



Ricerca di Sistema elettrico

Progettazione di una stazione per la ricarica rapida/ultrarapida per bus urbani con accumulo di terra innovativo a volani

Alessandro Lidozzi, Luca Solero, Luca Bigarelli

PROGETTAZIONE DI UNA STAZIONE PER LA RICARICA RAPIDA/ULTRARAPIDA PER BUS URBANI CON ACCUMULO DI TERRA INNOVATIVO A VOLANI

Alessandro Lidozzi, Luca Solero, Luca Bigarelli (Università degli Studi ROMA TRE)

Aprile 2021

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - II annualità

Obiettivo: Tecnologie

Progetto: Innovazioni tecnologiche e modellistiche per la mobilità elettrica urbana

Work package: Mobilità

Linea di attività: 2.32 - *Progettazione di una stazione per la ricarica rapida/ultrarapida per bus urbani con accumulo di terra a volani*

Responsabile del Progetto: Claudia Meloni, ENEA

Responsabile del Work package: Maria Pia Valentini, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Stazioni di ricarica flash per trasporto pubblico urbano (LA2.32 e LA2.33)"

Responsabile scientifico ENEA: Fernando Ortenzi

Responsabile scientifico Università degli Studi ROMA TRE: Alessandro Lidozzi

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	5
2.1 PROGETTAZIONE DEL VOLANO ELETTROMECCANICO E DEL RELATIVO AZIONAMENTO ELETTRICO	6
2.1.1 <i>Progettazione dell'azionamento elettrico per la carica/scarica del volano</i>	9
2.2 PROGETTAZIONE DEL SISTEMA DI CONVERSIONE PER IL COLLEGAMENTO ALLA RETE ELETTRICA NAZIONALE (AC-DC)	10
2.3 DIMENSIONAMENTO DEL SISTEMA DI CONVERSIONE DC-DC PER L'INTERFACCIAMENTO VERSO IL VEICOLO	14
2.4 PIATTAFORMA E SOFTWARE DI CONTROLLO	14
2.4.1 <i>Algoritmo di controllo della stazione di ricarica: volano elettromeccanico</i>	15
2.4.2 <i>Algoritmo di controllo della stazione di ricarica: AC-DC</i>	17
2.4.3 <i>Algoritmo di controllo della stazione di ricarica: DC-DC</i>	20
2.5 LAYOUT ED ASSEMBLAGGIO DEL SISTEMA	22
2.6 VERIFICA PRELIMINARE DEL FUNZIONAMENTO DEI VARI SOTTOSISTEMI	24
3 CONCLUSIONI.....	25
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	26

Sommario

L'attività è inerente allo sviluppo di stazioni per la ricarica rapida o ultrarapida di mezzi per trasporto pubblico urbano e ha riguardato, per la seconda annualità, il dimensionamento e la progettazione esecutiva di un sistema di accumulo a terra basato su volano, funzionale alla ricarica rapida al capolinea. Si è partiti quindi dalla struttura energetica per definire masse, velocità di rotazione e dimensioni geometriche, per poi concentrarsi sul dimensionamento della struttura di conversione statica che andrà a formare una sorta di nodo elettrico attivo tra volano, rete elettrica e sistema di accumulo a bordo del bus.

Contestualmente, sono state definite le specifiche relative alla scheda di controllo che verrà poi impiegata nel sistema da realizzare.

Pertanto, l'attività del secondo anno è terminata con la progettazione esecutiva e l'assemblaggio dell'intero sistema di accumulo: volano, sistema di conversione statica e relativo software controllo. La realizzazione costruttiva è stata eseguita da ditte specializzate esterne, una per il volano ed una per il sistema di conversione statica.

Per quanto riguarda il software di gestione e controllo è stato diviso in due principali task, alto livello, e basso livello, per gestire sia le fasi di ricarica rapida, charger-to-vehicle, che le fasi di ricarica dalla rete elettrica nazionale a potenza media significativamente ridotta, tale da minimizzare l'impatto della rete. Data la complessità dei compiti da assolvere, ci si è orientati verso ambienti di sviluppo grafici, quali ad esempio National Instruments LabVIEW.

I risultati attesi al termine della seconda annualità saranno il progetto esecutivo del sistema di accumulo basato su volani elettromeccanici, dalla struttura meccanica alla completa interfaccia di conversione statica. Completa l'output atteso la realizzazione dell'algoritmo di controllo dell'intero sistema.

1 Introduzione

La presente attività si inquadra all'interno di un insieme più vasto di attività il cui obiettivo è la progettazione e sperimentazione di tecnologie veicolari ed impiantistiche per permettere la ricarica rapida ed ultrarapida nell'ambito dei mezzi di trasporto pubblico urbano.

La stazione di ricarica, da realizzare nella corrente annualità del Piano Triennale della Ricerca, avrà i seguenti requisiti, ottenuti dalle analisi svolte nella prima annualità:

- Potenza in ricarica massima al capolinea 40 kW per 8 minuti
- Tensione nominale sistema di accumulo a bordo del veicolo 300 V, Tensione massima inferiore a 400 V, tensione minima maggiore di 200 V
- Energia da ricaricare 4.5÷5 kWh, di cui 2.5 kWh da parte del sistema di accumulo cinetico
- Potenza massima richiesta alla rete: 21 kW (≈ 32 A)

La Figura 1 rappresenta lo schema illustrativo dell'intera stazione di ricarica: la macchina elettrica accoppiata al volano si interfaccia con la rete tramite un doppio stadio di conversione AC-DC-AC, grazie ai due convertitori lato rete e lato macchina, mentre la ricarica delle batterie sul veicolo viene effettuata tramite un ulteriore convertitore DC-DC collegato al link DC. Nella pratica, per effettuare l'operazione di ricarica, l'autobus è dotato di un pantografo che si collega all'uscita del convertitore C3. Il convertitore C3 sarà responsabile della gestione della ricarica dell'accumulatore di bordo, mentre C1 gestirà la potenza prelevata dalla rete elettrica necessaria per la ricarica del volano e a supporto della ricarica del veicolo.

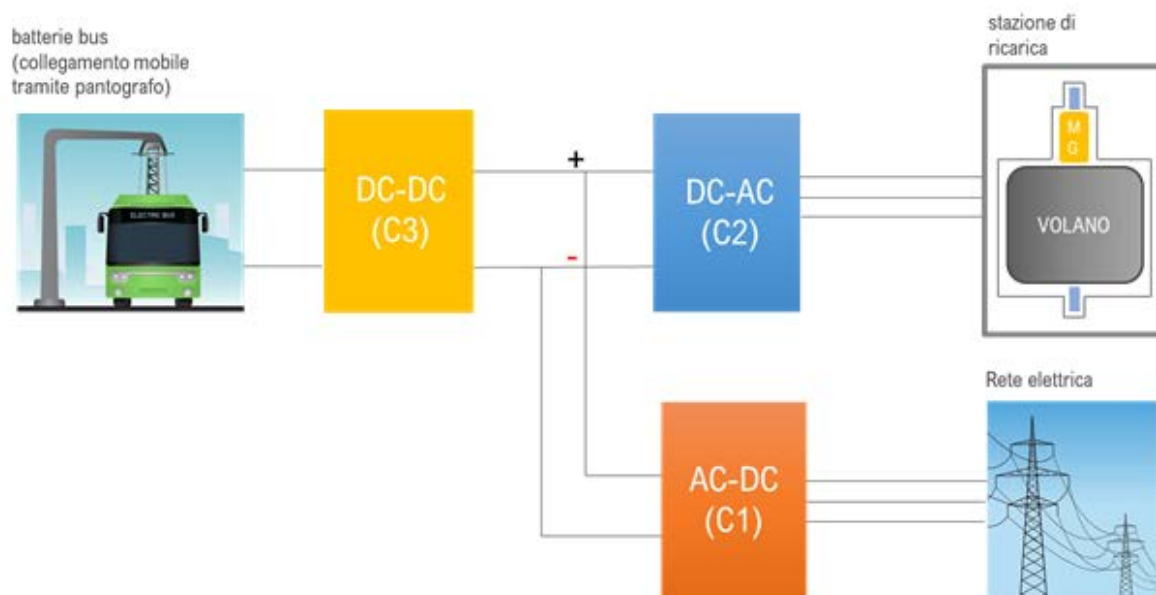


Figura 1. Schema illustrativo della stazione di ricarica.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

In questa sezione si riporta la descrizione delle attività svolte e degli output prodotti. La stazione di ricarica flash proposta, con schema a blocchi mostrato in Figura 2, è composta da tre blocchi funzionali, il sistema AC-DC per l'interfacciamento verso la rete elettrica nazionale, il blocco DC-DC per l'interfacciamento verso l'accumulo elettrochimico a bordo del veicolo e l'azionamento elettrico per la gestione del volano elettromeccanico.

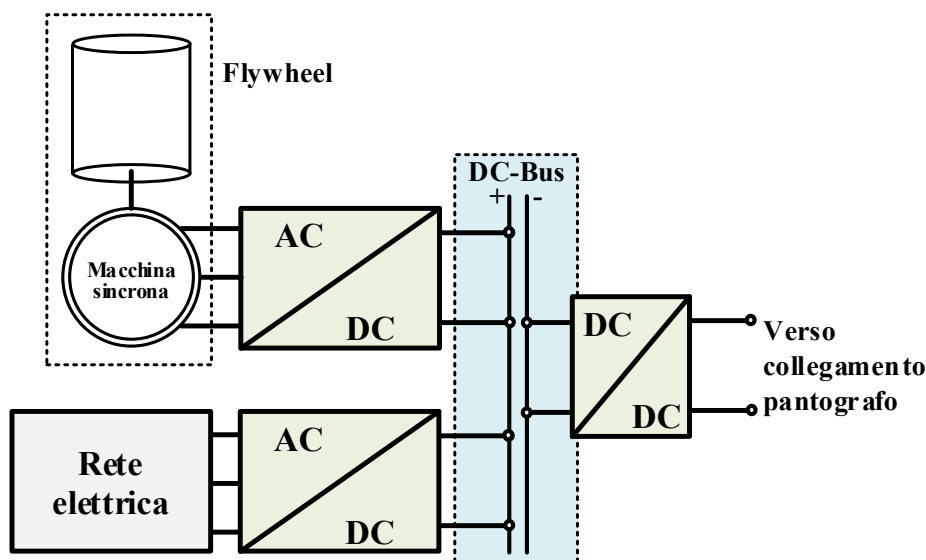


Figura 2. Stazione di ricarica rapida con accumulo elettromeccanico basato su volani.

La tensione sul DC-bus è regolata dal convertitore verso la rete elettrica, e mantenuta a circa 750 V. Questo consentirà di avere un noto DC di potenza perfettamente stabile, dove poter scambiare i vari flussi di potenza. Durante la fase di ricarica flash, l'energia verrà prelevata dall'accumulo cinetico, ed eventuali discrepanze tra ciò che viene richiesto e ciò che verrà fornito, verrà colmato dal gestore del bus DC. Questa modalità di funzionamento sarà necessaria e sufficiente a garantire che sul bus DC non insistano sistemi con puro controllo di potenza o corrente.

Nei paragrafi seguenti verranno descritti singolarmente i vari sotto blocchi componenti la stazione di ricarica, verrà illustrato il dimensionamento e le varie scelte progettuali. Verrà infine illustrato l'algoritmo di controllo completo che è stato poi implementato sulle varie piattaforme di controllo.

2.1 Progettazione del volano elettromeccanico e del relativo azionamento elettrico

Il dimensionamento del volano elettromeccanico è partito da requisiti energetici forniti durante la prima annualità. Quindi, per prima cosa si è preceduto alla progettazione della parte meccanica analizzandone le caratteristiche ed i requisiti. È stata identificata una geometria del volano che fosse in grado di fornire l'energia richiesta con complessità realizzative coerenti con l'applicazione. La velocità di rotazione non è stata scelta molto alta, per quanto avrebbe reso più compatto il sistema, in modo da utilizzare macchine elettriche industriali. Ai fini della dimostrazione di fattibilità, i parametri progettuali del volano poco influenzano la funzionalità del sistema. Qualora si passasse ad una realizzazione industriale, la velocità di rotazione potrà essere sicuramente aumentata per migliorare la compattezza e ridurre pesodella massa volanica. La Tabella 1 riassume le caratteristiche meccaniche del volano che si andrà a realizzare.

Il gruppo volano è costituito da un albero di supporto in acciaio bonificato sul quale vengono impilati n.15 dischi con diametro esterno $D_{ext}=742$ mm e altezza $H=50$ mm, ciascuno del peso di 166 kg, come riassunto in Figura 3.

Ciascun disco presenta un foro centrale cilindrico con 2 gole per chiavetta contrapposte a 180° per motivi di equilibratura, n.4 fori cilindrici in array polare utili a chiudere il pacco d'ischi in maniera compatta, due superfici circolari contrapposte come interfaccia di collegamento, un sistema di n.2 boccole di spessoramento per infilare agevolmente il modulo di volano fino a 50 mm dalla quota di posizione, per poi calettarlo "a tolleranza" in maniera centrata.

Tabella 1 Caratteristiche riassuntive del sistema volano elettromeccanico

grandezza	descrizione	valore
ω_2	Numero di giri massimo	4000 giri/min
$\omega_{1'}$	75% dell'energia stratta	2000 giri/min
ω_1	Numero di giri minimo	1600 giri/min
D_{ext}	Diametro esterno	742 mm
R_{ext}	Raggio esterno	371 mm
R_{int}	Raggio interno	0 mm
H	Altezza	750 mm
Densità	Densità materiale	7.68 g/cm ³
Massa	Massa del volano	2490,7 kg
J	Momento d'inerzia	171,4 kgm ²
Energia	Energia disponibile a ω_2	9754,7 kJ

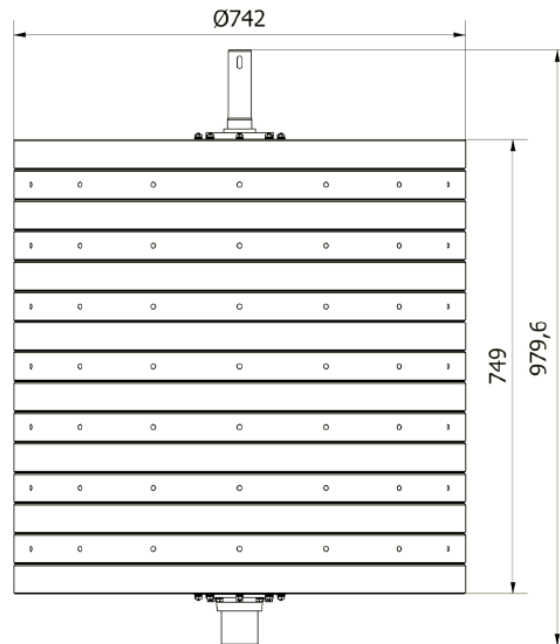


Figura 3. Vista dettagliata della sola massa volanica.

La Figura 4 mostra una vista più dettagliata del volano che si andrà a realizzare. Alcuni elementi notevoli sono descritti nel presente report. Rispetto sempre alla Figura 4, il blocco indicato con (32) identifica la macchina elettrica sincrona, (47) vano di accoppiamento tra macchina elettrica e albero superiore del volano, (45) camicia di contenimento in acciaio, (35) base di supporto della massa volanica, (34) base di fissaggio al suolo e (54) supporti antivibranti.

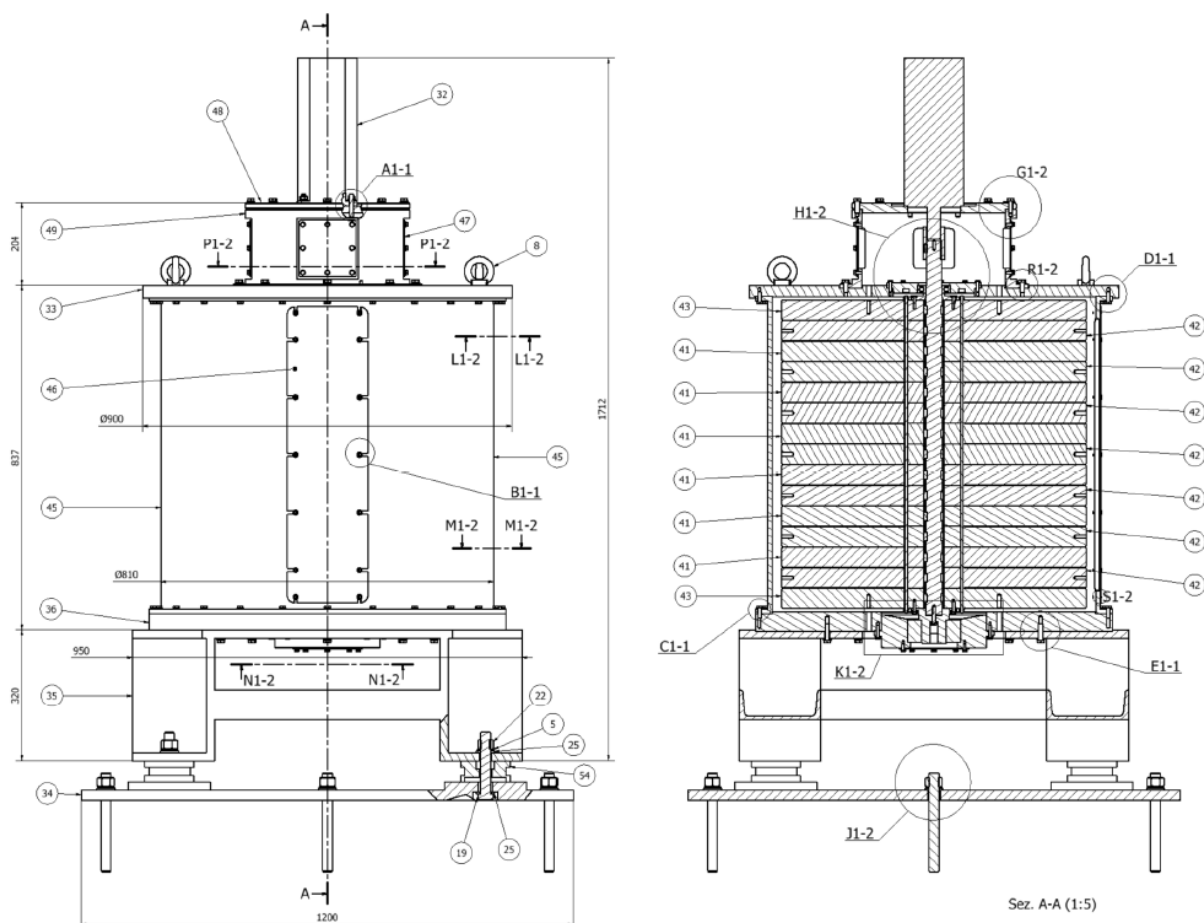


Figura 4. Struttura del volano realizzato su specifica dalla Opus Automazione Srl.

Nelle applicazioni pratiche la carica sarà delimitata da una velocità angolare massima ω_2 e da una minima ω_1 , in cui il sistema sarà considerato scarico. Questo per evitare variazioni troppo grandi di tensione e per limitare la coppia che deve fornire la macchina elettrica, a parità di potenza nominale. Pertanto, l'energia cinetica del volano che è effettivamente utilizzabile (E_u) può essere ricavata dalla seguente espressione:

$$E_u = \frac{1}{2} J (\omega_2^2 - \omega_1^2)$$

Riarrangiando l'equazione precedente ed esplicitando il rapporto $d = \omega_1 / \omega_2$ si può ricavare l'energia utilizzabile in funzione dell'energia massima disponibile, ovvero l'energia posseduta a ω_2 :

$$E_u = E_m (1 - d^2)$$

$$E_m = \frac{1}{2} J \omega_2^2$$

Si può allora riportare su di un grafico il rapporto $\frac{E_u}{E_m}$ in funzione del parametro d normalizzato tra 0 e 1, ed ottenere la curva di carica e scarica del volano che viene riportata in Figura 5.

Quando il volano ruota alla velocità massima ($d = 1$) l'energia utilizzata sarà nulla, mentre quando la velocità sarà pari a ω_1 ($d = 0$) tutta l'energia sarà stata estratta. L'andamento della curva è, ovviamente, di tipo quadratico, ed è pertanto facile notare che ad una scarica del 50% ($d = 0.5$) corrisponde un quantitativo di energia estratta pari al 75% di quella massima. Per evitare il sovradimensionamento del sistema di conversione

statica e della macchina elettrica, si è ipotizzato un range operativo con $0.4 \leq d \leq 1$ dove si andrà ad estrarre circa l'85% dell'energia disponibile.

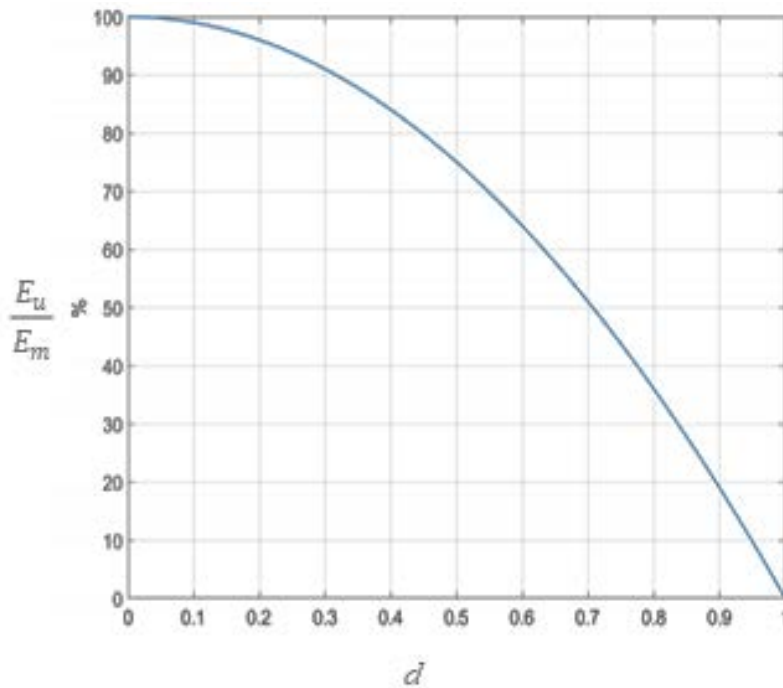


Figura 5 Legge di scarica del sistema volano.

2.1.1 Progettazione dell'azionamento elettrico per la carica/scarica del volano

L'inverter per l'alimentazione della macchina elettrica installata in testa al volano è basato su un modulo IPM prodotto dalla Semikron serie Skiip 603 GD123-3, mostrato in Figura 6. Il modulo è raffreddato ad aria e verrà posto in ventilazione forzata tramite l'installazione di due ventilatori sul lato delle alettature del dissipatore. Integra al suo interno i sensori di corrente lato AC, il sensore di tensione lato DC, i gate driver ed il trasduttore di temperatura del modulo di potenza stesso. Poiché l'IPM Semikron non integra i condensatori DC, sono state progettate e poi fatte realizzare delle bus-bar in grado di consentire il collegamento di sei condensatori a film della Cornell Dubilier serie 944U101K102AB (100 μ F, 1000 V). Per l'interfacciamento della scheda di controllo PED-Board® col modulo Semikron Skiip ci si è serviti di una scheda di adattamento disponibile commercialmente.



Figura 6. Modulo Semikron Skiip six-pack per la gestione del volano elettromeccanico.

La macchina elettrica selezionata che sarà collegata con accoppiamento diretto all'albero superiore del volano è prodotta dalla Phase Motion Control ed ha codice seriale U307W40, è lunga 359 mm, ha un diametro di 165 mm ed un peso complessivo di 24 kg. L'inerzia del rotore e del relativo albero è assolutamente trascurabile rispetto all'inerzia complessiva del sistema. Si tratta di una macchina sincrona a magneti

permanenti, con montaggio superficiale e quindi magneticamente isotropa. Le sue caratteristiche elettromeccaniche sono state scelte per poter operare a tensioni del DC-bus tipiche dei raddrizzatori controllati operanti da rete elettrica, circa 750 V DC. La caratteristica di coppia è tale da consentire di lavorare con le potenze richieste durante la fase più critica, ovvero quella di scarica. La fase di ricarica del volano avverrà a potenze inferiori rispetto a quelle di scarica, quindi la progettazione ha posto il focus sulla fase operativa più critica. Una vista della macchina elettrica è riportata in Figura 7, dove si possono notare i connettori per la potenza e per il sensore di posizione (resolver). I due fori sul lato sinistro sono a rappresentare l'ingresso e l'uscita del fluido di raffreddamento.

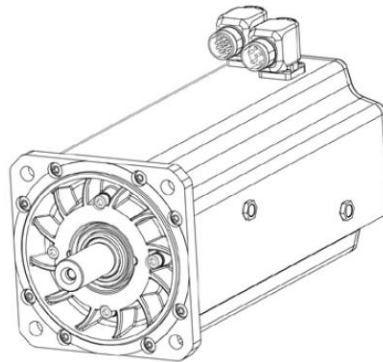


Figura 7. Vista d'insieme della macchina sincrona.

La Tabella 2 riassume i principali dati di targa della macchina elettrica che verrà utilizzata nel sistema volano.

Tabella 2 – Principali dati della macchina sincrona selezionata

grandezza	valore
Velocità nominale	4000 rpm
Coppia nominale	68 Nm
Potenza nominale	28.5 kW
Velocità massima	6000 rpm
Coppia massima	130 Nm
Resistenza avvolgimento	0.191 Ω (fase-fase)
Induttanza avvolgimento	1.895 mH (fase-fase)
Costante di velocità	76.82 Vrms/1000rpm

2.2 Progettazione del sistema di conversione per il collegamento alla rete elettrica nazionale (AC-DC)

Il sistema di conversione AC-DC verso la rete elettrica viene utilizzato sia per la fase di ricarica del volano, prelevando energia dalla rete, che durante la fase di ricarica del sistema di accumulo a bordo del veicolo, partecipando insieme al volano nel fornire l'energia necessaria.

L'interfacciamento verso la rete elettrica è stato quindi realizzato mediante un Boost-Rectifier trifase con filtro LCL (Figura 8) e con trasformatore di isolamento mostrato in Figura 9. Si noterà la mancanza del collegamento di neutro non necessario ai fini del funzionamento dell'apparato di conversione. L'inverter six-pack è stato dimensionato utilizzando dispositivi MOSFET full SiC (Figura 10) per poter aumentare la frequenza di commutazione, riducendo le dimensioni del filtro di rete, pur con una diminuzione delle perdite complessive ottenendo una efficienza maggiore rispetto all'impiego di dispositivi IGBT al silicio. Il sistema complessivo ne risulta quindi estremamente compatto. La Figura 11 mostra l'assemblaggio completo dell'inverter SiC e della relativa scheda di controllo, che viene posizionata perfettamente sopra l'inverter stesso. La frequenza di commutazione è stata selezionata per essere pari a 30 kHz.

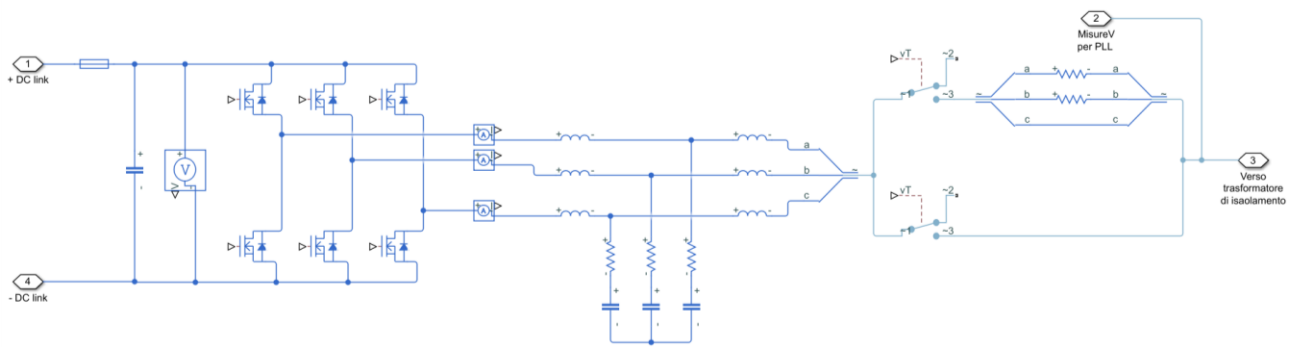


Figura 8. Schema del boost-rectifier per l'interfacciamento verso la rete elettrica.



Figura 9. Trasformatore per l'isolamento del sistema di conversione AC-DC verso la rete elettrica.



Figura 10 Inverter SiC utilizzato per il collegamento alla rete elettrica

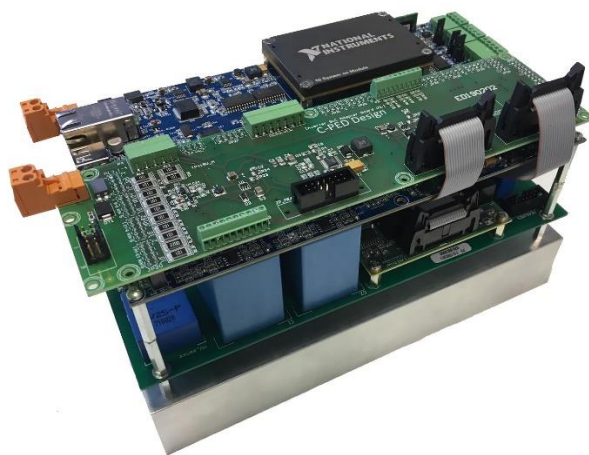


Figura 11. Assemblaggio finale dell'inverter SiC e della sua scheda di controllo.

Per quanto riguarda il filtro per l'interfacciamento verso rete, sono stati considerati i seguenti componenti ed i rispettivi valori: induttori primari da 1 mH e 32 A_{rms}, filtro capacitivo realizzato con condensatori da 5 μ F con in serie una resistenza di smorzamento da 4.7 Ω ed infine, filtro induttivo di uscita con induttanza pari a 55 μ H e 32 A_{rms}. Lo schema riassuntivo è mostrato in Figura 12.

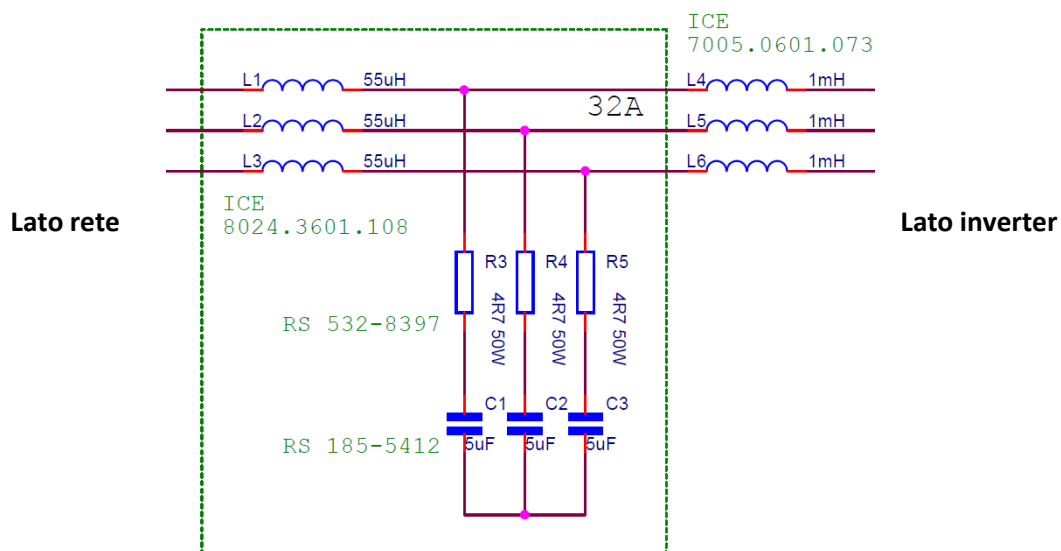


Figura 12. Schema elettrico del filtro per il collegamento alla rete elettrica.

Sul link DC, comune a tutti i sistemi di conversione come già illustrato in Figura 2, è stato inserito un banco di condensatori aggiuntivo, e realizzato per lo scopo, in modo da aumentare l'energia presente sul DC-bus per poter gestire in maniera più sicura le richieste ed i rilasci di potenza durante la fase sia di ricarica del volano che del sistema di accumulo a bordo del veicolo. Per la realizzazione di tale banco, sono stati utilizzati condensatori elettrolitici, caratterizzati da una elevata capacità e da un ridotto costo. La Figura 13 mostra il layout del banco di condensatori.

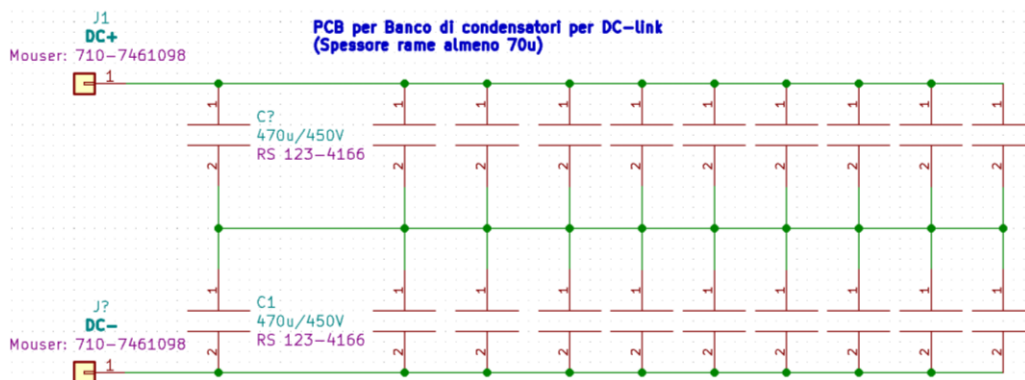


Figura 13. Layout del banco di condensatori elettrolitici collegati ad DC-bus.

Per poter effettuare il collegamento alla rete elettrica, è necessario acquisire le tensioni di rete, sia per motivi di protezione ed individuazione del range di funzionamento, sia per permettere all'inverter di essere sincronizzato con la rete tramite quindi un apposito PLL. La lettura delle tensioni concatenate è stata effettuata con una scheda elettronica dedicata che consente di avere isolamento tra lato alta tensione e lato misura, e segnali differenziali verso la scheda di controllo. Un'immagine della scheda per la lettura delle tensioni concatenate è mostrata in Figura 14 ed è basta sul chip serie ISO224 prodotto dalla Texas Instruments. Questa, tramite il connettore JP-ADP può essere collegata direttamente alla scheda di controllo tramite la scheda di adattamento dedicata mostrata nella parte superiore della Figura 11.



Figura 14. High Voltage Sensing Board per la lettura delle tensioni di rete.

La Figura 15 riassume e mostra lo schema elettrico completo del sistema di conversione AC-DC realizzato per interfacciare appunto il bus DC alla rete elettrica. La funzione di questo convertitore sarà quella di fornire la potenza per la ricarica del volano e supportare, seppur in modo parziale, con potenza addizionale la fase di ricarica dell'accumulatore elettrochimico a bordo del veicolo.

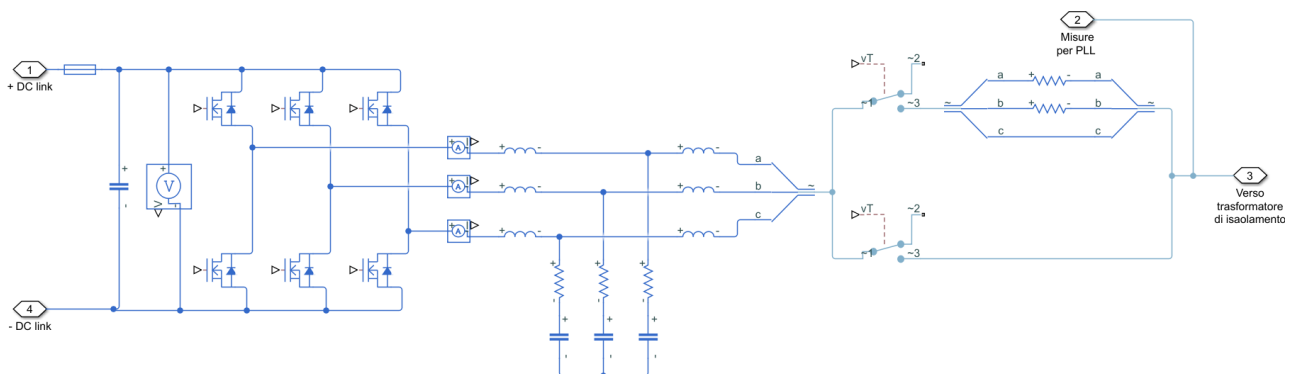


Figura 15. Schema elettrico completo del sistema AC-DC verso la rete elettrica

2.3 Dimensionamento del sistema di conversione DC-DC per l'interfacciamento verso il veicolo

Le operazioni di ricarica sono gestite da un sistema di conversione DC-DC che è stato interfacciato tra il bus DC comune a tutti i convertitori e l'uscita DC verso il bus. Poiché la tensione del sistema di accumulo elettrochimico sul veicolo è inferiore alla tensione del DC-bus, una configurazione di tipo step-down è stata selezionata per lo scopo. Il modulo di potenza è basato su un IPM prodotto dalla Semikron modello Skiip Skiip 613 GD123-3 già mostrato in Figura 6. Al suo interno sono presenti i gate driver, ed i trasduttori di misura per le correnti di uscita e per la tensione sul link DC.

Il convertitore DC-DC è realizzato con una struttura di tipo step-down con uscita composta da tre fasi operanti in parallelo ed in interleaving per la riduzione del ripple sull'uscita e quindi sull'accumulatore da ricaricare. Lo schema completo è mostrato in Figura 16, dove possono essere individuati i tre induttori di uscita da 800 μ H e 60 A, il filtro capacitivo da 450 V e circa 6.6 mF ed infine, i teleruttori di manovra per la connessione in sicurezza della stazione di ricarica al sistema di accumulo a bordo del veicolo.

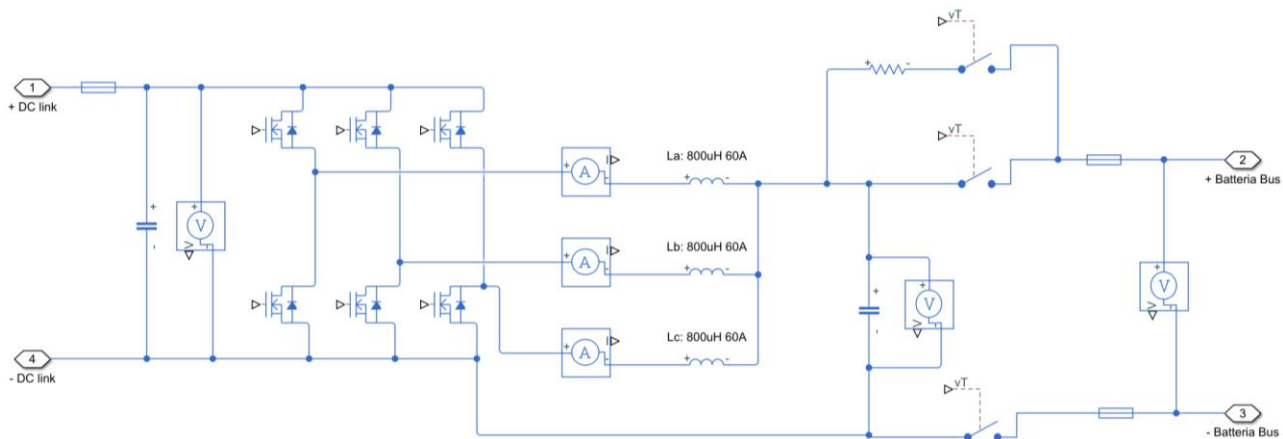


Figura 16. Schema elettrico del convertitore DC-DC.

2.4 Piattaforma e software di controllo

Per il controllo completo della stazione di ricarica è stata scelta una piattaforma in grado sia di poter gestire gli apparati di conversione statica, quindi dotata di capacità di acquisizione di segnali analogici come le misure e di disponibilità di uscite digitali per controlli PWM. Inoltre, per la specifica applicazione, ulteriori requisiti sono stati, la possibilità di integrare una interfaccia grafica per l'utente e la disponibilità di bus di comunicazione industriale necessari per far interagire i vari sistemi componenti la stazione. La scelta, quindi, è ricaduta sulla scheda PED-Board mostrata in Figura 17, prodotta e commercializzata dalla ED-Elettronica Dedicata Srl. La scheda monta un sistema System-on-Module sbRIO-9651 prodotto dalla National Instruments che ha al suo interno un microprocessore ARM dual-core ed una FPGA Xilinx Artix-7. Entrambi i target sono programmabili tramite il software di sviluppo LabVIEW®.

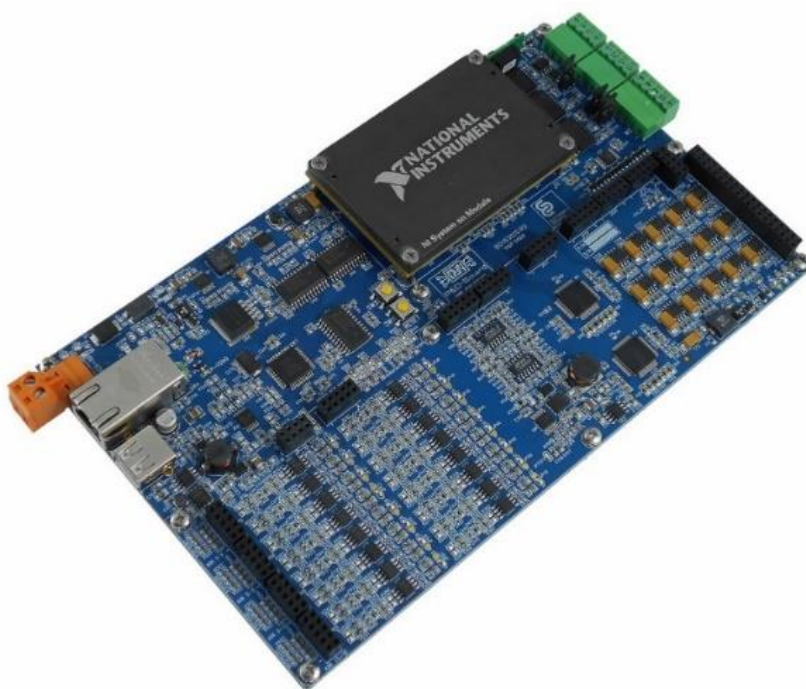


Figura 17. Piattaforma di controllo PED-Board® selezionata per i vari sottosistemi della stazione di ricarica.

Pertanto, l'algoritmo di controllo è stato diviso tra i due target disponibili. Gli anelli di regolazione e le protezioni sono stati implementati su FPGA, mentre la macchina stati, la struttura di comunicazione e l'interfaccia grafica sono stati fatti eseguire al microprocessore.

La stazione di ricarica è governata da tre distinte schede di controllo, una per ogni sottosistema virtualmente indipendente: DC-DC di interfaccia batterie, AC-DC per collegamento alla rete elettrica e DC-AC per il controllo del volano.

2.4.1 Algoritmo di controllo della stazione di ricarica: volano elettromeccanico

Per la regolazione del funzionamento del DC-AC tramite il quale si gestisce il funzionamento della macchina elettrica collegata al volano, è stato realizzato in ambiente LabVIEW un algoritmo di controllo, in parte eseguito tramite un microprocessore Real Time, in parte implementato su FPGA, entrambi appartenenti ad un sistema sbRIO-9651 prodotto dalla National Instruments e montato su una scheda di controllo PED-Board, rappresentata in Figura 17.

Per quanto riguarda la parte del codice realizzata per essere eseguita dal target Real Time, essa risulta deputata a fornire un'interfaccia grafica tramite la quale l'utente finale risulti in grado di interagire con il sistema, avendo da una parte ampi gradi di libertà nel modificare i vari parametri di funzionamento e al tempo stesso impedendo una gestione scorretta del sistema. Più nello specifico, si riassume brevemente le varie operazioni che è possibile compiere tramite l'algoritmo di controllo implementato su target Real Time:

1. risulta possibile visualizzare sul front panel le varie grandezze di interesse, sia sotto forma di andamenti temporali riportati in opportuni grafici, sia come valori istantanei messi a disposizione tramite specifici indicatori. Tali informazioni vengono inviate al microprocessore Real Time dall'FPGA appartenente alla medesima sbRIO-9651;
2. risulta possibile verificare la presenza di errori di corrente, tensione, velocità, o di malfunzionamento degli switch del convertitore. Anche tali informazioni giungono al target Real Time dall'FPGA;
3. risulta possibile modificare i vari parametri di controllo, quali la massima potenza alla quale può avvenire la carica o la scarica del volano, la velocità del volano raggiunta la quale deve terminare la fase di carica o di scarica, la pendenza della rampa con la quale la potenza viene aumentata fino al

raggiungimento del valore massimo così da non avere variazioni repentine e di ampiezza eccessiva delle varie grandezze elettriche. È importante sottolineare il fatto che, anche avendo la possibilità di gestire tali parametri, comunque l'algoritmo eseguito dal microprocessore Real Time evolve, a seconda di come opera il sistema, in maniera autonoma una volta avviato, svolgendo anche in caso di un errore delle operazioni opportune per potare il sistema in sicurezza e attendere, qualora necessario, la presenza di un operatore per un successivo riavvio;

4. risulta possibile comunicare, tramite MODBUS, con il programma che si occupa della gestione del funzionamento del convertitore DC-DC utilizzato come interfaccia verso le batterie, rappresentante il MASTER in tale processo di comunicazione, inviando ad esso tutte le informazioni relative al funzionamento nel caso in cui si decida di interagire con il sistema dal front panel del programma che ora si sta analizzando, operante da SLAVE, oppure ricevendo dallo stesso MASTER tutti i parametri e i segnali necessari nel caso in cui si voglia gestire tutto dal front panel del programma dedicato alla gestione del DC-DC sopra menzionato.

In Figura 18 viene mostrata l'interfaccia grafica con la quale l'operatore può interagire con il sistema.

Riguardo invece al codice di controllo implementato su FPGA, tramite quest'ultimo:

- 1) vengono ricevute le varie grandezze fornite dai diversi sensori/trasduttori utilizzati nel sistema;
- 2) vengono inviate tali grandezze al target Real Time ed inoltre processate per stabilire la presenza di eventuali errori, anch'essi inviati al target Real Time, dovuti al malfunzionamento dei componenti del convertitore o alla presenza di valori fuori dai range operativi previsti;
- 3) vengono eseguiti i vari anelli di regolazione tramite i quali vengono definiti i segnali modulanti (necessari per la gestione del convertitore elettronico di potenza) che consentiranno il raggiungimento dei valori desiderati delle varie grandezze, impostati tramite l'interfaccia grafica realizzata sul target Real Time;
- 4) viene generato un segnale portante che, confrontato con i segnali modulanti calcolati, consente di definire lo stato dei vari switch del convertitore ad ognuno dei quali viene inviato uno specifico segnale di accensione/spegnimento.

Entrando più nello specifico per quanto riguarda l'algoritmo di regolazione, è stato realizzato un anello di velocità in cui l'errore di velocità, pari alla differenza tra il valore di riferimento e il valore attuale, viene inviato a un controllore PI per ottenere in uscita il valore di corrente, di asse q, al quale risulta correlata la coppia che la macchina elettrica dovrà fornire per accelerare/decelerare il volano in modo tale che la velocità di quest'ultimo raggiunga il valore desiderato. Si noti che, per non avere in uscita dal regolatore PI un valore di corrente troppo elevato, quest'ultimo viene saturato tramite un valore massimo e un valore minimo calcolati sul target Real Time a partire dal valore di potenza inviata/ricevuta al/dal link DC al quale viene fatta seguire una rampa la cui pendenza e il cui valore massimo possono essere impostati e variati dall'operatore.

Quindi, il valore di corrente, di asse q, fornito in uscita dall'anello di velocità viene confrontato con il valore attuale della corrente, di asse q. L'errore viene inviato in ingresso a un secondo regolatore PI così che, in uscita da tale anello di corrente si possa avere il valore di duty-cycle di asse q.

Per quanto riguarda il valore di duty-cycle di asse d, esso viene fornito in uscita da un ulteriore regolatore PI in ingresso al quale viene inviato l'errore dato dalla differenza tra il riferimento di corrente di asse d, impostato pari a 0A, e il valore attuale.

I valori di D_q e D_d vengono utilizzati per ricavare, tramite una trasformata inversa di Park seguita da una trasformata inversa di Clarke, i valori di duty-cycle per i tre rami del convertitore.

L'algoritmo di regolazione è mostrato schematicamente nella Figura 19.



Per la regolazione della tensione del link DC viene adottato un convertitore AC-DC connesso alla rete. Il funzionamento di tale convertitore viene gestito tramite un algoritmo di controllo, realizzato in LabVIEW, in parte eseguito su un microprocessore Real Time, in parte implementato su FPGA. Sia il target Real Time sia

I'FPGA utilizzati per eseguire tale codice fanno parte di un sistema sbRIO-9651 prodotto dalla National Instruments e montato su una scheda di controllo PED-Board, rappresentata in Figura 17.

Sul target Real Time viene processata quella parte di codice generata per fornire all'utente finale una interfaccia tramite la quale possa dialogare con il sistema e per eseguire la macchina a stati implementata allo scopo di avere un'evoluzione del sistema che possa avvenire prescindendo dalla presenza di un operatore umano, comunque attesa in quei casi in cui si verifichi un errore a seguito del quale lo stesso algoritmo attua una serie di operazioni per giungere a uno stato in cui il tutto viene posto in sicurezza e in attesa di un segnale di riavvio fornito dallo stesso operatore. Entrando più nello specifico, tramite l'algoritmo che viene svolto dal microprocessore Real Time è possibile:

- 1) ricevere dall'FPGA appartenente alla stessa sbRIO-9651 tutte le grandezze di interesse i cui valori istantanei vengono resi disponibili tramite degli indicatori e i cui andamenti nel tempo vengono rappresentati su di un grafico;
- 2) verificare la presenza di eventuali errori di tensione, corrente, temperatura, frequenza o correlati al malfunzionamento degli switch del convertitore;
- 3) decidere se, una volta abilitata la modulazione, far crescere la tensione del link DC con una rampa automatica, la cui pendenza e il cui valore finale possono essere impostati, oppure controllarne il valore manualmente. È doveroso precisare il fatto che, anche essendo possibile impostare tali grandezze, comunque l'algoritmo è stato realizzato in modo tale da guidare l'utente finale in modo da non generare situazioni in cui il sistema non opera più in maniera corretta;
- 4) comunicare via MODBUS con il programma che regola il funzionamento del DC-DC. In tale comunicazione, in cui il programma che regola il funzionamento del DC-DC svolge il ruolo di MASTER mentre il programma che qui si sta descrivendo e che governa il funzionamento dell'AC-DC connesso alla rete svolge il ruolo di SLAVE, è possibile decidere se agire sul sistema dal front panel del MASTER oppure operare dal front panel dello SLAVE. Anche nel passaggio da una modalità operativa all'altra, l'algoritmo è stato realizzato in modo tale da non avere variazioni repentine delle varie grandezze del sistema, anche se tale passaggio venisse svolto quando il sistema risulta operativo.

In Figura 20 viene mostrata l'interfaccia grafica con la quale l'operatore può comunicare con il sistema.

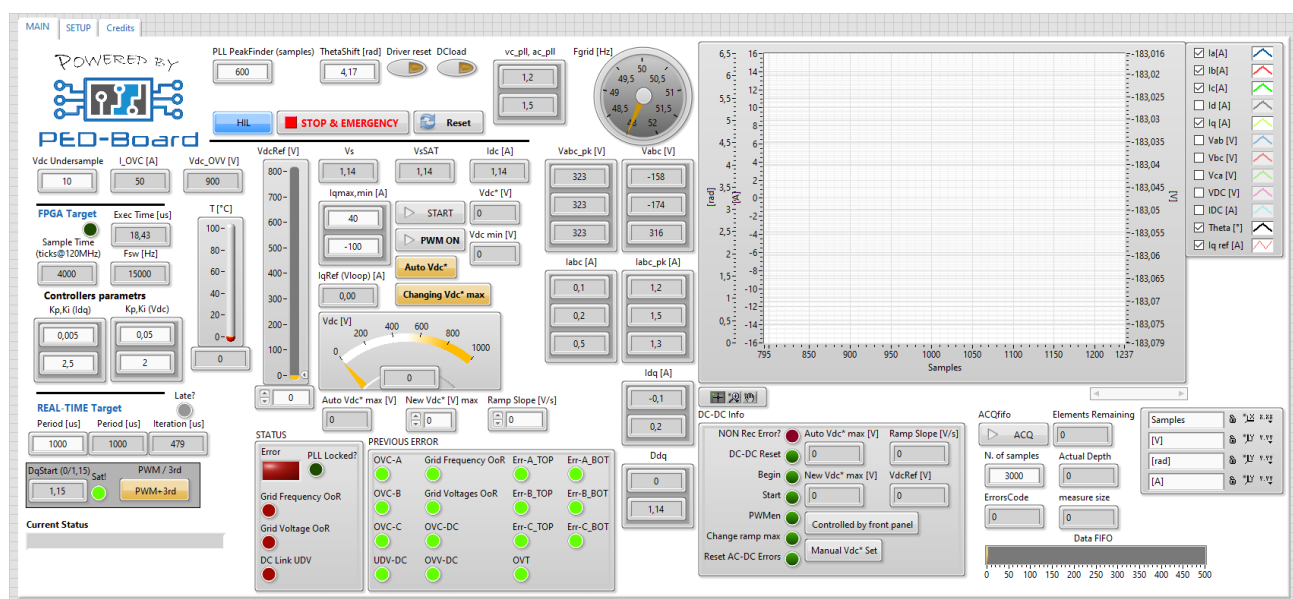


Figura 20. Front-Panel per debug/operatore relativo al convertitore AC-DC collegato alla rete elettrica.

Per quanto riguarda la parte di codice implementata per l'FPGA, tramite essa:

- 1) vengono acquisiti i valori forniti dai vari sensori/trasduttori e utilizzati sia per verificare la presenza di eventuali errori, dovuti a valori fuori range delle grandezze di interesse, sia per generare le modulanti tramite gli anelli di regolazione, i quali fanno uso anche dei valori desiderati per le varie grandezze, parametri forniti dal target Real-Time e eventualmente impostati dall'operatore;
- 2) i valori istantanei delle varie grandezze di interesse vengono inviati anche al target Real Time per poter essere visualizzati tramite l'interfaccia grafica;
- 3) viene generato un segnale portante che, tramite il confronto con i valori calcolati per le modulanti, consente di generare i segnali di accensione/spegnimento inviati agli switch del convertitore.

Osservando più nello specifico l'algoritmo di regolazione, esso è composto da due parti essenziali, un anello di tensione e un anello di corrente. Inizialmente, viene calcolato l'errore di tensione ottenuto dalla differenza tra il valore di riferimento, fornito dal target Real-Time, e il valore misurato. Tale errore di tensione viene inviato ad un regolatore PI tramite il quale viene definito il riferimento di corrente, di asse q . Quest'ultimo viene utilizzato nel secondo anello di regolazione per generare l'errore di corrente, sottraendo al riferimento il valore misurato, di asse q , che, fornito in ingresso a un secondo controllore PI, consente di ottenere il valore di duty cycle, di asse q .

Il valore di duty cycle di asse d viene ottenuto in uscita da un ulteriore regolatore PI che riceve in ingresso la differenza tra il valore di riferimento di corrente, di asse d , impostato pari a 0 A, e il valore attuale di corrente, di asse d .

I valori così ottenuti per D_q e D_d vengono sottoposti prima a una trasformata inversa di Park e poi a una trasformata inversa di Clarke così da ottenere i duty cycle per i tre rami del convertitore che consentiranno di giungere a un valore di tensione sul link DC pari al valore desiderato.

L'algoritmo di regolazione è rappresentato schematicamente nella Figura 21.

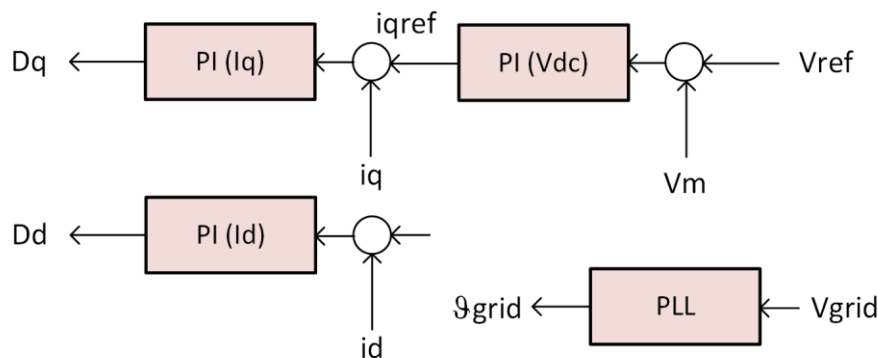


Figura 21. Algoritmo di controllo per lo stadio AC-DC connesso alla rete elettrica.

L'angolo di rete, necessario per eseguire prima la trasformata di Park e successivamente la trasformata inversa di Park, viene determinato tramite l'utilizzo di un PLL che riceve in ingresso i valori delle tensioni concatenate, avendo però eseguito prima una trasformata di Clarke per passare dal sistema di riferimento ABC al sistema di riferimento $\alpha\beta$. Per ricavare l'angolo di rete a partire dalle tensioni concatenate si deve sommare $(4/3)*\pi$ al valore fornito in uscita dal PLL. Questo perché il PLL si aggancia quando il vettore delle tensioni concatenate forma un angolo di 270° rispetto all'asse α , quindi, essendo il vettore delle tensioni di fase in ritardo di 30° rispetto al vettore delle tensioni concatenate, vuol dire che quando il PLL fornisce in uscita un valore pari a 0° in realtà il vettore delle tensioni di fase forma un angolo di 240° con l'asse α . Per tale motivo, per ricavare l'angolo di rete bisogna sommare 240° all'angolo fornito dal PLL.

2.4.3 Algoritmo di controllo della stazione di ricarica: DC-DC

Per la gestione della fase di ricarica del sistema di accumulo viene utilizzato un convertitore DC-DC la cui regolazione viene svolta tramite un programma, realizzato in LabVIEW, che in parte viene svolto da un microprocessore Real Time, in parte è stato implementato per un FPGA. Sia il microprocessore Real Time sia l'FPGA appartengono ad un sistema sbRIO-9651 prodotto dalla National Instruments e montato su una scheda di controllo PED-Board, rappresentata in Figura 17.

Il target Real Time esegue quella parte di codice tramite la quale è stata realizzata un'interfaccia grafica che consente all'operatore di poter interagire con il sistema completo. In particolare, tramite l'algoritmo svolto dal microprocessore risulta possibile:

- 1) prendere visione dei valori istantanei delle grandezze di interesse, visualizzati su degli indicatori e forniti al target Real Time dall'FPGA;
- 2) verificare la presenza di eventuali errori di corrente, tensione, temperatura o correlati al malfunzionamento degli switch del convertitore;
- 3) inviare opportuni comandi al sistema qualora quest'ultimo, in grado di evolvere autonomamente grazie alla macchina a stati realizzata, debba attendere un segnale fornito da un operatore, come nel caso in cui si verifica un errore a seguito del quale il programma realizzato per la gestione del DC-DC connesso alla batteria svolge delle operazioni per portare in sicurezza tutto il sistema per poi attendere un nuovo comando di avvio dall'operatore;
- 4) comunicare via MODBUS sia con l'AC-DC connesso alla rete sia con il DC-AC che regola il funzionamento della macchina elettrica connessa al volano. In tale comunicazione, il programma che ora si sta descrivendo e che gestisce il DC-DC connesso alla batteria svolge il ruolo di MASTER mentre gli altri due codici di controllo ricoprono il ruolo di SLAVE. Tramite il MASTER è possibile decidere se gestire l'intero impianto dal front panel dello stesso oppure se gestire il funzionamento delle parti del sistema correlate agli SLAVE dai front panel di quest'ultimi.

In Figura 22 è rappresentata l'interfaccia grafica realizzata.

Per ciò che riguarda la parte di codice implementata per l'FPGA, tramite essa:

- 1) vengono acquisite le grandezze rilevate tramite l'utilizzo dei vari sensori/trasduttori. Tali valori vengono utilizzati per determinare la presenza di eventuali errori, in particolare causati da grandezze fuori dai range operativi definiti sul target Real Time;
- 2) le grandezze di interesse acquisite vengono inoltre utilizzate per la generazione dei segnali modulanti tramite i quali viene regolata l'accensione o lo spegnimento degli switch del convertitore. In particolare, le modulanti vengono determinate tramite un algoritmo di controllo che nel seguito verrà analizzato più in dettaglio;
- 3) viene generato il segnale portante che, confrontato con le modulanti, consente di realizzare i segnali di accensione/spegnimento per gli switch del convertitore.

L'algoritmo di controllo per lo stadio DC-DC preposto alla gestione della ricarica del sistema di accumulo, coinvolge una struttura ad anelli annidati dove l'anello più interno è composto da tre regolatori che operano sulle tre correnti di uscita, misurate sugli induttori principali in maniera indipendente l'una dall'altra grazie anche alla presenza dell'interleaving. Questo consentirà di effettuare una ricarica a corrente costante qualora possibile. Successivamente, un anello esterno di tensione sarà presente per la ricarica a tensione costante.

La tensione che verrà utilizzata è la tensione del pacco batteria misurata tramite i trasduttori di uscita. Essendo l'anello di tensione la componente esterna, il passaggio da ricarica a corrente costante a ricarica a tensione costante avverrà senza interruzioni, con una perfetta soluzione di continuità.

Come mostrato nello schema elettrico semplificato di Figura 16, sono presenti due trasduttori di tensione, uno a monte ed uno a valle del circuito di precarica. Questo consentirà alla stazione di operare con maggiore

sicurezza durante lo svolgimento dell'attività di ricarica, potendo contare su una misura ridondante. Inoltre, sempre durante la fase di ricarica, le due misure di tensione serviranno ad ulteriore conferma che i teleruttori di potenza siano chiusi verso la batteria a bordo del veicolo. La presenza del veicolo alla fermata, e quindi l'inizio delle operazioni di ricarica, avverranno monitorando la tensione esterna che sarà pari a quella dell'accumulatore elettrochimico una volta che il veicolo verrà connesso alla stazione tramite il suo pantografo.

Uno schema esemplificativo dell'algoritmo di controllo è riassunto in Figura 23.

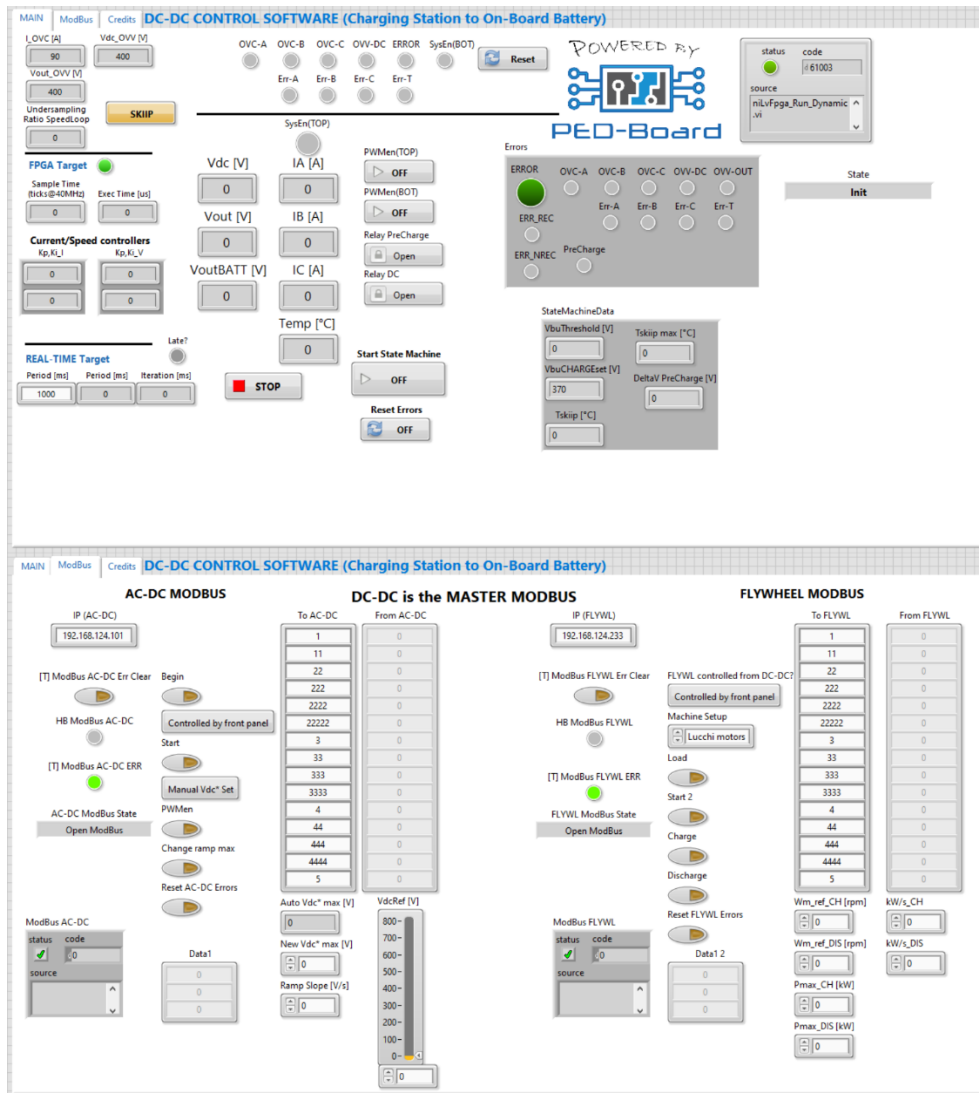


Figura 22. Front-Panel per debug/operatore relativo al convertitore DC-DC.

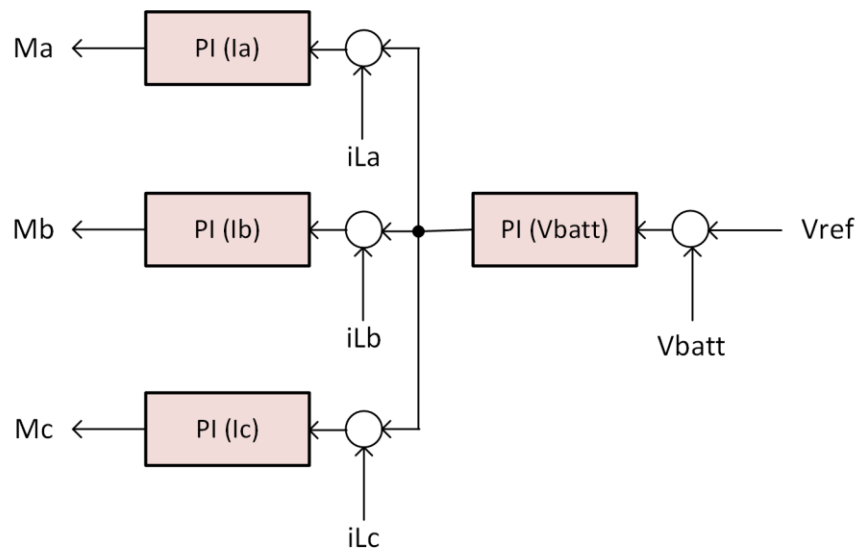


Figura 23. Algoritmo di controllo per il convertitore DC-DC.

2.5 Layout ed assemblaggio del sistema

La seconda annualità è terminata con la realizzazione dei vari sistemi componenti la stazione di ricarica. In Figura 24 è mostrata una vista frontale dell'armadio industriale che ha al suo interno tutta la componentistica elettronica, di protezione e di isolamento, necessaria alla stazione di ricarica. In basso al centro è ben visibile il trasformatore di isolamento da 20 kVA per l'interfacciamento verso la rete elettrica. Per l'allestimento finale della stazione di ricarica composta da volano e armadio di controllo e gestione della potenza elettrica, è stato utilizzato un container per uno industriale standard da 20 piedi climatizzato. Questo garantirà l'operatività in sicurezza della stazione stessa confinando il volano e gli altri elementi in una zona non accessibile durante i test e la successiva messa in servizio. Il layout della disposizione dei vari elementi è riassunto in Figura 25.

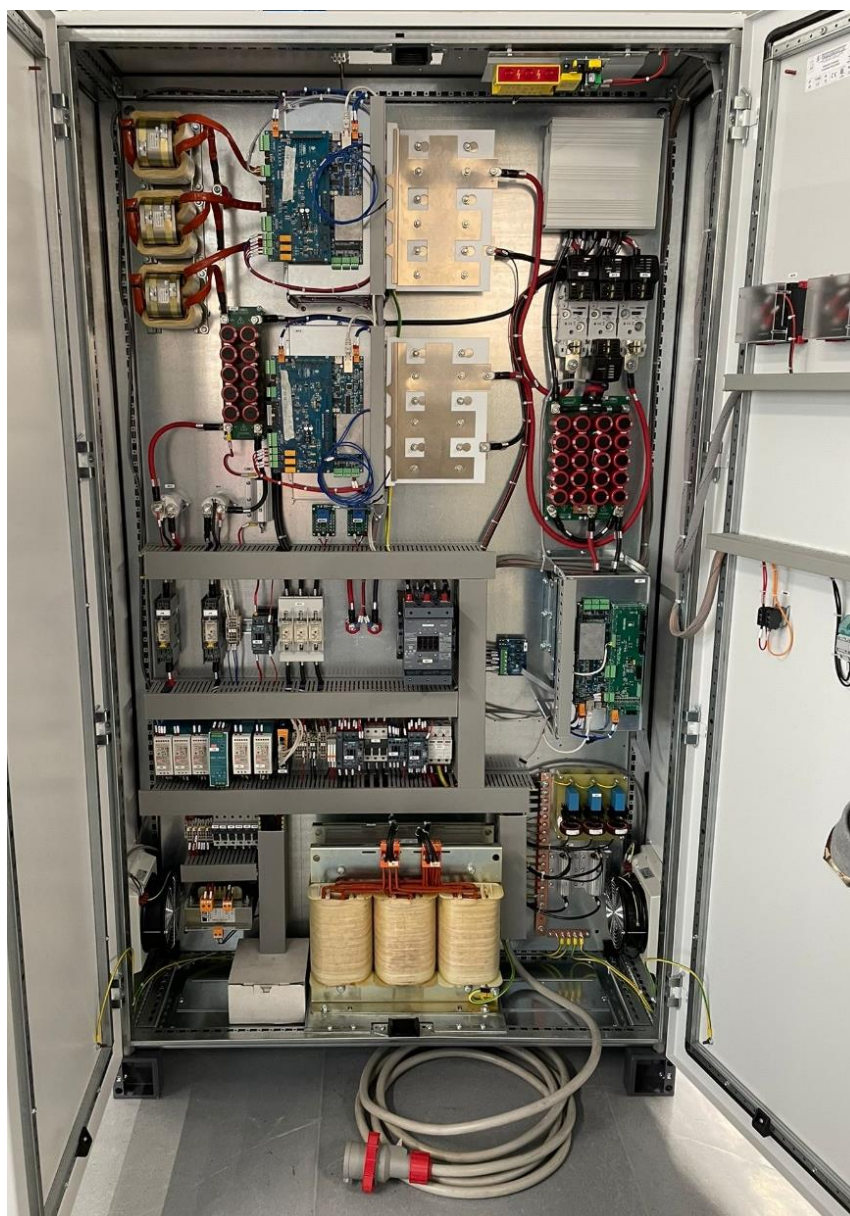


Figura 24. Vista della stazione di ricarica assemblata in armadio di tipo industriale.

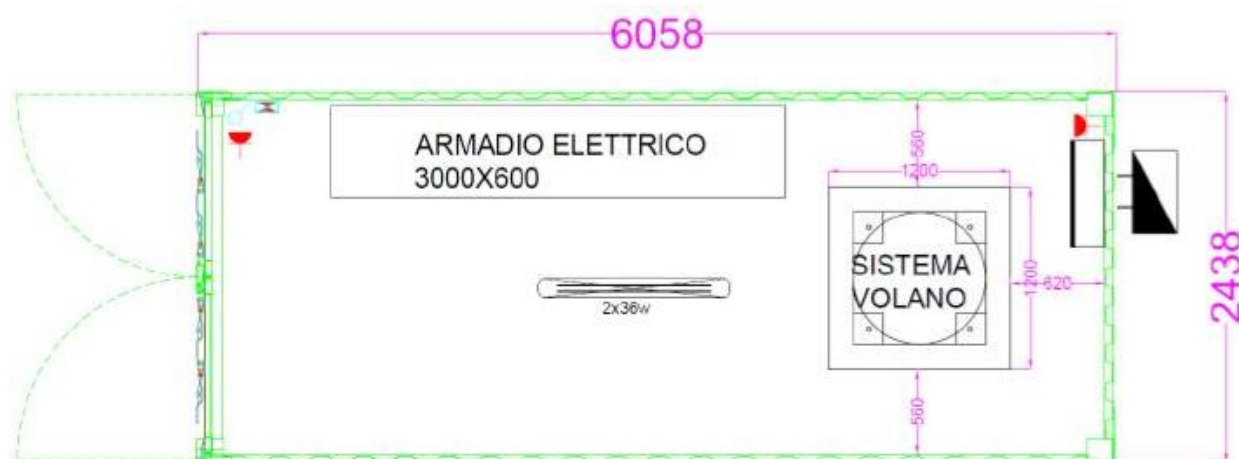


Figura 25. Pianta del container climatizzato dove verranno posizionati il volano elettromeccanico e l'elettronica di potenza della stazione di ricarica.

2.6 Verifica preliminare del funzionamento dei vari sottosistemi

Di seguito sono descritte brevemente le prove preliminari che sono state effettuate sulla stazione di ricarica ancora non completamente assemblata, quindi dove sono mancanti il volano ed il sistema di accumulo da ricaricare. Le prove complete verranno descritte nel successivo report, relativo alla terza annualità.

Tabella 3: schema delle prove preliminari

DC-DC (Batteria)	AC-DC (Rete)	DC-AC (Volano)
Verifica teleruttori	Verifica teleruttori	Verifica teleruttori
Verifica misure e pilotaggio dispositivi di potenza	Verifica misure e pilotaggio dispositivi di potenza	Verifica misure e pilotaggio dispositivi di potenza

Per la verifica dei teleruttori, un software con funzionalità dedicate è stato realizzato e fatto eseguire dalle varie piattaforme di controllo. Manualmente sono stati azionati i teleruttori e ne è stato verificato il corretto funzionamento.

La verifica della misura di temperatura interna ai vari convertitori è stata eseguita leggendo il relativo valore tramite i software di controllo e confrontandolo poi con un valore di riferimento acquisito tramite una termocoppia installata nelle immediate vicinanze del modulo di potenza.

DC-DC (Batteria)

Verifica misura tensione DC-bus e correnti di uscita. Una tensione è stata applicata al link DC tramite un alimentatore esterno e chiudendo opportunamente gli switch si è potuto verificare che le misure fossero acquisite in modo corretto.

Verifica delle due misure di tensione lato batteria. Una tensione è stata applicata all'uscita del convertitore, sul collegamento che poi sarebbe andato verso il pantografo di ricarica, sono state lette le due misure di tensione, la seconda delle quali disponibile solamente dopo l'azionamento dei teleruttori.

DC-AC (Volano)

Verifica misura tensione DC-bus e correnti di uscita. Una tensione è stata applicata al link DC tramite un alimentatore esterno e chiudendo opportunamente gli switch si è potuto verificare che le misure fossero acquisite in modo corretto.

Per la verifica dell'interfaccia di acquisizione della posizione e velocità rotorica, un resolver è stato collegato esternamente alla scheda di controllo ed i relativi segnali sono stati acquisiti e controllati.

AC-DC (Rete)

Verifica misura tensione DC-bus e correnti di uscita. Una tensione è stata applicata al link DC tramite un alimentatore esterno e chiudendo opportunamente gli switch si è potuto verificare che le misure fossero acquisite in modo corretto. Per la verifica delle misure di corrente è stato necessario chiudere in cortocircuito le tre fasi di uscita, prima del trasformatore di isolamento, in modo da fornire un percorso chiuso.

Lo stadio di conversione DC-AC collegato alla rete elettrica ha richiesto una ulteriore prova, che è stata effettuata collegando il lato AC alla rete elettrica. Questa ha consentito di verificare le misure in AC lato rete necessarie per la sincronizzazione tramite PLL. Successivamente è stata effettuata la manovra di avviamento eseguita automaticamente dall'AC-DC, quindi chiusura dei contattori di precarica e del contattore principale. Infine, partita la modulazione PWM ed abilitato l'algoritmo di controllo, la tensione del DC-bus è stata portata al suo valore nominale pari a 750 V. La Figura 26 mostra, dall'alto verso il basso, la tensione del link DC, la tensione concatenata V_{ab} in uscita dall'inverter e prima del filtro LCL, e la corrente della fase A.

La verifica preliminare ha consentito di provare ulteriormente il sistema di conversione AC-DC, disponendo della rete elettrica lato AC e di un carico di circa $150\ \Omega$ lato DC. È stata verificata la configurazione hardware ed il software di controllo con la relativa macchina a stati. I risultati delle grandezze DC acquisite tramite la scheda di controllo sono mostrati in Figura 27.

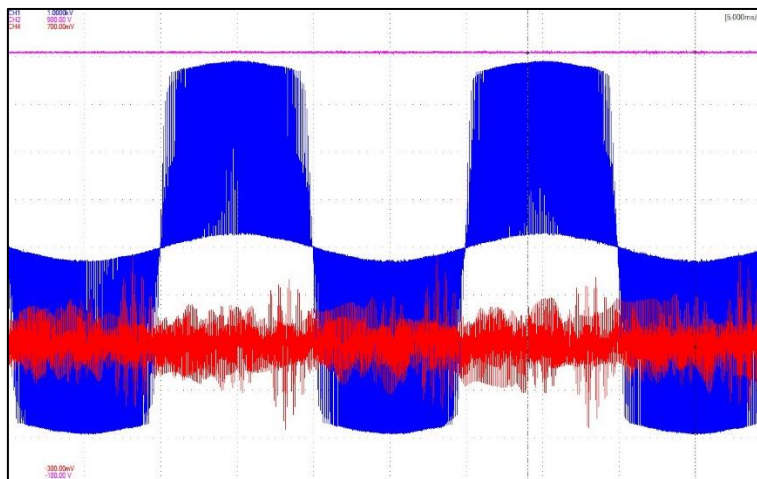


Figura 26. Verifica sperimentale del convertitore AC-DC nel funzionamento senza carico lato DC.

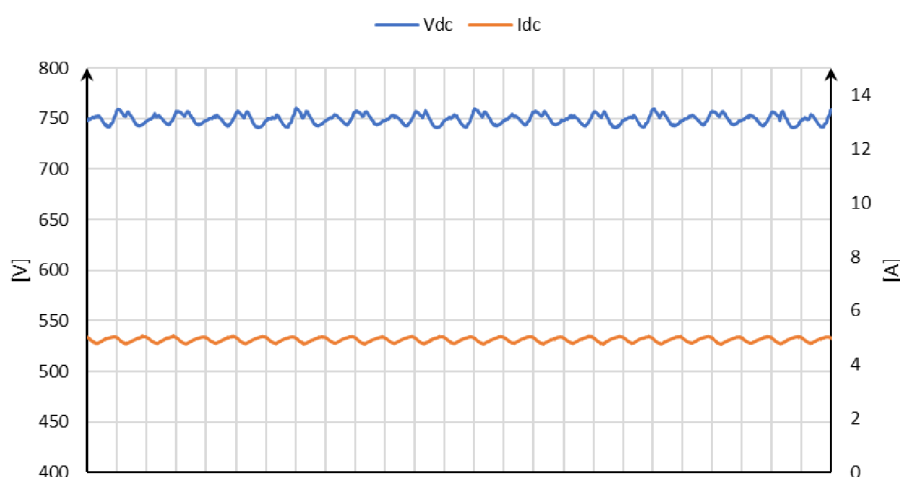


Figura 27. Verifica sperimentale del convertitore AC-DC con carico resistivo.

3 Conclusioni

La seconda annualità dell'attività di ricerca di sistema elettrico relativa allo sviluppo di sistemi di accumulo innovativi per la ricarica rapida a terra e a bordo dei sistemi di trasporto pubblico ha come obiettivo la realizzazione del progetto esecutivo della stazione di ricarica rapida con ridotto impatto sulla rete elettrica grazie all'accumulo di energia fornita da volani elettromeccanici. Nei paragrafi riportati nel presente report è stato descritto l'iter che ha portato alla realizzazione finale del volano, dell'interfaccia elettronica di potenza, dell'algoritmo di controllo e dei sistemi ausiliari. Le verifiche preliminari effettuate consentiranno durante la terza annualità di procedere con i test sul campo.

4 Riferimenti bibliografici

- [1] Fernando Ortenzi, Silvia Orchi, Maria Pia Valentini, Natascia Andrenacci and Alessandro Lidozzi, Technical and economical evaluation of fast charging infrastructures for electric buses, AIP Conference Proceedings 2191, 020123 (2019); <https://doi.org/10.1063/1.5138856>
- [2] <https://www.tecnobus.it/>
- [3] <https://www.autobusweb.com/minibus-elettrici-atac-post-revamping-presentato-il-primo-prototipo/>
- [4] Ortenzi, F., Genovese, A., Carrazza, M., Rispoli, F. et al., "Exhaust Energy Recovery with Variable Geometry Turbine to Reduce Fuel Consumption for Microcars," SAE Technical Paper 2018-01-1825, 2018, <https://doi.org/10.4271/2018-01-1825>
- [5] A. Lidozzi, L. Solero and F. Crescimbinì, "Adaptive Direct-Tuning Control for Variable-Speed Diesel-Electric Generating Units," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 59, no. 5, pp. 2126-2134, May 2012
- [6] A. Alessandrini et al., "A Flash Charge System for Urban Transport," 2019 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2019 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe), Genova, Italy, 2019, pp. 1-6.doi: 10.1109/EEEIC.2019.8783867
- [7] Alessandrini A. et al. (2019) Design of a Hybrid Storage for Road Public Transportation Systems. In: Carbone G., Gasparetto A. (eds) Advances in Italian Mechanism Science. IFToMM ITALY 2018. Mechanisms and Machine Science, vol 68. Springer, Cham
- [8] Ortenzi, F.; Pasquali, M.; Prosini, P.P.; Lidozzi, A.; Di Benedetto, M. Design and Validation of Ultra-Fast Charging Infrastructures Based on Supercapacitors for Urban Public Transportation Applications. Energies 2019, 12, 2348.