

ENEA

Agenzia nazionale per le nuove tecnologie,
l'energia e lo sviluppo economico sostenibile



MINISTERO DELLA
TRANSIZIONE ECOLOGICA



Prove di funzionamento e di prestazione dell'accumulo di terra a volani della stazione di ricarica rapida al capolinea

A. Lidozzi, L. Solero, M. di Benedetto, A. Faro

PROVA DI FUNZIONAMENTO E DI PRESTAZIONE DELL'ACCUMULO DI TERRA A VOLANI DELLA STAZIONE DI RICARICA RAPIDA AL CAPOLINEA

Alessandro Lidozzi, Luca Solero, Marco di Benedetto, Alessandro Faro (Università degli Studi ROMA TRE)

Dicembre 2021

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero della Transizione Ecologica - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - III annualità

Obiettivo: Tecnologie

Progetto: Tecnologie per la penetrazione efficiente del vettore elettrico negli usi finali

Work package: Mobilità

Linea di attività: LA 2.33 Prove di funzionamento e di prestazione dell'accumulo di terra a volani della stazione di ricarica rapida al capolinea

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 "Innovazioni tecnologiche e modellistiche per la mobilità elettrica urbana" (LA2.32 e LA2.33)

Responsabile scientifico ENEA: Fernando Ortenzi

Responsabile scientifico Università degli Studi ROMA TRE: Alessandro Lidozzi

Indice

SOMMARIO.....	3
1 INTRODUZIONE.....	4
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	5
2.1 SOFTWARE DI CONTROLLO E GESTIONE DELLA STAZIONE DI RICARICA.....	5
2.1.1 <i>Architettura di gestione dei sottosistemi</i>	5
2.1.2 <i>Architettura di comunicazione ModBus su TCP/IP</i>	9
2.1.3 <i>Architettura di comunicazione CAN bus tra stazione di ricarica e veicolo</i>	14
2.2 VERIFICA DEL SISTEMA AC-DC VERSO LA RETE ELETTRICA.....	15
2.3 VERIFICA DELL’AZIONAMENTO ELETTRICO RELATIVO AL VOLANO ELETTROMECCANICO.....	17
2.4 VERIFICA DEL DC-DC PER LA GESTIONE DELLA FASE DI RICARICA.....	19
3 CONCLUSIONI.....	21
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	21
5 CURRICULA SCIENTIFICI DELL’UNITÀ DI RICERCA.....	21
5.1 ALESSANDRO LIDOZZI.....	21
5.2 LUCA SOLERO.....	22
5.3 MARCO DI BENEDETTO.....	23
5.4 ALESSANDRO FARO.....	24

Sommario

La terza annualità ha visto il gruppo di ricerca coinvolto nelle attività di verifica sperimentale e collaudo sul campo della stazione di ricarica con accumulo a volano elettromeccanico. Si è provveduto alla verifica dei vari sottosistemi componenti la stazione di ricarica, quali lo stadio AC-DC verso la rete elettrica, il DC-DC per la gestione della ricarica della batteria a bordo veicolo, ed infine, l'inverter per la regolazione dell'azionamento elettrico installato sul volano.

Sono state effettuate delle prove di ricarica del volano prelevando l'energia necessaria dalla rete elettrica nazionale con potenza di picco ridotta. Le prime scariche del volano sono state sempre effettuate verso la rete elettrica per verificare che i due sistemi operassero correttamente. Successivamente, è stato attivato il DC-DC verso la batteria con un primo flusso di energia dalla rete elettrica all'accumulatore elettrochimico, non coinvolgendo il volano. Infine, sono state effettuate delle ricariche prelevando l'energia necessaria sia dal volano che dalla rete elettrica, quindi con tutti i sottosistemi attivi.

La complessità dell'architettura di conversione installata all'interno della stazione di ricarica ha richiesto lo sviluppo ad hoc oltre che dei singoli software di controllo, anche di un layer di comunicazione tra i vari sottosistemi, implementato tramite ModBus su TCP/IP. Pertanto, si è proceduto ad una successiva verifica dell'impianto software che consentirà alla stazione di poter essere gestita in maniera totalmente autonoma, senza quindi la richiesta di un operatore. Nel presente report verrà descritta in dettaglio l'architettura di controllo e gestione che è stata realizzata.

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, realizzata nella precedente annualità del Piano Triennale della Ricerca, ha i seguenti requisiti, ottenuti dalle analisi svolte durante la 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 e tensione minima maggiore di 200 V
- Energia da ricaricare 4.5÷5 kWh
- 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.

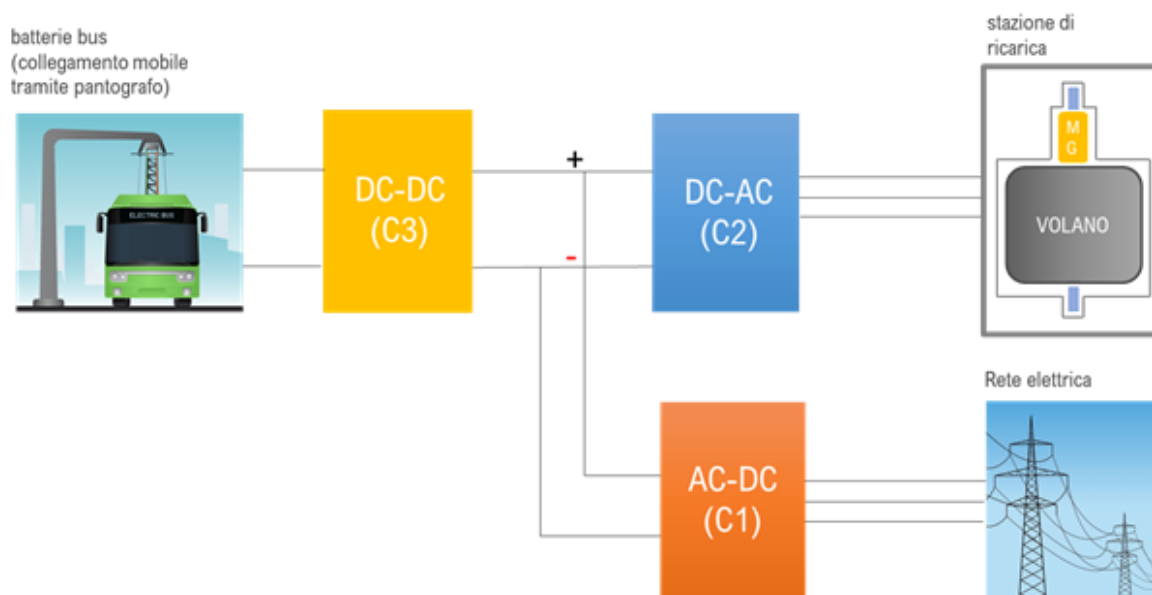


Figura 1. Schema illustrativo della stazione di ricarica.

La Figura 2 mostra la vista frontale dell'assemblaggio relativo alla stazione di ricarica. All'interno di un armadio industriale sono stati alloggiati i vari sistemi di conversione statica, le relative schede di controllo, il filtro ed il trasformatore per l'allaccio alla rete elettrica, i vari sistemi per l'alimentazione ausiliaria ed i dispositivi di protezione come interruttori e fusibili.

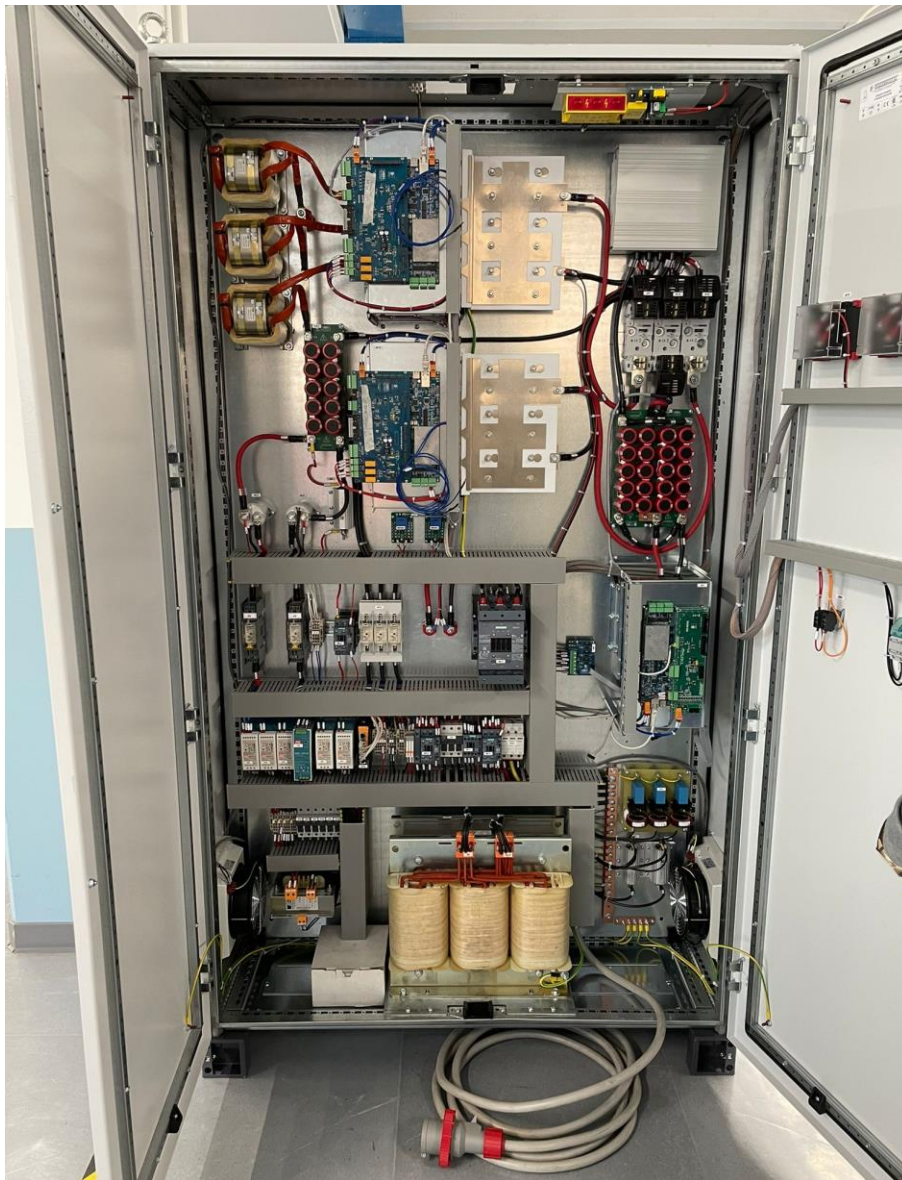


Figura 2. Vista della stazione di ricarica completa.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

2.1 Software di controllo e gestione della stazione di ricarica

Il software di controllo è stato precedentemente descritto nella sua prima realizzazione, durante la precedente annualità. La terza annualità ha richiesto un ulteriore sviluppo ed affinamento delle varie strutture di regolazione, così come delle relative macchine a stati per la gestione del sottosistema, ed infine lo sviluppo dell'infrastruttura di comunicazione tra le varie schede di controllo.

2.1.1 Architettura di gestione dei sottosistemi

La struttura del software di gestione e controllo, messa a punto a seguito di varie verifiche e collaudi, non è stata modificata in maniera tale da doverne dare una nuova descrizione rispetto a quanto fatto nella precedente annualità. Tuttavia, alcuni cambiamenti riguardanti in particolar modo il software di controllo del convertitore connesso alla macchina elettrica collegata al volano verranno di seguito illustrati.

Il primo importante miglioramento apportato è relativo all'implementazione della funzionalità riguardante il poter, dopo un evento di errore, riportare il sistema in funzione senza dover attendere che il volano raggiunga una velocità trascurabile, quindi utilizzando la cosiddetta 'ripresa in corsa'. In tal modo, anche se il volano

possiede una velocità non nulla, il sistema può adattare il valore iniziale delle modulanti in modo tale da non avere valori sovracorrenti all'avvio della modulazione. Il codice LabVIEW è mostrato in Figura 3 e Figura 4.

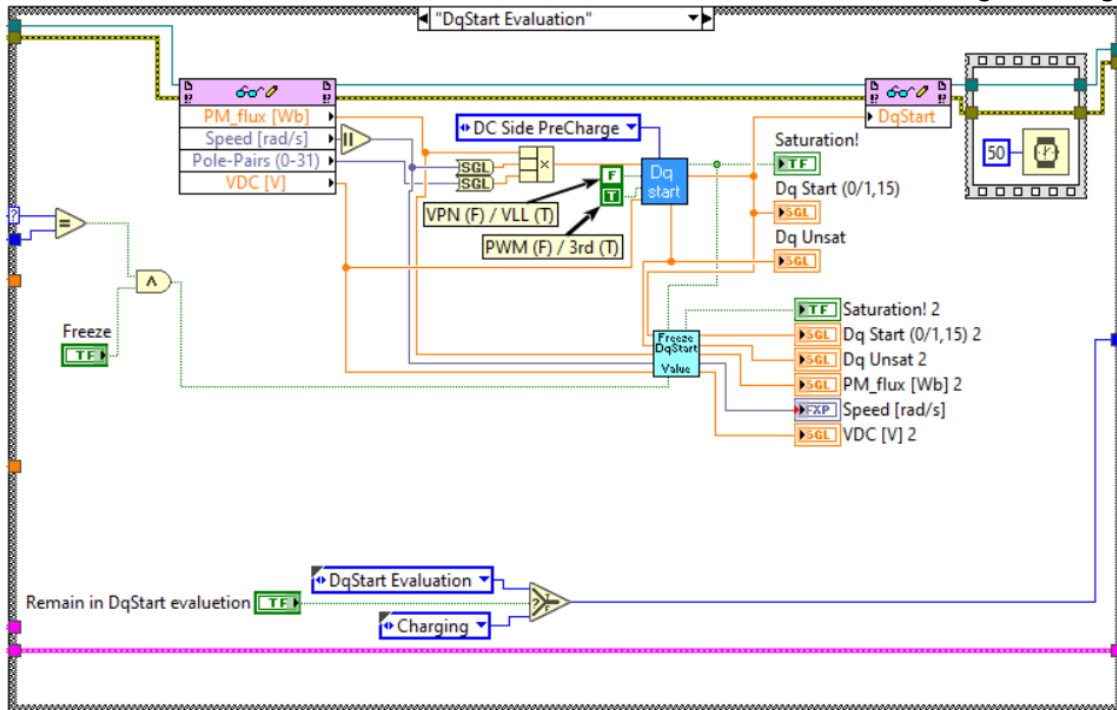


Figura 3. Determinazione del valore iniziale per Dq.

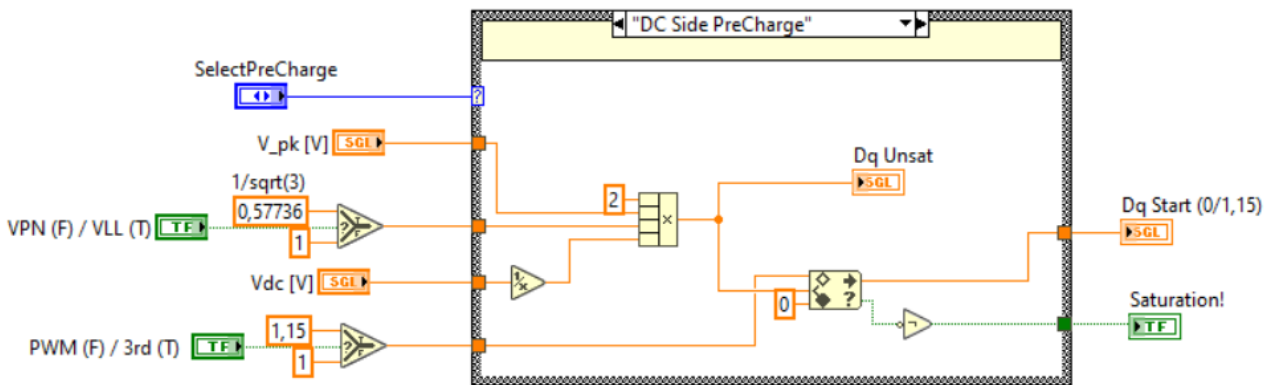


Figura 4. SubVI "Dq Start".

La seconda funzionalità aggiunta riguarda la possibilità, sempre per il software di controllo per il convertitore tramite il quale viene determinata la carica/scarica del volano, di impostare differenti soglie per quanto riguarda la frequenza di switching in funzione della velocità dello stesso volano. È stato previsto un aggiornamento con isteresi per poter gestire la variazione della frequenza di switching di modo tale che se essa viene variata a causa della modifica della velocità del volano non si rischi di assistere a una immediata variazione in senso opposto a seguito di una modifica inversa della stessa velocità. Il numero di intervalli di variabilità di quest'ultima entro i quali la frequenza di switching viene mantenuta costante può essere selezionato secondo necessità, così come possono essere variati i valori che la frequenza di switching dovrà assumere, nonché le soglie di velocità. Ciò consente di operare con valori di duty-cycle opportuni anche negli istanti in cui la velocità del volano risulta ridotta.

Quindi, si può scegliere tra due diverse modalità di funzionamento. Nella prima modalità operativa la frequenza di switching verrà mantenuta costante, indipendentemente dalla velocità del volano, come si può osservare dalla Figura 5:

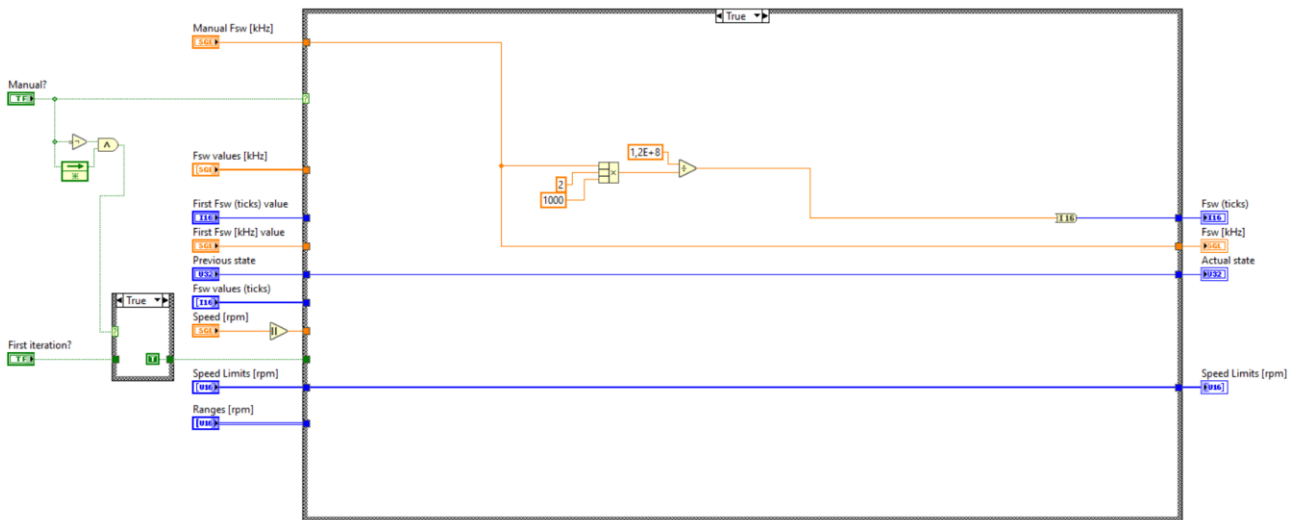


Figura 5. Modalità operativa a frequenza di switching costante.

Se però si decidesse di iniziare a far variare la frequenza di switching in funzione della velocità del volano, la prima operazione che verrebbe compiuta riguarda l'individuare il valore attuale della frequenza per impostare di conseguenza i valori di velocità adeguati ad attuare un funzionamento con isteresi. La Figura 6 mostra il codice LabVIEW realizzato.

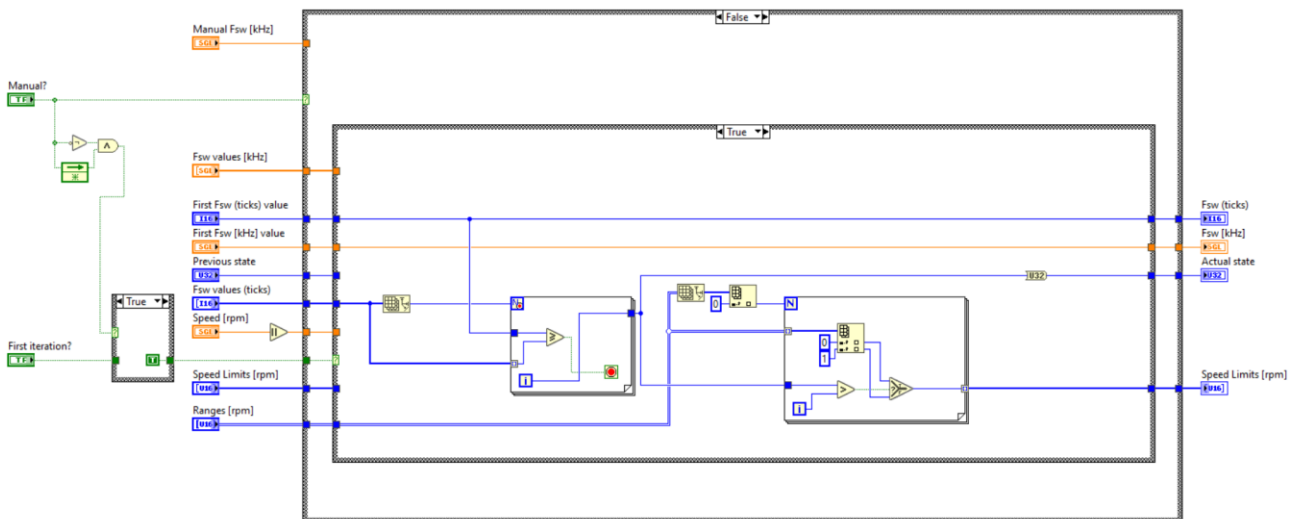


Figura 6. Individuazione delle soglie di velocità in funzione del valore attuale della frequenza di switching.

Quindi, si procede confrontando il valore attuale della velocità con i valori di velocità impostati per avere una variazione a gradino della frequenza di switching. Se da tale confronto emerge che la velocità attuale rispetto al valore precedente non è variata in maniera tale da dover avere una modifica della frequenza di switching allora quest'ultima non verrà modificata e verranno mantenuti tutti i valori di velocità che definiscono gli intervalli utilizzati per il confronto, Figura 7. Se il valore attuale di velocità risulta maggiore rispetto al valore precedente e tale incremento lo ha portato a superare una delle soglie di velocità, allora il limite appena superato viene decrementato e il valore della frequenza di switching coerentemente adeguato, Figura 8.

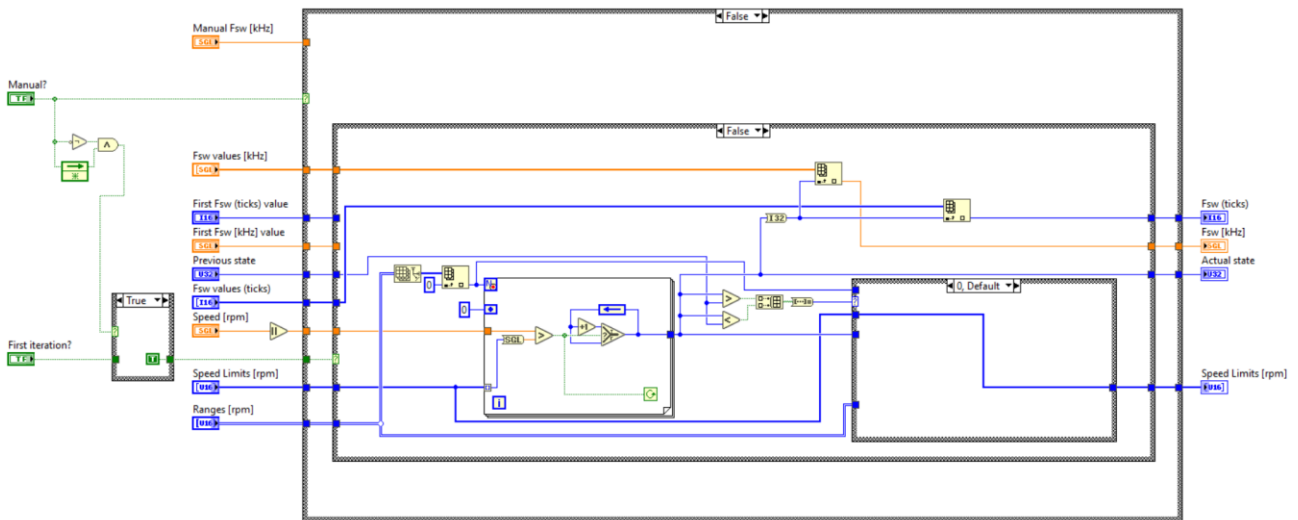


Figura 7. Valore attuale di velocità non genera variazione della frequenza di switching.

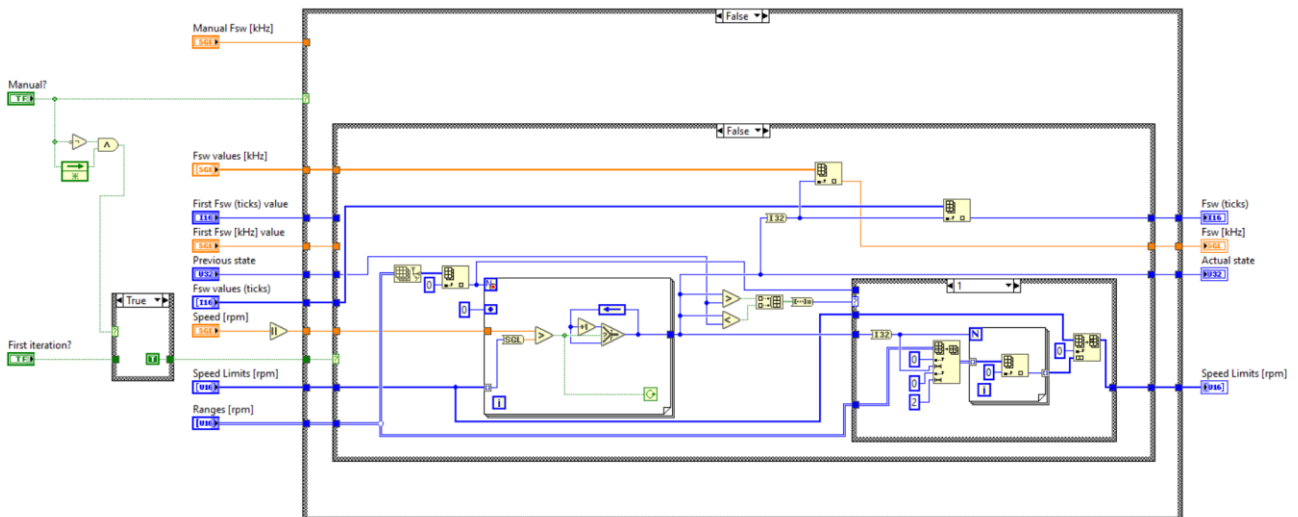


Figura 8. Modifica della frequenza di switching a seguito di un incremento della velocità del volano oltre un certo limite.

Se invece la velocità attuale del volano risulta diminuita rispetto al valore precedente andando a oltrepassare il valore di soglia immediatamente inferiore, allora tale limite viene opportunamente incrementato e il valore della frequenza di switching coerentemente adeguato. Così facendo, se successivamente la velocità dovesse aumentare, tale aumento dovrà essere di una certa entità per generare una nuova modifica della frequenza di switching, Figura 9. Si noti che, anche se nella pratica la seguente situazione non si verrà mai a verificare, se la velocità del volano tra due successive iterazioni si viene a modificare di un valore talmente elevato da oltrepassare più soglie, ciò non genera un problema in quanto l’algoritmo è in grado di adattare coerentemente tutti i range oltrepassati e individuare il valore più idoneo per la frequenza di switching.

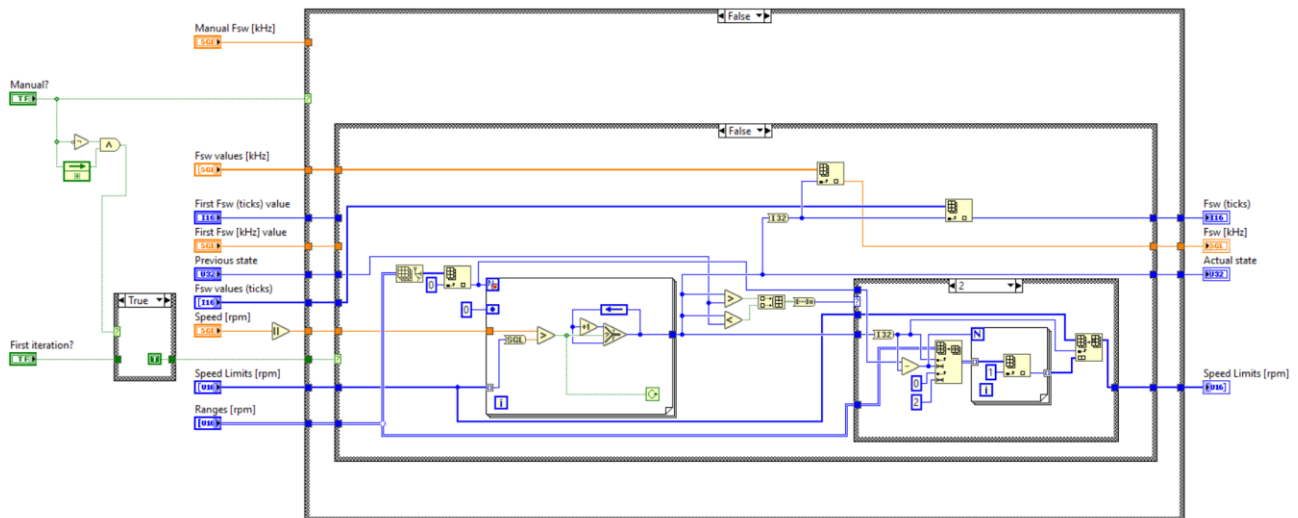


Figura 9. Modifica della frequenza di switching a seguito di una diminuzione della velocità del volano oltre un certo limite.

2.1.2 Architettura di comunicazione ModBus su TCP/IP

Per quanto riguarda lo sviluppo dell'infrastruttura di comunicazione ModBus tra le tre schede di controllo e quindi tra i tre sistemi di conversione (AC-DC, DC-DC e DC-AC), durante il terzo anno tale aspetto è stato sviluppato nella sua totalità e approfonditamente testato. L'architettura sviluppata ha visto il sistema DC-DC operare da MASTER rispetto agli altri convertitori che vedranno la loro funzionalità definita come SLAVE. Tramite tale struttura si è verificata la possibilità di comandare in maniera del tutto indipendente i tre differenti sistemi. Nel momento in cui si sceglie tale opzione, il convertitore AC-DC connesso in rete e il convertitore collegato alla macchina elettrica connessa al volano (DC-AC) verranno gestiti in maniera autonoma, impostando ogni valore di interesse (es. tensione alla quale deve essere mantenuto il link DC, potenze di carica e di scarica del volano, ecc.) direttamente dalle interfacce dei relativi software di controllo. Inoltre, in tale modalità, tutti questi parametri di controllo verranno costantemente inviati al programma che gestisce il convertitore DC-DC in maniera tale che esso rimanga aggiornato e posseda le informazioni necessarie dalle quali partire nel caso in cui si decida di passare a una modalità di funzionamento in cui gli SLAVE vengono direttamente gestiti dal MASTER. La Figura 10 mostra il Front Panel per la gestione e la diagnostica del convertitore AC-DC collegato alla rete elettrica. Il pannello fornisce un quadro completo sullo stato di funzionamento evidenziando inoltre ogni anomalia dovesse verificarsi. Analogamente, la Figura 11 mostra una vista di quella che è l'interfaccia di servizio per il sistema di gestione del volano elettromeccanico.

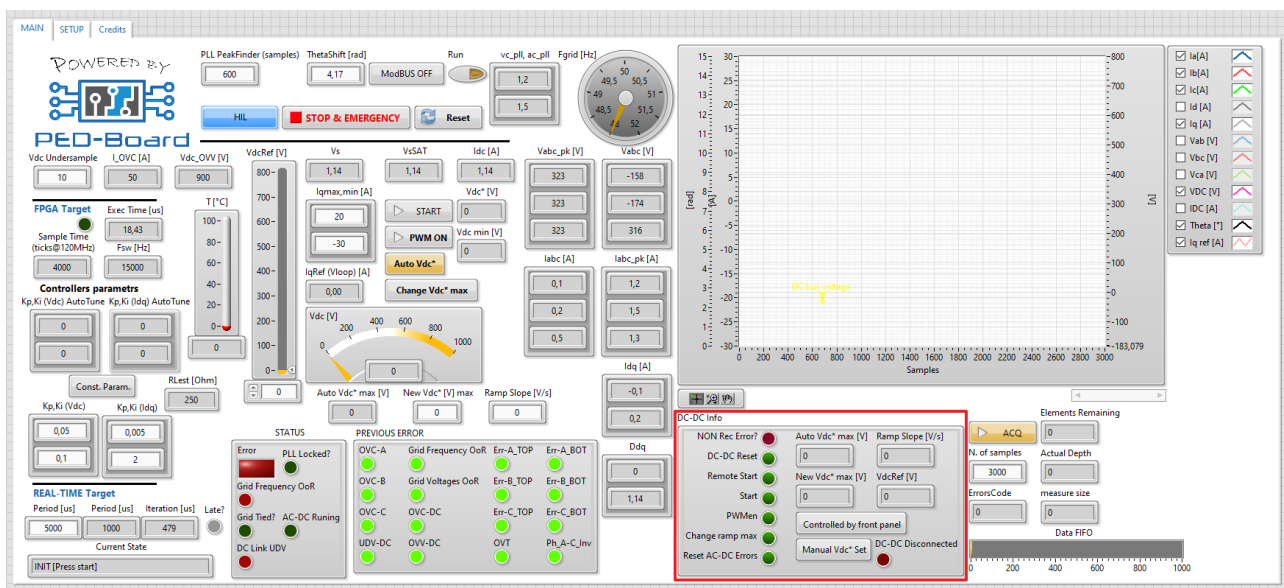


Figura 10. Interfaccia software di controllo del convertitore AC-DC verso la rete elettrica.

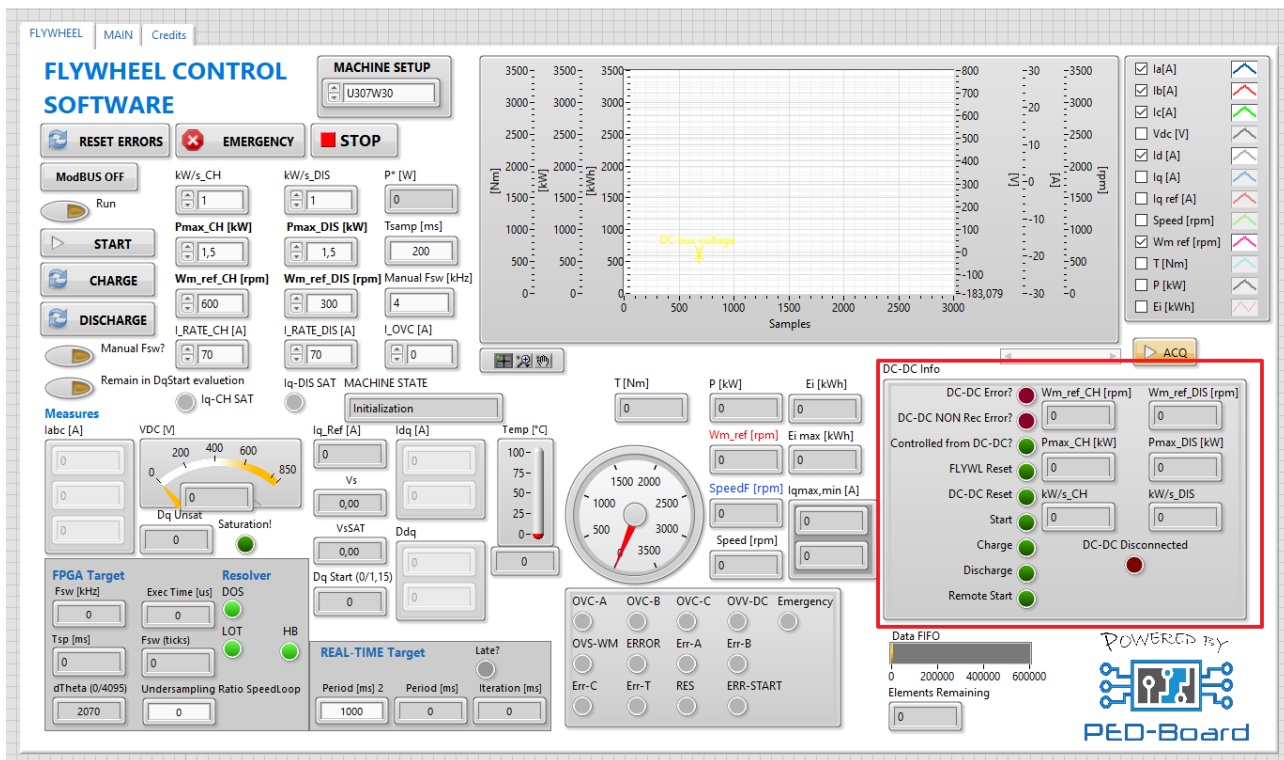


Figura 11. Interfaccia software di controllo per l'azionamento elettrico di gestione del volano elettromeccanico.

Poter operare direttamente dalla sola interfaccia del progetto relativo al convertitore DC-DC, che nella comunicazione svolge il ruolo di MASTER. In tal caso, rispetto a quanto accade nella modalità precedentemente descritta, i vari parametri di controllo necessari al funzionamento degli SLAVE vengono direttamente impostati tramite il software che gestisce il funzionamento del DC-DC, Figura 12.

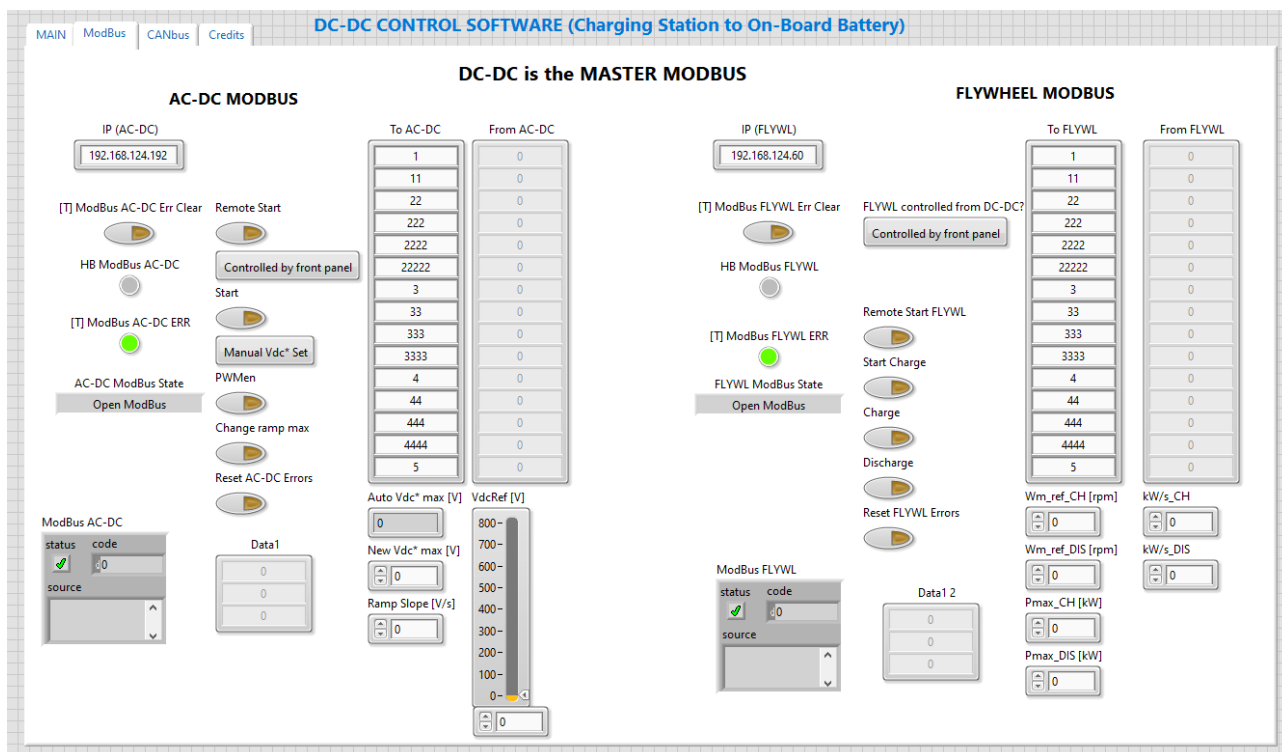


Figura 12. Gestione degli SLAVE tramite l'interfaccia del software di controllo del convertitore DC-DC.

Il software sviluppato consente inoltre di poter passare da una modalità di gestione all'altra in maniera del tutto fluida e senza che si verifichino malfunzionamenti o discontinuità di servizio durante le differenti operazioni.

Inoltre, durante questo terzo anno, è stata aggiunta la possibilità di rilevare e gestire la perdita di comunicazione tra il MASTER e uno o entrambi gli SLAVE in modo tale che se tale eventualità si dovesse verificare i tre convertitori risulterebbero in grado di svolgere determinate operazioni per portare l'intero impianto in una condizione di sicurezza nella quale attenderanno finché la comunicazione tra di essi non verrà nuovamente ristabilita.

In particolare, all'avvio del programma del DC-DC, viene aperta la comunicazione MODBUS sia con il DC-AC del volano sia con l'AC-DC verso rete, come mostrato in Figura 13.

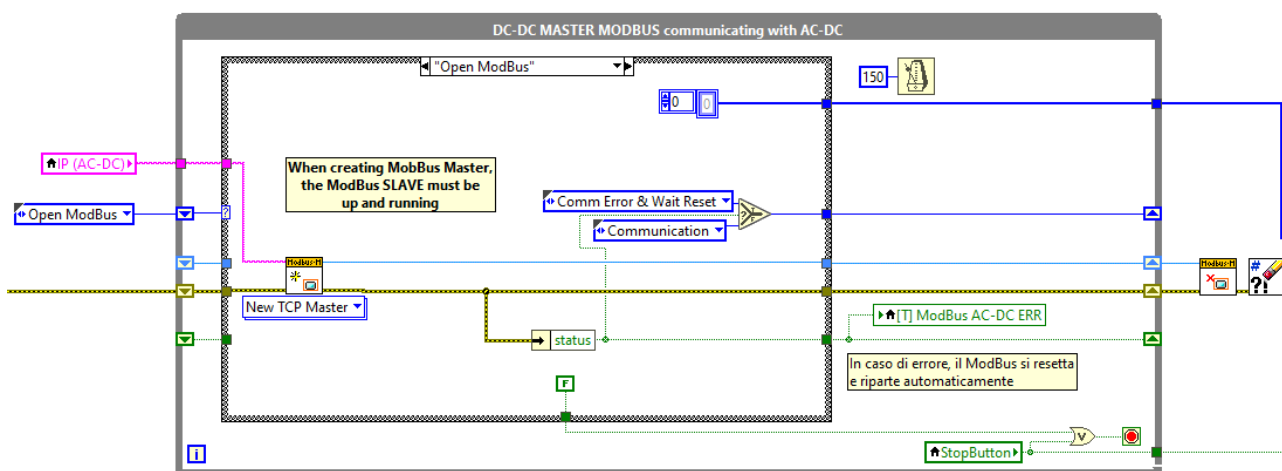


Figura 13. Apertura comunicazione MODBUS all'avvio del programma del DC-DC.

Non appena tale comunicazione viene stabilita, il DC-DC verifica se i due SLAVE sono stati precedentemente avviati: questa condizione si potrebbe verificare nel caso in cui il sistema era già stato avviato in precedenza ma per qualche motivo la comunicazione con l'HOST era caduta.

Se all'avvio del software di controllo del DC-DC gli altri due sistemi sono operativi, allora il MASTER aggiorna i valori provenienti dagli SLAVE e viene forzata la modalità in cui sia il DC-AC e l'AC-DC vengono regolati autonomamente dai rispettivi software di controllo. Il codice LabVIEW che realizza questa funzione è mostrato in Figura 14. Se invece anche gli SLAVE si trovano nella condizione di primo avvio, allora la comunicazione verrà impostata secondo la modalità scelta dall'operatore, Figura 15.

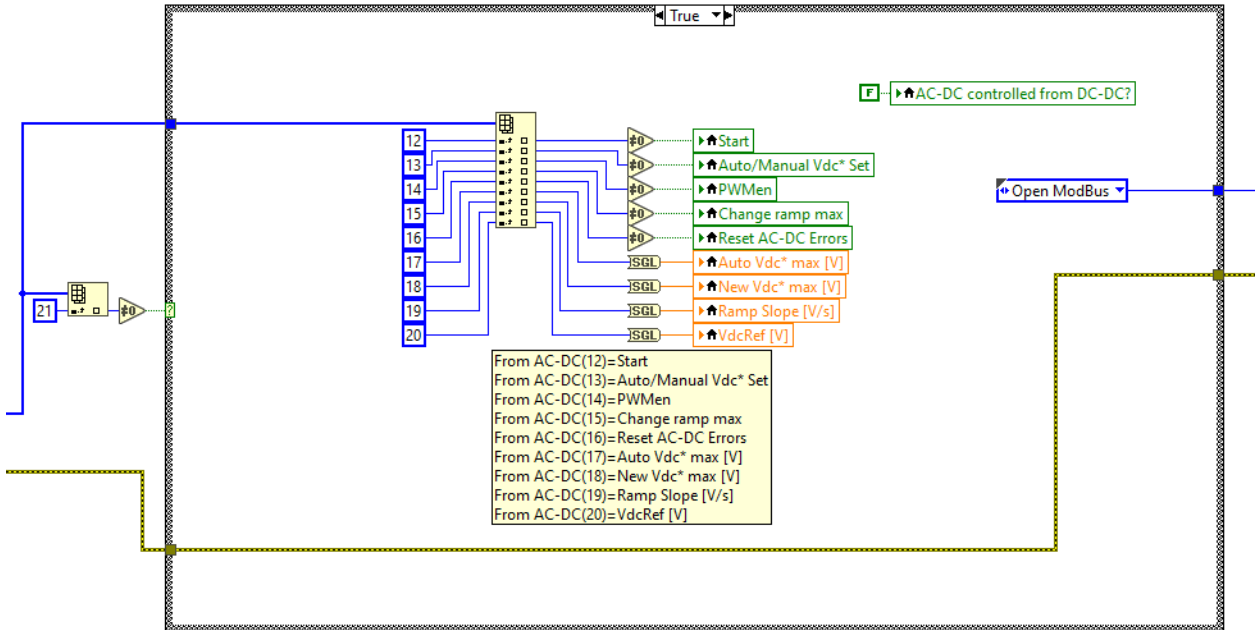


Figura 14. Caso in cui all'avvio del DC-DC gli SLAVEs già erano in funzione.

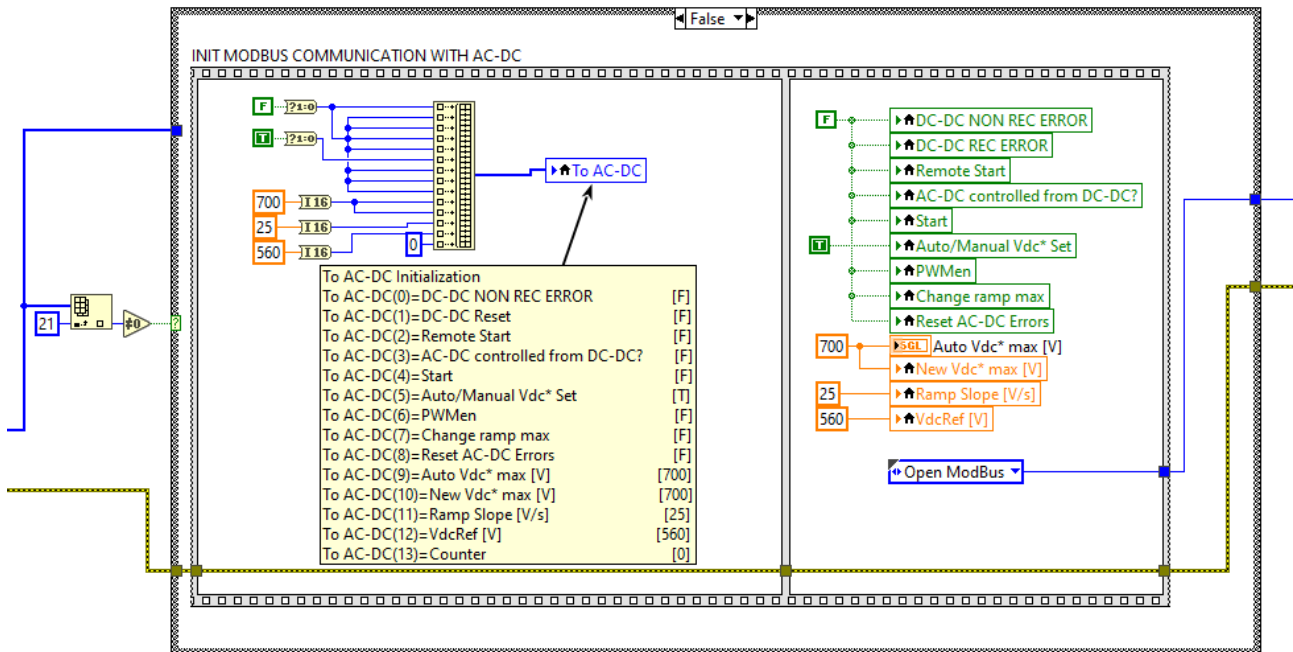


Figura 15. Caso in cui all'avvio del DC-DC anche gli SLAVE vengono avviati per la prima volta.

Terminata questa procedura iniziale, eseguita solo all'avvio del software di controllo per il convertitore DC-DC, ogni perdita di comunicazione non dovuta all'arresto del programma del MASTER verrà gestita direttamente nel ciclo mostrato in Figura 16. Anche nel caso in cui si dovesse perdere la comunicazione senza che il MASTER si sia arrestato, comunque si forza come modalità quella per la quale i due SLAVE vengono autonomamente governati. In tal modo, quando la comunicazione viene ristabilita il DC-DC aggiornerà di conseguenza i valori secondo le informazioni provenienti dagli SLAVE per non avere problemi di

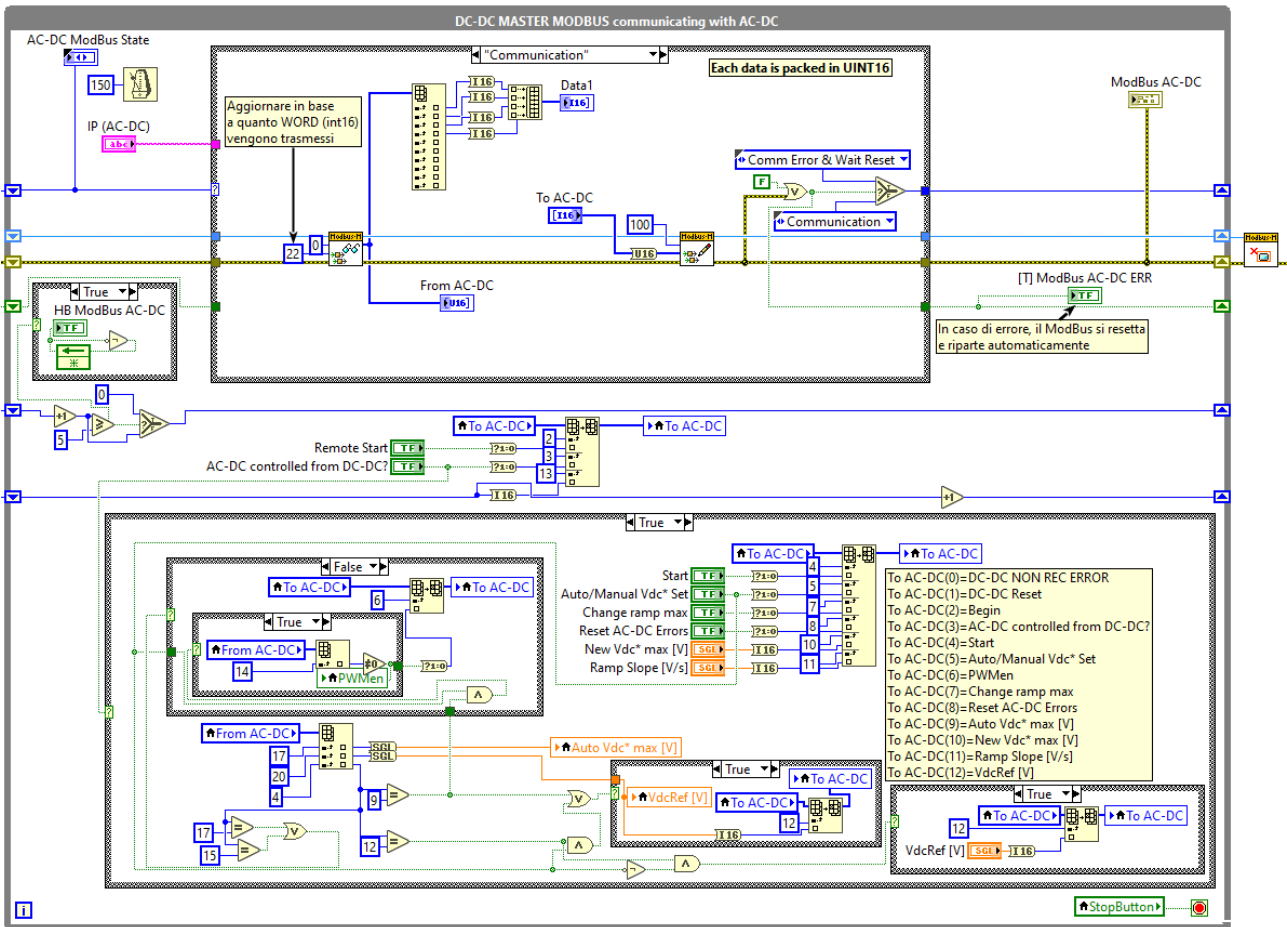


Figura 17. Block Diagram della struttura ModBus per il DC-DC in comunicazione con l'AC-DC verso la rete elettrica.

All'interno dei cicli *while* mostrati in Figura 16 e Figura 17, è stato realizzato un contatore il cui valore attuale viene continuamente aggiornato e inviato ai due SLAVE. Questo consente al DC-AC e al AC-DC di individuare la perdita di comunicazione con il MASTER nel momento in cui il valore del conteggio che essi ricevono non venisse più aggiornato. Questa funzionalità spesso prende il nome di *heart-beat*, appunto ad indicare la presenza di un sistema all'interno di una rete.

Quando i due SLAVE identificano la perdita di comunicazione con il MASTER, viene generato un errore che consentirà di disabilitare e mantenere disabilitata la modulazione del DC-AC e del AC-DC: ogni sistema viene posto in una condizione di sicurezza, modulazione PWM disabilitata, potenza erogata o assorbita nulla e sistema in stand-by. I due SLAVE potranno uscire dallo stato di FAULT solo nel momento in cui la comunicazione con il DC-DC viene ristabilita.

2.1.3 Architettura di comunicazione CAN bus tra stazione di ricarica e veicolo

Per la corretta e sicura gestione della fase di ricarica, è stato deciso di realizzare un'infrastruttura di comunicazione tra la stazione di ricarica ed il Battery Management System del veicolo. Oggi, la fase di ricarica in DC di qualsiasi veicolo elettrico deve essere gestita tramite comunicazione tra la stazione ed il veicolo stesso. Nel caso specifico di questa attività, non essendo possibile realizzare un collegamento elettrico per lo scambio di dati, essendo il veicolo collegato alla stazione tramite il solo pantografo, si è deciso di utilizzare una comunicazione wireless su standard CAN. Lo standard CAN è stato scelto poiché ampiamente impiegato in campo automotive.

Il transceiver wireless selezionato è l'Axiomatic [AX141200:CAN/WiFi Module](#) date le sue caratteristiche e l'involucro IP67, idoneo quindi per installazione esterna.

I dati di interesse sono riassunti nella Figura 18, dove si riportano le grandezze che il BMS fornirà alla stazione di ricarica e che verranno utilizzare per gestire la fase operativa.

TPDO2 nodo16, step time minimo 250ms

ID	290
BYTE0	Riservato
BYTE1	Riservato
BYTE2	Riservato
BYTE3	Riservato
BYTE4	Max Discharge Power [kW/]
BYTE5	Max Charge Power[kW/]
BYTE6	Max Discharge Current [A/10]
BYTE7	Max Charge Current[A/10]

Figura 18. CAN ID e trama dati per la comunicazione con il BMS di batteria.

L’arresto della ricarica potrà avvenire anche monitorando il SOC di batteria tramite il valore puntualmente fornito dal BMS tramite CAN-bus. La Figura 19 mostra l’ulteriore nodo CAN che fornirà i dati specifici.

TPDO4 nodo16, step time minimo 250ms

ID	490
BYTE0	Battery Current (WORD – low Byte) [A*10]
BYTE1	Battery Current (WORD – high Byte) [A*10]
BYTE2	Battery Voltage (WORD – low Byte) [V*100]
BYTE3	Battery Voltage (WORD – high Byte) [V*100]
BYTE4	Battery SoC [%]
BYTE5	0x80=Warning Isometer; 0x40=Error_I_Discharge; 0x20= Error_I_Charge; 0x10= Error_Slave; 0x08=Error_BMS temp; 0x04=Error_K_Pos; 0x02= Error_K_Neg; 0x01= Error NTC/BMS;
BYTE6	Codice byte7: 0=Disattivo, 1=Attivo
BYTE7	0x80=Disc_OK; 0x20=Dis_Warning; 0x10=Dis_Alarm; 0x08=Ch_OK; 0x02= Ch_Warning; 0x01=Ch_Alarm;

Figura 19. CAN ID e trama dati della batteria.

2.2 Verifica del sistema AC-DC verso la rete elettrica

A valle della descrizione dell’infrastruttura di comunicazione, si è proceduto alla verifica funzionale completa di ogni sottosistema della stazione di ricarica, iniziando dallo stadio raddrizzatore AC-DC verso la rete elettrica. Inizialmente è stata verifica la procedura di aggancio alla rete elettrica, il PLL per la stima dell’angolo e della frequenza di rete ed i trasduttori di misura. Successivamente alla manovra di avviamento, il valore di riferimento del DC bus è stato portato al setpoint nominale, il carico è stato fornito dal sistema di conversione DC-DC presente nella stazione che trasferiva potenza su un carico resistivo.

Tramite il software di controllo sono state acquisite diverse forme d’onda che sono riassunte nelle Figura 20, Figura 21 e Figura 22. Grazie all’interfaccia utente realizzata appositamente, è stato possibile acquisire e visualizzare ogni campione acquisito dall’FPGA ed utilizzato per il controllo. La Figura 20 mostra le correnti lato AC sull’induttore posto in ingresso al Boost Rectifier, nella condizione di carico prima descritta. Nella medesima condizione di esercizio, sono state acquisite le tensioni lato rete per la verifica dell’effettiva funzionalità del filtro LCL proposto: la Figura 21 mostra le tensioni concatenate. Sempre relativamente allo stesso punto operativo sono state acquisite la tensione sul DC bus e la corrente misurato in uscita dal Boost Rectifier, quindi la corrente in ingresso ai carichi rappresentati dal convertitore DC-DC. Le forme d’onda sono riportate in Figura 22.

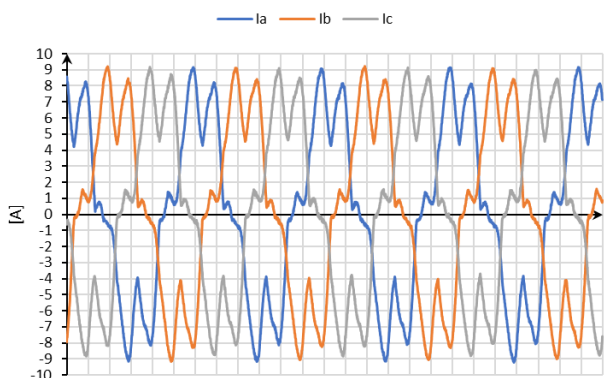


Figura 20. Correnti lato rete acquisite tramite la scheda di controllo.

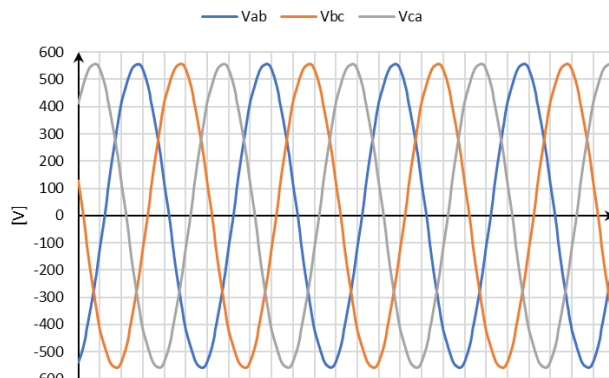


Figura 21. Tensioni concatenate a valle del filtro LCL acquisite tramite la scheda di controllo.

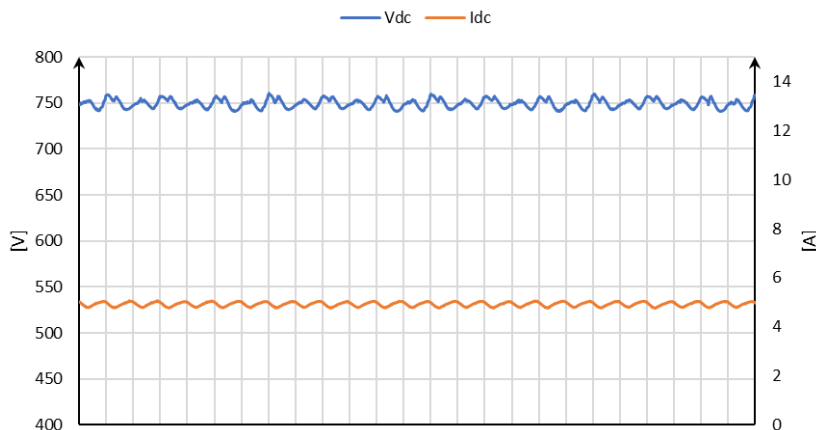


Figura 22. Tensione sul link DC comune ai vari convertitori e corrente di link erogata dall'AC-DC.

Per verifica tra le grandezze acquisite tramite il software di controllo e l'andamento delle stesse all'interno del sistema di conversione, è stato utilizzato un analizzatore di forme d'onda a canali isolati per ottenere l'oscillogramma riportato in Figura 23. Sono riportate la corrente della fase A lato AC (traccia fucsia), la tensione concatenata lato AC-DC e quindi a monte del filtro di rete (traccia verde), la tensione del bus DC (traccia gialla) ed infine, la corrente DC (traccia celeste).

Infine, la Figura 24 mostra l'istante in cui il Boost Rectifier inizia a modulare una volta completamente collegato alla rete elettrica. L'angolo di rete stimato (traccia gialla) è perfettamente allineato con la tensione di fase V_{an} (traccia fucsia). Il segnale modulante della fase A (traccia celeste), dove si evince chiaramente l'impiego dell'iniezione di terza armonica, è anch'esso allineato con l'angolo di rete essendo in quel preciso istante la potenza trasferita estremamente bassa (teoricamente nulla). Si può notare l'aumento del ripple di corrente (traccia verde) non appena il convertitore inizia a modulare, sempre mantenendo il setpoint di corrente a zero.

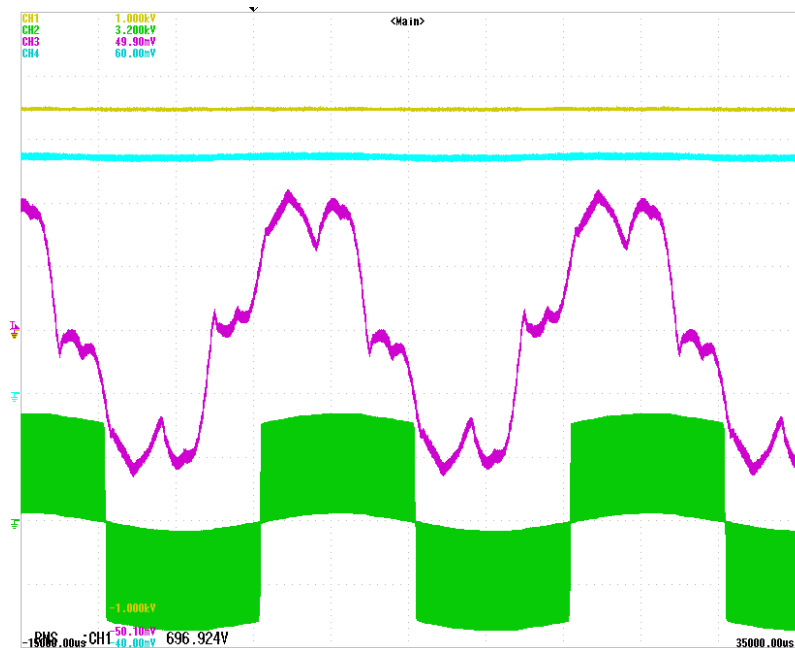


Figura 23. Grandezze elettriche del sistema di conversione AC-DC collegato alla rete elettrica durante una fase di ricarica.

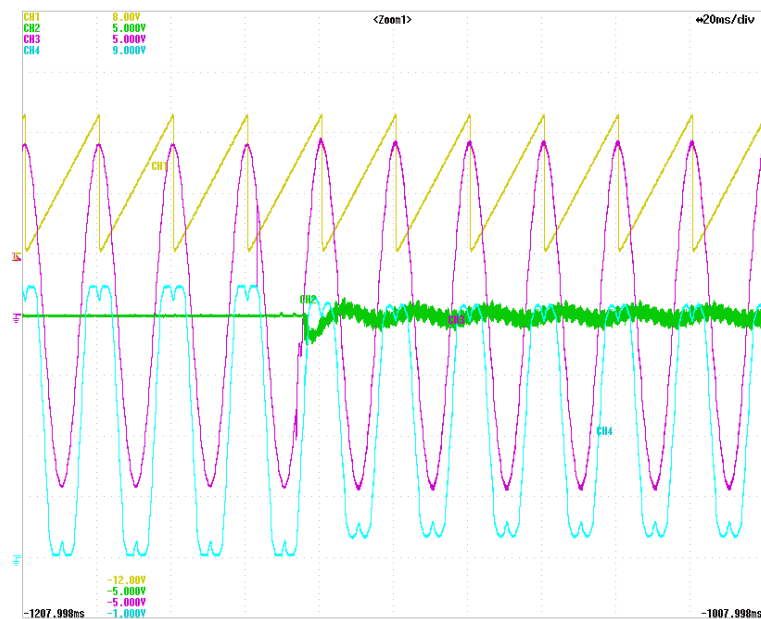


Figura 24. Collegamento alla rete elettrica del Boost Rectifier: avvio della modulazione.

2.3 Verifica dell'azionamento elettrico relativo al volano elettromeccanico

L'azionamento elettrico dedicato alla gestione del volano elettromeccanico è stato verificato separatamente dagli altri sistemi per valutarne le funzionalità così da effettuare contestualmente i collaudi funzionali del software di controllo. In base all'architettura illustrata nella precedente annualità, e a seguito della verifica dell'interfaccia AC-DC verso la rete elettrica, sono state effettuate diverse prove di tracciamento del volano elettromeccanico, che corrispondono praticamente a successive fasi di ricarica. La tensione operativa del bus DC è stata mantenuta al suo valore nominale pari a 750 V e la velocità meccanica via via aumentata variando il setpoint finale. La Figura 25 mostra un transitorio di accelerazione (di carica) del volano con partenza da fermo (volano completamente scarico) fino a raggiungere la velocità di 1650 rpm. Si può notare che

l'azionamento elettrico lavora praticamente a coppia costante (corrente costante) durante il transitorio di accelerazione, e quindi con potenza richiesta crescente. Si può notare come la tensione del link DC è perfettamente regolata ad un valore costante dall'AC-DC verso la rete elettrica.

Successivamente, una scarica del volano è stata effettuata producendo un rallentamento da 1650 rpm a 700 rpm come è possibile vedere nella Figura 26, dove oltre alla velocità meccanica sono mostrate le correnti della macchina elettrica e la tensione sul bus in continua.

La Figura 27 mostra la corrente della fase A (I_a) e l'angolo elettrico acquisito tramite resolver nella condizione di esercizio con angolo di coppia pari a 90° , ovvero $I_d=0$.

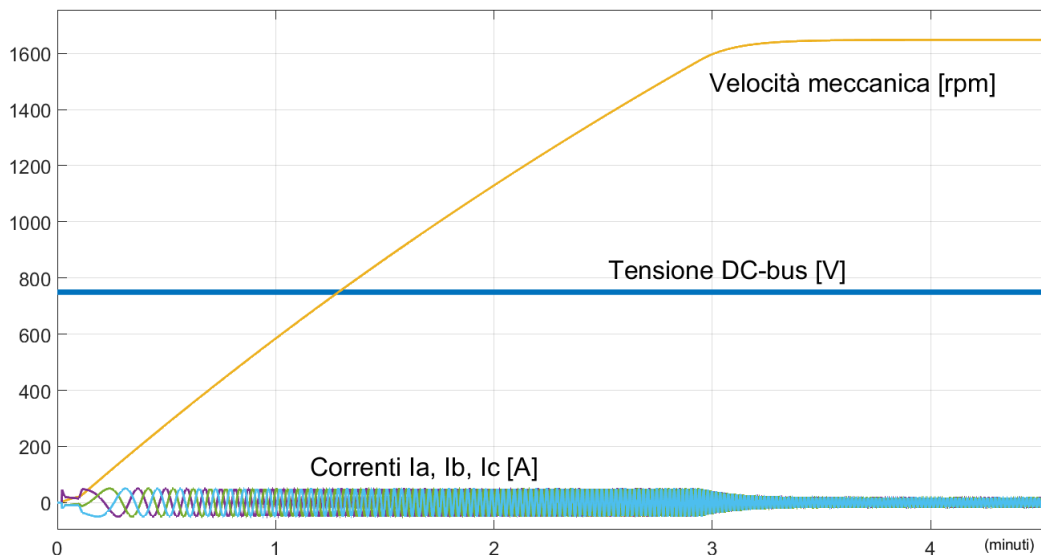


Figura 25. Transitorio di carica del volano.

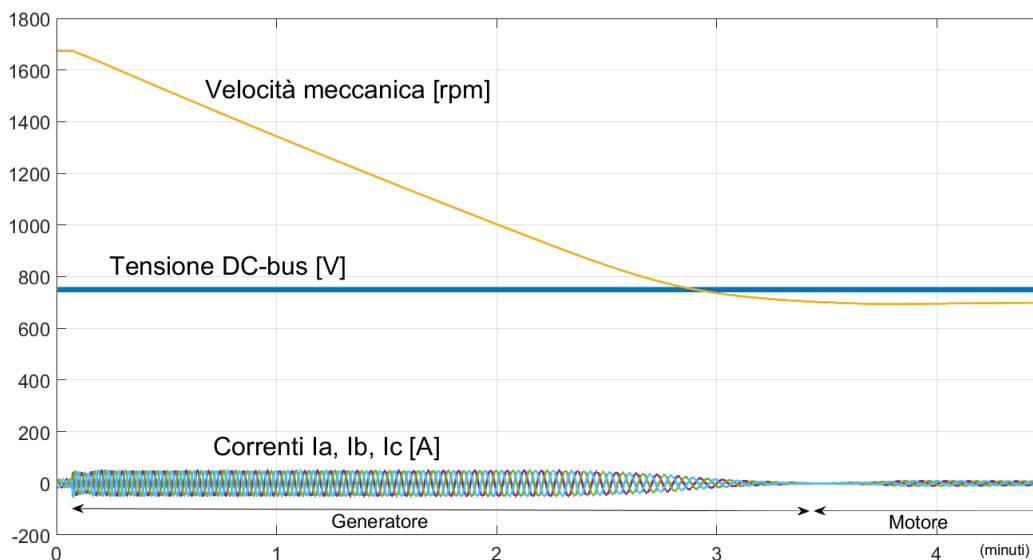


Figura 26. Transitorio di scarica del volano.

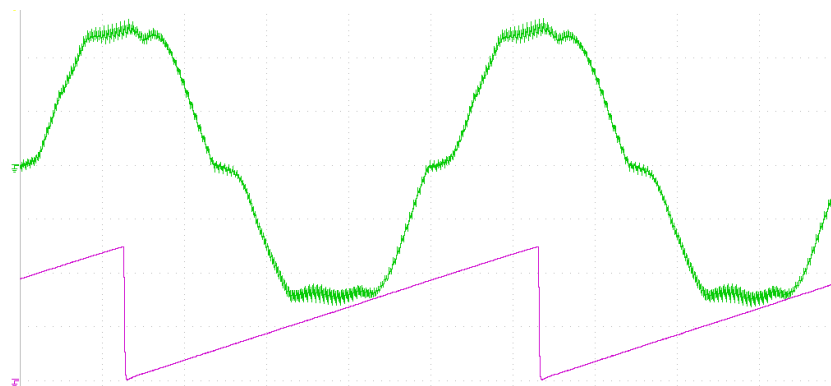


Figura 27. Corrente fase A e angolo elettrico del sistema volano.

2.4 Verifica del DC-DC per la gestione della fase di ricarica

L'architettura del sistema di conversione DC-DC per la regolazione della fase di ricarica è stata precedentemente introdotta nella seconda annualità. Nello specifico, la gestione potenza durante la fase di ricarica è demandata ad un convertitore di tipo Buck Sincrono composto da tre rami operanti in parallelo. La frequenza di commutazione è pari a 15 kHz. L'architettura di controllo è composta da un anello di tensione per la ricarica a tensione costante, e da tre anelli di corrente (uno per ramo) che operano durante la fase di ricarica a corrente costante. La presenza di questi tre anelli di corrente è sempre necessaria essendo l'architettura di controllo ad anelli annidati; pertanto, riceveranno il riferimento da inseguire direttamente dall'anello di tensione, esterno rispetto a loro stessi.

Il sensing della tensione durante la fase di ricarica è effettuato in due punti distinti, a monte e valle del contattore di inserzione, ed i due valori costantemente confrontati per avere una ridondanza durante la fase di ricarica.

La verifica sperimentale dello stadio DC-DC ha seguito diverse tappe, dapprima solo su carico resistivo, per poi terminare con una fase di ricarica sull'accumulatore elettrochimico a bordo del veicolo. La Figura 28 mostra le grandezze acquisite dal software di controllo durante una ricarica dove un solo 'leg' del convertitore DC-DC è attivo (si può notare che solo la corrente della fase a è diversa da zero). La tensione del link DC è stata mantenuta a circa 700 V dallo stadio AC-DC collegato alla rete elettrica, mentre il volano non era in esercizio. Pertanto, la potenza utilizzata per la ricarica è stata prelevata completamente dalla rete nazionale. Si può notare come la misura della tensione di batteria ridondante identificata nelle grandezze V_{out} e $V_{outBATT}$, denoti un ripple maggiore della $V_{outBATT}$. Questo effetto è dovuto all'impiego per quest'ultima grandezza di un convertitore analogico-digitale a bassa risoluzione, essendo utilizzata essenzialmente come verifica e non per azioni di regolazioni e controllo.

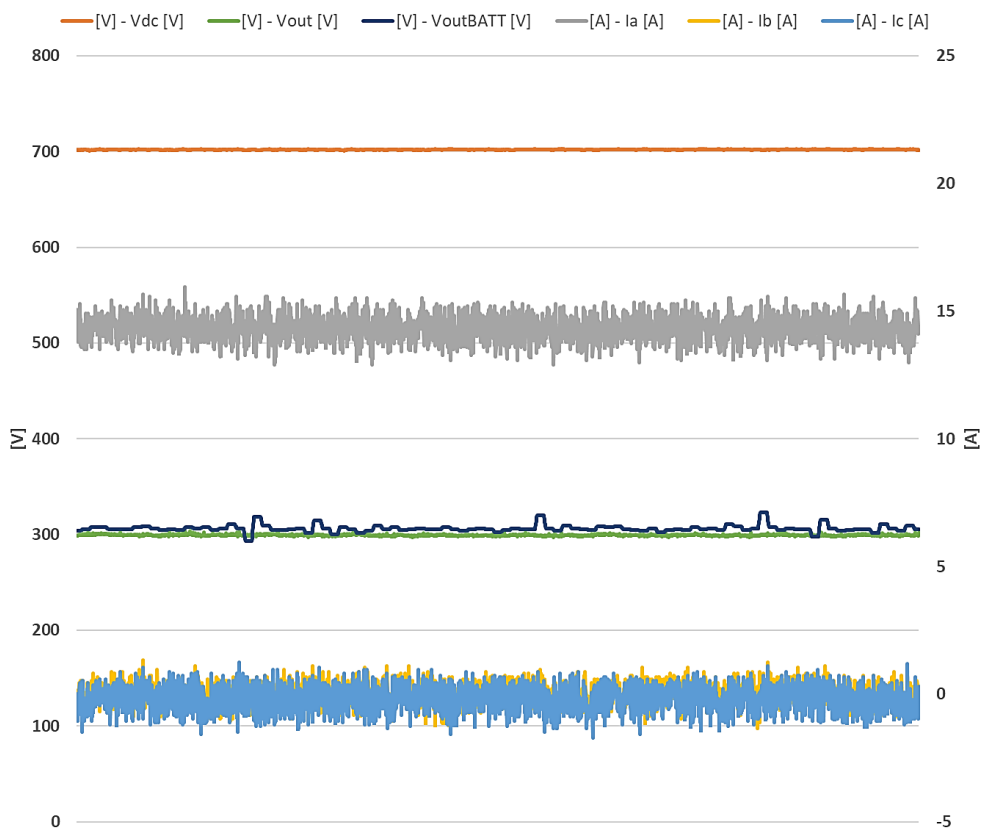


Figura 28. Grandezze elettriche relative allo stadio DC-DC durante un’operazione di ricarica acquisite tramite il software di controllo.

Ad ulteriore conferma di quanto mostrato in Figura 28, le grandezze elettriche sono state acquisite tramite analizzatore di forme d’onda. La Figura 29 mostra le correnti sugli induttori principali per le uscite A e B (verde e fucsia): l’uscita C è attiva ma non visualizzata poiché si dispone di due pinze amperometriche. La traccia mostrata in rosso è la tensione sull’accumulatore elettrochimico, e la corrente di ricarica, ovvero la corrente di uscita, è la traccia celeste.

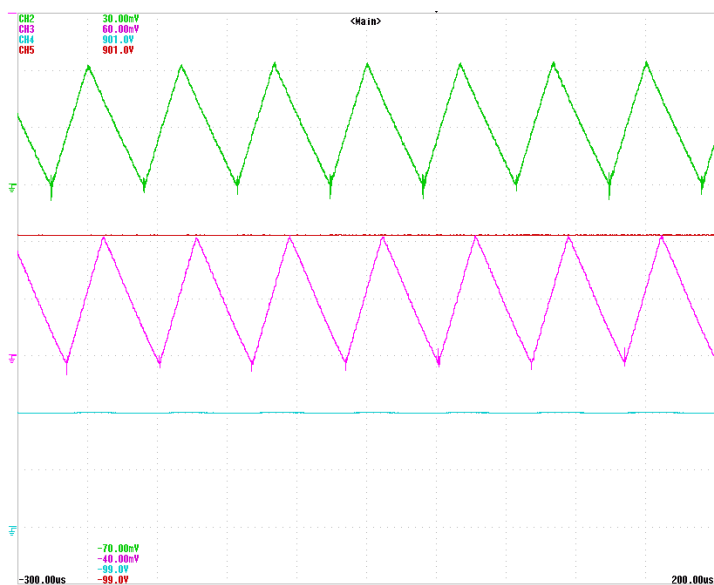


Figura 29. Grandezze elettriche relative al convertitore DC-DC durante una fase di ricarica.

3 Conclusioni

La terza ed ultima annualità ha riguardato la verifica completa della stazione di ricarica nelle reali condizioni operative. È stato ultimato il software di controllo, così da rendere il sistema completamente autonomo. Le verifiche effettuate hanno mostrato la piena operatività della stazione e quindi, la validità dell'approccio e delle scelte progettuali effettuate nell'annualità precedente.

Dato il modesto impatto sulla rete elettrica nazionale, grazie all'impiego di sistemi di accumulo dell'energia, sarebbe auspicabile l'integrazione di fonti rinnovabili, quali in fotovoltaico, per l'ulteriore riduzione del carico di rete. In questo modo si potrebbe sfruttare una modesta potenza di picco dell'impianto fotovoltaico per la ricarica del volano elettromeccanico.

4 Riferimenti bibliografici

- [1] Fernando Orteni, 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] Orteni, 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. Crescimbeni, "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] Orteni, 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.

5 Curricula scientifici dell'unità di ricerca

5.1 Alessandro Lidozzi

Attualmente impiegato come Professore Associato in Elettronica di Potenza e Azionamenti Elettrici presso l'Università degli Studi ROMA TRE – Dipartimento di Ingegneria, Center for Power Electronics and Drives (C-PED), Roma.

11/2003 – 10/2006 – Dottorato di Ricerca in Ingegneria Meccanica e Industriale conseguito presso l'Università degli Studi ROMA TRE. Tesi dal titolo: controllo sinergico di convertitori elettronici di potenza ed azionamenti elettrici con macchina sincrona a magneti permanenti.

08/2005 – 04/2006 – Visiting Scholar presso il Center for Power Electronics Systems (CPES), Blacksburg, Virginia (USA). Coinvolto in un progetto riguardante lo studio e la realizzazione su DSP di controlli vettoriali sensorless per macchine sincrone a magneti permanenti in applicazioni di ventilazione a bordo di aeromobili. Progetto finanziato dalla Thales Avionica.

03/2003 – Laurea in Ingegneria Elettronica (110/110) conseguita presso l'Università degli Studi ROMA TRE. Tesi dal titolo: analisi teorico sperimentale di architetture a controllo distribuito per convertitori elettronici di potenza.

L'attività scientifica, condotta prevalentemente presso il Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Industriale dell'Università degli Studi ROMA TRE, si articola secondo le tematiche inerenti alla progettazione di architetture di controllo e dell'hardware per sistemi di conversione statica dell'energia elettrica ed azionamenti elettrici. In particolare, sono stato coinvolto in progetti scientifici nel campo della trazione elettrica/ibrida e generazione grid-tied/stand-alone, finanziati da enti italiani, europei e da aziende private.

Direzione progetti scientifici (maggiore rilevanza ultimi cinque anni)

- 2020-2022. CITRACC, Construcciones Instalación y Tracción, S.A.U. (Spain) – “Long term collaboration on control aspects for medium voltage inverters in energy recovery and power supply applications”
- 2020-2022. ENEA Research Center – “Design and experimental verification of a fast/ultra-fast charging station for electric urban buses with innovative flywheel energy storage system”
- 2019-2020. CITRACC, Construcciones Instalación y Tracción, S.A.U. (Spain) – “Dual A-NPC inverter for energy recovery in railway systems, 1.5kV and 3.3kV power converters”
- 2018-2020. ABB S.p.A. - “Design and realization of a high-performance electric drive for motorized medium-voltage breakers (BPWR)”
- 2018-2019. ENEA Research Center – “Analysis and Evaluation of Energy Storage Technologies for high-performance Charging Stations”
- 2018. E.D. Elettronica Dedicata S.r.l. - “Active AC-DC converter for Stirling-based generating units: design and validation”
- 2018. E.D. Elettronica Dedicata S.r.l. - “Design, validation and software development of a T-SoM board for on-line production tests”
- 2017-2018. ENEA Research Center – “Design and implementation of a fast-charging infrastructure for public transportations vehicles”
- 2017-2020. National Instruments Corporation (TX, USA) – “Exploring the possibility to use the LabVIEW based graphical tool chain in the development of control structures for power electronics and drives applications”
- 2016-2017. ENEA Research Center – “Preliminary evaluation of fast charging systems for public transportation”
- 2017-2018. CITRACC, Construcciones Instalación y Tracción, S.A.U. (Spain) – “Dual A-NPC inverter for energy recovery in railway systems”
- 2017-2018. Huawei GmbH (Germany) – “High performance UPS based on multilevel power converter topologies”

5.2 Luca Solero

Dal 1996 al 2016 ho prestato servizio presso l'Università degli Studi Roma Tre come ricercatore universitario e come professore associato nel settore scientifico disciplinare ING-IND/32 Convertitori, Macchine e Azionamenti Elettrici. Dal 2016 sono in servizio, come professore ordinario, presso la stessa Università dove insegno i corsi di Applicazioni Industriali Elettriche e di Progetto dei Convertitori Statici di Potenza. Sono Direttore del C-PED, Centro di ricerca interuniversitario sull'elettronica di potenza e gli azionamenti elettrici. I miei interessi di ricerca riguardano lo sviluppo di azionamenti e di convertitori statici di potenza non convenzionali, destinati a diverse applicazioni, inclusi i sistemi di potenza in campo automobilistico, i veicoli ibridi o elettrici, i sistemi di generazione da fonti rinnovabili e la regolazione della relativa potenza elettrica prodotta. Riguardo tali tematiche sono autore di oltre 180 memorie scientifiche pubblicate su riviste o atti di conferenze di rilievo internazionale.

Direzione progetti scientifici

ENEA (2005-2006) “Realizzazione di un Sistema di Accumulo Energetico Integrato di Impiego in Ambito Automobilistico”; Larcet (2008-2009) “Progettazione e Sviluppo di un PFC Trifase Multilivello con Stadio di Uscita a 48V”; 3C-Group (2008-2009) “Definizione delle Specifiche di Dimensionamento dell'Azionamento Destinato alla Propulsione Elettrica di uno Scooter”; Semikron (2009-2010) “Analisi di Convertitori

Multilivello e Progettazione Esecutiva di un Banco Prova per Convertitori a 3 Livelli”; Geant Empowering (2010-2011) “Realizzazione del Sistema di Controllo di un Convertitore DC-AC da 3kW per la Generazione Fotovoltaica”; Regione Lazio - Consorzio Tecno.Tib.e.r.i.s. (2011-2013) “Alimentatore Modulare con Controllo Digitale”; Larcet (2011-2012) “Assistenza alla Progettazione, Sviluppo e Collaudo di Convertitori Elettronici di Potenza per Macchine Agricole Ibride”; Semikron (2015-2016) “Characterization of power modules: 3L Rectifier Module and Hybrid DC/DC Converter Module”; ABB PPHV Adda (2016) “Attività di ricerca su Motor Drive 1.4 Capacitor Charger (BCHRG)”; ECPE Engineering Center for Power Electronics GmbH (2016-2017) “Passive and Active Reduction of Switching Overvoltage in SiC Equipped Industrial Drives”; Infineon Technologies Austria AG (2016-2019) “SiC Devices equipped Inverter Topologies for Electric Motor Drives”; Lazio Innova - Regione Lazio Bando Progetti di Gruppi di Ricerca (2018-2020) “Eco-Smart Battery Charger per veicoli elettrici”; CNR – Ricerca di Sistema (2019-2021) “Energia Elettrica dal Mare”, Linee di Azione “Sviluppo e controllo di convertitori elettronici di potenza per floating offshore wind turbine”; Lazio Innova - Regione Lazio Bando Progetti di Gruppi di Ricerca (2021-2023) “Nodi Attivi di Potenza per l'Internet of Energy - Impiego efficiente delle unità di accumulo proprie dei settori delle telecomunicazioni e della mobilità elettrica”.

Sono stato responsabile nazionale (Principal Investigator), nell’ambito del bando competitivo PRIN 2008 del MiUR, del progetto di ricerca dal titolo Macchine e Azionamenti Innovativi per Applicazioni Speciali di tipo Direct-Drive; progetto che ha visto coinvolte, oltre all’Unità di Roma Tre anche Unità del Politecnico di Torino, del Politecnico di Milano e dell’Università di Cassino. Lo specifico progetto di ricerca di Roma Tre ha come titolo Azionamenti Elettrici per Turbo espansori per il Recupero di Energia in Motori Automobilistici.

Sono stato responsabile scientifico (Principal Investigator) di tre progetti finanziati su bandi competitivi della Regione Lazio:

Regione Lazio - Consorzio Tecno.Tib.e.r.i.s. (2011-2013) Alimentatore Modulare con Controllo Digitale

Lazio Innova - Regione Lazio Bando Progetti di Gruppi di Ricerca (2018-2020) Eco-Smart Battery Charger per veicoli elettrici

Lazio Innova - Regione Lazio Bando Progetti di Gruppi di Ricerca (2020-2022) Nodi Attivi di Potenza per l'Internet of Energy - Impiego efficiente delle unità di accumulo proprie dei settori delle telecomunicazioni e della mobilità elettrica.

5.3 *Marco di Benedetto*

Marco di Benedetto ha conseguito nel 2013 la laurea magistrale in Ingegneria Elettronica presso l’Università degli Studi di Roma “Tor Vergata” e nel 2017 ha conseguito il titolo di Dottore di Ricerca al termine del ciclo triennale di Dottorato di ricerca in Ingegneria Meccanica e Industriale svolto presso l’Università degli Studi “ROMA TRE”. Dal 02/11/2019 ad oggi è Ricercatore tempo determinato lettera A Legge 240/2010 nel settore scientifico disciplinare ING-IND/32 Convertitori, Macchine e Azionamenti Elettrici presso il Dipartimento di Ingegneria dell’Università degli Studi “Roma TRE”. Dal 1/11/2017, in qualità di assegnista di ricerca presso il Dipartimento di Ingegneria dell’Università degli Studi “Roma TRE”, ha svolto in sequenza due incarichi annuali per attività di ricerca nell’ambito del settore scientifico disciplinare ING-IND/32 Convertitori, Macchine e Azionamenti Elettrici. La prima annualità l’attività di ricerca è stata incentrata sulla progettazione, realizzazione e collaudo di un sistema elettronico di potenza da impiegare come gruppo statico di continuità (UPS), mentre nell’incarico attualmente in fase di completamento si è rivolto alla progettazione di un prototipo di convertitore elettronico di potenza per stazioni di ricarica di nuova generazione in grado di consentire scambi energetici bidirezionali con la rete elettrica di distribuzione. In generale l’attività di ricerca dell’ing. di Benedetto è dedicata principalmente alla individuazione di soluzioni innovative per la progettazione hardware e software di sistemi elettronici di potenza per la conversione statica dell’energia elettrica da utilizzare in diversi ambiti applicativi. In particolare, le sue attività di ricerca sono specificatamente rivolte all’analisi teorico-sperimentale di sistemi di generazione distribuita, sia connessi alla rete elettrica che funzionanti in isola, al dimensionamento e alla sperimentazione di apparati di generazione basati su macchine sincrone ad elevata frequenza di uscita per applicazioni in campo aeronautico e nei sistemi elettrici propri del campo automotive, allo studio di nuove configurazioni sia per gruppi statici di

continuità aventi elevati valori di efficienza e di densità di potenza, sia per sistemi elettrici dedicati alla ricarica di veicoli elettrici o ibridi.

5.4 Alessandro Faro

Alessandro Faro ha conseguito la laurea magistrale in Ingegneria Meccanica e Industriale, nel 2020, presso l'Università degli Studi ROMA TRE, Roma, Italia. Dal 2020 lavora per il dottorato di ricerca in Ingegneria Meccanica e Industriale presso il Dipartimento di Ingegneria, dell'Università degli Studi ROMA TRE, C-PED (Center for Power Electronics and Drives).

La sua attività di ricerca riguarda le configurazioni di convertitori elettronici di potenza in media tensione e gli aspetti di controllo per applicazioni ferroviarie. Tale attività prevede l'utilizzo di simulatori real-time di tipo Hardware-In-the-Loop e piattaforme di controllo basate su FPGA.