C_p}{I^k} \quad (4.5)$$

La (4.5), anche se matematicamente corretta, è usata molte volte in modo scorretto; infatti il valore della capacità che bisogna inserire è quello di Peukert e non può essere inserito un altro valore. Dato che, il valore di tale capacità non è presente nelle specifiche fornite dal costruttore, necessita introdurre un accorgimento per poter utilizzare la (4.5) in maniera corretta. L'obiettivo è di esprimere la capacità di Peukert in funzione di alcuni parametri presenti nei dati di targa e quindi di poter calcolare il tempo di scarica nel modo corretto.

Se si scrive la (4.3) nel punto nominale, indicando con C_n e T_n rispettivamente il valore di capacità e il tempo nominale, la capacità di Peukert può essere scritta nel seguente modo:

$$C_p = I_n^k T_n = T_n \left(\frac{C_n}{T_n} \right)^k = \frac{C_n^k}{T_n^{k-1}} \quad (4.6)$$

Sostituendo l'espressione della capacità di Peukert trovata nella (4.5), il tempo di scarica può essere calcolato come:

$$T = \frac{C_n^k}{I^k T_n^{k-1}} \quad (4.7)$$

con I generica corrente di scarica. La capacità che la batteria è in grado di fornire per un determinato valore di corrente erogata è:

$$C = IT = I \frac{C_n^k}{I^k T_n^{k-1}} = \frac{C_n^k}{(IT_n)^{k-1}} \quad (4.8)$$

Dalla formula precedente è possibile calcolare la capacità che la batteria riesce a fornire, per un determinato valore di corrente, a partire dalla conoscenza della capacità e del tempo nominale. Anche il coefficiente di Peukert deve essere noto. Tuttavia quest'ultimo è un parametro che difficilmente è fornito con la batteria. Un modo per ricavare il coefficiente di Peukert può essere quello di elaborare ulteriormente il tempo di scarica. Allora, dalla (4.7) si ha:

$$T = \frac{T_n}{\left(\frac{IT_n}{C_n}\right)^k} \quad (4.9)$$

Esplicitando il k si ha:

$$k = \frac{\log T_n - \log T}{\log \frac{IT_n}{C_n}} \quad (4.10)$$

La (4.10) permette di calcolare il coefficiente di Peukert per una qualsiasi batteria a partire dalla conoscenza di almeno un coppia di valori, corrente e tempo, oltre a quelli riferiti alle condizioni nominali. La linea a tratto continuo della Figura 4-4 mostra la stessa capacità della batteria a cui si fa riferimento in Figura 4-3 ma in funzione della corrente di scarica anziché del tempo di scarica. Si nota come la capacità decresce all'aumentare della corrente erogata. La linea a tratto discontinuo mostra la capacità stimata con il metodo di Peukert sopra illustrato. Le due curve del grafico sottostante non coincidono perfettamente però, con buona approssimazione, si può considerare accettabile il valore della capacità stimata con il metodo di Peukert.

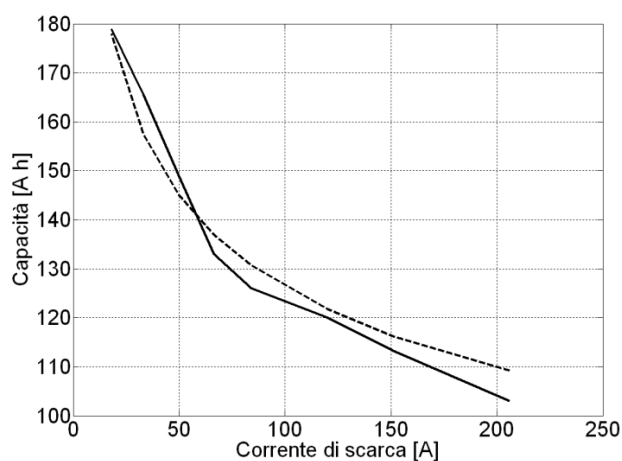


Figura 4-4. Confronto tra capacità dichiarata e quella stimata con il metodo di Peukert

In conclusione si può dire che la (4.3) e la (4.7) permettono di interpretare in un modo diverso la scarica di una batteria. Infatti, se una corrente I fluisce dalla batteria, allora dal punto di vista della capacità la corrente che appare all'uscita della batteria è I^k A. Tanto più il coefficiente di Peukert k e la corrente I differiscono dall'unità, tanto più il valore I^k si discosta da I . Un esempio dell'applicazione della formula di Peukert può essere fatto partendo da una simulazione e osservando come la capacità cambia quando la batteria si scarica. Tale simulazione è eseguita step by step in modo da calcolare la carica rimossa dalla batteria alla fine di ogni step. Se la corrente erogata dalla batteria viene indicata con I allora la carica infinitesima rimossa, dal punto di vista della capacità, dalla batteria è:

$$\delta t * I^k \quad (4.11)$$

δt è l'intervallo di tempo dello step ed è espresso in secondi; allora per esprimere la capacità in A·h si deve dividere per 3600. Se con CR_n si indica la totale carica rimossa dalla batteria, dopo n step di simulazione si può scrivere:

$$CR_{n+1} = CR_n + \frac{I^k \delta t}{3600} \quad (4.12)$$

E' molto importante tenere a mente che questa è la carica rimossa dagli elettrodi della batteria. La CR_n non indica una reale capacità trasferita al carico, ma viene introdotta esclusivamente per analizzare l'effetto di Peukert e di conseguenza dipende da k . La carica fornita al carico invece, indicata con CS (charge supplied), dipende esclusivamente dalla corrente I erogata.

Dopo n step di simulazione, tale carica vale:

$$CS_{n+1} = CS_n + \frac{I \delta t}{3600} \quad (4.13)$$

La profondità di scarica (Depth of Discharge, DOD) della batteria è data dal rapporto tra gli fornita al carico e la capacità totale immagazzinata nella stessa batteria. La DOD, dopo n step di simulazione può essere espressa anche nel seguente modo:

$$DoD_n = \frac{CR_n}{C_p} \quad (4.14)$$

4.4 Specifiche, test e risultati

Nel paragrafo precedente si è visto, in modo approssimativo, la teoria riguardante le batterie e si è dato uno sguardo alle grandezze che maggiormente influenzano il loro comportamento. In questo paragrafo si concentrerà l'attenzione sulle batterie scelte per equipaggiare il veicolo, che si vuole elettrificare, del sistema di propulsione. Le varie caratteristiche fornite dal costruttore verranno confrontate con i dati ricavati per via sperimentale (misurati) e per via analitica. Mediante una apparecchiatura chiamata "ciclatore", è stato emulato il ciclo ECE-15 in modo da poter misurare il comportamento delle batterie sul campo e con riferimento ad una applicazione di trazione. Il ciclatore, collegato alle batterie come un carico esterno, assorbe e fornisce energia dalle batterie. L'inserimento dei dati viene effettuato con l'ausilio di un software. Le possibili operazioni inseribili sono carica e scarica a tensione, corrente e potenza costante. Per ciascuna di queste fasi è previsto l'inserimento di un determinato numero di variabili. Ad esempio una scarica a corrente costante, indicata con Si, richiede come input non solo il valore della corrente che le batterie devono erogare, ma anche il tempo massimo dell'operazione, la tensione minima e gli A-h massimi che possono essere estratti dalla batteria. Queste ultime tre grandezze rappresentano delle soglie, e il raggiungimento di una di queste determina la fine dell'operazione. Una carica a tensione costante richiede come input la tensione di carica e come soglia la massima corrente da fornire durante la carica, il tempo massimo e gli A-h massimi. La variante rispetto a prima è che il superamento della soglia di corrente, evento probabile nelle prime fasi della carica, non comporta la fine dell'operazione, ma l'istaurarsi di una situazione di allarme. La condizione di partenza dopo un allarme di questo genere può essere impostata manualmente o automaticamente dato che si tratta di un allarme non grave. La Figura 4-5 mostra una schermata del software utilizzato per l'inserimento dei dati.

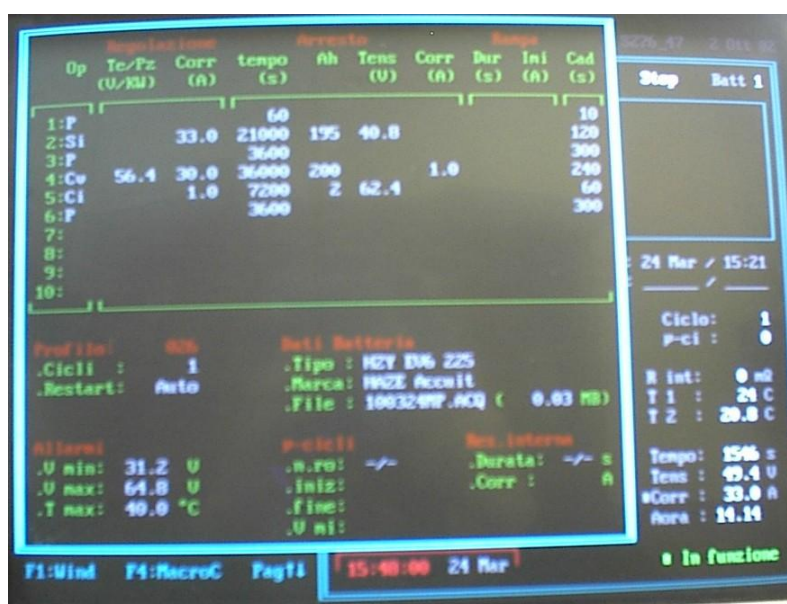


Figura 4-5. Schermata inserimento dati ciclatore.

Nel caso specifico le operazioni inserite sono una scarica a corrente costante 33A, una carica a tensione costante 56.4V e una carica a corrente costante (Ci) 1A. Nell'ultima colonna di destra sono raffigurati i tempi di acquisizione dati in ciascuna fase. In basso a sinistra sono mostrati i valori minime e massime della tensione ai capi delle batterie e la temperatura massima ammissibile. Questi valori non corrispondono a soglie ma a dei veri e propri allarmi di software anche se sono meno restrittivi delle soglie inseriti nella fase di compilazione del programma. Il Ciclatore utilizzato, modello E-8135 costruito dalla Eltra, ha tensione nominale 48-110V, corrente 6-600A; esso è provvisto anche di tre allarmi di macchina. Gli allarmi riguardano tensione minima e massima del pacco batterie e massima corrente erogabile dalle batterie. Gli allarmi di macchina vengono inseriti manualmente mediante l'uso di tre manopole collocate sul ciclatore stesso. I valori inseriti sono di estrema sicurezza e bloccano il funzionamento del ciclatore qualora non siano intervenuti gli allarmi di software. Esiste quindi una certa selettività tra le soglie, gli allarmi di software e gli allarmi di macchina. Le batterie utilizzate nel caso di studio sono al piombo acido, modello (HZY6-225EV), con elettrolita in gel, con valvola di regolazione (VRLA), 6V, 200Ah (C20). Per il sistema di propulsione, con cui si intende equipaggiare il veicolo a quattro ruote, è stata scelta una tensione nominale di lavoro di 48V; tale valore viene raggiunto con la connessione in serie di 8 batterie da 6V. In Figura 4-6 è mostrata una batteria del tipo prima citato, mentre in Tabella 4-1 sono riportate le caratteristiche di ciascuna singola batteria.



Figura 4-6. Batteria 6V, 200Ah

Nominal Voltage	6V
Nominal Capacity	200Ah (C20 @ 20°C)
Design Life	12 Years
Operating Temperature	-20 °C to 50 °C
Plates	Flat Pasted
Separator	Microporous Polymer
Active Material	Very high purity lead
Charge Voltage	Float 2.25 - 2.30 VPC @25 °C Cycling 2.35 @25 °C
	Max. 2.4 VPC Max ripple 0.05C (A)
Electrolyte	Gelled Sulphuric acid Analytical grade purity

Tabella 4-1. Caratteristiche cella 6V HYZ6

La Tabella 4-2 fornisce alcune indicazioni in merito alle dimensioni e al peso di ogni singola batteria.

		Nominal Voltage Nominal Capacity		6V 200Ah	
Dimensions	Total Height	276 mm	10.87 inches		
	(Inc. terminals)	- mm	n/a inches		
	Length	243 mm	9.57 inches		
	Width	188 mm	7.40 inches		
	Weight	32.2 Kg	71.16 lbs		

Tabella 4-2. Dimensioni della batteria HZY6-225EV

In Tabella 4-3 sono indicati alcuni parametri importanti come la capacità, espressa in A·h, che la batteria riesce a fornire per diversi tempi di scarica, ad una temperatura di 20 °C. La batteria viene considerata scarica quando, la tensione di ogni singola cella che la compone raggiunge una tensione di 1.7V. La capacità di una batteria non è funzione solo della corrente con cui essa viene scaricata, ma dipende anche dalla temperatura di lavoro.

Capacity 20°C To 1.7V	20 hour rate	183.0 Ah
	10 hour rate	179.0 Ah
	5 hour rate	165.5 Ah
	1 hour rate	120.0 Ah
	15 min	81.3 Ah
Internal resistance	2034 mOhm	
Impedance	1.5 S	
Capacity correction for Temperature Variation (C20)	40 °C	102%
	20 °C	100%
	0 °C	85%
	-15 °C	65%
Self-Discharge 20 °C	Capacity after 1 months storage	98%
	Capacity after 3 months storage	94%
	Capacity after 6 months storage	86%

Tabella 4-3. Caratteristiche della batteria HZY6

Un aumento della temperatura infatti, rispetto a quella ambiente, comporta un aumento lieve della capacità. Una diminuzione di temperatura invece, comporta una drastica riduzione di capacità. In Figura 4-7 è possibile notare l'andamento, espresso in % rispetto alla capacità nominale, della capacità di una batteria per tre diverse correnti di scarica (0.05C, 0.2C, 2C) al variare della temperatura di lavoro.

Tra le caratteristiche riportate in Tabella 4-3, un occhio di riguardo spetta all'auto-scarica. Come detto prima, questa tipologia di batteria è caratterizzata dall'aver un basso effetto di auto-scarica, difatti anche dopo sei mesi è possibile avere a disposizione una discreta capacità residua. In Tabella 4-3 l'auto-scarica è relativa alla temperatura ambiente ma anche essa è influenzata dalla temperatura. Più elevata è la temperatura, più marcato è l'effetto dell'auto scarica.

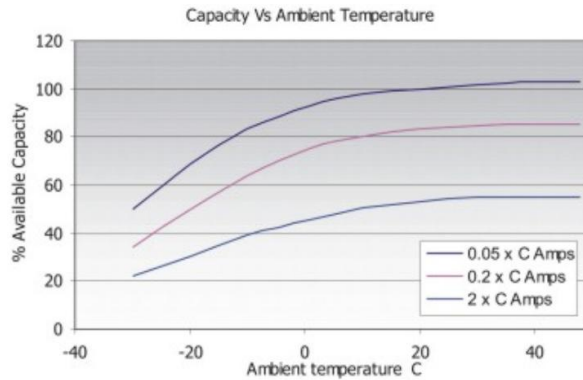


Figura 4-7. Variazioni della capacità in funzione della temperatura.

La Figura 4-8 mostra l'effetto dell'auto scarica per diverse temperature di lavoro.

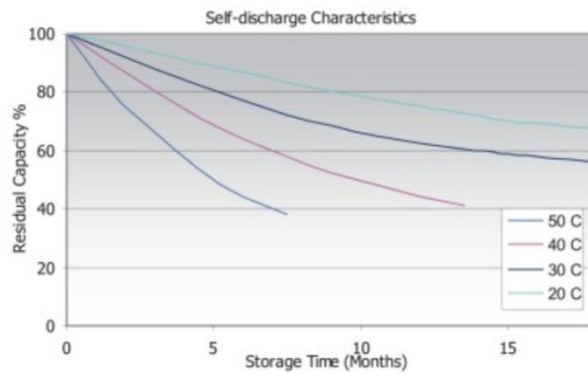


Figura 4-8. Auto scarica per diversi valori di temperatura.

Partendo dai dati forniti dal costruttore è possibile fare un confronto diretto tra questi e i dati ricavati mediante emulazione con l'utilizzo del ciclatore. In Tabella 4-4 sono raggruppati tutti i valori di corrente e relativi tempi di scarica che il costruttore garantisce al cliente. Come tensione di fine scarica viene preso il valore 1.7V per cella, corrispondente a 5.1V per batteria.

End V per Cell	5M	10M	15M	20M	25M	30M	35M	40M	45M	60M	90M	2 hr	3 hr	4 hr
1.85	610	500	440	400	360	320	290	271	254	210	156	126	88.8	68.1
1.80	710	580	500	435	392	349	315	288	268	222	165	133	94.4	71.7
1.75	790	640	540	465	411	371	331	301	278	230	168	136	96.2	73.3
1.70	880	690	580	495	428	382	343	312	285	235	173	139	98.6	75.0
1.65	925	745	595	503	431	387	347	316	290	238	175	140	99.4	75.7
1.60	1040	770	610	517	440	393	352	320	293	240	177	141	100.3	76.2

Tabella 4-4. Valori delle correnti di scarica a 20°C

Gli stessi valori di corrente forniti dal costruttore sono stati utilizzati come input della emulazione, in modo da avere dei tempi di scarica confrontabili direttamente con quelli del costruttore. Il prodotto tra corrente di scarica e tempo reale di scarica rappresenta la reale capacità che la batteria è in grado di fornire. Capacità fornita dal costruttore e capacità misurata sono state messe a confronto con la capacità stimata con l'utilizzo della formula di Peukert.

La Tabella 4-5 mostra la capacità misurata che la batteria è in grado di fornire per diversi valori di corrente di scarica. Da un confronto con la Tabella 4-3 è possibile notare che i dati misurati sono migliori rispetto a quelli forniti dal costruttore. Il motivo risiede nel fatto che i dati forniti dal costruttore sono valori minimi garantiti. Essi devono valere per un certo periodo di tempo e per tutti gli esemplari.

N. 8 batterie HAZE 6 V 200 Ah (C20)		
48 V nominali - scarica fino a 1.70 V		
regime di scarica	corrente [A]	capacità [Ah]
C ₁₀	17.9	192.5
C ₅	33.1	177.1
C ₃	49.7	170.1
C ₂	66.5	168.9
C _{1.5}	84.0	154.5
C ₁	120.0	147.0
C _{0.75}	151.0	135.4
C _{0.5}	206.0	119.8
C _{0.25}	325.0	88.6

Tabella 4-5. Valori di capacità forniti realmente dalla batteria

La Figura 4-9 mostra il confronto grafico tra i valori delle tre capacità (fornita dal costruttore, misurata con l'emulazione, stimati analiticamente). Per la tipologia di batteria in questione si è assunto un coefficiente di Peukert di 1.125.

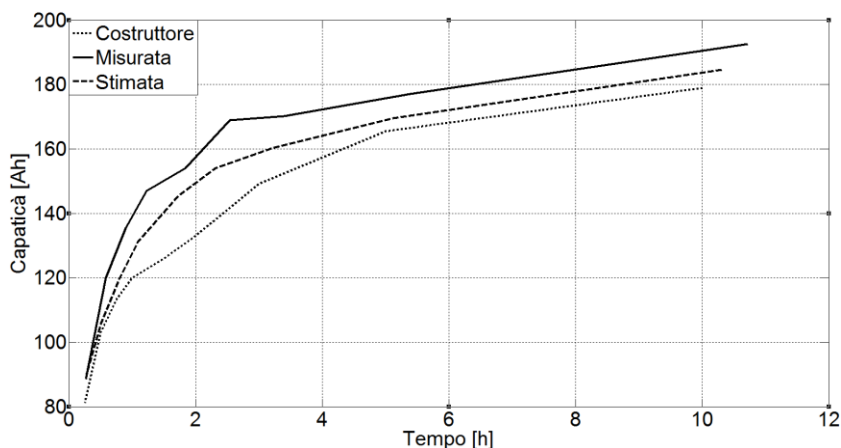


Figura 4-9. Confronto delle capacità fornite dal costruttore, misurate e stimata.

Di seguito è mostrato l'andamento della capacità in funzione della corrente di scarica, vedi Figura 4-10, della corrente erogata in funzione del tempo di scarica, vedi Figura 4-11; e della tensione di scarica, vedi Figura 4-12.

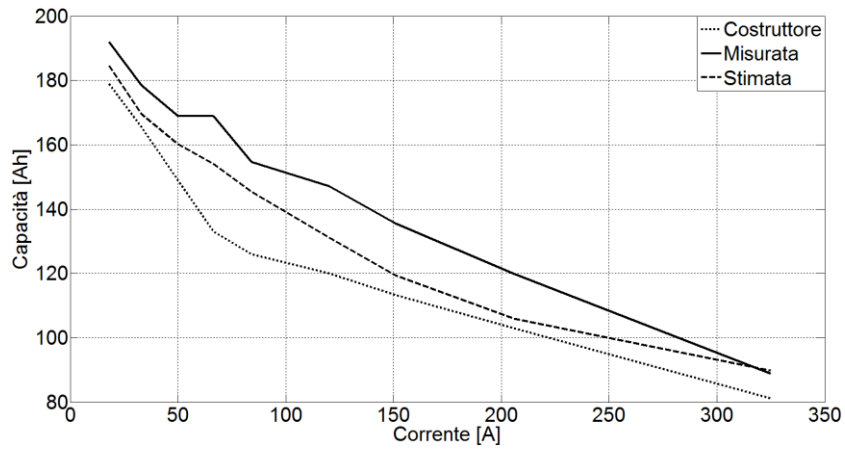


Figura 4-10. Andamento della capacità in funzione della corrente di scarica

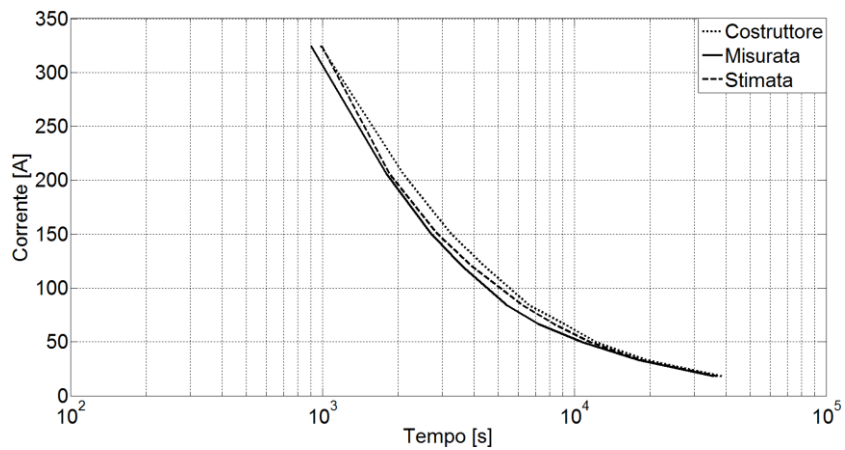


Figura 4-11. Andamento della corrente in funzione del tempo di scarica

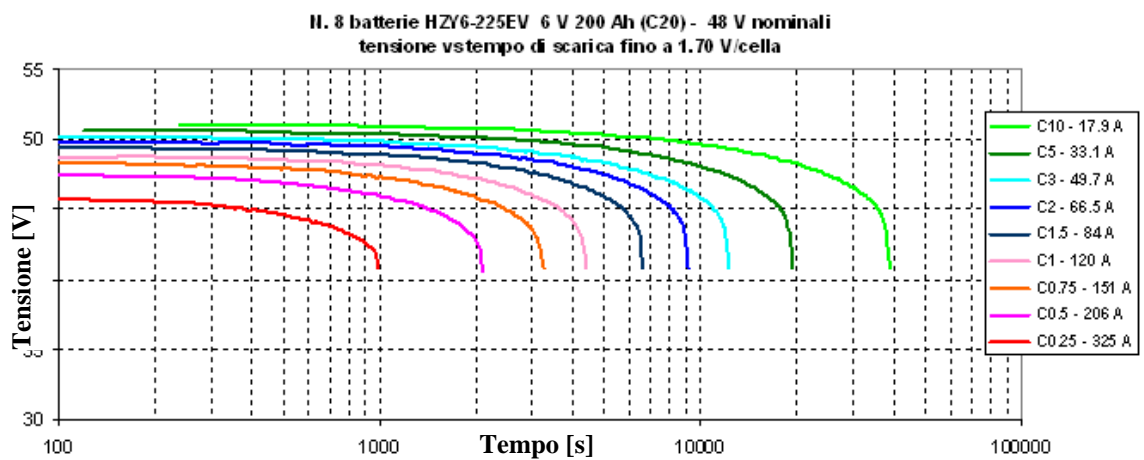


Figura 4-12. Andamento delle tensioni di scarica per diversi valori di corrente

5 Dimensionamento dei supercondensatori e del chopper



5.1 Introduzione

Nel capitolo precedente si è dato ampio spazio all'accumulo di energia nel sistema di propulsione posto a bordo di un veicolo. Nel capitolo seguente è illustrato in modo dettagliato il sistema dedicato a fornire i picchi di corrente, richiesti dal carico e non erogati dalla batteria, e assorbire l'energia recuperata dalla frenata supposta rigenerativa; il procedimento adottato per il dimensionamento della capacità C_{sc} dei supercondensatori tenendo conto della loro funzione; il valore dell'induttanza L del convertitore su ciascuno dei due rami, il quale ha il compito di innalzare la tensione dei supercondensatori. Successivamente, vengono dimensionate la capacità C_f e l'induttanza L_f del filtro posto sul bus in continua. Tale filtro ha il compito di ridurre il ripple della corrente erogata dalla batteria e di livellare la tensione in uscita dal chopper. Il convertitore, oltre a funzionare come chopper, deve essere in grado di effettuare una frenata dissipativa, in determinati condizioni di

lavoro, su una resistenza R_b . Risulta quindi conveniente, dal punto di vista economico, utilizzare un modulo con tre rami in quanto più diffuso a livello commerciale. Un ramo è dedicato alla frenatura dissipativa mentre per il funzionamento del chopper vengono utilizzati due rami. L'utilizzo di due rami permette di far funzionare il convertitore in modalità interleaved, riducendo l'ampiezza del ripple di corrente in ingresso del chopper. Infine, nell'ultima parte si pone l'attenzione sulla strategia di controllo del convertitore cc/cc bidirezionale in modo che, pur non conoscendo il ciclo di guida da effettuare (caso reale), i condensatori riescano a fornire i picchi di corrente e gli accumulatori riescano a fornire la potenza media.

La Figura 5-1 mostra tutti componenti del sistema di propulsione e, in particolare, il banco di supercondensatori e il blocco convertitore cc/cc. Nello schema sono mostrati anche il sistema di trazione con motore elettrico ed inverter e il blocco del sistema di controllo.

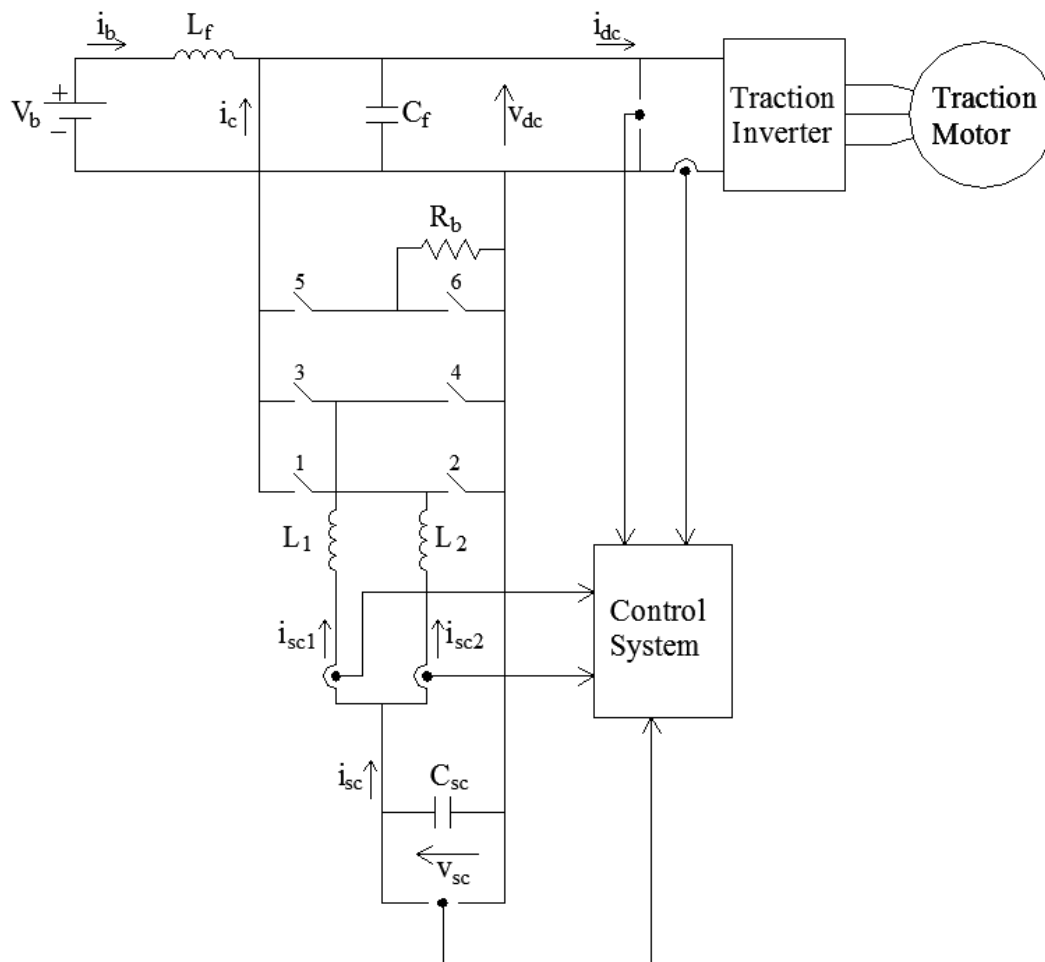


Figura 5-1. Schema elettrico completo

5.2 Dimensionamento dei Supercondensatori

La capacità del banco di supercondensatori (SC) del sistema di propulsione è dimensionata partendo dall'idea che essi devono fornire i picchi di corrente richiesti dal carico durante il ciclo ECE-15 o qualsivoglia ciclo di guida reale, mentre la potenza media è fornita dagli accumulatori al piombo gel; tale strategia permette di non sollecitare notevolmente le batterie e di allungare i cicli di carica e scarica, nonché la vita. I SC devono poter svolgere il compito assegnatogli anche quando gli accumulatori lavorano alla minima tensione di lavoro, ed inoltre si impone che svolgano una funzione tampone, cioè la carica presente nel condensatore alla fine di ogni ciclo di guida deve essere uguale a quella presente all'inizio. I SC sono collegati al bus in continua mediante un convertitore cc/cc bidirezionale (chopper). Per motivi di funzionamento, la tensione del bus V_{dc} , deve essere sempre più alta di quella dei SC. Quindi, al diminuire della tensione V_{dc} , anche la tensione v_{sc} dovrà calare. Con batterie quasi completamente scariche, la massima tensione dei SC è $v_{sc} = 40V$.

Come esposto nel capitolo precedente, si suppone che la minima tensione di lavoro degli accumulatori sia $V_b = 40.8V$. Se si trascura la caduta di tensione sull'induttanza L_{fs} , la tensione minima di batteria è anche la tensione minima presente sul bus in continua ($V_b = V_{dc}$). La corrente all'ingresso dell'inverter di trazione è:

$$i_{dc} = \frac{p_e}{V_b} \quad (5.1)$$

dove con p_e è indicata la potenza elettrica, precedentemente calcolata, richiesta dal carico durante il ciclo di guida. La componente media della i_{dc} viene fornita dalla batterie ed è pari a:

$$I_b = 34.5A \quad (5.2)$$

mentre la componente transitoria i_c sarà quelle in uscita dal convertitore bidirezionale.

La Figura 5-2 mostra gli andamenti delle tre correnti appena citate.

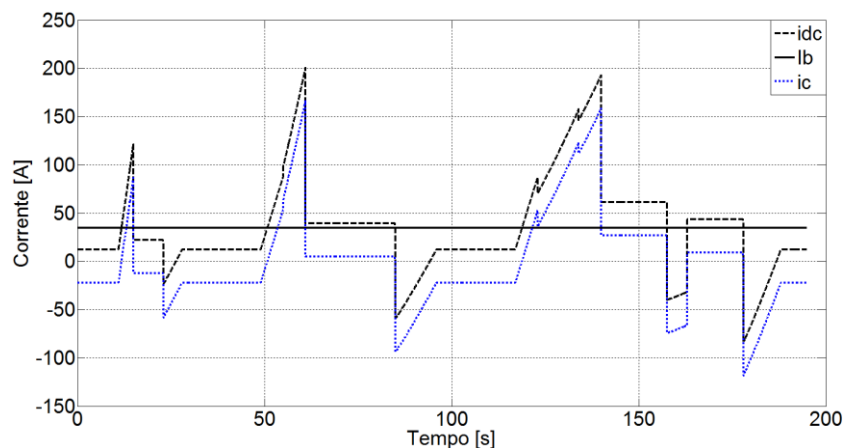


Figura 5-2. Andamento delle correnti i_{dc} , I_b e i_c

Dalla conoscenza delle correnti i_{dc} , I_b e i_c , è possibile calcolare l'energia E_b fornita dalla batteria e l'energia E_{sc} fornita dai SC. Indicando con t il tempo di durata del ciclo di guida, l'energia fornita dalla batteria è:

$$E_b = V_b I_b t = 76Wh \tag{5.3}$$

L'energia che i SC immettono nel bus in continua, assumendo un rendimento unitario del chopper, è:

$$E_c = E_e - E_b = 0 \tag{5.4}$$

dove con E_c si indica l'energia fornita dal blocco (SC e chopper), mentre con E_e è indicata l'energia elettrica totale, calcolata nel capitolo 2, (3.34), che il carico richiede, e vale.

$$E_e = 76Wh \tag{5.5}$$

L'energia E_e è uguale all'energia fornita dalla batteria E_b , mentre i SC non forniscono energia nell'intero ciclo. Il tutto è concorde con la strategia adottata; i condensatori devono esclusivamente fornire e assorbire picchi di corrente. Tutta l'energia richiesta per compiere un ciclo deve essere fornita dagli accumulatori. La Figura 5-3 mostra l'andamento delle energie del sistema di propulsione.

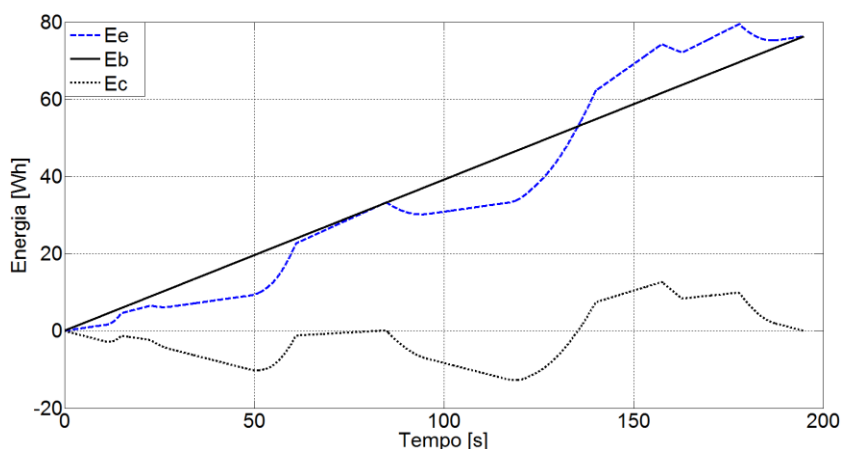


Figura 5-3. Energia elettrica fornita dalla batteria, immagazzinata nei SC, assorbita dal carico

L'energia immagazzinata nei SC nello stato iniziale, vista a valle del chopper, è uguale a quella finale, mentre l'energia della batteria coincide perfettamente con quella richiesta. Nel caso sotto illustrato, si è supposto che l'energia iniziale presente nei SC sia nulla. Nella realtà questo non è vero; ci sarà un valore iniziale diverso da zero; tuttavia, ai fini del calcolo della capacità, il valore iniziale non ha nessuna influenza. Per calcolare la reale energia E_{sc} immagazzinata dai SC è opportuno utilizzare il rendimento $\eta_c = 0.95$, del convertitore. Inoltre, al fine di semplificare i calcoli, si procede in termini di potenza anziché di energia.

La potenza del convertitore è data da:

$$p_c = V_{dc} i_c \quad (5.6)$$

Quando la potenza del chopper è positiva, cioè quando il flusso di energia fluisce dai SC al bus in continua, (scarica dei SC), si ha:

$$p_{sc} = \frac{p_c}{\eta_c} \quad (5.7)$$

viceversa, con potenza del chopper negativa (carica dei SC), si ha:

$$p_{sc} = p_c \eta_c \quad (5.8)$$

La differenza tra potenza dei SC e quella del chopper rappresenta la potenza dissipata all'interno del convertitore bidirezionale e vale:

$$p_d = p_{sc} - p_c \quad (5.9)$$

La potenza della batterie è:

$$P_b = V_b I_b = 1.4kW \quad (5.10)$$

La Figura 5-4 mostra l'andamento delle potenze elettriche in gioco nel sistema.

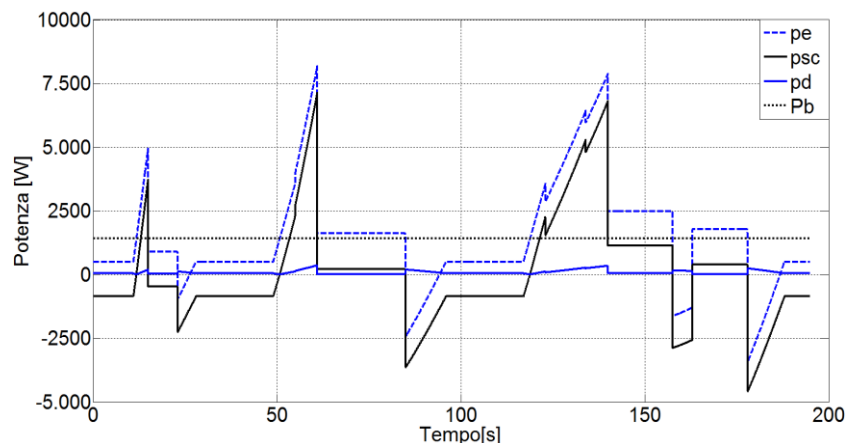


Figura 5-4. Andamento delle potenze della batteria, dei SC, e dissipata.

Come riferimento è mostrata la potenza elettrica richiesta all'ingresso dell'inverter calcolata in (3.32). Gli accumulatori non sono sottoposti a nessun picco di corrente e forniscono sempre una potenza costante per tutto il ciclo. Mediante integrazione delle potenze si ricavano le energie.

L'energia dei SC è data da:

$$E_{sc} = \int_0^t p_{sc} dt \quad (5.11)$$

L'energia dissipata dal chopper è:

$$E_d = \int_0^t p_d dt = 4Wh \quad (5.12)$$

La Figura 5-5 mostra l'andamento dell'energia scambiata dai SC con il bus in continua, l'energia dissipata nel chopper e l'energia in uscita dal convertitore sul bus in continua. Con riferimento alla E_{sc} di Figura 5-5 è possibile notare che il valore dell'energia reale immagazzinata nei SC all'inizio e alla fine del ciclo di guida non assume lo stesso valore.

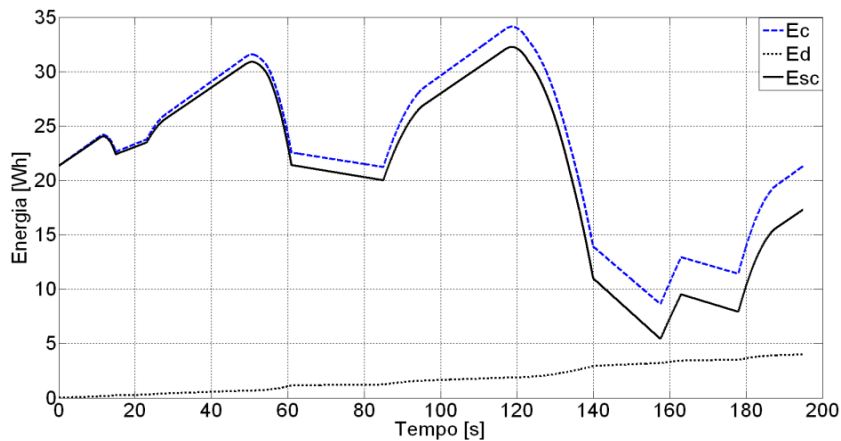


Figura 5-5. Energia dissipata nel chopper, fornita dai SC e in uscita dal chopper

La differenza tra il valore finale e quello iniziale di E_{sc} è l'energia dissipata nel chopper. L'energia immagazzinata dentro i SC all'inizio del ciclo di guida è:

$$E_{sc, inizio} = 22Wh \quad (5.13)$$

L'energia E_d deve essere fornita anch'essa dalla batteria, ossia la corrente erogata dagli accumulatori deve essere superiore rispetto quella trovata nei calcoli precedenti. La potenza media dissipata $P_{d,m}$ dal chopper è:

$$P_{d,m} = \frac{1}{T} \int_0^t p_d dt = 74W \quad (5.14)$$

cui corrisponde una corrente media di:

$$I_d = \frac{P_{d,m}}{V_b} = 1.8A \quad (5.15)$$

La corrente erogata dalla batteria diventa:

$$I_{bd} = I_b + I_d = 36.3A \quad (5.16)$$

Con il nuovo valore di corrente, la potenza e l'energia della batteria diventano:

$$P_{bd} = V_b I_{bd} = 1.48kW \quad (5.17)$$

$$E_{bd} = V_b I_{bd} t = 80Wh \quad (5.18)$$

In Figura 5-6 sono mostrati i nuovi andamenti delle energie delle batterie e dei SC. L'energia elettrica richiesta dal carico e quella dissipata dal convertitore cc/cc sono rimaste identiche a prima.

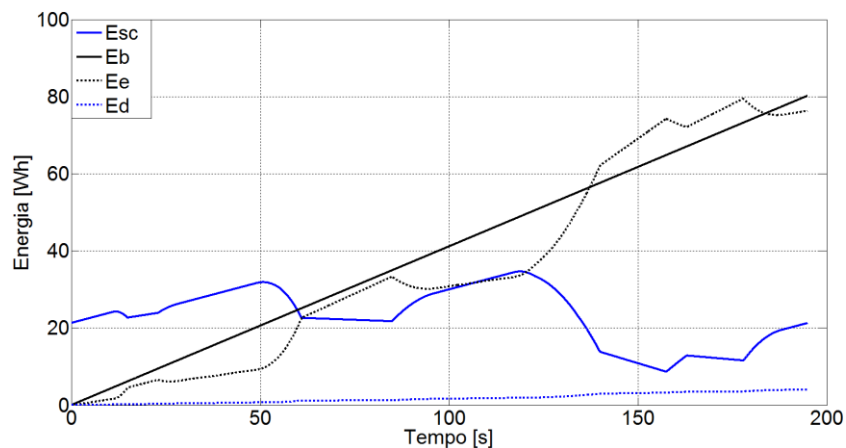


Figura 5-6. Andamento delle energie messe in gioco nel sistema

Dalla conoscenza dell'energia che i SC scambiano con il sistema in continua mediante il chopper, è possibile calcolare la capacità necessaria dei SC. La massima variazione di energia dipende dal massimo e dal minimo valore di energia. Quindi si ha:

$$\Delta E_{sc,max} = 12.6Wh \quad (5.19)$$

$$\Delta E_{sc,min} = -13.4Wh \quad (5.20)$$

$$\Delta E_{sc} = \Delta E_{sc,max} - \Delta E_{sc,min} = 26Wh \quad (5.21)$$

Il valore di capacità che i supercondensatori devono avere è:

$$C_{sc} = \frac{2\Delta E_{sc}}{(V_{sc,max}^2 - V_{sc,min}^2)} \quad (5.22)$$

$V_{sc,max}$ e $V_{sc,min}$ sono le tensioni del SC rispettivamente quando è carico e scarico. Il valore delle tensioni di lavoro dipende dalla tensione di batteria. Per motivi legati al rendimento dei SC, si

preferisce avere una $V_{sc,min}$ non più piccola della metà di $V_{sc,max}$. I SC, come detto precedentemente, devo adempire al loro compito anche quando le batterie sono quasi scariche e la tensione ai capi dei loro terminali è $V_b = 40.8V$. Quindi, è lecito scegliere una $V_{sc,max} = 40V$ e una $V_{sc,min} = 20V$. Con tali valori di tensione, la capacità è:

$$C_{sc} \cong 156F \quad (5.23)$$

Trovata la capacità dei SC, è possibile calcolare alcuni parametri di notevole interesse, come la massima corrente erogata o assorbita dagli stessi. La condizione peggiore si verifica quando le batterie sono completamente cariche, con tensione $V_b = 55.2V$, e i SC lavorano alla tensione di $V_{sc,min} = 20V$. (Nella pratica tale situazione non è mai verificata, in quando la tensione minima dei SC non va al di sotto di $\frac{1}{2}V_b$). L'energia residua immagazzinata nei SC vale:

$$E_{sc,res} = \frac{1}{2} C_{sc} V_{sc,min}^2 = 8.7Wh \quad (5.24)$$

mentre, l'energia immagazzinata nei SC durante tutto il ciclo di guida è:

$$E_{sc,imm} = E_{sc,res} - E_{sc} + \Delta E_{sc,min} \quad (5.25)$$

È possibile calcolare, nel seguente modo, la tensione ai capi dei SC:

$$v_{sc} = \sqrt{\frac{2E_{sc}}{C_{sc}} * 3600} \quad (5.26)$$

e la corrente assorbita dai SC quando sono carichi alla tensione v_{sc} vale:

$$i_{sc} = \frac{P_{scd}}{v_{sc}} \quad (5.27)$$

con p_{scd} si è indicata la potenza dei SC tenuto conto della corrente I_d . In Figura 5-7 è mostrata la v_{sc} quando le batterie sono cariche e i SC sono scarichi. L'andamento della curva conferma quanto il comportamento dei SC si discosti da quello delle batterie, la cui tensione rimane, nel corso di un ciclo, pressoché costante. La Figura 5-8 mostra l'andamento della corrente i_{sc} nel peggiore dei casi. Il valore massimo della corrente è:

$$i_{sc,max} = 228A \quad (5.28)$$

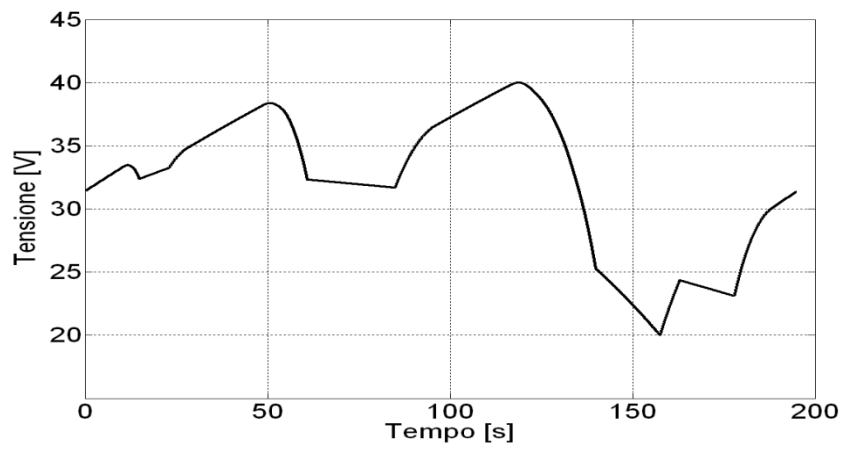


Figura 5-7. Andamento della tensione v_{sc}

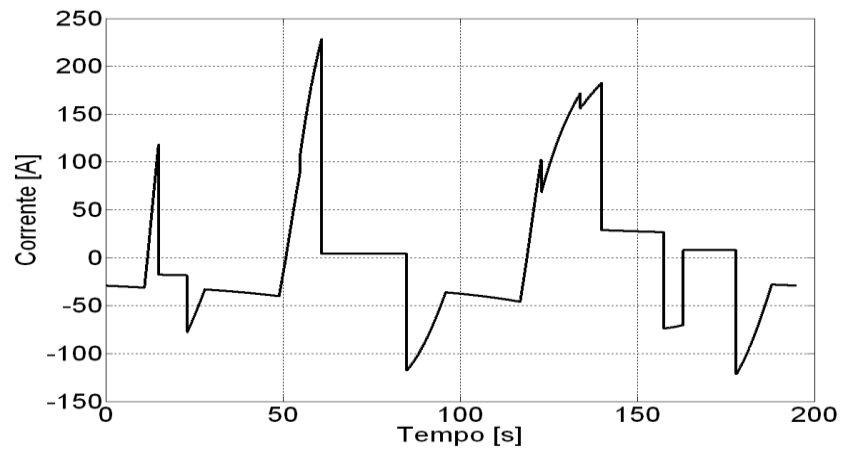


Figura 5-8. Andamento della corrente i_{sc}

5.3 Convertitore bidirezionale cc/cc

Calcolata la capacità dei SC, si può procedere con il dimensionamento dei vari componenti passivi del convertitore. Il convertitore, oltre a funzionare come chopper, deve essere in grado di effettuare una frenata dissipativa su una resistenza R_b . Risulta conveniente utilizzare un modulo con tre rami in quanto è più diffuso a livello commerciale. Un ramo è dedicato alla frenatura elettrica; frenatura che è necessaria quando sia batteria sia SC sono completamente carichi, mentre per il funzionamento del chopper vengono utilizzati i restanti due rami. In Figura 5-9 è mostrato lo schema elettrico del sistema di propulsione con particolare attenzione ai componenti del convertitore cc/cc.

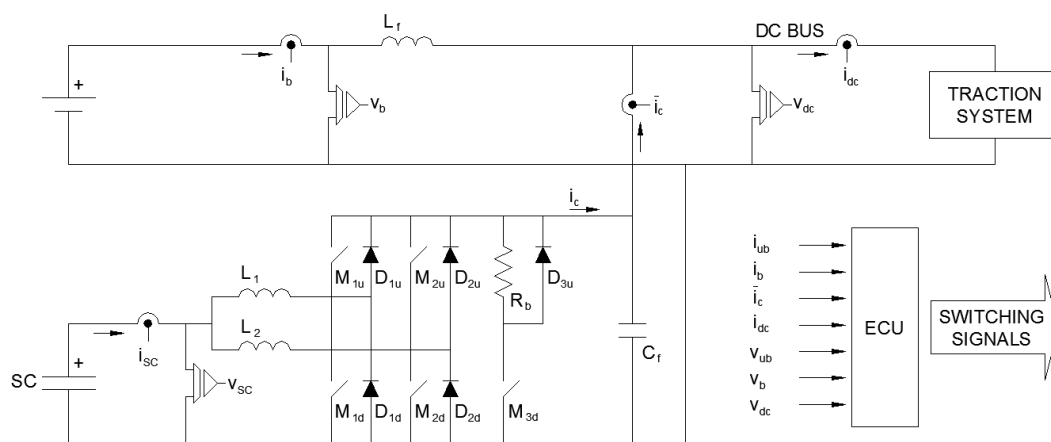


Figura 5-9. Schema elettrico del convertitore bidirezionale cc/cc

Quando i SC forniscono i picchi di corrente al bus in continua il convertitore funziona in modalità boost e i SC si scaricano mentre, nel caso inverso, i SC si ricaricano e il convertitore funziona in modalità buck. I due rami utilizzati per il funzionamento del chopper rappresentano due sezioni identiche collegate in parallelo, ognuna delle quali costituisce un convertitore cc/cc dimensionato per metà della potenza richiesta. Ogni sezione è formata da una induttanza di ingresso (L_1, L_2) da uno switch e da un diodo che operano nella modalità boost ($M_{1d}, D_{1u}, M_{2d}, D_{2u}$), e da uno switch e un diodo che operano nella modalità buck ($M_{1u}, D_{1d}; M_{2u}, D_{2d}$). Dallo schema di Figura 5-9 risulta evidente che il chopper può operare correttamente solo se v_{sc} è inferiore a V_b , altrimenti il SC si scaricherebbe sulla batteria attraverso le serie $L_1 - D_{1u}$, e $L_2 - D_{2u}$. I segnali di comando degli switch delle due sezioni sono ritardati di 180° del periodo di switching/commutazione in modo che essi operino nella modalità interleaved [6], riducendo l'ampiezza del ripple di corrente in ingresso del chopper e raddoppiando la frequenza, semplificando così la realizzazione dei circuiti di filtro. Le induttanze L_1 e L_2 , di uguale valore L , vengono dimensionate in modo da avere un determinato ripple massimo.

Per il corretto funzionamento del convertitore è importante avere un'induttanza L sufficientemente grande. La corrente dei SC è:

$$i_{sc} = i_{sc1} + i_{sc2} \tag{5.29}$$

Mentre il ripple Δi_{sc} vale:

$$\Delta i_{sc} = (i_{sc1}(t) + i_{sc2}(t))_{\max} - (i_{sc1}(t) + i_{sc2}(t))_{\min} \quad (5.30)$$

Le correnti i_{sc1} e i_{sc2} , e anche il loro ripple, variano in funzione del segnale di comando δ degli switch. Si ha un andamento differente delle forme d'onda delle correnti a seconda se il duty cycle è minore o maggiore di 0.5. Con duty cycle $\delta < 0.5$ il chopper funziona da buck. La Figura 5-10 mostra il duty cycle che comanda gli interruttori controllati.

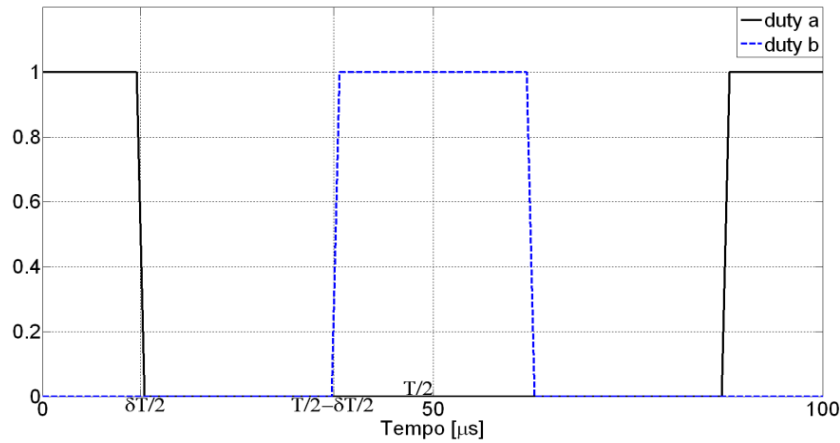


Figura 5-10. Duty cycle degli switch

Le correnti che circolano nelle singole induttanze sono mostrate in Figura 5-11.

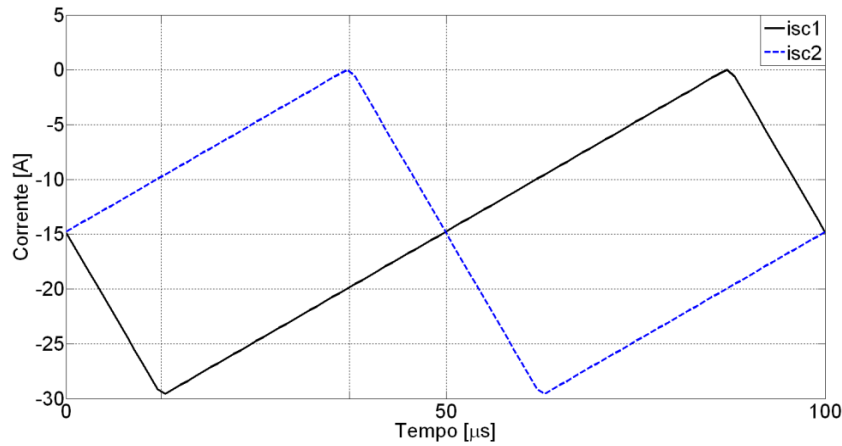


Figura 5-11. Correnti i_{sc1} e i_{sc2}

La somma della i_{sc1} e i_{sc2} è mostrata in Figura 5-12. Data la simmetria di Δi_{sc} , è sufficiente fare la somma delle correnti i_{sc1} e i_{sc2} solamente in un semi periodo. Per semplicità di calcolo, è possibile dividere quest'ultimo in tre intervalli. Fino a $t = \delta \frac{T}{2}$, la tensione ai capi di L_1 è positiva e la corrente i_{sc1} cresce (in Figura 5-11 la i_{sc1} è negativa, vista la convezione, e cresce in modulo), mentre la tensione ai capi di L_2 è negativa e la corrente cala (in modulo). Il ripple della corrente dei SC è:

$$\Delta i_{sc, \delta \frac{T}{2}} = \frac{1}{L} \left(\int_0^{\delta \frac{T}{2}} (V_b - v_{sc}) dt + \int_0^{\delta \frac{T}{2}} -v_{sc} dt \right) = \frac{1}{f_c L} \left(V_b \frac{\delta}{2} - v_{sc} \delta \right) \quad (5.31)$$

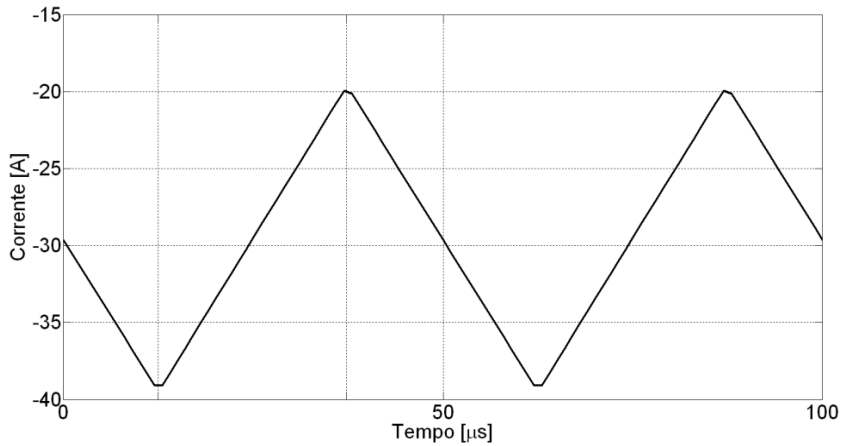


Figura 5-12. Corrente i_{sc}

Nel secondo intervallo, cioè da $\delta \frac{T}{2} < t < \frac{T}{2} - \delta \frac{T}{2}$ entrambe le induttanze hanno applicata una tensione negativa e le correnti diminuiscono. Il ripple di i_{sc} vale:

$$\Delta i_{sc, \frac{T}{2} - \delta \frac{T}{2}} = \Delta i_{sc, \delta \frac{T}{2}} + \frac{2}{L} \int_0^{\frac{T}{2} - \delta \frac{T}{2}} -v_{sc} dt = \Delta i_{sc, \delta \frac{T}{2}} + \frac{1}{f_c} v_{sc} (2\delta - 1) \quad (5.32)$$

Dalla Figura 5-11 è possibile notare che il ripple massimo è dato dalla differenza dei punti appena trovati, in quando uno rappresenta il minimo e l'altro il massimo. Diventa superfluo calcolare il ripple della corrente i_{sc} anche per l'ultimo intervallo. Ricordando che quando un chopper funziona in modalità buck vale la seguente relazione:

$$v_{sc} = V_b \delta \quad (5.33)$$

è possibile trovare per quale valore di duty cycle si ha il massimo ripple della corrente i_{sc} .

$$\Delta i_{sc, \max} = \Delta i_{sc, \delta \frac{T}{2}} - \Delta i_{sc, \frac{T}{2} - \delta \frac{T}{2}} = -\frac{v_{sc}}{f_c} (2\delta - 1) = -\frac{V_b}{f_c L} (2\delta^2 - \delta) \quad (5.34)$$

Derivando e uguagliando a zero, si trova che, in corrispondenza di $\Delta i_{sc, \max}$, il duty cycle è:

$$\delta = 0.25 \quad (5.35)$$

mentre il valore del massimo ripple di corrente è:

$$\Delta i_{sc, \max} = \frac{V_b}{8f_c L} \quad (5.36)$$

Nel caso in cui il duty cycle è $\delta > 0.5$ le due curve che comandano gli interruttori sono mostrate in Figura 5-13.

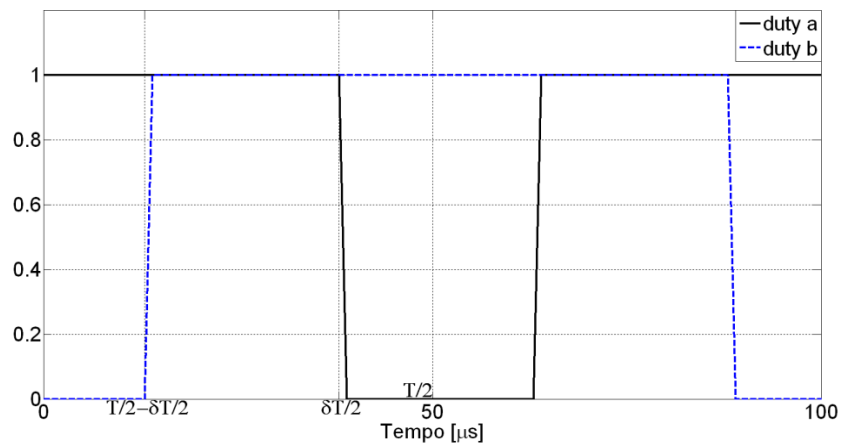


Figura 5-13. Duty cycle degli switch

Le correnti che circolano nelle singole induttanze sono mostrate in Figura 5-14.

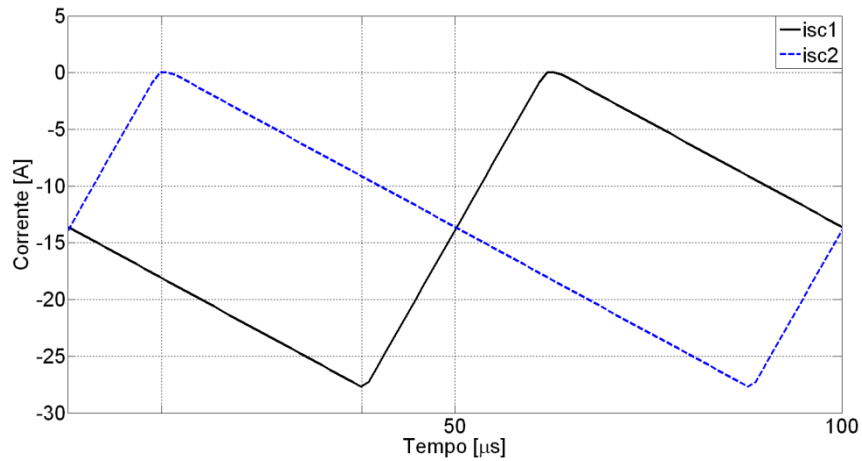


Figura 5-14 Correnti i_{sc1} e i_{sc2} con $\delta > 0.5$

La somma della i_{sc1} e i_{sc2} è mostrata in Figura 5-15:

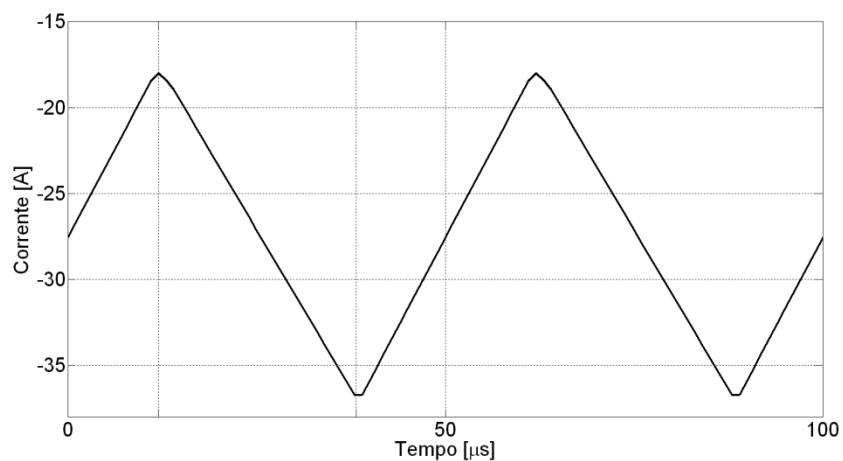


Figura 5-15. Corrente i_{sc}

Dalla Figura 5-15 è evidente che in questo caso il massimo ripple della corrente i_{sc} si ha per differenza tra il punto corrispondente a $t = \frac{T}{2} - \delta \frac{T}{2}$ e $t = \delta \frac{T}{2}$.

$$\Delta i_{sc, \frac{T}{2} - \delta \frac{T}{2}} = \frac{1}{L} \left(\int_0^{\frac{T}{2} - \delta \frac{T}{2}} (V_b - v_{sc}) dt + \int_0^{\frac{T}{2} - \delta \frac{T}{2}} -v_{sc} dt \right) \quad (5.37)$$

$$\Delta i_{sc, \delta \frac{T}{2}} = \Delta i_{sc, \frac{T}{2} - \delta \frac{T}{2}} + \frac{2}{L} \int_{\frac{T}{2} - \delta \frac{T}{2}}^{\delta \frac{T}{2}} (V_b - v_{sc}) dt \quad (5.38)$$

$$\Delta i_{sc} = \frac{2}{L} \int_{\frac{T}{2} - \delta \frac{T}{2}}^{\delta \frac{T}{2}} (V_b - v_{sc}) dt \quad (5.39)$$

$$\Delta i_{sc} = \frac{2}{L} \left[(V_b - v_{sc}) \delta \frac{T}{2} - (V_b - v_{sc}) \frac{T}{2} - \delta \frac{T}{2} \right] = \frac{1}{L} (2V_b \delta - 2v_{sc} - V_b + v_{sc}) \quad (5.40)$$

La relazione tra tensione di ingresso e uscita rimane sempre la (4.33), quindi si ha:

$$\Delta i_{sc} = \frac{1}{L} (2V_b \delta - 2V_b \delta^2 - V_b + V_b \delta) = \frac{V_b}{L} (3\delta - 1 - 2\delta^2) \quad (5.41)$$

Derivando e uguagliando a zero, si trova che, in corrispondenza di $\Delta i_{sc, \max}$, il duty cycle è:

$$\delta = 0.75 \quad (5.42)$$

Anche in questo caso il valore massimo del ripple Δi_{sc} è come in precedenza. Quando il chopper funziona da boost, il legame tra tensione in ingresso e tensione in uscita è

$$v_{sc} = V_b (1 - \delta) \quad (5.43)$$

Mediante passaggi matematici si arriva agli stessi risultati ottenuti per il funzionamento buck. È possibile adesso dimensionare il valore dell'induttanze del convertitore. Supponendo di limitare il ripple di corrente erogata dai SC a $\Delta i_{sc, \max} = 10A$, e che la frequenza di commutazione del chopper sia $f_c = 10kHz$, si ottiene:

$$L = \frac{V_b}{8f_c \Delta i_{sc, \max}} = 70 \mu H \quad (5.44)$$

La corrente che circola in ognuna delle induttanze L è metà di quella entrante o uscente dal SC.

5.4 Filtro

La corrente i_c erogata dal chopper ha un forte contenuto di ripple che non è compatibile con le caratteristiche delle batterie. A tale scopo risulta indispensabile inserire un filtro passa basso L\C [6] a valle del convertitore (Figura 5-9), costituito da un induttore L_f e da un condensatore C_f . Il banco dei SC eroga una corrente i_{sc} il cui valore medio si ripartisce in parti uguali nelle due induttanze L_1 e L_2 . Il ripple di queste correnti può essere trascurato rispetto al loro valore medio. Si assuma che il convertitore lavori in modalità boost. Quando gli switch sono chiusi (t_{on}), la corrente i_c in uscita dal chopper è nulla, mentre è pari a i_{sc} nel tempo complementare a t_{on} . La corrente i_c è data dalla somma delle correnti che attraversano i diodi D_{1u} e D_{2u} , le quali sono mostrate in Figura 5-16.

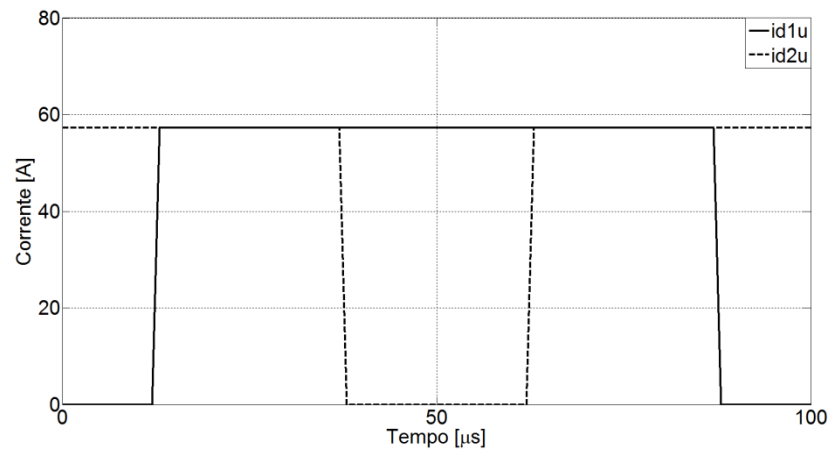


Figura 5-16. Andamento delle correnti nei diodi con $\delta=0.25$.

La Figura 5-17 mostra la corrente i_c .

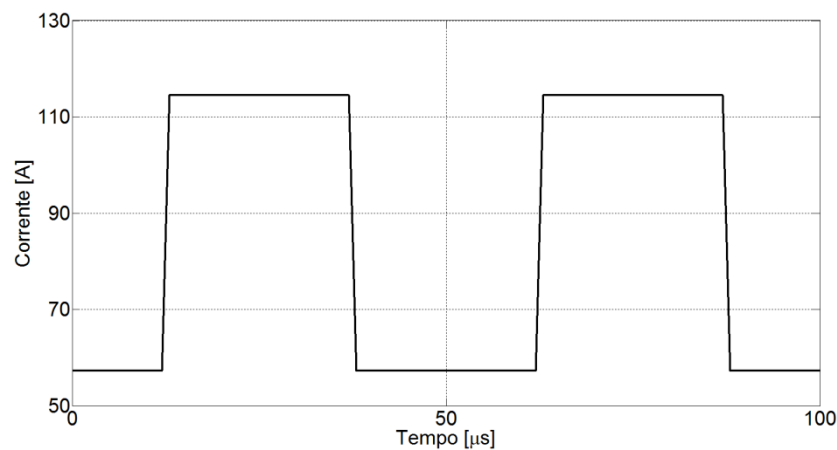


Figura 5-17. Andamento della corrente i_c con $\delta=0.25$.

Le correnti nei diodi assumono il valore $\frac{1}{2}i_{sc}$ oppure 0. Esse, come anche la corrente i_c , hanno un ripple di ampiezza $\frac{1}{2}i_{sc}$. Tuttavia, mentre il ripple di i_{d1u} e i_{d2u} ha una frequenza pari a quella di switching del convertitore, quello della corrente i_c ha una frequenza doppia.

Con $\delta > 0.5$ le correnti che fluiscono nei diodi hanno l'andamento di Figura 5-18.

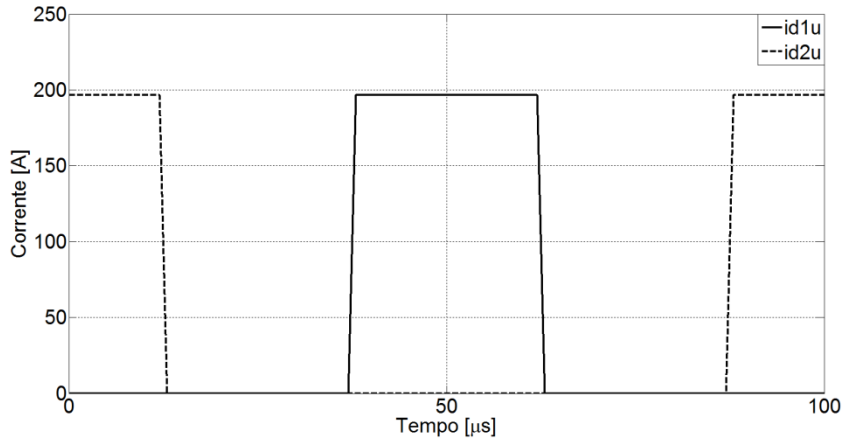


Figura 5-18. Andamento delle correnti degli switch con $\delta=0.75$

mentre la i_c è mostrata in Figura 5-19.

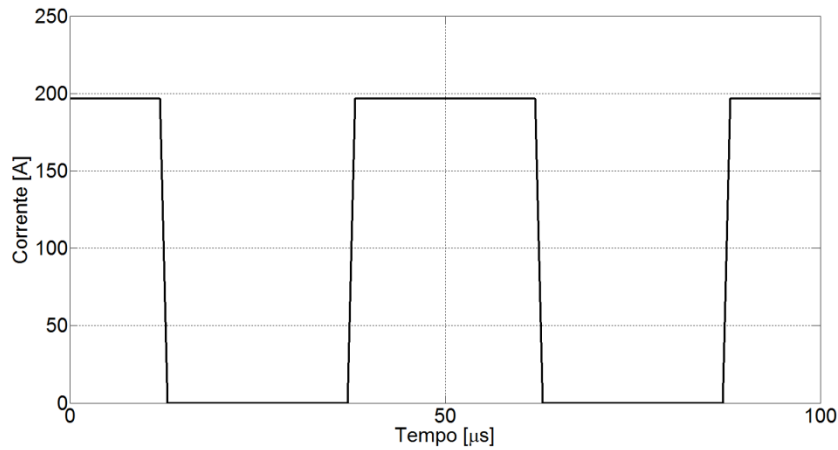


Figura 5-19. Andamento della corrente i_c con $\delta=0.75$.

Sotto queste condizioni di lavoro, il ripple delle correnti i_c , i_{d1u} e i_{d2u} mantengono immutato sia l'ampiezza che la frequenza rispetto al caso precedente.

Nel funzionamento in modalità buck, la corrente i_c è data dalla somma delle correnti che attraversano gli switch M_{1u} e M_{2u} . Le forme d'onda delle correnti i_{M1u} e i_{M2u} hanno, con $\delta = 0.25$, lo stesso andamento delle correnti i_{d1u} e i_{d2u} con $\delta = 0.75$ nella modalità boost. Mentre con $\delta = 0.75$ le correnti che fluiscono negli switch in modalità buck hanno lo stesso andamento delle correnti che attraversano i diodi in modalità boost. Il valore medio della corrente i_c , in funzione del duty cycle, con riferimento alle condizioni di lavoro di Figura 5-16 ($\delta < 0.5$), è:

$$i_{c,m} = \frac{1}{T} \left(\int_0^t i_{d1u} dt + \int_0^t i_{d2u} dt \right) = \frac{1}{T} \left(\int_0^{\delta T/2} \frac{i_{sc}}{2} dt + \int_{\frac{T}{2}-\delta T/2}^{\frac{T}{2}} \frac{i_{sc}}{2} dt \right) = \delta i_{sc} \quad (5.45)$$

mentre il valore efficace del ripple, è:

$$i_{e,eff,c} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (i_c - i_{c,m})^2 dt} = \frac{i_{sc}}{2} \sqrt{2\delta(1-2\delta)} \quad (5.46)$$

In corrispondenza di $\delta = 0.25$ si ha il valore massimo:

$$i_{r,eff,c,max} = 0.25i_{sc} \quad (5.47)$$

Lo stesso valore massimo si ha per $\delta = 0.75$. Il filtro deve impedire che la batteria sia interessata dalla componente di ripple della corrente i_c . Quest'ultima deve quindi fluire nella capacità C_f . L'obiettivo è avere un ripple di corrente su i_b cento volte più piccolo rispetto a quello che si ha sulla corrente i_{cf} . Ciò significa che, alla pulsazione della corrente di ripple, l'impedenza dell'induttanza L_f deve avere un valore cento volte superiore dell'impedenza del condensatore C_f . Si ottiene quindi la relazione:

$$\omega_r L_{filtro} = \frac{100}{\omega_r C_{filtro}} \quad (5.48)$$

dove ω_r è la pulsazione della corrente di ripple, uguale al doppio della pulsazione di switching del chopper ω_c ($f_c = 10\text{kHz}$). Dalla (4.48) si ottiene:

$$C_f L_f = \frac{100}{4\omega_c^2} \quad (5.49)$$

La frequenza propria di risonanza dell'induttanza accoppiata al condensatore è:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_f C_f}} \quad (5.50)$$

ed essa deve essere inferiore alla frequenza di switching, quindi la relazione da soddisfare è:

$$f_0 < f_c \quad (5.51)$$

Introducendo il rapporto tra le due frequenze si ha:

$$k = \frac{f_0}{f_c} = \frac{\omega_0}{\omega_c} = \frac{1}{\omega_c\sqrt{L_f C_f}} < 1 \quad (5.52)$$

La scelta del rapporto di attenuazione del filtro è compatibile con la necessità di impedire oscillazioni del circuito. La tensione ai morsetti del condensatore di filtro v_{cf} ha un valore medio V_{cf} e un ripple di ampiezza ΔV_{cf} variabile in funzione del duty cycle. L'ondulazione della v_{cf} presenta un massimo in corrispondenza di $\delta = 0.25$ e $\delta = 0.75$ e vale:

$$\Delta C_{cf} = \frac{i_{sc}}{2C\omega_0} \operatorname{tg} \frac{\pi k}{2} = \frac{i_{sc}}{2} \sqrt{\frac{L_f}{C_f}} \operatorname{tg} \frac{\pi k}{2} \quad (5.53)$$

Supponendo che sia $k = 0.1$, è possibile approssimare la tangente con l'angolo stesso. Esplicitando tutto in funzione della capacità di filtro si ottiene:

$$\Delta V_{cf} = \frac{i_{sc}}{4} \sqrt{\frac{100}{C_f^2 \omega_f^2}} \operatorname{tg} \frac{\pi k}{2} = \frac{i_{sc} \pi}{8C_f \omega_r} \quad (5.54)$$

Da cui si ha:

$$C_f = \frac{i_{sc} \pi}{8\Delta V_{cf} \omega} \quad (5.55)$$

I valori di dimensionamento della capacità e induttanza di filtro sono calcolati per limitare il ripple di tensione ai capi di C_f ad un valore $\Delta V_{Cf} = 1V$ nella condizione peggiore. Tale condizione si verifica quando sia le batterie sia i SC sono scarichi. La corrente i_{sc} , con riferimento al ciclo di guida ECE-load, raggiunge un valore di picco di circa 600A. Si hanno quindi i seguenti valori:

$$\begin{cases} C_f = 3.75mF \\ L_f = 1.68\mu H \end{cases} \quad (5.56)$$

Con i valori di induttanza e capacità appena trovati, le correnti i_{Lf} , i_{Cf} e i_c hanno l'andamento di Figura 5-20.

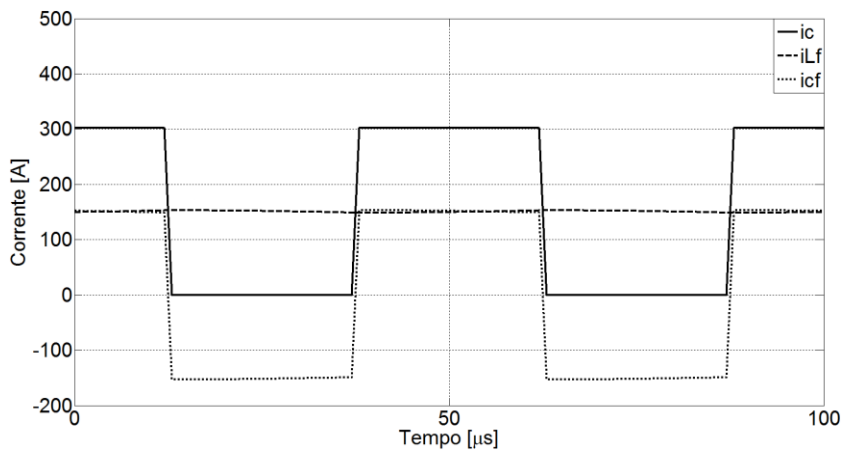


Figura 5-20. Andamento delle correnti i_{Lf} , i_{Cf} e i_c

La Figura 5-21 mostra la corrente i_{Lf} e il suo ripple.

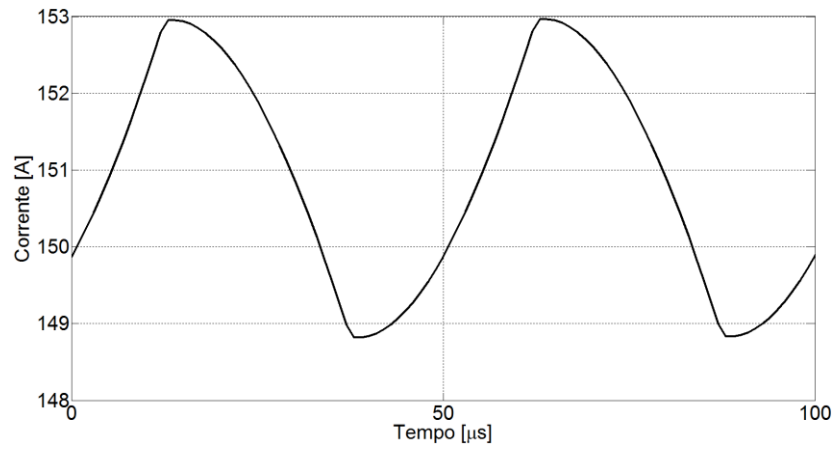


Figura 5-21. Corrente i_{Lf}

La Figura 5-22 mostra l'andamento della tensione ai capi del condensatore di filtro nel caso peggiore.

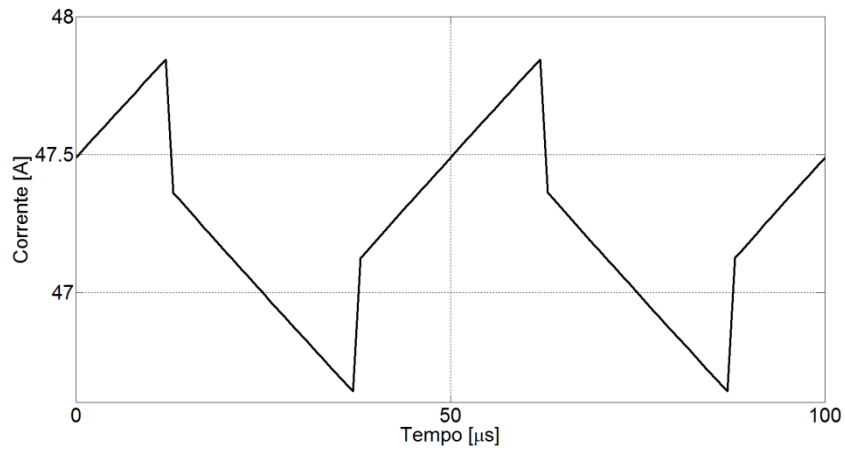


Figura 5-22. Andamento della tensione ai capi del condensatore di filtro

5.5 Resistenza di frenatura

Nei paragrafi precedenti si è discusso del convertitore bidirezionale e del fatto che esso deve permettere la carica e la scarica dei supercondensatori in determinate condizioni di lavoro. Quando il carico richiede un picco di corrente i condensatori si scaricano, mentre nel caso contrario si ricarica. Qualora i SC siano carichi, i picchi di corrente durante la frenatura vengono assorbiti dalle batterie. Nel caso particolare in cui entrambi gli accumuli di potenza ed energia si trovano in condizione di piena carica, l'energia cinetica di frenatura deve essere dissipata in una resistenza di valore opportuno tale per cui sia garantita la piena sicurezza nelle peggiori condizioni operative (frenatura elettrica). Partendo da una velocità iniziale di 45km/h , si richiede che il veicolo si arresti con una decelerazione uguale a quella massima del ciclo ECE-15 load (-1.39m/s^2). Si assuma che la strada è caratterizzata da un pendenza del 5% e il veicolo ha un peso di 775kg . Sotto queste condizioni, tenuto conto dei rendimenti, il picco di potenza è:

$$P_{rec,max} = 11\text{kW} \quad (5.57)$$

La manovra di frenatura ha una durata di 9sec. Supponendo che la R_b inizi a funzionare quando la tensione del bus in continua superi i 56V, allora la corrente massima che circola è:

$$I_{R_b,max} = 196\text{A} \quad (5.58)$$

Il valore di resistenza che ne consegue è:

$$R_b = 0.28\Omega \quad (5.59)$$

5.6 Strategia di controllo

Il sistema di alimentazione della minicar è stato progettato con lo scopo di tenere costante, o variabile lentamente, la corrente erogata dalla batteria e di forzare i SC a fornire la componente variabile della corrente assorbita dal sistema di trazione. I SC sono interfacciati con il bus in continua per mezzo di un convertitore cc/cc bidirezionale a mosfet, il quale ha una struttura interleaved con lo scopo di ridurre il ripple della corrente dei SC. Tale struttura è composta da due sezioni identiche. Con riferimento alla Figura 5-9, i mosfet appartenenti a sezioni differenti vengono pilotati con segnali ritardati l'uno rispetto all'altro di mezzo periodo di commutazione, mentre i mosfet appartenenti allo stesso ramo vengono controllati con logica complementare. Data la topologia del convertitore, la tensione dei SC v_{sc} deve essere sempre inferiore rispetto a quella di batteria V_b . Al fine di ottenere una elevata efficienza energetica, il guadagno del convertitore è limitato a due. Di conseguenza, la tensione v_{sc} è compresa tra V_b e $\frac{1}{2}V_b$.

Il sistema di alimentazione è controllato mediante una ECU. Le tensioni e le correnti del sistema rappresentano gli ingressi della ECU, mentre le sue grandezze di uscita sono i segnali di gate per i mosfet del convertitore. L'architettura del controllo si divide in due livelli: alto e basso.

Il livello alto, il cui flow chat è mostrato in Figura 5-23, effettua l'elaborazione dei valori trasdotti e il controllo logico if/then. Le grandezze di ingresso acquisite sono i valori misurati della tensione v_{sc} , della corrente del bus in continua i_{dc} , della tensione di batteria V_b e della velocità v del veicolo. Il riferimento i_c^* per la corrente del chopper i_c lato bus in continua, generato per differenza tra i_{dc} e i_b , quest'ultima idealmente tenuta costante, rappresenta l'ingresso del sistema di controllo di livello basso. Esso è composto da due anelli di corrente uno interno all'altro. Il livello basso del sistema di controllo genera il duty cycle che pilota gli switch del convertitore. Il controllo viene implementato supponendo di conoscere il ciclo di guida, nel caso di studio si fa riferimento al ciclo ECE-15; In pratica si limita a 3A/s la derivata massima di corrente che le batterie riescono a fornire. Inoltre, si opera in modo che l'energia immagazzinata dai SC alla fine del ciclo di guida sia il più possibile uguale a quella immagazzinata nell'istante iniziale. Le tensioni v_{sc} e V_b sono

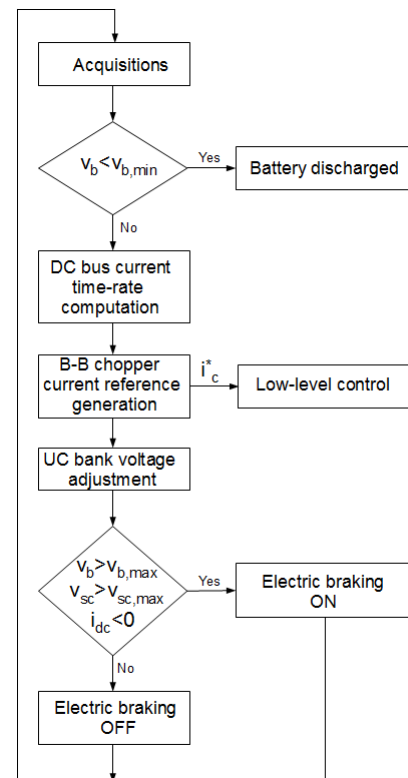


Figura 5-23. Flow chat del livello alto

usate per rilevare le condizone di piena carica rispettivamente del sistema di accumulo di potenza e di energia. La frenata elettrica è abilitata quando entrambi le tensioni raggiungono il valore massimo. Si prevede inoltre di adattare la tensione v_{sc} in relazione alle operazioni di guida: accelerare a basse velocità e decelerare ad alte velocità. L'adattamento è ottenuto mediante un anello a dinamica lenta. Il

referimento di tensione v_{sc}^* è dunque funzione della velocità del veicolo. Quando il veicolo è fermo è molto probabile (escludendo il caso di partenza in discesa con batterie e SC completamente carichi) che il sistema di trazione richieda picchi di corrente per accelerare mentre quando la velocità del veicolo raggiunge il valore massimo il sistema di trazione può solo immettere nel sistema di propulsione energia recuperata dalla frenatura. Nel primo caso la tensione v_{sc} è abilitata ad essere la più alta possibile (nel rispetto della tensione di bus), mentre nel secondo caso è preferibile che la tensione v_{sc} si mantenga in corrispondenza del suo valore minimo ($\frac{1}{2}V_b$) in modo da recuperare la più grande quantità di energia cinetica senza che la tensione superi livelli non accettabili dal sistema. Il legame tra v_{sc}^* e v viene ricavato analizzando la dinamica del veicolo. Se la velocità si porta da un valore v ad un valore $2v$ l'energia cinetica aumenta di ben quattro volte. Tale energia, immagazzinata dentro i SC, porta la loro tensione da un valore v_{sc} ad un valore $2v_{sc}$. La relazione è lineare e vale:

$$v_{sc}^*(t) = V_{sc,max}(t) - \frac{V_{sc,max}(t) - V_{sc,min}(t)}{v_{max}} v(t) \quad (5.60)$$

La (5.60) è impostata in modo che quando la velocità è nulla la tensione di riferimento è uguale alla tensione massima di lavoro dei SC, mentre quando la velocità raggiunge il valore massimo, il riferimento assume il valore della tensione minima dei SC. Ottenuto così il riferimento di tensione v_{sc}^* , dal confronto con la tensione reale dei SC v_{sc} si ottiene un errore di tensione e_v che, inviato ad un regolatore di tipo proporzionale, fornisce una corrente addizionale I_{add} . Essa rappresenta una corrente, positiva o negativa, ulteriore richiesta alla batteria avente lo scopo di caricare i SC quando il veicolo si trova a basse velocità e di scaricarli quando la velocità è prossima a quella massima. In particolari condizioni (velocità massima) può accadere che la corrente richiesta dal carico venga fornita dai SC non perché la batteria non sia in grado di erogarla, ma perché i SC vengono forzati dal riferimento v_{sc}^* .

La costante k del regolatore di proporzionalità rappresenta la rapidità di intervento dei SC. La Figura 5-24 e la Figura 5-25 mostrano gli andamenti delle tre correnti del sistema: batteria i_b , bus in continua i_{dc} , i_{sc} con due valori di k , rispettivamente con $k=1$ e $k=0.01$. Nel primo caso è possibile notare che in alcuni tratti la i_b diventa negativa, mentre la i_{sc} raggiunge un valore maggiore di i_{dc} . Il comportamento in atto indica che i SC forniscono energia al carico ma anche alle batterie. Al fine di evitare tale comportamento la costante k , che dipende sensibilmente dall'inverso della tensione di batteria V_b e in modo meno sensibile dall'inverso della tensione dei SC v_{sc} , deve essere gestita in maniera opportuna.

La corrente i_{add} sommata algebricamente alla corrente richiesta dal carico i_{dc} rappresenta la corrente richiesta alla batteria $i_{r,b}$. Di contro la batteria eroga la corrente i_b . Tra le due correnti entra in gioco la massima derivata che la batteria può erogare. Il concetto è molto chiaro se lo si analizza nel tempo discreto. Sia dt l'intervallo di tempo trascorso tra l'istante i e $i-1$.

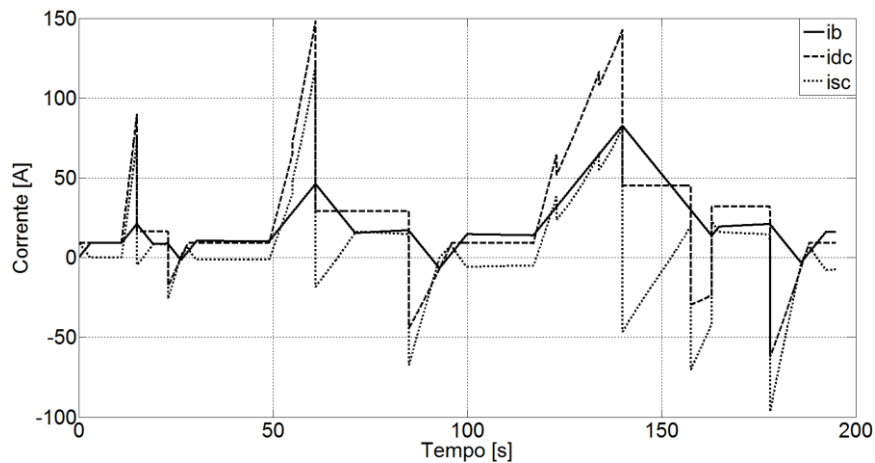


Figura 5-24. Andamento delle correnti del sistema con k=1

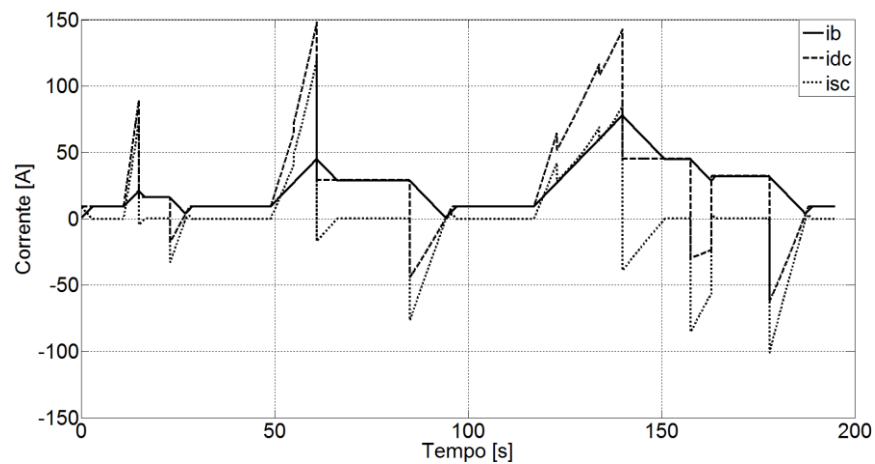


Figura 5-25. Andamento delle correnti del sistema con k=0.01

Se la differenza tra la corrente richiesta alla batteria all'istante i , $i_{r,b}(i)$, e quella fornita dalla batteria all'istante $i-1$, $i_b(i-1)$, è minore della massima derivata prefissata per la corrente (3A/s), allora la corrente richiesta coincide con quella fornita. In caso contrario, la corrente fornita dalla batteria aumenta in relazione alla sua massima derivata. La differenza tra $i_{r,b}$ e i_b rappresenta il riferimento di corrente i_c^* ovvero l'ingresso del sistema di controllo di basso livello. Tale livello è composto da due anelli di corrente annidati uno dentro l'altro.

L'anello più esterno regola la corrente del convertitore. Infatti il riferimento i_c^* viene comparato con la corrente i_c in modo da generare un errore di corrente e_c che viene inviato ad un regolatore PI_c al fine di ottenere un riferimento per la corrente i_{sc} . Il riferimento i_{sc}^* così ottenuto viene comparato con la reale corrente dei SC in modo da chiudere l'anello di corrente più interno. L'errore e_{sc} generato entra in un regolatore PI_{sc} e fornisce i segnali di gate dei mosfet. La Figura 5-26 mostra lo schema a blocchi dell'anello esterno del sistema di controllo di basso livello. Con $F(s)$ è indicata la funzione di trasferimento dell'anello più interno, il cui schema a blocchi è mostrato in Figura 5-27.



Figura 5-26. Anello esterno di corrente

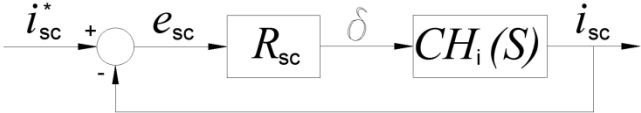


Figura 5-27. Anello interno di corrente.

6 Componenti



6.1 Introduzione

Il dimensionamento dei componenti costituenti il sistema di propulsione è solo una tappa del progetto. Non meno importante è la scelta dei componenti presenti in commercio da utilizzare al fine di conciliare il più possibile il valore di dimensionamento calcolato precedentemente con le caratteristiche presenti nei datasheet. Di seguito sono riportate le scelte effettuate riguardanti il banco dei SC e i trasduttori di tensione e corrente, indispensabili per le misure delle grandezze elettriche da monitorare.

6.2 Banco supercondensatori

La tipica tensione di lavoro di un singolo elemento super capacitivo è 2.7 V. Per ottenere una tensione di lavoro di 56 V (massima tensione del bus in continua) è necessario utilizzare almeno 21 elementi collegati in serie. Quando i SC sono collegati in serie è necessario predisporre opportuni circuiti di equalizzazione che bilancino la carica presente sugli elementi. Al fine di semplificare la realizzazione del banco dei SC si prevede di utilizzare moduli dotati di circuiti di equalizzazione sia degli elementi interni ai moduli sia dei moduli stessi. Dopo un'analisi delle soluzioni disponibili si è riscontrato che la scelta più adatta è l'utilizzo dei moduli Maxwell modello BMODO250 PO16 B01, i quali sono specificatamente progettati per essere utilizzati nei veicoli elettrici, ibridi e altre applicazioni dove è richiesta una ridotta resistenza serie equivalente (ESR) e una elevata efficienza. Prima di riportare le caratteristiche del modulo è opportuno fornire delle definizioni che aiutino la comprensione delle specifiche [8]:

Tensione nominale: tensione a cui si riferiscono le performance fornite nei datasheet.

Sovra tensione: massima tensione a cui il modulo di SC può lavorare per pochi secondi senza causare danni irreversibili.

Corrente di corto circuito: corrente che può erogare per poco tempo il modulo di SC quando si trova in corto circuito.

Corrente di autoscarica: corrente che circola internamente al modulo di SC quando ad esso non è collegato nessun carico. Il valore fornito nei datasheet è la misura della corrente che si ha dopo aver tenuto il modulo di SC carico alla tensione nominale per 72 ore alla temperatura di 25°C. Se il modulo di SC fosse tenuto costantemente carico alla tensione nominale per un tempo minore (maggiore) di 72 ore la corrente di autoscarica sarebbe maggiore (minore) di quella fornita nei datasheet. Inoltre la corrente di autoscarica dipende molto dalla temperatura durante la misura e dalla vita del modulo.

Massima corrente continuativa o efficace: massima corrente che può essere assorbita/erogata dal modulo di SC senza provocare un apprezzabile aumento di temperatura oltre la soglia consentita.

Massimo picco di corrente: picco di corrente che può essere assorbito/erogato dal modulo di SC senza un significativo effetto negativo sulla sua vita.

Temperatura di lavoro: temperatura a cui si porta il modulo dei SC nel funzionamento normale.

Temperatura di stoccaggio: temperatura a cui il modulo di SC può essere conservato senza che si danneggi.

Massima energia: massima energia che i moduli di SC, nei primi mesi di vita, riescono a fornire quando vengono scaricati completamente a partire dalla tensione nominale. Per scariche comprese tra la tensione nominale e metà di questa, l'energia fornita è pari al 75% di quella massima.

Picco di potenza: potenza istantanea che il modulo di SC può assorbire/erogare alla tensione nominale. Questo valore non rappresenta la potenza sostenibile nel tempo.

Densità di potenza: potenza per unità di peso calcolata quando la caduta di tensione va dal 20% al 40% della tensione nominale.

Capacità: energia immagazzinata nell'elemento. Il valore misurato è ottenuto scaricando il modulo, partendo dalla tensione nominale fino a 50% di essa, con una corrente costante. La Figura 6-1 mostra l'andamento della tensione ai capi del SC durante la scarica a corrente costante. Con riferimento alla simbologia del grafico la capacità è calcolata nel modo seguente:

$$C = \frac{I_d t_d}{V_n - V_f}$$

con I_d , t_d , V_n , V_f rispettivamente corrente e il tempo di scarica, tensione nominale e finale.

Resistenza interna, DC: resistenza equivalente alla serie di tutte le resistenze interne al modulo dei SC, ESR (equivalent series resistance). La misura della resistenza considera tutte le componenti resistive attribuite ai contatti, agli elettrodi, all'elettrolita e altri materiali resistivi, su circa cinque costanti di tempo. Con riferimento alla Figura 6-1 la ESR è così calcolata:

$$ESR = \frac{V_f - V_{\min}}{I_d}$$

con V_{\min} tensione minima. Il salto di tensione che si ha nella parte finale della Figura 6-1

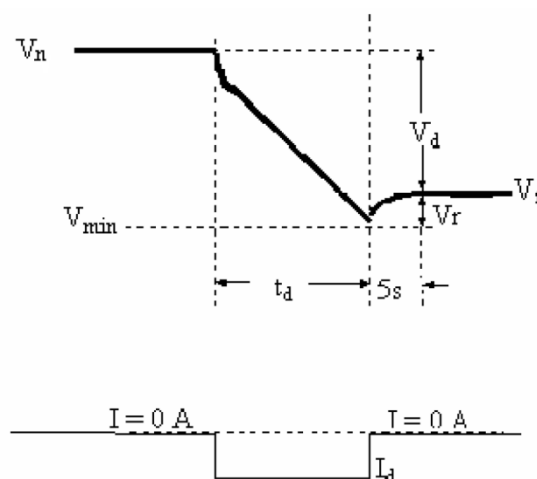


Figura 6-1. Andamento della tensione del modulo dei SC con una corrente di scarica costante.

Resistenza termica: resistenza che rappresenta l'aumento di temperatura rispetto ad un aumento di potenza.

Il modulo Maxwell presenta una bassa resistenza termica che permette uno sviluppo di calore, all'interno del modulo durante l'utilizzo, facilmente smaltibile con il raffreddamento per convezione naturale. Il valore della resistenza termica R_{th} è utile per stimare a priori l'aumento di temperatura del modulo rispetto alla temperatura ambiente e quindi per prevedere se con determinate correnti la temperatura del modulo ecceda quella indicata come massima nei datasheet. L'aumento di temperatura può essere calcolato nel seguente modo:

$$\Delta T = I^2 R_{ESR} R_{th} d$$

dove I è il valore efficace della corrente e d è il duty cycle ($0 \div 1$).

La Tabella 6-1 mostra le caratteristiche del modulo Maxwell scelto per comporre il banco di SC, mentre la Figura 6-2 mostra il modulo stesso.

Capacità	
Capacità Nominale	250 F
Tolleranza	20%
Tensione	
Tensione Nominale	16,2 V
Sovra tensione	16,8 V
Resistenza	
ESR, DC	4,1 mΩ
Resistenza termica	0,91 °C/W
Corrente	
corrente di mantenimento	3 mA
corrente di corto circuito	3900 A
massima corrente continua	115 A
massimo picco di corrente, 1sec	2000 A
Temperatura	
Temperatura di lavoro	-40 °C to +65 °C
temperatura di immagazzinamento	-40 °C to +70 °C
Pootenza	
densità di potenza	1700 W/kg
Picco di potenza	4400 W/kg
Energia	
Energia massima	2,05 Wh/kg
Peso	4,45kg

Tabella 6-1. Caratteristiche di un singolo modulo Maxwell modello BMOD0250

Per realizzare il banco di SC è necessario, al fine di ottenere la tensione di bus, collegare 4 moduli in serie. La capacità del banco in questo caso risulterebbe di 62.5 F, troppo bassa rispetto a quella richiesta. E' necessario quindi realizzare il banco di SC collegando in parallelo due pile formate dalla serie di 4 moduli ciascuna, ottenendo una capacità nominale di 125 F. Il banco di SC così realizzato ha una tensione nominale di 64.8V e un valore nominale della corrente efficace di 230 A. Il rendimento di carica e scarica del modulo è particolarmente elevato e può essere calcolato considerando un semplice ciclo di carica e scarica di un condensatore.



Figura 6-2. Modulo Maxwell modello BMOD250P016 B01

Si supponga di caricare il condensatore, modellato con la capacità C e le resistenza serie equivalente R , per mezzo di un generatore di corrente, come mostrato in Figura 6-3.

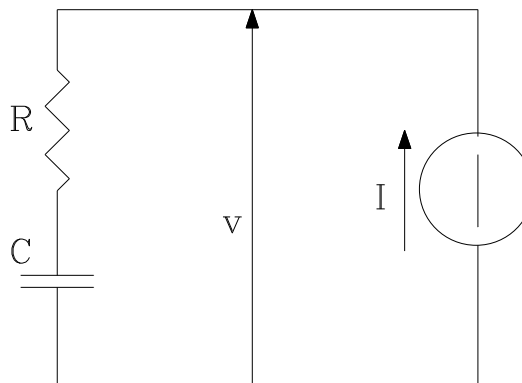


Figura 6-3. Circuito ideale di carica e scarica del condensatore

Se si esprime la tensione iniziale del condensatore $v_c(0)$ come frazione della sua tensione nominale v_n , la carica immagazzinata all'istante iniziale è:

$$q(0) = v_c(0)C = nv_n C \tag{6.1}$$

dove n è un numero compreso tra 0 e 1. La carica immagazzinata nel condensatore quando la tensione ai suoi capi è pari a quella nominale è:

$$q_N = v_n C \tag{6.2}$$

La carica che deve essere fornita dal generatore di corrente per raggiungere la tensione nominale ai capi del condensatore è quindi:

$$q = (1 - n)v_n C \tag{6.3}$$

Effettuando la carica a corrente costante, la tensione ai capi del condensatore raggiunge il valore nominale in un tempo pari a:

$$T = \frac{(1-n)v_n C}{I} = (1-n)T_n \quad (6.4)$$

Dove T_n è il tempo necessario a caricare il condensatore con corrente costante I a partire da tensione nulla. Dal secondo e terzo membro della (6.4) si ottiene anche la relazione seguente:

$$v_n = \frac{T_n I}{C} \quad (6.5)$$

La tensione ai capi del generatore è data da:

$$v(t) = nv_n + \frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt + Ri(t) \quad (6.6)$$

Dato che la corrente è costante si ha:

$$v(t) = nv_n + \frac{I}{C} t + RI \quad (6.7)$$

La potenza istantanea fornita dal generatore di corrente risulta:

$$P_g = v(t)I = nv_n I + \frac{I^2}{C} t + RI^2 \quad (6.8)$$

Per integrazione della (6.8) si ottiene l'energia erogata dal generatore durante il processo di carica. Il suo valore finale è dato da

$$E = nv_n IT + \frac{I^2}{2C} T^2 + RI^2 T \quad (6.9)$$

sostituendo la (5.5) nella (5.9) si ottiene:

$$E = \frac{n(1-n)I^2 T_N^2}{C} + \frac{1}{2} \frac{(1-n)^2 I^2 T_N^2}{C} + (1-2)RI^2 T_N \quad (6.10)$$

che può essere scritta anche come:

$$E = \frac{1}{2} \frac{(1-n^2)I^2 T_N}{C} + (1-n)RI^2 T_N \quad (6.11)$$

Il primo termine della (6.11) rappresenta l'energia assorbita dal condensatore mentre il secondo termine è uguale all'energia dissipata nella resistenza serie equivalente. Definendo l'efficienza di carica η_c come il rapporto tra l'energia immagazzinata nel condensatore e quella fornita dal generatore si ottiene:

$$\eta_c = \frac{1}{1 + \frac{2RC}{T_N} \frac{1}{1+n}} = \frac{1}{1 + \frac{2\tau}{T_N} \frac{1}{1+n}} \quad (6.12)$$

Con considerazioni analoghe fatte per il rendimento di carica, si può definire il rendimento di scarica come il rapporto tra l'energia assorbita dal generatore e quella erogata dal condensatore. Si ottiene:

$$\eta_{sc} = 1 - \frac{2RC}{T_N} \frac{1}{1+n} = 1 - \frac{2\tau}{T_N} \frac{1}{1+n} \quad (6.13)$$

Nel caso venga effettuato un ciclo di carica e scarica, l'efficienza del ciclo, cioè il rapporto tra l'energia restituita dal condensatore e quella inizialmente fornitagli è dato da:

$$\eta_{c-sc} = \frac{1 - \frac{2\tau}{T_N} \frac{1}{1+n}}{1 + \frac{2\tau}{T_N} \frac{1}{1+n}} \quad (6.14)$$

Nel caso specifico del modulo Maxwell, supponendo di caricare e scaricare il condensatore con una corrente costante di valore uguale alla sua massima corrente continua, la costante di tempo τ e il tempo necessario a caricare il condensatore con corrente costante I a partire da tensione nulla T_N sono:

$$\begin{cases} \tau = RC = 1.025 \text{ sec} \\ T_N = \frac{v_n C}{I} = 35.21 \text{ sec} \end{cases} \quad (6.15)$$

Se la tensione iniziale capi del modulo è metà di quella nominale, ovvero scegliendo $n=0.5$, il rendimento del ciclo di carica risulta essere:

$$\eta_c = \frac{1}{1 + \frac{2 * 1.025}{35.21} \frac{1}{1+0.5}} = 96.26\% \quad (6.16)$$

mentre il rendimento del ciclo di scarica, supponendo di fermarsi a metà della tensione nominale, è:

$$\eta_{sc} = 1 - \frac{2 * 1.025}{35.21} \frac{1}{1 + 0.5} = 96.11\% \tag{6.17}$$

Il rendimento complessivo del ciclo è:

$$\eta_{C-sc} = 99.8\% \tag{6.18}$$

Il rendimento di carica e scarica del banco di SC è identico a quello del singolo modulo.

I moduli da 16.2V includono un circuito di gestione attivo della tensione (Figura 6-4) atto a bilanciare la tensione di ogni singolo elemento nella fase di carica.

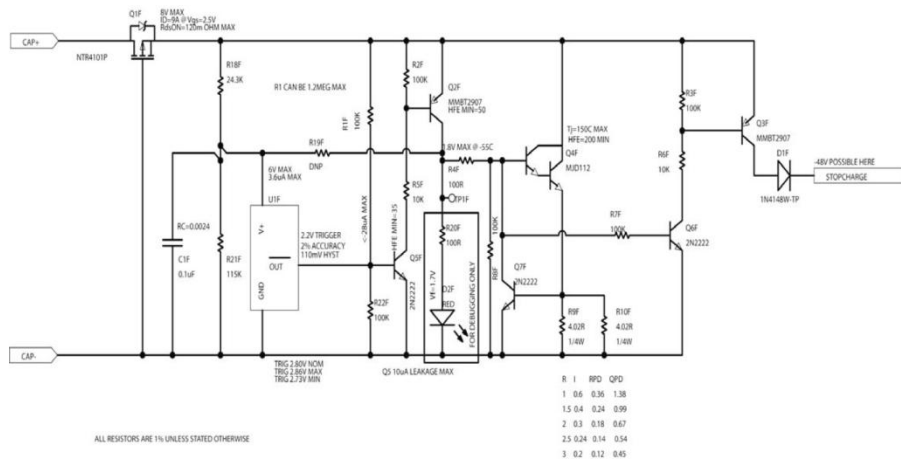


Figura 6-4. Schema del circuito di bilanciamento presente nelle celle dei moduli maxwell

Il singolo elemento ultracapacitivo è connesso ai terminali cap+ e cap-. Il mosfet Q1 evita che la tensione ai capi dell'elemento diventi negativa. Tale situazione può verificarsi quando è consentita la scarica totale del modulo. Il condensatore C1 costituisce un filtro passa basso insieme alla resistenza R18. Il partitore di tensione R18, R21 regola la tensione ai capi del comparatore U1 la cui uscita, di tipo open collector, viene forzata al livello basso quando l'ingresso è inferiore al valore di soglia di 2.2V. Fino a che la tensione del singolo elemento è tale per cui la tensione ai capi di R21 è inferiore alla soglia di tensione del comparatore, il comparatore, forza a massa la sua uscita e mantiene aperti tutti i transistor. In queste condizioni il circuito di equalizzazione non è attivo. Quando la soglia di tensione viene superata, l'uscita del comparatore, forzata da R1 si porta ad una tensione tale da permettere la conduzione del transistor npn Q5 e, di conseguenza, del transistor pnp Q2. Tramite i transistor Q6 e Q3 viene segnalato che la cella sta operando in condizioni di sovratensione e, a cura dell'utilizzatore, la carica viene arrestata. Il bilanciamento viene effettuato dal dispositivo Q4 che entra in conduzione e inizia a dissipare l'energia presente nell'elemento sulle resistenze R9 e R10. La corrente di scarica è mantenuta costante dalla retroazione formata dal parallelo delle resistenze R9 e R10 e dal transistor npn Q7. Quando al corrente aumenta, la tensione ai capi di R9//R10 cresce e chiude Q7. Questo forza a massa la base di Q4 e riduce la corrente di scarica. Un riduzione eccessiva

comporta l'abbassamento della tensione su R9//R10, l'apertura di Q7 e l'innalzamento della tensione della base di Q4. La corrente torna a crescere. Il circuito di gestione della tensione ritorna in uno stato di stand by quando la tensione ai capi di R21 scende sotto la soglia del comparatore U1.

Ogni qualvolta che una cella si trova in sovratensione, al fine di permettere il bilanciamento, la carica deve essere interrotta. Deve essere fornito all'esterno un segnale che permetta di accorgersi che una cella si trovi in sovratensione. I moduli maxwell sono dotati di un connettore le cui connessioni sono mostrate in Figura 6-5. Il piedino 4 è l'uscita di un NTC (negative temperature coefficient) transistor utile per monitorare la temperatura del modulo. Il piedino 2 è collegato al collettore del transistor Q3 normalmente aperto che commuta quando il circuito di bilanciamento della tensione è attivo. Per utilizzare il segnale VMC (voltage management circuit) l'utente deve collegare il pin 2 del connettore a una tensione di 5V per mezzo di una resistenza di pull up maggiore di $1k\Omega$ in modo da limitare la corrente che circola a 5mA

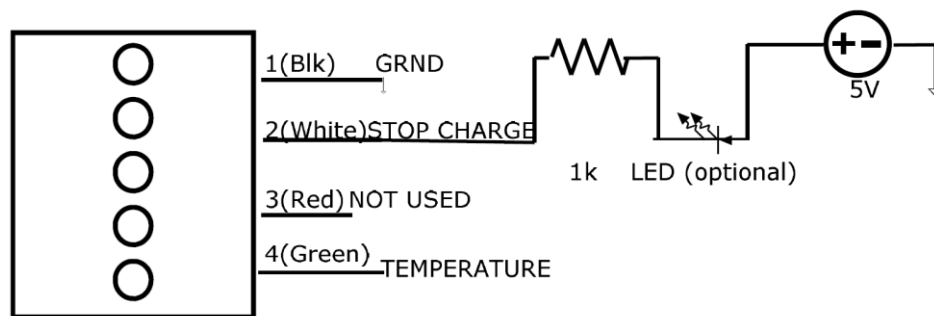


Figura 6-5. Connessioni del circuito di gestione del modulo

6.3 Trasduttori

L'acquisizione delle grandezze elettriche, tensione e corrente, è realizzata con l'ausilio di trasduttori [2]. I trasduttori con isolamento galvanico permettono di effettuare la misura nella massima sicurezza. La scelta di un tipo di trasduttore anziché di un altro richiede la conoscenza delle specifiche e delle loro definizioni e condizioni di misura. Inoltre molto importante è l'influenza dei disturbi esterni che possono influire sull'applicazione, ovvero temperatura, vibrazione, campi esterni etc. I trasduttori scelti sono di tipo LEM. Il loro segnale di uscita rappresenta istantaneamente il segnale primario. Inoltre può essere calcolato anche il valore medio, di picco, efficace del segnale di uscita, il quale può essere una corrente o una tensione. Tutte queste grandezze possono essere interfacciate con un DSP o μP .

Per una più chiara comprensione dei data sheet vengono riportate di seguito alcune definizioni di carattere generale riguardanti grandezze elettriche.

Primario: è l'ingresso, la sezione del trasduttore che riceve dal circuito di potenza la grandezza misurata. L'avvolgimento primario è percorso dalla corrente primaria.

Secondario: è l'uscita, la sezione del trasduttore che fornisce al circuito elettronico, un segnale elettrico proporzionale alla grandezza misurata. Il secondario fornisce la corrente secondaria.

Nominale: è il massimo valore continuativo in valore efficace del segnale di ingresso.

Resistenza di misura: quando un dispositivo fornisce un segnale di corrente come uscita, una resistenza è tipicamente usata per convertire l'uscita di corrente in una misura di tensione. Tale resistenza è anche chiamata resistenza di carico.

Misura di tensione: è la tensione misurata ai capi della resistenza di carico.

Tempo di risposta: è l'intervallo di tempo che intercorre tra l'applicazione del segnale da misurare e il segnale misurato. Come riferimento è preso il 90% del valore finale di entrambi i segnali.

Banda passante, potenza: è il campo di frequenza del segnale sinusoidale, avente ampiezza uguale al valore nominale, inviato all'ingresso del dispositivo.

Banda passante, circuito elettronico: è il campo di frequenza del segnale sinusoidale, avente ampiezza uguale al valore nominale, che può essere riprodotto con una specifica riduzione in ampiezza, tipicamente a -3dB.

6.3.1 Trasduttori di corrente

Esistono diverse tecnologie di trasduttori che permettono di misurare la corrente elettrica passante in un conduttore in completa sicurezza. La tecnologia più utilizzata per i trasduttori di corrente si basa sull'effetto Hall [7] e può essere implementata con un anello aperto o un anello chiuso. Il loro scopo è fornire un segnale di uscita proporzionale alla corrente passante attraverso un filo o una bobina. Ciò è realizzato utilizzando il campo magnetico generato dal passaggio della corrente primaria e indirizzandolo su una cella ad effetto Hall. A valle della cella può esserci un sistema sia ad anello aperto sia ad anello chiuso di corrente. Nella Figura 6-6, la quale mostra lo schema circuitale di un trasduttore ad effetto Hall, la corrente di controllo I_c è fornita dall'elettronica integrata nel trasduttore. L'uscita della cella Hall è una grandezza proporzionale alla corrente primaria sommata ad una tensione di offset. Il segnale di misura viene quindi compensato per rimuovere sia la componente di offset sia gli effetti di temperatura ed infine amplificato in modo da fornire all'utente l'uscita desiderata.

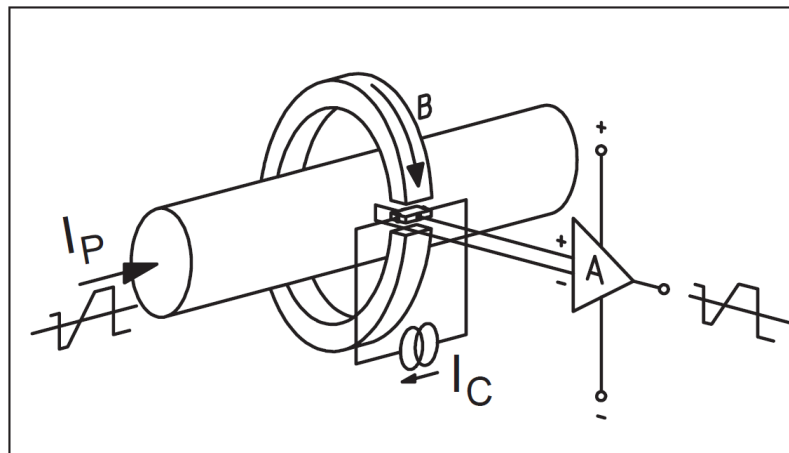


Figura 6-6. Principio di funzionamento del trasduttore ad effetto Hall ad anello aperto

L'uscita di un trasduttore ad anello aperto è tipicamente una tensione direttamente proporzionale alla corrente misurata. La tensione d'uscita varia tipicamente da 0V a 4V rispettivamente per correnti primarie che vanno da $I_P = 0$ a $I_P = I_{PN}$. I trasduttori ad anello aperto consentono di misurare correnti DC, AC e forme d'onda molto complesse riuscendo sempre a garantire un isolamento galvanico. I vantaggi di questi dispositivi includono bassi costi di realizzazione, dimensioni e pesi ridotti, bassi autoconsumi. Quest'ultimo vantaggio fa sì che questi trasduttori vengano utilizzati molto spesso per misure di correnti elevate (>300A). Di contro hanno limitate bande passanti, alti tempi di risposta e una dipendenza dalla temperatura che varia a seconda dell'entità del flusso al traferro. La tecnologia ad anello chiuso è basata sullo stesso principio di quella ad anello aperto ma, in più, viene introdotta una compensazione del flusso primario creato dalla corrente primaria in modo da aumentare le prestazioni del trasduttore. La tensione in uscita della sonda Hall è utilizzata per creare una corrente di compensazione che, circolando in una bobina secondaria posta sulla bobina primaria, crea, a sua volta, un flusso che sommandosi algebricamente con il quello primario rende nullo il flusso che investe

sonda Hall. La Figura 6-7 mostra il principio di funzionamento di un trasduttore di corrente ad effetto Hall ad anello chiuso.

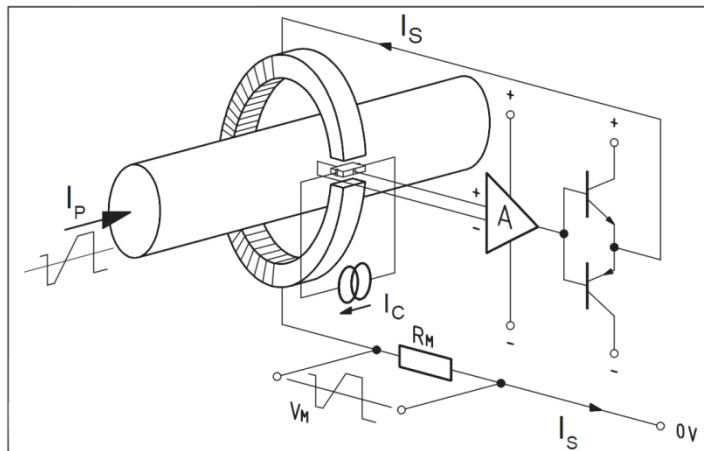


Figura 6-7. Principio di funzionamento del trasduttore ad effetto Hall ad anello chiuso

La corrente I_s crea un flusso uguale in ampiezza, ma di direzione opposta, al flusso creato dalla corrente primaria. Quando la sonda Hall è sottoposta ad un flusso nullo, non entra in gioco la dipendenza della misura dalla temperatura. Un ulteriore vantaggio di tale configurazione è dato dalla equivalenza tra la bobina secondaria e un trasformatore di corrente ad alta frequenza; il tutto consente un aumento della banda passante e riduce sensibilmente il tempo di risposta del trasduttore. Quando il flusso magnetico è completamente compensato si ha:

$$I_p N_p = I_s N_s \rightarrow I_s = \frac{I_p N_p}{N_s}$$

Di conseguenza la corrente I_s è l'esatta immagine della corrente primaria I_p . Inserendo una resistenza di valore noto R_M in serie alla bobina secondaria, è possibile misurare una tensione V_M che è l'esatta immagine della corrente I_s e quindi I_p . Tipicamente il numero di spire della bobina secondaria è $N_s = 1000 \div 5000$, mentre la corrente secondaria è $I_s = 25 \div 300 \text{ mA}$. Tra i vantaggi di questa tecnologia c'è l'ottima precisione e linearità, l'elevata banda passante e i rapidi tempi di risposta. Il segnale di uscita è facilmente adattabile a tutti i livelli desiderati e può essere convertito in tensione molto facilmente. Di contro, i principali svantaggi della tecnologia ad anello chiuso sono i consumi dovuti alle elevate correnti che circolano nella bobina secondaria, le elevate dimensioni, gli elevati costi realizzativi e la caduta di tensione ai capi della resistenza posta in serie alla bobina secondaria.

Nel caso specifico è stato scelto un trasduttore di corrente "LM 305-S/SP10" il quale è prevalentemente utilizzato nelle applicazioni industriali e di trazione. Il segnale di uscita è di tipo proporzionale e la tecnologia è ad



Figura 6-8. Trasduttore di corrente

effetto Hall ad anello chiuso. La Figura 6-8 mostra il trasduttore di corrente LM mentre la Figura 6-9 mostra il suo circuito elettrico e le relative connessioni.

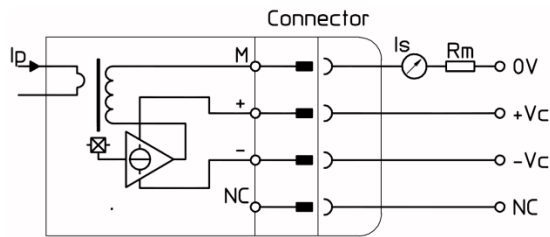


Figura 6-9. Circuito di connessione del trasduttore di corrente

Con I_p è indicata la corrente primaria il cui valore nominale è $I_{PN} = 300A_{rms}$, mentre il valore continuativo o di misura è $I_{PM} = \pm 500A$. La corrente del secondario I_s ha un valore nominale $I_{SN} = 150mA$. I trasduttori di corrente, nel caso specifico del sistema di propulsione progettato, misurano le correnti di batteria, di SC, del chopper e la corrente nel lato in continua che alimenta gli azionamenti elettrici di trazione.

6.3.2 Trasduttore di tensione

L'elaborazione delle tensioni in gioco nel sistema di propulsione, ovvero tensione di batteria V_b , dei SC v_{sc} e del bus in continua V_{dc} , è permessa grazie ad un trasduttore che converte il segnale di tensione in ingresso in un segnale di corrente in uscita, che a sua volta può essere trasformato in un segnale di tensione, il quale è più facilmente gestibile dal sistema di controllo. La tecnologia su cui si basa il trasduttore preso in considerazione sfrutta l'isolamento dei circuiti operazionali e la Figura 6-10 mostra il suo principio di funzionamento.

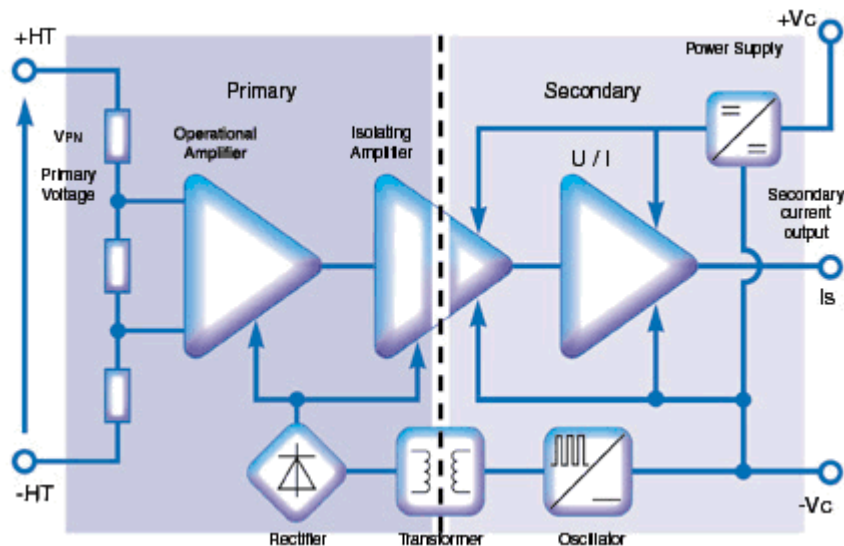


Figura 6-10. Schema elettrico del trasduttore di tensione LEM

La tensione primaria V_{PN} è applicata direttamente ai morsetti HT che costituiscono il primario del trasduttore. Una serie di resistenze interne e un amplificatore operazionale condiziona il segnale e lo invia ad un amplificatore di isolamento, il quale assicura un preciso e sicuro trasferimento della misura elettrica tra primario e secondario. Una funzione importante è costituita dall'alimentazione, a

bassa tensione, dei componenti elettronici del primario. Questo richiede l'utilizzo di un trasformatore capace di resistere ai livelli di isolamento tra primario e secondario. Il segnale trasmesso all'uscita dell'amplificatore isolamento è recuperato e condizionato in modo da fornire all'uscita una corrente che è esattamente l'esatta rappresentazione della tensione primaria. I trasduttori che sfruttano questa tecnologia possono essere utilizzati per tensioni che vanno da 50V a 1.5kV. La banda passante varia nel range 0÷13kHz, mentre il tempo di risposta è inferiore a 33μs.

Il trasduttore per cui si è optato è un "Lem Voltage Module AV 100-125" utilizzato per misure elettroniche di tensione in continua, in alternata, ect con isolamento galvanico tra il primario (alta tensione) e il secondario (circuito elettronico). In Figura 6-11 è mostrato un trasduttore del tipo preso in considerazione.



Figura 6-11. Trasduttore di tensione

In vantaggi di tale dispositivo sono i seguenti:

- Bassa potenza
- Elevata precisione
- Buona linearità
- Basso tempo di risposta
- Ampia banda passante
- Alta immunità alle interferenze esterne.

Le applicazioni di maggiore interesse per il loro utilizzo sono:

- Inverter trifase
- Carica batterie
- Convertitori cc/cc per propulsione e frenatura rigenerativa.

Il segnale di uscita è di tipo istantaneo e la tensione di alimentazione può essere unipolare sia positiva che negativa in modo tale da realizzare rispettivamente solo misure di tensione positiva o negativa.

In Figura 6-12 è mostrato lo schema elettrico del trasduttore e le relative connessioni.

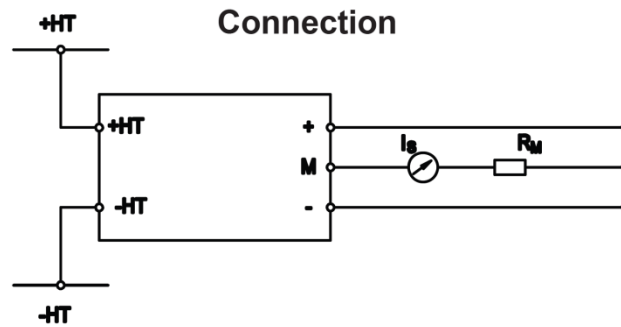


Figura 6-12. Circuito di connessione del trasduttore di tensione

I terminali HT rappresentano i morsetti del primario al quale può essere applicata una tensione nominale di $V_{PN} = 125V_{rms}$, mentre la tensione continuativa massima di misura è $V_{PM} = \pm 187.5V$. La tensione di alimentazione è applicata ai morsetti + e - e può essere $V_c = \pm 12 \dots 24V (\pm 5\%)$. La corrente al secondario I_s ha un valore nominale efficace di 50mA, mentre la corrente statica di consumo è $I_c = 50 + I_s$ (mA). I_s è positiva quando la tensione V_p è applicata sul terminale +HT. Con R_M è indicata la resistenza di misura il cui valore, espresso in Ω , è:

$$\left\{ \begin{array}{lll} & R_{M, \min} & R_{M, \max} \\ @ V_c = 11.4V & 0 & 47 \\ @ V_c = 22.8V & 0 & 184 \end{array} \right.$$

Il picco di tensione applicabile al primario è $\hat{V}_p = 2V_{PM}$ per 500ms ogni 60minuti. La banda passante a -3dB è 11kHz, mentre il tempo di risposta è $t_r < 30\mu s$.

7 Bibliografia

- [1] (s.d.). Tratto da <http://www.giottivictoria.com>
- [2] LEM. (s.d.). *Isolated Current and voltage trasducers*. Tratto da LEM: www.lem.com
- [3] Lowry, J. L. (2003). *Electrinc Vehicle Tecnology Explained*. Oxford .
- [4] Lyons T.J., K. J. (1986). *The developente of a driving cycle for fuel conusmption and emission evalution*.
- [5] Passafiume, M. (2007). Sistemi per la generazione e accumulo dell'energia per la trazione stradale. *Tesi*.
- [6] Perticaroli, F. (1998). *Trazione Elettrica*. Milano: clup.
- [7] R. Portas, L. C. (2007). *Accuracy of Hall-Effect Current Measurement Trasducers in Automotive Battery Management Applications using Current Integretion*.
- [8] Technologies, M. (2009). *Maxwell technologies BOOSTCAP Ultracapacitor*. Tratto da www.maxwell.com