



Ricerca di Sistema elettrico

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

S. Bodoardo, R. Bojoi, I. Doberdò, A. Tenconi, S. Vaschetto



MODELLISTICA PER IL BILANCIO ENERGETICO DI SISTEMI DI RICARICA CON FUNZIONALITA' VEHICLE-TO-GRID

Silvia Bodoardo, Italo Doberdò (DISAT, Politecnico di Torino)

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

Settembre 2014

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2013

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

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

Obiettivo: Interazioni mobilità elettrica/reti intelligenti

Responsabile del Progetto: Antonino 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: Giancarlo Giuli

Responsabile scientifico Politecnico di Torino: Alberto Tenconi

Indice

SOMMARIO.....	5
1 INTRODUZIONE.....	6
2 DESCRIZIONE DEL SISTEMA	8
2.1 CONVERTITORE	9
2.1.1 <i>Aspetti generali</i>	9
2.1.2 <i>Tipologie circuitali adatte al concetto V2G</i>	10
2.1.3 <i>Valutazione del rendimento del convertitore</i>	13
2.2 BATTERIA	15
2.2.1 <i>Aspetti generali</i>	15
2.2.2 <i>Modelli circuitali</i>	17
2.2.3 <i>Valutazione dell'efficienza energetica di batteria</i>	18
3 TERMINI DEL PROBLEMA	19
4 APPROCCIO MODELLISTICO.....	20
4.1 MODELLO SISTEMA COMPLETO	21
4.2 MODELLO CONVERTITORE	23
4.3 MODELLO BATTERIA.....	26
4.3.1 <i>Blocco SOC</i>	28
4.3.2 <i>Cycles counter</i>	30
4.3.3 <i>Battery model</i>	30
4.3.4 <i>Battery energy measurement</i>	31
4.3.5 <i>Efficiency computation</i>	32
4.4 BATTERY MANAGEMENT SYSTEM	33
5 ESEMPI E RISULTATI DI SIMULAZIONE	34
5.1 TEST GENERICI SUL MODELLO	34
5.1.1 <i>Impulso di carica con SOC 80%</i>	34
5.1.2 <i>Impulso di carica con diversi valori di SOC</i>	35
5.1.3 <i>Impulso di scarica</i>	36
5.1.4 <i>Ciclo di scarica/carica</i>	37
5.1.5 <i>Ciclo di scarica/carica con limite inferiore di SOC al 45%</i>	38
5.1.6 <i>Ciclo di scarica/carica con limite superiore di SOC al 85%</i>	39
5.2 TEST CON BATTERIA LI-ION	41
5.2.1 <i>Ciclo di scarica/carica ad 1C</i>	41
5.2.2 <i>Ciclo di scarica/carica a 3C</i>	43
5.3 TEST CON BATTERIA NI-MH.....	45
5.3.1 <i>Comparazione con dati di letteratura</i>	45
5.3.2 <i>Ciclo di scarica/carica ad 1C</i>	46
5.3.3 <i>Ciclo di scarica/carica a 3C</i>	48
5.4 TEST CONVERTITORE	51
5.5 ESEMPIO DI SIMULAZIONE SU CICLO	54
6 CONCLUSIONI	56
7 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	58
8 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI	60

Sommario

La gestione intelligente della ricarica dei veicoli elettrici in prospettiva vehicle-to-grid (V2G: flusso bidirezionale di energia tra veicolo e rete) costituisce un tema di innovazione che vede potenziali vantaggi per la rete sia in termini di adattabilità della domanda che di stoccaggio distribuito, e quindi di resilienza della rete stessa. L'approccio V2G comporta la necessità di un convertitore elettronico di potenza bidirezionale, ma anche la necessità di gestire i flussi di carica-scarica in modo energeticamente ottimale nel rispetto dei 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.

Nell'ambito dei convertitori per l'interfacciamento tra la rete elettrica e gli accumulatori a bordo veicolo esistono soluzioni diverse per topologia circuitale, numeri di fasi e taglia di tensione, corrente e potenza. Analogamente, per il sistema di accumulo sono disponibili più tecnologie e differenti taglie di tensione, corrente e potenza che dipendono da un'ampia pluralità di fattori legati alle prestazioni del powertrain e ai modi di impiego del veicolo.

Sull'efficienza complessiva della carica-scarica degli accumulatori, nelle diverse condizioni di funzionamento giocano in modo differente l'efficienza energetica del convertitore e l'efficienza energetica dell'accumulatore. Se per il convertitore le efficienze sono tipicamente massime in prossimità della piena potenza, per gli accumulatori sono preferibili profili a potenza ridotta per i vantaggi sia in termini di più elevata efficienza energetica sia in termini di un maggior numero di cicli vita, ovvero di un più lento decadimento della capacità di accumulo.

Per tali motivi è utile disporre di uno strumento di calcolo per quantificare le perdite e il rendimento di un sistema di accumulo distribuito, basato sullo sfruttamento delle batterie a bordo di veicoli elettrici e ibridi connessi alla rete.

Il presente documento riporta le attività di ricerca finalizzate allo sviluppo 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.

1 Introduzione

Il progressivo esaurimento globale delle riserve fossili di energia, in concomitanza ad una sempre maggior sensibilità rivolta alle politiche ambientali mirate alla riduzione dei gas serra, hanno favorito il continuo sviluppo dei veicoli elettrici (EV) puri (BEV), ibridi (HEV) e plug-in (PEV) [1]-[4]. Considerata la non emissività di CO₂ da parte dei motori elettrici, tali veicoli vengono spesso considerati come sistemi di mobilità ad impatto ambientale zero. Tuttavia, tal concetto ha validità in un bilancio energetico-ambientale localizzato e riferito al veicolo stesso in quanto l'elettricità non è una fonte energetica primaria, ma il prodotto di un complesso ciclo di produzione e distribuzione basato su diverse tipologie di fonti primarie. Pertanto, sia da un punto di vista del bilancio energetico che di quello ambientale è rilevante considerare l'impatto di tutti gli elementi coinvolti nel processo "well-to-tank". I recenti progressi tecnologici dei motori elettrici, dei sistemi di generazione, trasmissione e distribuzione dell'energia hanno fatto sì che il bilancio energetico complessivo sia a favore dei veicoli elettrici rispetto a quelli equipaggiati con motori a combustione interna (la cui efficienza energetica tipica è prossima al 20%). Va tuttavia precisato che il vantaggio ambientale nell'impiego dei veicoli elettrici è strettamente correlato alle tecnologie di generazione e all'efficienza delle linee di trasmissione e distribuzione [5].

Il paradigma tradizionalmente implementato fin dagli albori dello sviluppo dell'industria elettrica, è basato sulla presenza di un numero limitato di impianti di grande taglia per la produzione dell'energia elettrica connessi alla rete di distribuzione. Quest'ultima, principalmente di tipo passivo, ovvero non connessa ad altre fonti di generazione, ha lo scopo di trasferire l'energia elettrica, a diversi livelli di tensione, dagli impianti di produzione alle stazioni localizzate sul territorio per il dispacciamento dell'energia.

Con la sempre maggior diffusione della generazione distribuita di energia elettrica (in particolare da fonti rinnovabili) ed il continuo incremento delle utenze al contempo utilizzatrici e produttrici di energia elettrica (prosumers), i gestori dei sistemi elettrici di trasmissione e di distribuzione si trovano a dover far fronte ad uno sviluppo innovativo rispetto a quanto avvenuto negli anni passati. Al fine di ottimizzare le prestazioni complessive (economiche, energetiche, ambientali) del sistema si è sviluppato il concetto di *smart grids*, consistente nella decentralizzazione della gestione ottimale della rete e dei carichi ad essa connessi, permettendo così anche notevoli opportunità per una efficiente gestione della ricarica dei veicoli elettrici a fronte di una loro diffusione di massa [6], [7].

Il possibile impatto degli EV sul sistema elettrico può essere categorizzato a diversi livelli. Da un punto di vista macro prospettico, il loro impatto porta all'incremento del consumo di energia elettrica, così come ad un potenziale spostamento dei picchi di assorbimento giornalieri, con la conseguente necessità di potenziamento delle linee di trasmissione e distribuzione. Il profilo di potenza legato al consumo di energia risulta anch'esso influenzato con un potenziale spostamento dei picchi giornalieri di consumo. Da un punto di vista micro prospettico, l'impatto della diffusione degli EV va valutata in riferimento alle reti di distribuzione in media tensione e bassa tensione, le quali devono essere fortemente connesse tra di loro per un opportuno bilanciamento dei carichi energetici e per garantire la dovuta affidabilità e qualità dell'energia fornita alle utenze.

L'introduzione di strategie di gestione intelligente delle reti elettriche permette inoltre la possibilità di un utilizzo ottimale di veicoli elettrici da un punto di vista di sistemi di immagazzinamento distribuito. Infatti, la presenza di batterie ricaricabili a bordo veicolo rappresenta la disponibilità di sistemi di accumulo distribuiti che possono essere opportunamente sfruttati in una prospettiva di gestione intelligente delle reti elettriche, secondo il concetto di *vehicle-to-grid* (V2G). In letteratura, alcuni autori hanno proposto l'approccio V2G in cui l'energia elettrica immagazzinata nei veicoli elettrici connessi alla rete può essere impiegata per stabilizzare la rete stessa e per migliorare la qualità energetica [8]. Tal concetto è di particolare interesse in uno scenario di continuo aumento della generazione distribuita di energia elettrica da parte di fonti rinnovabili caratterizzate da una produzione di tipo stocastico (Figura 1).

Nelle applicazioni V2G, il caricabatteria deve poter permettere il flusso di energia bidirezionale, ovvero sia dalla rete al veicolo sia dal veicolo alla rete; ciò comporta una maggior complessità circuitale dello stesso e

l'impiego di componenti caratterizzati da un costo maggiore rispetto a quelli che possono essere impiegati per un caricabatteria unidirezionale.

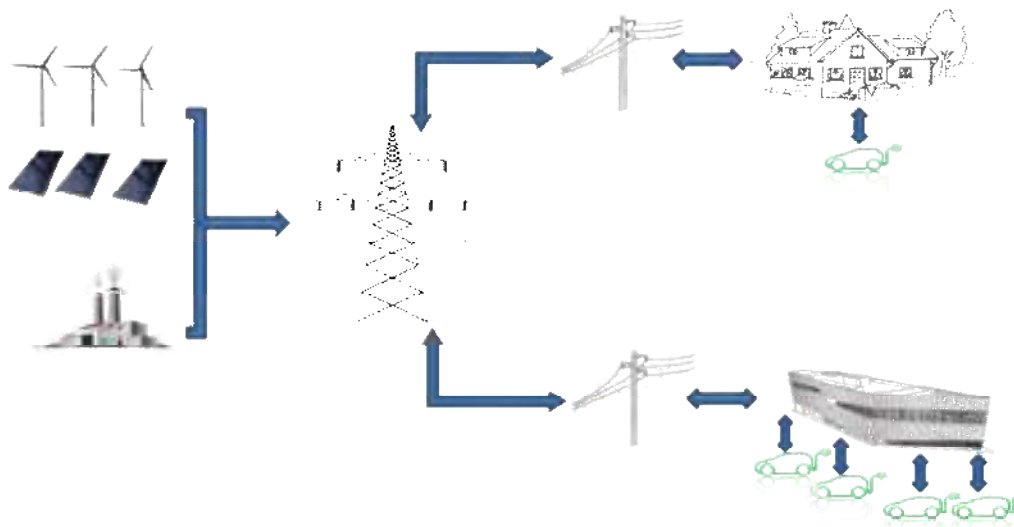


Figura 1. Schematizzazione del concetto V2G.

Lo scenario caratterizzante il concetto V2G è basato sulla dislocazione di opportune tecnologie che permettono il trasferimento di energia elettrica dalla rete al veicolo e viceversa. I veicoli elettrici con tecnologia V2G sono caratterizzati dalla possibilità di essere connessi alla rete elettrica per essere ricaricati, ed allo stesso tempo di poter comunicare con il sistema di gestione della rete stessa. La comunicazione bilaterale tra veicolo e rete di distribuzione permette di raffrontare, anche in tempo reale, le esigenze di entrambi. In aggiunta, tal comunicazione bilaterale permette un agevole computo economico del flusso energetico che avviene tra la rete ed il veicolo. La possibilità di fornire energia alla rete rappresenta inoltre, da un punto di vista di bilancio economico, una riduzione del costo complessivo di ricarica del veicolo elettrico.

Dal punto di vista della rete, i veicoli dotati di tecnologia V2G rappresentano una sorgente di generazione distribuita che può essere sfruttata durante i picchi di assorbimento, contribuendo così a ottundere il profilo di potenza e ad incrementare il fattore di carico, con un conseguente aumento della resilienza della rete. Tal riduzione della discrepanza tra domanda ed offerta di energia elettrica è di rilevante importanza anche da un punto di vista ambientale; infatti, l'insieme di più veicoli elettrici connessi alla rete e gestiti come sorgenti di energia, consentono una potenziale riduzione del numero di costosi impianti di generazione finalizzati al sofferimento dei picchi di richiesta energetica, i quali sono solitamente poco efficienti ed inquinanti [9]. L'immissione di potenza in rete da parte degli EV permette anche una più efficiente regolazione della tensione sulle reti di bassa tensione (come anche per le reti di media tensione) dei sistemi di distribuzione, ove la caduta di tensione è strettamente correlata al flusso di potenza. In caso di rete ad isola, dove la frequenza deve essere regolata, la batteria può essere caricata (o scaricata) al fine di stabilizzare la frequenza stessa quando subisce variazione rispetto al valore nominale [5].

La disponibilità di sistemi di accumulo distribuito connessi alla rete, favorisce inoltre la possibilità di connettere alla rete stessa un maggior numero di fonti stocastiche di energia, quali ad esempio gli impianti fotovoltaici ed i generatori eolici [10].

L'approccio V2G rappresenta anche un potenziale supporto nella gestione delle emergenze in quanto l'energia immagazzinata negli EV dotati di tecnologia V2G, rappresenta una sorgente di potenza distribuita di back-up che può essere resa disponibile in caso di guasto della rete di trasmissione ad alta tensione; in tal modo viene assicurata, congiuntamente con i sistemi di generazione distribuita, una temporanea fornitura di energia per i carichi [11].

Tuttavia, la convenienza dell'approccio V2G è soggetta anche alla valutazione del bilancio energetico complessivo del sistema, tenendo conto che l'operazione di immagazzinamento dell'energia e la successiva cessione della stessa non è un processo a rendimento unitario. Sull'efficienza complessiva della carica-

scarica degli accumulatori, nelle diverse condizioni di funzionamento giocano in modo differente il rendimento del convertitore e il rendimento dell'accumulatore elettrochimico. In particolare, se per il convertitore le efficienze sono tipicamente massime in prossimità della piena potenza, negli accumulatori sono tipicamente preferibili profili a potenza ridotta per i vantaggi sia in termini di più elevata efficienza energetica sia in termini di un maggior numero di cicli vita, ovvero di un più lento decadimento della capacità di accumulo. Per questa ragione è utile disporre di uno strumento di calcolo per quantificare le perdite e il rendimento di un sistema di accumulo distribuito, basato sullo sfruttamento delle batterie a bordo di veicoli elettrici e ibridi connessi alla rete.

Il presente documento riporta le attività di ricerca finalizzate allo sviluppo 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

2 Descrizione del sistema

In letteratura è riportata la classificazione dei livelli di potenza per la ricarica conduttiva dei veicoli (Tabella 1). Sulla base degli scenari presentati dagli autori in [11], il Livello 1 si riferisce in particolare agli EVs che vengono normalmente ricaricati durante le ore notturne in ambienti residenziali privati, dove i veicoli vengono connessi alla rete per mezzo di una normale presa elettrica monofase; tal livello permette una ricarica completa del veicolo in tempi relativamente lunghi (alcune ore). Il Livello 2 è tipicamente considerato quello di maggior diffusione sia per quanto riguarda gli ambienti privati sia per quelli pubblici (ad esempio parcheggi) e permette una ricarica completa del veicolo in tempi relativamente brevi (poche ore). Per questo livello, la presa attraverso la quale il veicolo può essere ricaricato, può essere di tipo monofase oppure trifase. Per il Livello 3, caratterizzato da una maggior potenza rispetto ai precedenti, è necessaria una linea trifase; i tempi di ricarica sono particolarmente rapidi (inferiori all'ora). Quest'ultimo livello è inteso per stazioni di ricarica dedicate e prevede l'utilizzo di un opportuno caricabatteria dedicato in locazione al punto di ricarica. Va sottolineato che, a differenza del Livello 1, i livelli 2 e 3 necessitano di un equipaggiamento di alimentazione dedicato (Electric Vehicle Supply Equipment - EVSE) a bordo veicolo in quanto non possono essere direttamente connessi alle comuni prese tipicamente installate presso le abitazioni residenziali.

Tabella 1. Livelli di potenza per la ricarica conduttiva dei veicoli [11].

Livelli di potenza	Tensione	Localizzazione caricabatterie	Utilizzo	Equipaggiamento di alimentazione	Potenza	Tempo di ricarica	Tipo di veicolo
Livello 1	120 Vrms USA 230 Vrms EU	Onboard Monofase	Ricarica domestica/ufficio	Presa normale	< 2 kW	4-11 ore 11-36 ore	Ibrido (5-15 kWh) Elettrico (16-50 kWh)
Livello 2	240 Vrms USA 400 Vrms EU	Onboard monofase/trifase	Punti di ricarica pubblici/privati	EVSE ^{III} dedicato	4 kW 8 kW 19.2 kW	1-4 ore 2-6 ore 2-3 ore	Ibrido (5-15 kWh) Elettrico (16-30 kWh) Elettrico (3-50 kWh)
Livello 3	208-600 Vrms AC oppure DC	Offboard trifase	Stazione di ricarica	EVSE ^{III} dedicato	50 kW 100 kW	0.4 - 1 ore 0.2- 0.5 ore	Elettrico (20-50 kWh)

Sulla base della classificazione riportata in Tabella 1, il Livello 2 può essere considerato quello di maggior interesse per l'applicazione V2G in oggetto di studio, in quanto è previsto per veicoli caratterizzati da range di potenza tipici di vetture per uso urbano e delivery van (5-50 kWh), ed i tempi di ricarica sono ragionevolmente compatibili con quelli previsti per l'applicazione.

I componenti principali dei sistemi di ricarica con funzionalità V2G, che vanno opportunamente considerati per la valutazione del bilancio energetico del sistema, sono il convertitore elettronico di potenza e l'accumulatore elettrochimico (Figura 2). Per quanto riguarda il convertitore elettronico di potenza, esso deve essere caratterizzato dalla possibilità di poter trasferire la potenza elettrica dalla rete al sistema di accumulo veicolare e viceversa, ovvero deve presentare la caratteristica di bidirezionalità.

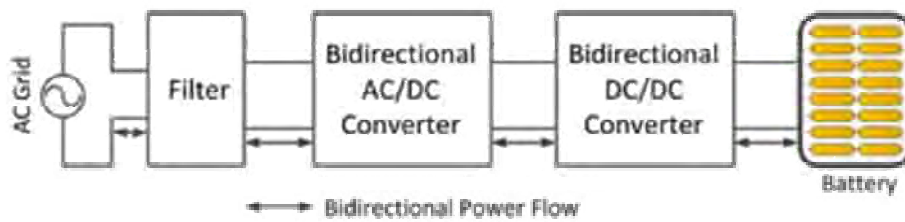


Figura 2. Schematizzazione dei componenti principali del sistema V2G [11].

Nelle sezioni successive vengono riportate, sia per il convertitore che per la batteria, le principali tecnologie oggi disponibili per applicazioni veicolari e l'individuazione delle soluzioni e delle taglie in termini di tensione, corrente e potenza più consone per il concetto di V2G oggetto del presente studio.

2.1 Convertitore

2.1.1 Aspetti generali

Uno schema a blocchi generico di PEV è mostrato in Figura 3, dove si può evidenziare il convertitore elettronico di potenza che svolge le funzioni di carica/scarica conduttiva della batteria di trazione a partire da una alimentazione esterna in corrente alternata [12]. Nell'esempio considerato, il convertitore è a bordo veicolo (convertitore on-board) ed il collegamento con l'alimentazione esterna in corrente alternata viene realizzato mediante un equipaggiamento di alimentazione (EVSE) e una stazione di ricarica dedicata, oppure per mezzo di una normale presa di corrente in caso di piccole potenze in corrente alternata monofase. Lo schema di alimentazione è valido anche per convertitori che non si montano a bordo veicolo (convertitori off-board).

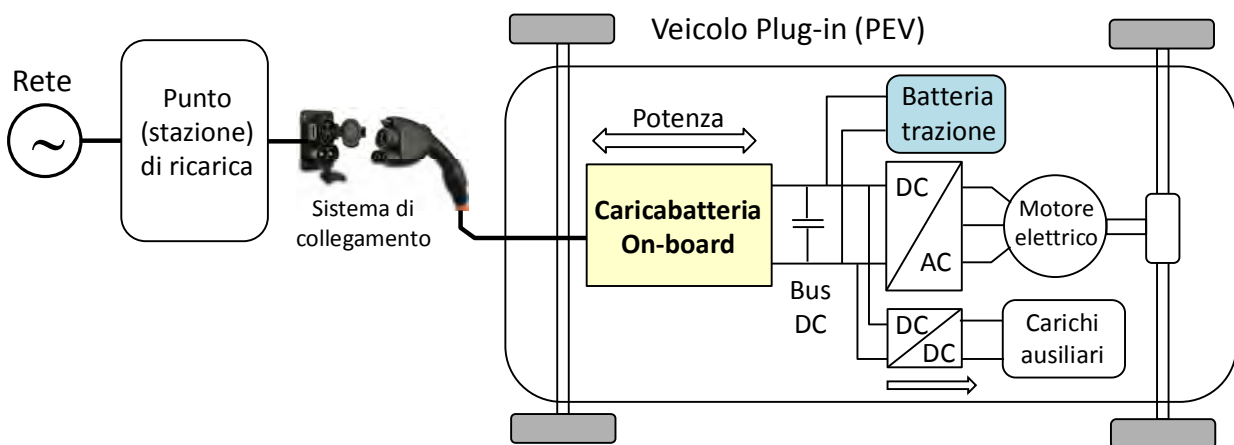


Figura 3. Schema a blocchi generico di un veicolo elettrico (ibrido) plug-in.

Indipendentemente dalla collocazione del convertitore (on-board oppure off-board), lo schema a blocchi più generico del convertitore è illustrato nella Figura 4:

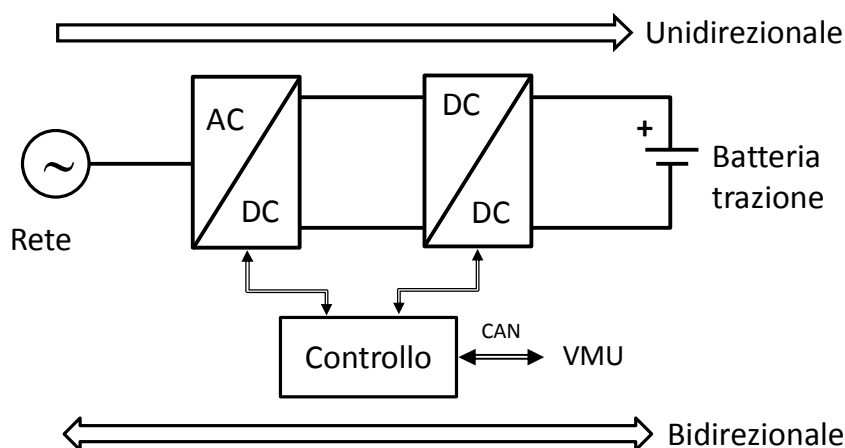


Figura 4. Schema a blocchi generico di un caricabatteria per veicoli plug-in.

Il caricabatteria è un convertitore elettronico di potenza costituito da un convertitore AC/DC e da un convertitore DC/DC comandati da almeno una unità di controllo a microprocessore. Il controllo del convertitore comunica con l'unità centrale del veicolo, di solito mediante una rete CAN.

I caricabatteria possono essere classificati come [11]:

- Unidirezionali quando sono progettati solamente per assorbire potenza elettrica dalla rete per ricaricare la batteria
- *Bidirezionali* quando sono progettati anche per erogare potenza elettrica in rete per applicazioni di tipo V2G
- Isolati quando contengono nella struttura interna un isolamento galvanico. Di solito, l'isolamento galvanico è ottenuto mediante un trasformatore in alta frequenza che si trova all'interno dello stadio di conversione DC/DC (Figura 4). Anche se le normative non specificano in modo chiaro la necessità di avere l'isolamento galvanico, di solito tutti i caricabatteria presentano un isolamento galvanico tra la rete e la batteria di trazione
- Non isolati quando non esiste nessun isolamento galvanico tra la rete e la batteria di trazione
- Integrati quando nella struttura di conversione sono utilizzati l'inverter di trazione e il motore elettrico di trazione. Di solito, i caricabatteria integrati non sono isolati; per questo motivo, la stazione di ricarica (Figura 3) deve contenere l'isolamento galvanico, che si può ottenere mediante un trasformatore di frequenza industriale

Come precedentemente detto, dalla letteratura [11], i livelli di potenza più comuni dei caricabatteria sono suddivisi in tre categorie mostrate in Tabella 1. Come si può notare dalla tabella, la potenza dei caricabatteria on-board è limitata all'incirca a 20 kW, mentre i caricabatteria off-board raggiungono livelli di potenza più elevati (fino a circa 100 kW). *Il presente report intende affrontare solo i convertitori per il livello 2 bidirezionale (e quindi adatti al concetto V2G), per i quali sono necessari punti/stazioni di ricarica dedicati in corrente alternata trifase.*

2.1.2 Tipologie circuitali adatte al concetto V2G

In base alla letteratura [11], [13]-[15], uno schema a blocchi tipico di un caricabatteria trifase di potenza contiene un convertitore AC/DC reversibile che alimenta uno stadio DC/DC isolato reversibile mediante un bus DC capacitivo, come mostrato in Figura 5.

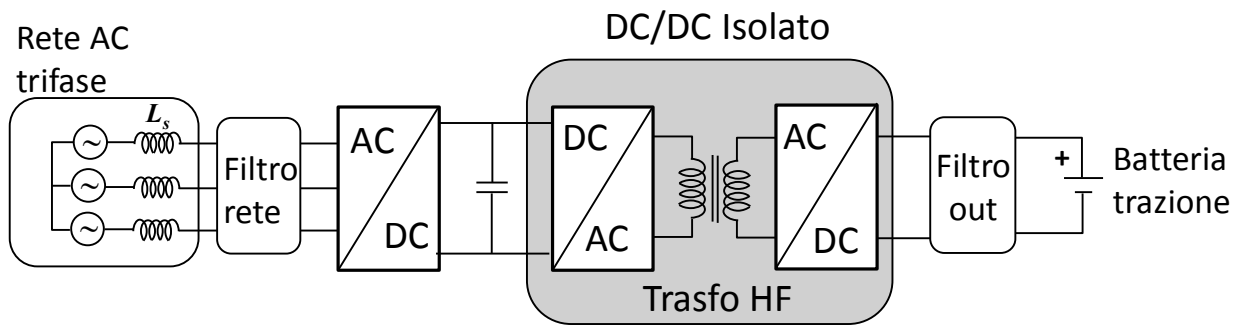


Figura 5. Schema a blocchi generico di un caricabatteria trifase adatto ad applicazioni V2G.

(A) Convertitore AC/DC reversibile

In base alla normativa CEI EN 61000-3-12 (EN 61000-3-12:2011-12) [16] relativa al collegamento alla rete di convertitori elettronici di potenza, lo stadio di conversione AC/DC deve avere in ingresso correnti sinusoidali a fattore di potenza unitario. Per questo motivo, la topologia circuitale più utilizzata per lo stadio di conversione AC/DC lato rete di alimentazione è un raddrizzatore trifase attivo boost con filtro LC oppure LCL, come illustrato in Figura 6:

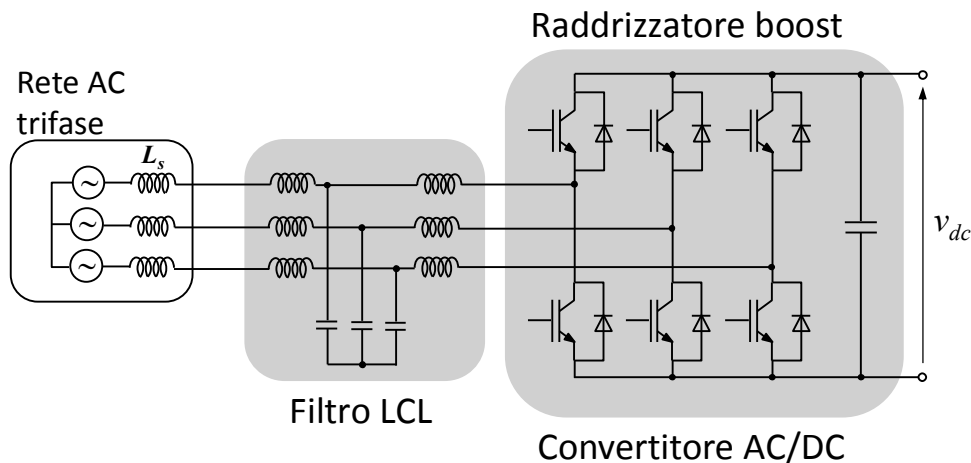


Figura 6. Convertitore AC/DC con filtro in ingresso LCL.

Il raddrizzatore boost è un inverter trifase in cui l'ingresso è in corrente alternata, mentre l'uscita è in corrente continua. Il nome boost deriva dal fatto che la tensione ottenuta sul DC link deve essere superiore al valore di picco della tensione concatenata trifase. I componenti utilizzati (IGBT) devono essere di tensione pari a 1200V quando la rete di alimentazione è da 400Vca (tensione concatenata).

La soluzione presentata in [17] da Brusa GmbH utilizza una tensione DC link compresa tra 620 e 840Vdc, mentre la tensione utilizzata in [18] è costante e pari a 800Vdc. In generale, lavorare con tensioni di DC link elevate comporta un aumento delle perdite di commutazione nel raddrizzatore.

Il filtro LCL all'ingresso del raddrizzatore boost deve filtrare in modo opportuno le armoniche di corrente immesse in rete a causa della commutazione. Queste armoniche aumentano all'aumentare della tensione di DC link e si riducono all'aumentare della frequenza di commutazione. La frequenza di commutazione utilizzata in [17] è pari a 36 kHz (con una struttura di potenza speciale brevettata per ridurre le perdite per commutazione), mentre la frequenza del raddrizzatore impiegato in [18] è pari a 50 kHz, ma con un convertitore dimensionato per una potenza di 10 kW.

(B) Convertitore DC/DC isolato reversibile

Il convertitore DC/DC è interposto tra la batteria di trazione e il DC link fornito dal convertitore AC/DC, come mostrato in Figura 5. Le soluzioni attuali devono fornire un isolamento galvanico tra la batteria e il convertitore AC/DC. Per questo motivo, la struttura di conversione DC/DC deve contenere un trasformatore in alta frequenza (High Frequency Transformer – HFT). La frequenza di commutazione deve essere elevata, pari a circa 100 kHz.

La soluzione industriale utilizzata in [17] è basata su 2 unità di potenza da 11 kW. Ciascuna unità è costituita da 2 inverter monofase con comando PWM phase shift che alimenta un trasformatore ad alta frequenza monofase a rapporto di trasformazione unitario. Ciascun secondario alimenta un raddrizzatore a diodi ponte. Le uscite delle 2 unità sono sempre collegate in parallelo sulla batteria, mentre gli ingressi possono lavorare in parallelo oppure in serie mediante 2 deviatori elettromeccanici (S_1 e S_2), come mostrato in Figura 7.

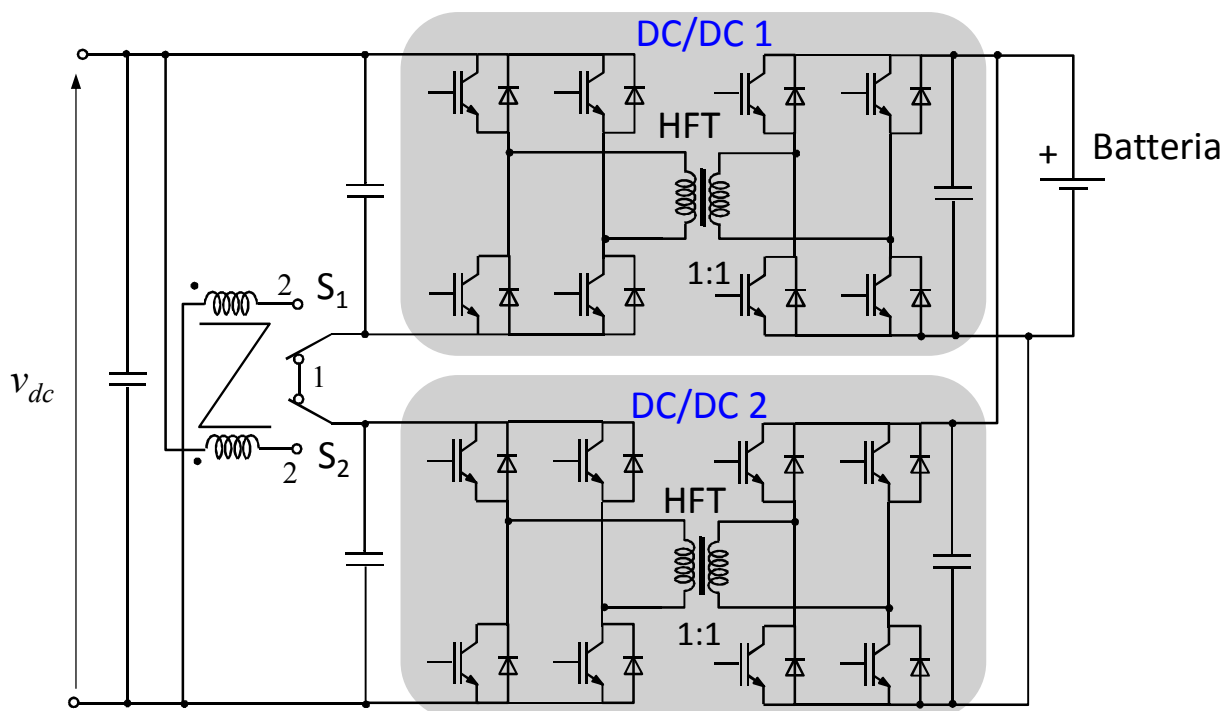


Figura 7. Convertitore DC/DC isolato utilizzato in [17].

La modalità serie viene usata quando la tensione in ingresso è elevata ed è prodotta dal convertitore AC/DC alimentato dalla rete trifase. I due deviatori S_1 e S_2 sono chiusi nella posizione 1, quindi gli ingressi sono in serie e sono alimentati da metà della tensione in ingresso. Quando la tensione di batteria è pari a 450 V, la tensione complessiva di DC link v_{dc} necessaria deve essere pari a 900 V.

La modalità parallelo viene usata quando la tensione in ingresso è bassa ed è prodotta dal convertitore AC/DC alimentato dalla rete monofase. I due deviatori S_1 e S_2 sono chiusi nella posizione 2, quindi gli ingressi sono in parallelo e sono alimentati da tutta la tensione in ingresso. Quando la tensione di batteria è pari a 450 V, la tensione complessiva di DC link v_{dc} richiesta deve essere pari a 450 V. Il collegamento in parallelo viene effettuato mediante due induttori accoppiati che si comportano come un filtro di modo comune per ridurre i disturbi EMI. I dispositivi elettronici di potenza sono IGBT da 1200 V.

I due convertitori DC/DC sono a guadagno variabile, cioè la loro tensione media erogata è variabile in funzione dello sfasamento usato dalla strategia di comando.

La soluzione presentata in [18] è molto costosa e consiste in due inverter trifase ed un trasformatore trifase ad alta frequenza, come mostrato in Figura 8. Il trasformatore trifase è costituito da tre unità monofase con collegamento stella a primario e stella a secondario. Non sono state forniti dati relativi al rapporto di trasformazione ed alla frequenza di commutazione. La tensione continua in ingresso è costante e pari a 800Vdc.

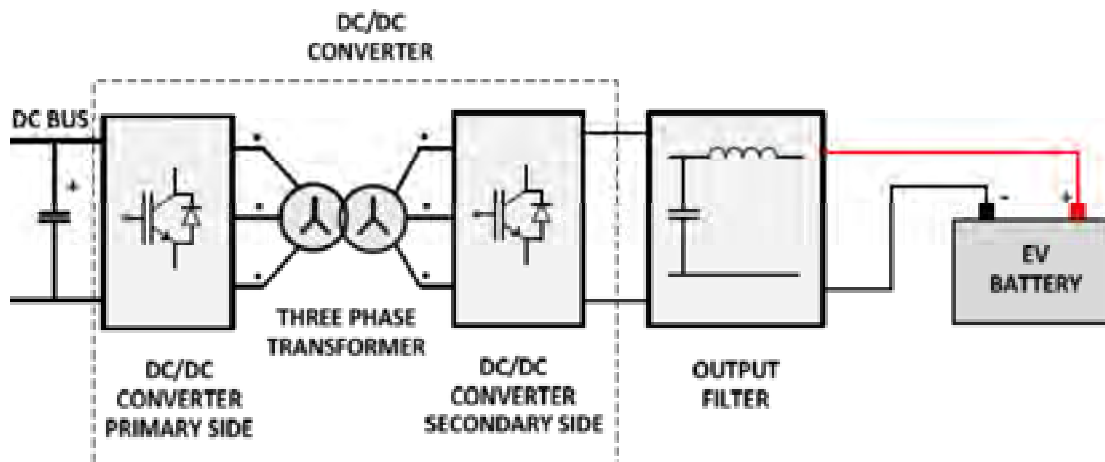


Figura 8. Convertitore DC/DC isolato presentato in [18].

Il convertitore DC/DC presentato in [19] ha una potenza pari a 10 kW e utilizza un inverter risonante, come mostrato in Figura 9. Il circuito risonante è ottenuto mediante l'induttore L_r e una capacità C_r in serie con il primario del trasformatore ad alta frequenza. In questo modo, le perdite di commutazione sono molto basse e consente l'utilizzo di MOSFET come dispositivi elettronici di potenza. La frequenza di commutazione è stata dichiarata tra 100 kHz ÷ 185 kHz.

La tensione in ingresso è costante è pari a 400 Vdc; per questo motivo, i MOSFET sono dispositivi da 600 V. Il convertitore è a guadagno variabile per variare la tensione erogata in uscita a partire da una tensione costante in ingresso.

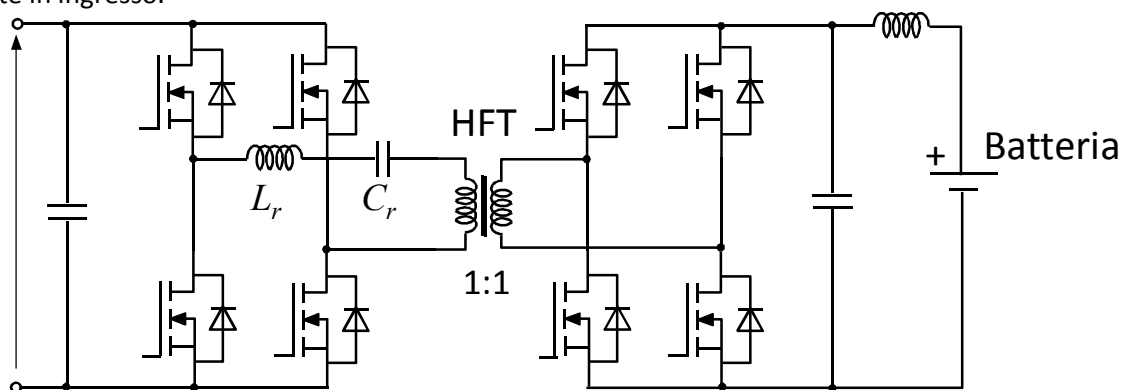


Figura 9. Convertitore DC/DC isolato risonante da 10 kW presentato in [19].

2.1.3 Valutazione del rendimento del convertitore

Come si può facilmente notare dalle topologie circuitali presentate, il sistema di conversione è in realtà un insieme di più convertitori di potenza e di eventuali trasformatori di potenza e filtri. Di conseguenza, una valutazione accurata del rendimento complessivo di conversione rete-batteria (carica) e batteria-rete (scarica) necessita la piena conoscenza della topologia circuitali (componenti di potenza utilizzati, componenti reattivi) e le strategie di controllo delle singole unità. Inoltre, il rendimento in un punto di funzionamento del sistema convertitore dipende dai seguenti parametri elettrici di funzionamento:

- Tensione di rete
- Tensione del bus DC tra l'unità AC/DC e l'unità DC/DC; questo livello di tensione non è accessibile e dipende dalla scelta progettuale del convertitore
- La corrente di carica/scarica della batteria
- Tensione di batteria che dipende dallo stato di carica e dalla corrente di scarica/carica

Una volta noto in dettaglio il circuito elettrico, le strategia di controllo ed il punto di funzionamento della batteria, il rendimento di conversione può essere valutato mediante delle simulazioni di tipo circuitale, che necessitano software dedicati e tempi di simulazione notevoli in quanto le frequenze di commutazione superano 100 kHz.

Una soluzione semplificata di valutazione del rendimento può essere implementata mediante delle mappe di rendimento energetico basate sui datasheet dei caricabatteria. Come esempio, Brusa GmbH fornisce nel datasheet [20] del caricabatteria da 22 kW una mappa di rendimento in funzione della potenza di carica e della tensione di rete, come mostrato nella Figura 10.

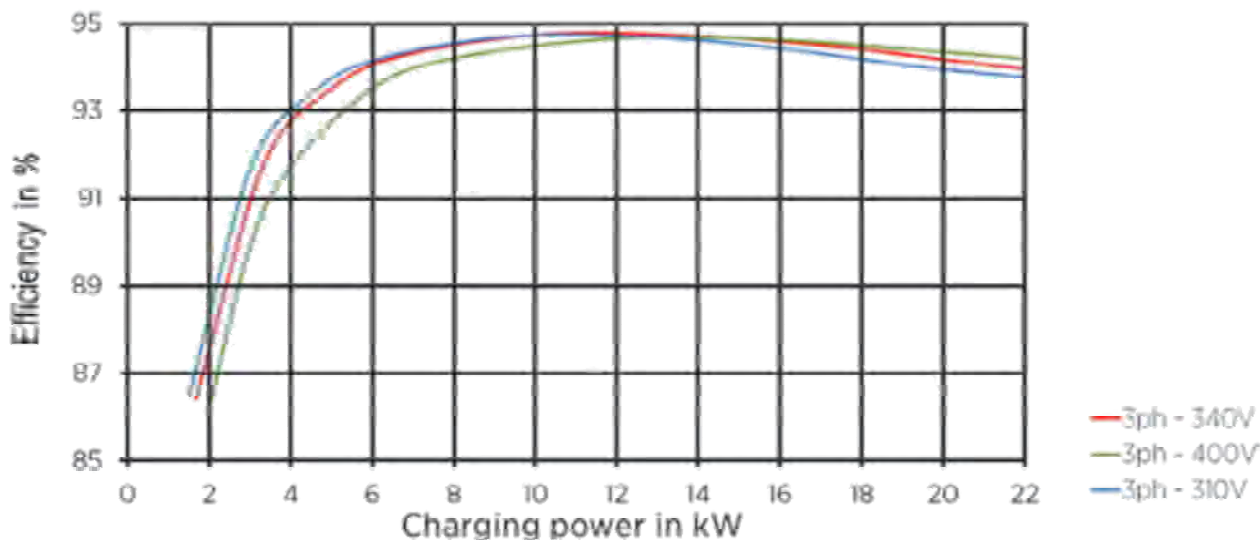


Figura 10. Rendimento di un caricabatteria da 22 kW di Brusa GmbH [20].

Un altro esempio è una mappa di rendimento in funzione della potenza di carica/scarica e della tensione di batteria presentata in [17], come mostrato in Figura 11. Rispetto all’esempio precedente, questo approccio è più completo e permette la valutazione del rendimento per valori diversi di tensione di batteria.

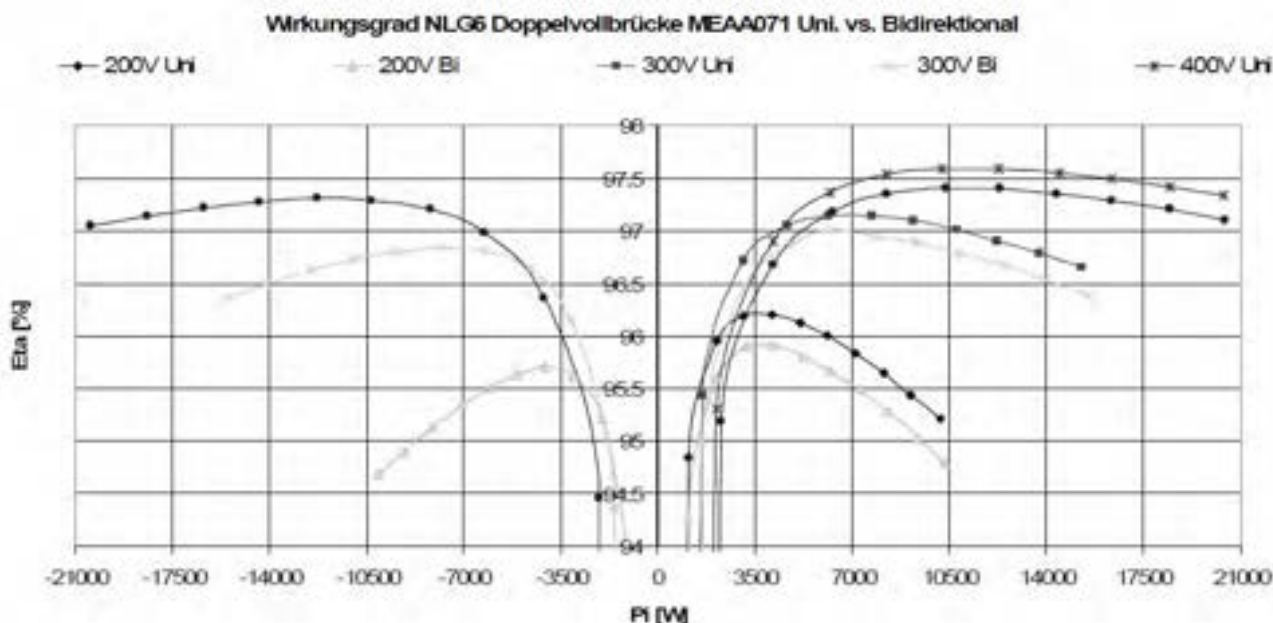


Figura 11. Rendimento del caricabatteria presentato in [17] in funzione della potenza di carica/scarica e della tensione della batteria.

2.2 Batteria

2.2.1 Aspetti generali

Una batteria (o accumulatore) è un dispositivo che permette di convertire l'energia chimica in energia elettrica e viceversa. Ciascuna singola cella è caratterizzata da una tensione ed una capacità energetica relativamente contenute rispetto a quanto richiesto per impiego veicolare. Connettendo opportunamente in serie ed in parallelo più celle tra di loro si ottiene un pacco batteria caratterizzato da valori di tensione ai morsetti ed una capacità energetica sufficiente per l'impiego a bordo di un EV [21], [22].

Le tecnologie inerenti gli accumulatori elettrochimici maggiormente impiegate oggi per immagazzinare energia a bordo dei veicoli elettrici sono:

- Nichel-idruri metallici (NiMH)
- Litio-ione (Li-ion)
- Nichel-cloruro di sodio (Ni-NaCl), denominate ZEBRA dall'acronimo Zero Emission Battery Research Activities.

In questo scenario, la tecnologia litio-ione è di gran lunga favorita rispetto alle altre. Il litio, essendo il metallo più leggero (peso equivalente: 6.94 g mol^{-1}) e il più elettropositivo ($E^0_{\text{Li}^+/\text{Li}} = -3.04 \text{ V vs SHE}$), possiede una elevatissima capacità specifica equivalente di circa 3.8 Ah g^{-1} . Queste caratteristiche lo rendono perfetto per la realizzazione di batterie ad elevata energia specifica. Tuttavia, i maggiori ostacoli alla sua applicazione in campo automotive sono dovuti a questioni inerenti la sicurezza. Un confronto tra le principali caratteristiche delle batterie al litio rispetto a quelle al nichel è riportato in Tabella 2.

Tabella 2: Principali caratteristiche delle batterie al litio e al nichel.

Tipo di batteria	Voltaggio (V)	Densità di energia (Wh/kg)	Osservazioni
Ni-MH	1.2	60-110	Affidabili, non tossiche, effetto di memoria
Li-ion	3.6 – 3.8	150-200	Sottili, leggere, nessun effetto di memoria, elevata densità di energia, elevato voltaggio, costose

Le principali caratteristiche delle batterie sono:

- Capacità (C): misurata in Ampere-ora (Ah), indica il valore teorico d'intensità di corrente che la batteria è in grado di fornire per un processo di scarica della durata di un'ora; la scarica si considera da uno stato iniziale di completa carica ad uno finale caratterizzato da una tensione prestabilita e corrispondente a batteria scarica. Alternativamente misurate in Coulomb (C), rappresenta la quantità di carica elettrica che una batteria può fornire in un processo completo di scarica.
- Energia immagazzinata (E): misurata in Watt-ora (Wh), indica la quantità di energia immagazzinata nella batteria ed è data dal valore integrale del prodotto della capacità per la tensione media di scarica.
- Stato di carica (*State of Charge* - SOC): identifica la capacità residua di una batteria ed è funzione della corrente di carico e della temperatura di lavoro.
- Profondità di scarica (*Depth of Discharge* - DOD): rappresenta la percentuale di capacità per la quale la batteria è scarica.
- Tensione finale di scarica/scarica (*Cut-off Voltage*): sono i valori di tensione (massimi o minimi) entro i quali può operare la batteria. Corrispondono al 100% di DOD o SOC.
- Autoscarica: indica la percentuale di perdita di carica a circuito aperto, ovvero fornisce un'indicazione del tempo nel quale la batteria si scarica completamente anche se non collegata ad un carico.

- Cicli vita: è il numero di cicli di carica-scarica ai quali una batteria può essere sottoposta fino ad uno specifico valore di DOD (tipicamente 80%) prima che presenti un degrado delle sue performance.

La vita operativa di una batteria è profondamente affetta dall'ampiezza dei cicli di carica e scarica, dal DOD e da altre condizioni operative quali ad esempio la temperatura. Quest'ultima cresce moderatamente all'interno della cella all'aumentare della corrente applicata per effetto ohmico, ma può aumentare considerabilmente durante la carica al superamento dell'80-90% dello SOC a causa di reazioni parassite, di degradazione dell'elettrolita [23]. Sia durante la carica che la scarica invece, le sovratensioni che si generano portano ad abbassare/alzare ulteriormente la tensione effettiva degli elettrodi (che non corrisponde a quella misurata ai capi della cella ma che dovrebbe essere misurata rispetto ad un elettrodo inerte) che quindi può eccedere rispetto ai valori di cut-off. Questo, oltre a problemi di sicurezza, porta al graduale collasso dei materiali attivi e quindi riduzione del cycle-life. Per tal motivo, al fine di preservare il normale invecchiamento della batteria stessa, lo SOC viene tipicamente mantenuto in un range compreso tra il 20% ed il 90% e i valori massimi di DOD si attestano nell'intorno del 70% [22], [23]. Tipicamente, maggiore è il DOD di una batteria, minore è il numero di cicli vita. Per quanto riguarda la tensione ai capi della batteria, essa non può mai eccedere i valori di cut-off prestabiliti, onde evitare reazioni di tipo irreversibili che porterebbero al permanente danneggiamento del materiale attivo elettrodico [21].

La tensione ai capi della batteria dipende dall'ampiezza e dal segno della corrente di carica/scarica, dallo SOC, dalla temperatura e dall'età della batteria. In Figura 12(a) sono riportati i profili della tensione di carica e di scarica in funzione della capacità specifica per diversi valori di corrente per una batteria con elettrodi di grafite (anodo) e Li-NiMnCoO₂ (catodo), brevemente C-LiNiMnCoO₂. Per quanto riguarda la capacità della batteria, essa diminuisce con l'uso (effetto di invecchiamento), come nelle curve di esempio mostrate in Figura 12(b).

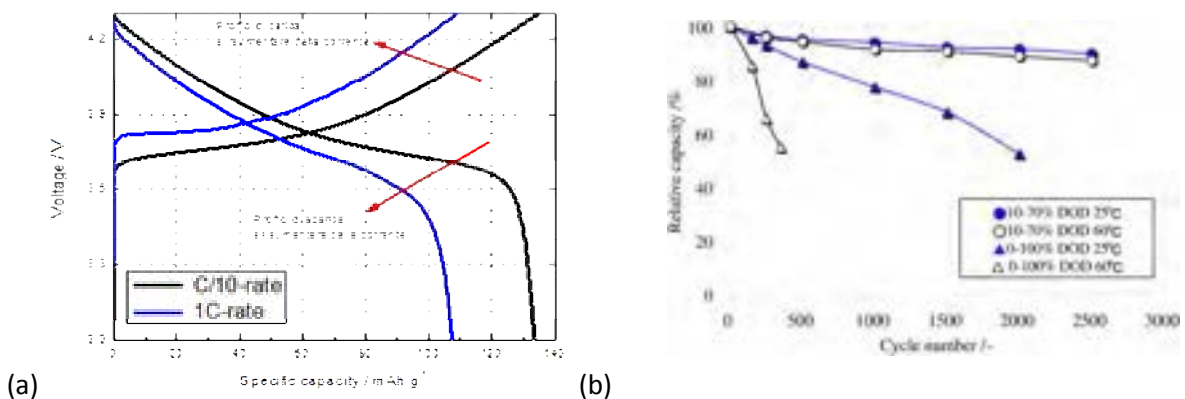


Figura 12. (a) Andamento della tensione ai morsetti in funzione della capacità specifica e della corrente; (b) riduzione della capacità all'aumentare del numero di cicli di carica/scarica.

L'efficienza di una batteria può essere definita in due modi:

- Efficienza di carica.
- Efficienza energetica.

L'efficienza di carica rappresenta il rapporto tra la carica elettrica fornita dalla batteria durante una fase di scarica e la quantità di carica elettrica che deve essere fornita alla batteria stessa affinché torni allo stesso livello di carica precedente. Valori tipici per l'efficienza di carica di una batteria per impiego veicolare si attestano tra il 95% ed il 99%.

L'efficienza energetica rappresenta invece il rapporto tra la quantità di energia elettrica fornita dalla batteria e la quantità di energia elettrica necessaria affinché la batteria torni al valore di SOC precedente. Questo valore di efficienza è strettamente legato alla resistenza interna della batteria, e decresce considerabilmente all'aumentare della rapidità di carica-scarica [22]. Valori tipici di efficienza energetica per batterie adibite ad impiego veicolare si attestano tra il 55% ed il 95%. In particolare, l'efficienza energetica è funzione del regime di corrente e, analogamente a quanto accade per la tensione, essa si

riduce all'aumentare della corrente. In Figura 13 sono riportati esempi di rendimento in carica e in scarica per due diverse tipologie di batterie [24].

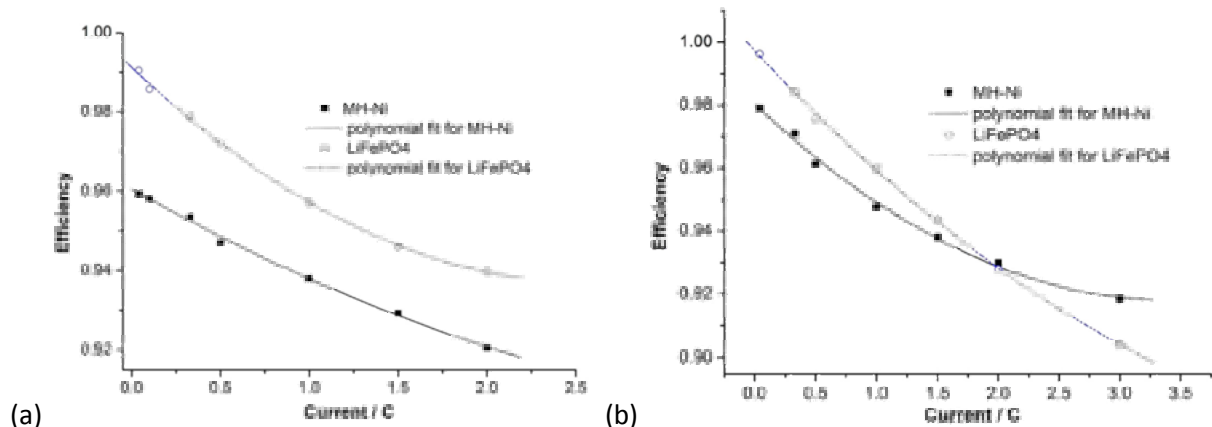


Figura 13. (a) Efficienza energetica in carica in funzione della corrente; (b) Efficienza energetica in scarica in funzione della corrente [24].

2.2.2 Modelli circuitali

In letteratura sono riportati diversi modelli matematici di batterie, sviluppati secondo differenti gradi di dettaglio e di complessità. In particolare, i tipi di modelli maggiormente utilizzati possono essere suddivisi in due principali tipologie: i modelli elettrochimici ed i modelli circuitali.

I primi sono mirati ad una identificazione e valutazione dettagliata dei fenomeni fisici e delle reazioni chimiche che avvengono all'interno delle celle stesse [25]. Sono particolarmente adatti per la progettazione delle batterie stesse, ma poco si confanno alle analisi di sistema [21].

Al fine di identificare e valutare le caratteristiche operative delle batterie in un contesto di sistema, risulta più conveniente l'adozione di modelli circuitali, i quali permettono di determinare il comportamento ai morsetti delle batterie in termini di tensione e corrente. Tal approccio è basato sulla modellizzazione di batteria per mezzo di reti elettriche a parametri concentrati [26]-[28]; a seconda dei diversi gradi di complessità del modello adottato, essi permettono di valutarne anche i comportamenti dinamici.

Alcuni tra i modelli circuitali più diffusi per le batterie sono [21]:

- Modello base.
- Modello RC.
- Modello run-time.

Il modello base è il più semplice e consiste in una sorgente di tensione ideale rappresentante la tensione a circuito aperto della batteria (V_{oc}), ed una resistenza interna equivalente e costante (Figura 14(a)). Il valore di V_{oc} può essere misurato su di una batteria per mezzo di una prova a vuoto; la resistenza interna viene tipicamente valutata applicando un carico e misurando la tensione e la corrente ai morsetti della batteria. Il modello base può prevedere la differenziazione della resistenza interna a seconda che la batteria si trovi in fase di carica o scarica (Figura 14(b)) [29].

Tal modello semplificato non permette tuttavia di valutare i comportamenti dinamici; a tal scopo, si può inserire un condensatore in parallelo, come mostrato in Figura 14(c) [30], [31]. In Figura 14(d) è riportato un esempio di modello circuitale che tiene conto sia dei fenomeni dinamici (condensatore) che dell'effetto di autoscarica per mezzo della resistenza posta in parallelo al generatore V_{oc} [32], [33].

Il modello RC proposto in [34] permette di modellizzare per mezzo del condensatore C_b la capacità della batteria e per mezzo del condensatore C_c le variazioni dinamiche ai morsetti (Figura 14(e)). Tal modello è in grado di valutare anche la temperatura media all'interno della batteria in funzione del tempo [22].

Il modello run-time, riportato in Figura 14(f), è costituito da tre parti circuitali distinte. La parte di sinistra, costituita dalla resistenza R_t e dalla capacità C_t , rappresenta il comportamento transitorio della batteria. La parte centrale, costituita dalla resistenza R_{sd} , dalla capacità C_c e dai generatori controllati di tensione e

corrente, rappresenta l'autoscarica della batteria, la capacità totale e la carica immagazzinata. La parte di destra, modella la tensione e la corrente ai capi della batteria [27], [31], [35], [36].

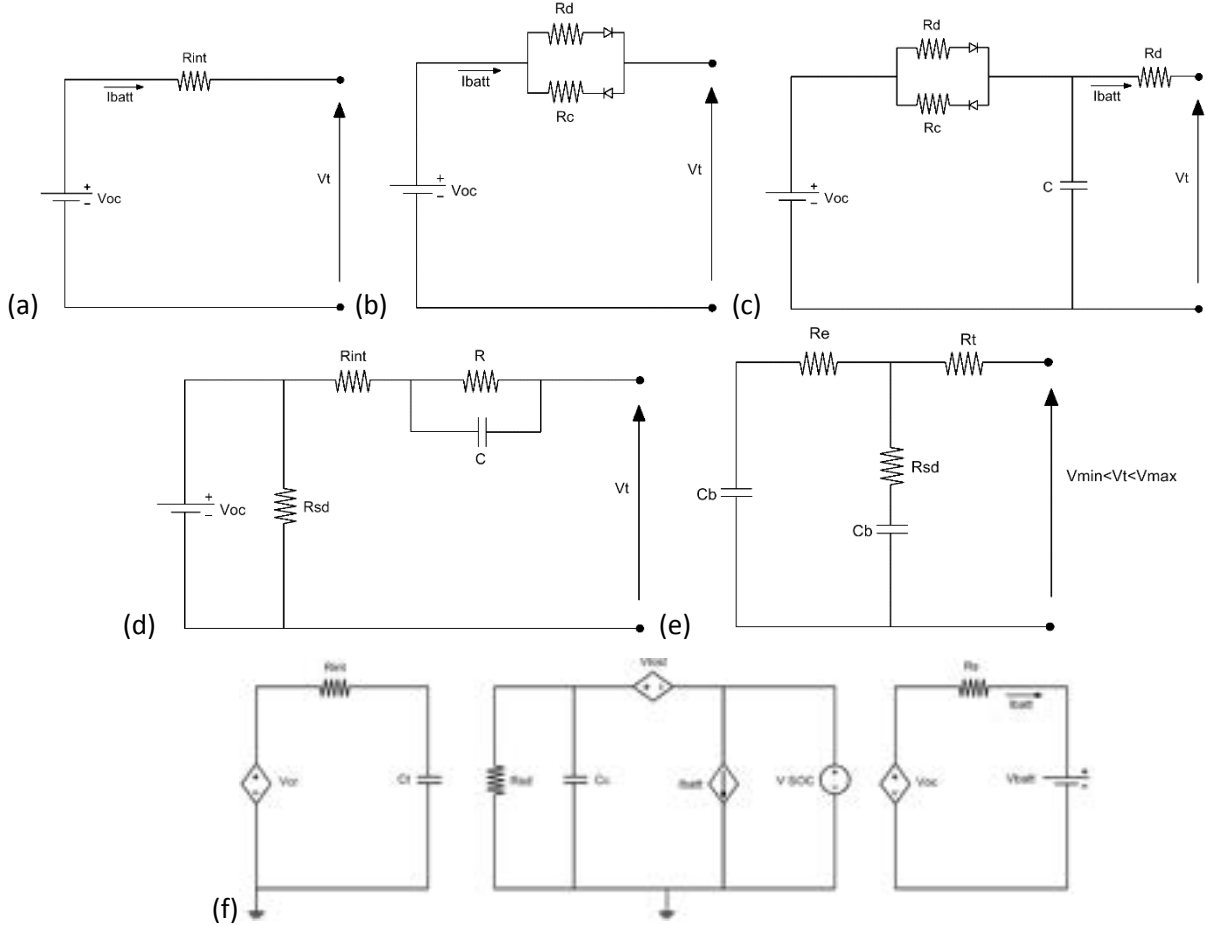


Figura 14. Modelli circuitali di batteria: (a) Modello base, (b) Modello base per carica e scarica; (c) Modello base dinamico; (d) Modello con autoscarica; (e) Modello RC; (f) Modello run-time.

L'utilizzo dei modelli circuitali sopra riportati, richiede la conoscenza quantitativa dei vari parametri e la loro variazione in funzione delle condizioni operative della batteria stessa. Tali dati non sempre sono di facile reperibilità per l'utilizzatore del modello. Va inoltre tenuto conto del fatto che i parametri assumono valori diversi a seconda della tecnologia elettrochimica e la taglia in termini di capacità della batteria stessa. In letteratura è possibile reperite alcune procedure ed i test che possono essere eseguiti in laboratorio per determinarne i valori di alcuni dei parametri caratterizzanti i modelli circuitali.

2.2.3 Valutazione dell'efficienza energetica di batteria

Il modello energetico della batteria sviluppato per lo studio in oggetto, come per il convertitore, non è basato sull'implementazione diretta dei modelli circuitali a parametri concentrati precedentemente introdotti, ma è basato sull'impiego di mappe di efficienza energetica di diversa complessità e risoluzione desunte, secondo i casi, da misure sperimentali, dati di letteratura o ipotesi semplificative. Un esempio di caratteristiche sulle quali è basato il modello sviluppato è riportato in Figura 12. Per ciascuno valore di SOC, nota la corrente, è possibile ricavare la tensione di carica e di scarica con le quali è possibile calcolare la potenza (e quindi l'energia) di carica e scarica, e pertanto l'efficienza energetica della batteria stessa. Tali mappe possono anche essere ricavate off-line per mezzo dei modelli circuitali sopra descritti nei casi in cui siano disponibili o ipotizzabili le necessarie informazioni sui componenti.

3 Termini del problema

Sulla base dei profili di assorbimento energetico della rete alla quale i veicoli elettrici vengono connessi, il concetto V2G consiste nella gestione intelligente della ricarica con potenziali vantaggi per la rete stessa in termini sia di adattabilità della domanda che di stoccaggio distribuito, e quindi di resilienza della rete stessa.

In Figura 15 sono riportati a titolo esemplificativo gli andamenti dei profili di assorbimento energetico lato media tensione misurati in una stazione di trasformazione alta tensione/media tensione in nord Italia (popolazione servita circa 12000 persone con piccola area industriale). In particolare, i due andamenti proposti si riferiscono a due periodi dell'anno diversi caratterizzati rispettivamente da assorbimenti medio-alti (giorno infrasettimanale invernale, gennaio) e medio-bassi (giorno festivo estivo, agosto). Come si evince da tali andamenti, quello di gennaio presenta durante l'arco della giornata molteplici picchi di assorbimento; per quanto riguarda invece l'andamento di agosto esso presenta per alcune ore della giornata un assorbimento negativo che corrisponde ad una re-immissione di energia nella rete di alta tensione. Quest'ultimo fenomeno è dovuto alla presenza di un parco fotovoltaico, insieme ad alcune altre sorgenti di energia da fonti rinnovabili, connessi alla rete di media tensione sulla quale sono state effettuate le rilevazioni; ciò, in concomitanza con una ridotta richiesta di energia durante le ore centrali della giornata, ha indotto ad un eccesso di offerta energetica rispetto alla domanda, dando così luogo ad un flusso inverso della stessa verso la rete di alta tensione. Va sottolineato che i profili energetici esemplificati si riferiscono a misure attuali e recenti; è quindi pronosticabile un progressivo aumento negli anni delle fonti di energia rinnovabile connesse alle reti di distribuzione, con una conseguente sempre maggior probabilità di discrepanza tra domanda ed offerta di energia in determinati periodi della giornata e dell'anno.

L'obiettivo del concetto V2G è sia quello di far fronte all'eccesso di offerta energetica sfruttando le batterie dei veicoli elettrici connessi alla rete come elementi di stoccaggio distribuito, sia di sopperire ai picchi di richiesta energetica sfruttando l'energia immagazzinata nelle batterie dei veicoli elettrici come fonte di energia distribuita.

Affinché tal operazione sia proficua, come precedentemente anticipato, è necessaria un'opportuna comunicazione tra il sistema di gestione della rete ed il veicolo, in considerazione anche della necessità da parte dell'utente automobilista di poter disporre del proprio veicolo con una sufficiente carica energetica in relazione ai propri fabbisogni di mobilità.

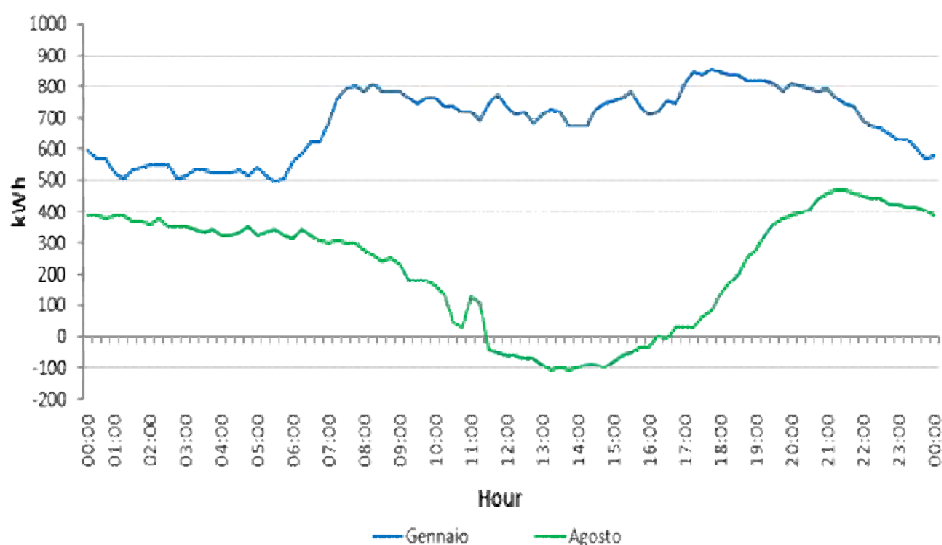


Figura 15. Esempio di assorbimenti di energia lato Media Tensione misurati ad intervalli di 15 minuti in un punto di trasformazione AT/MT in nord Italia: popolazione servita circa 12000 persone con piccola area industriale.

4 Approccio modellistico

La finalità del modello energetico è la determinazione delle perdite e dei rendimenti, in diverse condizioni operative, di sistemi di ricarica V2G con funzioni di accumulo distribuito sulla rete di bassa tensione. L’approccio circuitale consentirebbe potenzialmente una modellistica di dettaglio, ma si scontra con la difficoltà un impiego flessibile per la necessità di conoscere i valori di tutti i parametri dei componenti e dei sistemi che si intende valutare energeticamente; valori che raramente i costruttori sono disponibili a fornire. Pertanto, la modellistica energetica del convertitore elettronico di potenza bidirezionale e dell’accumulatore elettrochimico è basata 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 e le mappature sono di tipo parametrico e modulare in modo da poter essere estese a diverse taglie di batteria e convertitore all’interno del range di tensione, corrente e potenza individuato per l’analisi.

Coerentemente con le dinamiche di campionamento dei profili di carico delle reti, i profili energetici di carica/scarica simulabili sono di tipo a bassa dinamica rispetto alle costanti di tempo tipiche dei fenomeni elettrici, elettronici ed elettrochimici.

In Figura 16 è rappresentato lo schema di principio del modello energetico sviluppato. Esso è composto da:

- Generatore corrente di carica/scarica della batteria.
- Modello della batteria.
- Modello del convertitore elettronico di potenza bidirezionale.
- Contatore energetico bidirezionale.
- Rete elettrica/ciclo di test.

Sulla base delle richieste e dei consensi da parte della rete elettrica e del veicolo ad essa collegato viene generata la corrente di carica/scarica della batteria tenendo in considerazione i limiti operativi realistici di funzionamento delle batterie (ad esempio SOC compreso tra il 20% e l’90%).

Per ciascun ciclo completo di carica/scarica della batteria vengono valutate per mezzo dei modelli implementati le perdite energetiche della batteria e del convertitore. Il numero di cicli eseguiti e l’efficienza energetica per ciascun ciclo completo di carica/scarica della batteria vengono valutati per mezzo del contatore energetico bidirezionale.

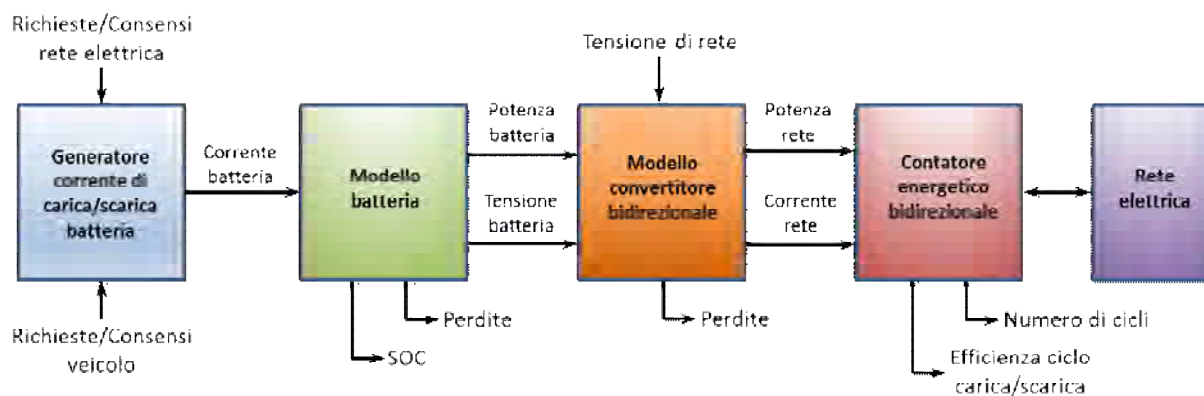


Figura 16. Schema di principio del modello energetico sviluppato.

Il modello, implementato in ambiente Matlab/Simulink[®], è stato sviluppato sulla base delle seguenti ipotesi:

- Il modello energetico è implementato considerando la tensione di rete costante.
- 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.
- L'efficienza del sistema viene valutata dal contatore bidirezionale di energia ogni qualvolta si ha un ciclo completo di carica/scarica della batteria.
- La temperatura del sistema in analisi è supposta all'interno dei limiti di normale operatività dichiarati dai costruttori dei vari componenti; pertanto il suo effetto inerente il degrado delle caratteristiche non è tenuto in conto durante le simulazioni.

4.1 Modello sistema completo

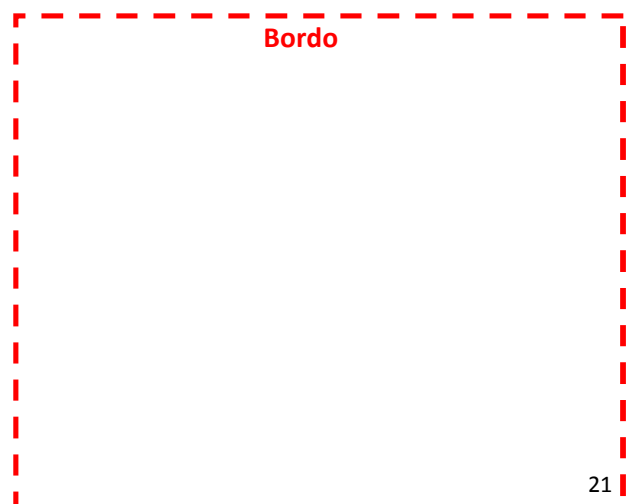
Il modello del sistema completo implementato in Matlab/Simulink[®] è riportato in Figura 17. Esso è costituito dai seguenti blocchi:

- Rete elettrica/Ciclo di test
- Contatore bidirezionale di energia
- Convertitore elettronico di potenza bidirezionale
- Batteria
- Logica di carica/scarica
- Battery Management System (BMS)

Il blocco del convertitore elettronico di potenza è stato rappresentato a metà del riquadro identificante gli elementi a bordo veicolo in quanto, come già precedentemente detto, a seconda delle architetture di sistema, può trovarsi a bordo veicolo o meno.

Il blocco modellante la rete elettrica/ciclo di test, atto alla generazione dei profili di assorbimento energetico da parte della rete (o di eventuali cicli di test del modello), fornisce in uscita il valore della tensione e della corrente di rete. Questi ultimi rappresentano un ingresso per il contatore bidirezionale di energia elettrica, il quale agisce da interfaccia tra la rete ed il veicolo. Come precedentemente detto, il modello è basato sull'ipotesi di tensione di rete costante durante ogni simulazione.

Il contatore bidirezionale di energia permette di visualizzare graficamente il flusso energetico tra rete e veicolo ed il rendimento energetico complessivo del sistema per ciascun ciclo di carica/scarica della batteria.



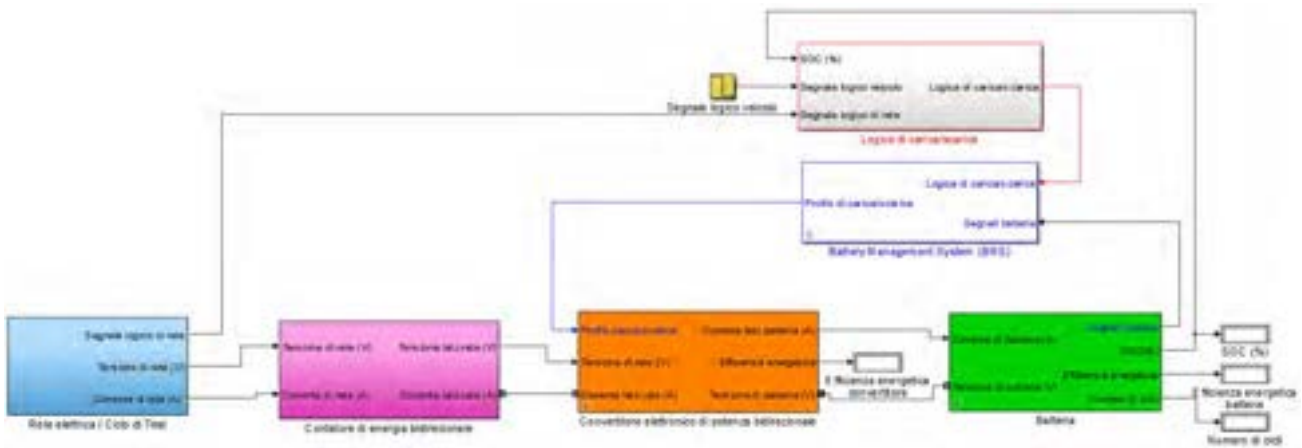


Figura 17. Modello Matlab/Simulink® del sistema completo.

Il blocco della rete elettrica fornisce in uscita anche un segnale logico (segnale logico di rete) il quale viene inviato alla logica di carica/scarica che si trova a bordo veicolo. Tal segnale può assumere gli stati logici indicati in Tabella 3.

Tabella 3. Stati logici e relativo significato del segnale logico di rete.

Stato logico	Significato
-1	La rete richiede energia al veicolo (scarica batteria)
0	La rete non acconsente ad alcun flusso di energia
+1	La rete cede energia al veicolo (carica batteria)

Nel modello implementato, il segnale logico di rete è gerarchicamente il più alto; ovvero in base alle esigenze di rete, tenendo opportunamente conto delle esigenze del veicolo come si vedrà in seguito, viene stabilita la direzione del flusso energetico tra rete e veicolo. Il valore 0 del segnale logico di rete indica che quest'ultima non acconsente ad alcun flusso energetico, al fine di modellizzare l'eventuale presenza di guasti lato rete.

Per quanto riguarda i segnali logici e la loro gestione, così come per la corrente elettrica e quindi il flusso di energia, nel modello implementato si è adottato sia per la rete che per la batteria la convenzione di segno dei generatori; ovvero il segno positivo indica che l'elemento in questione sta erogando (o acconsente ad erogare) energia, ed il segno negativo indica che l'elemento sta assorbendo (o acconsente ad assorbire) energia. Per quanto riguarda il convertitore, il segno positivo di corrente indica un flusso energetico dalla rete verso la batteria; viceversa il segno negativo indica un flusso energetico dalla batteria verso la rete.

A bordo veicolo vi è un segnale logico (segnale logico di veicolo, Figura 17) il quale può assumere gli stati logici indicati in Tabella 4. Tal segnale logico è gerarchicamente più basso di quello di rete in quanto non determina la direzione del flusso energetico tra rete e veicolo; tuttavia il valore 0 inibisce qualsiasi scambio di energia tra i due sistemi in quanto rappresenta la possibilità che il veicolo non sia connesso alla rete oppure che presenti guasti per cui non è possibile alcun interscambio energetico tra i due.

Tabella 4. Stati logici e relativo significato del segnale logico di veicolo.

Stato logico	Significato
0	Il veicolo non è connesso alla rete/non acconsente ad alcun flusso energetico
+1	Il veicolo è connesso alla rete

Sia il segnale logico di rete che il segnale logico di veicolo sono forniti in ingresso, insieme al valore di SOC della batteria, alla logica di carica/scarica che si trova a bordo veicolo (si veda Figura 17). Il valore di SOC della batteria rappresenta un importante parametro per acconsentire o meno allo scambio energetico: l'utente del modello sviluppato può infatti settare per mezzo di una maschera il limite minimo ed il limite massimo di SOC della batteria, raggiunti i quali la scarica o la carica della batteria vengono interrotte. Tal possibilità, come precedentemente detto, permette all'utente di limitare all'interno di un determinato

range il valore di SOC (ad esempio tra il 20% ed il 95%) al fine di preservare il normale invecchiamento della batteria stessa. In Figura 18 è mostrata la maschera che si apre automaticamente cliccando sul blocco Logica di carica/scarica e che permette il settaggio di tali parametri.

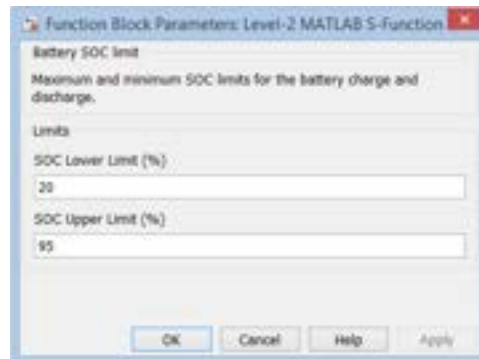


Figura 18. Maschera del blocco Logica di carica/scarica.

La logica di carica/scarica, implementata per mezzo di codice in Level-2 Matlab S-Function, genera, sulla base dei segnali di ingresso, un ulteriore segnale logico di carica/scarica. Tal segnale, generato secondo quanto riassunto in Tabella 5, viene fornito in ingresso al Battery Management System (BMS) per la generazione dell'opportuno profilo di carica o scarica della batteria.

Il profilo di carica/scarica così generato è fornito in ingresso al modello del convertitore elettronico di potenza bidirezionale il quale genera, sulla base di tal profilo, la corrente che viene imposta alla batteria. Quest'ultima, per mezzo di mappe di tensione in funzione di SOC e della corrente di batteria, permette di determinare il valore di tensione ai morsetti della batteria che viene fornita retroattivamente al blocco modellizzante il convertitore per il computo del flusso energetico da e verso la rete.

I modelli del convertitore bidirezionale di corrente, della batteria e del generatore dei profili di carica/scarica (BMS) sono analizzati in dettaglio nelle successive sezioni.

Tabella 5. Determinazione dello stato logico di carica/scarica.

Segnale logico di veicolo	Segnale logico di rete	SOC batteria	Segnale logico di carica/scarica	Significato
0	Qualsiasi	Qualsiasi	0	Non vi è flusso energetico
+1	-1	Min < SOC < MAX	+1	Flusso energetico da batteria vs. rete (scarica)
	0	Qualsiasi	0	Non vi è flusso energetico
	+1	Min < SOC < MAX	-1	Flusso energetico da rete vs. batteria (carica)

4.2 Modello convertitore

In Figura 19 è riportato il modello implementato in Matlab/simulink® del convertitore elettronico di potenza bidirezionale. Esso prevede in ingresso:

- Profilo di carica/scarica
- Tensione di rete (V)
- Tensione di batteria (V)

Il modello fornisce in uscita:

- Corrente di batteria (A)
- Corrente di rete (A)
- Efficienza energetica del convertitore

Va sottolineato che, sebbene in Figura 19 la tensione di batteria si trovi sul lato destro del blocco convertitore, essa non è un'uscita del blocco stesso ma un ingresso, essendo fornita retroattivamente dal blocco batteria; analogamente per la corrente di rete, essa è valutata dal modello del convertitore sulla base della potenza di batteria e dell'efficienza energetica del convertitore stesso, ed è fornita come ingresso al contatore bidirezionale di energia.

Come precedentemente detto, nel modello implementato il livello gerarchicamente più alto nei segnali logici di controllo spetta a quello di rete per la gestione della direzione del flusso energetico; dal punto di vista della gestione della quantità di energia scambiata tra la rete e la batteria, il livello gerarchicamente più alto spetta invece alla batteria. Ciò è dovuto al fatto che il modello di batteria fornisce l'indicazione della quantità di energia che essa può fornire o assorbire dalla rete, determinando così la corrispettiva quantità di energia che verrà sottratta o immessa in rete a seconda della richiesta da parte della rete stessa.

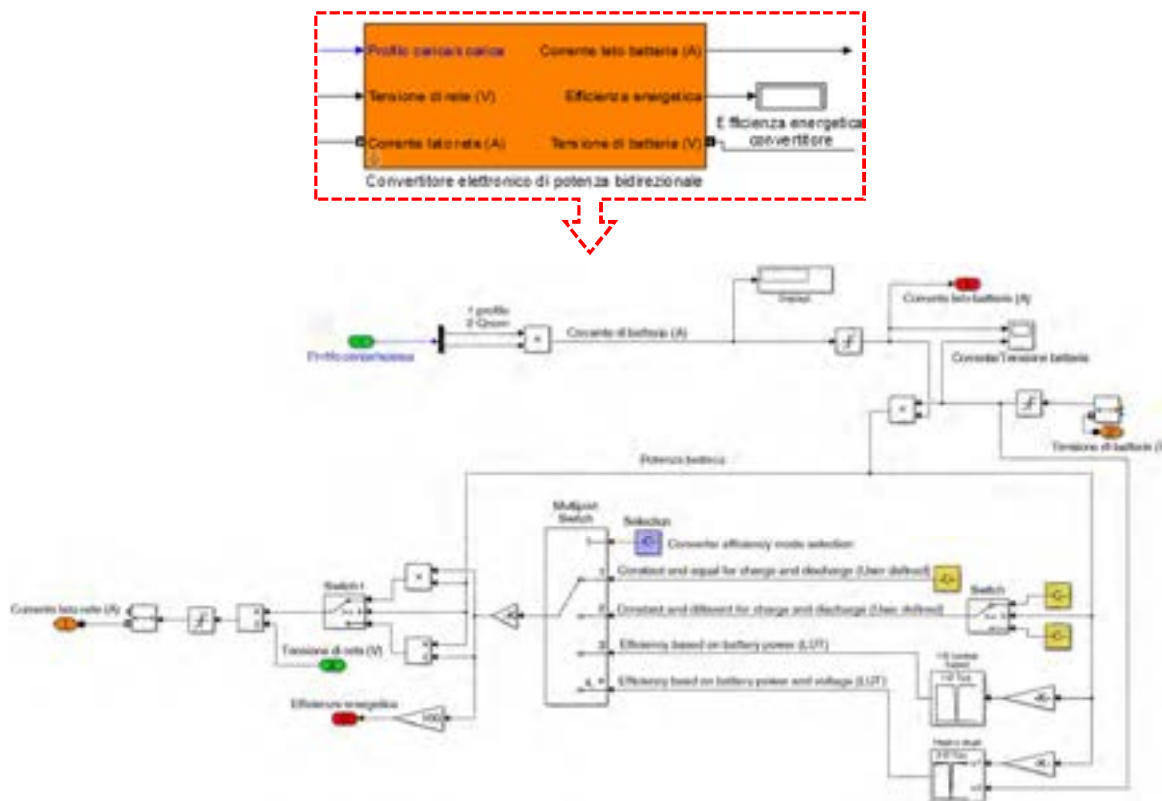


Figura 19. Modello Matlab/Simulink® del convertitore elettronico di potenza bidirezionale.

Sulla base dei profili di carica/scarica generato dal BMS (descritto nelle sezioni successive), il modello del convertitore genera la corrente di batteria moltiplicando il profilo di carica/scarica per il valore di capacità nominale della batteria stessa (segnale fornito anch'esso al convertitore dal BMS). Pertanto, nota la corrente di batteria imposta dal convertitore e nota la tensione di batteria fornita retroattivamente dal modello di batteria, è nota la potenza lato batteria. Moltiplicando (in caso di scarica della batteria) o dividendo (in caso di carica della batteria) la potenza di batteria per l'efficienza energetica del convertitore, si ottiene la potenza che può essere immessa (in caso di scarica della batteria) o assorbita (in caso di carica della batteria) dalla rete stessa.

Va osservato che, sulla base della logica di implementazione sopra descritta, il modello del convertitore rappresentato in Figura 19 è da intendersi da destra a sinistra, in accordo alla relativa posizione della batteria e della rete elettrica rispetto al convertitore nel modello completo riportato in Figura 17.



Figura 20. Maschera del blocco convertitore.

Per mezzo della maschera di interfaccia utente mostrata in Figura 20, l'utente del modello può eseguire le simulazioni potendo scegliere da un menù a tendina tra le seguenti quattro opzioni di efficienza energetica del convertitore:

- Efficienza costante ed uguale per carica e scarica (imposta dall'utente)
- Efficienza costante differenziata per carica e scarica (imposte dall'utente)
- Efficienza funzione della potenza lato batteria (LUT)
- Efficienza funzione della potenza e della tensione lato batteria (LUT)

Nel caso si scelga una delle prime due opzioni, ovvero efficienza costante ed uguale per carica e scarica, o efficienza costante differenziata per carica e scarica, i corrispondenti valori devono essere impostati dall'utente stesso negli opportuni campi previsti nella maschera.

Qualora si scelga una delle ultime due opzioni, ovvero efficienza funzione della potenza lato batteria, o efficienza funzione della potenza e della tensione lato batteria, il rendimento energetico del convertitore viene valutato per ciascun passo di simulazione per mezzo di Look-Up Tables (LUTs) contenenti i dati delle mappe di efficienza energetica del convertitore. Le LUTs possono essere inserite nel modello di simulazione selezionandole, in funzione della taglia e della tipologia di convertitore che si intende simulare, dalla libreria implementata nel modello stesso. Il modello consente l'inserimento di nuove LUT da parte dell'utente.

In Figura 10 è riportato un esempio di mappa di efficienza energetica di un convertitore elettronico di potenza da 22 kW proposto da Brusa GmbH [17]. In Figura 21 è riportato un altro esempio di mappa energetica per uno stadio di un convertitore DC/DC proposto anch'esso da Brusa GmbH per applicazioni di ricarica EVs [37]; in Figura 11 è mostrata una mappa energetica ottenuta da dati riportati in letteratura [17].

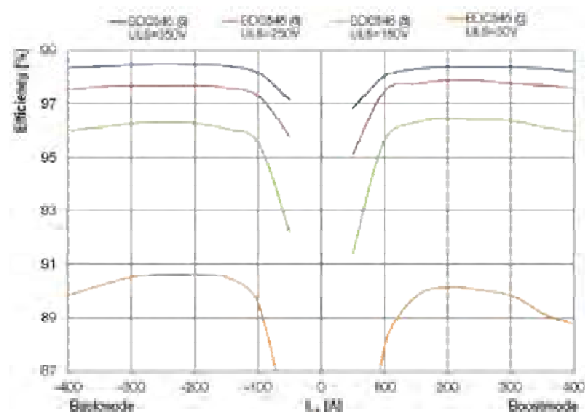


Figura 21. Esempio di mappa di efficienza energetica di un convertitore DC/DC proposto da Brusa GmbH [37].

Come illustrato nelle sezioni precedenti, le mappe energetiche del convertitore elettronico di potenza bidirezionale in funzione della potenza e della tensione lato batteria possono anche essere ottenute per mezzo di simulazioni circuitali eseguite off-line rispetto al modello energetico in oggetto. Tuttavia, per eseguire le simulazioni circuitali off-line devono essere noti tutti i dettagli costruttivi e di controllo del convertitore.

Nella maschera di interfaccia utente del blocco convertitore (Figura 20), è possibile impostare anche la limitazione di corrente massima lato rete elettrica, ed i limiti di tensione e corrente massime lato batteria.

4.3 Modello batteria

In Figura 22 è riportato il modello della batteria implementato in Matlab/simulink®. Esso prevede in ingresso:

- Corrente di batteria (A)

Il modello fornisce in uscita:

- Tensione di batteria (A)
- SOC (%)
- Efficienza energetica della batteria
- Numero di cicli eseguiti
- Segnali batteria

Va sottolineato che, sebbene in Figura 22 la tensione di batteria si trovi sul lato sinistro del blocco batteria, essa non è un ingresso del blocco ma una uscita, in quanto viene valutata all'interno del blocco stesso per mezzo di opportune mappe di tensione in funzione di SOC e corrente di batteria quali ad esempio quelle mostrate in Figura 12. Come precedentemente detto, il valore di tensione di batteria così determinato viene fornita retroattivamente come ingresso del blocco convertitore.



Figura 22. Modello Matlab/Simulink® della batteria.

Il modello di batteria riceve in ingresso la corrente di batteria imposta dal convertitore. Nel modello implementato per la batteria si è adottato la convenzione di segno dei generatori, ovvero una corrente positiva indica un flusso di potenza uscente dall'elemento (scarica della batteria), viceversa una corrente negativa indica un flusso di potenza entrante (carica della batteria).

Il modello di batteria nel suo complesso mostrato in Figura 22, è composto a sua volta dai seguenti sotto blocchi:

- SOC
- Cycles counter
- Battery model
- Battery energy measurement
- Efficiency computation

Per mezzo della maschera di interfaccia utente mostrata in Figura 23, l'utente del modello fornisce i seguenti parametri di batteria:

- Tensione nominale (V)
- Capacità nominale (Ah)
- Valore iniziale di SOC (%)
- Numero di cicli già eseguiti precedentemente dalla batteria in analisi

Per quanto riguarda l'efficienza, l'utente può scegliere da un menù a tendina tra le seguenti tre opzioni:

- Efficienza costante ed uguale per carica e scarica (imposta dall'utente)
- Efficienza costante differenziata per carica e scarica (imposte dall'utente)
- Efficienza funzione della tensione di batteria e dello SOC (LUT)

Nel caso si scelga una delle prime due opzioni, ovvero efficienza costante ed uguale per carica e scarica, o efficienza costante differenziata per carica e scarica, i corrispettivi valori devono essere impostati dall'utente stesso negli opportuni campi previsti nella maschera.

Qualora si scelga la terza opzione, ovvero efficienza funzione della tensione di batteria e dello SOC, il rendimento energetico della batteria viene valutato per ciascun ciclo completo di carica/scarica sulla base del rapporto tra l'energia ottenuta dalla scarica e l'energia fornita alla batteria durante la fase di carica.

Nelle sezioni successive sono analizzate in dettaglio le parti costituenti il modello di batteria.



Figura 23. Maschera del blocco batteria.

4.3.1 Blocco SOC

Il modello implementato in Matlab/Simulink[®] per la valutazione dello SOC della batteria è mostrato in dettaglio in Figura 24.

In ingresso si ha la corrente di batteria ed il numero di cicli eseguiti durante la simulazione; il valore di SOC in percentuale è calcolato integrando la corrente, in accordo alla relazione in (1).

$$SOC(\%) = 100 \cdot \left(1 - \frac{1}{Q} \int_0^t i(t) dt \right) \quad (1)$$

Per tener conto dei limiti fisici della batteria, l'integratore è saturato inferiormente al valore 0 e superiormente al valore della capacità nominale della batteria moltiplicato per 3600 (secondi in un'ora). Lo stato iniziale è fornito esternamente per mezzo di un blocco di memoria, sulla base del valore di SOC iniziale della batteria (impostabile dall'utente del modello) ed il valore di SOC del passo di simulazione precedente.

Al fine di tenere in considerazione l'effetto di invecchiamento della batteria, il valore di SOC è opportunamente moltiplicato per un coefficiente riduttivo calcolato per mezzo di un codice scritto in una Level-2 Matlab S-Function, il quale è stato scritto facendo riferimento a dei cicli vita al 100% di DOD di celle commerciali. In Figura 25 ne sono riportati due esempi tratti da datasheet commerciali [38], [39] di singole celle per l'impiego a bordo di veicoli elettrici. Nel modello è stata fatta l'ipotesi che l'intero pacco batteria

presenti un effetto di invecchiamento conforme a quello delle celle mostrate di esempio, dalle quali si è estrapolata la caratteristiche mostrata in Figura 26. La caratteristica per tener conto dell'effetto di invecchiamento può essere modificata a piacere dall'utente del modello.

Nel computo del numero di cicli, oltre a quelli eseguiti nella simulazione in corso, vengono tenuti in conto anche quelli già eseguiti precedentemente dalla batteria. Ciò permette di effettuare simulazioni anche con batterie che presentino uno storico antecedente al periodo di simulazione; tal parametro viene fornito dall'utente per mezzo della machera parametri della batteria riportata in Figura 23.

Il blocco SOC fornisce in uscita il valore di SOC in percentuale della batteria per ciascun passo di simulazione ed il coefficiente riduttivo che tiene conto dell'effetto di invecchiamento; quest'ultimo, come descritto nella sezione successiva, è utilizzato per la definizione delle soglie di SOC per il calcolo del numero di cicli eseguiti.

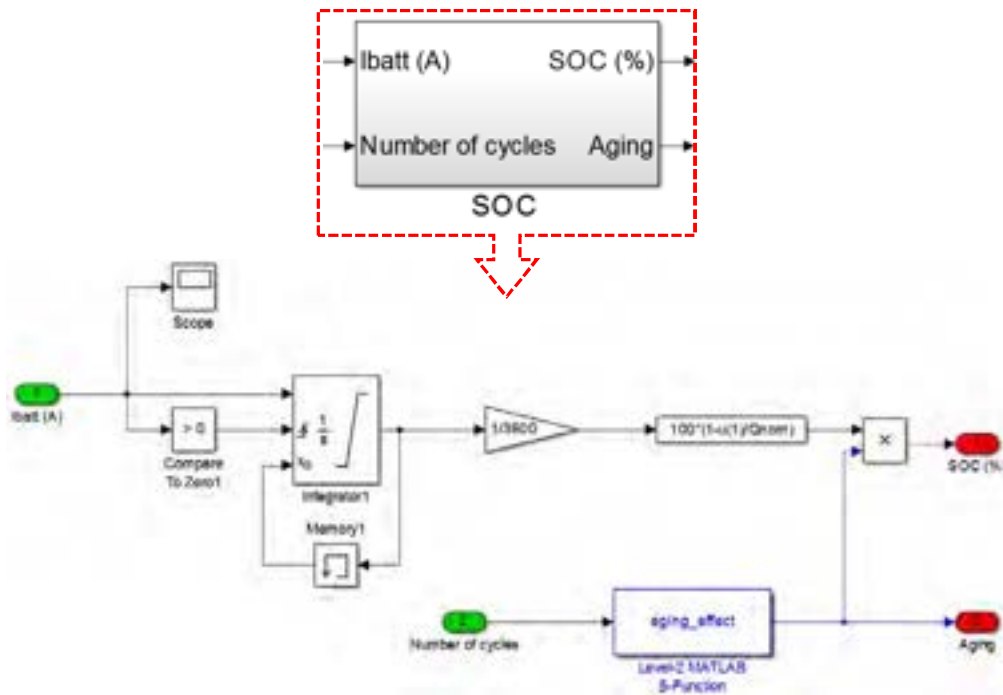


Figura 24. Modello Matlab/Simulink® per la valutazione dello SOC di batteria.

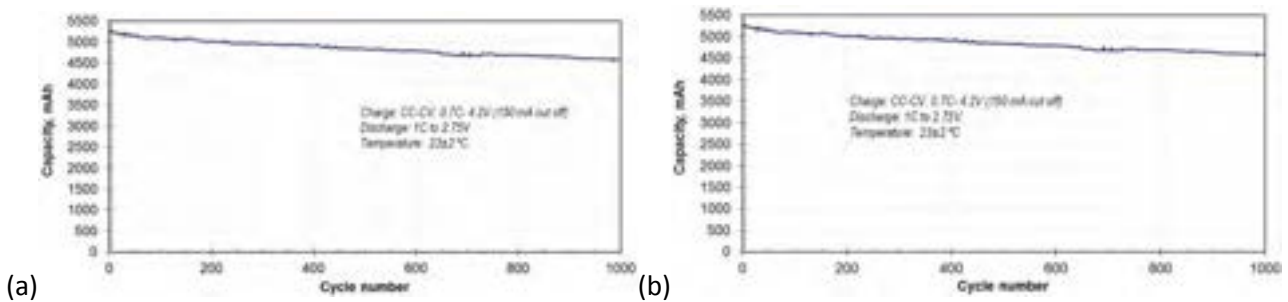


Figura 25. Esempi di caratteristiche di riduzione della capacità di singole celle in funzione del numero di cicli al 100% di DOD: (a) Sonata® 5300 Rechargeable Lithium-ion Cell [38], (a) Swing® 5300 Rechargeable Lithium-ion Cell [39].

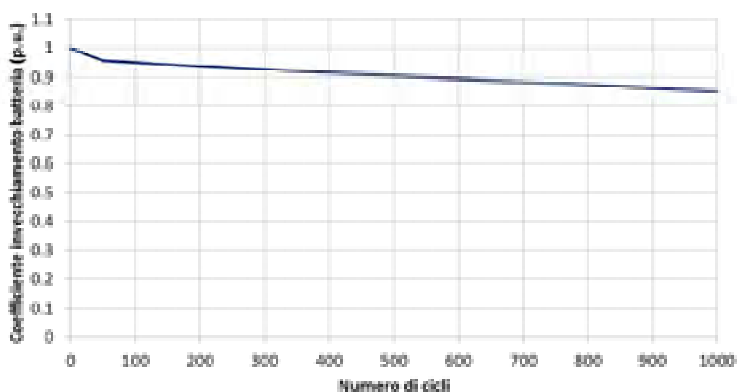


Figura 26. Esempio di caratteristica implementata nel modello per l’effetto di invecchiamento della batteria.

4.3.2 Cycles counter

Il modello implementato per il computo del numero di cicli di carica/scarica eseguiti della batteria è mostrato in dettaglio in Figura 27. Tal modello riceve in ingresso il valore di SOC ed il coefficiente riduttivo che tiene conto dell’invecchiamento della batteria, e fornisce in uscita il numero di cicli eseguiti ed un segnale logico di reset (che come verrà successivamente descritto è utilizzato per la gestione del computo energetico) ogni qualvolta venga compiuto un ciclo completo.

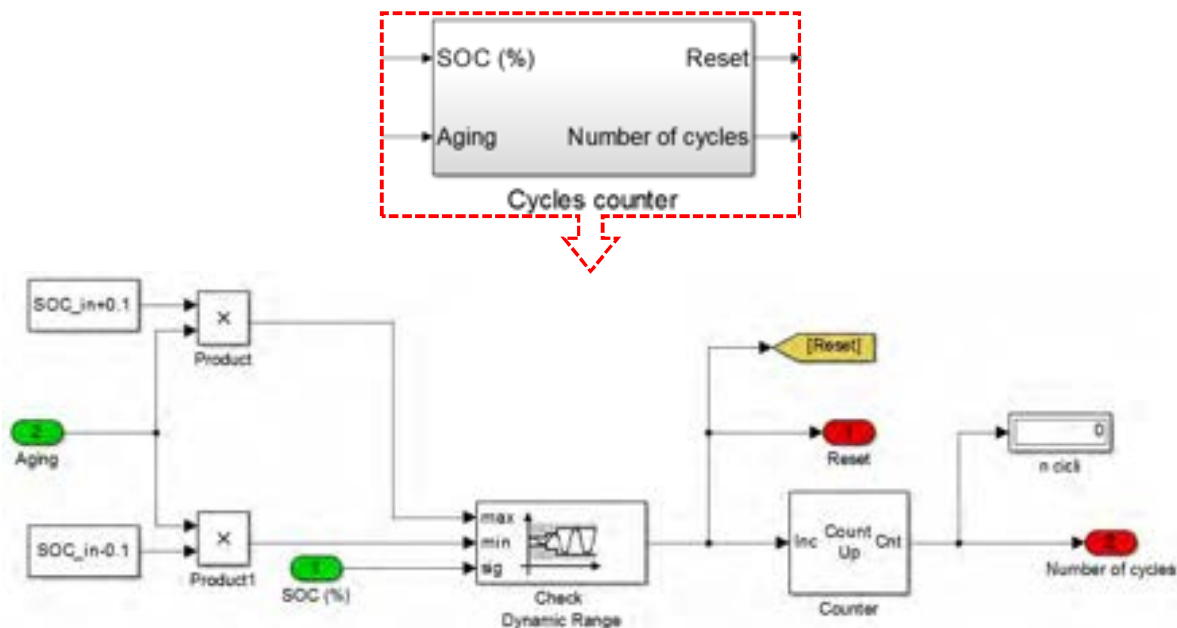


Figura 27. Modello Matlab/Simulink® per il computo del numero di cicli di carica/scarica eseguita dalla batteria.

Come già precedentemente detto, 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. Quest’ultimo è fornito dall’utente del modello per mezzo della maschera parametri di batteria (descritta in dettaglio nella sezione successiva). Va precisato che nel modello implementato, essendosi tenuto conto dell’effetto di invecchiamento della batteria in funzione del numero di cicli di carica/scarica eseguiti, il valore di SOC a ciascun passo di simulazione viene comparato con il valore di SOC iniziale opportunamente moltiplicato per il coefficiente riduttivo che tiene conto dell’effetto di invecchiamento, definendo così un range di comparazione dinamico per il computo del numero di cicli eseguiti.

4.3.3 Battery model

Il modello implementato per la valutazione della tensione ai morsetti della batteria è mostrato in dettaglio in Figura 28. Tal modello riceve in ingresso la corrente di batteria imposta dal convertitore ed il valore di SOC valutato ad ogni passo di simulazione.

Tal blocco valuta per ciascun passo di simulazione il valore della tensione ai morsetti per mezzo di LUTs in cui è mappata la tensione in funzione della corrente e dello SOC di batteria. Le LUTs, differenziate per carica e scarica della batteria, possono essere inserite nel modello di simulazione selezionandole, in funzione della tipologia e della taglia di batteria che si intende simulare, dalla libreria implementata nel modello stesso. Il modello consente l'inserimento di nuove LUTs da parte dell'utente. Gli andamenti riportati in Figura 29 sono un esempio delle caratteristiche della tensione di batteria in funzione dello SOC e della corrente per batterie Li-ion ottenute da misure sperimentali.

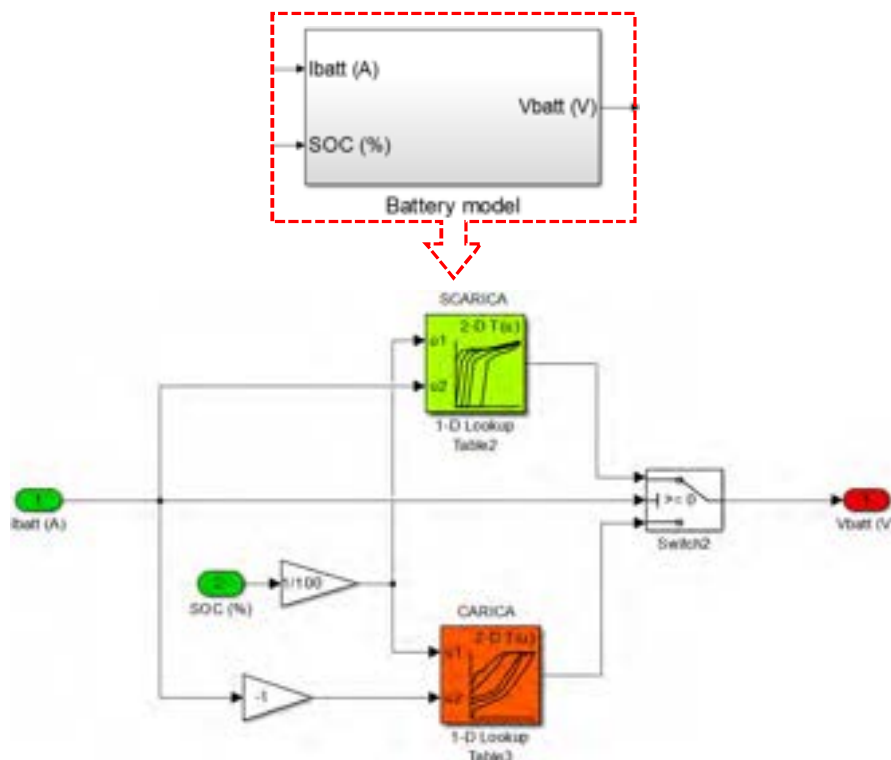
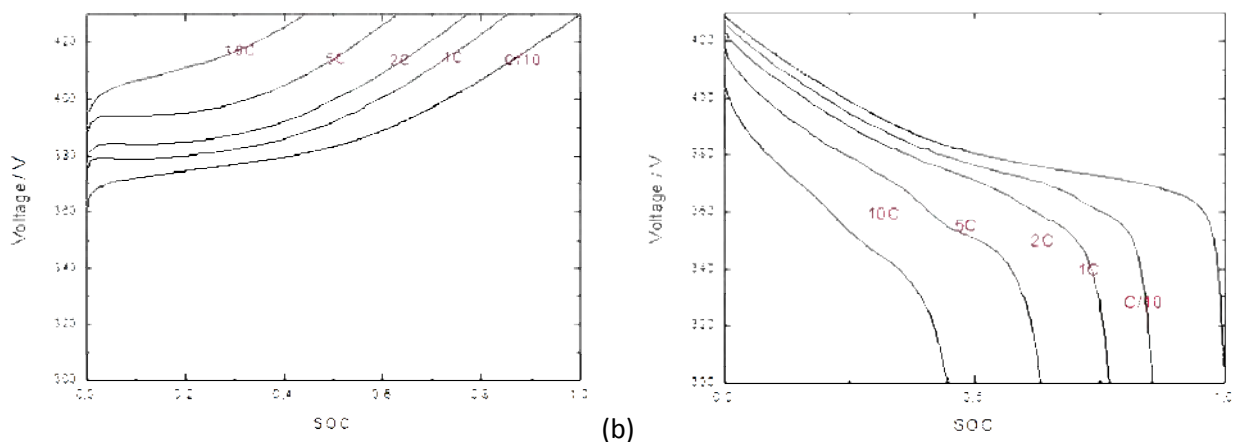


Figura 28. Modello Matlab/Simulink® per la valutazione della tensione ai morsetti della batteria.



(a)

(b)

Figura 29. Esempi di caratteristiche della tensione di batteria in funzione dello SOC e della corrente per batterie Li-ion ottenute da misure sperimentali: (a) carica della batteria; (b) scarica della batteria.

4.3.4 Battery energy measurement

In Figura 30 è riportato in dettaglio il modello implementato per la valutazione dell'efficienza energetica della batteria qualora sia selezionata l'opzione di valutazione dell'efficienza per mezzo di LUT funzione della tensione di batteria e dello SOC.

Tal modello riceve in ingresso la corrente e la tensione di batteria così come il segnale di reset generato dal contatore di cicli di carica/scarica. Ottenuta la potenza di batteria moltiplicando tra di loro la tensione e la corrente, la si integra al fine di ottenere l'energia. Per mezzo di opportuni switch controllati dal segno della corrente si ottengono come risultato dell'integrazione rispettivamente l'energia di carica della batteria per correnti negative e l'energia di scarica della batteria per correnti positive.

Il segnale di reset permette di resettare gli integratori ogni qualvolta venga compiuto un ciclo completo di carica/scarica della batteria.

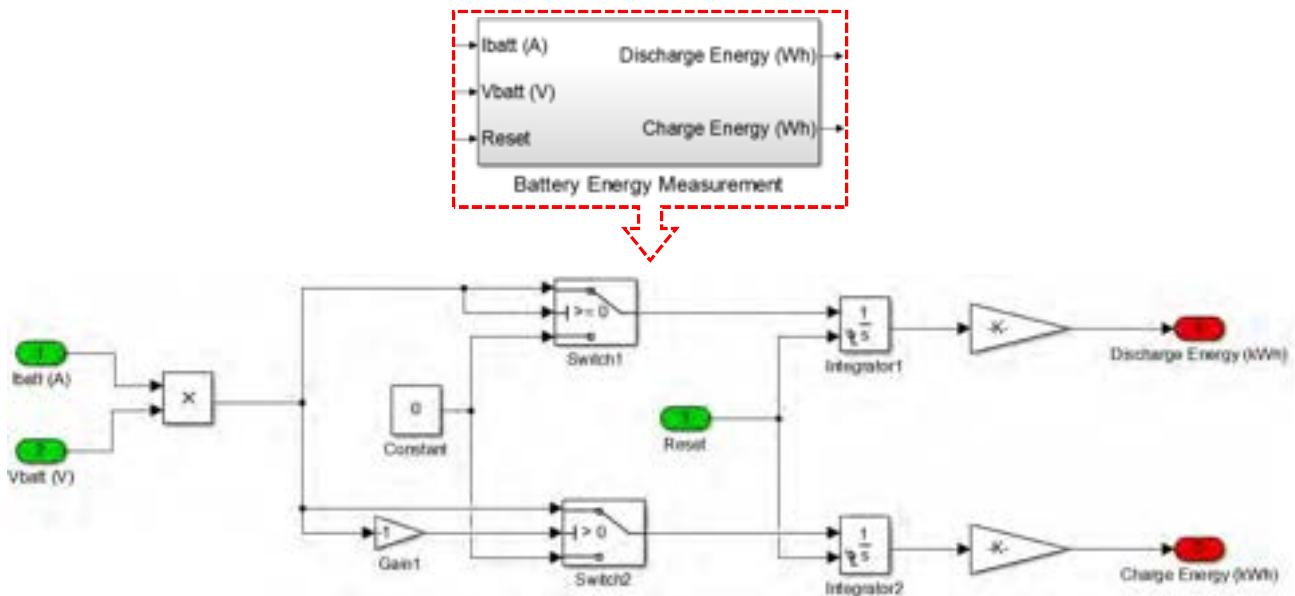


Figura 30. Modello Matlab/Simulink® per la valutazione dell'energia immessa nella batteria in fase di carica e resa in fase di scarica.

4.3.5 Efficiency computation

In Figura 31 è mostrato il modello implementato in Matlab/Simulink® per il calcolo dell'efficienza energetica della batteria quando viene selezionata nella maschera parametri di batteria l'opzione di valutazione dell'efficienza per mezzo di LUT funzione della tensione di batteria e dello SOC.

Tal modello riceve in ingresso l'energia di scarica e l'energia di carica della batteria valutate per mezzo del blocco Battery Energy Measurement, ed il segnale di reset.

Nella parte superiore dello schema a blocchi viene eseguita per ciascun passo di simulazione la differenza tra l'energia di carica e l'energia di scarica, ottenendo così l'energia persa. Nella parte sottostante, per mezzo di un blocco di sottosistema triggerato dal segnale di reset, viene eseguito il rapporto tra le due energie, ottenendo così in uscita il valore di efficienza energetica della batteria.

Va precisato che, sia l'energia dissipata che il valore di efficienza energetica, hanno in questo contesto una validità esclusiva legata al completamento di un ciclo di carica/scarica della batteria. Ciò è in accordo alla definizione di efficienza energetica di batteria già espressa in Sezione 2.2. Infatti, immaginando un processo di scarica che porti la batteria ad un valore di SOC finale minore di quello iniziale, l'efficienza energetica risulterebbe superiore all'unità in quanto non vi è stata immissione di energia nella batteria; pertanto il

computo energetico assume accezione realistica solo una volta che sia stata reimmessa energia affinché la batteria torni nelle condizioni di SOC iniziali.
Le rimanenti parti dello schema mostrato in Figura 31 sono impiegate per la sincronizzazione dei segnali di uscita.

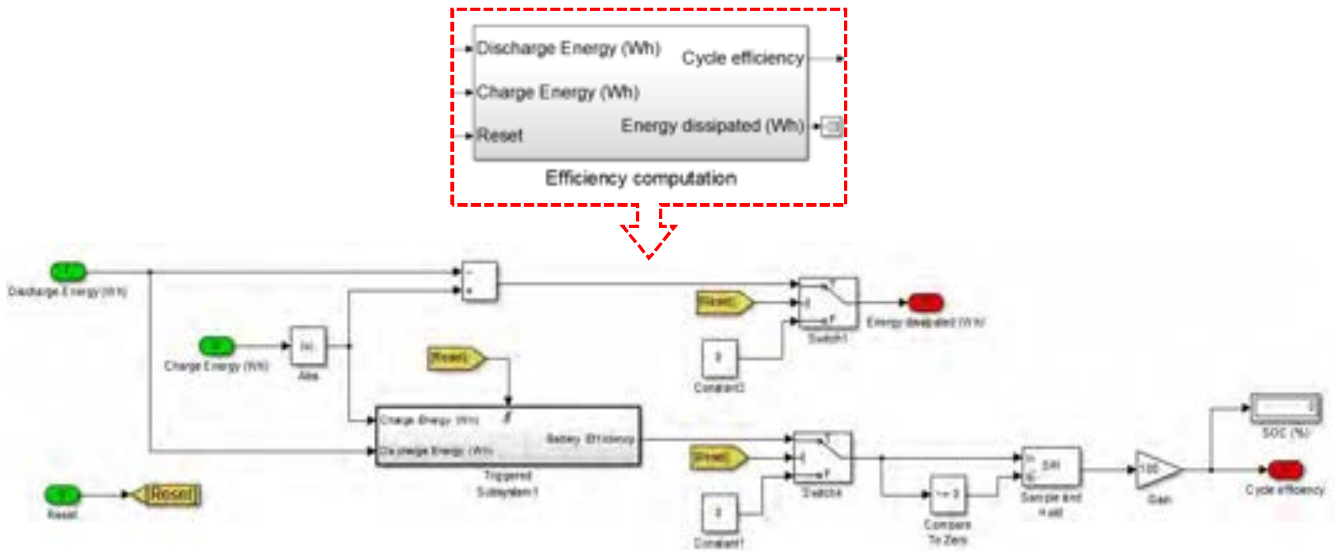


Figura 31. Modello Matlab/Simulink® per la valutazione dell'efficienza energetica della batteria.

Come si può vedere dal modello completo di batteria mostrato in Figura 22, all'esterno del blocco Efficiency Measurement vi è un'ulteriore parte di modello, che è riportata in dettaglio in Figura 32. Essa è atta alla gestione dell'opzione di scelta dell'utente in merito alla modalità di valutazione dell'efficienza energetica. Se infatti viene selezionata l'opzione "costante ed uguale per carica e scarica" il valore di efficienza energetica della batteria viene imposto costante e pari al valore inserito dall'utente; analogamente nel caso si scelga l'opzione di efficienza costante ma differenziata per carica e scarica (differenziazione effettuata in funzione del segno della corrente di batteria). Nel caso si scelga la valutazione per mezzo di LUT funzione di tensione e SOC di batteria, l'efficienza energetica fornita in uscita dal modello è quella valutata dal blocco Energy Computation precedentemente descritto.

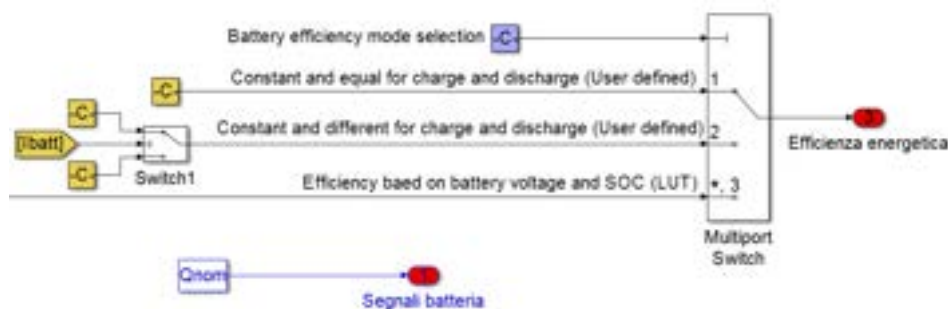


Figura 32. Modello Matlab/Simulink® per la selezione della modalità di valutazione dell'efficienza energetica della batteria.

Il segnale di uscita denominato "Segnali batteria" nella parte inferiore di Figura 32 permette di comunicare al BMS il valore di capacità nominale della batteria al fine di definire l'opportuno profilo di carica/scarica. Tal canale di comunicazione può eventualmente prevedere ulteriori segnali di batteria (quali ad esempio la tensione ai morsetti, il numero di cicli eseguito, etc.) qualora si intendano implementare particolari tecniche di generazione dei profili di carica/scarica.

4.4 Battery Management System

In Figura 33 è mostrato il blocco BMS implementato per mezzo di un codice scritto in Level-2 Matlab S-Function. Nel modello sviluppato, il compito del BMS è quello di generare gli opportuni profili di carica/scarica della batteria. In particolare esso riceve in ingresso il segnale di Logica di carica/scarica (Tabella 5) ed i segnali di batteria provenienti dal blocco batteria.

Per mezzo della machera parametri riportata in Figura 34, l'utente può scegliere indipendentemente il profilo di Crate per la fasi di carica e per le fasi di scarica della batteria. Le opzioni di Crate disponibili per entrambe le fasi sono: C10, C5, C3, C2, 1C, 2C, 3C, 5C. Come noto, 1C significa che la batteria viene caricata (o scaricata) con un valore di corrente di batteria pari al valore nominale (funzione della capacità nominale della batteria); C2 corrisponde ad una corrente metà della corrente nominale, mentre 2C corrisponde ad una corrente doppia rispetto alla nominale; analogamente per gli altri valori di Crate.

Il profilo generato è in per-unit e viene fornito come segnale al convertitore elettronico di potenza unitamente al valore di capacità nominale della batteria. Come già precedentemente descritto, sulla base di questi due segnali il convertitore genera la corrente (positiva o negativa a seconda che si tratti rispettivamente di scarica o di carica) che viene imposta alla batteria.

L'ingresso inerente i segnali di batteria, può prevedere molteplici segnali derivanti dalla batteria stessa, potendo così implementare logiche di generazione del profilo di carica/scarica anche più complesse.



Figura 33. Modello Matlab/Simulink® del BMS.



Figura 34. Maschera del blocco BMS.

5 Esempi e risultati di simulazione

5.1 Test generici sul modello

Al fine di valutare il corretto funzionamento del modello implementato, è stata inizialmente eseguita una campagna di test di simulazione mirata a verificare le risposte dei singoli componenti del sistema (batteria e convertitore).

5.1.1 Impulso di carica con SOC 80%

In Figura 35 sono riportati gli andamenti di corrente, tensione e SOC per una batteria da 10 Ah soggetta ad una prova di carica impulsiva ad 1C per 10 secondi.

Quando viene applicato l'impulso di corrente la tensione ai morsetti della batteria presenta una prima variazione a gradino per poi aumentare gradualmente fino a quando la corrente torna a zero. Al termine dell'impulso di corrente la tensione presenta nuovamente una variazione a gradino per portarsi ad un valore di tensione che è maggiore di quello iniziale per effetto della carica della batteria stessa; infatti, come si può vedere dall'andamento dello SOC, la batteria si è caricata.

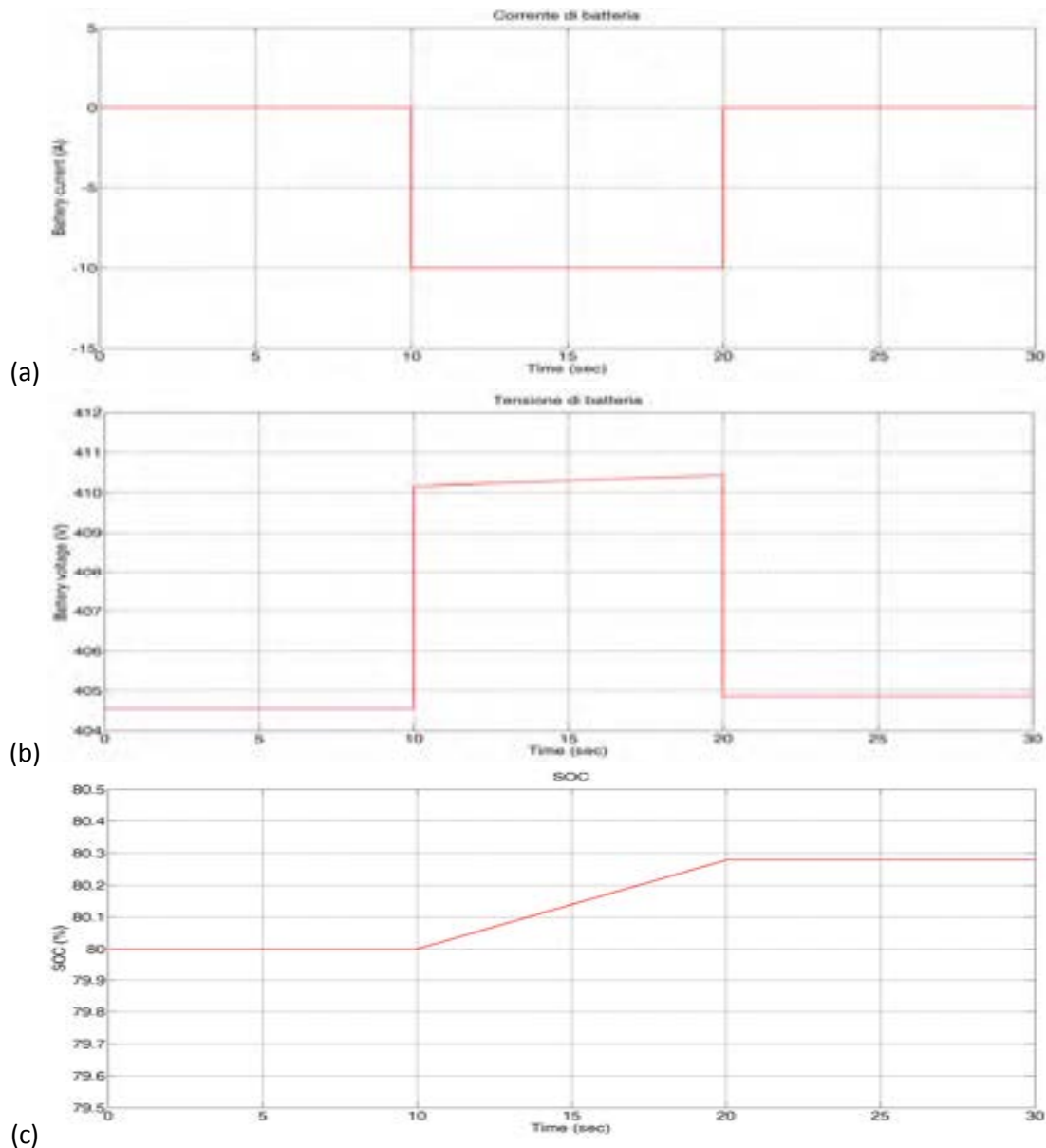


Figura 35. Risposta della batteria ad un impulso di corrente di carica: (a) corrente di batteria; (b) tensione di batteria; (c) SOC.

5.1.2 Impulso di carica con diversi valori di SOC

In Figura 36 sono riportati gli andamenti di tensione ai morsetti per una batteria da 10 Ah soggetta ad una prova di carica impulsiva ad 1C per 10 secondi, con diverse condizioni di SOC iniziale. Come si può vedere, a parità di impulso di corrente applicato, all'aumentare dello SOC della batteria la tensione ai suoi morsetti aumenta. Tal comportamento è in accordo con le caratteristiche tipiche di tensione in funzione della corrente e dello SOC per le batterie, come mostrato ad esempio in Figura 12 ed in Figura 29(a).

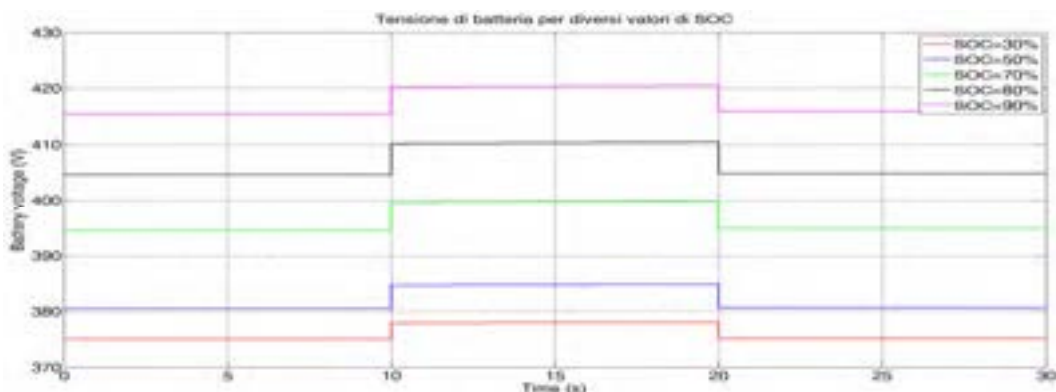
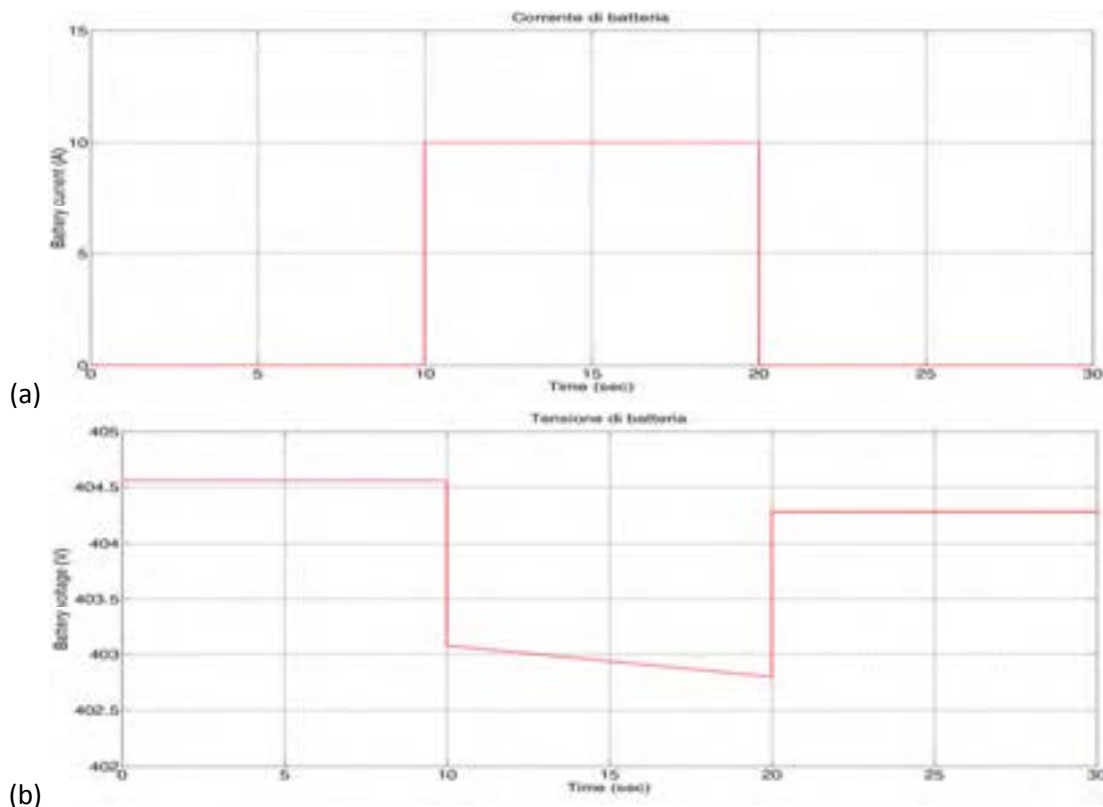


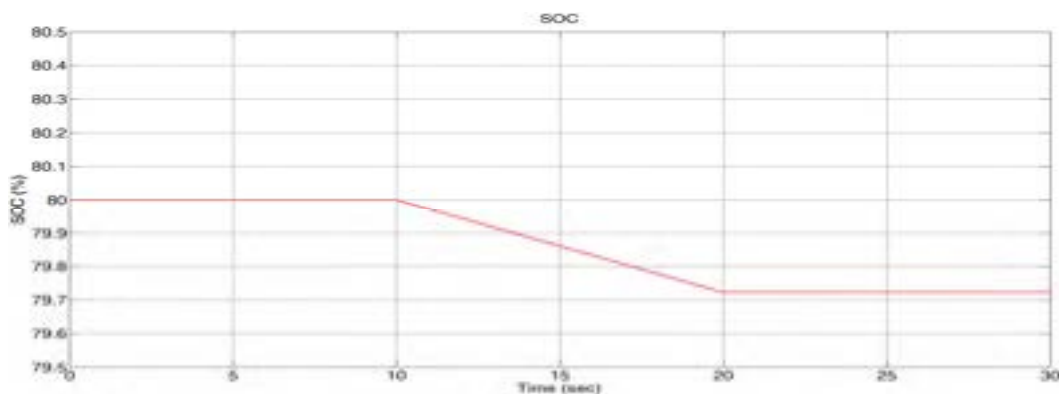
Figura 36. Tensione di batteria in risposta ad un impulso di corrente di carica per diversi valori di SOC.

5.1.3 Impulso di scarica

In Figura 37 sono riportati gli andamenti di corrente, tensione e SOC per una batteria da 10 Ah soggetta ad una prova di scarica impulsiva ad 1C per 10 secondi.

Quando viene applicato l'impulso di corrente la tensione ai morsetti della batteria presenta una prima variazione a gradino per poi diminuire gradualmente fino a quando la corrente torna a zero. Al termine dell'impulso di corrente la tensione presenta nuovamente una variazione a gradino per portarsi ad un valore di tensione che è minore di quello iniziale per effetto della scarica della batteria stessa; infatti, come si può vedere dall'andamento dello SOC, la batteria si è scaricata.



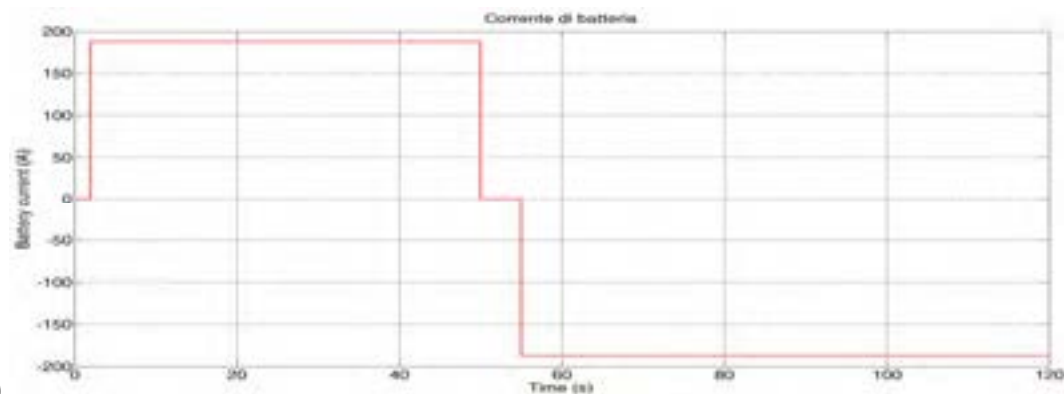


(c)

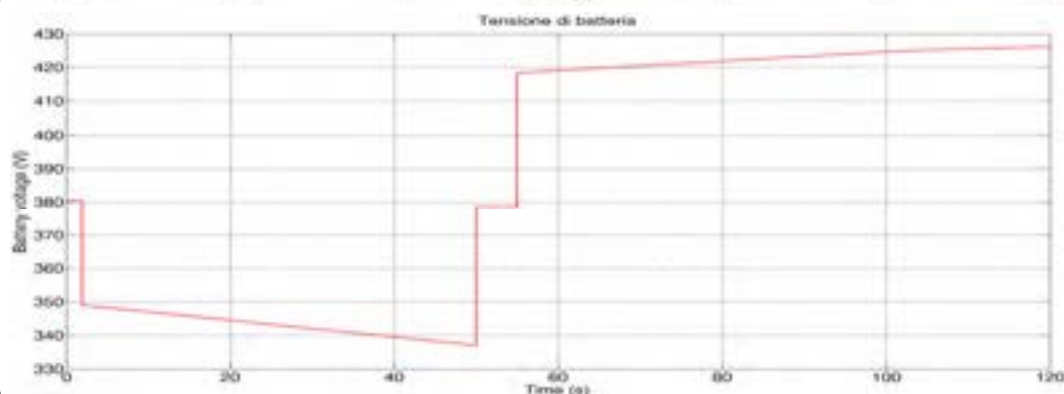
Figura 37. Risposta della batteria ad un impulso di corrente di scarica: (a) corrente di batteria; (b) tensione di batteria; (c) SOC.

5.1.4 Ciclo di scarica/carica

In Figura 38 sono riportati gli andamenti di corrente, tensione, SOC ed efficienza energetica di batteria per un ciclo di scarica/carica a partire dal valore iniziale di SOC pari al 50%. Il test è stato eseguito modellizzando una batteria Li-ion da 37,5 Ah con scarica e carica eseguite con un Crate pari a 5C. Inizialmente vi è una fase di scarica della batteria di circa 50 secondi, dopodiché non vi è scambio di energia per 5 secondi seguito dalla ricarica della batteria. Il valore di efficienza energetica di batteria ottenuto al completamento del ciclo (raggiungimento del valore di SOC pari al valore iniziale del 50%) è pari a 81.3%.



(a)



(b)

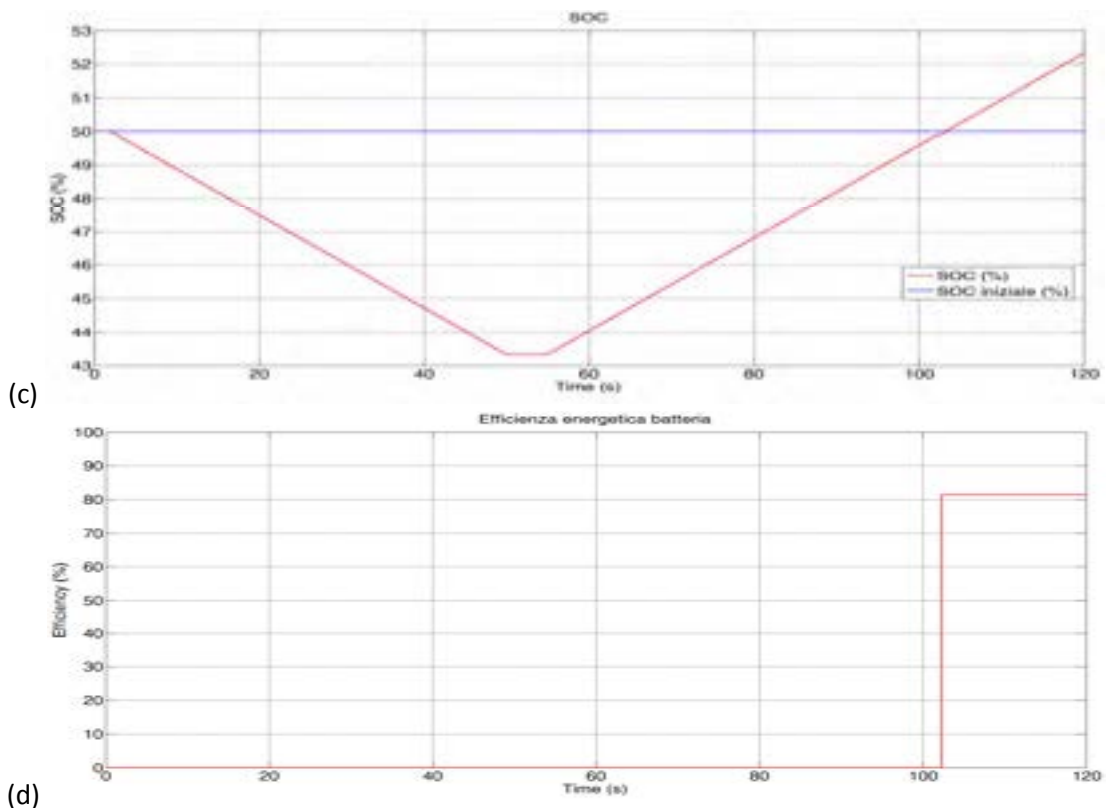
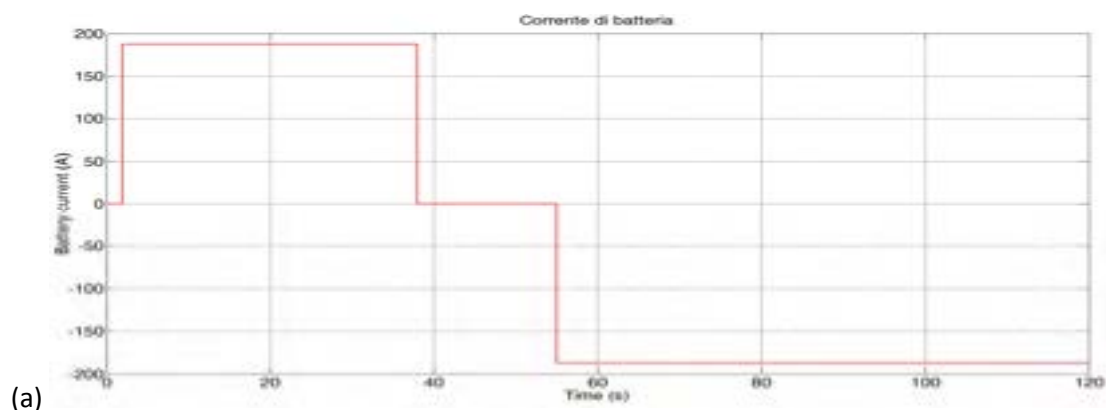


Figura 38. Risposta della batteria ad un ciclo di scarica/carica: (a) corrente di batteria; (b) tensione di batteria; (c) SOC; (d) Efficienza energetica di batteria al completamento del ciclo.

5.1.5 Ciclo di scarica/carica con limite inferiore di SOC al 45%

In Figura 39 sono riportati gli andamenti analoghi a quelli di Figura 38, dove però il limite inferiore di scarica della batteria (si veda Figura 18) è stato impostato pari a 45%. Come si può vedere, raggiunto il valore di SOC minimo la scarica della batteria si interrompe (il ciclo di corrente richiesto dalla rete è lo stesso di Figura 38(a)). Il valore di efficienza energetica di batteria (valutata per mezzo delle LUTs della tensione funzione di SOC e corrente di batteria) ottenuto al completamento del ciclo è in questo caso pari a 81.5%.



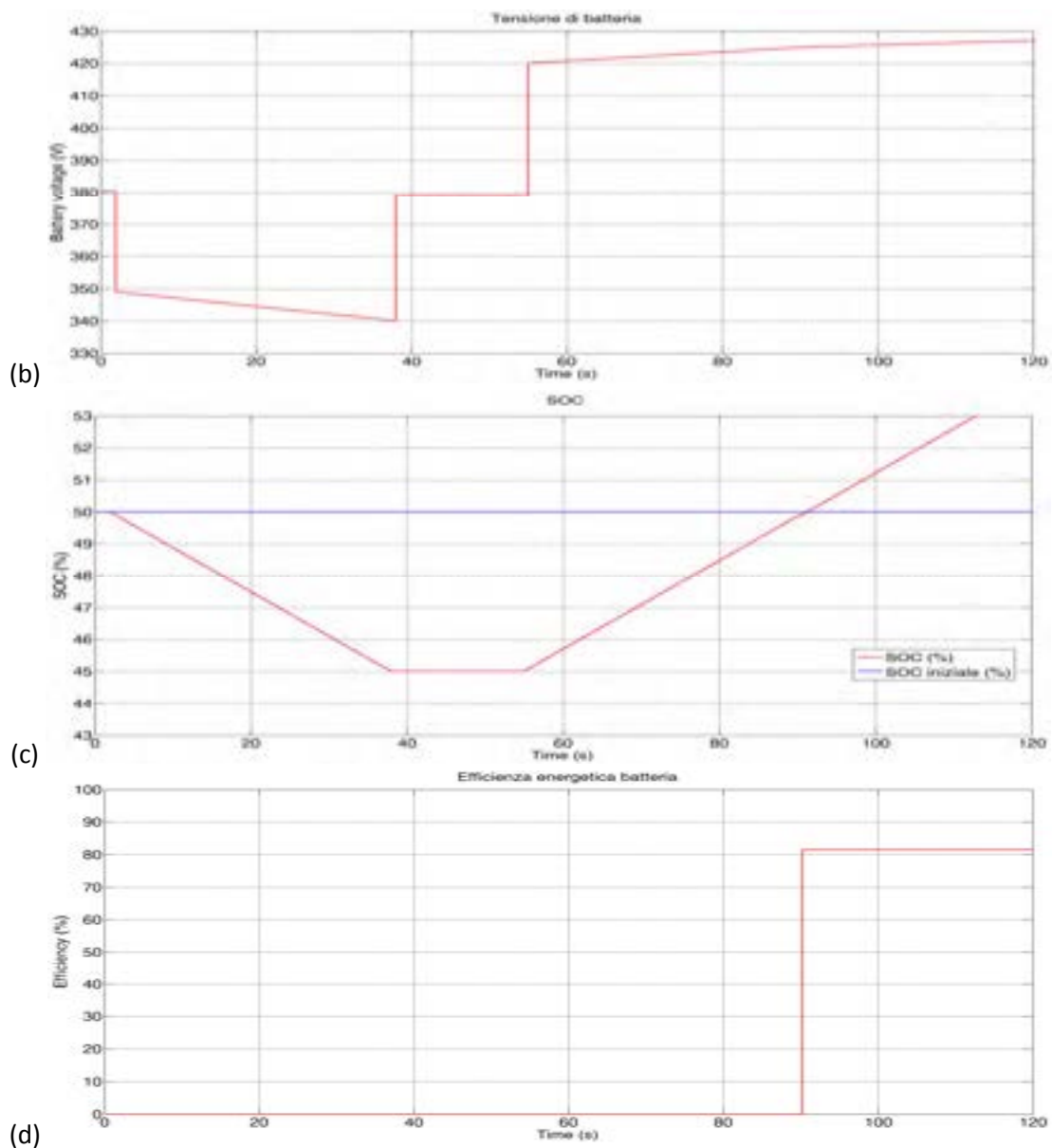


Figura 39. Risposta della batteria ad un ciclo di scarica/carica con valore minimo di SOC pari al 45%: (a) corrente di batteria; (b) tensione di batteria; (c) SOC; (d) Efficienza energetica di batteria al completamento del ciclo.

5.1.6 Ciclo di scarica/carica con limite superiore di SOC al 85%

In Figura 40 sono riportati gli andamenti analoghi a quelli delle figure precedenti, dove però il limite superiore di carica della batteria (si veda Figura 18) è stato impostato pari all'85%. Come si può vedere, raggiunto il valore di SOC massimo la carica della batteria si interrompe. Il valore di tensione durante la carica è saturato alla tensione di cut-off di 430 V (simulazioni eseguite con caratteristiche di batteria di Figura 29). Il valore di efficienza energetica di batteria (valutata per mezzo delle LUTs della tensione funzione di SOC e corrente di batteria) ottenuto al completamento del ciclo è pari a 90.2%.

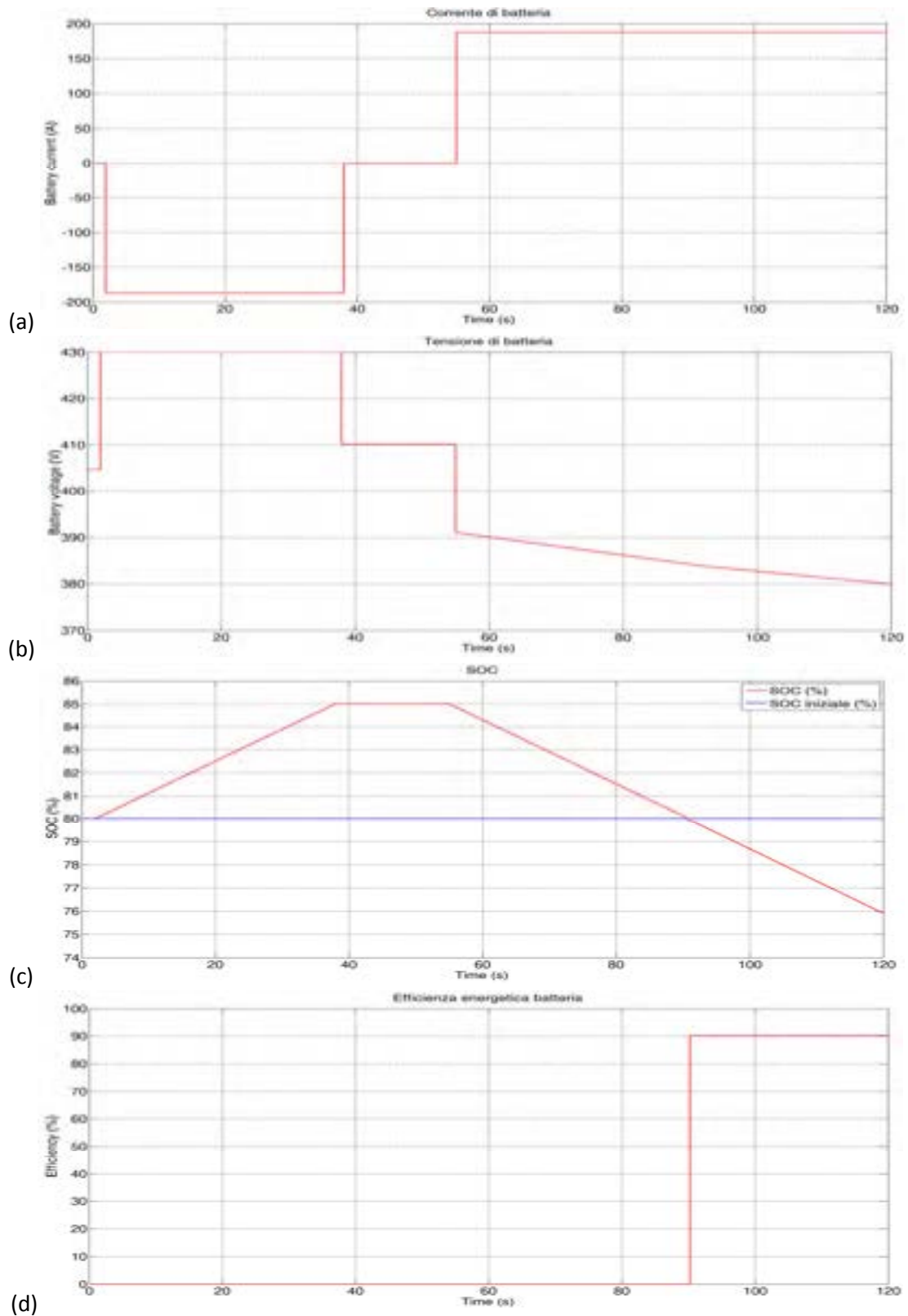


Figura 40. Risposta della batteria ad un ciclo di scarica/carica con valore massimo di SOC pari all'85%: (a) corrente di batteria; (b) tensione di batteria; (c) SOC; (d) Efficienza energetica di batteria al completamento del ciclo.

5.2 Test con batteria Li-ion

In seguito alla campagna di test generici sul modello di batteria, sono stati condotti test più dettagliati finalizzati a valutare i tempi di scarica/carica e l'efficienza energetica in funzione di diversi Crate per modelli realistici di batterie Li-ion.

In particolare, i test qui riportati sono stati eseguiti con una batteria Li-ion da 15 kWh con capacità nominale pari a 37.5 Ah. In Figura 41 sono mostrate le caratteristiche di tensione in funzione di corrente di batteria e SOC implementate nel modello.

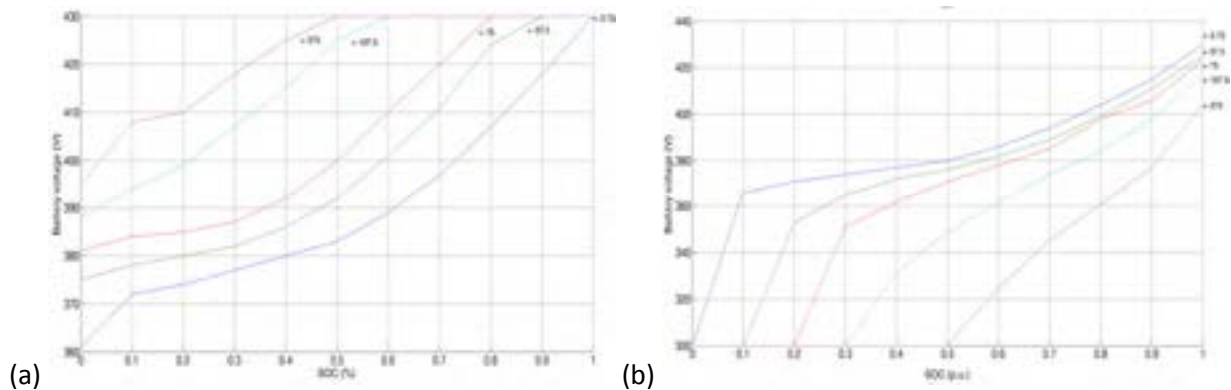


Figura 41. Caratteristiche di tensione in funzione di corrente e SOC per una batteria Li-ion da 15 kWh con capacità nominale pari a 37.5 Ah: (a) carica della batteria; (b) scarica della batteria.

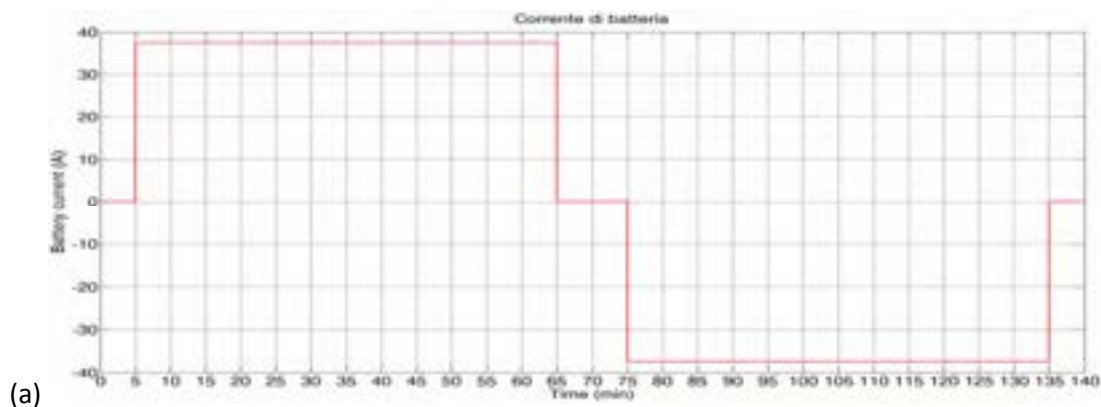
5.2.1 Ciclo di scarica/carica ad 1C

In Figura 42 sono riportati gli andamenti ottenuti a seguito di una scarica e successiva ricarica completa della batteria Li-ion da 15 kWh e capacità nominale pari a 37.5 Ah con Crate pari a 1C. Partendo da un valore di SOC iniziale pari al 100%, il ciclo prevede una scarica ad un 1C per 60 minuti, una fase di 10 minuti in cui non vi è scambio di energia, ed una successiva ricarica ad 1C di durate di 60 minuti.

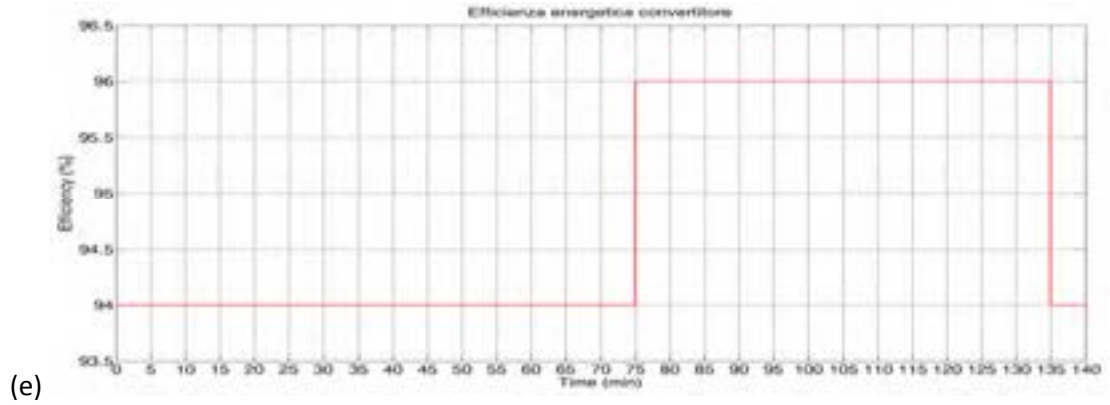
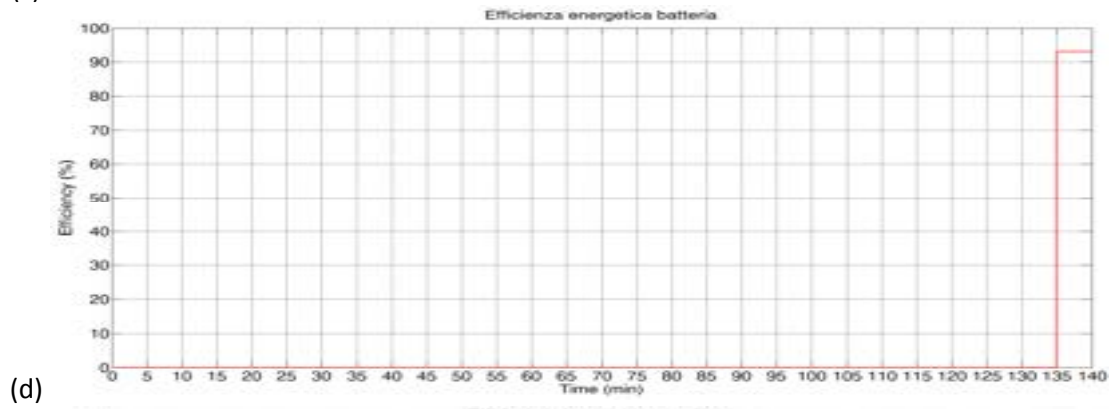
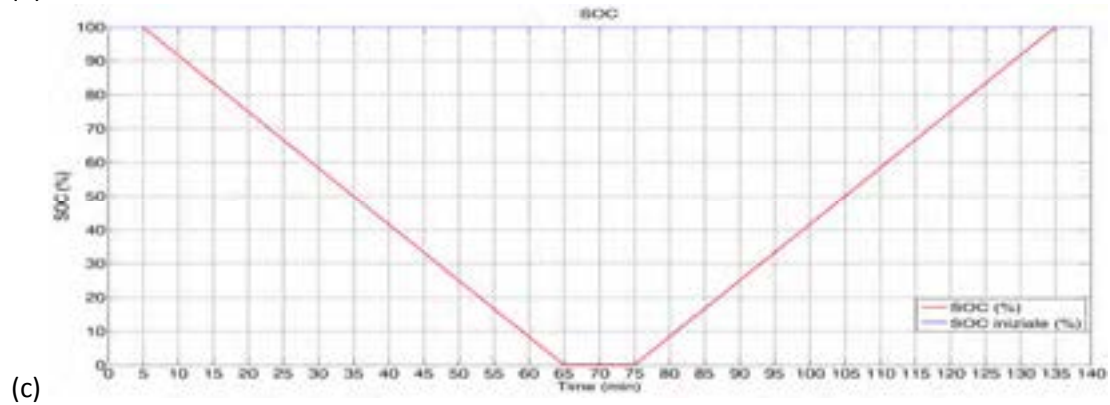
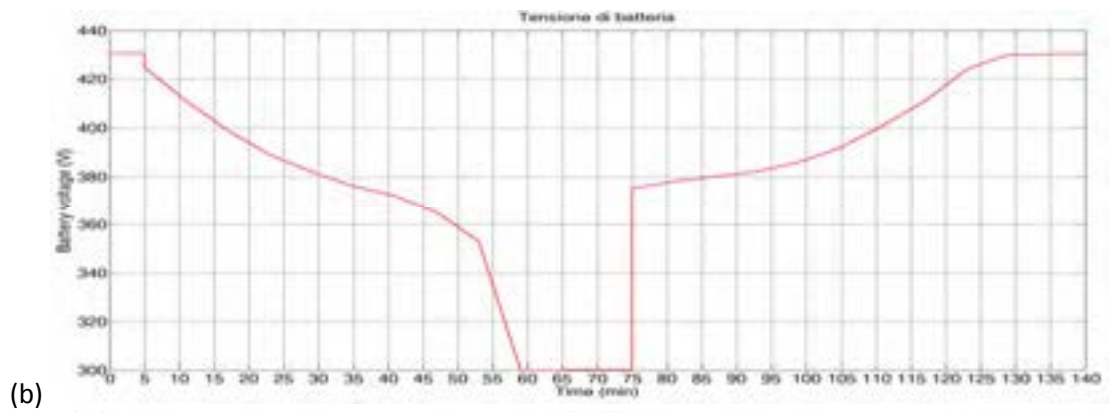
Essendo le fasi di scarica e di carica entrambe ad 1C, come si può vedere da Figura 42(a), il valore di corrente imposto alla batteria è pari a 37.5 A sia per la scarica che per la carica. Dall'andamento dello SOC riportato in Figura 42(c) si evince come la batteria si scarica completamente in un'ora e si ricarica in altrettanto tempo; ciò è in accordo con il fatto che si è selezionato un Crate per entrambe le fasi pari a 1C.

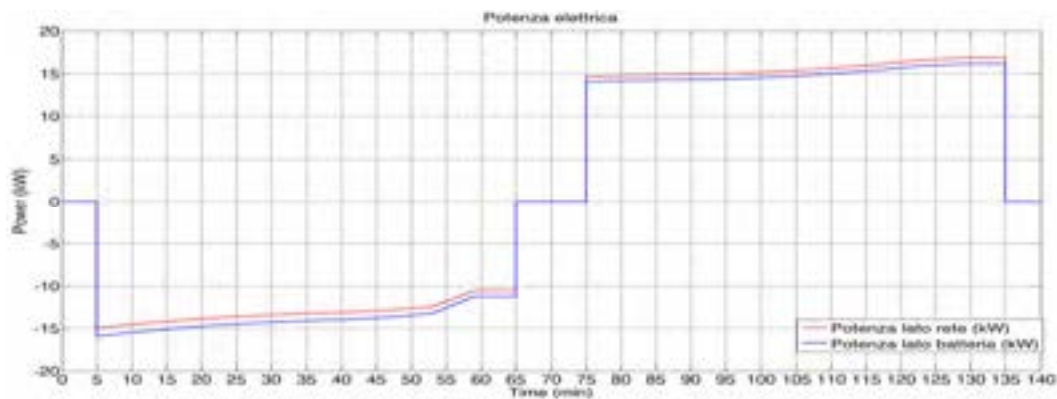
Il valore di efficienza energetica di batteria (valutata per mezzo delle LUTs della tensione funzione di SOC e corrente di batteria) ottenuto al completamento del ciclo è risultato pari a 90.2%.

In Figura 42(e) è mostrato l'andamento dell'efficienza energetica del convertitore che per il test condotto è stata assunta costante e differenziata per la fase di scarica (94%) e di carica (96%). In Figura 42(f) sono riportati gli andamenti della potenza elettrica di batteria e di rete ottenuti durante la simulazione.



(a)





(f)

Figura 42. Risposta della batteria Li-ion da 15 kWh e 37.5 Ah ad una scarica completa e successiva ricarica ad 1C: (a) corrente di batteria; (b) tensione di batteria; (c) SOC; (d) Efficienza energetica di batteria al completamento del ciclo; (e) Efficienza energetica convertitore; (f) Potenza convertitore lato batteria e potenza lato rete.

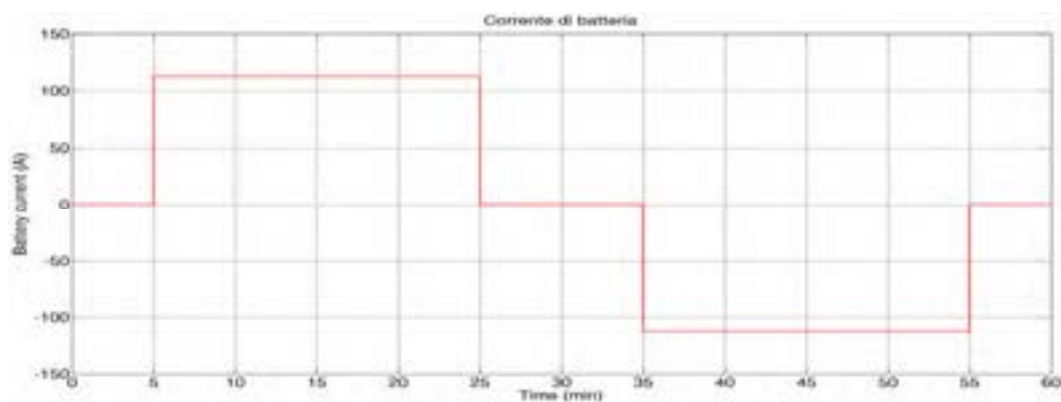
5.2.2 Ciclo di scarica/carica a 3C

In Figura 43 sono riportati gli andamenti ottenuti a seguito di una scarica e successiva ricarica completa della batteria Li-ion da 15 kWh e capacità nominale pari a 37.5 Ah con Crate pari a 3C. Partendo da un valore di SOC iniziale pari al 100%, il ciclo prevede una scarica ad un 3C per 20 minuti, una fase di 10 minuti in cui non vi è scambio di energia, ed una successiva ricarica ad 3C di durate di 20 minuti.

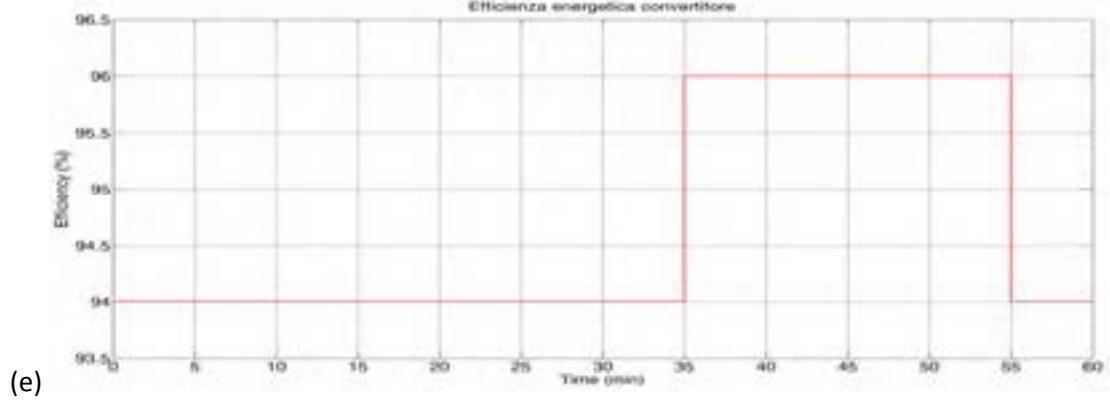
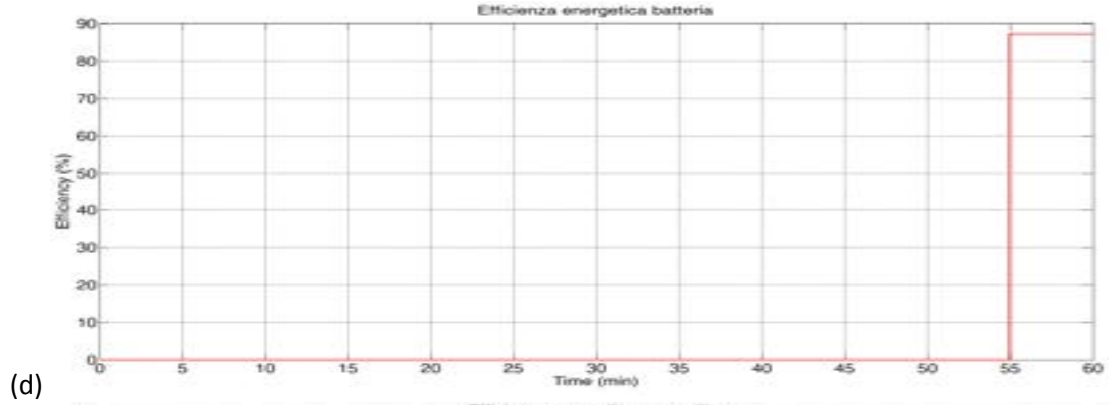
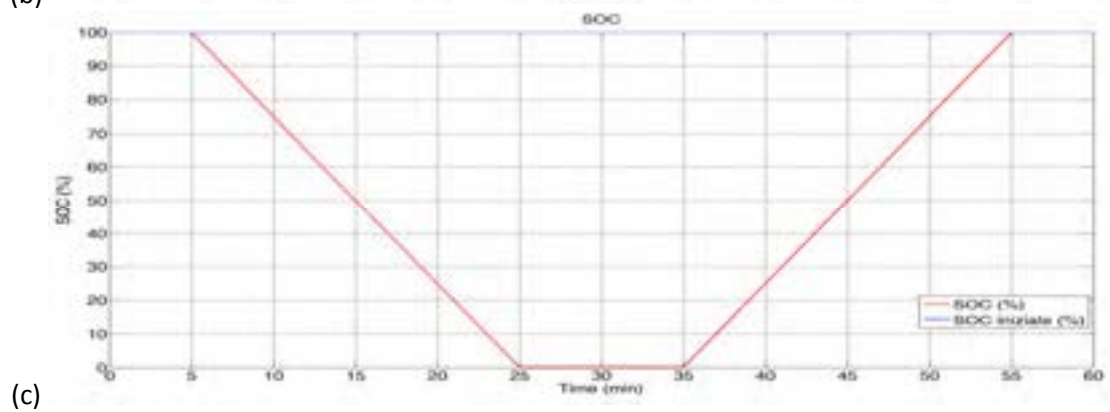
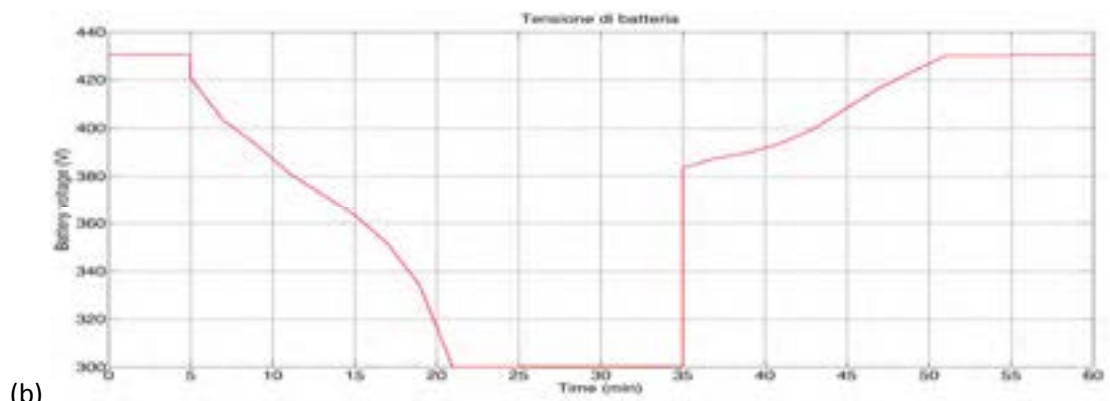
Essendo le fasi di scarica e di carica entrambe ad 3C, come si può vedere da Figura 43(a), il valore di corrente imposto alla batteria è pari a 37.5 A sia per la scarica che per la carica. Dall'andamento dello SOC riportato in Figura 43(c) si evince come la batteria si scarica completamente in venti minuti e si ricarica in altrettanto tempo; ciò è in accordo con il fatto che si è selezionato un Crate per entrambe le fasi pari a 3C.

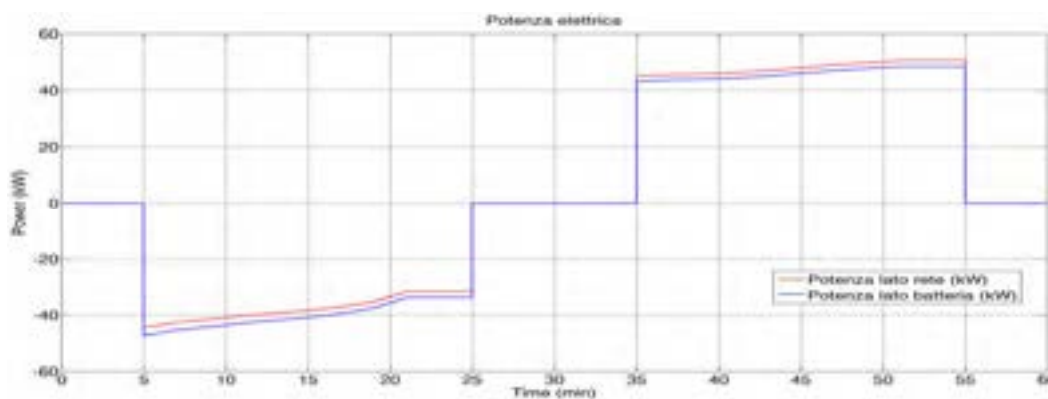
Il valore di efficienza energetica di batteria (valutata per mezzo delle LUTs della tensione funzione di SOC e corrente di batteria) ottenuto al completamento del ciclo è risultato pari a 87.1%. Si noti come tal valore di efficienza sia inferiore rispetto al ciclo di scarica e carica ad 1C riportato nella sezione precedente; ciò è in accordo con quanto già descritto nella sezione introduttiva sulle batterie (si veda Figura 13).

In Figura 43(e) è mostrato l'andamento dell'efficienza energetica del convertitore che per il test condotto è stata assunta costante e differenziata per la fase di scarica (94%) e di carica (96%). In Figura 43(f) sono riportati gli andamenti della potenza elettrica di batteria e di rete ottenuti durante la simulazione.



(a)





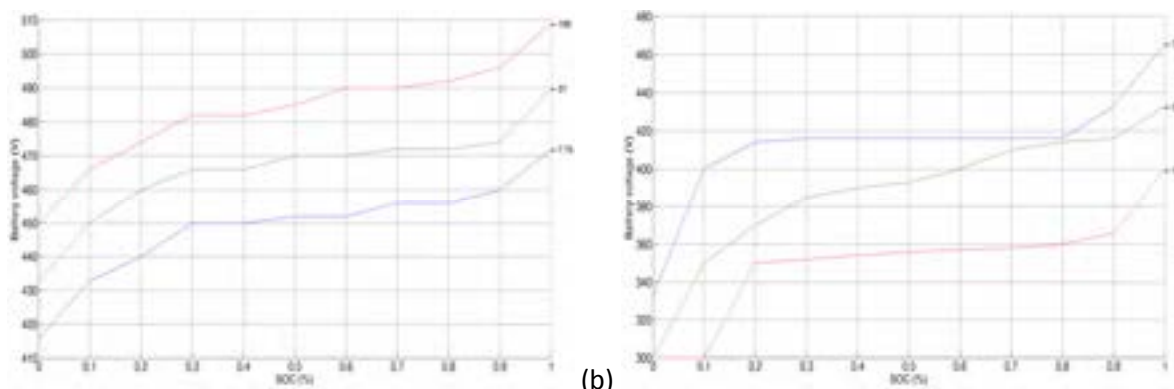
(f)

Figura 43. Risposta della batteria Li-ion da 15 kWh e 37.5 Ah ad una scarica completa e successiva ricarica ad 3C: (a) corrente di batteria; (b) tensione di batteria; (c) SOC; (d) Efficienza energetica di batteria al completamento del ciclo; (e) Efficienza energetica convertitore; (f) Potenza convertitore lato batteria e potenza lato rete.

5.3 Test con batteria Ni-MH

Test di scarica e carica completa a diversi Crate, analoghi a quelli sopra descritti per la batteria Li-ion, sono stati eseguiti per una batteria Ni-MH.

In particolare, i test qui riportati sono stati eseguiti con una batteria Ni-MH da 24.8 kWh con capacità nominale pari a 62 Ah. In Figura 44 sono mostrate le caratteristiche di tensione in funzione di corrente di batteria e SOC misurate sperimentalmente ed implementate nel modello.



(a)

(b)

Figura 44. Caratteristiche di tensione in funzione di corrente e SOC per una batteria Ni-MH da 24.8 kWh con capacità nominale pari a 62 Ah: (a) carica della batteria; (b) scarica della batteria.

5.3.1 Comparazione con dati di letteratura

In Figura 45 sono riportati gli andamenti per-unit di tensione, corrente e SOC per un ciclo di carica/scarica eseguito su una batteria Ni-MH con caratteristiche analoghe a quelle mostrate in Figura 44.

Il ciclo prevede, partendo da uno SOC iniziale della cella pari al 50%, una prima fase di carica della durata di 600 secondi, una seguente fase di scarica della cella di pari durata, ed una successiva ricarica fino al completamento del test di durata di 1500 secondi. Sia la fasi di carica che di scarica della cella sono state eseguite ad un Crate pari a 2C, ovvero al doppio della corrente nominale della batteria.

Come si può notare in Figura 45(c), durante la prima fase di carica il valore dello SOC passa dal 50% all'83.3%; ciò è in accordo con il Crate scelto per la carica ed il tempo per la quale essa avviene. Infatti, ad un Crate pari a 2C si ottiene una carica completa della batteria in 30 minuti; in 600 secondi (10 minuti) si ottiene una carica della batteria del 33.3%. Essendo la fase di scarica successiva condotto anch'essa a 2C e di pari durata, dopo 1200 secondi si ha nuovamente un valore di SOC pari al 50%.

Come si evince dalle figure riportate, la tensione ai morsetti di batteria ottenuta dal modello implementato aumenta gradualmente durante le fasi di carica e diminuisce durante quella di scarica.

Gli andamenti riportati in Figura 45 sono paragonabili a quelli riportati in [40], dove una cella con tecnologia Ni-MH è stata testata con un ciclo di carica e scarica analogo a quello simulato.

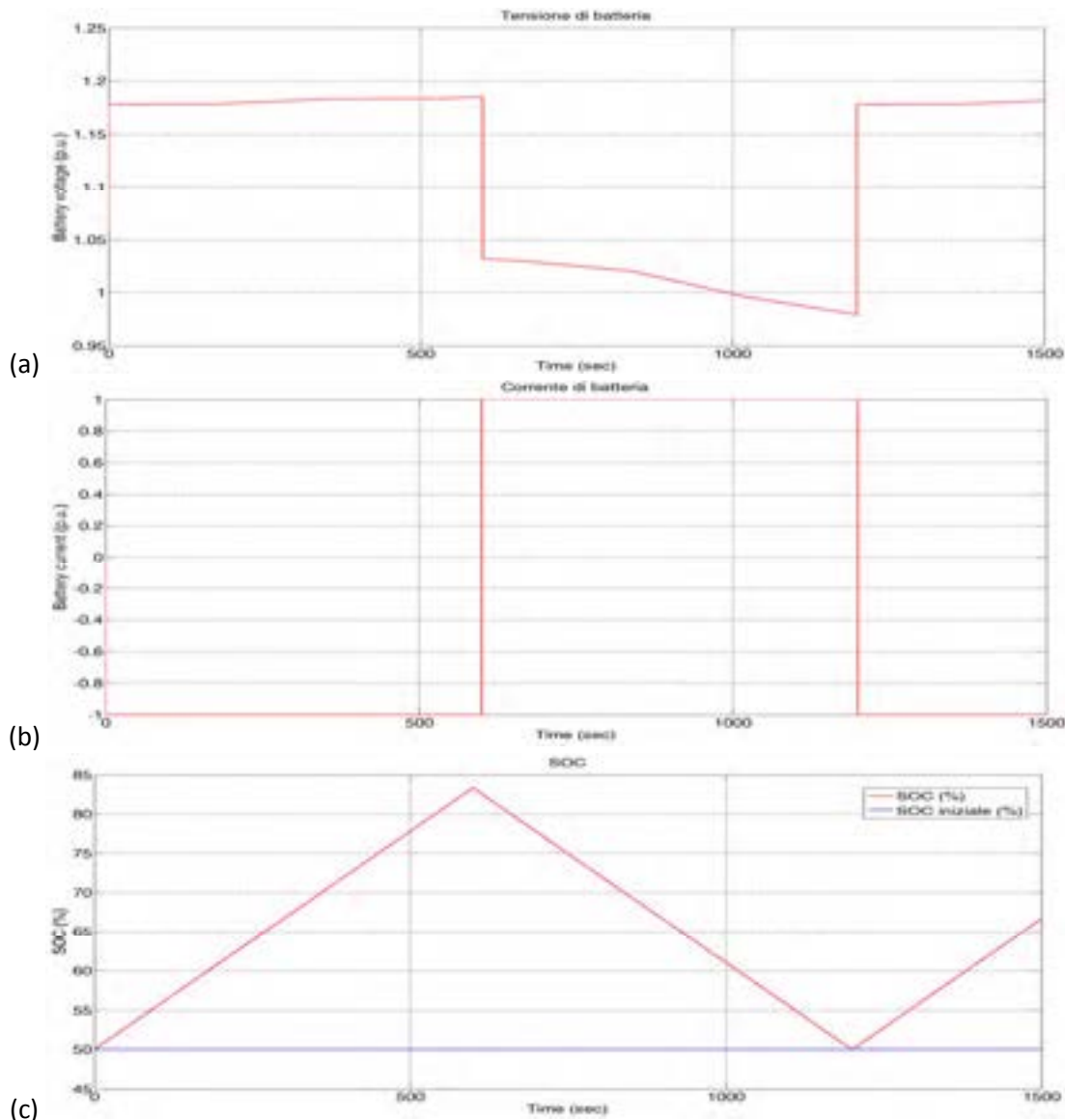


Figura 45. Valori per-unit della risposta di una batteria Ni-MH ad un ciclo di carica e scarica a 2C: (a) tensione ai morsetti; (b) corrente; (c) SOC.

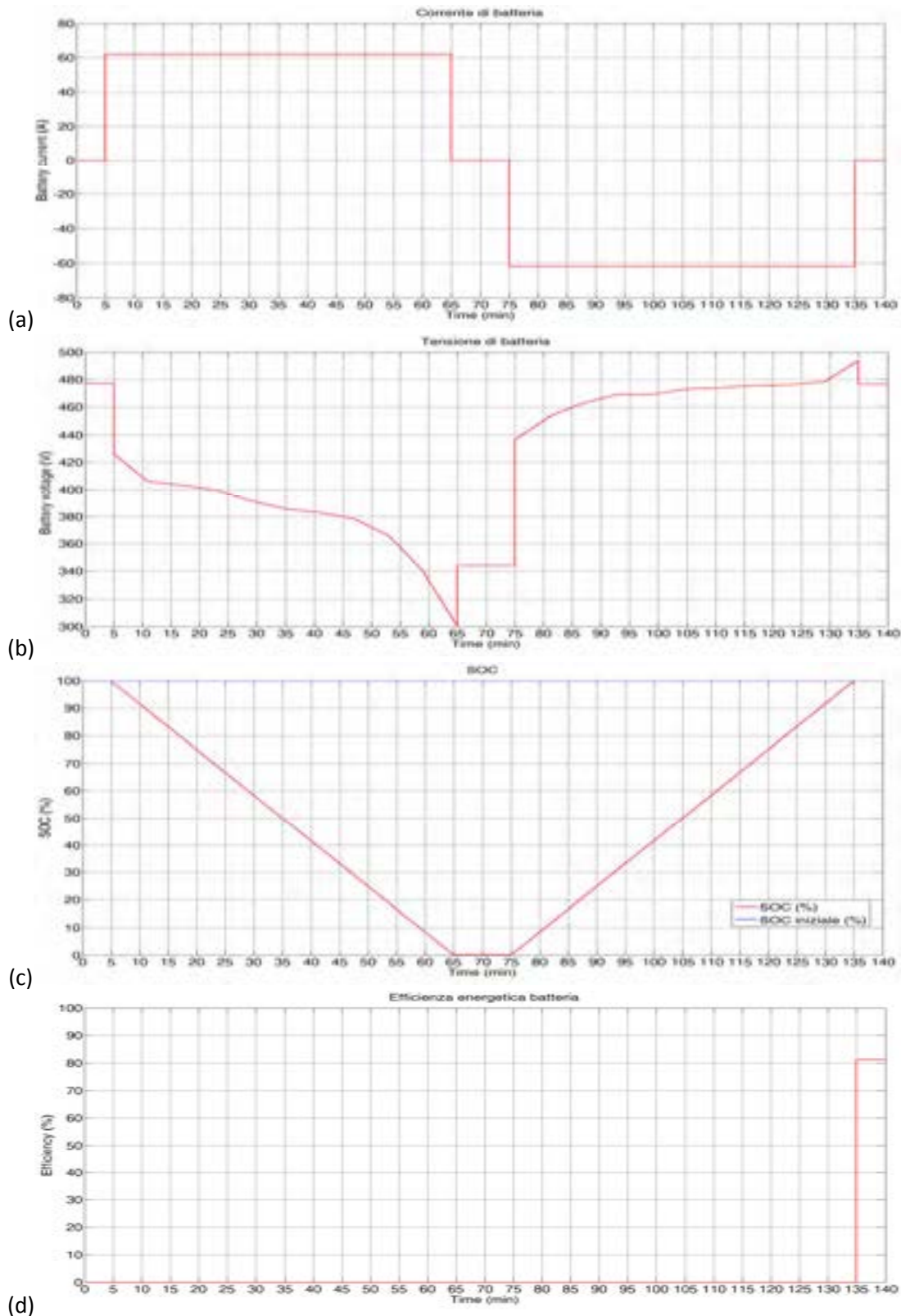
5.3.2 Ciclo di scarica/carica ad 1C

In Figura 46 sono riportati gli andamenti ottenuti a seguito di una scarica e successiva ricarica completa della batteria Ni-MH da 24.8 kWh e capacità nominale pari a 62 Ah con Crate pari a 1C. Partendo da un valore di SOC iniziale pari al 100%, il ciclo prevede una scarica ad un 1C per 60 minuti, una fase di 10 minuti in cui non vi è scambio di energia, ed una successiva ricarica ad 1C di durate di 60 minuti.

Essendo le fasi di scarica e di carica entrambe ad 1C, come si può vedere da Figura 46(a), il valore di corrente imposto alla batteria è pari a 62 A sia per la scarica che per la carica. Dall’andamento dello SOC riportato in Figura 46(c) si evince come la batteria si scarica completamente in un’ora e si ricarica in altrettanto tempo; ciò è in accordo con il fatto che si è selezionato un Crate per entrambe le fasi pari a 1C.

Il valore di efficienza energetica di batteria (valutata per mezzo delle LUTs della tensione funzione di SOC e corrente di batteria) ottenuto al completamento del ciclo è risultato pari a 81.3%.

In Figura 46(e) è mostrato l'andamento dell'efficienza energetica del convertitore che per il test condotto è stata assunta costante e differenziata per la fase di scarica (94%) e di carica (96%). In Figura 46(f) sono riportati gli andamenti della potenza elettrica di batteria e di rete ottenuti durante la simulazione.



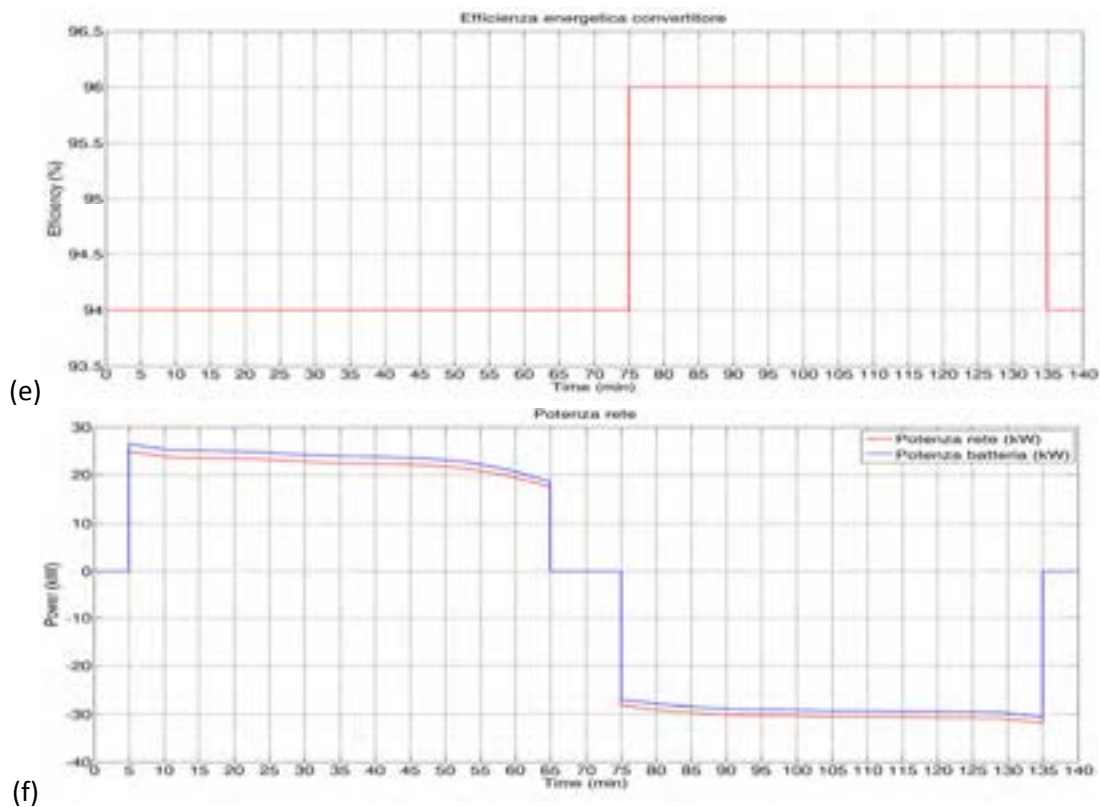


Figura 46. Risposta della batteria Ni-MH da 24.8 kWh e 62 Ah ad una scarica completa e successiva ricarica ad 1C: (a) corrente di batteria; (b) tensione di batteria; (c) SOC; (d) Efficienza energetica di batteria al completamento del ciclo; (e) Efficienza energetica convertitore; (f) Potenza convertitore lato batteria e lato rete.

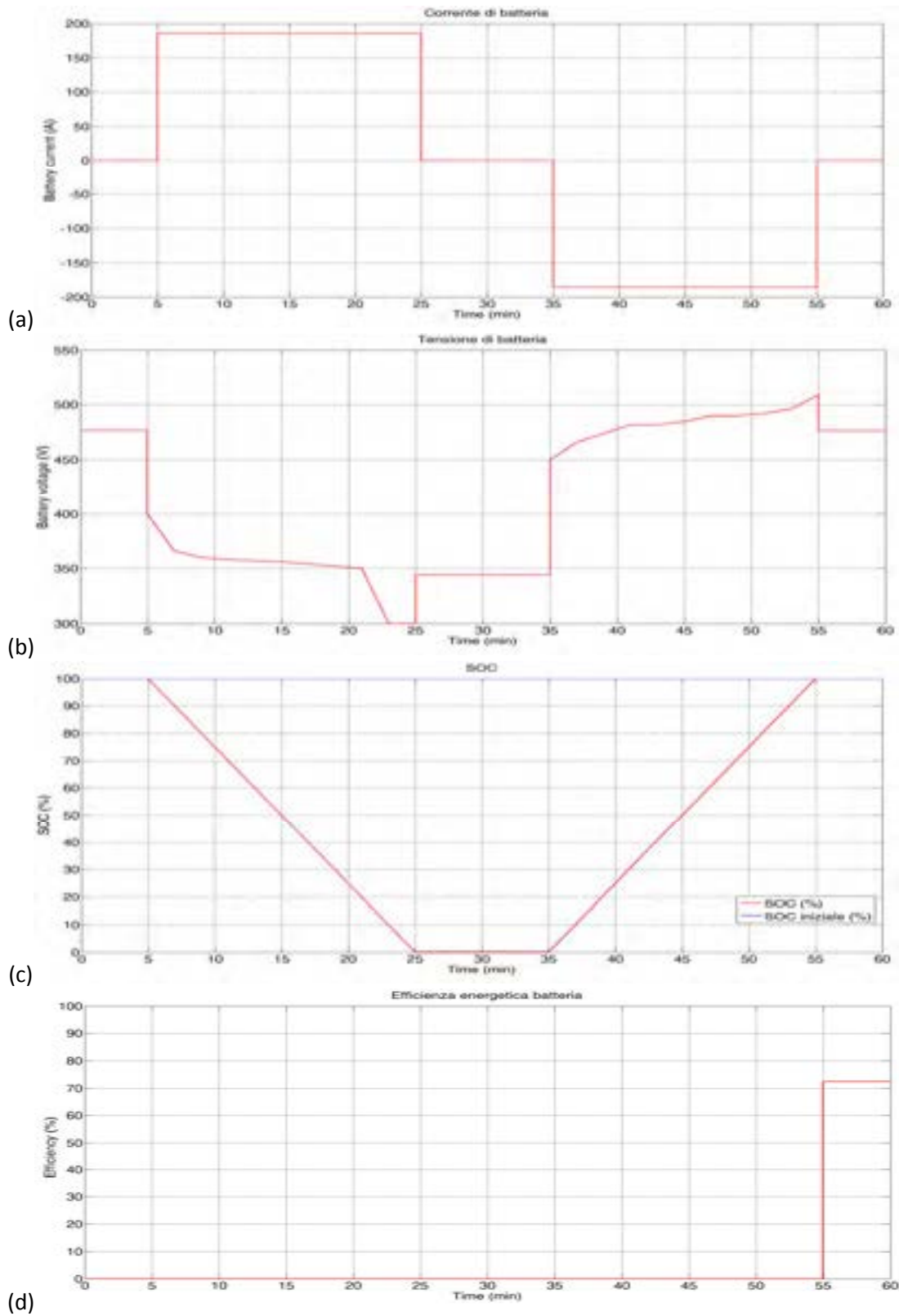
5.3.3 Ciclo di scarica/carica a 3C

In Figura 47 sono riportati gli andamenti ottenuti a seguito di una scarica e successiva ricarica completa della batteria Ni-MH da 24.8 kWh e capacità nominale pari a 62 Ah con Crate pari a 3C. Partendo da un valore di SOC iniziale pari al 100%, il ciclo prevede una scarica ad un 3C per 20 minuti, una fase di 10 minuti in cui non vi è scambio di energia, ed una successiva ricarica ad 3C di durate di 20 minuti.

Essendo le fasi di scarica e di carica entrambe ad 3C, come si può vedere da Figura 47(a), il valore di corrente imposto alla batteria è pari a 186 A sia per la scarica che per la carica. Dall’andamento dello SOC riportato in Figura 47(c) si evince come la batteria si scarica completamente in venti minuti e si ricarica in altrettanto tempo; ciò è in accordo con il fatto che si è selezionato un Crate per entrambe le fasi pari a 3C.

Il valore di efficienza energetica di batteria (valutata per mezzo delle LUTs della tensione funzione di SOC e corrente di batteria) ottenuto al completamento del ciclo è risultato pari a 72.4%. Si noti come tal valore di efficienza sia inferiore rispetto al ciclo di scarica e carica ad 1C riportato nella sezione precedente; ciò è in accordo con quanto già descritto nella sezione introduttiva sulle batterie (si veda Figura 13).

In Figura 47(e) è mostrato l’andamento dell’efficienza energetica del convertitore che per il test condotto è stata assunta costante e differenziata per la fase di scarica (94%) e di carica (96%). In Figura 47(f) sono riportati gli andamenti della potenza elettrica di batteria e di rete ottenuti durante la simulazione.



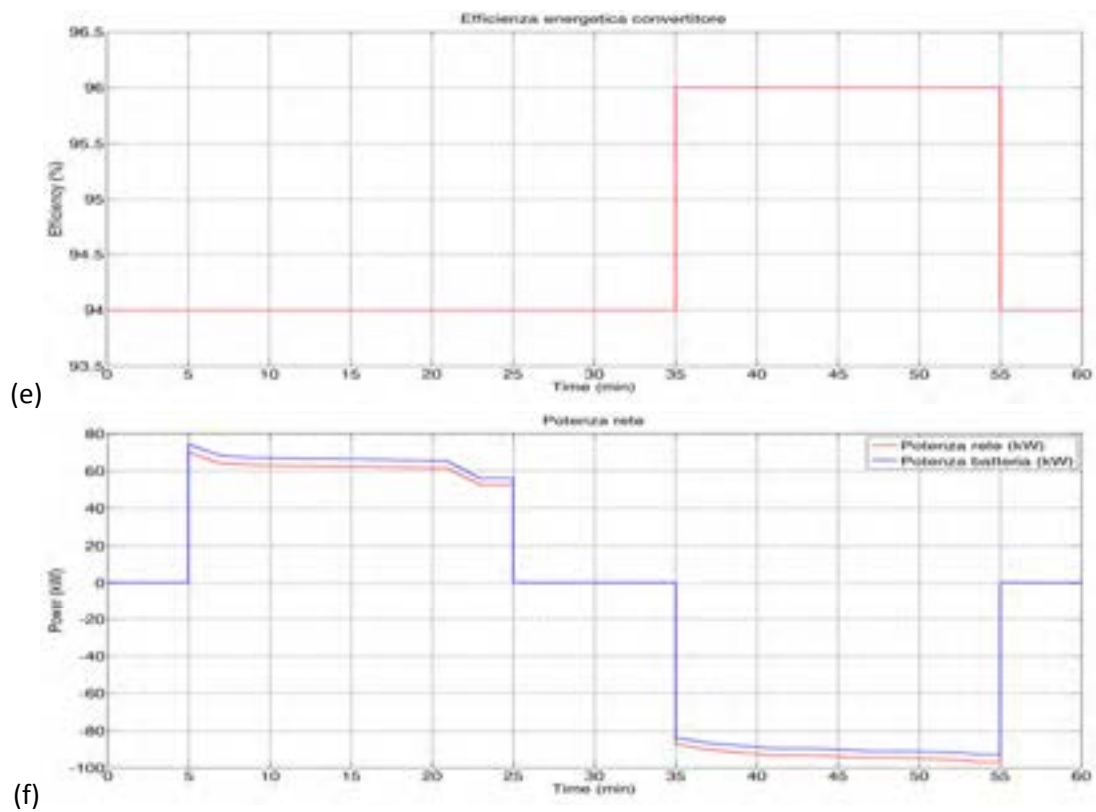


Figura 47. Risposta della batteria Ni-MH da 24.8 kWh e 62 Ah ad una scarica completa e successiva ricarica ad 3C: (a) corrente di batteria; (b) tensione di batteria; (c) SOC; (d) Efficienza energetica di batteria al completamento del ciclo; (e) Efficienza energetica convertitore; (f) Potenza convertitore lato batteria e lato rete.

5.4 Test convertitore

Al fine di testare il corretto funzionamento del modello implementato per il convertitore elettronico di potenza bidirezionale, è stata eseguita una serie di test finalizzata alla valutazione dell'efficienza energetica del convertitore imponendo determinati andamenti di potenza lato batteria.

I test non sono rappresentativi di un caso realistico di funzionalità V2G, ma mirano piuttosto a stressare il modello di simulazione (ad esempio con una variazione a gradino della tensione di batteria) per verificarne la robustezza; i test valutano l'efficienza energetica sulla base delle caratteristiche mostrate in Figura 48. Tale mappatura, dedotta dai dati riportati in [17] (si veda Figura 11), permette di determinare l'efficienza energetica del convertitore in funzione dalla potenza lato batteria (in percentuale rispetto alla taglia scelta per il convertitore) e dalla tensione lato batteria.

L'inserimento di tali caratteristiche nelle LUTs del modello implementato permette la valutazione dell'efficienza non solo sulle caratteristiche stesse, ma su tutto il piano per mezzo di un'opportuna interpolazione.

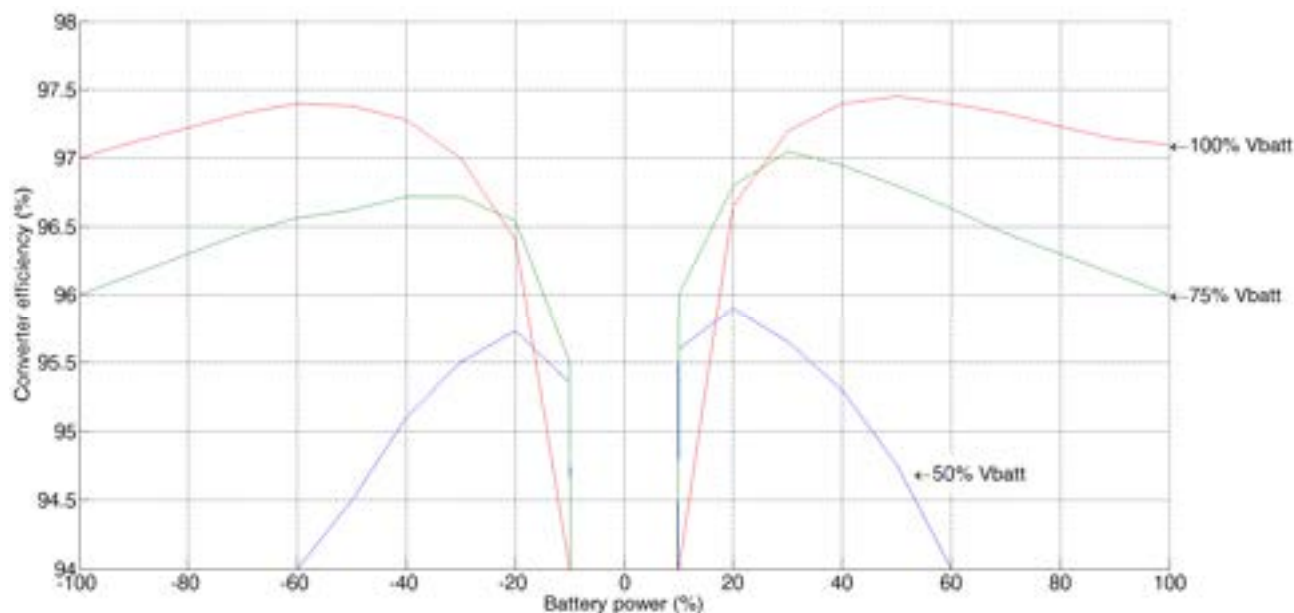


Figura 48. Curve di efficienza energetica convertitore elettronico di potenza bidirezionale.

In Figura 49 sono riportati gli andamenti di corrente e tensione lato batteria, efficienza energetica del convertitore e potenza lato batteria e lato rete.

Nel test eseguito, della durata di 200 secondi, è stata imposta una corrente iniziale lato batteria pari a 50 A, la quale è poi stata fatta diminuire a rampa come mostrato in Figura 49(a). Come precedentemente detto in Sezione 4.1, una corrente negativa del convertitore indica un flusso energetico dalla batteria verso la rete (ovvero scarica della batteria); pertanto, nella simulazione eseguita, la corrente lato batteria è negativa volendo simulare la scarica della batteria stessa.

La tensione lato batteria è stata imposta pari a 300 V per la prima metà di simulazione e pari a 400 V nella seconda metà, con una variazione a gradino come mostrato in Figura 49(b).

In Figura 49(c) è mostrata l'efficienza energetica del convertitore ottenuta per mezzo delle mappature inserite nelle LUTs (riportate in Figura 48). Trascorsi 100 secondi dall'inizio della simulazione, si ha una variazione a gradino dell'efficienza per via della variazione a gradino imposta alla tensione lato batteria. Va precisato che, a differenza della batteria per la quale l'efficienza energetica assume un'accezione realistica solo al completamento di un ciclo di carica/scarica, per il convertitore elettronico l'efficienza viene valutata per ciascun passo di simulazione.

In Figura 49(d) sono mostrati gli andamenti della potenza elettrica lato batteria e lato rete. Coerentemente con l'andamento della corrente, anche gli andamenti delle potenze sono negativi trattandosi di una scarica della batteria.

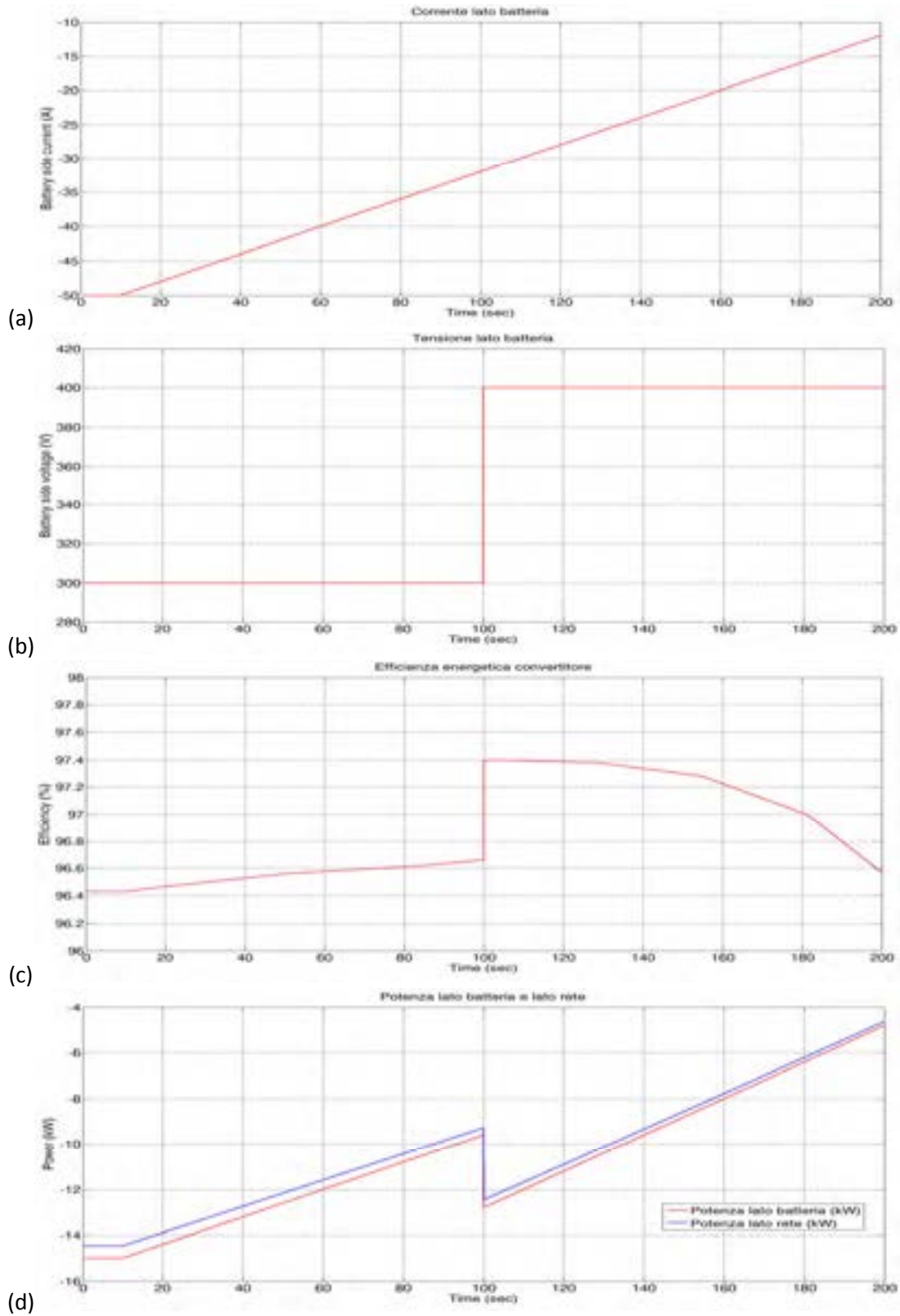


Figura 49. Test modello convertitore durante una fase di scarica della batteria: (a) corrente lato batteria; (b) tensione lato batteria; (c) Efficienza energetica del convertitore; (d) Potenza elettrica lato batteria e lato rete.

In Figura 50 sono riportati gli andamenti dell'efficienza energetica del convertitore e della potenza elettrica del convertitore lato rete e lato batteria per scarica e carica ad 1C di una batteria Li-ion, analogamente a quanto riportato in Figura 42. Nel caso di Figura 42 i risultati sono stati ottenuti considerando l'efficienza energetica del convertitore costante e differenziata per carica (96%) e scarica (94%) della batteria; in quest'ultimo caso l'efficienza del convertitore è stata valutata per mezzo delle mappature implementate nelle LUTs.

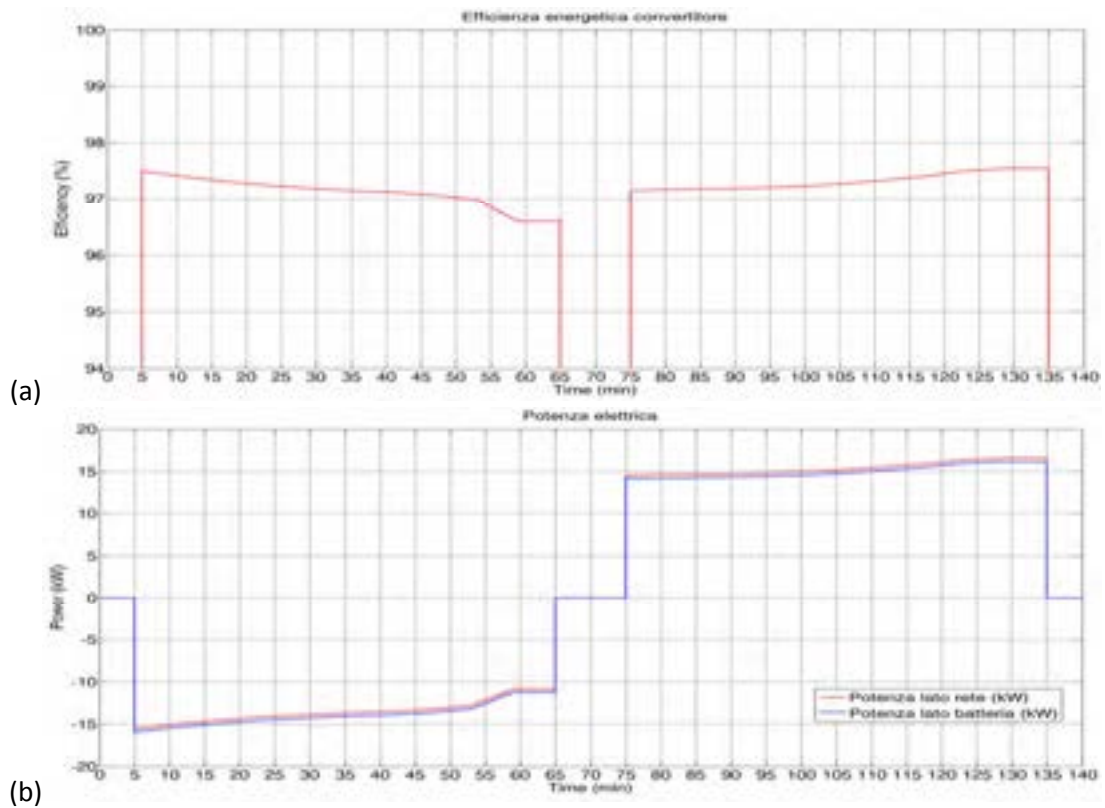


Figura 50. Test modello convertitore sul ciclo presentato in Figura 42 con batteria Li-ion: (a) Efficienza energetica convertitore; (b) Potenza elettrica convertitore lato rete e lato batteria.

5.5 Esempio di simulazione su ciclo

In Figura 51 è mostrato un esempio di simulazione su di un profilo giornaliero di assorbimento di potenza dedotto dalle misure effettuate ad intervalli di 15 minuti sul lato media tensione di una stazione di trasformazione alta tensione/media tensione mostrate in Figura 15. In particolare si è preso in esame il profilo riferito a una giornata festiva estiva, caratterizzata da assorbimenti medio-bassi, che presenta nelle ore centrali della giornata un assorbimento negativo dovuto alla presenza di un parco fotovoltaico.

Come detto, l'obiettivo del concetto V2G è sia quello di far fronte all'eccesso di offerta energetica sfruttando le batterie dei veicoli elettrici connessi alla rete come elementi di stoccaggio distribuito, sia di sopperire ai picchi di richiesta energetica sfruttando l'energia immagazzinata nelle batterie dei veicoli elettrici. Pertanto, sulla base del profilo di potenza di riferimento (Figura 51(a)), sono stati supposti per la simulazione in oggetto un limite inferiore ed uno superiore oltre i quali si ha il consenso/richiesta da parte del sistema di gestione della rete per l'assorbimento/generazione di energia da parte dei veicoli elettrici connessi.

Per la simulazione eseguita si è assunto come limite inferiore 0 kW al fine di limitare/eliminare l'inversione del segno della potenza, sfruttando l'eccesso di offerta per ricaricare i veicoli e come limite superiore 1200 kW in modo da sopperire al picco di domanda grazie all'energia disponibile a bordo dei veicoli.

In considerazione del fatto che la stazione sulla quale sono state fatte le misure serve una popolazione di circa 12000 persone, si è ipotizzato, a puro titolo di esempio applicativo, un fattore di penetrazione del 25% di veicoli equipaggiati con tecnologia V2G sulla totalità dei nuclei familiari serviti; si è inoltre supposto che almeno il 25% dei veicoli totali sia connesso contemporaneamente alla rete. Pertanto, gli andamenti di potenza con V2G riportati in Figura 51 sono stati ottenuti considerando un parco veicoli connesso alla rete pari a 200.

Le simulazioni sono state eseguite considerando tutti i veicoli equipaggiati con batteria Ni-MH da 24 kWh, con uno stato di carica iniziale pari al 40%. Considerando il maggior degrado degli accumulatori elettrochimici ad elevate correnti, si è fatta l'ipotesi che sia la carica che la scarica delle batterie veicolari avvenga con un C-rate pari ad C10. Inoltre, la simulazione è stata eseguita considerando un limite superiore di SOC durante la carica delle batterie pari al 90% ed un limite inferiore pari al 40%. Quest'ultimo in particolare, non è stato imposto solo in un'ottica di minor degrado delle batterie, ma anche per un approccio di simulazione realistico in considerazione delle esigenze di mobilità dell'utente automobilistico, il quale necessita di una soglia di ricarica minima del veicolo qualora si presenti la necessità improvvisa di utilizzo del mezzo.

Come si può vedere in Figura 51(a), quando il profilo di potenza della rete tende ad essere negativo, la rete dà il consenso alla ricarica dei veicoli incrementando così la domanda ed ottenendo l'andamento di Figura 51(b). Analogamente, quando il profilo di potenza della rete tende ad essere superiore a 1200 kW si richiede ai veicoli di sopperire a tal eccesso di domanda scaricandone le batterie. Va precisato che, in riferimento al ciclo mostrato in Figura 51(a), nonostante nelle prime ore della giornata il profilo di potenza della rete sia superiore al limite di 1200 kW, non vi è intervento del V2G. Ciò è dovuto al fatto che la simulazione è stata eseguita supponendo le batterie con un SOC iniziale pari al limite inferiore del 40%; pertanto, nonostante la rete richieda il funzionamento in generazione da parte dei veicoli, i veicoli stessi non danno il consenso ad operare in tal modo essendo le batterie al limite minimo di carica consentito per al operazione.

In Figura 51(c) è mostrato l'andamento dello scambio energetico tra la rete ed i veicoli; come si può vedere, nonostante vi sia stato un ciclo completo di carica e di scarica delle batterie, l'energia totale scambiata non risulta pari a zero al termine del ciclo; la quota parte mancante è dovuta alle perdite energetiche dell'intero sistema.

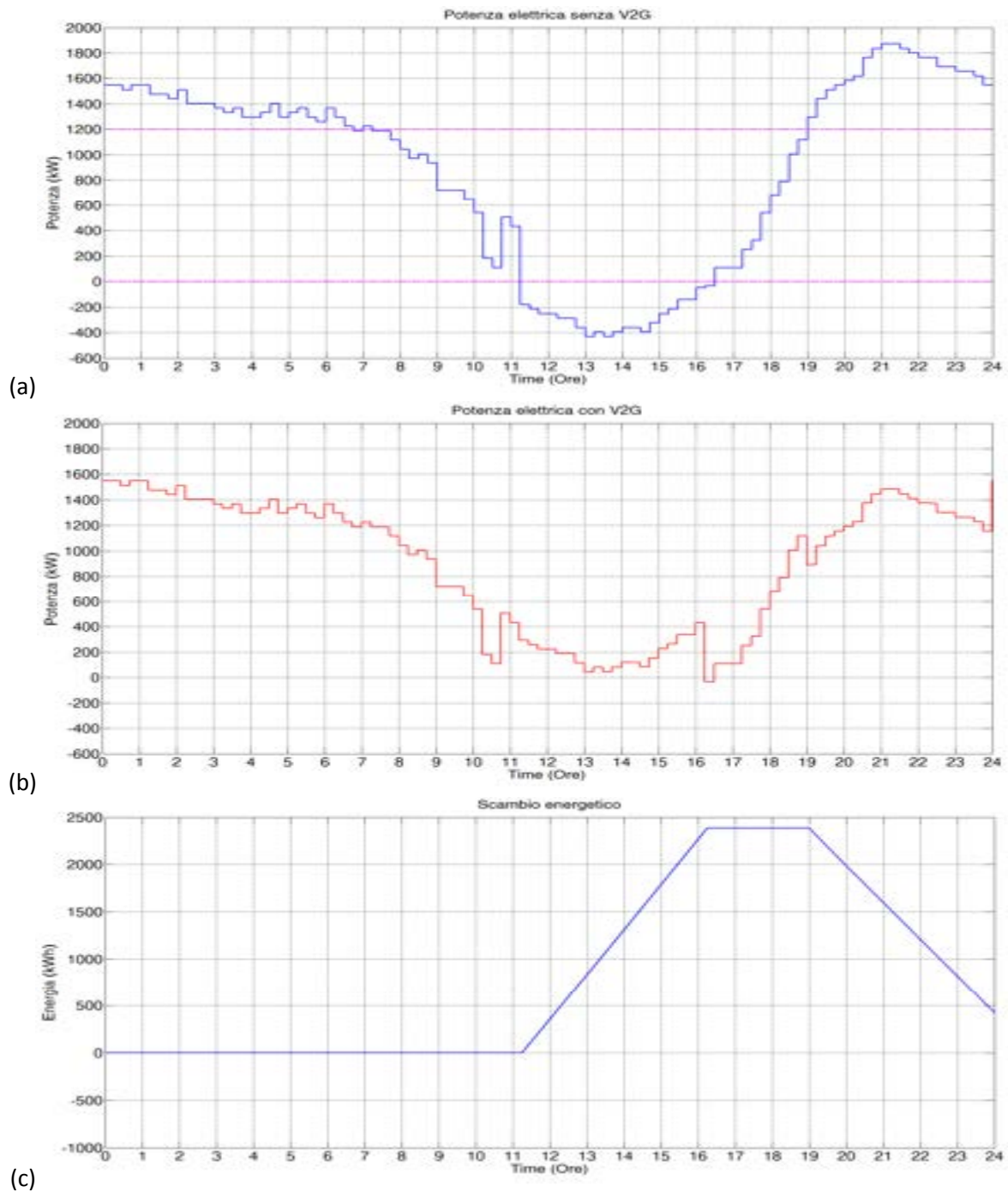


Figura 51. Esempio di simulazione su profilo giornaliero di assorbimento di potenza: (a) Potenza elettrica senza V2G; (b) Potenza elettrica con V2G parco di 200 veicoli; (c) Scambio energetico con la rete con convertitore da 21 kW.

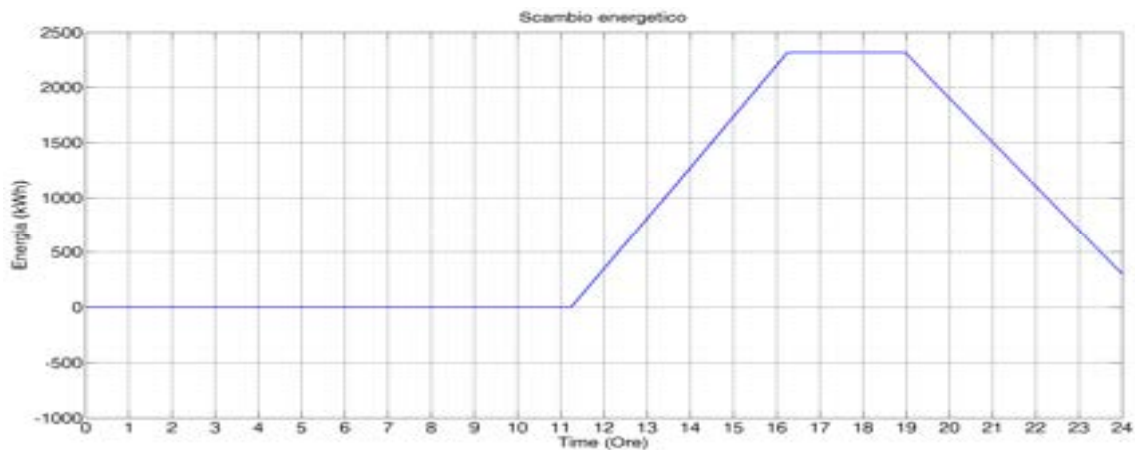


Figura 52. Scambio energetico con la rete con convertitore da 10 kW.

Gli andamenti riportati in Figura 51 sono stati ottenuti assumendo un convertitore elettronico di potenza bidirezionale di potenza nominale pari a 21 kW. In Figura 52 è mostrato lo scambio energetico tra rete e veicolo in una simulazione eseguita con convertitore da 10 kW. Come si evince confrontando Figura 51(c) e Figura 52, le perdite energetiche totali che si hanno con il convertitore di taglia inferiore sono minori. Infatti, facendo riferimento alle curve di efficienza energetica del convertitore mostrate in Figura 48, opportunamente riscalate in funzione della taglia del convertitore, per potenze ridotte l'efficienza è particolarmente bassa (a C10 la batteria in analisi lavora ad una potenza di circa 2.4 kW alla tensione nominale, cioè poco più del 10% della potenza del convertitore da 21 kW). Con il convertitore da 10 kW il punto di lavoro è pari a circa il 25% che, secondo le caratteristiche di Figura 48, presenta un'efficienza maggiore.

Considerando che, dal punto di vista delle batterie, è preferibile un regime di carica/scarica lento (correnti ridotte) al fine di non accelerarne il degrado, tal esempio permette di quantificare il potenziale vantaggio di un caricabatteria di taglia ridotta, e quindi più adatto per una ricarica lenta del veicolo, che lavori in condizioni di maggiore efficienza, rispetto ad un convertitore di taglia maggiore e quindi adatto a ricariche veloci (*fast-charging*) che si trovi a lavorare a potenza ridotta per la maggior parte del suo utilizzo.

In Tabella 6 sono riportati in dettaglio, sia per la simulazione con convertitore da 21 kW che quella con convertitore da 10 kW, i valori di energia totale di scarica e di carica misurate al punto di allacciamento del veicolo alla rete, l'energia totale persa e l'efficienza totale del sistema.

Tabella 6. Simulazioni su ciclo con 200 veicoli con batteria Ni-MH da 24 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 10 kW	2008	2313	305	87
Convertitore da 21 kW	1958	2387	429	82

6 Conclusioni

L'attività di ricerca svolta è stata finalizzata allo sviluppo di un modello energetico parametrizzato che consente di determinare le perdite ed i rendimenti, in diverse condizioni operative, di un sistema di accumulo veicolare con funzioni di accumulo distribuito sulla rete di bassa tensione.

Sono state individuate e definite le topologie circuitali e le taglie di tensione, corrente e potenza dei convertitori bidirezionali per l'interfacciamento del sistema di accumulo veicolare con la rete elettrica di bassa tensione e delle tecnologie elettrochimiche di potenziale interesse per l'applicazione del concetto V2G.

L'approccio modellistico adottato per il presente studio è 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 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 nell'ambito della gamma considerata.

Ciascun componente del modello implementato è stato testato singolarmente per mezzo di una campagna di simulazioni di test al fine di verificarne il corretto funzionamento. Successivamente si è eseguito un esempio di simulazione del sistema completo facendo riferimento ad un profilo di assorbimento giornaliero misurato in una stazione di trasformazione nel nord Italia in una giornata festiva estiva. Tal simulazione è stata eseguita considerando la contemporaneità di connessione alla rete di un determinato numero di veicoli equipaggiati con tecnologia V2G, chiamati ad agire per il livellamento del profilo di carico e, in particolare, ad evitare l'inversione del segno della potenza.

Programmato il diagramma di carico della rete, ad esempio un andamento giornaliero, è possibile inserire le soglie per l'attivazione della carica/scarica: tipicamente per richiedere al veicolo di assorbire dalla rete in corrispondenza di valori di carico bassi o negativi, e per richiedere di generare verso la rete, in concomitanza con i picchi di carico. Definiti in questo modo gli intervalli di carica/scarica, il modello restituisce i valori di energia scambiata tra rete e veicolo. Il simulatore consente pertanto di determinare, note le caratteristiche energetiche di un dato sistema di ricarica, come al variare del regime di carica scarica si modificano perdite ed efficienza complessiva, e quindi valutare la convenienza energetica della funzionalità V2G. Al contrario, fissata la modalità di carica/scarica il simulatore consente di determinare le perdite e l'efficienza complessiva al variare della taglia e delle caratteristiche energetiche del convertitore e della batteria. Infine, le informazioni ed i dati prodotti dal modello, se abbinati a dati tariffari, consentiranno di valutare la convenienza economica vista dal *prosumer* (il veicolo è sia utilizzatore che generatore) e/o dal gestore della rete.

7 Riferimenti bibliografici

1. T. Huria, G. Sanna, G. Pedè, "Systematic development of series-hybrid bus through modelling", *IEEE-VPPC Vehicle Power and Propulsion Conference*, pp. 1-6, 2010. .
2. L. Buzzoni, G. Pedè, "New Prospects For Public Transport Electrification", *IEEE-ESARS Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion*, pp. 1-5, 2012.
3. M. Ceraolo, G. Pedè, "Techniques for Estimating the Residual Range of an Electric Vehicle", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol.50, No.1, pp. 109-115, January 2001.
4. C. Polini, A. Di Napoli, G. Pedè, E. Rossi, C. Villante, "Energy management in Hybrid Electric Vehicle with ICE and Ultracapacitors", *IEEE-ESARS Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion*, pp. 1-6, 2010.
5. 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.
6. E. Ragazzi, "Lo stato dell'arte sulle smart grid: orientamenti, attori, prospettive ", *Rapporti Tecnici Ceris 2011*.
7. 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.
8. W. Kempton, J. Tomic, "Vehicle-to-grid power fundamentals: calculating capacity and net revenue ", *Journal of Power Sources*; 144(1): 268-79.
9. M.J. Scott, M. Kintner-Meyer, D.B. Elliott, W.M. Warwick "Impacts assessment of plug-in hybrid vehicles on electric utilities and regional US power grids part 2: Economic assessment", *Pacific Northwest National Laboratory*, 2007.
10. A.Y. Saber, G.K. Venayagamoorthy, "Resource Scheduling Under Uncertainty in a Smart Grid with Renewables and Plug-in Vehicles", *IEEE System Journal*, Vol.6, No.1, pp. 103-109, May 2012.
11. M. Yilmaz, P.T. Krein, "Review of Battery Charger Topologies, Charging Power Levels, and Infrastructures for Plug-In Electric and Hybrid Vehicles", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol.28, No.5, pp. 2151-2169, May 2013.
12. M. Yilmaz, and P.T. Krein, "Review of the Impact of Vehicle-to-Grid Technologies on Distribution Systems and Utility Interfaces", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol.28, No.12, December 2013, pp.5673-5689.
13. A. Khaligh, S. Dusmez, "Comprehensive Topological Analysis of Conductive and Inductive Charging Solutions for Plug-In Electric Vehicles", *IEEE Trans. On Vehicular Tech.*, Vol. 61, No. 8, pp. 3475-3489, Oct. 2012.
14. F. Musavi, M. Edington, W. Eberle, W. G. Dunford, "Evaluation and Efficiency Comparison of Front End AC-DC Plug-in Hybrid Charger Topologies", *IEEE Trans. On Smart Grid*, Vol. 3, No. 1, pp. 413-421, March 2012.
15. Y. Du, S. Lukic, B. Jacobson, A. Huang, "Review of High Power Isolated Bi-directional DC-DC Converters for PHEV/EV DC Charging Infrastructure", *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, pp. 553-560, Sept. 2011.
16. CEI EN 61000-3-12 (EN 61000-3-12:2011-12), Compatibilità elettromagnetica (EMC) Parte 3-12: Limiti - Limiti per le correnti armoniche prodotte da apparecchiature collegate alla rete pubblica a bassa tensione aventi correnti di ingresso $> 16 \text{ A}$ e $\leq 75 \text{ A}$ per fase.
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. Escoda, J. Fontanilles, D. Biel, V. Repecho, R Cardoner and R. Grino, "G2V and V2G operation 20 kW Battery Charger", *EVS27 International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium*, November 17-20, 2013, pp.1-5.

19. H. Bai, A. Taylor, W. Guo, G. Szatmari-Voicu, N. Wang, J. Patterson and J. Kane, "Design of an 11 kW DC/DC converter for a high-efficiency battery charger in electric vehicles", *IET Power Electronics*, Vol.5, Issue 9, pp.1714-1722.
20. BRUSA datasheet, "NLG6 – On – Board – Fast Charger", available on <http://www.brusa.eu>
21. K. Young, C. Wang, L.Y. Wang, K. Strunz, "Electric Vehicle Battery Technologies", *Electric Vehicle Integration into Modern Power Networks*, Editors: Rodrigo Garcia-Valle and João A. Peças Lopes, ISBN 978-1-4614-0133-9, Springer, 2012.
22. C. Mi, M. Abul Masrur, D. Wenzhong Gao, "Hybrid Electric Vehicles, Principles and Applications with Practical Perspectives", ISBN 978-0-470-74773-5, 2011, *John Wiley & Sons, Ltd., Publication*.
23. S. Watanabe, M. Kinoshita, T. Hosokawa, K. Morigaki, K. Nakura, "Capacity fading of LiAl_yNi_{1-x-y}CoxO₂ cathode for lithium-ion batteries during accelerated calendar and cycle life tests (effect of depth of discharge in charge–discharge cycling on the suppression of the micro-crack generation of LiAl_yNi_{1-x-y}CoxO₂ particle)", *Journal of Power Sources*, Vol. 260, 15 August 2014, pp. 50-56.
24. 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.
25. D.W. Dees, V.S. Battaglia, A. Bélanger, "Electrochemical modelling of lithium polymer batteries ", *Journal of Power Sources*, Vol. 110, No.2, 2002, pp. 310-320.
26. C. Min, G.A. Rincon-Mora, "Accurate electrical battery model capable of predicting runtime and I-V performance" *IEEE Trans. on En. Conv.*, Vol.21, No.2, pp.504-511, June 2006.
27. R.C. Kroeze, P.T. Krein. "Electrical battery model for use in dynamic electric vehicle simulations", *IEEE PESC Power Electronics Specialists Conference*, 2008.
28. S. Li, B. Ke, "Study of Battery Modeling using Mathematical and Circuit Oriented Approaches", *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, pp. 1-8, 2011.
29. A.A. Hussein, I. Bataresh, "An Overview of Generic Battery Models", *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, pp. 1-6, 2011.
30. R. Raman, S. Vinod John, "Computationally Efficient and Accurate Modeling of Li-ion Battery", *IEEE Innovative Smart Grid Technologies*, pp. 1-6, 2013.
31. S. Swarup, S.X. Tan, Z. Liu, H. Wang, Z. Hao, G. Shi, "Battery State of Charge Estimation using Adaptive Subspace Identification Method", *IEEE 9th International Conference on ASIC (ASICON)*, pp. 91-94., 2011.
32. M. Einhorn, V. Conte, C. Kral, J. Fleig, "Comparison of Electrical Battery Models using a Numerically Optimized Parameterization Method", *IEEE-VPPC Vehicle Power and Propulsion Conference*, pp. 1-7, 2011.
33. S. Kai, S. Qifang, "Overview of the Types of Battery Models", *Proceedings of the 30th Chinese Control Conference*, pp. 3644-3648, 2011.
34. T. Markel, A. Brooker, T. Hendricks, V. Johnson, K. Kelly, B. Kramer, M. O’Keefe, S. Sprik, K. Wipke, "ADVISOR: a system analysis tool for advanced vehicle modeling", *Journal of Power Sources*, Vol. 110, No.2, 2002, pp. 255-266.
35. Micheal Root: "The TAB Battery Book: An In-Depth Guide to Construction, Design, and Use", *Mc-Graw Hill/Tab Electronics*, 2010.
36. T. Huria, M. Ceraolo, J. Gazzarri and R. Jackey, "High fidelity electrical model with thermal dependence for characterization and simulation of high power lithium battery cell", *in Proc. of IEEE International Conference of Electrical Vehicles (IEVC)*, March 2012, pp. 1-8.
37. BRUSA datasheet, "BDC546-Bidirectional 750V DC/DC-Converter", available on <http://www.brusa.eu>
38. Boston Power datasheet, "Sonata[®] 5300 Rechargeable Lithium-ion Cell", available on <http://www.boston-power.com>
39. Boston Power datasheet, "Swing[®] 5300 Rechargeable Lithium-ion Cell", available on <http://www.boston-power.com>
40. Tremblay, O., Dessaint, L.-A. "Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV Applications", *World Electric Vehicle Journal*, Vol.3 - ISSN 2032-6653 - 2009 AVERE, EVS24 Stavanger, Norway, May 13 - 16, 2009.

8 Abbreviazioni ed acronimi

BEV	Battery Electric Vehicle
BMS	Battery Management System
DOD	Depth Of Charge
EMI	Electro-Magnetic Interference
EV	Electric Vehicle
EVSE	Electric Vehicle Supply Equipment
HEV	Hybrid Electric Vehicle
HFT	High Frequency Transformer
LUT	Look-Up Table
PEV	Plug-in Electric Vehicle
SOC	State Of Charge
V2G	Vehicle-to-Grid