

Ricerca di Sistema elettrico



Progettazione e Sviluppo Preliminare di un Convertitore Grid-Forming con Dispositivi Wide-Bandgap ed Avanzata Capacità Diagnostica, e Funzionalità di Supporto alla Rete con Sovraccaricabilità Adattativa e Massima Affidabilità

Gianmario Pellegrino



**Politecnico
di Torino**



LA 1.12: Progettazione e Sviluppo Preliminare di un Convertitore Grid-Forming con Dispositivi Wide-Bandgap ed Avanzata Capacità Diagnostica, e Funzionalità di Supporto alla Rete con Sovraccaricabilità Adattativa e Massima Affidabilità

Autore/ autori nel formato nome puntato cognome e separati da virgola Gianmario Pellegrino, Politecnico di Torino

Dicembre 2024

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica -ENEA Piano Triennale di Realizzazione 2022-2024

Obiettivo 2: Digitalizzazione ed evoluzione delle reti

Progetto 2.3: Evoluzione, pianificazione, gestione ed esercizio delle reti elettriche

Linea di attività: LA1.12

Responsabile del Progetto: Maria Valenti (ENEA)

Responsabile Linea di Attività: Gianmario Pellegrino (POLITO)

Mese inizio previsto: 19

Mese inizio effettivo: 19

Mese fine previsto: 36

Mese fine effettivo: 36

Indice

1	Risultati attesi	3
2	Risultati ottenuti.....	4
2.1	Avanzamento della ricerca rispetto allo stato dell'arte internazionale con riferimento ai risultati ottenuti.....	5
3	Prodotti attesi	5
4	Prodotti ottenuti.....	5
5	Analisi degli scostamenti su attività e risultati.....	6
6	Sintesi delle attività svolte	6
7	Dettaglio delle attività svolte.....	6
7.1	Simulazioni PLECS	6
7.2	Realizzazione Preprototipo	7
7.3	Sviluppo Firmware di Controllo	10
7.4	Sviluppo Interfaccia di Comunicazione e Debug	13
7.5	Progettazione Prototipo Finale	15
8	Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte.....	15
9	Pubblicazioni scientifiche	15
10	Eventi di disseminazione	15

1 Risultati attesi

L'attività di ricerca prevede la progettazione e lo sviluppo preliminare di un convertitore grid-forming trifase a tensione e frequenza industriale 400V, 50Hz di taglia proposta 100 kVA.

Il convertitore è caratterizzato da:

- capacità di supporto alla regolazione di tensione e frequenza di rete in modalità VSG (Virtual Synchronous Generator)
- Frequenza di switching PWM > 20 kHz, per minimizzare la taglia dei filtri verso rete.
- Misura real-time della tensione di giunzione individuale dei dispositivi di potenza per la stima diretta di temperatura di tutti i dispositivi del ponte
- Massima sovraccaricabilità transitoria e massima affidabilità: la stima diretta di temperatura permette di massimizzare in tempo reale la sovraccaricabilità in corrente del convertitore secondo l'effettivo stato delle giunzioni. Questo permette di massimizzare il supporto alla rete (regolazione tensione - frequenza) mantenendo totale affidabilità sulla vita dei componenti e non viceversa.
- Diagnostica dei componenti di potenza: lo stato di salute e la vita residua dei componenti possono essere valutati con controlli periodici della caduta di ON dei dispositivi
- Predisposizione al test Power-HiL per la validazione dei modelli di gestione delle reti sviluppati nel LA2.10

L'attività concepisce e sviluppa un dispositivo chiave per garantire intrinsecamente la sicurezza e resilienza delle reti ad alta prevalenza di fonti rinnovabili. Il dispositivo diventa parte della rete fisico-virtuale sviluppata nel progetto, arricchendola di possibilità di sperimentazione e validazione dei modelli. Inoltre, il dispositivo stesso viene sviluppato e validato ad un livello relativamente alto di maturità tecnologica (tra TRL4 - technology validated in lab e TRL5 - technology validated in relevant environment), aprendo l'opportunità di industrializzazione di questa tecnologia abilitante.

I risultati attesi dalla LA sono:

- Prototipo di convertitore grid-forming 3-fase della taglia prescritta. Moduli di potenza MOSFET SiC da 150 Arms, 1200 V, compatibili con la specifica e con frequenze di switching ≥ 20 kHz.
- Rapporto tecnico descrittivo delle attività di ricerca condotte e delle caratteristiche del prototipo sviluppato.

Il convertitore è alimentato da un emulatore di batteria di taglia 90 kW ed è collegato, tramite un filtro di rete, ad un emulatore di rete 3-fase composto da due stadi Regatron ACS.50.528.72 50kVA in parallelo. Uno dei due emulatori è già disponibile, ed il secondo verrà acquistato nell'ambito di questo progetto per raggiungere la taglia di 100 kVA. L'emulatore di rete è comandabile da processore real-time esterno per la modalità HiL, e può funzionare da carico oltre che da rete, durante i test in isola.

La tecnologia Wide-BandGap SiC è scelta per il duplice vantaggio della minimizzazione della taglia degli elementi reattivi grazie alla frequenza di PWM elevata e della stima precisa della

temperatura di giunzione dei dispositivi tramite misura della tensione di ON, che è la proprietà abilitante di questo LA 2.9. La stima di temperatura è facilitata dalla caduta di tipo resistivo dei MOSFET SiC, rispetto alla caduta con soglia di conduzione dei Si IGBT. Sempre grazie all'assenza di tensione di soglia di ON, i dispositivi SiC mantengono una elevata efficienza a basso carico (bassa corrente), a differenza degli IGBT di uso industriale. Infine, con adeguato packaging, i MOSFET SiC possono lavorare a temperature di giunzione superiori ai 200°C, rispetto ai 175°C standard del Silicio.

Il convertitore è controllato da un microcontrollore STM32F7 con interfaccia CAN o EtherCAT verso il sistema real-time in uso per i test HiL. Sono da concordare sia il protocollo di comunicazione che i segnali di I/O, che l'interfaccia utente per i successivi test P-HiL.

L'algoritmo di controllo è configurabile via CAN o EtherCAT e prevede

- Controllo in presenza di rete prevalente e/o in islanding
- Supporto alla rete in modalità Virtual Synchronous Generator
- Stima accurata della temperatura ed algoritmo di commissioning della legge temperatura vs corrente e tensione di ON
- Diagnostica dello stato di salute e di invecchiamento dei MOSFET SiC in base al monitor periodico off-line della caduta di ON.

2 Risultati ottenuti

L'attività di ricerca ha portato alla realizzazione di un preprototipo del convertitore grid-forming trifase da 100 kVA, con lo scopo di validare le funzionalità chiave previste nel progetto. Sebbene non sia stato possibile completare il prototipo finale a causa delle tempistiche di sviluppo, il preprototipo ha permesso di condurre test sperimentali mirati, i cui risultati sono dettagliati in seguito.

Gli obiettivi principali dell'attività di ricerca sono stati:

- Validare la capacità del convertitore di operare in modalità grid-forming con supporto alla rete.
- Dimostrare l'efficacia del controllo Virtual Synchronous Generator (VSG) nel garantire stabilità alla rete in presenza di guasti.
- Implementare una metodologia innovativa per la misura e il controllo in tempo reale della temperatura di giunzione dei dispositivi di potenza.
- Verificare la compatibilità del sistema con test Power-HiL per l'integrazione nei sistemi di rete.

Il **preprototipo sviluppato** ha integrato le seguenti caratteristiche principali:

- **Implementazione del controllo grid-forming:** utilizzo del Virtual Synchronous Generator (VSG) per il supporto attivo alla rete in condizioni normali e in caso di fault.
- **Elevata frequenza di switching:** PWM superiore a 20 kHz per minimizzare le dimensioni del filtro di rete e migliorare la qualità della corrente erogata.

- **Monitoraggio avanzato della temperatura:** misura real-time della tensione di giunzione dei dispositivi di potenza per una stima precisa della temperatura.
- **Ottimizzazione dell'affidabilità:** il controllo avanzato della temperatura di giunzione consente di massimizzare la sovraccaricabilità transitoria mantenendo un'elevata affidabilità operativa.
- **Diagnostica dello stato di salute dei semiconduttori:** monitoraggio della caduta di ON dei MOSFET SiC per la valutazione delle condizioni di invecchiamento dei componenti.

2.1 Avanzamento della ricerca rispetto allo stato dell'arte internazionale con riferimento ai risultati ottenuti

I risultati ottenuti in simulazione dal preprototipo hanno dimostrato l'efficacia del concetto sviluppato, aprendo la strada a future evoluzioni verso il prototipo completo e la possibile industrializzazione della tecnologia. La capacità di iniezione di corrente di guasto, abbinata alla gestione termica avanzata, rappresenta un importante passo avanti nell'integrazione dei convertitori elettronici nelle reti con alta penetrazione di rinnovabili.

I risultati ottenuti con le simulazioni hanno dimostrato che grazie alla stima di temperature è possibile ottenere il sovraccarico transitorio di un convertitore.

3 Prodotti attesi

- Simulazioni PLECS convertitore di potenza e algoritmo di controllo utilizzato.
- Prototipo di convertitore grid-forming 3-fase della taglia prescritta. Moduli di potenza MOSFET SiC da 150 Arms, 1200 V, compatibili con la specifica e con frequenze di switching ≥ 20 kHz.
- Rapporto tecnico descrittivo delle attività di ricerca condotte e delle caratteristiche del prototipo sviluppato.
- Firmware di controllo.
- Sviluppo codice interfacce di comunicazione e debug

4 Prodotti ottenuti

- Simulazioni PLECS convertitore di potenza e algoritmo di controllo utilizzato.
- Preprototipo di convertitore grid-forming 3-fase della taglia prescritta. Moduli di potenza MOSFET SiC da 150 Arms, 1200 V, compatibili con la specifica e con frequenze di switching ≥ 20 kHz.
- Rapporto tecnico descrittivo delle attività di ricerca condotte e delle caratteristiche del prototipo sviluppato.
- Firmware di controllo.
- File di progetto prototipo finale

- Sviluppo codice interfacce di comunicazione e debug

5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

Al posto del prototipo finale è stato realizzato un preprototipo con caratteristiche strettamente analoghe a quelle previste per il prototipo finale, il quale ha permesso di validare le soluzioni tecnologiche proposte nell'ambito della linea di attività del progetto. Tuttavia, la realizzazione del prototipo sperimentale nella sua configurazione definitiva non è stata possibile a causa degli elevati tempi di approvvigionamento dei materiali, che non sarebbero stati consegnati in tempo utile per il completamento del progetto.

Nonostante questa limitazione, il preprototipo si è rivelato uno strumento fondamentale per la validazione sperimentale della tecnologia proposta. Esso è stato sviluppato riadattando un convertitore esistente, mantenendo inalterate le principali caratteristiche elettriche e funzionali previste per la versione finale. La principale differenza tra il preprototipo e il prototipo definitivo risiede nell'assenza dei meccanismi di sicurezza necessari per consentire l'utilizzo da parte di personale tecnico qualificato esterno al team di progettazione.

Grazie al preprototipo sviluppato nella LA1.12, è stato comunque possibile procedere con attività sperimentali essenziali nell'ambito della LA1.13 tra cui: test del firmware di controllo, collaudo del convertitore in un ambiente Power-HiL (Hardware-in-the-Loop) e validazione delle funzioni critiche, come la gestione del sovraccarico e il supporto alla rete.

6 Sintesi delle attività svolte

Sono state svolte le seguenti attività:

- Sono state realizzate una serie di simulazioni termo-elettriche tramite PLECS del convertitore al fine di validare l'algoritmo di controllo proposto.
- È stato realizzato un preprototipo del convertitore finale con specifiche e prestazioni del tutto analoghe
- È stato sviluppato il firmware di controllo
- Sono state sviluppate le interfacce di comunicazione e debug per interfacciarsi al prototipo
- È stato fatto il progetto del convertitore nella sua versione finale.

7 Dettaglio delle attività svolte

7.1 Simulazioni PLECS

Per validare l'algoritmo di controllo proposto, è stata condotta un'ampia campagna di simulazioni termo-elettriche del convertitore di potenza. In particolare, è stato sviluppato e testato un modello termo-elettrico dettagliato del sistema, in grado di rappresentare con accuratezza le interazioni tra le dinamiche elettriche e termiche del convertitore.

Parallelamente, il codice di controllo, implementato in linguaggio C, è stato preliminarmente verificato in un ambiente di simulazione, consentendo di analizzarne il comportamento in condizioni operative realistiche e di ottimizzarne le prestazioni prima della fase di implementazione su hardware. A titolo di esempio in si riporta lo schematico di potenza che è stato simulato in PLECS.

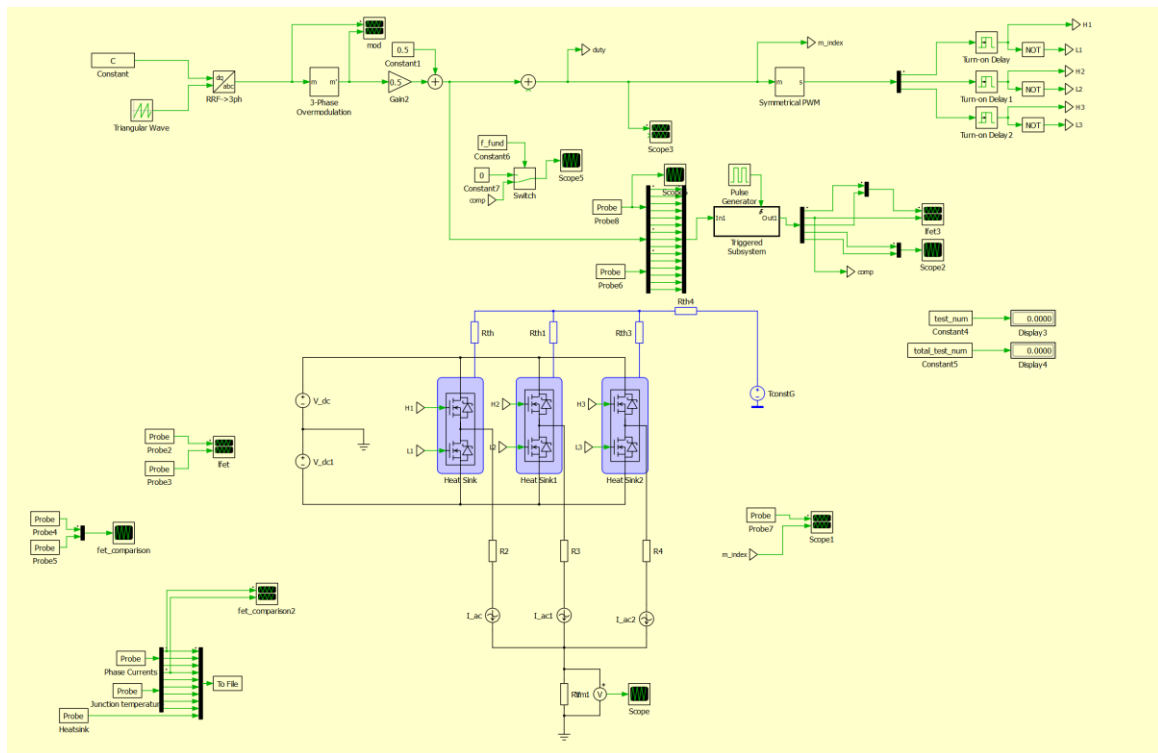


Fig.1. Modello termo-elettrico del convertitore inclusivo di algoritmo di controllo in codice C implementato in ambiente PLECS.

7.2 Realizzazione Preprototipo

Al fine di procedere con la validazione sperimentale della tecnologia proposta, è stato realizzato un preprototipo adattando un convertitore esistente. Questo approccio ha permesso di accelerare i tempi di sviluppo, evitando le lunghe attese legate alla realizzazione ex-novo di un prototipo completo, pur mantenendo le caratteristiche essenziali per le attività di testing.

Nello specifico, il preprototipo si basa su un inverter trifase equipaggiato con MOSFET in carburo di silicio (SiC), una scelta tecnologica che garantisce elevata efficienza e migliori prestazioni in termini di velocità di commutazione e gestione delle perdite rispetto alle soluzioni basate su dispositivi in silicio tradizionali.

Una delle principali modifiche apportate al convertitore esistente riguarda l'integrazione di un sistema avanzato di misura della tensione di conduzione dei dispositivi di potenza sviluppato presso il politecnico di Torino. Il sistema proposto permette la misura delle tensioni di conduzione dei dispositivi di potenza come mostrato dallo schematico mostrato in Fig.2, dove

in rosso sono rappresentate tutte le grandezze campionate dal microcontrollore di controllo. Oltre alla misura della tensione di conduzione vi sono le misure delle correnti di fase, la temperatura del dissipatore a liquido, la misura delle tensioni concatenate di rete e la tensione del DC-link.

In particolare, la misura delle tensioni di conduzione è stata resa possibile grazie all'inserimento di un circuito di condizionamento del segnale, appositamente progettato per garantire un'acquisizione precisa e affidabile dei valori di tensione durante le operazioni PWM del convertitore. Lo schematico del sistema di acquisizione delle tensioni di conduzione implementato è riportato in Fig.3, dove si vede lo stadio di condizionamento analogico che consiste in un amplificatore operazionale in configurazione differenziale protetto da due diodi che sono polarizzati (quando il dispositivo di potenza è in conduzione) da un generatore di corrente. L'uscita dell'amplificatore operazionale è campionata tramite un ADC a 14 bit che comunica i dati misurati al microcontrollore di controllo tramite interfaccia di comunicazione SPI.

Il sistema di misura è stato integrato nella scheda di pilotaggio (gate driver) dei dispositivi di potenza mostrata in Fig.4

L'implementazione del preprototipo mostrato in Fig.5 è risultata indispensabile per la validazione della metodologia proposta. Fig. 12 è mostrata il preprototipo utilizzato per la validazione sperimentale della tecnologia proposta, con sopra la scheda di misura per le tensioni concatenate di rete e l'interfaccia di debug per l'acquisizione dei dati (spiegata in dettaglio nei prossimi paragrafi).

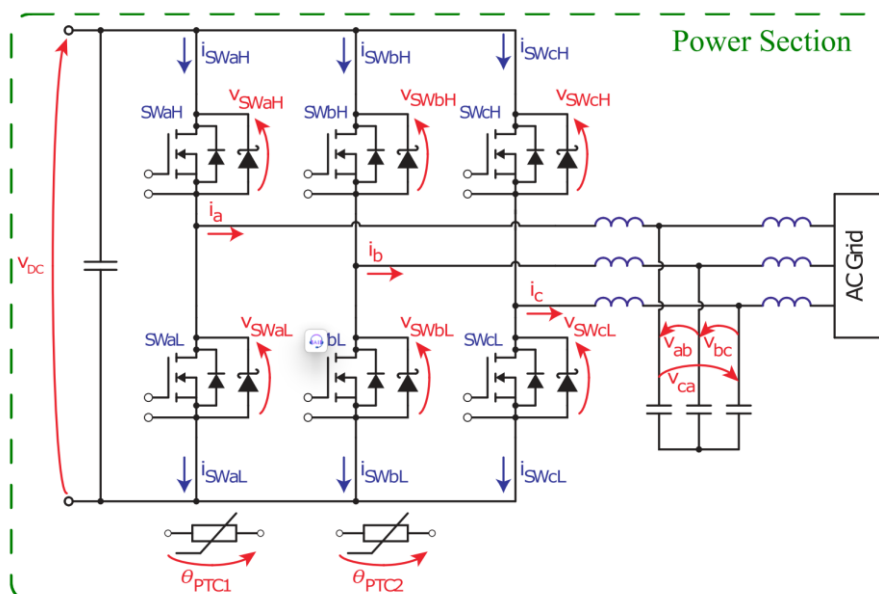


Fig.2. Layout di potenza convertitore prototipale, dove in rosso sono mostrate le grandezze campionate dal microcontrollore su cui viene eseguito il firmware di controllo.

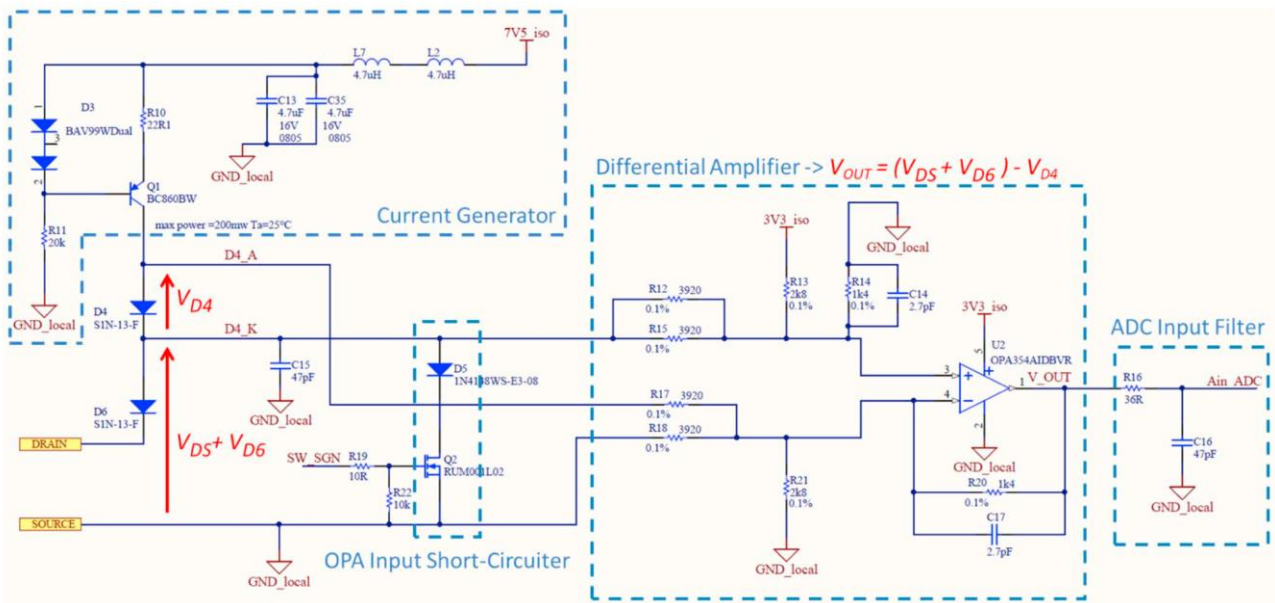


Fig.3. Sistema di misura per misura della tensione di conduzione dei semiconduttori integrato nella scheda driver.

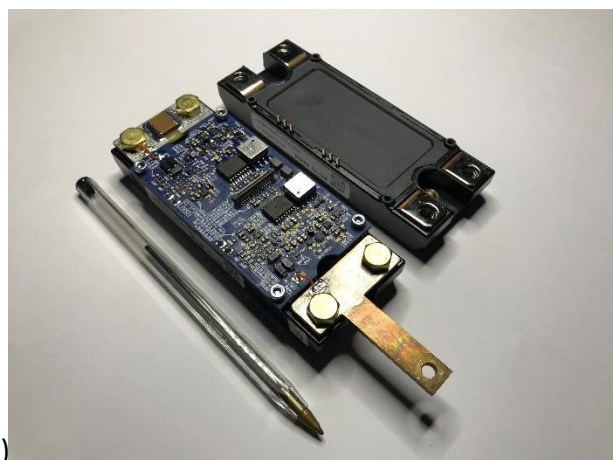


Fig.4. Moduli di potenza (SiC MOSFETs in configurazione half bridge) con scheda driver custom che integra il sistema per la misura della tensione di conduzione dei device.

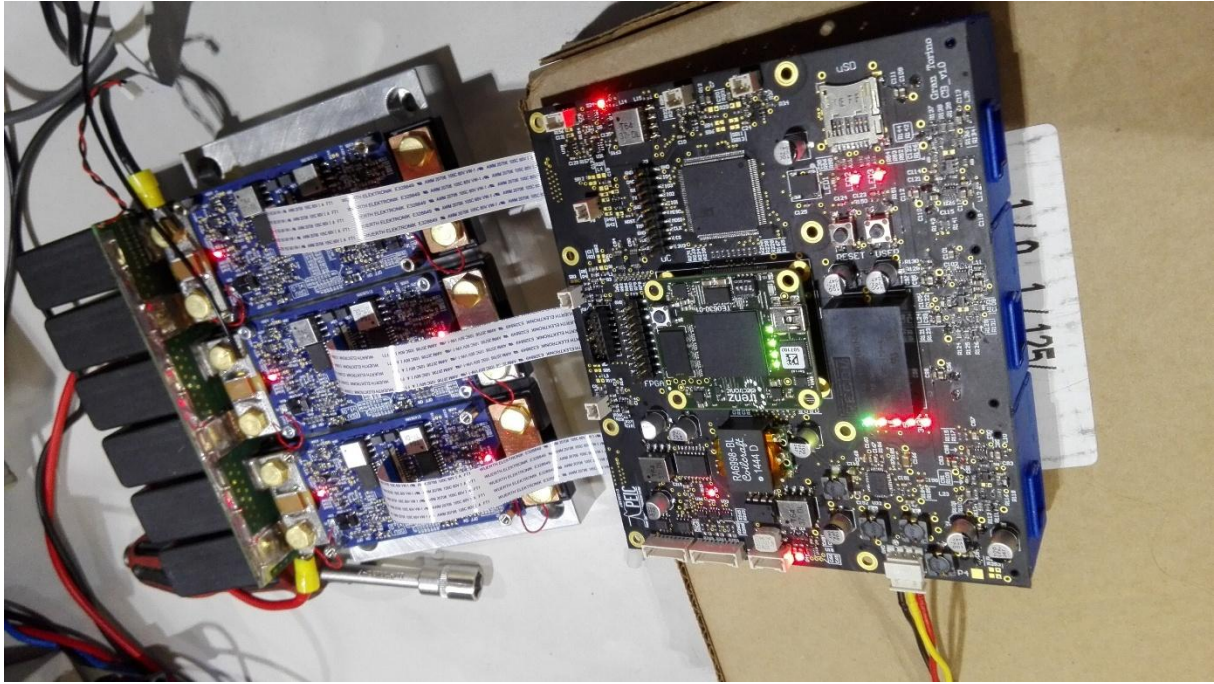


Fig.5. Dettaglio del preprototipo che mostra la connessione tra le schede driver dei moduli di potenza e la scheda di controllo

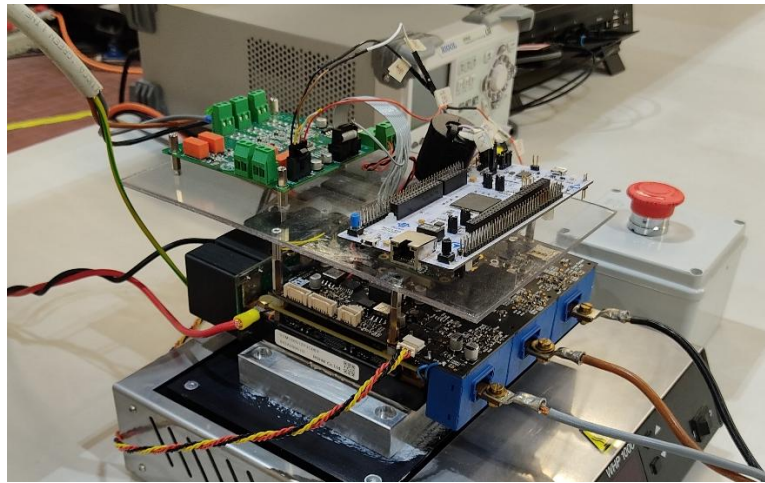


Fig.6. Convertitore prototipale con sopra scheda di misura per le tensioni concatenate di rete e interfaccia di debug.

7.3 Sviluppo Firmware di Controllo

Il firmware di controllo è stato sviluppato su un STM32H7, ovvero un microcontrollore ad alte prestazioni per il controllo real time sviluppato STMicroelectronics e ampiamente utilizzato in ambito industriale specialmente nell'ambito della conversione elettrica.

Il microcontrollore è stato preconfigurato usando il tool di configurazione STM32Cube e successivamente il codice di controllo è stato sviluppato in codice C. Il codice di controllo sviluppato è stato preliminarmente testato in PLECS. A titolo di esempio in Fig.7 è possibile vedere il pinout del microcontrollore impostato nell'applicazione STM32Cube, in particolare i segnali HRTIM1_CHxx rappresentano i segnali di pilotaggio dei semiconduttori di potenza.

Il firmware di controllo sviluppato è composto da decine di migliaia di linee; tuttavia, può essere suddiviso in quattro cinque principali:

- 1) Firmware per la calibrazione del convertitore, utilizzato per la creazione delle mappe di conduzione dei semiconduttori utilizzate dallo stimatore di temperatura. Un esempio di dati sperimentali è riportato in Fig.8 dove si vedono i campioni raccolti durante la fase di calibrazione, mentre la mappa ottenuta (una mappa per ciascun semiconduttore di potenza) è mostrata in Fig.9.
- 2) Stimatore di temperatura di giunzione dei semiconduttori facente uso delle mappe di conduzione misurate durante la fase di calibrazione dei semiconduttori. Il funzionamento dello stimatore può essere riassunto dal diagramma funzionale riportato in Fig.10. Lo stimatore riceve in ingresso tensione di conduzione e corrente nel device di potenza e grazie alla mappa precedentemente misurata permette di stimare la temperatura di giunzione del semiconduttore di potenza.
- 3) Limitatore di massima corrente al raggiungimento della massima temperatura di giunzione. Il limitatore riduce la massima corrente erogabile dal convertitore al raggiungimento della massima temperatura di giunzione in uno dei sei switch. La soluzione proposta permette di limitare la massima corrente di fase mantenendo le correnti di fase sinusoidali. Lo schema funzionale dell'algoritmo proposto è mostrato in Fig.11.
- 4) Firmware per l'interfacciamento del convertitore a rete che comprende: un controllo PLL per agganciarsi alla tensione di rete, anelli di corrente per la regolazione delle correnti di fase e anello di tensione per la regolazione della tensione di bus.
- 5) Sistema di controllo VSM che emula il comportamento di un generatore sincrono attaccato alla rete permettendo l'iniezione di potenza attiva e reattiva oltre che la generazione di correnti di corto indispensabili per innescare le protezioni di sovracorrente della rete.

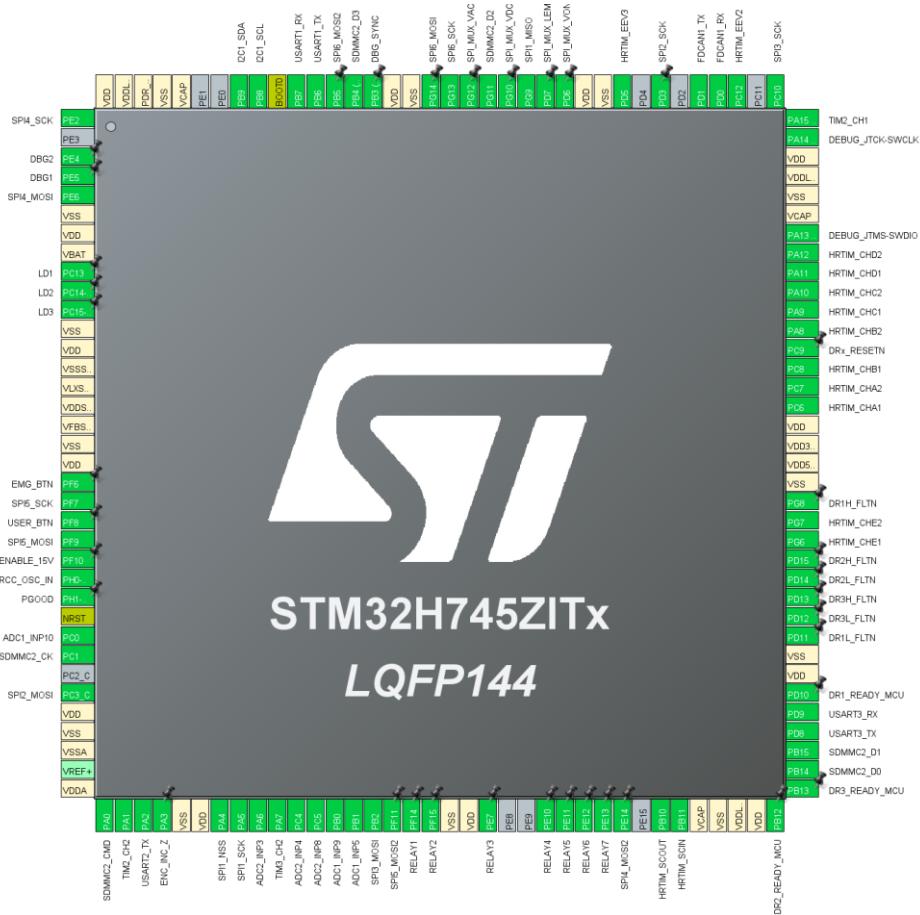


Fig.7. Pinout microcontrollore utilizzato

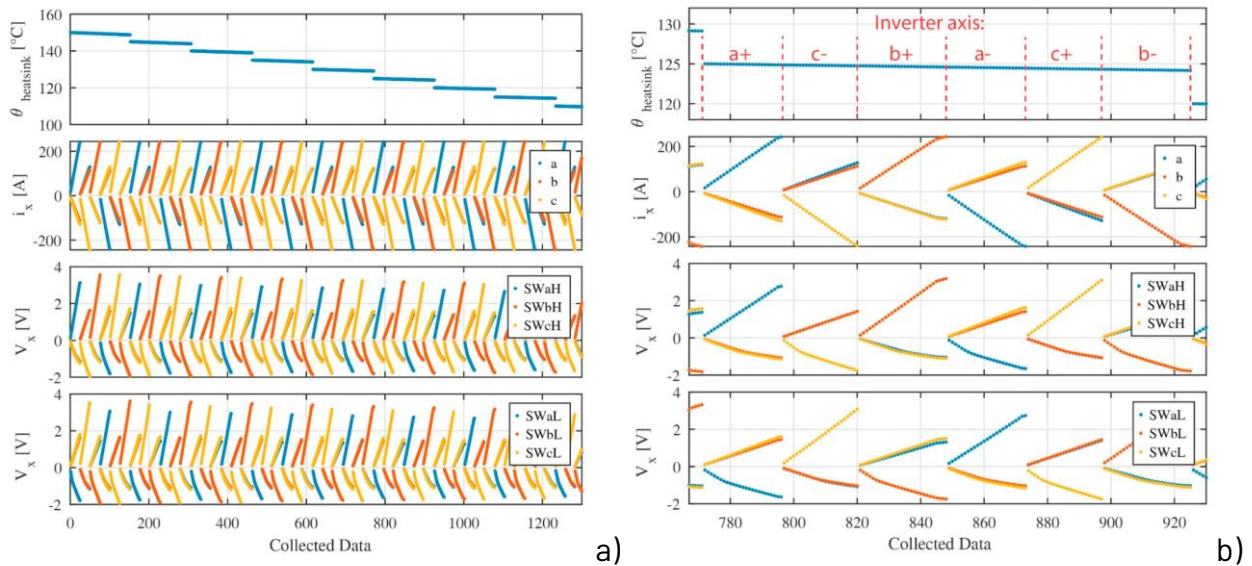


Fig.8. Iniezione impulsi di corrente durante la fase di calibrazione al fine di ottenere le mappe di conduzione dei semiconduttori.

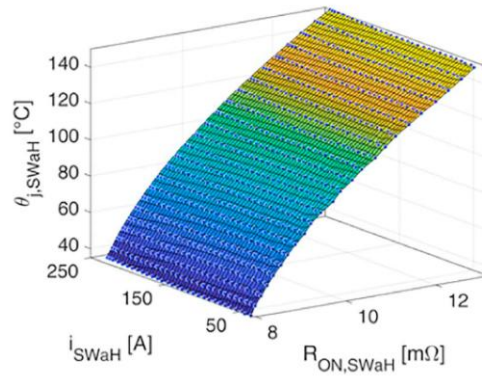


Fig.9. Mappa di condizione del componente ottenuta tramite la procedura di calibrazione. Ogni semiconduttore ha la sua mappa di conduzione per un totale di sei mappe ottenute tramite la procedura di calibrazione.

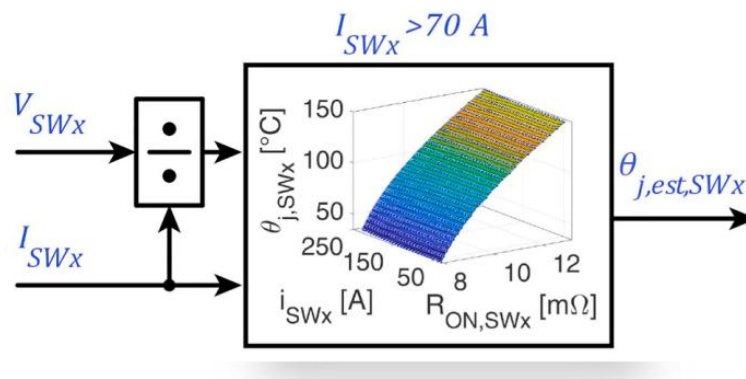


Fig.10. Diagramma funzionale dello stimatore di temperatura di giunzione real time.

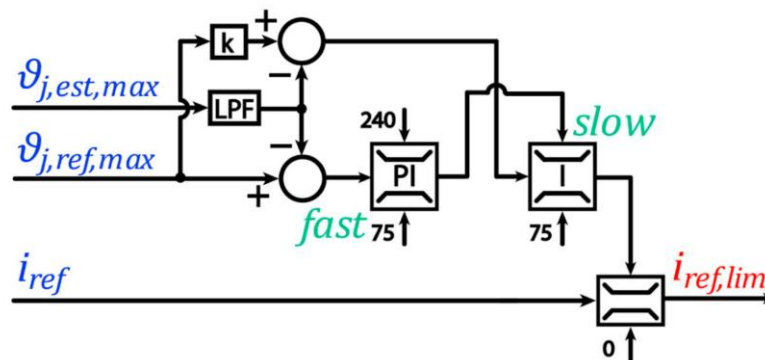


Fig.11. Diagramma funzionale del limitatore di corrente di fase al raggiungimento della massima temperatura di giunzione.

7.4 Sviluppo Interfaccia di Comunicazione e Debug

È stata sviluppata un'interfaccia di comunicazione e debug dedicata per consentire il controllo e il monitoraggio del convertitore. In particolare, si è reso necessario progettare un'interfaccia

ad alto bit rate per acquisire in tempo reale l'andamento delle variabili interne al microcontrollore.

L'interfaccia di debug fornita dal produttore del microcontrollore non è risultata adeguata, in quanto non permette di monitorare in modo efficace le variabili di controllo, che vengono aggiornate alla frequenza di switching del convertitore, pari a 20 kHz. Per superare questa limitazione, è stata sviluppata un'interfaccia basata su comunicazione USART, che attraverso un bridge di comunicazione converte i dati in USB (protocollo Virtual COM) per il collegamento diretto al PC. Lo schema funzionale è mostrato in Fig.12. Lato software è stata sviluppata una GUI (Graphic User Interface) in ambiente Matlab per l'acquisizione e la visualizzazione dei dati. A titolo di esempio è riportata la schermata principale in Fig.13. È stata inoltre sviluppato un sistema di comunicazione via CAN e via MODBUS per poter comandare il convertitore dall'esterno e poterlo interfacciare ad altri convertitore.



Fig.12. Schema funzionale dell'interfaccia di debug.

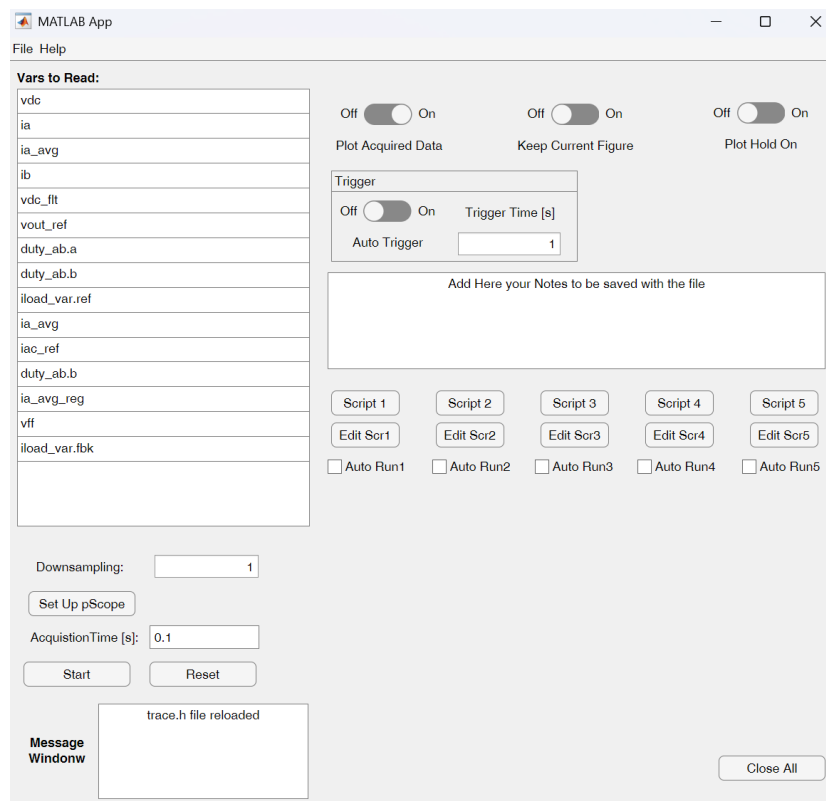


Fig.13. Applicazione per l'acquisizione e visualizzazione delle variabili sviluppata in Matlab.

7.5 Progettazione Prototipo Finale

Nonostante il prototipo finale non sia stato realizzato si è comunque proceduto alla sua progettazione completa. I file cad (meccanici ed elettrici) del prototipo finale risultano completati e potranno essere utilizzati in futuro per la sua realizzazione. A titolo in Fig.14 di esempio viene mostrata una parte della scheda di controllo sviluppata per il prototipo finale.

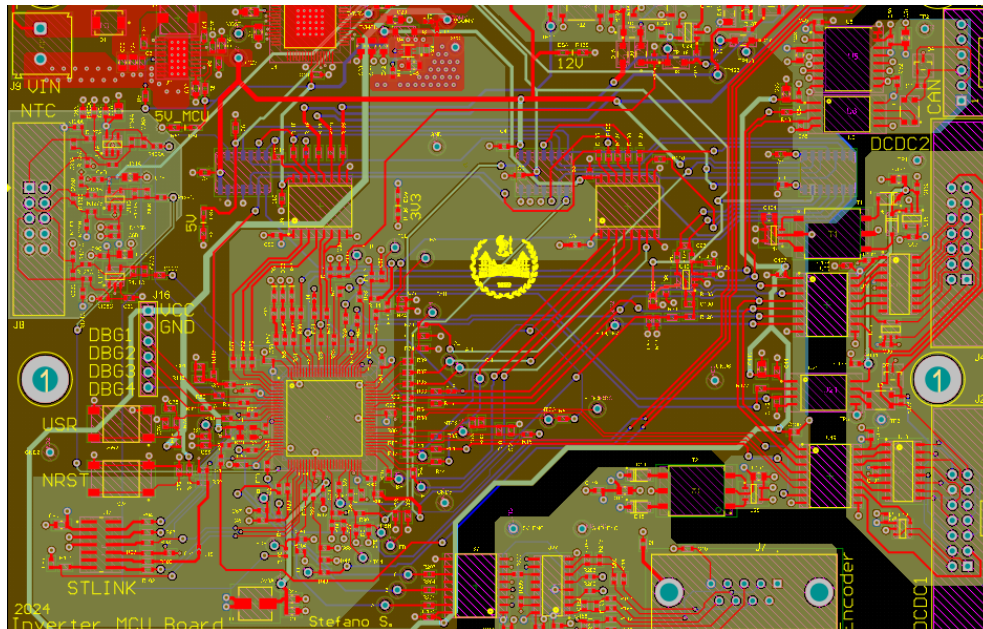


Fig.14. Dettaglio scheda di controllo del convertitore prototipale finale realizzata in Altium Designer.

8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

Non sono state utilizzate consulenze esterne.

9 Pubblicazioni scientifiche

A causa dei tempi di sviluppo dell'hardware non sono ancora stati pubblicati degli articoli in merito al lavoro svolto. Tuttavia, i risultati ottenuti verranno pubblicati a breve.

10 Eventi di disseminazione

Il lavoro svolto è stato presentato durante l'evento di conclusione progetto davanti a tutti i partner tenutosi a Portici (NA) il 3 dicembre 2024.