



Ricerca di Sistema elettrico

## Realizzazione e sperimentazione di una stazione di ricarica rapida in c.c. nel C.R. Casaccia

*A. Genovese, F. Ortenzi, B. Di Pietra, D. Sbordone*

## REALIZZAZIONE E SPERIMENTAZIONE DI UNA STAZIONE DI RICARICA RAPIDA IN C.C. NEL C.R. CASACCIA

Antonino Genovese , Fernando Ortenzi, Biagio DiPietra (ENEA)

Danilo Sbordone ( DIAEE Univ. Di Roma "La Sapienza")

Settembre 2013

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2012

Area: Razionalizzazione e risparmio nell'uso dell'energia elettrica

Progetto: Prodotti e processi per il miglioramento dell'efficienza energetica nell'elettromobilità

Obiettivo: Ricarica rapida in c.c.

Responsabile del Progetto: Antonino Genovese, ENEA

Si ringrazia l'Università di Roma "Sapienza" DIAEE – Sezione di Ingegneria Elettrica ed in particolare la prof.ssa Maria Carmen Falvo e il prof. Luigi Martirano per il loro contributo.

Si ringraziano tutti i colleghi ENEA che hanno fattivamente collaborato alla realizzazione della stazione di ricarica presso i laboratori ENEA dell'unità UTTEI-VEBIM nonché alla esecuzione delle prove descritte nel seguito del presente rapporto.

## Indice

SOMMARIO.....	4
INTRODUZIONE.....	5
1 RICARICA RAPIDA PER VEICOLI ELETTRICI.....	7
1.1 LA VARIAZIONE DI TENSIONE SULLA RETE BT.....	8
1.2 COMPENSATORI STATICI.....	10
1.3 LA STAZIONE DI RICARICA INTEGRATA.....	11
2 DESCRIZIONE DELL'IMPIANTO SPERIMENTALE DI PROVA.....	12
2.1 STAZIONE DI RICARICA RAPIDA CHAdeMO.....	12
2.2 IL VEICOLO NISSAN LEAF.....	15
2.3 IL COMPENSATORE STATICO.....	16
2.4 IL SISTEMA DI MISURA.....	16
3 CARATTERIZZAZIONE DEL CARICABATTERIE.....	17
4 STAZIONE DI RICARICA RAPIDA INTEGRATA.....	29
5 CONCLUSIONI.....	36
6 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	37
7 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	37

## Sommario

La ricarica rapida dei veicoli elettrici richiede il ricorso a sistemi di ricarica di discreta potenza che possono indurre fenomeni indesiderati sulla rete locale di distribuzione. L'accoppiamento tra un caricabatterie con un compensatore statico completo di sistema di accumulo, permette di ridurre gli effetti negativi contribuendo a fornire una quota della potenza reattiva se necessaria e ad immettere potenza attiva come supporto alla rete. Nel presente rapporto si riportano le esperienze condotte presso il laboratorio ENEA della Casaccia per la realizzazione di una stazione di ricarica rapida integrata ossia composta dall'accoppiamento di una stazione di ricarica con un compensatore statico completo. L'evidenza delle prove ha indicato come la ricarica rapida sia ormai realtà commerciale ma ha posto in luce la necessità di avere prodotti che presentino soluzioni tali da ridurre gli impatti sulla qualità della potenza di rete ( distorsione armonica ridotta). Le prove hanno evidenziato come un utilizzo a bassa potenza non sia energeticamente utile per il basso rendimento della stazione e per l'elevato tasso di distorsione armonica della corrente di alimentazione. L'uso del compensatore completo è stata positivamente verificato ed ha dimostrato come un sapiente accoppiamento dei due dispositivi possa contribuire a migliorare le prestazioni delle reti in BT localmente, specialmente in condizioni transitorie come l'evenienza di una ricarica rapida.

L'attività descritta nel "Capitolo 4 - Stazione di ricarica rapida integrata" è stata condotta in collaborazione con il dipartimento DIAEE – Sezione di Ingegneria Elettrica, dell'Università di Roma Sapienza, la quale ha messo a disposizione le proprie competenze e la piattaforma LabView di monitoraggio e controllo delle reti elettriche e termiche sviluppata nell'ambito dell'Accordo di Collaborazione in essere con ENEA per quanto attiene all'Area "Razionalizzazione e risparmio nell'uso dell'energia", Progetto C.1.

## Introduzione

La mobilità elettrica è stata sinora considerata come una delle strategie utili per contrastare l'effetto negativo delle emissioni provenienti dai veicoli dotati di propulsore "convenzionale" ossia utilizzando un combustibile di derivazione fossile. Gli interventi attuati negli ultimi decenni nella maggioranza dei casi hanno confermato l'interesse per il veicolo elettrico ma hanno evidenziato una visione strettamente legata al contesto delle emissioni "in situ" piuttosto che alla finalizzazione di una strategia di diffusione su scala maggiormente ampia che affronti anche gli aspetti energetici. Le difficoltà incontrate per una diffusione della mobilità elettrica provengono da diverse obiezioni che in passato sono state sollevate nei confronti del veicolo elettrico. Tali contestazioni hanno contribuito a creare una diffidenza dell'utilizzatore finale verso la tecnologia elettrica per la mobilità personale e delle merci. L'obiezione riscontrabile con maggiore frequenza è quella legata alle prestazioni del veicolo elettrico in comparazione ad un veicolo convenzionale. In particolare si fa sovente riferimento ad una carenza di autonomia del veicolo rispetto alle esigenze degli "end-user".

Questa osservazione ha trovato nel passato un riscontro reale legato fortemente alla tradizionale tecnologia dei sistemi di accumulo al piombo. Il connubio tra ridotta energia specifica accumulata e bassa potenza rispetto al peso imbarcato negli accumulatori al Pb hanno connotato negativamente i veicoli elettrici. Attualmente i sistemi di accumulo al Pb utilizzabili per l'elettromobilità garantiscono una densità di energia compresa tra 25 e 40 Wh/kg con una potenza specifica variabile tra 140 e 350 W/kg [1][2]. La differenza delle prestazioni è funzione delle specifiche applicazioni per cui gli accumulatori al piombo vengono progettati. In particolare nell'ambito del veicolo elettrico puro (BEV) la tecnologia impiegata nei sistemi di accumulo al Pb prevede di massimizzare le prestazioni relative all'energia specifica (energy oriented) mentre nel caso di veicoli ibridi (HEV) ci si orienta verso una ottimizzazione delle prestazioni in potenza (power oriented). Gli sforzi tecnologici hanno consentito di superare i limiti evidenziati grazie alla realizzazione di sistemi di accumulo, basati su celle al Lt-ioni, dalle caratteristiche elettriche avanzate capaci di incontrare le esigenze di una larga parte di utilizzatori. La tecnologia Lt-ioni ha posto sul mercato prodotti in grado di fornire alte potenze specifiche (sino a 3000 W/kg) ma anche dispositivi ottimizzanti l'energia specifica con valori di 200 Wh/kg. Questi notevoli avanzamenti hanno posto fine all'era del Pb facendo progredire notevolmente le prestazioni dei veicoli elettrici.

La disponibilità di sistemi di accumulo ad alta energia specifica ha consentito di portare l'autonomia dei veicoli elettrici a valori di interesse per una larga parte della popolazione residente all'interno della cinta urbana o in zone limitrofe ad essa. La tabella 1 [3] riassume le caratteristiche tipiche dei veicoli elettrici in commercio da cui si evidenzia che l'autonomia mostra valori di notevole interesse anche se inferiori ai veicoli convenzionali.

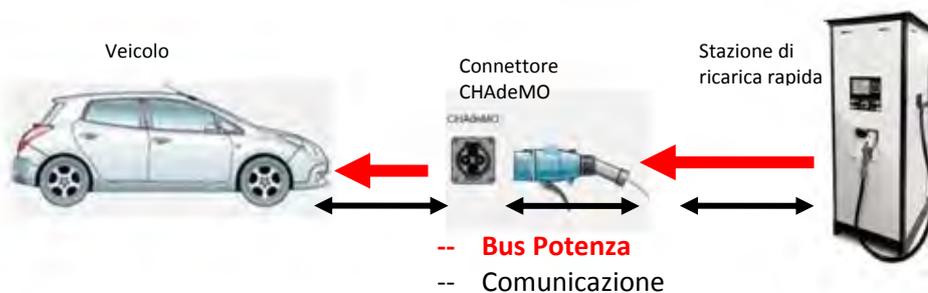
**Tabella 1. Principali caratteristiche dei veicoli elettrici sul mercato (CEI-CIVES)**

	Autovetture	Furgoni	Minibus	Bus urbani
Autonomia (km)	120-250	100-160	140-200	150-250
Velocità max (km/h)	100-130	80-110	80	70
Velocità continua (km/h)	100	80	60	60
Pendenza superabile (%)	25	20-25	15-20	12-15
Accelerazione 0-50 km/h (s)	6-9	10-15	12-18	15-20

L'attuale autonomia dei veicoli elettrici incontra positivamente le esigenze di quel parte di mobilità privata i cui spostamenti possono essere associati ad attività quotidiane come spostamenti casa-lavoro o attività di

carattere commerciale. Ad esempio uno studio [4] degli spostamenti giornalieri a Roma mostra che il 40% dei veicoli privati che si muovono entro l'area del GRA ( Grande Raccordo Anulare diametro medio 21 km, lungo 68 km racchiudente una superficie di circa 35 km<sup>2</sup> ) percorrono 25 km senza uscire dall'area. La restante parte esce al di fuori dell'area di controllo ma con percorrenze compatibili nella maggior parte con le autonomie dei moderni veicoli elettrici. In definitiva autonomia e prestazioni su strada sono adesso paragonabili tra veicoli elettrici e convenzionali che si muovono in aree urbane anche estese.

Attualmente la nuova sfida del veicolo elettrico è quella di eguagliare la "performance" in ricarica ossia di poter eseguire un pieno di energia con modalità affini ai veicoli convenzionali. I pochi minuti richiesti per un pieno di combustibile fossile rappresentano un traguardo fantastico che appare momentaneamente non raggiungibile. Tuttavia gli accumulatori al Lt-ioni presentano caratteristiche in ricarica tali da favorire la ricarica a valori di 2C o maggiori. La riduzione dei tempi di ricarica è quindi una realtà che prevede lo sviluppo e l'installazione di specifiche stazioni di ricarica veloci. Queste stazioni sono caratterizzate dal possedere una potenza di diverse decine di kW e di essere collocate su una rete in BT (Bassa tensione). Generalmente le stazioni di ricarica veloce sono del tipo in c.c. ( corrente continua) ossia si interfacciano con il sistema di accumulo direttamente secondo il modo 4 della IEC 61851. In tale modo il caricabatterie è sito a terra presso la stazione di ricarica ed il bus di collegamento di potenza con il veicolo è in c.c. . Il controllo della ricarica avviene mediante una comunicazione veicolo-stazione che consente di attuare la regolazione in remoto dal veicolo mediante un idoneo protocollo di comunicazione ( Figura 1). Uno degli standard "di fatto" che attualmente il mercato provvede a seguire è basato sul sistema "CHAdEMO" che consente valori massimi di 62.5 kW di potenza in c.c. ( 500 V @125 A). Questo standard nasce in Giappone dall'alleanza Nissan-Renault ma ha trovato in altri costruttori giapponesi larga accettazione. Nissan Leaf, Mitsubishi i-MiEV, Citroen C-ZERO e Peugeot iOn sono equipaggiate con sistemi di ricarica basati sul protocollo CHAdEMO. Il protocollo CHAdEMO provvede al canale di comunicazione tramite una linea CAN in grado di fornire il corretto supporto alle azioni di controllo.



**Figura 1. Stazione di ricarica rapida CHAdEMO**

La ricarica veloce dei veicoli appare quindi condizionata dalla necessità di avere la disponibilità di una sorgente in c.a. (corrente alternata) nella rete di bassa tensione in cui eseguire il collegamento elettrico della stazione. Il collegamento alla rete in BT di carichi di tali dimensioni potrebbe portare ad un decadimento della qualità dell'energia distribuita sia per gli effetti del carico non-lineare rappresentato dal sistema di conversione ac/dc interno alla stazione di ricarica sia per un non idoneo collegamento di linea inducente un calo della tensione di linea. Questo effetto diviene maggiormente sensibile qualora le stazioni di ricarica fossero più di una unità coincidendo temporalmente i prelievi di potenza lungo la medesima linea in BT.

La valutazione degli effetti in caso della collocazione di una stazione di ricarica rapida saranno valutati sia per le ricadute sulla rete di distribuzione ma anche per una determinazione delle prestazioni in termini di qualità della potenza e di efficienza energetica. Il coordinamento con un compensatore di energia statico

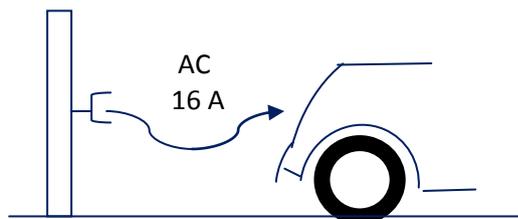
sarà posto in essere al fine di verificare come la strategia di compensazione della potenza prelevata al nodo di rete in BT possa contribuire a limitare i problemi della caduta della tensione di linea durante le fasi di prelievo da parte della stazione di ricarica.

## 1 Ricarica rapida per veicoli elettrici

La ricarica dei sistemi di accumulo elettrico dei veicoli elettrici, o più comunemente la ricarica dei veicoli elettrici, è l'operazione che consente di immagazzinare energia elettrica da poter successivamente essere prelevata per l'alimentazione dei motori di trazione del veicolo. Lo scenario normativo indica in numero di 4 le modalità per poter eseguire le operazioni di ricarica. Ognuna di queste modalità impone scelte progettuali a carico del costruttore del veicolo ma rappresentano un vincolo anche per la gestione quotidiana del mezzo. La norma di riferimento IEC-61851-1 prevede i seguenti modi :

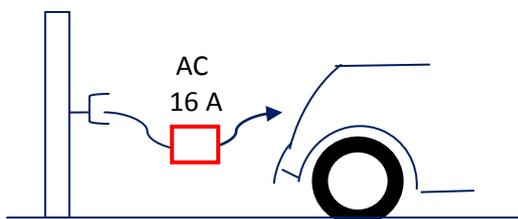
### Modo 1 Ricarica in ambiente domestico

E' una ricarica del tipo lento che richiede in genere 6-8 ore, ammessa in ambienti privati con una corrente massima di prelievo di 16 A. In queste condizioni è possibile utilizzare una presa domestica da 16 A per collegare il veicolo alla rete elettrica. Il caricabatterie è collocato a bordo.



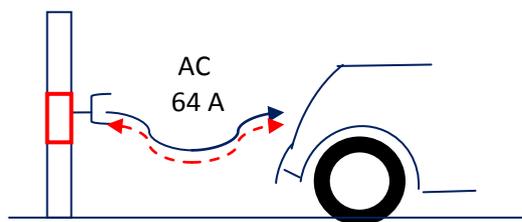
### Modo 2 Ricarica in luogo pubblico e/o domestico

La ricarica è sempre di tipo lento ma è consentita la ricarica anche in ambiente aperto al pubblico sempre con una presa da 16 A. Viene previsto l'utilizzo di un dispositivo ( Control Box) che tramite un sistema di tipo PWM (Pulse width modulation) provvede alla sicurezza durante le operazioni di ricarica. Il collegamento tra veicolo e Control Box prevede l'utilizzo di un conduttore pilota.



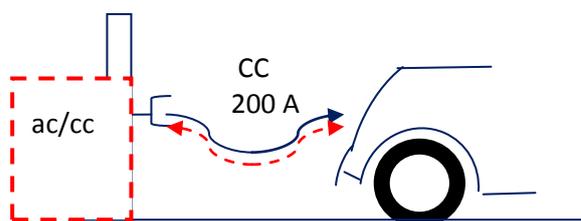
### Modo 3 Ricarica in ambiente domestico e/o pubblico

In questo caso la ricarica può essere lenta ma anche veloce ( con tempi tra 30 minuti ed 1 ora) e la connessione alla rete è attuata con connessione diretta del veicolo alla rete utilizzando un cavo specifico corredato di conduttore pilota e di spine specifiche. Il sistema di sicurezza PWM è direttamente implementato nella colonnina di ricarica lato presa c.a. E' possibile realizzare sistemi di ricarica a 63 A 400 V.



**Modo 4 Ricarica in ambiente pubblico**

Questo è il caso della ricarica rapida in c.c. utilizzando un caricabatterie in c.c. esterno al veicolo e collegando il veicolo tramite un cavo dotato di conduttore di controllo. Lo standard CHAdeMO si colloca in questo modo.



Quest’ultimo caso è quello che interessa maggiormente essendo avviato ormai un processo di industrializzazione a livello internazionale che punta sulla produzione di veicoli elettrici liberi dal sistema di conversione della potenza a bordo. 500 V e 125 A sono i valori massimi di tensione e corrente che sono ammissibili in CHAdeMO ma altre soluzioni sperimentali hanno aperto la strada a valori di potenza superiori ( ENEA nel Progetto Piattaforma Bus Innovativo ha sperimentato in BreadaMenariniBus una stazione di ricarica da 200 kW con 800 V e 250 A per la ricarica di batterie al Lt-ione per la trazione di bus elettrici/ibridi ricaricabili in 30 minuti).

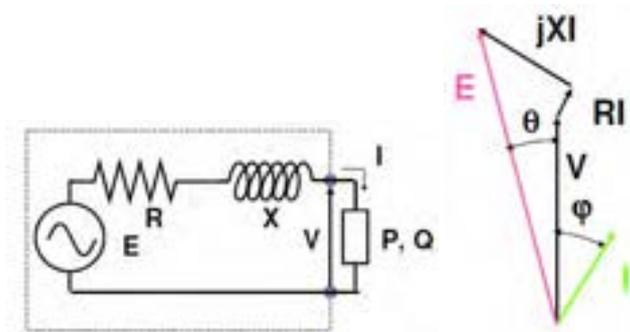
Le potenze messa in campo per la carica rapida iniziano ad essere significative, e sono soggette ad ulteriori incrementi se le ricariche si spingono verso condizioni ultrarapide ( 3C ed oltre) in grado di abbattere i tempi di ricarica a valori bassi da essere competitivi con la ricarica convenzionale.

Di contro la ricarica rapida può produrre effetti indesiderati sulla rete di distribuzione in BT in quanto il carico può risultare oneroso in determinate condizioni. Se ad esempio il carico in cabina MT/BT è elevato un carico aggiuntivo di 50 kW o maggiore se si considerano più veicoli in fase di ricarica può indurre fenomeni di riduzione della tensione nominale di rete non desiderati. Inoltre occorre considerare che il sistema di ricarica veloce è tipicamente un sistema non lineare che introduce fastidiose e non desiderate armoniche di corrente che a fronte della potenza nominale assorbita richiedono una maggiore attenzione sul dimensionamento dei cavi. Il caricabatterie è dunque un carico importante per la rete BT in quanto può impattare sulle condizioni di fornitura ma produrre anche riduzioni del rendimento della macchina medesima.

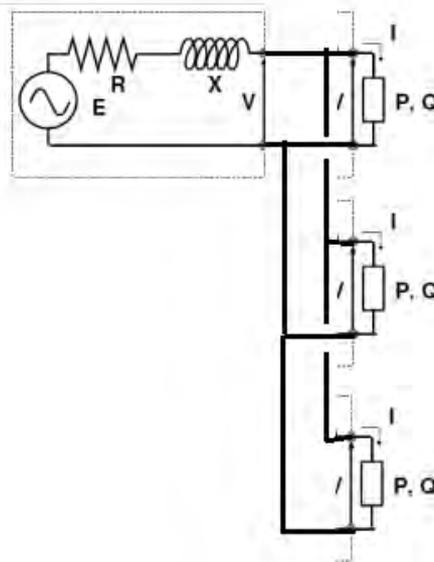
**1.1 La variazione di tensione sulla rete BT**

Nell’ipotesi che la rete sia lineare possiamo ipotizzare che la rete che alimenta la stazione di ricarica sia costituita da un generatore e da una serie di reattanza e resistenza X ed R. Il carico assorbe una certa potenza attiva P e reattiva Q. La variazione di potenza assorbita induce una variazione nella corrente di linea e di seguito una caduta di tensione maggiore sulla linea con conseguente riduzione della tensione nominale di alimentazione. Questo avviene anche in caso di richiesta di potenza reattiva che carica la linea ulteriormente con riduzione della tensione. In figura 2 è mostrato in sintesi l’effetto sulla tensione V. Nel

caso di più carichi collegati al medesimo quadro può accadere che un forte ed improvviso assorbimento induca una riduzione della tensione  $V$  a discapito dei carichi collegati allo stesso nodo (figura 3).



**Figura 2. Effetto del carico sulla tensione di alimentazione**



**Figura 3. Riduzione tensione su carichi collegati al medesimo nodo in BT**

Gli effetti di una riduzione della tensione di alimentazione si traducono, a pari potenza attiva assorbita, in un superiore assorbimento degli altri dispositivi collegati e quindi in un peggioramento delle perdite. Per carichi elettronici la riduzione eccessiva della tensione potrebbe anche condurre ad interruzioni del servizio.

Mantenere costante il valore della tensione è possibile mediante alcuni interventi. Il primo si basa sull'intervento diretto sulla rete ossia con la sostituzione delle linee con linee a bassa reattanza e resistenza oppure con il raddoppio di linee esistenti. Questa soluzione nel caso di piccole distanze potrebbe essere applicabile ma spesso gli aspetti economici sono ostacolo a questa azione a meno di importanti ragioni di affidabilità o di sicurezza che lo giustifichino. Una soluzione alternativa consiste nella introduzione di circuiti di compensazione che consentano di mantenere costante la tensione al nodo. I sistemi di compensazione possono agire sentendo le variazioni al nodo ed attuando strategie di regolazione per stabilizzare le variazioni. L'immissione di potenza attiva nelle vicinanze di un carico particolarmente oneroso potrebbe ridurre gli assorbimenti lungo la linea e contenere la riduzione di tensione a valori tali da ridurre al minimo

gli effetti negativi. La presenza di compensatori sarebbe inoltre in grado di fornire potenza reattiva qualora il carico ne facesse richiesta riducendo anche in questo caso il prelievo dalla rete.

### 1.2 Compensatori statici

I compensatori statici di potenza reattiva (STATCON .- static converter) sono dispositivi impiegati prevalentemente per il controllo della tensione nei nodi di trasmissione e trasporto di energia elettrica; impiegano un inverter come generatore di tensione alternata allacciato in derivazione alla rete tramite trasformatore di accoppiamento e collegato ad un banco di condensatori lato corrente continua. (figura 4) Il funzionamento dell'inverter (costituito da interruttori statici di potenza GTO o IGBT) è analogo ad una macchina sincrona ideale che genera una terna simmetrica di tensioni con il vantaggio di avere inerzia nulla e quindi tempi di risposta praticamente nulli. La regolazione della potenza reattiva scambiata tra l'inverter e la rete viene controllata variando l'ampiezza della tensione prodotta in uscita. Quando la tensione generata dall'inverter supera la tensione di rete lo STATCON assorbe potenza reattiva capacitiva, quando la tensione di rete è superiore a quella generata allora la potenza reattiva assorbita è di tipo induttivo. Un interessante tipologia di compensatore per reti in BT è quello con accumulo. In questo caso il compensatore è in grado di fornire anche energia attiva alla rete prelevandola dal sistema di accumulo e viceversa può accumulare l'energia attiva prelevandola dalla rete. Gli anelli di regolazione possono anche provvedere a regolare la potenza reattiva scambiata con la rete rendendo completo il sistema di scambio tra rete e compensatore.

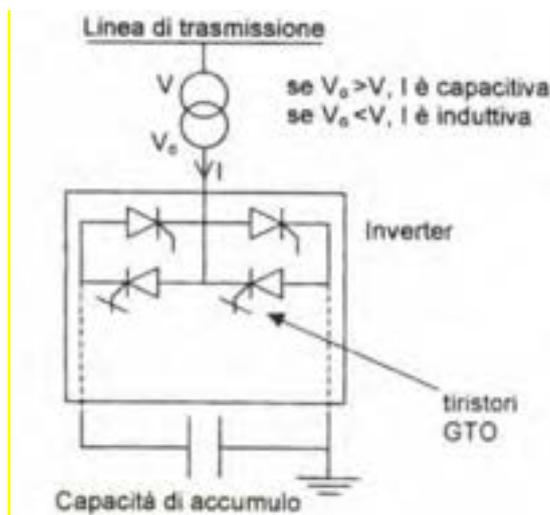


Figura 4. Schema di inserzione di uno STACON- [7]

Sul'architettura sopra descritta si basano i compensatori statici di potenza attiva e reattiva STATCOM impiegati maggiormente nelle reti bt in contesti civili o industriali con funzioni di livellamento dei picchi di assorbimento di potenza dalla rete (Peak-Shaving) o appiattimento della curva di carico (Load levelling).

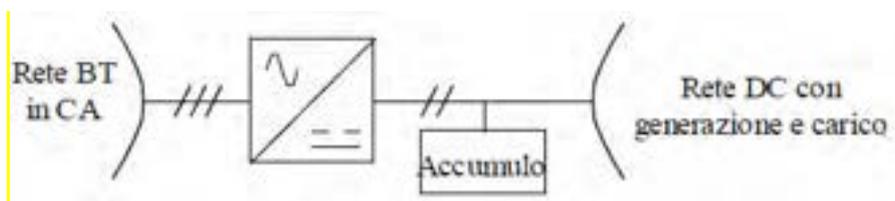


Figura 6. Schema generale del compensatore statico con accumulo (STATCOM)

Nel caso di reti in BT su cui gravitano diversi carichi intermittenti, come ad esempio i sistemi di ricarica dei veicoli elettrici, l'utilizzo di apparati di siffatta natura concorre ad alleggerire la rete e mantenere costante la tensione al nodo. L'integrazione con sistemi di generazione in c.c. spinge ad un utilizzo più completo favorendo ad esempio sia la ricarica dell'accumulo che lo scambio dell'energia prodotta da fonte rinnovabile direttamente con la rete in BT, oltre a mantenere le caratteristiche di intervento a soccorso della rete.

### 1.3 La stazione di ricarica integrata

Come già indicato nell'introduzione la ricarica rapida richiede l'impegno di potenze installate non elevate ma non totalmente trascurabili. Prendendo a riferimento lo standard CHAdeMO la potenza nominale di una stazione di ricarica rapida idonea alla ricarica di veicoli elettrici per la mobilità personale è di 65 kVA. Una potenza di tale taglia è sensibile a divenire fonte di disturbi alla rete con cali della tensione localizzati alle linee afferenti al quadro di distribuzione. Qualora il presupposto della robustezza della cabina di trasformazione MT/BT non fosse verificato si potrebbero avere problemi anche sulle linee dislocate dal trasformatore in giu.

Una possibile soluzione è quella di accoppiare alla stazione di ricarica un compensatore statico in grado di seguire le variazioni della rete localmente e di apportare quelle quantità di potenza attiva/reattiva necessarie a mantenere stabile il ramo della rete di distribuzione soggetto a carico rapido ed aleatorio.

La sperimentazione effettuata mirava a verificare come una stazione integrata si comporta sotto il profilo del carico sulla rete. La stazione integrata è realizzata utilizzando una stazione di ricarica rapida in c.c. di disponibilità commerciale ed un compensatore statico integrale realizzato nell'ambito della RdS nella annualità precedente.

I sistemi facenti parte della stazione sono collocati presso la hall tecnologica dell'edificio F-33 del Centro ENEA Casaccia. La collocazione fisica è scelta in funzione di collegamento alla rete elettrica che deve potersi eseguire sul medesimo ramo del quadro di distribuzione.

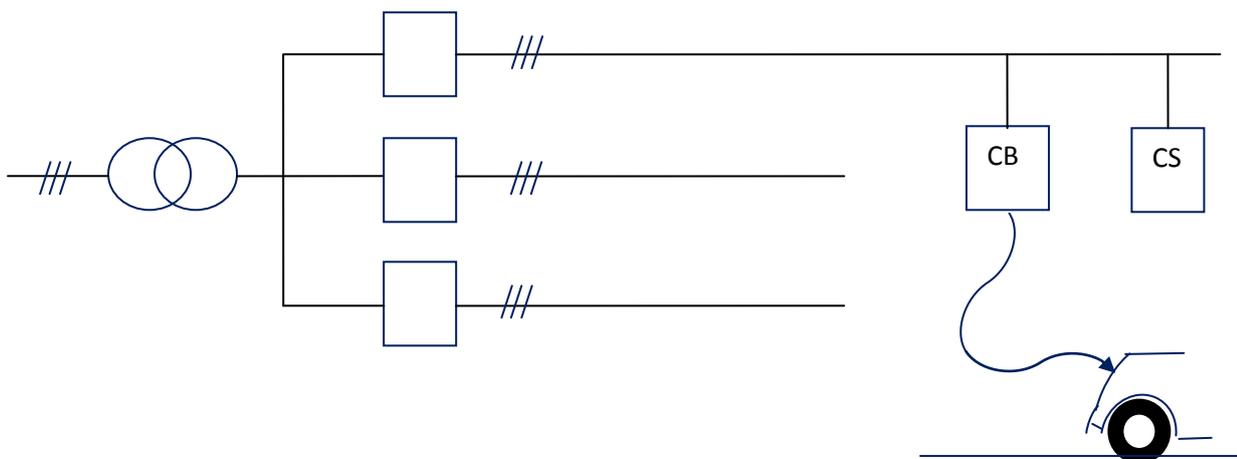


Figura 7. Integrazione sulla linea della stazione di ricarica



Figura 8. La stazione combinata durante le prove

## 2 Descrizione dell'impianto sperimentale di prova

L'esecuzione delle prove per la verifica del comportamento della stazione di ricarica integrata è stata espletata utilizzando un set-up sperimentale come indicato in figura 8. Di seguito sono descritte le caratteristiche principali dei dispositivi utilizzati.

### 2.1 Stazione di ricarica rapida CHAdeMO

Il primo elemento è una stazione di ricarica rapida commerciale in grado di fornire energia secondo lo standard previsto dal veicolo in prova. In particolare la stazione utilizzata è il modello EQC – 50 prodotto da Circutor, dotato di standard CHAdeMO. In figura 9 è riportata la tabella di sintesi delle caratteristiche tecniche della stazione come fornita dal costruttore.

INPUT		
Input voltage	400VAC 3P+N	
Nominal input power	77KVA	
Input frequency	50/60Hz	
OUTPUT		
Maximum rated output current <sup>1</sup>	AC	DC
	32A	125A
Maximum rated output power <sup>1</sup>	22kW	50kW
Maximum output DC voltage	400VAC	500VDC
CHARGE SYSTEM		
	AC	DC
	Mode 3	Mode 4
SOCKETS/PLUGS		
	AC	DC
	Type 2	JEVS G105
MODE 3 ENERGY METER		
Accuracy class in active energy	Class B - EN50470-3	
Accuracy class in reactive energy	Class 2 - EN62053-23	
Meter Standards	EN62052-11, EN62053-21, EN62053-23, EN61010-1	
COMMUNICATIONS		
Ethernet	10/100/1000BaseTX	
GENERAL		
Enclosure Rating	IP54 /IK8	
Operating temperature	-30 to 60°C	
RFID System	ISO/IEC14443A/B	
HMI	LCD 8" screen	
Interface protocol	OCPP / XML protocol	
Rear Light beacon	Three colour led status	
Power limit control	Software limit	
OPTIONAL DEVICES		
Mobile communications	3G/GPRS/GSM	
Harmonics filter (optional integrated harmonic filter module)	5th harmonic 7th harmonic	

Figura 9. Caratteristiche tecniche Circutor EQC-50

La stazione è dotata di due uscite per eseguire l'operazione di ricarica dei sistemi di accumulo dei veicoli: la prima in c.c. secondo lo standard CHAdeMO ossia con corrente di 125 A e tensione massima di 500 V secondo il modo di ricarica 4. La potenza nominale è dichiarata in 77 kVA su rete trifase a 400 V (3P+N). Tuttavia è anche possibile ricaricare il veicolo con il modo 3 ossia in c.a. con una potenza di 22 kW e 32 A di corrente 400 V. Nel caso di ricarica secondo il protocollo CHAdeMO occorre utilizzare l'apposito connettore definito dallo standard JEVS (Japan Electric Vehicle standard) G105-1993 dalla Japan Automobile Research Institute. In figura 10a si riporta una foto del connettore in cui sono presenti sia i cavi di potenza in c.c. per la connessione al bus del veicolo ma anche i segnali di comunicazione (tramite protocollo CAN) che di handshaking veicolo-stazione. In sintesi la figura 11 riporta il layout ed i pin assegnati. Nel caso di utilizzo della ricarica in c.a. occorre servirsi del connettore tipo 2 (Fig. 10b) secondo la norma IEC 62196-2. Questo connettore è utilizzabile anche in corrente trifase a 400 V (questo connettore, perciò, dispone di sette contatti in totale). Con il connettore tipo 2 è possibile raggiungere valori di potenza di ricarica abbastanza elevati: con cavo fisso fino a 43 kW (63 A/400 V, la cosiddetta ricarica "fast AC"), con cavo staccabile fino a 22 kW (32 A/400 V) come nel nostro caso. Il connettore di tipo 2 è quello ufficialmente raccomandato dall'ACEA (European Automobile Manufacturers' Association) e recentemente scelto dalla Commissione Europea come standard unico nei Paesi membri.



Figura 10 a: Connettore CHAdeMO b: connettore tipo 2 c.a.

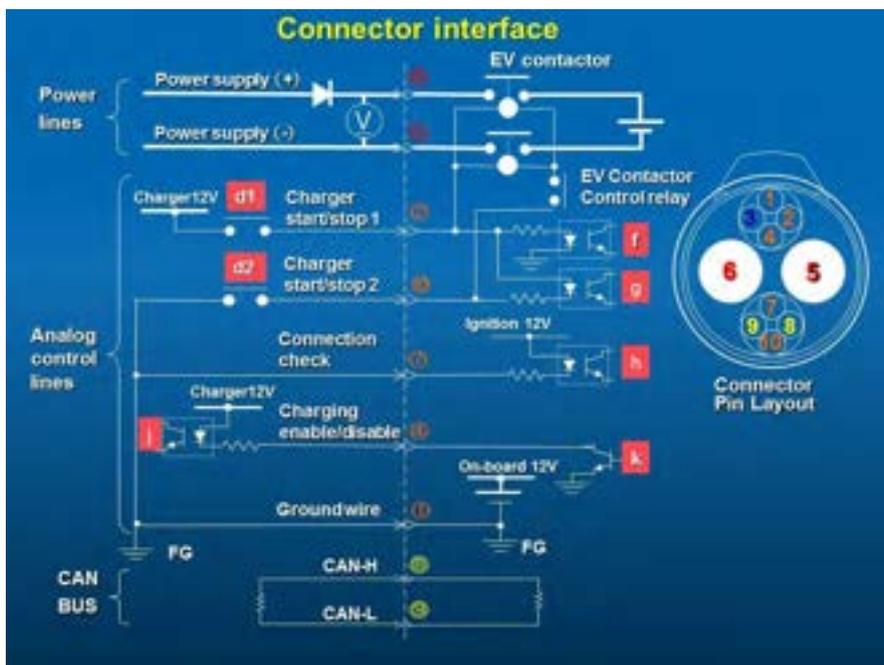


Figura 11 Layout connettore CHAdeMO

La stazione di ricarica eroga potenza dopo aver verificato la connessione ( vedi figura 12) con il veicolo e previo riconoscimento dell’utente che viene eseguito con tecnologia RFID ( Radio Frequency Identification). Uno schermo LCD presente sulla stazione attua l’interfaccia con l’utente che può conoscere tempi di ricarica, energia ricarica e SOC ( State of Charge) del sistema di accumulo del veicolo.



Figura 12 Collegamento alla stazione di ricarica del veicolo tramite connettore CHAdeMO



Figura 13 Interfaccia grafica stazione Circutor

## 2.2 Il veicolo Nissan Leaf

Le prove espletate hanno avuto luogo grazie alla disponibilità di un carico costituito dal sistema di accumulo di una Nissan Leaf. Questo veicolo è dotato di un pacco batterie della capacità di 24 kWh ( disponibili 16 kWh al 67% del DoD) composta da 48 moduli con 4 celle ciascuno ( per un totale di 192 celle). La potenza è di 90 kW avendosi una densità di potenza di 500 W/kg (scarica a 3C, 2500 W/kg di picco) e una densità di energia di 140 Wh/kg. Il tempo di ricarica secondo la modalità di ricarica rapida con standard CHAdeMO è dichiarata in 30 minuti con una ricarica da 0 a 80% .

Prove preliminari hanno confermato la ricarica in ca. 30 minuti dal 25% al 90% come indicato dalla stazione di ricarica. Con una ricarica successiva si è raggiunto il 98 % di ricarica massima, come mostrato dalla stazione, in circa 25 minuti. La seconda parte della ricarica come si vedrà nel seguito avviene a correnti molto inferiori alla prima ricarica ed i tempi sono pertanto maggiormente lunghi.

Il veicolo è dotato di un indicatore del livello di carica che fornisce una stima della carica accumulata in funzione della guida e quindi del livello di corrente utilizzato per la scarica.

**Tabella 2. Principali caratteristiche delle batterie della Nissan Leaf**

Tipo	Batteria laminata agli ioni di litio
Tensione	403 V
Capacità totale	24 kWh <sup>1</sup> (16 kWh disponibili al 67% DoD )
Potenza di uscita	Oltre 90 kW
Densità di energia	140 Wh / kg
Densità di potenza	2,5 kW / kg
Numero di moduli	48, ciascuno con quattro celle (totale 192 celle)
I tempi di carica:	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Caricabatterie rapido DC50kW (da 0 a 80%): ca. 30 min</li> <li>• In casa-uso AC240V Charging Dock (0-100%): 8 ore</li> </ul>

### 2.3 Il compensatore statico

Il compensatore utilizzato nella sperimentazione è un compensatore statico di collegamento tra la rete in corrente alternata in BT e una rete in corrente continua a 600V, dotato di accumulo elettrochimico e con una potenza nominale dell’inverter di interfaccia pari a 20kW. Il compensatore in oggetto nasce nell’ambito della pianificazione e gestione di un sistema energetico con presenza di impianti di generazione da fonte rinnovabile e di utenze sia in corrente alternata che in corrente continua, con la possibilità di disporre di una quota di accumulo elettrico. Esso riveste un ruolo fondamentale, non solo per migliorare i profili di carico e compensare i disturbi, ma anche per ottimizzare la gestione economica dell’intero insediamento consentendo una certa flessibilità di gestione.

Nell’ambito dell’impiego in un’ottica di utenza in bassa tensione, le funzioni da svolgere sono quelle di compensazione di potenza attiva e reattiva, in modo da ottimizzare la gestione delle sorgenti. Il sistema si comporta da generatore di tensione ed è controllato con una logica tale da consentirne il funzionamento in parallelo alla rete .

Le prestazioni in termini di potenza attiva erogabile sono limitate temporalmente dalle caratteristiche degli accumulatori impiegati aventi energia nominale alla scarica in un’ora non inferiore a 10kWh e capaci di erogare una potenza di 20kW per almeno 15 minuti. Il sistema di conversione è in grado di scambiare continuamente una potenza di 20kVA, in modo da poter comunque svolgere le altre funzioni, come ad esempio di compensazione di potenza reattiva, senza alcuna limitazione delle prestazioni.

### 2.4 Il sistema di misura

La stazione di ricarica è stata sottoposta ad un doppio monitoraggio : il primo relativo al caricabatterie CHAdeMO per la rilevazione del comportamento elettrico ed energetico durante la ricarica del veicolo, il secondo relativo alle grandezze elettriche ( potenza, tensione e corrente) a livello di nodo di collegamento e di cabina per la verifica del comportamento del compensatore.

Il monitoraggio del caricabatterie CHAdeMO è stato eseguito utilizzando il sistema di misura sviluppato dall’Università dell’Aquila per la RdS nell’annualità in corso (RdS/2013/134). Il sistema di misura è stato ideato come una stazione automatica di misura, basata su un PC equipaggiato con una scheda di acquisizione dati e con trasduttori di tensione, corrente e con un sistema di datalogging per le misurazioni della temperatura; per la acquisizione e l’elaborazione dei dati di misura è stato sviluppato un software

dedicato in ambiente National Instruments LabVIEW. L'acquisizione dei valori di tensione e corrente all'ingresso ed all'uscita del convertitore è eseguita con campionamento ad elevata frequenza, in modo da poter valutare correttamente l'efficienza del convertitore anche in condizioni dinamiche. I trasduttori di tensione e di corrente sono stati scelti privilegiando la precisione e la banda passante, con portate individuate a partire dalle specifiche del convertitore da collaudare. L'impiego di trasduttori ad effetto Hall consente di garantire al sistema di misura requisiti di sicurezza elettrica importanti, quali l'isolamento galvanico tra i circuiti di misura ed i conduttori di potenza, con un livello di isolamento fino ad alcuni kV, elevata banda passante grazie al funzionamento in tecnica a ciclo chiuso, possibilità di misura anche componenti significative in DC.

L'applicazione utilizza una scheda National Instruments, modello NI USB-6255; si tratta di un modulo DAQ di acquisizione dati multifunzione della Serie M a prestazioni elevate ottimizzato per ottenere maggiore accuratezza a frequenze di campionamento elevate. NI USB-6225 è utilizzabile per le applicazioni come la registrazione dei dati ad elevato numero di canali e per le misure di segnali di uscita di sensori ad elevata banda passante, come nella applicazione presente. Per l'applicazione sviluppata, sono stati utilizzati 8 canali in configurazione differenziale, per ridurre gli effetti del rumore di modo comune.

Non si è ritenuto necessario l'utilizzo di una scheda ad effettivo campionamento simultaneo, vista possibilità di sviluppare un sistema di misura con frequenza di campionamento sufficientemente elevata da rendere trascurabile il ritardo introdotto dal multiplexer, a fronte di un consistente risparmio nei costi di sviluppo del sistema. Il software di misura ed elaborazione dei dati sperimentali è stato implementato in LabVIEW.

### 3 Caratterizzazione del caricabatterie

La caratterizzazione della stazione di ricarica è uno dei punti in grado di fornire indicazioni sull'impatto delle operazioni di ricarica sulla rete in BT. In primo luogo si è provveduto a registrare le indicazioni fornite dall'interfaccia utente per valutarne la corrispondenza tra la carica immessa nel sistema di accumulo e quella realmente transitata. La tabella 3 mostra due ricariche eseguite con il sistema di accumulo scarico (ca.25 %).

**Tabella 3. Parametri rilevati in ricarica dall'interfaccia utente**

	Orario	Energia erogata	Tempo stimato fine	Stato di carica
		[kWh]	[min]	[%]
27/07/2013	11:05	0.00	45.00	25.00
	11:15	6.00	37.00	50.00
	11:20	8.50	32.00	63.00
	11:25	9.70	29.00	70.50
	11:28	11.30	25.00	80.00
	11:30	12.00	22.00	85.00
	11.35	12.80	0.00	90.00
20/08/2013	12:22	0.00	45.00	28.10
	12:27	2.80	41.00	40.70
	12:32	6.10	37.00	55.30
	12:37	8.70	32.00	68.50
	12:42	10.50	27.00	78.60
	12:47	11.80	22.00	86.20
	12:50	12.30	0.00	90.00

La ricarica avviene in 30 minuti, contro un tempo iniziale stimato in 45 minuti, con un “rifornimento” di 12 kWh. In figura 14 viene riportato l’andamento dell’energia in funzione dello stato di carica indicato dal caricabatterie.

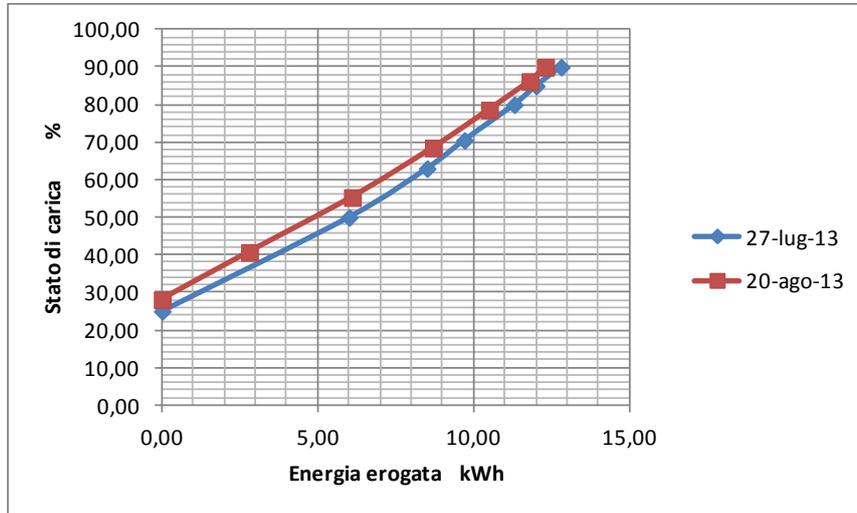


Figura 14 SOC vs. Energia erogata

Le grandezze elettriche in uscita ( tensione e corrente c.c.) sono riportate nei grafici di figura 15.

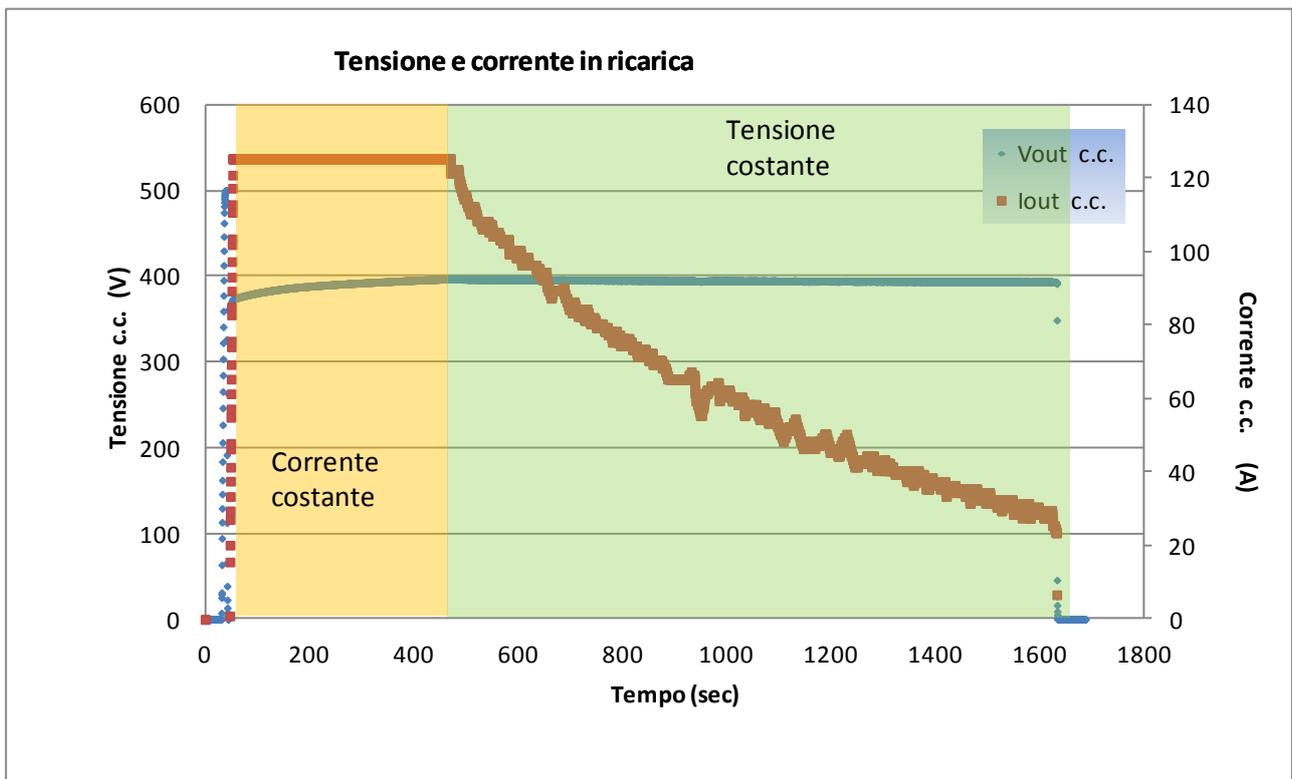


Figura 15 Tensione e corrente in uscita dal caricabatterie

Si vede ben evidenziato la tipologia di ricarica veloce adottata : il primo tratto a corrente costante di 125 A come da standard CHAdEMO ed un secondo tratto a tensione costante con valore di 395 V prossimo ai 405 V nominali del pacco batteria. Il primo tratto della ricarica ha impegnato un tempo di circa 8 minuti mentre la restante parte della ricarica ha richiesto 19 minuti. In totale il veicolo è stato impegnato in ricarica per 27 minuti netti ( 29 % a corrente costante e 71 % a tensione costante).

La capacità della batteria è di 60 Ah ( 24 kWh a 400 V nominali) pertanto la ricarica a corrente costante è eseguita ad un rate di 2C.

L'energia erogata in uscita dalla stazione di ricarica è di 13.5 kWh contro il valore letto a display di 12.3 kWh. Questa differenza del 9% potrebbe essere imputabile alle differenze dei sensori utilizzati dalla stazione di ricarica per il conteggio dell'energia lato continua rispetto al sistema di misura realizzato. Prendendo come riferimento il limite dei 16 kWh come energia disponibile la ricarica di 13.5 kWh corrisponde all'85% della sua carica . La potenza massima erogata è stata di 49.8 kW esattamente pari al limite massimo imposto dal costruttore ( vedi figura 16).

Il sistema di misura utilizzato ha consentito di valutare il rendimento del caricabatterie che è riportato in figura 17 in funzione del tempo di ricarica. Il rendimento cresce leggermente nel tempo sino a quando la potenza raggiunge il suo valore massimo per poi decrescere via via che la potenza erogata in uscita si riduce. Il valore massimo del rendimento calcolato è pari a 92.4% con un valor medio sull'intero ciclo di ricarica di 86%. Complessivamente il rendimento si attesta su buoni valori sia nel valore massimo che medio. In figura 18 è tracciata la curva caratteristica del rendimento al variare della potenza in uscita: essa mostra il tipico andamento crescente il relazione alla potenza erogata stante ad indicare che i rendimenti maggiori si hanno con punti di lavoro prossimi alle potenze massime.

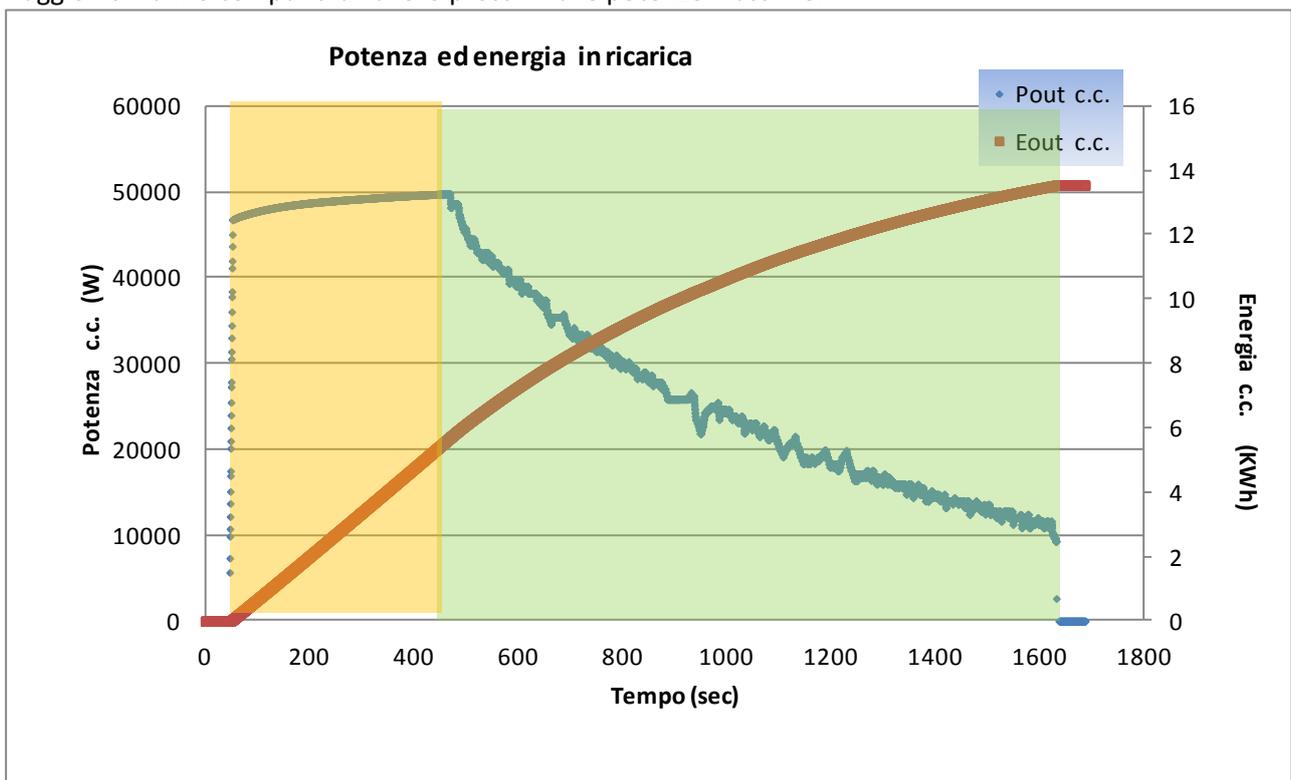


Figura 16 Potenza ed energia erogata in continua

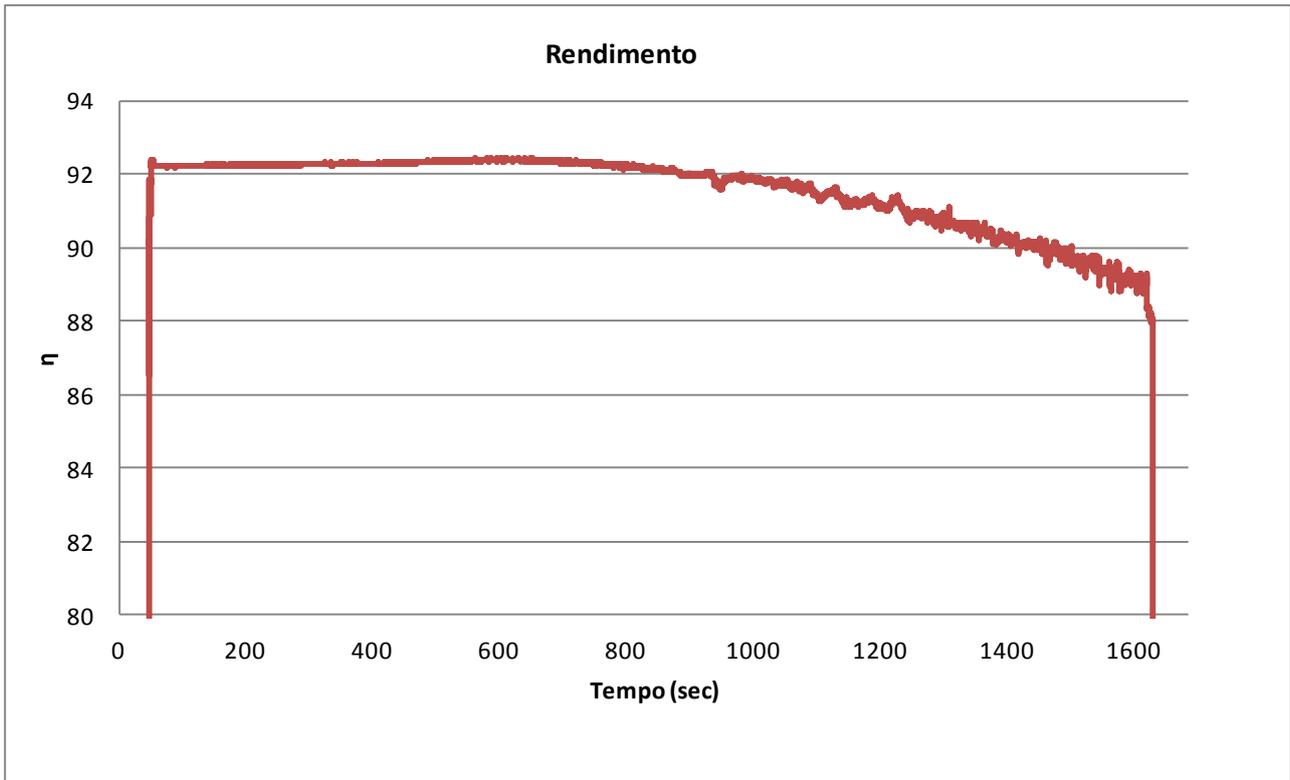


Figura 18 rendimento vs. tempo

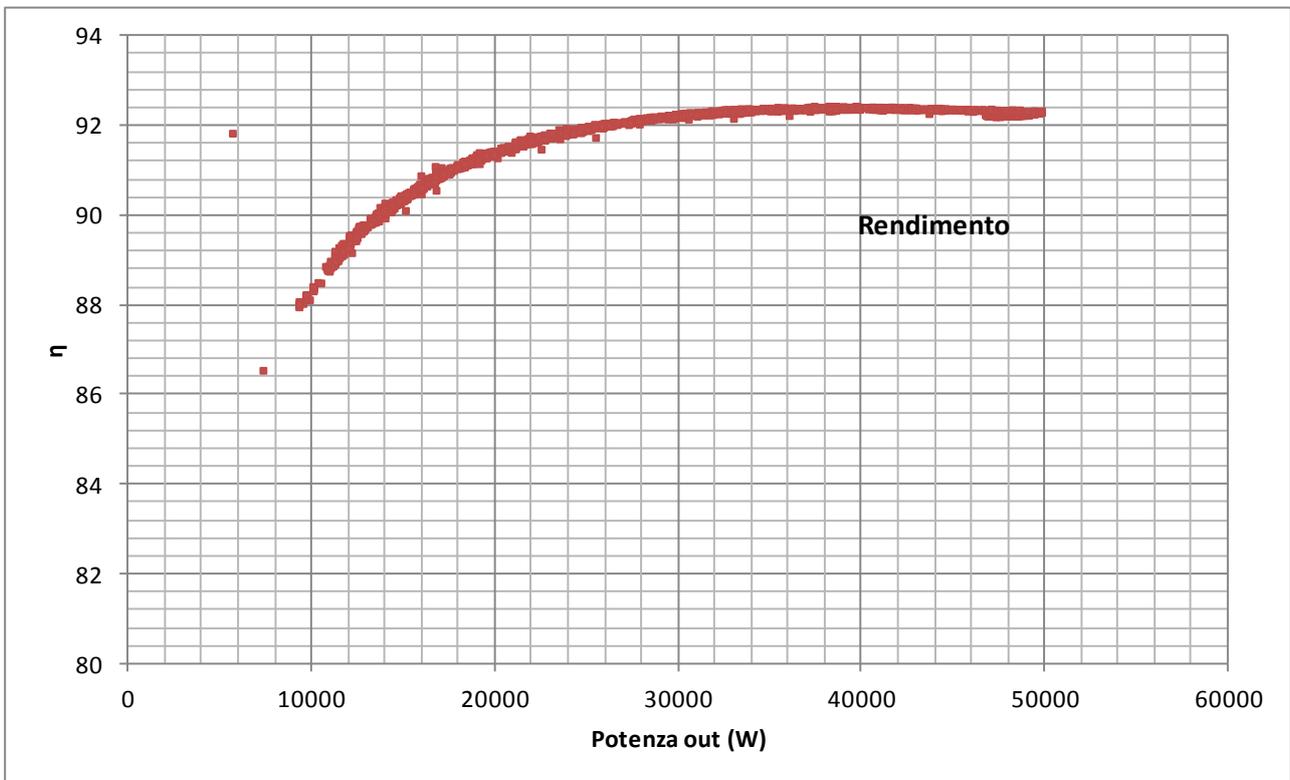


Figura 18 rendimento vs. potenza

Il sistema di misura ci fornisce indicazioni anche sul comportamento lato c.a. sia per le ampiezze che per la qualità delle grandezze elettriche in campo. In figura 19 si possono valutare le tensioni efficaci di fase in ingresso alla stazione di ricarica.

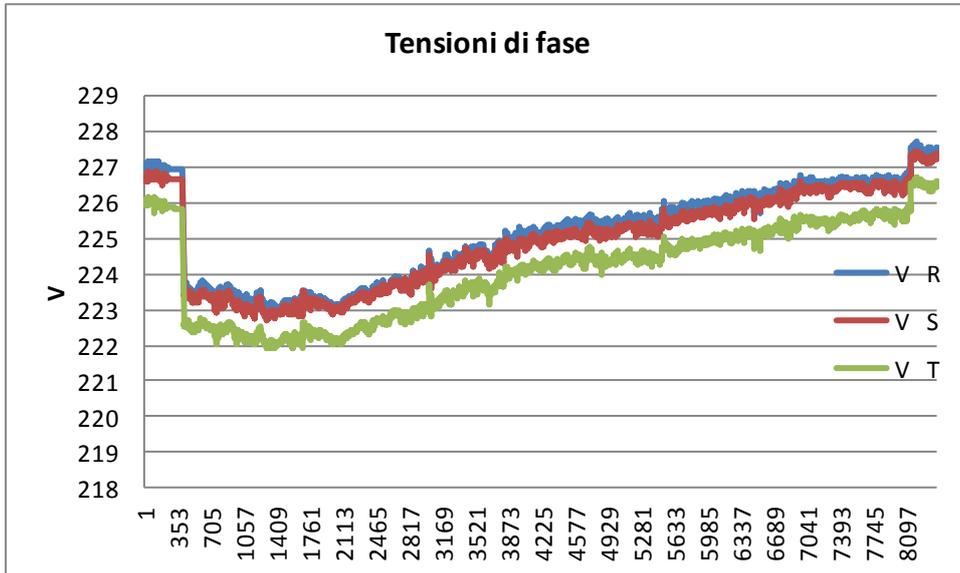


Figura 19 Tensione di linea in ingresso

La fase T presenta uno scarto di 1 V rispetto a R ed S ma rientra entro i valori ammessi. Interessante notare come all'atto dell'erogazione della potenza la tensione in ingresso subisca un calo di 3.5 V (circa 1.5%) e che questa diminuzione aumenta sino al raggiungimento della massima potenza nella fase a corrente costante.

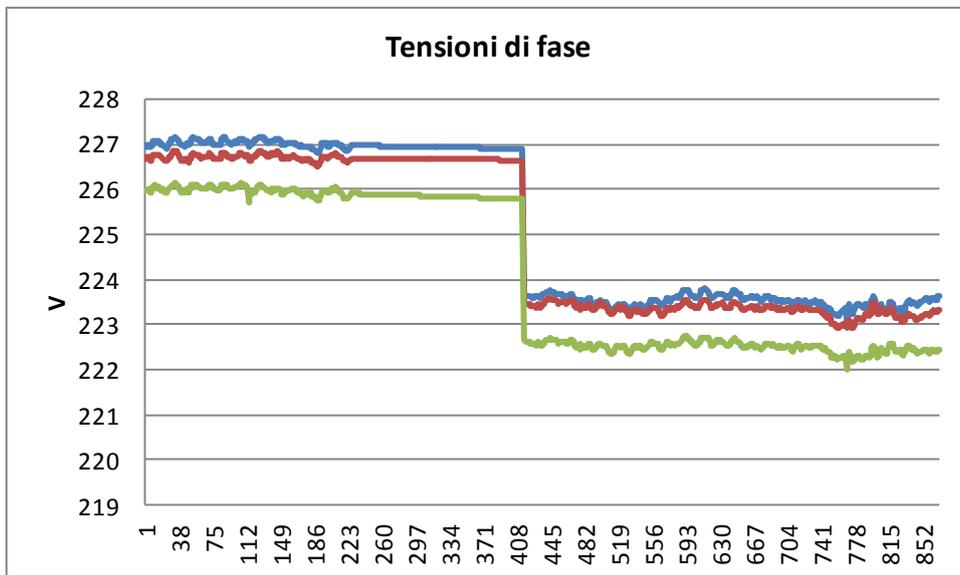


Figura 20 variazione tensione di linea in ingresso

Il calo della tensione in ingresso si riduce sino a sparire quando le potenze erogate dalla stazione divengono minime per poi annullarsi a fine ricarica.

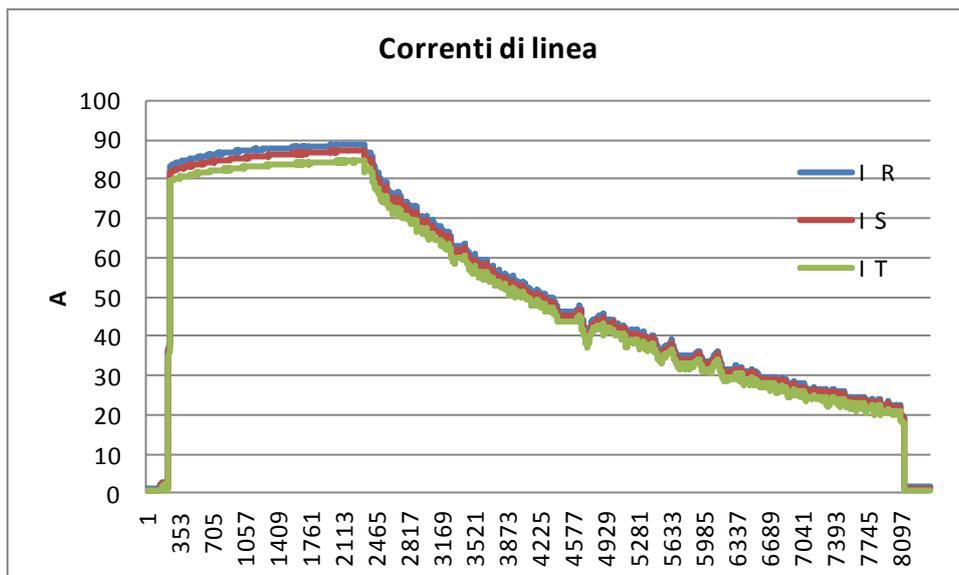


Figura 21 correnti di linea lato c.a.

La figura 21 mostra le correnti di linea nelle rispettive fasi R,S e T. Dal loro andamento si nota il profilo di carica dapprima a corrente costante e poi a tensione costante. Nel tratto a corrente di uscita costante le correnti di linea crescono sino alla massima potenza erogata a seguito della crescita della potenza in uscita. Le correnti di linea oscillano in questo tratto iniziale tra 80 e 90 A per ridursi a 20 A alla fine della ricarica.

La potenza attiva prelevata dalla rete raggiunge nel suo valore massimo 54 kW e si presenta ben equilibrata su tutte e tre le fasi ( vedi figura 22 e 23)

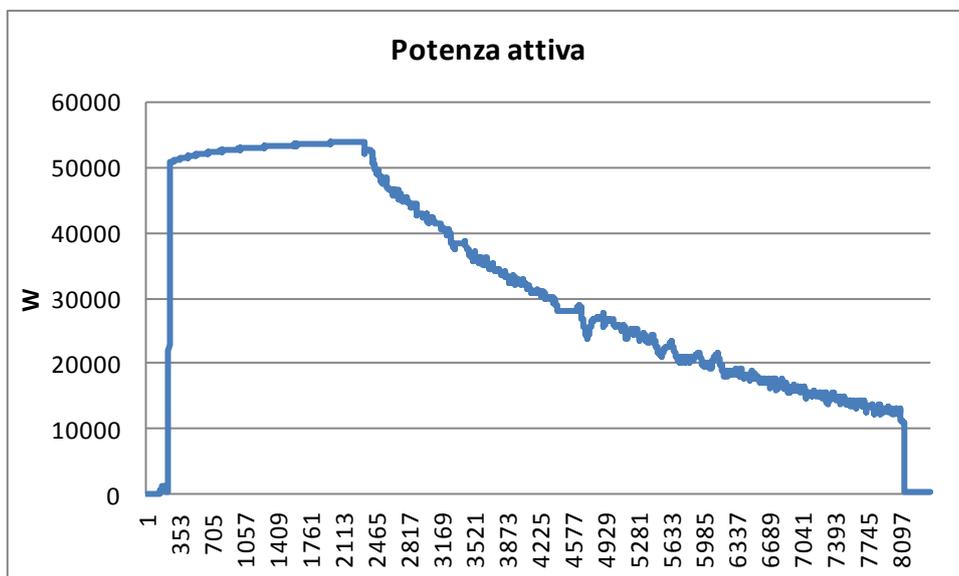


Figura 22 Potenza attiva prelevata dalla rete

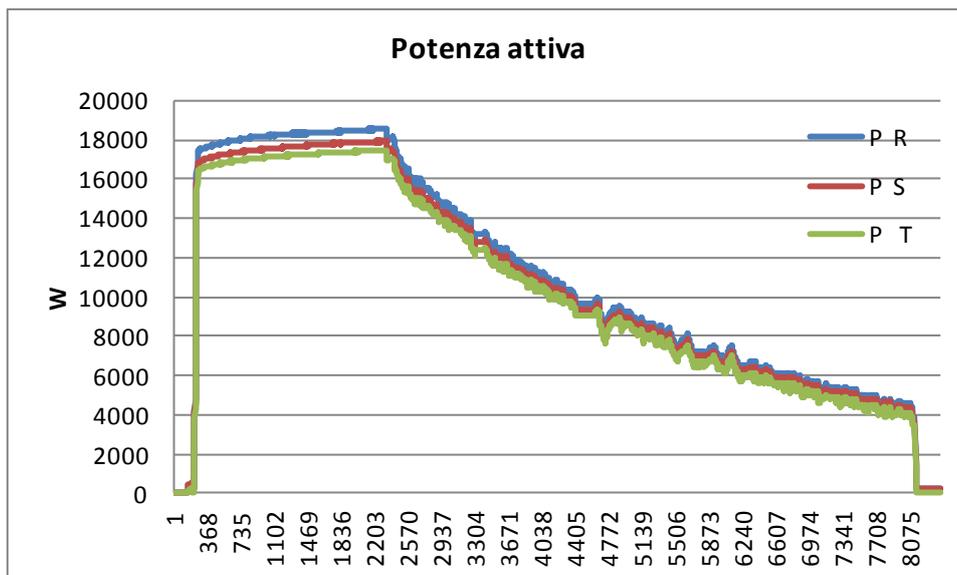


Figura 23 Potenza attiva per le singole fasi

La potenza apparente tocca il valore massimo di 58 kVA, come visibile in figura 24 e si mantiene entro il limite del costruttore pari a 77 kVA. Anche per la potenza apparente le tre fasi mostrano un equilibrio negli assorbimenti (figura 24).

Il fattore di potenza medio rilevato è visibile in figura 26 da cui si evince il valore medio di 0.91 su tutto il periodo di ricarica. Al diminuire della potenza richiesta il fattore di potenza peggiora richiedendo percentualmente valori di potenza reattiva maggiori. In figura 27 sono riportati i valori della potenza attiva, reattiva ed apparente in ingresso.

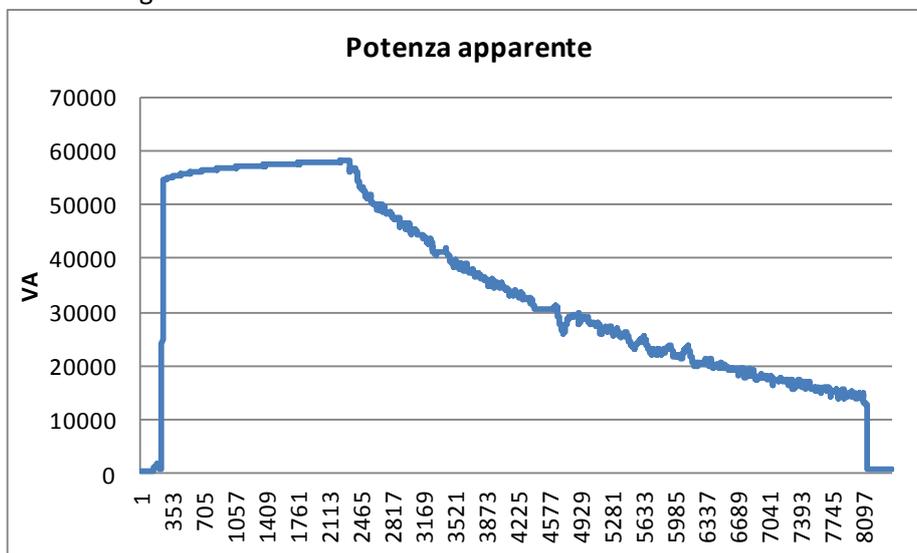


Figura 24 Potenza apparente

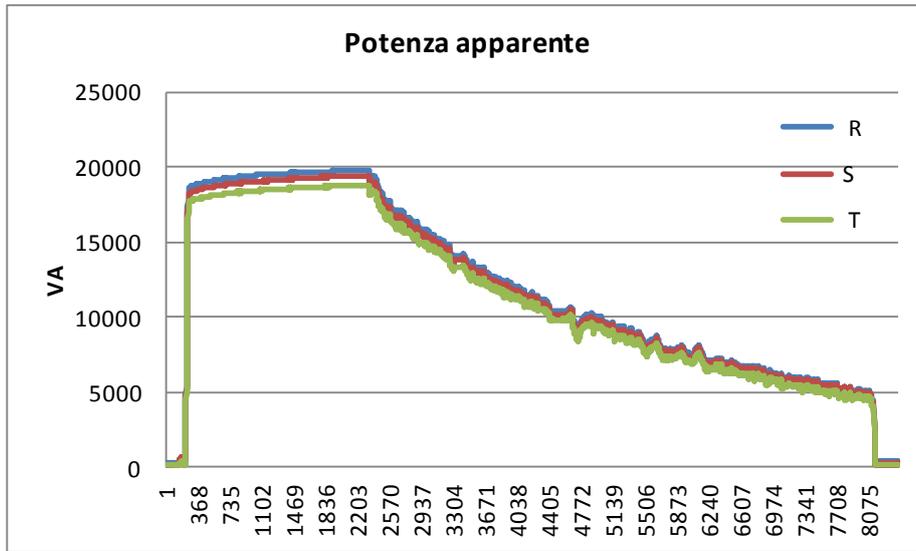


Figura 25 Potenza apparente per fase

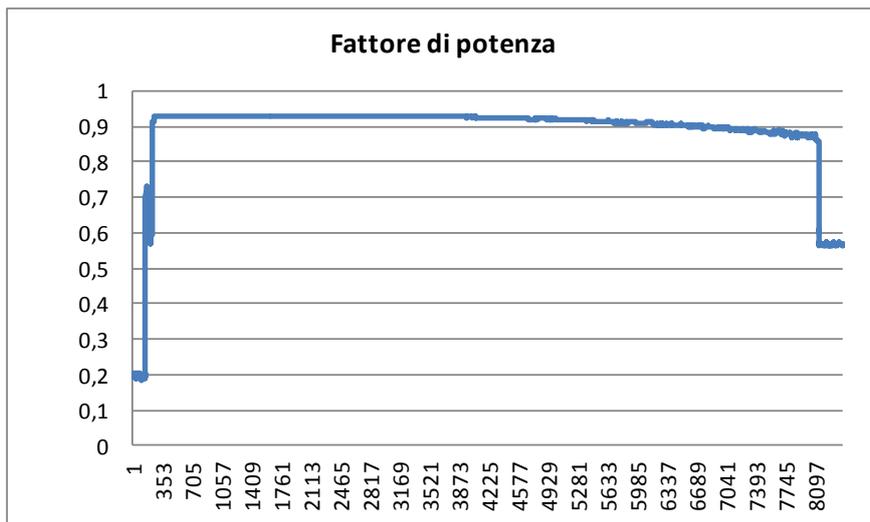


Figura 26 fattore di potenza

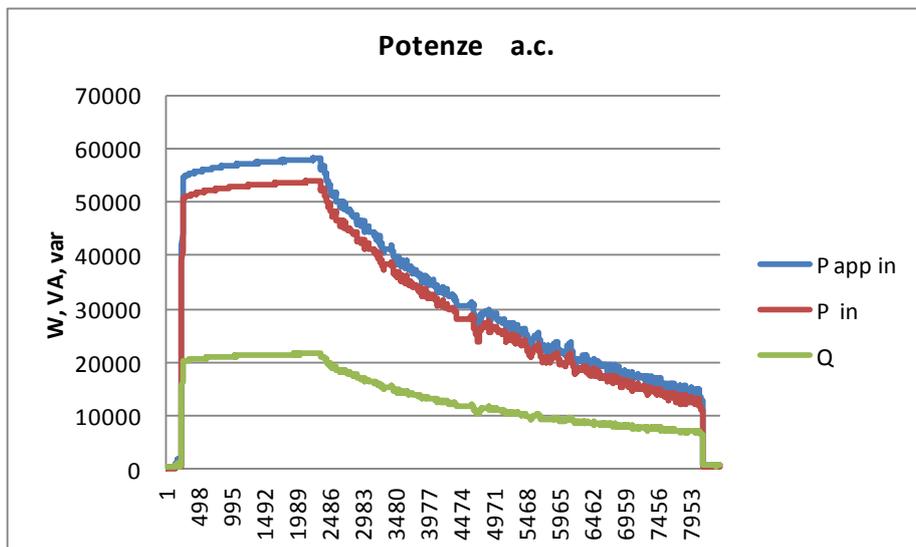


Figura 27 Potenze lato a.c.

L'analisi del sistema di ricarica si completa con la verifica della qualità della potenza ossia con la distorsione armonica sulla rete BT al punto di prelievo. La figura 28 mostra un intervallo di 40 msec di acquisizione nel dominio del tempo delle forme d'onda relative alle tensioni di fase. La distorsione appare minima e viene confermata sia dalla determinazione del THD% = 1.65 % che dallo spettro armonico in cui la componente armonica 5 ha una ampiezza di 3.7 V contro i 301 V della fondamentale. La tabella 4 riassume il contenuto armonico in % della tensione di fase R per le prime 4 armoniche maggiori.

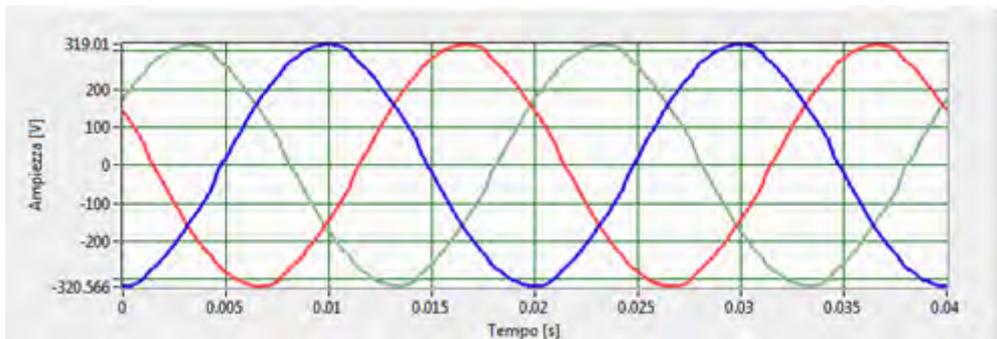


Figura 28 Tensioni di fase nel dominio del tempo

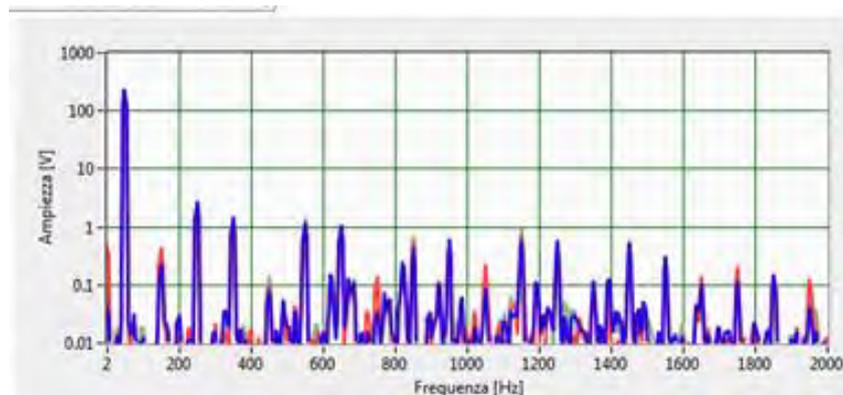


Figura 29 Analisi armonica delle tensioni di fase

Tabella 4. Ampiezze armoniche tensione

Ordine	V	%
1	316.26	100.00
5	3.68	1.16
7	2.08	0.66
11	1.62	0.51

Il grafico di figura 30 ci illustra l'andamento della distorsione armonica totale THD% durante la ricarica. La THD% decresce al diminuire della potenza erogata dalla stazione. Non vi sono particolari problemi evidenziabili per la distorsione della tensione.

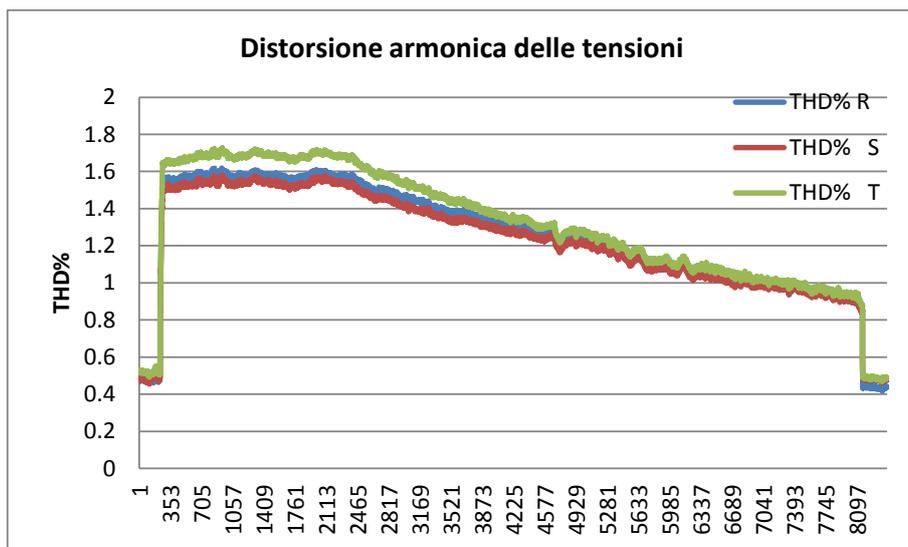


Figura 30 THD% delle tensioni nel tempo

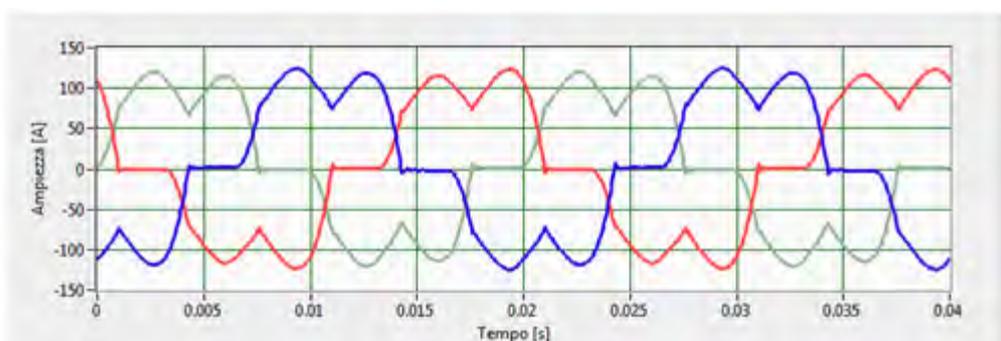


Figura 31 Forme d'onda delle correnti di linea

Per le correnti il problema della distorsione armonica è maggiore. Infatti dando uno sguardo alla figura 31 si nota come le correnti siano fortemente distorte come lo schema tipico delle correnti di alimentazione di un ponte raddrizzatore trifase non controllato. Lo spettro armonico delle correnti in figura 32 ci mostra la presenza di una forte componente in 5 e 7 armonica. La tabella 5 mostra l'ampiezza e la % delle armoniche più significative Il THD% è pari a 28% valore elevato che supera il valore massimo ammesso dalle norme. Infatti nelle apparecchiature in classe A ( $I > 16A$ ), le armoniche di corrente in ingresso non devono superare i valori indicati nella Tabella 6 (EN 61000-3-12).

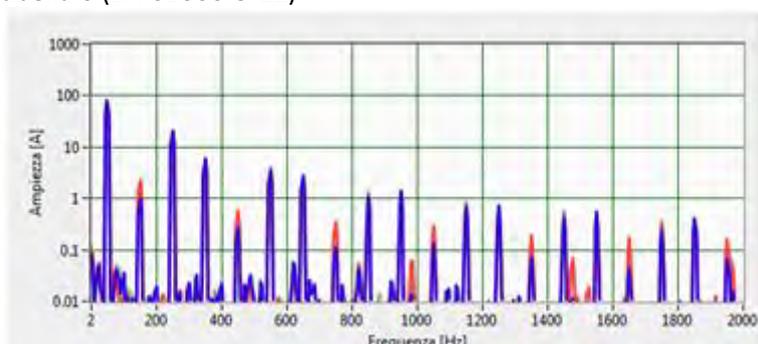


Figura 32 Analisi armonica delle correnti

Confrontando i valori delle armoniche con i limiti della norma indicata abbiamo che la 5 supera il massimo valore ammissibile del 150% , la 7 è al limite e l'11 lo supera del 40%.

**Tabella 5. Ampiezze armoniche corrente**

Ordine	A	%
1	114.23	100.00
3	1.43	1.25
5	29.45	25.78
7	8.31	7.27
11	5.02	4.39

**Tabella 6. Limiti armoniche di corrente secondo EN 61000-3-12**

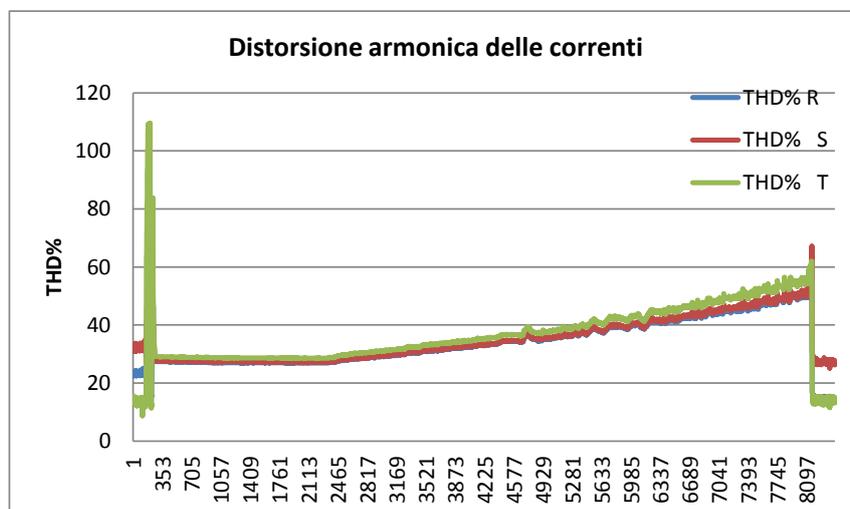
$R_{sce}$ minimo	Singola corrente armonica ammissibile $I_n/I_1^{(n)}$ %						Fattori di distorsione di corrente armonica ammissibili %	
	$I_3$	$I_5$	$I_7$	$I_9$	$I_{11}$	$I_{13}$	THD	PWHD
33	21,6	10,7	7,2	3,8	3,1	2	23	23
66	24	13	8	5	4	3	26	26
120	27	15	10	6	5	4	30	30
250	35	20	13	9	8	6	40	40
$\geq 350$	41	24	15	12	10	8	47	47

I corrispondenti valori delle armoniche pari fino all'ordine 12 non devono superare il  $16/n$  %. Le armoniche pari di ordine superiori a 12 sono presi in conto nei THD e nel PWHD nello stesso modo delle armoniche di ordine dispari.

NOTA. È permessa l'interpolazione lineare tra valori successivi di  $R_{sce}$ . Vedi anche Allegato B.

(a)  $I_1$  = corrente fondamentale di riferimento;  $I_n$  = componente di corrente armonica.

La distorsione armonica totale delle correnti lungo il processo di ricarica è mostrata in figura 33. Risulta evidente che il valore inizialmente risulta fuori il limite massimo ma la situazione peggiora con la riduzione della potenza erogata raggiungendo valori doppi rispetto al totale ammissibile.



**Figura 33 THD% delle correnti nel tempo**

Una prova di ricarica immediatamente successiva eseguita per portare la carica dal 90% al 95% ha posto in evidenza un peggioramento della situazione per la distorsione armonica delle correnti. La figura 34 mostra una maggiore distorsione della forma d'onda mentre in figura 35 si nota dall'analisi spettrale che in rapporto alla fondamentale le armoniche 3,5 e 7 hanno un peso maggiore. La tabella 7 riporta il peso % della componente armonica in esame. I limiti sono imposti dalla EN 61000-3-2 poiché le correnti sono inferiori a 16 A.

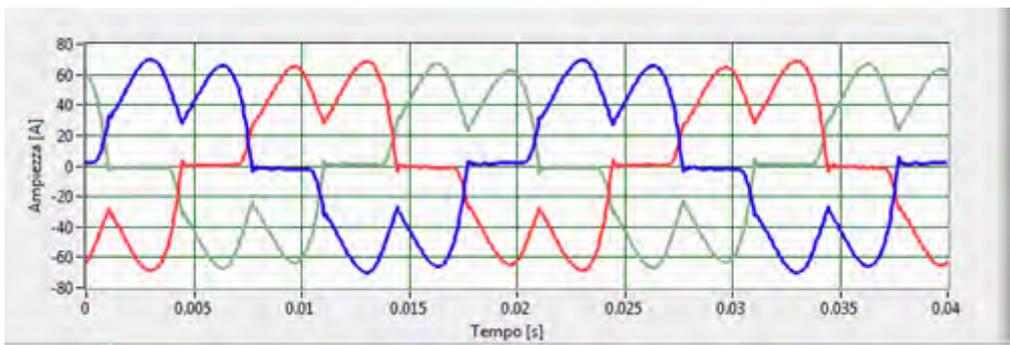


Figura 34 Forme d'onda delle correnti di linea ricarica successiva

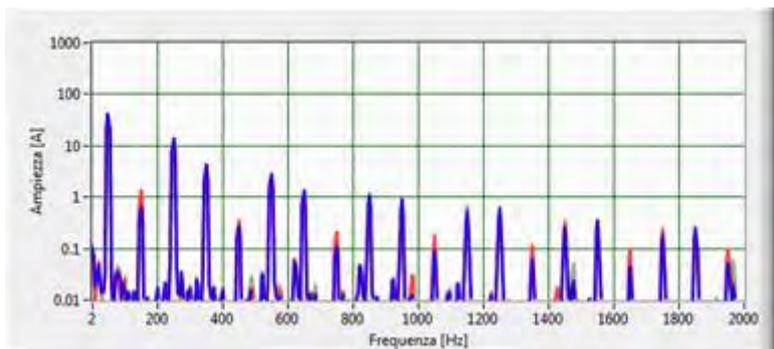


Figura 35 Analisi armonica delle correnti ricarica successiva

Tabella 7. Ampiezze armoniche corrente fase successiva

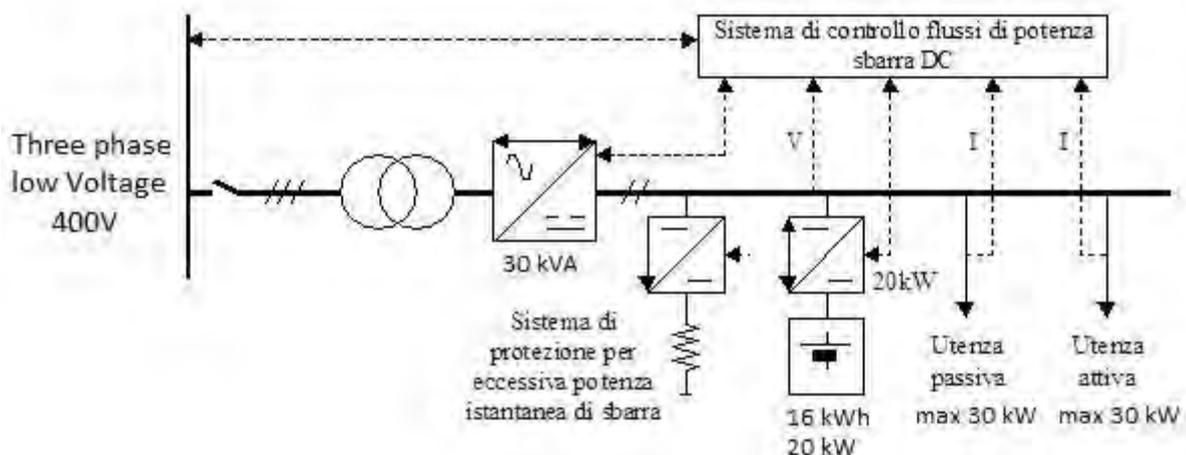
Ordine	A	%
1	58	100.00
3	0.93	1.60
5	19.02	32.79
7	5.94	10.24
11	3.9	6.72

In queste condizioni i limiti risultano superati anche del 500%. In collaborazione con ENEL è stata condotta una ulteriore campagna di misure volta a verificare il comportamento armonico della stazione durante la ricarica. I risultati della campagna [5] hanno confermato quanto già evidenziato.

## 4 Stazione di ricarica rapida integrata

L'obiettivo è quello di ricreare, e proporre una soluzione, per le future criticità sulla rete elettrica, che possono verificarsi attraverso la diffusione dell'energia distribuita e la necessità di alimentare carichi puntuali ad alta potenza presenti con andamento aleatorio come quelli che si verranno a creare dalle stazioni di ricarica veloce dei veicoli elettrici. A tal fine l'ambito scientifico ed il mercato si stanno muovendo verso l'utilizzo di sistemi di storage elettrochimico. Per questo si è deciso di analizzare i benefici apportati alla rete elettrica BT dall'utilizzo di un sistema di un compensatore statico da 30 kVA presente nel C.R Casaccia durante la ricarica veloce del veicolo elettrico con la stazione Chademo. In particolare parte della potenza necessaria alla ricarica veloce del veicolo verrà fornita dal sistema di storage di cui è fornito il compensatore e parte dalla rete BT.

Nell'ambito dell'impiego in bassa tensione le funzioni che può svolgere il compensatore sono quelle di compensazione della potenza attiva e reattiva assorbita dalle utenze controllate con funzioni di peak shaving o load levelling in modo da ottimizzare i flussi di potenza forniti dalla sorgente (rete), oltre che di consentire il possibile funzionamento in isola nell'evenienza di una disalimentazione dalla rete di distribuzione e impiegando le risorse disponibili localmente.



**Figura 36 - schema di principio del compensatore statico impiegato per il supporto alla colonnina Chademo**

Nello specifico, il compensatore statico ha un dispositivo di controllo per la gestione dei flussi di potenza sulla sbarra in corrente continua interfacciato con i convertitori DC-DC dell'accumulo e del sistema di sfioramento passivo (resistenza di frenatura), nonché con l'inverter. Lo schema dei dispositivi presenti nel compensatore utilizzato per le prove in oggetto al suo interno è mostrato in Figura 36.

In particolare il bilanciamento della potenza è ottenuto mantenendo costante la tensione sulla sbarra in corrente continua a 600V. I set-point di potenza ai dispositivi attuatori possono essere forniti manualmente, attraverso il pannello frontale, o in remoto attraverso comunicazione CAN secondo una logica definita. Le prestazioni in termini di potenza attiva erogabile sono limitate temporalmente dalle caratteristiche degli accumulatori impiegati e quindi sono capaci di erogare una potenza di 20kW per almeno 15 minuti, avendo al loro interno un'energia totale di 16 kWh. Il sistema di conversione è in grado di scambiare continuamente una potenza di 30kVA, in modo da poter comunque svolgere le altre funzioni, come ad esempio di compensazione di potenza reattiva, senza alcuna limitazione delle prestazioni.

Al fine di implementare una procedura di peak-shaving del compensatore statico durante la ricarica veloce, è stato utilizzato il sistema di monitoraggio e controllo per le reti energetiche implementato durante questa annualità della RdS dal Dipartimento DIAEE dell'Università La Sapienza e descritto nel report RdS/2013/103 di quest'annualità nell'ambito dell'obiettivo A, "Reti di poligenerazione distribuita" del Progetto C.1.

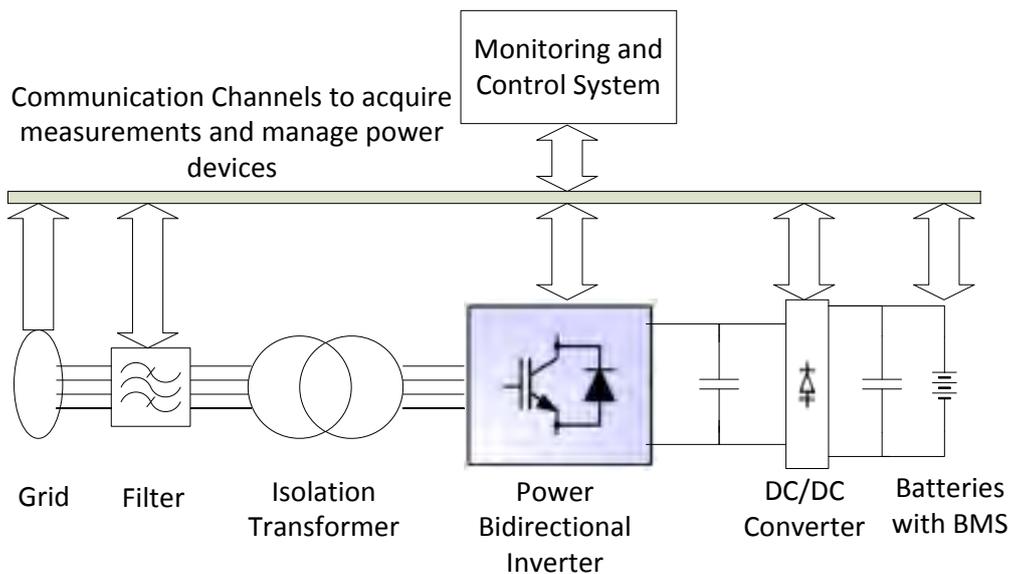


Figura 36 - Compensatore Statico

Lo schema a blocchi che caratterizza il sistema studiato è indicato in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**7, con riferimento alla fornitura in bt dell'edificio F33 dalla cabina 11 MT/BT del centro Enea di Casaccia, dove è posizionata sia la colonnina Chademo sia il compensatore statico.

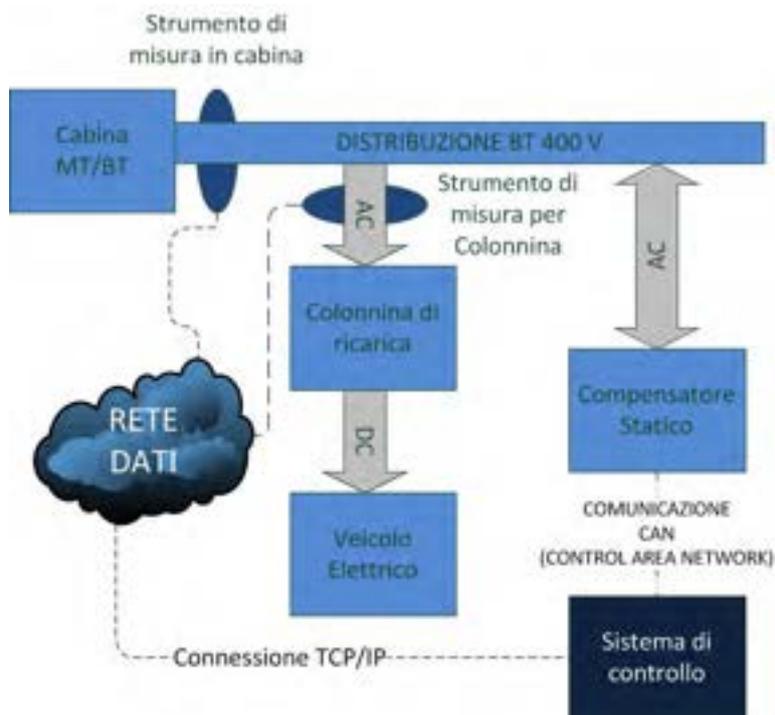


Figura 37 – Schema a blocchi del sistema implementato

Gli apparati di misura installati sono localizzati:

- 1) In cabina, sul lato bassa tensione, dove è acquisita la potenza totale fornita alle diverse utenze.
- 2) A valle dell'interruttore che gestisce la colonnina di ricarica.

Fornitura Edificio F33

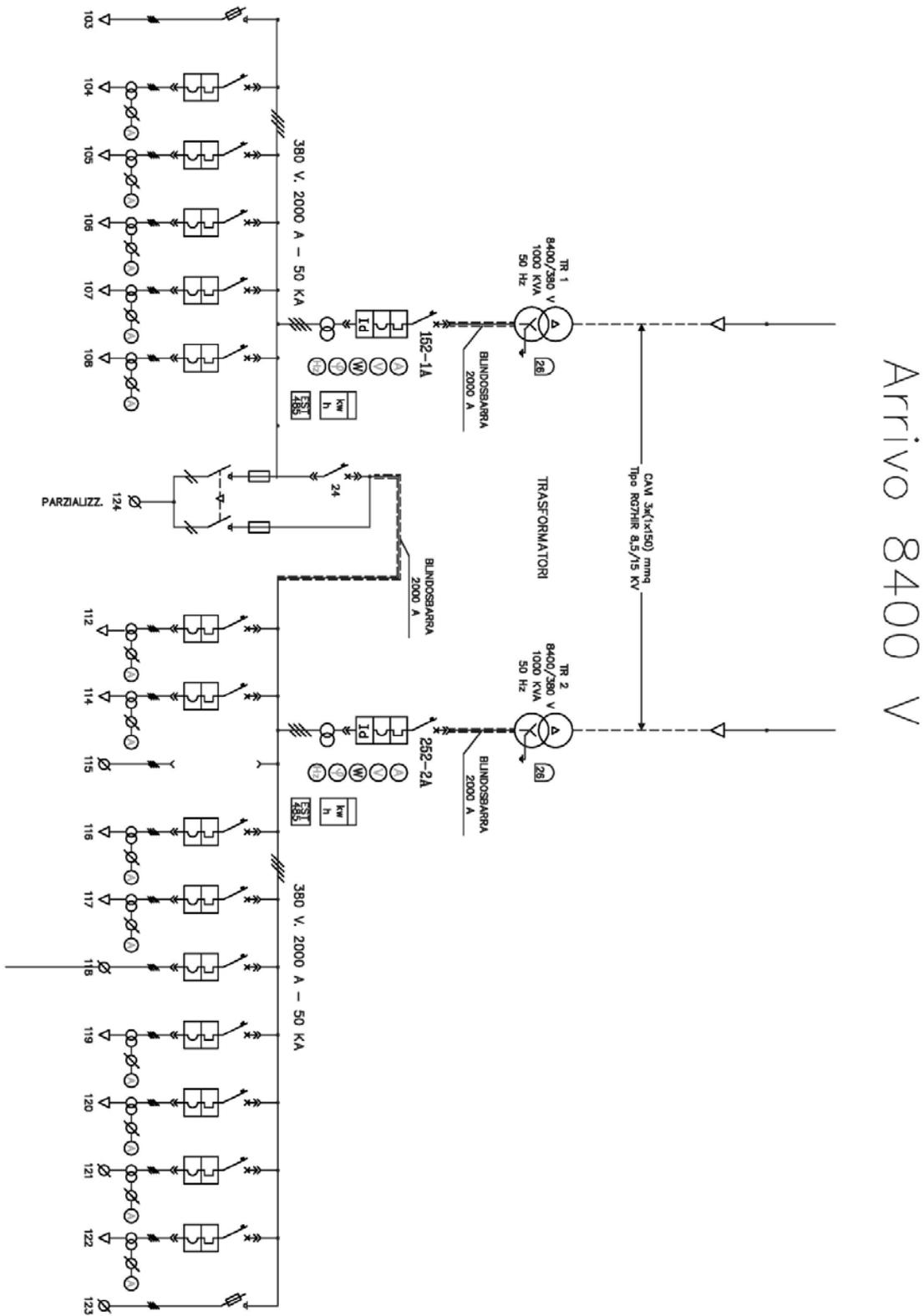


Figura 38 – Schema rete BT hall sperimentale

sistema di controllo è in grado di acquisire tali segnali e scambiare continuamente informazioni con il compensatore in modo da decidere quale potenza attiva e reattiva erogare o assorbire. In **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** si è inserito lo schema della cabina e il punto di fornitura dell'edificio F33, dove è posizionato il laboratorio per la sperimentazione, al fine di poter individuare i punti di monitoraggio e controllo già riportati nello schema logico.

Il sistema di controllo implementato, è stato utilizzato per acquisire:

- la potenza assorbita dalla colonnina di ricarica
- la potenza assorbita dall'intera cabina MT/BT
- i valori di tensione, corrente e potenza del compensatore

In base a tali valori il sistema di controllo decide se fornire o assorbire potenza dalla rete. Le richieste per l'acquisizione dati sono state effettuate attraverso modbus su TCP/IP. Il sistema di controllo, elaborando i dati acquisiti, invia la decisione all'energy storage attraverso il protocollo e l'interfaccia CAN presente e configurata a 250 kBit/s. Il pannello frontale è mostrato in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** La risoluzione temporale di tale sistema comporta l'analisi e l'invio dei dati una volta al secondo.

Come detto precedentemente è stata sviluppata una logica che ha visto l'attuazione del Peak Shaving. Tale logica prevede l'acquisizione della potenza da parte del sistema di smart metering e successivamente la decisione della potenza che l'Energy Storage System deve erogare o meno al fine di non superare un certo valore di potenza totale. Come caso applicativo sono state inserite diverse soglie per la potenza della colonnina di ricarica in modo tale che una volta superato tale valore di potenza, il compensatore eroghi la differenza di potenza dalla soglia, limitando tale emissione al valore massimo che può erogare, e quindi 20 kW.

Esaminando il diagramma di carico durante una ricarica rapida del veicolo in prova, si è deciso di far lavorare il compensatore a massima potenza. Per questo è stata effettuata una prima sperimentazione dove è stata inserita una soglia di 35 kW dopo la quale il compensatore si avvia e compensa il valore di potenza in eccesso a tale soglia, fino ad arrivare ad erogare la sua potenza massima.

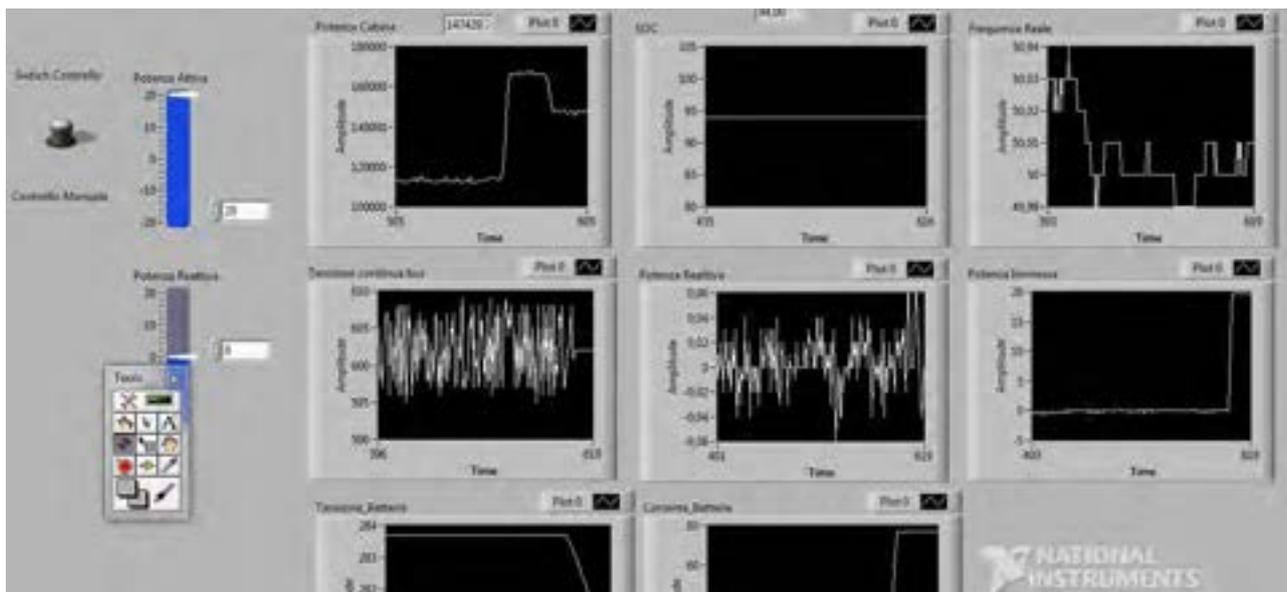


Figura 39 – Interfaccia controllo compensatore

Il controllo ha portato al comportamento di sistema mostrato in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**40, dove si nota l'assorbimento di potenza in cabina, mostrato da un innalzamento della sua

potenza assorbita a causa dell'accensione della colonnina di ricarica, e la compensazione che il compensatore esegue quando il valore misurato dallo strumento inserito nell'alimentazione della colonnina, supera il valore di 35 kW. Nella medesima prova sperimentale, quando il valore di potenza assorbita dalla colonnina è sceso al di sotto del valore di 35 kW, il compensatore non ha più erogato potenza. Successivamente, per verificare ulteriormente il funzionamento del sistema, è stata abbassata la soglia a 15 kW.

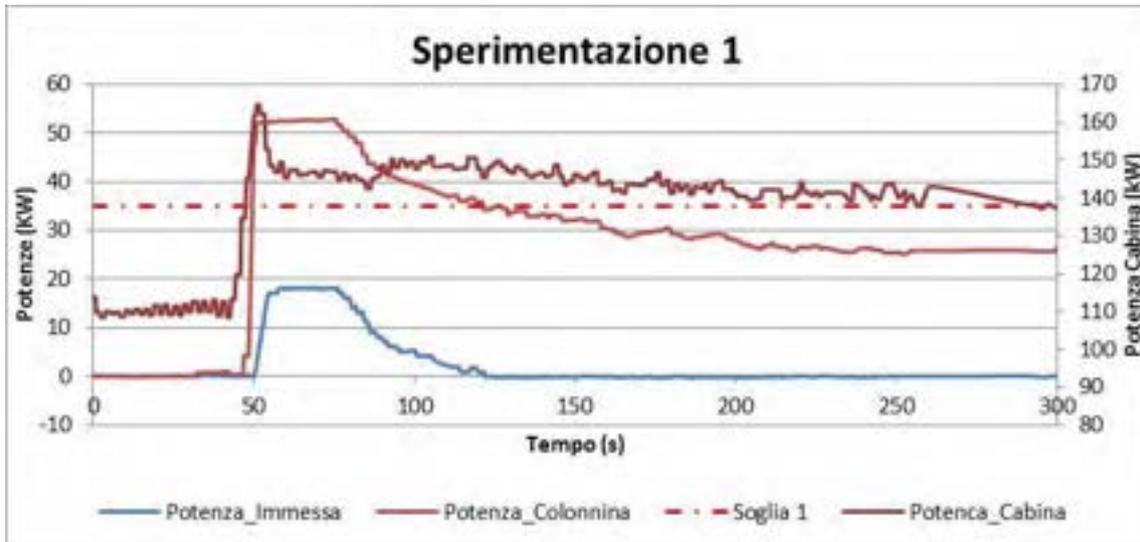


Figura 40 – Acquisizione sperimentazione 1

Ciò ha fatto in modo che il compensatore fornisca nuovamente potenza. In questa prima sperimentazione, l'energia totale fornita dal compensatore è stata di 362 Wh su una richiesta totale della colonnina di ricarica di 2,5 kWh, quindi pari al 15% del totale. Tali valori di energia sono bassi rispetto alla capacità totale delle batterie della Nissan Leaf, perché il test è stato effettuato con il pacco batterie del veicolo elettrico quasi completamente carico.

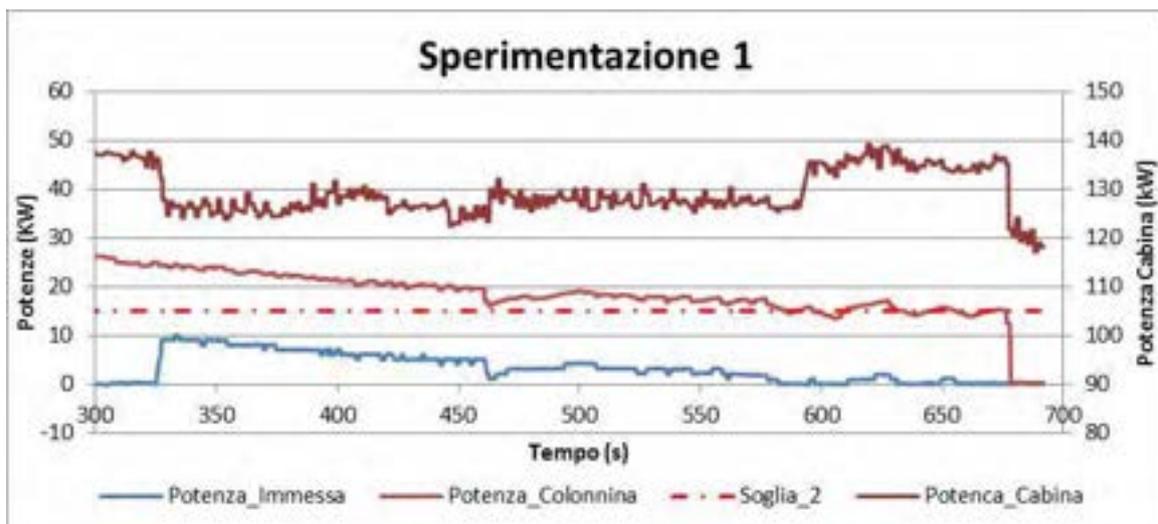


Figura 41– Dettaglio potenza erogata dal compensatore

In una seconda prova sperimentale, è stata effettuata la ricarica del veicolo elettrico partendo da un SOC (State of Charge) iniziale del pacco batterie del veicolo elettrico di circa il 40%, e le batterie del compensatore cariche all'85%. Le prove effettuate hanno portato ad un andamento complessivo delle potenze mostrato in **Errore**. L'origine riferimento non è stata trovata.. Tale grafico è diviso

sostanzialmente in due parti. Nella prima parte la ricarica effettuata è una ricarica veloce che porta il SOC di batteria del veicolo elettrico ad un valore pari all'85%. Nella seconda si è effettuata una seconda ricarica per portare il SOC della batteria del EV al 100%. Infatti dopo 1300 secondi, la potenza assorbita della colonnina è circa 0 e quindi la ricarica veloce è terminata. Negli istanti successivi si è effettuata l'ulteriore ricarica.

Nel dettaglio le prove effettuate hanno:

- 1) previsto l'inserimento, nei primi 120 secondi di ricarica, di una soglia molto bassa per far erogare al compensatore la massima potenza di 20 kW e capire il suo dinamismo rispetto alla richiesta di potenza della colonnina di ricarica (Figura 1);
- 2) previsto l'inserimento di una soglia di 35 kW negli istanti successivi fino a che la potenza immessa del compensatore non si è portata a 0 (Figura 1);
- 3) un ulteriore cambiamento di soglia a 15 kW dopo circa 480 secondi (Figura 2)

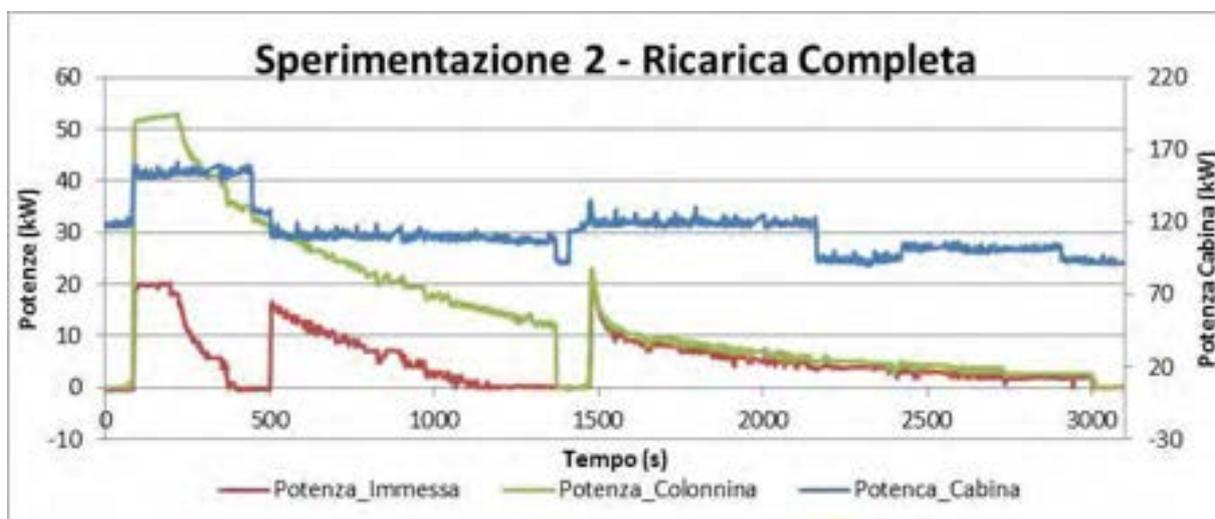


Figura 41– Acquisizione sperimentazione 2

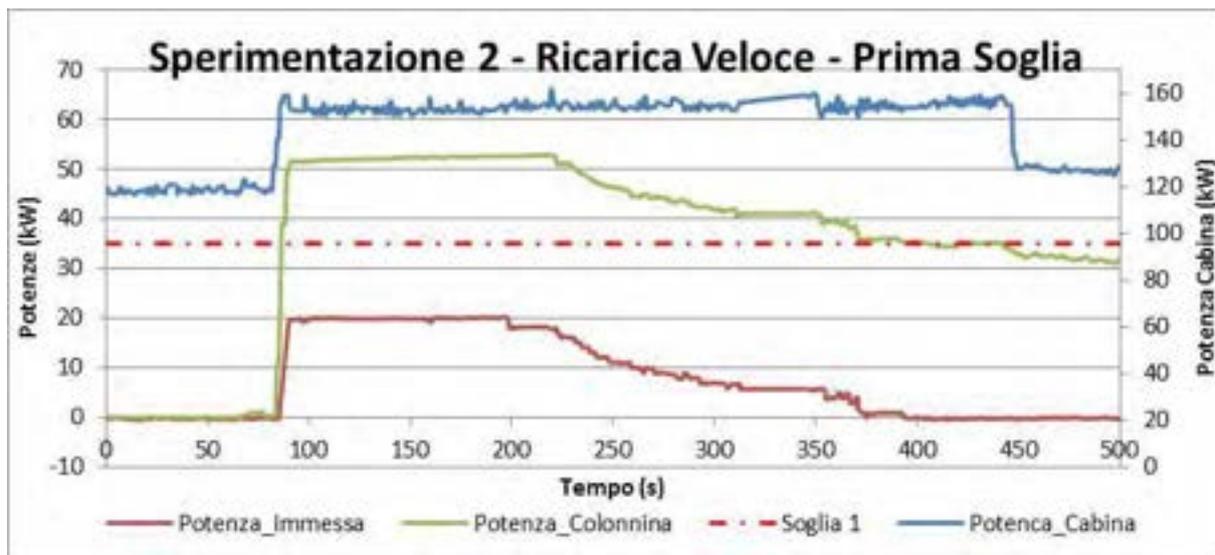


Figura 1 - Sperimentazione 2 - Dettaglio prima fase

Come si evince dai grafici, una volta impostata la soglia, il sistema di controllo tenta di stabilizzare la potenza assorbita dalla colonnina fornendo la potenza in eccesso alla soglia impostata da software. Infatti

la potenza totale assorbita dal sistema compensatore-colonnina di ricarica, connessa ad un stesso interruttore, è mostrata in Figura .

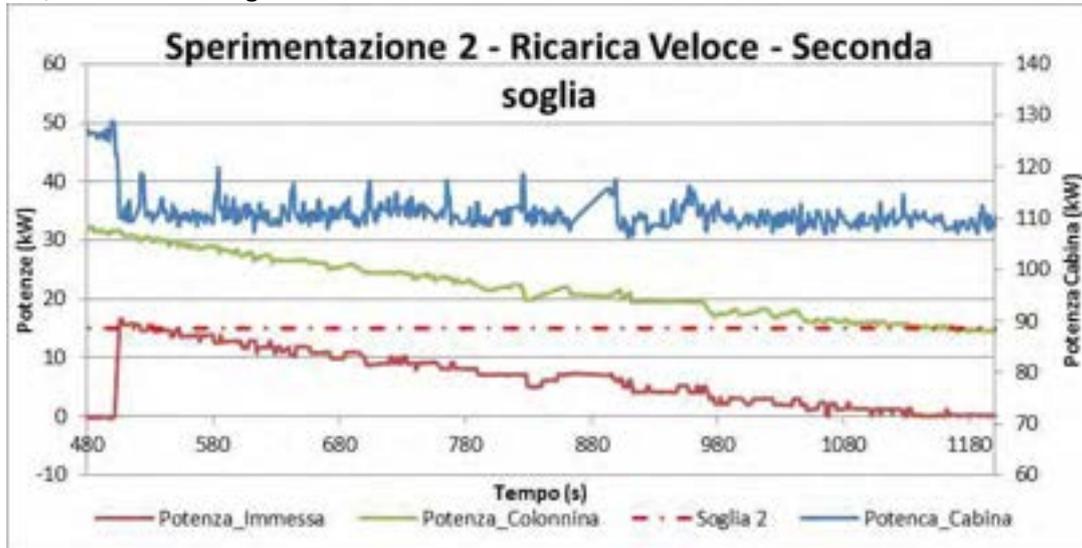


Figura 2 - Sperimentazione 2 dettaglio seconda fase

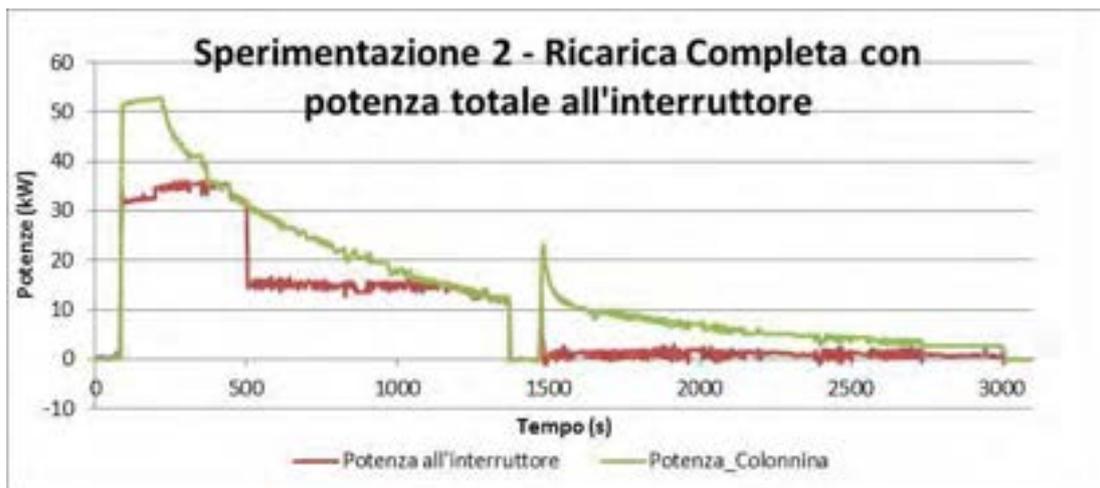


Figura 44 - Potenza all'interruttore

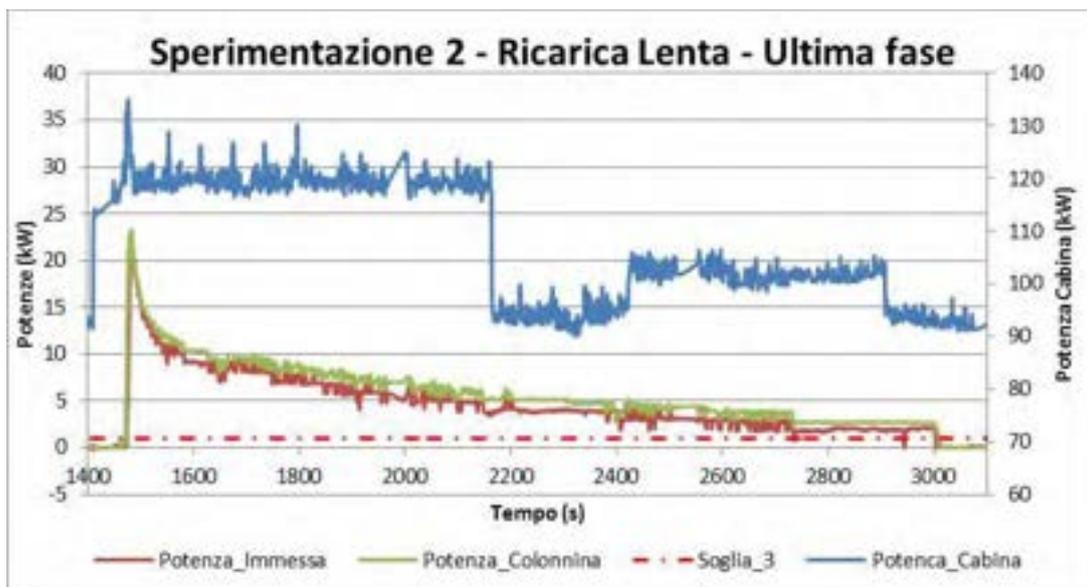


Figura 3 - Sperimentazione 2 dettaglio ultima fase

In particolare tale grafico mostra come il sistema di controllo cerca di mantenere costante al valore di soglia impostato, la potenza vista a monte, e cioè la potenza totale assorbita dalla colonnina dalla cabina. Come ultima sperimentazione è stata effettuata un'ulteriore ricarica per portare il SOC al 100% facendo fornire al compensatore la potenza assorbita dalla colonnina a meno di 1 kW. L'energia totale assorbita dalla colonnina nella sperimentazione 2 è stata di 12,4 kWh, mentre l'energia fornita dal compensatore è stata di 4,5 kWh, pari al 36%.

## 5 Conclusioni

Le attività hanno evidenziato la concreta fattibilità della ricarica rapida in tempi contenuti ed appetibili per il mercato dei veicoli elettrici. In 30 minuti il veicolo è pronto per andare nuovamente su strada con un "pieno" del sistema di accumulo pari all'85% della sua carica. Gli elevati rendimenti mostrati dalla sistema di ricarica hanno evidenziato un 10% di perdite ascrivibili alle perdite per commutazione, alla dissipazione termica ed alle altre inevitabili perdite elettriche passive circuitali. Le prove indicano un uso non ottimale qualora la ricarica avvenga con batterie già cariche oltre l'80%. In queste condizioni il rendimento cade repentinamente a valori compresi tra 0.8 e 0.7. Un altro aspetto importante è la configurazione della stazione di ricarica a livello di interfaccia con la rete di alimentazione. Infatti nel modello in prova è stata evidenziata la presenza di una forte distorsione di corrente eccedente i limiti imposti dalle norme per l'allaccio alla rete pubblica. Questa distorsione è ascrivibile alla topologia del circuito di ingresso alla rete che vede un ponte raddrizzatore trifase interfacciato senza alcun filtro verso la rete. Il costruttore interpellato sul problema ha indicato la disponibilità di opportuni filtri (forniti solo come opzione su questo modello) da collocare sul dispositivo di ricarica per ridurre la distorsione di corrente entro i limiti della normativa vigente.

La riduzione della tensione di linea in fase di erogazione della potenza massima è imputabile in buona parte alla sezione del cavo di collegamento della stazione al quadro di rete ed in parte al carico sulla rete.

Le prove con la stazione integrata hanno verificato il funzionamento complessivo di una futura stazione di ricarica veloce dei veicoli elettrici con energy storage. In particolare l'energia totale fornita dal compensatore nella sperimentazione, effettuata con logica di Peak-Shaving, è stata di 4,5 kWh e quindi pari al 36% dei 12,4 kWh assorbiti dalla colonnina. Secondo un calcolo del rendimento dell'energy storage del compensatore si ha un rendimento di sistema (e quindi complessivamente di carica/scarica) pari a circa 0.8. Ciò significa dire che deve essere fornita al compensatore, per far sì che eroghi 4,5 kWh, una quantità

di energia pari a 5,6 kWh. Con un rendimento medio di generazione dell'energia elettrica pari a 0.46 [6] si ha un consumo di energia primaria di 12,17 kWh. Questa è proprio pari alla quantità di energia primaria che si risparmierebbe se l'energia al compensatore statico fosse stata fornita da fonti rinnovabili e immagazzinata nelle batterie.

L'accoppiamento ha dimostrato come sia possibile ridurre gli aggravii sulle linee in BT in occasione di carichi aleatori come quelli dei veicoli elettrici specialmente nelle condizioni di poter disporre anche di energia proveniente da fonte rinnovabile per la realizzazione di "smart grid" con accumulo.

## 6 Riferimenti bibliografici

1. M. Conte, "I sistemi di accumulo elettrico", Sistemi di propulsione elettrica ed ibrida. Dalla sorgente a bordo all'attuazione meccanica, Focus Tecnologie ,Enea,Roma.
2. AA.VV., "Status overview of hybrid and final report Phase III, Annex VII, IA-HEV, Electric vehicle technology", Rapporto finale, IEA International Energy Agency , Dicembre 2007.
3. <http://www.ceiweb.it/it/cives-tecnica.html>.
4. G. Giuli, M. Mancini, P. Zampetti, "Analisi della mobilità mediante dati GPS registrati a bordo di autoveicoli privati", Rivista Mobility Lab, N. 39, Mag/Giu 2011
5. S. Riva M. Gaban ,Analisi armonica della ricarica in DC auto elettrica Nissan Leaf tramite protocollo Chademo ,ENEL distribuzione , rapporto interno
6. «Efficienza energetica e fonti rinnovabili: facce diverse della stessa medaglia — it». [In linea]. Available at: <http://www.enea.it/it/produzione-scientifica/EAI/anno-2012/n.-1-gennaio-febbraio-2012-1/efficienza-energetica-e-fonti-rinnovabili-facce-diverse-della-stessa-medaglia>. [Consultato: 18-set-2013].
7. Vincenzo Cataliotti, impianti elettrici Volume II, Flaccovio Editore, Palermo 1999.

## 7 Abbreviazioni ed acronimi

BEV	Battery Electric Vehicle
HEV	Hybris Electric Vehicle
GRA	Grande Raccordo Anulare
BT	Bassa Tensione
DC	Direct Current
c.c.	Corrente continua
c.a.	Corrente alternata
PWM	Pulse Width Modulation
STATCOM	Static compensator
RFID	Radio frequency Identification