

POLITECNICO DI TORINO

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA ELETTRICA



Tesi di Laurea Magistrale

SISTEMA DI GESTIONE ATTIVA DELLE BATTERIE

Relatore:

Dr. Paolo Guglielmi

Candidato:

Jacek Nicola

*A Laura e alla mia famiglia,
per tutto.*

Sommario

INTRODUZIONE.....	9
1. Celle agli Ioni di Litio.....	11
1.1. Struttura e principio di funzionamento.....	11
1.2. Condizioni pericolose di funzionamento.....	13
1.2.1. Overcharge.....	13
1.2.2. Overdischarge.....	13
1.3. Modello circuitale della cella.....	14
1.4. Caratterizzazione della Cella.....	15
1.4.1. Introduzione alla prova.....	15
1.4.2. Svolgimento Prova di Scarica.....	17
1.4.3. Svolgimento della Prova di scarica-carica.....	18
1.4.4. Analisi dei Dati e determinazione dei parametri della Cella.....	19
Prova di Scarica.....	19
Prova di scarica-carica.....	27
1.4.5. Simulazione del modello e confronto con la prova reale.....	31
Prova di Scarica.....	32
Prova di Scarica - Carica.....	33
Bibliografica.....	34
2. Battery Management System (BMS).....	35
2.1. Cell Monitoring.....	35
2.2. Protezioni.....	36
2.3. Stima del SOC.....	36
2.4. Stima del SOH.....	38
2.5. Cell Balancing.....	39
• Balancing passivo.....	39
• Balancing attivo.....	40
2.6. Gestione termica.....	45
2.7. Controllo della carica.....	46
Bibliografica.....	46
3. Progettazione Sistema Batteria.....	47
3.1. Sistema Batteria.....	47
• Cella.....	48
• Moduli.....	49

•	MBCB – Monitoring Balancing Control Board	50
•	BMSC – Battery Management System Control.....	52
•	Shunt.....	53
•	Teleruttore.....	53
•	Fusibile.....	54
•	CAN	54
•	Alimentazione Ausiliari (12 V)	54
4.	Intelligent Module	55
•	Interruttore Statico.....	58
•	Induttore.....	59
•	Condensatori LegBoard lato modulo.....	60
4.1.	Funzioni richieste al modulo Intelligente	61
4.2.	Calcolo parametri per la Simulazioni delle commutazioni del modulo intelligente	62
	Parametri del circuito di Commutazione.....	62
	Paramenti utilizzati per le simulazioni di commutazioni di inserzione e disinserzione dei moduli	67
4.3.	Precarica Modulo.....	69
	Simulazione commutazioni di un pacco batteria con chiusura rapida dell'interruttore statico	70
	Precarica di un pacco batteria costituito da 8 moduli in serie con controllo lineare di corrente.....	77
	Precarica di un pacco batteria costituito da 1 moduli in serie con controllo lineare di corrente	85
	Precarica di un pacco batteria di 8 moduli con controllo PWM della corrente	87
4.4.	Inserzione di moduli in un pacco batteria con corrente di carico costante	94
	Inserzione di un modulo con corrente di carico costante positiva di un Pacco batteria costituito da 8 moduli.....	95
	Inserzione di un modulo con corrente di carico costante di un Pacco batteria costituito da 8 moduli con controllo lineare della corrente.....	99
	Inserzione di un modulo con corrente di carico positiva costante di un Pacco batteria costituito da 8 moduli con controllo PWM della corrente.....	102
	Inserzione di un modulo con corrente di carico negativa costante di un Pacco batteria costituito da 8 moduli con controllo PWM della corrente.....	106
	Calcolo delle perdite di commutazione per il dimensionamento termico.....	108
4.5.	Disconnessione Modulo	112
	Disinserzione di un modulo con corrente di carico costante positiva di un Pacco batteria costituito da 8 moduli.....	113
	Disconnessione di un modulo con corrente di carico positiva costante di un Pacco batteria costituito da 8 moduli con controllo PWM della corrente	116

Disconnessione di un modulo con corrente di carico negativa costante di un Pacco batteria costituito da 8 moduli con controllo PWM della corrente	119
Disconnessione di un modulo con corrente di carico nulla di un Pacco batteria costituito da 8 moduli con controllo PWM della corrente	122
4.6. Dimensionamento termico della gamba di inverter	125
4.7. Conclusioni	140
4.8. Schematico del Intelligent Module.....	141
4.9. Schema del Monitoring Balancing Control Board	142
4.10. Schema della LegBoard.....	143
4.11. MCU	145
Bibliografia.....	146
5. Normative sui test di omologazione delle batterie	148
Bibliografia.....	156
Ringraziamenti.....	157

INTRODUZIONE

Le batterie agli ioni di litio sono la tecnologia dominante nel campo dell'accumulo di energia elettrica grazie alla loro elevata densità di energia per peso e per volume ma richiedono molti accorgimenti per potere funzionare correttamente. Ogni singola cella deve funzionare in un determinato intervallo di tensione e in determinato intervallo di temperatura per evitare il danneggiamento irreparabile della cella fino nel caso estremo dell'esplosione della stessa. Per questo sono necessari sistemi di monitoraggio della tensione e della temperatura per impedire il funzionamento dell'elemento oltre la zona di sicurezza. Nei capitoli successivi verranno spiegati dettagliatamente i limiti di sicurezza entro i quali ogni singola cella deve operare e i componenti che si occupano di monitorare la cella e comandare le protezioni.

Inoltre l'attuale mercato delle batterie sta incentivando la produzione di celle di dimensioni e tensione contenuta, mentre soprattutto nel caso di applicazioni come la mobilità elettrica e ibrida come anche lo storage di energia elettrica nell'ambito delle smart-grid richiede tensioni elevate e correnti elevate. Per ottenere maggiori tensioni si tende a costruire pacchi batterie con centinaia di celle in serie, questo permette di ottenere tensioni elevate ma poiché le singole celle non sono perfettamente uguali dal punto di vista della capacità e delle cadute di tensione succede che durante la fase di carica uno o più celle raggiungano prima i limiti di sovratensione rendendo impossibile caricare ulteriormente le celle che non hanno ancora raggiunto il limite di overcharge mentre in fase di scarica si ha che uno o più celle raggiungono il limite di sovrascarica prima delle altre rendendo inaccessibile l'energia disponibile nelle altre celle. Questo rende necessaria un'altra funzione ossia il balancing che si occupa di rendere uguale lo stato di carica di ogni singola cella per potere sfruttare tutta la capacità del pacco nel suo insieme.

La tesi ha come oggetto la realizzazione di un modulo da utilizzare come elemento fondamentale nei pacchi batterie. Il modulo è definito come un insieme di 10/12 celle agli ioni di litio e da tutti gli apparecchi necessari alla gestione delle celle ossia le protezioni necessarie per il funzionamento in sicurezza delle batterie. La progettazione in dettaglio prevede la costruzione del modulo costituito da:

- 10/12 celle
- Scheda contenente il chip di monitoring, le connessioni per i sensori di temperatura (per ogni singola cella e per le temperature di ingresso e uscita del fluido di raffreddamento), per i sensori di tensione, per gli interruttori di potenza e i resistori necessari per il balancing passivo (successivamente chiamato MBCB), il controllore per la gestione di ogni singolo modulo e le connessioni per terminali di comando degli interruttori statici.
- Sensori di temperatura in ingresso e uscita per la gestione termica della batteria
- Sensori di temperatura per ogni cella
- Fusibili e interruttori statici per l'esclusione del modulo dal pacco batteria

Il modulo intelligente è un'ulteriore evoluzione del modulo che include due interruttori statici che permettono di escludere le celle del modulo della serie del pacco batteria, questo risulta essere un buon compromesso perché permette al suo interno un balancing passivo più robusto e facile da realizzare mentre permette di effettuare un balancing attivo a livello dei moduli potendo escludere in fase di carica i moduli già carichi permettendo di caricare quelli con stato di carico inferiore al 100% e in fase di scarica escludere quelle che hanno già raggiunto la tensione di cut off.

Per operare questo tipo di balancing è necessario avere due interruttori per elemento che si vuole bypassare. Questo può essere effettuato a livello del modulo poiché la resistenza degli interruttori statici risulta elevata rispetto alle resistenze interne di ogni cella e quindi eccessivamente penalizzante se messi in serie ad ogni singola cella a livello di cadute di tensione, di perdite e di costo, mentre se messe per ogni modulo la resistenza dell'interruttore statico risulta trascurabile.

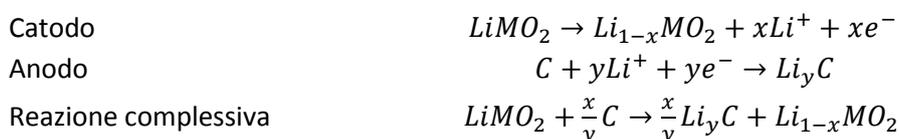
1. Celle agli Ioni di Litio

1.1. Struttura e principio di funzionamento

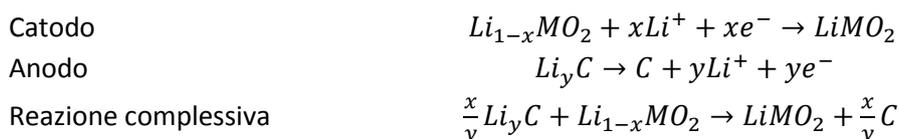
Le batterie agli ioni di litio funzionano sul principio della inserzione (intercalazione) di ioni di litio nelle strutture attive del catodo e dell'anodo. L'anodo intercala ioni di litio durante la carica, mentre il catodo riceve ioni di litio durante la scarica. Il materiale costituente gli elettrodi è collegato ad un current collector allo scopo di migliorare la conducibilità elettrica.

Reazioni agli elettrodi in una cella agli ioni di litio (LiMO_2 con $\text{M}=\text{Co}$ o Ni).

Reazioni durante la carica:



Reazioni durante la scarica:



- Catodo

Il catodo deve contenere degli ioni in grado di essere ossidati/ridotti, deve quindi avere uno o più stati ossidati stabili. Il materiale del catodo deve essere in grado di reagire con il litio in modo reversibile.

Materiali utilizzati per il catodo delle celle:

- LiCoO_2
- $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$
- $\text{LiNi}_{1-x-y}\text{Co}_x\text{Mn}_y\text{O}_2$
- LiMn_2O_4
- LiFePO_4

- Anodo

In teoria il litio metallico è il più adatto per essere usato come materiale anodico per la sua elevata capacità specifica rispetto agli altri materiali anodici. In pratica dopo ripetuti cicli si ha riduzione inevitabile di Li^+ in litio metallico che porta alla formazioni di dendriti che tendono a crescere all'interno del separatore cortocircuitando la cella. Vengono quindi utilizzati anodi di carbonio che possiede relativamente basse superfici e prevengono la formazione di litio metallico.

- Separatore poroso

Il separatore impedisce il contatto fisico e elettrico tra catodo e anodo e nello stesso tempo permettere il flusso degli ioni Li^+ , è importante che il materiale del separatore non prenda parte a nessuna delle reazioni della cella.

Materiali tipicamente usati per il separatori poroso:

- Polietilene (PE)
- Polipropilene (PP)
- Polietilene ad alta densità (HDPE)
- Polietilene molecolare ultra-alto (UHMPE)

- Soluzione Elettrolitica

Gli elettroliti più comuni sono basati su soluzioni di Sali di litio e solventi organici.

Le caratteristiche principali che deve avere il solvente sono:

1. Capacità di dissolvere una quantità sufficiente di Sali di litio
2. Bassa viscosità per facilitare il trasporto degli ioni Li^+
3. Rimanere inerte agli altri componenti della cella
4. Rimanere liquido in un ampio range di temperatura
5. Avere alto flash-point, essere atossico ed economico

Le caratteristiche richieste per il sale di litio:

1. Deve dissolversi o dissociarsi completamente nel solvente organico
2. I cationi del sale di litio dissolto devono avere alta mobilità all'interno del solvente
3. Gli anioni devono essere inerti rispetto al solvente elettrolitico
4. Gli anioni devono essere stabili contro la decomposizione ossidante del catodo
5. Sia i cationi che gli anioni devono essere inerti a tutti i componenti della cella
6. Gli anioni devono essere atossici e stabili contro reazioni indotte termicamente con il solvente e altre parti della cella

1.2. Condizioni pericolose di funzionamento

1.2.1. Overcharge

Durante il normale processo di carica gli ioni di litio migrano dal catodo all'anodo con il catodo che si ossida mentre l'anodo viene ridotto. Se si supera una tensione di sicurezza il processo di overcharge inizia.

Esempio di celle LiCoO_2 :

1. La migrazione degli ioni di Li^+ continua al crescere della tensione della cella. Si genera gas e aumenta la temperatura
2. Come la overcharge si avvicina al 100%, la resistenza dell'elettrodo positivo cresce con generazione di calore per effetto Joule e decomposizione esotermica dell'elettrolita.
3. La temperatura cresce rapidamente per effetto della reazione tra il catodo ad alta energia impoverito di litio con l'elettrolita. La reazione accelera quando la temperatura raggiunge i 60°C e si ha lo sviluppo di CO_2 gassosa per effetto della decomposizione dell'elettrolita organico
4. Raggiunti i $130\text{-}135^\circ\text{C}$ la cella può comportarsi in due modi diversi:
 - Se si ha la rottura del separatore in polietilene, ciò avviene per correnti di overcharge basse ($<1\text{C}$), la temperatura decresce senza rotture
 - Per elevate correnti può avvenire il runaway termico e l'eventuale rottura o fuoriuscita di gas (venting) come effetto di una reazione tra l'elettrodo negativo e l'elettrolita

Il catodo in LiFePO_4 è molto robusto al fenomeno dell'overcharge per due motivi. Un primo motivo è la presenza di un composto FePO_4 effetto della completa rimozione del litio estremamente stabile, la presenza di una robusta forma privata del litio garantisce una buona resistenza del LiFePO_4 al overcharge. Un altro motivo è che nel FePO_4 l'ossigeno è fortemente legato all'interno del gruppo PO_4 e questo rende il legame P-O difficilmente incline a rilasciare ossigeno che andrebbe a ossidare l'elettrolita organico. Da un altro lato il LiFePO_4 possiede bassa conducibilità elettrica e ionica ma questo può essere parzialmente risolto tramite dati metodi e strategie di sintesi.

1.2.2. Overdischarge

Condizione rara ma non impossibile per cui la scarica continua al di sotto della tensione di cut-off. Nel caso di scarica fino a 0V si ha che parte del current collector in rame si dissolve nella soluzione dell'elettrolita. Successivamente cercando di caricare la cella si forma del rame metallico sull'anodo di carbonio (formando una placatura sull'anodo) che crea un cortocircuito interno.

1.3. Modello circuitale della cella¹

Riportiamo in Figura 1 il modello di Thèvenin generalmente usato per modellizzare le celle agli ioni di litio.

- R_0 è legata alla resistenza dell'elettrolita alla propagazione degli ioni
- $R_1 C_1$ modella gli effetti del rilassamento di breve termine che sono dovuti dalla costituzione della interfaccia solida dell'elettrolita (SEI Solid Electrolyte Interface) sull'elettrodo anodico
- $R_2 C_2$ modella gli effetti del rilassamento di lungo termine sono dovuti alla formazione di una doppia capacità in entrambi gli elettrodi anodici e catodici
- La caratteristica OCV-SOC (Open Circuit Voltage – State of Charge) rappresenta la tensione a riposo in funzione dello stato di carica, questa contiene fenomeni di isteresi

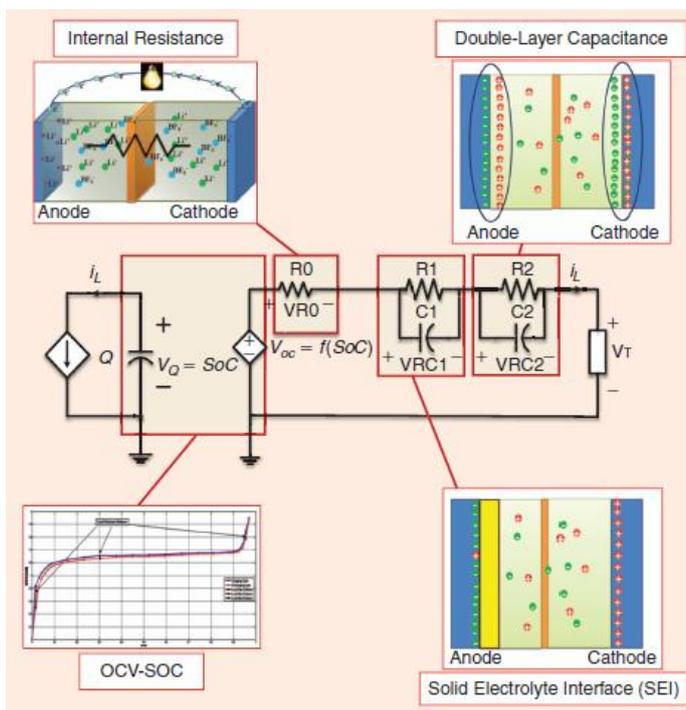


Figura 1

Tutti i parametri sono soggetti a variazioni in funzione della corrente di carica/scarica, dello stato di carica, della temperatura e per effetto dell'invecchiamento.

In Figura 2 vediamo un esempio di caratteristica OCV-SOC nel caso (a) per una cella LiFePO_4 nel caso (b) per una cella litio-polimero.

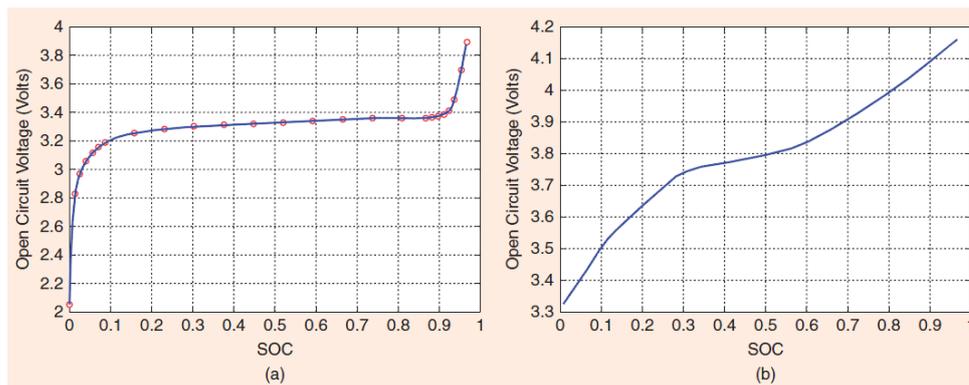


Figura 2

¹ Dall'articolo Habiballah Rahimi-Eichi, Unnati Ojha, Federico Baronti and Mo-Yuen Chow, "Battery Management System", IEEE INDUSTRIAL ELECTRONICS MAGAZINE

1.4. Caratterizzazione della Cella

1.4.1. Introduzione alla prova

La caratterizzazione della cella avviene tramite una prova di carica e scarica effettuata tramite un ciclatore. Scopo della prova è individuare i parametri del circuito equivalente della batteria.

La batteria considerata per la prova è riportata in Tabella 1:

Tabella 1

KOKAM	SLPB55205130H
Capacità	11 Ah
C_n	39600 F
ESR (Resistenza interna)	1.6 mΩ
Corrente Nominale (1C)	11 A
Tasso di scarica (continuativa)	8C
Tasso di scarica (impulsiva)	10C

Ora riportiamo le caratteristiche del ciclatore utilizzato in Tabella 2

Tabella 2

BITRODE	Model MCV
Canali	16
Corrente massima per canale	100 A
Tensione massima di canale	5 V
Tempo di campionamento	100 ms
Precisione misura di tensione	0.01 V
Precisione misura di corrente	0.1 A

In Figura 3 vediamo il ciclatore utilizzato.



Figura 3

Mentre in Figura 4 possiamo vedere la cella utilizzata collegata ai morsetti di prova del ciclatore.



Figura 4

1.4.2. Svolgimento Prova di Scarica

Una prima prova a cui è stata sottoposta la cella è consistita in una scarica con corrente costante intervallata da periodi di riposo per permettere di determinare la tensione di circuito aperto.

In Figura 5 vediamo l'andamento della tensione di cella e della corrente applicata dal ciclatore.

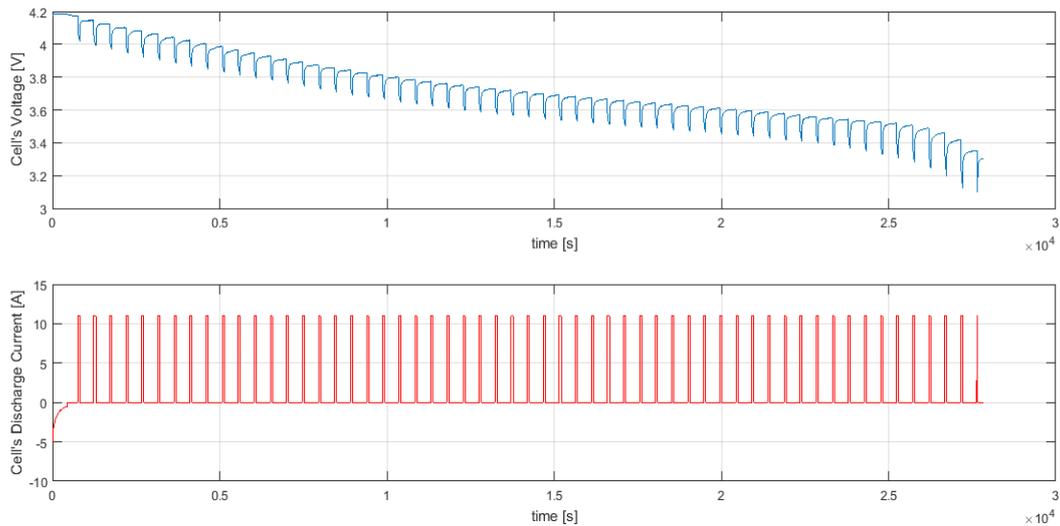


Figura 5 Andamento della tensione e della corrente di cella durante la prova di scarica

La cella viene sottoposta ad una corrente di scarica di 88 A (pari a 8 volte la corrente nominale), la corrente viene applicata in modo discontinuo comprendendo periodi a corrente nulla per permettere l'estinzione dei transistori e quindi la misura della tensione a circuito aperto, necessaria per determinare la curva che correla la tensione batteria allo stato di carica.

In Tabella 3 vediamo in parametri della prova di scarica e la durata totale.

Tabella 3

Tempo di scarica	1 min
Tempo di rilassamento	7 min
Tensione iniziale	4.2 V
Tensione fine prova	3.1V
Corrente di scarica	88 A
Durata totale prova	27845.7 s

1.4.3. Svolgimento della Prova di scarica-carica

La seconda prova a cui è stata sottoposta la cella è una scarica fino a 3.0V seguita da una carica fino a 4.185V. Sia per la scarica che per la carica si sono alternati periodi a corrente non nulla a periodi a corrente nulla, per permettere l'estinzione dei transistori e determinare quindi la tensione a circuito aperto.

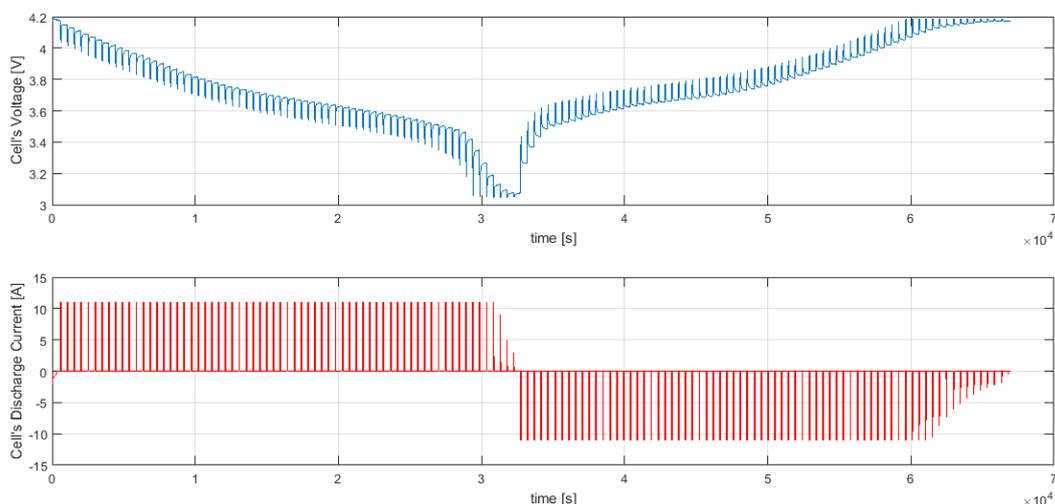


Figura 6 Andamento della tensione e della corrente di cella durante la prova di carica-scarica

La cella viene sottoposta ad una corrente di scarica di 88 A (pari a 8 volte la corrente nominale), la corrente viene ridotta progressivamente per fare si che durante la prova la tensione sia limitata tra due valori massimi e minimi di tensione, nello stesso modo discontinuo della prova di scarica a cui viene aggiunta un prova di carica con una corrente di 88A.

In Figura 6 vediamo in parametri della prova di scarica e la durata totale.

Tabella 4

Tempo di scarica	1 min
Tempo di rilassamento	7 min
Tensione iniziale	4.2 V
Tensione terminata la prova di scarica	3.0 V
Tensione fine prova	4.185 V
Corrente di scarica	88 A
Corrente di carica	88 A
Durata totale prova	66969.6 s

1.4.4. Analisi dei Dati e determinazione dei parametri della Cella

I dati ottenuti dalle prove svolte sulla batteria sono stati successivamente analizzati tramite degli script realizzati in Matlab per l'identificazione dei parametri del circuito equivalente e della caratteristica di tensione a circuito aperto in funzione dello stato di carica.

Prova di Scarica

Riportiamo in Tabella 5 i parametri del modello ottenuti dalla prima prova di scarica come descritta in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata. Errore. L'origine riferimento non è stata trovata..**

Tabella 5

Resistenza Serie R_0 (media)	6.6156 m Ω
Resistenza R_1	1.5466 m Ω
Capacità C_1	970.7 F
Costante di tempo R_1C_1	1.50 s
Resistenza R_2	4.8962 m Ω
Capacità C_2	6291.9 F
Costante di tempo R_2C_2	30.81 s
Costante di tempo R_1C_1 (zona di rilassamento)	10.99 s
Costante di tempo R_2C_2 (zona di rilassamento)	123.07 s

Possiamo vedere come la resistenza serie calcolata R_0 sia molto maggiore di quella fornita dal datasheet, questo perché la cella utilizzata non era nuova ed era già stata sottoposta a molti test intensivi.

In Figura 7 vediamo invece la caratteristica tensione di circuito aperto rispetto allo stato di carica. In blu sono rappresentati i punti ottenuti dalla prova, mentre la curva in rosso è l'interpolazione polinomiale di ordine 10.

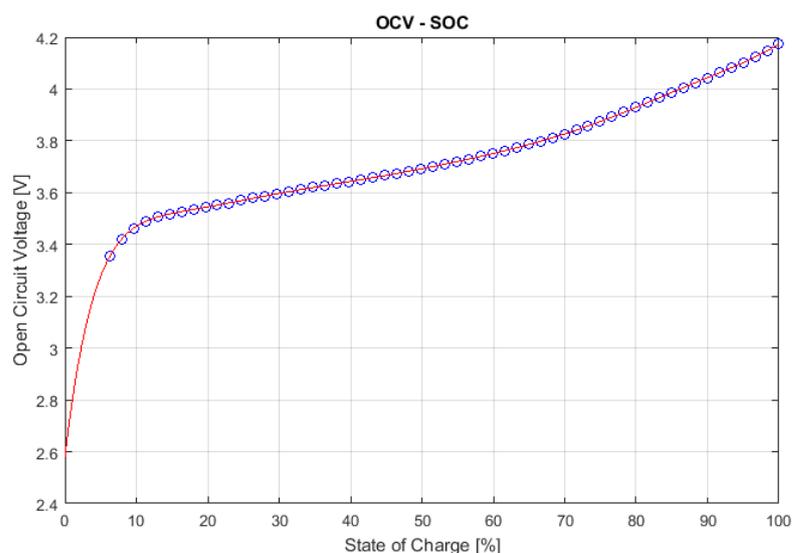


Figura 7 Caratteristica della tensione a circuito aperto rispetto allo stato di carica

- *Calcolo dello stato di carica (SOC)*

Lo stato di carica viene calcolato dall'integrale di corrente, considerando la cella carica ad inizio prova. Poiché consideriamo una corrente campionata utilizziamo l'approssimazione trapezoidale dell'integrale (Equazione 1).

Equazione 1

$$SOC(k) = SOC(k - 1) + \frac{1}{C_n} \frac{1}{2} [i_b(k) + i_b(k - 1)] \Delta t$$

In Figura 8 vediamo l'andamento dello stato di carica (per comodità in percentuale) durante la prova assieme alla tensione della cella.

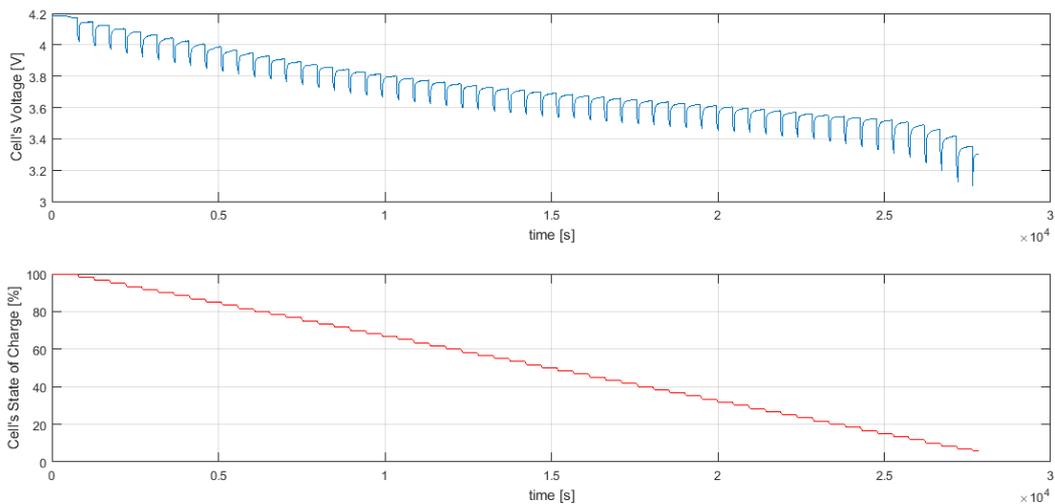


Figura 8 Andamento della tensione e dello stato di carica durante la prova

• *Calcolo della resistenza serie R_0*

La resistenza serie R_0 (Equazione 2) viene calcolata in prossimità dei fronti di salita della corrente di scarica considerando la caduta di tensione istantanea (di natura resistiva) sul fronte del gradino di corrente.

Equazione 2

$$R_0 = \frac{V_{max} - V_{min}}{abs(I_{max} - I_{min})}$$

In Figura 9 vediamo con il quadrato nero la V_{max} mentre con il cerchio rosso la V_{min} queste sono state determinate utilizzando lo stesso istante temporale delle I_{max} e I_{min} .

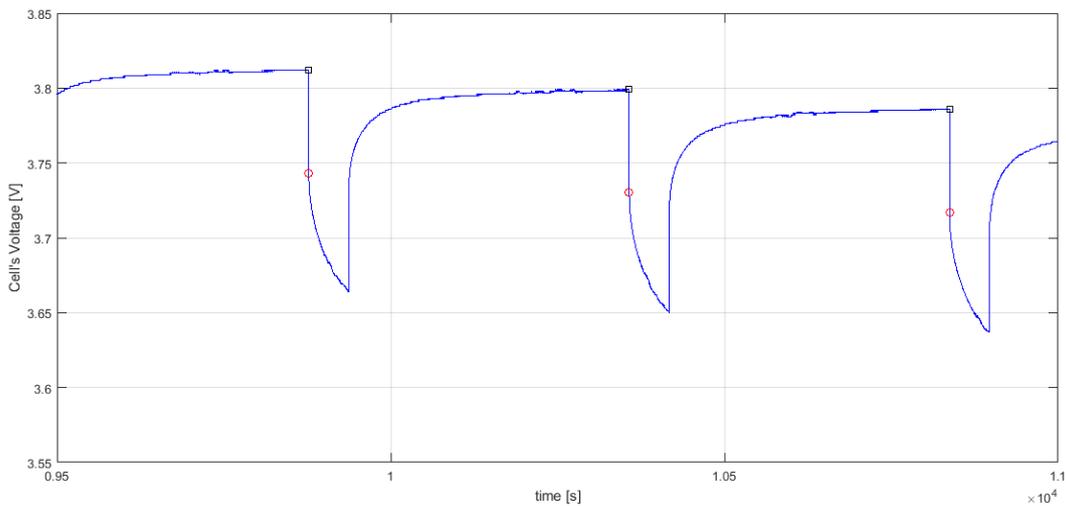


Figura 9 Dettaglio della tensione durante i periodi di scarica e rilassamento

In Figura 10 vediamo evidenziata dal cerchio rosso la I_{max} mentre con il cerchio nero la I_{min} .

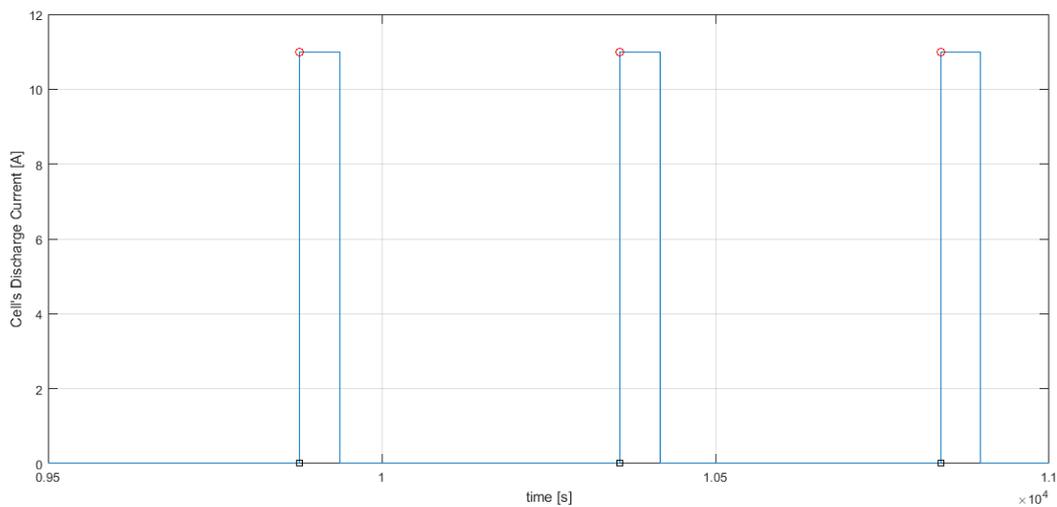


Figura 10 Dettaglio della corrente durante i periodi di scarica e rilassamento

• *Calcolo della tensione a circuito Aperto (OCV Open Circuite Voltage)*

Per il calcolo della caratteristica della tensione di circuito aperto in funzione dello stato di carica si è considerata la tensione raggiunta dalla cella immediatamente prima del gradino di corrente di scarica.

I punti di tensione sono presi in corrispondenza del massimo precedente al gradino di corrente di scarica, vediamo un esempio in Figura 12 ,dove i punti usati per calcolare la curva OCV sono indicati dai quadrati neri (V_{max}).

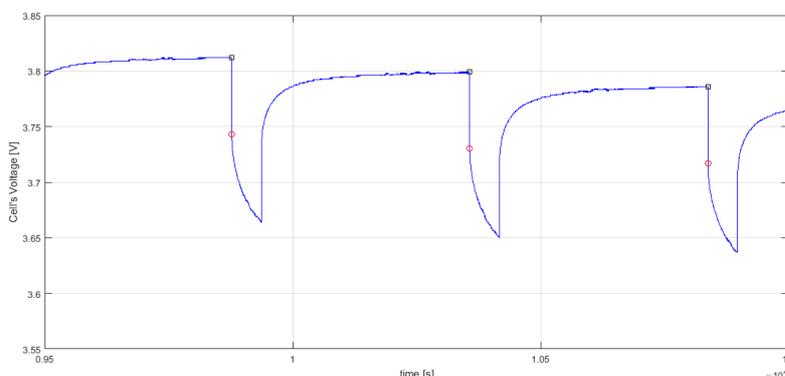


Figura 12

In Figura 13 vediamo i punti misurati della caratteristica OCV in blu, mentre in rosso vediamo l'interpolazione polinomiale di ordine 10 calcolata da Matlab.

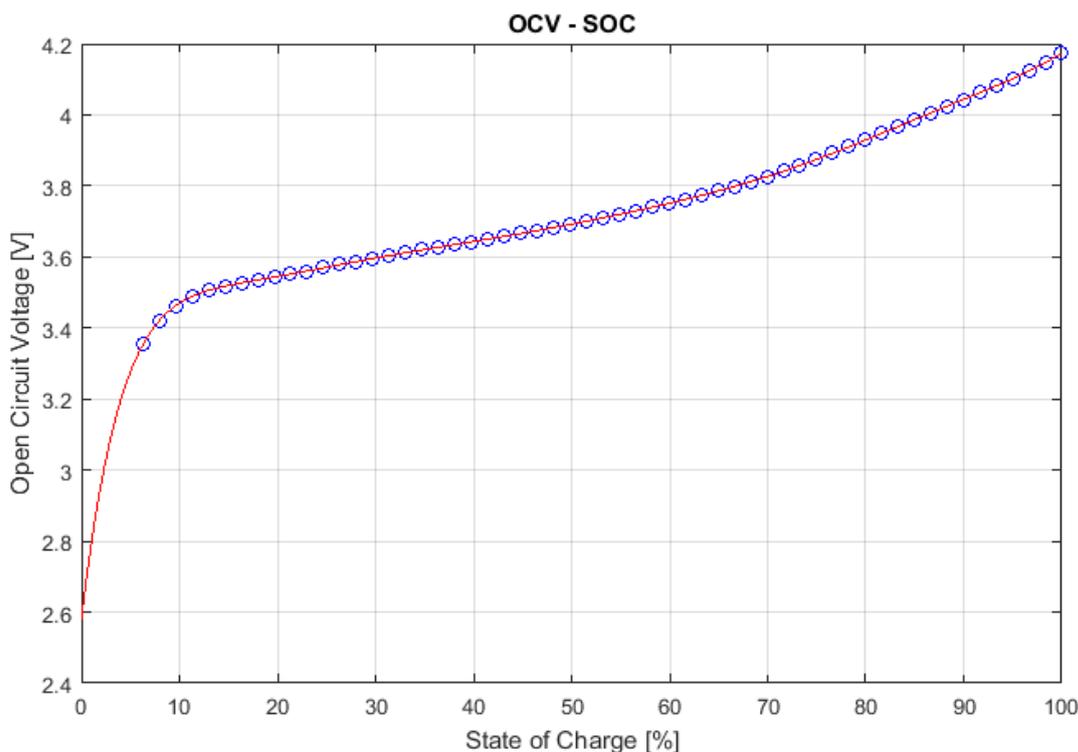


Figura 13 Tensione di Circuito Aperto (OCV) in funzione dello stato di carica

• *Calcolo parametri dei circuiti RC*

I parametri dei due circuiti RC che modellizzano gli effetti dinamici della cella sono stati calcolati a partire da un tensione equivalente ottenuta sottraendo dalla tensione della cella la tensione a circuito aperto ottenuta dalla curva interpolata (Figura 13) e la caduta resistiva.

In Equazione 4 vediamo il modello espresso nello spazio di Laplace.

Equazione 4

$$v_{cell} = v_{oc}(SOC) + R_0 i_b + \left[\frac{R_1}{sR_1C_1 + 1} + \frac{R_2}{sR_2C_2 + 1} \right] i_b$$

Partendo dall'Equazione 4 otteniamo la tensione equivalente (ossia quella ai capi della serie dei circuiti RC) in Equazione 5.

Equazione 5

$$v_{eq}(t) = v_{cell}(t) - v_{oc}(SOC) - R_0(t)i_b(t)$$

Per ridurre il rumore della v_{eq} si è considerata la R_0 aggiornata ad ogni impulso di corrente invece che considerare il valore medio.

In Figura 14 vediamo nella parte superiore l'andamento della tensione equivalente, che verrà utilizzata per calcolare i parametri dei circuiti RC, mentre nella parte inferiore la tensione di circuito aperto calcolata in base alla curva OCV e allo stato di carica (ottenuto dall'integrale di corrente).

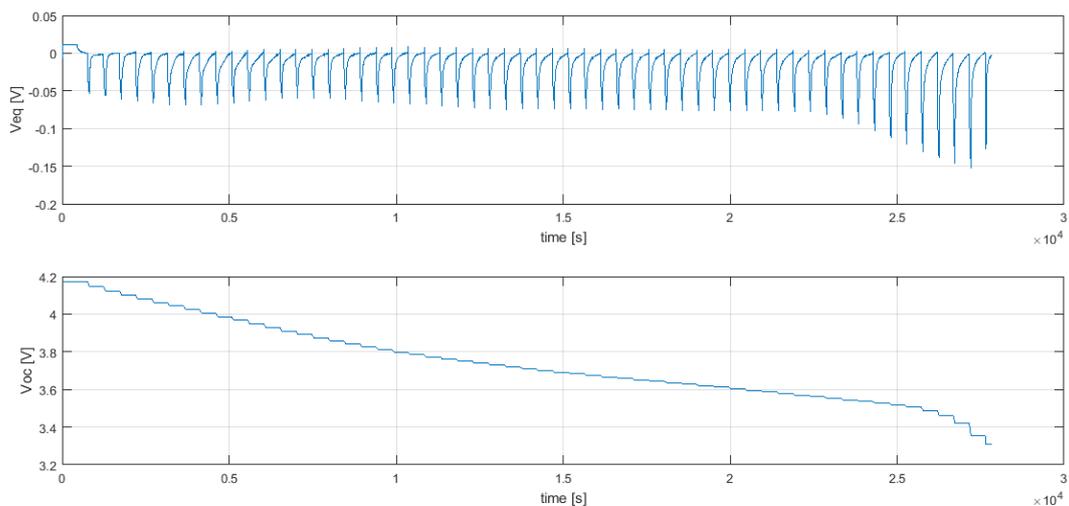


Figura 14 Tensione Equivalente calcolata durante la prova e stato di carica

Per calcolare le resistenze e le capacità dei circuiti RC si considerano i tratti esponenziali della v_{eq} in corrispondenza dei gradini di corrente di scarica.

Per il tratto di scarica si va a minimizzare la differenza tra i punti dell'andamento reale e quelli dell'esponenziale generico (Equazione 6)².

Equazione 6

$$f(t) = A_0 + A_1 e^{-t/\tau_1} + A_2 e^{-t/\tau_2}$$

Dalla minimizzazione con il metodo dei minimi quadrati si ottengono le due costanti di tempo, e sapendo l'ampiezza del gradino di corrente I_{batt} si calcolano R_1 (Equazione 7), R_2 (Equazione 8), C_1 (Equazione 9) e C_2 (Equazione 10).

Equazione 7

$$R_1 = \frac{A_1}{(1 - e^{-T/\tau_1})I_{batt}}$$

Equazione 8

$$R_2 = \frac{A_2}{(1 - e^{-T/\tau_2})I_{batt}}$$

Dove T è la durata del gradino di corrente.

Equazione 9

$$C_1 = \frac{\tau_1}{R_1}$$

Equazione 10

$$C_2 = \frac{\tau_2}{R_2}$$

² Equazione 6, Equazione 7, Equazione 8, Equazione 9 e Equazione 10 da Jean Ernst Bester, Ahmed El Hajjaji, Augustin Mpanda Mabwe, "Modelling of Lithium-ion Battery and SOC Estimation using Simple and Extended Discrete Kalman Filters for Aircraft Energy Management" IEEE 2015

Prova di scarica-carica

Come nel caso della prova di carica i dati ottenuti dalle prove svolte sulla batteria sono stati successivamente analizzati tramite l'ausilio di Matlab per identificare i parametri del circuito equivalente e della caratteristica di tensione a circuito aperto in funzione dello stato di carica.

Riportiamo in Tabella 6 i parametri del modello ottenuti dalla prova di scarica/carica come descritta in 1.4.3 Svolgimento della Prova di scarica-carica.

Tabella 6

Resistenza Serie R_0 (media)	6.8915 m Ω
Capacità effettiva	11.70 Ah
Resistenza R_1 (fase di scarica)	0.62081 m Ω
Capacità C_1 (fase di scarica)	4896.55 F
Costante di tempo R_1C_1 (fase di scarica)	3.0398 s
Resistenza R_2 (fase di scarica)	0.00369 m Ω
Capacità C_2 (fase di scarica)	6535.80 F
Costante di tempo R_2C_2 (fase di scarica)	24.1648 s
Costante di tempo R_1C_1 (zona di rilassamento durante la fase di scarica)	20.0600 s
Costante di tempo R_2C_2 (zona di rilassamento durante la fase di scarica)	156.4947 s
Resistenza R_1 (fase di carica)	0.42641 m Ω
Capacità C_1 (fase di carica)	1532.05 F
Costante di tempo R_1C_1 (fase di carica)	0.6532 s
Resistenza R_2 (fase di carica)	0.00342 m Ω
Capacità C_2 (fase di carica)	5902.88 F
Costante di tempo R_2C_2 (fase di carica)	20.2318 s
Costante di tempo R_1C_1 (zona di rilassamento durante la fase di carica)	19.4639 s
Costante di tempo R_2C_2 (zona di rilassamento durante la fase di carica)	126.7554 s
Resistenza R_1 (valore utilizzato per il modello)	0.52361 m Ω
Capacità C_1 (valore utilizzato per il modello)	3214.30 F
Resistenza R_2 (valore utilizzato per il modello)	3.56237 m Ω
Capacità C_2 (valore utilizzato per il modello)	6219.34 F
Resistenza R_1 (zona rilassamento, valore utilizzato per il modello)	8.595 m Ω
Resistenza R_2 (zona rilassamento, valore utilizzato per il modello)	25.227 m Ω

Poiché la prova è stata fatta per un range carica maggiore della precedente abbiamo notato come la capacità ottenuta sia maggiore di quella nominale caso imputabile alla bassa temperatura a cui è stata svolta la prova rispetto alla normale temperatura di esercizio.

In Figura 15 vediamo l'andamento della tensione (curva blu), e l'andamento dello stato di carica percentuale (in rosso).

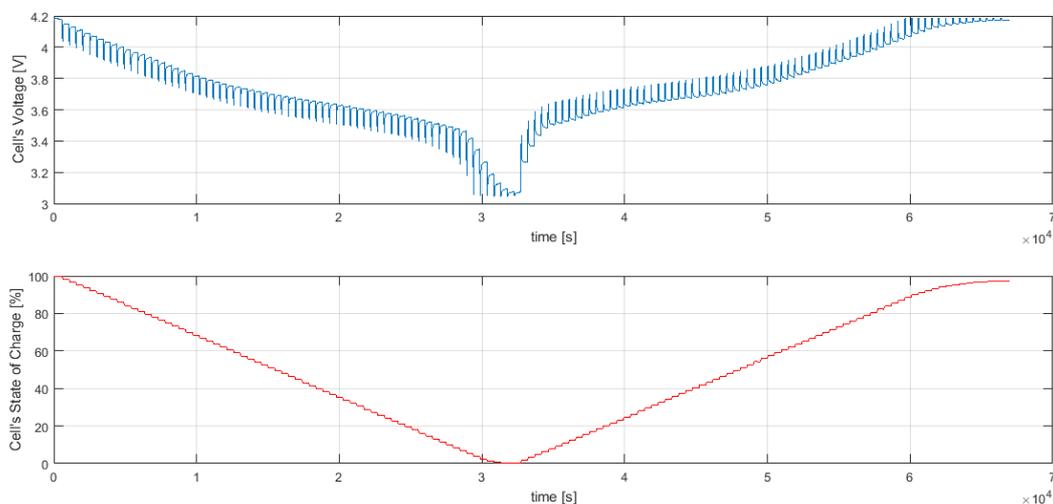


Figura 15 Andamento della tensione e dello stato di carica durante la prova

In Figura 16 vediamo invece la caratteristica tensione di circuito aperto rispetto allo stato di carica. In blu sono rappresentati i punti ottenuti dalla prova, mentre la curva in rosso è l'interpolazione polinomiale di ordine 11. Vediamo come i punti non sono sulla curva interpolata, questo perché si è scelto un tempo di riposo eccessivamente basso.

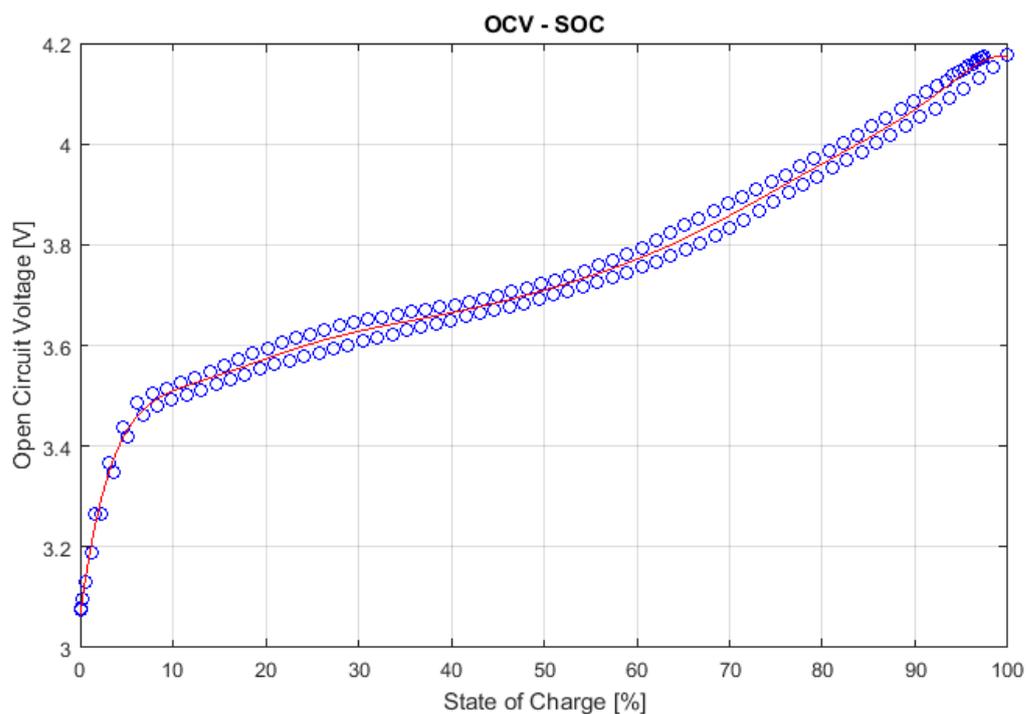


Figura 16 Tensione di Circuito Aperto (OCV) in funzione dello stato di carica

In Figura 17 vediamo la resistenza serie misurata in funzione dello stato di carica

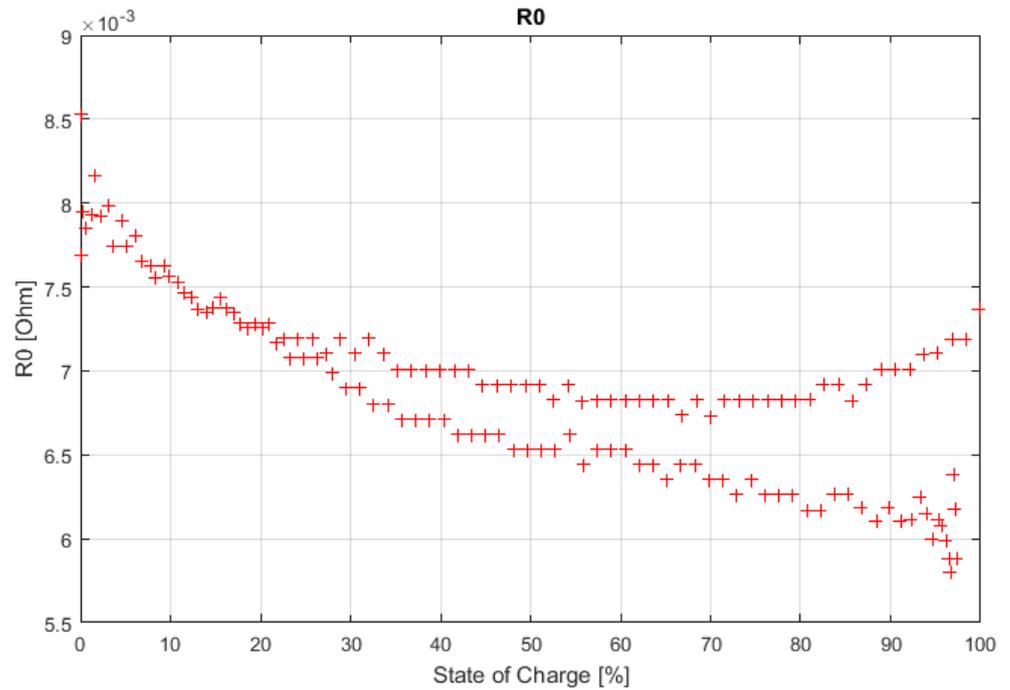


Figura 17 Andamento della resistenza serie misurata in funzione dello stato di carica

Si vede come la resistenza vari molto rispetto allo stato di carica. E' stato utilizzato il valore medio pari a 6.8915 mΩ.

In Figura 18 vediamo l'andamento della tensione ai capi dei due circuiti RC. Vediamo come questa tensione equivalente sia distanziata dallo zero ciò è dovuto al fatto dei i punti misurati in carica e scarica a circuito aperto non stanno sulla caratteristica OCV-SOC interpolata.

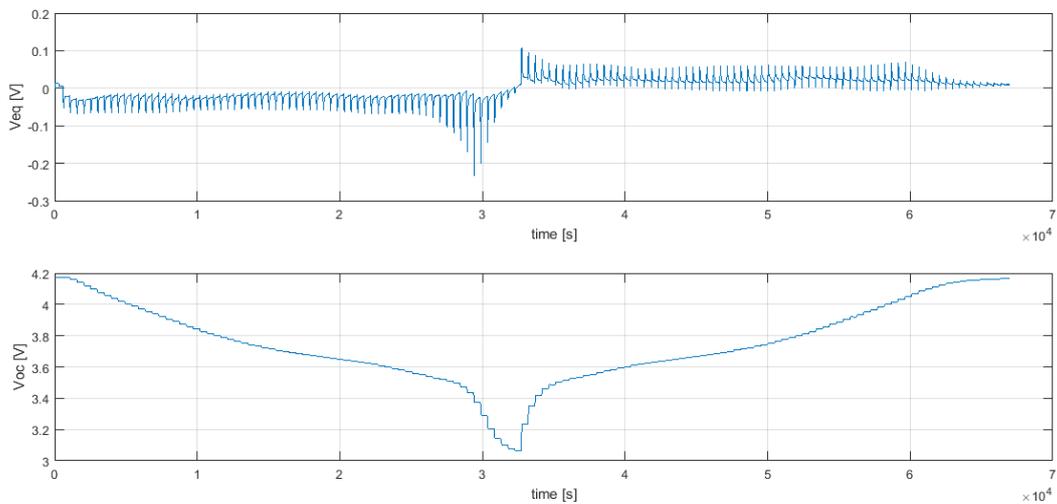


Figura 18 Tensione Equivalente calcolata durante la prova e stato di carica

1.4.5. Simulazione del modello e confronto con la prova reale

Per la validazione dei parametri si è costruito il modello in Simulink, si quindi fatta una simulazione con in ingresso la corrente della prova e lo stato di carica iniziale oltre ai parametri ricavati, si è quindi confrontata la tensione ai capi della cella ottenuta dalla simulazione con quella reale.

In Figura 19 vediamo lo schema del modello realizzato in Simulink della cella analizzata.

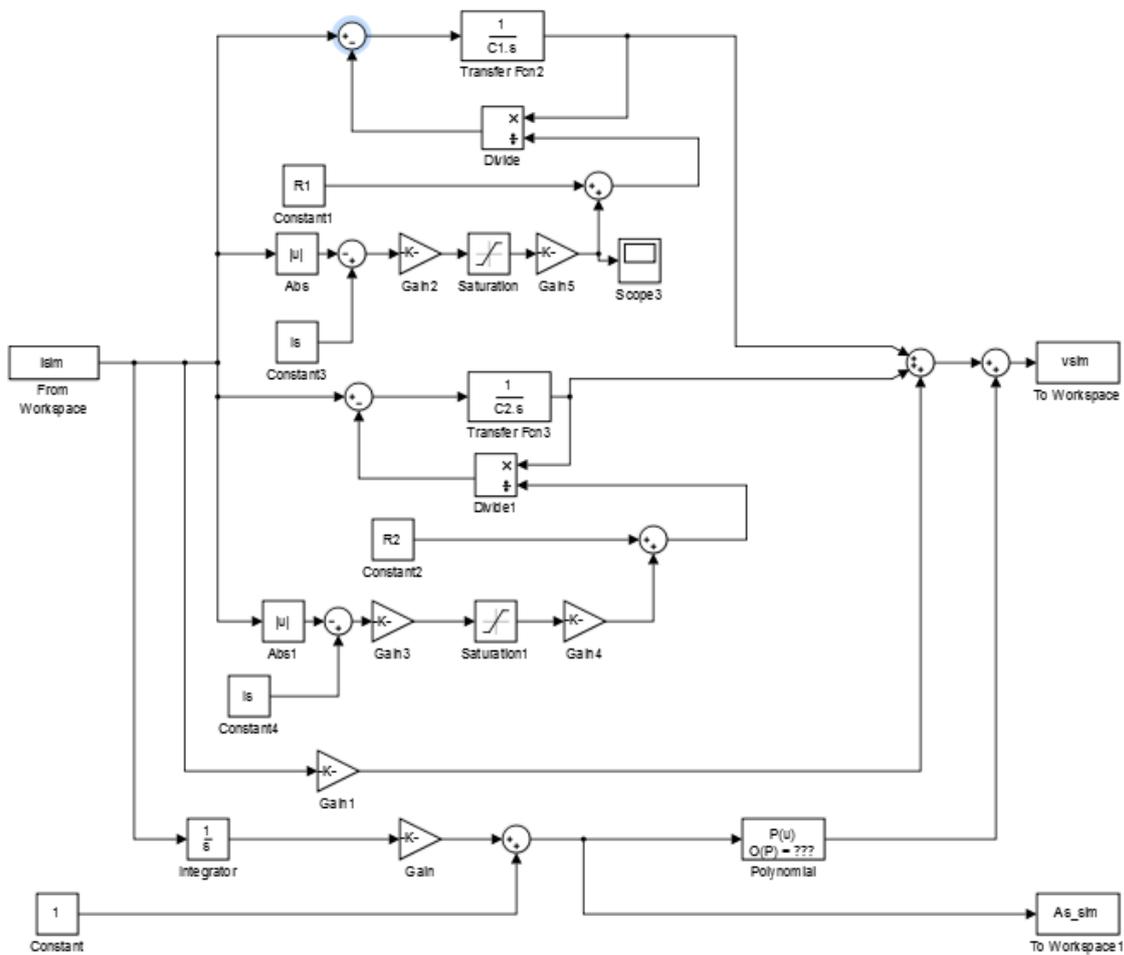


Figura 19 Modello della Cella in Simulink

Come si vede in Figura 19 si è deciso di imputare la variazione della costante di tempo nella zona di rilassamento (condizione con corrente nulla) alla sola resistenza.

Prova di Scarica

Possiamo vedere in Figura 20 in rosso la curva ottenuta dalla simulazione e confrontarla con la tensione reale rappresentata dalla curva blu. Si vede come il modello approssimi bene il comportamento reale della cella.

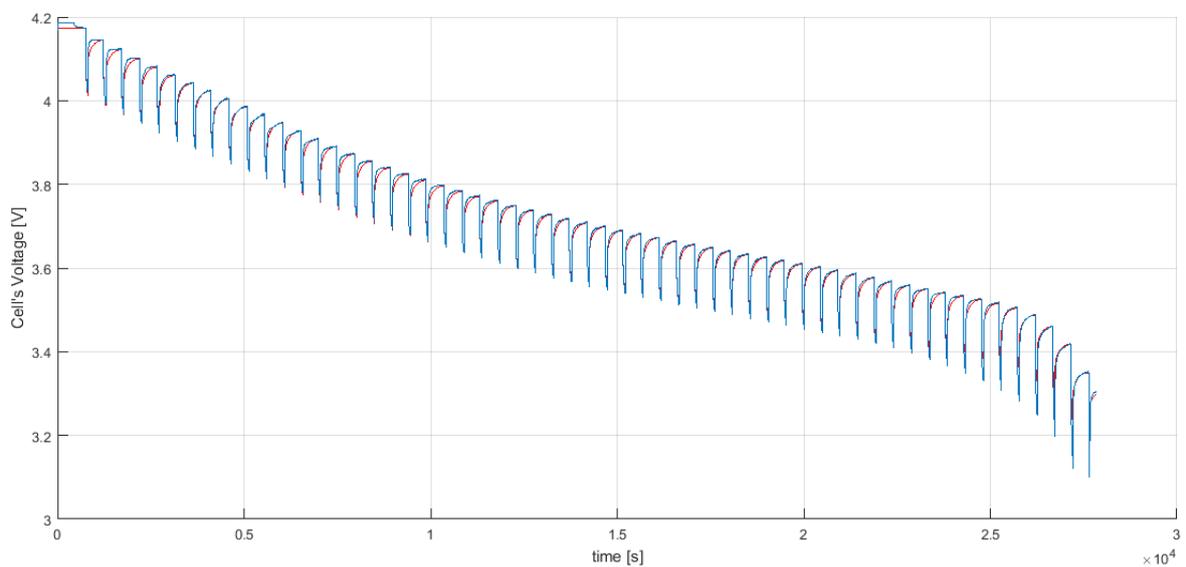


Figura 20 Confronto tra la tensione misura durante la prova e il valore ottenuto dalla simulazione del modello della cella

Prova di Scarica - Carica

In Figura 21 vediamo che approssimativamente la curva rossa ottenuta tramite la simulazione si sovrappone alla curva blu rappresentante la tensione effettivamente misurata durante la prova della cella, la differenza è dovuta al fatto che il tempo di riposo necessario perché la tensione si assesti al valore di OCV (tensione a circuito aperto) è stato insufficiente, e quindi i punti della caratteristica di carica e di scarica sono distanziati tra loro portando ad un offset, che dipende dal verso della corrente, della curva ottenuta tramite modello e quella reale ottenuta durante la prova.

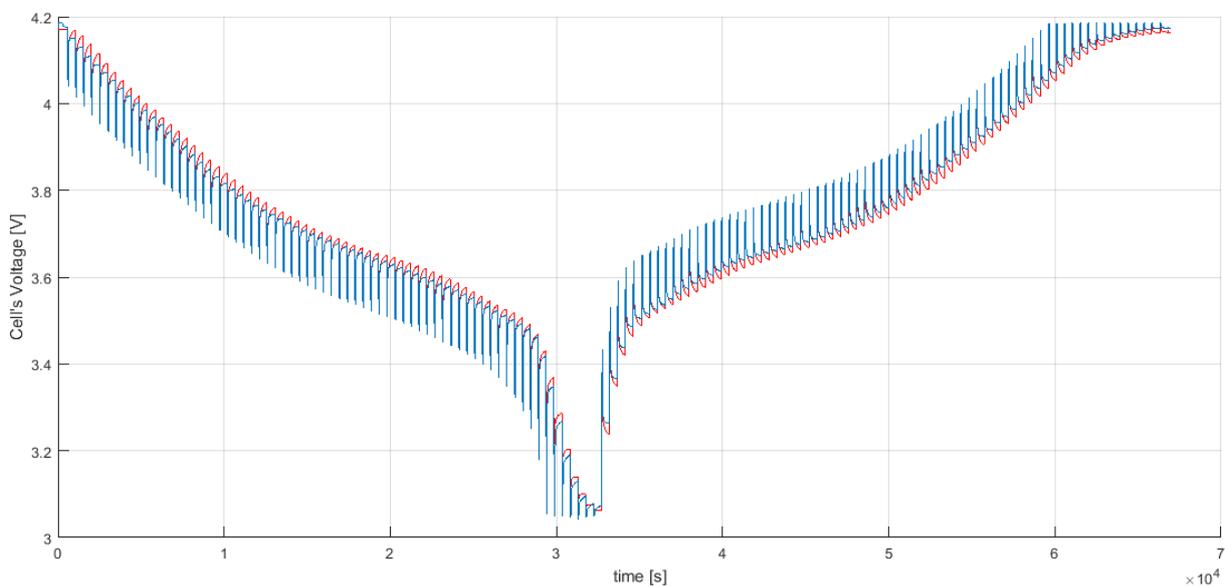


Figura 21 Confronto tra la tensione misurata durante la prova e il valore ottenuto dalla simulazione del modello della cella

Bibliografica

- (1) Habiballah Rahimi-Eichi, Unnati Ojha, Federico Baronti and Mo-Yuen Chow, "Battery Management System", IEEE INDUSTRIAL ELECTRONICS MAGAZINE
- (2) Malgorzata K. Gulbinska, "Lithium-ion Battery Materials and Engineering", Springer
- (3) Jean Ernst Bester, Ahmed El Hajjaji, Augustin Mpanda Mabwe, "Modelling of Lithium-ion Battery and SOC Estimation using Simple and Extended Discrete Kalman Filters for Aircraft Energy Management" IEEE 2015

2. Battery Management System (BMS)

Il Battery Management System (BMS) ha il compito di monitorare le condizioni operative della batteria per garantirne il funzionamento entro determinati limiti di tensione e temperatura, svolge anche il compito di stimare lo stato di carica (SOC State-of-Charge) al duplice scopo di fornire una informazione sulla carica disponibile ai sistemi di carica e all'apparecchio utilizzatore dell'energia immagazzinata e per potere effettuare il balancing, inoltre il BMS esegue la stima dello stato di salute della batterie (SOH State-of-Health) per determinare la vita residua delle celle componenti la batteria.

Vediamo ora in dettaglio le funzioni del BMS.

2.1.Cell Monitoring

Come prerequisito per il funzionamento del BMS è necessario misurare la tensione ai capi di ogni cella, la corrente del pacco batterie e la temperatura.

- **Misura della temperatura**
Per quanto riguarda la temperatura esisto diversi metodi di misura e numero di misure, si può o misurare la temperatura per ogni cella o utilizzare una o due misure di temperatura soprattutto nel caso di sistemi con liquidi di raffreddamento che permettono una distribuzione della temperatura più omogenea tra le celle.
- **Misura di tensione**
La misura di tensione deve avere una elevata accuratezza soprattutto per le celle con tecnologia Li-FePO₄ (visibile in Figura 2) che hanno un andamento molto piatto (nella parte centrale del SOC) della caratteristica di tensione in funzione dello stato di carica (SOC), per queste tecnologie è necessaria una accuratezza di 1-2 mV.
- **Misura di corrente**
La misura di corrente soprattutto se usata nella stima dello stato di carica con stimatori come l'integrale di Coulomb deve essere effettuata con precisione adeguata, un normale target è una precisione del 0.5-1%.

2.2. Protezioni

Le protezioni hanno lo scopo di garantire il funzionamento delle batterie in un dato range di temperatura e tensione. Le azioni intraprese consistono nell'apertura degli interruttori per impedire il funzionamento in zone pericolose per le batterie.

- Protezione di overvoltage (o overcharge)
Si attiva quando una qualsiasi delle celle componenti il pacco batteria supera la tensione massima ammissibile, la protezione impedisce la carica ulteriore del pacco batterie.
- Protezione di overdischarge
Si attiva quando una cella raggiunge uno stato di carica inferiore a una data soglia, la protezione impedisce di continuare la scarica.
- Protezione dal cortocircuito
Si attiva nel caso di elevate correnti aprendo gli interruttori di potenza.

2.3. Stima del SOC

La stima dello stato di carica (SOC) è essenziale per le protezioni di overdischarge e nelle operazioni di balancing. Esistono diversi metodi per la stima del SOC, il metodo più semplice è l'integrale di coulomb o coulomb counting, metodi più complessi prevedono osservatori basati sui filtri di Kalman riferiti al modello di Thévenin più o meno complesso della cella e con integrazione di metodi adattativi o meno.

- Integrale di Coulomb
L'integrale è espresso nella forma continua:

$$SOC(t) = SOC_0 + \frac{1}{Q_n} \int \eta_i i(t) dt$$

Per i controlli digitali si utilizza la forma discretizzata nel tempo:

$$SOC_k = SOC_{k-1} + \frac{\eta_i i_{k-1} \Delta t}{Q_n}$$

- Q_n quantità di carica nominale della cella
- η_i rendimento di Coulomb della cella, viene usato il valore uno per la fase di scarica mentre per quella di carica si usa un valore minore di 1, questo viene calcolato tramite prove sottoponendo la cella a un ciclo di carica-scarica tra due definiti livelli di tensione, il rendimento viene calcolato come quel valore tale che la variazione dello SOC calcolato in carica e scarica siano uguali.
- La corrente i è scelta positiva per la corrente di carica

L'integrale di Coulomb necessita del valore iniziale dello stato di carica e di elevata precisione della misura di corrente per evitare il divergere dell'integrale e quindi una scorretta valutazione del SOC.

Metodi basati sul filtro di Kalman permettono di risolvere il problema della dipendenza della stima dell'integrale di Coulomb dalla precisione della misura di corrente e dal valore iniziale del SOC.

- Combinazione dell'integrale di Coulomb e Modello Dinamico della batteria³

Il modello circuitale (rappresentato in Figura 22) utilizzato comprende un generatore di tensione che rappresenta la caratteristica OCV-SOC (Open Circuite Voltage- State of Charge) una resistenza serie e una rete RC per modellizzare i fenomeni dinamici.

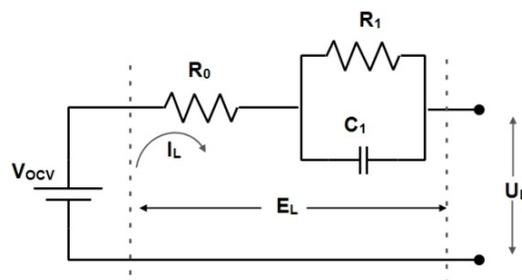


Figura 22

La rappresentazione a blocchi dello stimatore è visibile in Figura 23.

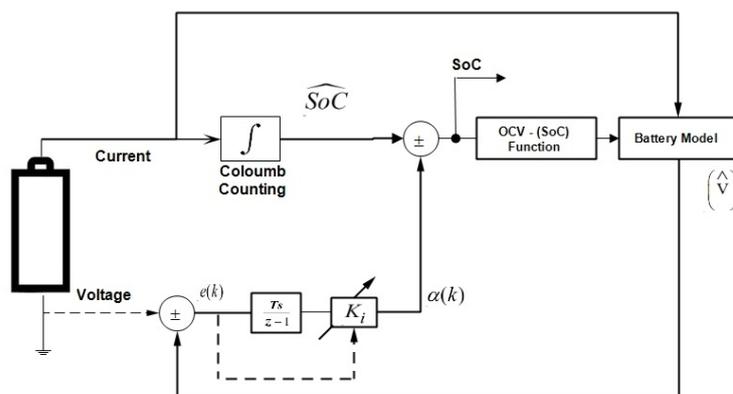


Figura 23

Il modello della batteria in base alla tensione stimata ottenuta dalla combinazione dello stato di carica stimato con la caratteristica OCV-SOC e alla corrente di ingresso genera la tensione stimata ai terminali della cella questa tensione stimata viene confrontata con la tensione reale e tramite un guadagno va a correggere la stima del SOC.

I parametri del modello del circuito equivalente della cella vengono stimati da un prova sperimentale di scarica con corrente rettangolare pari al valore di scarica voluta che si alterna a intervalli di tempo di riposo (corrente nulla) necessari per la misura della caratteristica OCV-SOC.

³ Asep Nugroho, Estiko Rijanto, F.Danang Wijaya, Prpto Nugroho "Battery State of Charge Estimation by Using a Combination of Coulomb and Dynamic Model With Adjusted Gain" 2015 Industrial Conference on Sustainable Energy Engineergin and Application (ICSEEA)

2.4.Stima del SOH

Un metodo facile per la definizione del SOH consiste nel paragonare la capacità attuale della batteria a quella nominale:

$$SOH = \frac{Q_{attuale}}{Q_n} \times 100$$

In genere si definisce un livello inferiore del SOH che quando raggiunto definisce la fine della vita utile della batterie (valori tipici sono 80%).

Altre stime del Stato di Salute delle batterie si basano sulla variazione della resistenza interna della cella.

2.5.Cell Balancing

Il cell balancing è una operazione atta a rendere uguale lo stato di carica per tutte le celle, il balancing in base alla tipologia può essere effettuato solo durante la carica (balancing passivo), oppure sia durante la carica che la scarica (balancing attivo).

- **Balancing passivo**

E' il più semplice, meno costoso e più compatto da implementare. Necessità infatti di un interruttori di potenza per cella che permette di chiudere la stessa su una resistenza che dissipa la corrente di carica. Deve essere correttamente dimensionato per rimuovere la corrente voluta e bisogna prevedere una adeguato raffreddamento per rimuove l'energia termica generata. Risulta essere lo standard in ambito industriale e viene molto utilizzato anche in ambito di trazione elettrica (auto ibride). Vediamo un esempio in Figura 24.

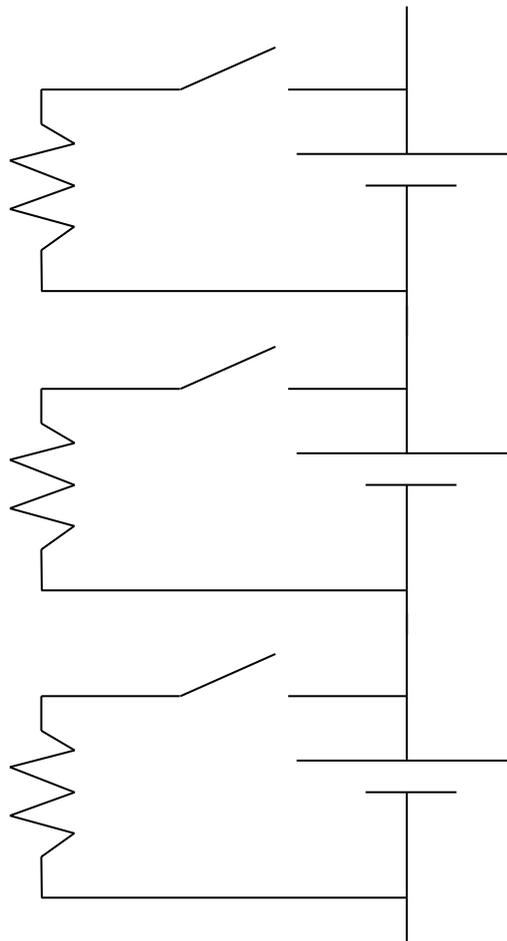


Figura 24

- **Balancing attivo**

Il suo scopo è di evitare la dissipazione tipica del balancing passivo trasferendo energia da una cella all'altra o dal pacco batteria alla singola cella e viceversa. Il balancing attivo potendo traferire energia da una cella all'altra può essere realizzato sia per la fase di carica che quella di scarica. La sua realizzazione è più complicata e costosa del balancing passivo ed esistono molte soluzioni che utilizzano diverse strutture e diversi componenti reattivi (induttori o capacità). Presentiamo nella Tabella 7 un resoconto delle possibili soluzioni tecnologiche.

Tabella 7⁴

Tipologia di Bilanciamento	Tecnica di bilanciamento	Vantaggi	Svantaggi
Passivo	Cell-to-Heat	Semplice	Inefficiente
		Economico	Lento (limitato dalla massima energia dissipabile termicamente nel resistore)
Attivo	Module-to-Cell (trasferimento dalla batteria a una singola cella e viceversa tramite un convertitore dc/dc con isolamento galvanico)	Relativamente semplice	Rete di interruttori di potenza
		Buona efficienza Veloce	Necessità di elevato isolamento di tensione per il convertitore dc/dc
Attivo	Cell-to-Cell		
	Celle-to-cell distributed (trasferimento alla cella adiacente)	Efficienza moderata Velocità moderata	Voluminoso Controllo complesso
	Cell-to-cell shared (trasferimento da una cella ad un serbatoio e poi dal serbatoio ad un'altra cella)	Alta efficienza Veloce	Rete di interruttori di potenza
Attivo	Cell/module bypass (la disconnessione di una cella/modulo dal percorso della corrente del pacco batteria)	Alta efficienza di balancing	Elevate correnti negli interruttori statici
		Molto veloce e flessibile	Complesso da implementare Riduzione dell'efficienza della batteria durante le operazioni

⁴ Dall'articolo (1) Habiballah Rahimi-Eichi, Unnati Ojha, Federico Baronti and Mo-Yuen Chow, "Battery Management System", IEEE INDUSTRIAL ELECTRONICS MAGAZINE

- Balancing attivo con bus comune⁵
(esempio di Cell-to-cell shared)

Ogni cella ha un suo convertitore dc/dc con isolamento galvanico (un convertitore fly-back) che scambiano potenza tramite un bus comune (Figura 25).

Questa struttura permette di immagazzinare l'energia da ogni cella all'induttanza di magnetizzazione dell'elemento induttivo del fly-back mentre successivamente un altro convertitore preleverà l'energia dall'elemento induttivo tramite il bus comune e la trasferirà alla cella più scarica.

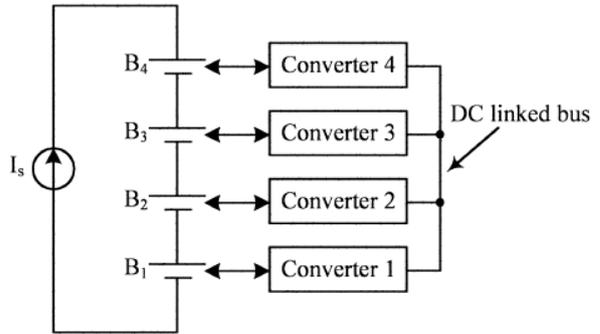


Figura 25

Nella Figura 26 vediamo lo schema del fly back interfacciato tra una cella e il bus comune.

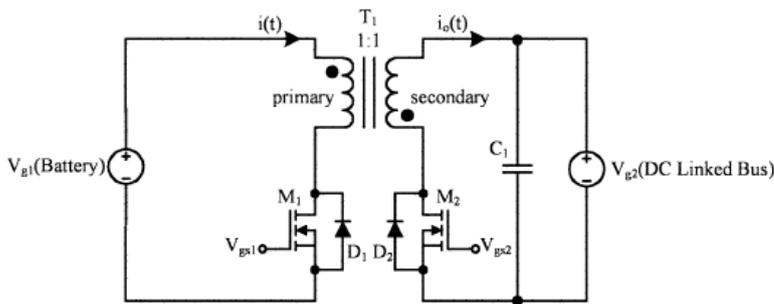


Figura 26

In questa struttura un cella carica l'induttanza di magnetizzazione del trasformatore del fly-back tramite il bus comune un secondo fly-back trasferisce l'energia alla seconda cella.

Una variante utilizza sempre un convertitore per cella ma prevede un convertitore risonante detto LLC descritto nell'articolo di Giovanna Oriti, Alexander L. Julian, Peter Norgaard, "Battery Management System with Cell Equalizer for Multi-Cell Battery Pack"

⁵ Dall'articolo Charnyut Karnjanapiboon, Karmon Jirasereeamornkul, Veerapol Monyakul "High Efficiency Battery Management System for Serially Connected String" IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE 2009)

- Balancing attivo con trasformatore di isolamento tra le singole celle e il pacco batteria⁶ (esempio di Module-to-Cell)

Dalla Figura 27 possiamo vedere la struttura del sistema di balancing, abbiamo un avvolgimento primario collegato ai terminali del pacco batteria e vari secondari, uno per cella, sono presenti interruttori al primario e al secondario, il funzionamento è analogo al fly-back.

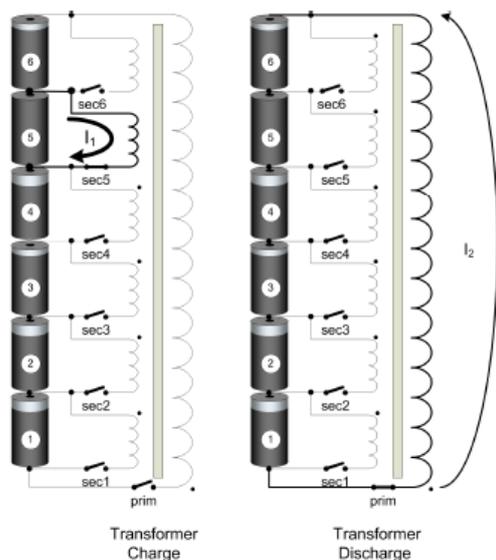


Figura 28

Mentre nella Figura 29 possiamo vedere la sequenza di trasferimento dell'energia dal pacco batteria alla singola cella. Nel caso di trasferimento di energia dal pacco batteria ad una cella, prima viene chiuso l'interruttore al primario trasferendo energia dal pacco batteria all'induttanza di magnetizzazione, viene poi aperto l'interruttore del primario mentre viene chiuso l'interruttore al secondario della cella che si vuole carica, con il trasferimento dell'energia dall'induttanza alla cella.

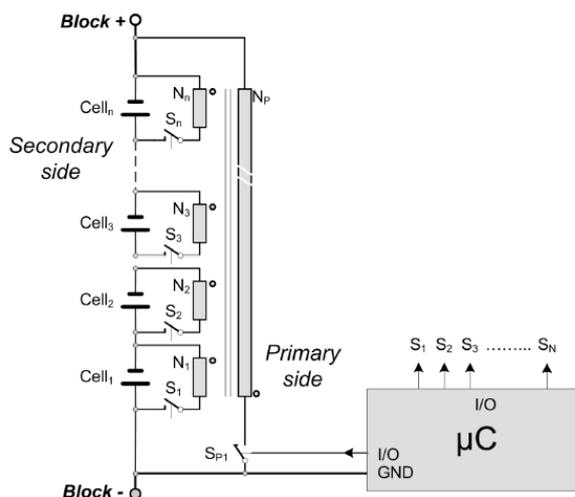


Figura 27

Nella Figura 28 abbiamo rappresentata la sequenza di chiusura degli interruttori statici necessaria al trasferimento di energia da una cella al pacco batteria. Per primo viene chiuso l'interruttore che collega un cella al suo secondario caricando l'induttanza di magnetizzazione, successivamente si apre l'interruttore della cella e si va a chiudere l'interruttore del primario trasferendo l'energia immagazzinata nel pacco batteria.

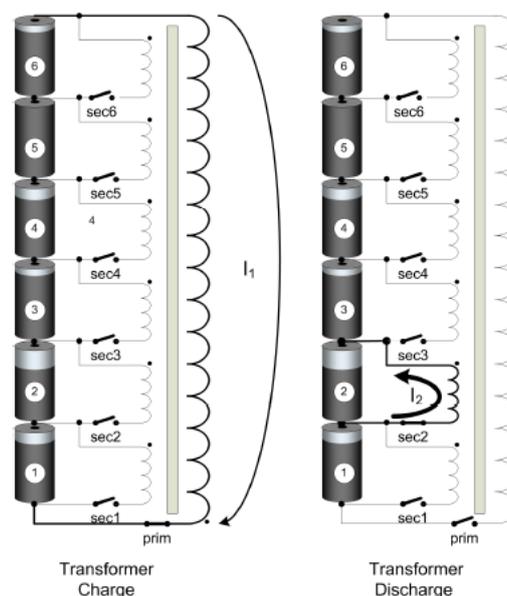


Figura 29

⁶Dall'articolo Carl Bonfiglio, Werner Roessler, "A Cost Optimized Battery Management System with Active Cell Balancing for Lithium Ion Battery Stach" IEEE 2009

- Balancing attivo con bus comune (serbatoio capacitivo)⁷

(esempio di balancing Cell-to-cell shared)

L'energia viene trasferita da una singola cella all'elemento capacitivo per poi essere trasferita ad un'altra cella, il sistema è complesso ogni coppia di interruttori statici connessi ai due estremi della capacità devono sostenere tutta la tensione del pacco batteria, ciò porta a limitare il massimo numero di celle che può utilizzare questo metodo di bilanciamento poiché al crescere della tensione di dimensionamento dell'interruttore statico questo diventa sempre più resistivo e costoso.

Nella Figura 30 vediamo il sistema di bilanciamento del pacco batteria.

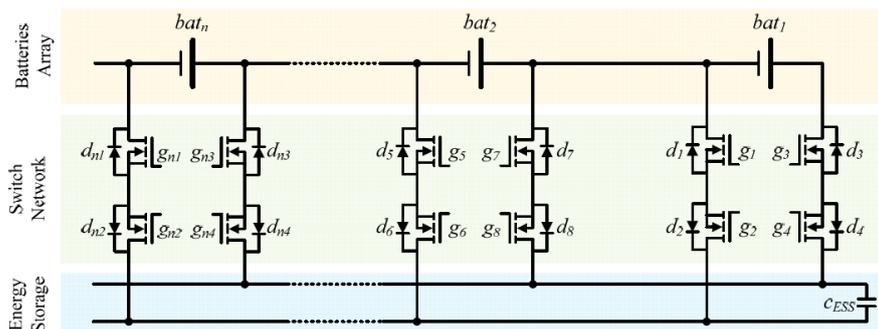


Figura 30

Nella Figura 31 vediamo la sequenza di chiusura degli interruttori statici necessaria a trasferire energia dalla cella 1 alla cella 2.

Un altro problema si ha per la natura capacitiva dell'accumulo di energia, si ha infatti che la corrente dipende dalla differenza di tensione tra le due celle, questo può portare a correnti eccessive nel caso di elevate differenze di tensioni e a tempi eccessivamente lunghi di bilanciamento quando le differenze di tensione sono più contenute.

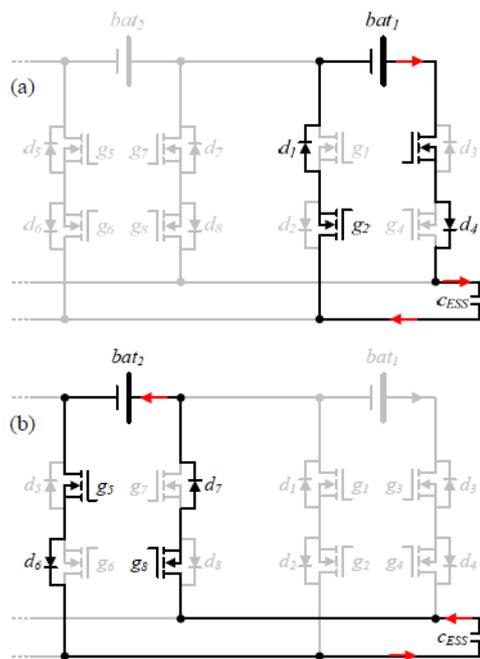


Figura 31

⁷ Dall'articolo di Vitor Monteiro, Pedro Alves, Andrés A. Nogueiras Meléndez, Carlos Couto, João L. Alfonso, "A Novel Modular Voltage Balancing Topology for Active Battery Management System", IEEE 2016

- Balancing attivo con serbatoio (elemento induttivo)⁸

Nella Figura 32 vediamo il sistema rappresentato, sono necessari $(2+2n)$ interruttori statici e diodi (dove n è il numero di celle), da questo si vede subito come il sistema sia costoso, rispetto al caso precedente permette però di regolare la corrente essendo l'elemento di immagazzinamento dell'energia induttivo.

Nella Figura 33 vediamo la fase di scarica della cella.

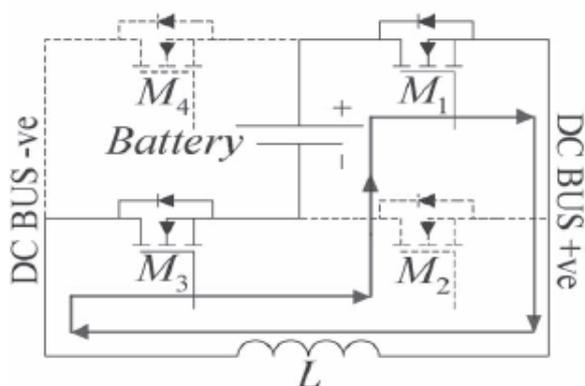


Figura 33

Mentre nella Figura 34 vediamo la fase di carica della cella che trasferisce energia dall'induttore alla batteria.

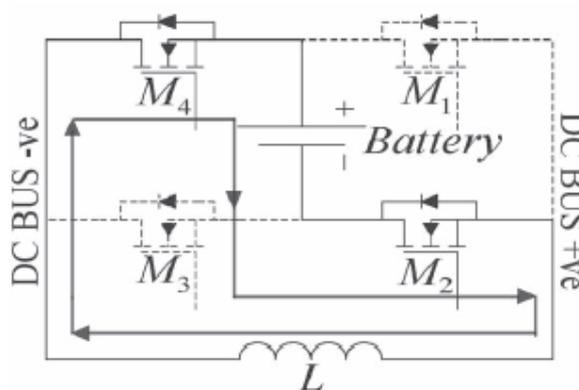


Figura 34

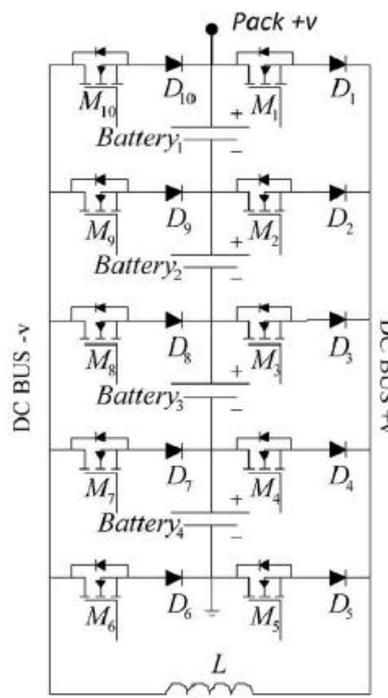


Figura 32

⁸ Sriram Yarlagadda, Tom T. Hartley and Iqbal Husain, "A Battery Management System Using an Active Charge Equalizer Technique Based on a DC/DC Convert Topology", IEEE 2013

2.6. Gestione termica

La temperatura delle celle è importante sia per la sicurezza sia perché l'efficienza delle stesse decresce al di fuori di un dato range di temperatura. La temperatura ha un effetto sia sulla riduzione della capacità che sull'aumento della resistenza interna. La dissipazione del calore generato risulta difficoltosa soprattutto quando si hanno diverse celle compattate in pacchi batteria, in questi casi si deve analizzare la distribuzione della temperatura all'interno del pacco e includere canali che usino aria o fluidi di raffreddamento.

I sistemi di raffreddamento più usati includono aria per la facilità di realizzazione, fluidi dielettrici o acqua (e miscele acqua/glicole)⁹.

In genere per limitare le cadute di pressione ci si mantiene in regione di moto laminare, questo può portare nel caso di raffreddamento in aria a elevati gradienti di temperatura tra la porzione di fluido a contatto con la cella e quella non direttamente a contatto con essa.

- **Raffreddamento ad aria**
E' il più facile da implementazione e da mantenere, i principali difetti risiedono nella bassa capacità termica che porta a variazioni elevate della temperatura dell'aria a contatto con la batteria da raffreddare e al basso coefficiente di conducibilità termica che richiede flussi elevati con elevate perdite di pressione e potenze richieste per la circolazione forzata dell'aria.
- **Raffreddamento a olio**
E' più efficiente nella rimozione del calore per la più elevata capacità termica e per la maggiore conducibilità termica che permette una distribuzione più uniforme della temperatura mentre richiede maggiori costi legati all'esercizio in circuito chiuso. La viscosità più elevata rispetto all'acqua porta ad avere maggiori cadute di pressioni, quindi maggiori potenze richieste per il ricircolo del fluido refrigerante.
- **Raffreddamento ad acqua/glicole**
E' più efficiente per la sua grande capacità termica, maggiore dell'olio e elevato coefficiente di conducibilità termica. La sua elevata capacità termica permette elevate dimensioni dei condotti di raffreddamento senza che si abbiano all'interno del fluido apprezzabili gradienti di temperatura tra il lato a contatto della superficie da raffreddare e il lato più lontano dalla superficie da raffreddare. Inoltre la sua bassa viscosità permette elevate portate senza richiedere elevate potenze per la circolazione del fluido. La necessità di isolamento elettrico porta ad avere una resistenza termica aggiuntiva del rivestimento presente sulla superficie da raffreddare per garantire l'isolamento elettrico. La presenza della resistenza aggiuntiva porta ad avere un trade-off tra la convenienza del raffreddamento in acqua e in olio che dipende dalla portata.

⁹ Gi-Heon Kim, Ahmad A. Pesaran, "Battery Thermal Management Design Modeling"

2.7. Controllo della carica

Il BMS comunica con il dispositivo di carica sia per implementare le protezioni sia per regolare la corrente comunicando informazioni quali il SOC necessario per determinare se operare una carica a tensione costante (nella zona prossima alla carica 100%) o a corrente costante (nella zona lineare della caratteristica tensione-stato di carica) e quando terminare la carica. Inoltre se necessario il BMS interviene nel limitare la corrente massima di carica soprattutto nel caso di apparecchiature di carica generiche.

Bibliografica

- (1) Habiballah Rahimi-Eichi, Unnati Ojha, Federico Baronti and Mo-Yuen Chow, "Battery Management System", IEEE INDUSTRIAL ELECTRONICS MAGAZINE
- (2) Asep Nugroho, Estiko Rijanto, F. Danang Wijaya, Prapto Nugroho "Battery State of Charge Estimation by Using a Combination of Coulomb and Dynamic Model With Adjusted Gain" 2015 Industrial Conference on Sustainable Energy Engineering and Application (ICSEEA)
- (3) Charnyut Karnjanapiboon, Karmon Jirasereeamornkul, Veerapol Monyakul "High Efficiency Battery Management System for Serially Connected String" IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE 2009)
- (4) Giovanna Oriti, Alexander L. Julian, Peter Norgaard, "Battery Management System with Cell Equalizer for Multi-Cell Battery Pack"
- (5) Carl Bonfiglio, Werner Roessler, "A Cost Optimized Battery Management System with Active Cell Balancing for Lithium Ion Battery Stach" IEEE 2009
- (6) Vitor Monteiro, Pedro Alves, Andrés A. Nogueiras Meléndez, Carlos Couto, João L. Alfonso, "A Novel Modular Voltage Balancing Topology for Active Battery Management System", IEEE 2016
- (7) Sriram Yarlagadda, Tom T. Hartley and Iqbal Husain, "A Battery Management System Using an Active Charge Equalizer Technique Based on a DC/DC Convert Topology", IEEE 2013
- (8) Gi-Heon Kim, Ahmad A. Pesaran, "Battery Thermal Management Design Modeling"

3. Progettazione Sistema Batteria

3.1. Sistema Batteria

Il sistema batteria include le celle e tutti i sistemi elettronici di gestione delle batterie e le relative protezioni. Dal punto di vista del sistema esterno a cui il pacco batteria è interfacciato il sistema batteria

(Figura 35) è costituito dai morsetti di potenza da una linea di alimentazione a 12 V per gli ausiliari da una linea di comunicazione CAN da cui recuperare i dati delle celle e da uno sganciatore manuale che interrompe la serie dei moduli interni a meta della stessa.

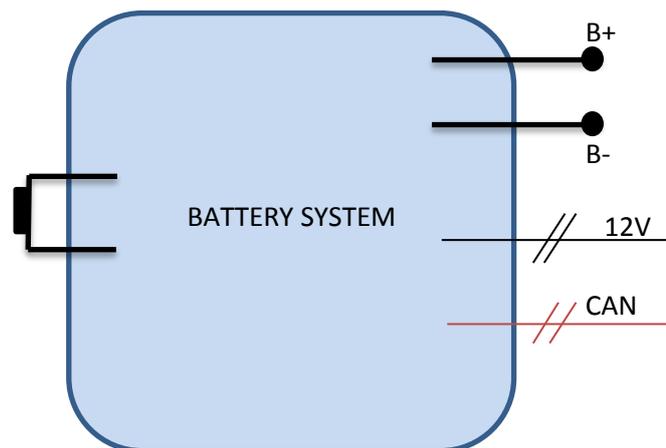


Figura 35

Vediamo ora in Figura 36 in dettaglio la struttura interna dal pacco batteria.

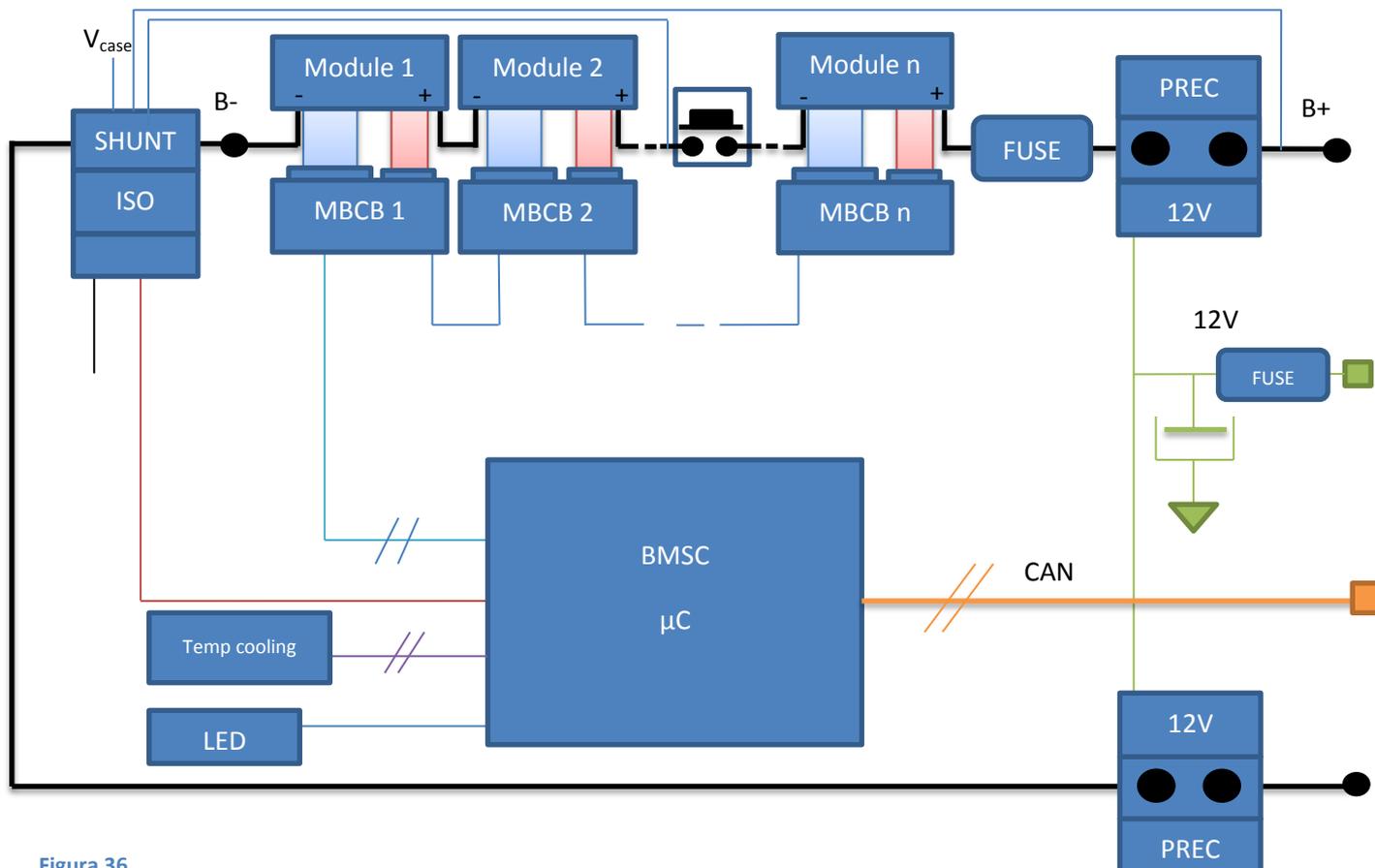


Figura 36

- Cella

In Tabella 8 riportiamo i dati della cella considerata per la costruzione dei moduli.

Tabella 8

KOKAM	SLPB55205130H
Capacità	11 Ah
ESR (Resistenza interna)	1.6 mΩ
Corrente Nominale (1C)	11 A
Tasso di scarica (continuativa)	8C
Tasso di scarica (impulsiva)	10C

Poiché i valori stimati dalla prova di caratterizzazione della cella sono molto diversi da quelli dichiarati, si è deciso di considerare quelli forniti dal produttore essendo questi meno resistivi portano a minore smorzamento e quindi ad una simulazione worst case.

• Moduli

Il modulo (rappresentato in Figura 37) è l'elemento base del pacco batteria, questo è costituito da un insieme di celle, dai sensori di temperatura dal sistema di raffreddamento e dal case che garantisce la protezione meccanica e l'isolamento elettrico. All'interno del modulo le celle sono connesse in serie e sono presenti dei collegamenti che portano il riferimento di tensione di ogni cella verso l'esterno per il duplice scopo di rendere disponibile al misura di tensione al MBCB e come collegamento ai mosfet deputati al balacing attivo posto sulla board del MBCM.

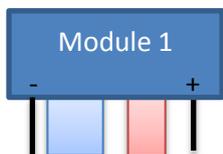


Figura 37

Nella Figura 38 è rappresentata la serie delle n celle interne al modulo con i riferimenti di tensione ($V_0, V_1, \dots, V_{n-1}, V_n$) che tramite il connettore dei riferimenti di tensione raggiunge la board MBCB.

E' interfacciato verso l'esterno tramite due connettori di potenza (+ e - della serie di celle), dal connettore che trasferisce i riferimenti di tensione delle singole celle al MBCB (segnati nella Figura 37 in azzurro) e dal connettore che trasferisce i segnali dei sensori di temperatura posti a contatto con le singole celle al MBCB (segnati in Figura 37 in rosa).

Per la presenti tesi si è scelto di realizzare un modulo che contiene 12 celle (Tabella 9).

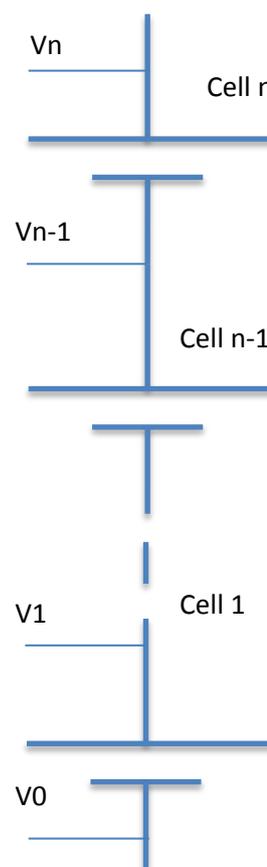


Figura 38

Tabella 9

Numero di celle nel Modulo	Tensione Nominale	Tensione Massima
12	43.4 V	50.4 V

• **MBCB – Monitoring Balancing Control Board**

E' il componente (Figura 39) demandato ad eseguire la misura di tensione delle celle (connettore azzurro) e dei segnali dei sensori di temperatura interni al modulo (connettore rosa). Il MBCB ha diversi compiti:

- Protezione overcharge
- Protezione undervoltage
- Balancing passivo
- Comunicazione dello stato di carica e delle tensioni e temperature al microcontrollore BMSC demandato alla gestione globale del pacco batteria.

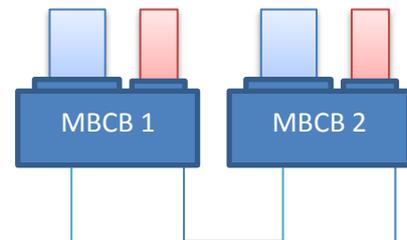


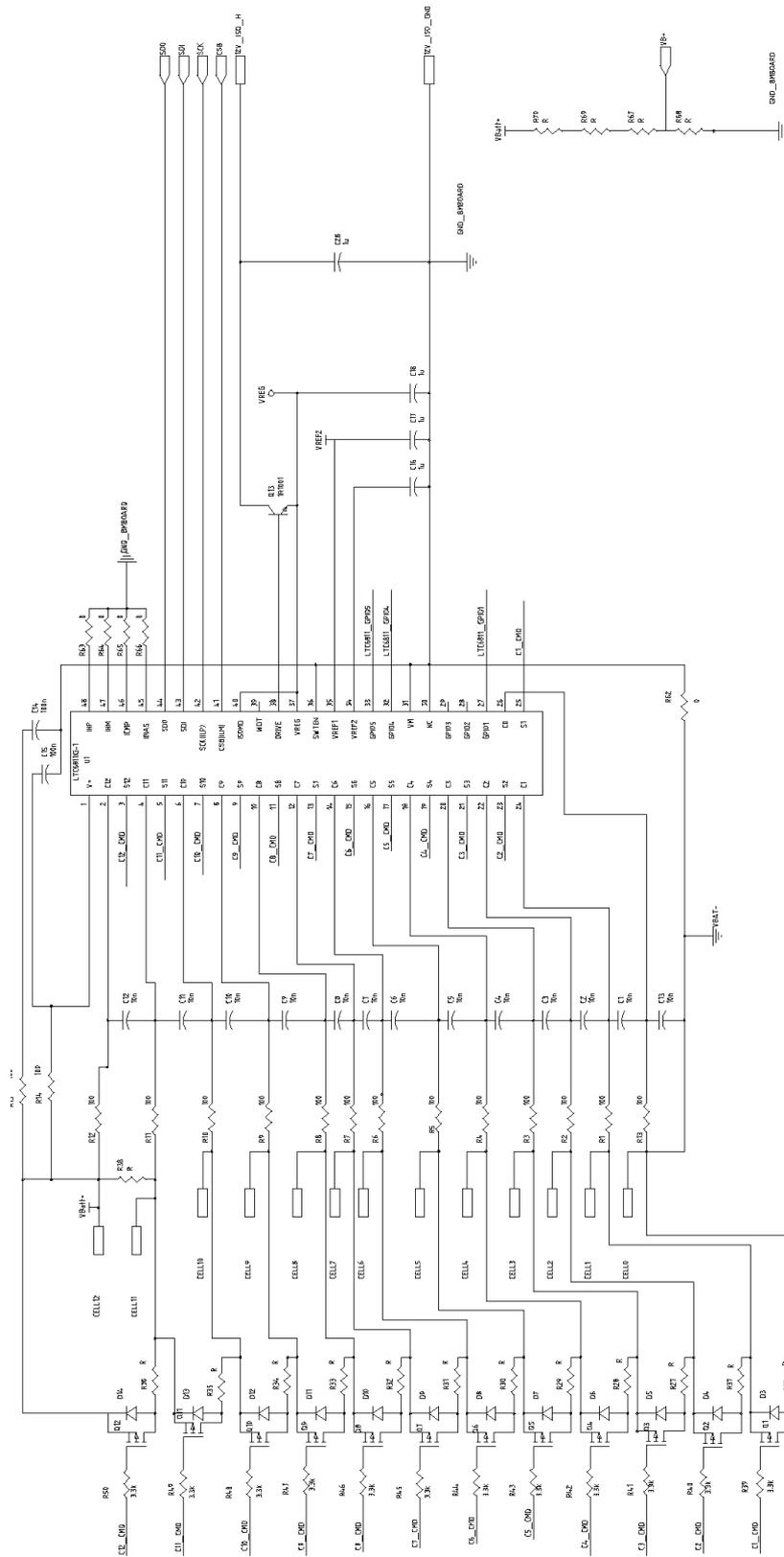
Figura 39

Il componente scelto per il monitoring e per il balancing passivo delle celle è il LTC6811 della Linear Technology. Si è deciso di realizzare un circuito stampato di tipo flessibile che permetta di tramite una diversa disposizione di resistenze e ponticelli di monitorare e configurare moduli con un numero variabile di celle (da 5 a 12 celle).

Il componente LTC6811 viene interfacciato ad due componenti LTC1380 per potere utilizzare previa amplificazione il GPIO1 come ingresso per la misura di 16 segnali di temperatura poiché i due componenti LTC1380 vengono comandati dal LTC6811 tramite due GPIO (GPIO4 e GPIO5) con un protocollo di comunicazione I²C per multiplexare il segnale selezionando uno per volta i segnali di temperatura di campionare, questo è possibile poiché le temperatura hanno una dinamica molto più lenta dei segnali elettrici e quindi è possibile campionare tutti i segnali con un solo ingresso.

Il circuito integrato LTC6811 comunicano direttamente ad un microcontrollore tramite il protocollo SPI, il microcontrollore della MBCB comunica tramite il protocollo CAN ad un microcontrollore (nel nostro caso il BMSC) con cui il MBCB scambia informazioni sulla tensione delle celle e sulle misure di temperature all'interno del modulo.

In Figura 40 vediamo la configurazione del chip LTC6811 nella configurazione usate per connettersi a 12 celle.



- **BMSC – Battery Management System Control**

E' il componente che gestisce la batteria nel suo complesso e la relazione di questo con l'esterno, come la gestione della carica e della scarica, l'esclusione dei moduli (solo per gli intelligent module si veda il capitolo 4 Intelligent Module) e la comunicazione dello stato di carica verso le apparecchiature esterne tramite in protocollo di comunicazione CAN.

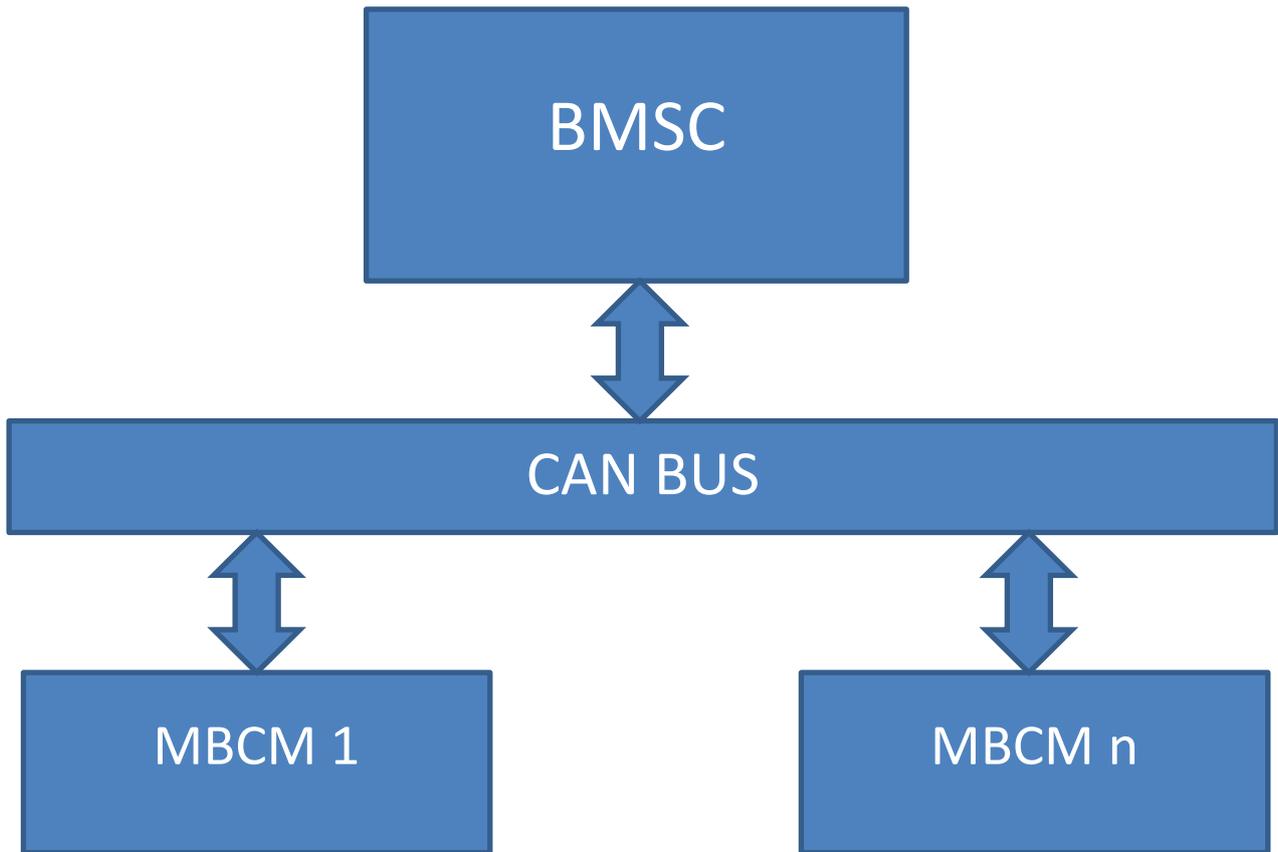


Figura 41

• **Shunt**

Lo shunt (visibile in Figura 42) è il componente demandato alla misurazione della corrente della serie dei moduli. Il componente scelto di cui riportiamo le caratteristiche in Tabella 10, permette di effettuare in aggiunta alla misura di corrente tre misure di tensione rispetto al potenziale dello shunt, si è deciso di effettuare misure nei seguenti punti:

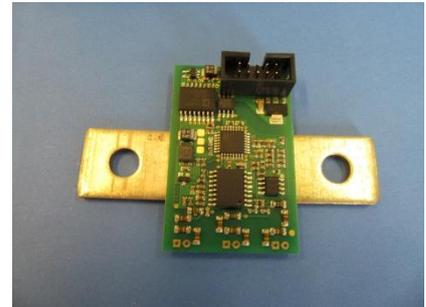


Figura 42

- Potenziale positivo della stringa di moduli (B+)
- Potenziale intermedio (in corrispondenza dello sganciatore manuale)
- Potenziale del Case

Lo shunt è provvisto di un sistema di isolamento per poter trasferire i riferimenti di corrente e tensione misurati in sicurezza. Il trasferimento delle misure avviene tramite il protocollo di comunicazione CAN al BMSC.

In Tabella 10 le caratteristiche dello shunt scelto IVT-MODULAR CAN della ISABELLEHÜNT.

Tabella 10

Range misura di corrente	±300 A
Tensione di alimentazione	12 V
Range di misura di tensione (3 canali)	±600 V

• **Teleruttore**

Il teleruttore ha il compito di collegare il sistema batteria al sistema esterno e di interrompere il circuito quando necessario. Al teleruttore è affiancato un circuito di prearica che consiste nel mettere inizialmente in serie al teleruttore una resistenza atta a limitare l'elevata corrente iniziale dovuta all'inserzione dei condensatori presenti nel sistema batteria, una volta che le capacità raggiungono il regime la resistenza viene disinserita. Questo è alimentato tramite una linea a 12 volt. In Tabella 11 elenchiamo le caratteristiche del teleruttore scelto Kilovac EV250-1A.

Tabella 11

Kilovac EV250-1A	
Tensione Nominale	320 Vdc
Corrente Nominale	400 A
Corrente Interrompibile	2500 A
Tensione di alimentazione	12 Vdc

- **Fusibile**

Sono presenti due fusibili una per la sicurezza del pacco batterie (della serie dei moduli) di tipo non ripristinabile e uno per la sicurezza dell'alimentazione degli ausiliari (12V).

- **CAN**

Protocollo di comunicazione tra i moduli e con l'intelligenza centrale.

- **Alimentazione Ausiliari (12 V)**

L'alimentazione a 12 Volt è necessaria per il funzionamento dei teleruttori, questi richiedono correnti elevate durante la fase di chiusura e apertura per questo viene associata una capacità elevata per garantire le elevate correnti istantanee. Inoltre verrà utilizzata per l'alimentazione dei driver e della logica per il comando degli interruttori statici nel modulo intelligente.

4. Intelligent Module

L'intelligent Module è una variante del modulo (insieme di celle) che comprende una gamba di inverter questa ha il compito di escludere o includere il modulo nella serie del pacco batteria in funzione dello stato di carica e permettere l'hot swat, cioè la rimozione e sostituzione a caldo del modulo.

In Figura 43 vediamo un esempio delle connessioni tra i vari intelligent module. Lo stato degli interruttori statici permette di includere o escludere un dato modulo dalla serie.

Se l'interruttore statico Up è in conduzione (quello Down in interdizione) si ha che il modulo a cui appartiene l'interruttore statico è in serie al pacco batteria. Mentre se l'interruttore statico Down è in conduzione (mentre l'interruttore statico Up è in interdizione) ho che il modulo è escluso dalla serie. Per evitare cortocircuiti di gamba in due interruttori statici non possono essere entrambi in ON.

Mentre scegliendo di avere entrambi gli interruttori in OFF posso interrompere la corrente di scarica. Per potere interrompere correnti in sicurezza si può andare ad aprire tutti gli interruttori statici di tutti i moduli, questo permette di evitare la necessità del teleruttore. E' comunque necessario prevedere un

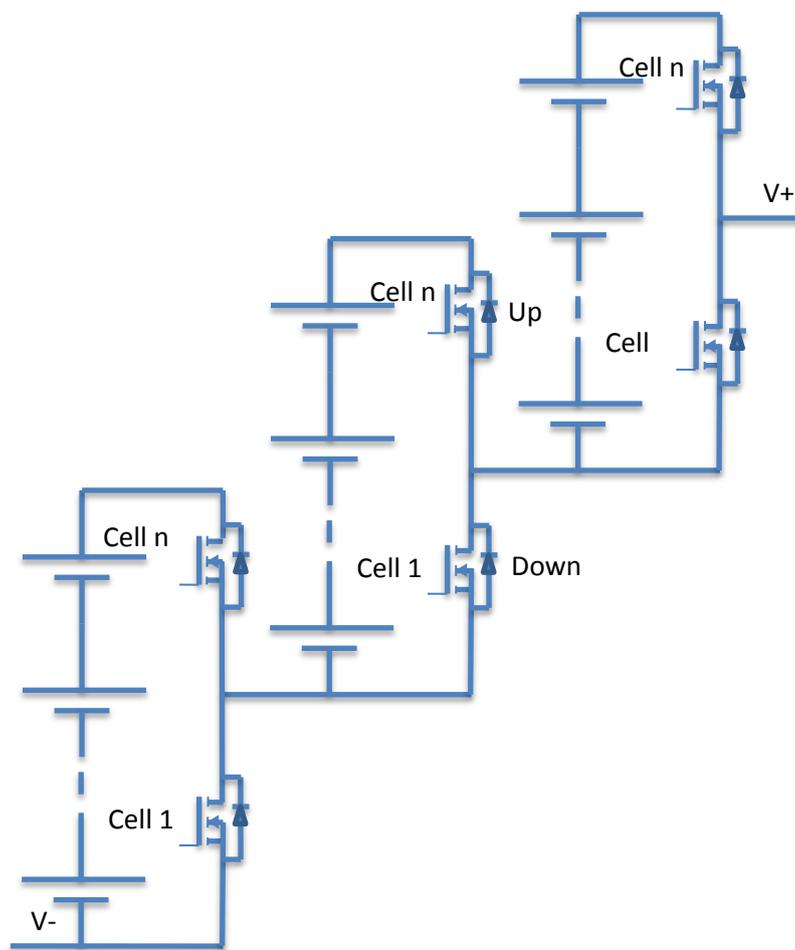


Figura 43

interruttore in grado di interrompere le correnti anomale in fase di carica o prevedere l'esistenza di un fusibile che intervenga solo in caso di corrente di carica eccessive (possibile caso ad esempio se si è collegati ad un motore deflussabile con guasto dell'inverter che porta in funzionamento i diodi dell'inverter stesso con elevate sovratensioni e correnti).

Il modulo intelligente risulta conveniente fino a che la resistenza del mosfet è inferiore a una data percentuale della somma della resistenza interne delle celle (ESR) del modulo.

In Figura 44 vediamo lo schema di un modulo intelligente. Nella presente tesi consideriamo un modulo intelligente ottenuto interponendo una scheda di potenza tra il modulo contenente le celle e il MBCB. La Leg-Board contiene i due interruttori statici che permettono di inserire e disinserire il modulo dalla serie e il relativo driver di gamba (che comanda entrambi gli switch), la presenza degli interruttori statici permette inoltre di effettuare l'apertura del circuito senza il bisogno del teleruttore, anche se bisogna prevedere un interruttore o un fusibile per interrompere una corrente di guasto in fase di carica.

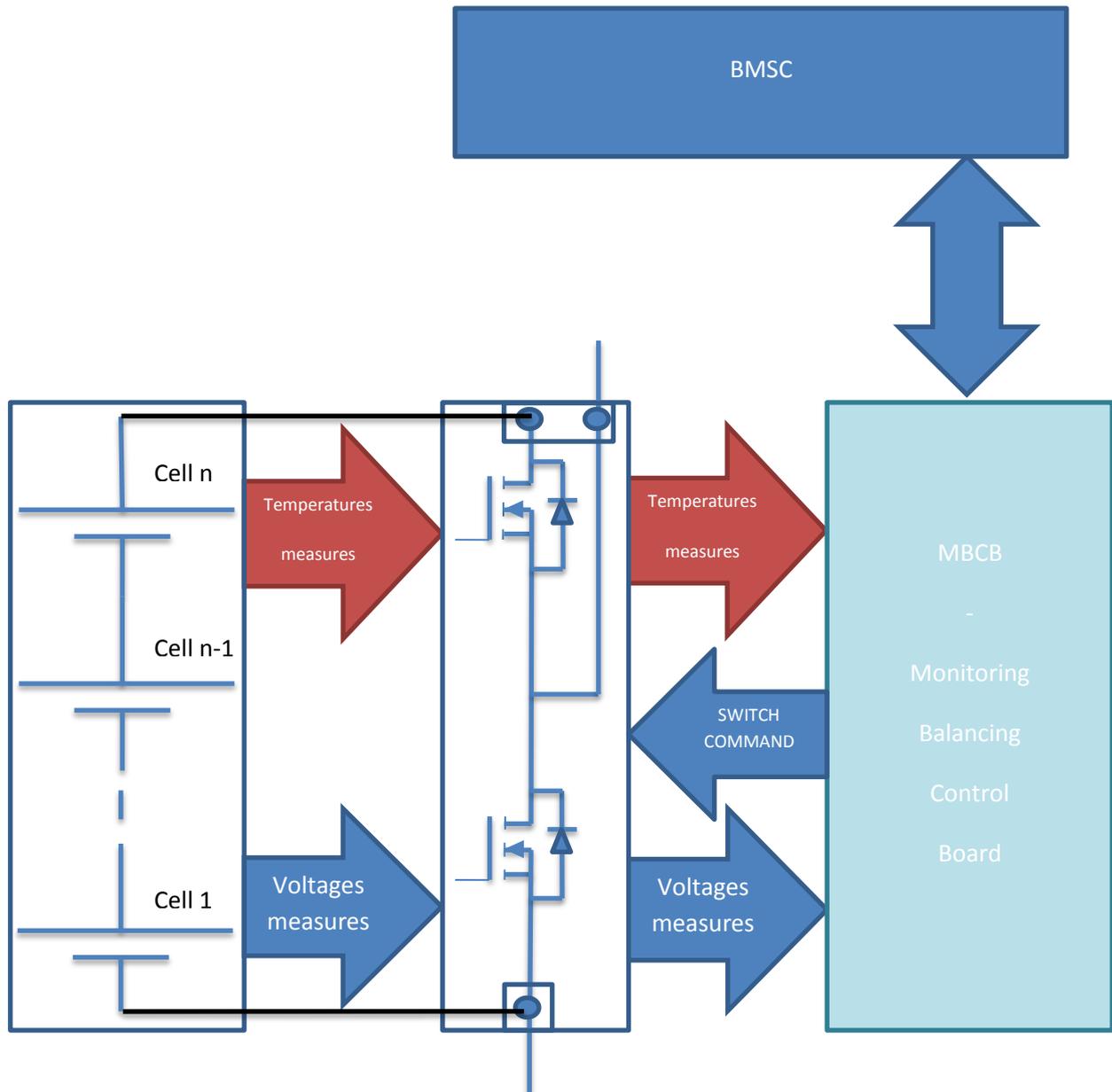


Figura 44

In Figura 45 vediamo in dettaglio il sistema di comunicazione tra i vari componenti della MBCB e il BMSC.

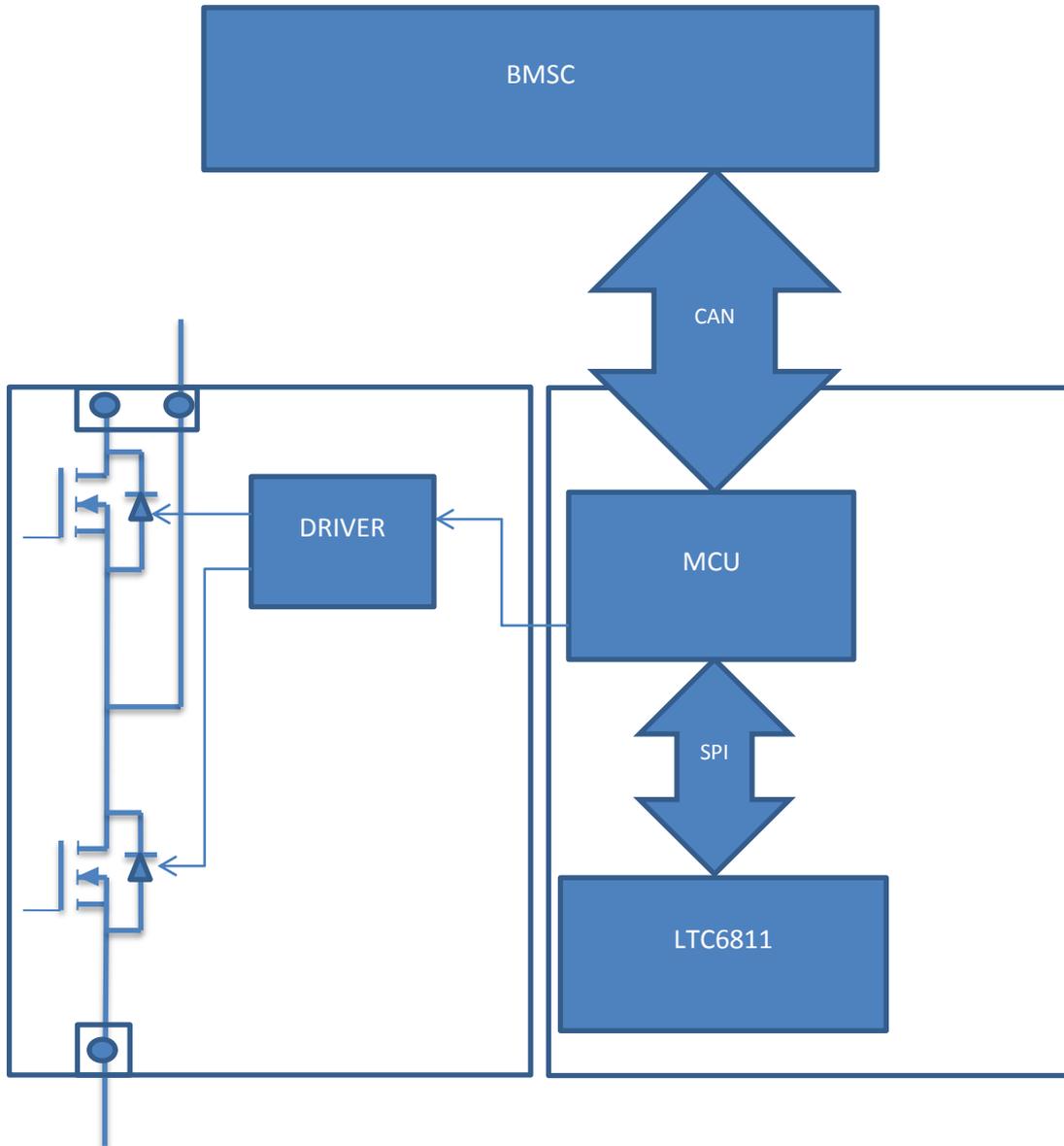


Figura 45

- **Interruttore Statico**

L'interruttore statico scelto è il mosfet Infineon IPT007N06N.
 Visibile in Figura 46.



Figura 46

In Tabella 12 riportiamo di dati dell'interruttore statico.

Tabella 12

Tensione massima	60 V
Corrente massima (I_D)	300 A
Ron ($V_{gs}=10\text{ V}$, $T_j=150\text{ °C}$)	1.226 mΩ
Ron ($V_{gs}=10\text{ V}$, $T_j=175\text{ °C}$)	1.356 mΩ
R_{jc} (resistenza termica giunzione case)	0.4 W/K

- **Induttore**

E' stato necessario inserire un induttore sia per ridurre l'ampiezza del ripple della modulazione PWM realizzata dal modulo per le operazioni di inserzione/disinserzione dello stesso, sia per potere filtrare adeguatamente l'oscillazione di corrente prodotta dal carico (considerato un inverter), per questo ultimo punto è necessario che l'impedenza vista dall'inverter del condensatore sia molto minore (un centesimo) di quella serie del pacco batteria, questo lo si può fare con una elevata capacità, che risultava per un sistema a 8 moduli pari a 2337 uF, o aggiungendo una induttanza per ogni modulo così da ridurre la capacità ad un valore di 600uF.

Il valore scelto di induttanza per modulo in una configurazione a 8 moduli è di 1uH, non si sono trovati in commercio induttori SMD con una portata di corrente sufficiente, si è quindi optato per un anello di ferrite sul quale avvolgere il cavo.

Si è scelto il seguente componente:

Tabella 13

TDK	B64290A0705
Materiale	K10
μ_i	700
Diametro esterno (mm)	140 mm
Diametro interno (mm)	103 mm
N (numero spire formate dal cavo)	1
Area Sezione Ferrite	458.9 mm ²
Lunghezza percorso magnetico effettivo	375.8 mm
Induttanza calcolata	1076 nH
B (induzione magnetico con 110A)	0.258 T

• **Condensatori LegBoard lato modulo**

Il componente capacitivo è necessario per due motivi, garantire la stabilità della tensione per l'esecuzione delle commutazione che non sarebbe se no garantita per l'elevata induttanza parassita tra il modulo e il mosfet stesso. Inoltre il sistema costituito dall'induttanza parassita e il condensatore permette la realizzazione di un filtro LC che filtra la corrente commutata per ridurre il contenuto armonico della corrente che va ad attraversare la batteria.

Poiché i condensatori adatti per il funzionamento in commutazione hanno capacità limitate si è considerato di mettere 3-4 componenti in parallelo.

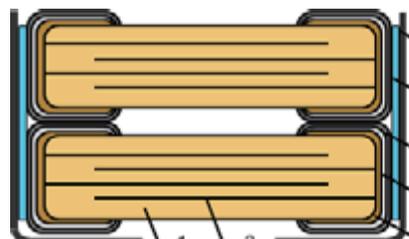


Figura 47

Il componente scelto è stato il TKD CKG57NX7S2A226M500JH da 22uF.

In Tabella 14 vediamo le caratteristiche del condensatore.

Tabella 14

TDK	CKG57NX7S2A226M500JH
Tensione massima	100 V
Capacità nominale	22 µF
Tolleranza della capacità	±20%
Temperatura massima	125°C

Tabella 15

N componenti	Capacità totale	Frequenza di risonanza
1	22 µF	107.30 kHz
2	44 µF	75.87 kHz
3	66 µF	61.95 kHz
4	88 µF	53.65 kHz

La capacità deve essere tale che la frequenza di risonanza sia (molto) minore rispetto alla frequenza di commutazione garantendo così che il valore massimo di corrente visto dalle celle del modulo sia inferiore a quello istantaneamente commutato dalla gamba, e al crescere della capacità tenda al valor medio.

Si è deciso di usare quattro componenti per le simulazione, si è provato anche la configurazione con tre componenti, è comunque consigliabile predisporre le piste della board in modo da poter mettere quattro componenti e poi sceglierne il numero considerando la reale induttanza parassita misurata.

Chiaramente minore è la capacità totale maggiore sarà l'ampiezza dell'oscillazione di corrente vista dalla batteria.

4.1. Funzioni richieste al modulo Intelligente

Le funzioni richieste al modulo intelligente sono:

- **Pre carica**
Operazione necessaria alla carica del condensatore dell'inverter utilizzatore, è necessaria utilizzare una tecnica di controllo della corrente per evitare sia oscillazioni RLC che picchi di sovracorrente eccessivi.
- **Spegnimento**
Operazione che prevede la scarica del condensatore prima della disconnessione del modulo, per evitare le sovracorrenti di scarica del condensatore che portino al danneggiamento delle celle e degli interruttori statici.
- **Protezione pacco batteria**
Con corrente positiva (erogazione) e negativa (carica pacco).
La protezione prevede essenzialmente la disconnessione in caso di eccessive correnti di scarica tramite l'apertura degli interruttori statici, in fase di carica del modulo è necessario che sia l'apparecchio di carica ad aprire la corrente poiché in questo caso si ha che la corrente passa per i diodi rendendo impossibile l'apertura dei moduli.
- **Overvoltage Cella/Modulo**
Funzione che esclude il modulo quando una delle celle raggiunge la tensione massima ammissibile
- **Undervoltage Cella/Modulo**
Funzione che esclude il modulo quando una delle celle raggiunge la tensione minima ammissibile
- **OverCurrente Modulo**
Funzione che esclude il modulo quando la corrente di modulo supera la massima corrente ammissibile di cella
- **OverTemperatura Modulo**
Funzione che esclude il modulo quando una delle celle raggiunge la temperatura massima ammissibile

4.2. Calcolo parametri per la Simulazioni delle commutazioni del modulo intelligente

Le simulazioni sono state effettuate tramite il programma PSPICE/Orcad®.

Parametri del circuito di Commutazione

Di seguito elenchiamo i parametri della maglia di commutazione e i relativi metodi di calcolo.

Induttanza parassita del cavo

L'induttanza parassita del cavo che connette il pacco batteria all'utilizzatore è calcolato tramite l'Equazione 11.

Equazione 11

$$L_{cable} = \mu_0 \frac{l}{\pi} \left[\ln \left(\frac{h}{D} \right) + Y \right]$$

Dove:

- μ_0 è la permeabilità magnetica del vuoto
- l è la lunghezza del cavo
- h è la distanza tra i due conduttori del cavo
- D è il diametro del conduttore
- Y è un fattore correttivo in base al range di frequenza considerato (usiamo $Y=1$)

Tabella 16

Lunghezza cavo (l)	2m
Distanza tra i conduttori (h)	10 - 2 cm
Diametro conduttori (D)	5mm
Induttanza Cavo (L_{cable}) ($h=10\text{cm}$)	3.19659 μH
Induttanza Cavo (L_{cable}) ($h=2\text{cm}$)	1.90904 μH

Resistenza cavo

La resistenza (in continua) è calcolata come (Equazione 12):

Equazione 12

$$R = \rho \frac{l}{A_{cable}}$$

Tabella 17

Resistività Rame (ρ)	16.7785 nΩm
Lunghezza cavo (l)	2m
Resistenza cavo (R)	1.677852 mΩ

Induttanza parassita del modulo

Tramite il programma FEMM® è stata effettuata una simulazione per calcolare l'induttanza delle connessioni alle 12 celle del modulo. In Figura 48 vediamo i risultati della simulazione. Per ridurre al minimo l'induttanza si è deciso di alternare le polarità delle celle così da avere alle due estremità correnti con verso alternato, cioè avere per ogni lato 6 correnti uscenti e 6 correnti entranti nel piano, così che il flusso totale concatenato sia nullo.

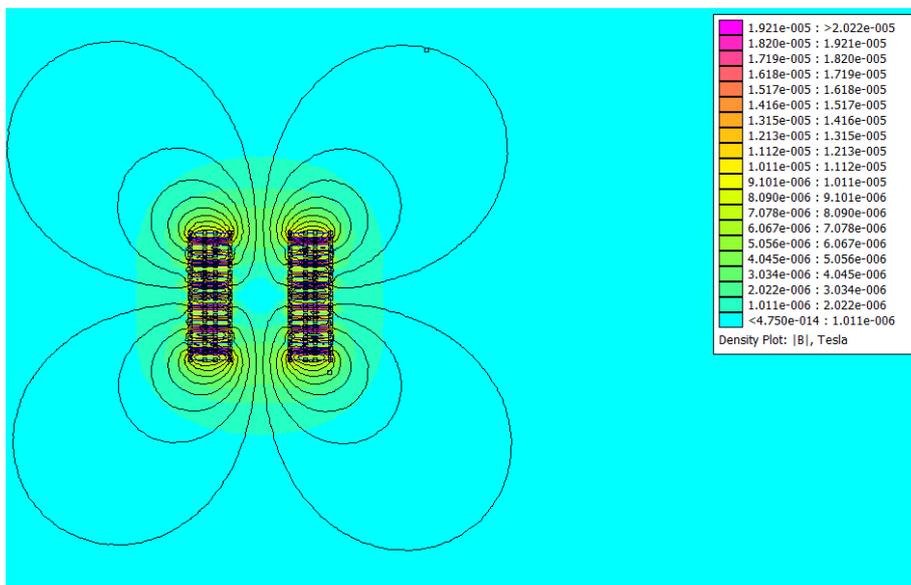


Figura 48 Simulazione magnetica dei connettori delle celle

In Tabella 18 vediamo i dati ottenuti dalla simulazione.

Tabella 18

Induttanza	47.8098 nH
Profondità conduttori	3cm
Distanza conduttori	10cm
Larghezza del conduttore (quadrato)	0.5cm

La cella scelta è costituita da strati alternati di catodi e anodi con interposizione dell'elettrolita.

Mentre in Figura 49 vediamo una simulazione approssimata di una cella, da cui otteniamo circa 1 nH.

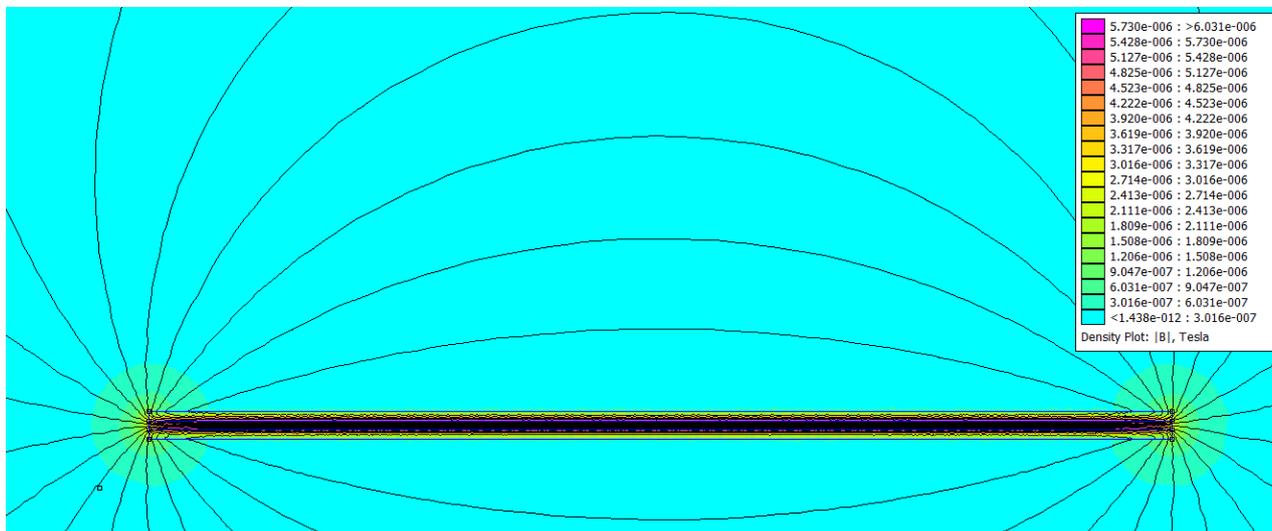


Figura 49 Simulazione magnetica della cella (3 strati)

In Figura 50 vediamo una simulazione più accurata dove rappresentiamo la cella con 31 strati, con questa simulazione otteniamo circa 0.8 nH per cella.

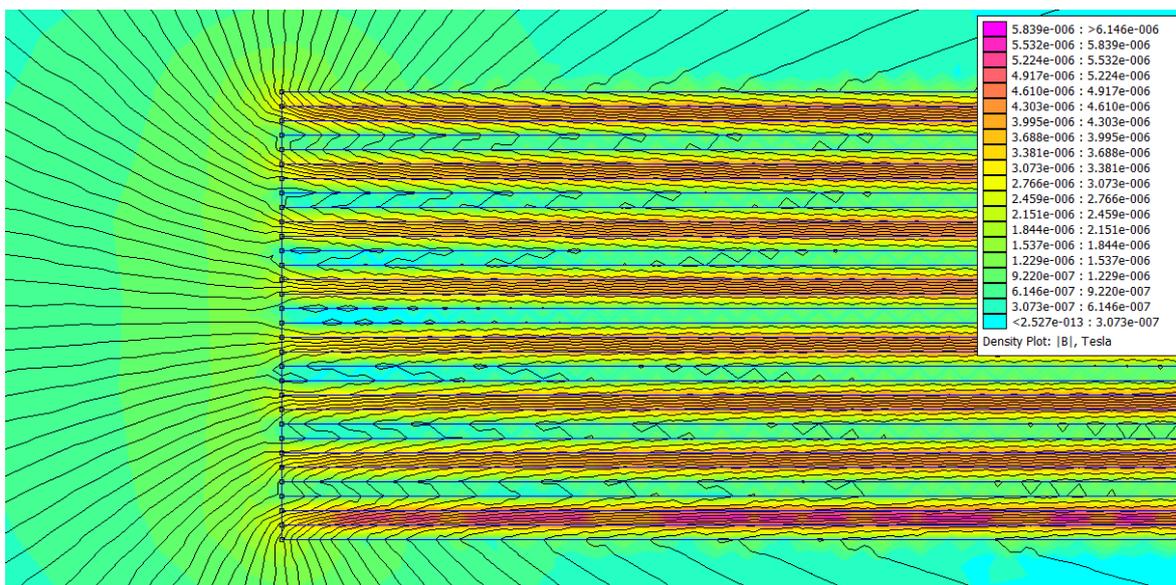


Figura 50 Simulazione magnetica della cella (31 strati)

Vediamo come all'aumentare degli strati in parallelo nella cella l'induttanza decresca, cautelativamente possiamo considerare una induttanza per le simulazioni di 1 nH.

In Figura 51 vediamo la simulazione delle connessioni tra i potenziali del modulo e la LegBoard. In questo caso l'induttanza dispersa è pari a 37.74 nH.

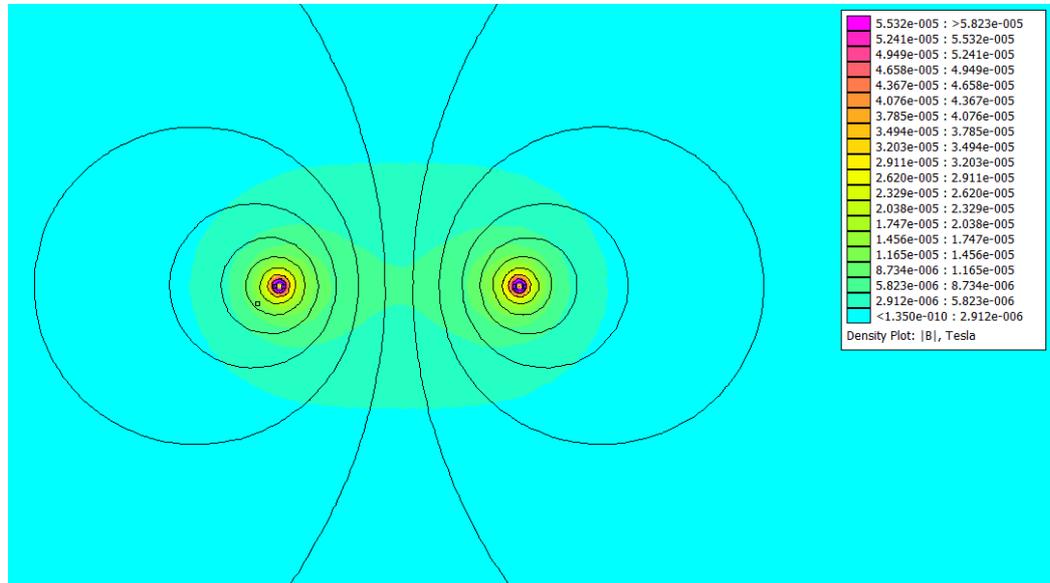


Figura 51 Simulazione magnetica connessioni tra LegBoard e modulo

In Tabella 19 ricapitoliamo le varie induttanze ottenute dalle simulazioni e il valore totale di induttanza dispersa assegnabile ad ogni modulo.

Tabella 19

Induttanza conduttori celle	47.809 nH
Induttanza cella (3 strati)	1.2137 nH
Induttanza cella (31 strati)	0.8832 nH
Induttanza cella considerata	1 nH
Induttanza totale celle modulo	12 nH
Induttanza connessioni LegBoard	42.196 nH
Induttanza totale modulo	102.005 nH

Resistenza del modulo

Per determinare la resistenza del modulo, consideriamo la resistenza delle singole celle e delle connessioni.

Tabella 20

Resistenza modulo (12 celle)	19.2 mΩ
Resistenza connessione celle	0.04272 mΩ
Resistenza connessione potenziali alla LegBoard	0.05033 mΩ
Resistenza totale modulo	19.29305 mΩ

Dimensionamento del condensatore lato bus dell'inverter

Per il dimensionamento dell'inverter si considera che l'impedenza del condensatore alla seconda armonica della frequenza di commutazione deve essere molto minore dell'impedenza serie del pacco batteria.

Abbiamo considerato una frequenza di commutazione dell'inverter lato utilizzatore di 10kHz.

La Equazione 13 definisce l'impedenza serie del pacco batteria.

Equazione 13

$$X_s = \{R_s + 2\pi * 2f_{sw}L_s\}$$

Equazione 14

$$X_c = \frac{1}{2\pi * 2f_{sw}C}$$

Imponendo

Equazione 15

$$X_c = \frac{X_s}{100}$$

La capacità è definita come (Equazione 16):

Equazione 16

$$C = \frac{100}{4\pi X_s}$$

Per ottenere questa relazione tra impedenza del pacco batterie e condensatore dell'inverter è stato necessario aggiungere un induttore alla leg board per contenere la capacità ad un valore ragionevole. Questo induttore sarà utile anche limitare il ripple di corrente che si ha con il controllo PWM per le operazioni di inserzione e disinserione del modulo.

Il rapporto 100 permette di ridurre la corrente di ripple dovuta all'inverter lato utilizzatore ad l'un per cento della corrente commutata.

Tabella 21

	1 Modulo	8 Moduli
Resistenza modulo	20 mΩ	20 mΩ
Resistenza switch	1.25 mΩ	1.25 mΩ
Resistenza cavo	1.677mΩ	1.677mΩ
Induttanza cavo	2 μH	2 μH
Induttanza modulo	100 nH	100 nH
Induttore aggiuntivo (per modulo)	5 μH	1 μH
Impedenza totale (20 kHz)	0.88 Ω	1.35 Ω
Capacità lato utilizzatore	903.49 μF	619.08 μF

Parametri utilizzati per le simulazioni di commutazioni di inserzione e disinserione dei moduli

In Tabella 22 ricapitoliamo i parametri generali comuni alle simulazioni.

Tabella 22

L_{modulo}	100 nH
R_{modulo}	20 mΩ
R_{cavo}	1.67 mΩ
L_{cavo}	2 μH
I_{carico} (corrente continuativa assorbita dall'inverter lato utilizzatore)	88 A

4.3.Precarica Modulo

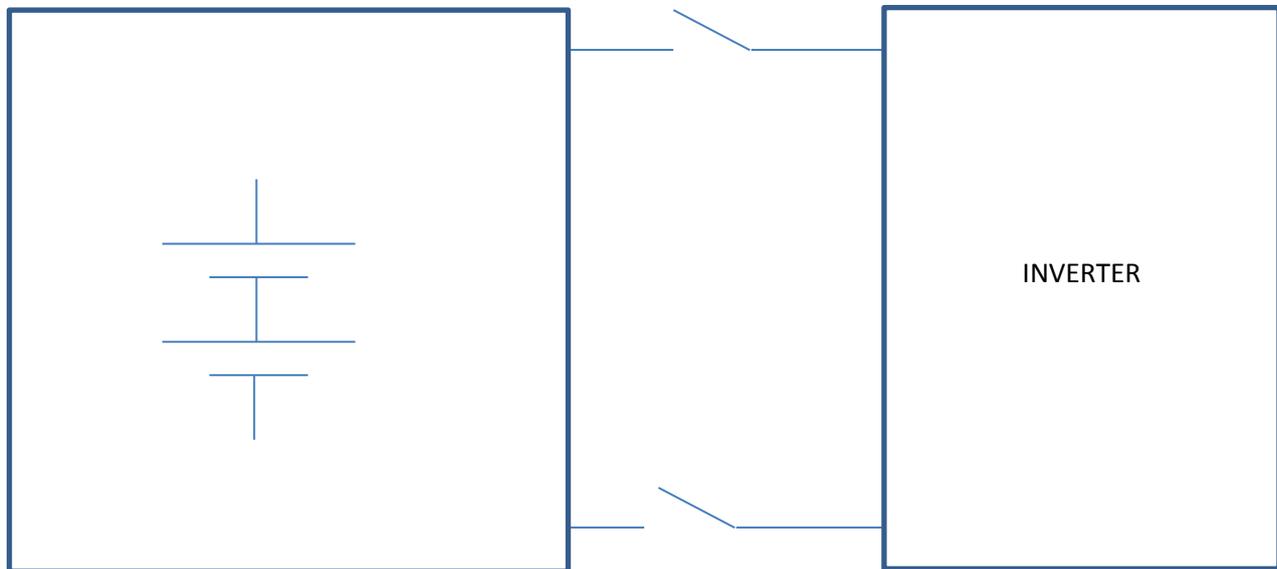


Figura 52

La precarica prevede questa sequenza di azioni:

1. Chiusura dei circuit breaker
2. Apertura dell'interruttore statico basso della cella 1
3. Chiusura dello switch alto della cella 1

La sequenza di precarica continua con le celle successive finché tutte le celle non sono connesse all'inverter utilizzatore.

Abbiamo considerato come primo caso la precarica con la chiusura rapida del mosfet alto, questo come verrà riportato in seguito ha portato ad elevate sovracorrenti, queste sono del tutto inaccettabili e porterebbero ad un grave danneggiamento di tutti i componenti del pacco batteria.

Simulazione commutazioni di un pacco batteria con chiusura rapida dell'interruttore statico

Durante le commutazioni di inserzione e esclusione dei moduli si sono verificate sovracorrenti con andamento cissoidale dovuto ai transistori di carica e scarica del condensatore lato carico.

Prearica Pacco batteria costituito da 8 moduli

In Figura 53 vediamo lo schema utilizzato per la simulazione orcad rappresentante un pacco batteria costituito da 8 moduli.

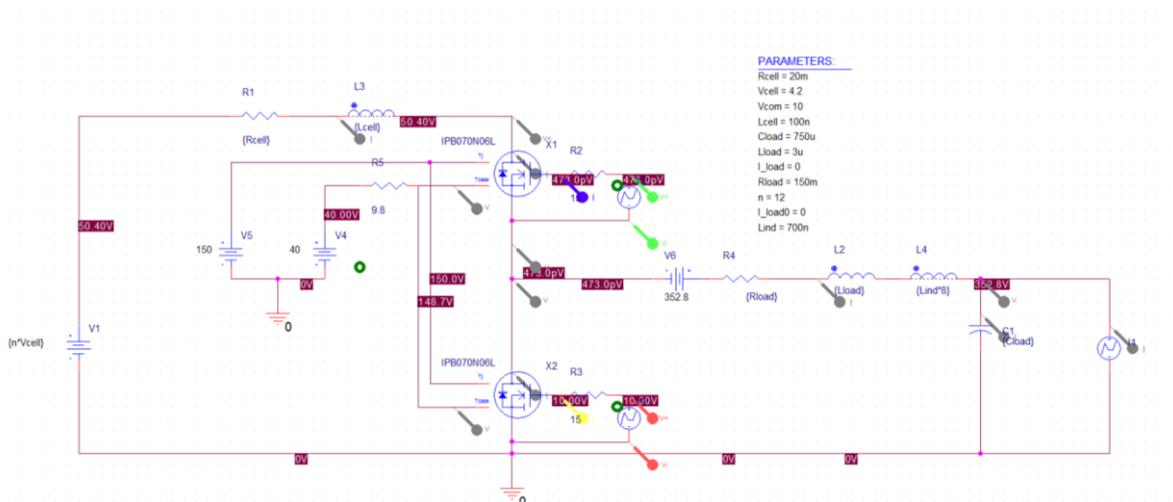


Figura 53

In Tabella 23 vediamo i parametri del circuito di simulazione.

Tabella 23

L_{modulo}	100 nH
R_{modulo}	20 mΩ
L_{carico} (induttanza del cavo e degli altri 7 moduli connessi esclusi gli induttori)	3 μH
L_{ind}	700 nH
L_{cavo}	2 μH
R_{carico} (resistenza del cavo e degli altri 7 moduli connessi)	150 mΩ
V_{moduli} (tensione dei restanti 7 moduli connessi)	403.2 V
C_{inverter} (condensatore di filtro dal lato capacitivo dell'inverter utilizzatore)	750 μF
I_{carico} (corrente continuativa assorbita dall'inverter lato utilizzatore)	0 A

Mentre Figura 54 in vediamo l'andamento della tensione ai capi dell'interruttore statico alto e la corrente del modulo durante le operazioni di inserzione e disinserzione del modulo.

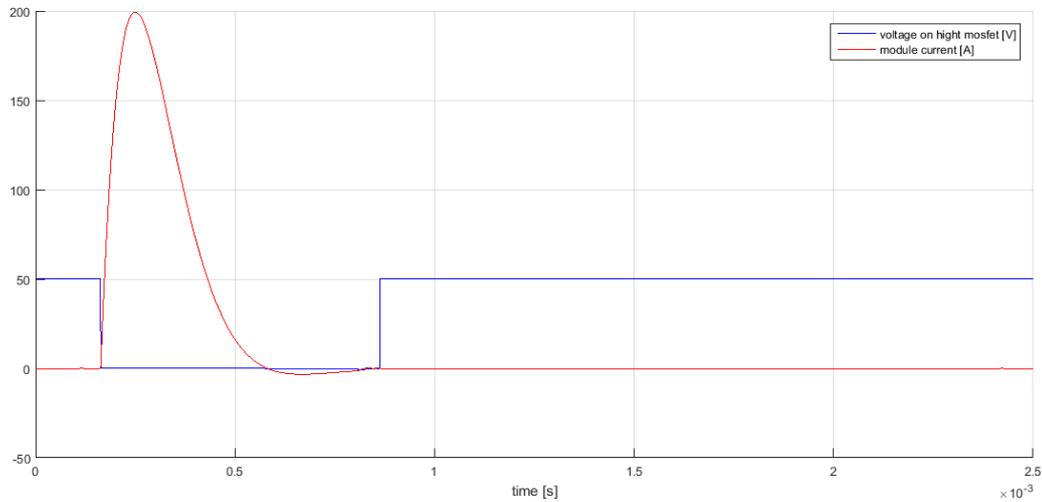


Figura 54

In Figura 55 vediamo sempre l'andamento della tensione ai capi dell'interruttore statico alto e la corrente del modulo, è presente inoltre la corrente che fluisce nel diodo del mosfet basso della gamba di inverter. Dalla Figura 55 si può vedere che è presente anche una sovracorrente in corrispondenza della disinserzione del modulo che provoca la scarica del condensatore lato utilizzatore, questa è elevata e leggermente superiore alla sovracorrente di inserzione del modulo.

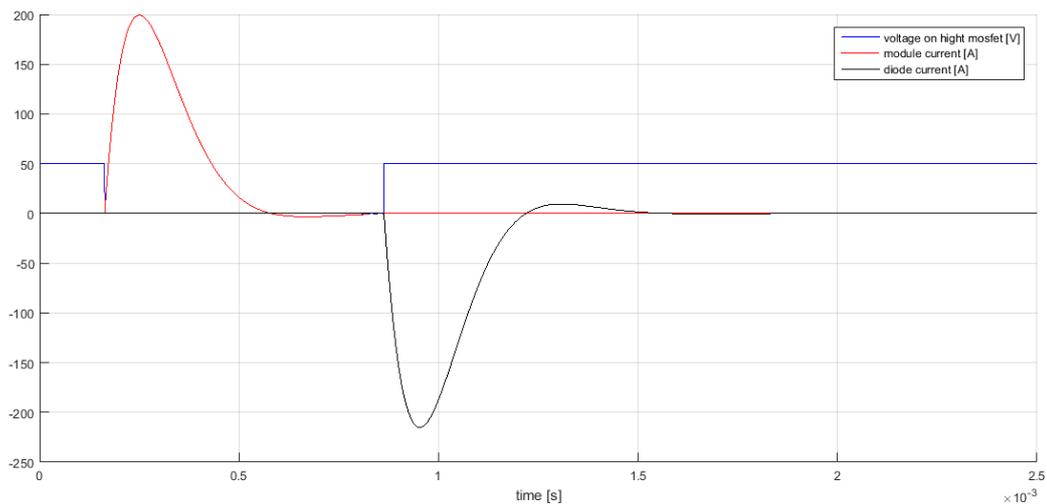


Figura 55

Possiamo vedere in Figura 54 come per effetto della chiusura del mosfet alto, e quindi dell'inserzione nella serie del modulo si ha una elevata sovracorrente dovuta al transitorio RLC di carica del condensatore, l'elevato smorzamento dovuto alle resistenze serie di mosfet e celle di tutti i moduli riduce il picco massimo raggiunto, che comunque risulta superiore alla corrente massima ammissibile di cella pari a 110 A istantanei, mentre come si vede la corrente raggiunge un picco di 200 A.

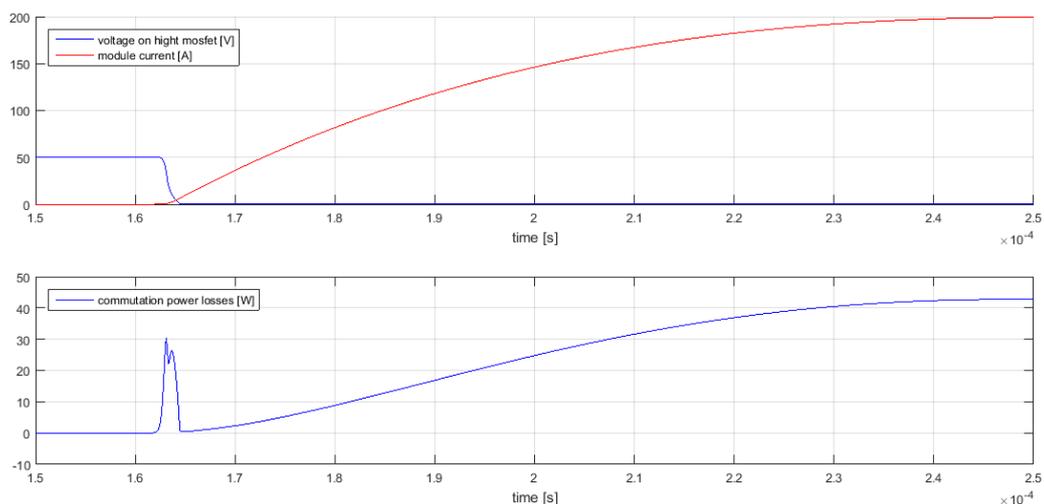


Figura 56

In Figura 56 vediamo nel grafico superiore l'andamento della tensione ai capi del mosfet alto e la corrente del modulo, con la relativa sovracorrente, durante la commutazione di inserzione del modulo nella serie del pacco batteria, nel grafico inferiore invece vediamo la potenza istantanea dissipata dall'interruttore statico durante la commutazione.

La Figura 57 ci mostra in dettaglio l'andamento della commutazione di chiusura dell'interruttore statico al potenziale alto della gamba, con la transizione di tensione e corrente.

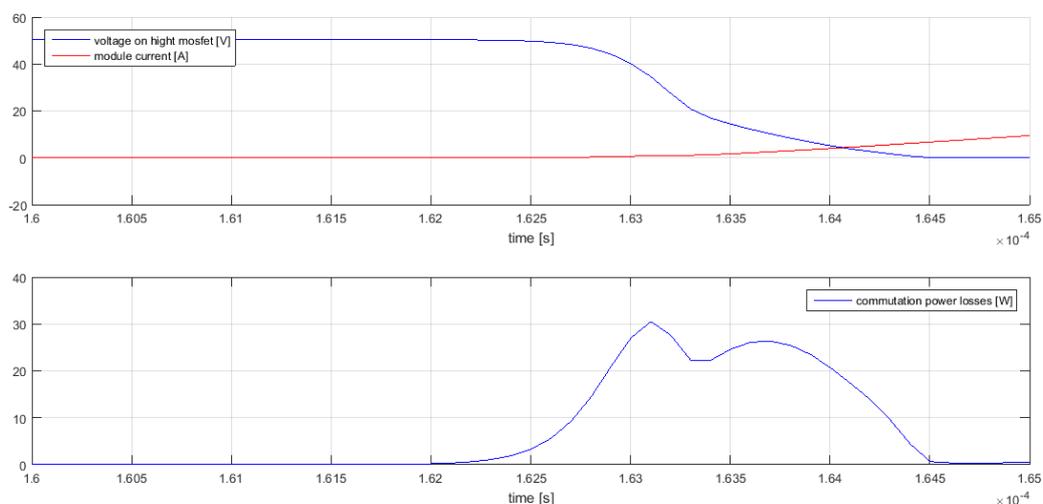


Figura 57

Mentre la Figura 58 ci mostra l'effetto sul condensatore lato utilizzatore, ossia sul condensatore dell'inverter che rappresenta il nostro carico, dell'inserzione e disinserzione del modulo, si vede come la tensione del condensatore (rappresentata dalla curva nera), durante l'inserzione raggiunga la tensione massima, si vede una sovracorrente elevata associata alla carica e scarica del condensatore, questa che è dovuta al transitorio RLC.

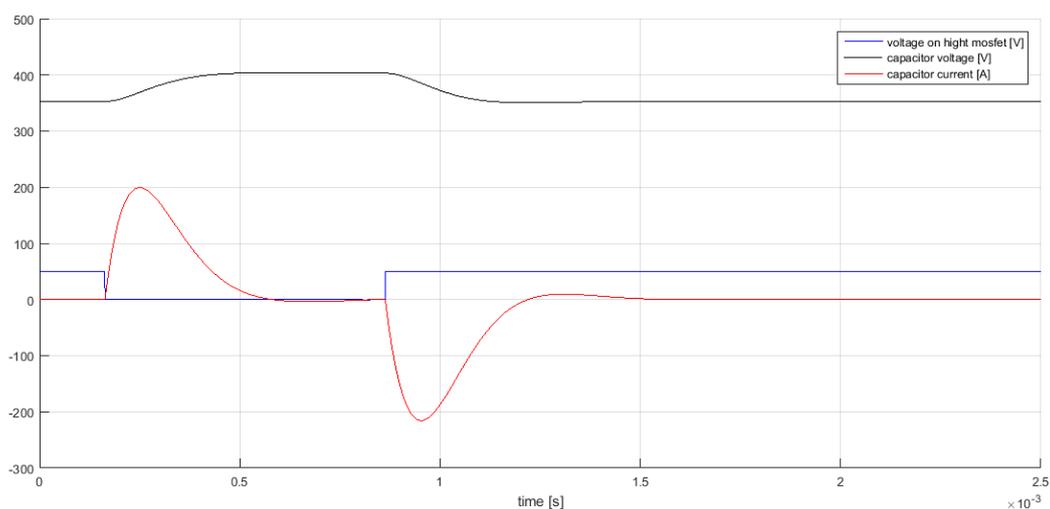


Figura 58

Dalla Figura 58 e dalla Figura 54 si vede come i problemi derivino principalmente dalla carica del condensatore che porta ad correnti impulsive elevate sia nel pacco batteria e sia nel condensatore.

Nella Figura 59 possiamo vedere la commutazione di disinserzione del modulo dalla serie, corrispondente al turn off del mosfet alto, questa non ha nessun effetto ne sul modulo essendo a corrente di carico nulla.

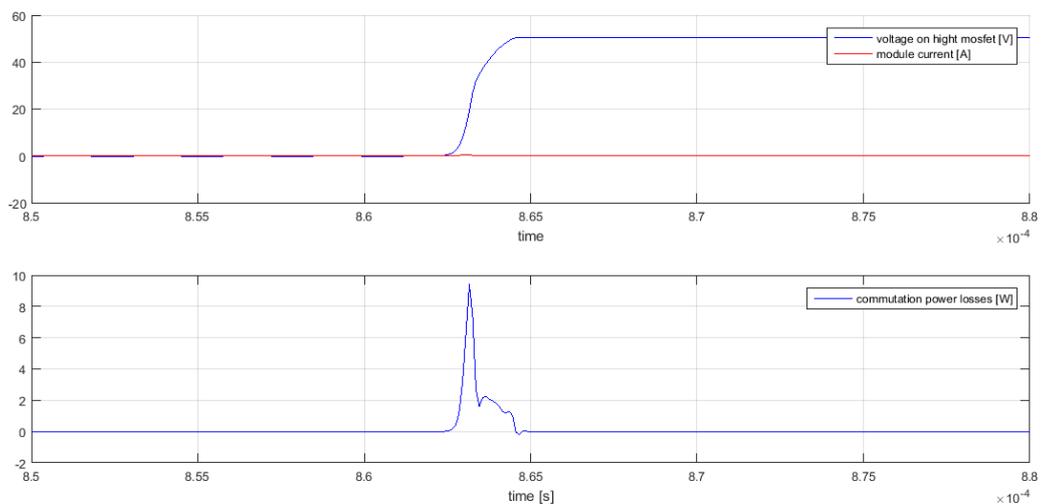


Figura 59

Pre carica Pacco batteria costituito da 1 modulo

In Figura 60 vediamo lo schema utilizzato per la simulazione orcad rappresentante un pacco batteria costituito da 1 modulo.

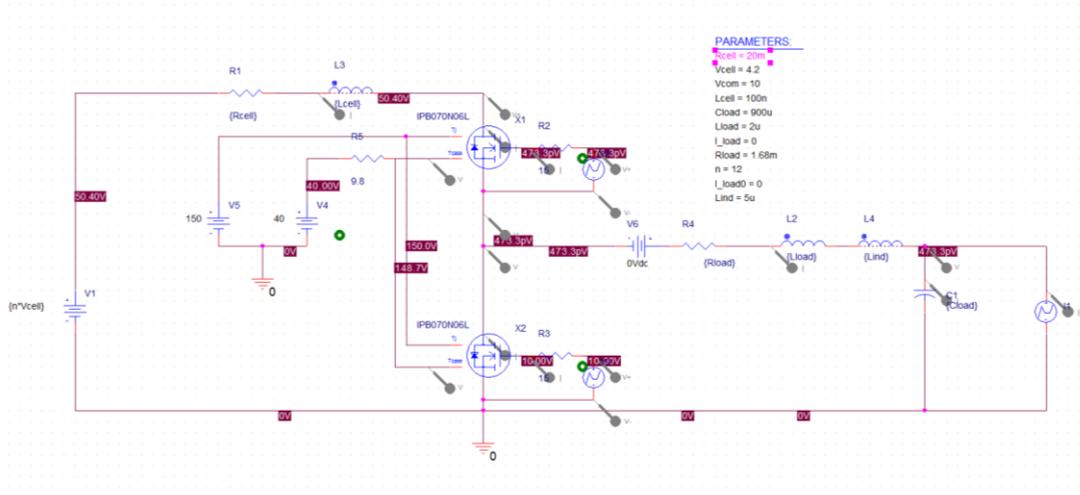


Figura 60

In Tabella 24 vediamo i parametri del circuito di simulazione.

Tabella 24

L_{modulo}	100 nH
R_{modulo}	20 mΩ
L_{carico}	2 μH
L_{cavo}	2 μH
L_{ind}	5 μH
R_{carico}	1.68 mΩ
C_{inverter} (condensatore di filtro dal lato capacitivo dell'inverter utilizzatore)	900 μF
I_{carico} (corrente continuativa assorbita dall'inverter lato utilizzatore)	0 A

Nella Figura 61 vediamo le sovracorrenti dovute all'inserzione del modulo.

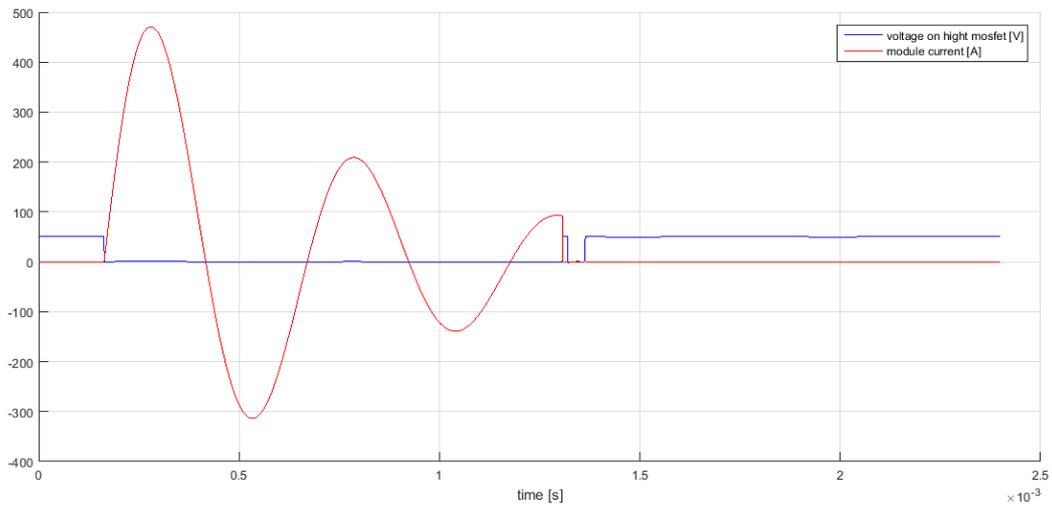


Figura 61

Dalla Figura 61 vediamo come lo smorzamento sia contenuto.

Per la prima commutazione di chiusura il picco è prossimo a quello teorico calcolato con la impedenza di linea.

Equazione 17

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Equazione 18

$$I_{pk} = \frac{\Delta V}{Z_0}$$

Tabella 25

Z_0	0.08807 Ω
$I_{picco\ stimato}$	572.21 A
$I_{picco\ reale}$	470.8 A

In Figura 62 vediamo in dettaglio la commutazione di chiusura del modulo, che porta ad elevate sovracorrenti, la commutazione è molto veloce questo porta a delle perdite trascurabili, e quindi sopportabili termicamente dal componente.

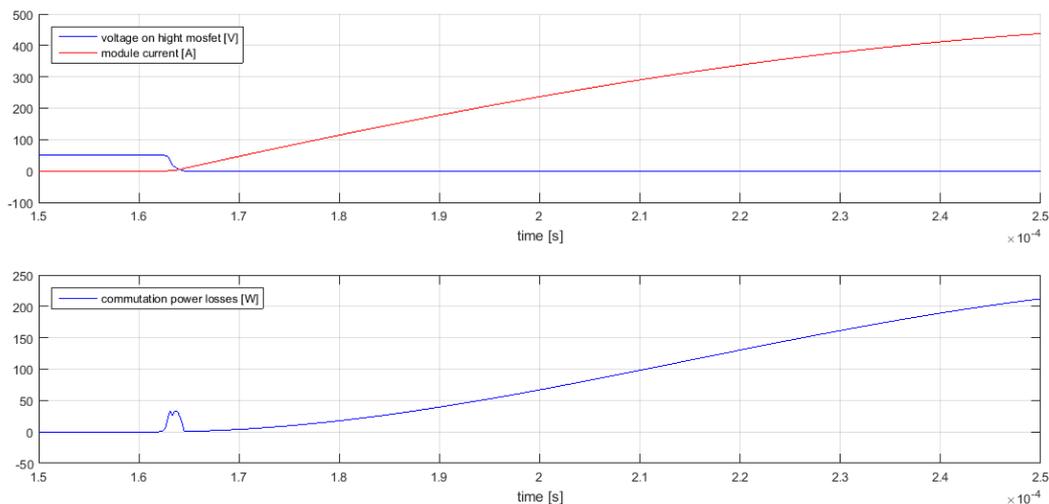


Figura 62

Si può vedere sempre in Figura 62 che le sovracorrenti portano ad perdite di conduzioni eccessive, superiori a 200 W.

In Figura 63 vediamo in dettaglio la commutazione di chiusura. La commutazione avviene in 2 μ s.

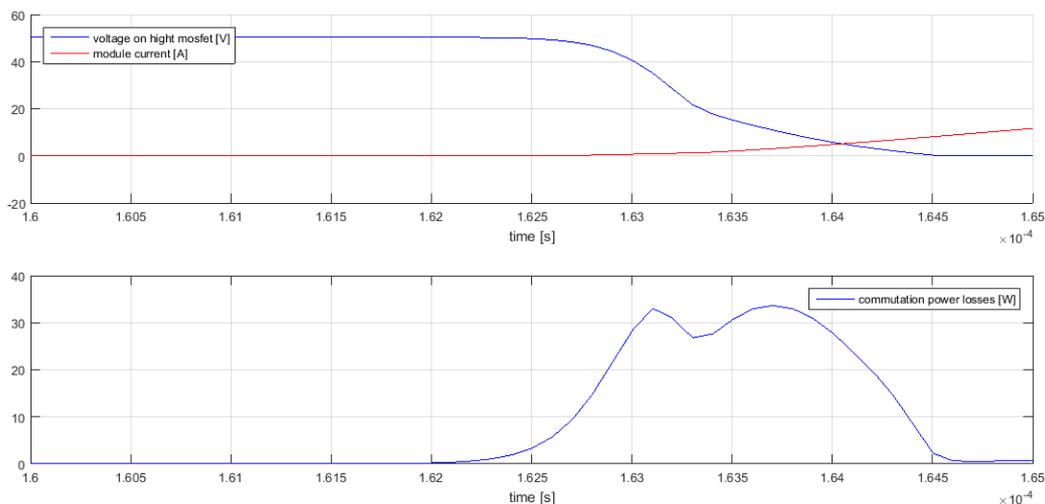


Figura 63

Prearica di un pacco batteria costituito da 8 moduli in serie con controllo lineare di corrente

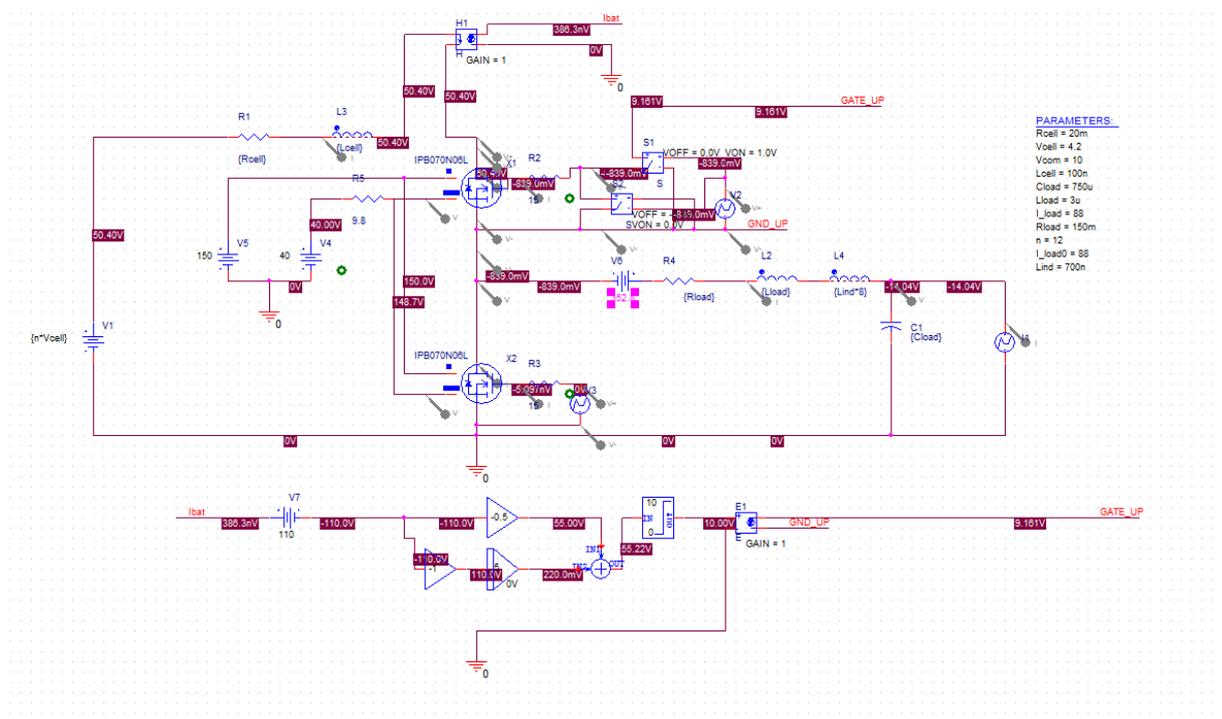


Figura 64

La simulazione è svolta due volte, una prima volta con la prearica del primo modulo (ossia sistema con nessun modulo connesso e si va a conettere solo il primo modulo) qui si vedrà che il sistema con controllo lineare di corrente risulta eccessivamente dissipativo e impossibile da attuare, mentre una seconda simulazione dove si ha la connessione dell’ottavo e ultimo modulo che risulta controllabile con la regolazione dissipativa dell’interuttore statico, questo perché l’ultima simulazione vede la serie delle resistenze di tutti i moduli e risulta molto più smorzata e quindi il picco della sovracorrente è più basso, mentre per la simulazione di prearica con il primo modulo la resistenza vista dal modulo è solo quella dei mosfet degli altri moduli in serie e delle cavo.

Tabella 26

L_{modulo}	100 nH
R_{modulo}	20 mΩ
L_{carico} (induttanza del cavo e degli altri 7 moduli connessi esclusi gli induttori)	3 μH
L_{carico} (induttanza del cavo e degli altri 7 mosfet esclusi gli induttori)	2 μH
L_{ind}	700 nH
L_{cavo}	2 μH
R_{carico} (resistenza del cavo e degli altri 7 moduli connessi)	150 mΩ
R_{carico} (resistenza del cavo e degli altri 7 mosfet, prearica con il primo modulo)	11 mΩ
V_{moduli} (tensione dei restanti 7 moduli connessi)	403.2 V
C_{inverter} (condensatore di filtro dal lato capacitivo dell’inverter utilizzatore)	750 μF
I_{carico} (corrente continuativa assorbita dall’inverter lato utilizzatore)	0 A

In Figura 65 è rappresentato l'anello di controllo che misura la corrente del pacco batteria la quale viene confrontata al valore richiesto di 110 A che tramite un controllo proporzionale integrale attua la tensione di comando da applicare al gate dell'interruttore statico alto, la tensione attuata viene limitata tra 0 e 10 V.

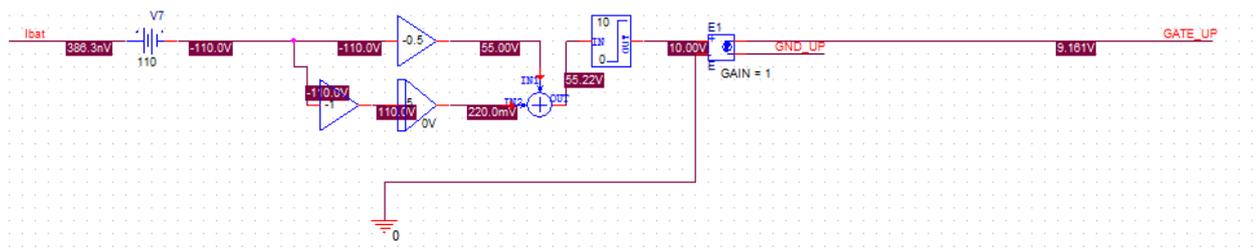


Figura 65

In Figura 66 vediamo le commutazioni di inserzione e disinserione del primo modulo dal pacco batteria per mezzo delle commutazioni della gamba di inverter. La durata totale della simulazione è di circa 360 μ s.

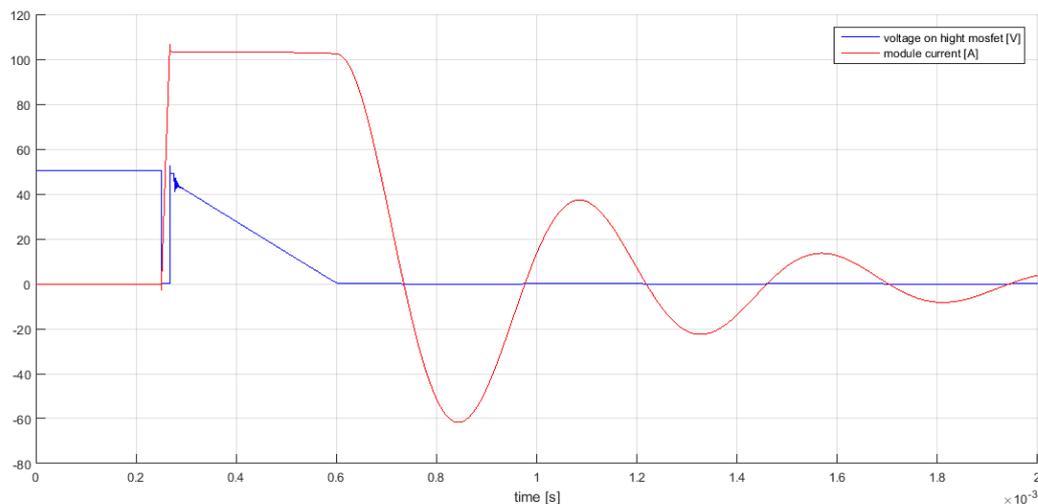


Figura 66

Vediamo come chiaramente viene limitata ad un valore prossimo a 110 A, l'errore è dovuto al regolatore.

In Figura 67 vediamo invece la precarica dell'ottavo modulo, vediamo che la tensione ai capi del mosfet rimane praticamente costante durante la sovracorrente, questo perché il picco massimo della commutazione incontrollata è già molto vicina al valore richiesto di corrente al regolatore.

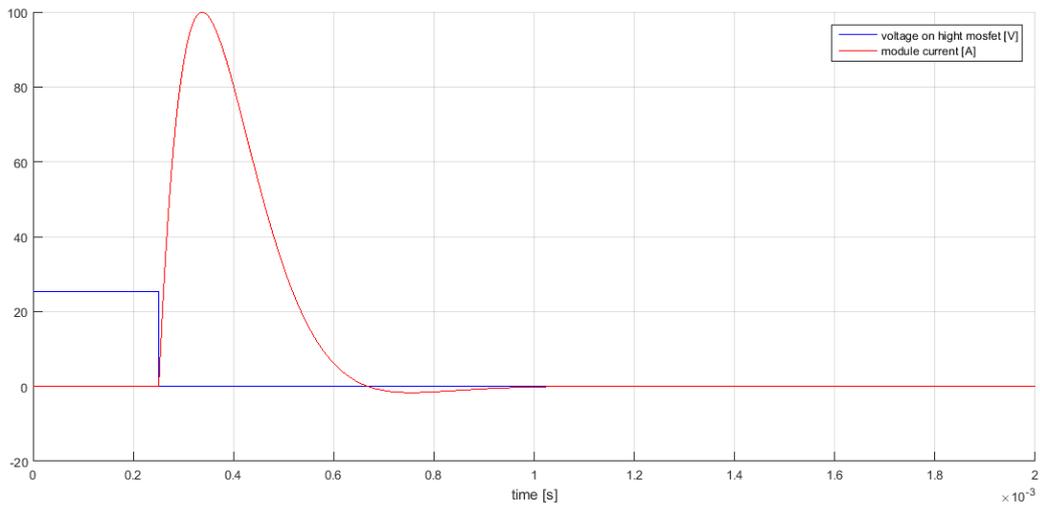


Figura 67

Per vedere più caramente il funzionamento del controllo riportiamo in Figura 68 l'andamento della commutazione e il relativo comando dell'interruttore statico alto.

Dalla Figura 68 vediamo come il controllo interviene per un tempo molto limitato per la precarica dell'ultimo modulo della serie.

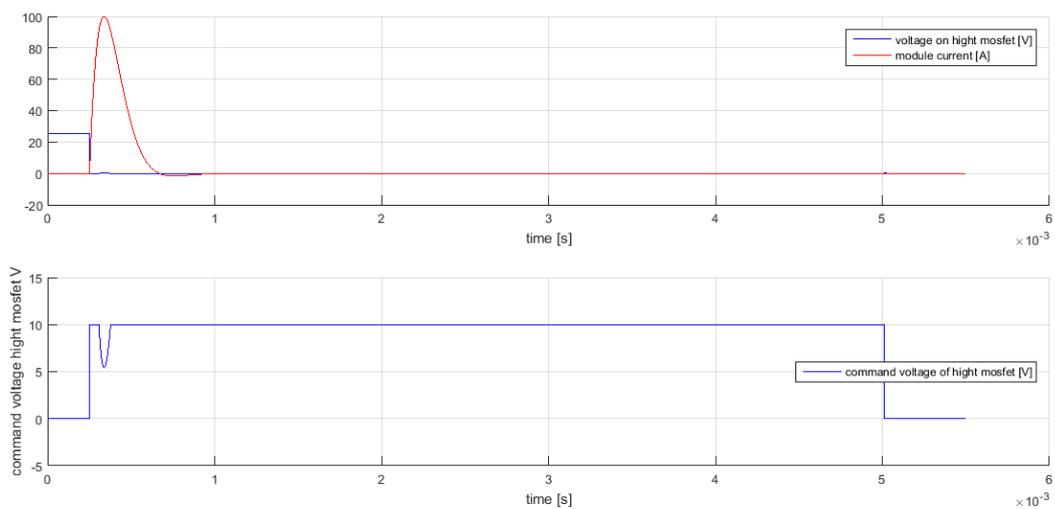


Figura 68

Mentre in Figura 69 vediamo come l'azione del controllo sia molto più estesa nel tempo per l'inserzione del primo modulo della serie, e renda impossibile il funzionamento del mosfet con controllo lineare di corrente, poiché la potenza dissipata risulta estremamente alta.

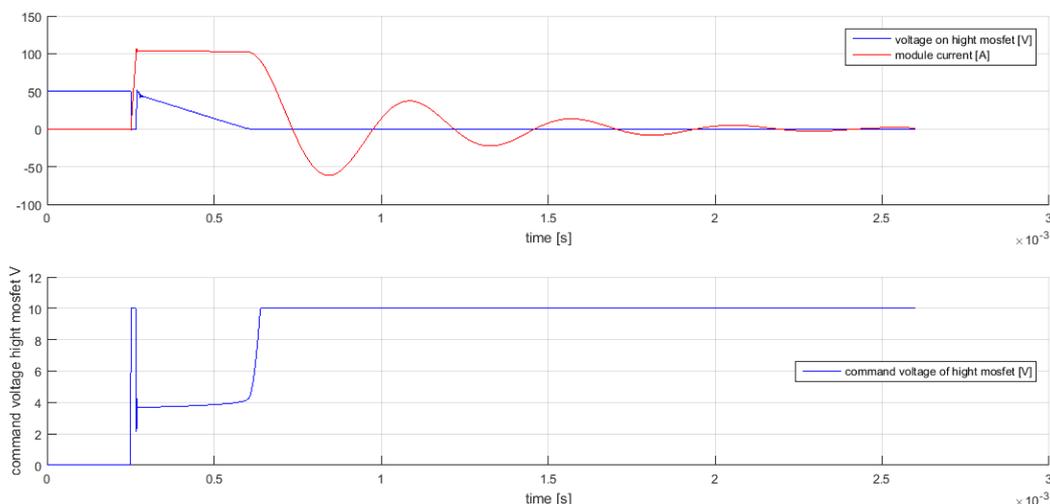


Figura 69

La Figura 70 mostra l'andamento della tensione e corrente del condensatore durante la chiusura controllata del primo modulo, si può chiaramente vedere come la corrente costante comanda dall'anello porti ad una corrente costante entrante nel condensatore, e di riflesso ad un andamento della tensione del condensatore durante la carica a rampa costante.

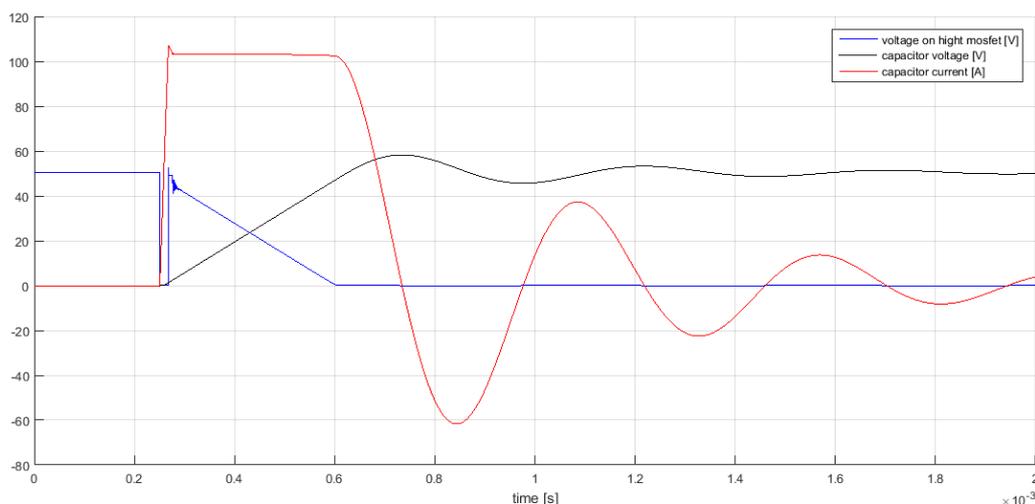


Figura 70

Le oscillazione della tensione del condensatore e soprattutto della corrente sono dovute al transitorio RLC che si instaura una volta che il controllo satura avendo esaurito tutto il forzamento di tensione dato dal modulo in inserzione. L'oscillazione non rappresenta un problema poiché si smorza abbastanza velocemente e ha i picchi comunque inferiori al valore massimo richiesto.

Mentre Figura 71 vediamo come la tensione sul condensatore cresce in maniera molto controllata, e la corrente della capacità si smorza molto velocemente, senza oscillazioni apprezzabili per l'ultimo modulo in inserzione.

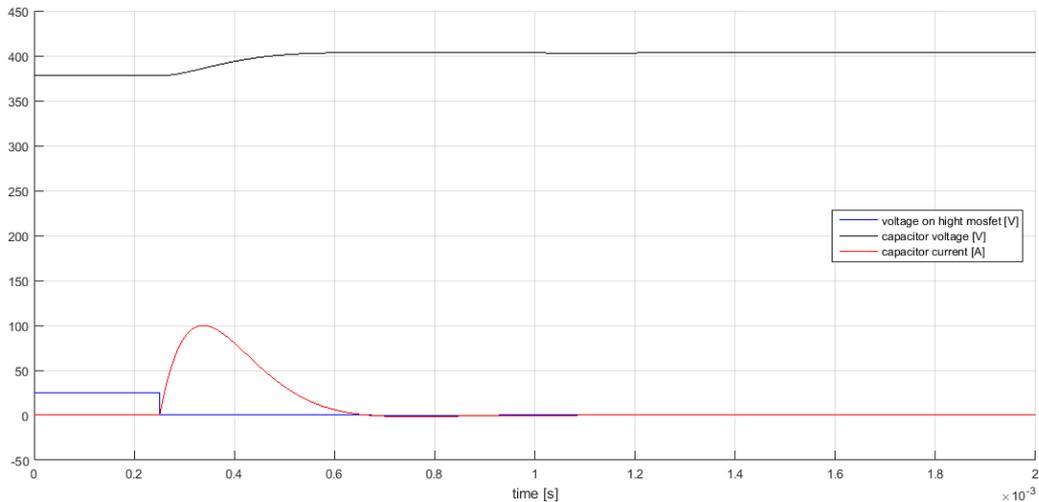


Figura 71

In Figura 72 è diagrammato in dettaglio l'andamento della commutazione di on dell'inserzione del primo modulo.

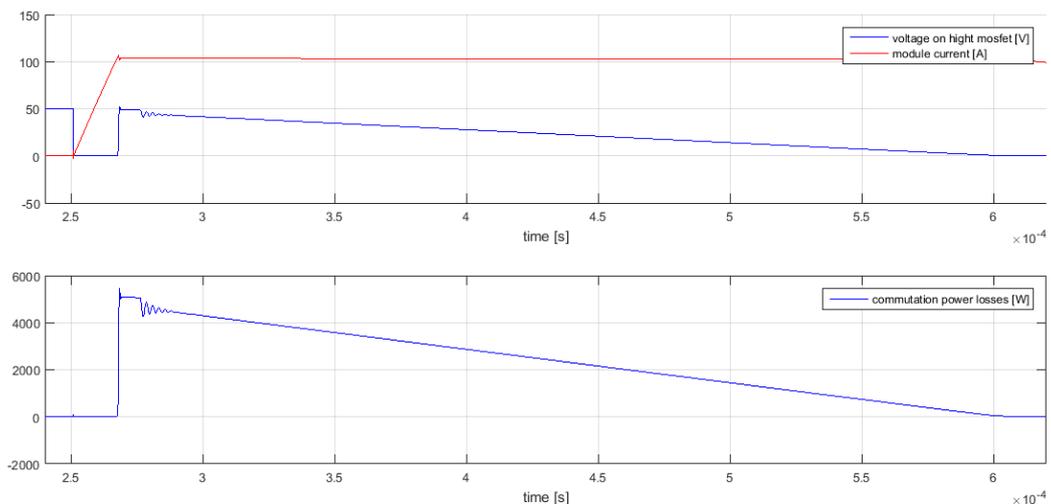


Figura 72

La commutazione dura 332.9 μ s (considerando solo la fase tensione superiore a zero), e una potenza dissipata totale di 795.23 mJ.

In Figura 73 vediamo la commutazione controllata durante l’inserzione dell’ultimo modulo, la commutazione è l’impulso in corrispondenza dei 250 μ s si ha che la potenza istantanea in commutazione è inferiore a quella dissipata in conduzione.

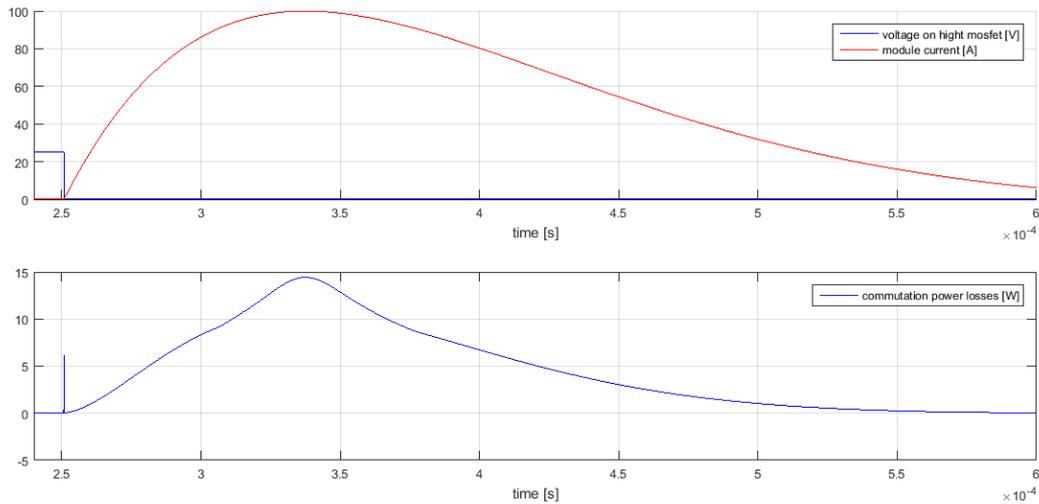


Figura 73

Dalla Tabella 27 vediamo ricapitolato i dati della commutazione di chiusura.

Tabella 27

	Tempo totale di commutazione	Perdite di commutazione
Commutazione di on	332.9 μ s	795.23 mJ

Le elevate perdite durante la commutazione richiedono una verifica del dimensionamento termico durante le commutazioni. Approssimiamo l’andamento della potenza con un andamento rettangolare con valore pari al valore medio (questo è necessario perché l’unica informazione sulle proprietà termiche del componente statico è espresso come impedenza equivalente in funzione della frequenza dell’impulso di potenza termica).

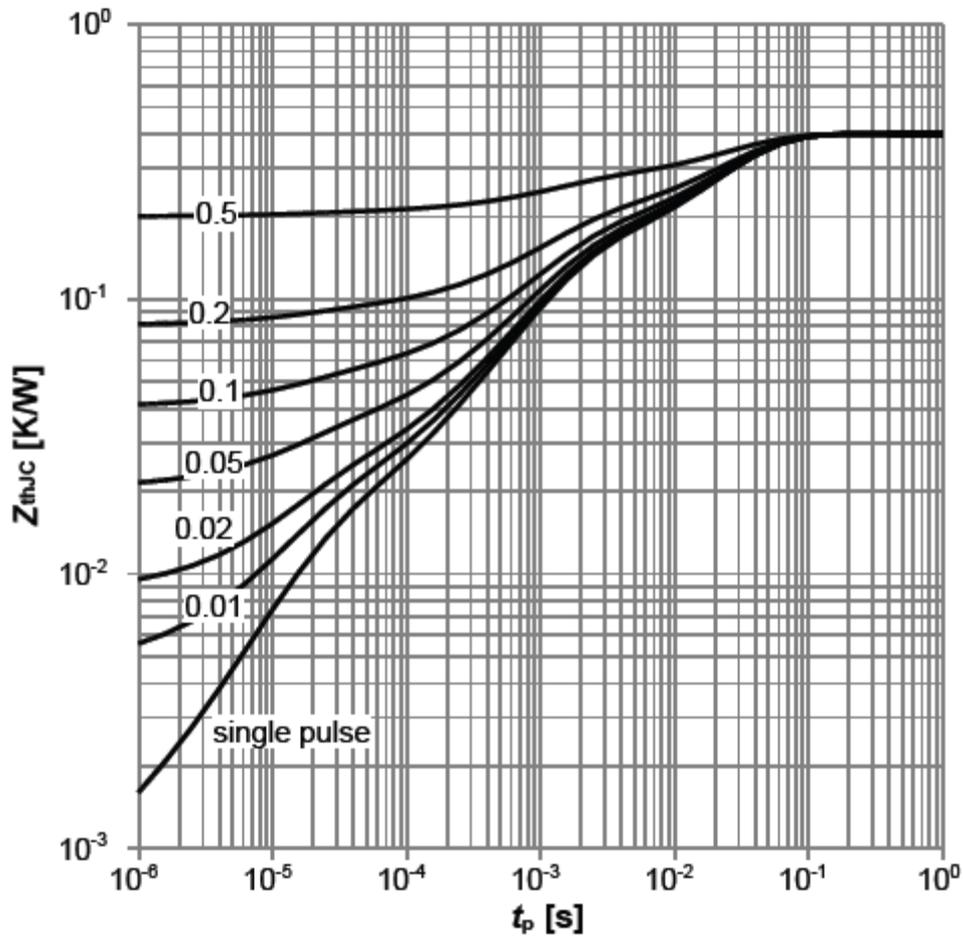


Figura 74

Dalla Figura 74 consideriamo la curva dell'impulso singolo (single pulse) per un tempo dell'impulso pari al tempo di commutazione di on (332 μ s) questo ci restituisce una impedenza termica di circa 45 mK/W. Facendo il rapporto tra energia dissipata e tempo di commutazione calcoliamo un potenza media di 2.34 kW.

Equazione 19

$$\tilde{p}_{losses\ turn-on} = \frac{E_{losses\ turn-on}}{\Delta t_{turn-on}}$$

Possiamo considerare per iniziare la sola sovratemperatura giunzione-case, e confrontarla con la temperatura del dissipatore, se questa si trova oltre alla massima temperatura tollerabile dal componente è evidente che considerando anche le resistenza tra case e dissipatore e la resistenza di contatto (difficilmente modellizzabile) la temperatura finale sarà inaccettabile.

Calcoliamo la sovratemperatura moltiplicando semplicemente l'impedenza ottenuta dalla Figura 74 per la potenza media calcolata con Equazione 19.

Equazione 20

$$\Delta\vartheta_{jc} = \tilde{p}_{losses\ turn-on} Z_{jc}(t_p)$$

La sovratemperatura così calcolata è pari a 107.5 °C che risulta chiaramente inaccettabile. In Tabella 28 abbiamo riepilogati i calcoli di dimensionamento termico del turn on.

Tabella 28

Energia dissipata dalla commutazione di on	795.23 mJ
Tempo di commutazione di on	332.9 μs
Potenza media durante la commutazione di turn-on	2338.79 W
Sovratemperatura (minima) calcolata	107.5 °C

Se consideriamo la migliore temperatura del dissipatore che troveremo nel capitolo di dimensionamento termico troviamo pari a 87°C è chiaro che la temperatura sicuramente superiore a 194°C non è accettabile per il componente considerando che inoltre sono presenti altre resistenze termiche che incrementano ulteriormente la temperatura.

Ciò ci porterà nei prossimi paragrafi a considerare un metodo alternativo per il turn on controllato e quindi per la limitazione della sovracorrente di carica del condensatore dell'utilizzatore.

Prearica di un pacco batteria costituito da 1 moduli in serie con controllo lineare di corrente

Per completezza riportiamo la commutazione di inserzione di un singolo modulo con controllo lineare di corrente che rappresenta il caso più gravoso in assoluto come ampiezza della sovracorrente.

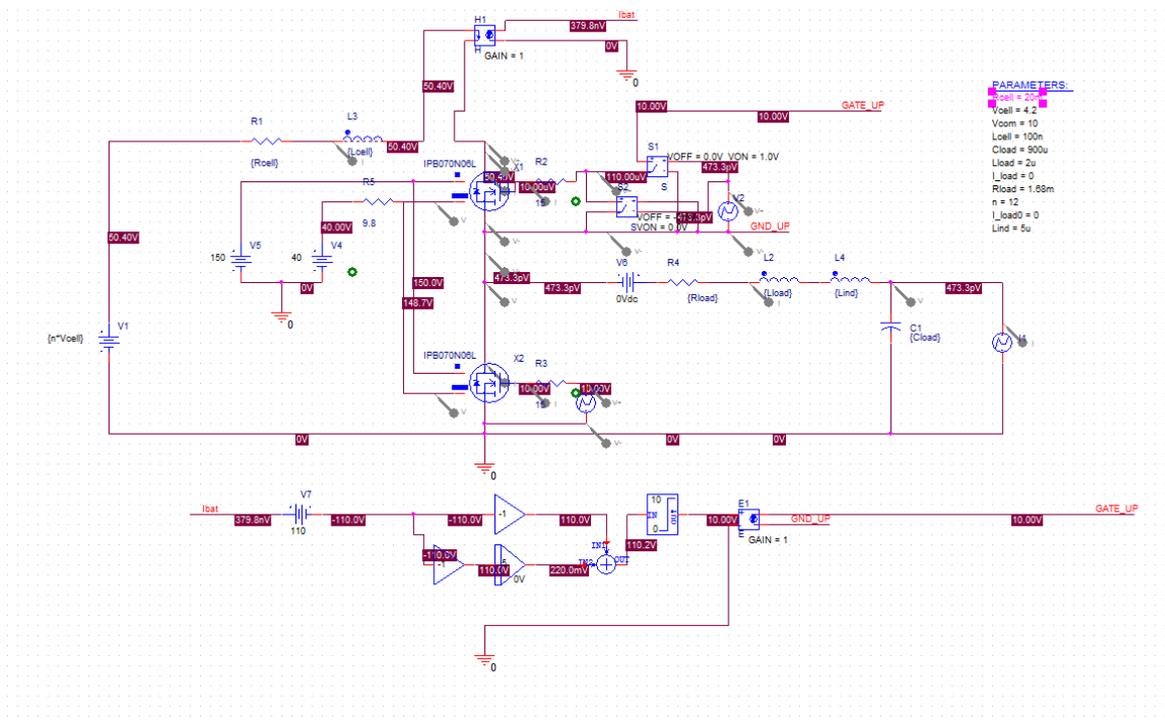


Figura 75

In Figura 29 riportiamo i parametri della simulazione.

Tabella 29

L_{modulo}	100 nH
R_{modulo}	20 mΩ
L_{carico (induttanza del cavo)}	2 μH
L_{ind}	5 μH
L_{cavo}	2 μH
R_{carico (resistenza)}	150 mΩ
V_{moduli (nulla perché non ci sono altri moduli connessi)}	0 V
C_{inverter (condensatore di filtro dal lato capacitivo dell'inverter utilizzatore)}	900 μF
I_{carico (corrente continuativa assorbita dall'inverter lato utilizzatore)}	0 A

In Figura 76 vediamo l'andamento della precarica con inserzione controllata con un anello lineare dissipativo di corrente dell'unico modulo.

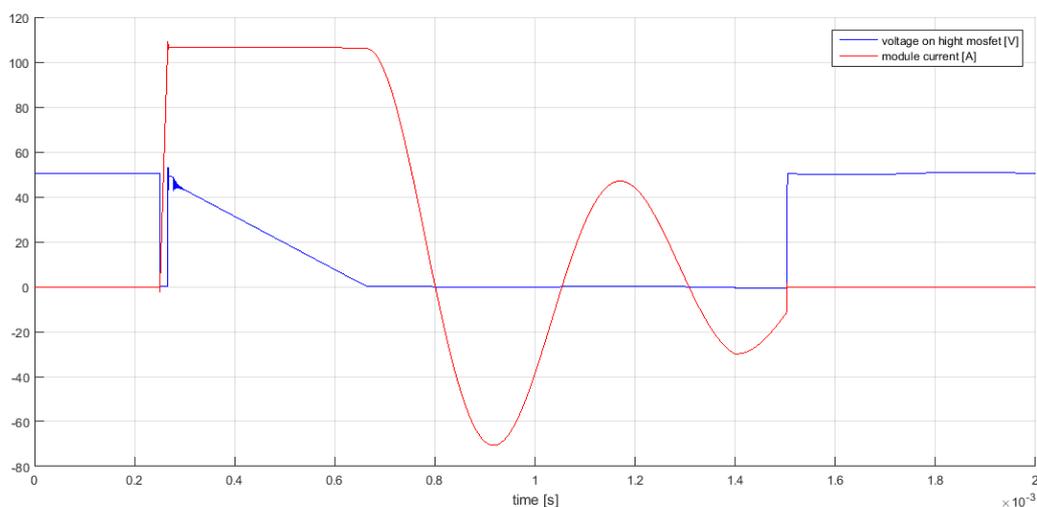


Figura 76

Anche in questo caso vediamo come la corrente sia controllata dall'anello del regolatore.

In Figura 77 vediamo il dettaglio della commutazione di precarica.

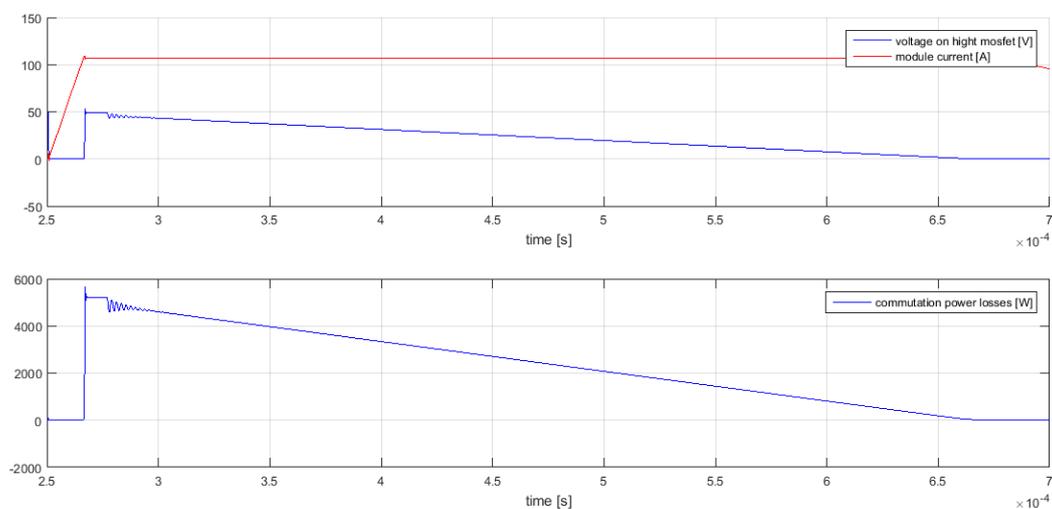


Figura 77

Vediamo dalla Figura 77 come la commutazione anche in questo caso avvenga in un tempo elevato pari a 394.7 μ s dalla Figura 74 troviamo che il tempo di commutazione abbiamo una resistenza termica di 55 mK/W, riportiamo in Tabella 30 il risultato del calcolo di dimensionamento termico.

Tabella 30

Energia dissipata dalla commutazione di on	1000 mJ
Tempo di commutazione di on	394.7 μ s
Potenza media durante la commutazione di turn-on	2533.6 W
Sovratemperatura (minima) calcolata	139.34 $^{\circ}$ C

Precarica di un pacco batteria di 8 moduli con controllo PWM della corrente

In Figura 78 vediamo il modulo e il la rappresentazione del carico.

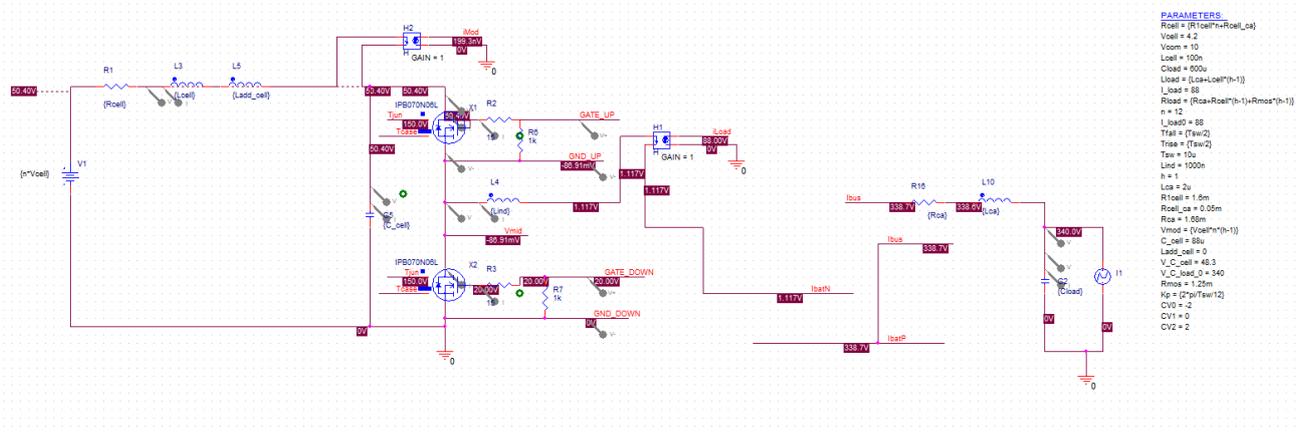


Figura 78

In Figura 79 vediamo l'anello di controllo di corrente e il blocco PWM. Il controllo PWM comprende la presenza di un tempo morto tra le commutazioni di 1µs.

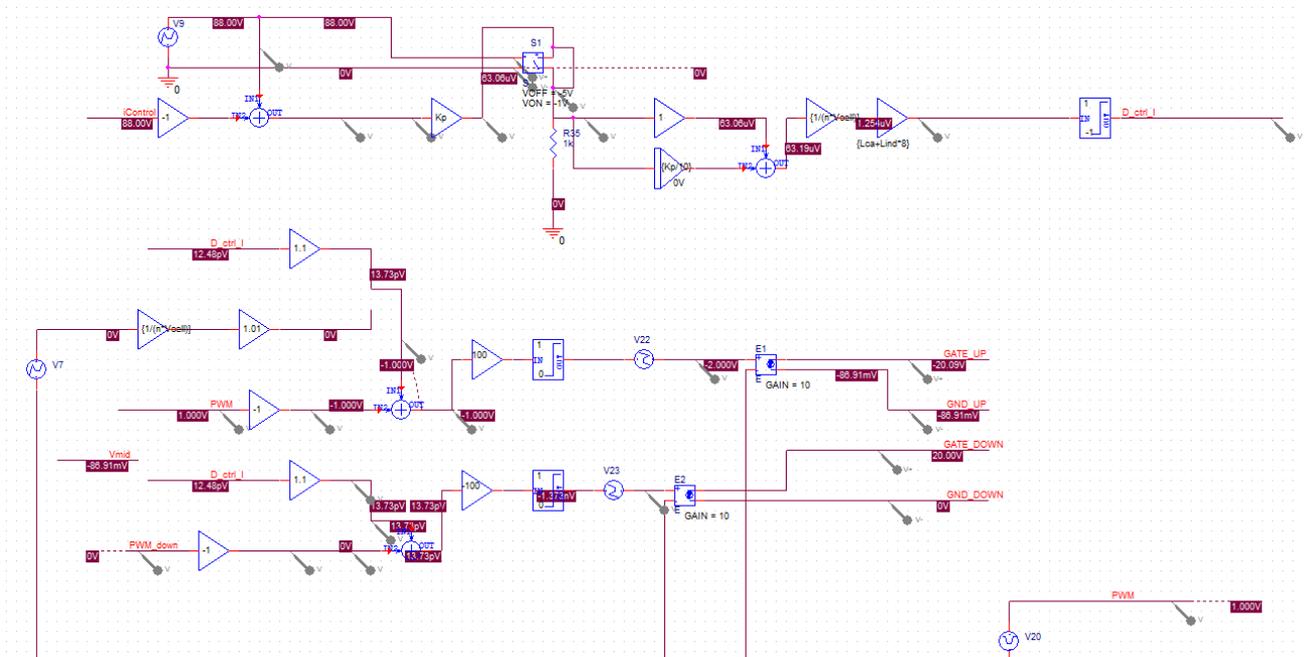


Figura 79

In Tabella 31 ricapitaliamo i parametri della simulazione.

Tabella 31

L_{modulo}	100 nH
R_{modulo}	19.25 m Ω
L_{cavo} (induttanza del cavo)	2 μ H
L_{ind} (induttore aggiuntivo per modulo)	1 μ H
R_{cavo} (resistenza del cavo)	1.68 m Ω
C_{modulo} (capacità lato modulo)	88 μ F
C_{inverter} (condensatore di filtro dal lato capacitivo dell'inverter utilizzatore)	600 μ F
Frequenza di commutazione PWM	100 kHz
Tempo di commutazione	10 μ s
I_{carico} (corrente continuativa assorbita dall'inverter lato utilizzatore)	0 A

La corrente richiesta dal controllo per la simulazione è di 100 A

In Figura 80 vediamo l'andamento dell'inserzione del modulo nel pacco batteria, vediamo la corrente commutata vista dalle celle del modulo in inserzione.

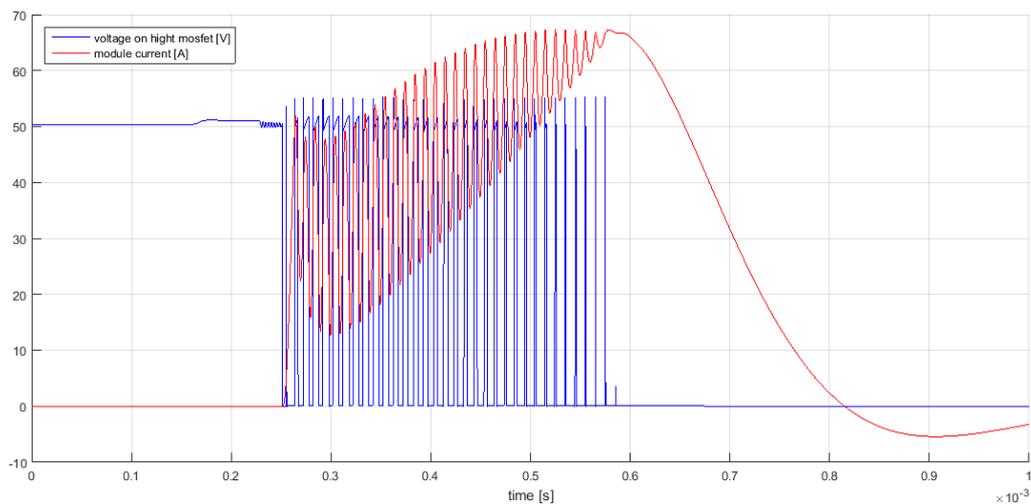


Figura 80

Mentre nella Figura 81 vediamo la corrente che percorre l'interruttore statico (in rosso) e quella il diodo di ricircolo (in nero), possiamo vedere come il controllo limiti adeguatamente la corrente sotto il valore massimo ammissibile dalla cella (110A).

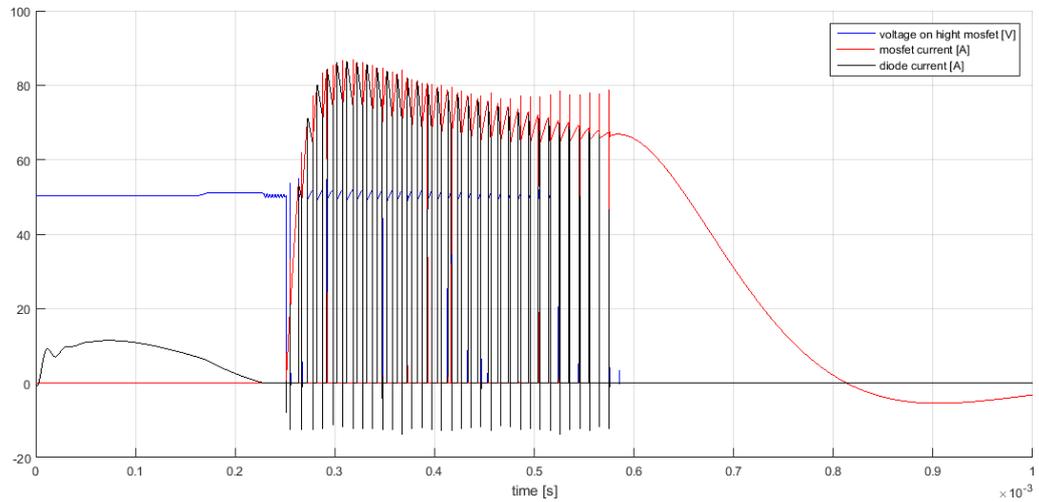


Figura 81

Il picco massimo del ripple è circa 86A molto inferiore alla corrente massima supportabile dalla batteria.

In Figura 82 vediamo in dettaglio la corrente modulata e le relative perdite di commutazione.

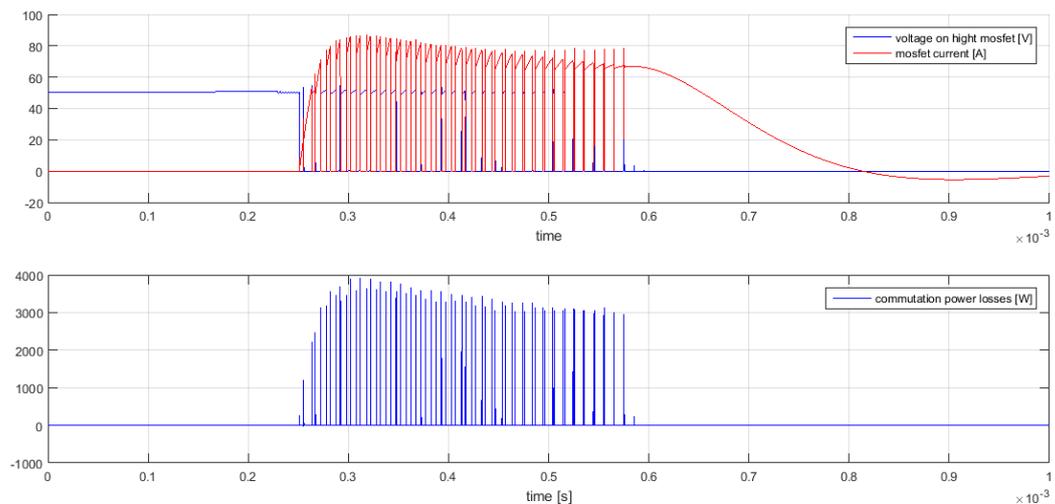


Figura 82

In Figura 83 in vediamo la corrente commutata dalla gamba del modulo intelligente e quindi la corrente vista dal carico.

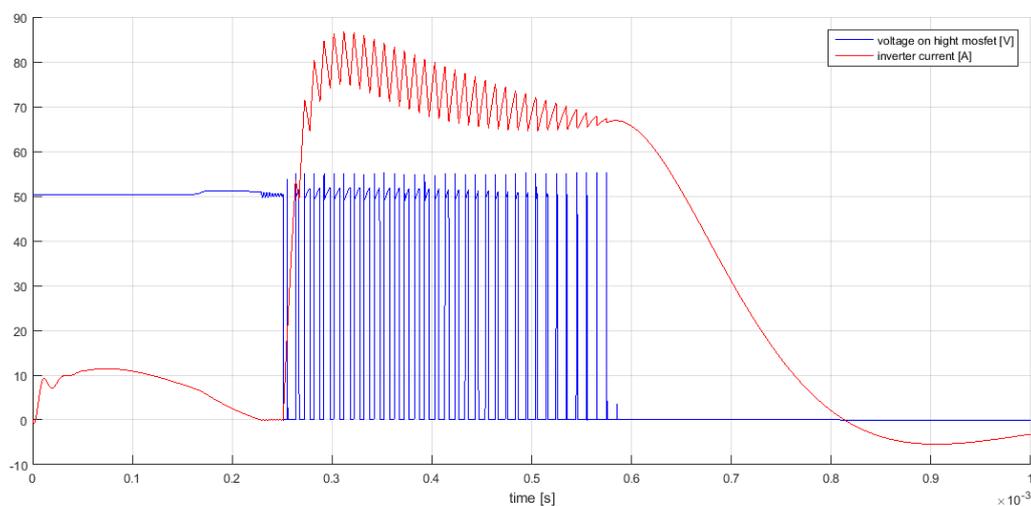


Figura 83

Dalla Figura 83 possiamo vedere invece che la corrente controllata è compresa tra i 60 e 90 A, anche se la corrente richiesta è di 100A, questo errore è dovuto alla limitazione del guadagno proporzionale per la stabilità dell’anello di corrente realizzato in digitale, mentre la regolazione integrale non riesce a compensare l’errore poiché il condensatore caricandosi rapidamente riduce progressivamente il forzamento disponibile.

Mentre la Figura 84 ci mostra l’andamento della corrente sulle celle degli altri moduli (al netto della corrente del condensatore locale del modulo).

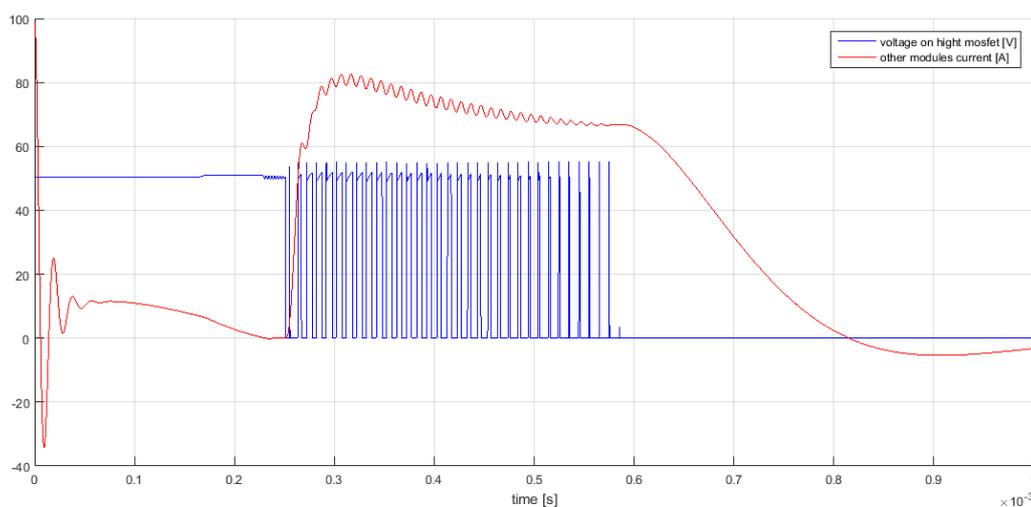


Figura 84

La capacità lato batteria è stata scelta per ottenere un comportamento capacitivo alla frequenza di commutazione scelta di 100 kHz.

In Figura 85 vediamo l'andamento della corrente e tensione sul condensatore lato inverter.

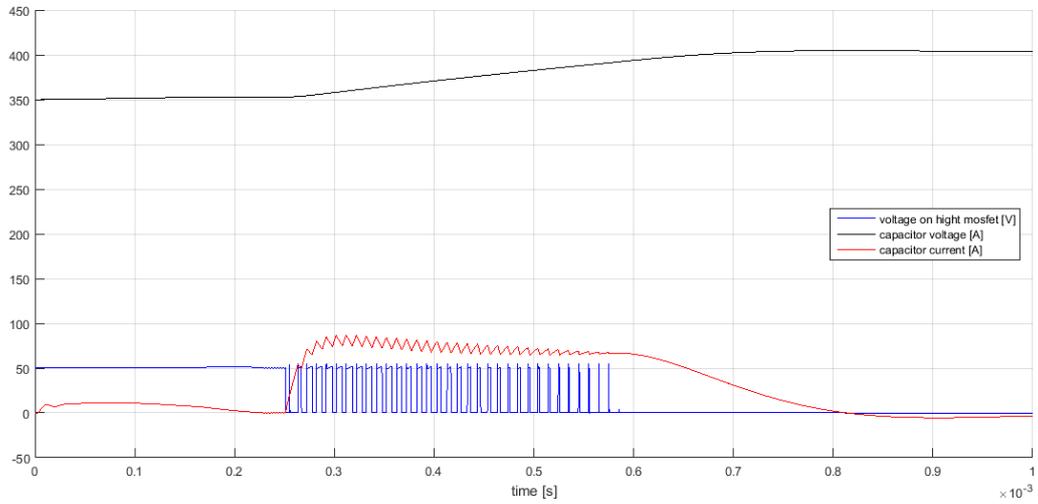


Figura 85

In Figura 86 possiamo vedere la prearica del primo degli otto moduli.

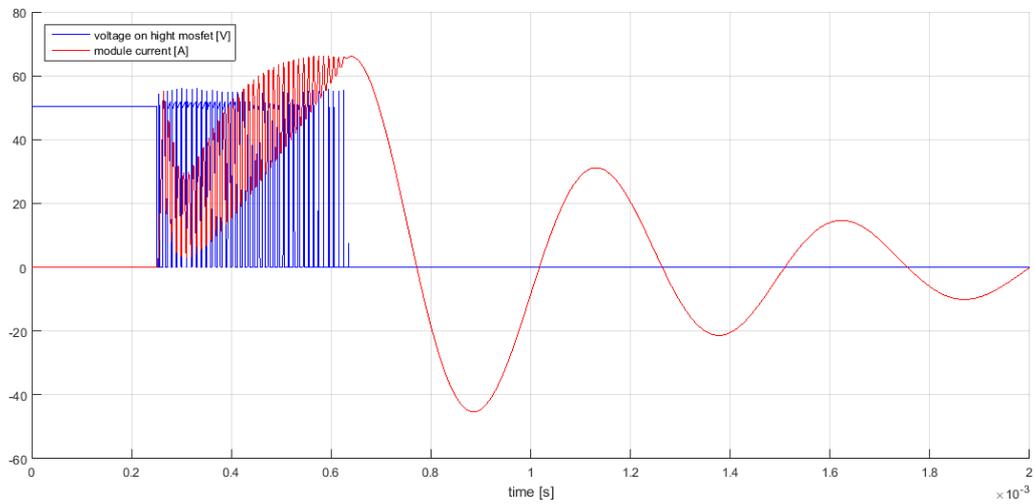


Figura 86

Vediamo delle oscillazioni dovute alla perdite di controllo dell'anello di corrente che satura, queste non sono dannose perché si smorzano abbastanza velocemente e inoltre sono con valore di picco inferiore alla corrente attuata dall'anello.

Mentre in Figura 87 vediamo la corrente del pacco batteria (ossia quella vista dal carico) nell'inserzione del primo modulo.

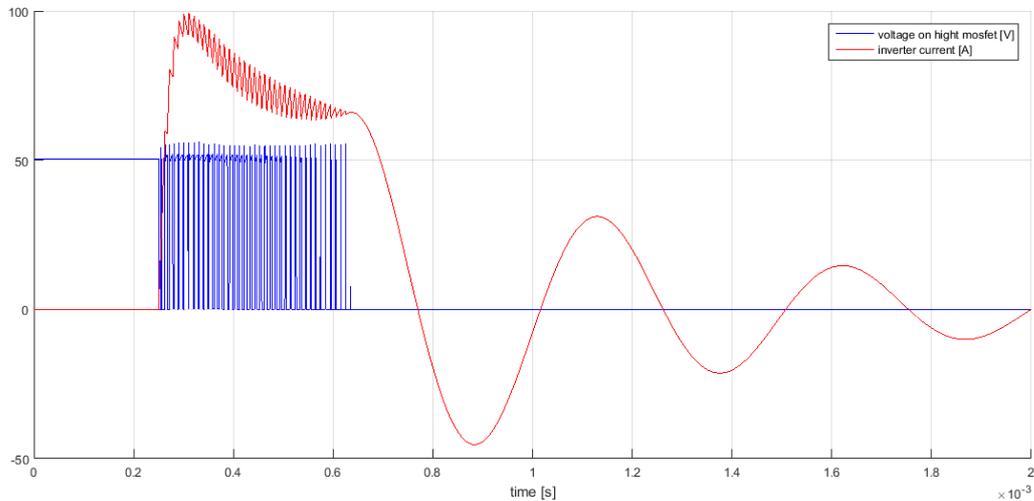


Figura 87

Vediamo le stesse oscillazioni che vedevamo nella Figura 86, che non rappresentano un problema poiché il picco è inferiore al valore comandato, comunque il valore di picco delle oscillazioni può essere limitato richiedendo al regolatore una corrente inferiore come vediamo in Figura 88.

In Figura 88 vediamo infatti come comandando una corrente inferiore le oscillazioni successive vengono limitate in ampiezza.

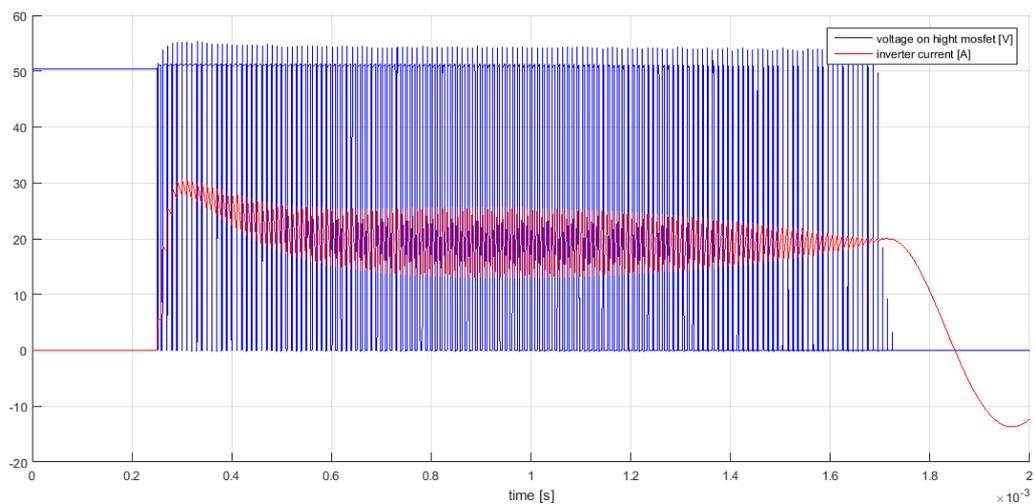


Figura 88

Mentre Figura 89 in possiamo vedere la precarica del secondo modulo, in rosso vediamo la corrente del modulo.

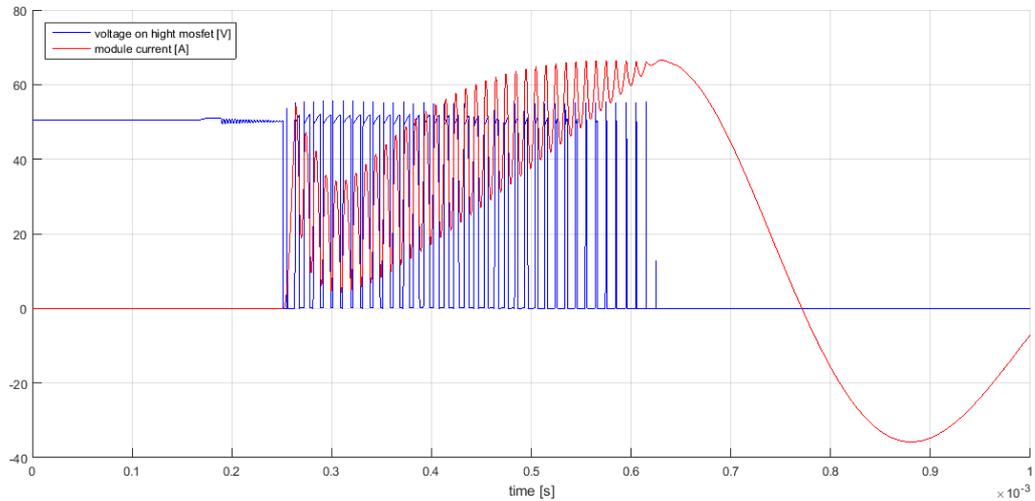


Figura 89

Si vede un comportamento simile alla precarica del primo modulo, solo che per il secondo modulo la corrente di picco delle oscillazioni è minore ed è maggiore lo smorzamento.

4.4. Inserzione di moduli in un pacco batteria con corrente di carico costante

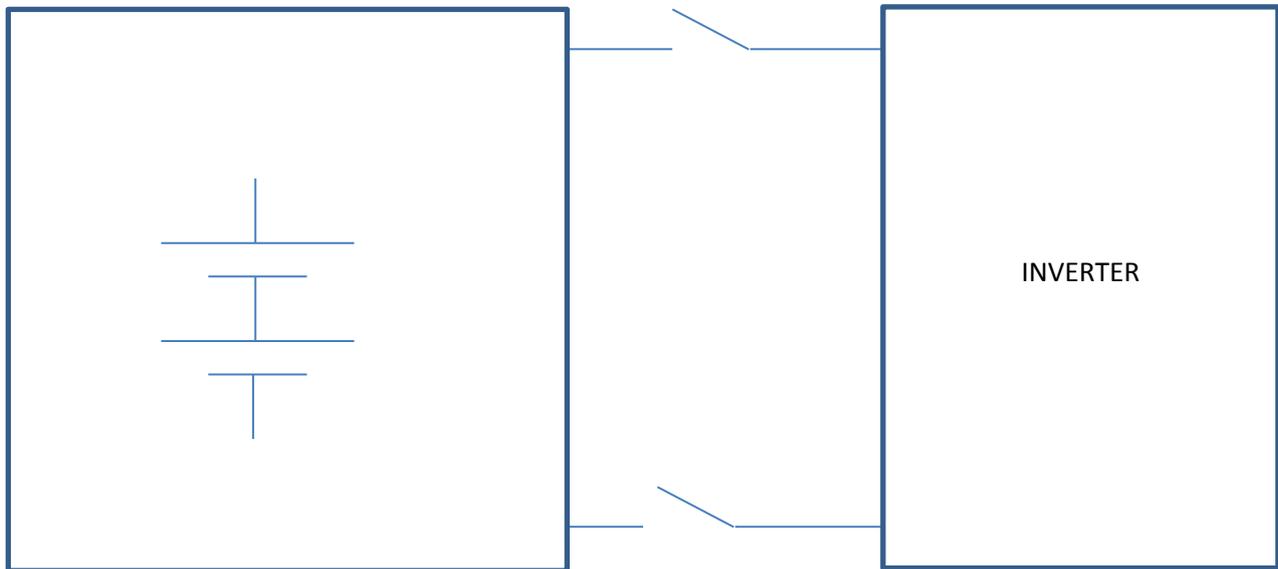


Figura 90

L'inserzione dei moduli è analoga alla precarica ma avviene in condizioni non nulla, la condizione più gravosa è quando la corrente del carico è molto elevata e quindi limitando la corrente a 100 A si hanno elevati tempi necessari alla carica del condensatore.

L'inserzione del modulo prevede le seguenti azioni:

- Per ogni modulo tramite il controllo PWM si pilota una corrente atta a incrementare la tensione del condensatore, questo dipende dal verso della corrente.
- Quando la corrente del pacco batteria $I_b < 0$ si regola una corrente pari a zero o superiore a I_b
- Per corrente di pacco $I_b = 0$ si regola una corrente positiva (in sostanza si carica il condensatore usando l'energia delle batterie).
- Con $I_b > 0$ è il caso peggiore perché si deve usare una corrente positiva maggiore in modulo della stessa I_b e si avrà una transizione inevitabilmente lenta in base a quanto è il margine disponibile rispetto alla massima corrente sopportabile dalla cella.
- Una volta che il modulo 1 è chiuso si ripete la procedura con il modulo successivo fino a che tutti i moduli non risultino essere chiusi.

Inserzione di un modulo con corrente di carico costante positiva di un Pacco batteria costituito da 8 moduli

In Figura 91 il modello utilizzato per la simulazione.

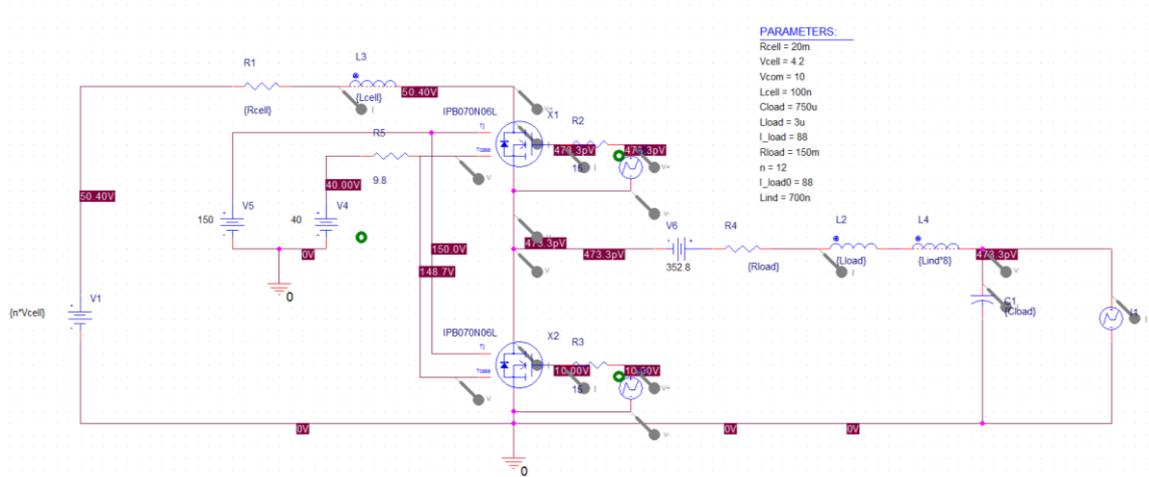


Figura 91

Nella Tabella 32 riepiloghiamo i dati utilizzati per la simulazione.

Tabella 32

L_{modulo}	100 nH
R_{modulo}	20 mΩ
L_{carico} (induttanza del cavo e degli altri 7 moduli connessi esclusi gli induttori)	3 μH
L_{ind}	700 nH
L_{cavo}	2 μH
R_{carico} (resistenza del cavo e degli altri 7 moduli connessi)	150 mΩ
V_{moduli} (tensione dei restanti 7 moduli connessi)	352.8 V
C_{inverter} (condensatore di filtro dal lato capacitivo dell'inverter utilizzatore)	750 μF
I_{carico} (corrente continuativa assorbita dall'inverter lato utilizzatore)	88 A

Nella Figura 92 vediamo la commutazione di inserzione del modulo.

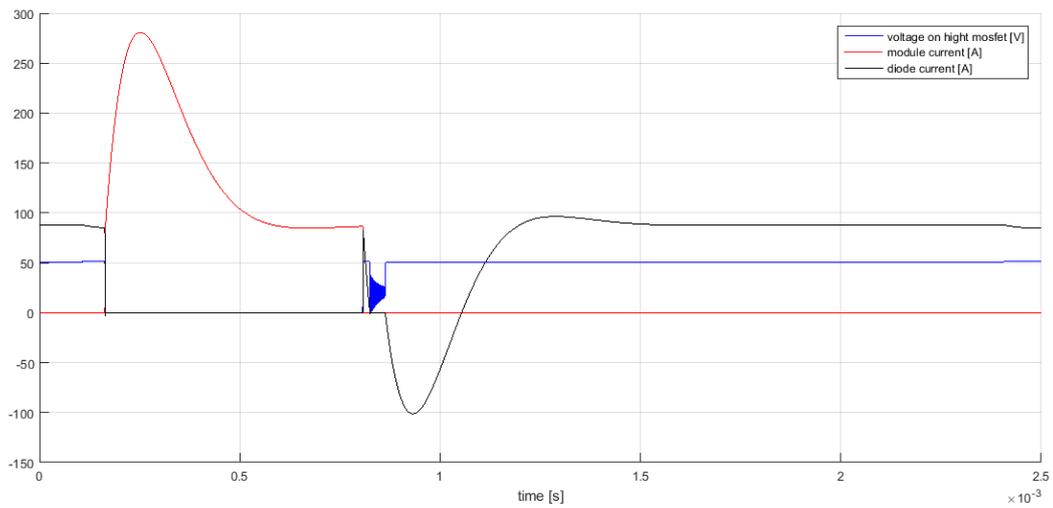


Figura 92

Vediamo come la sovracorrente si somma alla corrente del carico portando ad un sovracorrente massima di 280 A.

In Figura 93 vediamo in dettaglio l'andamento della commutazione di chiusura del mosfet alto.

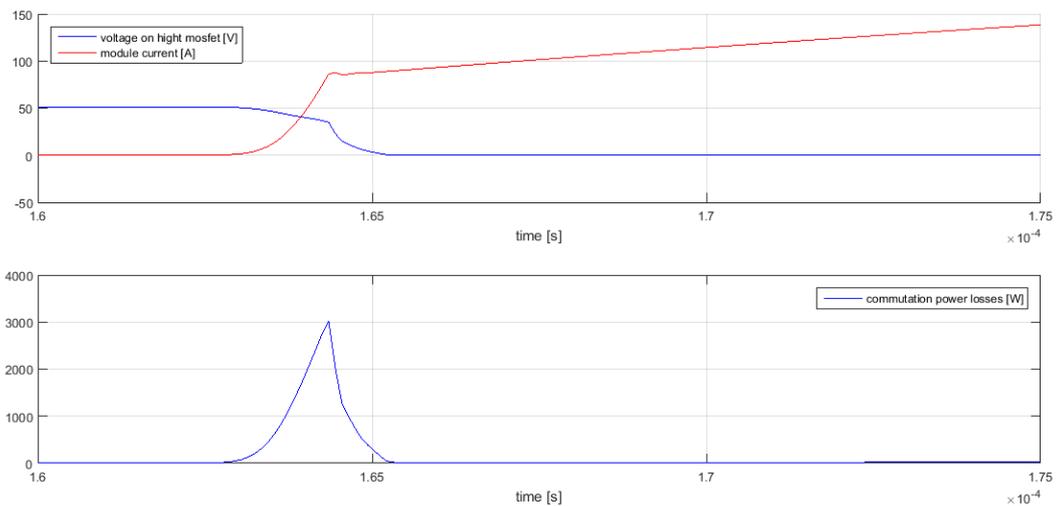


Figura 93

Vediamo come la commutazione sia breve per una transizione di on di 2.46 μ s e una energia dissipata di 2.35 mJ.

In Figura 94 vediamo la commutazione di apertura.

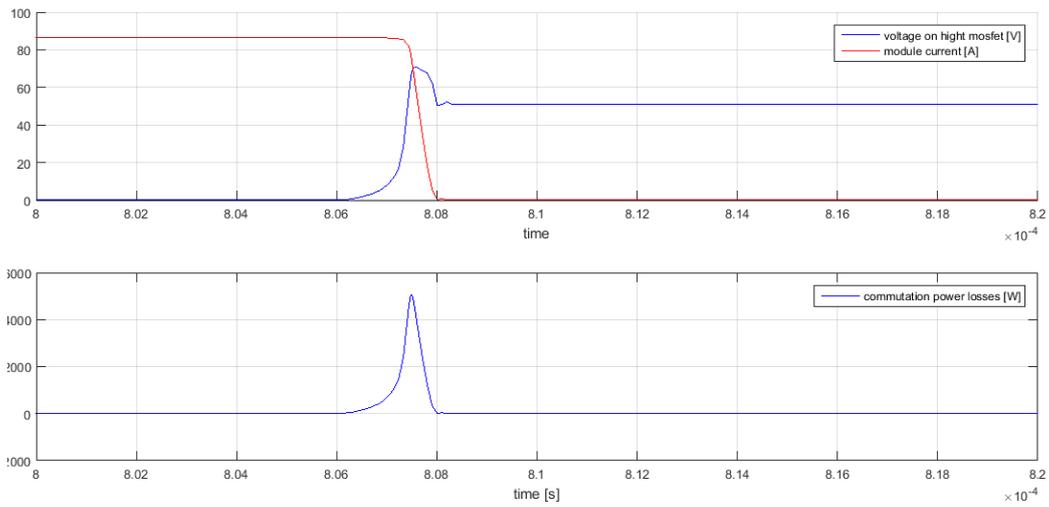


Figura 94

Mentre Figura 95 in vediamo l'evoluzione della tensione del condensatore lato inverter.

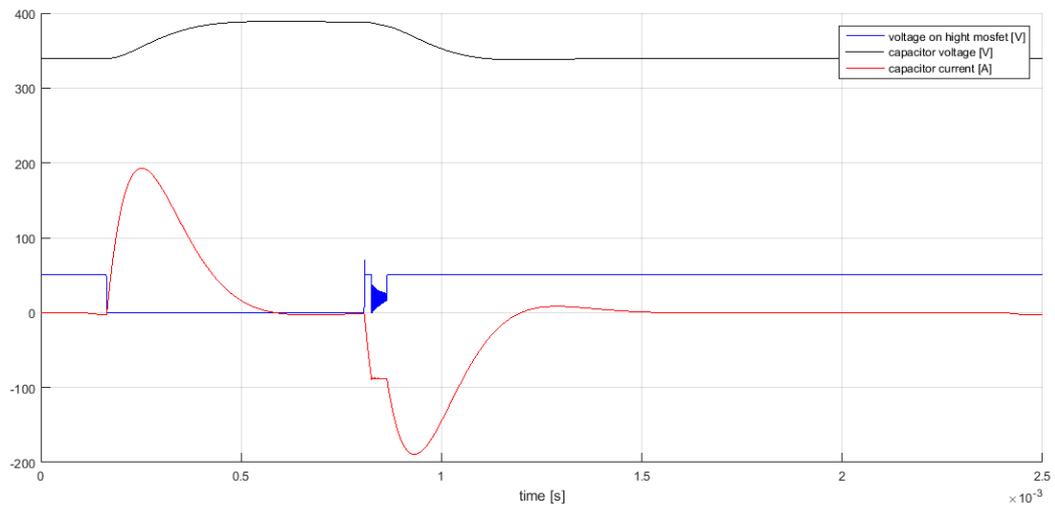


Figura 95

In Figura 96 vediamo l'andamento della corrente di pacco.

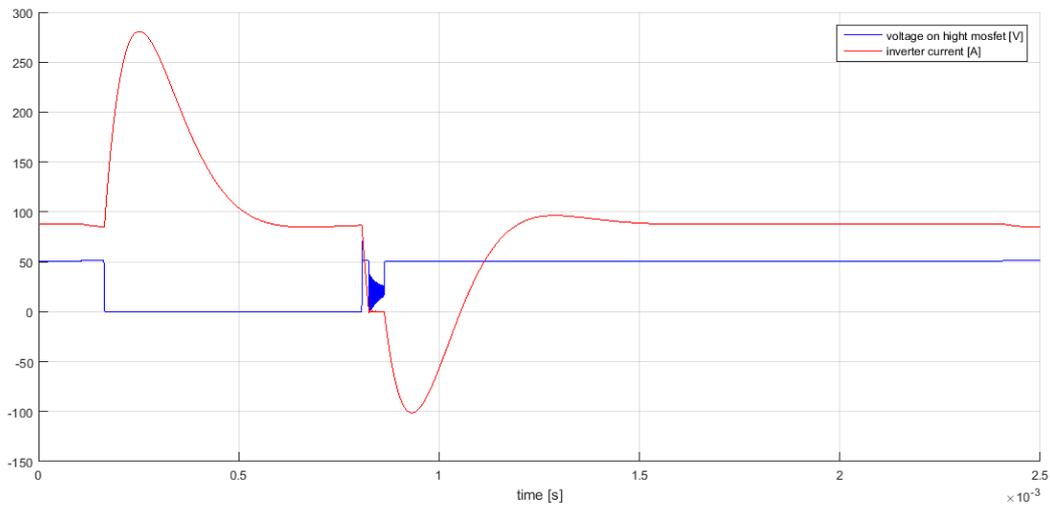


Figura 96

Tabella 33

	Tempo totale di commutazione	Perdite di commutazione
Commutazione di on	2.46 μ s	2.3498 mJ
Commutazione di off	1.875 μ s	2.3601 mJ

Inserzione di un modulo con corrente di carico costante di un Pacco batteria costituito da 8 moduli con controllo lineare della corrente

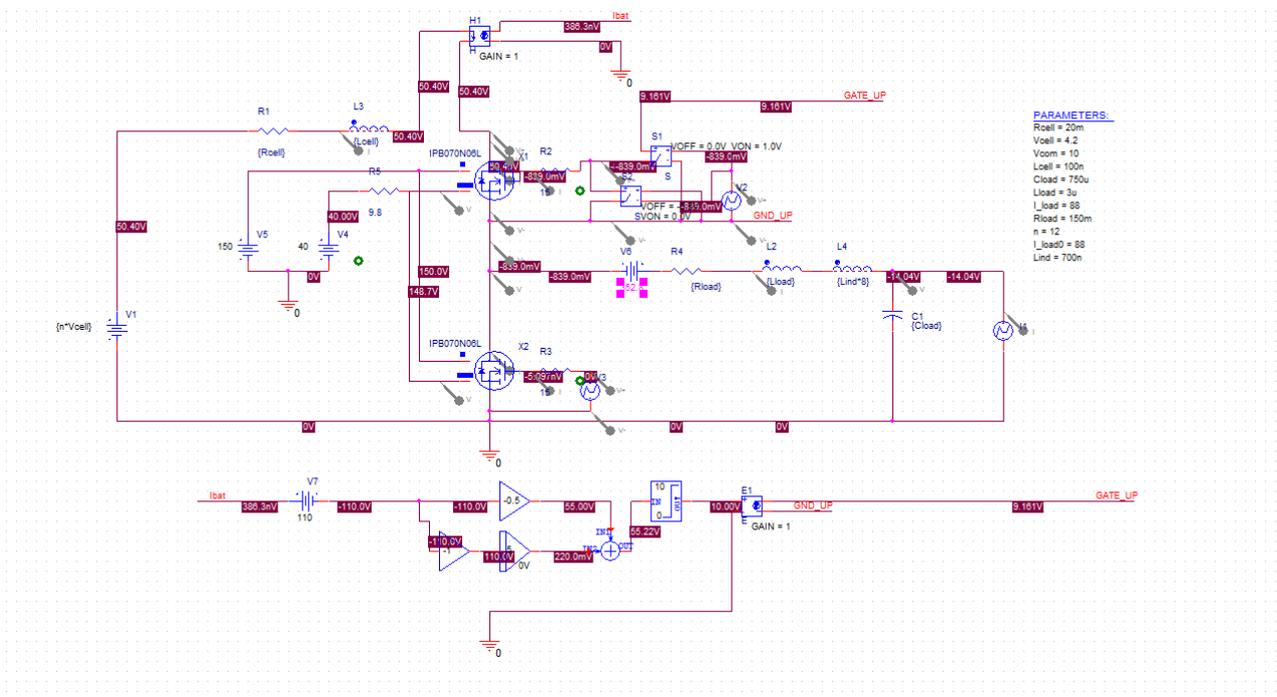


Figura 97

Nella Tabella 34 ricapitoliamo i dati della simulazione.

Tabella 34

L_{modulo}	100 nH
R_{modulo}	20 mΩ
L_{carico} (induttanza del cavo e degli altri 7 moduli connessi esclusi gli induttori)	3 μH
L_{ind}	700 nH
L_{cavo}	2 μH
R_{carico} (resistenza del cavo e degli altri 7 moduli connessi)	150 mΩ
V_{moduli} (tensione dei restanti 7 moduli connessi)	352.8 V
C_{inverter} (condensatore di filtro dal lato capacitivo dell'inverter utilizzatore)	750 μF
I_{carico} (corrente continuativa assorbita dall'inverter lato utilizzatore)	88 A

In Figura 98 vediamo l'inserzione del modulo nella serie e come la carica del condensatore visto la minore corrente di forzamento disponibile (poiché il carico richiede alla batteria la massima corrente continuativa) risulti molto più estesa nel tempo.

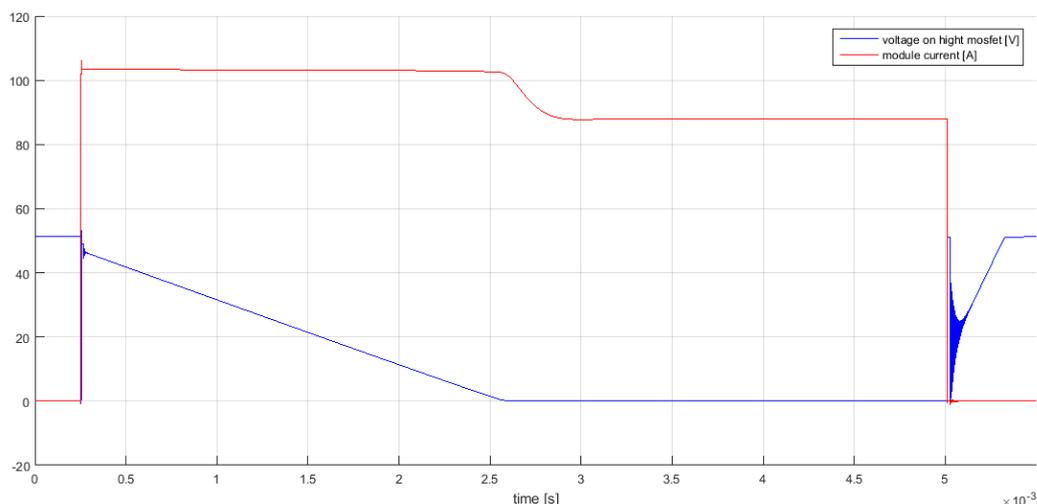


Figura 98

Vediamo subito come il tempo richiesto per la carica che avviene con regolazione lineare di corrente da parte dell'interruttore statico risulti del tutto irragionevolmente lungo, con la conseguenza di una potenza termica dissipata intollerabile per il componente.

In Figura 99 vediamo l'andamento della commutazione in relazione al comando del mosfet alto.

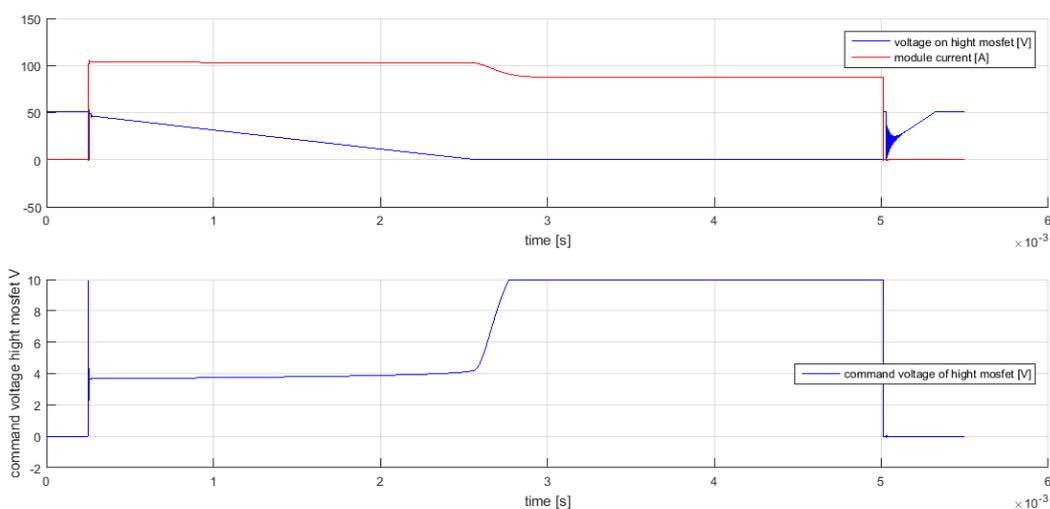


Figura 99

Vediamo Figura 100 l'andamento di tensione e corrente del condensatore.

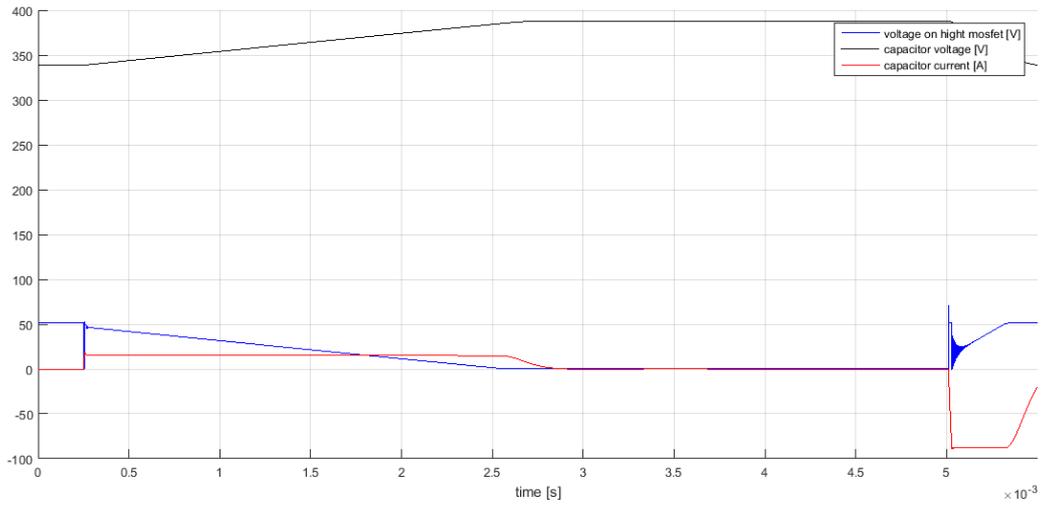


Figura 100

L'andamento della tensione del condensatore è a rampa per effetto della corrente costante imposta dall'anello lineare dissipativo di corrente.

Inserzione di un modulo con corrente di carico positiva costante di un Pacco batteria costituito da 8 moduli con controllo PWM della corrente

Nella Figura 101 vediamo il modello del circuito utilizzato per la simulazione.

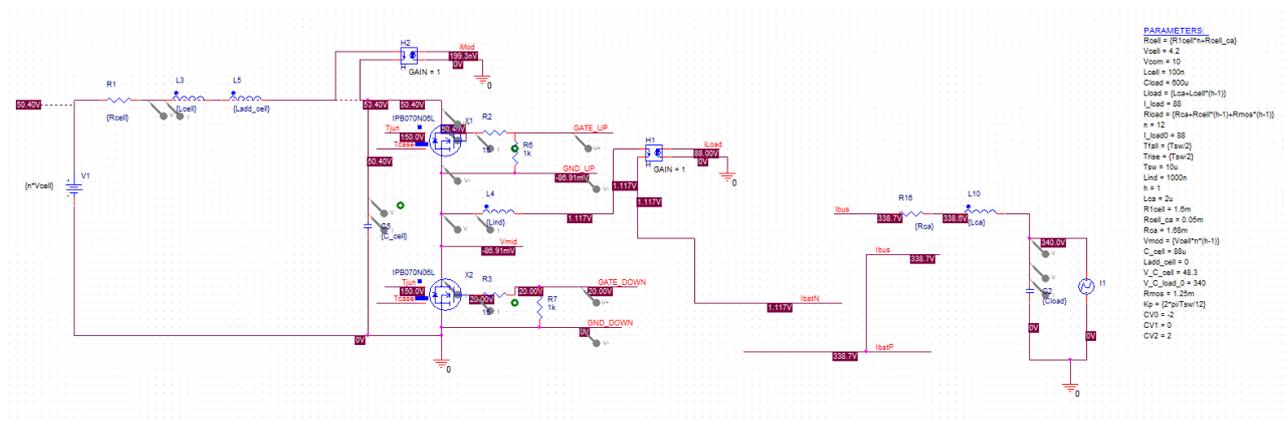


Figura 101

Nella Figura 36 ricapitoliamo i dati usati per la simulazione.

Tabella 35

L_{modulo}	100 nH
R_{modulo}	19.25 mΩ
L_{cavo} (induttanza del cavo)	2 μH
L_{ind} (induttore aggiuntivo per modulo)	1 μH
R_{cavo} (resistenza del cavo)	1.68 mΩ
C_{modulo} (capacità lato modulo)	100 μF
C_{inverter} (condensatore di filtro dal lato capacitivo dell'inverter utilizzatore)	600 μF
I_{carico} (corrente continuativa assorbita dall'inverter lato utilizzatore)	88 A

In Figura 102 vediamo la tensione ai capi dell'interruttore statico alto (in blu) e la corrente del modulo (in rosso)

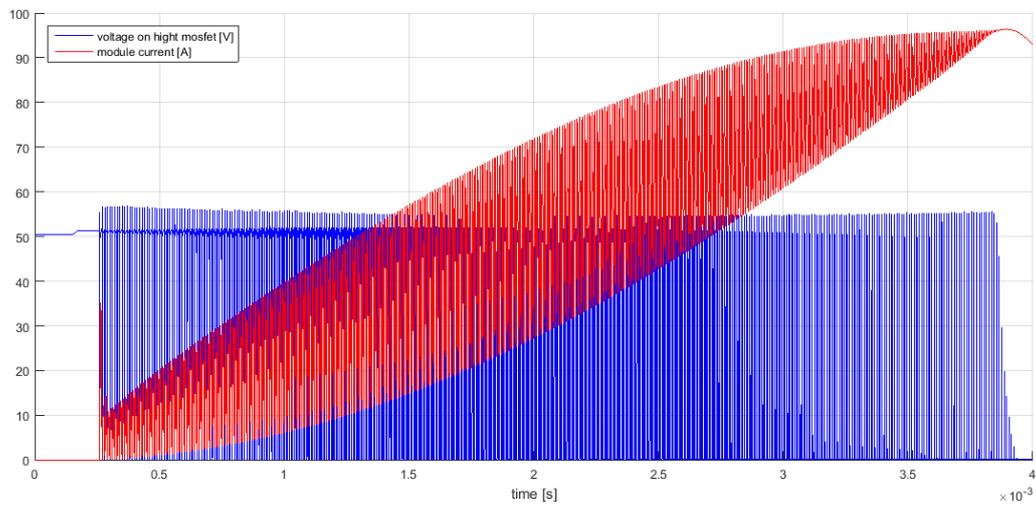


Figura 102

In Figura 103 vediamo la corrente di pacco (in rosso) ossia quella assorbita dall'inverter e in blu la tensione ai capi dell'interruttore alto.

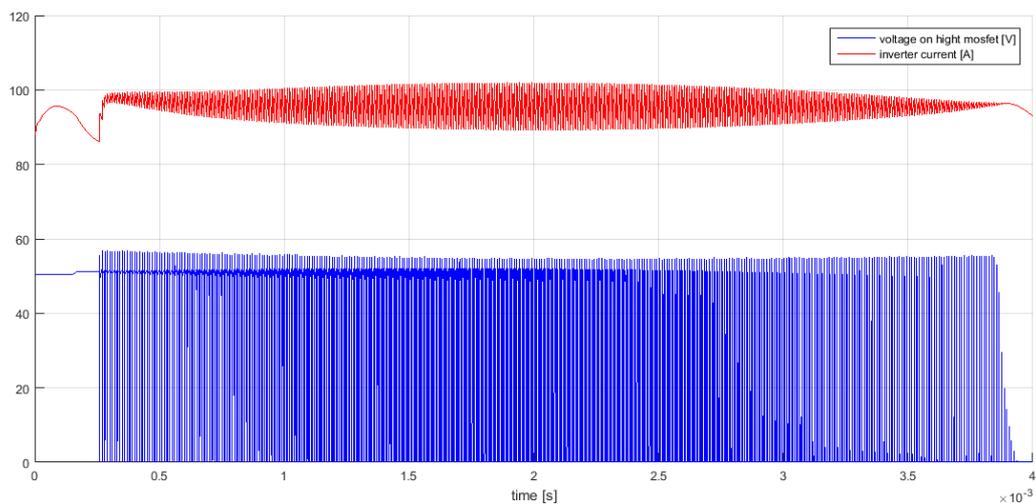


Figura 103

Il regolatore attua una corrente più vicina al valore richiesto rispetto ai casi di controllo PWM in precarica.

Mentre in Figura 104 vediamo la corrente che attraversa il mosfet in rosso, e in blu nel grafico della parte inferiore la potenza istantanea dissipata in commutazione.

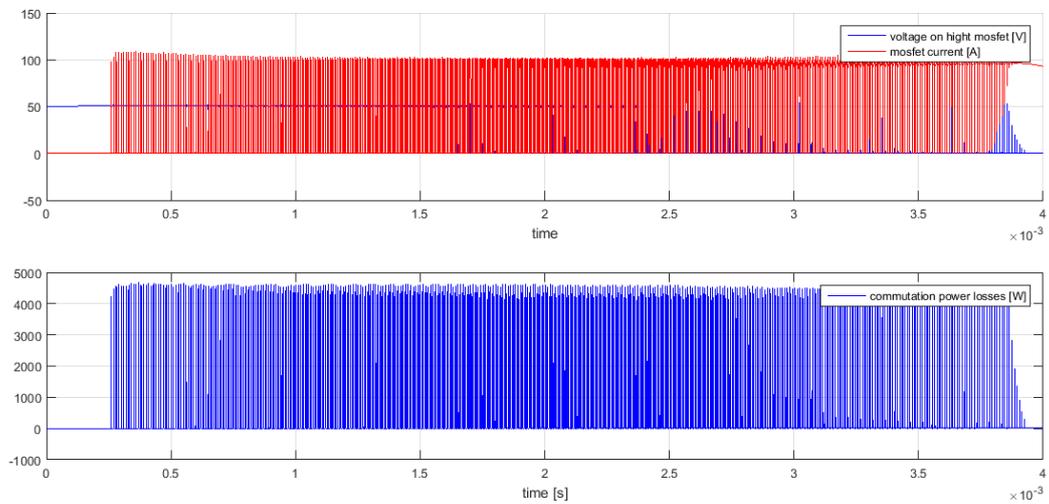


Figura 104

Nella Figura 105 vediamo l'andamento della tensione sul condensatore dell'inverter (in nero).

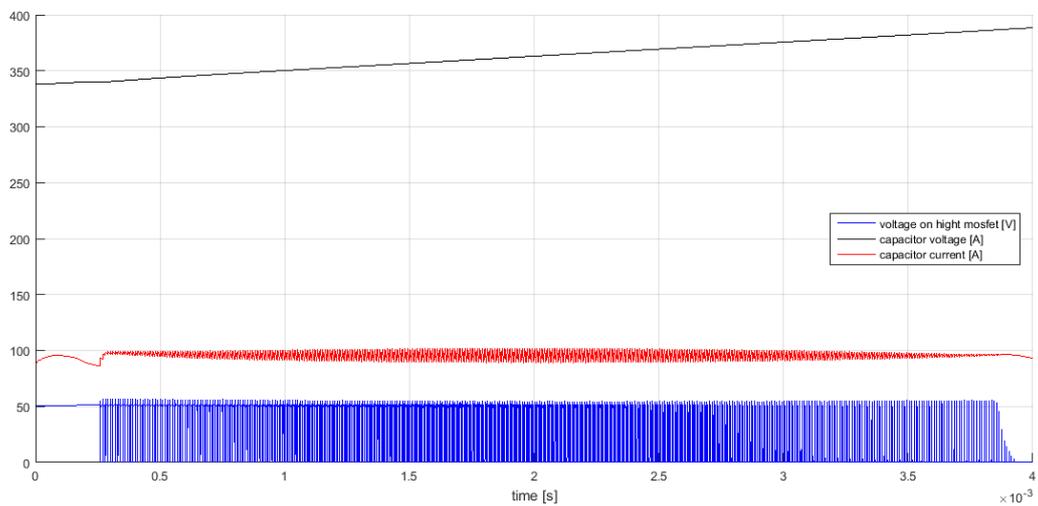


Figura 105

Mentre Figura 106 in vediamo la corrente nelle celle degli altri moduli.

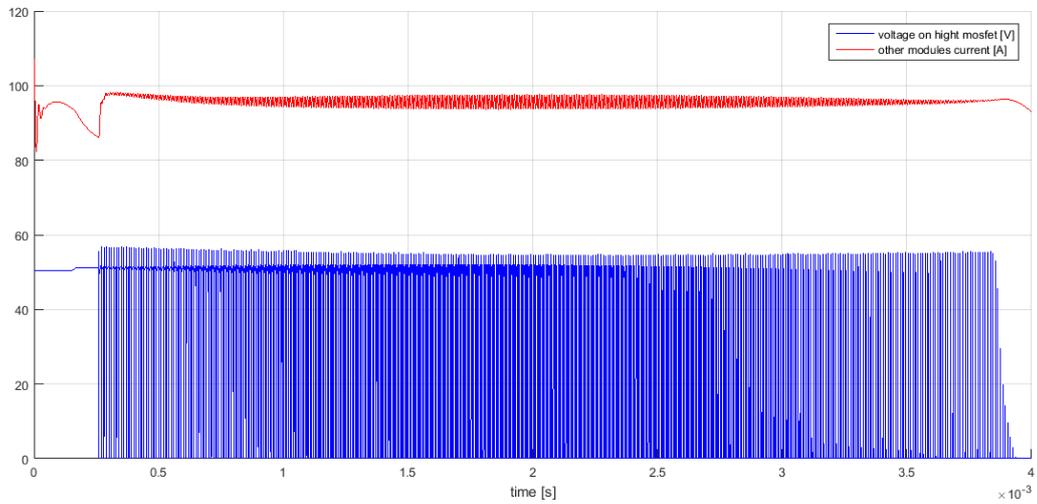


Figura 106

Possiamo vedere dalla Figura 106 come la corrente che percorre gli altri moduli risulta adeguatamente filtrata.

Inserzione di un modulo con corrente di carico negativa costante di un Pacco batteria costituito da 8 moduli con controllo PWM della corrente

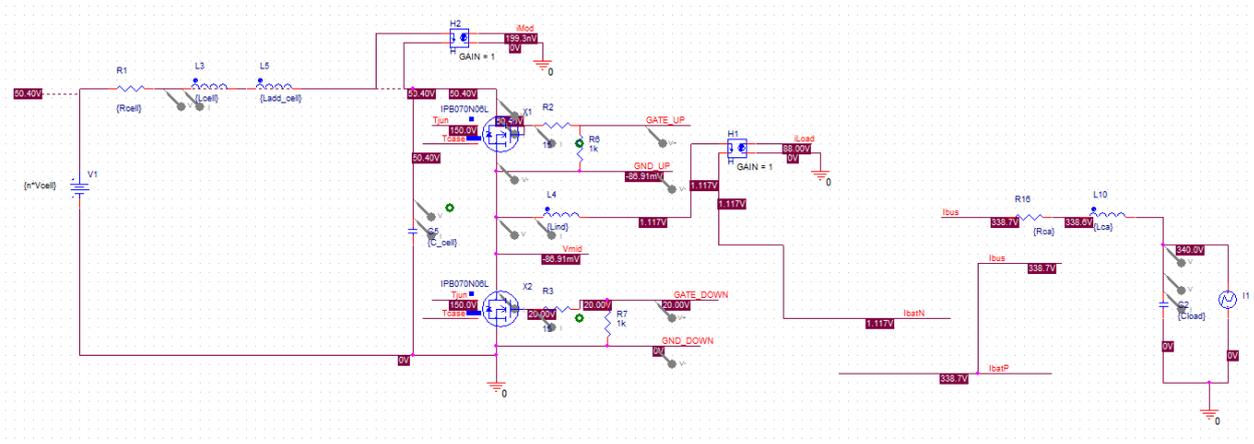


Figura 107

Nella Tabella 36 ricapitoliamo i dati usati per la simulazione delle commutazioni.

Tabella 36

L_{modulo}	100 nH
R_{modulo}	19.25 m Ω
L_{cavo} (induttanza del cavo)	2 μ H
L_{ind} (induttore aggiuntivo per modulo)	1 μ H
R_{cavo} (resistenza del cavo)	1.68 m Ω
C_{modulo} (capacità lato modulo)	100 μ F
C_{inverter} (condensatore di filtro dal lato capacitivo dell'inverter utilizzatore)	600 μ F
I_{carico} (corrente continuativa assorbita dall'inverter lato utilizzatore)	-88 A

In Figura 108 vediamo l'andamento della tensione sul mosfet alto e la corrente di batteria

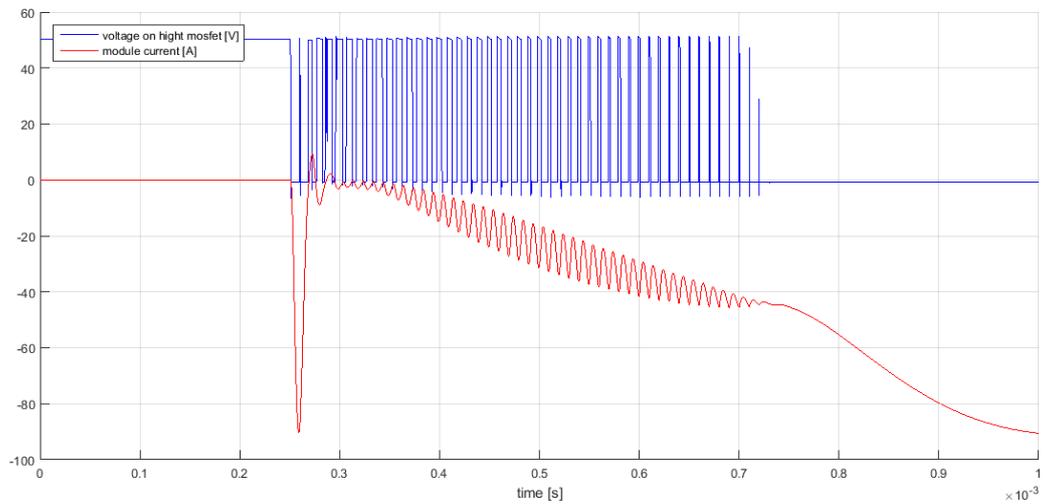


Figura 108

Vediamo come il sistema raggiunge rapidamente il regime questo perché pilotando una corrente nulla nel pacco batteria, forziamo tutta la corrente di carica nel condensatore.

Mentre in Figura 109 vediamo in rosso la corrente che passa per gli altri moduli (filtrata dalla capacità locale).

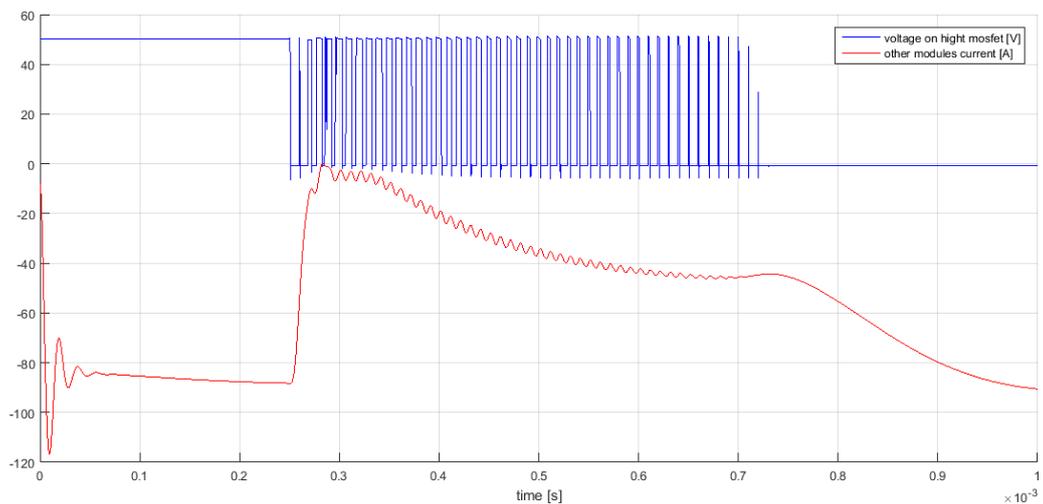


Figura 109

Calcolo delle perdite di commutazione per il dimensionamento termico

Le perdite possono essere calcolate tramite la formula.

Equazione 21

$$E_{sw} = \frac{1}{2}VI\Delta t_{comm}$$

Dove E_{sw} è l'energia dissipata durante il perdio di commutazione, mentre Δt_{comm} vale:

Equazione 22

$$\Delta t_{comm} = \Delta t_{turn-on} + \Delta t_{turn-off}$$

Mentre la potenza media dissipata dipende dalla frequenza e vale

Equazione 23

$$P_{sw} = \frac{E_{sw}}{T_{sw}}$$

Il tempo di commutazione non può essere ridotto a piacere poiché dipende anch'esso dalla tensione e dalla corrente commutata oltre che dalle caratteristiche elettriche del interruttore comandato. In questi casi si calcola empiricamente il tempo di commutazione come.

Equazione 24

$$\Delta t_{comm} = \frac{2E_{sw}}{VI}$$

La potenza totale dissipata è pari alla potenza dissipata dall'interruttore comandato e quella del diodo.

Equazione 25

$$P_{tot} = v_{eq,SW}(I)I \cdot D + \frac{1}{2}VI\Delta t_{comm SW} + \frac{1}{2}VI\Delta t_{comm FW} + v_{eq,FW}(I)I \cdot (1 - D)$$

Il mosfet ha un comportamento fortemente resistivo quindi possiamo dire che le perdite di conduzione sono pari a:

Equazione 26

$$P_{cond-SW} = R_{DS-on}I_L^2$$

Le perdite di commutazione sono pari a 10,5 W nel caso di corrente a 88A.

Tabella 37 Mosfet che commuta la corrente

$P_{\text{conduzione}}$ interruttore statico ($I_L=88A$)	10.5 W
$P_{\text{conduzione}}$ interruttore statico ($I_L=100A$)	13.5 W
$P_{\text{conduzione}}$ interruttore statico ($I_L=110A$)	16.4 W
$E_{\text{comm apertura}}$ ($V=50V, I_L=104.6$)	0.6116 mJ
$\Delta t_{\text{comm apertura}}$	233.88 ns
$E_{\text{comm chiusura}}$ ($V=51.7V, I_L=99$)	0.3297 mJ
$\Delta t_{\text{comm chiusura}}$	128.83 ns
$P_{\text{comm apertura}}$	32.97 W
$P_{\text{comm chiusura}}$	61.16 W
P_{comm}	94.13 W
Δt_{comm}	362.71 ns
$P_{\text{commutazione}}$ interruttore statico ($V=50 V, I_L=88A, f=100kHz$)	79.8 W
$P_{\text{commutazione}}$ interruttore statico ($V=50 V, I_L=88A, f=33kHz$)	26.6 W
$P_{\text{commutazione}}$ interruttore statico ($V=50 V, I_L=100A, f=100kHz$)	90.7 W
$P_{\text{commutazione}}$ interruttore statico ($V=50 V, I_L=110A, f=100kHz$)	99.8 W
$P_{\text{diss mosfet worst case}}$ ($V=50 V, I_L=110A, f=100kHz$)	116 W
$P_{\text{diss mosfet worst case}}$ ($V=50 V, I_L=100A, f=100kHz$)	104.2 W

In Figura 110 vediamo in dettaglio l'andamento della commutazione dello switch e la potenza dispersa.

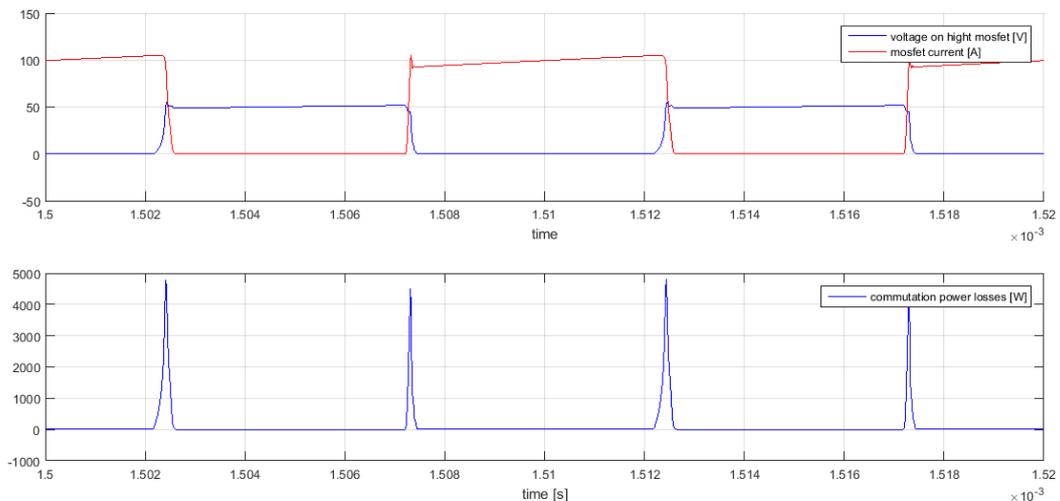


Figura 110

In Figura 111 vediamo invece l'andamento della potenza dissipata dal mosfet funzionante da diodo.

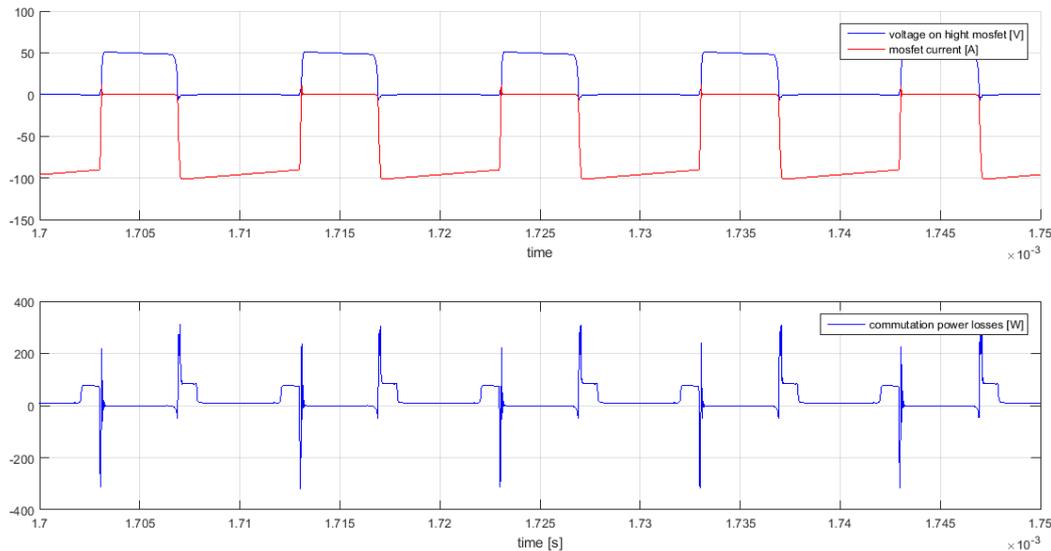


Figura 111

Si può vedere come le commutazioni sono sia di breve durata che di bassa potenza.

Si può anche vedere come il tempo morto tra la commutazione di apertura del mosfet alto e di chiusura del mosfet basso genera un aumento delle dissipazioni per conduzione.

La resistenza in conduzione del mosfet durante il tempo morto è pari a circa 8.38 mΩ, circa otto volte superiore alla resistenza dell'interruttore statico chiuso.

Tabella 38 Interruttore statico funzionante da diodo

P_{conduzione} interruttore statico (I_L=88A)	10.5 W
P_{conduzione} interruttore statico (I_L=100A)	13.5 W
P_{conduzione} interruttore statico (I_L=110A)	16.4 W
Potenza dissipata durante il funzionamento da diodo (I_d=100.5)	84.73 W
Resistenza di on durante il funzionameto da diodo (V_{gs}=0)	8.38 mΩ
Durata tempo morto	1 μs
Potenza dissipata durante il tempo morto (I_L=110A ,f=100 kHz)	20.27 W
Potenza dissipata durante il tempo morto (I_L=100A ,f=100 kHz)	16.76 W
E_{diss in turn-on (diodo) (V= 50 I_L=100A)}	0.049199 mJ
Δt_{comm}	19.679 ns
P_{diss turn-on (V= 50 I_L=100A)}	4.91 W
P_{diss turn-on (V= 50 I_L=100A)}	5.4 W
P_{diss mosfet worst case (V=50 V I_L=110A, f=100kHz)}	42.7 W
P_{diss mosfet worst case (V=50 V I_L=100A, f=100kHz)}	35.2 W

Per ridurre le perdite di commutazione si è pensato di ridurre la frequenza di commutazione ma questo porta ad un aumento eccessivo dei componenti reattivi necessari, soprattutto per quanto riguarda il condensatore lato batteria.

Tabella 39

L_{modulo}	100 nH
R_{modulo}	19.25 mΩ
L_{cavo} (induttanza del cavo)	2 μH
L_{ind} (induttore aggiuntivo per modulo)	3 μH
R_{cavo} (resistenza del cavo)	1.68 mΩ
C_{modulo} (capacità lato modulo)	300 μF
C_{inverter} (condensatore di filtro dal lato capacitivo dell'inverter utilizzatore)	600 μF
Frequenza di commutazione PWM	33 kHz
Tempo di commutazione	30 μs
I_{carico} (corrente continuativa assorbita dall'inverter lato utilizzatore)	0 A

4.5. Disconnessione Modulo

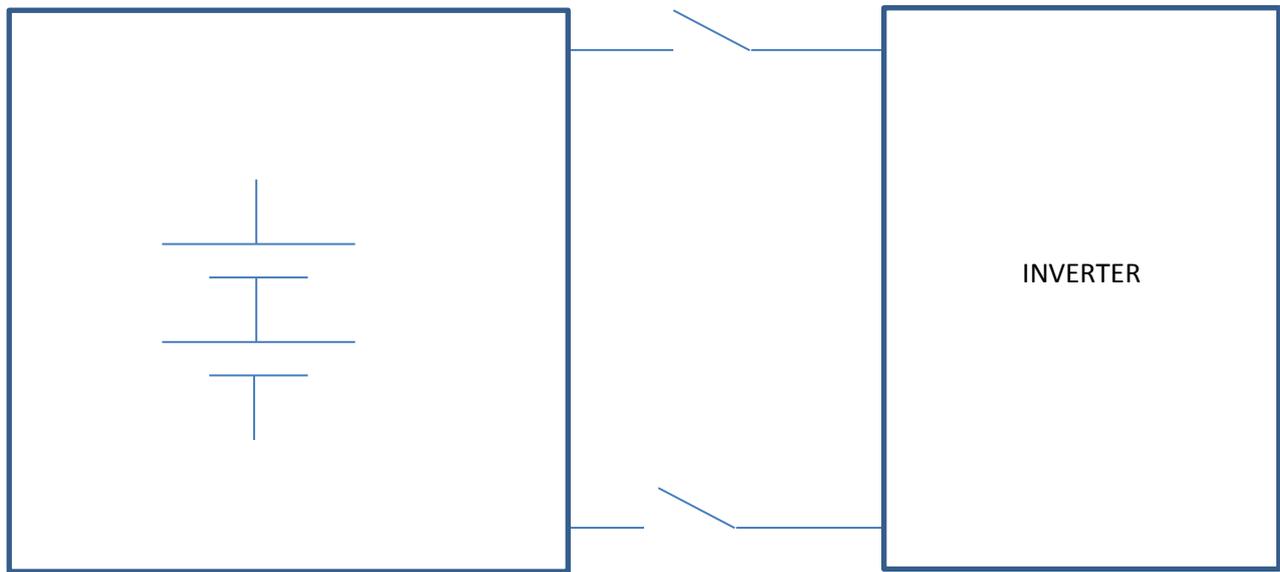


Figura 112

La disconnessione del modulo prevede le seguenti azioni:

- Per ogni modulo tramite il controllo PWM si pilota una corrente atta a ridurre la tensione del condensatore, questa dipende dal verso della corrente.
- Quando la corrente del pacco batteria $I_b > 0$ si regola una corrente pari a zero o inferiore a I_b .
- Per corrente di pacco $I_b = 0$ si regola una corrente negativa (in sostanza si scarica il condensatore caricando le batterie).
- Con $I_b < 0$ è il caso peggiore perché si deve usare una corrente negativa maggiore in modulo della stessa I_b e si avrà una transizione inevitabilmente lenta in base a quant'è il margine disponibile rispetto alla massima corrente sopportabile dalla cella.
- Una volta che il modulo 1 è aperto si ripete la procedura con il modulo successivo fino a che tutti i moduli non sono aperti e a questo punto è possibile aprire i due circuit breaker.

Disinserzione di un modulo con corrente di carico costante positiva di un Pacco batteria costituito da 8 moduli

In Figura 91 il modello utilizzato per la simulazione.

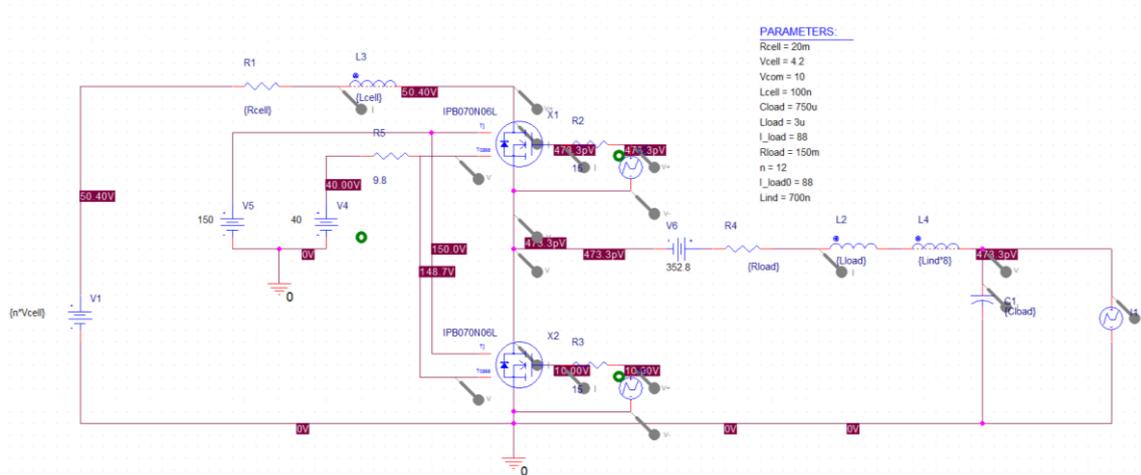


Figura 113

Nella Tabella 32 riepiloghiamo i dati utilizzati per la simulazione.

Tabella 40

L_{modulo}	100 nH
R_{modulo}	20 mΩ
L_{carico} (induttanza del cavo e degli altri 7 moduli connessi esclusi gli induttori)	3 μH
L_{ind}	700 nH
L_{cavo}	2 μH
R_{carico} (resistenza del cavo e degli altri 7 moduli connessi)	150 mΩ
V_{moduli} (tensione dei restanti 7 moduli connessi)	352.8 V
C_{inverter} (condensatore di filtro dal lato capacitivo dell'inverter utilizzatore)	750 μF
I_{carico} (corrente continuativa assorbita dall'inverter lato utilizzatore)	88 A

Nella Figura 92 vediamo la commutazione di disinserimento del modulo.

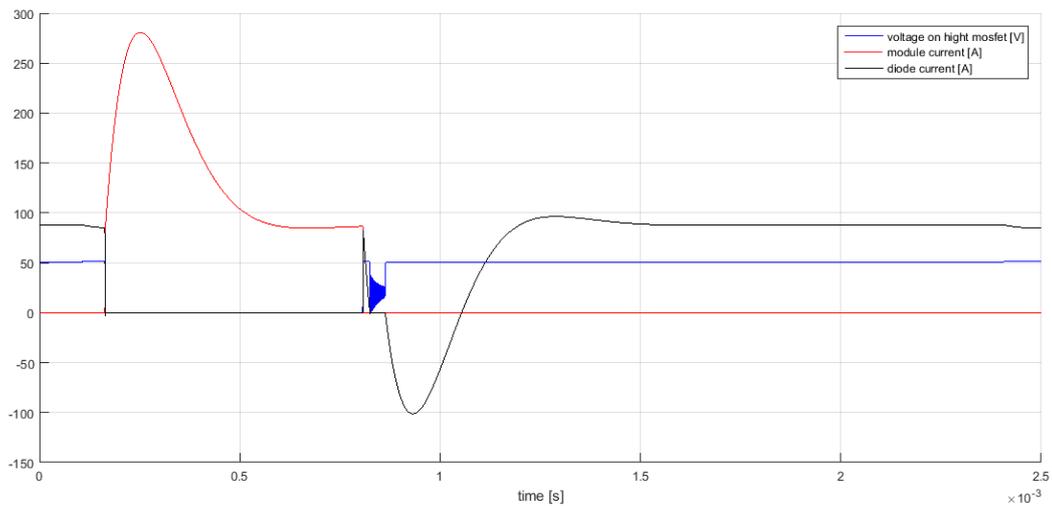


Figura 114

Vediamo che la sovracorrente dovuta alla disinserzione del modulo (corrente del diodo in nero) risulta essere limitata essa è pari a circa -100A, effetto della corrente di carico in questo caso riduce la sovracorrente, la corrente una volta scaricato il condensatore torna al valore della corrente di carico.

In Figura 94 vediamo la commutazione di apertura.

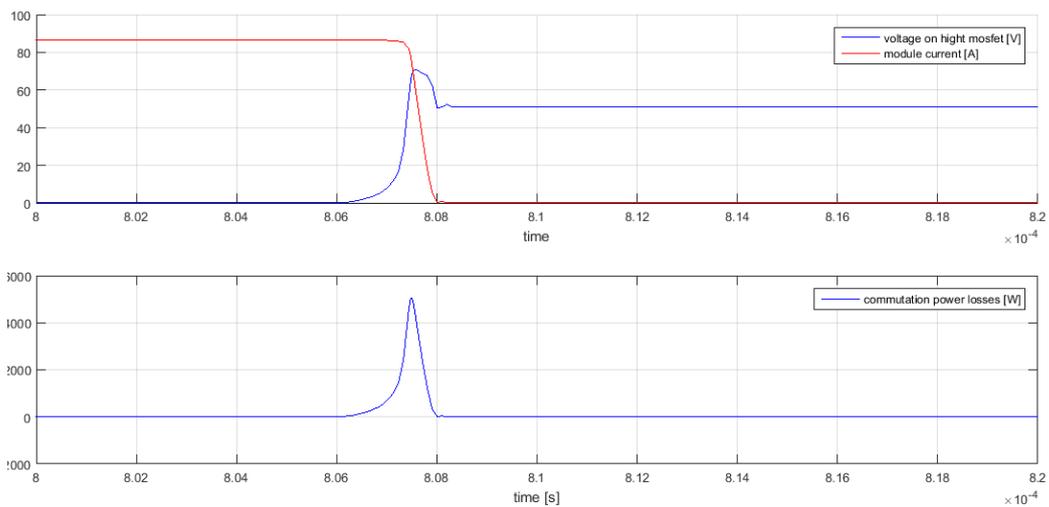


Figura 115

Mentre Figura 95 in vediamo l'evoluzione della tensione del condensatore lato inverter.

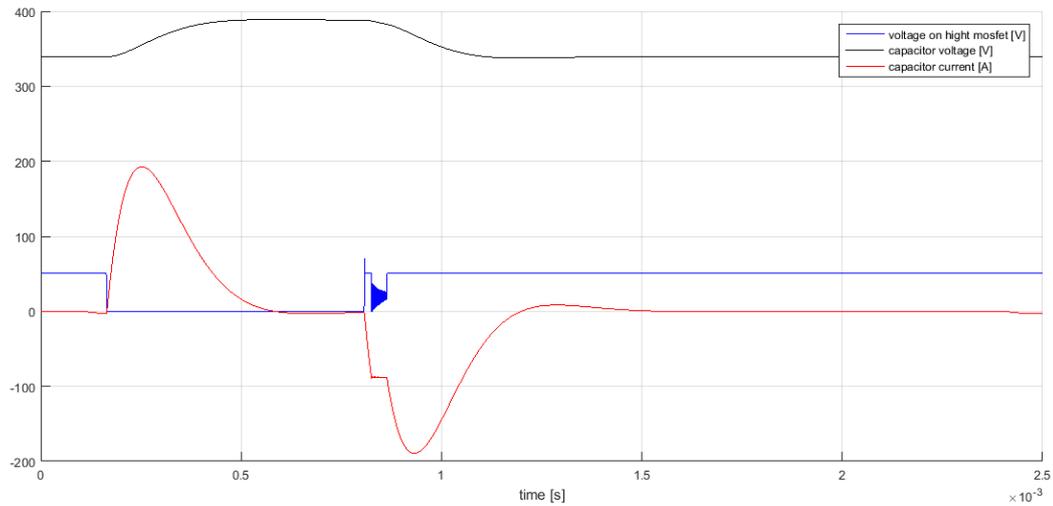


Figura 116

Mentre il condensatore vede una corrente più sostenuta rispetto al pacco batteria, vede in sostanza la corrente del pacco batteria (negativa) a cui si somma la corrente assorbita dall'inverter (anch'essa negativa).

In Figura 96 vediamo l'andamento della corrente di pacco.

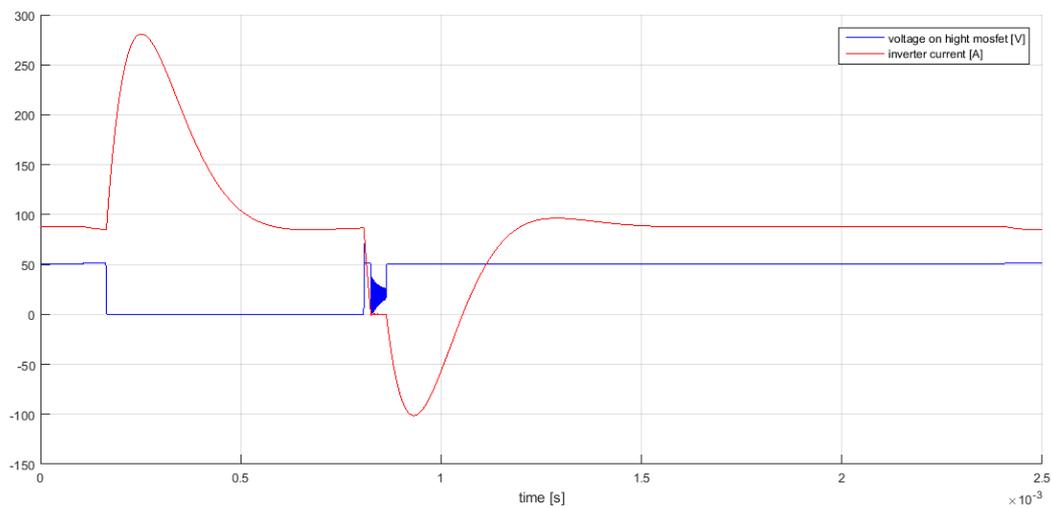


Figura 117

Tabella 41

	Tempo totale di commutazione	Perdite di commutazione
Commutazione di on	2.46 μ s	2.3498 mJ
Commutazione di off	1.875 μ s	2.3601 mJ

Disconnessione di un modulo con corrente di carico positiva costante di un Pacco batteria costituito da 8 moduli con controllo PWM della corrente

Vediamo in Figura 118 il modello del modulo usato per la simulazione.

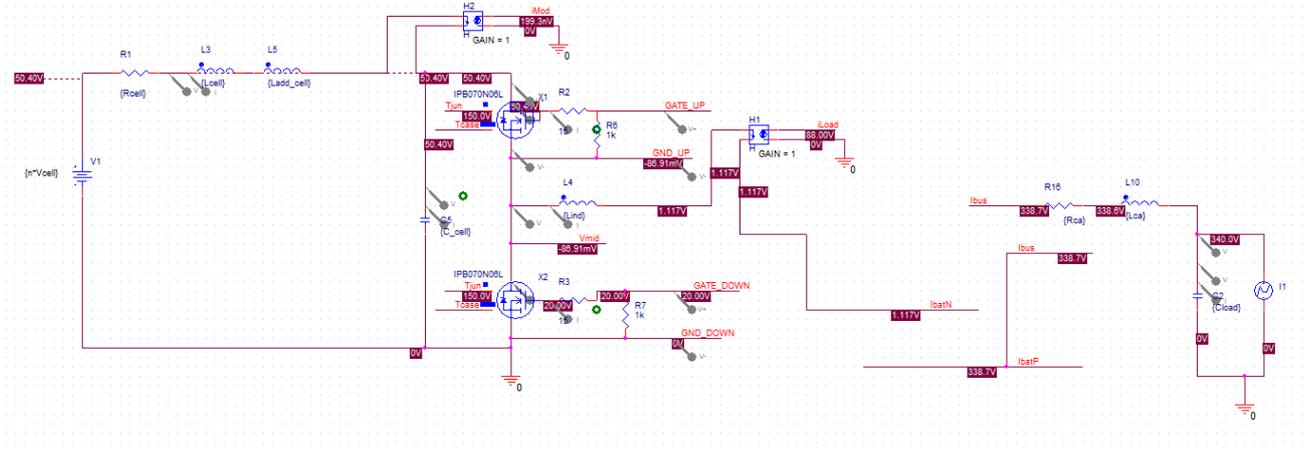


Figura 118

Nella Tabella 42 ricapitoliamo i dati della simulazione.

Tabella 42

L_{modulo}	100 nH
R_{modulo}	19.25 m Ω
L_{cavo} (induttanza del cavo)	2 μ H
L_{ind} (induttore aggiuntivo per modulo)	1 μ H
R_{cavo} (resistenza del cavo)	1.68 m Ω
C_{modulo} (capacità lato modulo)	100 μ F
C_{inverter} (condensatore di filtro dal lato capacitivo dell'inverter utilizzatore)	600 μ F
I_{carico} (corrente continuativa assorbita dall'inverter lato utilizzatore)	88 A

Nella Figura 119 vediamo la tensione ai capi del mosfet alto e la corrente di batteria. La disinserzione è molto rapida perché di fatto la corrente dell'inverter va ad essere prelevata esclusivamente dal condensatore.

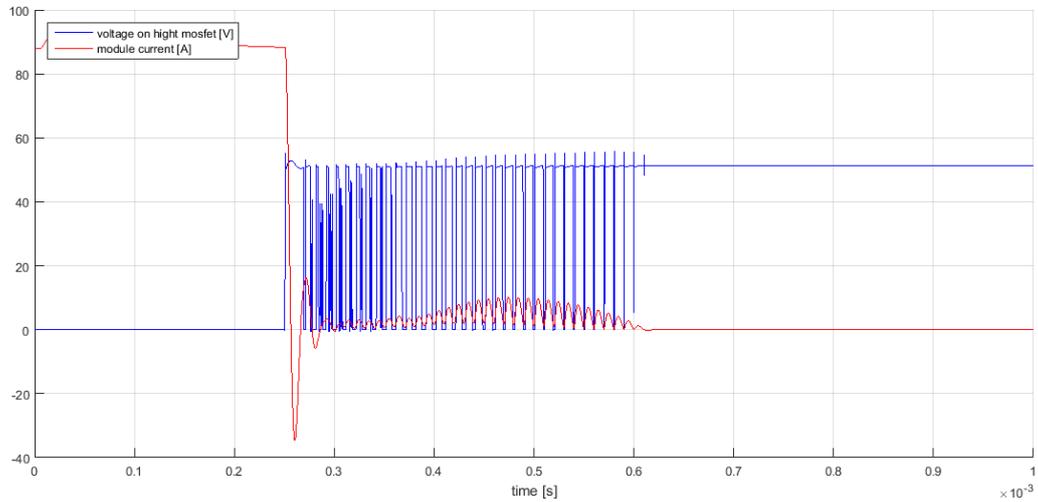


Figura 119

Vediamo in Figura 120 come il controllo attui la corrente richiesta pari a 30A.

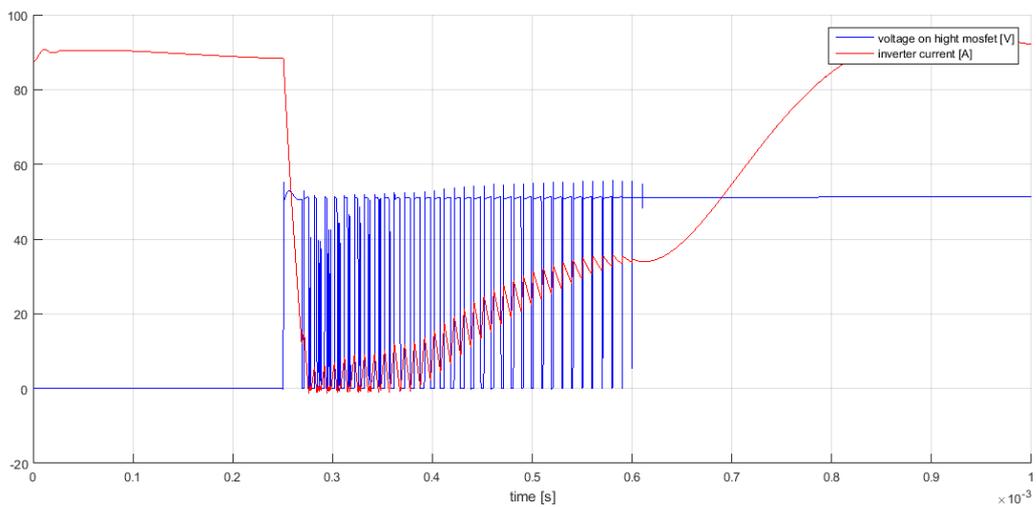


Figura 120

In Figura 121 vediamo l'andamento della tensione del condensatore durante la disinserzione del modulo.

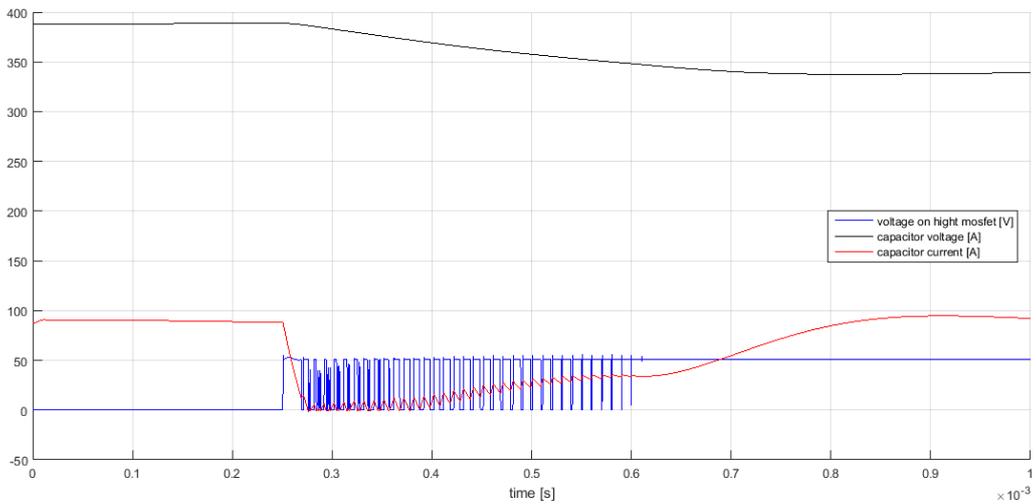


Figura 121

In Figura 122 vediamo le perdite di commutazione.

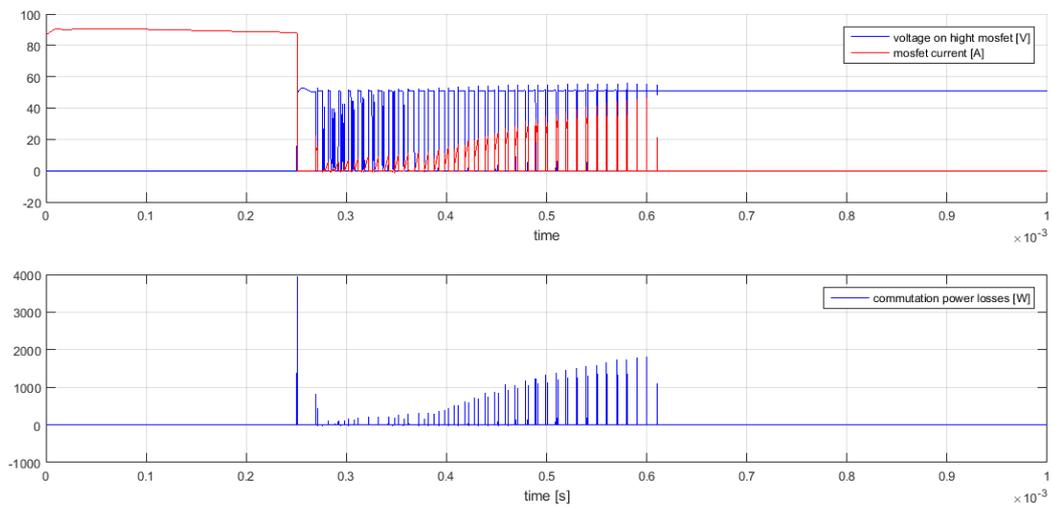


Figura 122

La potenza dissipata cresce nel tempo perché la corrente cresce fino al valore richiesto di 30A.

Disconnessione di un modulo con corrente di carico negativa costante di un Pacco batteria costituito da 8 moduli con controllo PWM della corrente

Vediamo in Figura 123 il modello del modulo usato per la simulazione.

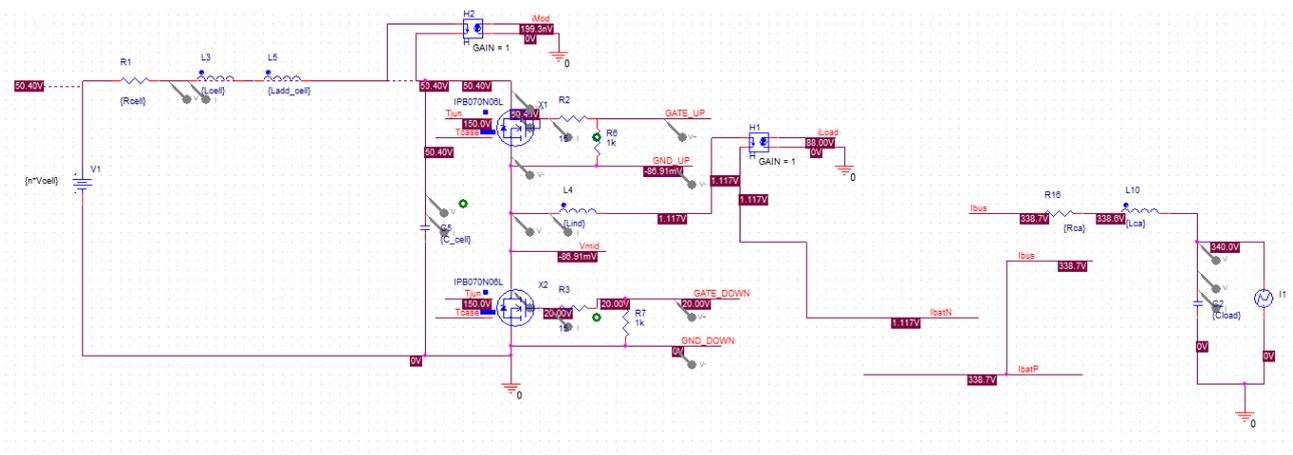


Figura 123

Nella Tabella 43 vediamo i parametri utilizzati per la simulazione.

Tabella 43

L_{modulo}	100 nH
R_{modulo}	19.25 mΩ
L_{cavo} (induttanza del cavo)	2 μH
L_{ind} (induttore aggiuntivo per modulo)	1 μH
R_{cavo} (resistenza del cavo)	1.68 mΩ
C_{modulo} (capacità lato modulo)	100 μF
C_{inverter} (condensatore di filtro dal lato capacitivo dell'inverter utilizzatore)	600 μF
I_{carico} (corrente continuativa assorbita dall'inverter lato utilizzatore)	-88 A

In Figura 124 vediamo la tensione sull'interruttore statico altro (in blu) e la corrente del modulo (in rosso).

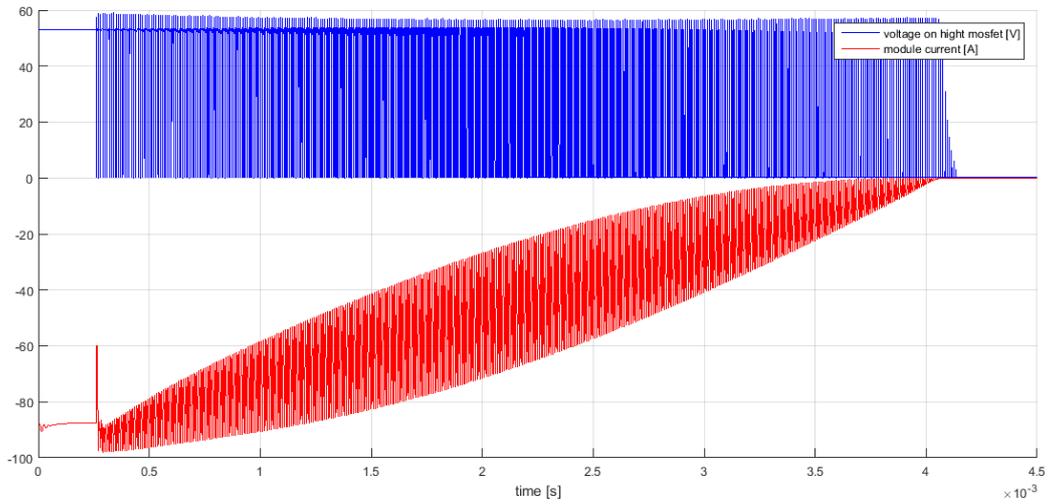


Figura 124

Mentre in Figura 125 vediamo l'andamento della corrente totale del pacco batteria (in rosso).

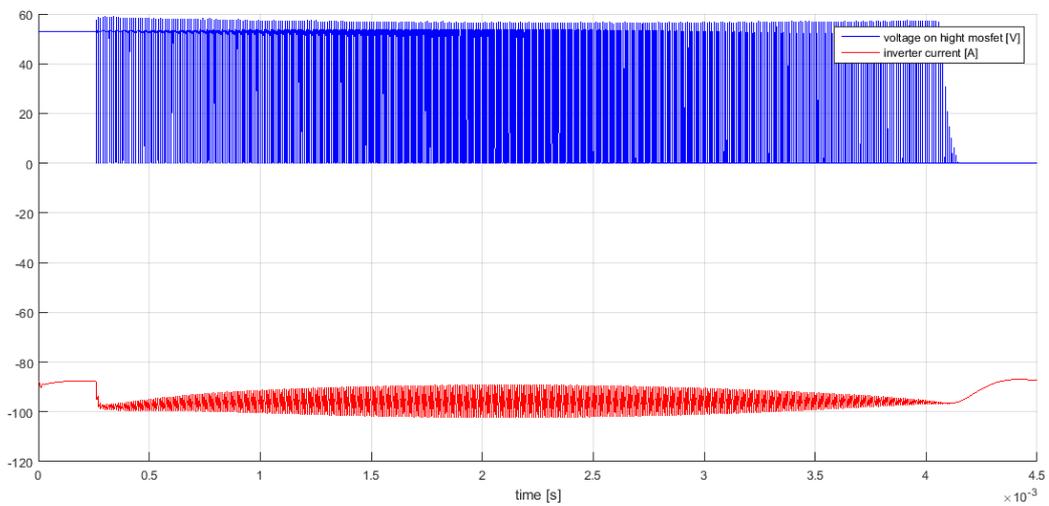


Figura 125

Qui (Figura 126) vediamo l'andamento della corrente capacitiva e la relativa tensione del condensatore.

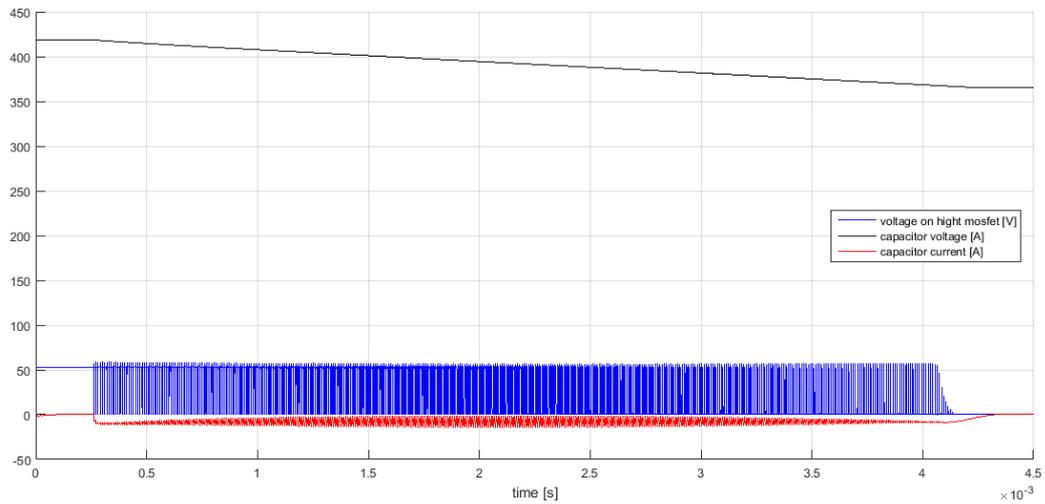


Figura 126

Mentre ora (in Figura 127) vediamo l'andamento della corrente vista dalle celle degli altri moduli.

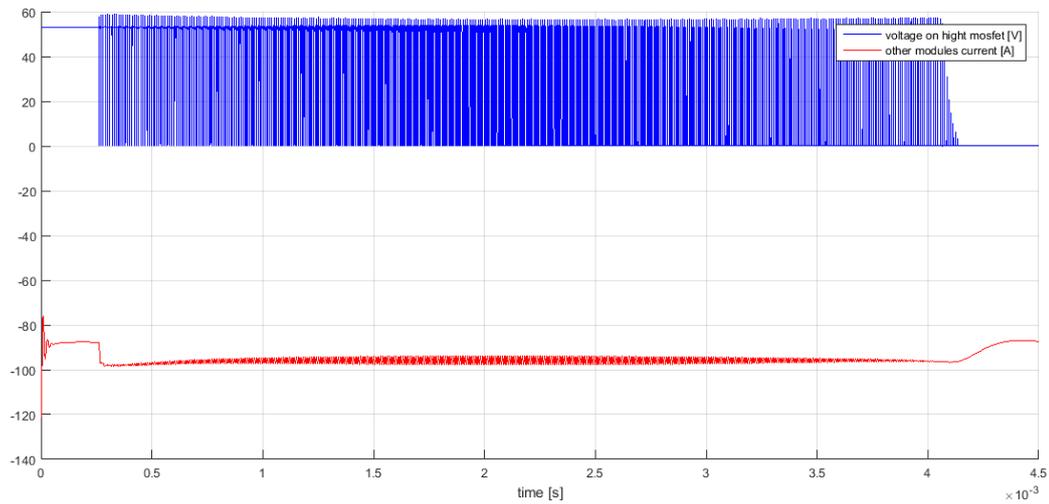


Figura 127

In Figura 129 possiamo vedere l'andamento della corrente di batteria durante una disconnessione con corrente di carico dell'inverter nulla.

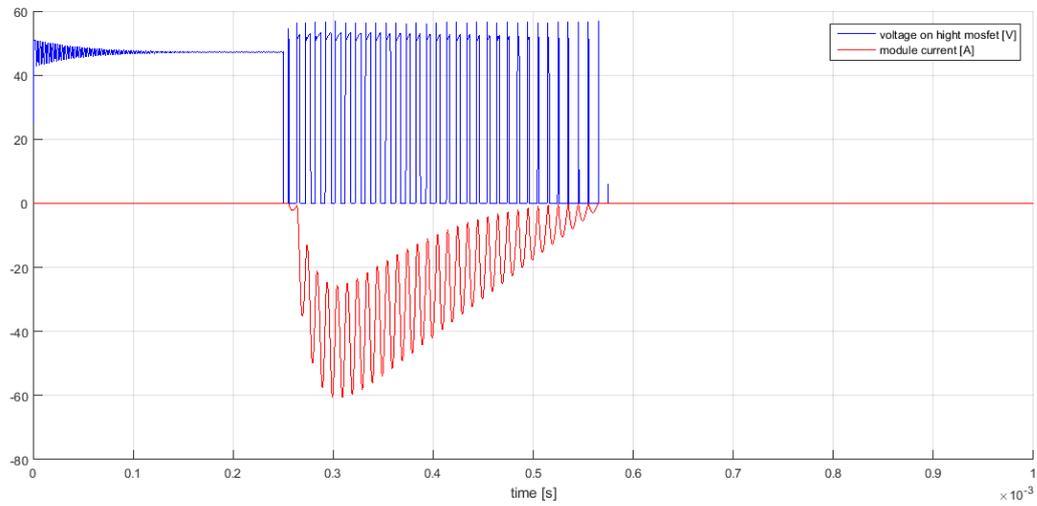


Figura 129

Mentre nella Figura 130 vediamo l'andamento della corrente di pacco.

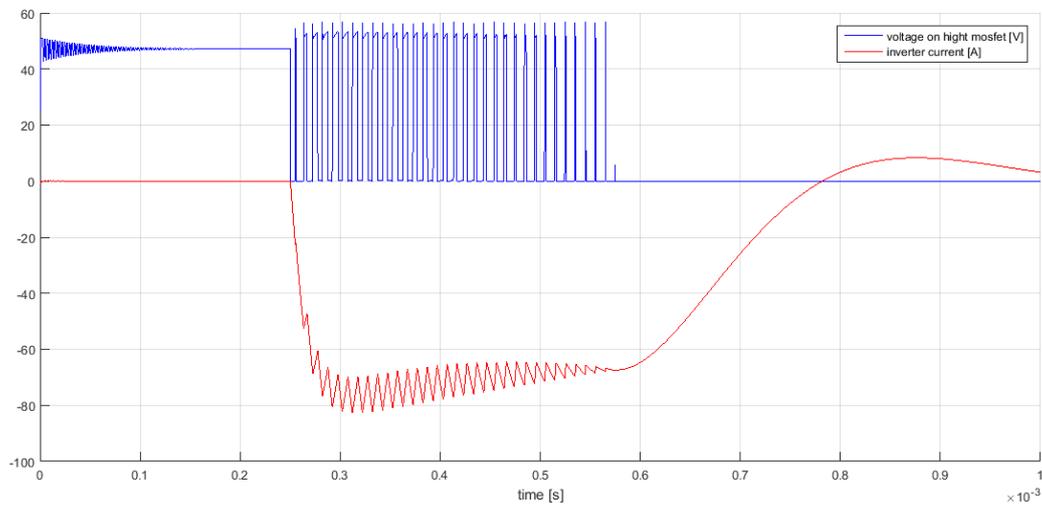


Figura 130

In Figura 131 la corrente vista dalle celle degli altri moduli filtrata dal condensatore locale.

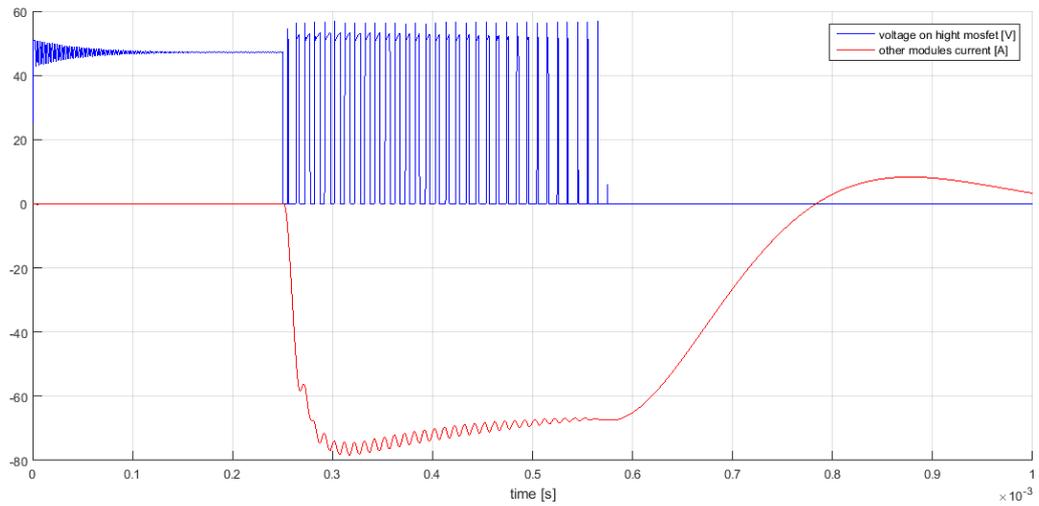


Figura 131

Mentre Figura 132 in vediamo l'andamento della tensione del condensatore lato inverter per effetto della disconnessione.

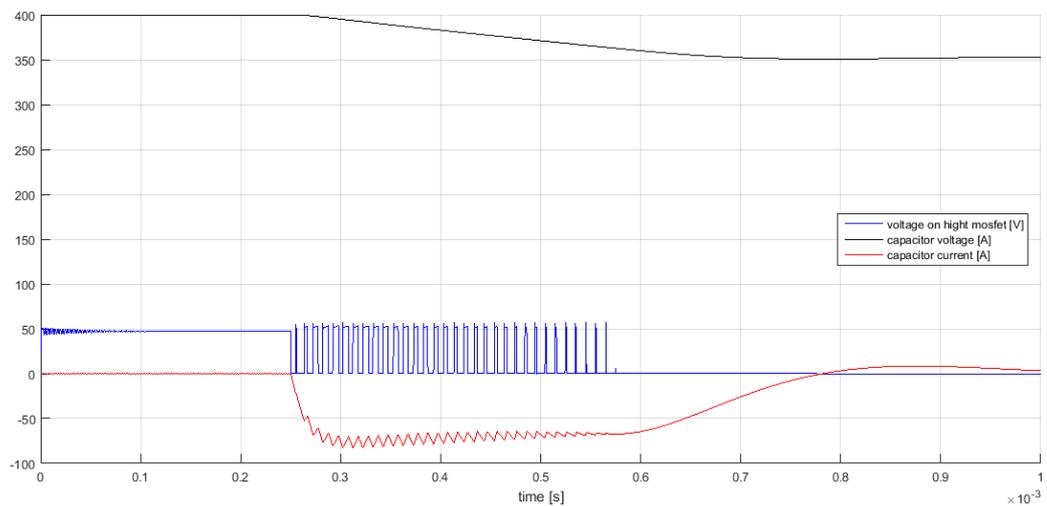


Figura 132

4.6. Dimensionamento termico della gamba di inverter

La dissipazione termica avviene tramite un scheda IMS (Insulated Metallic Substrates), visibile in Figura 133¹⁰, ossia una scheda dove il lato inferiore della stessa è costituito da un strato di alluminio con lo scopo di dissipare il calore, questo strato è separato dal circuito in tensione tramite uno strato isolante di materiale ceramico su cui è montato uno strato di rame al disopra del quale è stampato il circuito e sono posizionati i componenti.

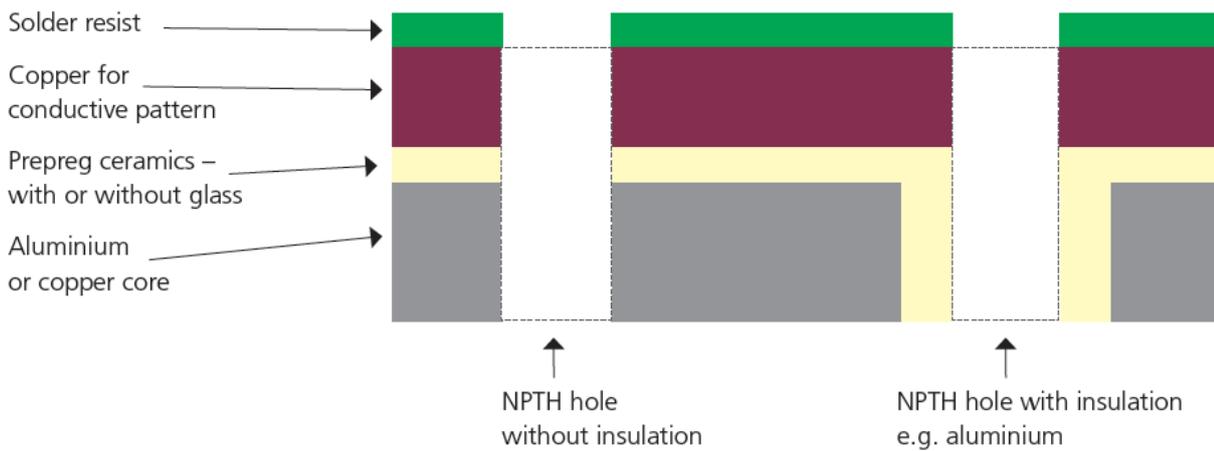


Figura 133

Per avere un'idea del dimensionamento termico si è partiti dalla formulazione analitica della dissipazione del calore di una lastra piana sottoposta a convezione naturale.

Riportiamo in seguito i dati della board IMS considerato.

Tabella 45

Produttore	Bergquist
Stato di alluminio	0.51 mm
Strato rame	35 μm
Strato dielettrico	38 μm
Coefficiente di conducibilità termica (dielettrico)	3.0 W/mK
Temperatura di esercizio	170 °C
Forza dielettrica (VAC)	1500 V/mm

¹⁰ Figura tratta da technoboards Kronach

Calcolo termico analitico della dissipazione termica

Si sono approssimate le resistenze termiche come se fossero applicate alla sola area del mosfet. Si è poi calcolata la convezione termica sulla superficie del dissipatore di alluminio presupponendo che la temperatura sulla superficie fosse costante.

Tabella 46

Area mosfet	99.716 mm ²
Area dissipatore	400 cm ²
Conducibilità termica dielettrico	3 W/mK
Conducibilità termica Rame	390 W/mK
Conducibilità termica Alluminio	290 W/mK
Capacità termica Alluminio	896.9 J/kg K
Densità Alluminio	2700 kg/m ³
Capacità termica Dissipatore (spessore 5.5mm)	372.93 J/K
Resistenza termica Mosfet	0.4 K/W
Resistenza termica strato isolante	0.1270 K/W
Resistenza termica rame	0.0009 K/W
Resistenza termica Strato dielettrico	0.1270 K/W
Resistenza termica giunzione-dissipatore	0.6549 K/W
Resistenza termica dissipatore in alluminio	0.0176 K/W

La sovratemperatura istantanea dipende esclusivamente dalla resistenza termica del mosfet e degli strati di materiale isolante, mentre il rame non contribuisce in maniera apprezzabile alla resistenza termica, mentre l'elevata capacità termica dell'alluminio permette di considerare il dissipatore praticamente a temperatura costante per tutte le variazioni rapide.

Riportiamo in Tabella 47 la potenza massima dissipata in condizioni di commutazione PWM.

Tabella 47

	I _L =100A	I _L =110A
P _{diss mosfet} (componente che commuta)	116 W	104.2W
P _{diss mosfet} (componente che ricircola la corrente)	42.7 W	35.2 W

Calcolo analitico del calore smaltibile dalla IMS Board

Il calcolo del calore smaltibile ha preso in considerazione una lastra piana orizzontale con convezione termica naturale. E' stato considerato un'ambiente a temperatura di 40°C e due dissipatori uno di 20cm x 20 cm e uno di 14cm x 20 cm.

Si parte dalle caratteristiche dell'aria a diverse temperature. Con un codice iterativo in matlab si è ottenuta la temperatura di equilibrio date le resistenze termiche, la convezione naturale in aria e il flusso termico dissipato dal mosfet.

Equazione 27¹¹ Numero di Grashof

$$Gr = d^3 d_n^2 \beta g (T - T_a) / \nu^2$$

Dove:

- d è il lato lungo del rettangolo rappresentante il nostro dissipatore
- d_n è la densità del fluido refrigerante (aria)
- β è il coefficiente isobaro di espansione termica
- g è l'accelerazione gravitazionale terrestre
- ν è la viscosità cinematica dell'aria
- T è la temperatura media del dissipatore
- T_a la temperatura dell'aria

Tutti i valore sono stati calcolati per interpolazione in base alla temperatura prevista del fluido.

Equazione 28 Numero di Nusselt per lastre orizzontali con superficie calda rivolta verso l'alto

$$Nu = 0.54 (Gr \cdot Pr)^{\frac{1}{4}}$$

Dalla Equazione 29 si ottiene il coefficiente di convezione termica.

Equazione 29 Equazione per determinare il coefficiente di convezione termica

$$\alpha = Nu k / d$$

Dove:

- d è il lato maggiore del rettangolo
- k coefficiente di conducibilità termica del fluido (in questo caso aria)
- Nu numero di Nusselt

¹¹ Equazione 27, Equazione 28, Equazione 29 da "Trasmissione del Calore" di Cesare Bonacina, Alverto Cavallini, Lino Mattarolo

In Figura 134 vediamo l'andamento della temperatura per il caso di dissipatore di 20 cm di lunghezza e 14 cm di larghezza.

La temperatura stimata per il funzionamento normale (ossia con una dissipazione di 11W) è di 108.6°C.

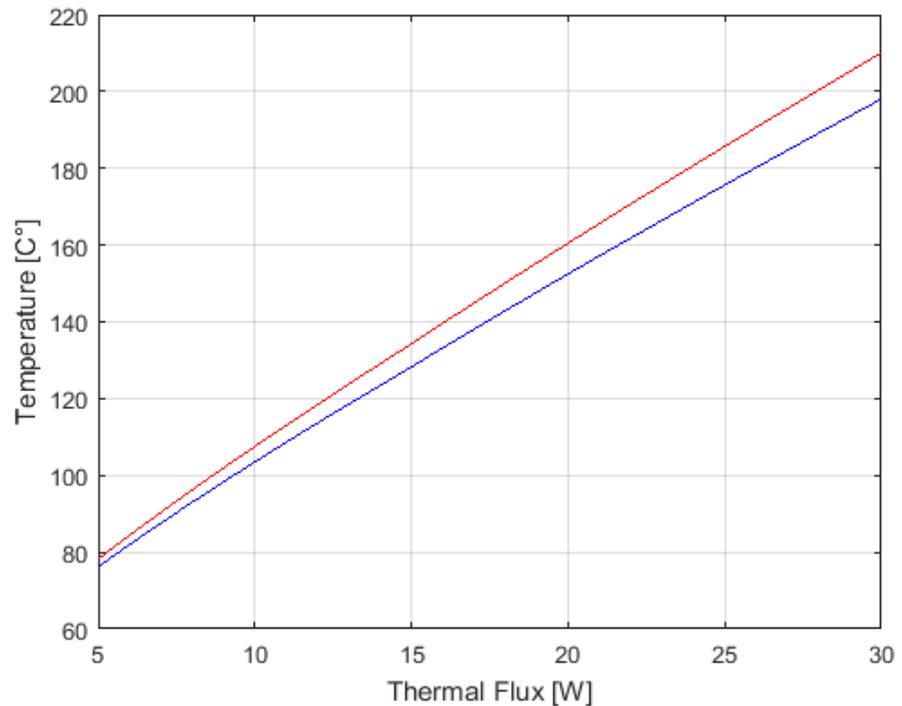


Figura 134

Mentre Figura 135 in vediamo il coefficiente di convezione termica in funzione della temperatura del dissipatore.

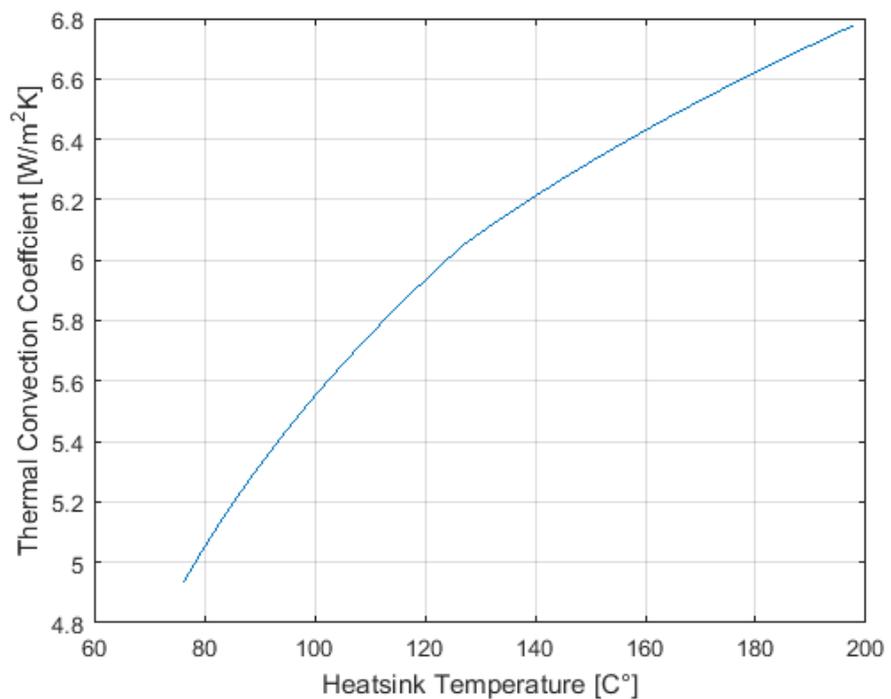


Figura 135

In Figura 136 vediamo l'andamento delle temperatura previste in condizioni stazionarie del dissipatore e della giunzione del mosfet in base al flusso termico generato dallo stesso interruttore statico per un dissipatore di 20cm di larghezza e 20cm di lunghezza.

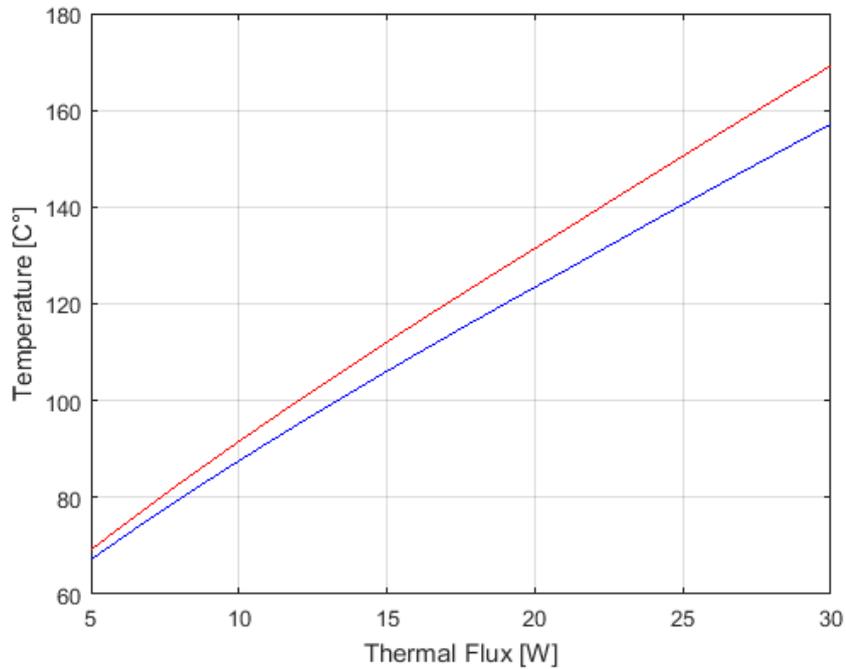


Figura 136

Mentre Figura 137 in vediamo i coefficiente di convezione termica stimato per un dissipatore di 20cmx20cm.

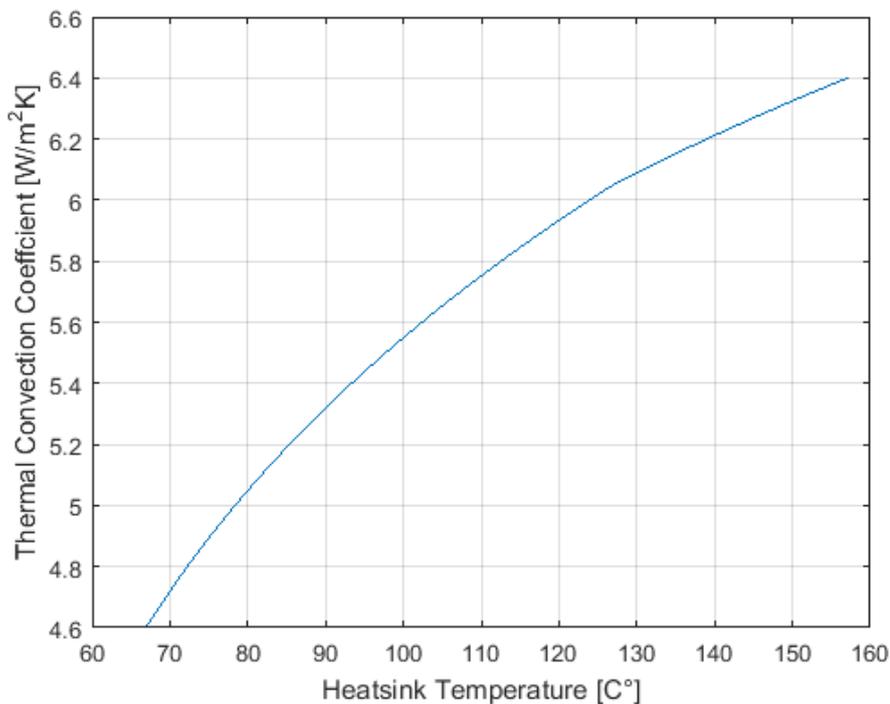


Figura 137

Simulazione termica IMS Board

In questo paragrafo discutiamo i risultati ottenuti tramite la simulazione termica svolta con il programma SolidWorks©.

In Figura 138 vediamo il modello utilizzato per la simulazione termica.

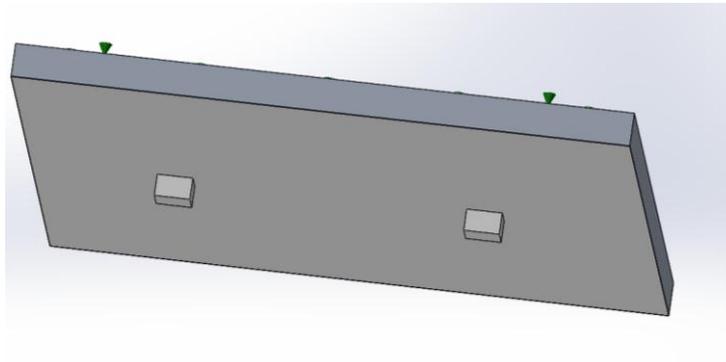


Figura 138

- Simulazione con coefficiente di convezione termica fisso con dissipazione pari a 11 W (ottenuti con una corrente di 88A) 20x20cm

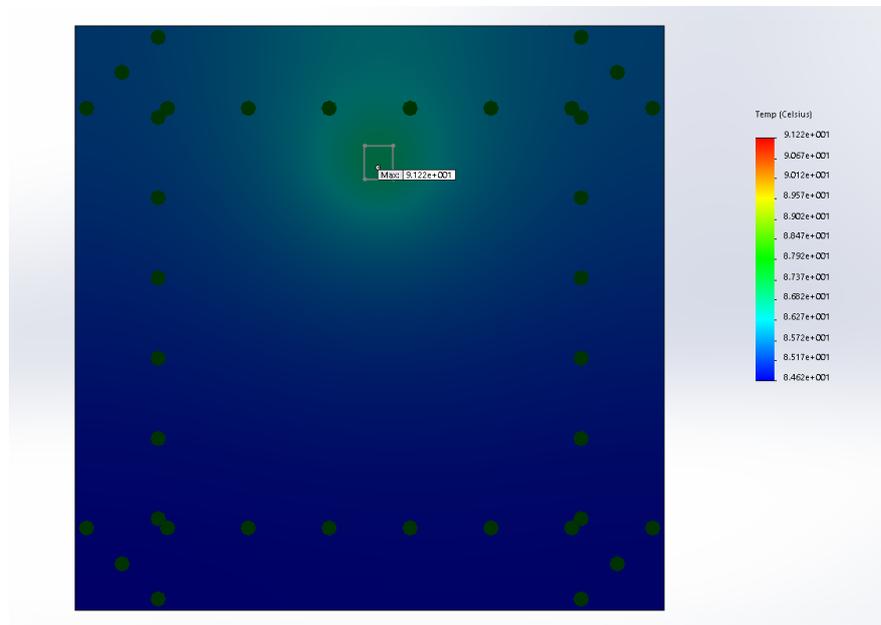


Figura 139

In Figura 140 vediamo il lato basso dove è presente l'interruttore statico che raggiunge una temperatura massima di 91.22°C.



Figura 140

- Simulazione con coefficiente di convezione termica fisso con dissipazione pari a 17 W (ottenuti con una corrente di 110A) 20x20cm

In Figura 141 possiamo vedere la parte sottoposta a convezione termica con un fatto fissato a 6 W/m²k.

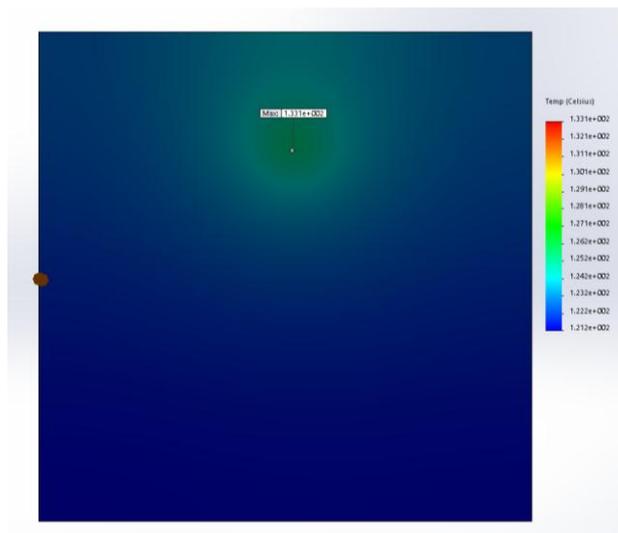


Figura 141

Mentre in Figura 142 vediamo il lato basso dove è presente l'interruttore statico.

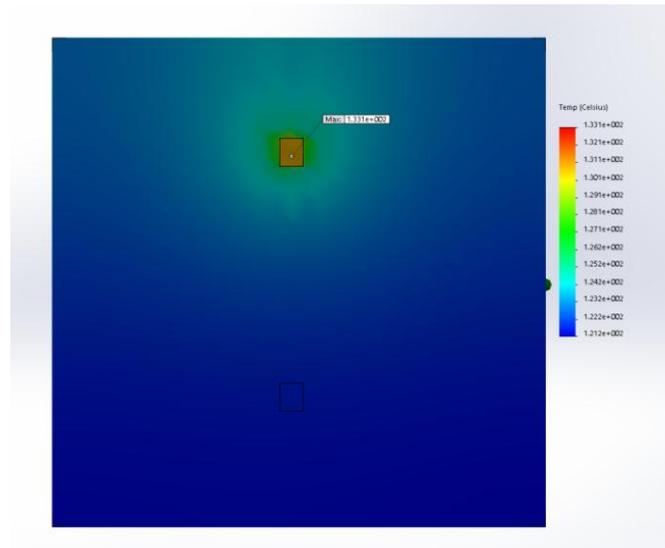


Figura 142

Vediamo che si raggiunge la massima temperatura in corrispondenza del case del componente e questa è pari a 133°C.

- Simulazione fluidodinamica con dissipazione di 11W (pari alla corrente nominale di 88 A) dissipatore di 20x20cm e 5mm di spessore

In Figura 143 vediamo l'andamento della temperatura dell'aria in kelvin per effetto della convezione termica del dissipatore.

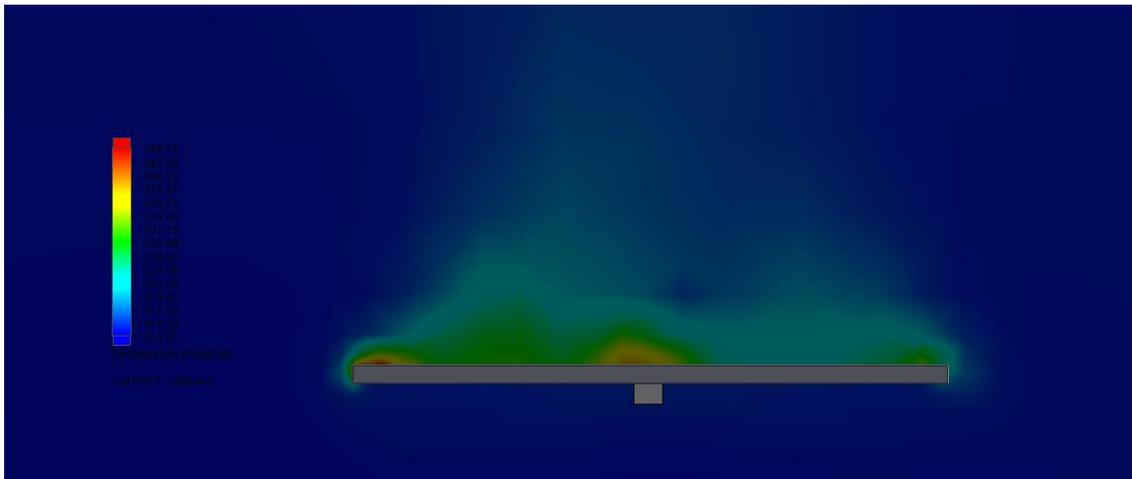
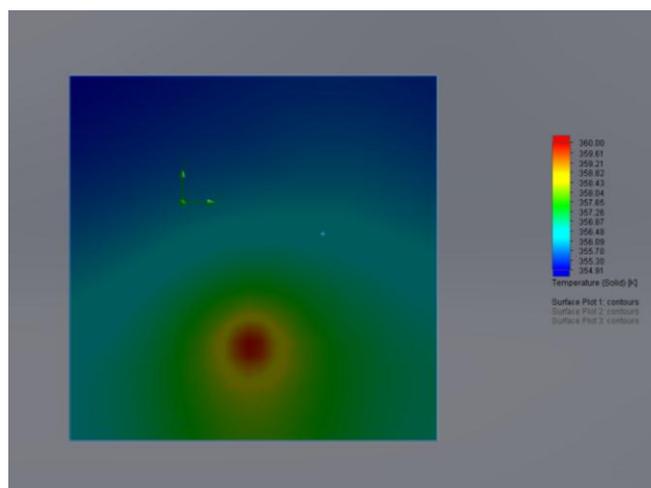


Figura 143

Mentre Figura 144 in possiamo vedere la distribuzione della temperatura sul lato esposto all'aria.

Figura 144



E in Figura 145 il lato non esposto all'aria dove è presente l'interruttore statico che è la sorgente del calore da smaltire.

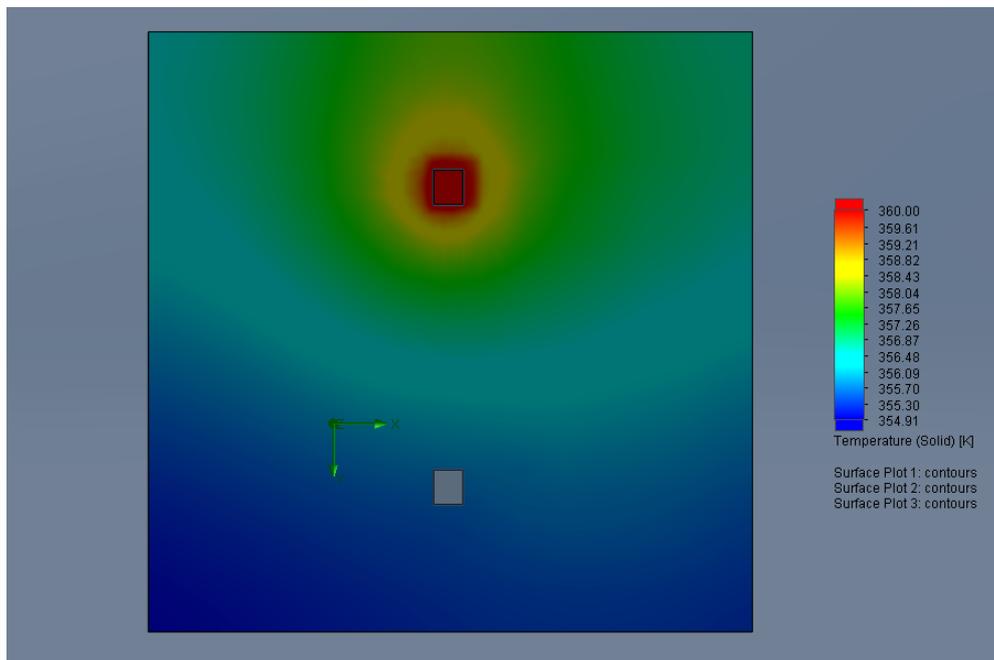


Figura 145

Possiamo vedere come la temperatura massima raggiunta dal dissipatore in prossimità del componente è di soli 360 K pari a 87°C.

Per avere la temperatura alla giunzione basta aggiungere le cadute termiche sulla Board e sul mosfet.

$$\theta_j = \theta_{diss,max} + (R_{jc} + R_{Al-iso} + R_{iso-Cu} + R_{Cu-iso})P_{cond}$$

Si ha che θ_j è pari a 94.2 C°, che è molto basso, questa temperatura risulta più bassa del caso con il calcolo teorico.

La bassa temperatura del dissipatore permette di operare nel regime commutato (in condizioni transitorie) sfruttando l'elevata capacità termica del dissipatore che permetterà di mantenere costante la temperatura dello stesso durante il breve funzionamento in PWM. Il regime PWM il componente sembra essere in grado di sopportare le sollecitazioni termiche, bisogna però verificare sperimentalmente la resistenza termica di contatto qui non considerata e difficilmente quantificabile.

Tabella 48

	I _L =110A	I _L =100A
P _{diss mosfet} (componente che commuta)	116 W	104.2W
P _{diss mosfet} (componente che ricircola la corrente)	42.7 W	35.2 W
$\Delta\theta_{j-diss}$ (componente che commuta)	76 K	68.3 K
$\Delta\theta_{j-diss}$ (componente che ricircola la corrente)	28 K	23.1 K
θ_j (componente che commuta)	163°C	155.3 K
θ_j (componente che ricircola la corrente)	115°C	110.1°C

- Simulazione fluidodinamica con dissipazione di 17W (pari alla corrente nominale di 110 A) con dissipatore di 20x20cm e 5mm spessore

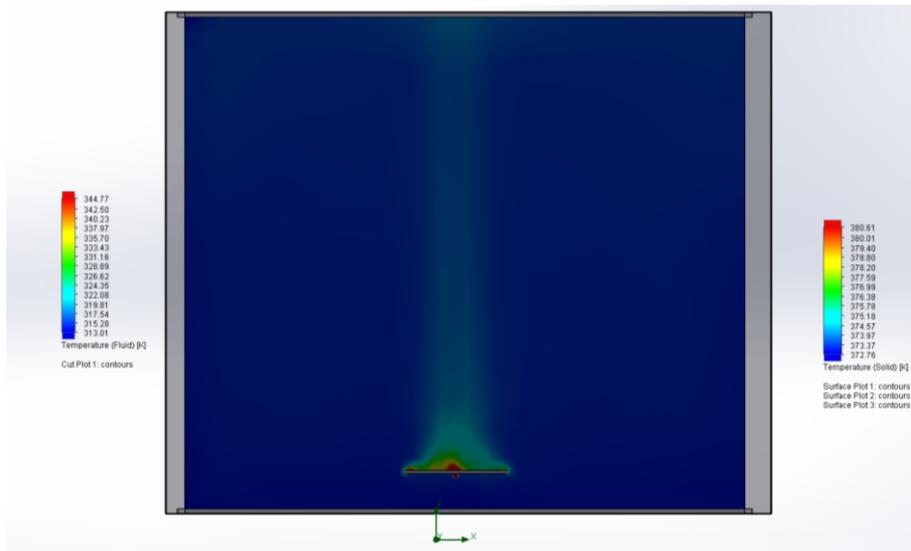


Figura 146

In Figura 147 vediamo la temperatura del lato basso dove è presente il mosfet.

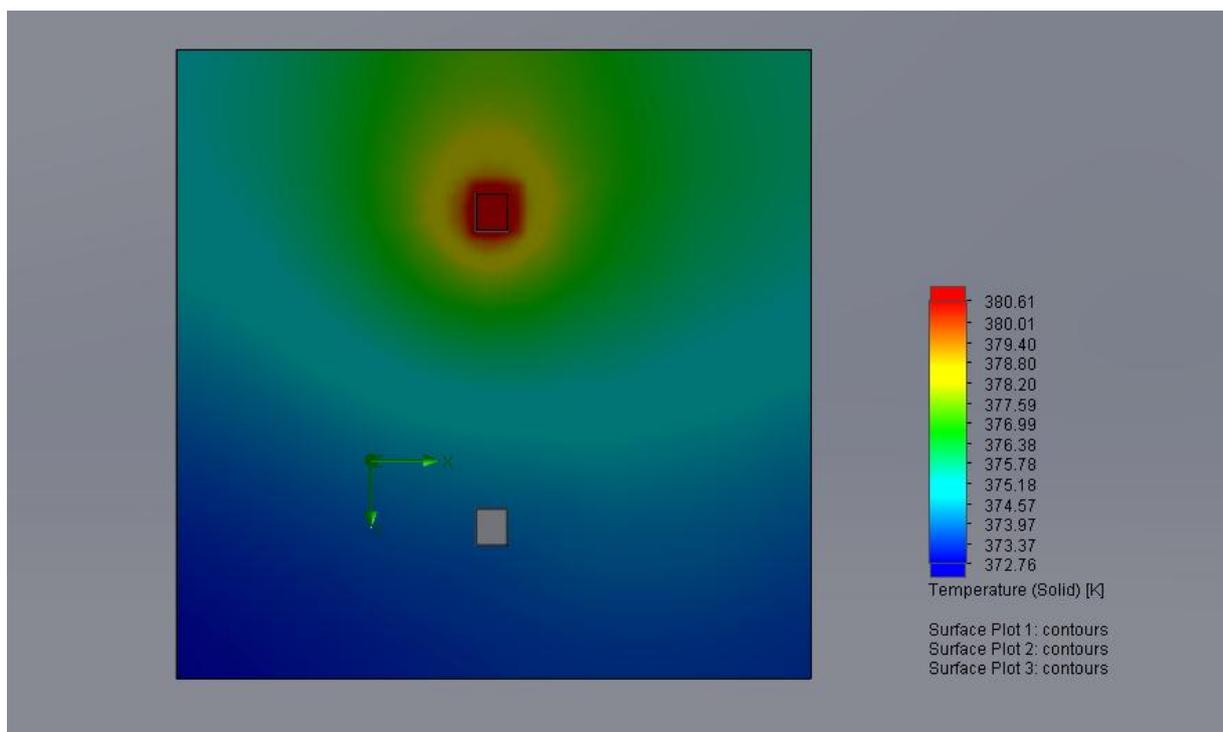


Figura 147

In Figura 148 vediamo il modello utilizzato per la simulazione termica di 20 centimetri di larghezza e 14 di lunghezza spesso 5mm.

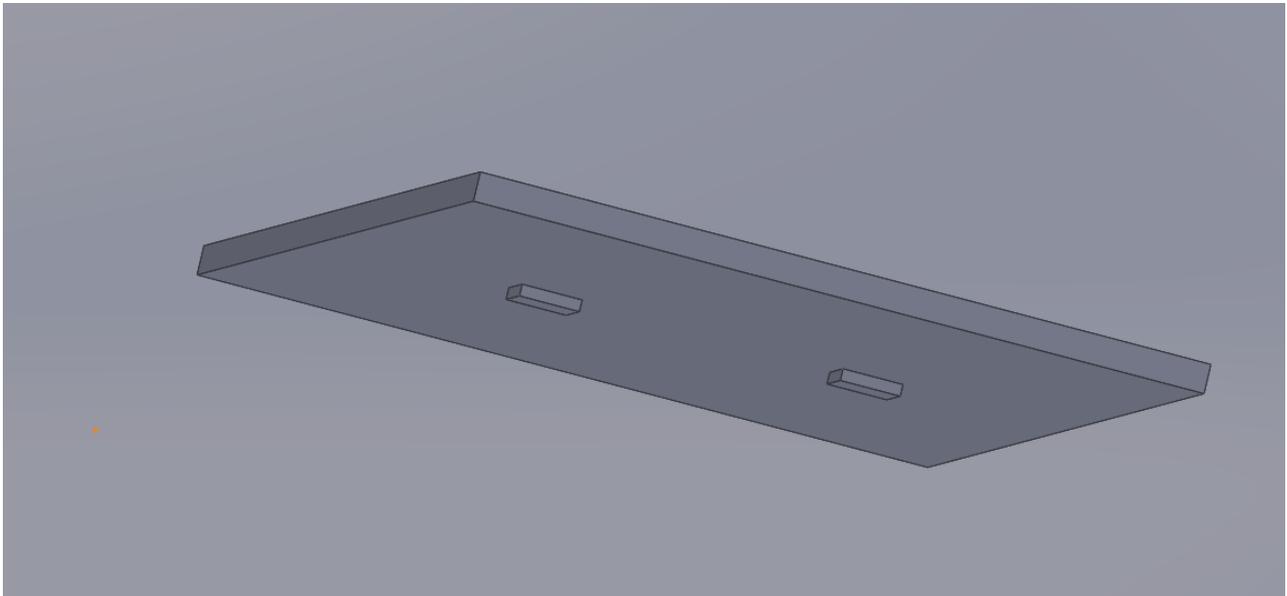


Figura 148

- Simulazione fluidodinamica con dissipazione di 11W (pari alla corrente nominale di 88 A) con dissipatore di 20x14cm

In Figura 149 vediamo la temperatura dell'aria per effetto della convezione termica, con una temperatura massima di 85°C (358K) .

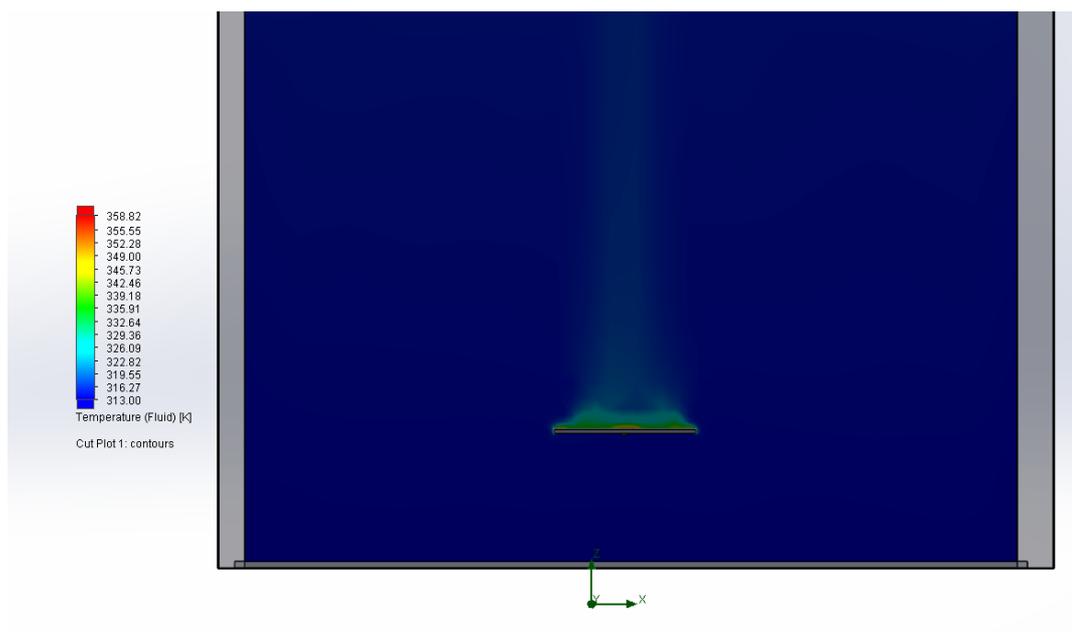


Figura 149

Mentre Figura 150 in vediamo la parte alta del dissipatore.

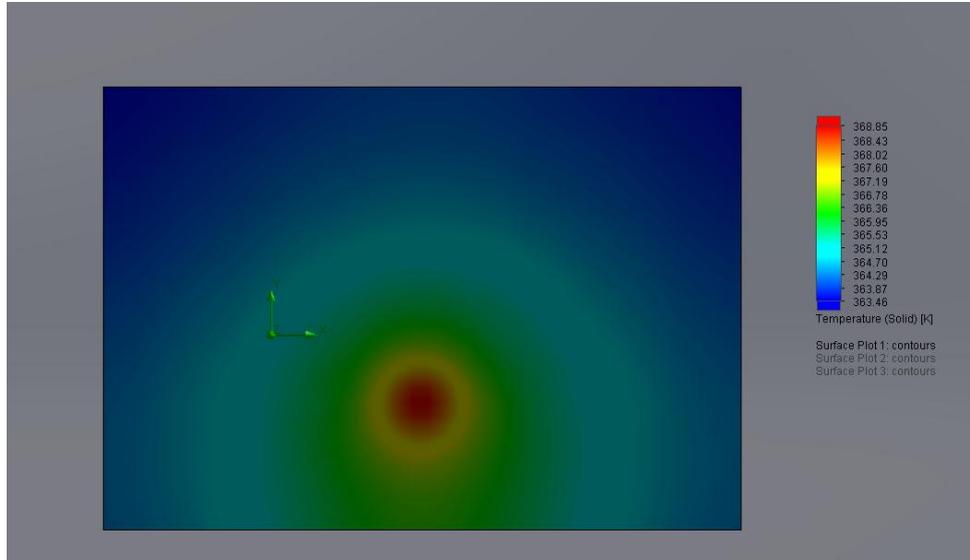


Figura 150

In Figura 151 vediamo la distribuzione della temperatura sul lato inferiore.

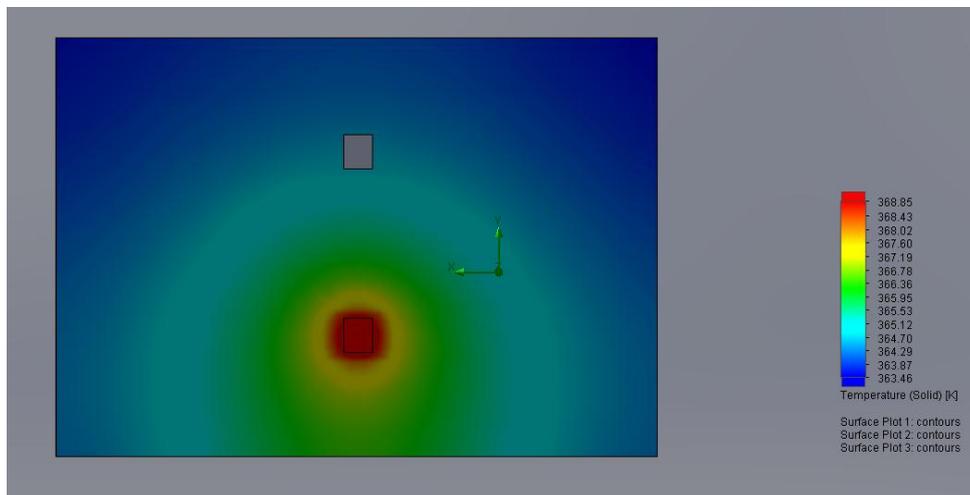


Figura 151

Si può vedere come la temperatura massima raggiunta sopra il componente sia pari a 95.85°C (368.85 K).

Per avere la temperatura alla giunzione basta aggiungere le cadute termiche sulla Board e sul mosfet.

$$\theta_j = \theta_{diss,max} + (R_{jc} + R_{Al-iso} + R_{iso-Cu} + R_{Cu-iso})P_{cond}$$

La resistenza termica tra dissipatore e giunzione è pari a 0.6549 K/W, si ha per 11W di dissipazione che la temperatura di giunzione è pari a 103.05 °C.

La temperatura del componente in conduzione è pari a 103.05°C mentre il componente in interdizione si trova alla temperatura del dissipatore e quindi tra 95.85°C e 91.7°C.

Vediamo come la temperatura stimata dalle formulazioni analitiche pari a 108.6°C del dissipatore risulti superiore alla realtà, la simulazione infatti ci restituisce una temperatura più bassa pari a 95.85°C.

Tabella 49

	$I_L=110A$	$I_L=100A$
$P_{diss\ mosfet}$ (componente che commuta)	116 W	104.2W
$P_{diss\ mosfet}$ (componente che ricircola la corrente)	42.7 W	35.2 W
$\Delta\theta_{j-diss}$ (componente che commuta)	76 K	68.3 K
$\Delta\theta_{j-diss}$ (componente che ricircola la corrente)	28 K	23.1 K
θ_j (componente che commuta)	171.9°C	164.15 K
θ_j (componente che ricircola la corrente)	123.85°C	118.95°C

La situazione è al limite però se si considera l'impedenza termica in funzione del tempo e si considera che nel caso peggiore la commutazione dura 5ms. Abbiamo una impedenza di 0.2 K/W (dalla Figura 152).

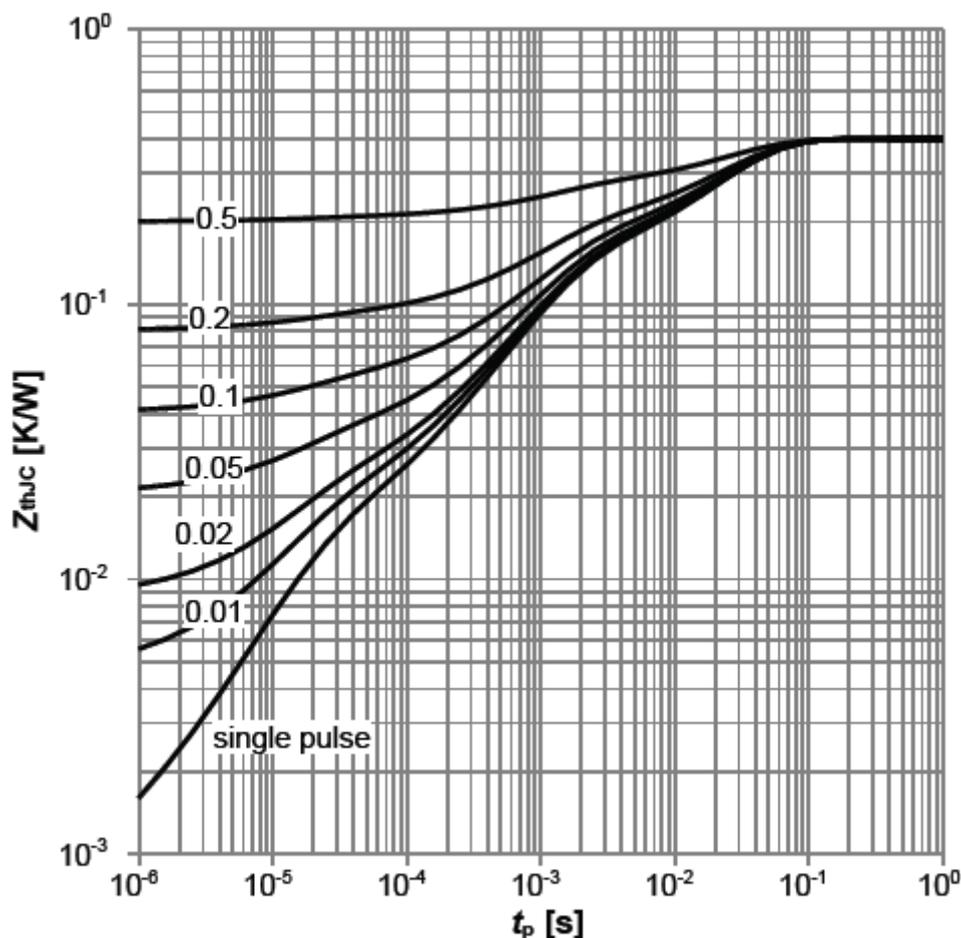


Figura 152

Tabella 50

Resistenza termica strato isolante	0.1270 K/W
Resistenza termica rame	0.0009 K/W
Resistenza termica Strato dielettrico	0.1270 K/W
Resistenza termica giunzione-dissipatore	0.6549 K/W
Resistenza termica case-dissipatore	0.2549 K/W

L'impedenza termica sarebbe quindi pari a 0.4549 K/W.

Tabella 51

	I_L=110A	I_L=100A
P_{diss mosfet} (componente che commuta)	116 W	104.2W
P_{diss mosfet} (componente che ricircola la corrente)	42.7 W	35.2 W
$\Delta\theta_{j-diss}$ (componente che commuta)	52.8 K	47.4 K
$\Delta\theta_{j-diss}$ (componente che ricircola la corrente)	19.4 K	16 K
θ_j (componente che commuta)	148.6 °C	143.25 °C
θ_j (componente che ricircola la corrente)	115.25 °C	111.86 °C

Dalla Tabella 51 si vede come il transitorio dovuto alle commutazioni di inserzioni e disinserione con corrente non nulla (I di carico pari 88A) permette l'hot swap se questi sono sufficientemente distanziati nel tempo, in modo che i componenti possano raffreddarsi.

La potenza totale worst case sarebbe pari a 158.7W generando in 5ms 0.795 J che portano ad un aumento della temperatura del dissipatore di 2mK, il dissipatore può essere considerato a temperatura costante nel tempo.

4.7. Conclusioni

L'utilizzo della modulazione PWM permette di controllare la corrente durante la fase di precarica, lo spegnimento e l'hot swap. Le perdite di commutazione risultano elevata poiché la frequenza utilizzata di 100 kHz è necessariamente alta per permettere di limitare la necessità di aggiungere induttori di dimensioni elevate per ridurre il ripple di corrente, è necessaria una verifica termica sperimentale che tenga conto delle resistenze termiche di contatto e la verifica del comportamento termico transitorio durante le commutazione PWM, un'altra soluzione consiste nell'utilizzo di nuovi componenti emergenti basati sull'arseniuro di gallio cosa che permetterebbe di abbattere di un decimo le perdite di commutazione consentendo alla struttura di funzionare a temperature molto più basse senza doversi preoccupare dei transistori termici durante le fasi di commutazione.

4.8.Schematico del Intelligent Module

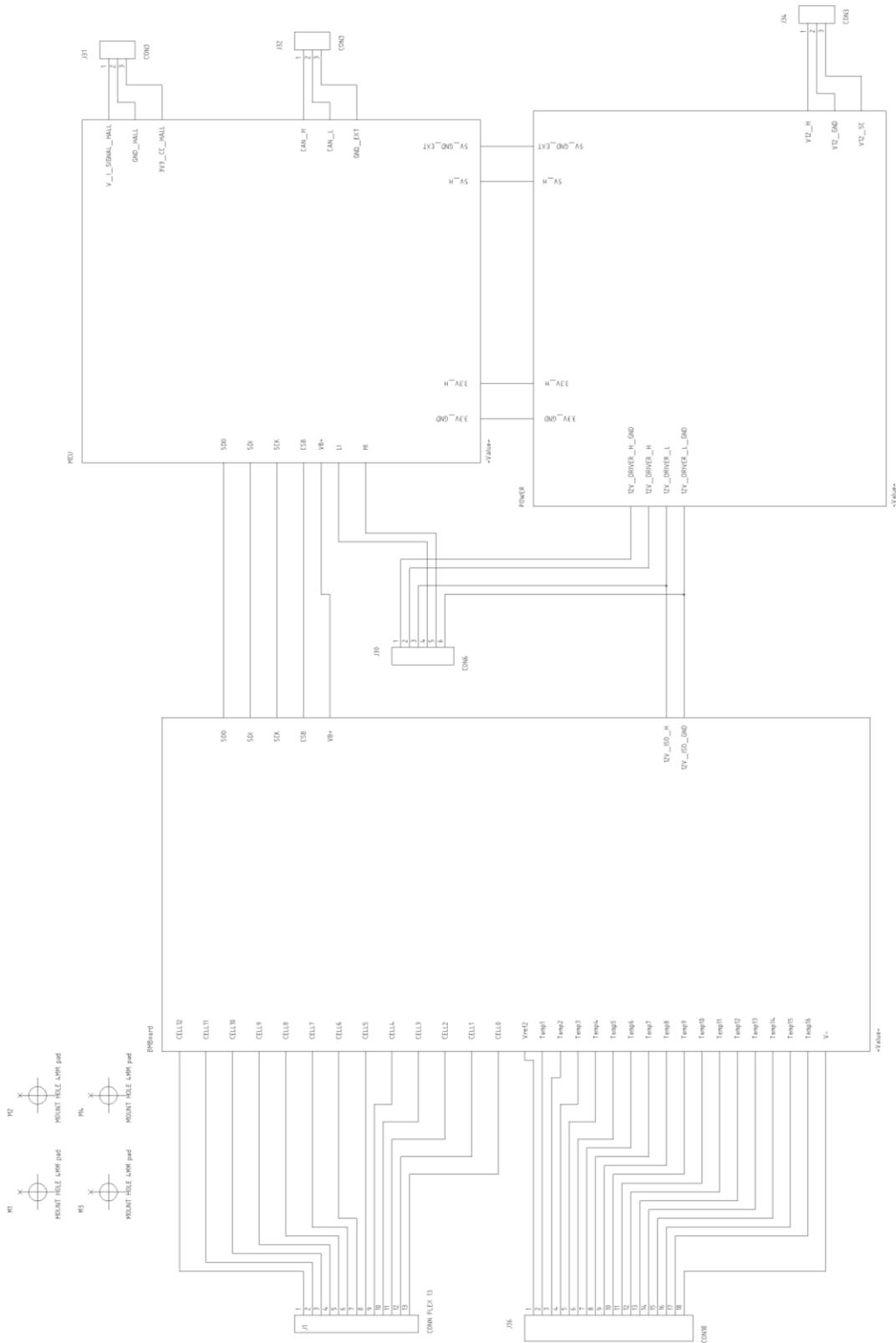


Figura 153

4.9.Schema del Monitoring Balancing Control Board

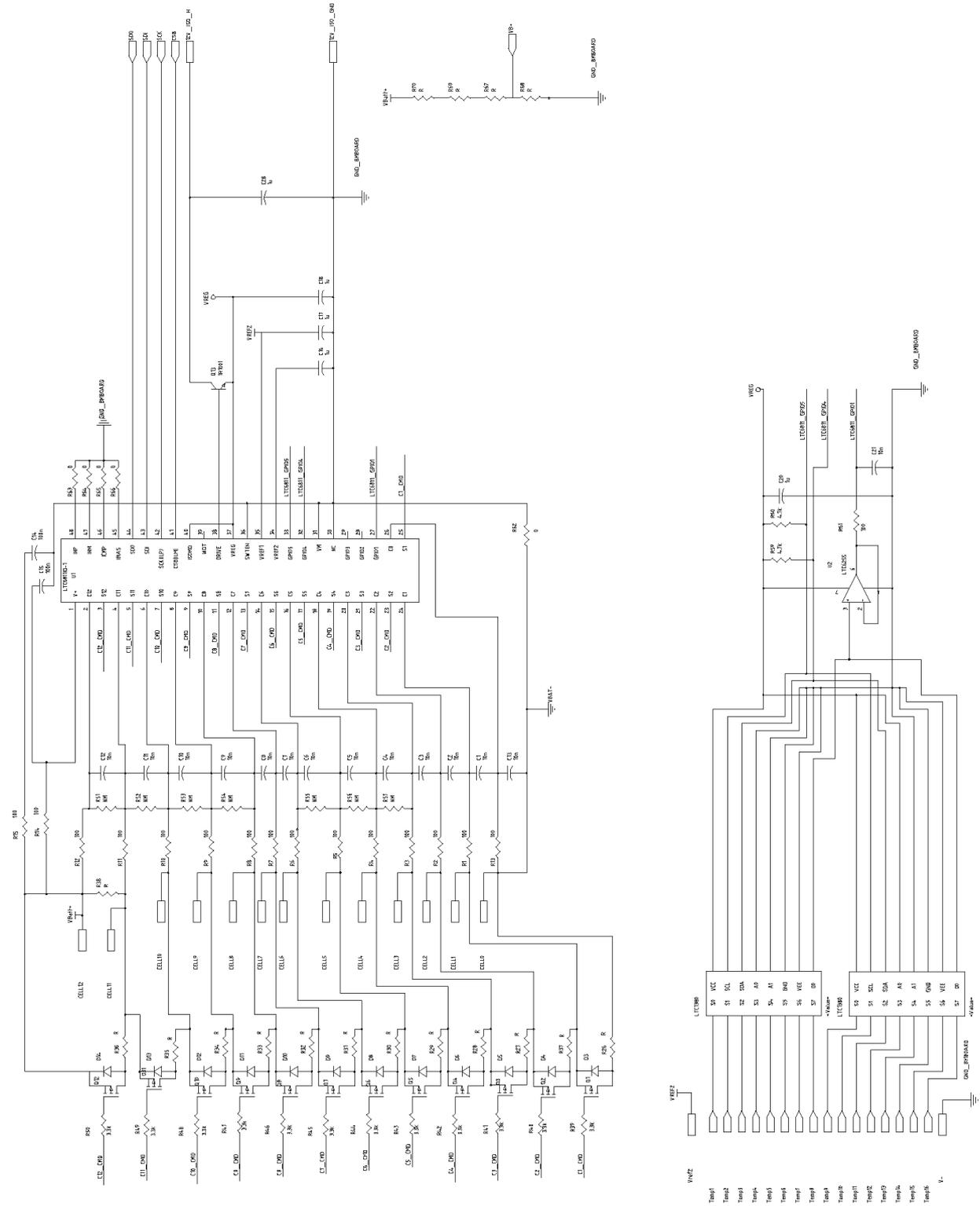


Figura 154

4.10. Schema della LegBoard

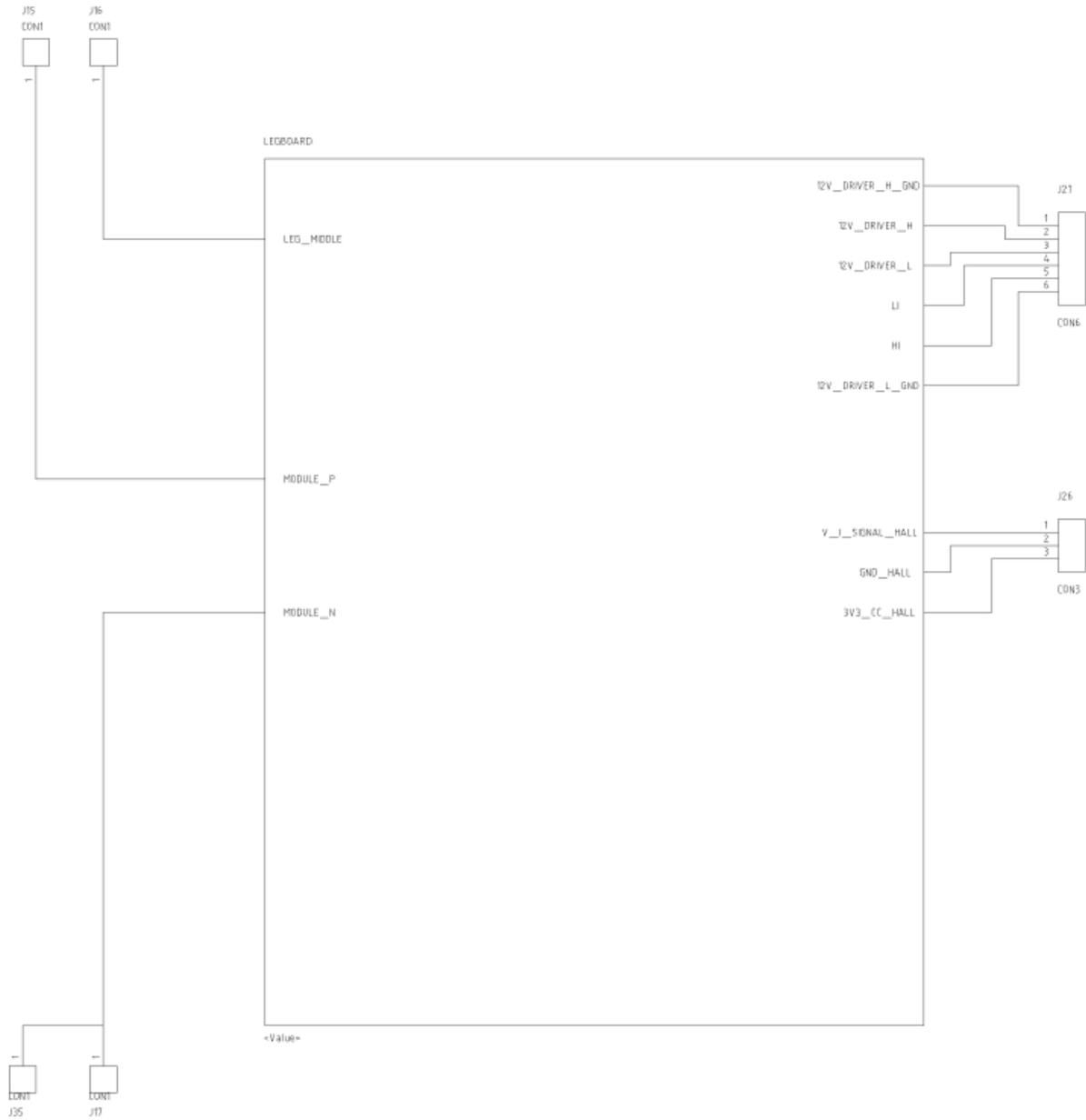


Figura 155

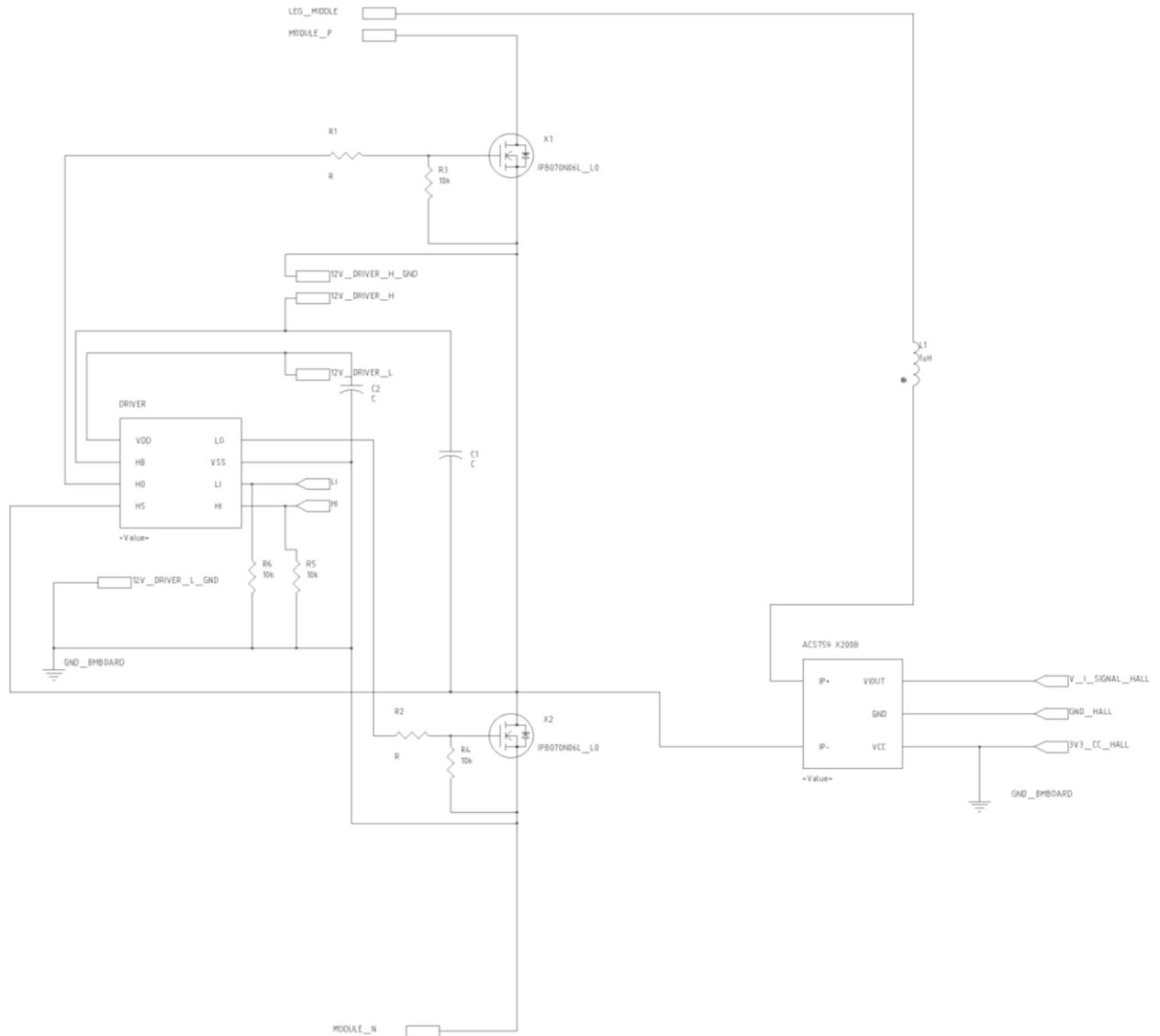


Figura 156

4.11. MCU

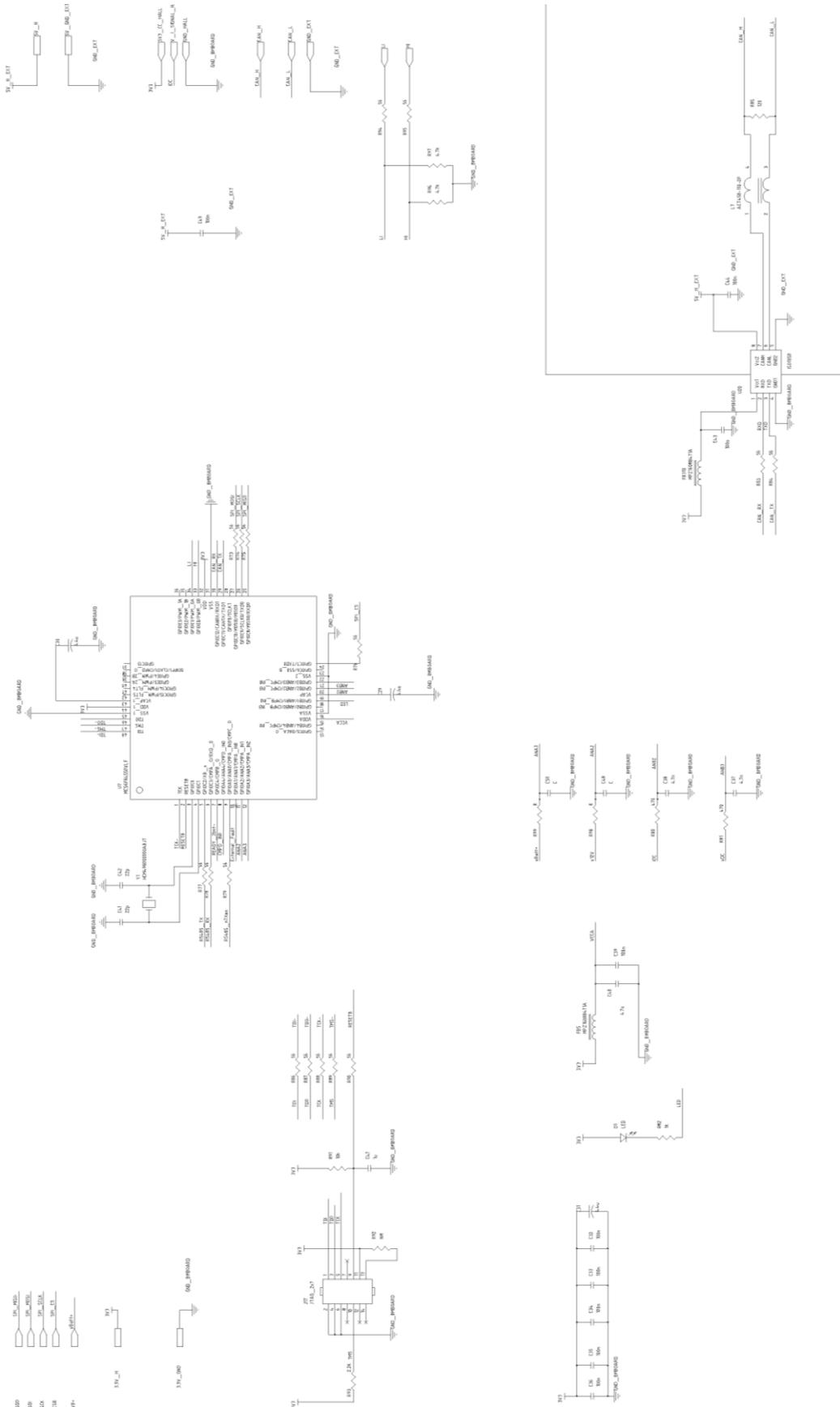


Figura 157

4.12. Alimentazione Board

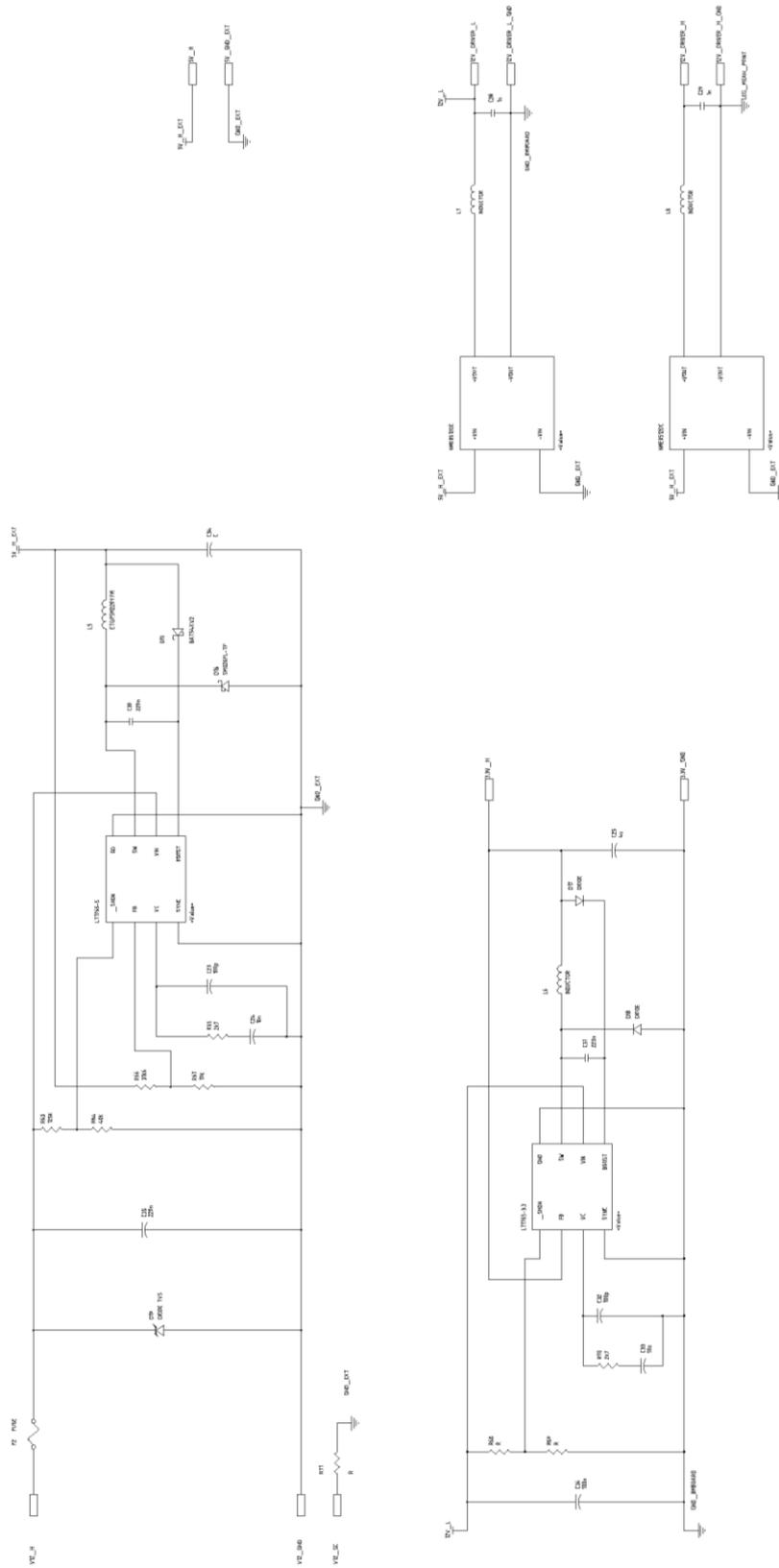


Figura 158

Bibliografia

- (1) Habiballah Rahimi-Eichi, Unnati Ojha, Federico Baronti and Mo-Yuen Chow, "Battery Management System", IEEE INDUSTRIAL ELECTRONICS MAGAZINE
- (2) Damian F. Frost and David A. "Completely decentralized active balancing battery management system" IEEE 2016
- (3) David A. White, Leon Adams "Safety & Reliability Capabilities of Lithium-Ion Battery System for Subsea Application That Use Autonomous Lithium-Ion Battery Modules"
- (4) <http://www.technoboards-kc.com>
- (5) Cesare Bonacina, Alberto Cavallini, Lino Mattarolo "Trasmissione del Calore", cleup editore

5. Normative sui test di omologazione delle batterie

Le normative sulle batterie si dividono in base alle due categorie di batterie:

- le celle o batterie primarie: ossia le batterie non ricaricabili al di fuori dell'interesse di questa tesi
- le celle o batteria secondarie: le batterie ricaricabili sulle quali fissiamo la nostra attenzione

In seguito elenchiamo diversi test normativi per la sicurezza e l'omologazione delle batterie e il relativi campi di applicazione.

- IEEE1625
- IEEE1725
- UL1642
- UL2054
- IEC62133
- IEC62660-1
- IEC62660-2
- IEC62660-3
- ISO12405-1
- ISO12405-3
- IEC61960
- IEC62281
- EN502727-1
- EN502727-2
- EN502727-3
- EN502727-4
- EN60952-1 (IEC60952-1)
- EN60952-2 (IEC60952-2)
- EN60952-3 (IEC60952-3)
- EN61982-1 (IEC61982-1)
- EN61982-2 (IEC61982-2)
- EN61982-3 (IEC61982-3)
- SAE J2464

Normativa	Campo di Applicazione		
IEEE1625	Standard per Batterie ricaricabili multi-cella per Dispositivi di calcolo mobili		
IEEE1725	Standard per Batterie ricaricabili per telefoni cellulari		
UL1642	Standard per le batterie al litio		
UL2054	Standard per le batterie domestiche e commerciali		
IEC62133	Requisiti di sicurezza per batterie secondarie		
IEC62660-1	Test sulle performance delle celle agli ioni di litio per la propulsioni di veicoli elettrici su strada		
IEC62660-2	Affidabilità e abuse testing delle celle agli ioni di litio per la propulsioni di veicoli elettrici su strada		
IEC62660-3	Requisiti di sicurezza delle celle agli ioni di litio per la propulsioni di veicoli elettrici su strada		
ISO12405-1	Specifiche per test di pacchi batteria e sistemi per batterie agli ioni di litio per applicazioni di alta potenza		
ISO12405-2	Specifiche per test di pacchi batteria e sistemi per batterie agli ioni di litio per applicazioni di alta energia		
ISO12405-3	Specifiche per test di pacchi batteria e sistemi per batterie agli ioni di litio per i requisiti richiesti di sicurezza		
IEC61960	Requisiti di sicurezza per celle secondarie agli ioni di litio sigillate e per le batterie realizzate con esse per applicazioni portatili		
IEC62281	Sicurezza delle celle agli ioni di litio primarie e secondarie durante il trasporto		
EN50272-1	Requisiti di Sicurezza per batterie secondarie e l'installazione di batterie: Informazioni generali di sicurezza		
EN50272-2	Requisiti di Sicurezza per batterie secondarie e l'installazione di batterie: batterie stazionare		
EN50272-3	Requisiti di Sicurezza per batterie secondarie e l'installazione di batterie: batterie per trazione		
EN50272-4	Requisiti di Sicurezza per batterie secondarie e l'installazione di batterie: batterie per applicazioni portatili		

Normativa	Campo di Applicazione		
EN60952-1 (IEC60952-1)	Batterie aeronautiche: Test generali e livelli di performance		
EN60952-2 (IEC60952-2)	Batterie aeronautiche: Requisiti del design e della costruzione		
EN60952-3 (IEC60952-3)	Batterie aeronautiche: Specifiche del prodotto e dichiarazioni del design e delle performance		
EN61982-1 (IEC61982-1)	Batterie secondarie per propulsione elettrica di veicoli su strada: Parametri dei test		
EN61982-2 (IEC61982-2)	Batterie secondarie per propulsione elettrica di veicoli su strada: Test sulle performance della scarica dinamica e test di resistenza dinamica		
EN61982-3 (IEC61982-3)	Batterie secondarie per propulsione elettrica di veicoli su strada: Performance e ciclo di vita (compatibilità con il traffico, uso urbano del veicolo)		
SAE J2464	Battery Abuse Fire Test	Simulazione di condizioni che possono innescare l'incendio della batterie per la valutazione del rischio di esplosione della batteria	

In seguito riportiamo maggiori dettagli delle prove previste dalle normative:

- IEEE1625
 - Test termico della cella
Test per celle nuove e usate (già sottoposte a cicli di carica scarica)
La cella o batteria viene posta in un forno a temperatura iniziale a 20°C, la temperatura del forno viene poi aumentata ad un tasso di 5°C/minuto fino ad una temperatura di 130°C, la temperatura del forno viene mantenuta a 130°C per 1 ora, successivamente la cella viene riportata a temperatura ambiente

- IEEE1725
 - Test termico della cella
Test per celle nuove
La cella o batteria viene posta in un forno a temperatura iniziale a 20°C, la temperatura del forno viene poi aumentata ad un tasso di 5°C/minuto fino ad una temperatura di 130°C, la temperatura del forno viene mantenuta a 130°C per 1 ora, successivamente la cella viene riportata a temperatura ambiente
 - Evaluation of excess lithium plating (placcatura del litio)
Lotti di produzione sottoposte a 25 cicli alla massima corrente di carica/scarica alla temperatura di 25°C. Un numero minimo di 5 celle deve essere sottoposto alla prova di corto circuito esterno della norma UL a 55°C. Un numero minimo di 5 celle deve essere sottoposto a dissezione e esaminate per evidenze di placcatura del litio
 - Corto-Circuito Esterno
Test su celle nuove
Corto circuito delle celle tramite una resistenza di al massimo 0.05 Ohm, testate a 55°C
 - Validazione della massima tensione di protezione
Le celle vengono sottoposte alla massima tensione permessa dalle protezione dell'elettronica, le celle sono isolate per creare un ambiente adiabatico per 24 ore
 - Pack Drop Test (Drop test del pacco batteria)
Un pacco carico viene gettato da 1.5m su una superficie piana per 6 volte per ognuno dei sei lati (36 volte) la tensione di open-Circuit-Voltage viene monitorata per verificare l'esistenza di cortocircuiti interni

- UL1642
 - Test di Corto-Circuito
Test su celle nuove e usate(sottoposte a cicli di carica/scarica)
Cortocircuito applicato alle celle tramite una resistenza di al massimo 0.1 Ohm, testato a una temperatura di 20°C e 55°C
 - Test di carica con corrente anormale
Test su celle nuove e usate(sottoposte a cicli di carica/scarica)
Test di carica con sovracorrente (tensione costante, corrente limitata a 3 volte la massima corrente di carica nominale), testato a 20°C, durata di 7 ore
 - Test di scarica forzata
Test su celle nuove e usate(sottoposte a cicli di carica/scarica)
Test di scarica forzata solo per applicazioni multi-cella, testato a 20°C
 - Test di schiacciamento (Crush Test)
Test su celle nuove e usate(sottoposte a cicli di carica/scarica)
Cella schiacciata tra due piani applicando una forza di 13 kN
 - Test di Impatto
Test su celle nuove e usate(sottoposte a cicli di carica/scarica)
Una barra di 16mm di diametro viene posta sopra la cella, un peso di 9.1 Kg viene fatta cadere sulla barra da un'altezza di 61 cm
 - Shock Test
Test su celle nuove e usate(sottoposte a cicli di carica/scarica)
La cella viene sottoposta a tre urti con minima accelerazione media di 75g, con picco di accelerazione tra 125 e 175g, gli urti vengono applicati ad ognuno delle direzioni perpendicolari all'asse di simmetria, testati a 20°C
 - Test sull'applicazione di vibrazioni
Test su celle nuove e usate(sottoposte a cicli di carica/scarica)
Viene applicata una semplice vibrazione armonica ad ognuno delle tre direzioni perpendicolari, frequenza applicata tra 10 e 55Hz
 - Test di riscaldamento
Test su celle nuove e usate(sottoposte a cicli di carica/scarica)
Le celle vengono messe in un forno a temperatura iniziale di 20°C, la temperatura del forno viene poi aumentata ad un tasso di 5°C/minuto fino ad una temperatura di 130°C, la temperatura del forno viene mantenuta a 130°C per 10 minuti, successivamente la cella viene riportata a temperatura ambiente
 - Test sull'applicazione di un ciclo termico
Test su celle nuove e usate(sottoposte a cicli di carica/scarica)
La cella viene portata alternativamente a diverse temperature: 4 ore alla temperatura di 70°C, 2 ore a 20°C, 4 ore a -40°C, per poi tornare a 20°C, il ciclo viene ripetuto per altre 9 volte
 - Test di Bassa Pressione (simulazione di altitudine)
Test su celle nuove e usate(sottoposte a cicli di carica/scarica)
Le celle vengono immagazzinate ad una pressione di 11.6kPa, testate a 20°C

- UL2054
 - Test di Corto-Circuito
Test su celle nuove
Cortocircuito applicato alle celle tramite una resistenza di al massimo 0.1 Ohm, testato a una temperatura di 20°C e 55°C
 - Test di carica con corrente anormale
Test su celle nuove
Test di carica con sovracorrente (tensione costante, corrente limitata a 3 volte la massima corrente di carica nominale), testato a 20°C
 - Test di scarica forzata
Test su celle nuove
Test di scarica forzata solo per applicazioni multi-cella, testato a 20°C
 - Test di schiacciamento (Crush Test)
Test su celle nuove
Cella schiacciata tra due piani applicando una forza di 13 kN, testato a 20°C
 - Test di Impatto
Test su celle nuove
Una barra di 15.8mm di diametro viene posta sopra la cella, un peso di 9.1 Kg viene fatta cadere sulla barra da un'altezza di 61 cm, testato a 20°C
 - Shock Test
Test su celle nuove
La cella viene sottoposta a multipli urti con minima accelerazione media di 75g, con picco di accelerazione tra 125 e 175g, gli urti vengono applicati a ognuna delle direzioni perpendicolari all'asse di simmetria, testati a 20°C
 - Test sull'applicazione di vibrazioni
Test su celle nuove
Viene applicata una semplice vibrazione armonica ad ognuno delle tre direzioni perpendicolari, frequenza applicata tra 10 e 55Hz, testati a 20°C
 - Test di riscaldamento
Test su celle nuove
Le celle vengono messe in un forno a temperatura iniziale di 20°C, la temperatura del forno viene poi aumentata ad un tasso di 5°C/minuto fino ad una temperatura di 130°C, la temperatura del forno viene mantenuta a 130°C per 10 minuti, successivamente la cella viene riportata a temperatura ambiente
 - Test sull'applicazione di un ciclo termico
Test su celle nuove
La cella viene portata alternativamente a diverse temperature: 4 ore alla temperatura di 70°C, 2 ore a 20°C, 4 ore a -40°C, per poi tornare a 20°C, il ciclo viene ripetuto per altra 9 volte

- IEC62133-2
 - Isolamento e cablaggio
Minima resistenza interna richiesta per il terminale positivo e isolamento dei collegamenti interni
 - Venting
Requisiti per il meccanismo di sfogo della pressione
 - Gestione della Temperatura/corrente
Requisiti per limitare incrementi anormali della temperatura (limitazione delle correnti di carica e scarica)
 - Contatti dei terminali
Requisiti per la marchiatura delle polarità, resistenza meccanica dei contatti, corrente sopportabile e resistenza alla corrosione
 - Assemblaggio delle celle in batterie
Requisiti per l'accoppiamento delle capacità delle celle e per la compatibilità per assemblaggio in pacchi batteria, per prevenire l'inversione delle celle
 - Piano qualità
Requisiti per il piano qualità del produttore

- IEC62133-4
 - Test di Corto-Circuito
Test su celle nuove
Cortocircuito applicato alle celle tramite una resistenza di al massimo 0.1 Ohm, testato a una temperatura di 20°C e 55°C
 - Test di carica con corrente anormale
Test su celle nuove
Test di carica con sovracorrente (tensione costante, corrente limitata a 3 volte la massima corrente di carica nominale), testato a 20°C
 - Test di scarica forzata
Test su celle nuove
Test di scarica forzata solo per applicazioni multi-cella, testato a 20°C
 - Test di schiacciamento (Crush Test)
Test su celle nuove
Cella schiacciata tra due piani applicando una forza di 13 kN
 - Shock Test
Test su celle nuove
La cella viene sottoposta a tre urti con minima accelerazione media di 75g, con picco di accelerazione tra 125 e 175g, gli urti vengono applicati a ognuna delle direzioni perpendicolari all'asse di simmetria, testati a 20°C
 - Test sull'applicazione di vibrazioni
Test su celle nuove
Viene applicata una semplice vibrazione armonica ad ognuno delle tre direzioni perpendicolari, frequenza applicata tra 10 e 55Hz, testati a 20°C

- Test di riscaldamento
Test su celle nuove
Le celle vengono messe in un forno a temperatura iniziale di 20°C, la temperatura del forno viene poi aumentata ad un tasso di 5°C/minuto fino ad una temperatura di 130°C, la temperatura del forno viene mantenuta a 130°C per 10 minuti, successivamente la cella viene riportata a temperatura ambiente
 - Test sull'applicazione di un ciclo termico
Test su celle nuove
La cella portata alternativamente a diverse temperature: 4 ore alla temperatura di 75°C, 2 ore a 20°C, 4 ore a -20°C, per poi tornare a 20°C, il ciclo viene ripetuto per altra 9 volte
 - Test di bassa pressione (simulazione dell'altitudine)
Test su celle nuove
 - Carica continua a bassa corrente
Test su celle nuove
Celle completamente cariche vengono sottoposte a carica specificata dal produttore per 28 giorni, testato a 20°C
 - Moulded Case Stress at high Ambient Temperature
Test su celle nuove
Le celle vengono poste in un ambiente con circolazione di aria a 70°C per 7 ore
 - Caduta Libera
Ogni celle viene lasciata cadere per tre volte da un'altezza di 1 metro contro un pavimento rigido
 - Sovraccarica
 - Drop Test del pacco batteria
Un pacco carico viene gettato da 1.2m su una superficie rigida in modo che uno dei bordi del pacco colpisca il terreno
-
- SAE J2464
Prova valutata con SOC 100%. Si sottopone la batterie ad un incremento della temperatura da un flusso termico radiante dall'ambiente a 890°C (+/-5) per 90 secondi la temperatura raggiunta dalla batteria viene mantenuta per 10 minuti.

Bibliografia

- (1) Celina Mikolajczak, Michael Kahn, Kevin White, Richard Thomas Long, "Lithium-Ion Batteries Hazard an Use Assessment Final Report", The Fire Protection Research Foundation

Ringraziamenti

Ringrazio il professore Paolo Guglielmi per la disponibilità nella realizzazione di questa tesi. Ringrazio la mia famiglia per l'appoggio e l'affetto, mia zia Isabella che ha sempre creduto in me. Ringrazio Laura per l'appoggio che mi ha dato ogni giorno, la sua costante presenza mi ha permesso di terminare questa tesi.

