



Ricerca di Sistema elettrico

Modellistica per il bilancio energetico di sistemi di ricarica con funzionalità vehicle-to-grid: validazione sperimentale

S. Bodoardo, R. Bojoi, N. Penazzi, A. Tenconi, S. Vaschetto



MODELLISTICA PER IL BILANCIO ENERGETICO DI SISTEMI DI RICARICA CON FUNZIONALITÀ VEHICLE-TO-GRID: VALIDAZIONE SPERIMENTALE

Radu Bojoi, Alberto Tenconi, Silvio Vaschetto (DENERG, Politecnico di Torino)

Silvia Bodoardo, Nerino Penazzi (DISAT, Politecnico di Torino)

Settembre 2015

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2014

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

Progetto: C4 Prodotti e processi per il miglioramento dell'efficienza energetica nell'elettromobilità

Obiettivo: B2 V2G gli aspetti di rete e di interfaccia di potenza e l'impatto sul sistema di accumulo

Responsabile del Progetto: A. Genovese, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "*V2G: aspetti di rete, di interfaccia di potenza ed impatto sul sistema di accumulo*"

Responsabile scientifico ENEA: A. Genovese

Responsabile scientifico Politecnico di Torino: prof. Alberto Tenconi

Indice

| | |
|---|----|
| SOMMARIO..... | 4 |
| 1 INTRODUZIONE..... | 5 |
| 2 DESCRIZIONE DEL SISTEMA..... | 7 |
| 2.1 APPROCCIO MODELLISTICO PER IL BILANCIO ENERGETICO DI SISTEMI DI RICARICA CON FUNZIONALITÀ V2G..... | 7 |
| 3 MODELLO CIRCUITALE DEL CONVERTITORE ELETTRONICO BIDIREZIONALE..... | 10 |
| 3.1 DIMENSIONAMENTO FILTRO LATO RETE..... | 11 |
| 3.2 DIMENSIONAMENTO FILTRO LATO BATTERIA..... | 13 |
| 3.3 CONTROLLO DELLO STADIO DI CONVERSIONE LATO RETE..... | 13 |
| 3.4 CONTROLLO DELLO STADIO DI CONVERSIONE LATO BATTERIA..... | 14 |
| 3.5 MODELLO DI SIMULAZIONE..... | 15 |
| 3.6 ESEMPIO DI SIMULAZIONE..... | 18 |
| 4 DESCRIZIONE DEL CONVERTITORE PROTOTIPALE..... | 20 |
| 5 DETERMINAZIONE SPERIMENTALE DELLA MAPPA DI EFFICIENZA DEL CONVERTITORE..... | 24 |
| 5.1 COMPARAZIONE DI PUNTI DI EFFICIENZA SPERIMENTALI CON QUELLI MISURATI..... | 28 |
| 6 MODELLO ELETTROCHIMICO DI CELLE PER ACCUMULATORI AL LITIO DA TRAZIONE STRADALE..... | 29 |
| 6.1 DESCRIZIONE DEL MODELLO..... | 29 |
| 6.1.1 <i>Tensione di cella</i> | 31 |
| 6.1.2 <i>Tensione di elettrodo e sovratensione</i> | 32 |
| 6.1.3 <i>Polarizzazione della cella dovuta al gradiente di concentrazione</i> | 33 |
| 6.2 MODELLAZIONE DEL COMPORTAMENTO TERMICO DI UNA BATTERIA..... | 34 |
| 6.2.1 <i>Validazione del modello: analisi termica di una cella commerciale da 5Ah</i> | 35 |
| 7 ANALISI APPLICATA A CASI DI STUDIO CON MODELLO ENERGETICO BASATO SU MAPPE DI EFFICIENZA SPERIMENTALI..... | 36 |
| 8 CONCLUSIONI..... | 39 |
| 9 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI..... | 40 |
| 10 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI..... | 41 |

Sommario

In un'ottica di sviluppo sostenibile, la gestione intelligente della ricarica dei veicoli elettrici in prospettiva vehicle-to-grid offre potenzialità per la razionalizzazione ed il risparmio energetico nell'uso dell'energia elettrica per l'elettromobilità. La bidirezionalità dell'interfaccia accumulo veicolo-rete rientra nei paradigmi *smart* delle reti elettriche introducendo non solo le azioni dei produttori, ma anche quelle dei consumatori e dei produttori-consumatori. Per questo scopo è richiesta una gestione intelligente dei singoli componenti e delle strategie di impiego per l'operatività congiunta dei componenti connessi a livello energetico e a livello informativo.

In tal contesto, le linee di attività sviluppate nell'ambito della precedente collaborazione (PAR2013) sono state finalizzate alla realizzazione di un modello energetico parametrizzato che consente di determinare le perdite e i rendimenti, in diverse condizioni operative, di un sistema di accumulo veicolare con funzioni di accumulo distribuito sulla rete di bassa tensione. In particolare, il modello sviluppato in Matlab/Simulink® è basato sull'impiego di mappe di efficienza energetica di tipo parametrico e modulare in modo da poter essere estese a diverse taglie di convertitore e di accumulatore elettrochimico.

In un'ottica di prosecuzione del lavoro, le attività oggetto della presente collaborazione (PAR2014) sono volte alla validazione, per mezzo di prove di laboratorio, dello strumento di calcolo sviluppato nell'ambito della precedente collaborazione. In particolare, le misure sperimentali sono finalizzate alla determinazione delle mappe di efficienza energetica del convertitore e di accumulatori al litio da trazione stradale. Le mappe di efficienza energetica determinate sperimentalmente permettono così la validazione del modello energetico di sistema sulla base di simulazioni di casi di studio con profili di carico di reti reali.

1 Introduzione

Le politiche incentivanti proposte dai Governi locali e dall'Unione Europea hanno fortemente promosso negli ultimi anni la mobilità elettrica. La previsione per il prossimo decennio è di ulteriore crescita del mercato dei veicoli elettrici (EV) puri (BEV), ibridi (HEV) e plug-in (PHEV), con l'acquisizione di una quota sensibile del numero totale di veicoli venduti [1], [2]. In un'ottica di sviluppo sostenibile, assumono pertanto un ruolo centrale la razionalizzazione ed il risparmio nell'uso dell'energia elettrica nell'elettromobilità. Inoltre, in uno scenario di ampia diffusione di EVs equipaggiati con sistemi per la ricarica delle batterie da rete elettrica, non è trascurabile il loro potenziale impatto sulle reti elettriche sia in termini di incremento del consumo di energia, sia in termini di spostamento orario dei picchi di assorbimento giornaliero [3], [4]. Pertanto, al fine di garantire la dovuta affidabilità e qualità dell'energia fornita alle utenze, le reti di bassa e media tensione devono essere opportunamente sovradimensionate e fortemente connesse tra di loro per un opportuno bilanciamento dei carichi energetici localizzati.

In tal ottica, notevoli potenzialità sono offerte dal paradigma di *smart grids*, il quale consiste nella decentralizzazione della gestione ottimale delle reti elettriche e dei carichi ad esse connessi al fine di ottimizzare le prestazioni complessive del sistema da un punto di vista economico, energetico ed ambientale [5], [6]. Per essere intelligente una rete deve integrare le azioni di tutti gli attori connessi, quindi non solo le azioni dei produttori (il paradigma tradizionale), ma anche quelle dei consumatori e dei produttori-consumatori (*prosumers*). Pertanto la *smartness* non è richiesta soltanto ai singoli componenti ma anche alle strategie di impiego per l'operatività congiunta dei componenti connessi a livello energetico e a livello informativo.

La rete intelligente ha bisogno di prodotti e servizi innovativi e di tecnologie evolute al fine di:

- integrare la generazione distribuita da fonti rinnovabili;
- ridurre l'impatto ambientale;
- fornire a consumatori e *prosumers* strumenti per ottimizzare i propri consumi energetici;
- minimizzare l'impatto sul sistema esistente della diffusione di infrastrutture per la mobilità elettrica;
- aumentare qualità e affidabilità del servizio.

Il binomio "veicolo elettrico – smart grid" è ampiamente trattato nella letteratura scientifica di settore degli ultimi anni ed emerge che, così come è evidente la centralità dell'aspetto infrastrutturale nella diffusione della mobilità elettrica, è anche opinione condivisa che i veicoli elettrici possano svolgere un ruolo importante per il futuro delle reti attive [7], [8]. In quest'ottica, la gestione intelligente della ricarica dei veicoli costituisce un tema d'innovazione che vede potenziali vantaggi per la rete in termini sia di adattabilità della domanda che di stoccaggio distribuito, e quindi di resilienza della rete stessa [9], [10].

La gestione intelligente della ricarica dei EVs in prospettiva *vehicle-to-grid* (V2G) è basata sul flusso bidirezionale di energia tra veicolo e rete, annoverando così le batterie ricaricabili a bordo veicolo come una fonte di immagazzinamento distribuito [11]. In tal contesto, ed in un'ottica di ampia diffusione di veicoli dotati di tecnologia V2G, la ricarica delle batterie a bordo delle vetture può essere gestita nell'arco temporale giornaliero affinché avvenga in orari di ridotta domanda di energia dalla rete, con una conseguente azione di *load-levelling* nei confronti della rete stessa. Viceversa, durante le ore di picco di domanda di energia dalla rete, le batterie dei veicoli possono essere parzialmente scaricate al fine di reimmettere l'energia in rete, sfruttandole come sorgenti di energia distribuita con una conseguente azione di *peak-shaving* nei confronti della rete [12]. Affinché tal operazione sia proficua è necessaria un'opportuna gestione dell'operatività congiunta della rete e dei veicoli per mezzo di strategie che tengano conto anche delle esigenze degli utilizzatori dei veicoli stessi, i quali devono poter disporre del veicolo con una sufficiente carica energetica in relazione ai propri fabbisogni di mobilità [13].

Sulla base delle attuali tecnologie, i PHEV sono la tipologia di EVs più promettente per lo sviluppo del concetto V2G; essi infatti, essendo alimentati anche da combustibile convenzionale, soffrono in misura minore della "range anxiety", non necessitano della ricarica veloce dell'intero pacco batterie e possono essere più facilmente caricati in diversi orari a seconda delle convenienze dell'utilizzatore del veicolo [1].

A fronte dei potenziali vantaggi lato rete, l'approccio V2G richiede l'utilizzo di un convertitore elettronico di potenza bidirezionale, il quale è caratterizzato da una maggior complessità sia in termini circuitali che di controllo rispetto ad un convenzionale caricabatteria unidirezionale. E' inoltre richiesta un'opportuna gestione dei flussi di carica-scarica in modo energeticamente ottimale, rispettando i vincoli derivanti sia dalle esigenze di disponibilità e impiego del veicolo sia dai livelli massimi di corrente e potenza che limitano gli effetti di invecchiamento dell'accumulatore elettrochimico.

Per quanto riguarda i convertitori per l'interfacciamento tra la rete e l'accumulatore elettrochimico, esistono soluzioni diverse per topologia circuitale, numero di fasi, taglia di tensione, corrente e potenza [14]. Analogamente, in funzione di un'ampia pluralità di fattori legati ai modi di impiego del veicolo ed alle prestazioni del powertrain, per il sistema di accumulo sono disponibili più tecnologie e differenti taglie di tensione, corrente e potenza.

Tuttavia, l'immagazzinamento dell'energia in accumulatori elettrochimici e la sua successiva cessione è un processo a rendimento non unitario [15], con un diverso impatto energetico nelle diverse condizioni di funzionamento del convertitore elettronico di potenza e dell'accumulatore elettrochimico. In particolare, il convertitore presenta un'efficienza massima in prossimità della sua piena potenza, mentre per gli accumulatori elettrochimici è tipicamente preferibile un profilo di carica-scarica a potenza ridotta per i vantaggi sia in termini di maggiore efficienza energetica sia di un più lento decadimento della capacità di accumulo (maggior numero di cicli vita).

In [16] sono documentate le attività di ricerca espletate nell'ambito del PAR 2013, inerenti alla realizzazione di un modello per la determinazione delle perdite e dei rendimenti, in diverse condizioni operative, di un sistema di accumulo veicolare interattivo con funzioni di accumulo distribuito sulla rete di bassa tensione. Lo strumento di calcolo è costituito da un modello energetico parametrizzato basato sull'impiego di mappe di efficienza energetica di diversa complessità e risoluzione per potersi adattare ai livelli di conoscenza disponibili per i sistemi che di volta in volta si intende simulare. La modellistica è stata implementata in Matlab/Simulink®, e le mappature energetiche sono di tipo parametrico e modulare in modo da poter essere estese a diverse taglie di convertitore e di accumulatore elettrochimico. Il modello sviluppato nella precedente attività include al proprio interno alcune mappe energetiche di esempio per il convertitore e per la batteria; è tuttavia prevista la possibilità di inserimento di nuove mappe da parte dell'utente che possono essere desunte da un'attività sperimentale, da dati di letteratura o da modelli circuitali di dettaglio del convertitore e della batteria.

Le attività di ricerca riportate nel presente documento sono la naturale prosecuzione del lavoro documentato in [16] e sono finalizzate alla validazione del modello energetico precedentemente sviluppato.

In particolare, l'attività consiste nello sviluppo di modelli circuitali di dettaglio e l'esecuzione di misure sperimentali finalizzati alla determinazione, in diverse condizioni operative, delle mappe di efficienza energetica in fase di carica e di scarica da utilizzarsi nel modello energetico sviluppato nella precedente collaborazione. Ciò permette l'analisi di simulazioni condotte applicando a casi di studio con profili di carico di reti reali il modello energetico sviluppato e validato a partire dalle misure sperimentali di laboratorio.

Per convenienza si richiamano brevemente nel Capitolo 2 la descrizione del sistema di ricarica per veicoli con funzionalità V2G e l'approccio modellistico riportato in [16] per il bilancio energetico dell'intero sistema.

2 Descrizione del sistema

In Figura 1 è riportata la schematizzazione dei principali componenti di un sistema di ricarica con funzionalità V2G, ovvero:

- filtro lato rete;
- convertitore elettronico di potenza: stadio AC/DC bidirezionale;
- convertitore elettronico di potenza: stadio DC/DC bidirezionale;
- filtro lato batteria;
- accumulatore elettrochimico (batteria).

Come si evince dallo schema di principio, il convertitore elettronico di potenza è costituito da due stadi distinti di conversione facenti parte della stessa struttura: lo stadio AC/DC e lo stadio DC/DC. Al fine di poter ottemperare alla carica ed alla scarica della batteria con la stessa struttura di convertitore, sia lo stadio di conversione AC/DC che quello DC/DC devono permettere il flusso di potenza bidirezionale, ovvero devono essere delle strutture cosiddette “a quattro quadranti”. La presenza del filtro lato rete si rende necessaria al fine di limitare la distorsione armonica della corrente assorbita (o erogata) in rete; analogamente il ripple di corrente lato batteria viene limitata per mezzo di un apposito filtro interposto tra la batteria stessa e lo stadio di conversione DC/DC.

Sia lo stadio AC/DC che lo stadio DC/DC sono controllati per mezzo di almeno una unità di controllo a microprocessore; inoltre, a seconda delle architetture di sistema, il controllo del convertitore comunica con l’unità centrale di controllo veicolo, di solito mediante una rete CAN.

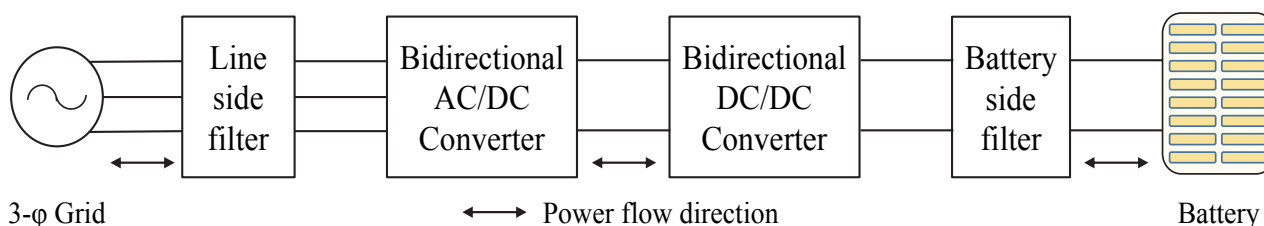


Figura 1. Schematizzazione dei componenti principali di un sistema di ricarica con funzionalità V2G.

2.1 Approccio modellistico per il bilancio energetico di sistemi di ricarica con funzionalità V2G

Al fine di valutare la proficuità di sistemi di ricarica con funzionalità V2G, nell’ambito delle linee di attività del PAR 2013 documentate in [16], è stato sviluppato uno strumento di calcolo per quantificare in diverse condizioni operative le perdite ed il rendimento di un sistema di accumulo distribuito, basato sullo sfruttamento delle batterie a bordo di veicoli elettrici ed ibridi connessi alla rete. Il modello è stato sviluppato per l’analisi del bilancio energetico di veicoli caratterizzati da range di potenza tipici di vetture per uso urbano e delivery van (5-50 kWh) per i quali i tempi di ricarica sono ragionevolmente compatibili con quelli previsti per l’applicazione.

L’approccio modellistico adottato per il convertitore e per la batteria è basato sull’utilizzo di mappe di efficienza energetica quali quelle riportate a titolo esemplificativo in Figura 2 ed in Figura 3. Sia la modellistica che le mappature energetiche sono modulari e parametrizzate in modo da poter essere estese a diverse taglie di convertitore e batteria, compatibilmente con i range di tensione, corrente e potenza individuate per l’analisi. Il modello permette di simulare profili di carica/scarica a bassa dinamica coerentemente con le dinamiche di campionamento dei profili di carico delle reti.

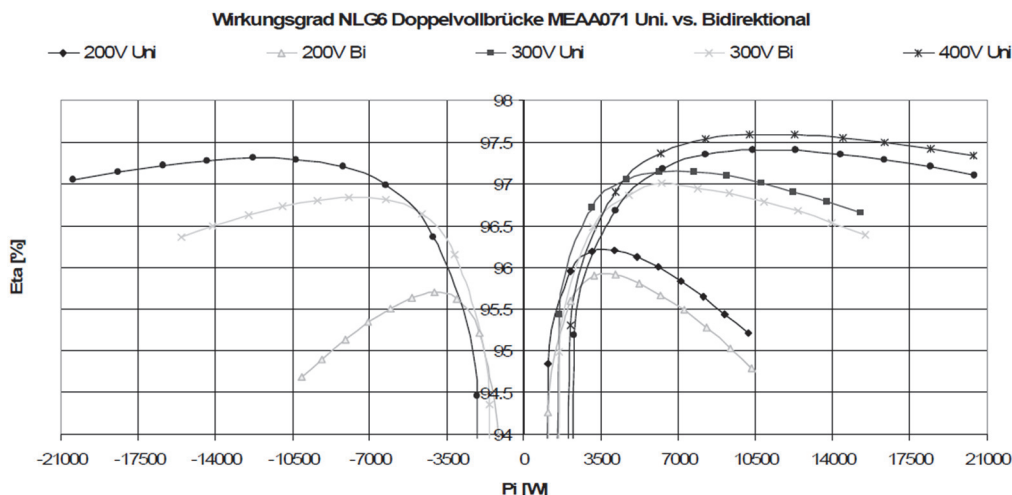


Figura 2. Rendimento di un caricabatteria in funzione della potenza di carica/scarica e della tensione di batteria [17].

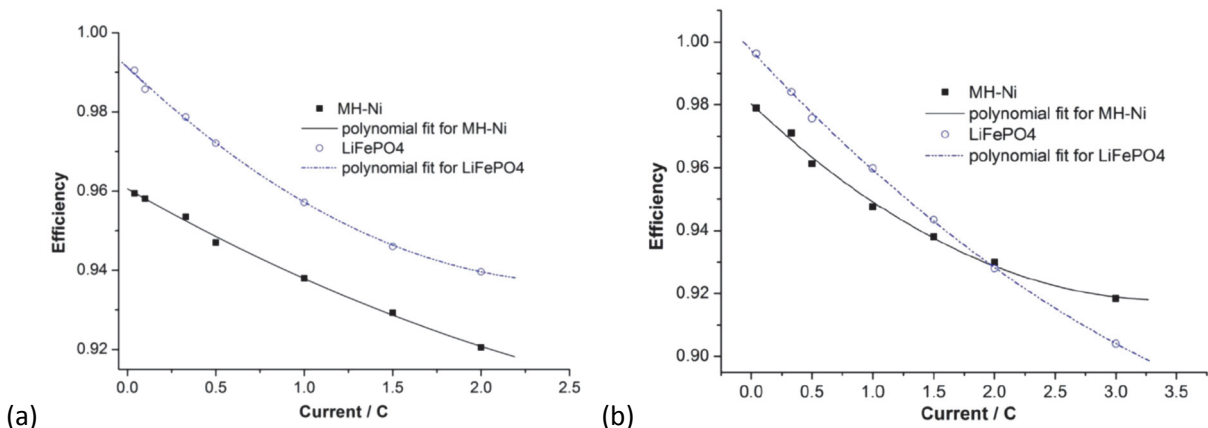


Figura 3. Efficienza energetica di una batteria in funzione della corrente: (a) fase di carica; (b) fase di scarica [18].

La modellistica basata sull'impiego di mappe di efficienza permette una maggior versatilità e facilità di utilizzo del modello stesso rispetto ad un approccio circuitale in quanto non richiede da parte dell'utilizzatore la conoscenza dettagliata dei sistemi e dei valori di tutti i componenti che si intende valutare energeticamente. Sia per il convertitore elettronico di potenza che per l'accumulatore elettrochimico, le mappe di efficienza possono essere ottenute dalla bibliografia tecnica di settore, ovvero da prove sperimentali o da modelli circuitali di dettaglio dei singoli sistemi. In quest'ultimo caso, ovviamente, è richiesta la conoscenza dettagliata del circuito e del valore di tutti i componenti costituenti il sistema convertitore e accumulatore. In Figura 4 è riportato lo schema di principio del modello energetico sviluppato, il quale è composto da:

- generatore di corrente di carica/scarica della batteria;
- modello della batteria;
- modello del convertitore bidirezionale;
- contatore energetico bidirezionale;
- rete elettrica.

Tenendo conto delle richieste e dei consensi sia della rete elettrica che dei veicoli, il modello genera un profilo di corrente di carica/scarica della batteria tenendo in conto eventuali limiti operativi realistici di funzionamento delle batterie, quali ad esempio uno stato di carica (SOC) compreso tra un limite minimo ed uno massimo impostati dall'utente del modello. Il modello della batteria e del convertitore permettono per ciascun ciclo di carica/scarica di determinare la loro efficienza energetica e lo SOC residuo della batteria. Il numero di cicli completi di carica/scarica, così come l'efficienza complessiva del sistema, vengono

determinati per mezzo del blocco contatore energetico bidirezionale ogni qualvolta si ha un ciclo completo di carica/scarica della batteria¹. Il contatore energetico bidirezionale si interfaccia a sua volta con il blocco rappresentante la rete elettrica, il quale permette all'utente di inserire i profili di carico della rete che si intende simulare.

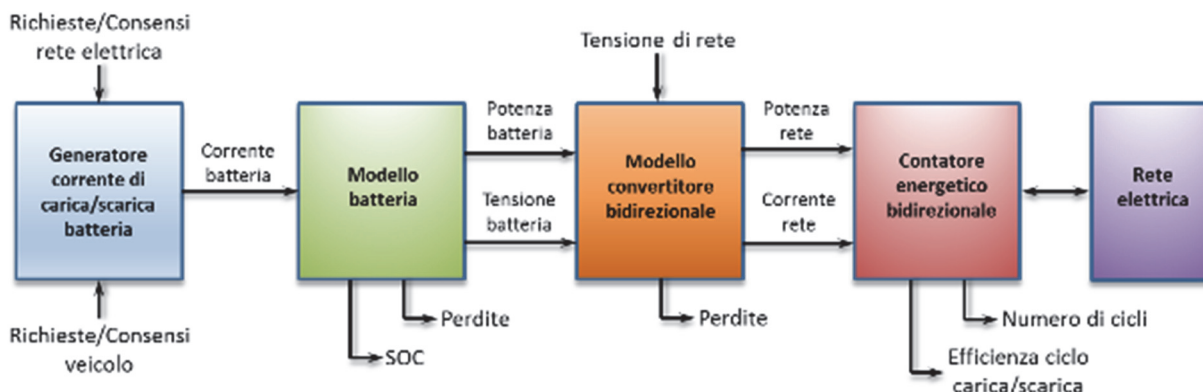


Figura 4. Schema di principio del modello per la valutazione del bilancio energetico di sistemi di ricarica con funzionalità V2G.

In Figura 5 è riportato il modello del sistema completo implementato in Matlab/Simulink[®] sviluppato sulla base dello schema di principio sopra esposto. Nel modello sviluppato, le funzioni di generazione dei profili di carica/scarica sono eseguiti dal blocco *Battery Management System* (BMS) sulla base dei segnali di feedback provenienti dalla batteria e del segnale logico di carica/scarica. Quest'ultimo è generato dal blocco *Logica di carica/scarica* sulla base delle richieste e dei consensi della rete e dei veicoli. Il riquadro rosso evidenzia i componenti che tipicamente vengono installati a bordo del veicolo; per quanto riguarda il convertitore, esso è stato racchiuso solo per metà all'interno di tal riquadro in quanto può essere installato a bordo veicolo oppure può essere in dotazione alle stazioni di ricarica a seconda delle architetture di sistema.

Il modello è stato implementato nell'ipotesi di tensione di rete costante e di temperatura del sistema in analisi all'interno dei limiti di normale operatività dichiarati dai costruttori dei vari componenti, ovvero senza degrado termico delle caratteristiche degli stessi durante le simulazioni.

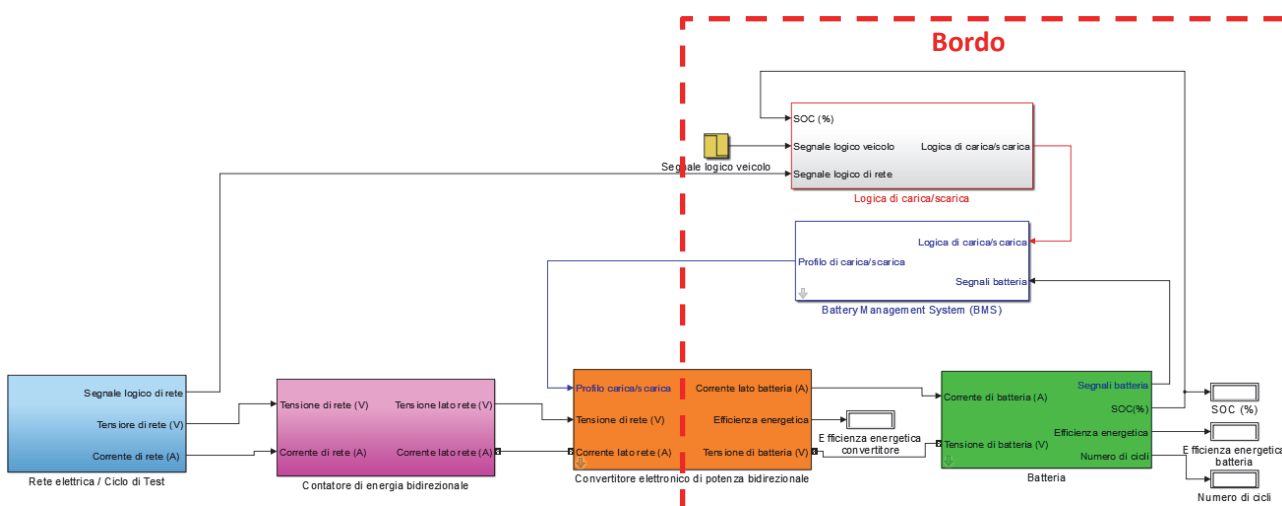


Figura 5. Modello Matlab/Simulink[®] del sistema completo.

¹ Per ciclo completo di carica/scarica si intende un ciclo per il quale la batteria raggiunge un valore di SOC pari al valore di SOC iniziale.

3 Modello circuitale del convertitore elettronico bidirezionale

In riferimento alla schematizzazione dei principali componenti di un sistema di ricarica con funzionalità V2G riportato in Figura 1, in Figura 6 è mostrato in dettaglio lo schema circuitale del sistema stesso. Il convertitore lato rete a due livelli (*Active Front End Converter*) costituisce lo stadio di conversione AC/DC, ed è costituito da tre rami (comunemente denominate "gambe") aventi ciascuno due dispositivi elettronici di potenza di tipo *Insulated –Gate Bipolar Transistor* (IGBT) con i rispettivi diodi di ricircolo; l'insieme dell'IGBT e dei diodi di ricircolo è comunemente denominato "power modules" o "power switches", il quale può essere di tipo singolo se costituito da una gamba solo, oppure trifase se costituito da tre gambe. Lo stadio in continua (*DC Stage*) mostra il banco condensatori del bus in continua seguito dal convertitore di potenza DC/DC. Lo stadio di conversione DC/DC bidirezionale lato batteria agisce da abbassatore di tensione (*buck converter*) quando il flusso di potenza è dal DC-link verso la batteria (carica della batteria), e da elevatore di tensione (*boost converter*) quando il flusso di potenza è dalla batteria verso il DC-link (scarica delle batteria).

I filtri passivi lato rete (*Line side filter*) e lato batteria (*Battery side filter*) sono costituiti da elementi induttivi ed elementi capacitivi i quali richiedono un accurato dimensionamento affinché i filtri stessi operino opportunamente nell'attenuazione delle armoniche indesiderate; il dimensionamento dei filtri del convertitore elettronico prototipale oggetto della presente attività sono riportati in dettaglio nei paragrafi successivi.

In Figura 6 sono schematizzati anche i punti di misura per i segnali di tensione necessari per il controllo del convertitore stesso; in particolare è rappresentata la misura della tensione lato rete, della tensione di DC-link e della tensione lato batteria. Le correnti vengono misurate per ciascuna gamba di entrambi gli stadi di conversione. Per semplicità di rappresentazione non sono incluse nello schema circuitale qui riportato i dettagli circuitali per la trasmissione dei comandi di apertura e chiusura degli *switch* e per lo scambio di informazioni tra il convertitore elettronico e l'*host PC* attraverso il sistema dSpace.

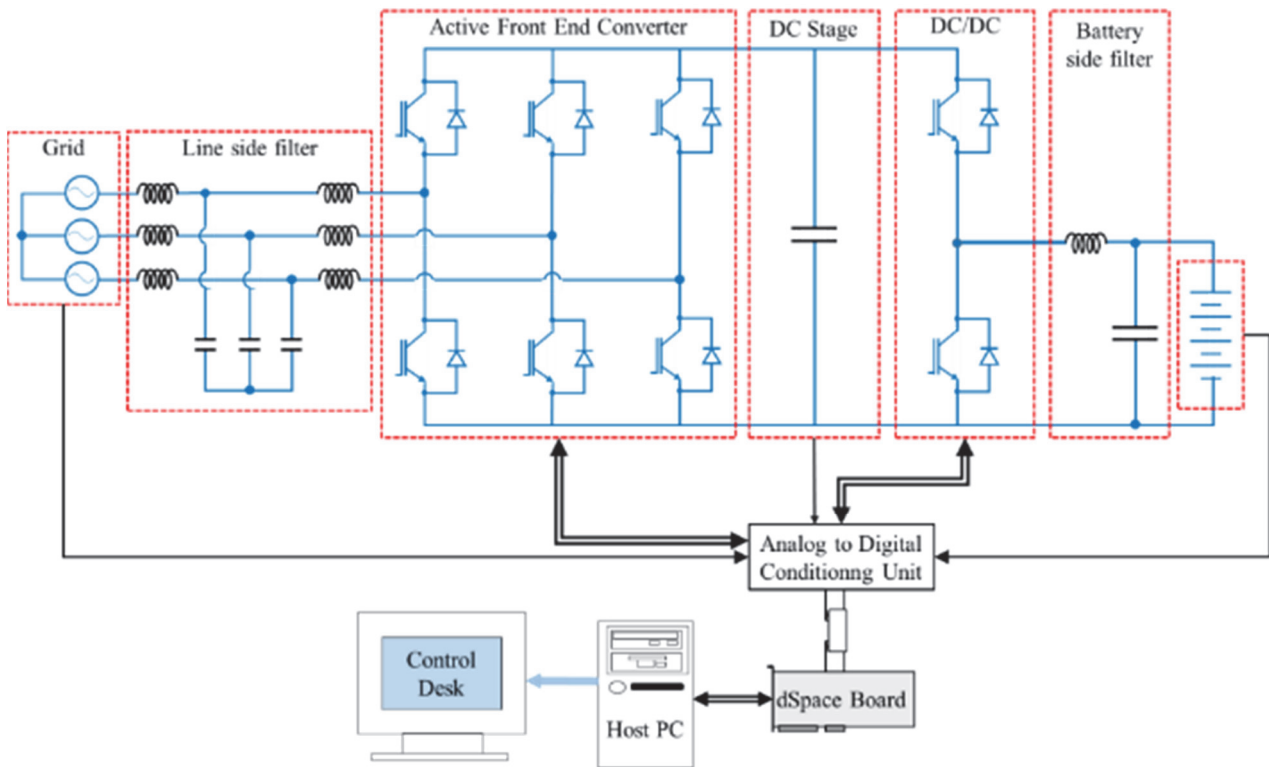


Figura 6. Schema circuitale del sistema di ricarica bidirezionale per accumulatori veicolari.

3.1 Dimensionamento filtro lato rete

Al fine di ridurre gli effetti di distorsione armonica della forma d'onda di corrente assorbita o generata in rete, si è interposto tra il convertitore elettronico di potenza e la rete stessa un filtro LCL. Tal filtro permette di introdurre un percorso a bassa impedenza che permette di attenuare le armoniche di corrente non desiderate nei confronti della rete. Come evidenziato in Figura 7, per ciascuna fase tal filtro è composto da un induttore lato convertitore ("1 e 2"), da un condensatore ("3") e da un successivo induttore lato rete ("4"). Si precisa che in Figura 7 l'induttore lato convertitore è indicato con due numeri per coerenza con le sezioni successive del presente documento che ne descrivono l'hardware del sistema, ove il valore di induttanza totale è stato ottenuto connettendo in serie due induttanze.

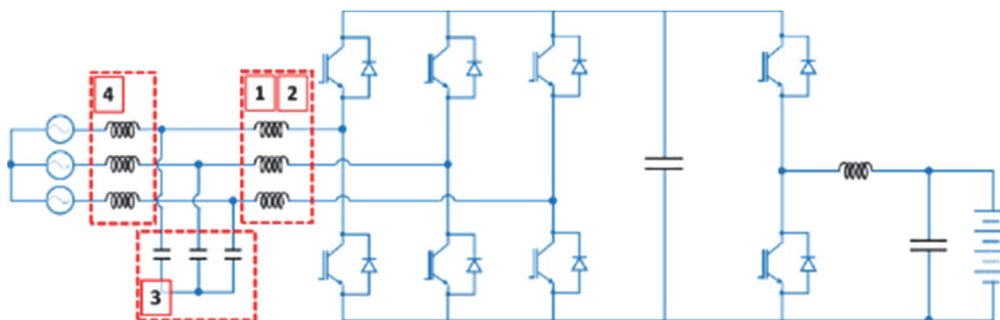


Figura 7. Identificazione dei componenti del filtro LCL interposto tra convertitore e rete.

Affinché il filtro attenui determinate armoniche di corrente indesiderate limitando il suo effetto sull'armonica fondamentale, esso deve essere opportunamente dimensionato per mezzo di un'accurata selezione dei valori di induttanza e capacità.

In particolare, il valore di induttanza lato convertitore ("1 e 2") è determinato sulla base del massimo ripple di corrente accettato, che per il presente lavoro è il 10% picco-picco della corrente nominale. Le equazioni per il dimensionamento dell'induttore lato convertitore sono le seguenti:

$$L_{1-2} = \frac{V_{dc}}{6 \cdot f_{sw} \cdot \Delta I_L} \quad (1)$$

$$\Delta I_L = I_n \cdot \Delta I_{Lmax} \quad (2)$$

dove ΔI_{Lmax} , ΔI_L e I_n sono il massimo ripple di corrente accettato in percentuale rispetto alla corrente nominale, il ripple di corrente desiderato e la corrente nominale, rispettivamente.

Il condensatore ("3") è invece dimensionato sulla base del massimo assorbimento di potenza reattiva ammesso per il filtro in questione, che per il presente lavoro è pari al 5% della potenza nominale del convertitore per non peggiorare il fattore di potenza in ingresso. L'equazione per il dimensionamento del condensatore è sintetizzata in (3), dove C_3 è il valore di capacità del filtro, x è la quantità di potenza reattiva ammessa in percentuale della potenza nominale e C_b è la capacità base definita in (4).

$$C_3 = x \cdot C_b \quad (3)$$

$$C_b = \frac{1}{\omega \cdot Z_b}; \quad Z_b = \frac{3 \cdot V_{fase}^2}{S_{3-fase}} \quad (4)$$

dove ω è la pulsazione di rete, Z_b è l'impedenza base, V_{fase} è la tensione stellata di rete e S_{3-fase} è la potenza apparente trifase di rete. Considerando la potenza lato rete del convertitore pari a 20 kVA, il valore di capacità C_3 risulta essere pari a 22 μ F.

Il valore di induttanza lato rete ("4") è determinato in base all'attenuazione desiderata del ripple di corrente. La funzione di trasferimento della corrente tra convertitore e rete è espressa in (5), dove a è una costante ed r è il fattore di attenuazione.

$$\frac{i_g(h_{sw})}{i(h_{sw})} = \frac{1}{|1+r(1-a \cdot x)|} \quad (5)$$

$$a = L_{1-2} \cdot C_b \cdot \omega_{sw}^2 \quad (6)$$

Nel dimensionamento del filtro va considerato che il valore totale di induttanza (somma dell'induttanza lato rete e dell'induttanza lato convertitore) deve essere inferiore a 0.1 p.u. al fine di limitare le perdite di potenza dovute al filtro stesso. Deve essere inoltre verificata la frequenza di risonanza del filtro LCL sulla base dei valori selezionati per le induttanze e le capacità utilizzando l'equazione (7).

$$\omega_{res} = \sqrt{\frac{L_{1-2} + L_4}{L_{1-2} \cdot L_4 \cdot C_3}} \quad (7)$$

La frequenza di risonanza del filtro LCL deve essere almeno 10 volte superiore alla frequenza di rete (50 Hz) e minore della metà della frequenza di commutazione del convertitore (10 kHz) al fine di prevenire la risonanza delle armoniche di corrente. Nel caso in cui la frequenza di risonanza fosse al di fuori di tali limiti, è necessario ridimensionare il filtro variando il limite di potenza reattiva ammessa o il fattore di attenuazione. In Tabella 1 sono riportati i valori di induttanza e capacità del filtro LCL interposto tra convertitore e rete.

Tabella 1. Valori di dimensionamento del filtro LCL interposto tra convertitore e rete.

| | |
|--|--------|
| Induttanza lato convertitore ("1 e 2") | 570 μH |
| Capacità ("3") | 22 μF |
| Induttanza lato rete ("4") | 120 μH |

In Figura 8 è mostrato il risultato di simulazione di attenuazione del ripple di corrente lato rete rispetto alla corrente lato convertitore da parte del filtro LCL dimensionato secondo quanto sopra esposto.

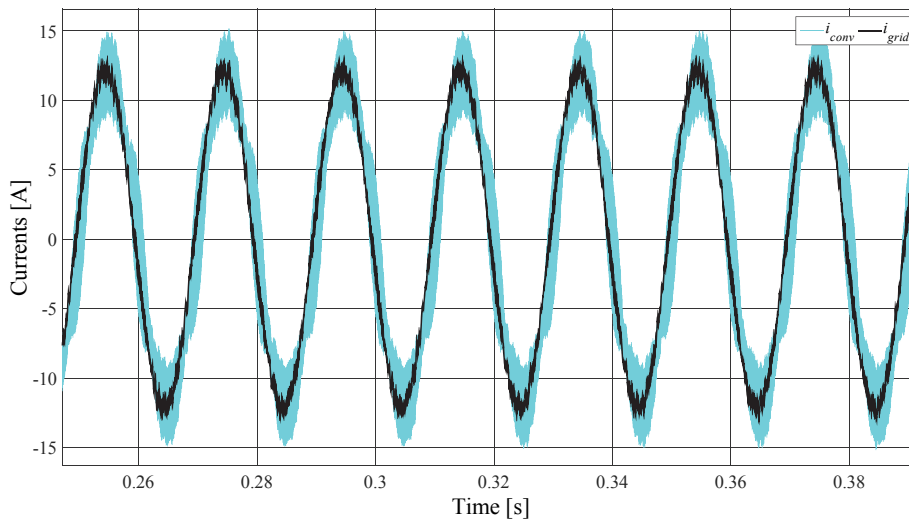


Figura 8. Simulazione dell'attenuazione del ripple di corrente lato rete rispetto alla corrente lato convertitore da parte del filtro LCL (risultato mostrato per una sola fase per semplicità).

3.2 Dimensionamento filtro lato batteria

Al fine di ridurre il ripple di corrente assorbita o generata dalla batteria, tra il convertitore elettronico di potenza e la batteria è interposto un filtro LC. Tal filtro permette di mantenere il più possibile costante il valore di tensione lato batteria limitando al contempo il ripple di corrente ad un valore accettabile che, normalmente, per le applicazioni di caricabatteria si attesta tra il 3% ed il 10% della corrente nominale.

Il massimo valore accettato per il ripple di corrente influisce direttamente sulla determinazione del valore di induttanza del filtro LC stesso. Il valore di induttanza (identificata con "5" nelle sezioni successive inerenti la descrizione dell'hardware prototipale) può essere calcolato usando (8), dove D , Δi_L e f_{sw} sono rispettivamente il duty cycle, il ripple della corrente di uscita e la frequenza di commutazione.

$$L_{\min} = \frac{(V_{dc} - V_{batt}) \cdot D}{\Delta i_L \cdot f_{sw}} \quad (8)$$

Per la taratura del filtro lato batteria, vanno considerati due limiti: il ripple della tensione di uscita (lato batteria) e la risposta dinamica del controllo. Al fine di avere un'adeguata risposta dinamica del controllo, il valore di induttanza del filtro LC lato batteria viene scelto pari al valore di induttanza lato rete del filtro LCL. Il valore minimo di capacità del filtro LC lato batteria, è determinato dalla (9) dove Δv è il massimo valore picco-picco accettato per il ripple di tensione.

$$C_{\min} = \frac{\Delta i_L}{8 \cdot f_{sw} \cdot \Delta v} \quad (9)$$

In Tabella 2 è riportato il valore di induttanza del filtro LC interposto tra convertitore e batteria.

Tabella 2. Valori di dimensionamento del filtro LC interposto tra convertitore e batteria.

| | |
|------------------|-----------------------------------|
| Induttanza ("5") | 10 mH |
| Capacità | Interna all'emulatore di batteria |

3.3 Controllo dello stadio di conversione lato rete

Il convertitore elettronico di potenza bidirezionale lato rete permette la conversione statica della corrente alternata assorbita dalla rete in corrente continua, interfacciando così la rete elettrica con il DC-link. In particolare, lo stadio di conversione AC/DC lato rete mantiene la tensione del bus in continua ad un valore impostato, indipendentemente dalla corrente assorbita o erogata dalla batteria.

Il controllo si basa pertanto sulla retroazione (*feedback*) della misura di tensione del bus in continua. Come si evince dallo schema a blocchi del controllo mostrato in Figura 9, la misura della tensione di DC-link retroazionata viene confrontata con il valore di riferimento, generando così, per mezzo di un regolatore Proporzionale-Integrale (PI), il comando per la corrente in asse diretto (asse d). L'anello interno per il controllo della corrente è anch'esso costituito da un regolatore PI.

Il controllo si avvale inoltre di un regolatore per la corrente in asse di quadratura (asse q) al fine di mantenere la corrente in asse q a zero; ciò permette di ottenere un fattore di potenza unitario per la potenza assorbita in ingresso lato rete.

Entrambi gli anelli di corrente sono dotati di un opportuno segnale di *feedforward* per compensare la tensione del filtro LCL lato rete.

3.5 Modello di simulazione

In Figura 11 ed in Figura 12 è mostrato il modello di simulazione circuitale del convertitore elettronico di potenza bidirezionale sviluppato in Matlab/Simulink® utilizzando i moduli *SimPowerSystems*.

Procedendo da destra verso sinistra, il modello è costituito da un blocco “*Rete Elettrica*” il quale modella la rete elettrica trifase a cui il sistema è connesso; tal blocco genera tre sinusoidi sfasate tra di loro di 120 gradi elettrici con ampiezza e frequenza definite dall’utente (ad esempio 230 V_{rms fase-fase} e 50 Hz).

Come si può vedere da Figura 12.a, al blocco “*Rete Elettrica*” è stato connesso un blocco “*Voltage measurement*” il quale permette di misurare e visualizzare in output la tensione concatenata tra due fasi. Successivamente vi è il blocco “*Soft-start convertitore*” il quale, inserendo opportune resistenze di valore pari a 5 Ω per ciascuna fase, permette di limitare il valore della corrente assorbita dal condensatore di DC-link durante le fasi iniziali di innalzamento della tensione del bus in continua. Tali resistenze vengono automaticamente disinserite dal controllo del convertitore una volta che la tensione di DC-link abbia raggiunto un valore minimo di tensione (300 V). Successivamente vi è un blocco per la misura e la visualizzazione delle correnti di rete su ciascuna fase, seguito dai blocchi modellizzanti il filtro LCL. Questi ultimi, al fine di modellizzare in modo realistico i componenti fisici, sono composti dalla serie dei rispettivi componenti induttivi e capacitivi congiuntamente ad opportune resistenze.

In Figura 12.b sono mostrati lo stadio di conversione AC/DC e lo stadio di conversione DC/DC, con interposto tra di loro il blocco modellizzante il DC-link. Quest’ultimo, al suo interno, è composto da un condensatore in serie ad una resistenza oltre che da sensori per la misura di tensione e corrente; come già precedentemente detto, le misure di tensione e corrente di DC-link sono necessarie per le strategie di controllo e di protezione del convertitore. A valle dello stadio di conversione DC/DC vi è un teleruttore per la connessione della batteria al convertitore ed un misuratore della corrente continua di batteria. Tra il modello di batteria ed il convertitore, come già precedentemente descritto, è interposto un filtro induttivo per ridurre il ripple di corrente lato batteria.

In Figura 12.c sono riportati i blocchi per il condizionamento dei segnali analogici/digitali, i quali sono necessari per interfacciare le misure di tensione e corrente eseguite dai sensori precedentemente descritti con i blocchi che eseguono le routine di controllo. Questi ultimi, mostrati anch’essi in Figura 12.c, permettono attraverso il codice scritto in linguaggio C ed implementato nelle *S-Function* di Matlab®, di generare i segnali di comando per gli switch di potenza degli stadi di conversione, oltre che gestire l’apertura e la chiusura dei teleruttori per la connessione di potenza, soft-start, ecc.

In ingresso al blocco di controllo, oltre ai vari segnali acquisiti dal modello, sono previsti i segnali di “*Riferimento corrente di batteria*” e “*Comandi convertitore – Virtual commands grid side converter*”. Il primo permette di settare il valore di corrente assorbita o generata dalla batteria (valore positivo corrisponde a corrente assorbita dalla batteria, valore negativo corrisponde a corrente generata dalla batteria). L’ingresso dei comandi del convertitore permette invece di virtualizzare i comandi della macchina a stati (implementata all’interno delle routine di controllo) gestibili dall’utente, quali il comando di GO e di RESTART.

Il modello circuitale sviluppato permette di simulare il funzionamento dell’intero sistema di conversione, valutando così sia la funzionalità del codice di controllo implementato che il dimensionamento dei filtri lato rete e lato batteria. In particolare, il codice di controllo che viene eseguito durante le simulazioni è lo stesso che viene adottato per il controllo del convertitore prototipale durante le prove in laboratorio. Ciò permette di apportare le dovute calibrazioni dei parametri di controllo in fase di simulazione, verificando così la correttezza dei parametri settati. La simulazione permette inoltre di verificare la corretta esecuzione della macchina a stati che gestisce le diverse fasi di operatività del convertitore, il raggiungimento dei livelli preimpostati per la chiusura o l’apertura dei teleruttori, i tempi di attesa per l’assestamento di tensioni e correnti, i limiti settati per l’intervento delle protezioni, ecc.

Nel paragrafo successivo sono riportati i risultati di simulazione per la validazione della macchina a stati durante l’avviamento del convertitore elettronico di potenza prototipale dell’attività in oggetto.

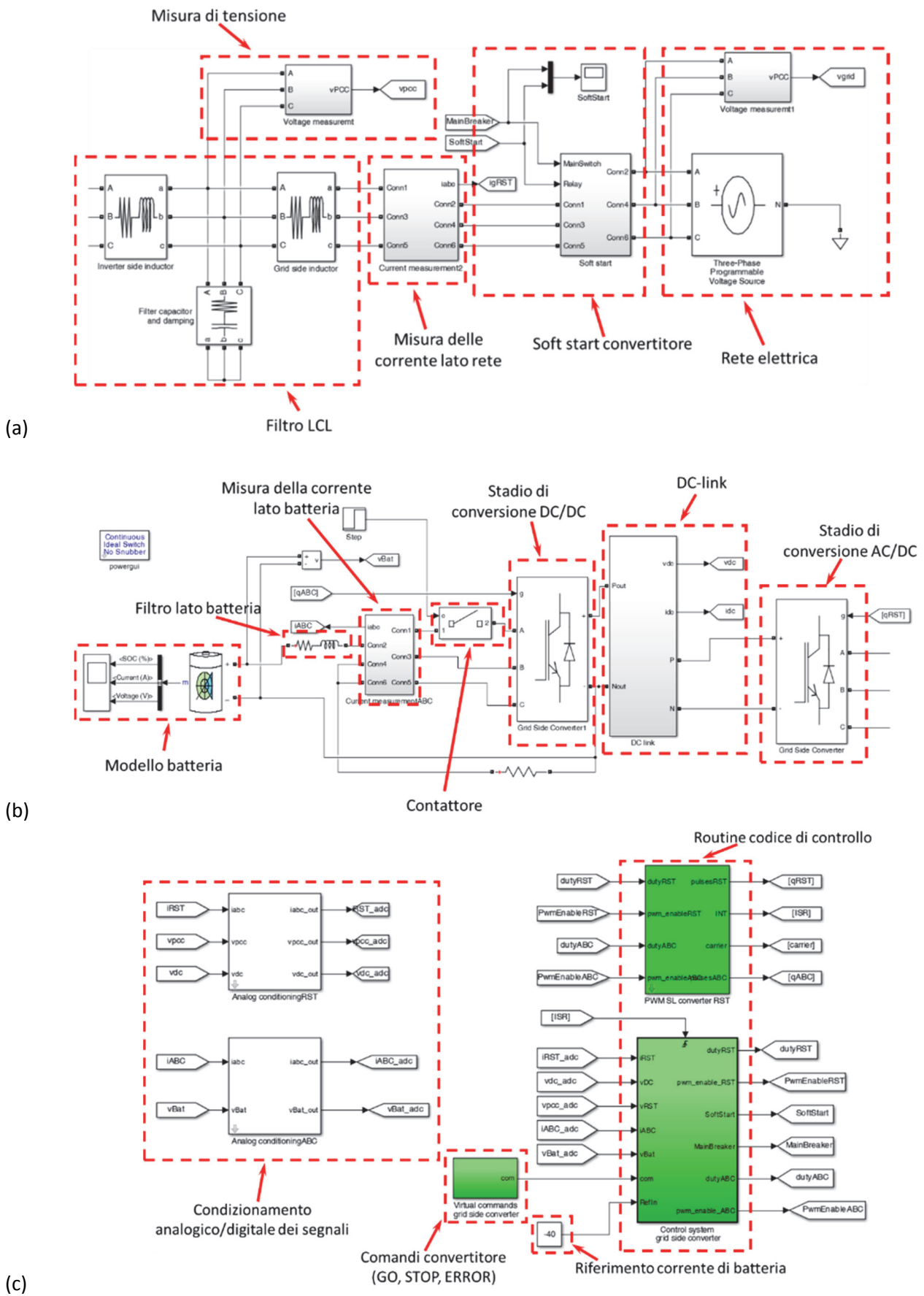


Figura 12. Dettaglio del modello di simulazione circuitale del convertitore elettronico di potenza: (a) modello lato rete; (b) modello lato batteria; (c) condizionamento segnali e blocchi di controllo.

3.6 Esempio di simulazione

Nelle figure seguenti, sono riportati i risultati di un esempio di simulazione eseguita utilizzando il modello circuitale precedentemente descritto. In particolare la simulazione consta nella fase di avviamento del convertitore, con la precarica del DC-link e la successiva fase di carica della batteria con una corrente pari a 40 A.

In Figura 13 sono riportate le correnti assorbite dal convertitore dal lato della rete elettrica. Per evitare forti correnti assorbite dai condensatori del bus in continua, l'avviamento avviene attraverso le resistenze di *soft-start* che limitano la corrente in ingresso. Come si evince dall'andamento della tensione del bus in continua raffigurata nella Figura 14, essa presenta un incremento esponenziale fino a 300 V che è la tensione di *wake-up*, cioè il valore minimo della tensione che settato per l'avviamento del sistema. Raggiunta il valore di tensione di *wake-up*, le resistenze di *soft-start* vengono bypassate ed il convertitore viene collegato direttamente alla rete. In corrispondenza di tal istante, si può vedere come sia le correnti assorbite dal convertitore dal lato della rete elettrica (Figura 13) che la corrente del bus in continua (mostrata in Figura 15) presentino dei picchi.

All'istante $t = 0.1$ s, viene dato il comando di GO al convertitore lato rete, il quale inizia a modulare innalzando la tensione del DC-link a 400V, il valore di riferimento durante sperimentazione sul banco. In Figura 14 è evidente come la tensione del DC-link aumenti linearmente a spesa della corrente in ingresso dalla rete (Figura 13).

All'istante $t = 0.125$ s, avviene l'inserzione della batteria la quale viene caricata ad una corrente costante pari a 40 A. In Figura 16 ed in Figura 17 sono rispettivamente mostrate la tensione di batteria e la corrente da essa assorbita. Al fine di mantenere la tensione del bus in continua a 400 V, l'anello di corrente del convertitore lato rete comanda gli *switch* ad assorbire una corrente maggiore dalla rete, come visibile in Figura 13.

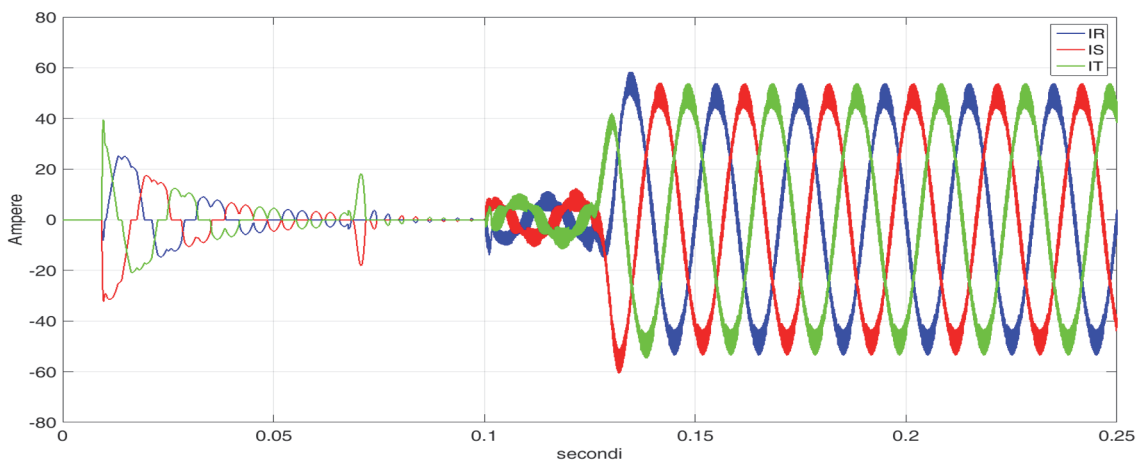


Figura 13. Correnti assorbite dal convertitore lato rete nella fase di avviamento e durante la carica della batteria.

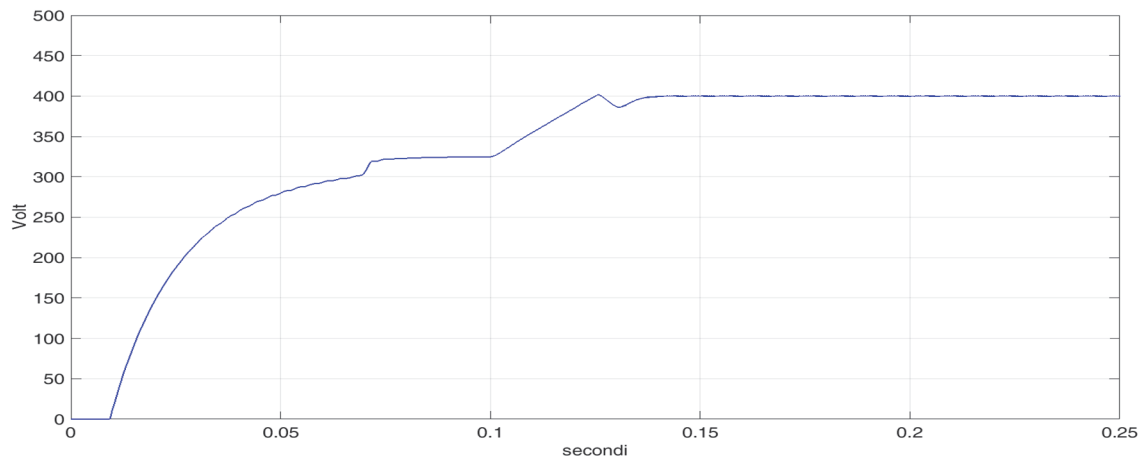


Figura 14. Evoluzione della tensione di DC-link durante il soft-start e nella fase di erogazione di potenza alla batteria.

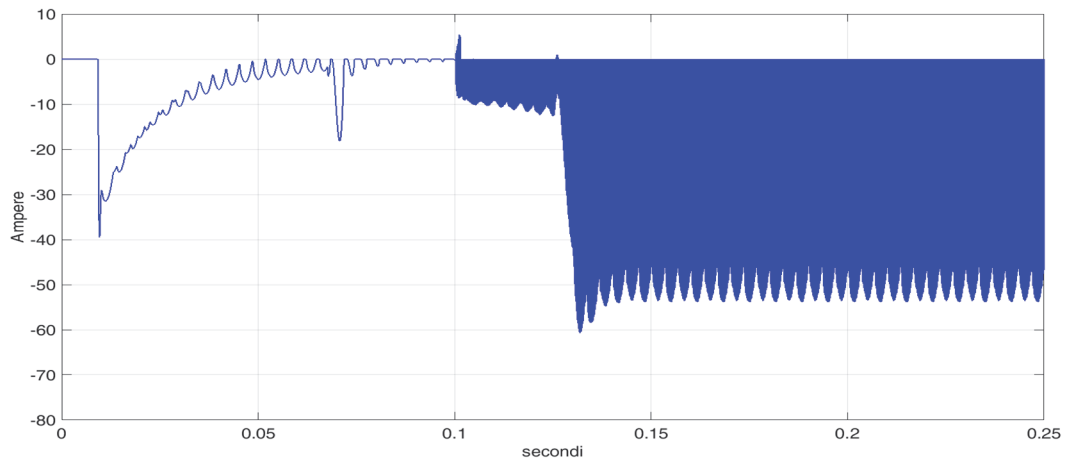


Figura 15. Corrente di DC-link.

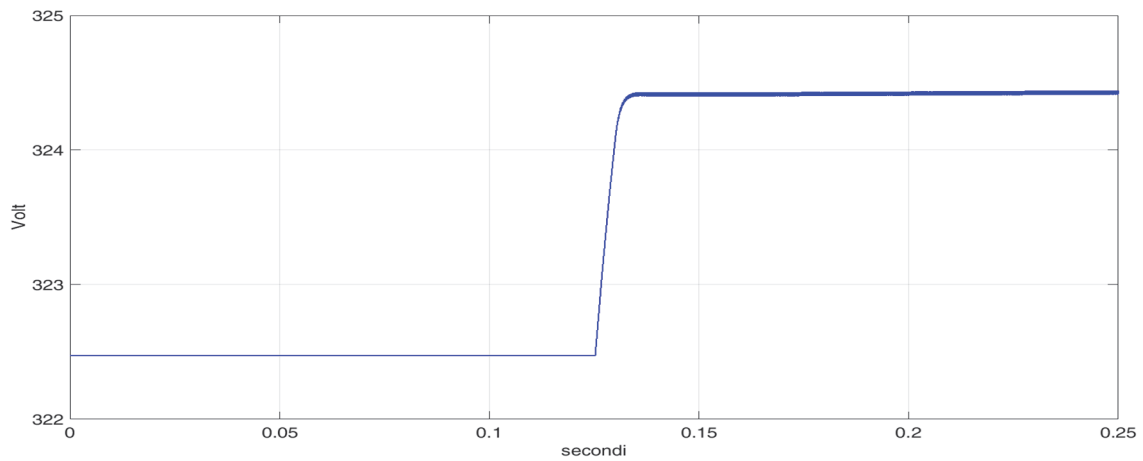


Figura 16. Tensione di batteria durante la fase di carica.

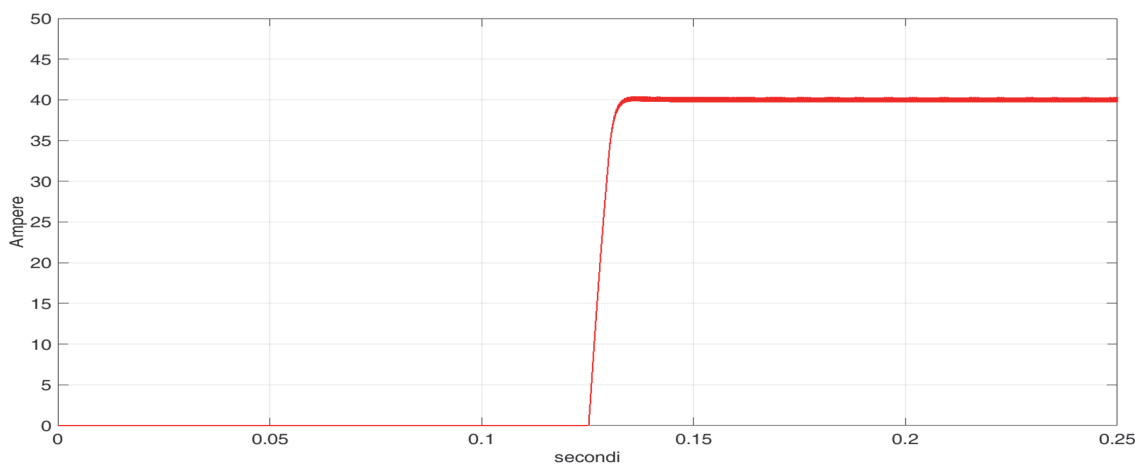


Figura 17. Corrente assorbita dalla batteria in fase di carica.

4 Descrizione del convertitore prototipale

Al fine di validare il modello energetico del convertitore elettronico di potenza bidirezionale, è stata condotta un’attività sperimentale utilizzando l’hardware prototipale mostrato in Figura 18, atto all’emulazione di sistemi di conversione bidirezionali per la ricarica di accumulatori veicolari. In particolare, l’hardware prototipale mostrato in figura è costituito dal convertitore elettronico di potenza bidirezionale, dai filtri di accoppiamento lato rete e lato batteria e dai componenti necessari per l’alimentazione dei sistemi ausiliari per il funzionamento del convertitore stesso.

In Figura 19 è riportato una vista di dettaglio del convertitore il quale, al proprio interno, è costituito da uno stadio di conversione AC/DC (*active front end converter*), da uno stadio di conversione DC/DC e da un banco di condensatori di accoppiamento sul DC-link con valore di capacità totale pari a 1880 μ F. Entrambi gli stadi di conversione sono equipaggiati con moduli Mitsubishi da 100 A – 600 V e frequenza di commutazione di 10 kHz. I moduli di potenza sono bidirezionali al fine di poter ottemperare con la stessa struttura sia la carica che la scarica della batteria. La potenza lato rete gestibile dall’hardware utilizzato è pari a 20 kVA con una tensione massima lato DC pari a 400 V. Come si può vedere in Figura 19.a, il convertitore è dotato di raffreddamento a liquido.

In Figura 19.b è mostrata in dettaglio la scheda di interfaccia tra il convertitore ed il controllo digitale, il quale è stato sviluppato per mezzo del sistema modulare di prototipazione rapida dSpace DS1005 (Figura 20). Quest’architettura modulare del sistema è stata scelta per utilizzare una sola scheda per ciascun compito hardware specifico (per esempio: la scheda DS5101 per la modulazione PWM, la scheda DS2004 per la conversione A/D, la scheda DS4302 per le comunicazioni CAN). In particolare, il controllo digitale è stato implementato sull’host PC per mezzo di routine *S-Function* scritte in linguaggio di programmazione C; le routine di controllo, una volta compilate, vengono eseguite in real-time dal sistema dSpace. In Figura 19.b è mostrata la scheda di interfaccia tra il sistema modulare dSpace ed il convertitore elettronico di potenza; come evidenziato in figura, la scheda di interfaccia è equipaggiata con una CPLD (*Complex Programmable Logic Device*) la quale assolve alla gestione ed esecuzione dei comandi generati dal controllo (compresi i comandi degli switch di potenza degli stadi di conversione AC/DC e DC/DC), al condizionamento dei segnali analogici/digitali ed alla gestione delle protezioni dell’hardware, comando per i teleruttori, relè di soft-start, ecc.

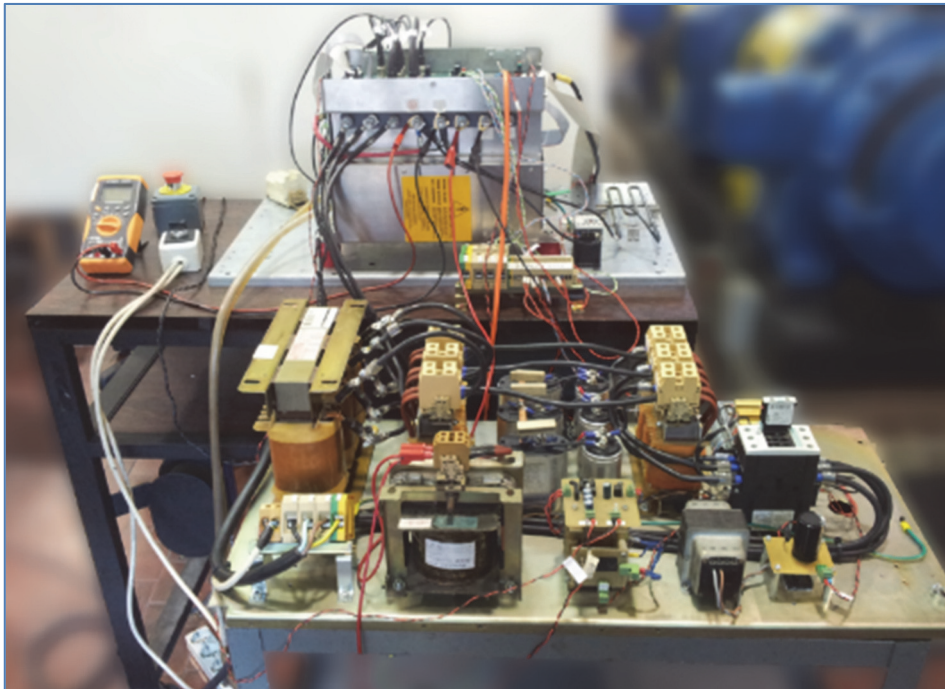


Figura 18. Hardware di laboratorio per l'emulazione di convertitori bidirezionali per la ricarica di accumulatori veicolari.

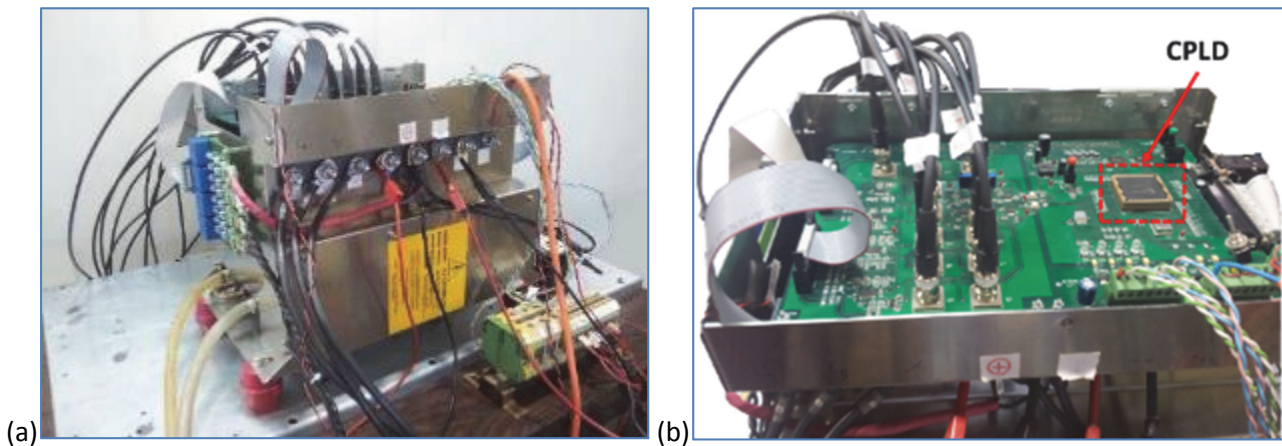


Figura 19. Dettaglio del convertitore elettronico di potenza: (a) ingresso ed uscita del raffreddamento a liquido; (b) scheda di interfaccia.



Figura 20. Host PC e dSpace DS1005 board per l'implementazione del controllo digitale del convertitore.

In Figura 21 è mostrata in dettaglio la componentistica hardware dei filtri di accoppiamento lato rete e lato batteria e dei componenti ausiliari necessari per il funzionamento del sistema. In particolare:

- **1 e 2:** induttanze lato convertitore del filtro LC interposto tra la rete elettrica ed il convertitore elettronico di potenza, con valore di induttanza totale pari a 570 μH ottenuto connettendo in serie due induttori per ciascuna fase;
- **3:** condensatori del filtro LC interposto tra la rete elettrica ed il convertitore elettronico di potenza, con valore di capacità totale pari a 22 μF ;
- **4:** induttanze lato rete del filtro LCL interposto tra la rete elettrica ed il convertitore elettronico di potenza, con valore di induttanza totale pari a 120 μH ;
- **5:** induttanze del filtro LC interposto tra il convertitore elettronico di potenza e la batteria, con valore di induttanza totale pari a 10 mH;
- **6:** alimentazione ausiliari del convertitore;
- **7:** teleruttore per la connessione alla rete elettrica;
- **8:** resistenze di precarica del DC-link.

In Figura 21.c sono evidenziati sullo schema circuitale i rispettivi componenti hardware mostrati in Figura 21.a e Figura 21.b per il filtro lato rete e lato batteria; trattandosi di uno schema circuitale semplificato, non sono riportati su quest'ultimo i sistemi ausiliari per il funzionamento del convertitore (quali ad esempio i circuiti di pilotaggio dei moduli di potenza).

Va precisato che il condensatore del filtro LC lato batteria visibile nello schema circuitale di Figura 21.c non è presente tra i componenti hardware mostrati in Figura 21.a e Figura 21.b in quanto l'utilizzo dell'emulatore di batterie permette di evitarne l'uso.

Le prove sperimentali sono state condotte utilizzando un emulatore programmabile di batteria (Figura 22), il quale permette sia di erogare che di assorbire energia con profili di tensione e corrente tipici degli accumulatori elettrochimici.

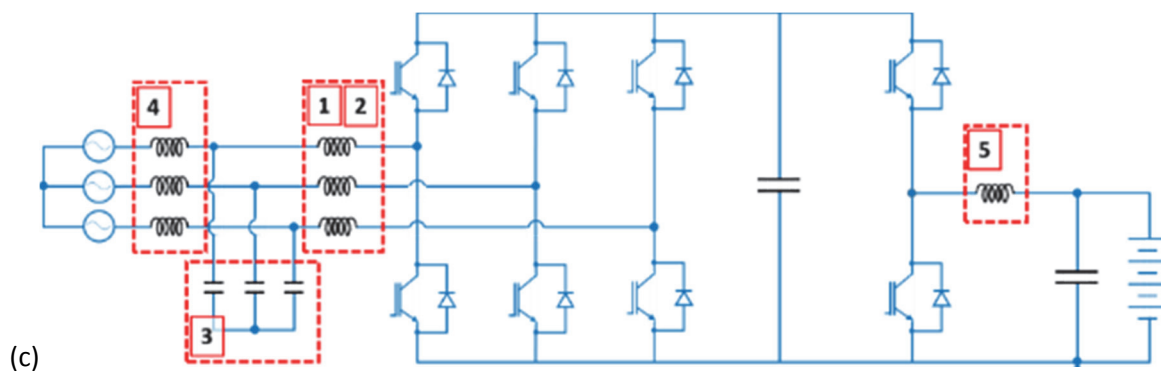
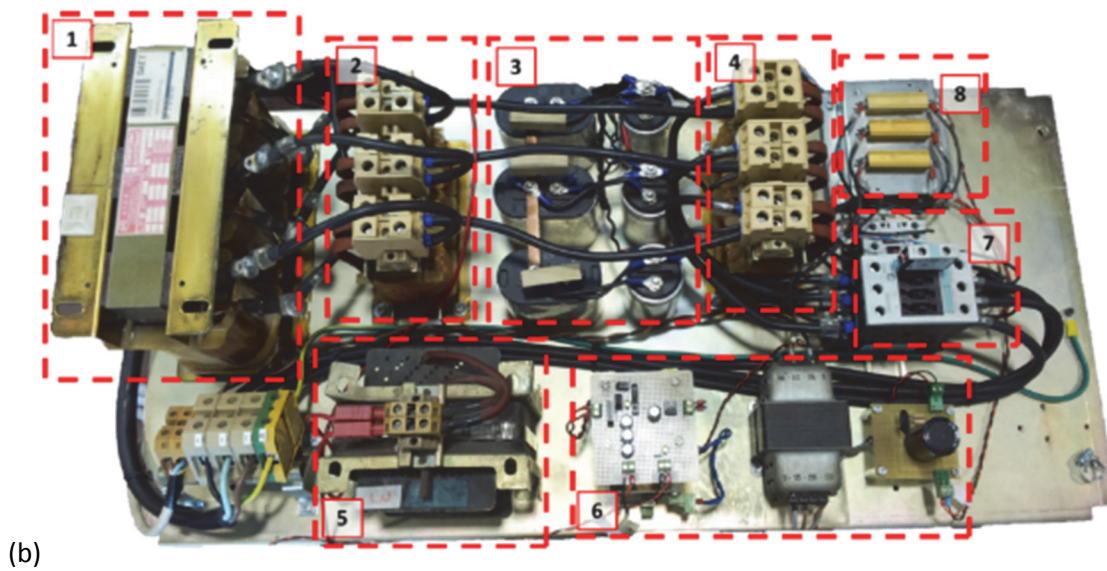
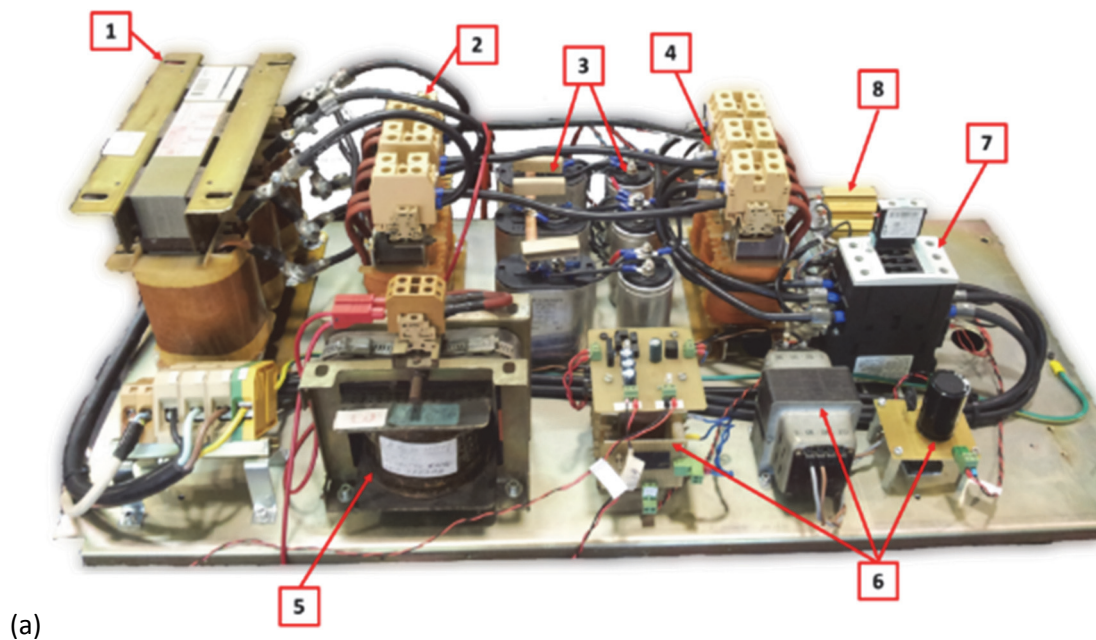


Figura 21. Dettaglio della componentistica del filtro lato rete, del filtro lato batteria ed alimentazione degli ausiliari del convertitore: (a) vista frontale; (b) vista superiore; (c) schema circuitale.



Figura 22. Emulatore di batteria.

5 Determinazione sperimentale della mappa di efficienza del convertitore

Al fine di determinare sperimentalmente la mappa di efficienza del convertitore elettronico di potenza prototipale, si è eseguita una campagna di misure sia in fase di carica che di scarica utilizzando l'emulatore di batteria.

La mappatura sperimentale è stata eseguita per diversi valori di tensione di batteria, a partire da 350 V fino a 100 V con passo di 25 V. Per ciascun valore di tensione di batteria impostata dall'emulatore, si sono eseguite le misure di tensione, corrente e potenza sia lato rete elettrica che lato batteria per diversi valori di corrente di batteria variabili a step di 5 A tra +40 A e -40 A. In Figura 23 è riportata, in funzione della potenza e della tensione di batteria, la mappa di efficienza determinata sperimentalmente per il convertitore prototipale in oggetto; tali risultati sono mostrati anche nella superficie di Figura 24, la quale riporta l'efficienza del convertitore come funzione simultanea della potenza e della tensione di batteria. In entrambe le figure, il segno positivo della potenza significa potenza assorbita dalla batteria, mentre il segno negativo indica potenza erogata dalla batteria verso la rete. In entrambe le figure, i valori intermedi tra due punti di misura sono stati estrapolati analiticamente.

Come si evince dalle mappe di efficienza ottenute sperimentalmente, il convertitore elettronico di potenza bidirezionale è caratterizzato da valori di efficienza maggiori all'aumentare della potenza sia in fase di carica che di scarica della batteria. In particolare, per il convertitore prototipale oggetto della presente attività, si sono misurati valori di efficienza energetica leggermente superiori in fase di scarica della batteria.

L'incremento dell'efficienza complessiva di conversione all'aumentare della potenza è dovuto sostanzialmente al fatto che le perdite (sia di conduzione che di commutazione) del convertitore diventano di entità minore rispetto alla potenza totale all'aumentare della potenza stessa. D'altra parte, l'aumento di efficienza all'aumentare della tensione di batteria indica che le perdite di conduzione nel convertitore sono maggiori di quelle di commutazione, come normalmente accade nella maggior parte dei casi.

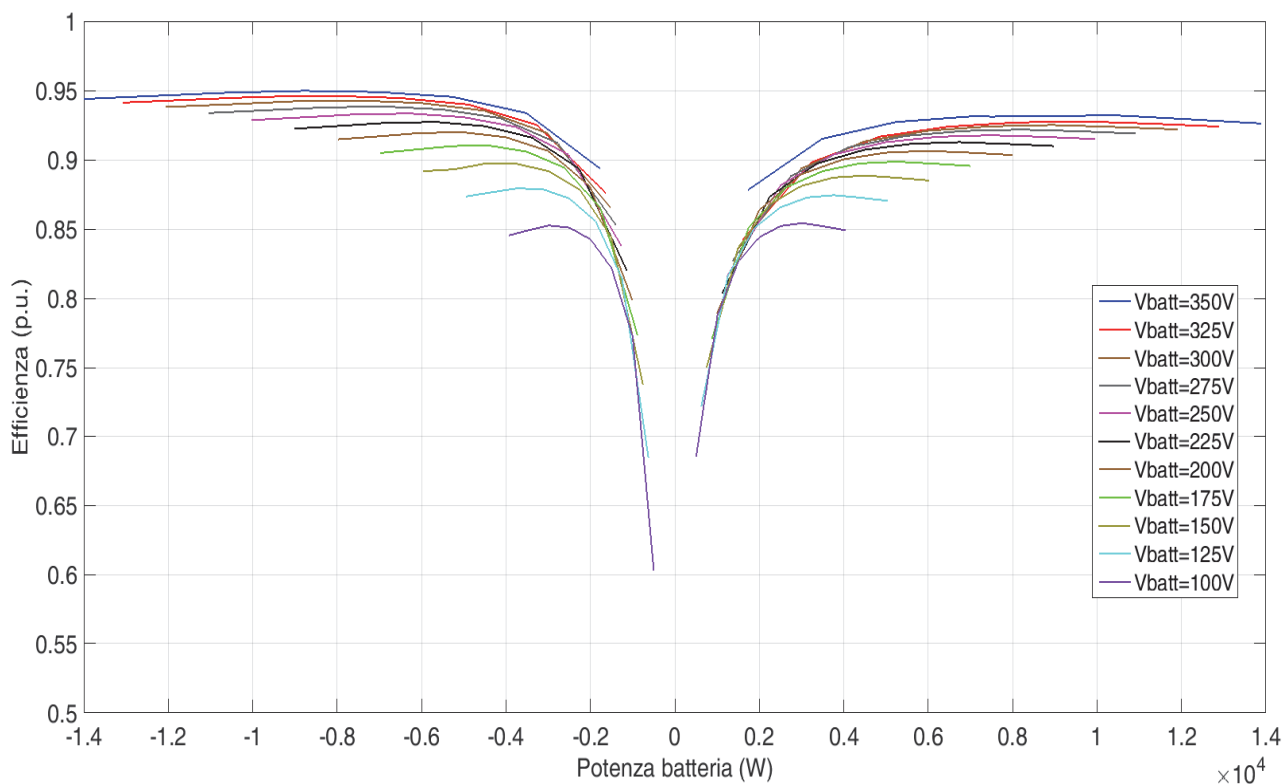


Figura 23. Mappa di efficienza determinata sperimentalmente per il convertitore prototipale per diversi valori di tensione di batteria.

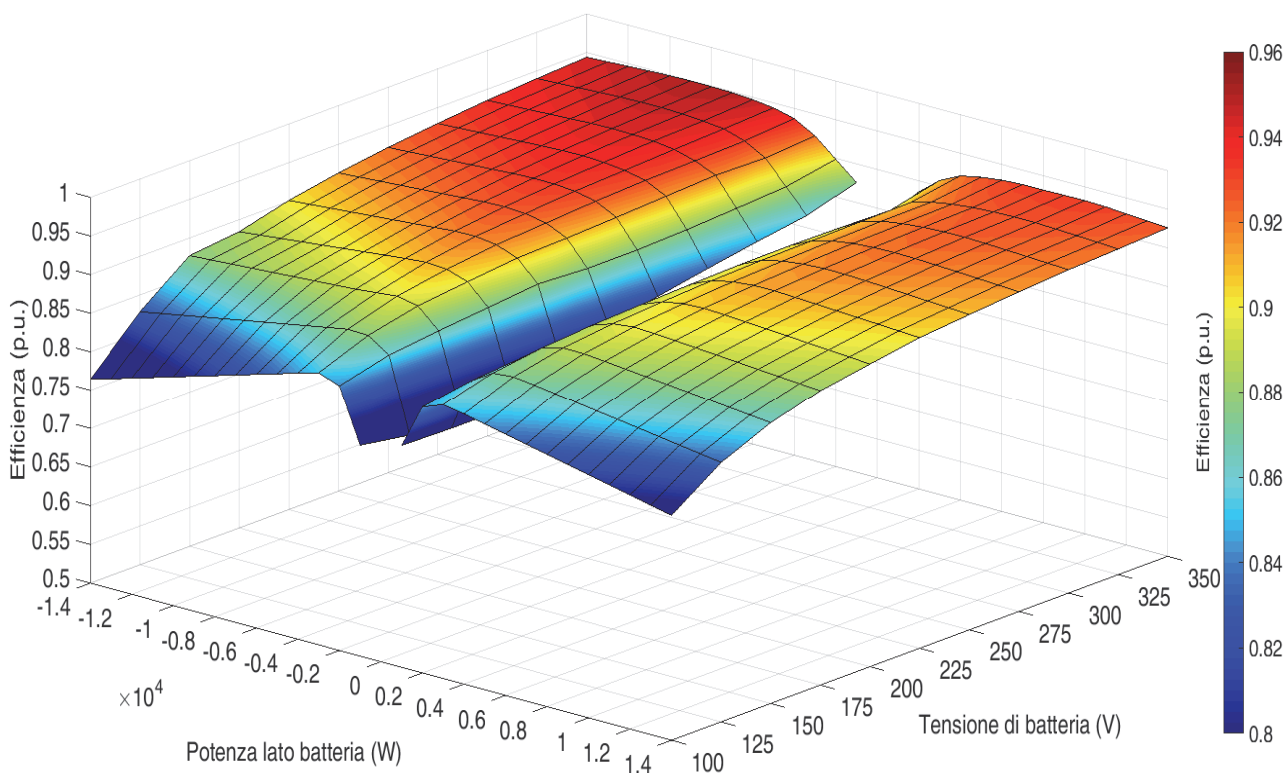


Figura 24. Mappa di efficienza determinata sperimentalmente per il convertitore prototipale.

Nelle figure seguenti sono riportati gli oscillogrammi acquisiti durante le prove condotte per la determinazione sperimentale della mappa di efficienza energetica del convertitore prototipale. In particolare, in Figura 25.a ed in Figura 25.b sono riportati, rispettivamente per la fase di carica della batteria a 10 A e 20 A, gli andamenti della tensione concatenata lato rete (blu), l'andamento della corrente lato rete a monte del filtro LCL (verde), la corrente lato rete a valle del filtro LCL (rossa) e la corrente assorbita dalla batteria (oro). In Figura 26.a ed in Figura 26.b sono riportati gli andamenti misurati per la carica a 30 A e a 40 A. Dai risultati sperimentali è evidente che la carica avviene a corrente costante ed il controllo di corrente mantiene la corrente erogata alla batteria pressoché costante.

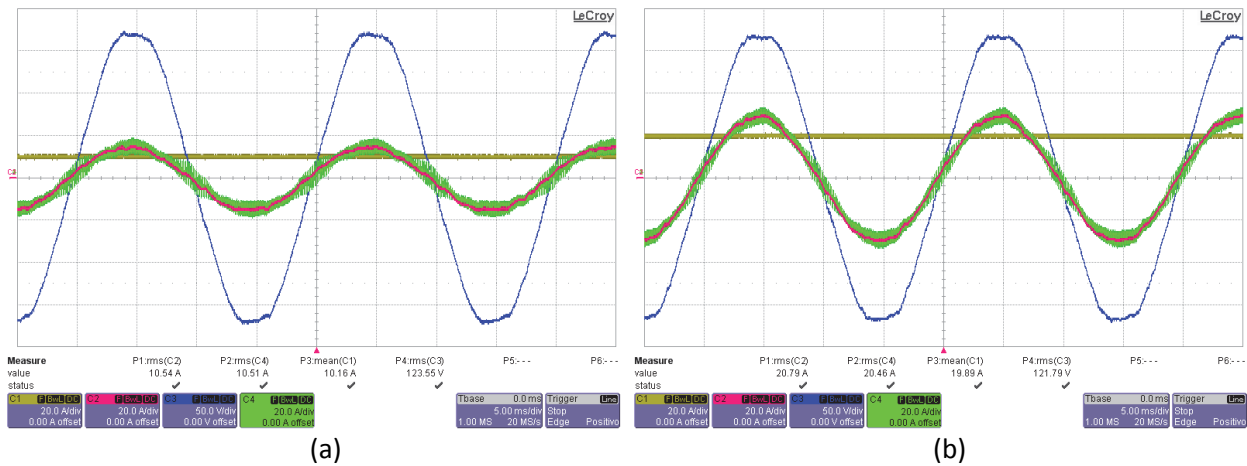


Figura 25. Risultati sperimentali per carica: tensione lato rete (canale 3), corrente lato rete a monte del filtro LCL (canale 2) e a valle del filtro (canale 4), corrente lato batteria (canale 1) – corrente batteria +10 A (a) e +20 A (b).

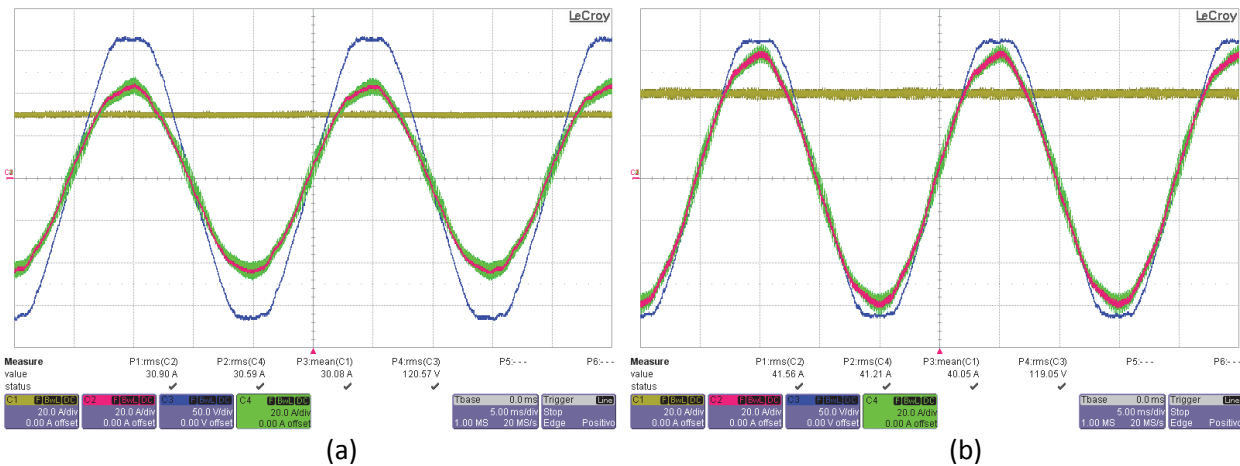


Figura 26. Risultati sperimentali per carica: tensione lato rete (canale 3), corrente lato rete a monte del filtro LCL (canale 2) e a valle del filtro (canale 4), corrente lato batteria (canale 1) – corrente batteria +30 A (a) e +40 A (b).

Per quanto concerne la fase di scarica, gli oscillogrammi di Figura 27.a e Figura 27.b raffigurano i risultati sperimentali per la corrente uscente dalla batteria di 10 A e 20 A, rispettivamente. Come dimostrato nelle figure, la corrente estratta dalla batteria è costante, il che conferma l'efficacia del controllo di corrente. I risultati di Figura 28.a e Figura 28.b confermano lo stesso per correnti generate dalla batteria di 30 A e 40 A, rispettivamente.

I risultati sperimentali dimostrano che, nonostante la corrente a valle del filtro LCL sia affetta dal ripple dovuto alla modulazione del convertitore lato rete, la corrente effettivamente assorbita dalla rete è pressoché sinusoidale per effetto dell'attenuazione delle armoniche da parte del filtro LCL stesso.

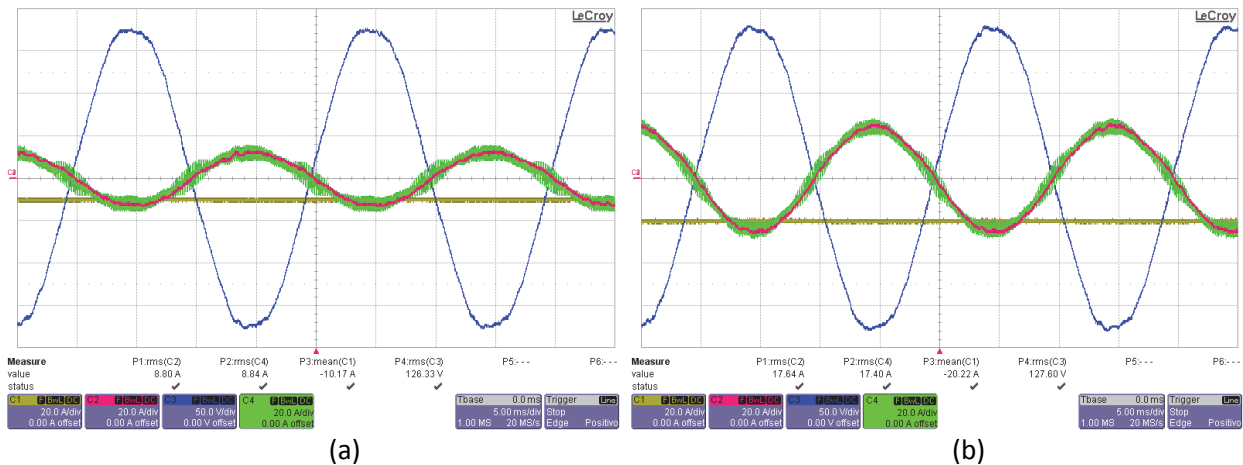


Figura 27. Risultati sperimentali per scarica: tensione lato rete (canale 3), corrente lato rete a monte del filtro LCL (canale 2) e a valle del filtro (canale 4), corrente lato batteria (canale 1) – corrente batteria -10 A (a) e -20 A (b).

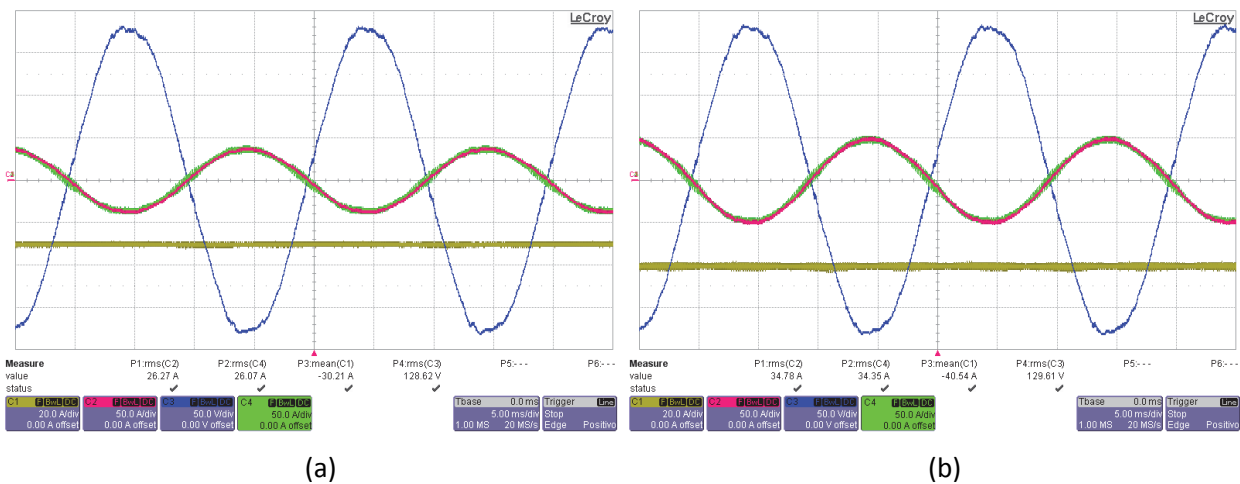


Figura 28. Risultati sperimentali per scarica: tensione lato rete (canale 3), corrente lato rete a monte del filtro LCL (canale 2) e a valle del filtro (canale 4), corrente lato batteria (canale 1) – corrente batteria -30 A (a) e -40 A (b).

La Figura 29 mostra le varie grandezze nella condizione di riposo (idling), che significa la batteria non è né nello stato di carica né in quello di scarica, ma è semplicemente collegata al caricabatteria e pronta ad assorbire o erogare la potenza.

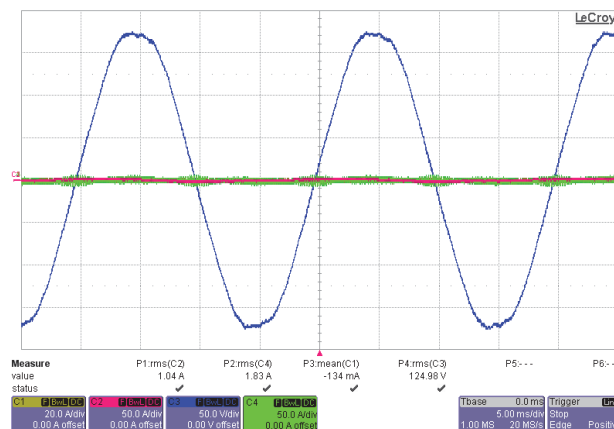


Figura 29. Risultati sperimentali con il sistema nella fase di riposo (idling) ma energizzato dalla rete e collegato con la batteria: tensione lato rete (canale 3), corrente lato rete a monte del filtro LCL (canale 2) e a valle del filtro (canale 4), corrente lato batteria (canale 1).

5.1 Comparazione di punti di efficienza sperimentali con quelli misurati

Le mappe di efficienza energetica da implementarsi all'interno delle Look-Up Tables (LUTs) del modello Matlab/Simulink® sviluppato nell'ambito del PAR2013, possono essere determinate sia sperimentalmente che per mezzo di opportuni modelli circuitali.

L'approccio circuitalo permette potenzialmente una modellistica di dettaglio, ma rende necessaria la conoscenza dei valori di tutti i parametri dei componenti che si intende modellizzare; dall'altra essa permette di valutare l'efficienza energetica qualora non sia disponibile il sistema hardware per l'esecuzione delle prove sperimentali. Inoltre, l'utilizzo di modelli circuitali permette l'eventuale estensione del campo di indagine anche oltre i limiti fisici di tensione e corrente dei componenti hardware a disposizione.

In Figura 30 ed in Figura 31 sono riportate sulle mappe di efficienza misurate sul convertitore prototipale per tensione di batteria di 350 V e 300 V rispettivamente, alcuni punti di efficienza valutati per mezzo del modello circuitalo sviluppato in Matlab/Simulink® di Figura 11. Come si può vedere i risultati ottenuti dalle simulazioni sono comparabili con quelli ottenuti sperimentalmente. In tal prospettiva, una maggior accuratezza può essere ricercata attraverso lo sviluppo di un'opportuna modellistica per mezzo di software dedicati alla modellizzazione elettronica dei dispositivi di potenza.

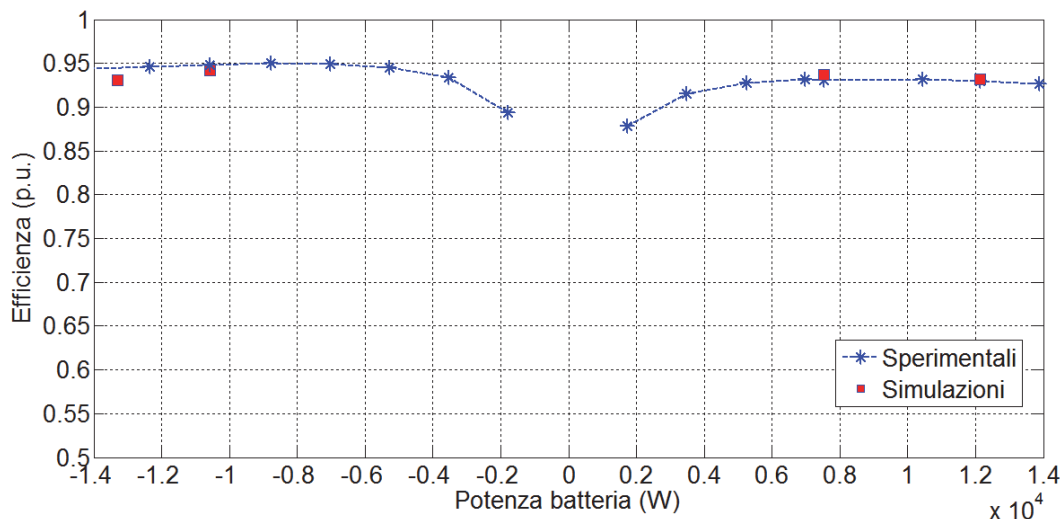


Figura 30. Comparazione di alcuni punti di efficienza valutati per mezzo del modello circuitalo di Figura 11 con l'efficienza determinata sperimentalmente alla tensione di batteria di 350 V.

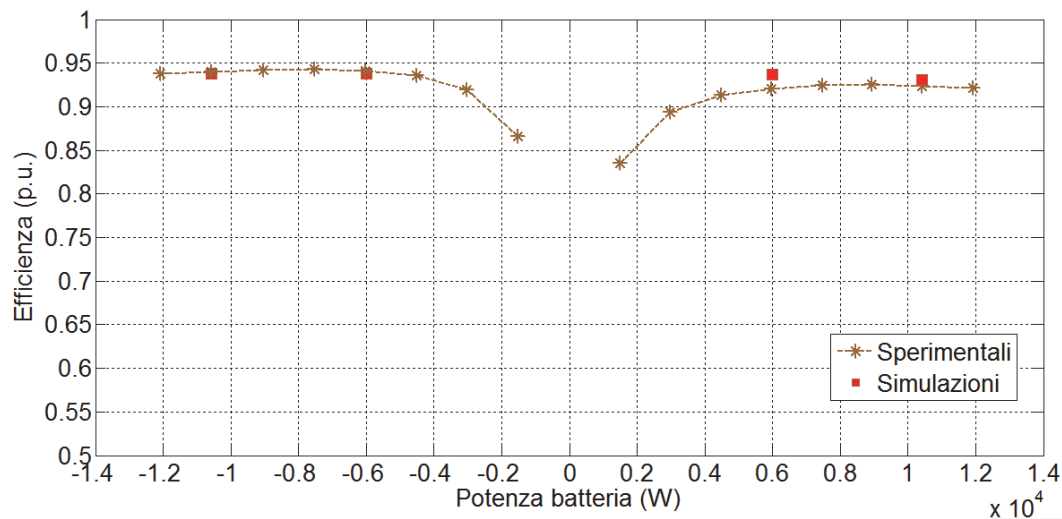


Figura 31. Comparazione di alcuni punti di efficienza valutati per mezzo del modello circuitalo di Figura 11 con l'efficienza determinata sperimentalmente alla tensione di batteria di 300 V.

6 Modello elettrochimico di celle per accumulatori al litio da trazione stradale

In vari campi di applicazione degli accumulatori, e segnatamente nell'ambito del trasporto, è necessario avere a disposizione in ogni istante una accurata e tempestiva analisi delle caratteristiche durante il funzionamento del sistema. Ciò si ottiene per mezzo di un modello numerico del funzionamento dell'accumulatore, che ne descriva in modo corretto il comportamento e si basi quindi sulle caratteristiche elettrochimiche del sistema che ha alla base, appunto, un processo elettrochimico. Un tale modello permette di predire lo stato delle caratteristiche di base della batteria come lo stato di carica, lo stato di salute, ecc. Altrettanto importante è il fatto che con tale modello si può avere una visione generale dei fattori limitanti l'accumulatore in maniera da ottimizzarne il comportamento.

Un altro ambito in cui la simulazione è molto importante è la gestione termica dell'accumulatore. Il controllo della temperatura delle batterie al litio è fondamentale per la sicurezza e per assicurare la massima durata di vita dato che le alte temperature aumentano la velocità dei processi di degrado. Inoltre la presenza di elevati gradienti di temperatura in una cella o in un modulo, portano a disuniformità nella densità di corrente e quindi nelle prestazioni.

Il modello permette di simulare la scarica di una batteria a differenti regimi di corrente ed è inoltre orientato alla determinazione di parametri di carattere prettamente elettrochimico di fondamentale importanza per assicurare una previsione corretta del comportamento dell'accumulatore. Esso deve diventare lo strumento fondamentale per avere un orizzonte completo sulle relazioni tra parametri sperimentali, e risposta delle grandezze, talora difficilmente misurabili, che influiscono direttamente sulle prestazioni della cella condizionandone il comportamento istantaneo e la durata di vita.

Delle informazioni elettrochimiche derivabili dal modello (potenziali di elettrodo, sovratensioni, effetti della polarizzazione dovuta ai gradienti di concentrazione, caratteristiche della zona di reazione, tensione di cella durante il funzionamento, studio dell'influenza del trasferimento di massa nell'elettrolita, variazione del numero di trasporto degli ioni litio, effetto della variazione della conducibilità dell'elettrolita) illustreremo i risultati per quanto riguarda il potenziale di cella, la tensione agli elettrodi, la sovratensione e la polarizzazione dovuta al gradiente di concentrazione.

6.1 Descrizione del modello

Le equazioni che simulano il comportamento di una cella completa a ioni di litio sono riportate in Tabella 3. Il modello è monodimensionale. Per questo modello le variabili dipendenti φ_1 , φ_2 , ce , cs , jp sono risolte rispetto alla dimensione x per ogni elettrodo e per il separatore. Si tratta di un sistema con 12 equazioni differenziali parziali non lineari con 12 incognite. I parametri usati nella simulazione sono elencati in Tabella 4. Per il bilanciamento della corrente elettronica viene assegnato un valore di 0 V di potenziale nell'intorno del collettore di corrente all'elettrodo negativo. Per quanto riguarda i materiali si è considerato un elettrodo positivo di NMC come materia attiva e uno negativo di carbone.

Per l'elettrolita si è considerato il comportamento del sale LiPF₆ in una miscela di solventi Ec-DMC 1:2. La conduttanza dell'elettrolita e il potenziale di equilibrio degli elettrodi sono stati considerati dipendenti dalla composizione del sistema sulla base di funzioni interpolanti i dati sperimentali. In Figura 32 è mostrato il fitting polinomiale del potenziale reversibile per l'elettrodo negativo e per l'elettrodo positivo riferito allo stato di carica, mentre in Figura 33 è mostrato il fitting polinomiale della conducibilità dell'elettrolita al variare della concentrazione.

Tabella 3. Simulazioni su ciclo con 200 veicoli con batterie Ni-MH da 18 kWh caricate e scaricate a C10.

| Region | Eq. | Governing equations | Boundary conditions |
|----------------|-----|--|--|
| Positive elec. | 1 | $\varepsilon_p \frac{\partial c_{e,p}}{\partial t} = D_{eff,p} \frac{\partial^2 c_{e,p}}{\partial x^2} + a_p(1-t_+)j_p$ | $D_{eff,p} \frac{\partial c_{e,p}}{\partial x} \Big _{x=0} = 0$ and $D_{eff,p} \frac{\partial c_{e,p}}{\partial x} \Big _{x=L_p^-}$ $= -D_{eff,p} \frac{\partial c_{e,s}}{\partial x} \Big _{x=L_p^-}$ |
| | 2 | $I = \sigma_{eff,p} \frac{\partial \phi_{2,p}}{\partial x} - \kappa_{eff,p} \frac{\partial \phi_{2,p}}{\partial x} + \frac{2\kappa_{eff,p}RT}{F}(1-t_+) \frac{\partial \ln c}{\partial x}$ | $-\kappa_{eff,p} \frac{\partial \phi_2}{\partial x} \Big _{x=0} = 0$ and $-\kappa_{eff,p} \frac{\partial \phi_2}{\partial x} \Big _{x=L_p^-} =$ $-\kappa_{eff,p} \frac{\partial \phi_2}{\partial x} \Big _{x=L_p^+}$ |
| | 3 | $\sigma_{eff,p} \frac{\partial^2 \phi_{1,p}}{\partial x^2} = a_p F j_p$ | $\sigma_{eff,p} \frac{\partial^2 \phi_{1,p}}{\partial x^2} \Big _{x=0} = I$ and $\phi_1 = 1$ |
| | 4 | $\frac{d}{dt} c_s^{ave} + 3 \frac{j_p}{R_p} = 0$ and $\frac{5D_{s,p}}{R_p}(c_s^{surf} - c_s^{ave}) = -j_p$ | initial condition $c_s^{ave} \Big _{t=0} =$ $c_{s,max,p}$ |
| Separator | 5 | $j_p = 2k_p(c_{s,max,p} - c_{s,p})^{0.5} c^{0.5} \sinh \left[\frac{0.5F}{RT} (\phi_{1,p} - \phi_{2,p} - U_p) \right]$ | |
| | 6 | $\varepsilon_s \frac{\partial c_{e,s}}{\partial t} = D_{eff,s} \frac{\partial^2 c_{e,s}}{\partial x^2}$ | $D_{eff,s} \frac{\partial c_{e,p}}{\partial x} \Big _{x=L_p^-} =$ $-D_{eff,s} \frac{\partial c_{e,s}}{\partial x} \Big _{x=L_p^-}$ and $D_{eff,s} \frac{\partial c_{e,s}}{\partial x} \Big _{x=L_p+L_s'-} =$ $-D_{eff,n} \frac{\partial c_{e,n}}{\partial x} \Big _{x=L_p+L_s'+}$ |
| Negative elec. | 7 | $I = -\kappa_{eff,s} \frac{\partial \phi_{2,s}}{\partial x} + \frac{2\kappa_{eff,s}RT}{F}(1-t_+) \frac{\partial \ln c_{e,s}}{\partial x}$ | |
| | 8 | $\varepsilon_n \frac{\partial c_{e,n}}{\partial t} = D_{eff,n} \frac{\partial^2 c_{e,n}}{\partial x^2} + a_p(1-t_+)j_n$ | $D_{eff,n} \frac{\partial c_{e,n}}{\partial x} \Big _{x=L_p+L_s+L_n} =$ 0 and $D_{eff,n} \frac{\partial c_{e,n}}{\partial x} \Big _{x=L_p+L_s'-}$ $= -D_{eff,s} \frac{\partial c_{e,s}}{\partial x} \Big _{x=L_p+L_s'+}$ |
| | 9 | $I = \sigma_{eff,n} \frac{\partial \phi_{2,n}}{\partial x} - \kappa_{eff,n} \frac{\partial \phi_{2,n}}{\partial x} + \frac{2\kappa_{eff,n}RT}{F}(1-t_+) \frac{\partial \ln c_{e,n}}{\partial x}$ | $-\kappa_{eff,n} \frac{\partial \phi_2}{\partial x} \Big _{x=L_p+L_s+L_n} =$ 0 and $-\kappa_{eff,s} \frac{\partial \phi_2}{\partial x} \Big _{x=L_p+L_s'-} =$ $-\kappa_{eff,n} \frac{\partial \phi_2}{\partial x} \Big _{x=L_p+L_s'-}$ |
| | 10 | $\sigma_{eff,n} \frac{\partial^2 \phi_{1,n}}{\partial x^2} = a_p F j_n$ | $\sigma_{eff,n} \frac{\partial^2 \phi_{1,n}}{\partial x^2} \Big _{x=L_p+L_s}$ $= 0$ and $\sigma_{eff,n} \frac{\partial^2 \phi_{1,n}}{\partial x^2} \Big _{x=L_p+L_s+L_n} = -I$ |
| | 11 | $\frac{d}{dt} c_s^{ave} + 3 \frac{j_n}{R_n} = 0$ and $\frac{5D_{s,n}}{R_n}(c_s^{surf} - c_s^{ave}) = -j_n$ | initial condition $c_s^{ave} \Big _{t=0} =$ $c_{s,max,p}$ |
| | 12 | $j_n = 2k_n(c_{s,max,n} - c_{s,n})^{0.5} c^{0.5} \sinh \left[\frac{0.5F}{RT} (\phi_{1,n} - \phi_{2,n} - U_n) \right]$ | |

Tabella 4. Parametri del modello elettrochimico.

| Symbol | Unit | Positive electrode | Separator | Negative electrode |
|---------------------|------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------------------|
| σ_i | S/m | 100 | | 100 |
| $\varepsilon_{f,i}$ | | 0.025 | | 0.0326 |
| ε_i | | 0.385 | 0.724 | 0.485 |
| Brugg | | | 4 | |
| $D_{s,i}$ | m^2/s | 1.0×10^{-14} | | 3.9×10^{-14} |
| D | m^2/s | | 7.5×10^{-10} | |
| k_i | $Mol/(sm^2)/(mol/m^3)$ | 2.334×10^{-11} | | 5.0307×10^{-11} |
| $c_{s,i,max}$ | mol/m^3 | 51554 | | 30555 |
| $c_{s,i0}$ | mol/m^3 | 0.4955×51554 | | 0.8551×30555 |
| c_0 | mol/m^3 | | 1000 | |
| R_p | m | 2.0×10^{-6} | | 2.0×10^{-6} |
| l_i | m | 100×10^{-6} | 52×10^{-6} | 183×10^{-6} |
| R_{sei} | Ωm^2 | | | 0.0 |
| t_+ | | | 0.363 | |
| F | C/mol | | 96487 | |
| R | J/(mol K) | | 8.314 | |
| T | K | | 298.15 | |

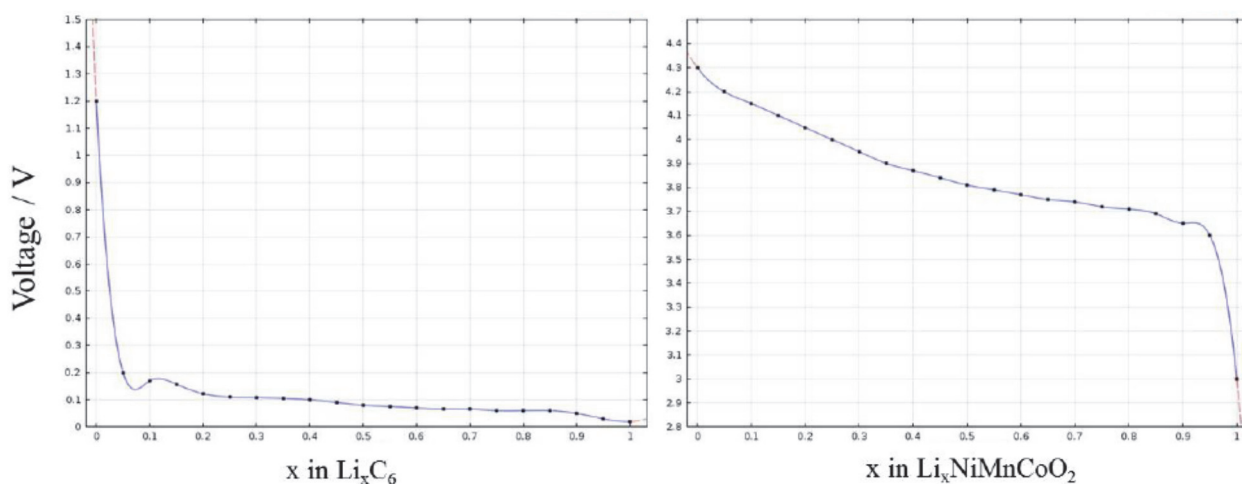


Figura 32. Fitting polinomiale del potenziale reversibile per l'elettrodo negativo (grafico di sinistra) e positivo (grafico di destra) riferito allo stato di carica.

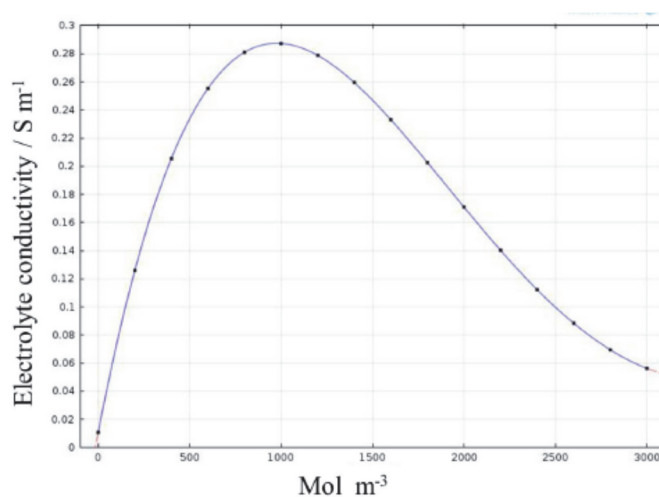


Figura 33. Fitting polinomiale della conducibilità dell'elettrolita al variare della concentrazione.

6.1.1 Tensione di cella

La previsione dell'andamento della scarica della cella è l'obiettivo basilare della simulazione. La capacità di riprodurre il comportamento alla scarica per diversi regimi di una cella a ioni di litio è garanzia di poter usare le informazioni ottenute per simulare correttamente l'andamento di grandezze di assai difficile misura sperimentale. Si può così ottenere così un quadro dell'andamento dei fenomeni elettrochimici da usare come base per una approfondita interpretazione dei dati ottenuti durante la sperimentazione. In Figura 34 è riportato il confronto tra i risultati ottenuti dal modello con quelli sperimentali relativi ad una cella di laboratorio. Va notato che il processo di scarica simulato segue lo stesso andamento sperimentale della cella in laboratorio. Tutte le principali caratteristiche tipiche della scarica di una cella a ioni di litio sono ben riprodotte nonostante le semplificazioni del modello.

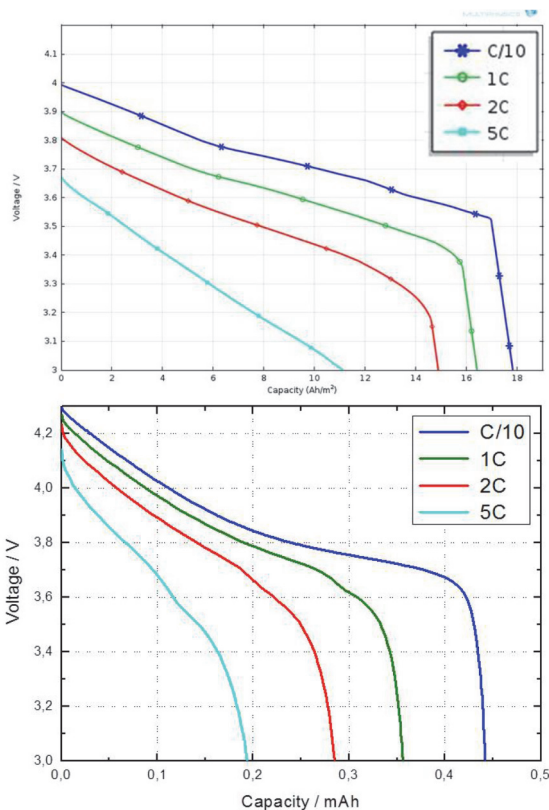


Figura 34. Confronto tra curve di scarica simulate (grafico superiore) e sperimentali (grafico inferiore) per vari valori di corrente di scarica.

6.1.2 Tensione di elettrodo e sovratensione

Il potenziale degli elettrodi è funzione del grado di litiazione della materia attiva e cambia in relazione con il potenziale reversibile dell'elettrodo. La Figura 35 mette in evidenza una delle maggiori semplificazioni introdotte nel modello allo scopo di alleggerire il peso della parte di calcolo: il potenziale di elettrodo viene considerato costante lungo il suo spessore, condizione non realistica dato che la reattività alla superficie di un elettrodo è molto differente da quella nel bulk della materia attiva.

Il modello include la sovratensione di cella, la perdita di energia dovuta allo sviluppo delle reazioni secondarie che si traduce in una diminuzione del potenziale di cella. Essendo un fattore relativo alla cinetica della reazione, dipende dalla corrente di scarica come si vede dalla Figura 36.

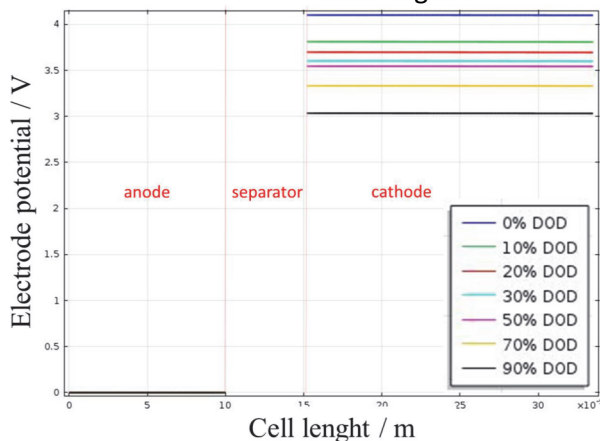


Figura 35. Valori di potenziale degli elettrodi positivo e negativo a vari gradi di profondità di scarica.

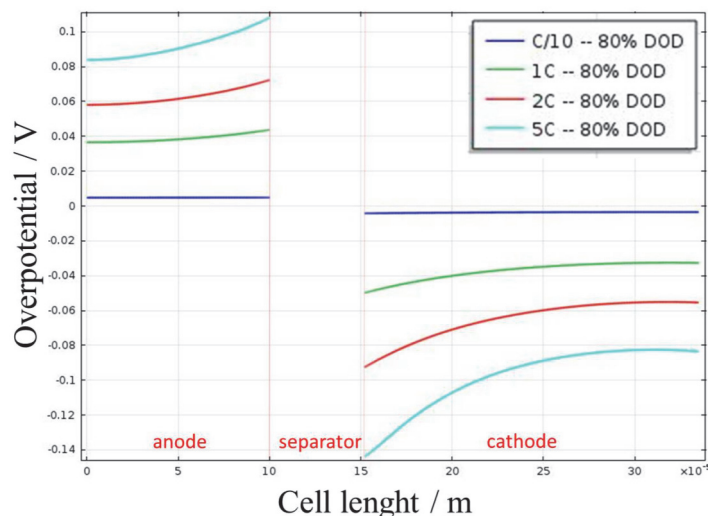


Figura 36. Andamento della sovratensione agli elettrodi per vari valori di corrente.

6.1.3 Polarizzazione della cella dovuta al gradiente di concentrazione

All'inizio della scarica, i cationi Li⁺ e gli anioni PF6⁻ migrano verso il catodo e l'anodo rispettivamente, mossi dal campo elettrico. Dato che la velocità di spostamento è differente (quella degli anioni è maggiore) c'è un accumulo del sale di litio nel compartimento anodico e quindi la formazione di gradienti di concentrazione attraverso la cella. La polarizzazione dovuta alla concentrazione porta ad una variazione della conducibilità ionica e della sovratensione di concentrazione. Come visibile in Figura 37, il gradiente di concentrazione aumenta con la corrente. Questo fenomeno porta ad una limitazione nel trasporto delle cariche, quando la concentrazione raggiunge il valore limite la materia attiva catodica non può più contribuire alla corrente dato che non ci sono ioni Li⁺ disponibili nella soluzione, i processi di inserzione-deinserzione degli ioni Li⁺ sono in pratica inibiti dai gradienti di concentrazione.

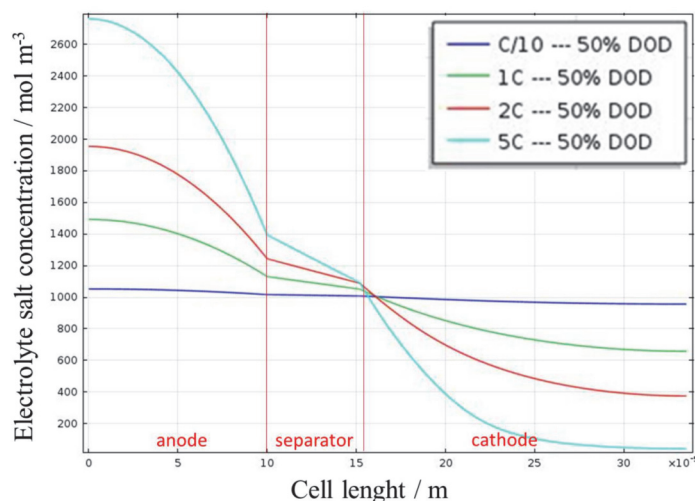


Figura 37. Concentrazione del sale nell'elettrolita per una cella al 50% della DOD (Depth Of Discharge) per differenti regimi di scarica.

6.2 Modellazione del comportamento termico di una batteria

Le simulazioni dell'andamento termico alla cella sono state condotte per studiare l'aumento della temperatura e la distribuzione di esso sulla superficie della cella durante il funzionamento. Sono stati impiegati il modello elettrochimico a una dimensione e un modello termico 3D. Il modello elettrochimico è stato usato per simulare il comportamento della reazione di base e creare una sorgente di calore media nel sistema, il modello 3D è stato usato per simulare il comportamento della temperatura nella cella. I due modelli sono accoppiati attraverso la sorgente di calore e la temperatura media, come schematizzato in Figura 38.

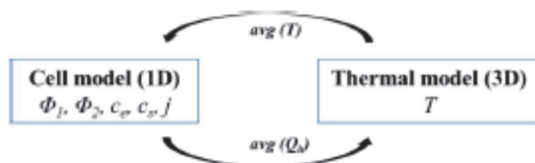


Figura 38. Schematizzazione dell'accoppiamento tra il modello elettrochimico monodimensionale ed il modello termico tridimensionale per una cella elettrochimica.

Poiché la conducibilità di calore dei componenti la cella è decisamente grande rispetto al calore generato, si può assumere che in molti casi la cella abbia un profilo di temperatura praticamente uniforme, potendo quindi assumere una temperatura media della cella da usare per il ricalcolo dei parametri di cella a ogni step della simulazione. Il modello 1D qui usato è caratterizzato dall'aggiunta di un dominio positivo e negativo per il collettore della corrente. Inoltre i parametri sono stati aggiustati per simulare una cella da 5 Ah. La geometria della cella e i relativi parametri sono specificati Tabella 5.

La simulazione è stata condotta immaginando la presenza di un flusso di aria a temperatura ambiente. La figura mostra la distribuzione della temperatura sulla superficie della cella prismatica in scarica a 5C in vari stadi di DOD.

La temperatura iniziale era stata settata a 25°C corrispondente alla temperatura della cella carica. Al 50% di DOD la temperatura della cella aumenta di un solo grado, la cella si scalda in corrispondenza ai portacorrente situati nei lati corti ma l'effetto della corrente d'aria fa sì che la zona più calda sia verso il centro della cella. Quando la scarica è completa la zona più calda è ancora più vicina al centro. Come si vede in Figura 39, la temperatura aumenta leggermente all'inizio della scarica ma si raggiunge quasi subito un equilibrio tra la generazione del calore e l'asporto tramite la corrente d'aria grazie alla alta conducibilità termica dei materiali della cella e al suo limitato spessore.

Tabella 5. Geometria e parametri della cella elettrochimica per il modello termico.

| Name | Value | Description |
|-------------------------------------|-----------------|---|
| Cell geometry | | |
| L_{neg-cc} | 7 μm | Negative current collector thickness |
| L_{pos-cc} | 10 μm | Positive current collector thickness |
| L_{sep} | 10 μm | Thickness of the separator |
| L_{neg} | 55 μm | Negative active layer thickness |
| L_{pos} | 80 μm | Positive active layer thickness |
| Parameters for thermal model | | |
| kT_{neg} | 1.04 [W/(m*K)] | Negative electrode thermal conductivity |
| kT_{pos} | 1.58 [W/(m*K)] | Positive electrode thermal conductivity |
| kT_{pos-cc} | 170 [W/(m*K)] | Positive current collector thermal conductivity |
| kT_{neg-cc} | 398 [W/(m*K)] | Negative current collector thermal conductivity |
| kT_{sep} | 0.344 [W/(m*K)] | Separator thermal conductivity |
| Cp_{pos} | 1269 [J/(Kg*K)] | Positive electrode heat capacity |
| Cp_{neg} | 1437 [J/(Kg*K)] | Negative electrode heat capacity |
| Cp_{pos-cc} | 875 [J/(Kg*K)] | Positive current collector heat capacity |
| Cp_{neg-cc} | 385 [J/(Kg*K)] | Negative current collector heat capacity |
| Cp_{sep} | 1978 [J/(Kg*K)] | Separator heat capacity |

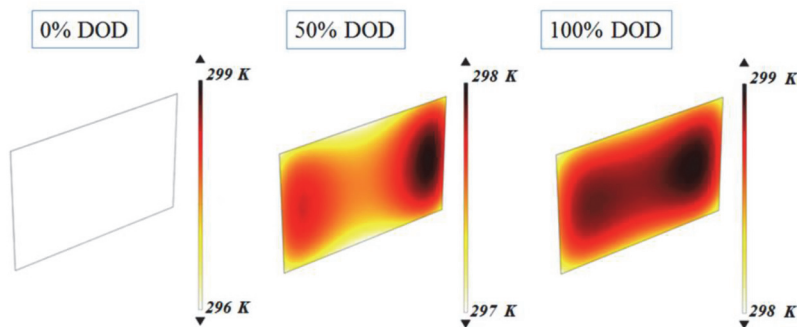


Figura 39. Simulazione della distribuzione della temperatura per una cella prismatica scaricata a 5C a diversi DOD. I connettori.

6.2.1 Validazione del modello: analisi termica di una cella commerciale da 5Ah

Le variazioni termiche di una cella da 5Ah (della ditta LITHOPS) sono state esaminate sperimentalmente mediante l'uso di un visualizzatore d'immagine termico. L'andamento e la distribuzione della temperatura è stato registrato durante il ciclaggio a vari regimi di corrente. In Figura 40 è mostrata la forma e la disposizione della cella in esame e la sua immagine termica all'inizio della scarica.

Come si può vedere dalle immagini termiche riportate in Figura 41, l'andamento e la distribuzione della temperatura durante la scarica a 5C della cella mostrano una situazione simile a quella del modello, con un limitato aumento della temperatura dopo il quale si mantiene costante. La zona più calda è anche in questo caso nella zona centrale.

I valori numerici sono maggiori nel caso delle misure sperimentali perché non era attiva una vera corrente di raffreddamento, la cella era semplicemente esposta all'aria libera condizionata a 25 °C.



Figura 40. Cella LITHOPS da 5Ah usata per l'analisi termica e immagine termica all'inizio della scarica.

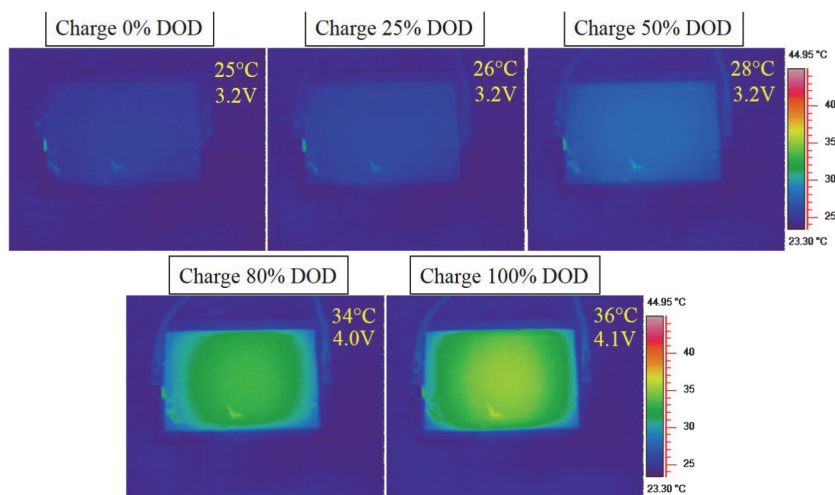


Figura 41. Immagini termiche della cella sottoposta a scarica a 5C a diversi stati di DOD.

7 Analisi applicata a casi di studio con modello energetico basato su mappe di efficienza sperimentali

La mappe di efficienza energetica determinate sperimentalmente possono essere implementate all'interno del modello sviluppato in ambiente Matlab/Simulink® nell'ambito del PAR2013 (Figura 5) per la valutazione del bilancio energetico di sistemi di ricarica con funzionalità vehicle-to-grid.

In questa sezione è riportato un esempio di simulazione sul profilo di assorbimento giornaliero mostrato in Figura 42. L'assorbimento energetico preso in considerazione è stato misurato ad intervalli di 15 minuti in una stazione di trasformazione alta tensione/media tensione; la stazione di trasformazione è situata in prossimità di una cittadina del nord Italia con una popolazione servita di circa 12000 persone ed una piccola zona industriale. L'andamento preso in esame si riferisce ad una giornata festiva del mese di agosto caratterizzata da assorbimenti energetici medio-bassi. Come si può vedere dalla figura, durante alcune ore della giornata vi è un assorbimento energetico negativo, il quale corrisponde ad una re-immissione di energia nella rete di alta tensione. Ciò è dovuto alla presenza di un parco fotovoltaico e ad alcune altre sorgenti di energia da fonti rinnovabili collegate alla rete servita dalla cabina di trasformazione in oggetto che, in concomitanza con una bassa domanda di energia durante le ore centrali della giornata, dà luogo al flusso inverso di energia.

Come già precedentemente detto, in tal contesto l'approccio V2G intende ridurre tal flusso energetico inverso dando una maggior priorità alla ricarica delle batterie veicolari nei periodi in cui vi è un minor assorbimento di energia dalla rete (*load levelling*), andandole poi a scaricare in presenza dei picchi di domanda (*peak shaving*).

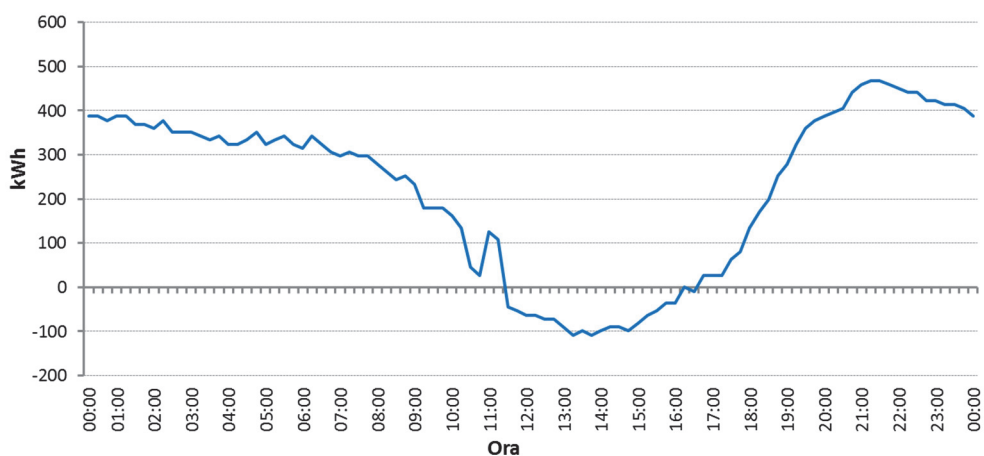


Figura 42. Esempio di assorbimento di energia lato Media Tensione misurato ad intervalli di 15 minuti in un punto di trasformazione AT/MT in nord Italia: popolazione servita circa 12000 persone con piccola area industriale.

Sulla base del profilo di assorbimento energetico giornaliero mostrato in Figura 42, si è dedotto un profilo giornaliero di assorbimento di potenza discretizzato ad intervalli di 15 minuti, mostrato in Figura 43.a. Tal profilo di potenza è stato implementato all'interno del blocco "Rete elettrica/Ciclo di test" del modello Matlab/Simulink® sviluppato nell'ambito del PAR2013 (Figura 5). Ai fini della simulazione si è assunto come limite inferiore, al di sotto del quale il sistema dà il consenso per la ricarica delle batterie veicolari, il valore di potenza pari a 0 kW, e come limite superiore, oltre il quale il sistema dà il consenso per la scarica delle batterie, il valore di potenza pari a 1200 kW.

In Figura 43.b è riportato l'andamento della potenza elettrica giornaliera assumendo un parco di 200 veicoli dotati di tecnologia V2G connesso alla rete. Le simulazioni sono state eseguite considerando tutti i veicoli equipaggiati con convertitori elettronici bidirezionali di potenza nominale pari a 14 kW e con accumulatori Ni-MH da 18 kWh aventi uno stato di carica iniziale pari al 40%. In considerazione del maggior degrado degli

accumulatori ad elevate correnti, le simulazioni sono state eseguite ad un *Charging rate* (Crate) pari a 10 sia per la carica che per la scarica.

Il limite inferiore ed il limite superiore per il consenso alla cessione ed all'immagazzinamento di energia sono stati assunti pari al 40 % e al 90 %, rispettivamente; pertanto, al di sotto del 40 % di SOC il sistema di gestione della logica di carica/scarica non dà il consenso alla cessione di energia da parte delle batterie; analogamente, una volta raggiunto il 90 % dello SOC il sistema non permette di caricare ulteriormente le batterie.

Nelle simulazioni eseguite, essendo lo stato iniziale di carica delle batterie pari al 40%, ovvero pari al limite inferiore per il consenso alla scarica delle batterie stesse in ottica V2G, non vi è alcun scambio energetico (Figura 43.c) nonostante il profilo di potenza sia superiore al limite di 1200 kW nelle ore iniziali della giornata. Successivamente, nelle ore centrali vi è la ricarica delle batterie, le quali si trovano così in condizioni di poter fornire potenza alla rete nelle ore serali ove il profilo di potenza è nuovamente superiore al limite di 1200 kW. Dal confronto di Figura 43.a (profilo di potenza senza V2G) e di Figura 43.b (profilo di potenza con V2G) si può apprezzare il conseguente effetto di *load levelling* (aumento della domanda) nelle ore centrali della giornata e di *peak shaving* (aumento dell'offerta) nelle ore serali.

Nelle simulazioni eseguite, il pacco batterie compie un ciclo completo di carica/scarica nell'arco delle 24 ore. Tuttavia, come si evince da Figura 43.c, lo scambio energetico non è nullo, ovvero l'energia immessa nelle batterie in fase di carica è maggiore dell'energia ceduta dalle stesse in fase di scarica. La quota parte mancante corrisponde alle perdite energetiche dell'intero sistema.

Con un profilo di carica/scarica a C10, la potenza di impiego della batteria in analisi è pari a circa 1.8 kW, corrispondente a poco più del 10% della potenza del convertitore; quest'ultimo si trova pertanto a lavorare in condizioni di efficienza energetica non particolarmente elevate.

Essendo il modello energetico sviluppato nell'ambito del PAR2013 parametrico e modulare, la mappatura energetica del convertitore determinata sperimentalmente (Figura 23 e Figura 24) è stata opportunamente riscalata assumendo un convertitore di taglia pari a 7 kW. A pari condizioni delle simulazioni eseguite con il convertitore di taglia superiore, il punto di lavoro del convertitore da 7 kW è pari a circa il 25 %, con un conseguente incremento della sua efficienza energetica.

In Tabella 6, insieme all'efficienza energetica totale, sono riportati i valori di energia caricata, scaricata e persa valutati al punto di connessione dei veicoli alla rete, sia per il caso in cui i veicoli siano equipaggiati con convertitori di potenza nominale da 14 kW che da 7 kW. L'incremento di efficienza con il convertitore di taglia minore va tuttavia a discapito della possibilità di fare ricariche veloci.

Tabella 6. Simulazioni su ciclo con 200 veicoli con batterie Ni-MH da 18 kWh caricate e scaricate a C10.

| Caso di simulazione | Energia totale di scarica al punto rete (kWh) | Energia totale di carica al punto rete (kWh) | Energia totale persa (kWh) | Efficienza totale di carica/scarica (%) |
|-----------------------|---|--|----------------------------|---|
| Convertitore da 7 kW | 1360 | 1789 | 429 | 76 |
| Convertitore da 14 kW | 1280 | 1882 | 602 | 68 |

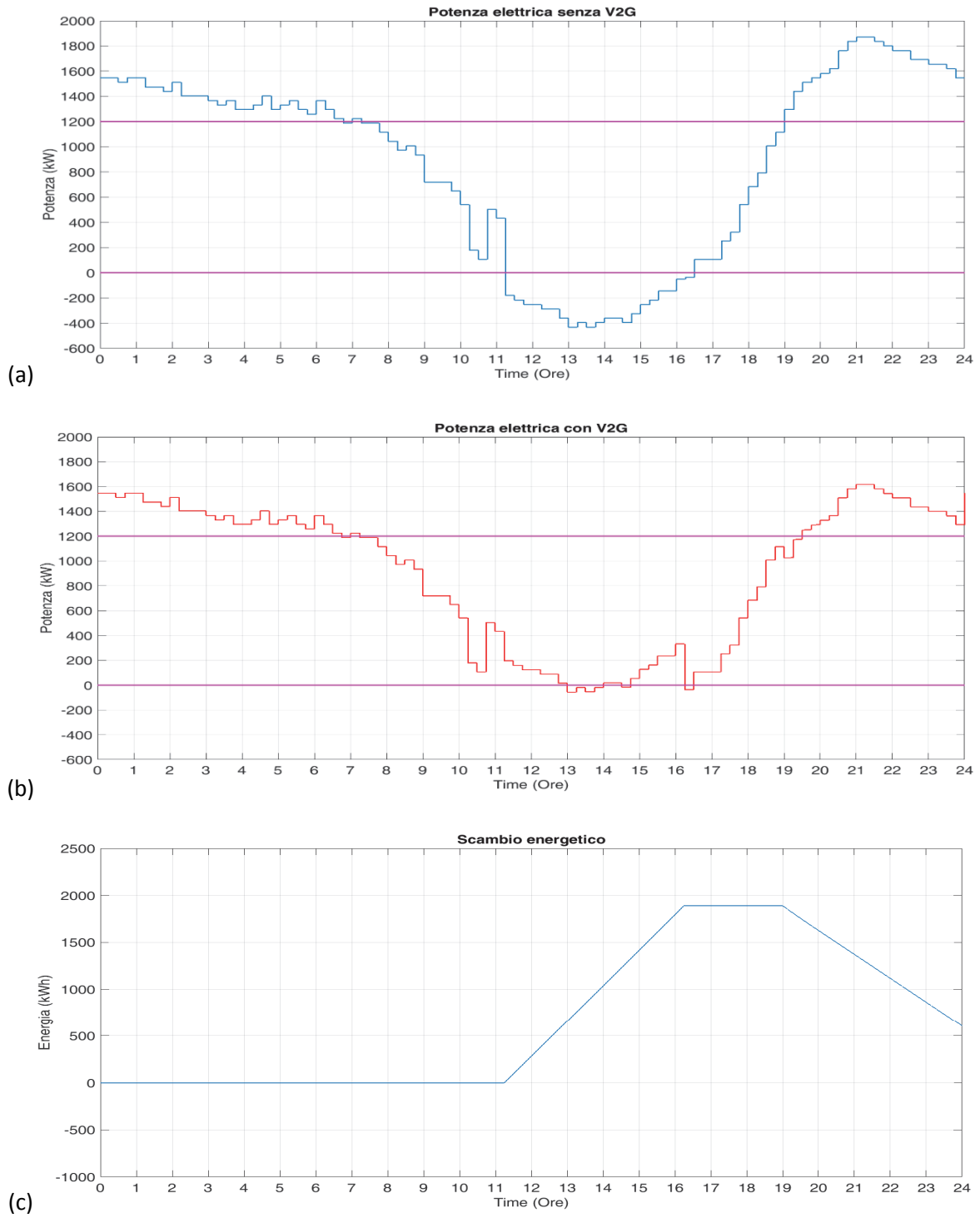


Figura 43. Esempio di simulazione su profilo giornaliero di assorbimento di potenza: (a) Potenza elettrica senza V2G; (b) Potenza elettrica con V2G parco di 200 veicoli; (c) Scambio energetico con la rete con convertitore da 14 kW.

8 Conclusioni

L'attività di ricerca è stata svolta nell'ottica di prosecuzione delle linee di attività espletate nell'ambito del PAR2013, finalizzate alla realizzazione di prodotti di interesse per le azioni inerenti la ricerca dei veicoli elettrici. In particolare, nell'ambito della precedente collaborazione, è stata espletata un'attività di ricerca relativa alla realizzazione di un modello energetico sviluppato in ambiente Matlab/Simulink® per la determinazione delle perdite e dei rendimenti, in diverse condizioni operative, di sistemi di ricarica con funzionalità V2G. La valutazione energetica da parte del simulatore è basata sull'impiego di mappe di efficienza energetica del convertitore elettronico di potenza e dell'accumulatore elettrochimico. Il modello sviluppato è dotato di alcune mappe sia per il convertitore che per l'accumulatore elettrochimico; tuttavia è prevista la possibilità di implementazione da parte dell'utente di ulteriori mappe di efficienza energetica per ciascuno dei componenti; queste ultime possono essere tratte dalla letteratura tecnica di settore, da modelli circuitali o da prove sperimentali.

In tal prospettiva, le attività di ricerca svolte nell'ambito della presente collaborazione sono state finalizzate alla validazione sperimentale del modello energetico sopracitato.

Il modello di simulazione elettrochimico del comportamento di una cella a ioni di litio qui descritto è stato sviluppato partendo dalla considerazione dei fenomeni e dei processi che hanno luogo durante il funzionamento della cella stessa. Come validato sperimentalmente su di una cella di tipo commerciale, note le caratteristiche dei materiali costitutivi della cella, il modello permette di dare buone previsioni energetiche e termiche in un largo campo di condizioni e modalità di utilizzo.

Per quanto riguarda il convertitore elettronico di potenza bidirezionale si è definita la topologia circuitale atta all'emulazione della carica/scarica di accumulatori veicolari, la quale è composta da uno stadio di conversione AC/DC e da uno stadio di conversione DC/DC. Al fine di limitare il contenuto armonico della corrente assorbita dalla rete e dalla batteria, sono stati dimensionati opportuni filtri LCL ed LC interposti rispettivamente tra convertitore e rete e tra convertitore e batteria. Inoltre, sono state eseguite simulazioni circuitali per mezzo di un modello sviluppato in Matlab/Simulink® utilizzando i moduli SimPowerSystem, al fine di valutare le funzionalità dell'intero sistema di conversione, di validare le strategie di controllo ed il dimensionamento dei filtri lato rete e lato batteria; il modello circuitale permette inoltre la valutazione dell'efficienza energetica del sistema di conversione.

Al fine di determinare sperimentalmente la mappa di efficienza del convertitore elettronico di potenza, è stata condotta sia per la fase di carica che per la fase di scarica una campagna di misure su di un convertitore prototipale connesso alla rete elettrica e ad un emulatore di batterie. I risultati ottenuti dalle misure rispettano gli andamenti attesi, ovvero il convertitore elettronico di potenza è caratterizzato da valori di efficienza energetica maggiori all'aumentare della potenza e della tensione di batteria, sia in fase di carica che di scarica.

La mappa di efficienza determinata sperimentalmente è stata implementata nel modello energetico sviluppato nell'ambito della precedente collaborazione, permettendo così l'analisi delle simulazioni condotte su casi di studio con profili di carico di reti reali con il modello energetico validato a partire dalle misure sperimentali di laboratorio.

9 Riferimenti bibliografici

1. G. Giuli, M. Mancini, "Studio delle interrelazioni tra il sistema elettrico e quello dei trasporti urbani", Report RdS/2014/101, Settembre 2014.
2. W. Su, H. Rahimi-Eichi, W. Zeng, M.Y. Chow, "A Survey on the Electrification of Transportation in a Smart Grid Environment", *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol.8, no.1, pp. 1-10, February 2012.
3. E. Ragazzi, E. Bompard, A. Tenconi, "Electric Vehicles and Power Grids: Challenges and Opportunities", The Greening of the Automotive Industry, Editore: Palgrave Macmillan Ltd., Basingstoke (GBR), ISBN 978-0-2303-6909-2.
4. S. Stüdli, W. Griggs, E. Crisostomi, R. Shorten, "On Optimality Criteria for Reverse Charging of Electric Vehicles", *IEEE Trans. on Intelligent Transportation System*, vol.15, no.1, pp.451-456, February 2014.
5. E. Ragazzi, "Lo stato dell'arte sulle smart grid: orientamenti, attori, prospettive", *Rapporti Tecnici Ceris 2011*.
6. W. Su, H. Rahimi-Eichi, W. Zeng, M.Y. Chow, "A Survey on the Electrification of Transportation in a Smart Grid Environment", *IEEE Trans. on Ind. Informatics*, vol.8, no.1, pp. 1-10, February 2012.
7. F. Berthold, A. Ravey, B. Blunier, D. Bouquain, S. Williamson, A. Miraoui, "Design and Development of a Smart Control Strategy for Plug-In Hybrid Vehicles Including Vehicle-to-Home Functionality", *IEEE Trans. on Transportation Electrification*, vol. 1, no. 2, August 2015, pp. 168-177.
8. H.N.T. Nguyen, C. Zhang, Md.A. Mahmud, "Optimal Coordination of G2V and V2G to Support Power Grids With High Penetration of Renewable Energy", *IEEE Trans. on Transportation Electrification*, vol. 1, no. 2, August 2015, pp. 188-195.
9. Z. Ma, A. Pesarani, V. Gevorgian, D. Gwinner, W. Kramer, "Energy Storage, Renewable Power generation, and the grid", *IEEE Electrification Magazine*, vol. 3, no. 3, September 2015, pp. 30-40.
10. T. Boston, S. Baker, "Energy Storage – Balancing the 21st century power grid", *IEEE Electrification Magazine*, vol. 3, no. 3, September 2015, pp. 52-57.
11. C. Liu, K.T. Chau, D. Wu, S. Gao, "Opportunities and Challenges of Vehicle-to-Home, Vehicle-to-Vehicle, and Vehicle-to-Grid Technologies", *Proceedings of the IEEE*, vol.101, no.11, November 2013, pp.2409-2427.
12. A. Vassallo, P. Maker, T. Dixon, V.G. Agelidis, "Electricity Storage – Renewable energy applications in the Australian context", *IEEE Electrification Magazine*, vol. 3, no. 3, September 2015, pp. 22-29.
13. V. del Razo, C. Goebel, H.A. Jacobsen, "Vehicle-Originating-Signals for Real-Time Charging Control of Electric Vehicle Fleets", *IEEE Trans. on Transportation Electrification*, vol. 1, no. 2, August 2015, pp. 150-167.
14. M. Yilmaz, P.T. Krein, "Review of Battery Charger Topologies, Charging Power Levels, and Infrastructures for Plug-In Electric and Hybrid Vehicles", *IEEE Trans. on Power Electron.*, vol.28, no.5, pp. 2151-2169, May 2013.
15. E.S. Dehaghani, S.S. Williamson, "On the Inefficiency of Vehicle-to-Grid (V2G) Power Flow: Potential Barriers and Possible Research Directions", *Proc. IEEE Transportation Electrification Conf. and Expo ITEC*, 2012, pp. 1-5.
16. S. Bodoardo, R. Bojoi, I. Doberdò, A. Tenconi, S. Vaschetto, "Modellistica per il bilancio energetico di sistemi di ricarica con funzionalità vehicle-to-grid", Report RdS/2013/100, Settembre 2014.
17. K. Stengert, "On-board 22 kW fast charger NLG6", *EVS27 International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium*, November 17-20, 2013, pp.1-11.
18. J. Kang, F. Yan, P. Zhang, C. Du, "Comparison of comprehensive properties of Ni-MH (nickel-metal hydride) and Li-ion (lithium-ion) batteries in terms of energy efficiency", *Journal of Energy*, Vol. 70, 1 June 2014, pp. 618-625.

10 Abbreviazioni ed acronimi

| | |
|------|-----------------------------------|
| AC | Alternating Current |
| BEV | Battery Electric Vehicle |
| BMS | Battery Management System |
| CAN | Controller Area Network |
| CPLD | Complex Programmable Logic Device |
| DC | Direct Current |
| DOD | Depth Of Discharge |
| EV | Electric Vehicle |
| HEV | Hybrid Electric Vehicle |
| IGBT | Insulated Gate Bipolar Transistor |
| LUT | Look-Up Table |
| PHEV | Plug-in Hybrid Electric Vehicle |
| SOC | State Of Charge |
| V2G | Vehicle-to-Grid |