



Ricerca di Sistema elettrico

Risultati delle prove di ricarica e di movimento del minibus

Fernando Ortenzi

Report RdS/PTR(2021)/208

RISULTATI DELLE PROVE DI RICARICA E DI MOVIMENTO DEL MINIBUS
Fernando Ortenzi – ENEA

Dicembre 2021

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - 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: 2.31 *Sperimentazione di sistemi di ricarica al capolinea basati su volani con minibus equipaggiato con sistemi di accumulo ad alta potenza specifica*

Responsabile del Progetto: Claudia Meloni, ENEA

Responsabile del Work package: Maria Pia Valentini, ENEA

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 RISULTATI PRELIMINARI.....	5
2.1 VEICOLO.....	5
2.2 STAZIONE DI RICARICA.....	10
3 CONCLUSIONI.....	16

Sommario

La presente attività è stata dedicata alla sperimentazione del sistema di ricarica rapida con un accumulatore inerziale.

Tale sistema di ricarica è ad alta potenza e dotato di pantografo per il contatto fra stazione e veicolo.

La ricarica che si vuole testare è quella al capolinea, di un minibus Tecnobus Gulliver, che viaggia, nel centro di Roma, per 50 minuti ed effettua una sosta di 10 al capolinea (Linea 117).

Il sistema di ricarica, posto all'interno di un container, è composto da un volano da 2.66 kWh, collegato ad una macchina elettrica da 20 kW, da un sistema di raffreddamento con chiller e da un armadio elettrico di controllo. E' in grado di erogare una potenza massima di 40 kW dimezzando quindi la richiesta alla rete elettrica da 40 a 20 kW.

Il veicolo, inizialmente dotato di una batteria al piombo di 72V e 585 Ah (42 kWh) è stato opportunamente modificato per avere una nuova batteria ad alta potenza di 16 kWh (355V e 46 Ah) con un powertrain opportunamente adeguato in grado di poter erogare potenza a 72 V e di potersi ricaricare tramite pantografo.

Le prime prove preliminari hanno consentito la marcia all'interno del centro ENEA della Casaccia eseguendo dei percorsi con soste, rappresentativi della marcia nelle reali condizioni di utilizzo e di potersi ricaricare ad alta potenza nei tempi prefissati

Nelle annualità sono state condotte delle prove sperimentali all'interno dell'area del Centro di Ricerca ENEA della Casaccia

1 Introduzione

Il presente rapporto tecnico riporta i test preliminari del sistema di trasporto progettato, dimensionato e testato nei singoli componenti nelle precedenti 2 annualità di Ricerca di Sistema.

Il sistema di trasporto che si vuole riprodurre. È quello della linea ATAC 117 di Roma, attualmente svolta con un Tecnobus Gulliver.

Nella presente sperimentazione si vuole utilizzare un sistema di ricarica rapida al capolinea, da 40 kW, con un accumulo a terra di tipo inerziale e un sistema di accumulo di bordo compatibile.

Il sistema di terra, progettato dall'Università di Roma 3 e dall'ENEA è composto da un volano da 2.66 kWh che effettua 3250rpm, collegato ad una macchina elettrica da 20 kW, da un chiller per il raffreddamento di quest'ultimo e da un armadio di controllo in grado di ricaricare un minibus prendendo potenza dalla rete e dal volano, ricaricato dopo che il minibus ha completato la sua carica.

Il veicolo, inizialmente dotato di una batteria da 72V e 585 Ah, è stato modificato sostituendo un sistema di accumulo ad alta potenza da 355 V e 46 Ah (16.3 kWh) ed un convertitore DCDC che collega la batteria all'azionamento che ha ancora la tensione a 72 V.

Le prove sperimentali effettuate riguarderanno quindi sia la stazione di ricarica, sia il veicolo in marcia con il nuovo accumulo/azionamento.

2 Risultati preliminari

Le prove sperimentali, riguardanti l'intero sistema prototipale realizzato, vengono analizzate sia dal punto di vista del veicolo, dove, eseguendo un percorso prefissato, vengono valutate le prestazioni in termini di potenza e consumi, sia lato terra (stazione di ricarica), dove anche qui se ne valuterà il comportamento in condizioni simili a quelle reali.

2.1 Veicolo

In Figura 1 si riporta il minibus oggetto della presente sperimentazione mentre si ricarica tramite il pantografo installato su un palo situato nella sede ENEA Casaccia. Il veicolo è un Tecnobus Gulliver mentre il pantografo è prodotto dalla SHUNK con tensione e corrente massimi di 1000V e 1000 A, già descritto in precedenti rapporti tecnici.



Figura 1: Vista del minibus durante la ricarica

Le specifiche del veicolo testato sono riportate in Tabella 1.

Tabella 1: Specifiche del Tecnobus Gulliver

Variable	Symbol	Value	Units
Vehicle mass	m	4285	kg
Rolling resistance coefficient	μ_{rr}	0.035	-
Gravity acceleration	g	9.81	m/s ²
Air density @ 20°C	ρ	1.223	kg.m ⁻³
Aerodynamic drag coefficient	C_D	0.7	-
Vehicle front area	A_f	5.693	m ²
Wheels radius	r	0.365	m
Gearbox transmission ratio	G_{gb}	4.37	-
Gearbox transmission efficiency	η_{gb}	90	%

La sperimentazione è stata effettuata nel centro ENEA Casaccia, nell'area Capanna. Si è testato il mezzo su un percorso interno riproducendo quanto possibile il reale utilizzo che di questo mezzo può essere fatto, prevedendo una ricarica rapida alla fine del percorso.



Figura 2: Vista del minibus, del container e del pantografo

In Figura 2 si riporta il luogo dove sono state effettuate le prove, oltre al minibus è mostrato il pantografo ed il container che contiene il sistema di ricarica inerziale.

Il percorso effettuato dal bus, viene mostrato in Figura 3, tramite la traccia GPS, è di circa 2 km ed è stato effettuato ad una velocità media di circa 8 km/h.

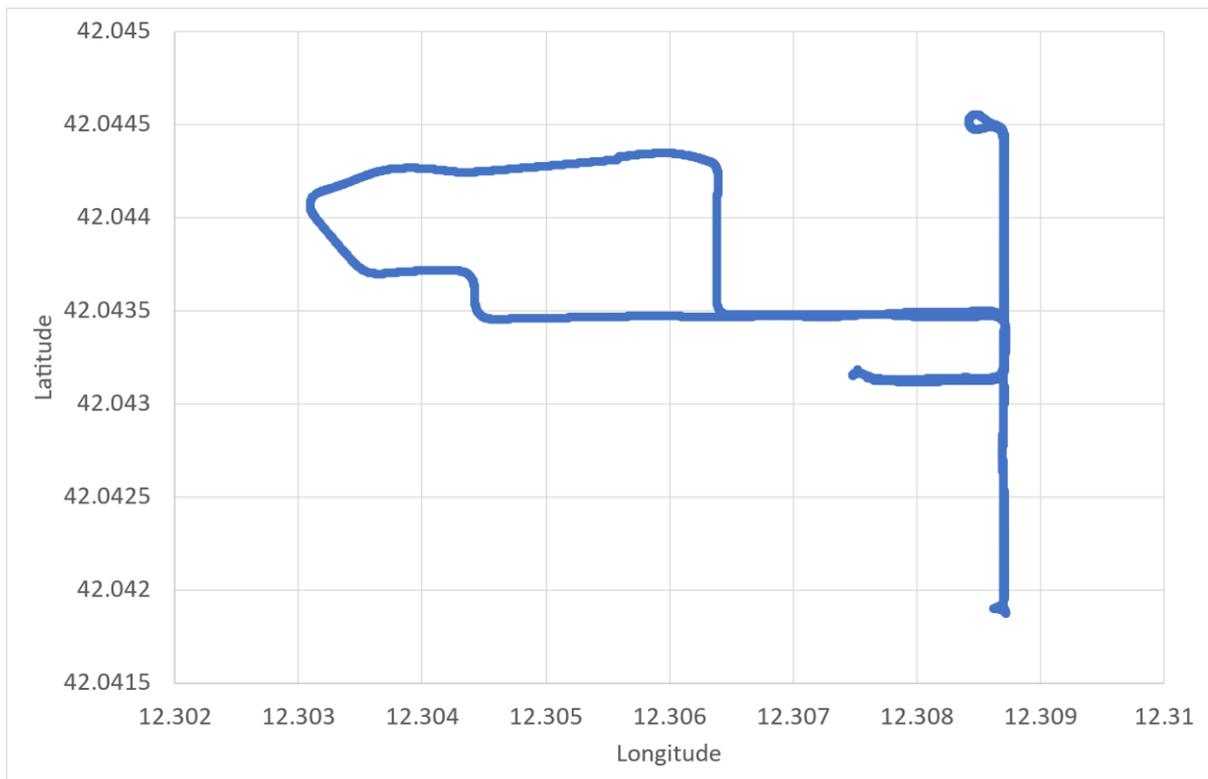


Figura 3: Traccia GPS del percorso del veicolo durante i test

Tabella 2: Riepilogo della prova

Descrizione	Valore
Distance	2 km
Average Speed	8 km/h
Average Running speed	10.5 km/h
Battery Energy	1.223 kWh
Energy Consumption	0.62 kWh/km
Delta SOC	10 %

La velocità media di running, ovvero la velocità media decurtata di tutte le soste, è di circa 10.5 km/h, mentre l'energia consumata è di 1.223 kWh; il consumo energetico è quindi 0.62 kWh/km, leggermente superiore rispetto a quanto stimato nella precedente annualità, ovvero kWh/km, tuttavia in linea con quanto riscontrato in letteratura scientifica.

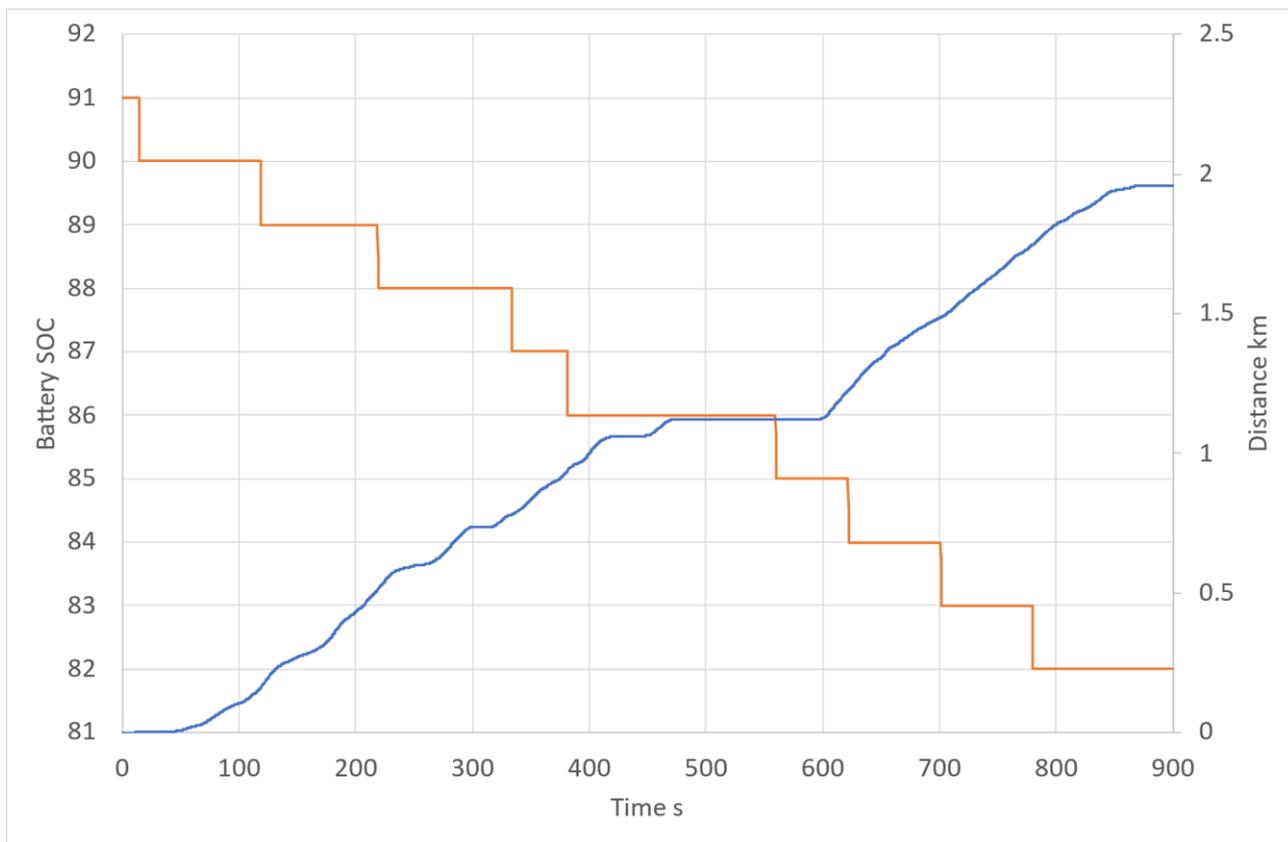


Figura 4: Andamento della distanza percorsa e dello stato di carica della batteria

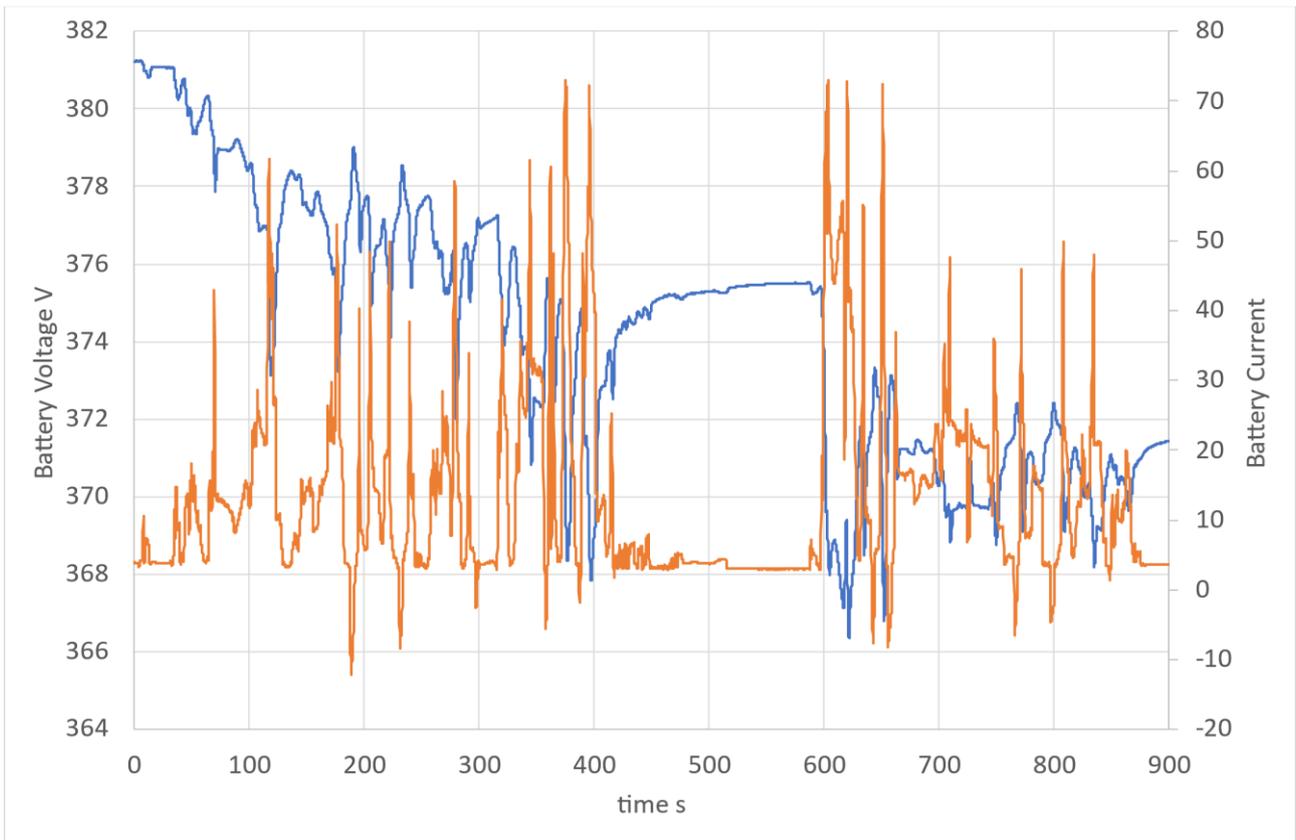


Figura 5: Andamento della tensione e della corrente durante la prova

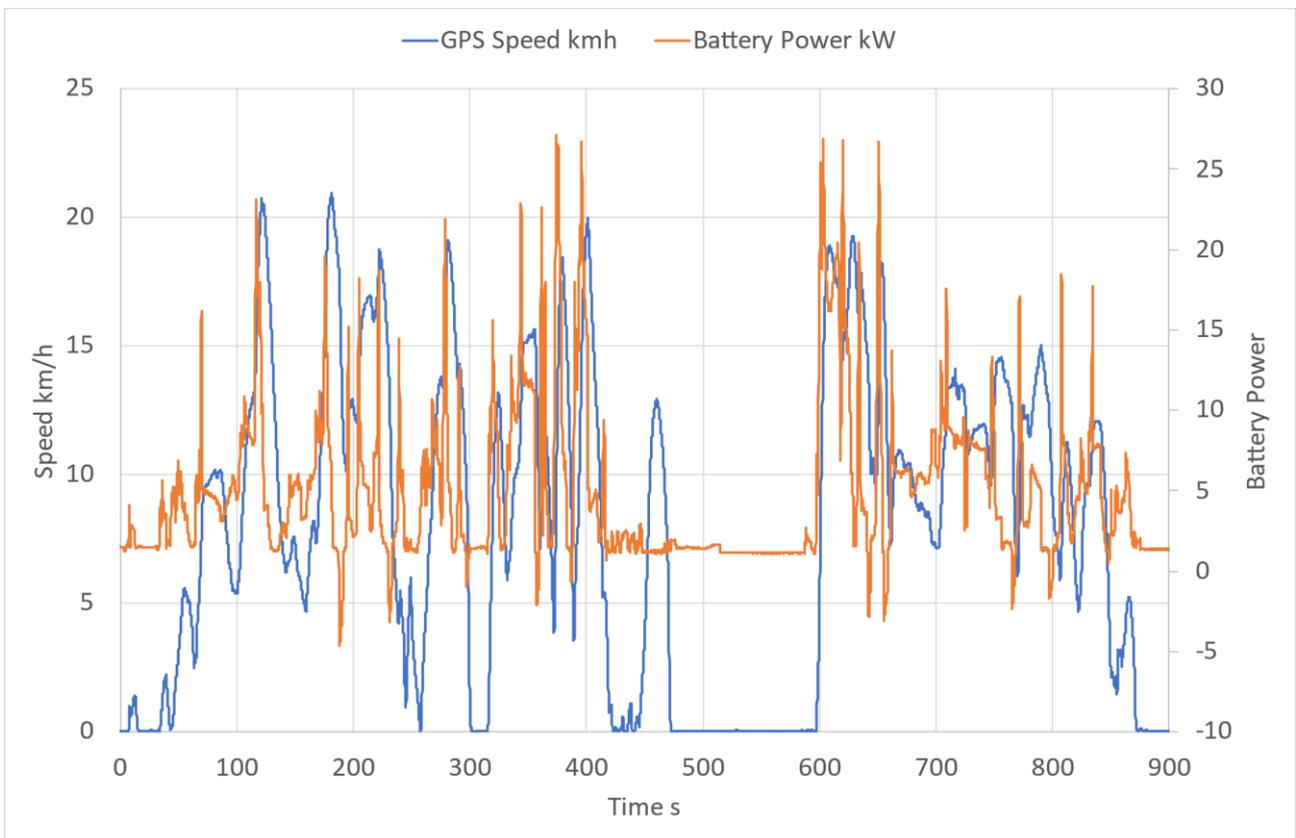


Figura 6: Andamento della velocità del minibus e della potenza erogata dalle batterie

I dati istantanei invece vengono riportati nelle Figura 4 Figura 5 e Figura 6:

- Si nota che, lungo il percorso lo stato di carica della batteria (stimato dal costruttore del BMS) scende del 10%, mentre l'energia consumata è di 1.22 kWh
- I valori di tensione oscillano da un massimo di 381 V a poco più di 366 V, mentre la corrente oscilla tra 73 A (nella fase di erogazione della massima potenza del motore elettrico) a -10 A (frenata rigenerativa);
- Il ciclo, della durata di 900 secondi ha una velocità massima di 21 km/h, tenendo conto che il veicolo ha una velocità massima di 32 km/h.
- La potenza massima erogata dalle batterie è di 27 kW e la minima è di 4.6 kW. La potenza massima nominale del motore elettrico è di 24 kW, mentre l'energia recuperabile è settabile tramite dispositivo diagnostico e di norma tale valore non viene massimizzato per non danneggiare le parti meccaniche (il componente più critico dal punto di vista delle sollecitazioni in frenata rigenerativa è il differenziale).

2.2 Stazione di ricarica

Le prove sperimentali hanno avuto come obiettivo anche la prova di ricarica del minibus con la stazione equipaggiata con accumulo inerziale. Tale ricarica, effettuata in maniera semiautomatica tramite l'azionamento da parte del conducente di un comando per l'alzata del pantografo e la successiva ridiscesa, è stata effettuata al termine del percorso effettuato e riportato precedentemente.



Figura 7: Container contenente i componenti della stazione di ricarica

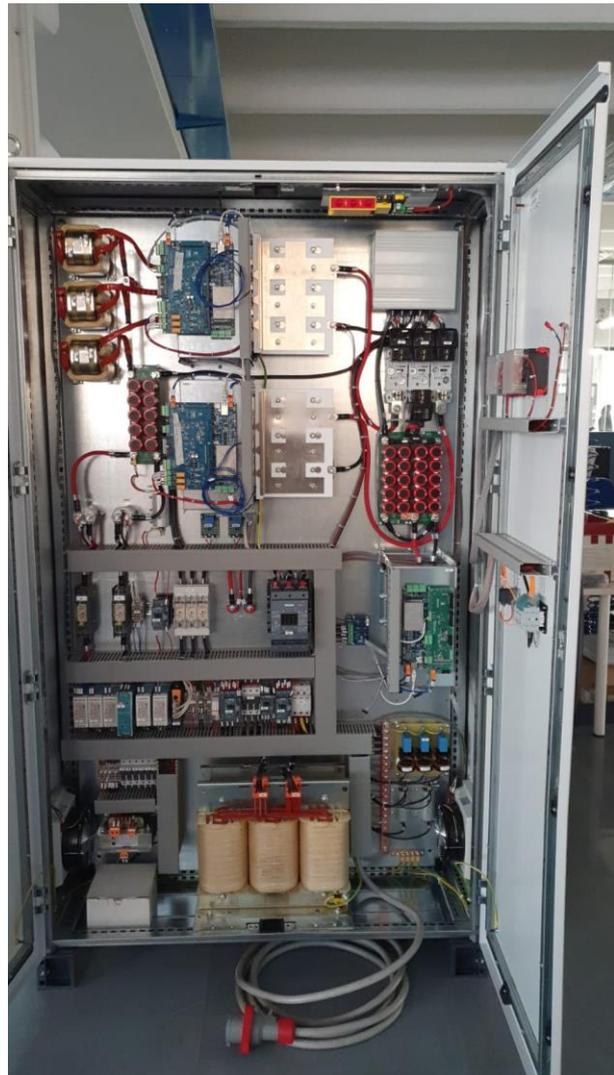


Figura 8: Il volano realizzato (a sx) e l'armadio elettrico di controllo (a dx)

Una volta effettuata la connessione, l'armadio elettrico di controllo della stazione di ricarica (situato nel container di Figura 7 e riportato in

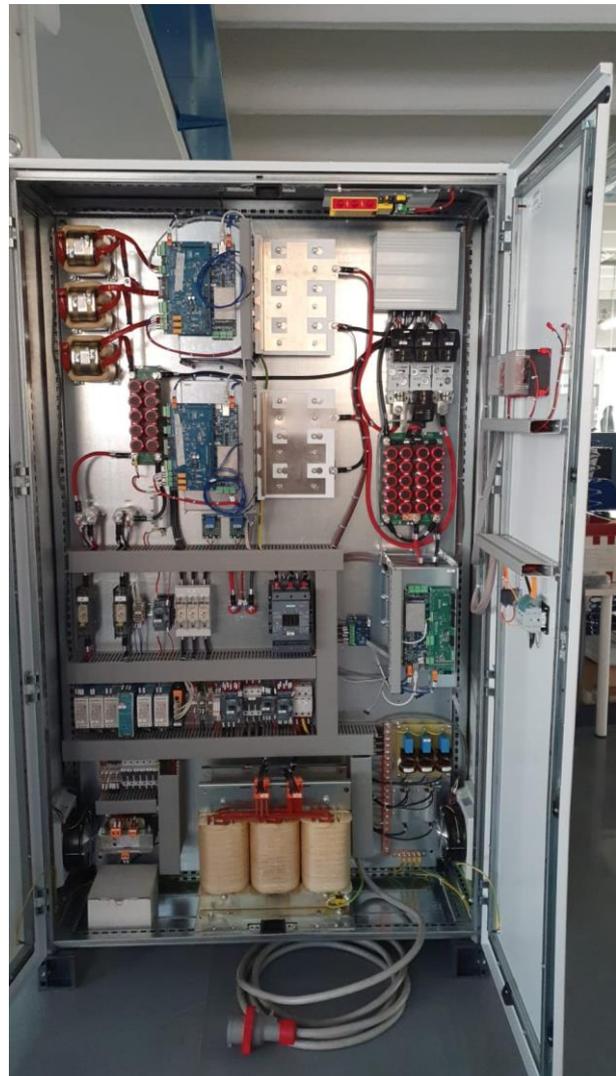


Figura 8 a destra) chiude l'interruttore principale e inizia la ricarica che può avere una potenza di 40 kW, in cui 20 kW provengono dal sistema di accumulo e 20 kW dalla rete elettrica. Questo per ridurre l'impatto sulla rete elettrica dalle richieste di elevata potenza dovute alla ricarica dei veicoli elettrici.

In queste prove preliminari, tale potenza è stata ridotta a circa 20 kW, tuttavia entrambe le sorgenti di energia hanno contribuito alla ricarica della batteria a bordo del minibus.

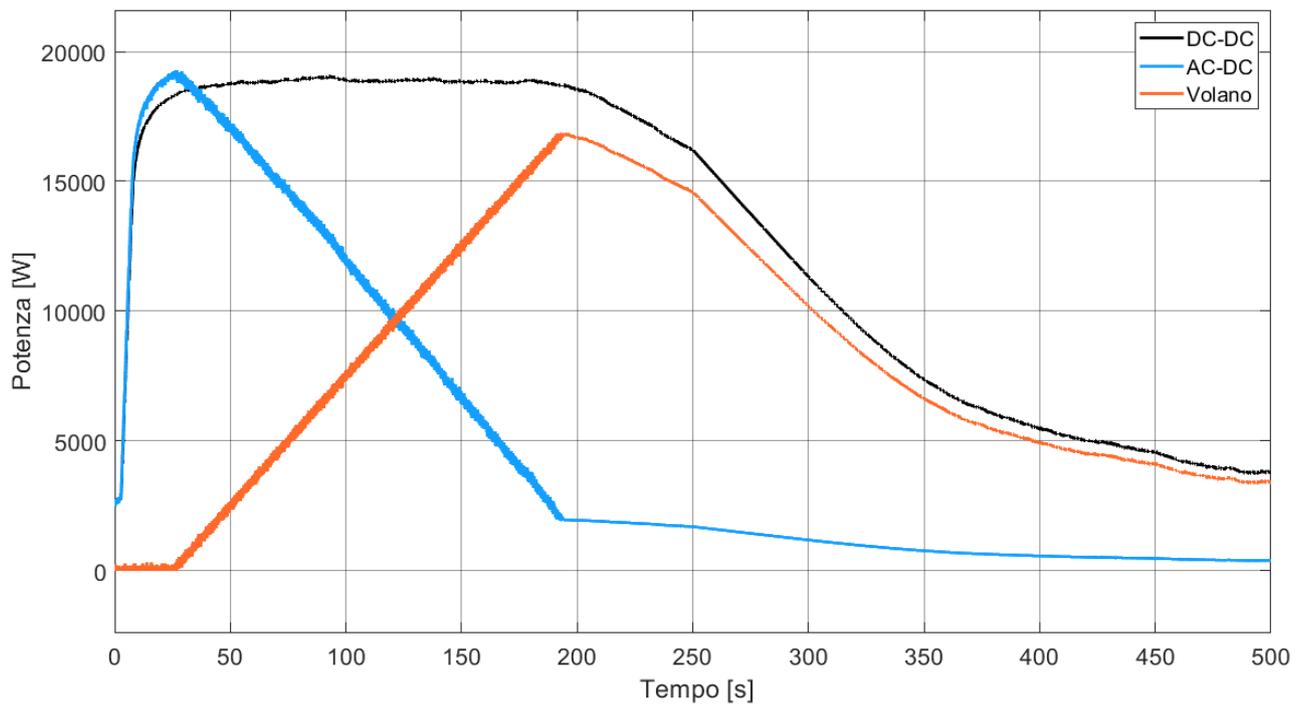


Figura 9: Potenze DCDC (verso la batteria), AC-DC (dalla rete elettrica) e del volano durante la ricarica

L'andamento delle potenze ed energie durante la ricarica sono riportati in Figura 9 e Figura 10; questo test preliminare mostra come la prima parte della ricarica avvenga prevalentemente dalla rete elettrica, che poi nel tempo scende di valore per passare ad una seconda parte della ricarica prevalentemente svolta dal volano. Verso la batteria, dopo un primo tratto in cui la potenza cresce con un rate controllato, la potenza si assesta ad un valore vicino a 20 kW, per poi scendere con il tipico andamento della ricarica a Tensione costante.

Si ricorda infatti che la ricarica delle batterie avviene in due fasi: una prima fase a corrente costante che avviene ad alta potenza, una seconda fase, che comincia quando la tensione di batteria raggiunge il suo valore massimo, a tensione costante, con una rapida decrescita della potenza.

Entrambi le sorgenti di potenza, hanno in questa ricarica preliminare, raggiunto il loro valore nominale, ovvero 20 kW, rispettano quindi i dati di progetto.

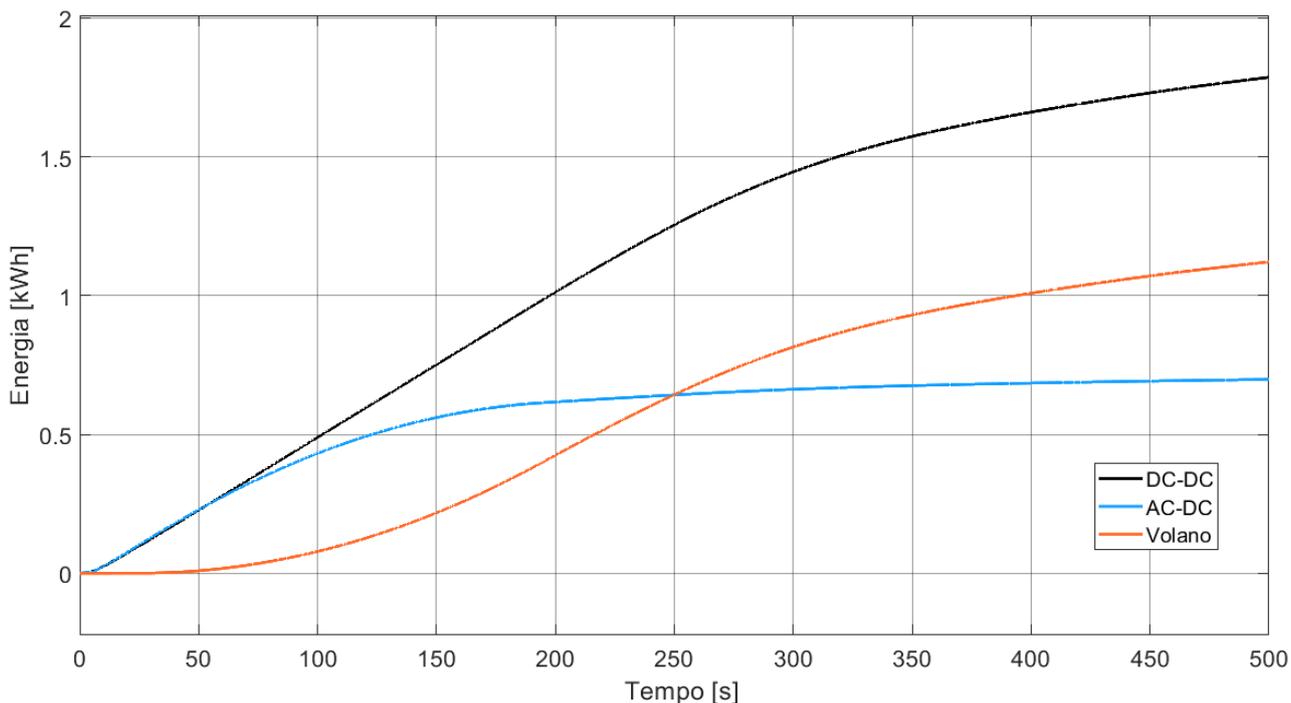


Figura 10: Andamento delle energie della rete elettrica (AC-DC), dal volano e verso la batteria.

Successivamente alla ricarica del minibus, il volano deve essere riaccelerato per tornare al numero di giri nominale pronto per la successiva ricarica.

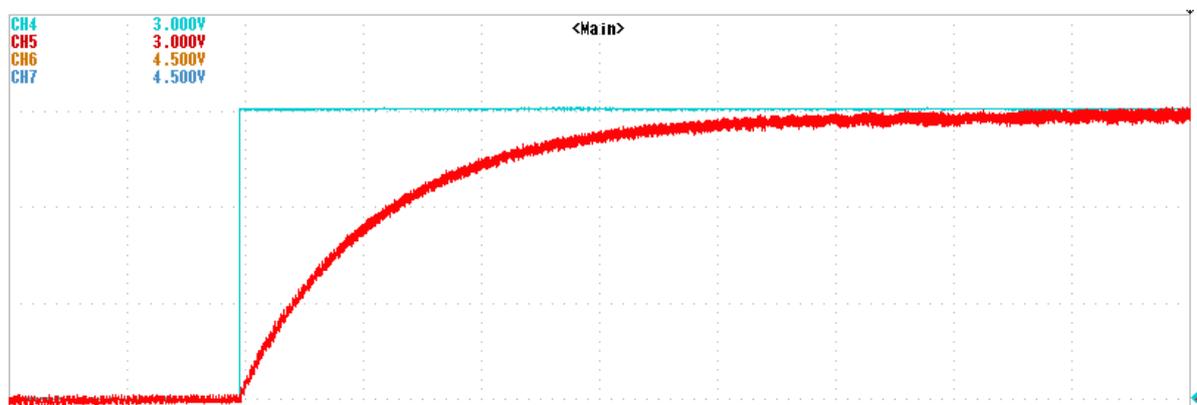


Figura 11: Transitorio di carica del volano da 0 rpm a velocità nominale. Asse x 4 min/div

In Figura 11 si nota il transitorio di ricarica del volano partendo da 0 rpm fino a raggiungere il regime nominale di 3250 rpm.

Si allegano di seguito alcune schermate relative alle correnti e tensioni sui convertitori DCDC e ACDC in prove a potenza ridotta e nominale

Test sul convertitore ACDC

AC-DC collegato alla rete elettrica

Test preliminare a potenza ridotta

Celeste: corrente in ingresso all'AC-DC di rete durante una fase di ricarica. 2 A/div

Verde: corrente di asse diretto che deve essere controllata a zero. 1 A/div

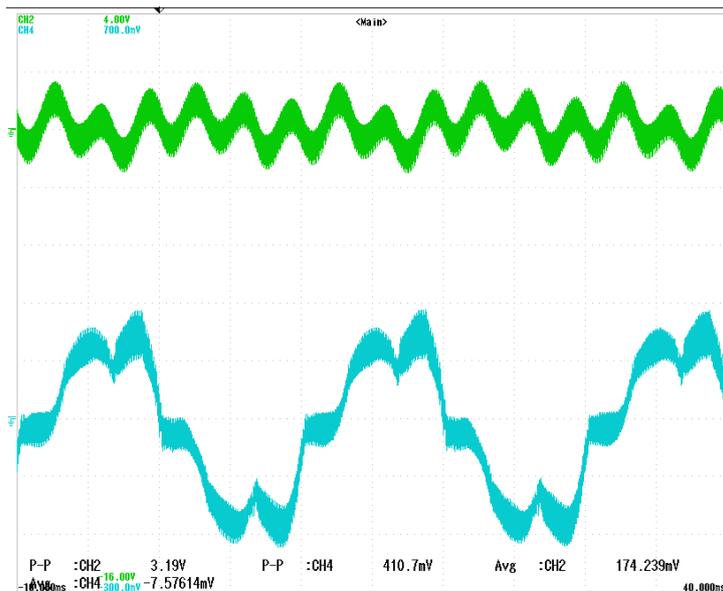


Figura 12: Valori di corrente sul convertitore ACDC collegato alla rete elettrica

Prova a potenza nominale

Giallo: armonica fondamentale concatenata lato rete

Verde: tensione concatenata V_{ab} in ingresso all'AC-DC

Rossa e fucsia: correnti di fase 30 A/div

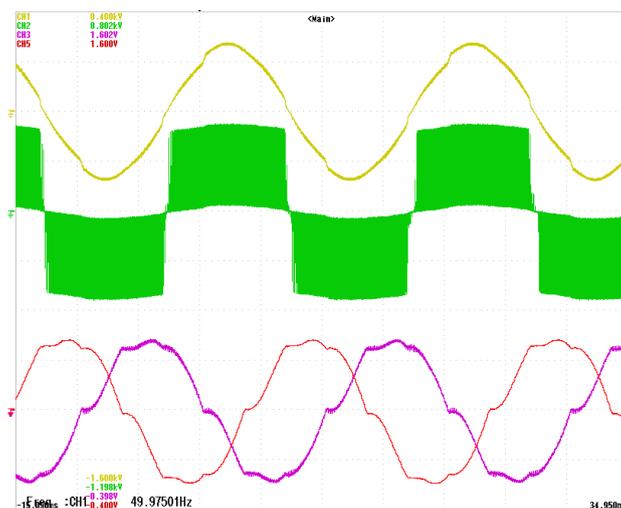


Figura 13: Valori di tensione e corrente in un test a Potenza nominale

Test sul convertitore DCDC

Fase di ricarica del veicolo, tracce relative al DC-DC di uscita.

Celeste: corrente fase A del DC-DC di ricarica, durante una fase di ricarica. 20 A/div

Verde: tensione ai capi dell'induttore (traccia invertita), duty-cycle circa 50%.

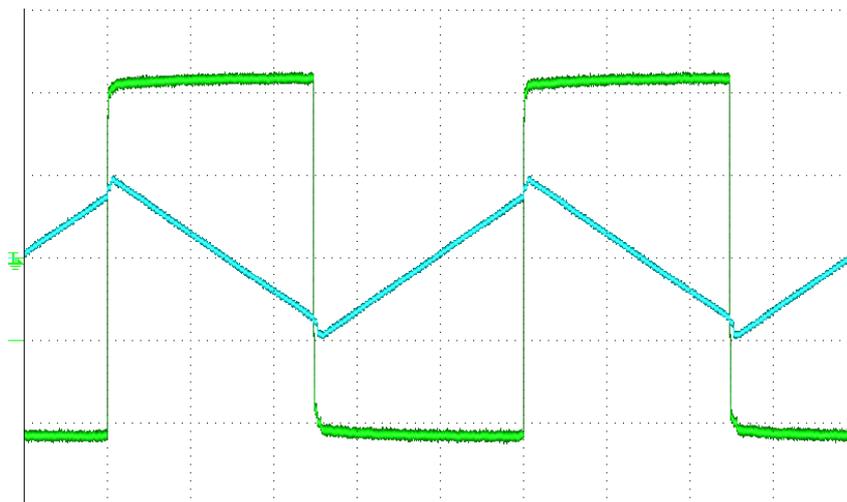


Figura 14: Correnti e tensioni relative al DCDC di uscita

Azionamento elettrico riferito al volano

Funzionamento in ricarica.

Giallo: armonica fondamentale nella tensione concatenata estratta tramite filtraggio.

Verde corrente fase A della macchina elettrica durante la fase di ricarica del volano. 5 A/div

Fucsia: angolo elettrico.

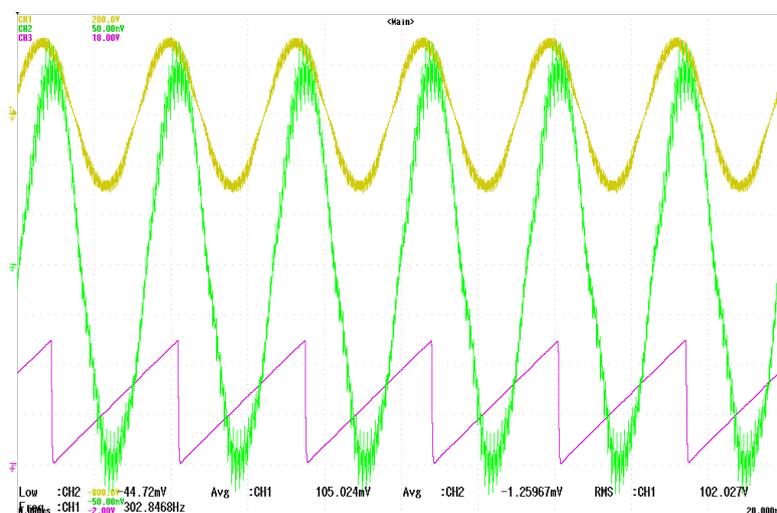


Figura 15: Valori di tensione, corrente e di fase dell'azionamento del volano

3 Conclusioni

Questa linea di attività riguardava lo sviluppo di un sistema di trasporto per veicoli elettrici a ricarica rapida con accumulo stazionario di terra.

Nella prima annualità si è monitorato una linea di autobus esistente eseguita con minibus elettrici (la linea ATAC 117) e si è sviluppato un modello di simulazione per il dimensionamento di un nuovo sistema di accumulo e una stazione di terra per la ricarica rapida al capolinea di tale tipologia di bus.

Nella seconda annualità, insieme all'università di Firenze e di Roma 3 sono stati progettati e realizzati i vari dispositivi di bordo, come un nuovo sistema di accumulo ed un nuovo azionamento e di terra, come una stazione di ricarica con un armadio elettrico e un accumulo inerziale per il livellamento della potenza richiesta alla rete elettrica.

Nella presente annualità sono stati assemblati tutti i nuovi componenti sul minibus in dotazione all'università di Firenze ed è stata fatta una sperimentazione eseguendo un profilo di missione di test con successiva ricarica alla stazione realizzata.

Il veicolo è in grado di eseguire i profili di missione per i quali è stato progettato, avendo la possibilità di erogare oltre 27 kW (in batteria), senza quindi riduzioni di potenza. Il consumo energetico è stato di circa 0.6 kWh/km, dello stesso ordine di grandezza della configurazione originale. Il veicolo è stato ricaricato con la nuova stazione di ricarica in grado di erogare una potenza massima di 40 kW. Nella presente sperimentazione sono state fatte delle prove preliminari con una potenza ridotta di 20 kW, ma tutte le funzionalità del sistema sono state testate, riuscendo ad erogare comunque 20 kW sia dalla rete elettrica, sia dall'accumulo inerziale. È stata poi testato il funzionamento di ricarica del volano, per riportarlo, dopo la ricarica del minibus, fino al suo regime di rotazione nominale. Tale test è stato fatto mettendo in movimento il volano da un rpm nullo fino al suo regime nominale di 3250 rpm con successo.