



Ricerca di Sistema elettrico

Ottimizzazione di sistemi di controllo BMS per moduli batterie al litio da utilizzare in applicazioni stazionarie

F. Baronti, R. Roncella, R. Saletti

OTTIMIZZAZIONE DI SISTEMI DI CONTROLLO BMS PER MODULI BATTERIE AL LITIO DA UTILIZZARE IN APPLICAZIONI STAZIONARIE

F. Baronti, R. Roncella, R. Saletti (Università di Pisa, Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione)

Settembre 2013

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2012

Area: Governo, gestione e sviluppo del sistema elettrico nazionale

Progetto: Sistemi avanzati di accumulo dell'energia

Obiettivo: Sperimentazione e caratterizzazione di moduli e sistemi al litio

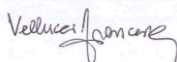
Responsabile del Progetto: Mario Conte, ENEA



Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Ottimizzazione di sistemi elettronici di controllo BMS per moduli batterie al litio da utilizzare in applicazioni stazionarie"

Responsabile scientifico ENEA: Francesco Vellucci

Responsabile scientifico Università di Pisa: Roberto Roncella



Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI	5
2.1 RIVISITAZIONE DELL'ARCHITETTURA DEL SISTEMA DI ACCUMULO.....	5
2.2 MODIFICHE AL PROGETTO ELETTRICO	7
2.2.1 <i>Aumento della tensione di lavoro del bus di bilanciamento</i>	7
2.2.2 <i>Pilotaggio del driver HT0440</i>	8
2.2.3 <i>Misura delle correnti di bilanciamento</i>	9
2.2.4 <i>Integrazione delle ventole</i>	10
2.2.5 <i>Misura della corrente di modulo</i>	10
2.3 MODIFICHE AL PROGETTO GEOMETRICO.....	12
2.4 MODIFICHE ALLE STRATEGIE DI ASSEMBLAGGIO	15
2.4.1 <i>Progetto della connessione di potenza</i>	16
2.4.2 <i>Progetto della scheda di connessione di segnale</i>	17
2.5 MODIFICHE E AGGIUNTE AL FIRMWARE	20
2.6 EVOLUZIONE DEL SOFTWARE	22
2.7 COLLAUDO DELLA SCHEDA E VALIDAZIONE DEL PROGETTO	23
2.8 RICONFIGURABILITÀ DINAMICA	25
2.8.1 <i>Architettura del modulo di bypass riconfiguratore</i>	25
2.8.2 <i>Problematiche legate alla commutazione degli interruttori</i>	26
2.8.3 <i>Problematiche termiche</i>	26
2.8.4 <i>Realizzazione di un modulo di riconfigurazione dinamica</i>	27
2.8.5 <i>Collaudo del modulo di riconfigurazione dinamica</i>	28
3 CONCLUSIONI.....	29
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	30
5 ABBREVIAZIONI E ACRONIMI	31

Sommario

Il presente rapporto descrive le attività svolte per ottimizzare l'elettronica di gestione e controllo di moduli batterie, basate preferenzialmente anche se non esclusivamente su celle con chimica LiFePO_4 , sviluppate in precedenti anni nell'ambito della ricerca di sistema elettrico [1]-[2], accentuando in questo caso l'enfasi su applicazioni di tipo stazionario.

In particolare sarà evidenziata l'evoluzione del progetto elettrico e geometrico della scheda elettronica, studiata per adattarsi alle caratteristiche delle applicazioni stazionarie, e specificatamente a una maggiore tensione complessiva di batteria, mantenendo comunque una significativa attenzione all'ingombro del modulo. La nuova elettronica di modulo, pur mantenendo le precedenti caratteristiche, permetterà di realizzare batterie con architettura più complessa, distribuita su più livelli gerarchici (modulo, stringa e batteria complessiva), e permetterà il conseguimento di una maggiore affidabilità di sistema. Ugualmente sarà descritto il perfezionamento del sistema di gestione termica, sempre basato su raffreddamento ad aria a convezione forzata e ora maggiormente integrato nell'elettronica stessa.

Il rapporto, a partire dalle esperienze maturate nella realizzazione e nel collaudo dei moduli preesistenti, introdurrà quindi la nuova metodologia di assemblaggio progettata, in grado di superare le difficoltà evidenziate dalla sperimentazione. L'uso di una scheda aggiuntiva dedicata esclusivamente alla connettività riduce il cablaggio interno e rappresenta un notevole passo verso la possibilità di ingegnerizzazione del modulo.

L'ottimizzazione dell'elettronica coinvolge anche il firmware della scheda, implementato a bordo del microcontrollore presente: il rapporto introduce i vantaggi ottenibili dalla disponibilità di un sistema di aggiornamento del firmware sul campo e descrive la metodologia di aggiornamento del firmware stesso tramite un apposito connettore, facilmente accessibile in fase di manutenzione. Anche il software di gestione complessivo, implementato con linguaggio LabVIEW su un personal computer, deve tenere conto delle nuove caratteristiche architetture, permettendo il monitoraggio e il bilanciamento di sistemi con un ulteriore livello di gerarchia.

Nella parte finale del rapporto viene infine presentato un nuovo sistema elettronico aggiuntivo, utile in configurazioni di batteria complesse, che permette la riconfigurazione dinamica della batteria con l'esclusione o l'inserimento di intere sezioni, durante il funzionamento stesso del sistema di accumulo energetico. La disponibilità di tale sistema rappresenta un deciso avanzamento dello stato dell'arte dei sistemi di accumulo energetico stazionario, permettendo un deciso incremento della manutenibilità di sistema e la pianificazione di interventi di manutenzione preventiva.

1 Introduzione

L'evoluzione delle batterie con chimica al litio, con la costante riduzione del costo per unità di energia immagazzinata, rende sempre più attraenti le applicazioni, anche stazionarie, di immagazzinamento diretto di energia elettrica in forma elettrochimica. Le caratteristiche di queste batterie infatti permettono il conseguimento di elevati rendimenti energetici delle fasi di immagazzinamento e successiva restituzione dell'energia e, allo stato dell'arte, con potenze in gioco tali da garantire lo scambio dell'intero contenuto energetico in frazioni di ora, con picchi di potenza anche due volte superiori al valore permesso a regime.

Le attività svolte negli anni precedenti della Ricerca di Sistema Elettrico, hanno portato alla realizzazione di moduli, prevalentemente orientati ad applicazioni mobili, in cui il principale obiettivo di progetto è rappresentato da densità di energia e di potenza, insieme ad affidabilità, sicurezza nell'applicazione e semplicità di gestione termica ed elettrica, comprese le problematiche di bilanciamento.

L'uso dei moduli sviluppati in applicazioni stazionarie richiede quindi attività aggiuntive, che aumentino le potenzialità e la flessibilità dei moduli, soprattutto in vista di applicazioni di alta energia e potenza. Tali specifiche richiedono una rivisitazione delle architetture di batteria, con la definizione di elementi aggiuntivi di controllo per permettere il coordinamento di un maggiore numero di moduli in serie.

Inoltre, mentre nelle applicazioni mobili è possibile separare la fase operativa dalle attività di manutenzione, nelle applicazioni stazionarie di maggiore responsabilità la continuità di servizio per periodi di tempo prolungati, nella scala di mesi o anni, rappresenta un obiettivo fondamentale che deve prevedere la possibilità di modificare in linea la configurazione stessa della batteria, escludendo e reinserendo intere sue sezioni.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

2.1 Rivisitazione dell'architettura del sistema di accumulo

Il sistema di accumulo energetico preesistente era basato su un modulo da 4 celle e sulla possibilità di assemblare fino a 4 moduli per formare un'unica batteria, per un totale di 16 celle. La batteria così formata, dotata di un'intelligenza distribuita nei suoi moduli componenti e in un elemento di controllo e supervisione ulteriore¹, ha capacità di monitoraggio completa per quanto riguarda tensioni, correnti e temperature, e di gestione del bilanciamento tra tutte le celle della batteria.

Il software di supervisione può proporre semplici stime dell'energia disponibile nella batterie, basate sull'integrazione della corrente di carica o scarica e sulla misura delle tensioni delle celle e inoltre registrare su file con sufficiente accuratezza e frequenza lo stato completo della batteria.

Tale architettura, sicuramente adeguata per applicazioni mobili off-road di piccola e media taglia, presenta però notevoli limiti, il principale dei quali consiste nella massima tensione di batteria ottenibile, pari a 48 V nominali con celle LiFePO_4 e solo leggermente maggiori con altri tipi di cella. Esiste la possibilità di mettere in serie un certo numero di questo tipo di batterie, ma questa soluzione crea criticità legate alla gestione di un numero elevato di sistemi con tensioni di riferimento diverse, con notevoli costi di isolamento e difficoltà nel conseguire le procedure di equalizzazione tra celle di batterie differenti.

Per questo motivo, pur mantenendo come prima aggregazione di base il modulo da 4 celle, si è ripensata l'architettura di sistema, introducendo stabilmente un ulteriore livello gerarchico, denominato stringa, che prevede fino a un massimo di 8 moduli. La batteria può quindi essere composta da un numero massimo di 4

¹Negli attuali prototipi, l'elemento di controllo e supervisione globale risiede su PC ed è sviluppato in ambiente LabVIEW. Le potenzialità e gli algoritmi presenti in questo elemento sono però compatibili con il processore di modulo, per cui è prevedibile un percorso progettuale che porti al trasferimento degli algoritmi di supervisione in uno dei moduli della batteria, che assume la funzione di master.

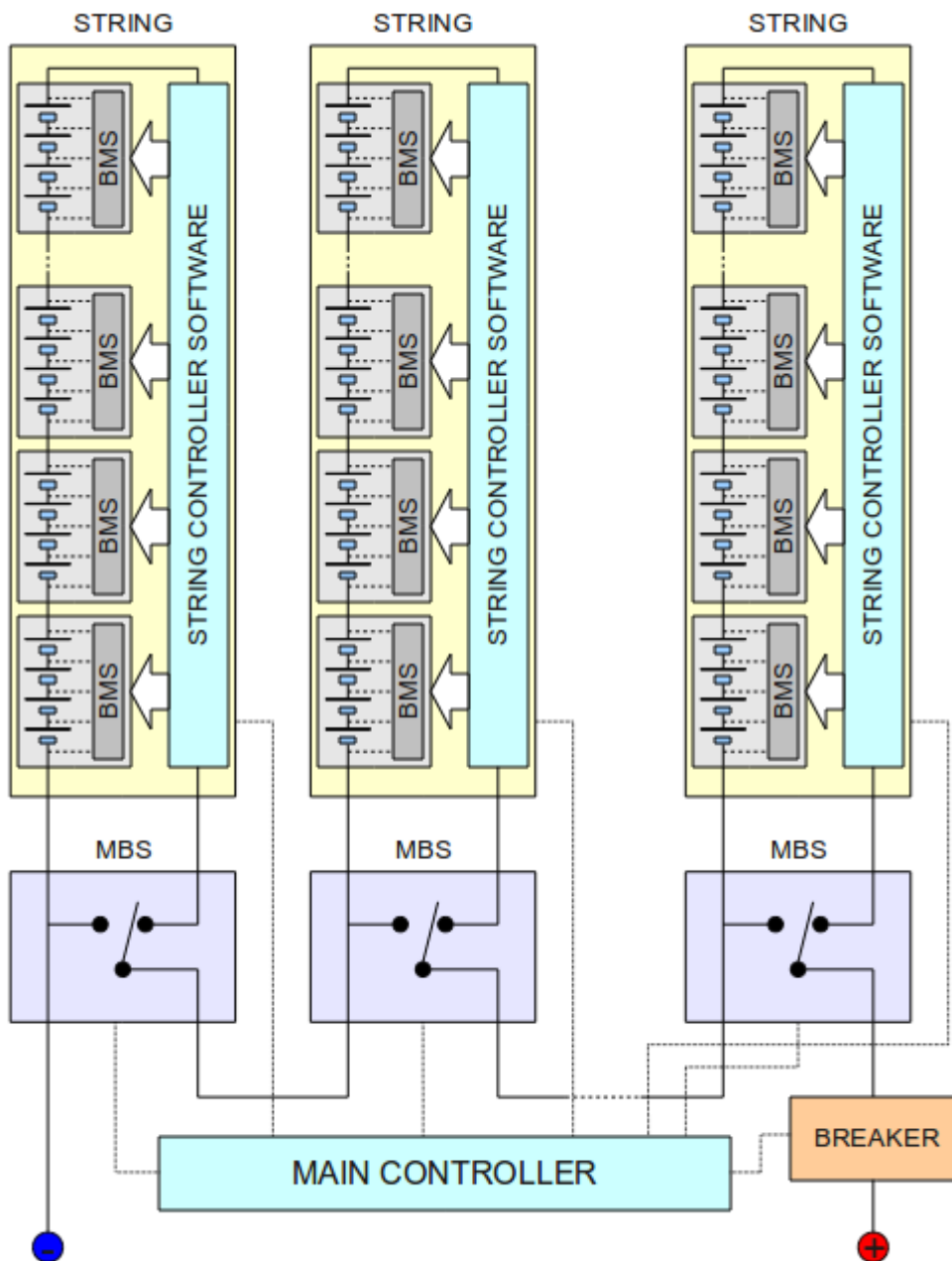


Figura 1 Architettura del sistema di accumulo di energia.

stringhe, per un numero totale massimo di $4 \times 8 \times 4 = 128$ celle, che permettono di ottenere 384 V nominali con chimica LiFePO_4 e oltre 450 V nominali con celle LiPO.

Le nuove specifiche, più ragionevoli per applicazioni stazionarie, richiedono una rivisitazione di diversi aspetti del progetto elettrico del modulo, per renderlo compatibile con la nuova dimensione della stringa². Inoltre, approfittando dell'esigenza di produrre nuovamente i circuiti stampati per la nuova versione dell'elettronica di modulo, è stata messa a frutto l'esperienza maturata durante lo svolgimento delle attività degli anni precedenti, prevedendo la revisione e il miglioramento di diversi aspetti circuitali e geometrici, per migliorare le caratteristiche e aumentare l'affidabilità dei sistemi realizzati con questi moduli.

² Nella versione precedente, la stringa poteva essere identificata con l'assemblaggio di un massimo di 4 moduli.

Inoltre poiché un aspetto determinante in un sistema di accumulo per applicazioni stazionarie consiste nella continuità di servizio e in una facile manutenibilità, l'architettura è stata arricchita della possibilità di riconfigurare dinamicamente la batteria durante il funzionamento, grazie a un modulo aggiuntivo di bypass, azionato dal software di supervisione. Questa parte, descritta nella seconda sezione, permette l'inserimento o l'esclusione di una delle stringhe della batteria e naturalmente prevede la compatibilità da parte dell'applicazione di variazioni di tensione pari a una frazione $1/n$ della tensione totale, dove n è il numero di stringhe che compongono la batteria.

Tale compatibilità è un requisito ragionevole in molte applicazioni stazionarie, dove il sistema di accumulo energetico è collegato alla rete e/o alle utenze con convertitori DC/DC bidirezionali con ampio range di ingresso, necessari in ogni caso per tenere conto della variazione di tensione di batteria al variare dello stato di carica³.

La possibilità di riconfigurazione della batteria può inoltre essere usata come primo livello di protezione di fronte al raggiungimento di condizioni critiche da parte di una delle celle della stringa: piuttosto che disinserire completamente la batteria, rinunciando alla continuità di servizio, è possibile escludere soltanto la stringa in condizioni critiche attivando contestualmente una richiesta di manutenzione.

2.2 Modifiche al progetto elettrico

2.2.1 Aumento della tensione di lavoro del bus di bilanciamento

La principale modifica apportata all'elettronica del modulo riguarda la tensione di breakdown degli interruttori a stato solido a MOSFET, usati per la matrice di connessione che permette di connettere individualmente ciascuna cella al bus di bilanciamento.

Gli interruttori della matrice di connessione, come appare evidente dalla Figura 2, possono essere sottoposti, nel caso in cui sia connessa una delle celle estreme, a tensioni inverse pari a

$$V_{SW}^{max} = (N M - 1) V_{cell}^{max}$$

ove N è il numero massimo di moduli nella stringa, M il numero di celle nel modulo e V_{cell}^{max} la tensione superiore di cut-off della cella. La tensione è applicata alla coppia di interruttori che connettono una delle celle estreme, quando è connessa la cella all'altro estremo.

Poiché le stringhe nella nuova architettura a 3 livelli possono comprendere fino a 8 moduli da 4 celle ciascuno, si ha sugli interruttori una sollecitazione massima pari a 130 V, se si assume come massima tensione quella di cut-off delle celle LiPO di 4.2 V.

In considerazione della gravità delle conseguenze di un guasto dovuto alla chiusura non prevista di uno degli switch del bus di bilanciamento, con il cortocircuito di una sezione della stringa e conseguente rischio di incendio, si è ritenuto di dimensionare gli interruttori di cella in modo che ciascuno dei due, sia quello del polo positivo sia quello del negativo, fosse in grado di sopportare da solo la tensione inversa.

Ognuno dei due interruttori di cella, dovendo essere bidirezionale, è composto da due MOSFET collegati back-to-back, in modo tale che, nel caso di interruttore aperto, ce ne sia uno che si oppone al passaggio di corrente, essendo in conduzione il diodo intrinseco dell'altro.

Sulla base di queste riflessioni, occorre selezionare quindi un MOSFET con tensione di breakdown superiore a 130 V, a cui occorre aggiungere un ulteriore ragionevole margine di sicurezza.

Nella scheda di modulo preesistente era stato usato il dispositivo Si7478DP della Vishay, caratterizzato da tensione di breakdown da 60 V, resistenza tipica in accensione minore di 9 mΩ con VGS = 4.5 V e contenitore PowerPAK a 8 pad e basso profilo. Tale componente, ottimo dal punto di vista delle caratteristiche in conduzione della matrice di connessione, non è più compatibile con la nuova architettura.

³ Occorre tenere presente infatti che una comune cella LiFePO₄ presenta durante il funzionamento, prima di raggiungere le condizioni di cut-off, variazioni di tensioni tipiche rispetto al nominale pari al ±20%.

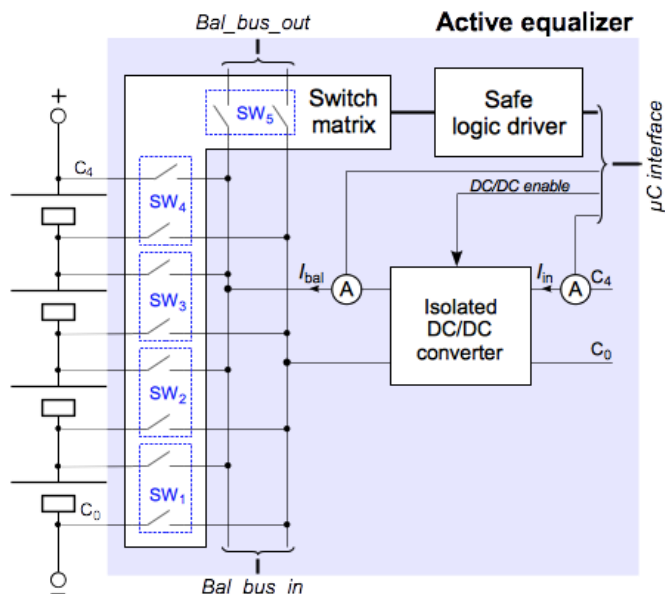


Figura 2 Schema elettrico di principio che mostra la matrice di connessione delle celle di una stringa al bus di bilanciamento. La massima sollecitazione si ha sugli interruttori a stato solido della cella a uno degli estremi, quando al bus di bilanciamento è connessa la cella all'altro estremo.

Sono stati quindi selezionati nuovi dispositivi che, pur presentando lo stesso package e caratteristiche accettabili in conduzione⁴, garantissero una tensione di breakdown di 150 V. La ricerca di questi componenti ha permesso di selezionare 3 alternative accettabili: il componente Si7738DP della Vishay, il componente BSC190N15NS3G della Infineon e il componente STL35N15F3 della ST Microelectronics. Nella Tabella I sono confrontate le principali caratteristiche dei diversi componenti.

2.2.2 Pilotaggio del driver HT0440

L'esame della Tabella I mostra che, accettando un ragionevole aumento della resistenza in conduzione, è possibile ottenere il requisito sulla tensione sopportata senza modificare il footprint nel circuito stampato.

Tabella I Confronto tra le diverse alternative per i MOSFET della matrice di commutazione

Componente	Produttore	VDS(Max)	Rds(on)	@ VGS	IDS(Max)	EURO*
7478DP	Vishay	60 V	8.8 mΩ	4.5 V	18.5 A	1.0689
Si7738DP	Vishay	150 V	38 mΩ	10 V	30 A	1.0730
BSC190N15NS3G	Infineon	150 V	19 mΩ	10 V	50 A	1.2677
STL35N15F3	STM	150 V	40 mΩ	10 V	7 A	1.6630

* Costo unitario per 1000 pezzi offerti dal distributore internazionale Digikey

Anche i costi dei nuovi dispositivi restano confrontabili con la precedente soluzione. L'analisi delle caratteristiche dei dispositivi mostra però la necessità di usare una tensione di pilotaggio maggiore di quella prevista nel precedente circuito⁵. A questo scopo è stato introdotto un buffer alimentato a 5 V in uscita al chip programmabile che genera i segnali di controllo della matrice di commutazione, i quali sono limitati a 3.3 V. Una coppia di interruttori per una cella del modulo e relativo driver sono mostrati in Figura 3.

⁴L'aumento della tensione di breakdown in dispositivi della stessa taglia, si accompagna inevitabilmente a un aumento della resistenza di canale in conduzione.

⁵ Il driver HT0440 garantisce una tensione di pilotaggio circa doppia di quella presente al suo ingresso.

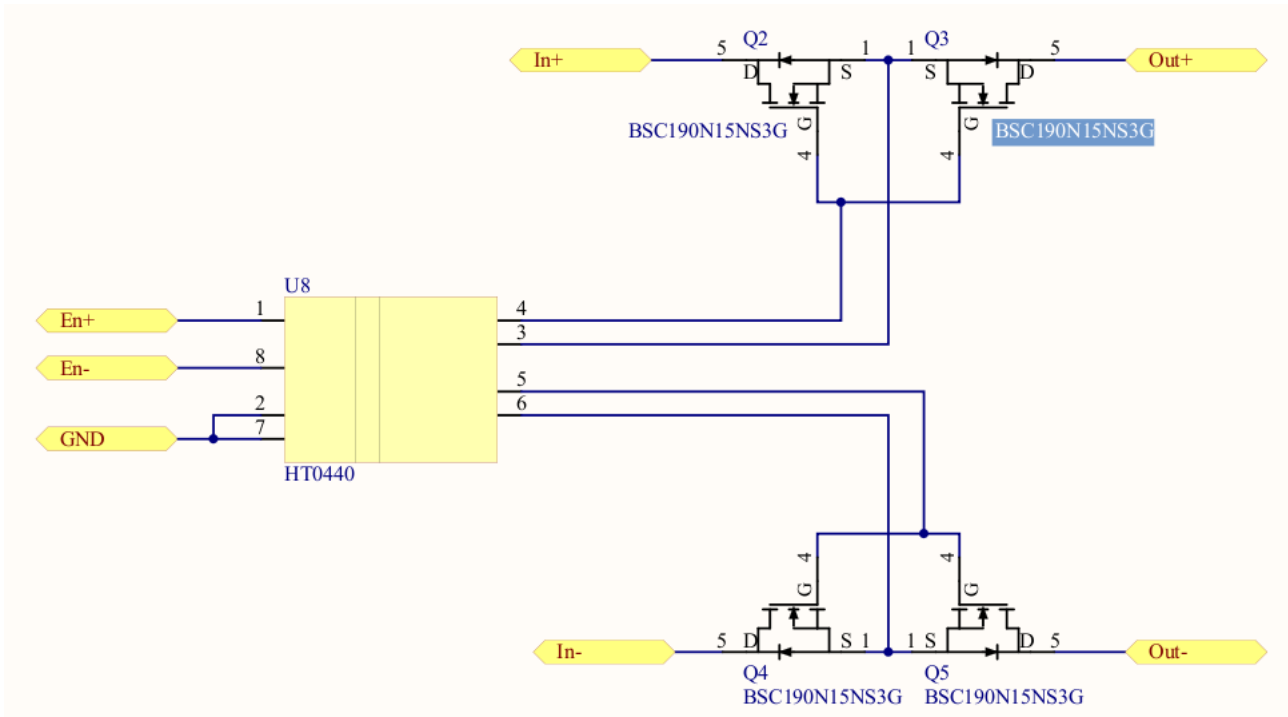


Figura 3 Schema del nuovo sistema di pilotaggio del canale di bilanciamento.

L'aggiunta del buffer, esplicitata nella Figura 4, non altera le caratteristiche di sicurezza garantite dalla logica di controllo, cioè l'impossibilità di selezionare contemporaneamente due o più celle e un adeguato tempo morto tra la disattivazione di una cella e la connessione di una nuova cella sul bus di bilanciamento. La presenza dei pull-down R57-R61 garantisce la disattivazione di tutti gli interruttori nel caso di mancata alimentazione o di sconnessione del chip CPLD di pilotaggio.

2.2.3 Misura delle correnti di bilanciamento

Nelle modifiche allo schema elettrico per il miglioramento delle caratteristiche particolarmente utili in applicazioni stazionarie, è stato inserito un circuito per la misura di corrente ACS714 prodotto dalla Allegro anche in ingresso al convertitore DC/DC di bilanciamento di modulo. Infatti tutti gli algoritmi sia per il bilanciamento tra celle sia per la stima dello stato di carica, traggono vantaggio da una conoscenza precisa delle correnti di carica e scarica di ciascuna cella.

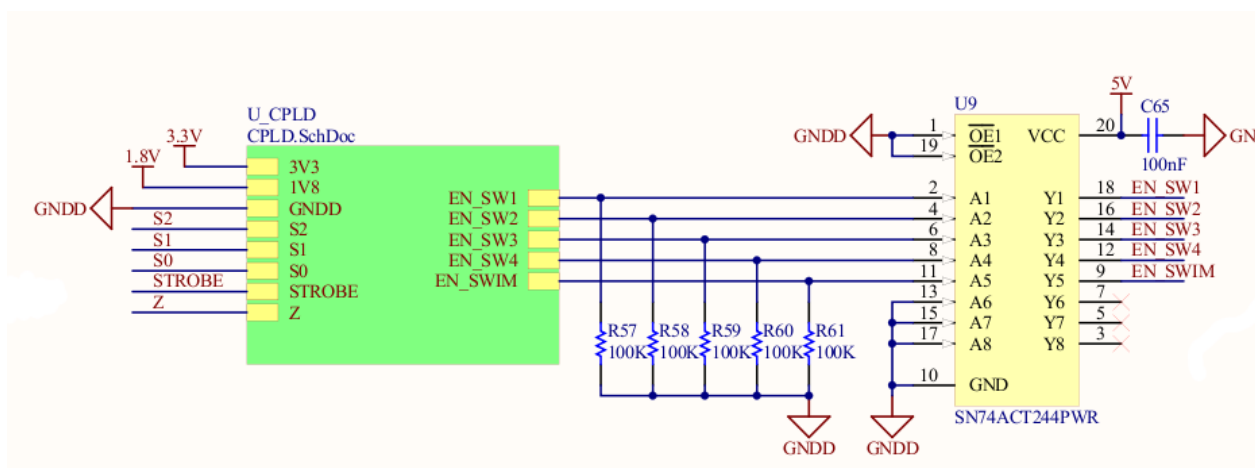


Figura 4 Dettaglio dello schema con il buffer per il pilotaggio dei driver isolati HT0440.

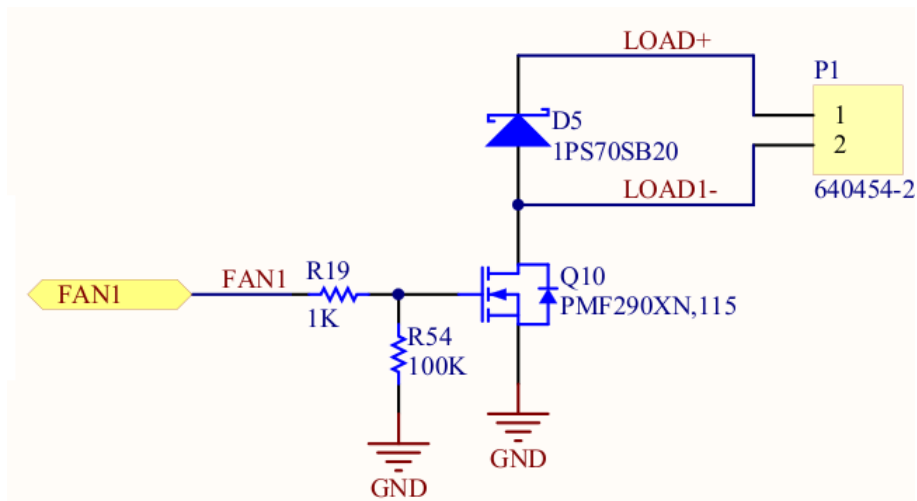


Figura 5 Dettaglio dello schema del driver di una delle 3 ventole di raffreddamento.

L'esigenza di misurare la corrente ai due lati del convertitore deriva dal fatto che il rendimento del DC/DC, che in questa applicazione funziona a corrente di uscita costante, è fortemente influenzato dalla temperatura e non è quindi possibile ricavare l'assorbimento dalla batteria dalla semplice conoscenza della corrente erogata sul bus di bilanciamento.

Una ulteriore evoluzione del progetto prevede la sostituzione del convertitore DC/DC commerciale⁶ con un dispositivo custom bidirezionale, progettato per fornire una corrente di uscita costante con rendimento stabile. In questo caso, la misura delle correnti risulta inutile, in quanto il processore può ricavare il dato della carica trasferita a partire dalla conoscenza dei tempi di accensione.

2.2.4 Integrazione delle ventole

Una ulteriore integrazione apportata nello schema elettrico consiste nell'inserimento sulla scheda di tre circuiti di pilotaggio adeguati alle potenze delle ventole di raffreddamento. In vista di una maggiore ingegnerizzazione dell'assemblaggio, la disponibilità a bordo della scheda delle uscite direttamente collegabili alle ventole garantisce semplicità di montaggio ed evita l'aggiunta di plug-in esterni con i relativi cablaggi.

In Figura 5 è mostrato lo schema di uno dei 3 circuiti di pilotaggio disponibili, direttamente attivato da un pin del microcontrollore. La possibilità di attivare separatamente le ventole permette l'implementazione di diverse strategie di gestione termica, differenziando eventualmente i flussi d'aria all'interno del contenitore delle batterie.

Il MOSFET di attivazione PMF290XN, prodotto dalla NXP, ammette correnti massime di 1 A e tensioni in condizioni di apertura di 20 V.

2.2.5 Misura della corrente di modulo

Per aumentare la flessibilità d'uso e l'affidabilità del modulo è stata inserita nell'elettronica di monitoraggio la possibilità di misurare la corrente complessiva di modulo non solo con un sensore di Hall esterno, applicabile al connettore dedicato al cablaggio di comunicazione e bilanciamento, ma anche con shunt resistivo sul percorso di potenza.

Dati i bassi valori di resistenza dei ponticelli di connessione di potenza tra celle, realizzati in rame o alluminio e dimensionati per la massima corrente impulsiva delle celle, è necessario l'uso di un

⁶Il modello EC6A01 prodotto dalla Cincon viene usato nel circuito di bilanciamento come generatore di corrente circa costante, sfruttando le sue caratteristiche di protezione contro il cortocircuito. La limitazione della corrente di uscita è però basata sulla tensione dell'elemento attivo interno al convertitore, che varia - aumentando - quando il convertitore si scalda.

amplificatore da strumentazione per portare il segnale a valori di tensione compatibili con il convertitore A/D a bordo del processore sulla scheda. In particolare si è scelto di ricondurre il range di misura della corrente a quello del sensore di Hall esterno, che può essere usato come alternativa di maggiore accuratezza e costo.

Inoltre, a causa dell'elevato coefficiente di temperatura sia del rame sia dell'alluminio⁷, è necessario acquisire l'informazione sulla temperatura del ponticello, per compensare le notevoli variazioni dovute alle condizioni operative.

È stata ritenuta una buona soluzione quella di collocare direttamente sulla scheda ausiliaria di connessione⁸ l'elettronica di acquisizione del segnale di tensione dello shunt, proporzionale alla corrente nel circuito di potenza. L'amplificatore da strumentazione a cui è affidato il compito di portare questo segnale dell'ordine dei millivolt nel range dei volt si trova così a essere permanentemente alimentato dalla stessa tensione di modulo.

Per questo motivo, è stato cercato un amplificatore da strumentazione a basso consumo, compatibile con le correnti di autoscarica delle più piccole tra le celle⁹ previste per i moduli. Il processo di selezione ha portato all'individuazione di 2 alternative costituite dall'amplificatore AD627 prodotto da Analog Devices (corrente di riposo 85 μ A) e dall'equivalente INA122 prodotto da Texas Instruments (corrente di riposo 60 μ A).

L'amplificazione del circuito integrato viene fissata nel valore di 1000 tramite un opportuno resistore esterno. La temperatura del ponticello viene acquisita grazie a un termistore NTC, in serie a un resistore, collocato in prossimità della zona centrale dello shunt. Le tensioni di uscita sia dell'amplificatore sia del partitore sensibile alla temperatura, sono ottenute a partire dalla tensione di 5 V fornita dall'elettronica di modulo alla scheda di connessione e condivisa con il misuratore a effetto Hall esterno. In Figura 6 viene mostrato lo schema completo del misuratore.

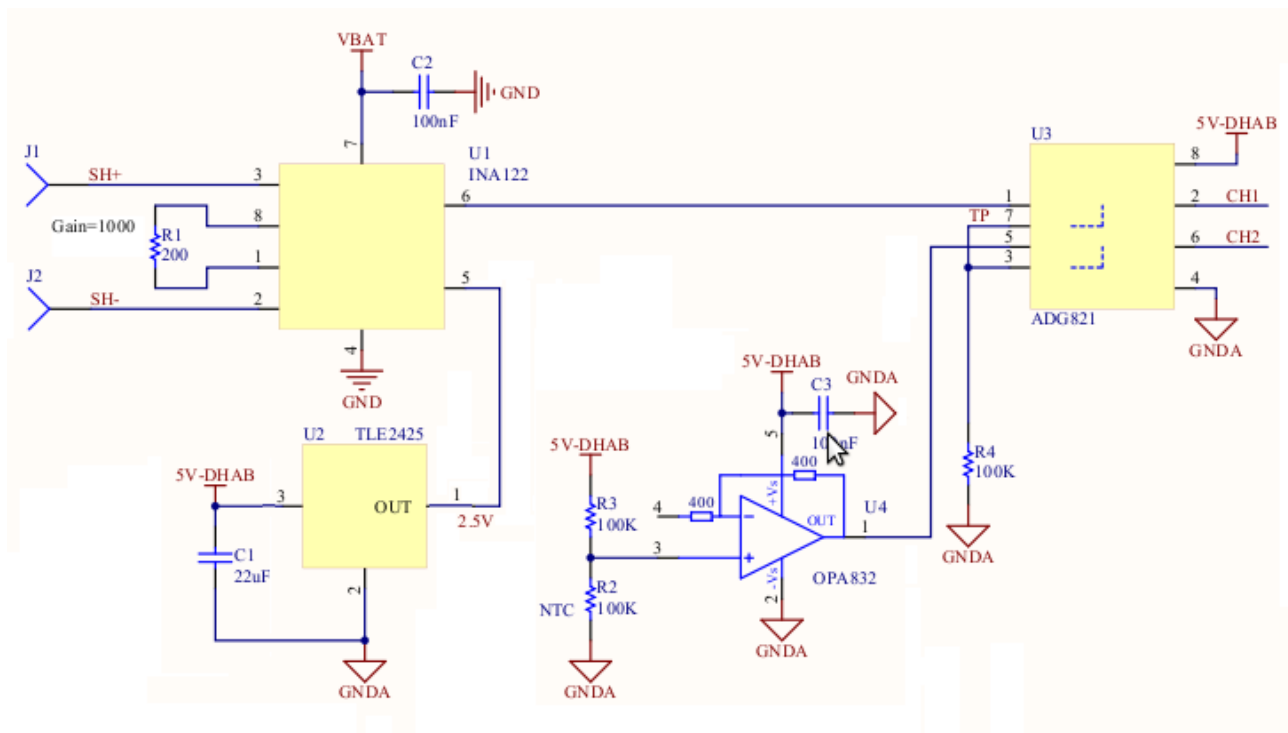


Figura 6 Schema del misuratore di corrente di modulo.

⁷Per entrambi i metalli, per una variazione di temperatura di 10°C, si ha una variazione di resistenza del 4% circa.

⁸ Per maggiori dettagli sul progetto geometrico e sulla tecnica di assemblaggio, si vedano le sezioni successive.

⁹Considerando un tasso di autoscarica tipico del 3% ogni mese, si ha per le celle da 30 Ah una corrente equivalente pari a 1.25 mA.

2.3 Modifiche al progetto geometrico

L'ottimizzazione dei moduli progettati ha riguardato anche in misura notevole il progetto geometrico della scheda elettronica. Gli obiettivi di questa attività si sono concentrati, oltre che ovviamente sulla riduzione delle dimensioni complessive del modulo, sul miglioramento complessivo dell'assemblaggio, per conseguire una significativa riduzione dei costi complessivi di modulo.

L'elevata quantità di moduli richiesta nella maggior parte delle applicazioni stazionarie giustifica questa attenzione, sia per motivi economici sia per incrementare l'affidabilità riducendo la presenza di connessioni cablate interne al modulo e semplificando la gestione termica grazie al controllo integrato nell'elettronica delle ventole.

La modifica più significativa al progetto geometrico consiste nella scelta di una tecnologia realizzativa a 4 layer per compensare la maggior criticità di piazzamento e permettere il routing dei componenti nella minore area disponibile. Inoltre la presenza di piani di massa e alimentazione migliora le prestazioni di compatibilità elettromagnetica della scheda e la capacità di trasporto di corrente nella sezione di bilanciamento.

Si è quindi proceduto alla riorganizzazione dei percorsi di alimentazione alle diverse sezioni del BMS per ridurre le criticità da "hot insertion" della scheda: durante il montaggio infatti, la messa sotto tensione delle diverse sezioni del chip può avvenire in modi differenti, in funzione della procedura di assemblaggio adottata. Nella nuova versione è presente un unico connettore con l'alimentazione principale dell'elettronica, che deve essere collegato come primo elemento. In questo modo la connessione delle tensioni di cella e del bus di bilanciamento trova il processore e il chip di misura già alimentato.

La principale difficoltà nella realizzazione del nuovo layout è dovuta alla compatibilità geometrica della scheda, da collocare nella parte superiore del modulo solidalmente al coperchio, con le aperture circolari praticate per il sistema di ventilazione e a cui sono attaccate le ventole stesse. La scheda in pratica viene fissata meccanicamente al contenitore del modulo usando gli stessi bulloni delle ventole e con esse e il coperchio viene a formare un unico elemento meccanico.

Questo arrangiamento ha ridotto notevolmente gli spazi per il piazzamento e il collegamento dei componenti, introducendo numerosi vincoli sulla posizione dei componenti stessi, ma permette di ottenere una soluzione molto più compatta, che racchiude all'interno le principali difficoltà di assemblaggio.

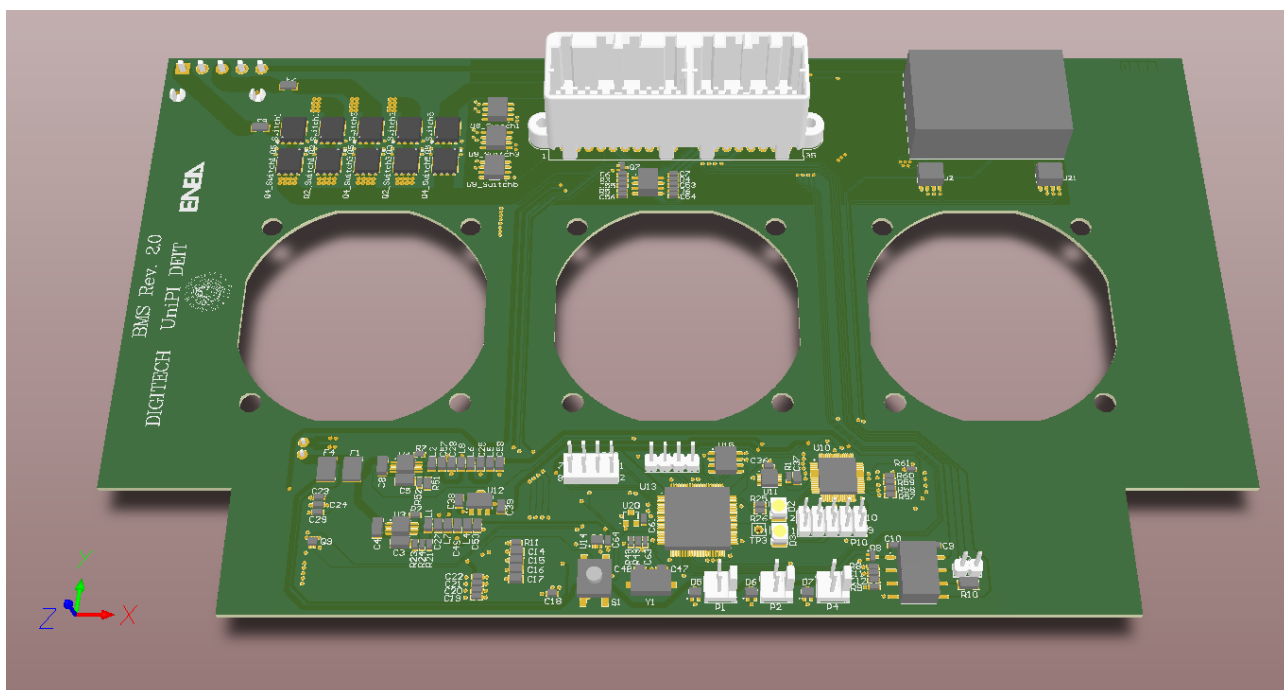


Figura 7 Rendering della faccia superiore del nuovo circuito stampato per l'elettronica di modulo.

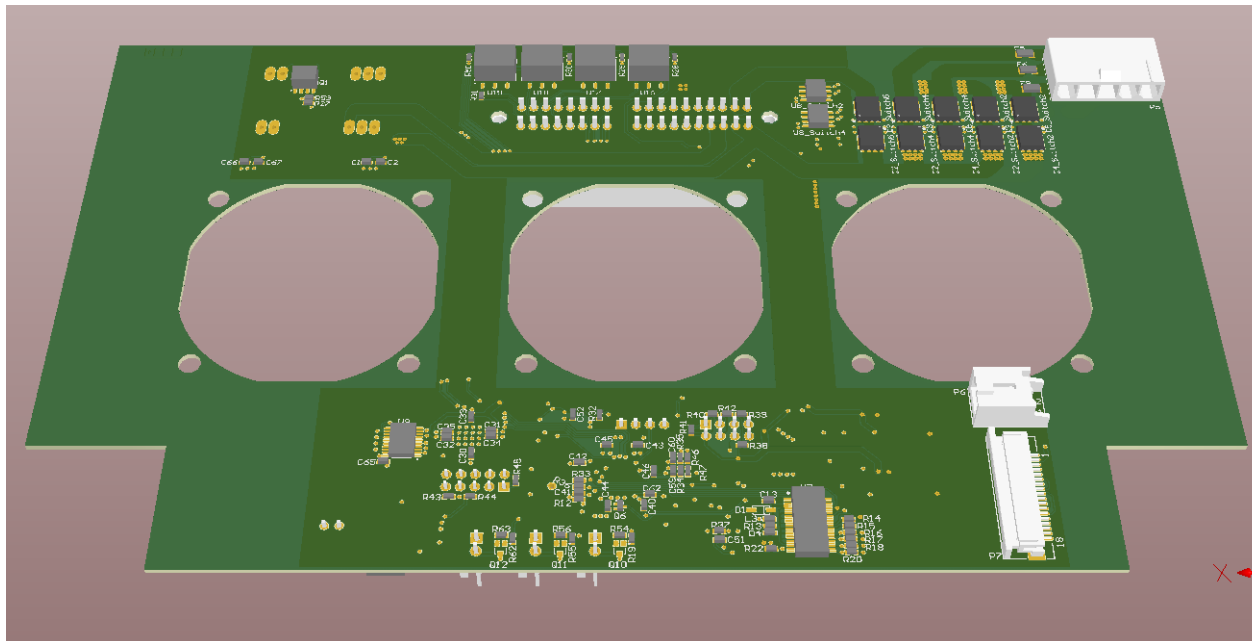


Figura 8 Rendering della faccia inferiore, verso le celle, del nuovo circuito stampato per l'elettronica di modulo.

Una possibile causa di criticità è costituita dalla difficoltà di dissipazione termica per i componenti elettronici che si vengono a trovare tra la scheda e il coperchio e in particolare per il convertitore DC/DC di bilanciamento. Per facilitare la circolazione d'aria in prossimità di questo componente, per cui è prevedibile una dissipazione di qualche watt, è stata praticata un'apertura nel circuito stampato, a cui potrà corrispondere una griglia forata nel coperchio del modulo. La Figura 7 e la Figura 8 presentano il rendering delle due facce della nuova versione della scheda.

Nella Figura 7 è evidente la scelta di un diverso connettore per il cablaggio esterno. Si tratta di un connettore rettangolare di tipo automobilistico direttamente cablato sul PCB, che evita la presenza di un cospicuo cablaggio e dei numerosi connettori intermedi che caratterizzavano la precedente versione. Nella Figura 9 sono elencate le connessioni funzionali verso l'esterno.

Anche i connettori per l'assemblaggio interno sono stati modificati e nella Figura 8 è possibile vedere la relativa collocazione. Tutti i segnali sono raggruppati in soli tre connettori per l'alimentazione dell'elettronica, la connessione con NTC e celle (ed eventuale misuratore di corrente) e il bilanciamento.

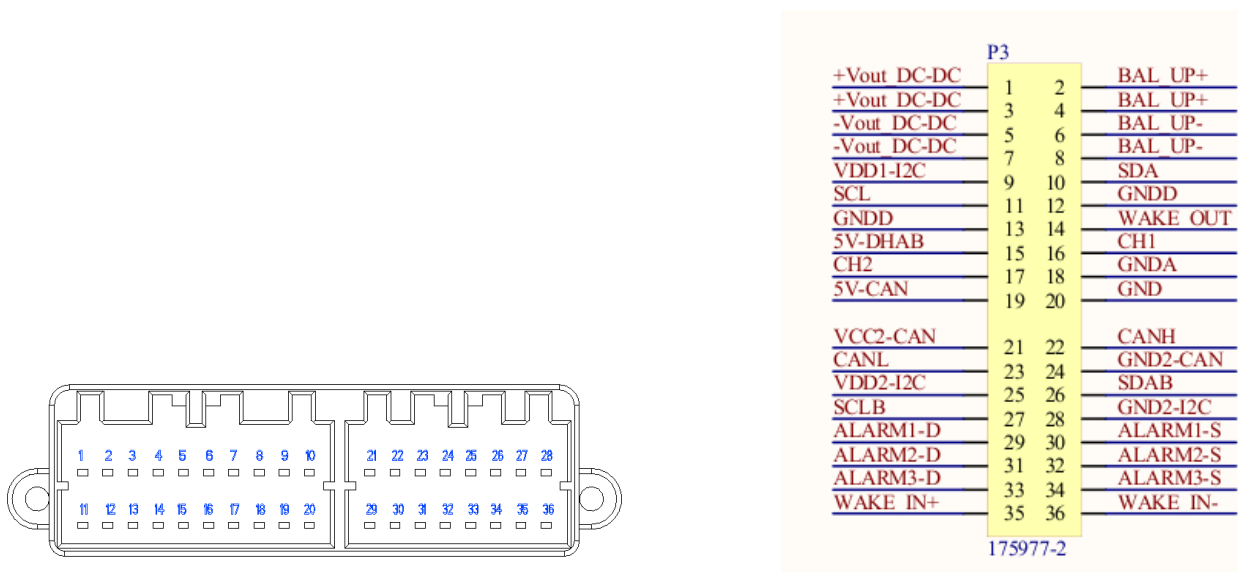


Figura 9 Vista frontale e pinout del connettore di interfaccia esterno.

Il connettore di alimentazione, il primo da collegare durante l'assemblaggio, è un connettore polarizzato a 2 pin posto in prossimità della ventola più a destra, nella figura, in posizione che non presenta particolari problemi di cablaggio rispetto al connettore corrispondente nella scheda di connessione sottostante. La vista frontale e il pinout del connettore di alimentazione sono mostrati in Figura 10.

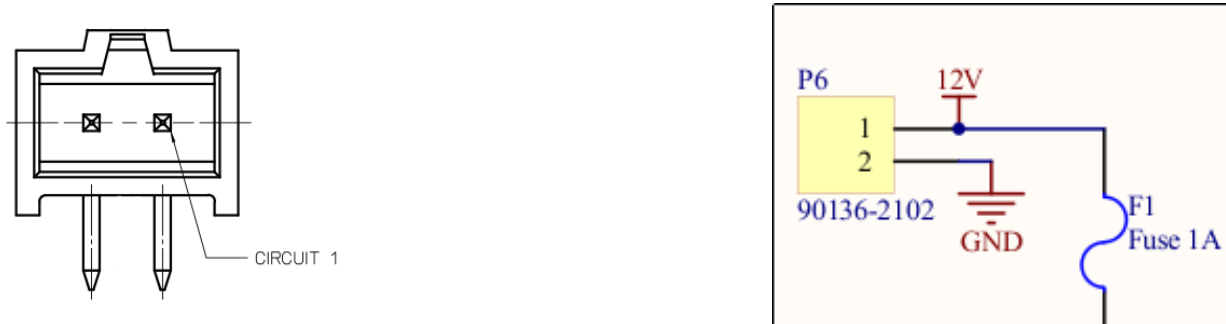


Figura 10 Vista frontale e pinout del connettore di alimentazione verso le celle.

Il connettore di bilanciamento a 5 pin, posizionato in alto a destra nella Figura 9, viene ugualmente collegato con un cablaggio filato compatibile con i livelli di corrente di bilanciamento, che in particolari circostanze potrebbero arrivare anche al valore di 10 A, nel caso in cui più moduli di una stringa riversino carica su una cella del modulo in oggetto. La Figura 11 mostra la vista frontale e il pinout del connettore per le connessioni di *bilanciamento* verso le celle.

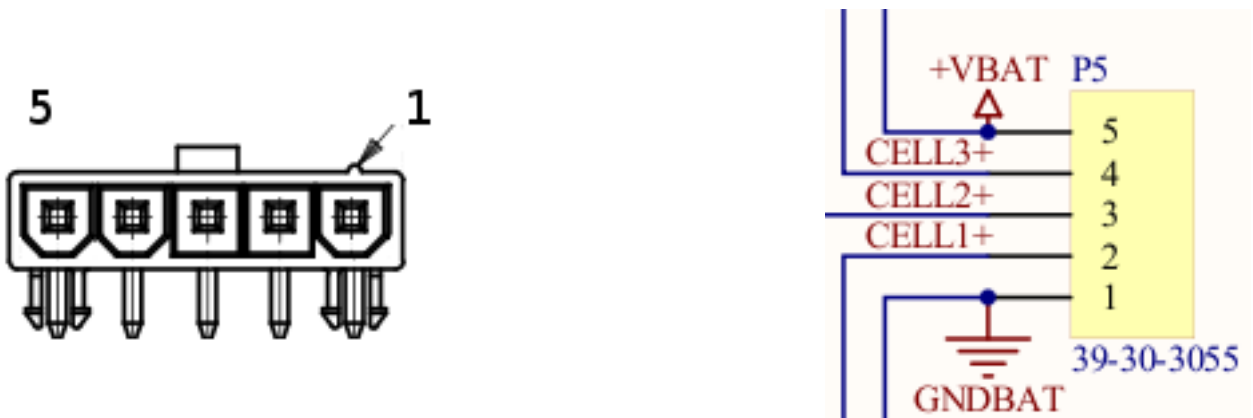


Figura 11 Vista frontale e pinout del connettore per le connessioni di *bilanciamento* verso le celle.

La soluzione più innovativa che facilita la realizzazione del cablaggio è però rappresentata dall'uso di un circuito stampato flessibile a 18 vie per la connessione dei rimanenti segnali, in cui non si hanno particolari esigenze di corrente. È quindi possibile connettere con un unico elemento le tensioni di ciascuna cella, i sensori di temperatura e le terminazioni per la misura della corrente di modulo. Il corrispondente connettore utilizzato e la piedinatura dei segnali utilizzati sono mostrati in Figura 12.

Occorre prestare particolare attenzione all'allineamento di questo connettore con il suo omologo nella scheda di connessione sottostante, in quanto il circuito flessibile permette solo una limitata tolleranza nella collocazione delle due terminazioni. Per contro la possibilità di essere piegato completamente, permette di eseguire facilmente la connessione tra modulo e coperchio, con la garanzia di mantenere la posizione durante le fasi di chiusura del modulo, evitando quindi pericolose interferenze con le pale delle ventole.

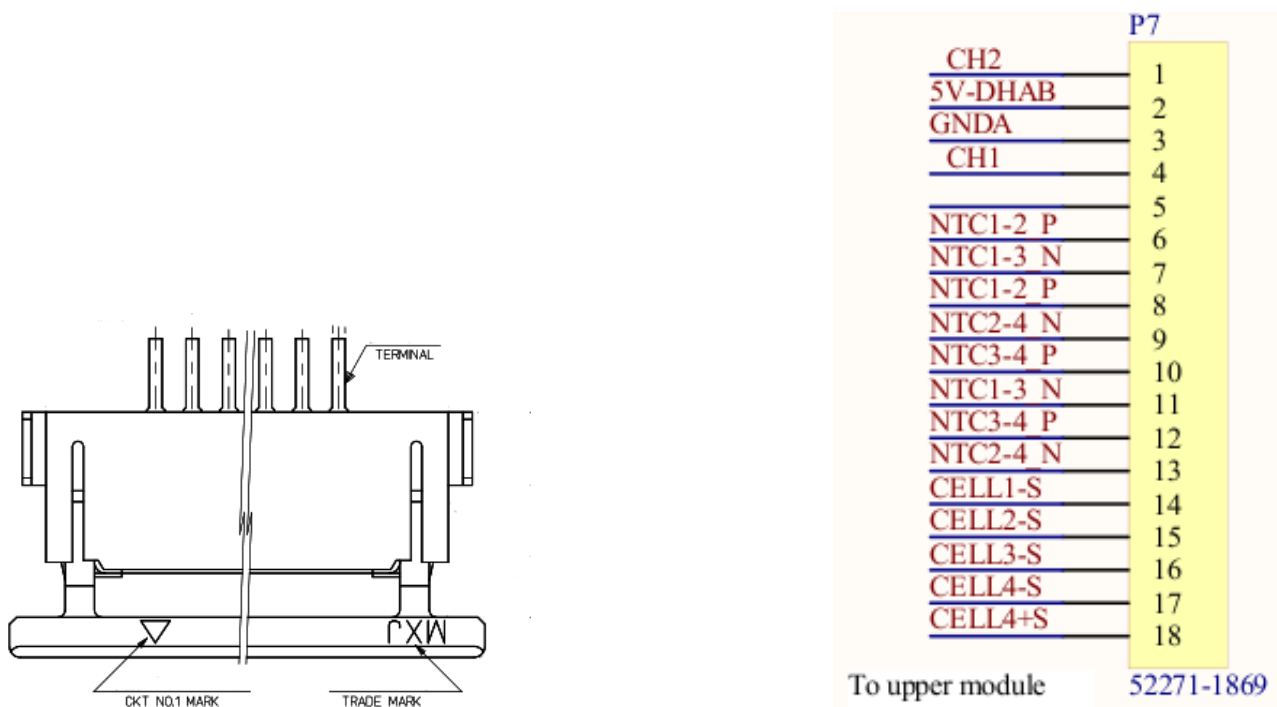


Figura 12 Vista dall'alto e pinout del connettore per le connessioni di *sense* verso le celle, per i sensori NTC e per il misuratore di corrente interno al modulo.

2.4 Modifiche alle strategie di assemblaggio

L'assemblaggio si è dimostrato uno dei punti di maggior criticità della versione precedente. Sono state pertanto dedicate risorse per riprogettare la sezione di interconnessione tra celle, sia per quanto riguarda il percorso di potenza, sia per la connessione all'elettronica di monitoraggio e controllo.

La precedente strategia di assemblaggio prevedeva un ampio uso di cablaggi filati ed era affidata, per le fasi conclusive, al montaggio manuale. Le criticità individuate riguardano principalmente due aspetti: la difficoltà costruttiva e l'affidabilità dei moduli realizzati.

Infatti, se da un lato l'uso di fili garantisce una notevole libertà nella scelta e nel posizionamento dei connettori e, almeno teoricamente, una certa facilità nel posizionamento delle connessioni all'interno del modulo, dall'altra il grande volume dei cablaggi insieme alla ridotta disponibilità di spazi all'interno del modulo, ha creato problemi di collocazione e maneggevolezza delle sezioni del modulo da montare, aggravati dalla presenza costante e inevitabile di tensione nel cablaggio stesso.

L'inserimento dell'elettronica "a caldo" e la possibilità non remota di contatti tra cavi interni e parti del modulo soggette a innalzamenti di temperatura incrementa inoltre la probabilità di guasti, e riduce pertanto l'affidabilità del modulo per quanto riguarda la mortalità infantile e nelle prove più impegnative dal punto di vista termico.

Per ovviare a queste criticità, particolarmente penalizzanti anche in applicazioni stazionarie, richiedenti nella maggior parte dei casi volumi elevati, costi ridotti ed elevate affidabilità, sono stati adottati diversi provvedimenti, basati fondamentalmente sulla separazione¹⁰ tra connessione di potenza e connessione di monitoraggio e controllo, e sulla migliore pianificazione di una ridotta quantità di cablaggi¹¹.

¹⁰Le barre di potenza sono collocate subito a contatto con gli elettrodi delle celle mentre l'elettronica è separabile con connettori e posta superiormente, nel coperchio. Inoltre anche il montaggio avviene in due fasi distinte, con la connessione di potenza che precede la connessione dell'elettronica.

¹¹La posizione dei connettori è pianificata in precedenza e per i segnali viene usato un conduttore flessibile multipolare, che permetta la connessione simultanea di 18 conduttori con ingombro limitato.

2.4.1 Progetto della connessione di potenza

La connessione di potenza, realizzata con barre metalliche fissate agli elettrodi delle celle, viene effettuata preliminarmente e completata prima dell'inserimento e della connessione dell'elettronica, completamente contenuta nel coperchio del modulo. I contatti terminali, illustrati in Figura 13, sono compatibili con quelli standard, troncoconici, delle batterie di avviamento automobilistiche, e posizionati sempre agli estremi di uno dei lati maggiori del coperchio, rilassando il vincolo di posizione costituito dalle coordinate dei contatti degli elettrodi terminali della batteria.

Per il completamento delle connessioni occorrono 3 barre interne e 2 blocchi terminali. Tutti questi elementi devono prevedere 2 contatti, per il prelievo della tensione e per il bilanciamento, realizzabili con viti M3 e foro filettato; inoltre la barra centrale della batteria deve prevedere due ulteriori contatti agli estremi per il prelievo della tensione di shunt. Occorre dimensionare questi elementi di connessione sulla base della massima corrente di regime del modulo, garantendo che in queste condizioni l'insieme di tutte le connessioni non comporti una riduzione significativa della potenza erogata al carico, rispetto a quella fornita dalle celle.

Inoltre durante la condizione di massima corrente impulsiva, mantenuta per il tempo massimo di 1 minuto, i ponticelli che si troveranno a dissipare circa 2.75 volte la potenza dissipata nelle precedenti condizioni di regime¹², non devono raggiungere temperature critiche.

Un criterio per il dimensionamento delle connessioni può essere quello di limitare le perdite di contatto a una frazione pari all'1 ‰ della potenza nominale corrispondente erogata dal modulo. Sulla base di questo criterio, le resistenze complessive dei contatti per i 3 diversi moduli devono essere inferiori a 133 $\mu\Omega$, 67 $\mu\Omega$ e 40 $\mu\Omega$ rispettivamente per il modulo da 30, 60 e 100 Ah.

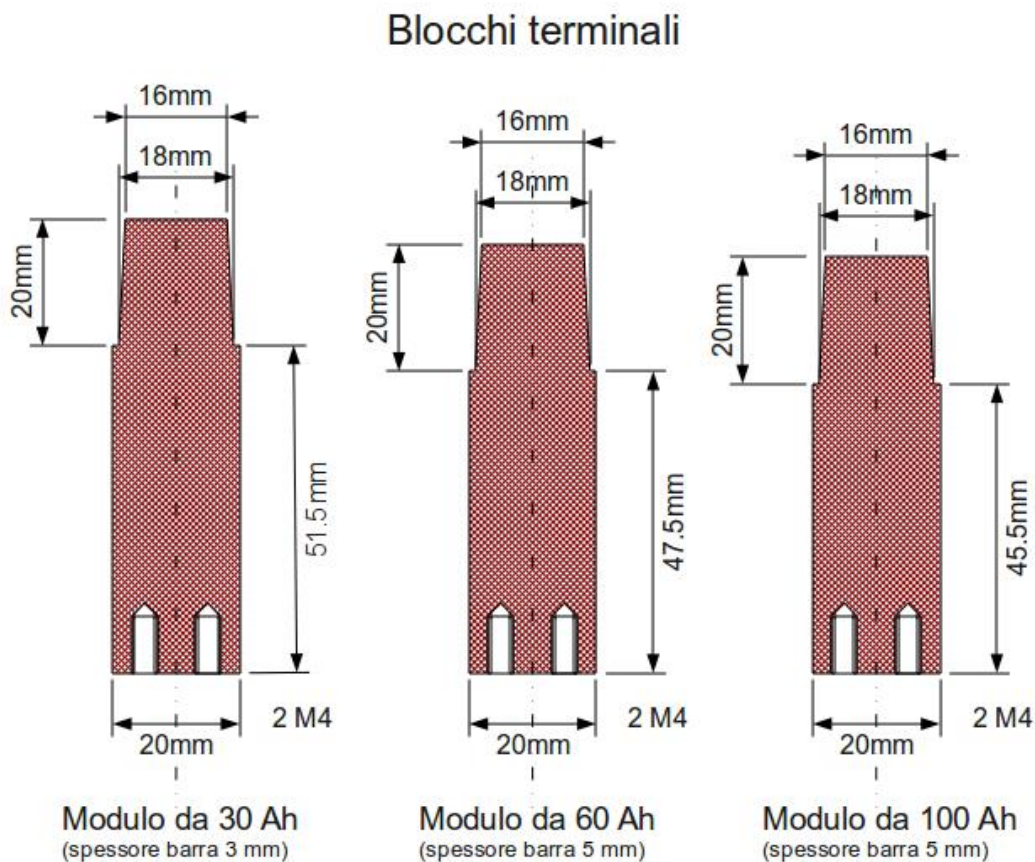


Figura 13 Sezione dei contatti di uscita dei blocchi terminali per i moduli da 30, 60 e 100 Ah. Il fissaggio del cilindro alla placca può avvenire per saldatura o con due viti M4 a testa svasata.

¹²La corrente impulsiva sopportata in scarica dalle celle è 5/3 quella di regime.

Questa scelta porta anche i valori assoluti di potenza dissipata complessivamente da tutti i contatti nelle condizioni di massima corrente impulsiva rispettivamente a 3 W, 6 W e 10 W per i tre moduli, sicuramente compatibile con la capacità di dissipazione termica degli elementi di connessione con sovra-temperature accettabili.

Per lo shunt, si può eseguire il dimensionamento tenendo presente che il circuito di misura previsto ha una amplificazione pari a 1000. Quindi volendo ottenere una portata massima di misura simmetrica e pari in valore assoluto alla corrente impulsiva del modulo, si ottengono resistenze di shunt pari rispettivamente a $16.7 \mu\Omega$, $8.3 \mu\Omega$ e $5 \mu\Omega$ per il modulo da 30, 60 e 100 Ah. Lo shunt è collocato sul ponticello centrale del modulo.

Esaminiamo con maggior dettaglio la geometria dei ponticelli, in modo da dimensionare ciascuno in accordo ai valori di resistenza massima individuati. Nel caso dei blocchi terminali - Figura 14 - è ragionevole trascurare la resistenza del cilindro di uscita, di sezione molto maggiore delle altre connessioni.

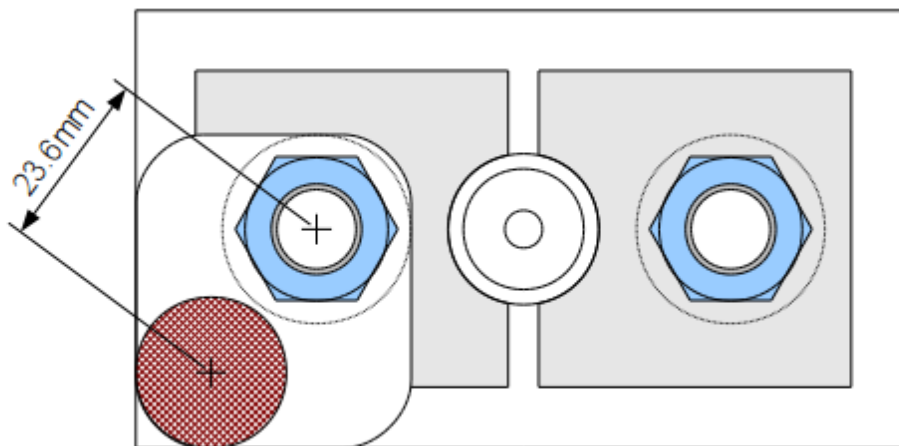


Figura 14 Blocco terminale e placca nel caso particolare, più critico, del modulo da 30 Ah. Nella figura è evidenziata una cella e l'area di rispetto intorno al dado per l'uso della chiave di serraggio, nel caso di dado M12 standard e chiave da 19 a tubo.

Nei fogli di calcolo mostrati nelle tabelle II ÷ IV si osserva un possibile dimensionamento di massima delle connessioni di potenza di ciascun modulo. Per la lunghezza si è fatto riferimento, in modo cautelativo, al centro dell'elemento di fissaggio.

Lo spessore minimo per i ponticelli è stato scelto non inferiore a 3 mm, per permettere la filettatura dei fori di fissaggio per le connessioni elettriche di segnale. Inoltre nel ponticello centrale è stato ricavato lo shunt, in accordo alle osservazioni precedenti.

Le valutazioni numeriche di resistenza mostrano come sia possibile realizzare i ponticelli sia in rame sia in alluminio. Quest'ultima soluzione risulta senz'altro più conveniente nei casi in cui è richiesta la minimizzazione del peso complessivo del modulo¹³.

2.4.2 Progetto della scheda di connessione di segnale

Dopo aver garantito la corretta connessione di potenza, è stata progettata la scheda di connessione – Figura 15 - per convogliare tutti i segnali di interesse ai connettori che li porteranno al BMS. La scheda si colloca superiormente ai ponticelli e prevede aperture per i dadi (o le viti, a seconda del tipo di cella) di fissaggio dei ponticelli stessi alle celle, tali da permetterne il fissaggio.

¹³La massa approssimativa dei ponticelli in rame, compresi i cilindri di fissaggio terminali, ammonta per i 3 moduli rispettivamente a 0.57 kg, 0.63 kg e 0.64 kg. L'uso dell'alluminio permette di ridurre questo valore di un fattore 3.4.

Tabella II Dimensionamento delle connessioni di potenza del modulo da 30 Ah

Resistenza delle connessioni di potenza					
Modulo da 30 Ah					
Spessore		3			
ρ Cu		1.69E-008			
Al/Cu		1.627			
Ponticello	#	Lunghezza	Larghezza	R_Cu ($\mu\Omega$)	R_Al
Terminale	2	24	25	10.816	17.600
Intermedio	2	88	25	39.659	64.533
Centrale	1	28	25	6.309	10.267
Shunt	1	30	16.467	10.263	16.700
Totale				67.047	109.100

Tabella III Dimensionamento dei ponticelli per il modulo da 60 Ah

Resistenza delle connessioni di potenza					
Modulo da 60 Ah					
Spessore		5			
ρ Cu		1.69E-008			
Al/Cu		1.627			
Ponticello	#	Lunghezza	Larghezza	R_Cu ($\mu\Omega$)	R_Al
Terminale	2	27	30	6.084	9.900
Intermedio	2	95	30	21.407	34.833
Centrale	1	33	30	3.718	6.050
Shunt	1	30	19.88	5.101	8.300
Totale				36.309	59.083

Tabella IV Dimensionamento dei ponticelli per il modulo da 100 Ah

Resistenza delle connessioni di potenza					
Modulo da 100 Ah					
Spessore		5			
ρ Cu		1.69E-008			
Al/Cu		1.627			
Ponticello	#	Lunghezza	Larghezza	R_Cu ($\mu\Omega$)	R_Al
Terminale	2	29	38	5.159	8.395
Intermedio	2	62	38	11.029	17.947
Centrale	1	32	38	2.846	4.632
Shunt	1	30	33	3.073	5.000
Totale				22.107	35.974

Inoltre in corrispondenza dei corridoi tra le celle, ovunque possibile, sono state ricavate aperture per permettere il flusso dell'aria verso il coperchio, dove le ventole espellono l'aria calda contenuta nel modulo, per permettere l'ingresso di aria esterna dalle feritoie presenti nella parte inferiore del contenitore.

Le tensioni di cella e i collegamenti per il bilanciamento sono effettuati direttamente sui ponticelli sottostanti tramite viti M3 e rondelle conduttrici fissate alla scheda, che garantiscono il collegamento del ponticello con la pista della scheda. Le viti devono essere serrate con l'ausilio di dispositivi contro lo svitamento, per combattere l'effetto di eventuali sollecitazioni meccaniche.

La presenza della scheda di connessione solidale ai ponticelli, migliora le caratteristiche meccaniche complessive delle connessioni, riducendo la probabilità che sollecitazioni sulle celle possano allentare il fissaggio delle connessioni di potenza.

La scheda di connessione raccoglie anche il segnale proveniente dai termistori NTC, incollati alle celle e dotati di un breve tratto di filo terminato da un piccolo connettore a 2 pin. La scheda contiene i 4 connettori a 2 pin che si accoppiano a quelli dei termistori e che fuoriescono da 4 apposite aperture nella scheda stessa.

Infine sulla scheda di connessione è montato il semplice circuito di misura della corrente di modulo. Il circuito si connette direttamente agli estremi del modulo per alimentare l'amplificatore da strumentazione e allo shunt per prelevare il segnale utile.

Il rendering della scheda di connessione è mostrato in Figura 15, dove la scheda è vista dalla faccia superiore, cioè quella verso l'altra scheda di connessione alle celle. Si notino le aperture che consentono la circolazione di aria per l'estrazione forzata del calore generato.

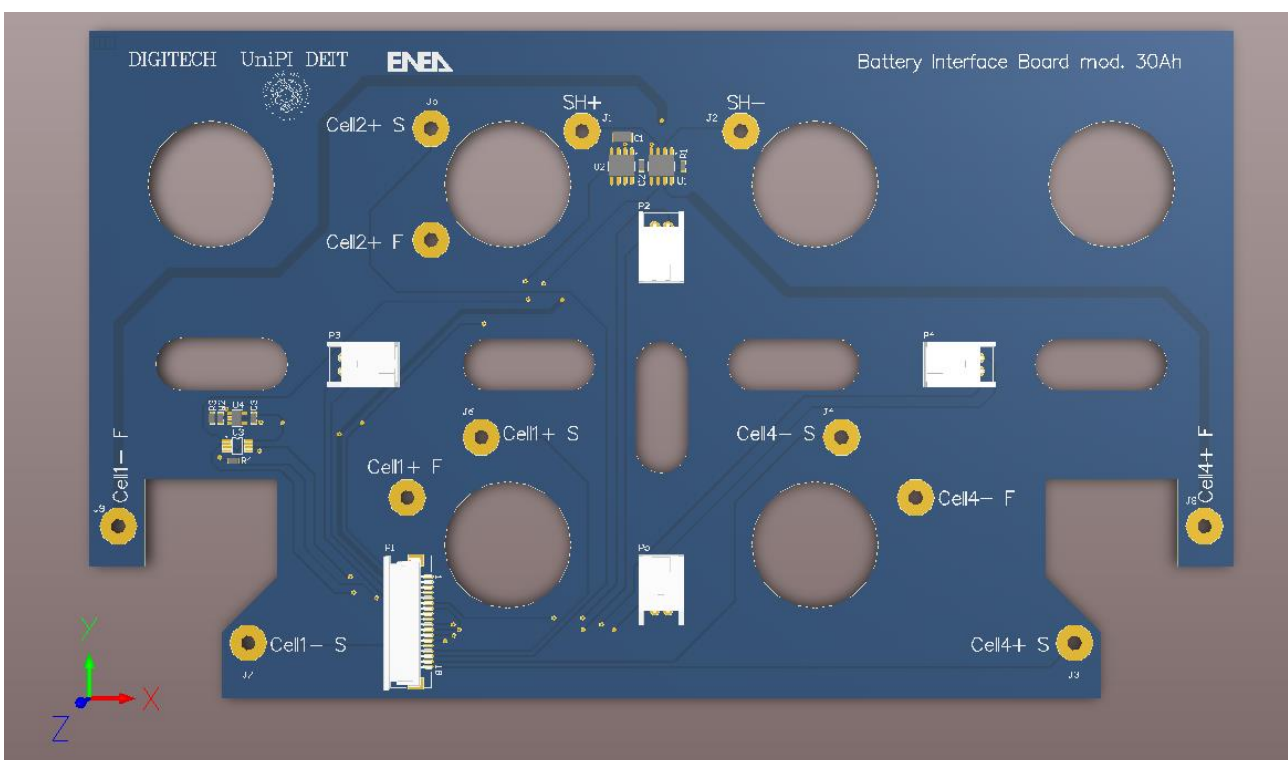


Figura 15 Rendering della faccia superiore, verso le celle della scheda di connessione con le celle.

I connettori della scheda di connessione sono corrispondenti a quelli del BMS, sia meccanicamente sia elettricamente. La corretta procedura di montaggio del modulo prevede:

- la collocazione delle celle nel contenitore;
- il posizionamento dei ponticelli e dei relativi elementi di fissaggio, che però non devono ancora essere serrati;
- il posizionamento della scheda di connessione, con il passaggio dei fili dei termistori dalle apposite aperture con l'inserimento dei relativi connettori;
- il fissaggio della scheda di connessione ai ponticelli sottostanti con le viti previste;
- il serraggio dei ponticelli di potenza alle celle;
- l'inserimento dei cavi cablati con i corretti connettori nella scheda di connessione;
- l'inserimento dei connettori nel BMS, a partire dal connettore di alimentazione e poi da quello di bilanciamento e dal flat cable con i rimanenti segnali.

2.5 Modifiche e aggiunte al firmware

Pur mantenendo le funzionalità di base della versione precedente, il firmware del microcontrollore è stato aggiornato per tenere conto delle modifiche apportate allo schema elettrico descritte in precedenza. In particolare, è stata rivista la funzione **monitor_measure_current_probes** per aggiungere la lettura dell'ingresso del convertitore ADC collegato all'uscita dell'ulteriore sensore di corrente ACS714 che rivela la corrente in ingresso al convertitore DC/DC di bilanciamento di modulo. È stato inoltre aggiornato il messaggio CAN **BAL_STATUS_MSG** per includere nel campo dati i due byte contenenti il valore letto su 12 bit dall'ADC. La struttura aggiornata del messaggio è mostrata nella Tabella V.

Tabella V Struttura del messaggio CAN contenete la lettura dei due sensori di corrente in ingresso e uscita del convertitore DC/DC di bilanciamento di modulo e dello stato del circuito di bilanciamento.

ID: 0x280 + id	Name: BAL_STATUS_MSG	
Length: 6 Byte	Type: Periodic	Refresh Time: 250 ms

Signal name	Bit pos. Msb-Lsb	Size (bit)	Type	Scale	Offset	Note
Active balancing current (DC/DC output current)	15-0	16	Unsigned 12b	732 10 ⁻⁶	0	Right aligned, LSB first
Status of the active balancing current generator	16	1	Logic			0: Disabled 1: Enabled
Selected cell by the switch matrix	26-24	3	Unsigned	1	0	0: No cell selected 1-4: Internal cell selected 5: External cell selected
Active balancing current (DC/DC input current)	47-32	16	Unsigned 12b	732 10 ⁻⁶	0	Right aligned, LSB first

Un'altra modifica apportata al firmware ha riguardato l'aggiunta di un nuovo comando gestito dalla scheda, che permette all'intelligenza di livello superiore di abilitare o meno il sensore di corrente interno per la misura della corrente di batteria. Si osservi che in questa versione della scheda i due sensori per la misura corrente di batteria sono mutuamente esclusivi. L'abilitazione del sensore interno avverrà solo nel caso in cui il sensore esterno non sia connesso alla scheda, condizione che può essere rivelata dal firmware. La Tabella VI mostra la struttura del messaggio CAN **COMMAND_MSG** e l'elenco aggiornato dei comandi che possono essere inviati alla scheda.

Tabella VI Struttura del messaggio CAN mediante il quale la scheda di modulo riceve i comandi dall'intelligenza di livello superiore.

ID: 0x0100	Name: COMMAND_MSG	
Length: 8 Byte	Type: Aperiodic	Refresh Time: NA

Signal name	Bit pos. Msb-Lsb	Size (bit)	Type	Scale	Offset	Note
RX_MODULE_ID	7-0	8	Unsigned	1	0	0-31: Module id 32-254: Not allowed

						255: Broadcast
CMD_TYPE	15-8	8				See table below
CMD_PARAM_0	23-16	8				
CMD_PARAM_1	31-24	8				
CMD_PARAM_2	39-32	8				
CMD_PARAM_3	47-40	8				
CMD_PARAM_3	55-48	8				
CMD_PARAM_5	63-56	8				

Command	CMD_TYPE	NUM PARAMS	PARAM DESCRIPTION: CMD_PARAM_0 – CMD_PARAM_5
Set alarm output 1	w	0	
Reset alarm output 1	W	0	
Set alarm output 2	X	0	
Reset alarm output 2	X	0	
Set alarm output 3	Y	0	
Reset alarm output 3	Y	0	
Reset all alarm outputs	r	0	
Set WAKE output	m	0	
Reset WAKE output	M	0	
Set TP1 output	A	0	
Reset TP1 output	A	0	
Set TP2 output	B	0	
Reset TP2 output	B	0	
Go to sleep mode (with wake on WDT signal)	s	0	
Go to sleep mode (with wake on external WAKE)	z	0	
Select cell 1 to cell 4	1 .. 4	0	
Select external cell	5	0	
Deselect cell	0	0	
Enable current generator	e	0	
Disable current generator	E	0	
Enable message transmission	d	0	
Disable message transmission	D	0	
Enable internal battery current sensor	c	0	
Disable internal battery current sensor	C	0	

È stata infine studiata la possibilità di dotare il microcontrollore di *bootloader*, utile per la correzione e l'aggiornamento del comportamento dell'elettronica del modulo dopo che la batteria è sul sito di applicazione. In questo modo il gestore di sistema può applicare le nuove versioni del firmware in grado di correggere anomalie evidenziate durante il funzionamento o di perfezionare gli algoritmi di stima e bilanciamento. La soluzione più semplice appare quella di utilizzare la caratteristica *bootloader* primario presente nel microcontrollore, che prevede il collegamento di quest'ultimo a un host PC, dove è in esecuzione un apposito software, mediante una connessione seriale. Tale connessione può essere realizzata mediante un comune convertitore seriale-USB. L'implementazione di questa modalità richiede l'inserimento di un ulteriore connettore sul retro della scheda BMS, che diviene accessibile una volta aperto il coperchio del modulo. Questa operazione potrebbe risultare poco agevole quando i moduli sono installati nell'applicazione; si è quindi valutata la possibilità di un *bootloader* che usi come mezzo di comunicazione il CAN bus che è accessibile all'esterno dei moduli. Questa seconda opzione, sicuramente più attraente, richiede però lo sviluppo di un programma per il microcontrollore che gestisca la comunicazione CAN verso lo host PC e la programmazione della porzione della memoria programma del microcontrollore destinata a contenere l'applicazione.

2.6 Evoluzione del software

L'intelligenza di livello superiore della batteria è realizzata mediante un software generale di controllo che gira su una piattaforma di tipo personal computer. Il software, in linguaggio LabVIEW, è ancora necessario al funzionamento del sistema nella presente versione; la perdita di connessione causa quindi la disconnessione del relè di sicurezza. È stata comunque intrapresa l'attività di trasferimento delle funzionalità basiche del modulo nel firmware del modulo stesso, per permettere in una delle prossime versioni il funzionamento autonomo del modulo nelle applicazioni singole.

Tenendo presente le applicazioni stazionarie, dove la presenza di un PC industriale, che supervisiona il funzionamento dell'intera batteria, può essere adeguata, il software di controllo LabVIEW è stato aggiornato per poter gestire le modifiche apportate alla scheda dei moduli.

Inoltre, al fine di rendere il software più flessibile, per poter essere facilmente utilizzato con diverse configurazioni della batteria, i parametri di configurazione della batteria sono inseriti mediante un file di testo (ENEA_BMS_configuration.txt) che è letto dal software all'avvio. Di seguito è riportato un esempio del file di configurazione relativo a una batteria con 4 moduli composti da 4 celle da 60 Ah.

```
# This is a comment!
# BMS-ENEA CONFIGURATION FILE #
# USE . AS DECIMAL SEPARATOR

CANUSB_Port          COM3
# CAN Baudarate 500kb/s !!do not change!!
CAN_Baudrate         6

# CAN Command Message ID ! do not change!!
CAN_CMD_ID           0x100

# BATTERY PACK ORGANIZATION

#NUM_OF_MODULES      4
MASTER_MODULE_ID     0
SLAVE_1_MODULE_ID    1
SLAVE_2_MODULE_ID    2
SLAVE_3_MODULE_ID    3

# BATTERY SAFE OPERATING RANGE
# ALERT CONDITIONS: ACTIVATE ALARM SIGNAL FOR TIME_ALARM_ON [s]
TIME_ALARM_ON        5
V_MAX_ALERT           3.65
V_MIN_ALERT           2.7
T_MAX_ALERT           45
T_MIN_ALERT           0
I_MAX_CHARGE_ALERT    100
I_MAX_DISCHARGE_ALERT 300

# ERROR CONDITIONS: SWITCH OFF CONTACTOR
V_MAX_ERROR           3.85
V_MIN_ERROR           2.5
T_MAX_ERROR           60
T_MIN_ERROR           -10
I_MAX_CHARGE_ERROR    200
I_MAX_DISCHARGE_ERROR 500

#FAN CONTROL
T_CELL_FAN_ON         5
T_CELL_FAN_OFF        30
```

```

T_BOARD_FAN_ON           33
T_BOARD_FAN_OFF         30

#CELL SPECIFICATION
NOMINAL_CAPACITY         60
EQ_INTRAMODULE_PARAM    100
EQ_INTERMODULE_PARAM     3

# Current sensor DHAB S/18
#ch1
Cur_sens_offset_ch1     2.5
Cur_sens_sensitivity_ch1 0.0667
Cur_sens_FS_ch1        30
#ch2
Cur_sens_offset_ch2     2.5
Cur_sens_sensitivity_ch2 0.0057
Cur_sens_FS_ch2        350
    
```

2.7 Collaudo della scheda e validazione del progetto

La nuova scheda del BMS è stata realizzata e assemblata. Le fotografie dei due lati della scheda sono mostrate Figura 16 e Figura 17. Prima del montaggio delle versioni per i nuovi moduli, si è proceduto a un collaudo funzionale preliminare, per escludere problemi sistematici dovuti a bug introdotti nelle varie fasi di riprogettazione.

È stata quindi impostata una procedura di set-up della scheda e di test.

1. Sono stati cablati i 2 connettori filati per le connessioni interne e il connettore per le connessioni esterne. Per il *flat cable*, è stata realizzata una schedina ad hoc, il cui layout è mostrato nella Figura

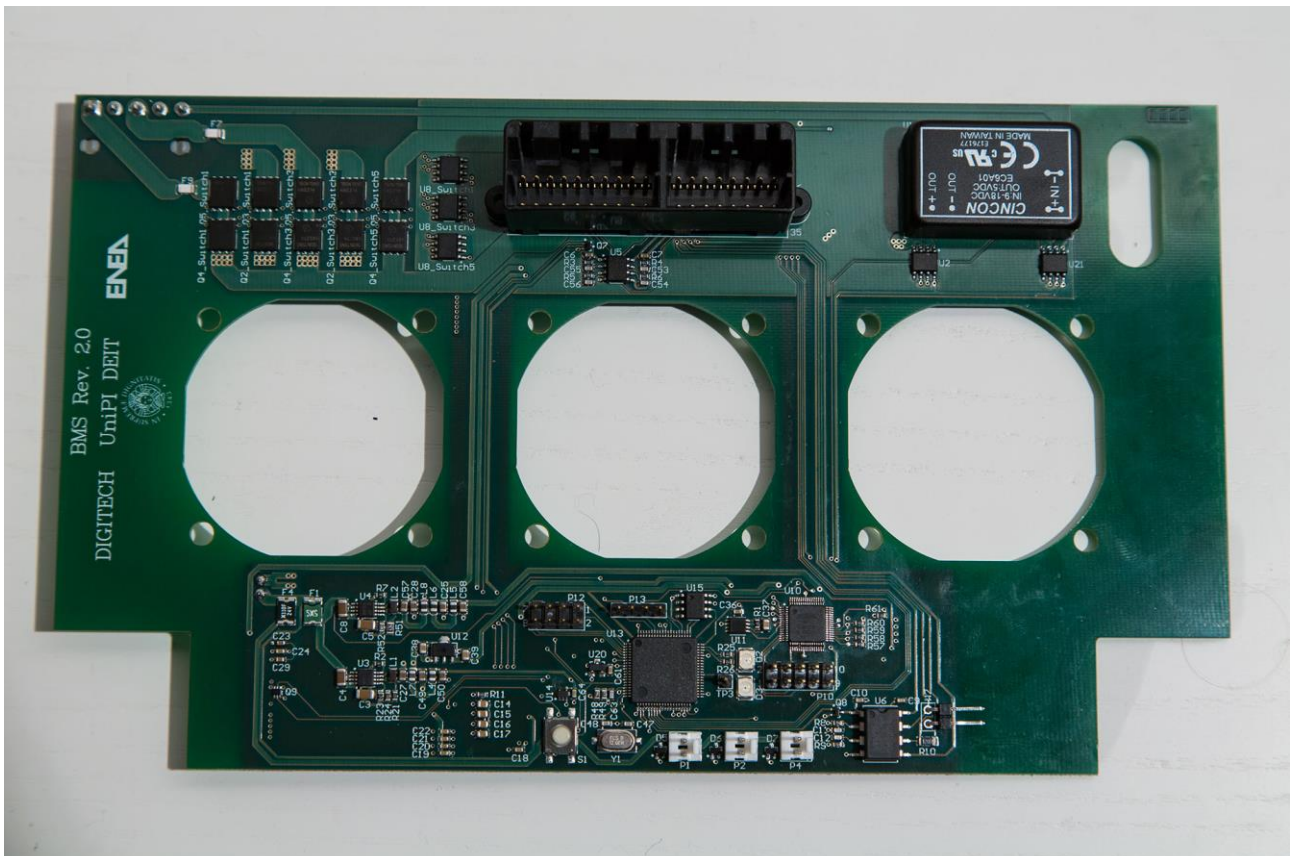


Figura 16 Fotografia del lato superiore della scheda del BMS completamente montata.

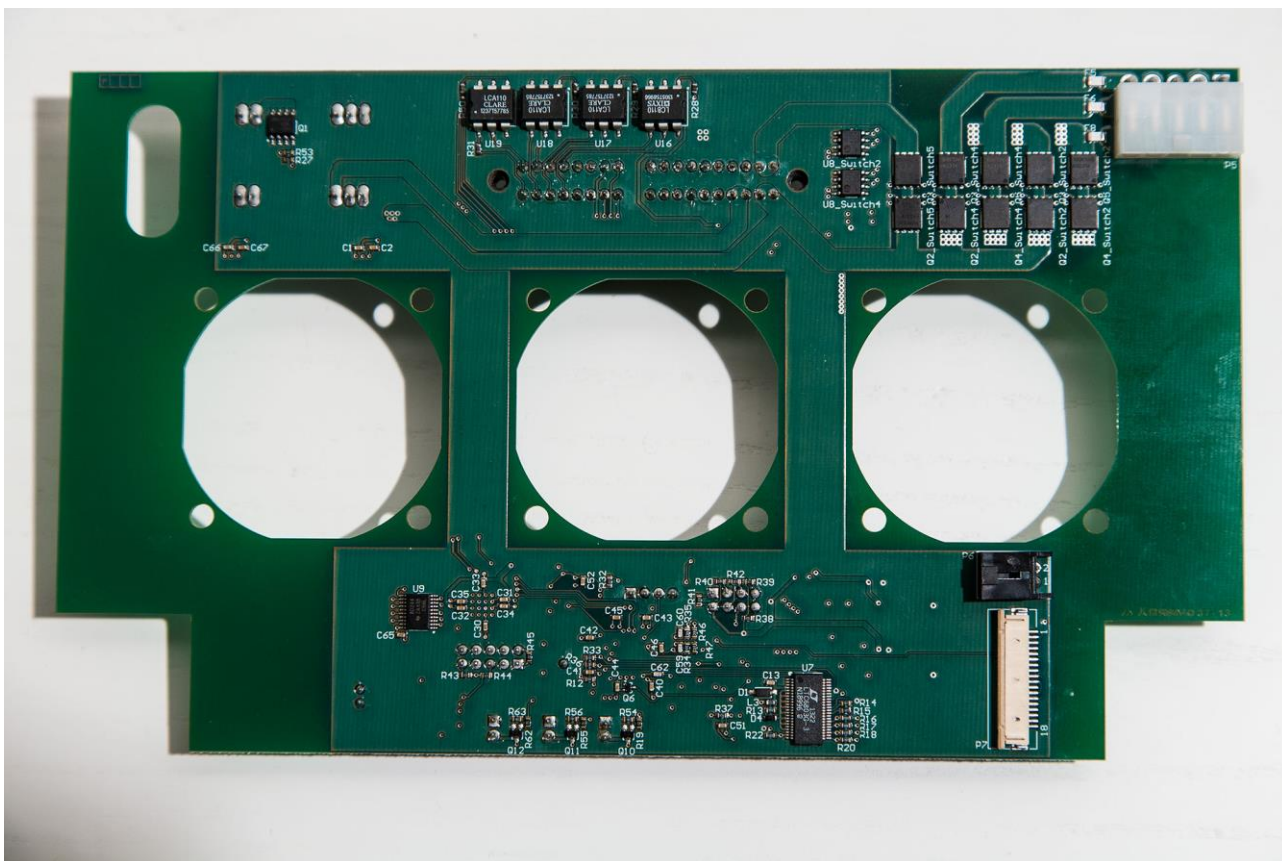


Figura 17 Fotografia del lato inferiore della scheda del BMS, dalla parte delle celle, completamente montata.

- 18, per riportare i segnali a cavi da connettere alle celle, ai termistori e ai due canali del circuito sensore di corrente.
2. Facendo uso del connettore JTAG P12 si è provveduto all'alimentazione della scheda e all'inserimento del firmware nella memoria del microcontrollore.
3. Mantenendo collegato P12, grazie all'altro connettore JTAG P10 si è provveduto alla programmazione della PLD che pilota la matrice di connessione delle celle per il bilanciamento.
4. Staccati i connettori JTAG, con un alimentatore a 12 V è stata quindi alimentata la scheda, verificando l'attivazione del firmware.
5. Si sono collegati i fili per la tensione delle celle a tensioni intermedie prodotte con un partitore e quelle per i termistori a componenti simili a quelli previsti per le batterie.
6. È stata collegata la scheda tramite l'interfaccia CAN disponibile sul connettore esterno al personal computer dotato del software di gestione.

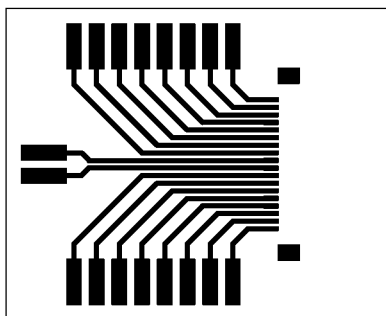


Figura 18 Layout della scheda ausiliaria per il collegamento del flatcable alle celle, ai termistori e al sensore di corrente.

7. A questo punto sono iniziate le verifiche sulle grandezze misurate, tensioni e temperature, e sulla possibilità di pilotare correttamente la matrice di connessione. La verifica della presenza di connessione tra bus di bilanciamento e cella è stata prevista con multimetro. È stata anche eseguita la verifica dei segnali isolati di allarme e del pilotaggio delle ventole.

L'esito positivo delle verifiche effettuate ha permesso di confermare la procedura di montaggio per le schede necessarie alla realizzazione dei moduli prototipali.

2.8 Riconfigurabilità dinamica

Come è stato accennato in precedenza, l'architettura precedente è stata modificata arricchendola della possibilità di riconfigurare dinamicamente la batteria durante il funzionamento. Questa è una caratteristica determinante in un sistema di accumulo per applicazioni stazionarie, in quanto può garantire la continuità del servizio e una più facile manutenibilità del sistema stesso. Riconfigurabilità significa poter consentire l'inserimento o l'esclusione a caldo di una delle stringhe dal corpo della batteria, purché l'applicazione nella quale il sistema di accumulo è inserito preveda la funzionalità della stessa anche in assenza di una stringa e quindi con una tensione ridotta di $1/n$ della tensione totale, dove n è il numero di stringhe che compongono la batteria. La riconfigurabilità è stata ottenuta grazie a un modulo aggiuntivo di bypass, opportunamente azionato dal software di supervisione.

La possibilità di riconfigurazione della batteria può anche costituire il primo livello di protezione di fronte al raggiungimento di condizioni critiche da parte di una delle celle di una qualunque stringa della batteria. Infatti, si può pensare di escludere soltanto la stringa che rivela la condizione critica e attivare contestualmente una richiesta di manutenzione mantenendo la continuità del servizio, piuttosto che disinserire completamente la batteria e interrompere quindi il servizio.

2.8.1 Architettura del modulo di bypass riconfiguratore.

Il modulo di bypass responsabile della riconfigurazione dinamica della batteria è costituito da due interruttori a stato solido, azionati in alternativa, uno sul percorso principale della corrente e quindi in serie alla stringa, e l'altro in parallelo alla stessa. Il principio di funzionamento è semplicissimo, poiché l'interruttore serie è sempre chiuso e lascia scorrere la corrente di batteria lungo le celle della stringa. Nel caso in cui si voglia attivare il bypass, l'interruttore serie viene aperto e quello parallelo viene contestualmente chiuso. In tal modo la corrente di batteria viene mantenuta e scorrerà lungo l'interruttore parallelo che bypassa l'intera stringa, mentre le celle della stringa verranno isolate dal corpo della batteria. Questa soluzione presenta il vantaggio che parte della batteria, in particolare le celle della stringa in questione, sono escluse dalla batteria senza la necessità di interrompere il flusso principale di corrente, anzi mantenendo ancora operativa, anche se con una stringa in meno, la batteria.

La possibilità di riconfigurazione può essere utilizzata per molteplici e innovativi scopi. Abbiamo accennato che escludere una stringa dalla batteria consente di mantenere la funzionalità operativa anche se una delle celle dovesse segnare una criticità di funzionamento. Nella batteria tradizionale il pacco viene spento per salvaguardare la sua salute, ma l'applicazione cessa purtroppo di funzionare. Nel caso dell'uso di un bypass, invece, l'applicazione non si interrompe e può proseguire, anche se a potenza ridotta. Si può immaginare il beneficio ottenibile in un veicolo dove comunque, a velocità ridotta, si riesce a proseguire il percorso anche in presenza di un allarme batteria, o l'applicazione stazionaria, dove il servizio di accumulo o di erogazione di energia viene mantenuto senza interruzione.

Ma i vantaggi del bypass non si esauriscono in funzioni aggiuntive di protezione del pacco, in quanto consentono anche di poter effettuare on-line manutenzioni preventive della batteria, escludendo a comando le stringhe che necessitano di manutenzione, quale la sostituzione di celle che hanno raggiunto il limite di vita operativa, e reinserendole senza spegnimento del sistema. Infine, la presenza del bypass consente anche la realizzazione di un facile bilanciamento di carica tra stringhe diverse. Infatti, quando

rileva uno sbilanciamento di carica inaccettabile tra stringhe diverse, il software di comando può provvedere all'esclusione della più carica di esse dal percorso, per esempio, di ricarica e reinserirla solo dopo che le altre hanno recuperato, con un tempo di carica supplementare, lo svantaggio energetico accumulato in precedenza.

2.8.2 Problematiche legate alla commutazione degli interruttori

L'introduzione del bypass riconfiguratore introduce, d'altra parte, problematiche aggiuntive che devono essere affrontate e risolte per un suo uso efficace. Il primo evidente problema che si pone è che gli interruttori utilizzati, sia il serie che il parallelo, devono essere in grado di sopportare per un tempo indefinito tutta la corrente operativa che attraversa la stringa. Il loro dimensionamento è quindi delicato e richiede un'attenta valutazione dei loro parametri. Si è optato per interruttori a stato solido e in particolare per MOS di potenza.

Il secondo problema da risolvere è il fatto che la commutazione degli interruttori deve avvenire in modo isolato. Infatti, abbiamo parlato di poter escludere una stringa qualunque del pacco batteria, stringa che può trovarsi nella parte alta del pacco e quindi con i suoi terminali a un valore di tensione elevato. Gli interruttori, a contatto con i terminali della stringa, dovranno quindi essere pilotati in modo isolato da parte del sistema di controllo.

Siccome gli interruttori cambiano il loro stato contemporaneamente, per esempio il serie si apre e il parallelo si chiude durante l'esclusione della stringa, è essenziale che la commutazione non avvenga simultaneamente lasciando un intervallo di tempo nel quale entrambi sono parzialmente accesi. Questo determinerebbe il catastrofico, anche se temporaneo, corto circuito della stringa in questione. È quindi necessario introdurre un tempo morto adeguato tra i due eventi di commutazione in modo da garantire la condizione di assenza di corto.

È quindi chiaro che la commutazione dei due interruttori che costituiscono il bypass riconfiguratore è un processo estremamente delicato. Se è giustificata la necessità di introdurre un dead time per evitare il corto circuito della stringa, allo stesso tempo si deve anche evitare che questo tempo morto sia così elevato tale da impedire la conduzione della corrente di batteria. Non dimentichiamo infatti che la corrente di batteria deve mantenersi senza interruzioni per garantire la piena funzionalità dell'applicazione nella quale essa è inserita. Il tempo morto deve essere quindi accuratamente tarato per evitare sia l'uno (corto circuito) che l'altro (interruzione del flusso) dei problemi che possono manifestarsi.

Infine, l'ultima problematica da affrontare che riguarda ancora il pilotaggio degli interruttori deriva dal fatto che se la commutazione fosse relativamente lenta si avrebbe un intervallo di tempo prolungato nel quale il dispositivo MOS lavora in regione di saturazione di corrente, con tensioni drain-source elevate. Questo determinerebbe un'elevata dissipazione di potenza sul transistore in transitorio e l'innalzamento, potenzialmente pericoloso, della temperatura di funzionamento o il superamento dei limiti di targa del dispositivo.

2.8.3 Problematiche termiche

Il circuito di riconfigurazione deve essere progettato in modo tale da garantire il passaggio di tutta la corrente della batteria, compresi i picchi massimi che essa può erogare anche in condizioni estreme di funzionamento. Se infatti la protezione del pacco batteria è affidata all'intervento di un interruttore di protezione elettromeccanico, caratterizzato da tempi di intervento dell'ordine di diversi millisecondi, allora gli interruttori del bypass devono sopportare senza conseguenze per il tempo necessario, non solo la corrente di regime della batteria ma anche quella della condizione estrema che determina l'interruzione di sicurezza.

È fondamentale quindi che la dissipazione di potenza statica determinata dallo scorrimento delle correnti previste a regime, in carica e scarica, sia compatibile con la capacità di smaltimento di calore da parte del modulo, che deve sopportare la corrente di regime per un tempo indefinito. Esso sarà quindi dotato di un opportuno sistema di dissipazione termica e della relativa gestione. Nel prototipo realizzato lo smaltimento

del calore avviene tramite un sistema di raffreddamento ad acqua la cui politiche di gestione sono state affidate al modulo master della stringa.

2.8.4 Realizzazione di un modulo di riconfigurazione dinamica

I problemi sopra enunciati sono stati affrontati in sede di progetto e, per verificare la bontà delle soluzioni proposte, è stato realizzato un modulo di riconfigurazione dinamica (MBS, Module Bypass Switch), in grado di sostenere in modo continuo correnti di batteria fino a 150 A. La Figura 19 mostra lo schema circuitale del bypass riconfiguratore, dove si individua nel riquadro di destra la stringa delle celle e il corrispondente interruttore MOS serie Q_S , nel riquadro centrale l'interruttore MOS parallelo Q_B , e nella parte sinistra della figura la logica di pilotaggio dei gate dei transistori interruttori. I MOS utilizzati sono di tipo n , con un valore più basso della resistenza in accensione rispetto ai corrispondenti di tipo p .

Si noti come il pilotaggio avviene tramite un segnale digitale di ingresso che attiva un circuito integrato gate driver isolato. In questo modo si ottiene l'isolamento del pilotaggio del bypass. Purtroppo, questi circuiti sono dotati di resistenza di uscita abbastanza alta (300 k Ω nel caso scelto), la cui combinazione con la capacità di gate da pilotare determina tempi di transizione della effettiva tensione di comando dell'interruttore non accettabili, in quanto porterebbero il MOS in saturazione di corrente, e quindi in fase di alta dissipazione di potenza, per un tempo troppo elevato. La soluzione adottata è quella di caricare una capacità di bootstrap da 220 nF che viene poi commutata rapidamente sui gate tramite i relé allo stato solido S_1 e S_2 . Siccome questi relé hanno una resistenza di uscita di 1 Ω , allora la commutazione dell'interruttore avviene molto più rapidamente rispetto al pilotaggio diretto con i MOS driver.

I transistori MOS sono stati scelti in modo da avere parametri di dissipazione di potenza e smaltimento del calore compatibili con la prevista corrente massima di 150 A. In particolare, i MOS Sono caratterizzati da una resistenza in accensione $r_{on} = 1,9$ m Ω , una massima tensione drain-source $V_{DSS} = 60$ V, una resistenza termica tra giunzione e contenitore $\vartheta_{jc} = 0,4$ $^{\circ}\text{C}/\text{W}$.

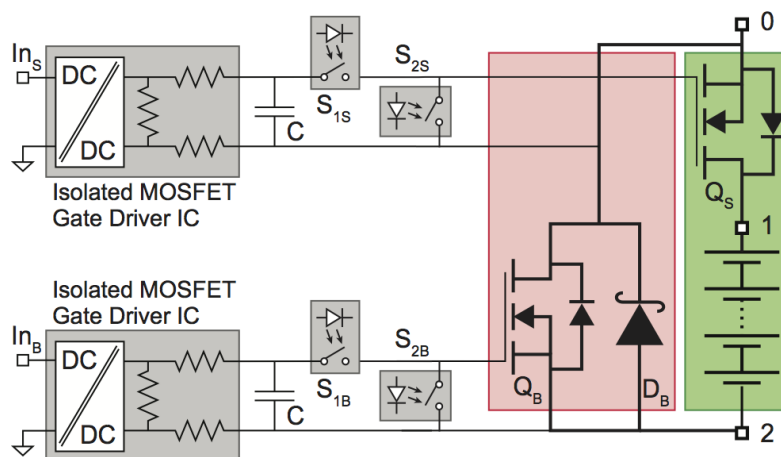


Figura 19 Schema elettrico del circuito di bypass.

Il prototipo del circuito di bypass è stato fabbricato su un PCB a doppia faccia con spessore delle linee di rame di 100 μm per facilitare la conduzione delle alte correnti in gioco. La forma della scheda e la posizione delle tre terminazioni facilita il collegamento del bypass alle celle del modulo. I MOS sono posti in parallelo due a due, in modo da poter sopportare la corrente di targa massima e sono disposti sulla scheda come mostrato in Figura 20(a). Si noti come sia stato utilizzato un dissipatore raffreddato a liquido per permettere la rimozione del calore generato dagli interruttori accesi. Il dissipatore si attacca al lato componenti della scheda e si collega al circuito di raffreddamento a liquido, come mostrato in Figura 20(b).

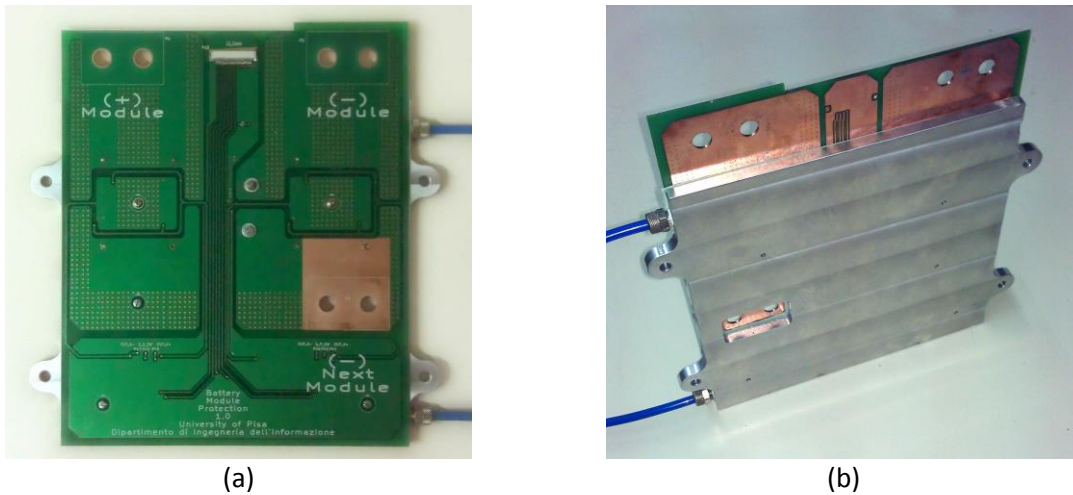


Figura 20 Fotografia di un lato della scheda elettronica del circuito di bypass; (b) Fotografia del dissipatore a liquido sull'altro lato della scheda.

2.8.5 Collaudo del modulo di riconfigurazione dinamica

Il prototipo di circuito MBS sopra descritto è stato quindi collaudato per validarne le funzioni ed estrarne le caratteristiche. Il modulo è stato pilotato tramite un'interfaccia basata su microcontrollore che controlla i relé allo stato solido S di Figura 19, in modo da garantire il dead time opportuno. La temperatura del contenitore dei MOS è stata rilevata tramite una termo camera FLIR i50 focalizzata sui dispositivi e la tensione sul MBS letta tramite un multimetro Keithley 2420, in modo da valutare la potenza dissipata.

I risultati dell'esperienza di caratterizzazione sono mostrati in Figura 21, dove è riportata in funzione del tempo la corrente che attraversa il bypass con passi di 20 A e la temperatura misurata sul MOS. Si noti come, per correnti che raggiungono i 160 A, la temperatura del transistor si mantenga al di sotto dei 100 °C, quando la temperatura ambiente e del liquido refrigerante è di 20 °C. La potenza dissipata in condizioni massimali è di 66 W, per cui si può ricavare il valore della temperatura di giunzione, conoscendo la resistenza termica ϑ_{jc} sopra menzionata. Tale valore è di 133 °C, ben al di sotto del limite massimo di 175 °C sopportabile dal MOS: Si può quindi affermare che il bypass progettato e costruito è in grado di sopportare correnti continue di 160 A senza problemi fino a temperature del liquido refrigerante che raggiungono i 50 °C.

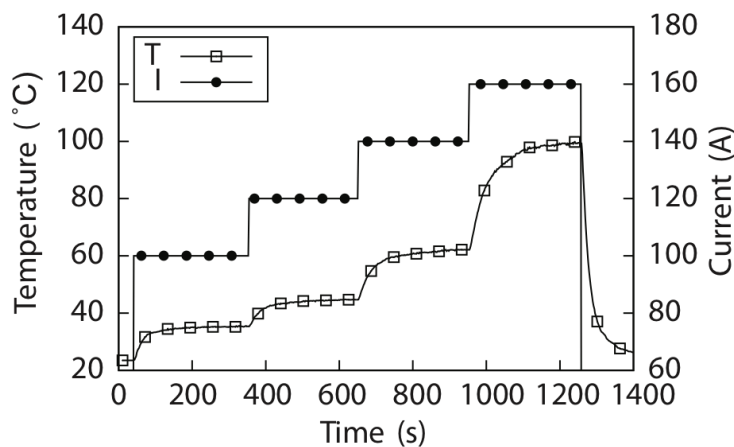


Figura 21 Risultati del collaudo del prototipo di bypass con correnti di commutazione fino a 160 A.

Non deve spaventare il valore di 66 W della potenza dissipata dal MBS in condizioni massime. Essa infatti contribuisce in maniera trascurabile al degrado di efficienza. Infatti, se definiamo P_D la potenza dissipata dai

MOS e r_{on} la loro resistenza serie, V_c la tensione di cella, I la corrente ed N il numero di celle nella stringa, si può calcolare la perdita di efficienza sulla batteria dovuta all'introduzione del bypass riconfiguratore $\Delta\eta$ come il rapporto tra la potenza dissipata e quella fornita dalla stringa:

$$\Delta\eta = \frac{P_D}{NV_c I} = \frac{r_{on} I^2}{NV_c I} = \frac{r_{on} I}{NV_c}$$

Nel caso per esempio di $N = 11$, $V_c = 3.7$ V e $r_{on} = 1.9$ m Ω come visto in precedenza, si ha che l'efficienza peggiora di un misero 1 % circa, quando si eroga la massima corrente di 160 A. Questo dimostra come l'introduzione del bypass riconfiguratore sia possibile senza alterare in modo significativo la dissipazione della batteria.

3 Conclusioni

Nel presente rapporto sono state descritte le attività di ottimizzazione dell'elettronica di monitoraggio e gestione per moduli da 4 celle realizzati con chimica al litio, preferibilmente di tipo LiFePO₄ ma adatte anche a celle con catodo di tipo diverso, per applicazioni di tipo stazionario. Come punto di partenza delle attività di ottimizzazione è stata usata l'elettronica dei moduli da 30, 60 e 100 Ah precedentemente sviluppata in collaborazione con ENEA.

Nel rapporto vengono descritte dettagliatamente le modifiche apportate al progetto elettrico e alla geometria della scheda elettronica, per permetterne l'uso in applicazioni con maggiore tensione complessiva di batteria, caratteristica di molte applicazioni stazionarie, mantenendo un limitato ingombro. La nuova elettronica di modulo, pur mantenendo le precedenti caratteristiche, permette di realizzare batterie con architettura più complessa, distribuita su più livelli gerarchici (modulo, stringa e batteria complessiva), e garantisce il raggiungimento di una maggiore affidabilità di sistema. È stata anche descritta l'integrazione hardware e software del sistema di gestione termica, basato sul controllo di ventole per l'estrazione dell'aria calda dal modulo.

È stata presentata inoltre una nuova metodologia per l'assemblaggio dei moduli, che facilita notevolmente le fasi costruttive e di messa in funzione del modulo, riducendo i rischi di mortalità infantile dovuta alla grande presenza di cavi e connessioni nella versione precedente. Nella nuova versione presentata, la connessione di potenza precede l'inserimento e il collegamento dell'elettronica, e l'uso di una scheda aggiuntiva di connessione facilita grandemente il completamento del modulo. L'elettronica e il sistema di raffreddamento sono racchiusi nel coperchio, che può essere smontato e separato dalle celle grazie a 3 soli connettori, di cui nel rapporto è fornita la descrizione dettagliata.

Si è provveduto anche all'ottimizzazione del firmware di scheda, implementato nella memoria non volatile a bordo del microcontrollore a 32 bit presente: è stata presa in considerazione la possibilità di aggiornare più facilmente il firmware anche senza la disponibilità di un programmatore specifico e senza dover smontare completamente la scheda. La metodologia di aggiornamento studiata, basata sulla tecnica del "bootloading", rappresenta un primo passo verso la possibilità di aggiornamento del firmware durante la vita operativa del modulo, anche in sede di manutenzione ordinaria e remota. Questa possibilità risulta particolarmente utile in applicazioni stazionarie con accumuli energetici in zone di difficile accesso.

Il software di gestione complessivo, implementato con linguaggio LabVIEW su un personal computer, tiene ora conto delle nuove caratteristiche architetture, e permette il monitoraggio e il bilanciamento di sistemi con un ulteriore livello di gerarchia.

La nuova elettronica di modulo, progettata e assemblata, ha superato i collaudi preliminari rispettando le specifiche previste.

Infine è stato presentato un nuovo sistema elettronico aggiuntivo, utile in configurazioni di batteria complesse, per riconfigurare dinamicamente la batteria, escludendo o inserendo intere sezioni, durante il funzionamento stesso del sistema di accumulo energetico. La disponibilità di tale sistema rappresenta un deciso avanzamento dello stato dell'arte dei sistemi di accumulo energetico stazionario, e permette un incremento significativo della manutenibilità di sistema e la pianificazione di interventi di manutenzione preventiva.

4 Riferimenti bibliografici

- [1] F. Baronti, G. Fantechi, R. Roncella, and R. Saletti, "Sviluppo di un BMS (Battery Management System) con sistema di bilanciamento attivo per sistema batterie al LiFePO₄ da 48 V - 100 Ah," Report RdS/2012/088.
- [2] F. Baronti, G. Fantechi, R. Roncella, and R. Saletti, "Progettazione definitiva del BMS per batterie di avviamento e trazione non automotive," Report RdS/2012/089.
- [3] F. Baronti, G. Fantechi, E. Leonardi, R. Roncella, and R. Saletti, "Enhanced model for lithium-polymer cells including temperature effects," in Proc. 36th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. IECON 2010, Nov. 2010, pp. 2329–2333.
- [4] F. Baronti, G. Fantechi, E. Leonardi, R. Roncella, and R. Saletti, "Effective modeling of temperature effects on lithium-polymer cells," in Proc. 17th IEEE Int'l Conf. on Electronics Circuits and Systems. ICECS 2010, Dec. 2010, pp. 992–995.
- [5] F. Baronti, G. Fantechi, L. Fanucci, E. Leonardi, R. Roncella, R. Saletti, and S. Saponara, "State-of-charge estimation enhancing of lithium batteries through a temperature-dependent cell model," in International Conference on Applied Electronics, AE2011, Sep. 2011, pp. 1–5.
- [6] F. Baronti, G. Fantechi, E. Leonardi, R. Roncella, and R. Saletti, "Hierarchical platform for monitoring, managing and charge balancing of LiPo batteries," in Proc. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conf. (VPPC), 2011, pp. 1–6.
- [7] F. Baronti, G. Fantechi, R. Roncella, and R. Saletti, "High-efficiency digitally-controlled charge equalizer for series-connected cells based on switching converter and super-capacitor," IEEE Trans. Ind. Informat., vol. 9, no. 2, pp. 1139-1147, 2013
- [8] F. Baronti, G. Fantechi, R. Roncella, R. Saletti, "Intelligent cell gauge for a hierarchical battery management system," IEEE ITEC 2012, pp. 1-5.
- [9] F. Baronti, G. Fantechi, R. Roncella, R. Saletti, "Design of a Module Switch for Battery Pack Reconfiguration in High-Power Applications," IEEE ISIE 2012, pp. 1-6.
- [10] F. Baronti, G. Fantechi, R. Roncella, R. Saletti, P. Terreni "Hardware Building Blocks of a Hierarchical Battery Management System for a Fuel Cell HEV," IEEE IECON 2012, Oct. 2012, pp. 1-7.
- [11] F. Baronti, W. Zamboni, R. Roncella, R. Saletti, N. Femia, "Parameter Identification of Li-Po batteries in electricvehicles: a comparative study, in Proc. *Int.l Symposium on Industrial Electronics, (ISIE13)*, pp. 1-6, 2013
- [12] F. Baronti, G. Fantechi, R. Roncella, R. Saletti, G. Pede, F. Vellucci, "Design of the Battery Management System of LiFePO₄Batteries for Electric Off-Road Vehicles," in Proc. *Int.l Symposium on Industrial Electronics, (ISIE13)*, pp. 1-6, 2013
- [13] F. Baronti, et al., "Experimental Analysis of Open-Circuit Voltage Hysteresis in Lithium-Iron-Phosphate Batteries," to be presented at *IECON13*, Nov. 2013, Vienna.
- [14] F. Baronti, et al., "Mitigation of Single Event Upsets in the Control Logic of a Charge Equalizer for Li-ion Batteries," to be presented at *IECON13*, Nov. 2013, Vienna.
- [15] "HiPower HP-PW-30AH -60AH – 100AH cell data sheet" disponibile su www.hipowergroup.com
- [16] "LPC1754 datasheet" disponibile su www.nxp.com
- [17] "LTC6803-3 datasheet" disponibile su www.linear.com
- [18] "Vishay SI7478DP datasheet" disponibile su www.vishay.com

- [19] "EC6A01 datasheet" disponibile su www.cincon.com
[20] "LPCX presso by Code Red home page" www.lpcxpresso.code-red-tech.com/LPCXpresso
[21] "CANUSB datasheet", disponibile su www.canusb.com

5 Abbreviazioni e acronimi

- BMS** (Battery Management System)
Si tratta del sistema elettronico a cui sono affidate le funzioni di base per la sicurezza e il corretto funzionamento di un accumulatore elettrochimico di energia. Sicuramente dotato delle funzioni di monitoraggio di tensione e temperatura, spesso è anche in grado di eseguire funzioni superiori, come stima dello stato di carica e equalizzazione dello stato di carica tra le diverse celle di una serie.
- CAN** (Controller Area Network)
Sistema di comunicazione tra sistemi digitali particolarmente diffuso in ambito automobilistico e industriale. Caratterizzato da una massima velocità di trasmissione di 1 Mb/s nella versione standard, è dotato di diverse caratteristiche orientate alla robustezza di comunicazione e affidabilità. Prevede come supporto fisico alla comunicazione tra i diversi moduli, una connessione elettrica adattata agli estremi.
- JTAG** (Joint Test Action Group)
Nome comune della porta standard di test e delle relative metodologie di accesso, basato su registri a scorrimento e sul concetto di percorso di scansione. Oltre che per il collaudo fisico di chip e connettività, viene comunemente usata per la programmazione e il debug di chip complessi programmabili.
- LiPO** (Lithium Polymer)
Batterie al litio caratterizzate da alte densità di potenza ed energia, con tensione nominale di 3,7 V e tensione massima di 4.2 V.
- MBS** (Module Bypass Switch)
Circuito elettronico che permette l'inserimento o il disinserimento di una sezione di batteria.
- MOS** (Metal Oxide Semiconductor)
- MOSFET** (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)
Basati sull'effetto del campo elettrico su un canale semiconduttore, sono tra i più diffusi transistori oggi usati. Spenti sono in grado di sopportare tensioni significative, di decine o centinaia di volt. Accesi presentano basse resistenze di canale, in funzione delle dimensioni, e sono comunemente usati come interruttori a stato solido.
- NTC** (Negative Temperature Coefficient)
Resistori costituiti da materiale semiconduttore pesantemente drogato, che presentano un forte coefficiente di temperatura negativo. Per questa loro caratteristica, che li rende sensori di temperatura economici di elevata sensibilità, sono privilegiati nelle applicazioni industriali dove ha particolare importanza la sensibilità e dove la non linearità intrinseca può essere corretta grazie alla presenza di un dispositivo digitale programmabile.
- PCB** (Printed Circuit Board)
Supporto fisico di un circuito elettronico, costituito da una base, tipicamente in vetroresina, su cui è possibile posizionare i componenti elettronici e connetterli tramite piste metalliche, distribuite su uno o più strati.
- PLD** (Programmable Logic Device)
Circuito integrato la cui funzionalità è programmabile in hardware, direttamente intervenendo su interruttori non volatili che determinano le connessioni interne del chip. Trova spesso uso in

applicazioni dove è richiesta una elevata affidabilità, perché meno soggetto, rispetto ai comuni processori, agli errori indotti dalle condizioni ambientali.

Curriculum scientifico del gruppo di lavoro impegnato nell'attività.

Federico Baronti si è laureato con lode in Ingegneria Elettronica nel 2001 presso l'Università di Pisa, dove ha conseguito il dottorato di ricerca in Veicoli Terrestri e Sistemi di Trasporto nel 2005. Durante il corso di dottorato, da gennaio a giugno 2004, è stato in visita alla Vanderbilt University (Nashville, TN), dove ha collaborato con il gruppo di ricerca "Radiation Effects and Reliability Group". Dal 2005 al 2011, ha beneficiato di assegni di ricerca e borse di studio post-dottorato presso il Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione, dell'Università di Pisa. Da dicembre 2011 è ricercatore non confermato presso lo stesso dipartimento, dove svolge attività di ricerca orientata principalmente allo studio e progetto di sistemi innovativi per il miglioramento delle prestazioni, sicurezza e comfort dei veicoli. Attività più recenti riguardano la modellizzazione di batterie agli ioni di litio e lo sviluppo di sistemi innovativi per il monitoraggio e gestione di pacchi batteria. Relativamente a questo ambito di ricerca è stato invitato, nell'agosto 2011, a svolgere un seminario presso la North Caroline State University; ha presentato tutorial alle conferenze ISIE 2012 e 2013; è organizzatore di diverse special session all'interno delle conferenze ISIE IECON organizzate da IEEE Industrial Electronics Society. Altri interessi di ricerca riguardano la progettazione e collaudo di circuiti integrati digitali e mixed-signal e di sistemi di acquisizione ed elaborazione dati in tempo reale e multi-canale.

Federico Baronti è coautore di oltre 60 pubblicazioni su riviste internazionali e atti di conferenze e di un brevetto italiano. È membro della IEEE Industrial Electronics Society e co-fondatore e vice-chair del Technical Committee su "Energy Storage" della IEEE Industrial Electronics Society.

Il Prof. Roberto Roncella ha conseguito con lode la laurea in Ingegneria Elettronica presso l'Università di Pisa nel 1984. Nel 1989 ha conseguito il titolo di Dottore di Ricerca. Ha poi prestato servizio come borsista del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CSMDR, Pisa). Dal 1990 presta servizio presso il "Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione" (DII) dell'Università degli Studi di Pisa, prima come Ricercatore e dal 1998 come professore di seconda fascia, ricoprendo gli insegnamenti di Microelettronica ed Elettronica Biomedica. Dal 1993 ha collaborato prima alla formazione e poi allo sviluppo e gestione del Centro per le Tecnologie e Applicazioni Microelettroniche (Centro TEAM) di Pisa Ricerche, Centro di Competenza in Microelettronica finanziato dall'Unione Europea nel quadro della ESPRIT Special Action MEPI. Ha ricoperto il ruolo di responsabile scientifico di unità di ricerca dipartimentali nell'ambito di diversi progetti nazionali, con finanziamento da parte del Consiglio Nazionale delle Ricerche (come nel caso del progetto Materiali e Dispositivi per l'Elettronica dello Stato Solido - MADESS II), del Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca e da fondazioni bancarie. Svolge attività come referee per la rivista internazionale Electronics Letters. Le sue attività di ricerca sono orientate al progetto e collaudo di circuiti integrati ad alta prestazione, quali circuiti per linee di ritardo ad alta risoluzione o circuiti a bassa dissipazione di potenza, e alla proposta di nuove architetture VLSI per l'elaborazione numerica dei segnali. Nell'ambito di ricerche con finanziamento industriale, si occupa della progettazione di sistemi innovativi applicati all'ambito biomedicale e automobilistico, con particolare riferimento alle due ruote. Sulle proprie attività ha pubblicato più di novanta lavori su riviste o atti di congressi internazionali.

Il Prof. Roberto Saletti ha conseguito con lode la laurea in Ingegneria Elettronica presso l'Università degli Studi di Pisa nel 1981. Ha prestato servizio come ricercatore del Consiglio Nazionale delle Ricerche dal 1983 al 1992 presso il "Centro di Studio per Metodi e Dispositivi per Radiotrasmissioni" di Pisa. Nel 1987 è stato visiting scientist presso la Cornell University, Ithaca, New York. Ha prestato servizio dal 1992 al 2001 come professore universitario di ruolo di seconda fascia presso il "Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione" dell'Università degli Studi di Pisa. Vincitore di concorso per valutazione comparativa, dal 1/09/2001 è professore ordinario di Elettronica presso il medesimo Dipartimento. Dal 2003 è stato responsabile

dell'Indirizzo Scientifico-Tecnologico della Scuola di Specializzazione per l'Insegnamento Secondario - SSIS, organizzata congiuntamente dalle tre università toscane di Pisa, Firenze e Siena.

Dal 1993 ha collaborato alla fondazione, sviluppo e gestione del Centro per le Tecnologie e Applicazioni Microelettroniche (Centro TEAM) di Pisa Ricerche, finanziato dall'Unione Europea nel quadro della ESPRIT Special Action MEPI. Ha coperto il ruolo di responsabile scientifico di unità di ricerca in progetti quali il Programma di ricerca applicata 5% Microelettronica, il progetto finalizzato del CNR "Materiali e Dispositivi per l'Elettronica dello Stato Solido" (MADESS II) e altri programmi di ricerca di interesse nazionale (PRIN). E' anche responsabile di gruppi per lo svolgimento di ricerche in collaborazione o su commessa di partner industriali quali Piaggio S.p.A., Ferretti Yacht, etc..

Svolge attività come referee dell'Unione Europea per la valutazione di progetti di ricerca e per pubblicazioni internazionali.

Le sue attività di ricerca sono orientate al progetto e collaudo di circuiti integrati ad alta prestazione, quali circuiti per linee di ritardo ad alta risoluzione per la misura di intervalli temporali, di sistemi elettronici per acquisizione dati e applicazioni "automotive", particolarmente per il campo dei veicoli a due ruote e degli yacht da crociera, nonché nella realizzazione di sistemi elettronici per il controllo e il monitoraggio di sistemi di accumulo di energia, in particolare batterie con chimica al litio, i cosiddetti BMS (Battery Management Systems).

Il Prof. Saletti è membro della IEEE Industrial Electronics Society (IES), della IEEE Instrumentation and Measurements Society (IM) ed è coautore di oltre 150 pubblicazioni scientifiche in riviste e conferenze internazionali. Nel 2012 è stato nominato Senior Member dello IEEE ed è co-fondatore dello IEEE-IES Technical Committee su "Energy Storage".