

Ricerca di Sistema elettrico



Test P-HiL Preliminare di un Convertitore Grid-Forming con
Avanzata Capacità Diagnostica e Funzionalità di
Supporto alla Rete.

Gianmario Pellegrino



**Politecnico
di Torino**



LA 1.13: Test P-HiL Preliminare di un Convertitore Grid-Forming con Avanzata Capacità Diagnostica e Funzionalità di Supporto alla Rete

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: LA1.13

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.....	5
6	Sintesi delle attività svolte	6
7	Dettaglio delle attività svolte.....	6
7.1	Test Sperimentali	6
8	Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte.....	6
9	Pubblicazioni scientifiche	7
10	Eventi di disseminazione	7
11	Descrizione dei risultati ottenuti	7
11.1	RISULTATI OTTENUTI DAI TEST DI CALIBRAZIONE E DALLO STIMATORE DI TEMPERATURA.....	7
11.2	RISULTATI RELATIVI AL FUNZIONAMENTO VSG.....	11

1 Risultati attesi

L'attività di ricerca prevede il test preliminare del convertitore grid-forming realizzato nella LA 1.12 in modalità P-HiL, per la validazione funzionale, della stima di temperatura, e delle varie tecniche di controllo (islanding, supporto VSG, regolazione diretta della sovraccaricabilità).

Durante i test preliminari, il convertitore grid forming è alimentato lato DC da un emulatore di batteria ITECH IT6090C-1500-200 a due quadranti di taglia 90 kW, con tensione fino 1500 V e corrente fino a 200 A. Il convertitore è in prima battuta controllato in tensione con limite di corrente regolabile.

Lato AC, il convertitore grid forming è collegato tramite un filtro di rete ad un emulatore di rete 3-fase composto da due stadi da 50kVA in parallelo (Regatron ACS.50.528.72). Uno dei due stadi è già disponibile, mentre il secondo verrà acquistato nell'ambito di questo progetto entro il M24 per raggiungere la taglia di 100 kVA utile ai test preliminari del convertitore da 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 banda passante dell'emulatore di rete è di 1 kHz, con frequenza di modulazione 5 kHz.

Il sistema real-time in uso per i test P-HiL preliminari è la RT-Box 1 di PLEXIM, disponibile presso PoliTO. Le RT-Box attuali hanno un limite inferiore di time step nell'ordine dei 5 us, ma entro la metà 2023 verrà fornito un aggiornamento firmware che permetterà di scendere sotto 1 us. In entrambi i casi, si ritiene che reti e carichi trifase siano ampiamente coperti. Il modello di rete deve essere descritto in modo circuitale in ambiente nativo PLECS, ambiente che supporta anche script C ed altro. La trasposizione del modello di rete fornito da ENEA in PLECS è parte di questa attività.

I seguenti risultati sono attesi:

- Rapporto tecnico descrittivo delle attività di testing condotte.

Il test preliminare del convertitore grid-forming 3-fase della LA1.12 presso PoliTO, con emulatore di rete/carico trifase da 400V, 50Hz, 100 kVA e emulatore di batteria da 90 kW. Il convertitore under test è collegato all'emulatore di rete trifase tramite un filtro progettato ad hoc.

Il sistema real time in uso presso PoliTO è la RT-Box di Plexim, collegato al convertitore tramite la linea di comunicazione CAN concordata con ENEA per stabilire il tipo di prova in corso e per altre comunicazioni ausiliarie da stabilire (stato, monitor diagnostica, log grandezze controllate ecc..).

Il comando real-time dell'emulatore trifase Regatron avviene attraverso 3 segnali analogici (riferimenti di tensione o di corrente di fase).

I test previsti, concordati con ENEA, sono

- Calibrazione delle tabelle di temperatura dei dispositivi di potenza e della caduta di ON ad inizio vita utilizzata per la stima della vita dei componenti
- Controllo della rete in islanding al variare delle condizioni di generatore e carico
- Supporto tensione - frequenza alla rete con limite di corrente di picco regolato attivamente dalla stima di temperatura. Le condizioni di test sono da definirsi con ENEA.

- Sensitività al variare della frequenza di modulazione

2 Risultati ottenuti

In questa sezione vengono descritti i risultati ottenuti a seguito dei test condotti utilizzando il preprototipo grid-forming trifase realizzato nella LA1.12 presso il Politecnico di Torino, in modalità Power Hardware-in-the-Loop (P-HiL). L'obiettivo dei test è stato validare il funzionamento del convertitore, verificare l'accuratezza della stima della temperatura e valutare le prestazioni delle varie tecniche di controllo, inclusa la gestione in isola (islanding), il supporto Virtual Synchronous Generator (VSG) e la regolazione diretta della sovraccaricabilità.

Setup sperimentale:

Il convertitore è stato alimentato lato DC da un emulatore di batteria ITECH IT6090C-1500-200, capace di fornire fino a 90 kW, con tensione massima di 1500 V e corrente massima di 200 A. Il convertitore è stato inizialmente configurato in controllo di tensione con limite di corrente regolabile.

Lato AC, il convertitore è stato collegato tramite un filtro di rete progettato ad hoc a un emulatore di rete trifase Regatron ACS.50.528.72, configurato in parallelo per raggiungere la potenza di 100 kVA. L'emulatore è stato gestito da un processore real-time esterno per la modalità HiL, con capacità di operare sia come rete attiva sia come carico in scenari di test in isola. La banda passante dell'emulatore è risultata pari a 1 kHz, con una frequenza di modulazione di 5 kHz.

Il sistema real-time utilizzato per i test è la RT-Box 1 di PLEXIM, con un limite di time-step di circa 5 μ s, che verrà ridotto a meno di 1 μ s grazie a un aggiornamento firmware previsto entro la metà del 2023. Il modello di rete fornito da ENEA è stato trasposto nell'ambiente PLECS, con supporto per script C e altre funzionalità avanzate.

Risultati ottenuti:

- Calibrazione delle tabelle di temperatura e della caduta di ON

Sono state calibrate le tabelle di temperatura dei dispositivi di potenza in base alle misure sperimentali. La caduta di ON dei semiconduttori è stata caratterizzata all'inizio della vita operativa per fornire una base affidabile alla successiva stima della vita utile dei componenti.

- Controllo della rete in islanding

Sono stati ottenuti risultati positivi nella verifica del comportamento del convertitore in modalità islanding. Il sistema ha dimostrato una buona stabilità al variare delle condizioni di generazione e del carico. Le transizioni tra operazione connessa alla rete e operazione in isola sono risultate fluide e prive di instabilità significative.

- Supporto tensione-frequenza con limite di corrente regolato dalla stima di temperatura

Il convertitore ha fornito supporto alla rete regolando dinamicamente il limite di corrente di picco in base alla stima della temperatura dei dispositivi di potenza. Questo ha permesso di evitare sovratemperature e migliorare l'affidabilità del sistema.

- Sensitività alla frequenza di modulazione

Sono stati effettuati test per valutare l'impatto della variazione della frequenza di modulazione sulle prestazioni del sistema. I risultati hanno evidenziato una buona robustezza del controllo anche per variazioni significative della frequenza di switching.

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

I test preliminari hanno confermato la validità delle strategie di controllo implementate nel convertitore grid-forming. Il sistema si è dimostrato capace di operare in condizioni di rete connesse e in isola, fornendo supporto tensione-frequenza con regolazione attiva della corrente di picco. Le future attività di ricerca si concentreranno sul miglioramento dell'algoritmo di stima della temperatura e sulla verifica sperimentale con il secondo stadio dell'emulatore di rete per raggiungere i 100 kVA nominali.

3 Prodotti attesi

- Rapporto tecnico descrittivo delle attività di ricerca condotte
- Test preliminare del convertitore grid-forming 3-fase presso PoliTO con emulatore di rete/carico trifase da 400V, 50Hz, 100 kVA e emulatore di batteria da 90 kW..

4 Prodotti ottenuti

- Rapporto tecnico descrittivo delle attività di ricerca condotte e delle caratteristiche del prototipo sviluppato.
- Test preliminare del convertitore grid-forming 3-fase presso PoliTO con emulatore di rete/carico trifase da 400V, 50Hz, 100 kVA e emulatore di batteria da 90 kW.

5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

Non sono stati rilevati scostamenti significativi dei prodotti ottenuti rispetto ai prodotti attesi. L'unica differenza significativa è dovuta al fatto che la parte sperimentale è stata portata avanti utilizzando il preprototipo piuttosto che il prototipo finale per questioni di tempo e ritardi nell'approvvigionamento dei materiali.

6 Sintesi delle attività svolte

Sono state svolte le seguenti attività:

- Test preliminare del convertitore grid-forming 3-fase presso PoliTO con emulatore di rete/carico trifase da 400V, 50Hz, 100 kVA e emulatore di batteria da 90 kW in modalità P-HIL.

7 Dettaglio delle attività svolte

7.1 Test Sperimentali

È stata condotta un'ampia campagna di test sperimentali, i cui risultati saranno presentati nei paragrafi successivi, con l'obiettivo di validare la tecnologia proposta. I dati raccolti hanno confermato pienamente l'efficacia della soluzione sviluppata, dimostrando non solo il successo del progetto, ma anche la sua concreta applicabilità nella prossima generazione di convertitori interfacciati a rete. In Fig.1 viene mostrato il banco test utilizzato per la validazione sperimentale dove si vede il convertitore di potenza, il filtro LCL e l'emulatore di rete. Grazie all'emulatore di rete state simulate varie condizioni operative tra cui: buchi di tensione, ai cambiamenti di frequenza operativa di rete, funzionamento a isola.

I risultati sperimentali ottenuti sono mostrati nel paragrafo 11.

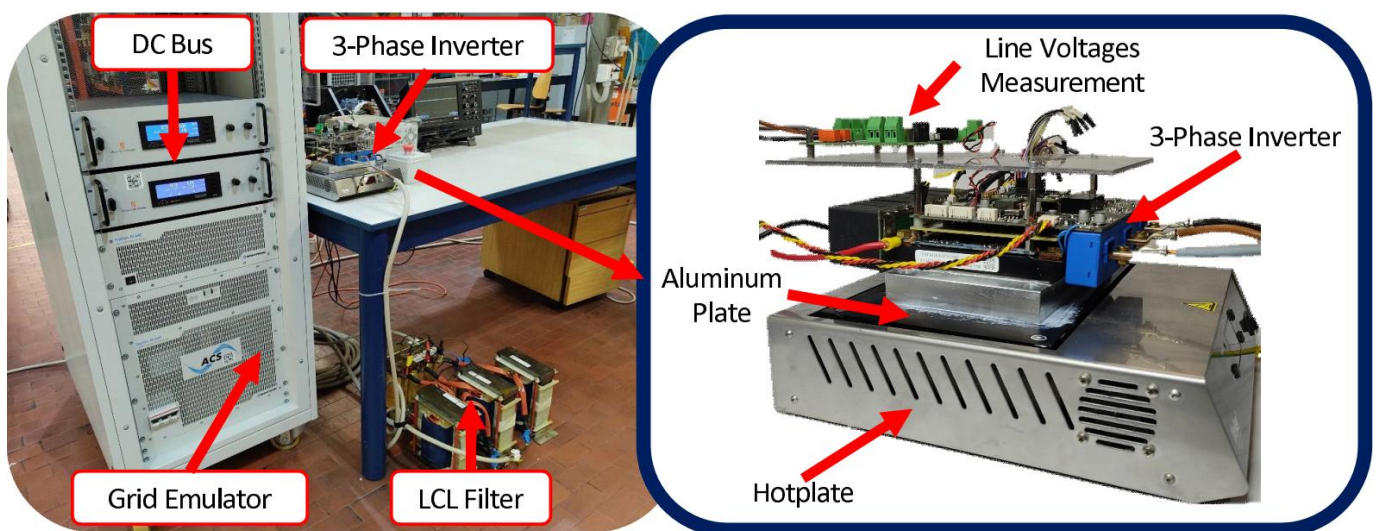


Fig.1. Banco test sperimentale con convertitore, filtro LCL ed emulatore di rete.

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

11 Descrizione dei risultati ottenuti

Di seguito vengono riportati alcuni dei risultati sperimentali ottenuti dalla validazione sperimentale della metodologia proposta.

11.1 RISULTATI OTTENUTI DAI TEST DI CALIBRAZIONE E DALLO STIMATORE DI TEMPERATURA.

Le seguenti figure illustrano i risultati sperimentali relativi alla calibrazione e al monitoraggio termico dei dispositivi di potenza, evidenziando le relazioni tra corrente, temperatura di giunzione e resistenza di conduzione.

La Fig.2 mostra l'impulso di corrente misurato durante la fase di calibrazione dei dispositivi di potenza, con l'indicazione degli istanti di campionamento utilizzati per acquisire i dati sperimentali.

In Fig.3, è riportata la resistenza di conduzione di uno dei semiconduttori di potenza in funzione della temperatura di giunzione per diverse condizioni di corrente. I dati sperimentali sono stati ottenuti a seguito della procedura di calibrazione, fornendo un'analisi dettagliata del comportamento termico del dispositivo.

Fig.4 analizza l'andamento della resistenza di conduzione in funzione della corrente per diverse temperature di giunzione. È possibile vedere come la variazione di resistenza in funzione della corrente sia minima; tuttavia, per poter correttamente stimare la temperatura di giunzione del dispositivo è necessario tenere in considerazione questa dipendenza nelle LUT usate dallo stimatore.

Fig.10 e Fig.6 presentano la stima in tempo reale della temperatura di giunzione, ottenuta utilizzando il diagramma funzionale riportato nel Rapporto Tecnico della LA1.12 (Rapporto tecnico RdS_PTR 22-24_PR 2.3_LA1.12_165 – Fig. 10) in due differenti condizioni operative. In particolare, la Fig.10 si riferisce a una corrente di fase pari a 220 Apk con una frequenza fondamentale di 10 Hz, mentre la Fig.6 mostra la stessa analisi con una frequenza ridotta a 0.5 Hz, consentendo di osservare l'impatto della variazione della frequenza sul comportamento termico del dispositivo. È possibile notare come a frequenza più bassa la massima temperatura di giunzione raggiunta dai semiconduttori a parità di corrente commutata sia sensibilmente più alta.

In Fig.7 viene mostrato il sistema di limitazione attiva della corrente, che interviene quando la temperatura di giunzione raggiunge il valore massimo consentito, il cui schema funzionale è riportato nel Rapporto Tecnico della LA1.12 (Rapporto tecnico RdS_PTR 22-24_PR 2.3_LA1.12_165 - Fig. 11). Questa strategia di protezione termica è essenziale per garantire l'affidabilità e la sicurezza operativa del sistema senza introdurre distorsioni armoniche in caso di limitazione attiva della corrente.

Infine, la Fig. 21 dimostra come una riduzione della tensione di DC-link consenta di aumentare la massima corrente erogabile, mantenendo invariato il limite di temperatura di giunzione. Questo risultato evidenzia il potenziale impatto della tensione di alimentazione sulle prestazioni termiche del convertitore.

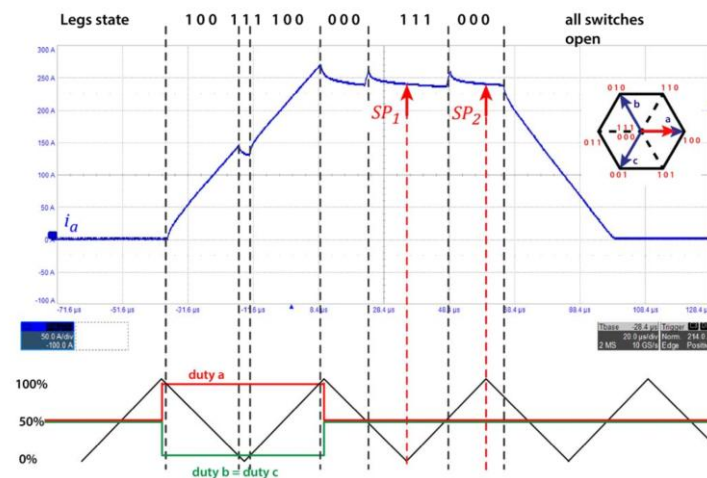


Fig.2. Impulso di corrente misurato durante la fase di calibrazione dei dispositivi di potenza, dove vengono messi in evidenza gli istanti di campionamento.

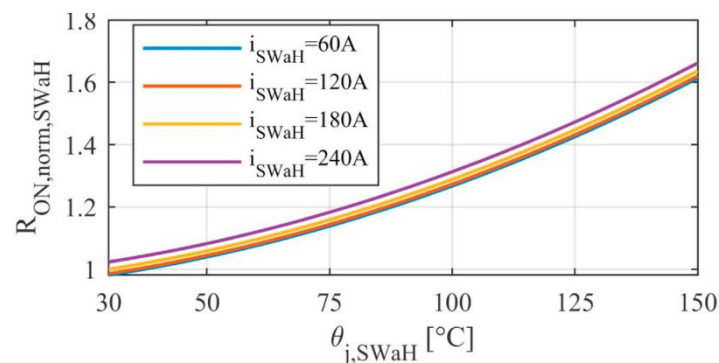


Fig.3. Resistenza di condizione di uno dei semiconduttori di potenza in funzione della temperatura di giunzione per diverse correnti ottenuta sperimentalmente a seguito della procedura di calibrazione

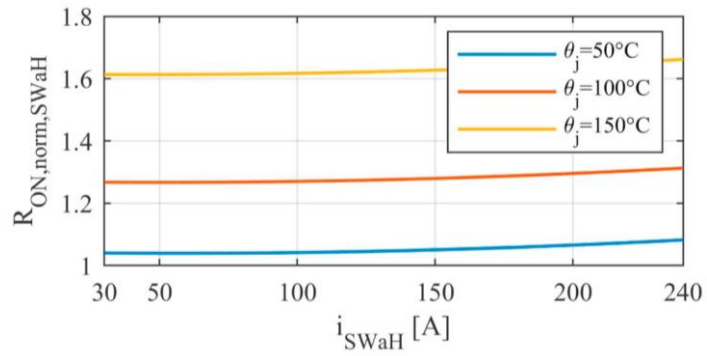


Fig.4. Andamento della resistenza di condizione di uno dei semiconduttori di potenza in funzione della corrente per diverse temperature di giunzione ottenuta a seuto della procedura di calibrazione.

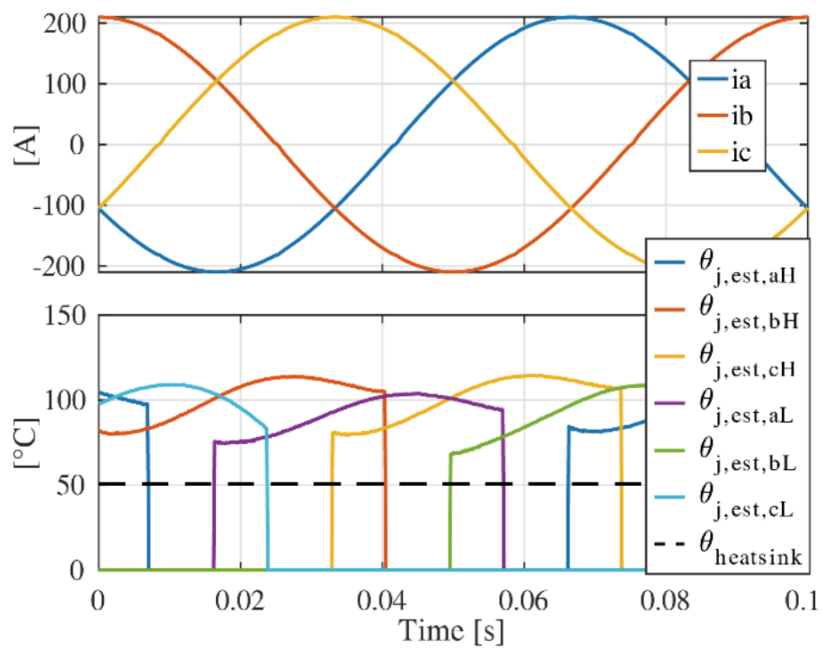


Fig.5. Stima real time della temperatura di giunzione con corrente di fase pari a 220 Apk e freuquenza di fondamentale 10Hz.

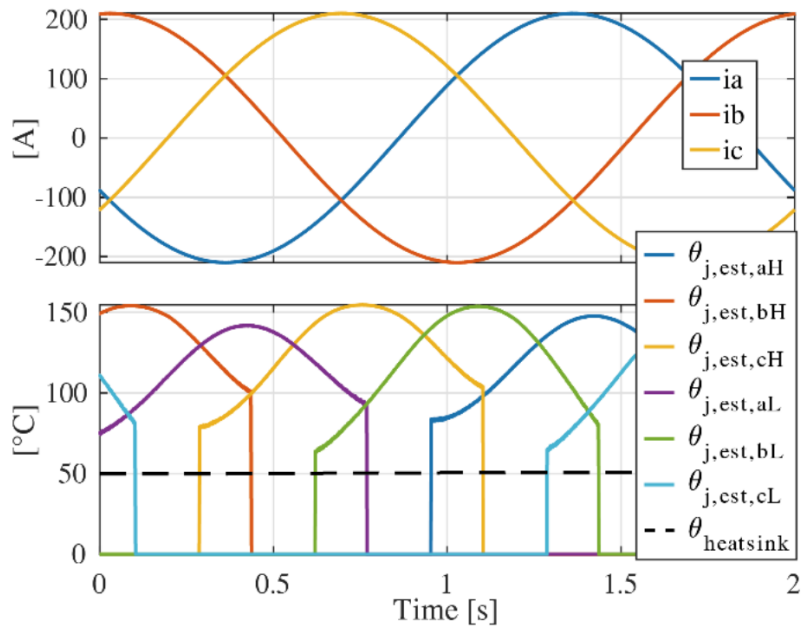


Fig.6. Stima real time della temperatura di giunzione con corrente di fase pari a 220 Apk e frequenza di fondamentale 0.5Hz.

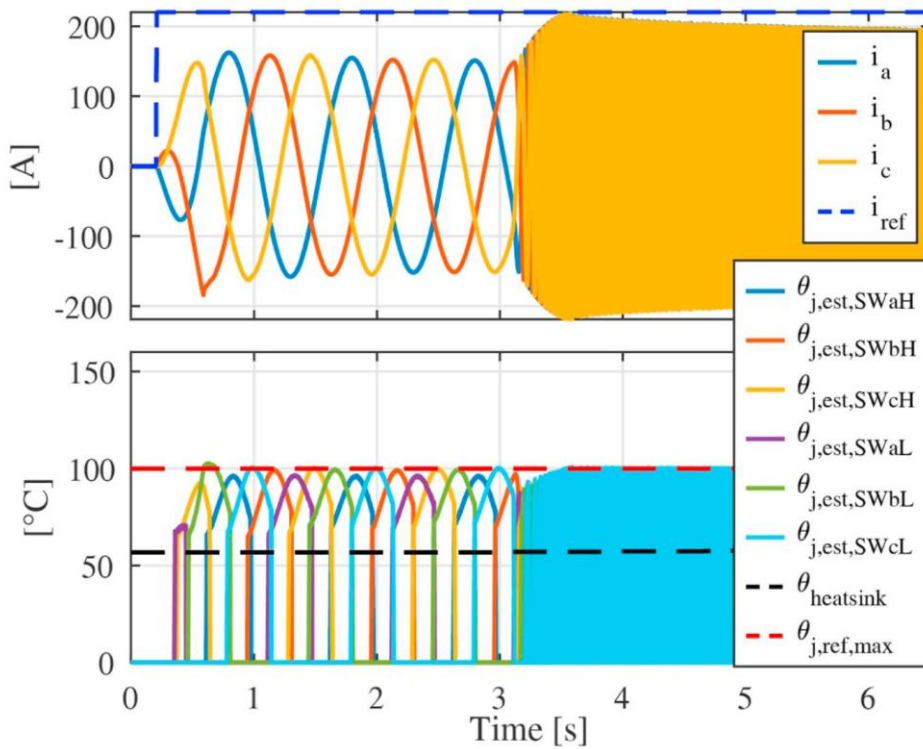


Fig.7. Limitazione arriva di corrente al raggiungimento della massima temperatura di giunzione.

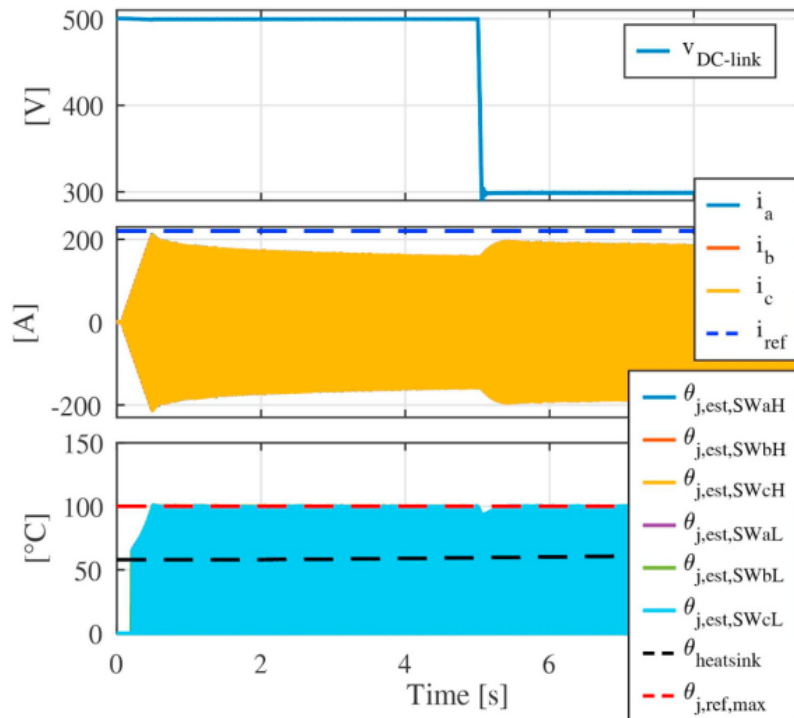


Fig.8. Aumento della massima corrente erogabile a parità di massima temperatura di giunzione in seguito a una diminuzione della tensione di DC-link.

11.2 RISULTATI RELATIVI AL FUNZIONAMENTO VSG

Di seguito, si riportano i risultati ottenuti dall'implementazione del VSG con sovraccarico transitorio e limitazione termica attiva.

In Fig.9 si mostra la tabella con i parametri di inverter e S-VSC. In particolare la tabella riporta i parametri specifici dell'inverter e del S-VSC che sono stati impostati da codice. I parametri descritti includono caratteristiche tecniche come la potenza nominale, le capacità di sovraccarico, i limiti di corrente e le specifiche termiche dei dispositivi elettronici, che sono cruciali per determinare come il convertitore risponde durante eventi di guasto sulla rete.

In Fig.10. A titolo di esempio viene mostrata l'iniezione di una corrente di guasto S-VSC durante un abbassamento di tensione di 500 ms.

Questa figura si divide in due parti:

- Parte superiore: Mostra la corrente di fase i_a del convertitore (rappresentata in rosso), che indica come il convertitore inietta corrente nel sistema, e il valore di picco della corrente di riferimento $|i^*|$ (indicato in blu), che rappresenta il valore target della corrente da iniettare durante un guasto.
- Parte inferiore: Mostra la temperatura massima stimata della giunzione (T_j , in rosso), che è una misura della temperatura raggiunta dal semiconduttore, e la temperatura massima impostata (T_{j^*} , in verde) che rappresenta la temperatura di sicurezza del dispositivo. La temperatura del dissipatore di calore ($T_{heatsink}$, in verde) è anche monitorata per garantire che il convertitore non surriscaldi.

Fig.11. Mostra la corrente di riferimento proveniente dal controllo S-VSC (rossa) e corrente di riferimento saturata (blu) dopo la limitazione I_{max} imposta dal controller di temperatura durante un abbassamento di tensione di 500 ms

Questa figura illustra come il controller di temperatura interviene per limitare la corrente di riferimento del convertitore durante un abbassamento di tensione. La corrente di riferimento del VSM (in rosso) rappresenta la corrente ideale che il convertitore dovrebbe iniettare durante il guasto. Dopo l'intervento del controller, la corrente di riferimento viene limitata a un valore massimo (in blu), che tiene conto della temperatura del semiconduttore per evitare danni da surriscaldamento.

Fig.12. Mostra il Dettaglio dell'iniezione di corrente di guasto S-VSC durante un abbassamento di tensione di 500 ms Questa figura è simile alla Fig. 8, ma fornisce un dettaglio maggiore:

- Parte superiore: La corrente di fase ia del convertitore (rossa) e la corrente di riferimento di picco (blu) sono monitorate durante l'abbassamento di tensione, evidenziando come il convertitore reagisce al guasto.
- Parte inferiore: La temperatura della giunzione (rappresentata come T_j , in rosso) viene monitorata attentamente, insieme al valore massimo impostato T_j^* per garantire che la temperatura non superi i limiti critici.

Fig.13. Comportamento in caso di guasto con due diversi limiti di corrente (180 e 240 A).

Questa figura mostra i risultati sperimentali per due diversi limiti di corrente (180 A e 240 A) durante un guasto:

- Il primo grafico partendo dall'alto mostra la corrente di picco iniettata dall'inverter durante l'evento di guasto. Questa corrente dipende dai limiti impostati e dalla risposta del convertitore.
- Il secondo grafico partendo dall'alto mostra il picco di tensione della rete, che fa vedere come la rete reagisce durante l'iniezione di corrente di guasto. La presenza di una corrente di guasto più alta contribuisce a mantenere la stabilità della rete.
- Il terzo grafico mostra l'iniezione di potenza reattiva da parte del convertitore, che supporta la rete mantenendo il bilanciamento tra potenza attiva e reattiva durante il guasto.
- Il quarto grafico mostra la temperatura della giunzione del semiconduttore, che viene monitorata per evitare danni termici durante l'operazione di sovraccarico. La figura mostra l'effetto di diverse limitazioni di corrente sulla temperatura, con la presenza di limiti più elevati che porta a un maggiore riscaldamento.

Queste figure illustrano l'interazione tra il controllo della corrente di guasto, la gestione termica e le risposte del convertitore durante un guasto sulla rete, con un focus sul garantire che il convertitore supporti la rete senza danneggiare i componenti elettronici sensibili.

INVERTER AND S-VSC PARAMETERS FOR THE EXPERIMENTAL TESTS

Parameter	Value	Parameter	Value
V_b (Phase)	$120\sqrt{2}$ V	S_b	50 kVA
f_{sw}	20 kHz	V_{dc}	470 V
L_f	300 μ H	C_f	40 μ F
L_{fg}	270 μ H	L_g	300 μ H
L_s	0.1 pu	R_s	0.02 pu
H	4 s	τ_e	1 s
k_r	0.95	k_p^{fast}	4.5 A/ $^{\circ}$ C
k_i^{fast}	160 A/($^{\circ}$ C \cdot s)	k_i^{slow}	25 A/($^{\circ}$ C \cdot s)

Fig.9. Tabella con i parametri di inverter e S-VSC

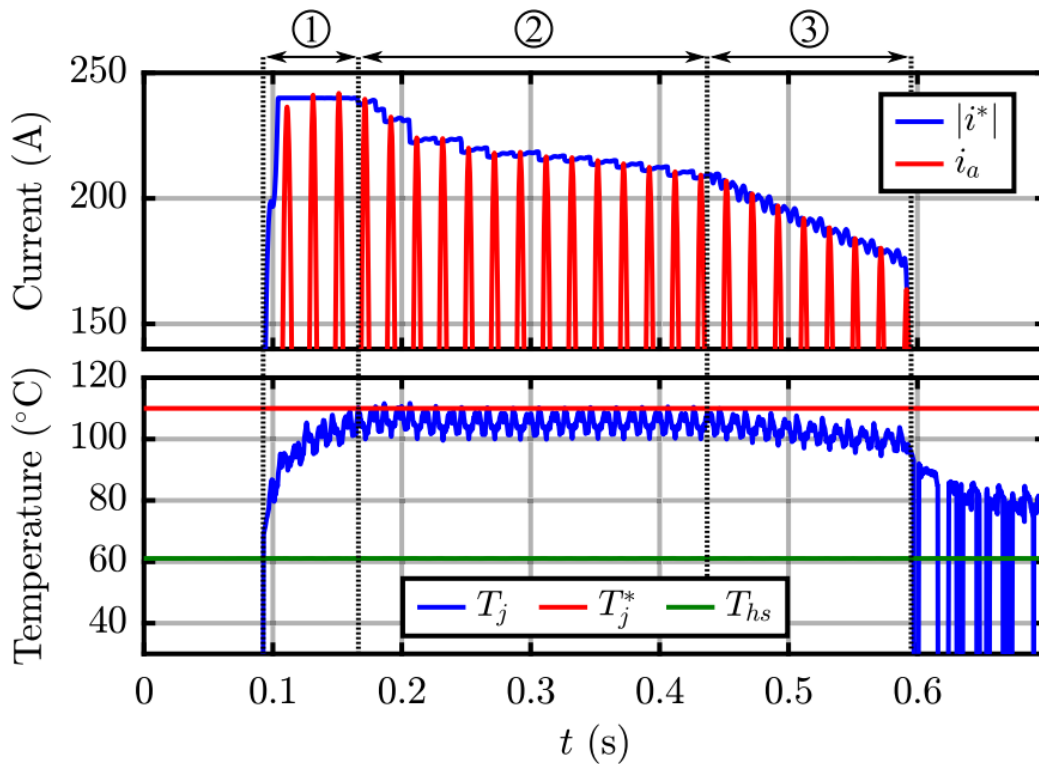


Fig.10. Iniezione di corrente di guasto S-VSC durante un abbassamento di tensione di 500 ms. Parte superiore: corrente di fase i_a del convertitore (rosso) e valore di picco della corrente di riferimento $|i^*|$ (blu). Parte inferiore: temperatura massima stimata di giunzione T_j e temperatura massima impostata T_j^* (rosso) e temperatura del dissipatore di calore T_{hs} (verde).

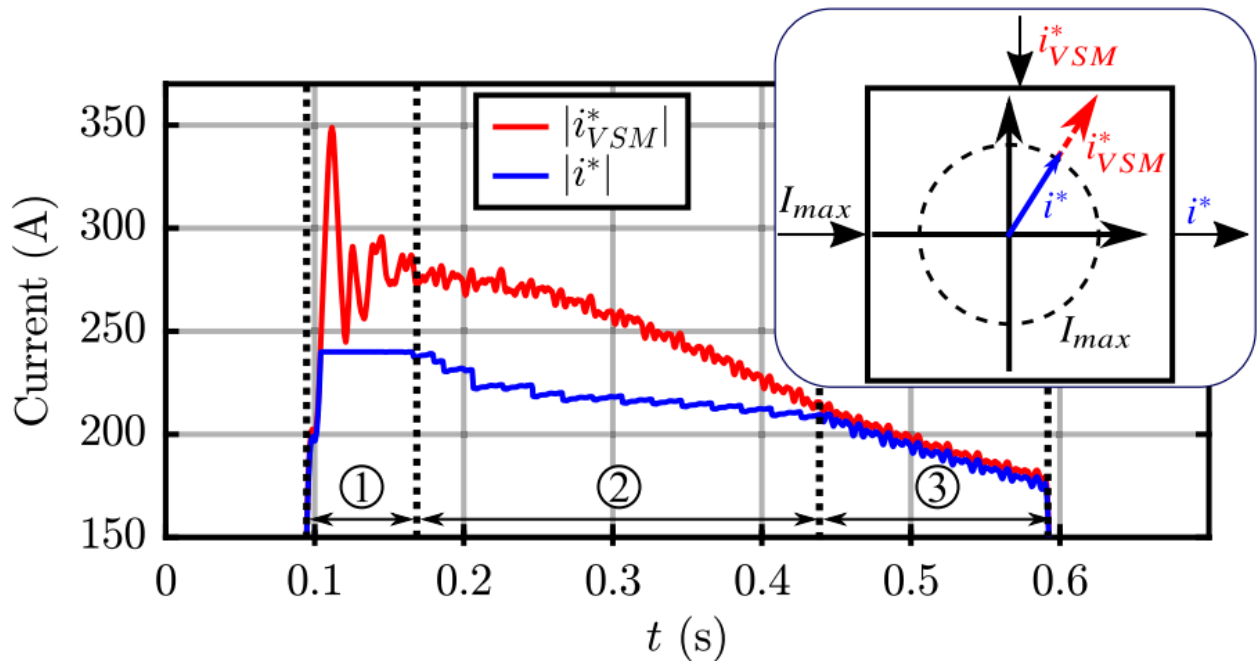


Fig.11. Corrente di riferimento S-VSC $|i^*_{VSM}|$ (rossa) e corrente di riferimento saturata $|i^*|$ (blu) dopo la limitazione I_{max} imposta dal controller di temperatura durante un abbassamento di tensione di 500 ms.

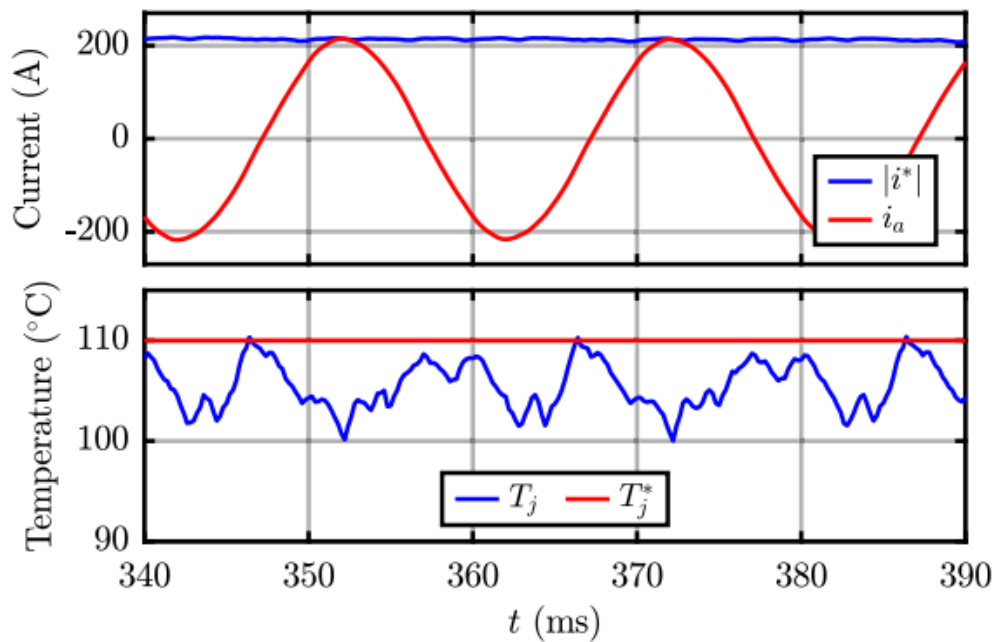


Fig.12. Dettaglio dell'iniezione di corrente di guasto S-VSC durante un abbassamento di tensione di 500 ms. Parte superiore: corrente di fase a i_a del convertitore (rossa) e valore di picco della corrente di riferimento $|i^*|$ (blu). Parte inferiore: temperatura massima stimata di giunzione T_j e temperatura massima impostata T_j^* (rossa).

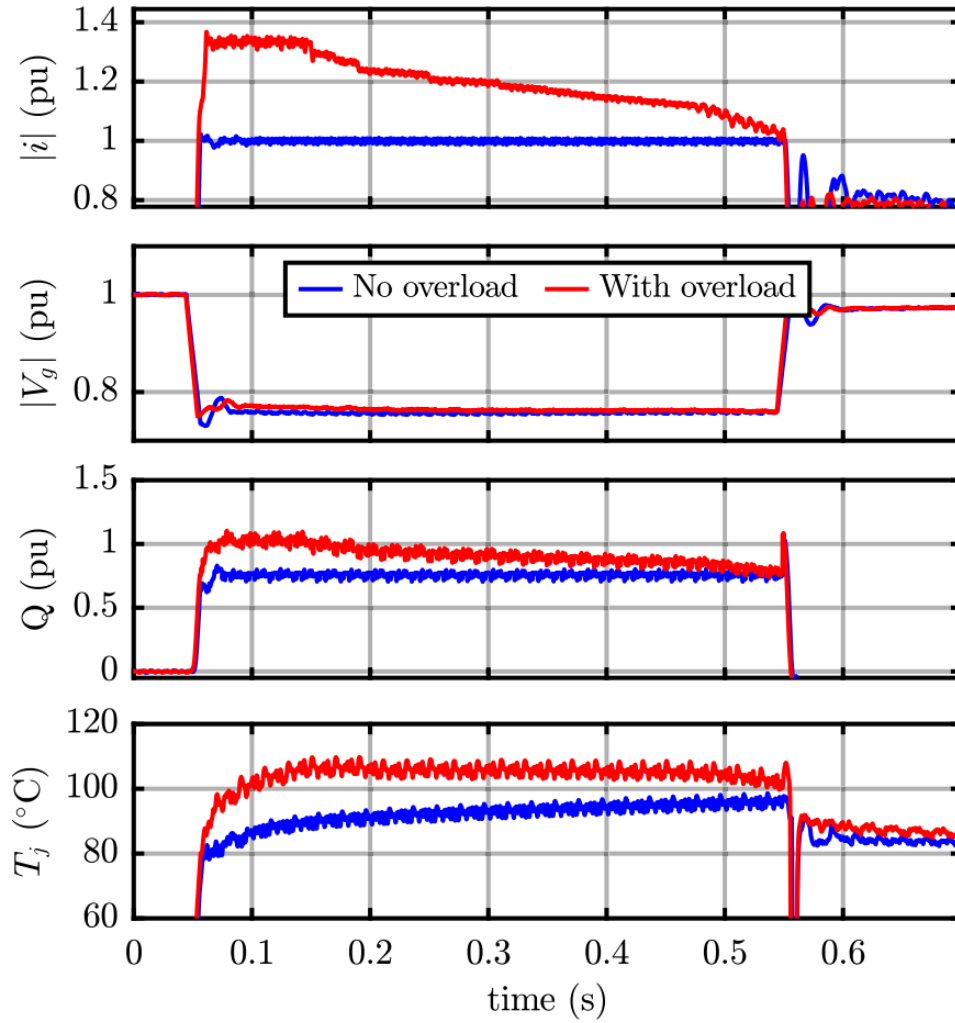


Fig.13. Comportamento in caso di guasto con due diversi limiti di corrente (180 e 240 A) Primo: corrente di picco iniettata dall'inverter. Secondo: picco di tensione di rete. Terzo: iniezione di potenza reattiva. Quarto: temperatura di giunzione.