

POLITECNICO DI MILANO

Facoltà di Ingegneria dei Processi Industriali

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Elettrica

Dipartimento di Elettrotecnica



IL VEICOLO ELETTRICO A SUPPORTO DELLE SMART GRID

Relatore: Prof. BRENNNA Morris

Tesi di Laurea Specialistica
di:
Claudio Cantoni
Matr. 711321

Anno Accademico 2011-2012

INDICE

Introduzione	4
1 - IL TRASPORTO ELETTRICO	
1.1 Introduzione	6
1.2 Componenti di un veicolo elettrico	7
1.3 Standardizzazione	9
1.4 Analisi delle tipologie di veicolo elettrico.....	11
1.4.1 L7e.....	11
1.4.2 M1.....	11
1.4.3 N1.....	12
1.4.4 N2.....	12
1.5 Utilizzo medio dei veicoli	13
1.6 Livelli di penetrazione del trasporto elettrico.....	14
1.7 Range Anxiety.....	16
1.8 Trasporto Pubblico	17
1.8.1 Battery Exchange.....	19
2 - BATTERIE PER LA TRAZIONE ELETTRICA	
2.1 Introduzione	21
2.2 La vita utile delle batterie	22
2.2.1 Effetti della temperatura.....	25
2.3 Carica - Generalità.....	26
2.4 Battery Managing System (BMS).....	27
2.4.1 BMS e V2G.....	32
2.4.1.1 Calcolo dei costi V2G	32
2.4.1.2 Calcolo della riduzione della vita utile delle batterie a causa del V2G.....	33
2.4.1.3 Drive away time.....	33
2.4.2 BMS e sicurezza	33
2.5 Costo delle batterie	34

3 - STAZIONI DI RICARICA E RETE ELETTRICA

3.1	<i>Introduzione</i>	36
3.2	<i>Stazione di carica</i>	36
3.2.1	Contatore intelligente (Smart Meter)	38
3.2.2	Tipologie di carica.....	40
3.2.3	Battery Exchange.....	41
3.3	<i>Impatto sulla rete di distribuzione</i>	43
3.3.1	Impatto sui trasformatori, simulazione	47
3.4	<i>Metodi per la disposizione ottimale delle stazioni di carica</i>	54
3.4.1	Metodo della suddivisione in griglie	54
3.4.1.1	Applicazione	59
3.4.2	<i>Metodo basato sulla richiesta di energia</i>	62
3.4.2.1	Calcolo della richiesta di energia	62
3.4.2.2	Limiti imposti dalla rete di distribuzione.....	64
3.4.2.3	Limiti imposti dallo sviluppo urbanistico.....	65
3.4.2.4	Applicazione dell' algoritmo, città di Chengdu.....	65

4 - SERVIZI DI RETE OFFERTI DAL VEICOLO (V2G)

4.1	<i>Introduzione</i>	68
4.2	<i>Vantaggi del V2G</i>	70
4.2.1	Servizi per la rete.....	70
4.2.2	Aspetti economici.....	72
4.3	<i>V2G Aggregato</i>	73
4.4	<i>Interfaccia</i>	73
4.4.1	Struttura generale	74
4.4.2	Protocolli di comunicazione	77
4.5	<i>Schema di Controllo V2G</i>	79
4.6	<i>Simulazione V2G</i>	80
4.6.1	Carica Semplice	80
4.6.2	Scarica semplice	81
4.6.3	Regolazione verso l'alto e verso il basso.....	82
4.6.4	Simulazione di una giornata	83
4.6.5	Carica eccessiva durante la regolazione	84

5 - INTERFACCIA RETE VEICOLO

<i>5.1 Introduzione</i>	86
<i>5.2 Struttura</i>	86
<i>5.3 Valutazione dello stato di carica (SOC)</i>	88
5.3.1 Misurazione diretta	89
5.3.2 Book Keeping.....	90
5.3.3 Metodo di Coulomb unito a EMF.....	93
<i>5.4 Gestione del processo di carica</i>	95
<i>5.5 Dimensionamento di una stazione di carica</i>	98

6 - L'EVOLUZIONE DELLA RETE

<i>6.1 Introduzione</i>	103
<i>6.2 Smart Home</i>	107
<i>6.3 Energia Rinnovabile</i>	107
<i>6.4 Coinvolgimento del consumatore</i>	108
6.4.1 Indagine sul coinvolgimento dell'utente.....	109
<i>6.5 Gestione della rete</i>	112

<i>Conclusioni</i>	114
---------------------------------	-----

<i>Bibliografia</i>	116
----------------------------------	-----

<i>Sitografia</i>	120
--------------------------------	-----

<i>Indice immagini</i>	122
-------------------------------------	-----

<i>Indice tabelle</i>	123
------------------------------------	-----

INTRODUZIONE

Con l'aumento del prezzo del petrolio e con la paura che questo si possa esaurire, l'elettrificazione dei trasporti viene ormai vista come una necessità. Una evoluzione verso questo tipo di veicoli può portare diversi vantaggi, come la riduzione dell'uso dei derivati del petrolio e la conseguente diminuzione delle emissioni dannose per l'ambiente.

Il principale ostacolo alla elettrificazione dei trasporti risiede però nei costi onerosi delle batterie e nell'elevato numero di celle da utilizzare (con conseguente aumento di peso e costi del pacco batterie) per avere autonomie paragonabili a quelle dei mezzi a combustione interna.

Le proiezioni mostrano come negli anni, con il progredire della tecnica, le batterie costeranno sempre meno, saranno sempre più piccole e avranno prestazioni sempre migliori.

Attualmente i veicoli puramente elettrici (EV), in base alla categoria di appartenenza, montano batterie con capacità che vanno dagli 8kWh ai 200kWh, potenze che sarebbero in grado di alimentare più di 2 appartamenti per diversi giorni.

Alcuni studi, ma anche la pratica comune, hanno dimostrato che mediamente un veicolo si trova parcheggiato per più del 80% della sua vita e che gli spostamenti settimanali si riducono al tragitto casa-lavoro.

È proprio da queste considerazioni che nasce l'idea di poter vedere le automobili elettriche non solo come mezzi di trasporto, ma come un elemento attivo in grado di svolgere un ruolo nella gestione della potenza presente in linea.

L'automobile elettrica, una volta connessa alla rete elettrica, viene quindi vista come una parte integrante del sistema capace di fornire energia nei momenti di massima richiesta (scaricando la batteria) e di assorbire il surplus di energia prodotto nei momenti con minore richiesta (ricaricando la batteria).

Tutto questo, però, è realizzabile solo con l'introduzione delle Smart Grid e con l'uso di colonnine di ricarica intelligenti in grado di monitorare i bisogni della rete e di conseguenza gestire il processo di carica/scarica della batteria dell'automobile.

Questo è un progetto ambizioso che, una volta a regime e integrato con fonti di energia rinnovabile, può portare notevoli vantaggi come:

- creazione di isole elettricamente autonome
- riduzione dei consumi per la generazione dell'energia elettrica
- tutela ambientale
- ottimizzazione dell'energia presente sulla rete

- vantaggi economici per l'utilizzatore che mette la sua auto a disposizione della rete.

La realizzazione di questo progetto si scontra però con delle problematiche piuttosto importanti.

La prima è che la rete deve diventare intelligente, cioè deve diventare una Smart Grid. Questo richiede interventi di ammodernamento e di introduzione di strumenti di lettura delle grandezze di rete in grado di dialogare in tempo reale tra loro.

Un secondo problema consiste nel connettere in maniera intelligente l'auto elettrica alla rete, quindi nel costruire un'interfaccia in grado di monitorare i bisogni della rete e gestire l'interazione con l'automobile connessa.

Un'altro aspetto che non va sottovalutato è quello relativo al degrado delle prestazioni della batteria, direttamente collegato al numero di cicli di carica/scarica.

Non da ultimo va considerato anche il fatto che lo scopo principale dell'automobile è quello di spostare le persone da un punto all'altro, quindi deve rimanere nella batteria un livello di carica tale da consentire gli spostamenti all'utilizzatore.

Queste e altre problematiche verranno studiate all'interno di questo elaborato.

CAPITOLO 1 - IL TRASPORTO ELETTRICO

1.1 Introduzione

Quando si parla di trasporto elettrico, il primo pensiero è legato all'autonomia e alla capacità di percorrere chilometri con la tranquillità di avere sufficiente energia per proseguire il proprio viaggio. Attualmente, sotto questo punto di vista, le batterie non garantiscono ai veicoli elettrici le stesse prestazioni delle auto con motore a combustione interna e l'attuale scarsità di colonnine di ricarica o di stazioni di scambio della batteria non fanno altro che contribuire ad alimentare la cosiddetta "Range Anxiety" (1.7) ovvero la paura di rimanere con la batteria scarica in luoghi nei quali è impossibile la ricarica.

Con lo sviluppo della tecnologia si produrranno batterie con un rapporto potenza/peso sempre maggiore e dai costi sempre più contenuti, quindi sarà possibile aumentare notevolmente l'autonomia.

Attualmente l'unico modo per aumentare la distanza percorribile con i veicoli puramente elettrici è quello di installare batterie con capacità sempre maggiore, ma questo si scontra con il costo finale eccessivo del pacco batterie e con il suo peso che andrebbe a incidere enormemente sulla massa totale del veicolo.

Il problema dell'autonomia limitata, sebbene sia reale, è però un problema relativo: recenti studi dimostrano come un'automobile percorra poche centinaia di chilometri a settimana (in media 37km al giorno), la maggior parte dei quali dedicati al percorso casa-lavoro. Gli attuali veicoli elettrici (EV) coprono ampiamente questa distanza con una sola carica, quindi è possibile effettuare gli spostamenti con tranquillità e ricaricare l'auto di notte.

Attualmente i veicoli con motorizzazione elettrica si dividono in:

- veicoli elettrici ibridi (HEV): hanno un motore a combustione interna accoppiato ad una trazione elettrica. A seconda della velocità del veicolo, subentra una delle due tipologie di trazione o entrambe. Le batterie vengono ricaricate dal motore a combustione interna e hanno una bassa autonomia. Non è possibile collegarli alla rete di alimentazione.

- veicoli elettrici ibridi collegabili alla rete di alimentazione (PHEV): sono veicoli ibridi che utilizzano batterie con autonomia maggiore rispetto ai veicoli ibridi tradizionali. La batteria viene caricata dal motore a combustione, ma può anche essere ricaricata collegando il veicolo alla rete di alimentazione.

- veicoli elettrici (EV): sono veicoli con trazione esclusivamente elettrica. Le batterie montate hanno autonomia maggiore rispetto a quelle presenti sui veicoli ibridi e per essere ricaricate devono essere collegate alla rete.
- veicoli elettrici con autonomia estesa (EREV): utilizzano una batteria come fonte primaria di alimentazione ma montano anche un motore a combustione interna per sostenere la carica della batteria estendendo così l'autonomia del veicolo.

L'autonomia di un veicolo elettrico non dipende solo dalla capacità delle batterie installate ma risente del tipo di utilizzo del veicolo, della temperatura dell'ambiente in cui si trova ad operare, dei consumi dei servizi ausiliari a bordo e dal tipo di guida del conducente.

Ci sono diversi fattori che devono essere sviluppati affinché l'auto elettrica abbia successo nel mercato, ma l'aspetto che deve essere maggiormente curato è quello della standardizzazione delle stazioni di carica e delle interfacce, così da permettere all'automobilista di poter collegare la sua auto in un qualsiasi punto di carica.

Un altro aspetto della standardizzazione è quello di arrivare a un formato comune di batterie così da poter istituire punti di scambio in cui sostituire la propria batteria scarica con una pronta all'uso. Questo scenario è di difficile realizzazione nell'ambito dell'auto elettrica privata, ma è già realtà nel campo del trasporto pubblico. (1.8.1).

1.2 Componenti di un veicolo elettrico

La seguente figura mostra uno schema logico dei principali componenti di un veicolo elettrico e come interagiscono tra loro.

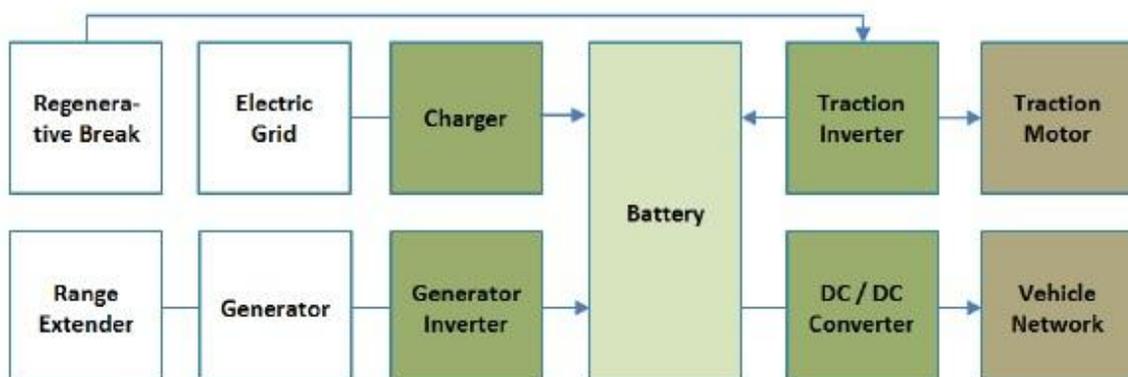


Figura 1 - Schema logico di connessione dei principali elementi di un veicolo elettrico

Una breve descrizione dei componenti:

Range Extender e Generator: è un motore a combustione interna che permette di prolungare l'autonomia del veicolo fornendo l'energia direttamente alla trasmissione o ricaricando le batterie una volta scariche. Il generatore trasforma energia meccanica in energia elettrica e può essere integrato nel Range Extender così da ridurre gli ingombri.

Generator Inverter: permette di trasformare in corrente continua la corrente alternata fornita dal generatore.

Electric Grid e Charger: la rete fornisce l'energia elettrica alle stazioni di carica. Queste sono molto importanti per la penetrazione del veicolo elettrico perché è dalla loro distribuzione e densità che dipende la possibilità di ricaricare il veicolo e di non alimentare i fenomeni di "range anxiety" (1.7). Attualmente le stazioni di carica sono esterne, le cosiddette colonnine, ma non si esclude che in futuro le automobili elettriche possano ospitare il proprio caricabatterie a bordo.

Questo componente è caratterizzato da un'elevata efficienza elettrica, oltre il 93%.

Regenerative Break: è il sistema di frenata rigenerativa, un modo per sfruttare l'energia cinetica prodotta durante la frenata per generare energia elettrica con la quale ricaricare le batterie. Una prima fase di decelerazione viene effettuata dal generatore (frenatura elettrica) per poi passare alla frenata vera e propria attraverso il sistema frenante principale.

Traction Inverter: questo inverter permette di trasformare l'energia prodotta dalla frenata rigenerativa in modo da usarla per ricaricare le batterie. Permette anche il controllo della potenza fornita dalla batteria per l'alimentazione del motore di trazione. Controlla l'ampiezza e la frequenza della corrente alternata fornita al motore e, di conseguenza, controlla la velocità del veicolo in base alla posizione del pedale dell'acceleratore.

Motor: il motore elettrico permette di erogare una coppia elevata anche a bassi giri ed è per questo che non è richiesto un sistema di trasmissione con un cambio di marce. Dal punto di vista tecnico, il motore elettrico è conosciuto molto bene. La sua applicazione nel settore delle automobili, però, pone diverse sfide tecniche. La principale è quella di riuscire a soddisfare le richieste di potenza del motore nel minor spazio possibile garantendo anche una discreta autonomia; occorre quindi che il motore abbia potenza ed efficienza elevate ed è per questo che il più usato è il motore sincrono AC.

Battery: è l'ostacolo principale al successo dei veicoli elettrici; per questo motivo la necessità di sviluppare batterie più adeguate è diventata sempre più importante.

Attualmente le batterie riescono ad immagazzinare fino a 140-170 Wh/kg contro i 1300Wh/kg disponibili nei combustibili fossili quindi serve una batteria molto pesante per soddisfare le stesse richieste di potenza del motore. Un altro fattore da tenere in considerazione è la variazione delle prestazioni in funzione della temperatura di utilizzo della batteria.

Attualmente le batterie hanno un costo molto elevato e incidono pesantemente sul prezzo finale del veicolo. Le problematiche delle batterie nell'ambito della trazione elettrica verranno trattate approfonditamente nel capitolo 2.

Vehicle Network: è la parte più importante del veicolo. E' costituita da un insieme di moduli di controllo che comunicano in tempo reale tra loro facilitando la gestione del veicolo. Questi moduli comunicano con il guidatore attraverso un'interfaccia chiamata unità di bordo. Lo sviluppo di un'unità di bordo chiara, efficace, facile da usare e che comprenda accorgimenti per ridurre la "range anxiety" costituisce il punto chiave per lo sviluppo commerciale dei veicoli elettrici.

1.3 Standardizzazione

Dal punto di vista hardware, la standardizzazione è il punto cruciale per l'interoperabilità tra le strutture di carica perché consente al guidatore di poter ricaricare la sua auto ovunque ce ne sia la possibilità ed è anche il punto cruciale per garantire il successo commerciale dei veicoli elettrici.

I componenti che devono essere uguali per tutti sono il caricabatterie, la presa di ricarica sull'auto, la presa di ricarica in uscita dal caricabatterie e tutti gli altri accessori che permettono il collegamento del veicolo.

Il processo di standardizzazione è portato avanti da enti come lo Standard Development Organizations.

I più importanti e riconosciuti standard per la ricarica delle batterie sono redatti dalla Commissione Elettrotecnica Internazionale (IEC) e dalla Society of Automotive Engineer (SAE). Gli standard proposti da queste organizzazioni sono internazionali, ma la IEC è molto più influente nel mercato europeo mentre la SAE in quello degli Stati Uniti.

La situazione attuale degli standard di carica è riportata nella figura 2.

AC - On-board vehicle charger			
	Specifications (Voltage/Current/Power):	Charging Time (for 25kWh)*	Standardiz. Status
Level 1	120V / up to 16A / up to 1.9kW	17 hrs (20% to full)	SAE J1772
Level 2	240V / up to 80A / up to 19.2kW	1.2-7 hrs (20% to full)	SAE J1772
Level 3	TBD / TBD / > 20kW	TBD	In progress
DC - Off-board vehicle charger			
	Specifications (Voltage/Current/Power):	Charging Time (for 25kWh)*	Standardiz. Status
Level 1	200-450V / up to 80A / up to 36kW	1.2 hrs (20% to full) @ 20kW	In progress
Level 2	200-450V / up to 200A / up to 90kW	20 min. (20% to 80%) @ 45kW	In progress
Level 3	200-600V / up to 400A / up to 240kW	< 10 min. (20% to 80%) @ 45kW	In progress

Figura 2 - Situazione relativa agli standard di carica

Come si può notare, lo standard attualmente in uso negli Stati Uniti è il SAE J1772 che comprende requisiti per le diverse tipologie di carica, protocolli di comunicazione, rispetto della compatibilità elettromagnetica (EMC), sicurezza elettrica e definisce la tipologia di connettori e di accessori necessari per collegare il veicolo.

In Europa lo standard SAE J1772 non è la soluzione più adeguata ed è per questo che la IEC sta elaborando lo standard IEC 61851 che coprirà tutte le problematiche relative alla standardizzazione della carica dei veicoli. Successivamente verrà rilasciato uno standard specifico riguardante i dispositivi di connessione dell'auto alla stazione di carica (IEC 62196).

Attualmente nessuno standard relativo ai connettori è in uso in Europa.

La SAE e la IEC hanno stabilito degli standard per quanto riguarda la carica AC, mentre non hanno ancora prodotto dei documenti riguardo la carica DC.

I progressi più grandi riguardo la standardizzazione della carica DC stanno avvenendo in Giappone, dove si sta sviluppando un sistema in grado di caricare fino a 500V e fino a 125A con relativo sistema standardizzato di connettori. Questo si sta imponendo come lo Standard Giapponese per i Veicoli Elettrici (JEVS) e si sta progressivamente espandendo anche a livello internazionale come riferimento per la carica DC.

Un altro settore che richiede un veloce sviluppo della standardizzazione è quello del Vehicle To Grid (V2G). In quest'ambito, oltre alle normali procedure di carica, occorre standardizzare il flusso bidirezionale della potenza e delle comunicazioni.

L'argomento V2G verrà affrontato in maniera approfondita nel capitolo 4.

1.4 Analisi delle tipologie di veicolo elettrico

Oltre alla macro divisione vista nel paragrafo precedente, i veicoli elettrici (EV) si possono ulteriormente classificare in 4 categorie in base alla potenza installata delle batterie e alla classe di appartenenza del veicolo:

L7e: quadricicli con una massa a vuoto di max 550kg e con un motore con al max 15kW.

M1: veicolo civile, quattro ruote, fino a 8 posti più quello del guidatore

N1: veicolo commerciale, quattro ruote, massa a carico max 3500kg

N2: veicolo commerciale, quattro ruote, massa a carico compresa tra i 3500kg e i 12000kg.

La maggioranza dei veicoli circolanti in Europa è del tipo M1.

1.4.1 L7e

I veicoli L7e, per il codice della strada, devono avere una potenza massima di 15kW. Analizzando i dati dei produttori si nota come in media essi tendano ad equipaggiare questi veicoli con batterie da circa 9kWh per ridurre i costi e per rientrare nei limiti di peso imposti per questa categoria.

Sempre per contenere i costi di produzione, la maggior parte di questi veicoli utilizza batterie al Pb, che in futuro verranno sostituite con batterie Li-Ion per la loro leggerezza e per la semplicità nella gestione.

Per quanto riguarda la potenza di carica i produttori consigliano cariche lente a 1-2kW e come potenza di carica massima 3kW. In questo modo i veicoli possono tranquillamente essere caricati collegandoli all'impianto elettrico domestico.

Per quanto riguarda l'autonomia, sempre ricordando che questa dipende da molteplici fattori e non solo dalla capacità installata, la maggior parte di questi veicoli copre tra i 50km e i 150km, con una media di 84km, con un consumo medio di circa 112Wh/km.

1.4.2 M1

Analizzando i dati dei vari produttori di questo tipo di veicoli si nota come la potenza disponibile alle ruote si estenda su un range molto ampio, dai 20kW fino a 500kW, di conseguenza anche la capacità delle batterie installate coprirà un ampio range in relazione alla potenza del motore installato. La maggior parte di questi veicoli, però, ha una potenza disponibile di circa 50-100kW quindi si ha che la maggior parte delle batterie montate ha una capacità di 10-30kWh, con una media di 28kWh.

Le batterie Li-Ion sono le più utilizzate su questi veicoli e permettono una carica standard a 3kW e anche la possibilità di una carica veloce fino a 240kW.

La maggior parte di questi veicoli ha un'autonomia che si estende tra i 100km e i 250km, con una media di 170km e un consumo medio stimato di circa 160Wh/km.

1.4.3 N1

La potenza media installata su questa tipologia di veicoli spazia dai 20kW fino ai 100kW (in proporzione alle dimensioni del mezzo), con una media che si assesta attorno ai 40-60kW.

Il range delle capacità delle batterie installate varia tra i 10kWh e i 40kWh, con una media di circa 23kWh.

Anche in questo caso la maggior parte dei veicoli utilizza batterie Li-Ion con possibilità di essere ricaricate direttamente dalla rete domestica a 3kW. C'è anche la possibilità di ricarica veloce fino a 45kW.

Anche per questa tipologia di autoveicoli l'autonomia copre un range abbastanza ampio: tra i 50km e i 200km con un consumo medio di 185Wh/km.

1.4.4 N2

Questi veicoli hanno una potenza installata fino a 200kW, con una media attorno ai 100kW. La capacità media delle batterie installate è di 85kWh.

Il futuro di questi veicoli prevede l'utilizzo delle batterie Li-Ion che andranno a sostituire le attuali ZEBRA.

A causa delle grandi batterie installate è molto importante scegliere una potenza di carica adeguata: una carica a 3kW sarebbe molto lenta e impiegherebbe più di 24 ore per completarsi, quindi la minima potenza di carica consigliata è di 10kW; inoltre è possibile effettuare una carica veloce fino a 60kW.

L'autonomia di questi veicoli è elevata grazie alle batterie di grossa capacità installate e si estende fino a 300km, con una media attorno ai 152km.

I consumi sono più elevati a causa delle dimensioni di questi veicoli e del peso trasportato e si assestano, in media, attorno ai 590Wh/km.

1.5 Utilizzo medio dei veicoli

Per comprendere quali siano le caratteristiche di autonomia che un EV deve avere per competere con i veicoli a combustione interna occorre prendere in considerazione i dati sulle distanze giornaliere medie percorse dagli automobilisti.

Mediamente, in un anno, un veicolo di classe M1 percorre circa 14000km. Alcuni studi del 2009 mostrano che la situazione media europea è la seguente:

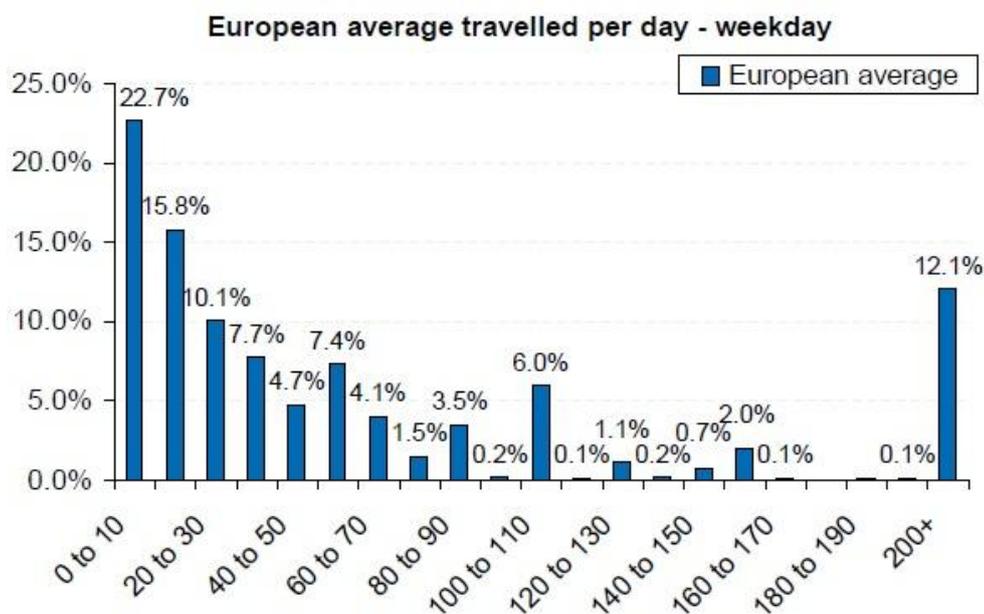


Figura 3 - Distanza giornaliera media percorsa durante la settimana

mentre durante i week end la situazione è la seguente:

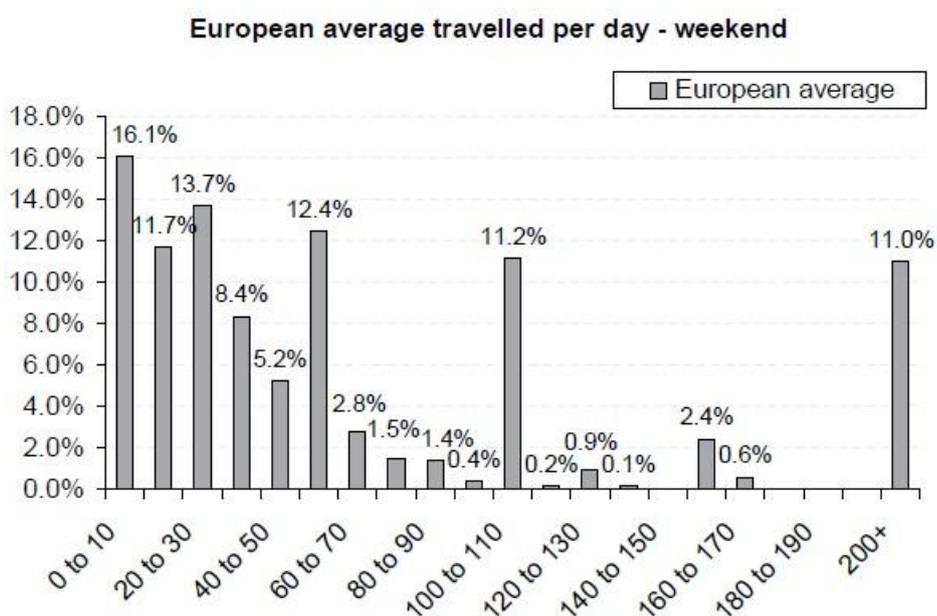


Figura 4 - Distanza giornaliera media percorsa durante il week end

Analizzando questi dati si nota come sia possibile individuare che più dell'87% dei viaggi settimanali si svolge entro 160km, mentre durante il fine settimana i viaggi entro i 160km aumentano fino all'89%.

Il 74% dei viaggi settimanali copre una distanza entro gli 80km (nel week-end scende a 71%) mentre il 61% dei viaggi ha una distanza inferiore ai 50km (55% nei week-end).

Si possono così individuare 3 fasce in cui può essere classificata la distanza media giornaliera percorsa: 160km, 80km, 50km.

Un EV con una capacità installata tale da poter coprire 160km è quindi più che sufficiente per coprire la maggior parte delle esigenze medie di spostamento in Europa, in più richiede piccole quantità di energia per essere ricaricato dopo percorsi brevi.

Un EV con autonomia di 80km è ancora valido per la maggior parte delle esigenze di spostamento, ma la batteria, avendo una capacità inferiore, avrà un livello percentuale di scarica più alto; quindi servirà più energia per ricaricarla.

Un EV con 50km di autonomia permette spostamenti limitati ed è possibile che la batteria si scarichi completamente. Livelli di scarica superiori all'80% della capacità nominale producono effetti negativi sull'efficienza della batteria, sulla sua capacità e sulla sua vita utile.

1.6 Livelli di penetrazione del trasporto elettrico

I dati proposti in questa sezione sono delle previsioni.

Gli studi del progetto MERGE hanno proposto i seguenti 3 possibili scenari per le percentuali di vendite dei veicoli elettrici dal 2010 al 2030:

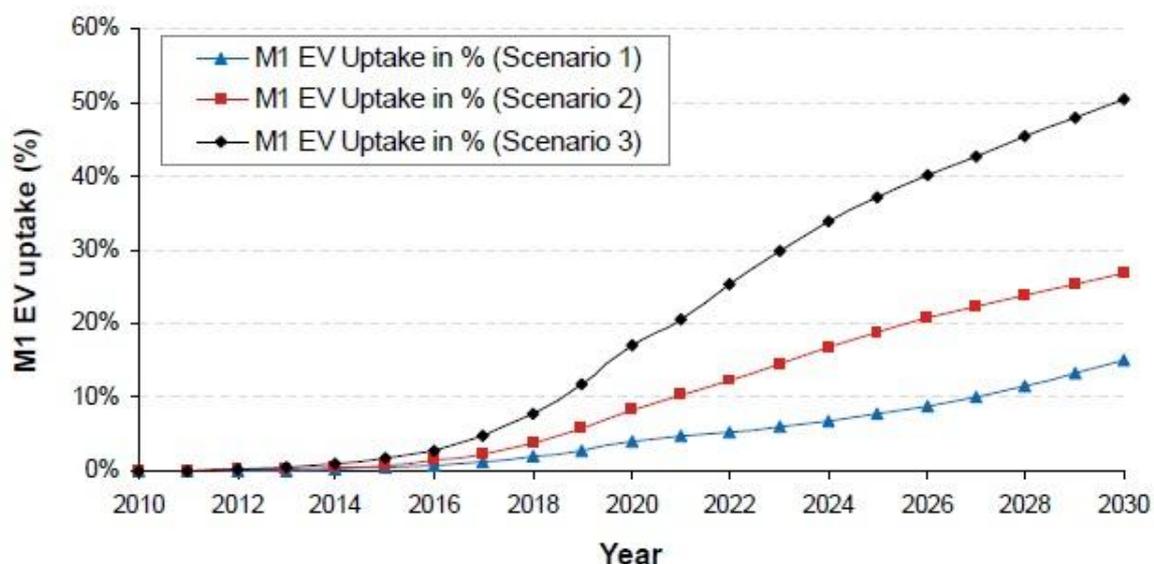


Figura 5 - Possibili scenari di penetrazione del veicolo elettrico

Lo *scenario 1* è quello più probabile, ma non permette di utilizzare i veicoli in un contesto di V2G perché la loro quantità non è sufficientemente elevata per soddisfare le future richieste della rete.

Lo *scenario 2* prevede un livello di penetrazione più aggressivo del precedente ed è perfetto per lo studio dei veicoli in un contesto di V2G.

Lo *scenario 3* propone condizioni migliori dello scenario 2, ma è poco probabile che si verifichi a livello nazionale.

Utilizzando lo scenario 2 è possibile effettuare una previsione del livello di penetrazione dei veicoli elettrici in Europa:

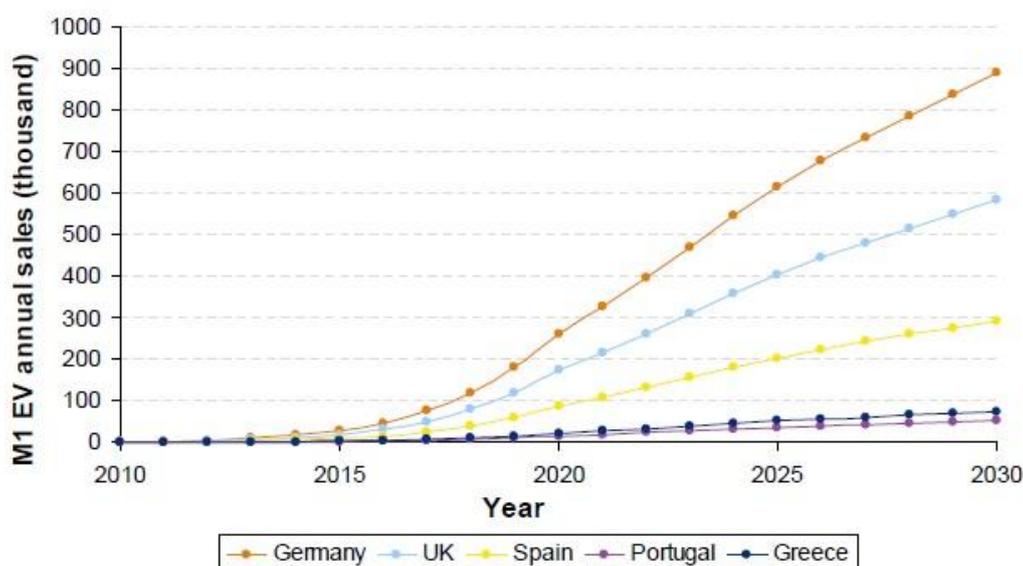
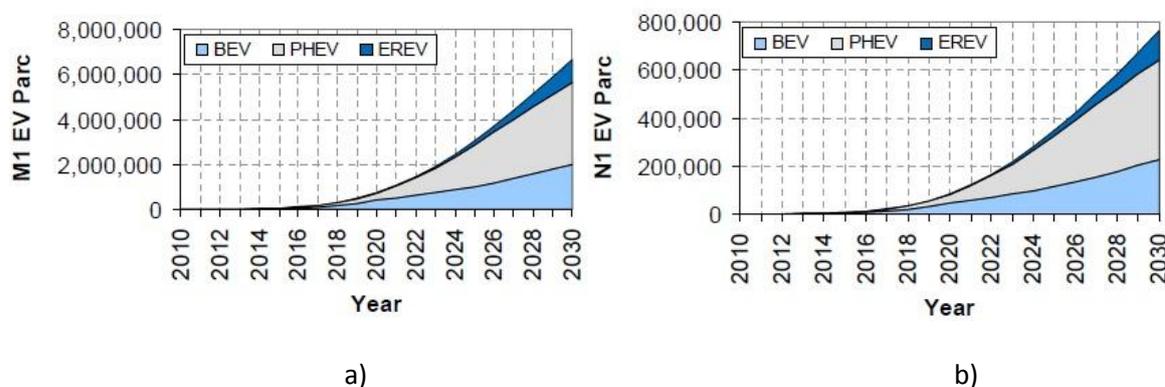


Figura 6 - Proiezione delle vendite di veicoli elettrici in alcuni paesi europei

Utilizzando gli scenari appena visti è possibile inoltre prevedere la futura composizione del parco veicoli elettrici che sarà disponibile nei vari paesi europei.

Prendendo in considerazione la Germania, la situazione proposta è la seguente:



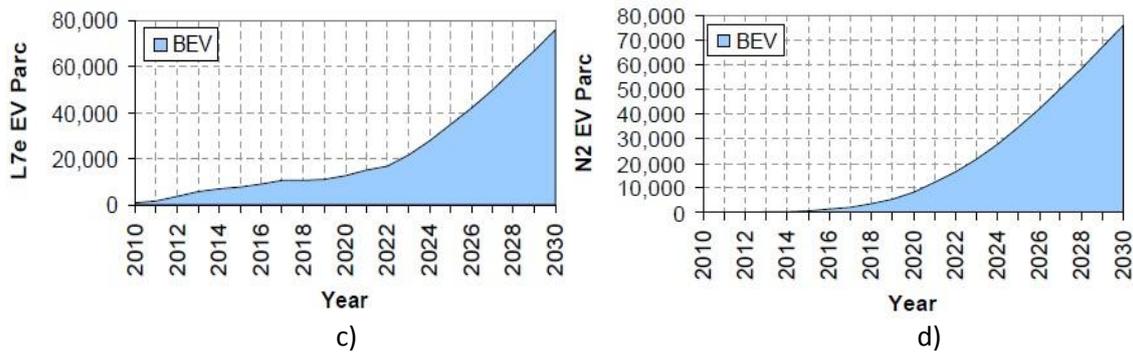


Figura 7- a) Proiezione vendite veicoli M1 b) Proiezione vendite veicoli N1
c) Proiezione vendite veicoli L7e d) Proiezione vendite veicoli N2

Si stima che anche gli altri Paesi Europei seguiranno questi profili di crescita rispettando le stesse proporzioni nella suddivisione in classi dei veicoli.

1.7 Range Anxiety

Range Anxiety è un termine associato agli EV in riferimento alla loro limitata autonomia e al poco sviluppato sistema di punti di ricarica attualmente disponibile. In altre parole indica la paura del guidatore di non riuscire a raggiungere la destinazione voluta mentre sta utilizzando un veicolo elettrico.

Il fenomeno di Range Anxiety è però molto più ampio ed indica anche la paura di non raggiungere la destinazione voluta, la paura di quello che potrebbe succedere in quella situazione, la paura di non essere capaci di trovare una soluzione e la paura di rimanere bloccati in una situazione di disagio.

I sintomi della Range Anxiety hanno effetti a livello comportamentale, portando ad una nuova pianificazione delle attività o addirittura ad evitare l'uso dell'auto elettrica; in più si possono avere conseguenze a livello psicologico e sul livello di stress.

È interessante notare come il fenomeno della Range Anxiety sia fortemente presente nonostante sia statisticamente provato che l'attuale utilizzo medio di una vettura è inferiore alla distanza massima percorribile dalla maggior parte dei veicoli elettrici presenti sul mercato (1.5).

Si conclude che quello della Range Anxiety è un fenomeno puramente emotivo, ma nonostante questo occorre sviluppare le infrastrutture e moltiplicare le stazioni di ricarica o di scambio delle batterie.

Un ulteriore modo per ridurre il fenomeno della Range Anxiety è quello di offrire servizi aggiuntivi a bordo del veicolo come soluzioni di navigazione verso il punto di ricarica più vicino, monitoraggio in tempo reale della situazione della batteria, indicazioni sui parcheggi abilitati alla ricarica nelle

vicinanze del punto da raggiungere, oppure dare la possibilità di preriscaldare l'automobile o pre-raffreddarla in modo da ottimizzare le prestazioni della batteria.

Per ottimizzare i servizi aggiuntivi occorre permettere al cliente di poter dialogare con la vettura anche prima che il suo viaggio abbia inizio, ad esempio, attraverso l'utilizzo degli smart phone.

1.8 Trasporto Pubblico

Le linee aeree per tram e filobus non costituiscono una soluzione pratica perché sono caratterizzate da alti costi di manutenzione, da un forte impatto visivo ed estetico e inoltre non permettono flessibilità sui percorsi.

La soluzione è la progressiva introduzione di autobus elettrici con batterie a bordo, come sta già succedendo in molte parti del mondo.

I metodi di progettazione e i parametri da tenere in considerazione per l'elettrificazione del trasporto pubblico sono diversi rispetto a quelli utilizzati per il trasporto privato. Un autobus, infatti, viene utilizzato mediamente per 18 ore al giorno e raggiunge facilmente le 5000 ore di utilizzo l'anno.

In queste condizioni di lavoro è facile vedere come una singola carica non sia sufficiente per soddisfare il fabbisogno di energia giornaliero.

Sono in fase di studio due soluzioni per risolvere questo problema: la ricarica veloce nei punti di fermata e la sostituzione della batteria esausta con una carica.

Conoscendo i profili di utilizzo dell'autobus e le caratteristiche del suo percorso giornaliero è più facile dimensionare la batteria e le infrastrutture di carica rispetto al caso del trasporto privato. Questo si traduce in una ottimizzazione dei costi e delle risorse.

Nel trasporto pubblico la batteria viene usata in maniera intensiva e i periodi di non utilizzo sono ridotti esclusivamente alle fasi di ricarica. In questo modo si hanno numerose operazioni elettriche sulla batteria che, nonostante vadano a ridurre la vita utile, permettono di sfruttarla al meglio eliminando i fenomeni di invecchiamento dovuti al non utilizzo, che sono invece molto presenti nel trasporto privato.

Il consumo di energia di un singolo autobus dipende dalla stagione, dal numero di passeggeri trasportati e dalla velocità media mantenuta.

Tipicamente un autobus richiede picchi di potenza fino a 300kW per periodi fino a 20s durante le accelerazioni o durante la frenata rigenerativa.

Il consumo dei servizi ausiliari a bordo (come luci, idroguida, aria condizionata, sistema di compressione dell'aria, segnalazioni ai passeggeri) può raggiungere e superare i 40kW.

Questi assorbimenti non sono critici per le batterie moderne: anche una cella non ottimizzata per alti assorbimenti riesce a sopportare scariche fino a 4C, quindi installando una batteria da 100kWh si ottengono i 400kWh necessari per far fronte ai consumi dell'autobus.

Un consumo di energia medio pari a 2.75kWh/km distribuito su 18 ore di servizio porta a circa 900kWh di consumo giornaliero.

Assumendo una densità di energia di 100Wh/kg, la batteria installata peserebbe circa 9 tonnellate. Peso inaccettabile.

Ipotizzando di installare una batteria da 200kWh, questa verrebbe ricaricata completamente durante le ore notturne utilizzando una potenza di 39kWh.

Volendo ricaricare l'autobus durante il servizio occorre dimensionare le colonnine di carica in base al tempo medio di fermata nei diversi capolinea. Ipotizzando un tempo di fermata di 7 minuti servirebbe una colonnina con una potenza di carica di almeno 300kW.

Come si vede nel grafico, aumentando la potenza di carica si diminuiscono i tempi di fermata necessari. Diminuisce anche la quantità di interventi di carica necessari.

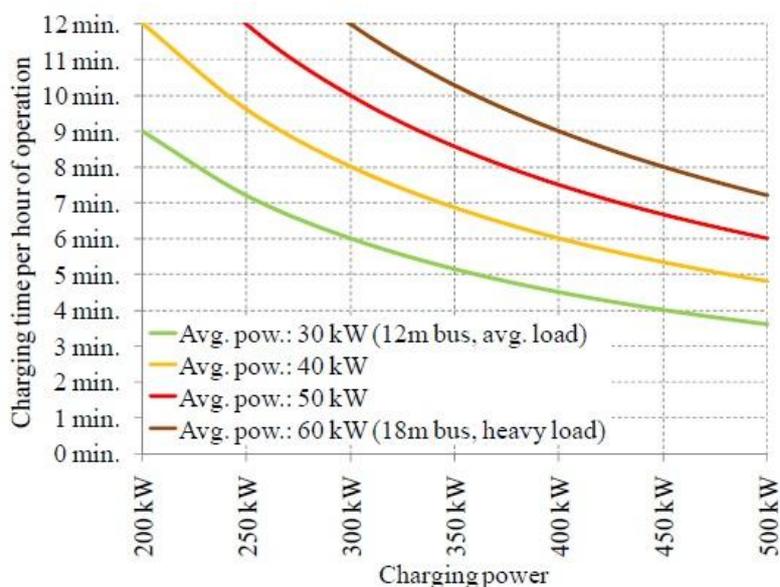


Figura 8 - Variazione del tempo di carica in funzione della potenza di carica

Con questa soluzione il numero di colonnine di ricarica è ridotto al minimo e la batteria viene ricaricata solo quando è completamente scarica (viene dimensionata per coprire l'intero percorso dell'autobus).

In questo modo, però, la batteria subisce forti stress dovuti alla scarica profonda e alla ricarica veloce completa. Altro svantaggio è che la potenza installata nelle colonnine ai capolinea dovrà essere molto elevata.

Un modo per ridurre la potenza installata e per stressare meno la batteria è quello di distribuire più stazioni di ricarica lungo il percorso dell'autobus. In questo modo la distanza tra una colonnina e l'altra sarà minore così come la quantità di energia scaricata; servirà quindi una minor potenza per riportare la batteria nelle condizioni di carica completa.

Il tempo di carica nell'arco della giornata rimarrà lo stesso, ma vengono ridotti i tempi di fermata.

È possibile individuare il livello di profondità di scarica che va a minimizzare i costi: questo valore dipende da molti fattori, ma mediamente è attorno al 16%.

1.8.1 Battery Exchange

L'alternativa alla carica durante il servizio è la sostituzione della batteria scarica con una carica.

Viste le dimensioni delle batterie, questa è un'operazione che può essere eseguita solo quando l'autobus torna nella rimessa a fine servizio oppure con rientri programmati.

Come verrà discusso nel paragrafo 3.2.3, la creazione di una struttura di cambio della batteria prevede la presenza di un'elevata standardizzazione nella forma della batteria. Questo requisito è facilmente ritrovabile nel contesto del trasporto pubblico, dove la presenza di mezzi uguali tra loro e l'ampio spazio a disposizione porta ad avere anche batterie uguali tra loro, soprattutto nei mezzi della stessa compagnia.

Per questo motivo sono già state realizzate stazioni di scambio per il trasporto pubblico e sono in fase di sperimentazione sul campo.

All'interno della stazione il processo di sostituzione della batteria si articola nelle seguenti fasi:

- 1) si spegne il veicolo e si apre lo sportello della batteria. Successivamente si accende il sistema automatico di scambio della batteria che attende il segnale di permesso di scambio dal modulo di controllo della batteria del veicolo.
- 2) dopo aver ricevuto il segnale il braccio robotico si avvicina al veicolo elettrico controllato dal dispositivo portatile.
- 3) l'allineamento tra il braccio meccanico e la batteria del veicolo viene effettuato in automatico.
- 4) una volta effettuato l'allineamento, il braccio robotico continua a muoversi verso la batteria finché i suoi relay e quelli del modulo di controllo della batteria confermano l'avvenuto aggancio tra le due parti.

- 5) quando i relay confermano l'avvenuto aggancio, il modulo di controllo della batteria invia il segnale di stop al braccio robotico.
- 6) contemporaneamente il modulo di controllo della batteria sblocca le valvole elettromagnetiche che trattenevano la batteria nel veicolo, così il braccio robotico può iniziare l'estrazione.
- 7) una volta effettuata l'estrazione, il braccio robotico viene guidato con il dispositivo portatile fino ai moduli di stoccaggio, dove verrà riposta la batteria sostituita.

La comunicazione tra i vari dispositivi coinvolti nell'operazione di sostituzione avviene mediante protocollo wireless, come descritto in 3.2.3

La batteria scarica, una volta rimossa dall'autobus, viene messa in carica. Tutte le informazioni relative alla batteria vengono registrate e immagazzinate in un archivio, in questo modo l'azienda riesce a tenere sotto controllo la vita di tutte le proprie batterie e riesce a gestirne l'utilizzo in maniera ottimale.

Il numero di batterie collegato contemporaneamente all'interno della stazione di scambio è elevato, ma la possibilità di ricaricare le batterie su tempi più lunghi permette l'abbassamento della potenza totale richiesta alla rete.

CAPITOLO 2 - BATTERIE PER LA TRAZIONE ELETTRICA

2.1 Introduzione

Negli anni la tecnologia utilizzata per le batterie dedicate alla trazione elettrica ha subito molte evoluzioni passando dalle celle Ni-Cd, Ni-Mh, Pb per assestarsi negli ultimi anni sull'utilizzo della tecnologia ai polimeri di Litio (LiPo).

Queste ultime, rispetto alle tecnologie precedenti, offrono un rapporto peso/potenza migliore: a parità di peso installato le LiPo offrono più energia, di conseguenza, a parità di kWh installati, un pacco batterie basato sui polimeri di Litio peserà meno rispetto agli altri, con tutti i vantaggi che derivano da questa caratteristica.

Altro vantaggio di questa tipologia di celle è quello di poter sopportare alti valori di scarica fino a più di 40C (vedi 2.3). Questo significa che in caso di una richiesta elevata di potenza, questa può essere fornita da una cella di capacità più piccola rispetto alle altre tecnologie.

Le celle LiPo hanno anche una gestione del ciclo di vita semplificata perché non avendo l'*effetto memoria* non richiedono processi di ricondizionamento dopo gli utilizzi. Questo si traduce in una maggiore vita utile e in un sistema più semplice della gestione della cella.

L'aspetto negativo delle celle al Litio è che hanno bisogno di un processo di carica dedicato con un controllo più preciso di quello richiesto dagli altri tipi di batterie.

La carica è infatti suddivisa in 2 fasi, una a corrente costante (CC) e una a tensione costante (CV) che vanno rispettate per non rovinare la cella diminuendone le prestazioni o portandola a lavorare al di fuori delle zone di sicurezza. Esistono infatti 2 limiti di tensione ben precisi entro i quali lavorare con le celle al Litio: non si devono superare i 4.2V/cella in carica e non si deve scendere sotto i 2.7V/cella in scarica.

Altro aspetto da tenere in considerazione è che per formare una batteria occorrono centinaia di celle opportunamente collegate in serie (per raggiungere la tensione nominale dei motori) e parallelo (per raggiungere la potenza nominale necessaria). Occorre quindi predisporre un sistema di monitoraggio delle celle per gestire il loro bilanciamento durante le fasi di carica e scarica e agire di conseguenza per non avere perdite di potenza e danneggiamenti al pacco di batterie.

2.2 La vita utile delle batterie

La batteria è il componente più costoso del veicolo elettrico quindi la ricerca di metodi per migliorarne il rendimento e la vita utile è uno dei primi passi da compiere affinché la trazione elettrica aumenti i suoi livelli di presenza nel mercato.

La vita utile di una batteria è direttamente collegata al numero di cicli carica/scarica eseguiti. Ogni ciclo, infatti, "consuma" la batteria che arriverà al termine della sua vita utile attorno ai 1000 cicli (circa 6 anni) anche se, in condizioni di lavoro particolarmente svantaggiose, potrebbe esaurirsi in un tempo minore.

Nel grafico è riportata la diminuzione della capacità utile in funzione degli anni di vita della batteria:

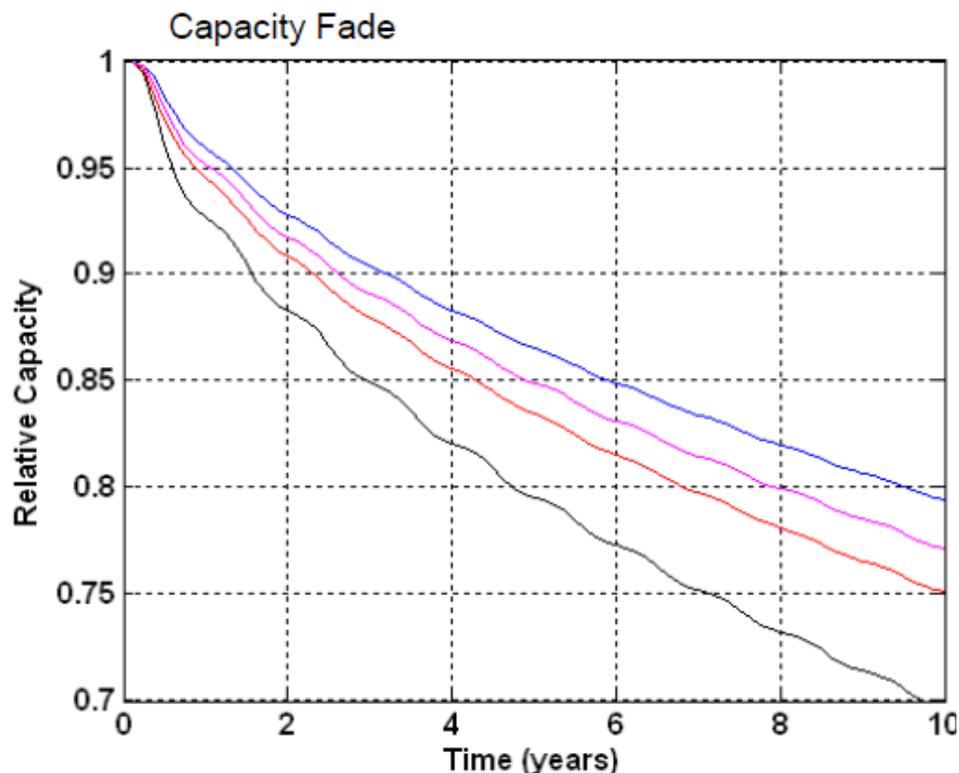


Figura 9 - Diminuzione della capacità di una batteria in funzione del tempo (anni)

Per garantire prestazioni ottimali anche verso la fine del ciclo di vita del pacco, gli autoveicoli elettrici montano batterie sovradimensionate: a seconda della tipologia del veicolo solo una percentuale compresa tra il 10% e il 50% della potenza installata viene realmente utilizzata.

Per evitare questi sovradimensionamenti (che incidono sul costo finale del veicolo) e per garantire una vita utile maggiore, i pacchi batterie devono essere ottimizzati mediante lo studio dei parametri che influenzano le loro prestazioni e dallo studio delle grandezze che indicano lo stato di efficienza della cella.

A livello macroscopico gli effetti di invecchiamento della cella si ripercuotono sulla perdita di capacità immagazzinata (circa il 20%), su un aumento dell'impedenza della cella (circa 120%) e sulla riduzione della potenza erogata.

Il livello di danneggiamento della cella può essere stimato con la seguente formula:

$$\text{Danneggiamento} = \frac{N^{\circ} \text{cicli}}{e^{-\ln(DOD)/0.685+7.27}} + \frac{\text{età}}{6}$$

DOD = profondità della scarica $0 < DOD < 1$

Possiamo ora stimare la resistenza interna e la capacità residua come:

$$\begin{aligned} \text{Capacità}\% &= 100 - (\text{Danneggiamento} * 20) \\ \text{Resistenza interna}\% &= 100 + (\text{Danneggiamento} * 20) \end{aligned}$$

Una cella si considera esaurita quando raggiunge l'80% della sua capacità nominale. A causa degli elevati costi delle batterie, però, l'utente tende ad utilizzare la batteria anche al di sotto di questo limite, accettando il fatto che i fenomeni di invecchiamento non saranno più lineari ma esponenziali. È compito del Battery Managing System (tra le altre sue funzioni) quello di monitorare i parametri della batteria e di dichiararla esaurita per evitare situazioni di utilizzo pericolose.

Il numero di cicli utili per una cella Li-Ion può essere stimato come:

$$C_f = e^{\ln(DOD)/(0.658+7.27)}$$

Lasciando la cella a riposo si va in contro a fenomeni di auto-scarica, mentre utilizzandola, oltre all'accentuarsi degli effetti visti in precedenza, si ha anche un consumo meccanico e chimico degli elementi che la costituiscono.

Le parti fondamentali di una cella sono l'*anodo* e il *catodo* ed entrambi questi elementi sono soggetti a invecchiamento e usura, ma in due modi differenti.

Per quanto riguarda l'*anodo* si ha la formazione, sin dai primi cicli, di una patina solida sull'elettrolita, che andrà a crescere col tempo.

Le temperature elevate, così come quelle troppo basse, incidono sull'invecchiamento della cella perché incrementano la formazione della patina solida e aumentano la possibilità di superare i 4.2V/cella.

Il processo di invecchiamento ha come conseguenza la riduzione dell'elettrolita. Questo può portare alla formazione di gas che provocano l'aumento del volume della cella e, successivamente, la sua rottura.

L'evoluzione della vita utile di una cella può essere monitorata e studiata attraverso l'uso di un modello con il quale è possibile effettuare anche previsioni.

I modelli, però, non sono di semplice realizzazione poiché le variabili coinvolte nel processo di invecchiamento sono molte e il loro decorso non è conosciuto pienamente.

Per calcolare l'aumento della resistenza interna e la diminuzione della capacità della cella occorre prendere in considerazione gli effetti dovuti alle perdite di Litio utilizzabile e alla degradazione del materiale attivo (microfratture).

Moltiplicando il valore della resistenza della singola cella per il numero di celle collegate in serie si ottiene la resistenza equivalente della singola batteria.

Altri fattori che influenzano la vita utile delle batterie sono la tipologia e la profondità del processo di scarica. Frequenti scariche profonde portano infatti ad un aumento della resistenza interna e a una diminuzione della capacità utile, inoltre possono aumentare il tasso di guasto e avere come conseguenza l'invecchiamento prematuro della cella.

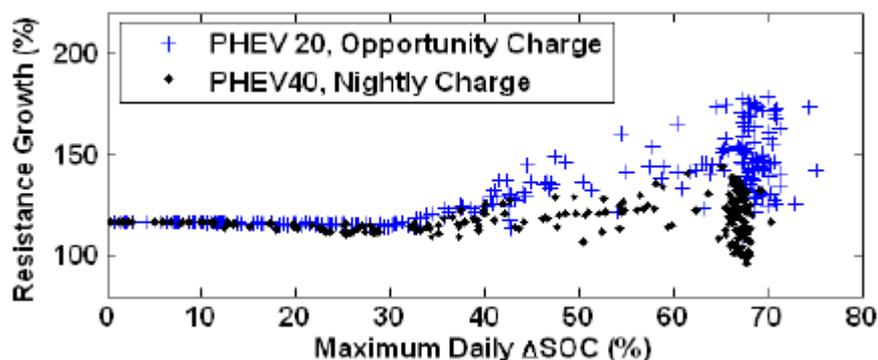


Figura 10 - Relazione tra l'aumento della resistenza interna e la profondità della scarica

2.2.1 Effetti della temperatura

Dagli studi è emerso che uno dei principali fattori che influenza la vita utile delle celle è la temperatura di utilizzo. Molti produttori consigliano di non effettuare la carica con temperature inferiori a 0°C.

Diminuzioni di temperatura portano alla riduzione della capacità utile della batteria:

- a 10°C si ha il 95% della capacità nominale
- a 0°C si ha l'83% della capacità nominale
- a -10°C si ha il 70% della capacità nominale.

L'andamento della capacità utile in funzione della temperatura è riportato nel seguente grafico:

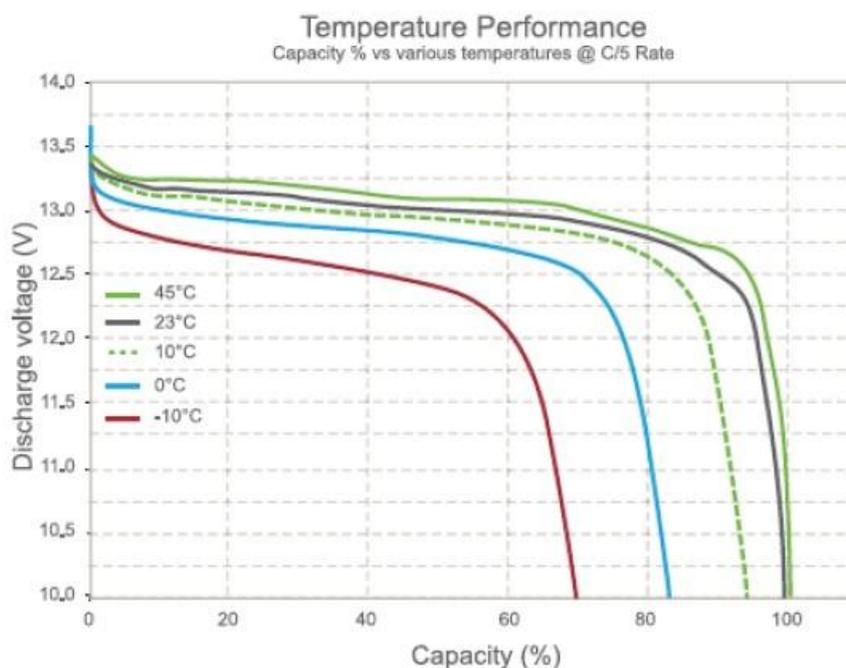


Figura 11 - Variazione delle prestazioni della batteria in funzione della temperatura

La maggior parte dei paesi Europei ha condizioni climatiche che portano la batteria a dover lavorare in condizioni non ottimali per buona parte dell'anno, per questo sono state pensate alcune soluzioni per aumentare la temperatura delle celle. Le più diffuse sono quelle di utilizzare un sistema di riscaldamento delle celle o di utilizzare la batteria immediatamente dopo la carica sfruttando il calore residuo dovuto del processo di carica.

Anche le temperature elevate, però, influenzano negativamente le prestazioni delle batterie e ne riducono la vita utile, è per questo che sono state introdotte diverse strategie di raffreddamento: ad aria, a liquido, oppure il raffreddamento ad aria abbinato a celle a bassa impedenza.

Il *raffreddamento ad aria* è efficace per le sovratemperature dovute all'utilizzo, ma è poco efficiente in caso di temperature ambientali elevate.

Il *raffreddamento a liquido* è sicuramente il metodo più vantaggioso ma ha un costo elevato a causa degli elementi che compongono il sistema.

L'utilizzo di *celle a bassa impedenza*, unito al raffreddamento ad aria, permette di mantenere temperature basse durante l'uso, ma è inefficace contro le sovratemperature ambientali. Nonostante questo, le celle a bassa impedenza hanno una vita maggiore delle celle classiche, ma l'elevato costo di realizzazione del sistema completo porta a preferire altre soluzioni.

2.3 Carica - Generalità

Si definisce "C" la corrente richiesta per caricare completamente la cella in un'ora.

Ad esempio, 1C indica che se vogliamo caricare una cella da 1000mAh in un'ora dobbiamo utilizzare una corrente di 1000mA.

Ci sono due tipologie di carica, normale e veloce, che dipendono dal tipo di caricabatterie a disposizione e dal luogo in cui esso si trova. In una normale abitazione, ad esempio, il caricabatterie non supererà i 3kW di potenza, mentre in un contesto industriale o in un luogo dedicato alla carica delle batterie, si può arrivare fino a 25kW.

In prima approssimazione è possibile affermare che la massima potenza disponibile in scarica corrisponde alla massima potenza accettabile per la carica.

La batteria può essere caricata con impulsi fino a 15C-20C, ma queste potenze elevate sono disponibili solo per intervalli limitati (10 secondi circa), quindi per processi di carica lunghi non è possibile utilizzare livelli di potenza così elevati perché bisogna tenere in considerazione il rischio di surriscaldamento delle batterie.

Con l'aumentare dello stato di carica (SOC) diminuisce la capacità della batteria di accettare altra energia dall'esterno, quindi la potenza di carica deve essere diminuita.

Il processo di carica di una cella Li-Ion prevede una prima parte a corrente costante (CC) fino al raggiungimento della tensione nominale di 4.2V/cella. Successivamente si passa alla modalità di carica a tensione costante CV, con la corrente che decresce fino al completamento della carica. Il BMS (2.4) controlla e regola il processo di carica in base alla tensione delle singole celle, della temperatura e del SOC (State Of Charge - Stato Di Carica).

Nella figura 12 è riportato il tipico profilo del processo di carica.

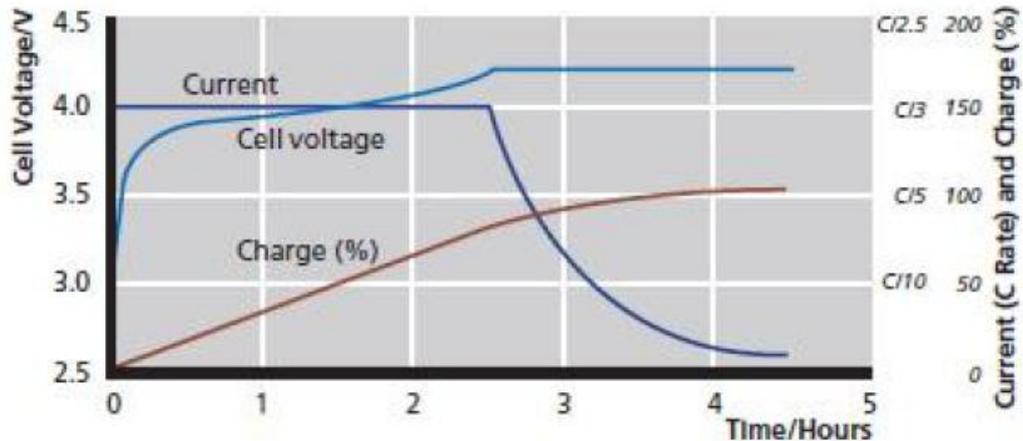


Figura 12 - Tipico profilo di carica

Per quanto riguarda la scarica, questa può essere effettuata utilizzando qualsiasi profilo purché si rimanga all'interno dei limiti fisici e di sicurezza della batteria.

Anche in questo caso è compito del BMS monitorare il processo intervenendo nel caso venissero raggiunte le condizioni limite.

2.4 Battery Managing System (BMS)

Mediante una batteria è costituita da una stringa di N celle in serie per ottenere la tensione nominale ($420V = 100$ celle). Successivamente vengono collegate in parallelo più stringhe fino ad ottenere la potenza nominale richiesta. La batteria completa ha una struttura simile a quella riportata in figura:

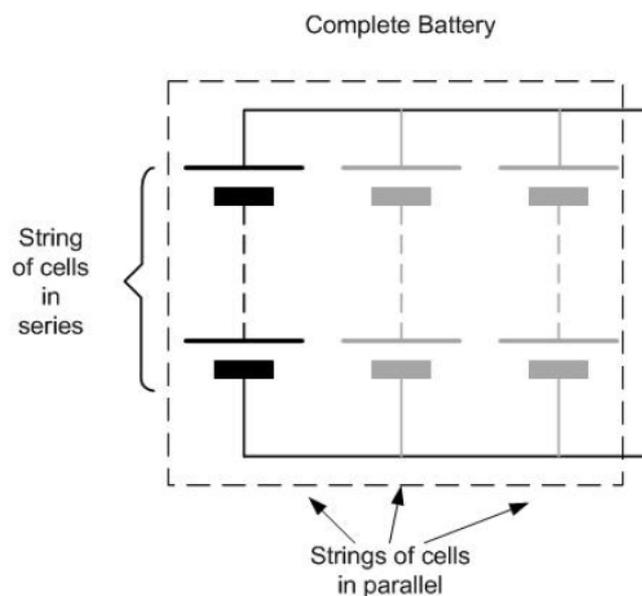


Figura 13 - Struttura schematica di una batteria

Inevitabilmente le celle non si troveranno tutte allo stesso potenziale a causa di piccole differenze costruttive e dei fenomeni di auto-scarica. È importante inoltre sapere che un pacco batterie non sarà mai più potente della sua cella più debole. Questo porta all'esigenza di avere un sistema di bilanciamento efficiente.

Due celle della stessa capacità si dicono bilanciate se hanno lo stesso SOC (State Of Charge). Un indicatore del bilanciamento può essere la tensione a vuoto ai capi della cella.

Se una o più celle all'interno del pacco sono sbilanciate si va in contro a diverse problematiche. La meno grave è la riduzione della capacità utile del pacco perché questa sarà influenzata dalla cella più debole. La seconda problematica, più grave, è che le celle sbilanciate possono raggiungere prima di altre le due tensioni limite di 4.2V/cella in carica e di 3.7V/cella in scarica: questo porta a lavorare al di fuori dei limiti di sicurezza e a diminuire notevolmente la vita utile dell'intero pacco.

Come abbiamo visto nel paragrafo 2.2 ci sono molti fattori che influenzano la vita di una batteria, e questi possono dividersi in *interni* ed *esterni*.

I fattori interni sono intrinseci alla cella e dipendono dalle sue caratteristiche costruttive, mentre i fattori esterni dipendono dalle condizioni di utilizzo e sono individuabili nella temperatura di esercizio, nel metodo di carica e nei metodi di mantenimento della batteria.

Per ottimizzare la vita utile delle batterie occorre quindi un buon sistema di bilanciamento abbinato ad un buon sistema di monitoraggio in tempo reale delle condizioni operative della batteria (Battery Managing System).

Le funzioni principali del BMS sono:

- mantenere la batteria nelle condizioni tali da poter supportare le prestazioni richieste dal veicolo elettrico
- prolungare la vita utile della batteria
- proteggere le celle e la batteria da danneggiamenti
- svolgere funzioni di interfaccia con le altre applicazioni all'interno del veicolo (ad esempio verso l'ECU) e all'esterno del veicolo (ad esempio con la colonnina di ricarica)

Il BMS ha una funzione fondamentale durante i cicli di carica/scarica perché una batteria può essere danneggiata da una carica non corretta o da una scarica troppo profonda.

Il controllo viene effettuato svolgendo le seguenti funzioni:

- *controllo termico* della cella provvedendo a raffreddarla o a riscaldarla nel caso si raggiungessero temperature limite;

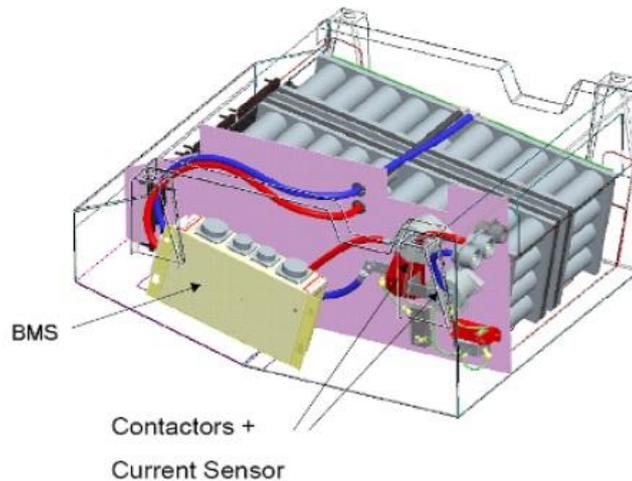


Figura 14 - BMS Installato

- *misura* e riporta la tensione e l'assorbimento di corrente dell'intero pacco e delle singole celle;
- *rileva* la capacità rimanente ed effettua un conteggio dei cicli di carica/scarica;
- *controlla* che la batteria sia in grado di erogare la potenza richiesta dall'utente;
- provvede al *bilanciamento* delle singole celle che compongono il pacco batterie.

Il BMS ha anche funzione di *diagnostica* in modo da rilevare eventuali problemi con la batteria così da lavorare sempre in condizioni di sicurezza. Le operazioni effettuate sono:

- rileva gas di sfiato, provvedendo al distacco della batteria;
- rileva corto circuiti con il telaio del veicolo. Normalmente i terminali della batteria sono isolati;
- isola la batteria durante lo spegnimento, per le emergenze e nel caso dovesse fornire servizi verso la rete (V2G);
- in caso di emergenza limita l'assorbimento di corrente.

Come detto in precedenza, il BMS svolge anche una funzione di comunicazione: trasmette agli altri dispositivi i dati rilevati e le informazioni di diagnostica utilizzando porte CAN.

Permette la comunicazione con i controller del veicolo, tra la batteria e il caricabatteria e permette l'accesso ai parametri di controllo per effettuare prove di diagnostica.

L'SMC riporta questa condizione al processore centrale che, mediante uno shunt, bypasserà la corrente di carica di quelle celle. In questo modo si permette alle altre celle di portarsi allo stato di carica di quelle più veloci. Nel momento in cui una cella raggiunge i 4.2v, l'SMC provvede a inviare un segnale con il quale viene terminata la sua carica.

Lo stesso procedimento si ha in fase di scarica: quando una cella raggiunge la soglia di 2.75V l'SMC invia un segnale che porta alla conclusione del processo di scarica.

Le misurazioni sulla corrente della singola cella vengono effettuate con resistenze di precisione o con sonde ad effetto Hall. Il primo metodo ha una maggior precisione per correnti elevate, mentre per correnti di piccola entità è preferibile utilizzare la sonda ad effetto Hall.

L'SMC provvede anche al controllo della temperatura.

Per risparmiare energia, il sistema master-slave è per la maggior parte del tempo in modalità *sleep*. Il processore centrale manda il segnale di *awake* agli slave solo quando la batteria si trova in stato di carica o quando viene collegato il carico.

Un'altra importante funzione del BMS è quella di stimare lo stato di carica (SOC) della batteria. Come abbiamo visto, la capacità della cella è proporzionale alla tensione ai suoi capi, quindi un primo metodo per stimare il SOC è appunto quello di misurare la tensione a vuoto della cella. Questo sistema è molto valido in condizioni di cella a riposo o di carico con assorbimento costante, ma nel momento in cui il veicolo elettrico è in marcia, a causa delle ampie e veloci oscillazioni di tensione dovute alle variazioni di carico, questo metodo perde di efficacia.

Un altro sistema è quello di misurare gli Ampere/ora, cioè monitorare il flusso di corrente in ingresso e in uscita dalla cella effettuandone l'integrazione.

$$A_h = \int I(t) dt = \sum_{t=1} I(t)\Delta t$$

A_h = Ampere/ora

$I(t)$ = corrente misurata all'istante t

Δt = periodo di osservazione

Più piccolo è l'intervallo di osservazione Δt migliore sarà la misurazione degli Ampere/ora, ma il sistema di elaborazione necessario sarà più costoso.

Un altro metodo per valutare gli Ampere/ora si basa sulla valutazione del flusso di energia integrando la potenza:

$$E = \int p_t dt = \int (v_t \times i_t) dt$$

E = Energia

p_t = potenza

v_t = tensione ai morsetti

i_t = corrente che circola nella batteria

Ipotizzando v_t costante è possibile modificare la formula dell'energia in questo modo:

$$E = \int p_t dt = v_t \times \int i_t dt = v_t \times A_h$$

da qui:

$$A_h = \frac{E}{v_t}$$

A causa delle intrinseche difficoltà di campionamento della corrente e dei problemi legati all'efficienza dei cicli di carica/scarica, questi metodi non portano a valutazioni accurate del SOC e tendono ad accumulare errori sempre più grandi.

Un metodo molto più preciso per la misurazione della capacità è quello di Coulomb. Questo ed altri metodi per la valutazione del SOC sono trattati nel paragrafo 5.3.

2.4.1 BMS e V2G

In aggiunta ai ruoli di controllo e gestione della batteria, il BMS svolge funzioni importanti nell'utilizzo del veicolo elettrico in modalità V2G, quali: calcolo dei costi, calcolo della riduzione della vita utile, calcolo del "drive away time".

2.4.1.1 Calcolo dei costi V2G

Il calcolo si basa sulla potenza che scorre attraverso il caricabatterie e tiene conto delle perdite nella batteria e nel caricabatterie.

Dovrà tenere in considerazione anche l'eventuale energia necessaria per il condizionamento termico della batteria se le condizioni climatiche dovessero richiederlo.

Deve essere preso in considerazione anche l'aumento dei costi di gestione della batteria dovuto ai cicli aggiuntivi di carica/scarica.

2.4.1.2 Calcolo della riduzione della vita utile delle batterie a causa del V2G

Come visto in precedenza, l'aumento dei cicli carica/scarica diminuisce la vita utile delle batterie. Questo fenomeno è tanto più accentuato tanto più è profonda la scarica. L'aumento dei cicli dovuti al V2G porta ad una riduzione accelerata della vita della batteria e, quindi, può portare alla sua sostituzione anticipata.

Il BMS deve essere in grado di stimare la riduzione della vita utile e deve anche tenere il conto dei cicli aggiuntivi dovuti alla configurazione V2G per poter attribuire una perdita economica ad ognuno di essi per poi poterla compensare attraverso contratti specifici con il gestore della rete.

2.4.1.3 Drive away time

Il proprietario del veicolo, nel momento in cui collega l'auto al caricabatterie, deve impostare una distanza minima necessaria per gli spostamenti del giorno successivo e un drive away time, cioè l'orario in cui vuole trovare l'auto pronta per essere utilizzata.

Il BMS deve gestire questi parametri nelle due possibili condizioni di carica controllata o di modalità V2G.

In entrambi i casi, il BMS converte la distanza richiesta in un valore minimo di SOC che deve essere raggiunto entro l'orario di drive away impostato, successivamente calcolerà il profilo di carica più adatto per ottenere queste condizioni.

In regime di V2G il BMS deve valutare le richieste della rete e del proprietario del veicolo bloccando le operazioni di V2G nel caso non fossero compatibili, oppure ricalcolando il profilo di carica più adatto per soddisfare tutte le esigenze.

Il BMS, in altre parole, deve gestire gli scambi con la rete in modo da far trovare il veicolo nelle condizioni impostate dall'utente.

Per compiere queste valutazioni, il BMS deve avere al suo interno un modello matematico della batteria che tiene conto dei seguenti parametri:

- capacità utilizzabile
- resistenza interna
- temperatura interna
- numero di cicli effettuati

2.4.2 BMS e sicurezza

Come visto nel paragrafo 2.4, il BMS svolge una serie di controlli attraverso i quali garantisce che la batteria lavori in condizioni di sicurezza durante la scarica e la ricarica.

Le operazioni di scarica dovute al normale utilizzo del veicolo sono supervisionate dal BMS, dal controllo centrale del veicolo e anche dal guidatore. Le operazioni di carica, invece, avvengono in automatico, senza alcuna supervisione umana, ed è per questo che la stazione di carica e il BMS devono avere un numero sufficiente di controlli per garantire la sicurezza dell'automobile e delle batterie mentre il veicolo è connesso.

Ad esempio, se il BMS rileva una temperatura eccessiva, la colonnina deve abbassare la corrente di carica o addirittura fermare l'operazione. Se il BMS rileva un guasto nell'isolamento, la stazione di carica deve essere in grado di bloccare la carica e di isolare la batteria.

BMS e stazione di carica devono essere, quindi, in grado di scambiarsi reciprocamente informazioni.

Come visto, il contenuto delle informazioni scambiate tra BMS e stazione di carica è vario: informazioni sulla sicurezza, informazioni commerciali e informazioni sulle abitudini del proprietario del veicolo.

Questi sono dati importanti e protetti dalla privacy, ed è per questo che le informazioni contenute nelle stazioni di carica e le comunicazioni tra BMS e stazione di carica devono essere protette contro gli accessi non autorizzati.

2.5 Costo delle batterie

La batteria è il componente più costoso del veicolo elettrico, quindi la ricerca per la riduzione dei costi è il primo passo affinché la trazione elettrica aumenti i suoi livelli di presenza nel mercato.

I grafici seguenti mostrano come i costi sono ripartiti all'interno del pacco batterie e all'interno della cella stessa, che è l'elemento più costoso del pacco batterie.

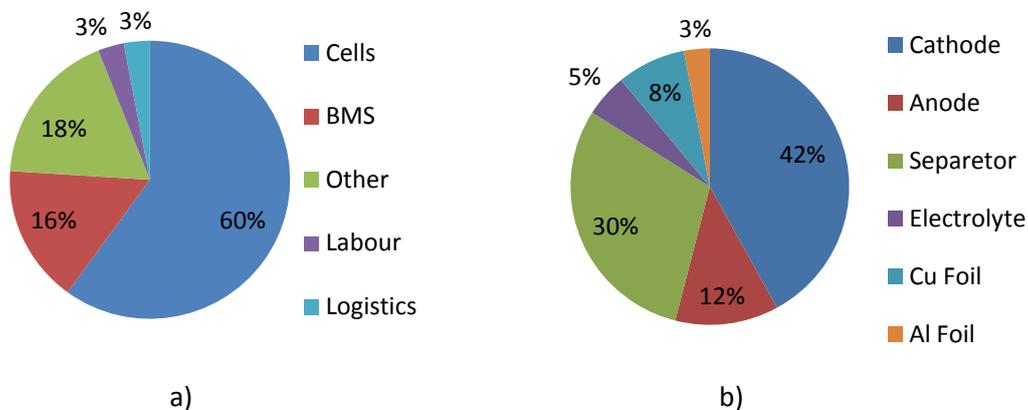


Figura 16 - a) Costo in percentuale dei componenti di una batteria
b) Costo in percentuale dei componenti di una cella

Lo scopo principale della ricerca sulle batterie è quello di ridurre i costi mantenendo alto il livello delle prestazioni. Una delle prime soluzioni è quella di utilizzare materiali meno rari (e quindi meno costosi) e di ottimizzare il processo di manifattura delle celle.

Si sta cercando anche di ridurre i costi sul BMS che, come si vede dal grafico, costituisce la seconda percentuale più elevata nel computo totale del costo del pacco batterie.

Nei prossimi dieci anni si stima che ci sarà una riduzione di più del 50% dei costi di produzione delle batterie ai polimeri di litio che, unitamente alla creazione di un'economia di scala dovuta alla maggiore penetrazione nel mercato, permetterà un abbassamento dei costi finali passando dagli attuali 1000\$/kW a circa 350\$/kW.

Alcuni studi mostrano come l'acquirente medio prenda in considerazione solo l'investimento iniziale nel momento in cui decide di comprare una automobile, e non tenga in considerazione il suo costo di gestione durante la vita utile. Lo stesso atteggiamento si riscontra nei confronti di un'auto elettrica con l'aggiunta del fatto che il cliente non prende in considerazione il denaro risparmiato sul carburante.

Allo stato attuale della tecnologia, un'alternativa all'elevato costo di acquisto della batteria deve essere fornita dalle case automobilistiche produttrici di veicoli elettrici.

Attualmente i maggiori produttori offrono 5 scenari possibili:

- vendita della batteria con pacchetto di garanzia completo che copre tutti i rischi per almeno 10 anni;
- noleggio: l'auto rimane di proprietà della casa produttrice che si assume quindi tutti i costi relativi alla gestione della batteria;
- vendita della batteria con garanzia limitata a 3 anni: questa è una soluzione tipica per le case automobilistiche più piccole;
- noleggio parziale: il cliente compra l'automobile ma noleggia la batteria: questo ha come conseguenza una notevole riduzione del costo iniziale di acquisto;
- pay per mile: il cliente non è proprietario della batteria, e questo aiuta a ridurre il costo iniziale di acquisto, in più paga la batteria e l'energia utilizzata per la ricarica in base all'utilizzo. Il cliente stipula un contratto che gli permette di percorrere un numero stabilito di chilometri. In caso di superamento della soglia stabilita, paga in proporzione ai chilometri aggiuntivi. Questa tipologia viene utilizzata in combinazione alle stazioni di scambio delle batterie (Battery Swap Station vedi capitolo 1.8.1 e 3.2.3).

CAPITOLO 3 - STAZIONI DI RICARICA E RETE ELETTRICA

3.1 Introduzione

L'introduzione dell'auto elettrica impone la costruzione di infrastrutture per provvedere in maniera adeguata alla ricarica dei veicoli.

Il primo passo per capire in che direzione muoversi è quello di individuare le esigenze del consumatore rispetto al bisogno di dover ricaricare il veicolo elettrico.

Studi del CISP rivelano come un guidatore di EV non voglia cambiare le abitudini e le operazioni che effettuava con veicoli a combustione interna: il consumatore medio non vuole rimanere fermo a lungo per ricaricare la batteria e trova inaccettabile avere tempi di ricarica superiori a 30 minuti, inoltre trova riduttivo dover limitare i suoi viaggi solo all'interno della città e indica in 250 km un'autonomia più che sufficiente per un veicolo elettrico (anche se per raggiungere questa percorrenza servono ulteriori sviluppi nella tecnologia delle batterie).

Altro aspetto da non sottovalutare è la densità delle stazioni di carica e l'interoperabilità tra gli EV e le stazioni di carica stesse (standardizzazione 1.3).

L'obiettivo a breve termine è quello di introdurre stazioni di ricarica in cui il cliente deve solo collegare l'auto alla colonnina e il processo viene iniziato e portato a termine in automatico.

Attualmente sono presenti diverse tipologie di ricarica, quella più veloce è la DC Quick Charge che per le sue elevate richieste di potenza è attuabile solo in contesti con poche auto connesse, come ad esempio una stazione di ricarica lungo le autostrade, dove il bisogno di una carica veloce è elevato poiché gli automobilisti stanno percorrendo lunghi tragitti e richiedono cariche in tempi brevi. In città, invece, una stazione di carica veloce in continua costituirebbe un peso inaccettabile per la rete, occorre quindi implementare tipologie diverse di carica tenendo in considerazione che i guidatori tendono a ricaricare il loro veicolo dove rimangono per più tempo: il 90% delle ricariche avviene in ambito domestico.

3.2 Stazione di carica

Ci sono due grosse tipologie di caricabatterie. Quelli a bordo del veicolo e quelli esterni.

I caricabatterie a bordo sono alimentati dalla rete in AC ed effettuano un raddrizzamento in DC per fornire potenza alla batteria. Questo tipo di

caricabatterie permette di collegare il veicolo direttamente alla presa di corrente.

I caricabatterie esterni effettuano la stessa conversione fornendo al veicolo direttamente potenza DC.

I caricabatterie esterni sono collocati nelle colonnine di ricarica. Più colonnine in un unico punto costituiscono una stazione di ricarica.

In base al numero di colonnine presenti, possono essere individuate 3 categorie di stazione di ricarica per un veicolo elettrico: grandi, medie e piccole. Una stazione media può essere composta, ad esempio, da 2 colonnine DC, 2 colonnine AC, e una unità per il cambio della batteria.

Attualmente i caricabatterie più utilizzati nelle stazioni di carica sono quelli che impiegano un raddrizzatore controllato ad alta frequenza che utilizza i MOSFET o gli IGBT come elementi di potenza. La scelta ricade su questa architettura di caricabatterie perché forniscono un controllo molto preciso sulla tensione e sulla corrente in uscita, e questo è molto importante per far fronte ai requisiti di precisione e di sicurezza richiesti per la carica delle nuove celle Li-Ion.

I futuri campi di sviluppo nell'ambito della ricarica delle batterie riguarderanno la carica veloce (Quick Charge), la carica intelligente (Smart Charge) e il miglioramento dell'interazione con le Smart Grid.

In base alla direttiva IEC 61851-1 possono essere definite 3 classi di potenza di carica:

-monofase (230V-16A, 3.7kW);

-trifase (400V-32A, 22-43kW);

- carica veloce (AC:500V-250A, 220kW DC: 600V-400A, 240kW);

Queste tre classi portano ad una differenza sui tempi minimi di ricarica che, ovviamente, dipendono anche dallo stato di carica della batteria.

La scelta di una di quelle tipologie di carica dipende dal tempo a disposizione ma soprattutto dal luogo in cui si sta effettuando la carica. Non tutte le stazioni di carica sono infatti dimensionate per una carica veloce o per una carica trifase. In ambito domestico è disponibile solo la carica monofase. I sistemi di carica sono abbastanza gravosi per la rete elettrica soprattutto se sono presenti più veicoli in carica contemporaneamente. Una soluzione può essere quella di affiancare delle fonti di energia rinnovabile alle stazioni di carica più grosse.

3.2.1 Contatore intelligente (Smart Meter)

Questo è un componente fondamentale per lo sviluppo del V2G perché effettua le misure di potenza e fornisce i dati alla colonnina in modo da gestire le operazioni di carica e scarica.

Un tipico Contatore Intelligente è costruito utilizzando il chip di misura ADE7758 in abbinamento al microprocessore S3C24400. In uno scenario di V2G questo strumento deve essere in grado di effettuare misurazioni bidirezionali, ovvero deve essere in grado di misurare il flusso di potenza che entra nel veicolo ma anche quello che viene rimesso in rete.

In base all'angolo tra la forma d'onda della corrente e la forma d'onda della tensione presente in rete, questo strumento è in grado di misurare la direzione del flusso di potenza. Oltre a questo, il contatore è in grado di misurare la tensione, la corrente, la potenza attiva e reattiva e la frequenza.

Il Contatore Intelligente è l'interfaccia tra il caricabatterie del veicolo e la rete; e può funzionare in modo unidirezionale o bidirezionale.

Nel funzionamento *unidirezionale* si ha la semplice carica della batteria. Una volta collegata l'auto alla rete, il BMS (Battery Managing System 2.4) rileva la tipologia della batteria e, in base ai dati forniti dal Contatore riguardo la qualità dell'energia presente in rete, inizia il processo di carica più adeguato per raggiungere il profilo impostato dall'utente.

Nel funzionamento *bidirezionale* (V2G), invece, il Contatore deve monitorare la richiesta di potenza della rete e, interagendo con il BMS, deve adeguare il profilo di carica (scarica) in base alle sue variazioni. Nel caso lo stato di carica della batteria non permetta lo scambio di potenza richiesto, il Contatore Intelligente deve interrompere momentaneamente qualsiasi processo di carica o scarica. Il Contatore Intelligente deve essere quindi in costante comunicazione con il caricabatterie e il BMS.

Un Contatore Intelligente è costituito da un microprocessore (MCU) e da un'interfaccia esterna che include le misurazioni di energia, una tastiera, lo schermo LCD, un sistema di comunicazione e un sistema di memorizzazione dei dati.

Le misure elettriche vengono effettuate utilizzando il chip di misura ADE7758 che permette la rilevazione della potenza attiva, reattiva e apparente, della potenza di picco, del periodo del segnale e della temperatura.

Questo chip viene alimentato a 5V ed è sincronizzato con gli impulsi di clock dell'intero sistema (10MHz). E' dotato di una porta seriale con la quale comunica con il microprocessore (MCU).

Un modello di microprocessore utilizzato per il Contatore Intelligente è il Samsung S3C2440, un chip ad alte prestazioni sviluppato per applicazioni a bassa potenza.

Utilizza un processore a 16/32bit ed ha un'interfaccia di comunicazione seriale che permette lo scambio di dati con il chip di misura.

Il modulo dedicato alle comunicazioni ricopre un ruolo fondamentale all'interno del sistema. Vengono utilizzati due modi per trasmettere i dati: mediante RS485 e mediante sistema GPRS.

La comunicazione deve essere bi-direzionale e deve permettere lo scambio di informazioni tra il veicolo, il Contatore Intelligente e la rete. Lo schema a blocchi della trasmissione dei dati è il seguente:

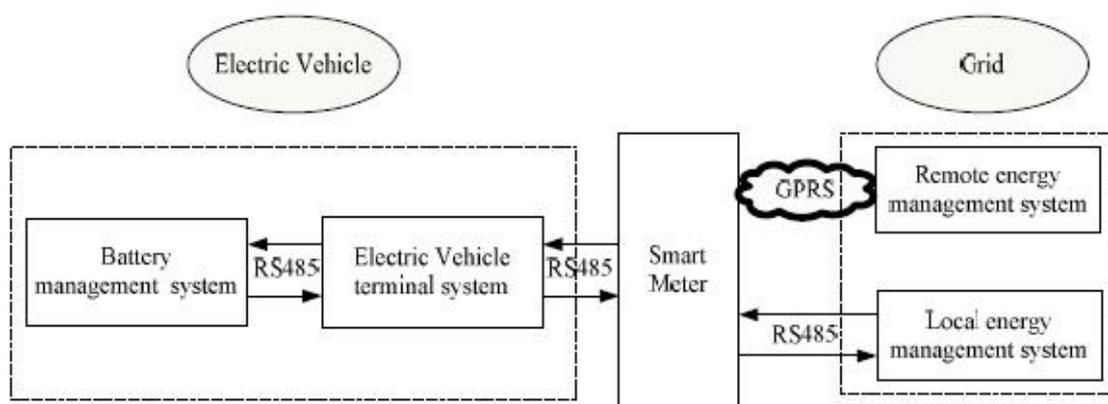


Figura 17 - Schema delle comunicazioni tra veicolo, contatore intelligente e la rete

La trasmissione via RS485 viene implementata attraverso il chip MAX485 che permette una velocità di trasmissione fino a 2.5Mbps.

I dati rilevati dal contatore intelligente vengono trasmessi all'EMS (Energy Management System) che, grazie ad un sistema di indirizzi univoci associati ad ogni contatore intelligente, riesce a gestire dati provenienti da 32 diverse zone. La comunicazione è bidirezionale.

Per trasmissioni su distanze lunghe si preferisce utilizzare il sistema GPRS.

Il modulo utilizzato ha tre differenti interfacce per lo scambio dati: UART1, UART2, UART3.

UART1 viene utilizzata come porta seriale RS232 con una velocità di trasmissione di 9600bps e viene impiegata per le comunicazioni con un micro controllore esterno; UART2 ha una velocità di trasmissione di 115200bps, viene utilizzata per operazioni di programmazione esterna, debug e upgrade del firmware; UART3 viene utilizzata come interfaccia per i software incorporati nel sistema.

I dati contenuti all'interno del contatore intelligente sono molto importanti sia dal punto di vista commerciale (fatturazioni) sia dal punto di vista della privacy (informazioni sugli usi e le abitudini del consumatore) e per questo vanno protetti contro gli accessi non autorizzati e non devono essere persi in caso di interruzione dell'alimentazione. Anche lo scambio di informazioni tra una parte e l'altra del sistema deve avvenire in modo sicuro.

A causa dell'elevato numero di dati, alcuni contatori intelligenti utilizzano memorie ROM da 2Mb a 32bit, che assicurano un'ottima capacità di immagazzinamento dati e permettono di mantenere una elevata velocità nelle misurazioni.

L'interfaccia con l'utente avviene mediante uno schermo LCD il cui sistema di controllo è integrato nel microprocessore S3C2440. La comunicazione tra MCU e il display LCD avviene attraverso l'interfaccia seriale.

3.2.2 Tipologie di carica

Ci sono diversi tipi di algoritmi di controllo per la carica, i più usati sono i seguenti:

Opportunity Charging: il veicolo inizia il processo di carica appena viene parcheggiato e collegato alla colonnina, e termina il processo solo quando la batteria ha raggiunto la sua capacità massima. Non avviene nessuna comunicazione con la rete e nessuna operazione V2G. La carica viene gestita semplicemente dal BMS.

Carica basata sul prezzo dell'elettricità: prevede una rete di comunicazione unidirezionale o bidirezionale. Varia la potenza di carica in base alle variazioni di prezzo della corrente elettrica.

Carica basata sul carico della rete: è molto simile alla carica basata sul prezzo dell'elettricità, ma la gestione della potenza di carica si basa sulla densità di carico presente sulla rete.

Carica basata sulle energie rinnovabili: durante le giornate soleggiate o ventose i veicoli elettrici assorbono molta potenza dalle centrali eoliche e fotovoltaiche, mentre nei periodi di bassa produzione le batterie vengono caricate con potenze molto più basse. Quando la produzione di energia rinnovabile è nulla, i veicoli elettrici non riuscirebbero a caricarsi, ma il gestore della rete provvede a fornire una quantità minima di energia tale da poter completare il processo di carica in circa 6 ore.

3.2.3 Battery Exchange

Un'alternativa alla ricarica della batteria attraverso la colonnina è quella di sostituire la batteria esausta con una carica.

La batteria sostituita viene messa immediatamente in carica mentre il veicolo può proseguire il suo viaggio con una batteria fresca, eliminando i lunghi tempi di fermata per la ricarica della batteria.

La sostituzione della batteria permette di risparmiare tempo rispetto all'operazione di ricarica, però l'investimento per costruire una stazione di scambio è elevato: mediamente il costo di costruzione di una stazione di scambio è triplo di quello di una normale stazione di carica.

Alcuni particolari che contribuiscono all'aumento del costo di realizzazione sono l'elevato livello di automazione richiesto e l'elevata accuratezza necessaria nel controllo dello stato della batteria: la curva di carica e la capacità immagazzinata devono essere monitorate in maniera precisa per garantire che la batteria sia sempre nelle sue condizioni ottimali e di sicurezza.

Tutto questo si traduce nella richiesta di un sistema di monitoraggio molto più complesso di quello presente nelle stazioni di carica.

La sostituzione manuale della batteria è un'operazione difficile e lunga a causa del peso elevato del componente. Per effettuare lo scambio con efficienza e precisione è richiesta quindi un'elevata automazione.

Ci sono due tipi di robot per lo scambio di batteria: i robot automatici e i semiautomatici.

L'elevato livello di automazione deve essere completato da un sistema di comunicazione efficiente tra le parti coinvolte nel processo di scambio.

Per evitare che i cavi possano intralciare i movimenti dei bracci robotici viene utilizzato un protocollo wireless per le comunicazioni.

Grazie alla sua versatilità, alla robustezza, ai disturbi e all'efficienza nelle comunicazioni su piccole distanze, viene utilizzato il protocollo Blue Tooth in configurazione peer to peer.

I componenti che devono comunicare tra loro per rendere efficiente il processo di scambio sono: il dispositivo portatile (per monitorare e comandare il processo di scambio), il braccio meccanico, i moduli della batteria all'interno dell'auto e i moduli di stoccaggio all'interno della stazione di scambio.

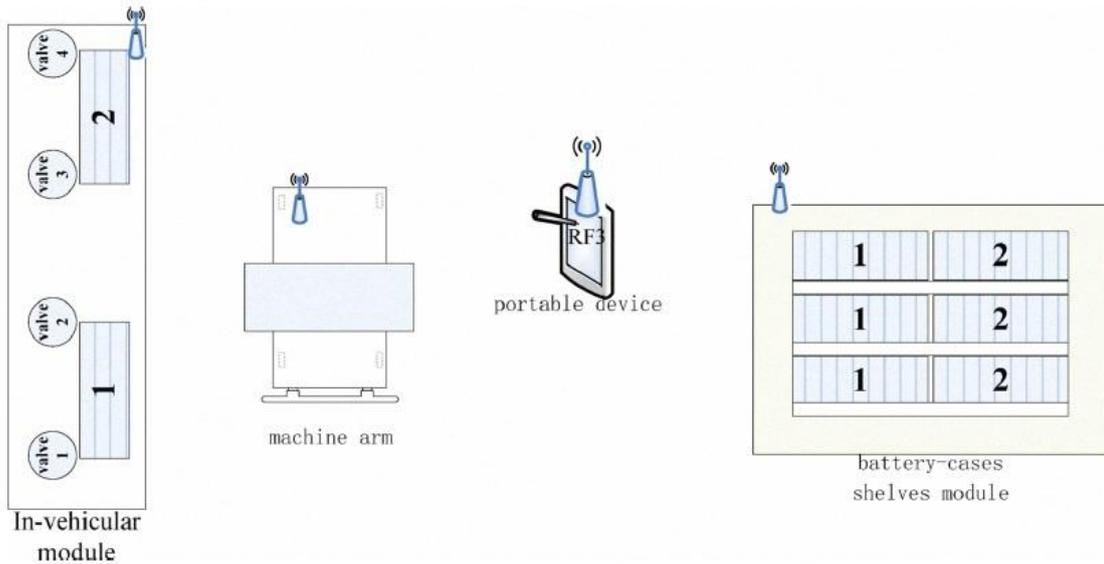


Figura 18 - Componenti coinvolti nell'operazione di sostituzione della batteria

Durante la comunicazione tra i componenti, un dispositivo viene designato come master, mentre gli altri sono in configurazione slave. Il master interroga gli slave uno per volta, e ogni slave non può occupare il canale di trasmissione finché non viene selezionato dal master. La comunicazione tra slave non è consentita.

Nel processo di estrazione, il modulo di controllo della batteria è il master mentre il braccio robotico è in configurazione slave.

Nonostante l'elevato costo iniziale, l'utilizzo di stazioni di scambio in zone urbane permette di ridurre le stazioni di carica e questo porta ad una minore presenza di materiale elettrico per la carica e quindi un risparmio.

Le batterie esauste smontate dai veicoli vengono successivamente caricate all'interno della stazione. Per ridurre l'impatto sulla rete può essere utilizzata energia proveniente da fonti rinnovabili come eolico e fotovoltaico.

Centrali ad energia rinnovabile e stazioni di scambio delle batterie possono quindi essere costruite assieme: nei momenti di elevata produzione di energia la stazione ne assorbe l'eccesso; nei momenti di bassa produzione la stazione si appoggia alla rete di distribuzione.

La carica delle batterie all'interno della stazione di scambio produce un impatto sulla rete meno pesante di quello prodotto dalle stazioni di carica perché i processi di carica non devono necessariamente essere veloci e possono quindi avvenire a potenze più basse.

L'ostacolo principale alla realizzazione delle stazioni di scambio per il trasporto privato è la mancanza di standardizzazione nei modelli delle batterie.

Buona parte dei veicoli elettrici attualmente in commercio sono un'elettrificazione di modelli già esistenti quindi la forma del pacco batterie viene adattata allo spazio disponibile; di conseguenza esistono troppe tipologie di pacchi batterie per poter gestire in maniera ottimale una stazione di scambio.

I costruttori non vogliono allinearsi su uno standard perché al momento lo ritengono una spesa inutile, una perdita e un limite troppo basso per permettere uno sviluppo futuro. Il rischio, infatti, è che tra poco tempo, complice il progresso tecnologico, lo standard scelto potrebbe risultare già obsoleto.

Nel trasporto pubblico, invece, la situazione è differente e quanto visto fin ora è già stato realizzato ed è in fase di sperimentazione sul campo. (1.8)

3.3 Impatto sulla rete di distribuzione

All'introduzione di un numero sempre più elevato di veicoli elettrici corrisponde l'aumento del numero di caricabatterie connessi alla rete e, quindi, della potenza richiesta al sistema.

Attualmente le reti elettriche di molte città lavorano già in condizioni vicine al loro limite di carico e in alcuni periodi dell'anno raggiungono il sovraccarico (ad esempio d'estate con l'aria condizionata). L'aggiunta di un ulteriore carico costituito dai caricabatterie porta all'aumento dello stress sui singoli componenti o, nell'ipotesi peggiore, al collasso della rete.

Il componente più debole della rete elettrica locale è il trasformatore di distribuzione. Il suo sovraccarico si traduce in un aumento della temperatura che accelera il processo di invecchiamento degli isolanti e dei componenti e che, a lungo termine, può portare a guasti che possono lasciare senza alimentazione interi quartieri.

La situazione di leggero sovraccarico è una condizione di lavoro abituale per un trasformatore di distribuzione ed è sopportabile solo per intervalli di tempo brevi e seguiti da adeguati periodi di raffreddamento. L'aggiunta di carico comporta il peggioramento delle condizioni di sovraccarico e la riduzione dei tempi di raffreddamento, rendendo così questa condizione insopportabile. Il futuro aumento del livello di penetrazione del veicolo elettrico nel settore dei trasporti non potrà far altro che peggiorare la situazione.

Nella figura 19 viene riportato l'andamento medio giornaliero della percentuale di carico di un trasformatore di distribuzione.

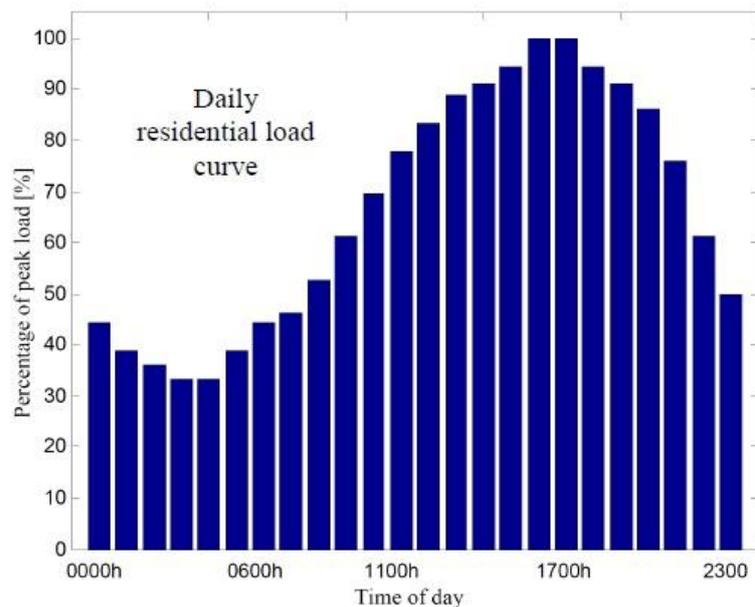


Figura 19 - Andamento giornaliero della percentuale di carico del trasformatore

Si nota che la percentuale di carico maggiore si ha nelle ore pomeridiane, con i picchi di massimo attorno all'ora di cena. Il carico poi diminuisce e si abbassa notevolmente nelle ore notturne.

Per dimensionare la quantità di energia necessaria per un ciclo di carica, la capacità delle batterie è un dato importante poiché il caricabatterie deve essere in grado di caricare la batteria in un tempo ragionevole. Maggiore sarà la capacità delle batterie, maggiore sarà il tempo richiesto e quindi l'assorbimento di potenza si prolungherà nel tempo.

Nel decidere la potenza di carica bisogna tenere in considerazione anche il dimensionamento dell'impianto domestico.

Vediamo ora un esempio di calcolo della potenza necessaria per la carica della batteria di un'automobile elettrica.

I veicoli elettrici attualmente in commercio montano batterie con un range di capacità molto ampio, ma mediamente la capacità installata è di circa 13kWh. Assumendo un rendimento del caricabatterie del 90% si nota come la rete debba fornire almeno 14kWh per caricare un solo EV.

Una normale carica da 2.4kW è quella con il minor assorbimento di potenza, ma è anche quella con la maggior durata: circa 6 ore per fornire 14kWh. Una ricarica media, invece, ha un assorbimento leggermente maggiore, 3.6kW, ma con durata di circa 4 ore. Alcuni caricabatterie sono già in grado di

effettuare una ricarica veloce, della durata di circa un'ora, ed è questo il caso con assorbimento maggiore.

Si hanno quindi diversi scenari di consumo, dalla richiesta di potenza elevata ma per brevi intervalli di tempo, ad una richiesta di potenza più bassa ma prolungata nel tempo.

Si è ulteriormente mostrato come la presenza di EV in carica vada ad avere un impatto significativo sulle curve di carico della rete. Nelle condizioni di alta richiesta di potenza il sistema elettrico perde efficienza e possono verificarsi oscillazioni di tensione.

Nella tabella seguente sono riportati i dati di carico e di tensione relativi agli scenari appena visti.

IMPACTS OF PEV CHARGE RATES, CHARGING TIME PERIODS AND PENETRATIONS ON THE PERFORMANCE OF A SMART GRID DISTRIBUTION SYSTEM

Charging Rates	Charging Periods	Low PEV Penetration (20%)			High PEV Penetration (80%)		
		$\frac{P_{LOSS}^{MAX}}{P_{TOTAL}^{PEAK}}^*$ [%]	Maximum voltage deviation** [%]	Maximum of all transformer currents*** [%]	$\frac{P_{LOSS}^{MAX}}{P_{TOTAL}^{PEAK}}^*$ [%]	Maximum voltage deviation** [%]	Maximum of all transformer currents*** [%]
Normal Charge 6 Hr @ $P_{chg,max} \approx 2.4$ kW	5pm-8am	2.146	12.658	0.812	2.298	16.913	0.976
	5pm-2am	2.198	12.909	0.859	2.732	18.715	1.130
	5pm-11pm (peak)	2.273	13.007	0.884	3.212	19.747	1.181
Medium Charge 4 Hr @ $P_{chg,max} \approx 3.6$ kW	5pm-8am	2.224	13.019	0.862	2.530	20.624	1.039
	5pm-2am	2.224	13.036	0.896	2.726	20.981	1.150
	5pm-11pm (peak)	2.265	13.148	0.930	3.649	22.755	1.343
	5pm-9pm (peak)	2.351	13.186	0.933	3.995	23.710	1.395
Quick Charge (to 80% Capacity) 1 Hr @ $P_{chg,max} \approx 11.4$ kW	5pm-8am	2.244	13.022	0.908	3.030	36.907	1.522
	5pm-2am	2.199	13.633	1.018	3.130	39.445	1.455
	5pm-11pm (peak)	2.293	13.561	1.027	3.863	43.301	1.658
	5pm-6pm (peak)	3.065	14.407	1.267	---	---	---

*) Ratio of system losses compared to total peak load.

**) Voltage deviation from rated voltage (i.e., 1 pu) at the worst bus.

***) Maximum of all distribution transformer load currents.

Tabella 1 - Impatto sulla rete delle diverse tipologie di carica

Alcune ricerche sottolineano come la maggior parte degli attuali possessori di EV tenda a ricaricare l'auto nelle ore serali, con il picco attorno all'ora di cena, al rientro dalla giornata lavorativa. La Figura 19 mostra come la fascia serale sia già caratterizzata da un'elevata percentuale di carico elettrico.

Lo scenario peggiora nel caso in cui siano presenti numerosi veicoli elettrici collegati contemporaneamente durante un periodo di elevata richiesta di energia poiché questo va ad aumentare ulteriormente il carico presente sulla rete e possono verificarsi fenomeni di oscillazione della tensione ed una generale scarsità della qualità di alimentazione.

L'andamento della tensione in p.u. presente sulla attuale rete elettrica al variare dei livelli di penetrazione del veicolo elettrico e della percentuale giornaliera di carico è riportata nella figura 20.

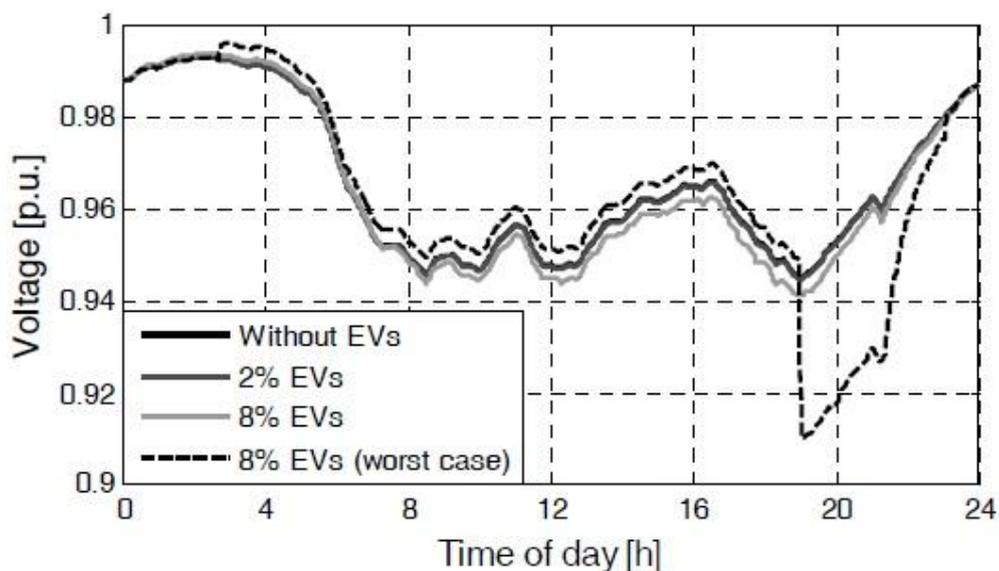


Figura 20 - Andamento giornaliero della tensione di linea in p.u. per diversi livelli di penetrazione

La carica non controllata e simultanea di molti veicoli elettrici può far variare il punto di funzionamento dei trasformatori portandoli ad un sovraccarico e, di conseguenza, ad un surriscaldamento. Questo porta ad una riduzione della vita utile dei trasformatori e può portare a rotture degli isolamenti e quindi a guasti. Nella figura 21 è riportato l'andamento della potenza sul trasformatore al variare del livello di penetrazione del veicolo elettrico.

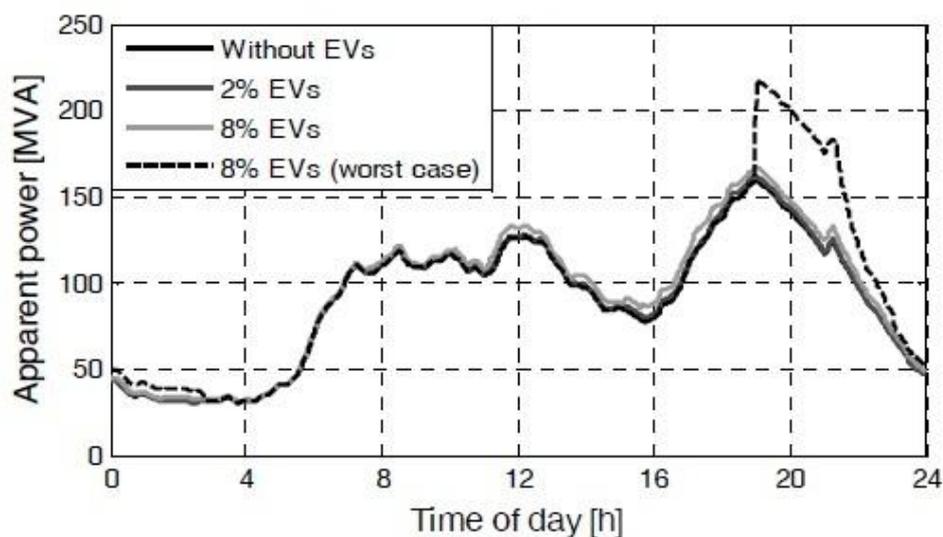


Figura 21 - Andamento giornaliero della potenza sul trasformatore per diversi livelli di penetrazione

Si nota come un alto livello di penetrazione del veicolo elettrico unito ad un elevato fattore di coincidenza (più veicoli collegati contemporaneamente alla rete) porta ad un forte aumento della potenza sul trasformatore nelle ore di massimo carico. Durante il resto della giornata la potenza richiesta è simile

alla condizione in cui non è presente alcun veicolo elettrico, questo perché i grafici sono stati realizzati assumendo una bassa percentuale di penetrazione dell'automobile elettrica nel mercato.

Quanto detto fin ora può quindi avere conseguenze più pesanti nel caso in cui la penetrazione dei veicoli elettrici fosse maggiore di quella ipotizzata. Studi dimostrano che i livelli di presenza degli EV non aumenteranno drasticamente nei prossimi anni, ma il gestore della rete non deve per questo farsi cogliere impreparato.

Attualmente è proprio compito del gestore (che ha un contatto diretto con il proprietario dell'EV o con un fornitore di servizi) quello di incentivare il cliente a ricaricare l'auto in periodi di basso carico o in fasce orarie in cui è garantita anche la presenza dell'energia prodotta da fonti rinnovabili.

Deve essere indotto un cambiamento nelle abitudini del cliente facendo in modo che nelle ore di carico massimo non ricarichi l'auto (oppure carichi solo il minimo indispensabile), rimandando il completamento della carica in fasce orarie differenti.

La gestione del periodo migliore in cui iniziare il processo di carica può avvenire in modo automatico nel caso si utilizzi un processo di carica intelligente. Il BMS e il Contatore Intelligente permettono infatti di calcolare il profilo di carica ottimizzato per venire in contro alle esigenze del cliente tenendo però in considerazione lo stato di carico della rete.

3.3.1 Impatto sui trasformatori, simulazione

Come visto nel paragrafo precedente, il trasformatore è l'elemento che verrà più sollecitato con un aumento del livello di penetrazione dei veicoli elettrici. Questo dispositivo è dimensionato in modo tale da raffreddarsi di notte così da recuperare lo stress termico subito durante il giorno a causa dell'elevato carico e delle condizioni ambientali.

Con l'introduzione dei veicoli elettrici ci si aspetta che la maggior parte dei processi di ricarica avverrà nelle ore notturne, limitando di fatto le possibilità del trasformatore di recuperare dagli stress termici diurni. Se le operazioni di carica non verranno gestite in maniera ottimale, c'è il rischio che i trasformatori più deboli non riescano ad uscire dalla condizione di sovratemperatura, con conseguenze pesanti sulla loro vita utile.

Un altro problema da tenere in considerazione è che la distribuzione dei veicoli elettrici non sarà uniforme, quindi un trasformatore di distribuzione potrebbe venire sovraccaricato mentre altri potrebbero non aver alcun veicolo connesso.

Come già anticipato, la causa principale del degrado del trasformatore è il raggiungimento di un'elevata Hot Spot Temperature (HST), ovvero la più alta temperatura che si raggiunge in un qualsiasi punto del trasformatore.

Il raggiungimento di una temperatura elevata negli avvolgimenti comporta un degrado chimico dei materiali di isolamento (carta e olio), che porta alla riduzione della tensione di isolamento e quindi all'aumento delle possibilità di cortocircuiti interni e guasti.

E' possibile individuare un modello per simulare l'aumento di HST in funzione del carico.

L'equazione di HST è la seguente:

$$\theta_{h(n)} = \theta_{0(n)} + \Delta\theta_{h(n)}$$

con:

θ_n = HST

θ_0 = temperatura massima dell'olio

$\Delta\theta_h$ = aumento di HST al tempo n

$\Delta\theta_h$ può essere a sua volta calcolato come:

$$\Delta\theta_{h(n)} = \Delta\theta_{h1(n)} + \Delta\theta_{h2(n)}$$

con $\Delta\theta_{h1}$ e $\Delta\theta_{h2}$ che derivano da due diverse equazioni che esprimono l'aumento di HST:

$$\Delta\theta_{h1(n)} = \Delta\theta_{h1(n-1)} + \frac{Dt}{k_{22}\tau_w} \times [k_{21} \times \Delta\theta_{hr}K^y - \Delta\theta_{h1(n-1)}]$$

$$\Delta\theta_{h2(n)} = \Delta\theta_{h2(n-1)} + \frac{k_{22}Dt}{\tau_0} \times [(k_{21} - 1) \times \Delta\theta_{hr}K^y - \Delta\theta_{h2(n-1)}]$$

K = fattore di carico

mentre θ_0 è data da:

$$\theta_{0(n)} = \theta_{0(n-1)} + \frac{Dt}{k_{11}\tau_0} \left[\left[\frac{(1 + k^2R)}{1 + r} \right]^x \times (\Delta\theta_{0r}) - [\theta_{0(n-1)} - \theta_a] \right]$$

le variabili e i loro valori utilizzati per la simulazione sono riportati nella seguente tabella:

Simbolo	Descrizione	Valore	Unità di misura
g_r	Gradiente di scambio di temperatura tra gli avvolgimenti e l'olio ad una determinata corrente	14.5	Ws/K
H	Coefficiente di Hot Spot	1.4	
k_{11}	Costante per il modello termico	1	
k_{21}	Costante per il modello termico	1	
k_{22}	Costante per il modello termico	2	
P_{rated}	Potenza del trasformatore	25 o 37.5	kW
R	Rapporto tra le perdite a carico e le perdite a vuoto ad una determinata corrente	8	
Dt	Step della simulazione	1	minuti
x	Coefficiente tra le perdite e l'aumento di temperatura dell'olio	0.8	
y	Coefficiente tra le perdite e l'aumento di temperatura degli avvolgimenti	1.6	
$\Delta\theta_{hr}$	Gradiente tra hot spot e temperatura massima dell'olio ad una determinata corrente	20.3	K
$\Delta\theta_{or}$	Aumento di temperatura dell'olio ad una determinata corrente	38.3	K
τ_0	Costante di tempo dell'olio	180	minuti
τ_w	Costante di tempo degli avvolgimenti	10	minuti

Tabella 2 - Dati utilizzati per la simulazione

Con i dati a disposizione è possibile tracciare un primo grafico che mostra l'andamento della temperatura di Hot Spot θ_h e del fattore di carico K in un arco di tempo di 120minuti.

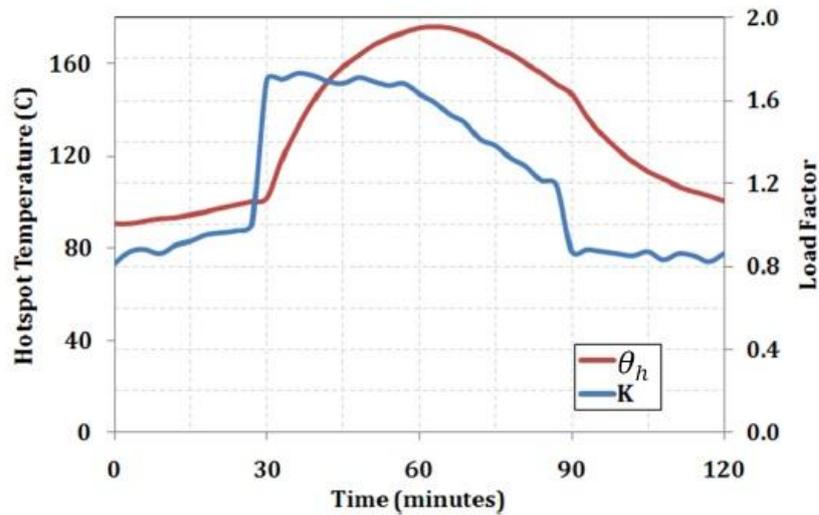


Figura 22 - Andamento della temperatura in funzione del fattore di carico

Lo scopo dell'analisi è quello di definire i limiti dell'aumento della temperatura di Hot Spot e di definire gli effetti di invecchiamento dovuti alla presenza di veicoli elettrici collegati in rete.

Il profilo di carica delle batterie viene assunto come se fosse un'onda quadra con valore minimo 0kW e ampiezza massima 3.3kW.

La relazione tra il carico e la temperatura è lineare fino a poco prima della potenza nominale del trasformatore, poi diventa esponenziale.

Nella figura 23 è mostrato l'andamento della temperatura in funzione del carico in due trasformatori di potenza 25kVA e 37.5kVA.

Il trasformatore da 37.5kVA si scalda meno a causa della maggiore potenza di dimensionamento.

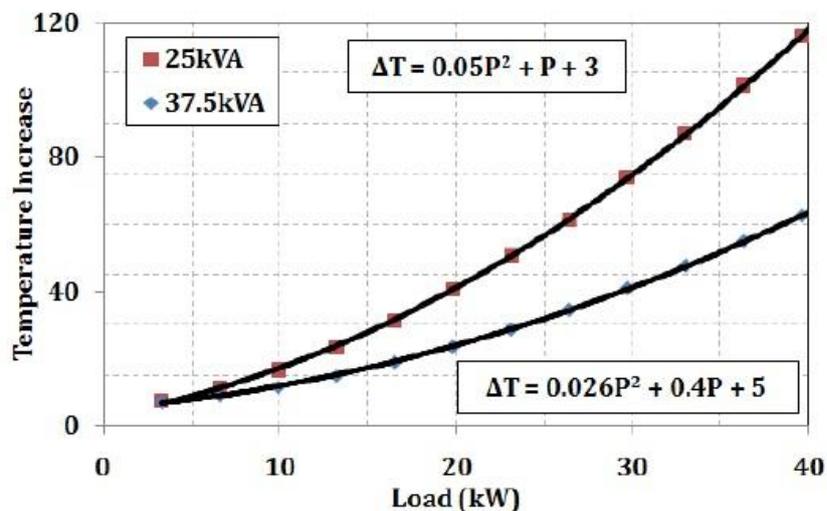


Figura 23 - Aumento della temperatura in funzione del carico in due trasformatori di taglia diversa

Una volta raggiunte elevate temperature di Hot Spot si ha un aumento del tasso di invecchiamento degli isolanti, come mostrato nella figura 24:

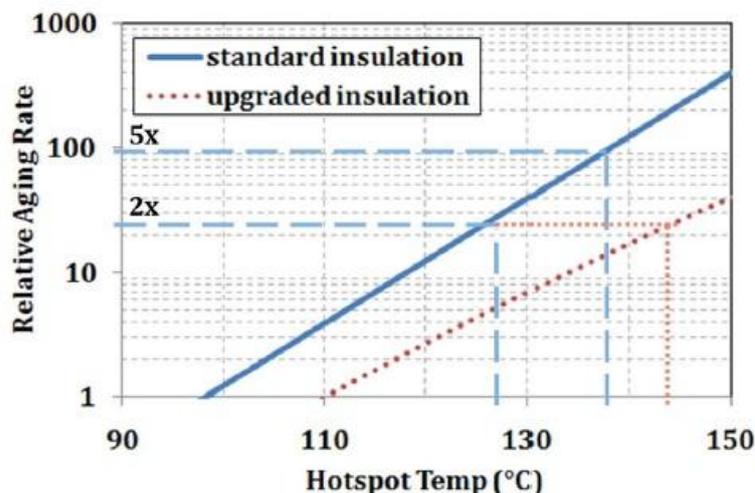


Figura 24 - Fattore di invecchiamento in relazione all'aumento della temperatura

In questo grafico si vede chiaramente come l'utilizzo di un materiale di isolamento migliore porti ad un minor tasso di invecchiamento poiché le sovratemperature riescono ad essere meglio sopportate.

L'*upgraded insulation* è un tipo di carta isolante che mantiene una resistenza alla trazione del 50% dopo aver passato 65000 ore in un tubo sigillato a 100°C.

La sostituzione dei vecchi trasformatori con quelli che utilizzano l'*upgraded insulation* è una delle prime soluzioni per prevenire l'invecchiamento prematuro dei trasformatori a seguito del sovraccarico dovuto al collegamento dei veicoli elettrici alla rete elettrica.

Oltre a questa soluzione va ovviamente affiancato un miglioramento delle comunicazioni tra veicoli e rete per ottimizzare i processi di carica in funzione dello stato della rete.

E' possibile combinare le due analisi appena effettuate per vedere come il numero di veicoli connessi al trasformatore incida sulla sua temperatura e di conseguenza sul suo invecchiamento.

Nella figura 25 vengono riportati i risultati di una simulazione in cui si è assunto un numero variabile di veicoli collegati contemporaneamente alla rete e caricati a 3.3kW. Il loro carico si va ad aggiungere ad una rete che impiegava già l'80% delle possibilità del trasformatore. La temperatura ambiente è ipotizzata essere di 30°C.

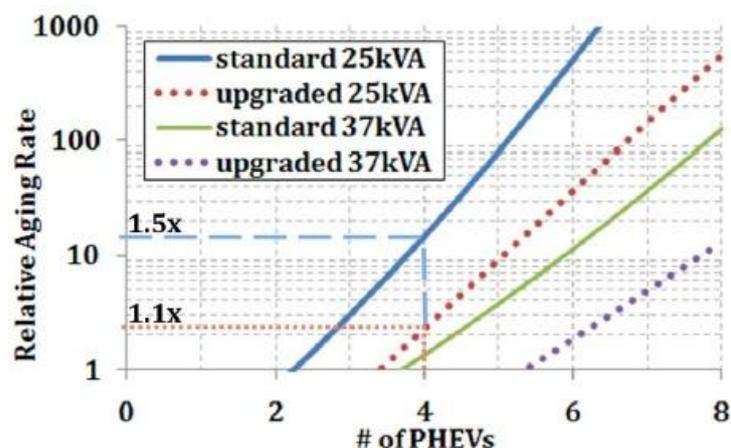


Figura 25 - Andamento del fattore di invecchiamento in relazione al numero di veicoli collegati

Il grafico mostra una riduzione di vita attorno al 10-15% per quanto riguarda il trasformatore da 25kVA, mentre il trasformatore da 37kVA vede una riduzione minore a causa della maggior potenza di dimensionamento. Nel caso reale la riduzione sarà più bassa perché le tipologie di veicoli in carica saranno diversificate e tali da permettere al trasformatore di recuperare dagli stress termici.

E' possibile ora effettuare un'analisi annuale dell'andamento della temperatura del trasformatore in funzione dei veicoli elettrici collegati alla rete.

I casi presi in considerazione sono elencati nella tabella 3.

Caso	Potenza del trasformatore	Numero di veicoli
Base	25	0
Base	37.5	0
1	25	1
2	25	3
3	25	6
4	37.5	1
5	37.5	3
6	37.5	6

Tabella 3 - Elenco casi utilizzati per la simulazione

I risultati delle simulazioni sono riportati nei seguenti grafici, rispettivamente per una carica a 3.3kW e 6.6kW.

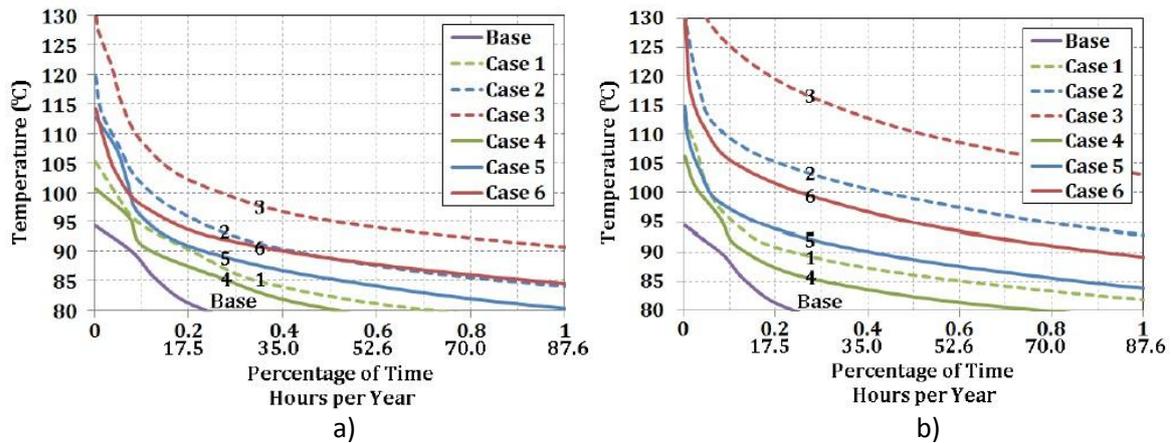


Figura 26 - a) Andamento annuale della temperatura nel trasformatore in caso di carica a 3.3kW
b) Andamento annuale della temperatura nel trasformatore in caso di carica a 6.6kW

Questi risultati portano ad una riduzione trascurabile della vita utile del trasformatore finché i veicoli collegati sono 2, mentre passando a 4 si può avere una riduzione fino al 37% sul trasformatore da 25kVA. I risultati peggiori si hanno con 6 veicoli collegati al trasformatore più debole, che vede la sua vita utile ridursi di più del 50%.

Come detto in precedenza, un modo per ottimizzare la carica dei veicoli elettrici così da non sovraccaricare i trasformatori è quello di introdurre un sistema di comunicazione tra rete e veicolo che permette di fermare la carica quando il trasformatore raggiunge i 100°C per poi riprenderla quando torna ad una temperatura più bassa.

Un tempo di attesa di circa 10 minuti può essere sufficiente.

Questo scenario porta però al rinvio di numerosi processi di carica: per un trasformatore da 25kVA le interruzioni attuali sono circa 1200, per un totale di 33 ore di ritardo, mentre per un trasformatore da 37.5kVA le interruzioni scendono a 240 per un totale di 7 ore di ritardo.

L'andamento della temperatura di Hot Spot in caso di rinvio della carica è riportato nella figura 27.

Si nota come nonostante il controllo attivo del processo di carica, siano presenti dei momenti in cui la temperatura supera i 98°C. Questo è dovuto a particolari condizioni di picco della rete uniti a elevate temperature ambientali dei mesi estivi.

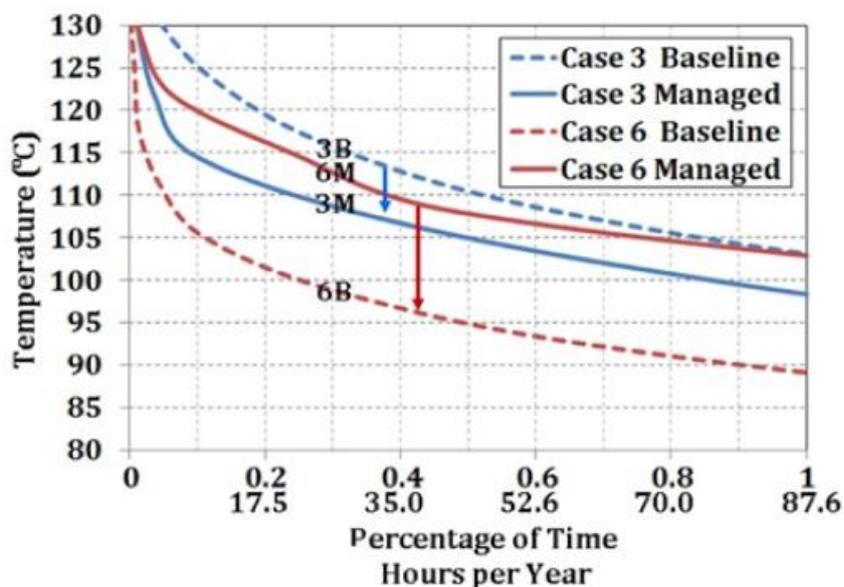


Figura 27 - Andamento annuale della temperatura sul trasformatore nel caso di carica controllata

3.4 Metodi per la disposizione ottimale delle stazioni di carica

A differenza delle auto con motore termico, l'auto elettrica ha un'autonomia limitata quindi è necessaria un'elevata densità di stazioni di ricarica per garantirne il successo commerciale e l'elevata penetrazione nel settore dei trasporti.

Cogliendo questa necessità, molte città hanno iniziato la costruzione di diversi punti di ricarica, senza però un'adeguata pianificazione.

Le stazioni di ricarica devono essere distribuite in modo da non lasciare zone potenzialmente scoperte e devono essere dimensionate in modo da venire incontro alle richieste degli automobilisti senza però generare una richiesta di potenza insostenibile per la rete elettrica di distribuzione.

Esistono diversi metodi per pianificare il posizionamento e il dimensionamento delle stazioni di ricarica, in questo paragrafo ne verranno presentati due basati sulla distribuzione della densità del flusso del traffico.

3.4.1 Metodo della suddivisione in griglie

Un primo metodo proposto per lo studio della distribuzione delle stazioni di carica è quello basato sulla suddivisione in griglie dell'area presa in considerazione.

Lo scopo di questo metodo è quello di ottimizzare la distribuzione delle stazioni di carica in una zona, scegliendone la migliore collocazione in funzione della densità del traffico e dei vincoli di potenza imposti dalla rete alle singole stazioni.

In base alla richiesta di potenza stimata per l'area presa in considerazione, viene effettuata una suddivisione preliminare in zone. Effettuando uno studio più approfondito si va poi ad ottimizzare la suddivisione fino ad avere una sola stazione di carica per ogni area.

Uno dei primi criteri da prendere in considerazione per la collocazione delle stazioni di carica è quello di minimizzare le spese per il loro raggiungimento. Indicando con h_1 il costo delle perdite e con h_2 il costo delle perdite aggiuntive è possibile calcolare il costo totale delle perdite come:

$$H_{min} = h_1 + h_2$$

questa quantità deve essere minimizzata.

Le quantità h_1 e h_2 possono essere calcolate come:

$$h_1 = \frac{\sum L_j}{g} \times p$$

p = prezzo della ricarica

g = chilometri percorsi per Wh

$\sum L_j = \sum d_{ij} \times q_i$ = sommatoria delle distanze d_{ij} tra la stazione di ricarica j e il punto i in cui si trova l'utente moltiplicate per le richieste di ricarica q_i nel punto i .

$$h_2 = \frac{\sum L_j}{v} \times k$$

v = velocità media del veicolo

k = costo del tempo di utilizzo dell'auto (travel time cost)

Per calcolare la potenza richiesta alle stazioni di ricarica occorre stimare il flusso di veicoli che transita in ogni nodo di intersezione.

Indichiamo con w il numero di sezioni di strada connesse con il nodo i e indichiamo con $i + f$ il nodo che è connesso con i .

Il flusso di veicoli transitanti dal nodo i al nodo $i + f$ nel tempo t è dato quindi dalla seguente espressione:

$$p_t^f(i, i + f)$$

mentre il flusso totale di veicoli nel nodo i è dato da:

$$p_t^i = \sum_{f=1}^w p_t^f(i, i+f)$$

Il flusso di veicoli è bidirezionale e non è simmetrico, per questo bisogna prestare molta attenzione al verso in cui il flusso viene calcolato.

Una volta calcolato il flusso di autoveicoli è possibile ricavare, con la seguente formula, la quantità di potenza richiesta alla stazione di carica nel singolo nodo nell'intervallo di tempo T :

$$q_i = \int_0^T p_t^i \times \alpha \times \beta \times P_v dt$$

α = proporzione dei veicoli elettrici

β = velocità di carica dei veicoli elettrici

P_v = capacità media dei veicoli elettrici

Ipotizzando che siano presenti n_j nodi nell'area relativa alla stazione di carica j , è possibile calcolare la potenza richiesta alla stazione con la seguente formula:

$$Q_j = \sum_{i=1}^{n_j} q_i$$

E' possibile calcolare il numero di caricabatterie necessari:

$$m_j = \left\lceil \frac{Q_j \times \rho}{P \times k_x \times T_v \times k_t} \right\rceil + 1$$

m_j = numero di caricabatterie per stazione

ρ = margine di capacità della stazione di carica

P = potenza massima dei caricabatterie

k_x = efficienza dei caricabatterie

T_v = tempo effettivo di carica

k_t = indice di contemporaneità

Una volta stimata la potenza richiesta da ciascuna partizione, che è il primo passo dell'algoritmo, è possibile calcolare il numero di stazioni di carica necessarie:

$$N_{min} = \frac{Q}{S_{max}} \quad N_{max} = \frac{Q}{S_{min}}$$

Q = stima della potenza assorbita dalla zona presa in considerazione

S_{min} = minima capacità della stazione di carica

S_{max} = massima capacità della stazione di carica

N = numero di stazioni di carica

In base a questi risultati può quindi essere effettuata una prima suddivisione dell'area in studio.

Il punto in cui verrà posizionata la stazione di carica all'interno della singola suddivisione sarà tale da minimizzare le perdite H_{min} .

Un nodo i appartiene alla partizione j se $d_{ij} < d_{ik}$, con

d_{ij} = distanza tra il nodo i e la stazione di carica della partizione j

d_{ik} = distanza tra il nodo i e la stazione di carica della partizione k

Una volta effettuata la suddivisione preliminare, occorre ottimizzare la partizione andando a confrontare le esigenze delle singole aree con la potenza disponibile alla stazione di carica.

Se la potenza richiesta è minore della minima capacità disponibile alla stazione di carica ($ZoneDemand < S_{min}$) allora l'area è a bassa richiesta.

Se invece $ZoneDemand > S_{max}$ l'area è definita ad alta richiesta.

In entrambi i casi la situazione va riequilibrata modificando la partizione iniziale, accorpando le zone caratterizzate da bassa richiesta e dividendo quelle caratterizzate da una richiesta elevata.

Questo processo deve essere ripetuto finché tutte le aree avranno una potenza richiesta compresa tra S_{min} e S_{max} ($S_{min} < ZoneDemand < S_{max}$).

La logica del metodo delle suddivisioni è riassunta nel diagramma di flusso riportato in figura 28.

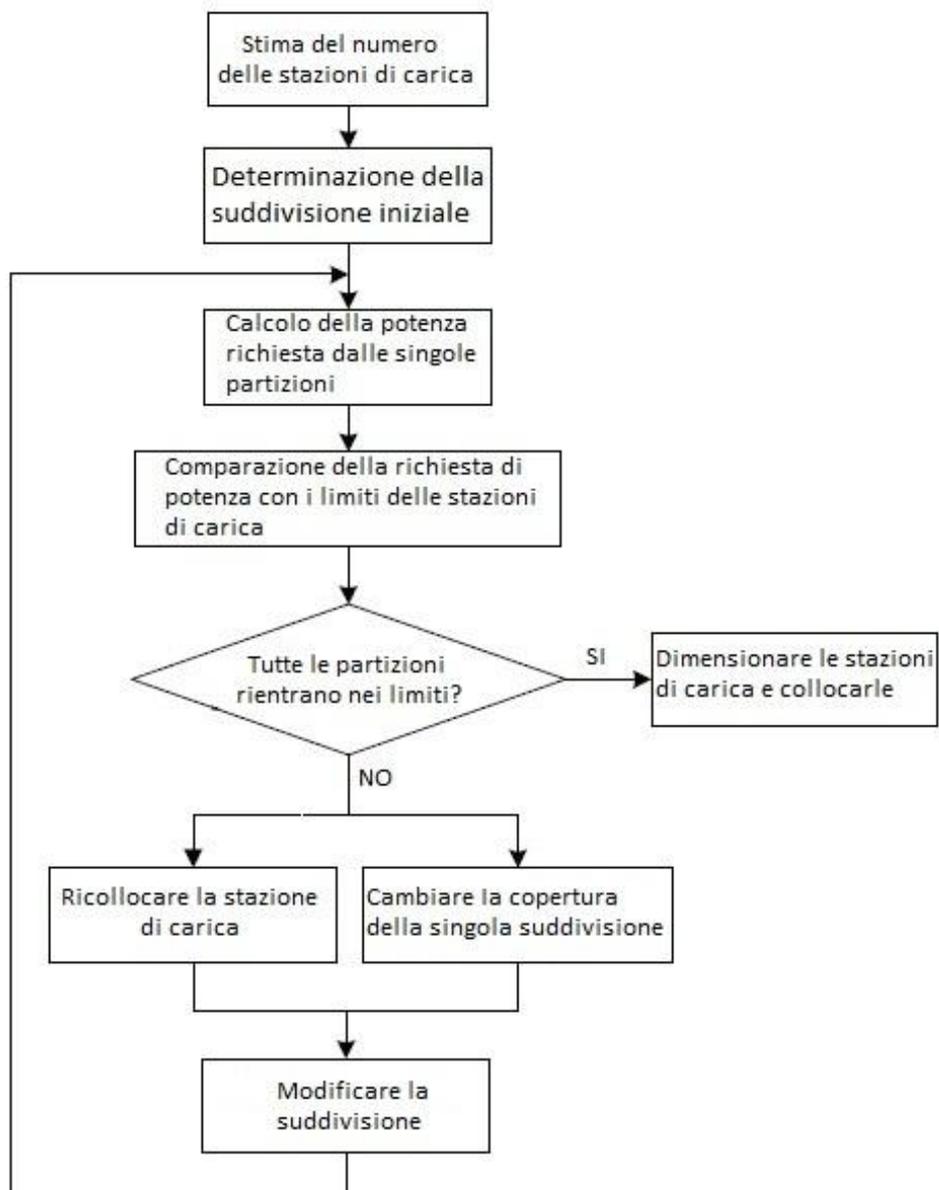


Figura 28 - Diagramma di flusso relativo all'algorithmo di suddivisione

3.4.1.1 Applicazione

Per il caso portato come esempio si ha un'area di 63km² all'interno della quale sono presenti 48 punti di intersezione e 110 sezioni stradali.

I dati relativi al flusso del traffico di ogni singola area sono riportati nella tabella 4.

Node Label	X	Y	Traffic Flow	Node Label	X	Y	Traffic Flow
1	1.0	6.0	4495	25	8.0	3.0	2012
2	2.0	6.0	2813	26	7.0	3.0	1435
3	3.0	6.0	3595	27	6.0	3.0	2156
4	4.0	6.0	3493	28	5.0	3.0	3211
5	5.0	6.0	5470	29	4.0	3.0	2543
6	6.0	6.0	4304	30	3.0	3.0	1242
7	7.0	6.0	2684	31	2.0	3.0	1059
8	8.0	6.0	4100	32	1.0	3.0	2132
9	8.0	5.0	4329	33	1.0	2.0	3055
10	7.0	5.0	2404	34	2.0	2.0	2185
11	6.0	5.0	4210	35	3.0	2.0	1327
12	5.0	5.0	3408	36	4.0	2.0	2566
13	4.0	5.0	2265	37	5.0	2.0	3526
14	3.0	5.0	1327	38	6.0	2.0	4210
15	2.0	5.0	2085	39	7.0	2.0	3401
16	1.0	5.0	3055	40	8.0	2.0	4329
17	1.0	4.0	2034	41	8.0	1.0	4200
18	2.0	4.0	959	42	7.0	1.0	2738
19	3.0	4.0	1242	43	6.0	1.0	4511
20	4.0	4.0	3040	44	5.0	1.0	3216
21	5.0	4.0	2660	45	4.0	1.0	1493
22	6.0	4.0	2099	46	3.0	1.0	3596
23	7.0	4.0	1314	47	2.0	1.0	2843
24	8.0	4.0	1712	48	1.0	1.0	5015

Tabella 4- Flusso di traffico di ogni singola area

Al momento dello studio, la percentuale di penetrazione dei veicoli elettrici (α) è del 15%, e la percentuale di carica è al 10%.

La capacità media installata sui veicoli viene fissata a 50kWh, mentre la potenza di ogni carica batterie è di 96kW. In ogni stazione ci sono da 6 a 20 caricabatterie caratterizzati da un'efficienza del 90%; il tempo effettivo di carica è di 16 ore.

Il margine sulla capacità caricata è di 1.2 mentre l'indice di coincidenza è 0.8-1.0.

Ogni veicolo elettrico può percorrere 7km per ogni kWh, ed è caratterizzato da una velocità media di 20km/h. L'energia per la carica costa 0.8 Yuan/kWh.

Si definiscono il numero massimo e il numero minimo di stazioni e, facendone la media, si trova il numero di stazioni necessario per la prima suddivisione dell'area.

$$N_{min} = 5 \quad N_{max} = 13 \rightarrow N = 9$$

L'area viene quindi inizialmente divisa in 9 partizioni. La situazione è riportata in figura 29.

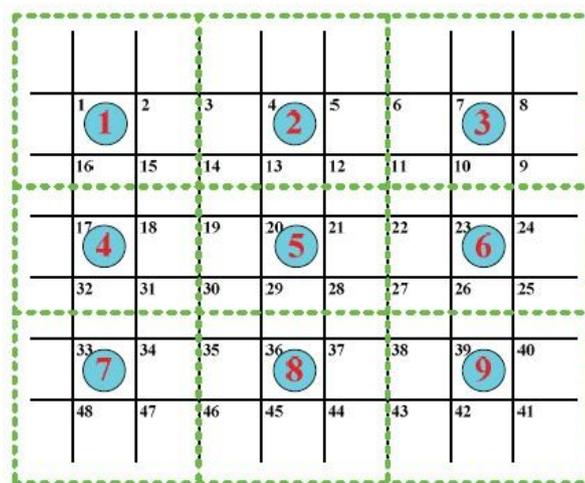


Figura 29 - Suddivisione iniziale dell'area

Dopo aver effettuato la prima suddivisione troviamo le seguenti richieste di potenza di carica:

Partition Label	X-coordinate of the Station	Y-coordinate of the Station	Charging Demand (kWh)
1	1.55	5.67	11182.13
2	4.84	5.76	16015.88
3	7.33	5.51	13330.50
4	1.43	3.47	5569.50
5	4.62	3.49	11117.63
6	7.23	3.44	6450.38
7	1.50	1.31	11669.63
8	4.86	1.56	13217.25
9	7.27	1.56	14271.38

Tabella 5 - Richieste di potenza di carica dopo la prima suddivisione

Alcune zone sono caratterizzate da una richiesta elevata, mentre altre da una richiesta bassa. E' necessario quindi ricalcolare la suddivisione e la collocazione delle stazioni di ricarica.

Dopo alcuni passaggi di ottimizzazione si ottiene la situazione riportata nella tabella 6.

Partition Label	X-coordinate of the Station	Y-coordinate of the Station	Charging Demand (kWh)
1	1.72	5.46	15273.00
2	5.09	5.73	17362.50
3	7.77	5.18	12407.25
5	4.71	3.48	13644.75
7	1.69	1.54	15909.00
8	5.28	1.54	14641.50
9	7.69	1.83	13586.25

Tabella 6 - Richieste di potenza dopo l'ottimizzazione

E' possibile ora calcolare il numero di caricabatterie presenti in ogni stazione. I risultati sono riportati nella seguente tabella:

Partition Label	The Number of Chargers	The Users' Loss (Yuan)
1	15	15206.86
2	17	14431.12
3	11	9825.22
5	14	13417.06
7	16	15817.32
8	15	12349.70
9	14	10854.20
Total	102	91901.48

Tabella 7 - Numero di caricabatterie per stazione

Nella figura 30 possiamo vedere graficamente il risultato del processo di ottimizzazione delle suddivisioni e del posizionamento delle stazioni di ricarica.

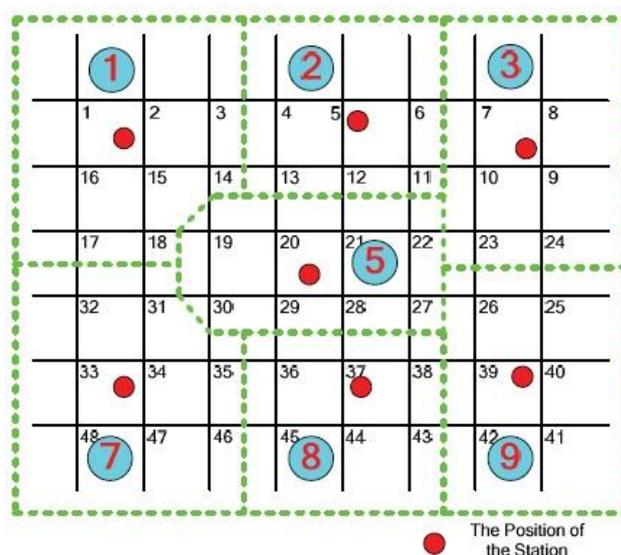


Figura 30 - Suddivisione finale

3.4.2 Metodo basato sulla richiesta di energia

Il secondo metodo proposto prende in considerazione la domanda di energia richiesta in base al flusso del traffico, unendola ai limiti di potenza della rete di distribuzione e alle linee guida imposte dai piani municipali di costruzione per individuare le zone in cui dovrebbe essere costruita una stazione di carica.

Come primo passo viene definita la domanda di energia nella zona presa in considerazione e viene disegnata una mappa in cui vengono evidenziati i punti di maggior richiesta.

Attorno a questi punti vengono cercate delle stazioni di servizio già esistenti in modo da sfruttarne le strutture per trasformarle in stazioni di ricarica, diminuendo così i costi di realizzazione.

Nel caso non esistesse alcuna stazione di servizio, si procede con l'individuazione del punto ottimale per la costruzione della stazione di ricarica tenendo in considerazione i limiti imposti dalla rete di distribuzione (evitando di sovraccaricare i trasformatori di distribuzione), le necessità imposte dal piano regolatore della città, oltre che a cercare di minimizzare le perdite per il raggiungimento della stazione di carica.

3.4.2.1 Calcolo della richiesta di energia

Supponiamo di prendere in considerazione un'area φ caratterizzata dalla conservazione dei veicoli in transito (il numero di veicoli in uscita dall'area è uguale a quello in entrata).

Ipotizzando che il flusso di veicoli nelle aree di raggio r_1 e r_2 sia dato da f_1 e f_2 , è possibile calcolare il numero di veicoli N come:

$$\begin{aligned} N &= S_1 \times f_1 = 2\pi r_1 \Delta x f_1 \\ N &= S_2 \times f_2 = 2\pi r_2 \Delta x f_2 \end{aligned}$$

Introducendo la velocità dei veicoli v_1 e v_2 è possibile calcolare l'energia consumata E_1 ed E_2 .

$$E_1 = \frac{N t_1 E_0}{S_1} = \frac{N \frac{\Delta x}{v_1} E_0}{2\pi r_1 \Delta x} = \frac{N E_0}{2\pi r_1 v_1}$$

$$E_2 = \frac{N t_2 E_0}{S_2} = \frac{N \frac{\Delta x}{v_2} E_0}{2\pi r_2 \Delta x} = \frac{N E_0}{2\pi r_2 v_2}$$

La relazione tra il flusso del traffico e la velocità dei veicoli è data da:

$$v = Q(f)$$

Questo metodo per dimensionare e collocare le stazioni di carica è stato elaborato in Cina e, dall'esperienza maturata sul campo, la relazione precedente può essere semplificata come:

$$v = \frac{c}{f^b}$$

In base al raggio r_1 e r_2 è possibile quindi riscrivere l'espressione dell'energia consumata come:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{r_2^{b+1}}{r_1^{b+1}}$$

Supponendo che l'area φ abbia raggio r_0 è possibile esprimere l'energia totale consumata come:

$$E = \begin{cases} E_0, & r \leq r_0 \\ \frac{c}{r^{b+1}} + a, & r > r_0 \end{cases}$$

Quest'ultima equazione indica che l'energia consumata all'interno di un'area φ dipende dalla distanza percorsa r .

Col passare degli anni l'auto elettrica sarà sempre più presente sul mercato e andrà gradualmente a sostituire l'automobile tradizionale. Di pari passo con la scomparsa dell'automobile con motore termico verranno dismesse le stazioni di servizio. Costruire stazioni di carica al posto delle stazioni di servizio può essere una soluzione per risparmiare sulle infrastrutture.

Il posizionamento delle stazioni di servizio, però, non è ottimizzato per le richieste e le necessità del proprietario dell'auto elettrica.

L'area di copertura di una stazione di servizio tradizionale è rappresentabile con un cerchio di raggio R all'interno del quale la capacità di copertura è costante.

Per quanto riguarda i veicoli elettrici, esiste la necessità di effettuare la ricarica nella stazione di carica più vicina, in modo da ridurre le perdite per il raggiungimento della stazione stessa. Dalla pratica e da alcuni studi effettuati, la capacità di copertura di una stazione di carica può essere rappresentata con il grafico riportato nella figura 31.

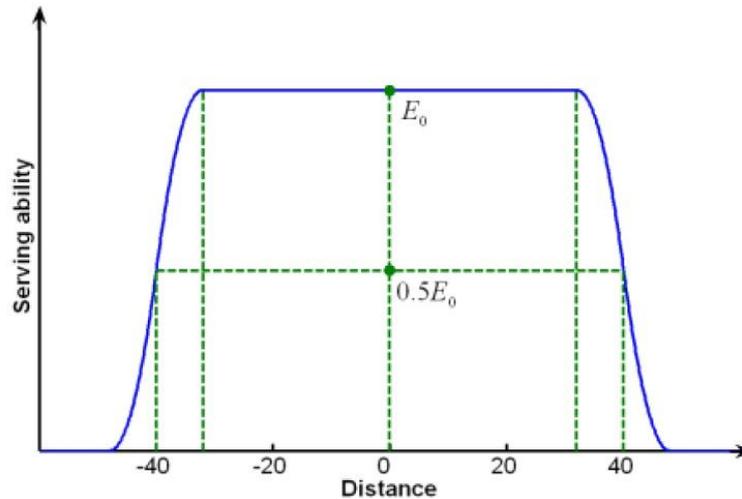


Figura 31 - Capacità di copertura di una stazione di carica

Si nota quindi che il posizionamento di una stazione di servizio può non essere ottimale per ospitare al suo interno anche una stazione di carica. Occorre anche tenere in considerazione che una stazione di servizio costruita nelle vicinanze di una strada principale vedrà un flusso di traffico maggiore rispetto ad una costruita lungo strade secondarie.

3.4.2.2 Limiti imposti dalla rete di distribuzione

La stazione di carica verrà alimentata dai trasformatori di distribuzione, quindi la loro posizione e il loro carico di lavoro saranno fondamentali per determinare il punto in cui verrà collocata la stazione di ricarica.

Una singola stazione può essere alimentata da più trasformatori di distribuzione, quindi occorre trovare la soluzione più economica per garantire la gestione ottimale della rete.

Ipotizzando che la posizione del trasformatore m sia indicata come (u_j, v_j) e che la posizione della stazione di carica sia (x_i, y_i) , in accordo con il principio del minimo investimento, della minima distanza tra i carichi e del minimo costo della rete, è possibile trovare le condizioni che minimizzano i costi:

$$\min C = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^h \delta_{ji} \left[(u_j - x_i)^2 + (v_j - y_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\min C = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^h \delta_{ji} S_i \left[(u_j - x_i)^2 + (v_j - y_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\min C = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^h \delta_{ji} P_i \left[(u_j - x_i)^2 + (v_j - y_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\min C = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^h \delta_{ji} \beta_i P_i \left[(u_j - x_i)^2 + (v_j - y_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

con:

$\delta_{ji}=0$ se il carico i non è alimentato dal trasformatore j

$\delta_{ji}=1$ se il carico i è alimentato dal trasformatore j

h = numero dei carichi

S_i = area della linea di trasmissione

P_i = potenza del carico

β_i = costo dell'energia per kilometro

3.4.2.3 Limiti imposti dallo sviluppo urbanistico

Nel posizionare una stazione di ricarica occorre tenere in considerazione il fatto che questa dovrà essere distante da incroci, da edifici pubblici (come ad esempio gli ospedali) e da luoghi turistici. La linea deve essere tenuta distante da strade molto trafficate mentre deve essere vicina alle strade secondarie.

Queste condizioni possono essere riportate con la seguente notazione:

$$\min D_I = \left[(x_i - x_{I_i})^2 + (y_i - y_{I_i})^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\min D_B = \left[(x_i - x_{I_B})^2 + (y_i - y_{I_B})^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

3.4.2.4 Applicazione dell' algoritmo, città di Chengdu

Come esempio, viene ora presentata l'applicazione per definire la collocazione delle stazioni di ricarica nell'area della città di Chengdu, in Cina.

I passi dell'algoritmo sono:

1- Attraverso Google Earth e Google Maps viene acquisita la mappa della rete stradale e del flusso di traffico relativi all'area presa in esame in modo da calcolarne la richiesta di energia. Questi dati sono approssimazioni ma possono essere utilizzati senza creare problemi all'algoritmo. Il risultato è riportato nella figura 32.

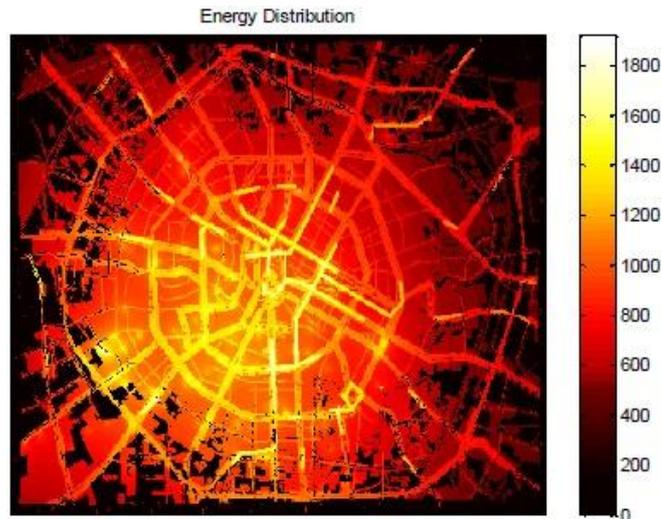


Figura 32 - Distribuzione della richiesta di energia nella città di Chengdu

2- In base alla capacità di copertura viene calcolata la massima energia media richiesta alla stazione di carica se fosse costruita in un punto qualsiasi (x_o, y_o)

$$e_{max} = \max \bar{E}(x_o, y_o) = \frac{\iint_{(x,y) \in S} E(x, y) dx dy}{\iint_{(x,y) \in S} dx dy}$$

S = area del cerchio di raggio r_o e centro nel punto (x_o, y_o)

3- Si individua l'area con $r < r_o$. Se all'interno di quest'area esiste una stazione di servizio allora è possibile costruire la stazione di ricarica al suo interno, così da soddisfare le esigenze sia dei veicoli tradizionali sia di quelli elettrici.

L'algorithmo propone quindi le coordinate (x_j, y_j) nelle quali andrà collocata la stazione di ricarica e la richiesta di energia che dovrà sostenere. In questo modo è possibile dimensionare la stazione di carica e procedere alla sua realizzazione. In questo caso si può procedere con il passo 5.

Nel caso non fosse presente una stazione di servizio nell'area presa in considerazione, occorre calcolare le coordinate per costruirne una nuova. La procedura è indicata nel passo 4.

4- Tenendo in considerazione i limiti imposti dalla rete di distribuzione e dai piani comunali di costruzione è possibile ricavare la funzione:

$$F(x, y) = f(c(x, y), D(x, y))$$

Una volta individuata l'area con $r < r_0$, e calcolato il $\min F$, l'algoritmo restituisce l'energia richiesta alla stazione e la sua posizione (x_j, y_j) .

5- La capacità di copertura della stazione di carica appena individuata può essere espressa come: $s(x, y, x_i, y_i)$

Una volta individuata la prima stazione occorre dimensionare le altre.

La nuova richiesta di energia è data da:

$$e(x, y) = e(x, y) - s(x, y, x_i, y_i)$$

L'algoritmo riparte dal passo 2 e prosegue fino ad avere individuato ed ottimizzato la posizione di tutte le stazioni di carica necessarie.

Una volta completato il processo di ottimizzazione si ottiene il seguente risultato:

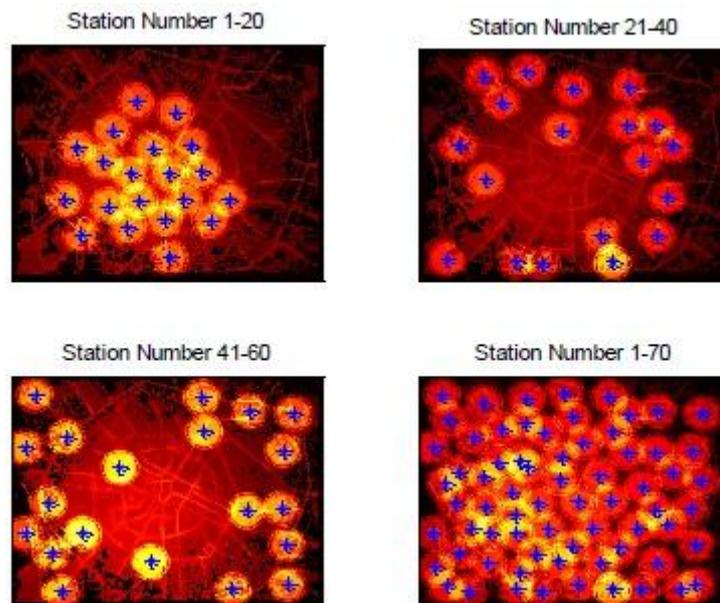


Figura 33 - Disposizione finale delle stazioni di carica nella città di Chengdu

CAPITOLO 4 - SERVIZI DI RETE OFFERTI DAL VEICOLO (V2G)

4.1 Introduzione

I sistemi di accumulo svolgono un ruolo importante nel supporto alla generazione perché sono necessari per la gestione ottimizzata delle microreti e indispensabili per la gestione dei transitori veloci.

Permettono inoltre di creare un disaccoppiamento tra la fase di produzione di energia e quella di utilizzo ottimizzando così la produzione da fonti rinnovabili non programmabili.

I sistemi di accumulo, inoltre, offrono una serie di servizi ancillari alla rete e ne garantiscono l'ottimizzazione.

L'insieme dei servizi offerti dai sistemi di accumulo è riportato nella figura 34.

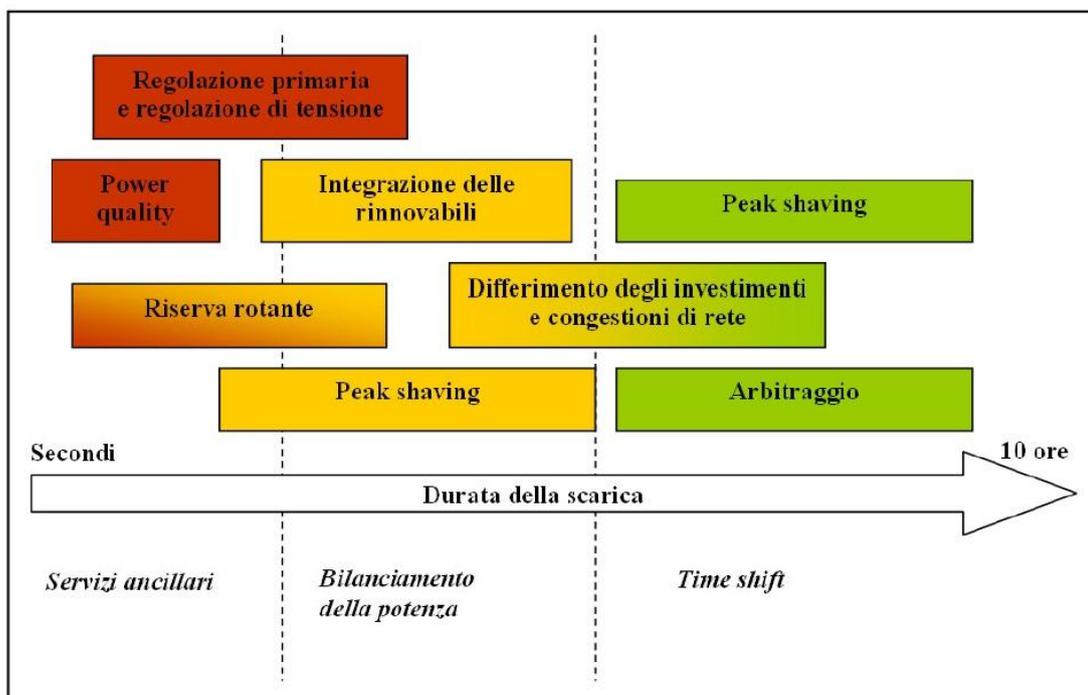


Figura 34 - Servizi di rete offerti dagli accumulatori, suddivisi per la durata di intervento

Esistono diverse tipologie di accumulatori ed è possibile raggrupparli in base alla tecnologia utilizzata: accumulatori elettrochimici, elettromeccanici e basati su super condensatori.

Per quanto riguarda gli accumulatori elettrochimici, la tipologia di batterie più versatile per fornire servizi alla rete è quella basata sugli ioni di litio (NCA-LFP), ed è proprio questa tecnologia di batterie che sta avendo sempre più applicazioni nell'ambito della trazione elettrica.

Con l'introduzione di milioni di EV e di PHEV, è quindi possibile utilizzare le loro batterie come elemento di accumulo per fornire servizi alla rete, possono essere infatti utilizzate come una fonte per sostenere picchi di carico, come spinning reserve (energia di riserva immagazzinata) o come strumenti di regolazione dell'energia prodotta.

L'interazione bidirezionale tra il veicolo e la rete viene chiamata Vehicle to Grid (V2G) ed è possibile solo in un contesto di Smart Grid (argomento trattato nel capitolo 6) ovvero una rete elettrica evoluta in grado di comunicare in maniera bidirezionale tra il gestore e il consumatore utilizzando sistemi intelligenti di misura e di monitoraggio dei consumi e delle richieste.

Come visto nel capitolo 1, i veicoli elettrici montano batterie con una capacità che può andare da 10kWh ai 100kWh in accordo alla taglia del veicolo stesso. Una volta collegati alla rete, i veicoli elettrici offrono quindi un grosso potenziale per la gestione dell'equilibrio della potenza di rete.

Lo scenario V2G porta vantaggi anche al consumatore infatti esso può rivendere l'energia, può stipulare contratti elettrici ad hoc oppure può ottenere degli incentivi sull'acquisto del veicolo elettrico o sulla sostituzione delle batterie.

Una delle problematiche della tecnologia V2G è quella della ricerca di un protocollo standard valido per le comunicazioni e per la misurazione. Al momento, infatti, non esiste ancora alcuno standard per la comunicazione bidirezionale.

Fondamentale per il successo del V2G è lo sviluppo di tecniche di misurazione avanzate, delle tecniche di ricarica e dei componenti di monitoraggio.

Per lo sviluppo del V2G servono i seguenti requisiti:

- connessione di potenza affinché il flusso di energia passi dal veicolo alla rete;
- controlli e interfacce logiche: permettono al gestore della rete di determinare la capacità disponibile delle batterie; permettono di monitorare la potenza in uscita dal veicolo; garantiscono la presenza di servizi ausiliari;
- precisione nelle misurazioni che avvengono durante il processo.

4.2 Vantaggi del V2G

Come anticipato nell'introduzione, la modalità V2G permette di sfruttare le batterie in diversi modi vantaggiosi sia dal punto di vista tecnico (per la rete) sia dal punto di vista economico.

4.2.1 Servizi per la rete

Le batterie dei veicoli elettrici possono offrire alla rete diversi servizi. I principali sono riportati di seguito.

Power Peak

Quando è richiesto un aumento temporaneo della potenza in rete, vengono momentaneamente messe in servizio alcune centrali. Con la tecnica V2G le batterie delle auto possono essere utilizzate per questa funzione in maniera meno dispendiosa e più rapida rispetto a quella di mettere in servizio una centrale. Il sistema di accumulo viene utilizzato per far fronte a variazioni rapide del carico livellandolo sulla potenza media.

La durata di accensione per far fronte ai picchi è in media di 3-5 ore. In regime V2G questa richiesta di potenza è affrontabile solo con un numero elevato di veicoli collegati contemporaneamente alla rete (ad esempio in un parcheggio).

Le batterie dei veicoli elettrici possono fornire energia (attraverso la scarica) durante le fasi di richiesta di potenza e assorbirla (attraverso la carica) durante le fasi di basso carico, così da diminuire la differenza tra il picco di carico massimo e le condizioni di carico minimo. Questa operazione è definita *Peak Shaving*, e l'effetto è riportato nella figura seguente:

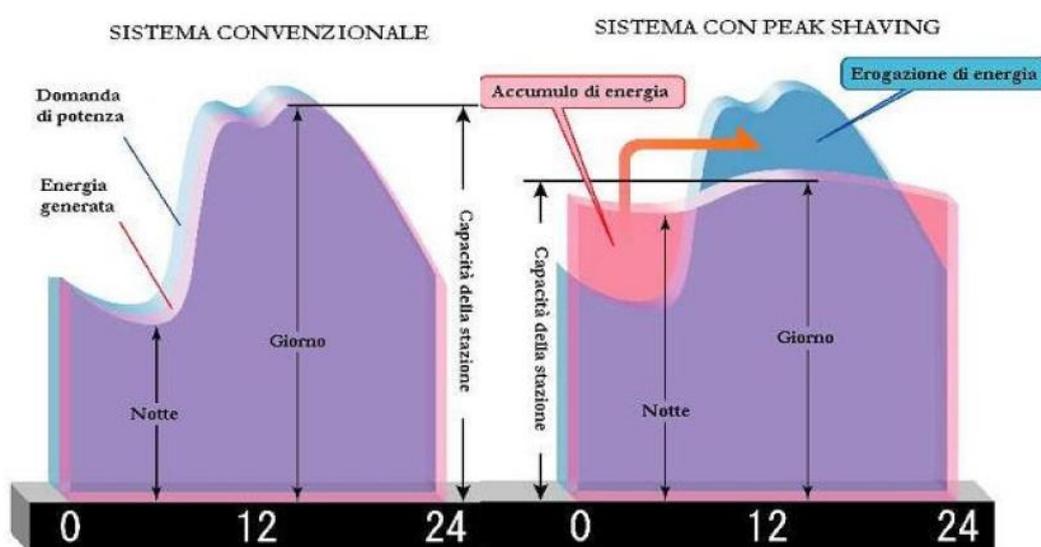


Figura 35 - Peak Shaving

Spinning Reserve

Il termine Spinning Reserve si riferisce a dispositivi che sono in grado di fornire picchi di potenza in maniera rapida (10 minuti) su richiesta del gestore della rete.

Tipicamente questi generatori vengono chiamati a produrre potenza per 20-50 volte all'anno e sono pagati in base alla loro capacità di produrre energia durante un evento non programmato e in relazione alla potenza erogata.

Questa è una condizione perfetta per lo sfruttamento delle batterie degli EV, che costituiscono una spinning reserve solo per il fatto di essere collegate alla smart grid. Anche l'utente trae un vantaggio da questa condizione perché l'energia erogata viene pagata in base al tempo di spinning.

Regolazione di Frequenza

La frequenza del sistema deve essere mantenuta a 50Hz per garantire il corretto funzionamento delle utenze collegate alla rete.

Se la frequenza si alza, significa che i carichi collegati in rete non sono sufficienti per assorbire tutta la potenza generata, occorre quindi aumentare il carico in rete oppure diminuire la potenza elettrica prodotta.

Se la frequenza si abbassa, significa che il carico collegato alla rete richiede una potenza superiore a quella erogata in quel momento, occorre quindi ridurre il carico oppure aumentare la produzione di potenza.

La regolazione della frequenza deve avvenire sotto il controllo diretto del gestore della rete che invia segnali al generatore il quale deve rispondere entro un minuto aumentando (regolazione verso l'alto) o diminuendo (regolazione verso il basso) la potenza generata.

In modalità V2G le batterie offrono un valido aiuto per la regolazione di frequenza perché attraverso il processo di carica possono assorbire potenza dalla rete in caso di sovra generazione, mentre con il processo di scarica possono funzionare da generatore nel caso di sotto generazione.

Backup e immagazzinamento dell'energia da fonti rinnovabili

Uno dei compiti del V2G è quello di supportare le fonti di energia rinnovabile in modo da ottimizzare le operazioni di bilanciamento della rete.

L'eolico e il fotovoltaico sono due fonti di energia rinnovabili non programmabili (la loro produzione dipende dai fattori atmosferici) e spesso i loro picchi produttivi non coincidono con le richieste di carico della rete. Gli accumulatori permettono di assorbire l'energia rinnovabile prodotta nei periodi di basso carico e di re-iniettarla in rete nei momenti di maggiore carico. Si ha quindi un disaccoppiamento temporale tra la produzione di energia e il suo utilizzo.

La capacità di immagazzinare e fornire energia da parte delle batterie è però limitata nel tempo e dipende ovviamente dalla potenza installata sul veicolo. Le batterie delle automobili connesse alla rete in modalità V2G permettono anche di effettuare operazioni di backup e di disaccoppiamento temporale della produzione, ma la soluzione ottimale dal punto di vista tecnico è quella di installare accumulatori fissi nei pressi delle centrali eoliche o fotovoltaiche.

L'energia immagazzinata nelle batterie delle automobili può anche servire da back up in caso di black out: si formano piccole isole della rete elettrica che possono rimanere alimentate fino alla risoluzione del guasto.

4.2.2 Aspetti economici

L'applicazione del V2G porta anche ad altri vantaggi: oltre alla diminuzione dell'inquinamento e all'indiretta tutela ambientale, si avranno dei vantaggi economici sia per l'operatore sia per il proprietario del veicolo.

L'energia immagazzinata nelle batterie può essere utilizzata per soddisfare una parte della richiesta locale di energia, così da abbassare i picchi del profilo di carico. In questo modo si riduce lo stress sulle centrali, si riduce l'energia presente nel sistema di distribuzione e di conseguenza si riducono le perdite. L'abbassamento del picco, quindi, permette di ridurre il costo dell'elettricità nei periodi di massimo carico. Il prezzo dei servizi elettrici basati sulle batterie è più competitivo di quello basato sui generatori e i veicoli elettrici offrono un sistema di potenza molto più flessibile e controllabile.

Questo mostra come il gestore della rete di distribuzione abbia dei benefici economici dall'uso del V2G.

L'energia viene immagazzinata nelle batterie durante la notte, quando l'elettricità costa meno, e viene rilasciata in rete nei periodi di picco, quando ha il suo massimo costo. Sfruttando la differenza di prezzo, il proprietario del veicolo ha un guadagno con il quale può ammortizzare l'investimento iniziale per l'acquisto del veicolo elettrico.

Altri vantaggi economici per il proprietario del veicolo in configurazione V2G risiedono nella possibile stipulazione di un contratto elettrico ad hoc che può prevedere agevolazioni sul prezzo dell'energia elettrica oppure incentivi sull'acquisto di una nuova batteria che, come visto nel capitolo 2, all'aumentare del numero di cicli di carica/scarica dovuti alle operazioni di V2G, perde efficienza e vita utile.

4.3 V2G Aggregato

Con l'aumento del numero di automobili elettriche presenti in circolazione, il gestore della rete potrebbe trovarsi a dover effettuare contratti V2G con migliaia di proprietari di veicoli. Per evitare questo, può intervenire una terza parte che aggrega veicoli elettrici in blocchi dell'ordine dei MW e rivende energia in massa al gestore di rete offrendo servizi sia alla rete sia ai proprietari dei veicoli.

L'aggregazione di veicoli elettrici può avvenire in grandi parcheggi di edifici commerciali o in apposite strutture per la ricarica.

Con questa soluzione la rete non vede la potenza del singolo veicolo ma percepisce la struttura come un'unica fonte di potenza elevata. Il sistema di gestione della struttura deve essere in grado di dialogare con la rete come se fosse un'unità singola, ma deve allo stesso tempo monitorare lo stato e le richieste di ogni veicolo connesso all'interno della struttura, per questo occorre lo sviluppo di tecniche di controllo aggiuntive rispetto al controllo del singolo veicolo.

Una grande quantità di veicoli collegati nello stesso punto, se non gestita in maniera corretta, può portare a surriscaldamenti nei trasformatori e a forti sbilanciamenti sulle fasi della rete di trasmissione.

4.4 Interfaccia

Uno degli aspetti critici nello sviluppo del V2G è quello di creare e diffondere uno standard stabile nel tempo per la comunicazione con le smart grid.

Il veicolo elettrico deve integrarsi perfettamente con il sistema elettrico, per questo il processo di carica richiede un'ottima comunicazione tra il veicolo, la colonnina di carica e la rete.

Al contrario dei veicoli tradizionali, il veicolo elettrico non può essere "rifornito" solo in una stazione di servizio, ma può essere ricaricato anche in ambiente domestico, sul posto di lavoro, in parcheggi attrezzati e in stazioni di ricarica. Per continuare a garantire questa ampia scelta, deve essere sviluppata una interfaccia standard, sia software sia hardware, per permettere l'interoperabilità tra veicoli di diversi produttori e le diverse tipologie di colonnine di carica che si possono incontrare.

Questo, oltre ad offrire vantaggi per l'utilizzatore, può portare ad un incentivo per aumentare la penetrazione del veicolo elettrico nel mercato dei trasporti.

Per avere un maggior successo commerciale, la procedura di carica di un EV deve essere più semplice e più automatizzata possibile, soprattutto per

quanto riguarda le autorizzazioni, le operazioni da compiere e il processo di fatturazione.

Nelle stazioni di ricarica pubbliche o semi-pubbliche, la colonnina deve essere in grado di riconoscere l'utente così da inviare la fattura direttamente al suo account in modo da evitare pagamenti in contanti o con carta di credito. L'operazione di identificazione dell'utente porta anche al riconoscimento dei profili tipici di carica e delle impostazioni di V2G così da semplificare e velocizzare le operazioni.

Le informazioni importanti come i cicli di carica-scarica effettuati, le richieste dell'utente, i suoi profili di utilizzo del veicolo, le previsioni di utilizzo e lo stato della rete, vengono unite e processate in modo da fornire all'utente un profilo adeguato per i successivi programmi di carica.

4.4.1 Struttura generale

Come visto in precedenza, è necessario trovare un protocollo standard per la trasmissione delle informazioni tecniche e commerciali in ambito V2G.

Una prima soluzione proposta prevede lo scambio di informazioni attraverso un IPv6 basato sulla tecnologia PLC.

Per garantire la velocità e l'efficienza dello scambio di informazioni si utilizza un codice XML binario.

La struttura del messaggio V2G è composta da 3 elementi, *V2G_message*, *Header* e *Body*.

Il *V2G_message* identifica il documento XML come un messaggio V2G e contiene l'*Header* e il *Body*. L'*Header* contiene informazioni generiche che non sono strettamente correlate con il messaggio vero e proprio, ad esempio codici di identificazione della sessione e dell'utente, oppure informazioni riguardanti la sicurezza e la privacy. Nel *Body* è contenuto l'effettivo messaggio da trasportare, che può essere una richiesta dell'utente alla rete o una risposta dal server che controlla il processo.

Durante il processo di carica avviene una fitta comunicazione tra il veicolo elettrico e il fornitore del servizio, attraverso queste fasi:

- Autorizzazione: quando un EV sceglie un servizio da un EVSE, viene inviata una richiesta di autorizzazione che contiene informazioni sulla sicurezza e sullo stato della batteria del veicolo. In risposta dall'EVSE sia ha la conferma o meno dell'autorizzazione.
- Power Discovery: dopo aver ottenuto l'autorizzazione, l'EV invia i parametri di carica e le informazioni sul pagamento all'EVSE. Dopo aver ricevuto questi dati, l'EVSE controlla che i parametri immessi siano compatibili con il veicolo collegato e con lo stato attuale della rete, successivamente calcola una

tariffa in base all'energia richiesta per il processo di carica. In risposta l'EV riceve informazioni sui parametri di carica proposti e sulla tariffazione.

- Line Lock: il messaggio è usato per bloccare il connettore in modo da evitare distacchi accidentali. In risposta si ha la segnalazione del riuscito (o non riuscito) bloccaggio.
- Power Delivery: l'EV conferma il profilo di carica proposto e accetta la tariffazione proposta dall'EVSE. Il processo di carica ora può iniziare.
- Metering Status and Metering Receipt: durante il processo di carica, in maniera alternata, i risultati delle misurazioni vengono forniti e richiesti.
- Power Off: il veicolo elettrico richiede di interrompere l'erogazione di potenza all'EVSE, che risponde con un messaggio di conferma bloccando la carica.
- Line Unlock: il messaggio di sblocco del connettore viene inviato all'EVSE. In caso di risposta positiva è possibile disconnettere il veicolo dalla colonnina.

I punti di accesso per la comunicazione con un determinato elemento della rete sono offerti dai server. A ogni server sono associati dei parametri definiti, come un indirizzo IP e un numero di porta. All'interno dei server sono presenti dei dispositivi logici che permettono di monitorare la rete o parte di essa; questi dispositivi sono formati a loro volta da nodi logici che valutano lo stato della rete utilizzando quattro parametri:

- Status Information: informazioni, in sola lettura, che descrivono lo stato dei nodi logici;
- Settings: valori di configurazione modificabili;
- Valori di Misura: risultati delle misurazioni, sono valori di lettura;
- Controllo: offre la possibilità di effettuare operazioni di distacco sulle utenze;

I veicoli elettrici, con le loro batterie, possono essere considerati come delle centrali elettriche virtuali.

Attraverso questi dispositivi e tecniche di controllo è possibile monitorare lo stato di una centrale virtuale e dei carichi connessi, così da gestire la smart grid in maniera ottimale cercando di mantenere il bilancio energetico.

I soli parametri presenti nei nodi logici, però, non sono sempre sufficienti a descrivere in maniera completa lo stato della centrale virtuale. Occorre quindi introdurre altri parametri che permettono di controllare al meglio il processo di scambio di potenza tra veicolo e rete in un contesto di smart grid.

Questi parametri sono:

- Massima potenza assorbita: è la massima potenza che la centrale virtuale può assorbire dalla rete;

- Massima potenza emessa: è la massima potenza che la centrale virtuale può immettere nella rete;
- Step-less si/no: indica la possibilità di poter effettuare un controllo continuo della potenza assorbita o immessa nella rete;
- Capacità totale d'immagazzinamento: si riferisce al valore reale o virtuale massimo d'immagazzinamento che l'operatore della centrale virtuale mette a disposizione;
- Livello della corrente di carica: questo parametro esiste solo nelle centrali virtuali con capacità d'immagazzinamento e indica il valore massimo di corrente supportabile durante la fase di accumulo;
- Efficienza dell'immagazzinamento: indica il rapporto tra l'energia immagazzinata e quella che potenzialmente potrebbe andare persa;
- Punto di partenza e punto di arrivo: è un parametro specifico per i veicoli elettrici e indica l'orario in cui la carica deve iniziare e finire oppure la soglia minima di carica da raggiungere;
- Minimum Target Energy Amount: anche questo parametro è tipico per i veicoli elettrici e indica la quantità di energia da raggiungere ad un determinato orario;
- Minimal Charging State Trajectory: a volte non basta specificare il minimum target energy amount ma occorre specificare anche il profilo di carica per raggiungere il valore minimo di energia richiesto ad un determinato orario;
- External Feeder: alcune tipologie di batterie hanno una perdita costante di energia che ne riduce il livello di carica e aumenta i tempi di ricarica. Occorre quindi una sorgente esterna che immette nella batteria l'energia necessaria per mantenere costante il livello di carica.

Tutti questi parametri permettono di avere il quadro completo dello stato delle centrali virtuali connesse alla smart grid in modo da poter effettuare una gestione ottimale della rete.

Il processo di carica di un EV viene costantemente monitorato attraverso i dati forniti dal Metering Status che vengono raccolti nel server centrale e utilizzati per aggiornare lo stato delle singole utenze collegate alla smart grid. Nel caso in cui il centro di controllo delle centrali virtuali rilevasse un cambiamento tale da dover modificare il profilo di carica di un EV, partirebbe una comunicazione dal server centrale all'EVSE che avvierebbe una procedura di rinegoziazione del nuovo profilo di carica. Se le condizioni rilevate dal centro di controllo delle centrali virtuali dovessero essere particolarmente gravose, il processo di carica nelle utenze che lo consentono può essere interrotto e ripreso in seguito.

4.4.2 Protocolli di comunicazione

Esistono vari metodi per comunicare con la rete, ma per garantire l'interoperabilità e uno sviluppo più veloce serve trovare un protocollo standard.

Per trovare il sistema più adatto per le operazioni in ambito V2G, ogni protocollo di trasmissione viene valutato in base alla sua capacità di assorbire poca potenza e di garantire la sicurezza delle comunicazioni.

Prendendo in considerazione queste due caratteristiche viene ora eseguito un confronto tra quattro protocolli di comunicazione.

Trasmissione sulle linee di potenza e HomePlugTM

E' una tecnologia che utilizza i conduttori delle linee di potenza come mezzo per la trasmissione dei dati: l'informazione da trasmettere viene modulata ad alta frequenza e sovrapposta al segnale di potenza. Questo è un metodo ad alto rischio d'interferenze e proprio per ridurre l'effetto "antenna" il suo utilizzo viene limitato alle linee di trasmissione in bassa tensione.

Non richiede alimentazione esterna poiché i dispositivi prendono l'energia direttamente dalla rete alla quale si appoggiano.

ZWaveTM

Questo protocollo è stato pensato e ottimizzato per l'uso nell'ambito della home automation. I dispositivi ZWave creano automaticamente una rete nel momento dell'accensione. La velocità di trasmissione dati è di 9kbit/s ed è l'unico protocollo che lavora esclusivamente sulla banda dei 900MHz.

Anche questo protocollo, essendo progettato principalmente per applicazioni alimentate con batterie, è ottimizzato per avere bassi consumi.

ZigbeeTM

E' un protocollo di trasmissione dedicato per piccole reti basate sullo standard wireless 802.15.4. Lo Zigbee opera su due bande di frequenza, 2.4GHz e 900GHz, così da poter scegliere la banda di trasmissione libera e con minor rumore. Questo protocollo è ideato per l'automazione quindi è ottimizzato per un ridotto consumo di energia. La velocità di trasmissione dello Zigbee può raggiungere i 250kbit/s.

Grazie ai suoi bassi consumi (<1mW) questo protocollo sta trovando sempre più applicazioni nel campo delle comunicazioni nei veicoli elettrici.

Il suo range di copertura è di circa 100m e questo lo rende ideale per comunicazioni all'interno di aree urbane e suburbane.

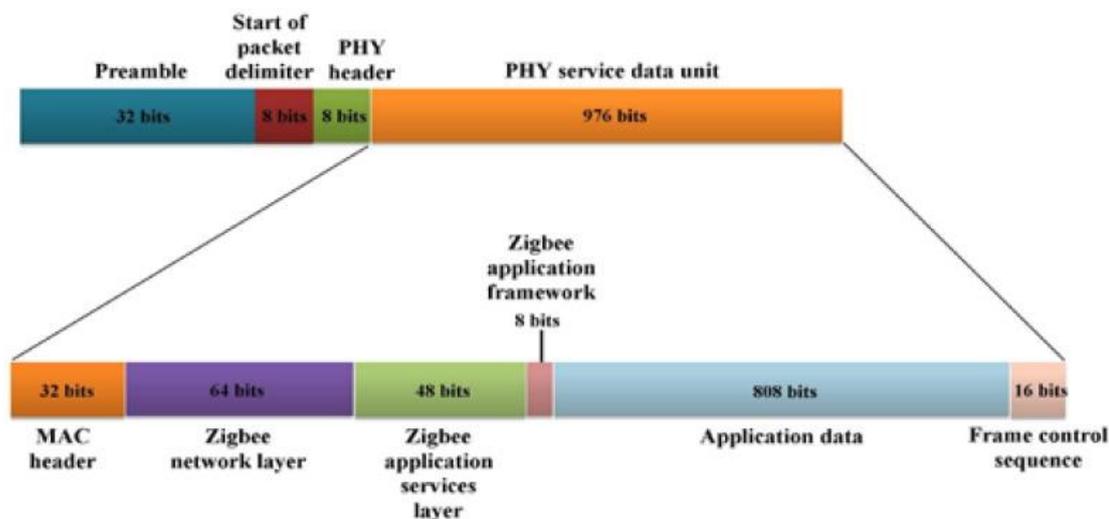


Figura 36 - Struttura del messaggio Zigbee

Rete telefonia mobile

La rete per la telefonia mobile offre una rete wireless ad ampio raggio ideale per dispositivi con elevata mobilità, come i veicoli elettrici. La velocità di trasmissione attualmente disponibile è di oltre 100kbit/s.

I protocolli utilizzati per la telefonia mobile consumano più di Zigbee e di ZWave perché hanno un range di copertura molto esteso.

Molti dispositivi wireless utilizzano le stesse frequenze, è quindi possibile che ci siano fenomeni d'interferenza. L'unico modo per minimizzare questi fenomeni è quello di scegliere adeguatamente il canale di trasmissione e di utilizzare un accurato sistema di gestione della rete in presenza di più sorgenti.

Il sistema di trasmissione dati della rete elettrica deve essere protetto contro tentativi di accesso non autorizzati: un'eventuale intrusione nel sistema della rete di trasmissione potrebbe provocare disturbi pesanti sul normale flusso di energia.

I protocolli visti in precedenza utilizzano un sistema a 128 bit, l'Advanced Encryption Standard (AES), per mettere in sicurezza i dati trasmessi in rete.

La rete di trasmissione per i telefoni cellulari ha fatto progressi per quanto riguarda la sicurezza di trasmissione dei dati, ma non ha ancora raggiunto un livello adatto per comunicazioni relative alla gestione della rete elettrica.

4.5 Schema di Controllo V2G

Uno sbilanciamento tra la richiesta di potenza e la generazione può essere rilevato osservando la frequenza delle grandezze di rete in ingresso agli utilizzatori. La quantità di potenza assorbita da un veicolo elettrico in modalità V2G (P_{V2G}) è un compromesso tra la quantità necessaria per i bisogni della rete e la quantità minima di SOC in accordo con i cicli di carica e le necessità di utilizzo impostati dall'utente.

La massima potenza disponibile in modalità V2G (P_{max}) dipende anche dal dimensionamento dell'impianto al quale è collegato il veicolo.

Durante operazioni V2G lunghe è possibile che la batteria arrivi vicino al SOC minimo stabilito dall'utente, in questo caso interviene un controllore che permette di regolare il processo di V2G in modo che il SOC non scenda sotto il valore minimo impostato.

Ipotesizzando di stimare correttamente il SOC, la formula che regola il controllo della potenza prelevata in modalità V2G è la seguente:

$$P_{V2G} = P_{max} \left\{ 1 - \left(\frac{SOC - SOC_{low(high)}}{SOC_{max(min)} - SOC_{low(high)}} \right)^2 \right\}$$

Quando SOC si avvicina al valore minimo, il funzionamento V2G viene sospeso e i sistemi di controllo permettono di riportare la batteria sopra il valore impostato. Il controllo passa dalla modalità V2G alla modalità V1G che consiste in un processo unidirezionale di carica controllata.

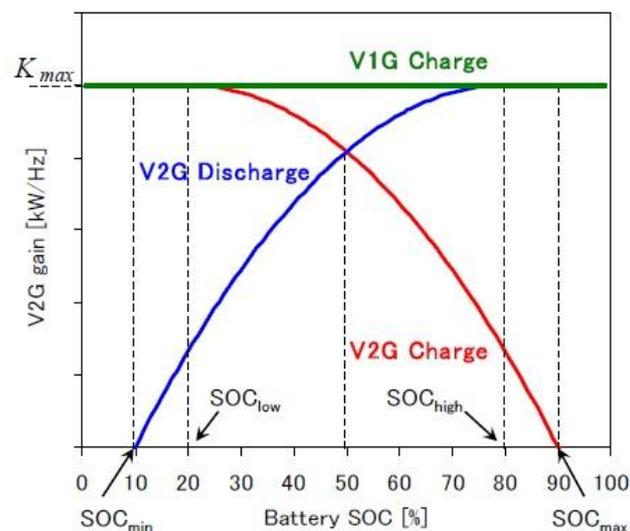


Figura 37 - Modalità di funzionamento in relazione allo stato di carica

La quantità di energia necessaria per passare dal SOC attuale a quello di destinazione SOC_E viene calcolata utilizzando un accurato modello della

batteria. E' possibile effettuare una stima della durata delle operazioni V1G utilizzando la seguente formula:

$$T_{V1G} = \frac{SOC_E}{P_{V1G}}$$

4.6 Simulazione V2G

Nel momento in cui si collega il veicolo alla smart grid, i dati relativi a SOC, capacità, tensione della batteria connessa, corrente di linea, segnale di regolazione e altre variabili elettriche, vengono trasmessi in tempo reale al centro di controllo, dove vengono elaborati e memorizzati in modo da monitorare il veicolo e garantire la gestione ottimale del processo V2G.

Analizzando questi dati è possibile osservare il comportamento della batteria e della rete al variare delle condizioni richieste. Le varie casistiche sono riportate e analizzate nei seguenti paragrafi.

4.6.1 Carica semplice

Quando il veicolo viene impostato nella modalità "carica" anziché in quella "V2G", inizia un processo di carica semplice che prevede il passaggio di energia dalla rete alla batteria.

L'auto elettrica è vista come un carico e non viene effettuata alcun tipo di regolazione.

La carica può avvenire nei diversi modi visti nei capitoli precedenti e viene eseguita alla massima potenza permessa dall'impianto a cui è collegato il veicolo (salvo disposizioni diverse impostate dall'utente).

L'evoluzione del processo di carica è rappresentata nel seguente grafico:

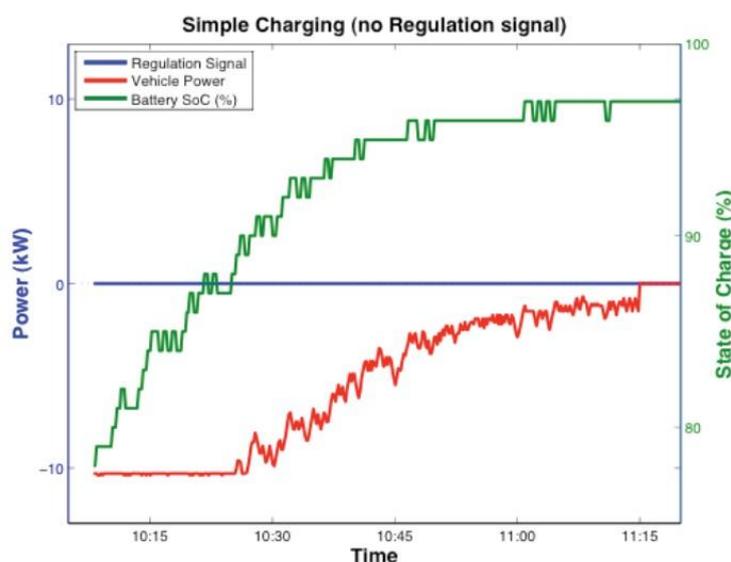


Figura 38 - Andamento delle grandezze nella modalità di carica semplice

Lo stato di carica della batteria (SOC) in questo caso è un'approssimazione basata sul livello di tensione della batteria, è per questo che nel grafico mostra un aumento a gradini (linea verde). Come visto nei paragrafi 2.4 e 5.2 esistono diversi modi più o meno accurati per misurare il SOC.

Nel caso in esame la batteria parte dal 78% e aumenta fino all'89% utilizzando la massima potenza disponibile di carica che, in questo caso, è di 10kW, come si vede osservando la linea rossa. Una volta raggiunto il 90%, la potenza di carica viene ridotta dal BMS (2.4) per preservare la vita della batteria. Per lo stesso motivo, la carica viene terminata al raggiungimento del 97% di SOC.

Non viene effettuata alcuna procedura di regolazione (la linea blu rimane a zero).

4.6.2 Scarica semplice

In questa condizione la batteria è vista come un generatore e viene scaricata in modo da fornire potenza alla rete. Anche in questo caso non viene eseguita alcuna operazione di regolazione.

Per avere un quadro completo di cosa succede durante la scarica, in questa simulazione la batteria è stata scaricata manualmente portandola volontariamente ad una tensione di 0 Volt. Normalmente l'operazione di scarica avviene in automatico, in accordo con le esigenze della rete, inoltre la batteria non viene mai portata a tensione nulla per motivi di sicurezza.

Nel grafico seguente sono riportati l'andamento del SOC e della potenza immessa in rete.

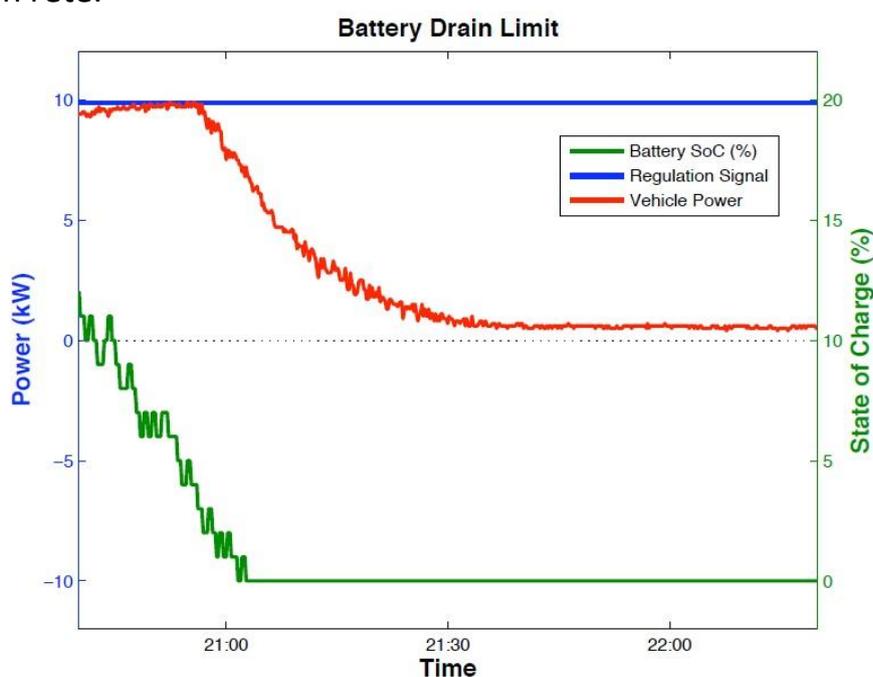


Figura 39 - Andamento delle grandezze in caso di scarica semplice

Alla batteria vengono richiesti 10kW, come mostrato dallo stato del segnale di regolazione (linea blu). Finché SOC è a livelli adeguati, la batteria riesce a fornire la potenza richiesta alla rete, ma quando SOC inizia ad abbassarsi (attorno al 5%) la potenza fornita alla rete diminuisce.

Questo è dovuto ai meccanismi di protezione della cella che riducono la potenza erogabile perché la sicurezza della cella è prioritaria rispetto alle operazioni V2G.

Si nota che si ha un assorbimento di potenza anche quando SOC è a zero. Questo è dovuto a un sistema di protezione della cella che consiste nel dichiarare esaurita la batteria anticipatamente lasciando così una minima quantità di carica per evitare fenomeni di sovra scarica. Come anticipato, in questa simulazione si è volutamente prolungato il processo di scarica al di sotto dei limiti minimi di sicurezza.

4.6.3 Regolazione verso l'alto e verso il basso

Quando il veicolo è impostato per rispondere alle esigenze di regolazione della rete, il flusso di potenza tra il veicolo e la rete non è più unidirezionale ma dipende dal segnale di regolazione (linea blu nel grafico).

Dal grafico si nota come il segnale di regolazione varia velocemente e come il flusso di potenza del veicolo riesca a seguire queste fluttuazioni.

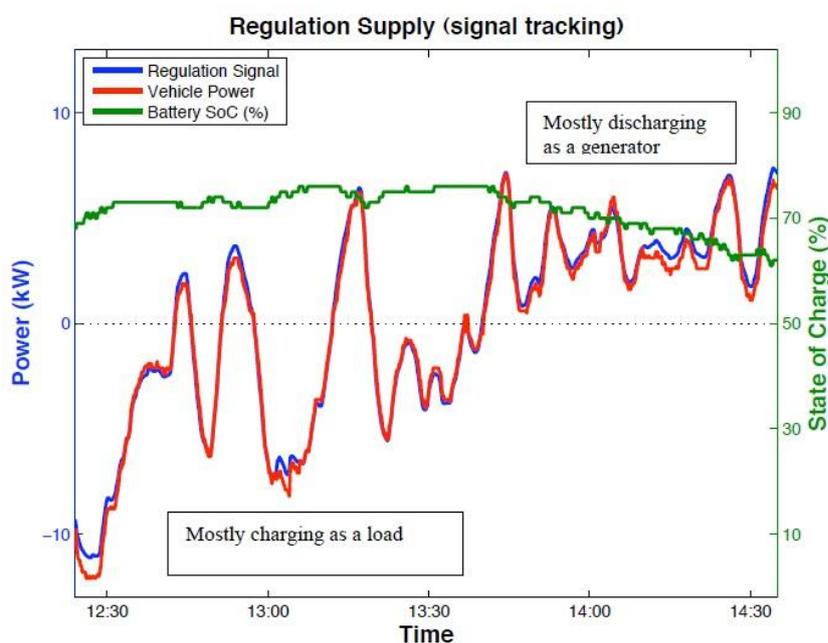


Figura 40 - Andamento delle grandezze nel funzionamento V2G

Lo stato di carica della batteria varia da circa 70% a circa il 60%. Fino alle 13.30 circa SOC si mantiene mediamente costante perché la potenza richiesta in regolazione verso l'alto (scarica) è quasi uguale a quella richiesta

verso il basso (carica). Dopo le 13.30, invece, SOC decresce perché le richieste di regolazione verso l'alto (scarica) prevalgono su quelle verso il basso.

4.6.4 Simulazione di una giornata

E' possibile ora vedere il comportamento della batteria in una tipica giornata. Viene preso in considerazione un veicolo usato sporadicamente.

Nel nostro caso viene usato 3 volte:

- tra le 14.48 e le 15.16, SOC scende da 97% a 91%;
- tra le 18.54 e le 20.30, SOC scende da 97% a 88%;
- tra le 8.35 e le 9.13, SOC scende da 70% a 49%.

Quando non è utilizzato, il veicolo è sempre connesso alla rete in modalità V2G, per un totale, nel nostro caso, di 21.5 ore.

Si nota dal grafico come la carica disponibile dopo i periodi di regolazione sia sufficiente per utilizzare in maniera soddisfacente il veicolo, questo perché le regolazioni verso il basso (carica) sono state superiori rispetto a quelle verso l'alto (scarica). La presenza di numerose regolazioni verso il basso ha escluso i periodi di sola scarica del veicolo permettendo così di poter effettuare operazioni di regolazione per tutta la durata del tempo di connessione alla rete.

Dal grafico si nota come la variazione di SOC prodotta dal processo V2G sia comparabile con quella ottenuta durante i periodi di utilizzo del veicolo. Normalmente le variazioni di SOC dovute alla V2G devono essere contenute per minimizzare il danneggiamento e l'invecchiamento della batteria.

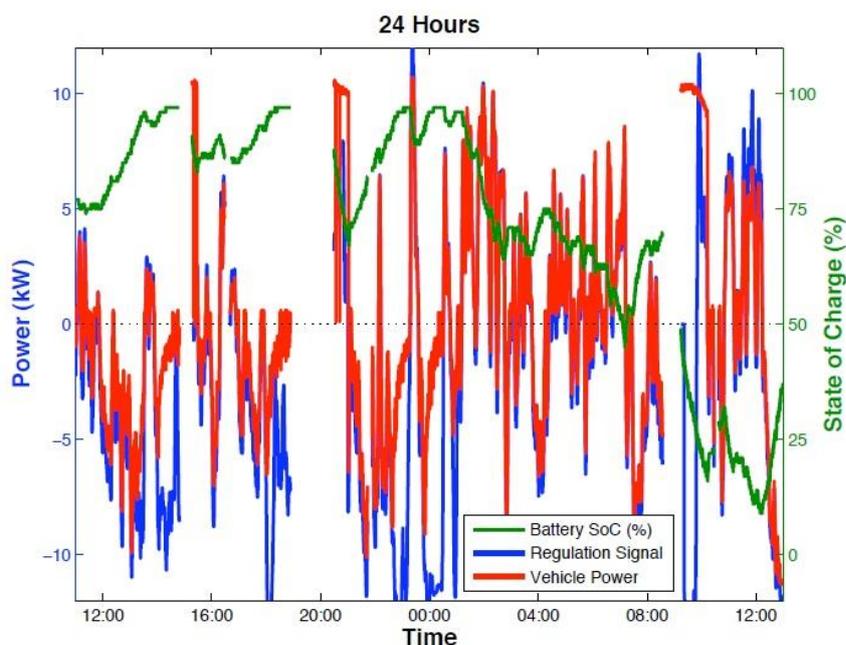


Figura 41 - Andamento giornaliero delle grandezze in modalità V2G

4.6.5 Carica eccessiva durante la regolazione

Come visto in 4.6.1, quando una batteria sta per raggiungere il suo punto massimo di carica, il BMS riduce la potenza assorbita per preservare la vita della batteria e per completare la carica in sicurezza.

Nel caso di carica semplice questo non comporta un problema, mentre nel caso V2G la riduzione della capacità di assorbire potenza dalla rete può portare a non riuscire ad effettuare la regolazione.

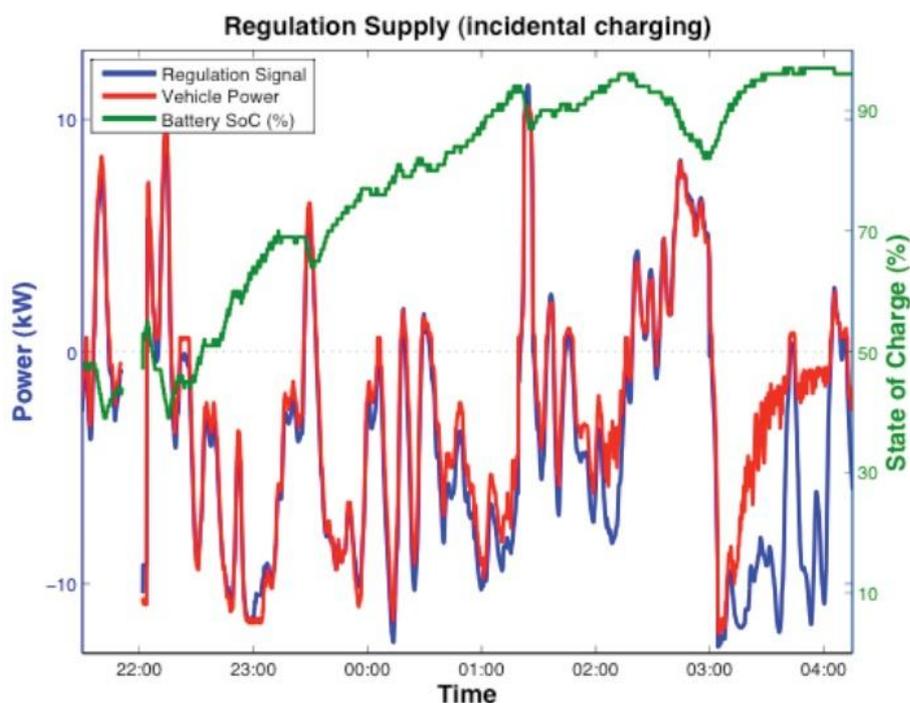


Figura 42 - Andamento delle grandezze in modalità V2G nel caso di carica eccessiva

Come si vede nella figura 42, attorno alle 2.00 la batteria ha quasi raggiunto il suo valore massimo di carica e inizia a non seguire le richieste del segnale di regolazione (la linea rossa non segue più quella blu).

Dopo le 2.20 si ha una serie di richieste di regolazione verso l'alto (scarica) che portano la batteria attorno all'80% di SOC. Questo riporta la batteria nelle condizioni di poter seguire le nuove richieste di regolazione verso il basso.

Attorno alle 3.15, però, si ha una serie di richieste di regolazione verso il basso coincidenti con un elevato stato di carica della batteria.

La regolazione non riesce ad essere effettuata perché la potenza che la batteria può assorbire è minore di quella richiesta.

Se non si hanno eventi di regolazione verso l'alto o se il veicolo non viene utilizzato, la situazione di risposta lenta alla regolazione può peggiorare fino alla condizione di risposta zero.

La situazione è evidenziata nel seguente grafico:

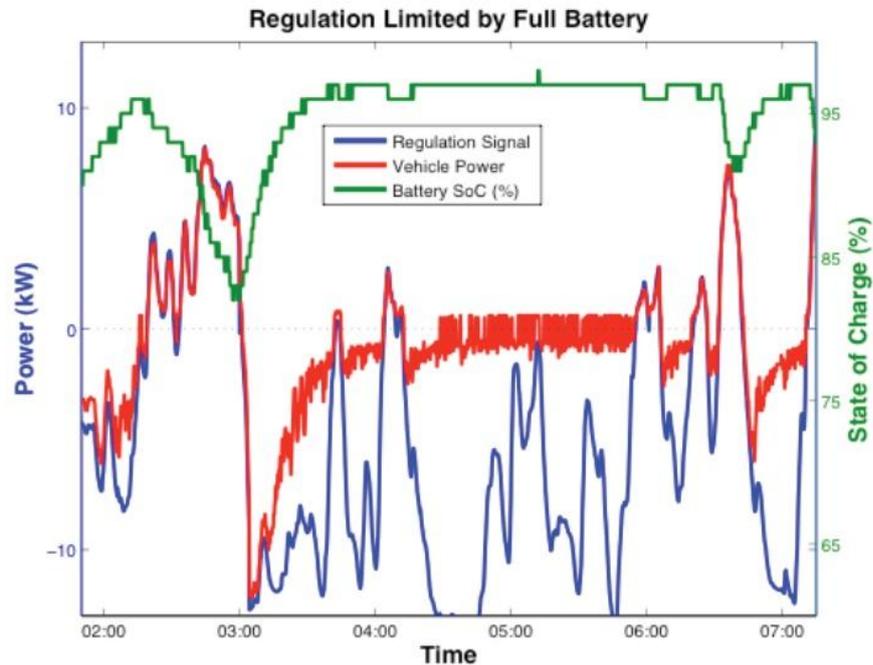


Figura 43 - Capacità di regolazione limitata dallo stato di carica della batteria

Ovviamente è possibile anche il caso duale, cioè quello di eccessiva scarica. Nel momento in cui la batteria viene scaricata al di sotto di un valore minimo di SOC a causa di eccessive regolazioni verso l'alto, il veicolo si trova in condizioni di poter effettuare solo regolazione verso il basso.

CAPITOLO 5 - INTERFACCIA RETE VEICOLO

5.1 Introduzione

Affinché il veicolo elettrico abbia successo commerciale occorre creare un'adeguata struttura di punti e stazioni di carica in grado di comunicare tra loro e con la rete di distribuzione. Ogni punto di ricarica non deve essere isolato.

Con il progresso tecnologico nella produzione di energia da fonti rinnovabili, è possibile costruire stazioni di carica alimentate da centrali eoliche o fotovoltaiche.

La colonnina deve essere in grado di effettuare un processo di carica rapido, efficiente e che rispetti i parametri di sicurezza della batteria. Per far questo sono numerosi i parametri che devono essere monitorati, come la temperatura e la tensione della batteria, la corrente di carica e il tempo totale del processo.

5.2 Struttura

Lo scopo principale della colonnina è quello di fornire energia al veicolo elettrico (normalmente 220V AC-13A) e di effettuare processi di scambio e acquisizione dati.

La struttura di una colonnina isolata è quella riportata nella figura 44.

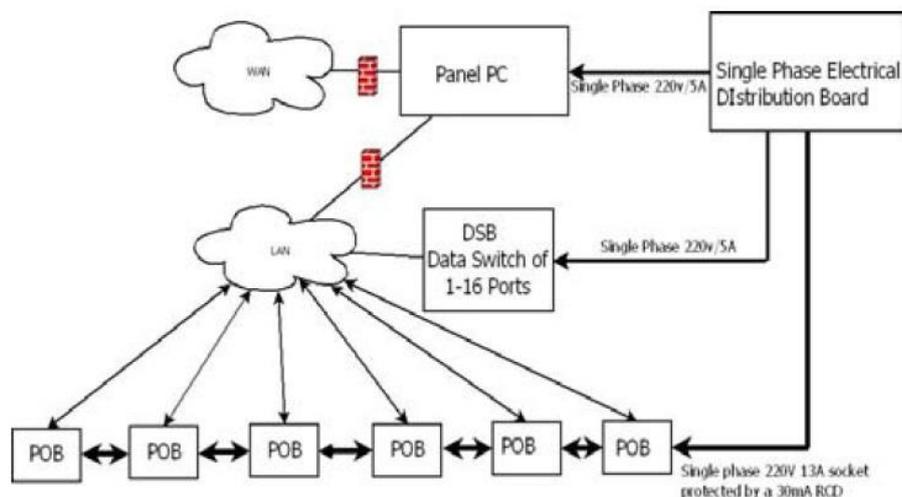


Figura 44 - Struttura logica di una colonnina di ricarica

Gli elementi che la costituiscono sono:

POB: Power Output Box, è l'uscita di potenza della colonnina. Contiene da 3 a 6 prese per la ricarica, relay di controllo e sensori per verificare lo stato di connessione della presa. Costituisce l'interfaccia con l'utente attraverso la quale è possibile stabilire i parametri di carica e le soglie che definiscono i punti di arrivo.

DSB: Data Switch Box, è l'interfaccia tra il POB e il computer di controllo del processo di carica. In questa unità vengono elaborati i dati di controllo del processo, quali il flusso di energia, lo stato delle prese di ricarica e lo stato dei relay di controllo.

CPCC: Charging Point Control Console, è l'interfaccia tra l'utente e il sistema di carica. Si occupa della fatturazione e dell'eventuale stampa delle ricevute.

Remote Server: Il server effettua il controllo in remoto delle operazioni di carica e mantiene un archivio dei dati registrati. Analizzando i dati contenuti nell'archivio, l'operatore può avere tutte le informazioni sulle fatturazioni e sull'energia fornita ad un singolo utente.

Oltre all'hardware, deve essere presente un software di controllo, la cui struttura tipica è la seguente:

Hardware Monitor: controlla lo stato delle prese di carica ed eventuali errori sulle misurazioni.

Hardware Driver and Control: implementa operazioni hardware come ad esempio togliere l'alimentazione quando viene raggiunto il tempo massimo di carica.

Human Machine Interface (HMI): è l'interfaccia uomo/macchina, tra il sistema di carica e il proprietario del veicolo elettrico. Deve essere più semplice e intuitiva possibile così da semplificare le operazioni di connessione e di ricarica.

Operazione/Manutenzione: è una parte del software di controllo, accessibile solo agli operatori, che permette operazioni di debug e di risoluzione dei guasti.

Una stazione di carica isolata utilizza un sistema di comunicazione basato su client/server: il client acquisisce il segnale e lo invia al server, il quale manda per risposta un segnale di comando che permette lo svolgimento delle operazioni.

Con lo sviluppo dei sistemi di comunicazione e in previsione di un forte livello di penetrazione del veicolo elettrico, è necessario che le varie stazioni di carica isolate possano comunicare tra loro formando una rete distribuita.

La struttura di comunicazione sarà costituita da 2 livelli:

quello più interno mette in connessione i componenti delle singole stazioni, mentre quello più esterno cura la connessione tra il server e le stazioni.

La scelta di un protocollo di comunicazione standard è importante per il futuro sviluppo delle stazioni di carica. Attualmente non è ancora stato adottato uno standard ma uno dei più utilizzati al momento è il protocollo Ethernet.

Sebbene la suddivisione su 2 livelli sia ottima, la soluzione che porta all'ottimizzazione è quella di riorganizzare le stazioni in base alla loro grandezza (potenza) e alla regione di appartenenza.

In questo modo otteniamo 3 livelli:

- unità intelligente di carica e scarica: questa comprende una centralina per l'acquisizione dei dati, lo "smart meter" (3.2.1), il BMS (2.4) e l'interfaccia con l'utente;

- controllo integrato della stazione e sistema di gestione: completa il processo di monitoraggio delle operazioni e gestisce l'effettiva interazione tra la rete e l'autoveicolo connesso regolando i processi di carica e scarica. Effettua ulteriori procedure di misurazione e gestisce la fatturazione. Gestisce anche i parametri relativi alla sicurezza (2.4.2);

- stazione regionale di monitoraggio dei processi di carica-scarica: fornisce un controllo uniforme sui bisogni della rete e sulla regolazione dei processi di V2G, permette inoltre di monitorare un numero più elevato di veicoli connessi così da poter pianificare al meglio le operazioni di V2G.

5.3 Valutazione dello stato di carica (SOC)

Una funzione molto importante della colonnina è quella di valutare lo stato di carica della batteria (SOC) per poter calcolare di conseguenza l'algoritmo di carica più adatto.

Lo stato di carica (SOC) è definito come la percentuale della capacità totale della batteria che è disponibile per la prossima scarica o anche come il rapporto tra la capacità disponibile della cella e la sua capacità massima.

Il metodo di misurazione dello stato di carica deve essere semplice, pratico e accurato, perché solo una misurazione precisa del SOC permette l'utilizzo ottimale della batteria.

Misurazioni poco accurate e poco affidabili del SOC portano ad avere stime errate dell'autonomia della batteria e questo può indurre ad effettuare cicli di ricarica non necessari, con il conseguente aumento del processo di invecchiamento e consumo della cella, oppure può portare a ritrovarsi con la batteria esaurita nonostante venga ancora indicata della capacità residua.

Gli effetti di una misurazione poco accurata dello stato di carica possono avere conseguenze peggiori durante il processo di carica, infatti la batteria può non essere caricata completamente oppure essere sovraccaricata.

Ci sono diversi metodi per la valutazione dello stato di carica.

I più vecchi si basano sulla misurazione della tensione della cella, ma forniscono risultati poco affidabili perché questa cambia con la temperatura, con l'età della cella e con la corrente di scarica.

Altri metodi prevedono la misurazione dell'impedenza della cella utilizzando circuiti a ponte, confrontando poi la misura ottenuta con curve standard di riferimento.

Uno dei metodi più diffusi per la misurazione del SOC è quello di misurare il flusso di corrente in ingresso e in uscita dalla batteria e stimarne la capacità integrando nel tempo la corrente (metodo di Coulomb).

I risultati di questa misurazione vanno però corretti perché vengono alterati da fattori come la temperatura, l'efficienza del processo di carica o scarica e il numero di cicli di vita della batteria (metodo book-keeping).

Il problema principale nella scelta del sistema di misurazione dello stato di carica è l'imprevedibilità del comportamento della batteria e delle abitudini del suo utilizzatore.

5.3.1 Misurazione diretta

Il metodo di misurazione diretta consiste nel misurare alcuni parametri caratteristici della batteria come la tensione (V), la temperatura (T), l'impedenza (Z) o il voltage relaxation time (τ) dopo l'applicazione di un gradino di corrente, poiché lo stato di carica varia in funzione di queste grandezze.

Un primo metodo di misurazione diretta consiste nel rilevare la tensione ai capi della batteria. Sebbene sia un metodo molto diffuso a causa della sua semplicità, i risultati ottenuti con questo tipo di misurazione non sono accurati e possono essere molto distanti dal reale stato di carica poiché la relazione tra la tensione e SOC dipende da molti fattori, tra cui la temperatura e la corrente di scarica.

L'errore commesso nella misurazione può essere compensato se l'algoritmo effettua un confronto tra i dati rilevati e le curve standard dell'andamento della tensione della cella in funzione della corrente di scarica, ma in questo modo l'algoritmo di misura diventa più pesante e oneroso.

Questo metodo non è adatto per l'utilizzo con batterie di tecnologia Li-Ion perché questo tipo di batterie mantiene una tensione pressoché costante

durante la scarica mostrando una rapida caduta solo quando la batteria è quasi completamente scarica. Questa è una condizione inaccettabile per la stima dello stato di carica poiché non ne garantisce una lettura progressiva della variazione e non fornisce il giusto preavviso prima della scarica completa, che in una cella Li-Ion va evitata perché riduce la vita utile della batteria e può portarla a lavorare al di fuori dei suoi limiti di sicurezza.

Un altro metodo di misurazione diretta è basato sulla stima dell'EMF (Electromotive Force). La forza elettromotrice interna indica la capacità della batteria di fornire energia ad un carico e può essere calcolata con metodi termodinamici e con l'equazione di Nernst.

Un altro metodo per calcolare l'EMF è basato sull'interpolazione lineare e sulla misurazione del voltage relaxation time: viene calcolata la tensione media della batteria dopo 2 scariche consecutive effettuate con lo stesso valore di corrente ed alla stessa temperatura. Dopo l'interruzione della scarica, la tensione della batteria tornerà ad un nuovo valore di equilibrio in un intervallo di tempo che dipende dalle condizioni della batteria e dalla temperatura. Questo intervallo è il voltage relaxation time.

L'impedenza interna della batteria è un indice delle prestazioni dinamiche. Questo parametro è influenzato notevolmente dalla temperatura ed è per questo che la sua misurazione non viene utilizzata per determinare lo stato di carica della batteria ma solo per determinarne lo stato di "salute". Un aumento dell'impedenza interna, infatti, è indice di invecchiamento della cella.

5.3.2 Book Keeping

Il metodo di Coulomb utilizza questo algoritmo:

$$SOC = SOC_0 + \frac{1}{C_N} \int_{t_0}^t (I_{batt} - I_{loss}) dt$$

con:

SOC_0 = stato di carica iniziale

C_N = capacità nominale

I_{batt} = corrente che scorre nella batteria

I_{loss} = corrente persa dovuta alle reazioni interne

Il metodo book keeping è il metodo di Coulomb con l'aggiunta della compensazione degli effetti legati all'auto-scarica, alla temperatura, all'efficienza del processo di carica/scarica e all'età della batteria.

In dettaglio, gli effetti che vengono compensati sono i seguenti:

Efficienza del processo di scarica: in dipendenza dalla corrente, dalla temperatura e dallo stato di carica della batteria, solo una parte dell'energia totale della batteria viene fornita al carico. Questo è dovuto alle reazioni chimiche che avvengono nella cella durante la fase di scarica che non riescono a seguire istantaneamente le richieste di potenza del carico. Il risultato è quello di avere una indicazione di batteria scarica quando in realtà è ancora presente dell'energia da poter essere sfruttata. Si ha quindi una lettura errata del SOC.

Questa condizione peggiora con l'invecchiamento della cella.

Conoscendo i tempi delle reazioni chimiche è possibile compensare questo fenomeno.

L'efficienza del processo di scarica è influenzata anche dal fatto che parte dell'energia della batteria non viene trasformata in lavoro elettrico ma viene dissipata in calore.

Auto-scarica: ogni batteria perde progressivamente la sua carica anche in condizioni di riposo. Il metodo di Coulomb non è in grado di quantificare questa energia persa perché non deriva da un effettivo flusso di corrente misurabile. Il tasso di auto-scarica dipende fortemente dalla temperatura e dallo stato di carica della batteria.

Occorre compensare questo effetto per non introdurre errori di valutazione del SOC.

Perdita di capacità: la massima capacità disponibile in una batteria diminuisce col tempo a causa dell'invecchiamento della cella e degli eventi di sovra carica o sovra scarica che possono avvenire negli anni.

La perdita di capacità utile viene monitorata attraverso la misurazione della tensione della batteria, in questo modo il sistema di book keeping riesce a compensare questo fattore.

Anche degli errori casuali possono influenzare l'accuratezza dell' algoritmo.

Questi errori nascono dalle incertezze sulla misurazione dei parametri coinvolti nel calcolo dello stato di carica della batteria, e i più diffusi riguardano:

- tensione della cella
- temperatura della cella
- tasso di auto-scarica
- campionamento della corrente della batteria
- errori di quantizzazione nel passaggio da analogico a digitale

Tipicamente l'impatto che questi errori casuali hanno sulla misurazione finale può essere stimato e compensato.

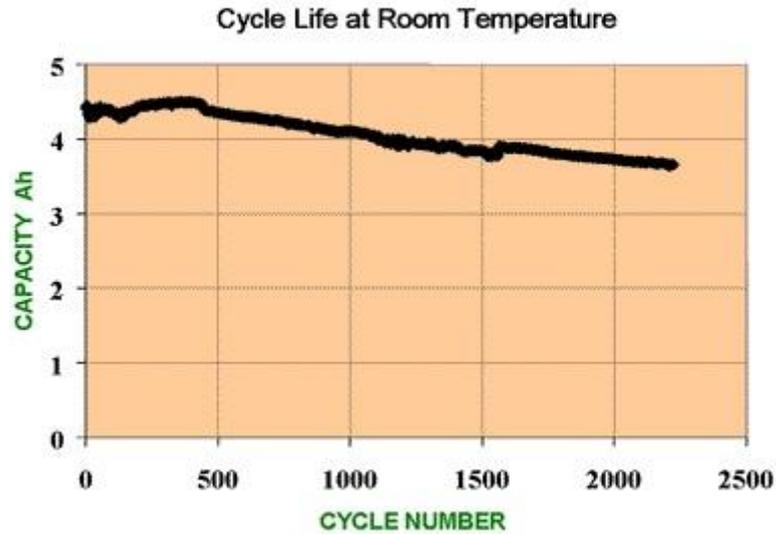


Figura 45 - Perdita della capacità in funzione del numero di cicli di carica/scarica

L'accuratezza del metodo di Coulomb dipende dalla precisione con la quale viene misurata la corrente durante le fasi di carica e di scarica della batteria.

Ci sono diversi modi per rilevare la corrente:

Sensore effetto Hall: è un trasduttore che non va ad introdurre perdite nel circuito, è sensibile alle componenti continue della corrente, ha lo svantaggio di non essere adeguato in presenza di correnti elevate ed è soggetto a rumore;

GMR (sensori magnetoresistivi): sono più costosi dei sensori ad effetto Hall ma sono più sensibili, hanno un livello di uscita più alto e hanno anche una stabilità termica migliore;

Shunt: il misuratore di corrente rileva la tensione ai capi di uno shunt e successivamente trova la corrente corrispondente che poi viene integrata per calcolare lo stato di carica della batteria. E' il metodo più semplice ed economico ma introduce delle perdite di potenza e può causare il riscaldamento della batteria. Questo trasduttore può avere errori inaccettabili in caso di misurazioni con correnti basse. Maggiore è il livello di corrente più lo shunt deve avere un valore basso di resistenza e maggiori capacità di dissipazione del calore.

La misurazione della corrente deve essere effettuata con una precisione elevata poiché un piccolo errore può produrre un significativo errore nella valutazione dello stato di carica. Quest'ultimo (dovuto frequentemente ad errori di offset) è difficile da eliminare e, a causa del processo di integrazione, tende ad accumularsi nel tempo. L'effetto di divergenza

dell'errore commesso nella determinazione dello stato di carica della batteria viene amplificato dal processo di invecchiamento della cella.

Quando il veicolo è in movimento la corrente subisce forti variazioni e non è possibile utilizzare il metodo del book keeping: campionando e ricostruendo la corrente è possibile stimare lo stato di carica di ogni singola cella.

A causa della complessità dell'algoritmo e dell'elevato numero di variabili coinvolte, questo processo richiede milioni di calcoli per secondo, quindi per la sua gestione sono necessari microprocessori veloci e potenti.

5.3.3 Metodo di Coulomb unito a EMF

Misurare correttamente lo stato di carica non è un'operazione semplice poiché lo stato della batteria non dipende solo dai parametri fisici della cella, ma dipende soprattutto da fattori difficilmente prevedibili, tra cui il ciclo di vita della batteria e le abitudini di utilizzo del proprietario del veicolo.

La soluzione è quella di utilizzare un metodo che nasce dalla combinazione tra la misurazione diretta e il book-keeping.

Viene ora proposto un metodo che unisce i vantaggi del metodo di Coulomb e del metodo EMF.

Come visto in precedenza, il metodo di Coulomb si basa sull'integrazione della corrente che scorre nella batteria per stimare lo stato di carica.

Essendo un integratore puro è caratterizzato da un errore intrinseco che non può essere eliminato e che tenderà a crescere portando l'algoritmo alla divergenza.

Il metodo EMF permette di valutare SOC attraverso un modello completo della batteria basato sui parametri caratteristici.

Unendo questi due algoritmi si riesce ad eliminare la divergenza tipica dell'integrale di Ampere mantenendo la precisione dell'EMF.

L'algoritmo risultante è il seguente:

$$SOC(k) = [SOC(k-1) + \Delta SOC_i]a + SOC_v(1-a)$$

$\Delta SOC_i = \frac{k_i k_t i(k) T}{3600 k_l Q_0}$ variazione dello stato di carica calcolata con il metodo dell'integrale di Ampere.

k_i , k_t , k_l , sono i coefficienti di corrente, temperatura e della vita utile della batteria e possono essere modificati per migliorare i risultati dell'algoritmo.

SOC_v = è la stima del valore dello stato di carica utilizzando il metodo EMF.

a = coefficiente del metodo ibrido $0 \leq a \leq 1$

Se $a = 1$ abbiamo $SOC(k) = SOC(k - 1) + \Delta SOC_i$ che è l'algoritmo per il metodo dell'integrale di Ampere

Se $a = 0$ abbiamo $SOC(k) = SOC_v$ che è l'algoritmo EMF.

Se $0 < a < 1$ abbiamo la combinazione dei due algoritmi.

Quando la batteria è carica e inizia il processo di scarica, il coefficiente a è posto uguale a 0 così da utilizzare il metodo EMF per la valutazione dello stato di carica. In seguito il valore del coefficiente a varierà tra 0 e 1 seguendo la variazione della resistenza interna della batteria che cresce al diminuire della capacità disponibile.

Il coefficiente a può quindi essere calcolato come:

$$a = \frac{Max(R_{int}) - R_{int}}{Max(R_{int}) - Min(R_{int})}$$

La valutazione della resistenza interna R_{int} viene effettuata con la seguente formula:

$$E(t) = V(t) + R_{int}i(t)$$

$E(t)$ = tensione della cella

$V(t)$ = tensione ai morsetti

Nel caso V2G la batteria ha una funzione doppia, alimentare il veicolo elettrico e fornire potenza alla rete. Il suo scopo principale è però quello di fornire energia al veicolo elettrico, quindi il cliente deve essere in grado di fornire una previsione sull'utilizzo dell'automobile così da avere lo stato di carica necessario per compiere i suoi spostamenti. Questo è un parametro che va impostato nella colonnina, sarà poi compito del BMS e del contatore intelligente gestire il processo V2G rispettando le richieste di utilizzo dell'utente. (Drive Away Time 2.4.1.3)

5.4 Gestione del processo di carica

Come abbiamo visto, la batteria è il componente fondamentale dell'auto elettrica e la sua vita utile dipende fortemente anche dai metodi di carica utilizzati.

Per quanto riguarda le batterie Li-Ion, i metodi di carica più diffusi sono quelli a corrente costante e a tensione costante. Il primo metodo ha un'efficienza elevata nel caso in cui vengano utilizzate correnti elevate, ma certi livelli di corrente non possono essere forniti alla cella quando questa è quasi carica perché si andrebbe incontro alla formazione di gas e a fenomeni rischiosi per la vita della cella stessa e per la sicurezza di quello che la circonda.

Utilizzando una corrente costante bassa il processo di carica potrebbe avere una durata inaccettabile, ma in questo modo si avrà la possibilità di effettuare un bilanciamento più accurato delle tensioni delle singole celle.

Con il metodo a tensione costante la corrente è elevata all'inizio del processo di carica per poi calare alla fine, quando la cella raggiunge i 4.2V. Le fasi finali di carica sono effettuate con correnti molto basse.

Il metodo di carica migliore per garantire ottime prestazioni e un aumento della vita utile della batteria consiste nel monitorare costantemente i parametri delle celle (temperatura, tensione e corrente) e scegliere di conseguenza la tipologia di carica adeguata.

Le tipologie di carica più diffuse sono le seguenti:

Corrente costante con tensione limitata: questa tipologia viene utilizzata all'inizio della carica e consiste nel mantenere la corrente costante mentre la tensione aumenta progressivamente. Nel momento in cui la cella raggiunge il livello di tensione prestabilito, la tipologia di carica viene cambiata in accordo con le condizioni della batteria.

Tensione costante con corrente limitata: mentre la tensione viene mantenuta ad un livello costante, la corrente scende progressivamente e il processo termina quando raggiunge il valore minimo prefissato. Questa tipologia viene utilizzata a metà del processo di carica.

Corrente costante e tempo fisso: questa tipologia viene utilizzata a fine processo di carica per provvedere all'equalizzazione delle celle.

Tensione costante e tempo fisso: mantiene la tensione costante per un tempo prefissato. Viene spesso utilizzata a metà del processo di carica.

Il compito della colonnina è quello di controllare la situazione della batteria e scegliere di conseguenza la tipologia di carica più adeguata. Tutto questo deve avvenire in maniera automatica.

Un sistema proposto per compiere questa gestione è basato sullo standard RS-485 e contiene un algoritmo di controllo del processo di carica che si basa sullo stato di carica, sulla tensione e sulla temperatura delle singole celle.

L'intero sistema si appoggia ad un personal computer che viene utilizzato per monitorare il processo di carica e per organizzare i blocchi del sistema di controllo. E' presente anche un'interfaccia che permette la comunicazione tra il caricabatterie e il personal computer.

Come anticipato, la trasmissione dei dati dell'intero sistema avviene utilizzando lo standard RS-485, che è caratterizzato da una velocità massima di trasmissione di 10Mbps, una distanza di trasmissione fino a 1200m (a 90kbps) e ha la capacità di eliminare gli errori di modo comune perché i dati vengono trasmessi con un sistema bilanciato.

Il sistema di comunicazione tra il personal computer e i sistemi di controllo è del tipo master-slave: i nodi slave non possono comunicare tra loro e non possono occupare il canale di trasmissione senza che prima non siano stati interrogati dal nodo master.

Ogni nodo è descritto da un indirizzo univoco. Quando viene trasmesso un comando, tutti i nodi ricevono lo stesso indirizzo contemporaneamente, ma solo il nodo destinatario riconosce il proprio indirizzo e si attiva connettendosi con il master.

Il messaggio è composto da 11 bit: un bit di start (0), 8 bit che codificano il messaggio, un bit per l'identificazione dell'indirizzo e un bit di stop (1).

L'operatore può eseguire il controllo del processo di carica direttamente attraverso il PC, e può anche effettuare modifiche sui parametri di carica dei singoli caricabatterie controllati dal sistema.

Il processo di carica può essere effettuato in maniera differente in base all'orario di inizio: si può avere una carica veloce durante il giorno e una carica lenta di equalizzazione la notte.

Durante la carica veloce vengono utilizzate contemporaneamente le prime due tipologie di carica proposte, corrente costante e tensione costante: la carica parte a corrente costante e quando la tensione della batteria raggiunge i 460V il sistema di controllo comanda il passaggio alla tipologia di carica a tensione costante.

I grafici relativi alle curve di carica sono riportati di seguito:

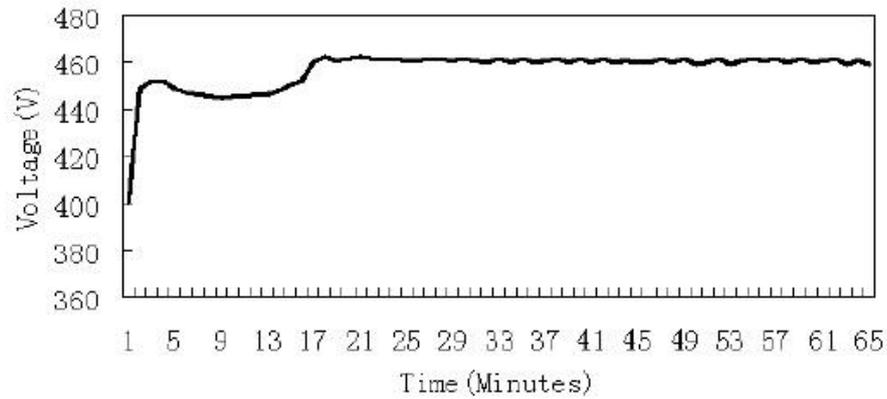


Figura 46 - Andamento della tensione durante la carica CC-CV

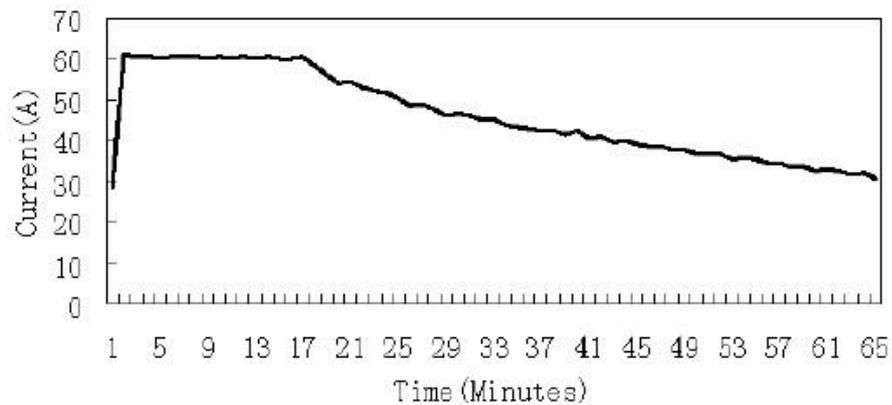


Figura 47 - Andamento della corrente durante la carica CC-CV

Durante la ricarica notturna si ha abbastanza tempo per effettuare anche l'equalizzazione delle celle. Viene utilizzata la tipologia di carica con corrente costante e durata limitata, dove la corrente viene mantenuta ad un valore basso per un tempo prestabilito. La carica viene iniziata con il metodo a tensione costante per poi passare, al raggiungimento della tensione di soglia, al metodo corrente costante e durata limitata.

I grafici relativi a questa condizione di carica sono riportati di seguito.

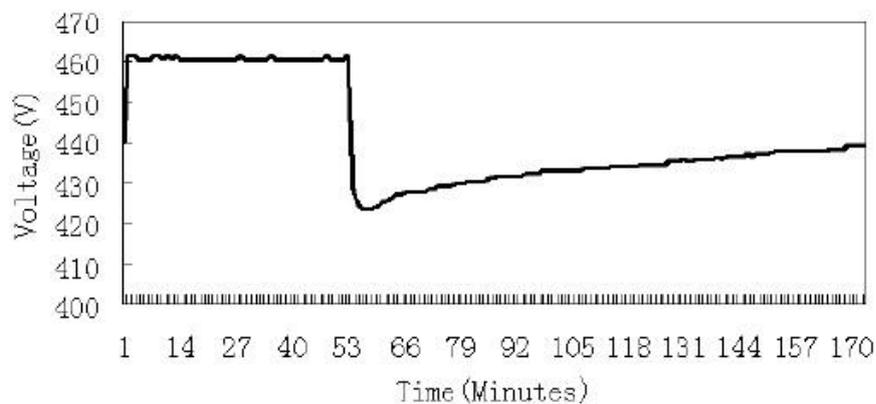


Figura 48 - Andamento della tensione durante la carica CV-CC a durata limitata

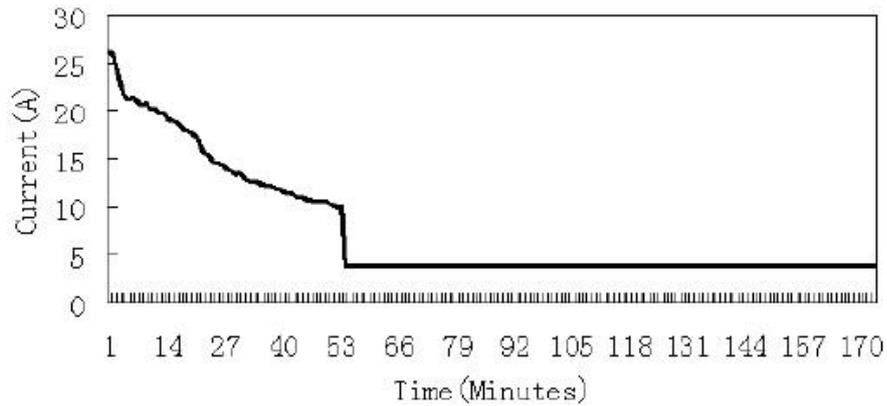


Figura 49 - Andamento della corrente durante la carica CV-CC a durata limitata

Il sistema di controllo offre anche una funzione di sicurezza: se la batteria supera i livelli massimi (o minimi) consentiti per tensione, corrente o temperatura, viene lanciato un segnale di allarme, viene riportata la situazione sullo schermo di controllo e il processo di carica viene immediatamente bloccato.

Oltre ai dati riguardanti la batteria, il sistema di controllo effettua un campionamento anche sulle grandezze in uscita dal caricabatterie come la tensione di carica e la corrente di carica.

La presenza di un amperometro permette di calcolare il flusso di corrente e di energia che scorre tra il caricabatterie e la batteria. I dati vengono elaborati dal sistema di controllo centrale che può così effettuare le operazioni di fatturazione.

5.5 Dimensionamento di una stazione di carica

I metodi di carica descritti dallo standard SAE J1772 adottato negli Stati Uniti sono 3:

- corrente alternata livello 1
- corrente alternata livello 2
- corrente continua

Una stazione di ricarica ideale deve essere in grado di ricaricare l'auto elettrica in tempi brevi, come avviene nelle attuali stazioni di rifornimento per veicoli a motore termico, per questo devono essere utilizzati caricabatterie in grado di sostenere la ricarica veloce (fast charge).

Come visto nel capitolo 1, un veicolo elettrico può montare batterie per una capacità superiore ai 60kWh. Viste le potenze in gioco, la carica veloce può essere eseguita solamente con un processo di carica DC.

Per avere una velocità di rifornimento paragonabile a quella delle stazioni di servizio, una stazione di carica deve essere in grado di effettuare una carica

ad un livello compreso tra 3C e 5C. Per un pacco batterie da 60kWh il livello di carica massimo è di 4C poiché, come da standard SAE J1772, la potenza della carica veloce è limitata a 240kW.

Supponendo di avere 10 colonnine di ricarica all'interno della stazione, il caso peggiore è quello che vede la presenza di 10 veicoli con batteria da 60kWh e un SOC del 20% che iniziano contemporaneamente il processo di ricarica veloce a 4C.

Una volta terminato il primo gruppo di 10 veicoli, altri 10 veicoli uguali ai precedenti iniziano lo stesso processo di carica con le stesse condizioni di partenza. Ipotizzando che la transizione tra i due gruppi avvenga in 1 minuto, si ottiene che la potenza massima richiesta dalla stazione di carica è di 2.4MW, mentre la potenza media è di 2.05MW.

L'andamento nel tempo è riportato nella figura 50.

I livelli di potenza richiesti in questa situazione sono inaccettabili e una stazione dimensionata in questo modo va evitata poiché, se realizzata in zone urbane, porterebbe sicuramente al sovraccarico della rete di alimentazione e il corretto funzionamento del sistema sarebbe garantito solo con l'installazione di centrali elettriche dedicate.

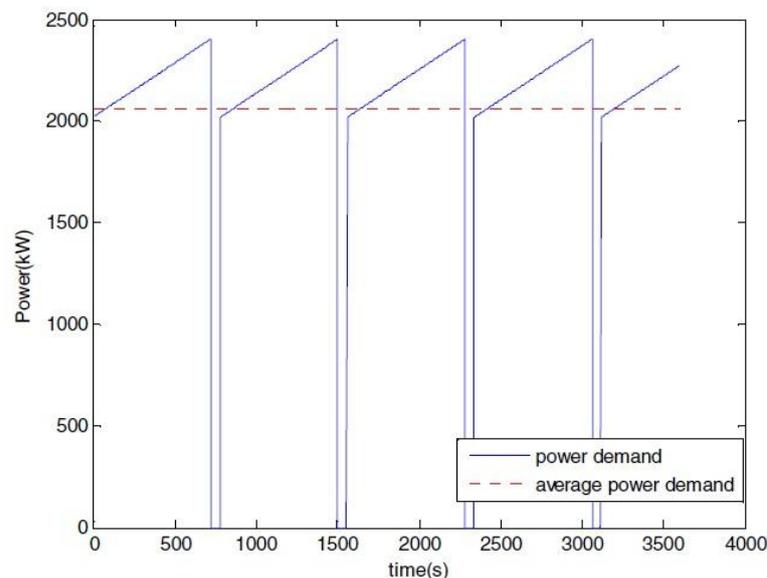


Figura 50 - Richiesta di potenza della stazione di carica nel caso peggiore ipotizzato

Per avere un quadro più realistico delle potenze coinvolte nella stazione di carica è possibile effettuare le seguenti ipotesi:

- lo stato di carica delle batterie degli autoveicoli è compreso tra il 20% e il 50% (media 35%)
- il range di capacità delle batterie installate sui veicoli elettrici va da 5kWh a 60kWh, con una media di 32.5kWh.

- il range della potenza di carica varia da 3C a 5C, con una media di 4C.
- tutti i caricabatterie lavorano contemporaneamente ad eccezione del periodo di 3 minuti in cui si ha il passaggio dal veicolo carico a quello che deve iniziare il processo.

Basandosi su queste assunzioni è possibile calcolare il profilo di carico richiesto alla rete. Effettuando l'osservazione per 12 ore si nota che la potenza media richiesta è di 942kW, che è notevolmente inferiore al picco massimo di 1678kW.

Nonostante la diminuzione delle potenze in gioco, la richiesta alla rete rimane elevata. Una prima soluzione per limitare l'impatto sulla rete è quella di adottare dei sistemi di accumulo dell'energia in grado di fornire potenza aggiuntiva quando la richiesta è elevata e di ricaricarsi nei momenti di basso carico.

Una seconda soluzione è quella di affiancare alle stazioni di ricarica delle fonti di energia rinnovabile, come pannelli solari o turbine eoliche.

Se queste soluzioni non dovessero essere sufficienti, è possibile ridurre l'impatto sulla rete ritardando e rinviando i processi di carica.

Una struttura per la stazione di carica è riportata in figura:

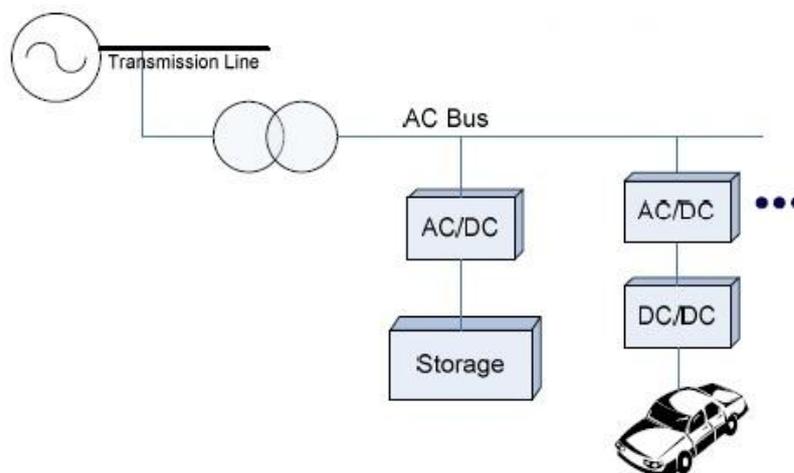


Figura 51 - Struttura logica di una stazione di carica

Come si vede dalla figura, nella stazione di carica è presente un bus AC necessario per il collegamento dei vari componenti. La soluzione in corrente alternata è la più sviluppata e standardizzata, per questo è anche la più diffusa.

Nonostante questi vantaggi, la soluzione più adeguata dal punto di vista pratico ed economico è quella del bus DC. Tutti i componenti in continua della stazione di carica possono essere interfacciati su un bus in DC, e questo permette di eliminare i sistemi di conversione AC/DC relativi ad ogni

caricabatteria sostituendoli con un unico convertitore posto a valle del sistema. Questo porta ad un guadagno in termini economici e di efficienza. In base ai dati riportati in precedenza, il convertitore viene dimensionato per una potenza di 1.1MW, di poco superiore alla potenza media richiesta dalla stazione di carica (942kW).

Un altro componente che deve essere dimensionato in maniera efficace è il sistema di accumulo di energia che serve per ridurre l'impatto del profilo di carico della stazione sulla rete.

Si ipotizza la presenza di 10 veicoli che arrivano alla stazione di ricarica con un intervallo di 2 minuti tra l'uno e l'altro.

Se durante la simulazione viene superata la potenza di carica massima disponibile al DC bus, la richiesta di potenza aggiuntiva che dovrebbe fornire il sistema di accumulo viene registrata e i dati vengono elaborati estrapolando il valore massimo e il valore medio.

No.	Needed storage capacity (kWh)			Needed storage power (kW)		
	max.	mean	median	max.	mean	median
1	66.68	13.01	9.72	646.81	170.18	163.58
2	88.79	12.77	8.51	741.20	166.96	145.62
3	84.15	12.88	9.42	779.07	169.18	155.38
4	72.07	12.63	8.59	694.85	166.59	144.60
5	74.62	13.42	10.13	698.88	173.48	159.28

Tabella 8 - Risultati della simulazione

Dalla tabella 8 si nota come il valore medio sia molto inferiore rispetto al valore massimo, quindi è più conveniente effettuare il dimensionamento sul valore medio, in questo caso 13kWh di capacità e 170kW di potenza.

In base a questi dati la scelta migliore per il sistema di immagazzinamento dell'energia ricade sui supercondensatori.

A causa delle caratteristiche del supercondensatore, ci sarà una caduta di tensione che ne andrà a limitare la capacità effettiva al 75%. Questo componente va quindi sovradimensionato: nel nostro caso occorre quindi installare un supercondensatore da 20kWh per avere 15kWh disponibili.

Con questi dati di dimensionamento è possibile effettuare una simulazione del funzionamento della stazione lungo un intervallo di 12 ore. Più del 98% delle richieste di carico vengono soddisfatte e solo pochi clienti vedono la loro carica ritardata nel tempo (in media 10 secondi).

Per quanto riguarda il convertitore AC/DC, per una potenza di 1.1MW, la soluzione del raddrizzatore ad alta frequenza può non essere la migliore a causa dei suoi elevati costi di realizzazione. Un semplice raddrizzatore a diodi può costituire una soluzione competitiva. Le fluttuazioni di tensione tipiche

di questo raddrizzatore non costituiscono un problema per i caricabatterie, mentre la presenza di armoniche può creare più di un problema di distorsione.

Un primo metodo per eliminare le armoniche presenti nel segnale è quello di aumentare il numero di impulsi nel raddrizzatore fino a 18. Anche se questa soluzione abbassa notevolmente il livello di distorsione, è di difficile realizzazione, quindi si preferisce modificare un raddrizzatore a 12 impulsi in modo da ottenere un THD inferiore al 5%.

L'ultimo componente che rimane da dimensionare è il caricabatterie.

Ci sono due tipologie di caricabatterie:

uno che può effettuare operazioni di carica e scarica (V2G) e l'altro che effettua solo la carica.

Le configurazioni tipiche per un caricabatterie bidirezionale sono un Buck-Boost a semi-ponte e un convertitore Buck-Boost a tre livelli. Queste configurazioni sono riportate nella figura 52:

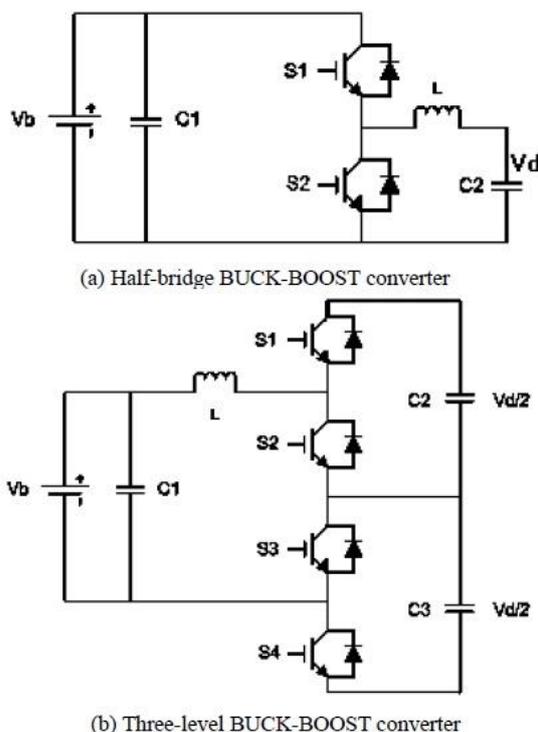


Figura 52 - Possibili configurazioni per un caricabatterie

Per avere le stesse prestazioni e lo stesso ripple sulla corrente, la frequenza di switching del convertitore a tre livelli deve essere molto più bassa di quella del convertitore a semi-ponte; l'induttore nel convertitore a tre livelli è più piccolo (1/3) rispetto a quello del convertitore a semi-ponte.

Lo stress sui componenti è simile nelle due tipologie.

C'è una relazione tra la frequenza di switching e la tensione sulla batteria: il ripple sull'induttore aumenta al diminuire del duty cycle e l'efficienza diminuisce perché le perdite non decrescono seguendo l'andamento dell'uscita.

Da questo punto di vista il convertitore migliore è il Buck-Boost a tre livelli, ed

è questo che viene scelto nella maggior parte delle colonnine di ricarica.

Rispetto al convertitore a semi-ponte, il "tre livelli" ha 4 valvole controllate anziché 2, quindi avrà un costo maggiore, ma la tensione che ogni singolo componente deve sopportare nel semi-ponte è doppia rispetto al convertitore a tre livelli.

CAPITOLO 6 - L'EVOLUZIONE DELLA RETE

6.1 Introduzione

Con il termine Smart Grid si intende una rete elettrica che include carichi, punti di accumulo, generatori e controllori in grado di comunicare tra loro in modo da migliorare l'efficienza del sistema energetico.

Una rete elettrica diventa "intelligente" quando integra tecnologie tradizionali con soluzioni digitali innovative che ne rendono flessibile la gestione attraverso uno scambio di informazioni più efficace.

Il compito principale del nuovo concetto di Smart Grid è quello di garantire la sicurezza e l'affidabilità delle operazioni in un contesto sempre più complesso della rete elettrica in cui il processo di produzione e distribuzione non sarà più basato su un numero limitato di grandi centrali, ma su un numero elevato di piccoli impianti sparsi sul territorio che sfruttano l'energia proveniente da fonti alternative.

La rete deve evolversi, e da passiva deve diventare attiva e intelligente, in grado di accogliere flussi di energia bidirezionali e di permettere l'interazione tra produttori e consumatori, capace di determinare in anticipo le richieste di consumo e di adattare con flessibilità la produzione e l'utilizzo dell'energia elettrica. La rete deve essere in grado di scambiare informazioni sui flussi di energia in modo da gestire con efficienza i picchi di richiesta riducendo il carico dove è necessario, così da evitare sovraccarichi e conseguenti interruzioni di elettricità.

Il distributore dovrà quindi monitorare e gestire anche a livello locale la distribuzione e la produzione di energia in media e bassa tensione.

La Smart Grid utilizzerà prodotti e servizi innovativi assieme a tecnologie intelligenti di monitoraggio, controllo e comunicazione, al fine di:

- facilitare l'interconnessione e l'interoperatività dei generatori elettrici di qualsiasi dimensione e tecnologia;
- fornire ai consumatori gli strumenti per contribuire ad ottimizzare il funzionamento del sistema globale;
- dare ai consumatori maggiore informazione e potere di scelta;
- ridurre l'impatto ambientale dell'intero sistema elettrico;
- aumentare il grado di affidabilità del sistema elettrico.

I motivi che spingono verso lo sviluppo di nuove tecnologie di rete sono principalmente tre:

- necessità di ridurre le emissioni di elementi inquinanti in modo da ridurre il riscaldamento climatico. L'Unione Europea ha deliberato un accordo che

prevede entro il 2020 la riduzione del 20% delle emissioni di gas serra, l'aumento del 20% dell'efficienza energetica e il raggiungimento del 20% di energia elettrica prodotta da fonti alternative.

- l'impossibilità di soddisfare le ipotesi di crescita dei consumi. Gli ultimi dati mostrano come il fabbisogno di energia elettrica dei paesi più industrializzati crescerà, entro il 2030, del 40% e la sola introduzione di energia da fonti rinnovabili non sarà sufficiente a far fronte a questa elevata richiesta di potenza. L'aumento dell'efficienza del sistema energetico è quindi una priorità.

- l'introduzione in massa delle auto elettriche. I produttori di auto sono pronti ad iniziare la produzione di veicoli elettrici, ma non è ancora chiaro se la rete allo stato attuale possa sopportare un alto livello di penetrazione di questa nuova tipologia di veicoli. E' necessario dislocare sul territorio i punti di ricarica, prevedere la possibilità di effettuare una ricarica veloce, attrezzare le case in modo che sia possibile ricaricare l'auto nel proprio garage, gestire le modalità di fatturazione e gestire il processo di carica in maniera "intelligente".

L'auto elettrica è un sistema di accumulo di energia elettrica e può essere utilizzata in operazioni di vehicle-to-grid (V2G) per rivendere energia alla rete mentre l'auto è parcheggiata e connessa alla colonnina di ricarica.

Una Smart Grid dovrà essere in grado di reagire agli eventi esterni e perseguire obiettivi di efficienza in modo autonomo e in tempo reale.

La rete elettrica attuale è stata progettata come una rete passiva che si limita a trasportare in un'unica direzione l'energia elettrica, da poche grosse centrali a tanti piccoli punti di consumo.

La nuova rete elettrica, invece, dovrà sfruttare maggiormente le fonti di energia rinnovabile e i sistemi di micro-generazione in modo da ridurre le perdite e aumentare l'efficienza avvicinando fisicamente la zona di produzione dell'energia elettrica a quella di consumo.

Allo stato attuale la generazione distribuita riesce ad essere integrata finché si tratta di quantitativi modesti, ma in caso di diffusione massiva si avrebbe un degrado importante dell'efficienza e della qualità dell'energia distribuita. La Smart Grid dovrà quindi essere in grado di gestire il flusso bi-direzionale della potenza in modo da poter coordinare al meglio la generazione distribuita. In questo modo sarà possibile anche gestire in maniera ottimale le fonti di energia rinnovabile, la cui produzione dipende fortemente dalle condizioni atmosferiche locali ed è di difficile previsione.

Ogni dispositivo di micro-generazione connesso alla rete deve essere in grado di comunicare e ricevere dati così da reagire in tempo reale agli stimoli provenienti da altri dispositivi o dalla rete stessa.

La rete elettrica sarà dotata di sensori, attuatori, nodi di comunicazione, sistemi di controllo e monitoraggio in modo che ogni utente potrà potenzialmente comprare e vendere energia in un mercato aperto ai grandi distributori e ai piccoli utenti.

Il prezzo dell'energia varia nel tempo ed è la principale variabile in grado di bilanciare la domanda all'offerta dell'energia elettrica.

Ogni utente, grazie ad un software gestito da una nuova tipologia di contatore intelligente in grado di rilevare l'andamento del prezzo della corrente, potrà riadattare il profilo dei consumi dei propri elettrodomestici in funzione delle fasce orarie più economiche.

Una rete configurata come Smart Grid permette di utilizzare nuovi sistemi di fatturazione e nuove procedure di auto-controllo della rete: in momenti di sovraccarico il sistema di gestione della rete può chiedere ad alcuni dispositivi non prioritari di spegnersi o di ritardare la loro accensione così da evitare il distacco dell'alimentazione di un'utenza.

L'utilizzo delle Smart Grid è fondamentale per raggiungere questo obiettivo, ma il progresso tecnico deve essere seguito dall'adozione di comportamenti e consumi eco sostenibili da parte dell'utente. Solo così sarà possibile ottenere il risultato migliore.

Essendo basata sullo scambio di informazioni, la gestione della Smart Grid deve prestare attenzione anche alla sicurezza informatica e delle trasmissioni in modo che i dati siano accessibili solo alle persone autorizzate.

Per promuovere l'evoluzione delle Smart Grid su un territorio vasto occorre una precisa standardizzazione delle parti coinvolte. Negli Stati Uniti il National Institute for Standards and Technology (NIST) e lo IEEE stanno lavorando allo sviluppo di uno standard per le Smart Grid, mentre la Federal Communication Commission (FCC) si occuperà delle regole di accesso alle reti broadband e allo spettro di banda da allocare per queste applicazioni.

Uno degli standard emergenti per le comunicazioni in un contesto di Smart Grid è il protocollo ZigBee.

L'operazione per l'introduzione delle Smart Grid vede impegnate in prima linea molte aziende importanti come Microsoft, Google, IBM e Cisco, mentre in Europa sono coinvolte tutte le più importanti aziende che operano nel settore elettrico ed energetico. La commissione Europea ritiene che siano

necessari investimenti fino a 750miliardi di euro nei prossimi 30 anni, suddivisi in €100miliardi per la trasmissione, €300miliardi nella distribuzione e €350miliardi nella generazione.

Le aziende impegnate nel progetto stanno portando avanti lo sviluppo della gestione dell'energia elettrica nell'ambito della building automation, il primo passo per arrivare al concetto più esteso di Smart Grid.

La rete di comunicazione necessaria per realizzare la Smart Grid può essere suddivisa in 4 livelli:

- la rete domestica, che connette i contatori domestici (elettricità, acqua, gas) con i sistemi locali di monitoraggio e controllo, quali gli impianti di micro-generazione e accumulo energia, le auto elettriche, i termostati, gli elettrodomestici e tutti gli apparati che contribuiscono a generare, consumare, monitorare e controllare l'energia in casa.
- la rete di quartiere, che interconnette i contatori di quartiere e consente di gestire il bilancio energetico a livello aggregato.
- la rete metropolitana, che convoglia i dati alle utilities e che include le piattaforme di gestione sia di tipo energetico sia di tipo ICT.
- la rete Inner-Grid, che permette la comunicazione fra Smart Grid di paesi diversi al fine di gestire dinamicamente il bilancio energetico.

I primi due livelli sono attualmente il principale oggetto di studio, assieme ai sistemi di comunicazione e allo sviluppo di un protocollo standard di controllo.

I dati provenienti dai sistemi di micro-generazione e dagli utenti devono essere monitorati ed elaborati in tempo reale. Da questa necessità nasce l'introduzione di strumenti di misura intelligenti connessi ad una rete broadband, in grado di effettuare operazioni di controllo e di comunicare in maniera bi-direzionale.

La conoscenza dei profili di consumo in tempo reale consente al gestore di rete di realizzare meccanismi di maggiore dinamicità nella gestione della rete stessa, inoltre permette all'utilizzatore di avere maggior consapevolezza dell'energia che sta consumando.

Il primo passo per poter effettuare operazioni di lettura in tempo reale è l'introduzione di contatori intelligenti (3.2.1) in grado di effettuare lo Smart Metering.

In Italia, da Ottobre 2008, sono obbligatori i meccanismi di tele gestione e tele lettura dei consumi di gas e di energia elettrica. Dal 2009 CEN, CENELEC

e ETSI sono incaricati di sviluppare gli standard necessari alla realizzazione di un'architettura aperta di sistemi di Smart Metering interoperabili.

6.2 Smart Home

L'utilizzo delle Smart Grid è finalizzato ad avere una riduzione dei consumi, una riduzione del costo dell'energia e un miglioramento dell'efficienza della rete.

Questi obiettivi possono essere raggiunti grazie all'elemento chiave della rete intelligente: la relazione interattiva e bidirezionale tra il gestore di rete e l'utilizzatore.

In ambito domestico questo si traduce nella presenza di un sistema di controllo computerizzato (Energy Management System, EMS) che gestisce gli elettrodomestici in funzione dello stato della rete, riducendone l'utilizzo nei periodi di picco oppure spostandone l'accensione nei periodi in cui l'energia elettrica ha il suo costo minore.

L'interfaccia tra l'abitazione e la rete elettrica è costituita dal contatore intelligente (3.2.1) che permette lo scambio bidirezionale di informazioni con il gestore di rete riguardanti i consumi e i costi dell'energia elettrica.

L'EMS permette di monitorare in tempo reale i consumi di ogni applicazione elettrica presente nell'abitazione e consente di creare un profilo di utilizzo che minimizza le spese.

Con l'introduzione di pannelli solari e microturbine eoliche, molte abitazioni si stanno trasformando in punti di micro-generazione. La connessione di queste micro centrali alla rete è possibile attraverso le Smart Grid, i contatori intelligenti e l'EMS, in modo da controllare in tempo reale la quantità di energia utilizzata dall'abitazione e quella immessa in rete.

Un'evoluzione della micro generazione in combinazione alle Smart Grid è quella di creare isole elettricamente autonome in grado di provvedere alla propria alimentazione anche in assenza della fonte principale di energia elettrica.

6.3 Energia Rinnovabile

Le risorse che permettono di sfruttare le energie rinnovabili (solare, eolico, geotermico) si trovano spesso molto distanti dalle zone urbane in cui la potenza è richiesta. Serve quindi una rete in grado di effettuare in sicurezza la trasmissione della potenza e che permetta a più utenze di usufruire dell'energia rinnovabile.

Oltre a limiti di tipo logistico, le fonti rinnovabili sono caratterizzate dall'intermittenza nella generazione, un fenomeno difficile da gestire in una rete passiva.

La Smart Grid, in combinazione con sistemi di accumulo di energia, offre gli strumenti necessari per gestire le fluttuazioni di produzione: quando la generazione è elevata, l'energia in eccesso viene utilizzata per caricare i sistemi di accumulo per poi essere re-immessa in rete quando la produzione è bassa.

Inoltre, la presenza di una rete intelligente che collega fonti di energia rinnovabile diffuse sul territorio, permette di risolvere il problema della fluttuazione della generazione prelevando l'energia solo dove è disponibile. Ad esempio, se il vento non mette in funzione un impianto eolico, l'energia elettrica può essere prelevata da un'altra zona dove il vento sta soffiando.

6.4 Coinvolgimento del consumatore

L'utilizzo delle Smart Grid offre al consumatore diverse opportunità per risparmiare sul costo dell'elettricità, ad esempio la riduzione dei consumi mediante la redistribuzione dell'utilizzo degli elettrodomestici nell'arco della giornata in base al costo dell'energia.

Il profilo di carico della rete nell'arco dell'intera giornata non è costante, ma è caratterizzato da un picco nelle ore serali. Il dover garantire l'energia elettrica durante i periodi di picco porta al sovradimensionamento delle centrali elettriche che vengono utilizzate al massimo della loro potenza solo in quel periodo della giornata.

Nel caso peggiore il gestore è costretto a comprare energia dall'estero o addirittura a scollegare utenze per alleggerire il carico.

Riuscire a ridurre l'ampiezza del picco e ad avere un profilo dei consumi più piatto porterebbe quindi a vantaggi economici e di gestione notevoli.

In alcune fasce orarie la produzione di energia elettrica è superiore alle richieste della rete e poiché il consumo deve essere istantaneo (l'energia prodotta non può essere accumulata), in queste fasce il prezzo dell'energia è addirittura negativo, e l'utente può venire pagato per assorbire energia dalla rete.

Una prima soluzione è quella di cercare di incoraggiare la distribuzione dei consumi nelle fasce orarie in cui il prezzo dell'energia elettrica è minore, evitando le fasce di picco (in cui il prezzo dell'energia è elevato).

In questo modo si ha un abbassamento del picco di richiesta e il profilo di carico della rete diventa più uniforme rendendo superfluo l'utilizzo di

centrali aggiuntive e diminuendo (o eliminando) il bisogno di comprare energia dall'estero.

Grazie alle Smart Grid e allo Smart Home (6.2) l'utente riesce a controllare in tempo reale le fasce di prezzo dell'energia elettrica programmando così le sue attività, anche in maniera automatica.

Un altro modo per ottenere un risparmio utilizzando la Smart Grid è quello di immettere in rete energia prodotta da fonti rinnovabili: l'utente può immettere in linea l'energia in eccesso venendo pagato o avendo uno sconto nella fatturazione dell'energia consumata.

L'utilizzo delle Smart Grid permette di pagare l'energia immessa in base alle fasce di orario e permette l'utilizzo e la gestione di queste fonti aggiuntive nei periodi di picco.

Altri incentivi possono arrivare dall'utilizzo di veicoli elettrici come strumento per immagazzinare l'energia elettrica. I possessori di un veicolo elettrico possono essere pagati per immettere energia in rete nei momenti di massimo picco oppure per assorbire la potenza in eccesso nei momenti di bassa richiesta (V2G, capitolo 4).

A causa dei cicli aggiuntivi di carica/scarica, la batteria subisce una riduzione della sua vita utile, quindi gli incentivi riconosciuti all'utente devono tenere in considerazione anche il degrado della batteria.

Un numero elevato di veicoli collegati alla rete permette di garantire l'alimentazione di piccole zone in caso di black out.

6.4.1 Indagine sul coinvolgimento dell'utente

Quelli mostrati finora sono i principali vantaggi che l'introduzione delle smart grid porterà al consumatore.

I possibili benefici derivanti da questa tecnologia sono molti, ed è per questo che sono state effettuate indagini di mercato in modo da concentrarsi sulle reali esigenze dei consumatori in modo da fornire servizi più mirati possibile.

I progetti per il futuro sono quelli di avere una rete al 100% intelligente, ma al momento l'introduzione sarà graduale e riguarderà dapprima gli utenti che potrebbero essere maggiormente interessati da questa nuova tecnologia che, secondo uno studio norvegese, saranno coloro che:

- hanno una elevata bolletta dell'elettricità;
- si preoccupano dell'ambiente;
- hanno sostituito il loro impianto di riscaldamento;
- hanno una casa che adotta tecniche di home automation;

Su un campione di persone rientranti nelle precedenti categorie è stata svolta un'indagine di mercato i cui risultati sono discussi di seguito.

La maggior parte delle persone si è mostrata interessata alla possibilità di ottenere informazioni personalizzate sul risparmio energetico e a ricevere messaggi di allerta quando i propri consumi superano determinate soglie.

La possibilità di controllare a distanza i propri elettrodomestici e il proprio impianto di casa è un servizio al quale sono interessate molte delle persone intervistate che, per questa possibilità, sarebbero anche disposte a pagare un sovrapprezzo sulla bolletta.

Uno scenario che ha suscitato molto interesse nei soggetti intervistati è quello che prevede la possibilità di generare la propria energia (ad esempio attraverso pannelli fotovoltaici) e l'opportunità di immetterla in rete vendendola, anche se qualche preoccupazione è stata sollevata riguardo le difficoltà tecniche, legali e gestionali del processo di auto generazione e feed-in.

Per quanto riguarda la possibilità di utilizzare le batterie delle auto elettriche come risorsa per l'immagazzinamento dell'energia, le persone intervistate hanno mostrato delle preoccupazioni riguardo la sua realizzabilità, soprattutto per il timore di rimanere senza energia sufficiente per gli spostamenti e anche perché attualmente i veicoli elettrici sono ancora troppo pochi. C'è sensibilità riguardo al problema e alla necessità di immagazzinamento dell'energia, ma il potenziale dell'auto elettrica non è ancora visto come una possibile soluzione.

La gestione dei carichi effettuata dall'operatore di rete e la possibilità di una tariffazione dinamica permetteranno di gestire i picchi di carico presenti sulla rete attraverso un sistema di domanda-risposta. Sebbene gli utenti intervistati percepiscano l'importanza di avere un profilo di carico più piatto possibile, vedono questo sistema di controllo come una complicazione del modo di utilizzare l'elettricità.

Il campione intervistato si è dimostrato disponibile a diminuire i propri consumi se fosse possibile avere in tempo reale informazioni sulla propria potenza richiesta alla rete e sullo stato di carico della rete.

La maggioranza delle persone intervistate ha sottolineato che i servizi della rete intelligente devono essere accuratamente testati e progettati per la facilità d'uso e l'affidabilità ma si è dimostrata poco disponibile ad essere utilizzata come banco di prova per sistemi non ancora completamente sviluppati e affidabili.

Un'altra preoccupazione riguarda la sicurezza dei dati trasmessi e la privacy. Le smart grid, infatti, prevedono un fitto scambio di informazioni sensibili tra il consumatore e il gestore di rete.

Come visto, per lo sviluppo delle smart grid e dei servizi ad esse correlati, l'utente finale svolge un ruolo fondamentale in quanto può partecipare alla gestione dell'energia attraverso l'uso di tecnologie di generazione distribuita e di automazione domestica per il controllo dei carichi, ed è chiamato a modificare l'uso dell'energia, e quindi delle sue abitudini, in base alla risposta di segnali di prezzo o alla disponibilità delle fonti rinnovabili.

Una scarsa accettazione della flessibilità dei consumi, la poca conoscenza delle fonti rinnovabili e la scarsa propensione al risparmio energetico possono essere dei fattori di sbarramento allo sviluppo delle smart grid.

Riguardo questo tema, RSE ha svolto un'indagine somministrando un questionario ad un vasto campione di persone caratterizzato da differenze di sesso, età e titolo di studio.

I primi risultati mostrano come il 68% degli intervistati sia favorevole all'introduzione delle smart grid e all'utilizzo di impianti di cogenerazione nel proprio edificio, purché questo non comporti costi superiori a quelli attuali.

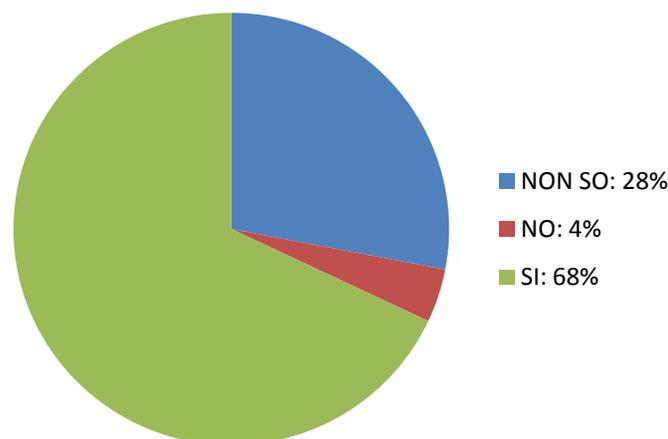


Figura 53 - Gradimento all'installazione di impianti di cogenerazione nel proprio edificio

Solo una piccola parte del campione di persone intervistato ha dichiarato di essere poco attenta al risparmio energetico, mentre la maggior parte ha mostrato un elevato apprezzamento per le fonti rinnovabili, principalmente per il fotovoltaico; gli impianti che sfruttano le biomasse sono quelli che riscuotono minor apprezzamento.

Molto importante per la gestione delle smart grid è il fatto che la quasi totalità degli intervistati (più del 95%) ha dichiarato di essere disponibile a limitare i propri consumi modificando l'utilizzo dell'energia.

Come è possibile vedere nella figura 54, gli intervistati sono disponibili a modificare l'utilizzo di alcuni elettrodomestici (come lavastoviglie, lavatrice e aspirapolvere) accettandone uno spostamento dalle 8 alle 24 ore, mentre si

nota che per altri elettrodomestici, come TV, condizionatore, ma soprattutto Personal Computer, lo spostamento non è tollerato.

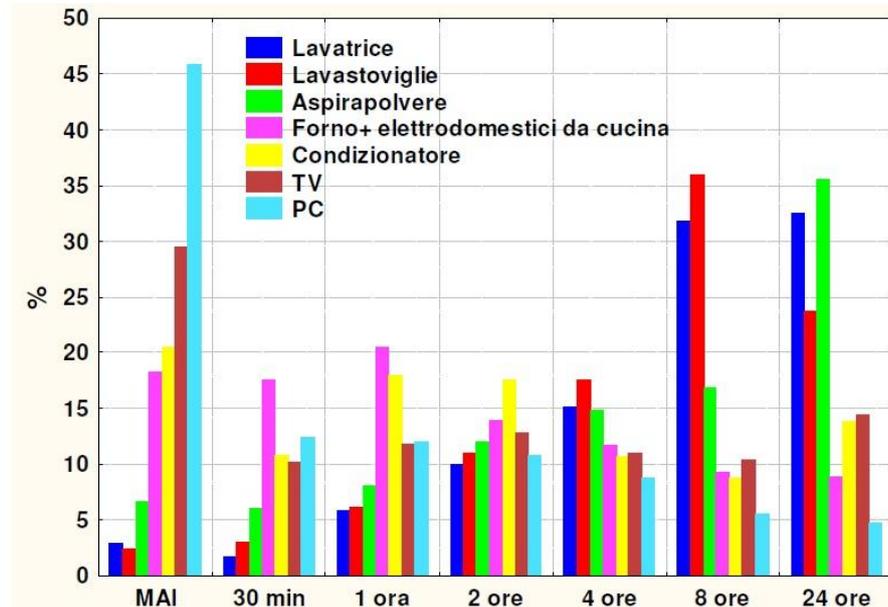


Figura 54 - Flessibilità sull'utilizzo degli elettrodomestici

Il 45% degli intervistati si è dichiarato disponibile a modificare le proprie abitudini di utilizzo degli elettrodomestici anche senza un incentivo economico, mentre il 52% chiede una riduzione della bolletta fino a 15€.

I risultati mostrano che l'accettazione dei sistemi di generazione distribuita è in generale molto buona e che l'utente dimostra un'elevata disponibilità nel modificare le proprie abitudini di consumo anche senza incentivi economici. Per migliorare la situazione percepita dal consumatore occorrono soluzioni economiche (tariffa multi-oraria) e tecniche (Smart Meter, Home Management System e carichi intelligenti), ma soprattutto un'informazione maggiore e corretta sui temi energetici.

6.5 Gestione della rete

Lo scopo principale del controllo della rete è quello di garantire che la potenza prodotta sia uguale a quella consumata. Se così non dovesse essere si avrebbero delle variazioni di tensione che andrebbero a compromettere la qualità dell'energia immessa in linea creando problemi alle utenze.

Gli attuali sistemi di controllo, pur essendo efficienti, offrono scarse informazioni su come il flusso di energia sta percorrendo la rete.

L'utilizzo delle Smart Grid rende la gestione della rete più affidabile poiché introduce nuovi sistemi di controllo e di misurazione sul sistema di trasmissione.

La PMU (Phasor Measurement Unit) permette di campionare tensione e corrente parecchie volte al secondo in modo da avere un quadro dettagliato e in tempo reale della situazione della rete in un determinato punto. In questo modo si riesce a controllare la dinamica delle grandezze di rete in modo da individuare le oscillazioni e intervenire tempestivamente in caso di problemi.

In una rete intelligente è anche più facile rilevare un guasto ed isolarlo in modo da evitare che cresca su larga scala. In pochi secondi i sensori, in combinazione con gli interruttori automatici e il controllo intelligente della rete, permettono di individuare il guasto, isolarlo e trovare un percorso alternativo affinché le altre utenze sane continuino ad essere alimentate.

CONCLUSIONI

Una volta connessa alla presa di ricarica, l'automobile elettrica può fornire servizi ausiliari alla rete di distribuzione migliorandone la gestione e ottimizzandone il funzionamento.

L'entità dei benefici, in termini di durata e potenza, dipende dal livello di penetrazione del veicolo elettrico e dal livello di evoluzione della rete; alcuni tipi di intervento sono infatti possibili solo con determinate condizioni di potenza connessa e di sviluppo del sistema di gestione bidirezionale della rete.

L'evoluzione della rete verso le Smart Grid è dunque importante per poter sfruttare appieno le potenzialità di accumulo delle batterie degli autoveicoli elettrici.

Le automobili elettriche possono inoltre svolgere un ruolo chiave nello sviluppo delle fonti di energia rinnovabile, come l'eolico e il fotovoltaico: la capacità di accumulo permette di disaccoppiare il processo di produzione dell'energia elettrica dal suo consumo diminuendo fortemente gli aspetti negativi della non programmabilità dell'energia proveniente da fonti rinnovabili.

Oltre agli aspetti positivi sopra menzionati, la presenza di numerose batterie collegate alla rete per la ricarica porta ad un aumento del carico presente in linea. Se non verranno effettuati gli opportuni adeguamenti alla rete, uniti ad un controllo ottimizzato dei processi di carica, si andrà incontro ad un sovraccarico della linea che porterà all'invecchiamento precoce dei componenti fino alla loro rottura o, nel caso peggiore, al collasso della rete.

La presenza di un sistema evoluto di rete elettrica ottimizzata sia nei componenti fisici, sia nei sistemi di gestione e comunicazione, è quindi una reale necessità per poter sfruttare interamente le potenzialità del V2G.

Quando si parla di utilizzare i veicoli per offrire servizi alla rete è opportuno ricordare che l'automobile nasce per spostarsi da un luogo all'altro; occorre quindi tenere in considerazione le esigenze dell'utente garantendo un livello minimo di carica (Drive Away Time) e stipulando contratti ad hoc che prevedano incentivi per l'acquisto dell'auto elettrica o agevolazioni sulla sostituzione della batteria, usurata più velocemente del normale a causa dalle operazioni V2G.

Per incentivare l'aumento del livello di penetrazione del veicolo e garantire il massimo sfruttamento del potenziale V2G, occorrerà sviluppare una fitta rete di colonnine e stazioni di ricarica caratterizzate da un alto livello di standardizzazione (atto a garantire l'interoperabilità) e dotate di un sistema

ottimizzato per il controllo dei processi di carica/scarica. Andrà inoltre sviluppato un sistema di comunicazione tale da permettere alle colonnine uno scambio di dati bidirezionale tra loro e con la rete intelligente.

Lo stato attuale del livello di penetrazione del veicolo elettrico, in aggiunta alla condizione di rete passiva, non consente alcun tipo di interazione V2G.

Le proiezioni indicano un notevole aumento dei veicoli nei prossimi 20 anni con un tasso di crescita tale da raggiungere cifre adeguate per effettuare tutte le tipologie di operazioni V2G entro pochi anni.

Per quanto riguarda le Smart Grid, invece, il progetto si trova ancora in fase di studio, ed esistono solo poche realtà sperimentali.

L'elettrificazione dei trasporti, lo sviluppo della rete verso le Smart Grid e la massiccia introduzione di fonti rinnovabili, costituiscono la prossima e imminente evoluzione della tecnologia elettrica.

Il nuovo status, oltre a garantire i vantaggi tecnici elencati in questo elaborato, porterà ad una mobilità sostenibile e ad una gestione ottimale della rete, con minori potenze in gioco e una riduzione di costi e sprechi, in un circolo virtuoso a beneficio dell'ambiente.

BIBLIOGRAFIA

Minxin Zheng, Bojin Qi, Hongjie Wu "A Li-ion Battery Management System Based on CAN-bus for Electric Vehicle", Industrial Electronics and Applications, 2008. ICIEA 2008, pp 1180-1184

Chen CHEN, Jin JIN, Lenian HE, "A New Battery Management System for Li-ion Battery Packs", Circuits and Systems, 2008. APCCAS 2008. IEEE Asia Pacific, pp 1312-1315

Prof.-Dr. Jiirgen Garche, Dr.-Ing. Andreas Jossen "Battery management systems (BMS) for increasing battery life time", The 21st International Telecommunication Energy Conference, 1999. INTELEC '99, PP 81-84

Jeff Lee "Battery Management Technology for an Electric Vehicle", International Symposium on Low-Power Electronics and Design (ISLPED), 2010 ACM/IEEE, pp 361

Philipp Sinhuber, Werner Rohlf, Dirk Uwe Sauer, "Conceptual Considerations for Electrification of Public City Buses – Energy Storage System and Charging Stations ", Emobility - Electrical Power Train, 2010, pp 1-5

BI Jun, WANG Lu, QI Long-tao, "Design and implementation of the remote management system for electric public vehicle batteries data", International Conference on Optoelectronics and Image Processing (ICOIP), 2010, pp 394-396

Kandler Smith, Tony Markel, Gi-Heon Kim, Ahmad Pesaran, "Design of Electric Drive Vehicle Batteries for Long Life and Low Cost", IEEE 2010 Workshop on Accelerated Stress Testing and Reliability, 6-8 October 2010

Dongping XU, Lifang Wang, JianYang, "Research on Li-ion Battery Management System", International Conference on Electrical and Control Engineering (ICECE), 2010, pp 4106-4109

Einar Gotaas, Arne Nettum, Dag S. Bakken, "Single Cell Battery Management Systems (BMS)", INTELEC 22nd International Telecommunications Energy Conference, 2000, pp 695-702

T. L. Chern, P. L. Pan, "The Research of Smart Li-ion Battery Management System", 2nd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, 2007, pp 2273-2277

Zhengwei Zhu, Bo yang, "The Research on Intelligent Management System of Li-Ion Power Battery String Of Electric Vehicle", International Conference on Electronics, Communications and Control (ICECC), 2011, pp 2370-2372

Liu Yongxiang, Hui Fuhui, Xu Ruilin, Chen Tao, Xu Xin and Li Jie, "Investigation on the construction mode of the charging station and battery exchange station", Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2011, pp 1-2

Wang Dafang, Zhu Yueying, Xin Ming and Zhao Guifan, "Research on Auto and Rapid Exchange System of EV battery cases", International Conference on Mechatronics and Automation, 2009. ICMA 2009, pp 2287-2291

Vipin Prajapati, Herbert Hess, Edward James William II, Vishu Gupta, Matthew Huff, Milos Manic, Freeman Rufus, Ash Thakker, Justin Govar, "A Literature Review of State-of-Charge Estimation Techniques Applicable to Lithium Poly-Carbon Monoflouride (Li/CFx) Battery", India International Conference on Power Electronics (IICPE), 2010, pp 1-8

Hengsong Wang, Qi Huang, Changhua Zhang, Aihua Xia. "A Novel Approach For The Layout Of Electric Vehicle Charging Station", International Conference on Apperceiving Computing and Intelligence Analysis (ICACIA), 2010, pp 64-70

Libiao Qiao, Xiaojun Liu, Baochen Jiang, "Design and Implementation of the Smart Meter in Vehicle-to-Grid", 4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring an Power Technologies (DRPT), 2011, pp 618-621

Yunus Kalid, De La Parra Hector Zelaya, Reza Muhamad, "Distribution Grid Impact of Plug-In Electric Vehicles Charging at Fast Charging Stations Using Stochastic Charging Model", Proceeding of the 2011-14th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE), 2011, pp 1-11

Liu Yongxiang, Hui Fuhui, Xu Ruilin, Chen Tao, Xu Xin, Li Jie, "Investigation on the construction mode of the charging station and battery-exchange station", Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2011, pp 1-2

Yunyan Wang, Jingxin Li, Jiuchun Jiang, Liyong Niu, "Management Information System of Charging Station for Electric Vehicle (EV)", Proceedings of the Eighth International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS) 2005, vol.1 pp 857-860

Xie Wei-dong, Luan Wei, "Modeling and Simulation of Public EV Charging Station with Power Storage System", International Conference on Electric Information and Control Engineering (ICEICE), 2011, pp 2346-2350

Sanzhong Bai, Yu Du, Srdjan Lukic, "Optimum design of an EV/PHEV charging station with DC bus and storage system", IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2010, pp 1178-1184

Deng Benzai , Wang Zhiqiang, "Research on Electric-Vehicle Charging Station Technologies Based on Smart Grid", Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2011, pp 1-4

Zhenhua Jiang, Roger A. Dougal, "Strategy for Active Power Sharing in a Fuel-Cell-Powered Charging Station for Advanced Technology Batteries", IEEE 34th Annual Power Electronics Specialist Conference (PESC), 2003, vol.1 pp 81-87

Shaoyun Ge, Liang Feng, Hong Liu, "The Planning of Electric Vehicle Charging Station Based on Grid Partition Method", International Conference on Electrical and Control Engineering (ICECE), 2011, pp 2726-2730

Junfeng Liu, Tszwang N.G. , Cheng K.W.E. , Jun Zeng, "The Study of Distributed EV Charging Station Based on Network", 4th International Conference on Power Electronics System and Applications (PESA), 2011, pp 1-5

X. Li, M. Xiao, K. Malinowski, and S.-Y. Choe, "State-of-charge (SOC) estimation based on reduced order of electrochemical model for a pouch type high power Li-polymer battery", IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2011, pp 1-6

Li Ran, Wu Junfeng, Wang Haiying, Li Gechen, "Prediction of State of Charge of Lithium-ion Rechargeable Battery with Electrochemical Impedance Spectroscopy Theory", 5th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2010, pp 684-688

B. S. Bhangu, P. Bentley, D. A. Stone, C. M. Bingham, "Observer techniques for estimating the State-of Charge and State-of-Health of VRLABs for Hybrid Electric Vehicles", IEEE Conference Vehicle Power and Propulsion, 2005, pp 780-789

Terrill B. Atwater, "State of Charge Indicators", IEEE Military Communications Conference MILCOM '94, 1994, pp 1

Dai Haifeng, Wei Xuezhe, Sun Zechang, "State and Parameter Estimation of a HEV Li-ion Battery Pack Using Adaptive Kalman Filter with a New SOC-OCV Concept", International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation (ICMTMA), 2009, pp 375-380

S.J. Lee, J.H. Kim, J.M. Lee, and Bo H. Cho, "The State and Parameter Estimation of an Li-Ion Battery Using a New OCV-SOC Concept", IEEE Power Electronics Specialist Conference (PESC), 2007, pp 2799-2803

P. Spagnol, S. Rossi, S. M. Savaresi, "Kalman Filter SoC estimation for Li-Ion batteries", IEEE International Conference on Control Applications (CCA), 2011, pp 587-592

Ota Y., Taniguchi H., Nakajima T., Liyanage K.M., Baba J., Yokoyama A., "Autonomous Distributed V2G (Vehicle-to-Grid) considering Charging Request and Battery Condition", IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe), 2010, pp 1-6

A.S. Masoum, S. Deilami, P.S. Moses, A. Abu-Siada, "Impacts of Battery Charging Rates of Plug-in Electric Vehicle on Smart Grid Distribution Systems", IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe), pp 1-6

Jörg Heuer, Przemyslaw Komarnicki, Zbigniew A. Styczynski, "Integration of Electrical Vehicles into the Smart Grid in the Harz.EE-mobility Research Project", IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2011, pp 1-6

Sebastian Käbisch, Anton Schmitt, Martin Winter, Jörg Heuer, "Interconnections and Communications of Electric Vehicles and Smart Grids", First International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm), 2010, pp 161-166

Deng Benzai, Wang Zhiqiang, "Research on Electric-Vehicle Charging Station Technologies Based on Smart Grid", Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2011, pp 1-4

Tu Yiyun, Li Can, Cheng Lin, Le Lin, "Research on Vehicle-to-grid Technology", International Conference on Computer Distributed Control and Intelligent Environmental Monitoring (CDCIEM), 2011, pp 1013-1016

Willett Kempton, Victor Udo, Ken Huber, Kevin Komara, Steve Letendre, Scott Baker, Doug Brunner, Nat Pearre, "A Test of Vehicle-to-Grid (V2G) for Energy Storage and Frequency Regulation in the PJM System", 2008

Michael Kuss, Tony Markel, William Kramer, "Application of Distribution Transformer Thermal Life Models to Electrified Vehicle Charging Loads Using Monte-Carlo Method", 25th World Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium & Exhibition, 2010

T. Markel, M. Kuss, P. Denholm, "Communication and Control of Electric Vehicles Supporting Renewables", IEEE Vehicle Power and Propulsion Systems Conference, 2009

K. Parks, P. Denholm, T. Markel, "Costs and Emissions Associated with Plug-In Hybrid Electric Vehicle Charging in the Xcel Energy Colorado Service Territory", NREL Technical Report, 2007

T. Markel, K. Bennion and W. Kramer, J. Bryan and J. Giedd, "Field Testing Plug-in Hybrid Electric Vehicles with Charge Control Technology in the Xcel Energy Territory", NREL Technical Report, 2009

T. Markel, "Plug-in Electric Vehicle Infrastructure: A Foundation for Electrified Transportation", MIT Energy Initiative Transportation Electrification Symposium, 2010

Tony Markel, Michael Kuss, and Michael Simpson, "Value of Plug-in Vehicle Grid Support Operation", IEEE Conference on Innovative Technologies for an Efficient and Reliable Electricity Supply (CITRES), 2010, pp 325-332

Mike Simpson, Tony Markel, and Michael O'Keefe, "Vehicle to Micro-Grid: Leveraging Existing Assets for Reliable Energy Management", 4th International Conference on Integration of Renewable & Distributed Energy Resources, 2010

Fabio L. Bellifemine, Claudio Borean, Roberto De Bonis, "Smart Grids: Energia e ICT", Notiziario Tecnico Telecom Italia, Anno 18, No. 3, 2009

Elvire, "Elvire Scenario and Electric Mobility Business Model Documentation (M15, Public Version)", 2009

Robert Ball, Nicola Keers, Marcus Alexander, Ed Bower, "MERGE Modeling Electric Storage Devices for EV", 2010

Enrica Micolano, "Contributo degli accumuli di energia e potenza al miglioramento della qualità e dell'efficienza delle reti di distribuzione", AEIT Giornata di Studio - Milano, aprile 2012, Smart Grid: prospettive per clienti finali e distributori. Esame della normativa, regolamentazione e opportunità per l'industria

Claudio Bossi, "Indagine socio-economica per valutare l'attitudine degli utenti a una partecipazione nella gestione delle Smart Grid", AEIT Giornata di Studio - Milano, aprile 2012, Smart Grid: prospettive per clienti finali e distributori. Esame della normativa, regolamentazione e opportunità per l'industria

SITOGRAFIA

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775301005602>

<http://www.mpoweruk.com/soc.htm>

http://www.smartgrid.gov/the_smart_grid#home

<http://www.sgiclearinghouse.org/LearnMore>

<http://www.greentechmedia.com/articles/read/electric-car-firms-push-alternative-to-project-better-places-idea-892/>

<http://www.nrel.gov/>

http://www.nrel.gov/vehiclesandfuels/project_ev_grid_integration.html

<http://www.thefuturewillfollow.com>

<http://www.enel.it/it-IT/>

http://www.alpenergy.net/index.php?option=com_content&view=article&id=44&Itemid=42&lang=it

http://www.ev-merge.eu/index.php?option=com_content&view=article&id=47&Itemid=54

<http://axeon.com/Technology/Technology-Overview.aspx>

<http://www.greencarcongress.com/v2g/>

<http://www.udel.edu/V2G/>

INDICE IMMAGINI

<i>Figura 1</i> - Schema logico di connessione dei principali elementi di un veicolo elettrico.....	7
<i>Figura 2</i> - Situazione relativa agli standard di carica.....	10
<i>Figura 3</i> - Distanza giornaliera media percorsa durante la settimana.....	13
<i>Figura 4</i> - Distanza giornaliera media percorsa durante il week end.....	13
<i>Figura 5</i> - Possibili scenari di penetrazione del veicolo elettrico.....	14
<i>Figura 6</i> - Proiezione delle vendite di veicoli elettrici in alcuni paesi europei.....	15
<i>Figura 7</i> - a) Proiezione vendite veicoli M1 b) Proiezione vendite veicoli N1.....	16
<i>Figura 8</i> - Variazione del tempo di carica in funzione della potenza di carica.....	18
<i>Figura 9</i> - Diminuzione della capacità di una batteria in funzione del tempo (anni).....	22
<i>Figura 10</i> - Relazione tra l'aumento della resistenza interna e la profondità della scarica.....	24
<i>Figura 11</i> - Variazione delle prestazioni della batteria in funzione della temperatura.....	25
<i>Figura 12</i> - Tipico profilo di carica.....	27
<i>Figura 13</i> - Struttura schematica di una batteria.....	27
<i>Figura 14</i> - BMS Installato.....	29
<i>Figura 15</i> - Schema Logico del Funzionamento del BMS.....	30
<i>Figura 16</i> - a) Costo in percentuale dei componenti di una batteria.....	34
<i>Figura 17</i> - Schema delle comunicazioni tra veicolo, contatore intelligente e la rete.....	39
<i>Figura 18</i> - Componenti coinvolti nell'operazione di sostituzione della batteria.....	42
<i>Figura 19</i> - Andamento giornaliero della percentuale di carico del trasformatore.....	44
<i>Figura 20</i> - Andamento giornaliero della tensione di linea in p.u. per diversi livelli di penetrazione.....	46
<i>Figura 21</i> - Andamento giornaliero della potenza sul trasformatore per diversi livelli di penetrazione.....	46
<i>Figura 22</i> - Andamento della temperatura in funzione del fattore di carico.....	50
<i>Figura 23</i> - Aumento della temperatura in funzione del carico in due trasformatori di taglia diversa.....	50
<i>Figura 24</i> - Fattore di invecchiamento in relazione all'aumento della temperatura.....	51
<i>Figura 25</i> - Andamento del fattore di invecchiamento in relazione al numero di veicoli collegati.....	52
<i>Figura 26</i> - a) Andamento annuale della temperatura nel trasformatore in caso di carica a 3.3kW.....	53
<i>Figura 27</i> - Andamento annuale della temperatura sul trasformatore nel caso di carica controllata.....	54
<i>Figura 28</i> - Diagramma di flusso relativo all'algoritmo di suddivisione.....	58
<i>Figura 29</i> - Suddivisione iniziale dell'area.....	60
<i>Figura 30</i> - Suddivisione finale.....	61
<i>Figura 31</i> - Capacità di copertura di una stazione di carica.....	64
<i>Figura 32</i> - Distribuzione della richiesta di energia nella città di Chengdu.....	66
<i>Figura 33</i> - Disposizione finale delle stazioni di carica nella città di Chengdu.....	67
<i>Figura 34</i> - Servizi di rete offerti dagli accumulatori, suddivisi per la durata di intervento.....	68
<i>Figura 35</i> - Peak Shaving.....	70
<i>Figura 36</i> - Struttura del messaggio Zigbee.....	78
<i>Figura 37</i> - Modalità di funzionamento in relazione allo stato di carica.....	79
<i>Figura 38</i> - Andamento delle grandezze nella modalità di carica semplice.....	80
<i>Figura 39</i> - Andamento delle grandezze in caso di scarica semplice.....	81
<i>Figura 40</i> - Andamento delle grandezze nel funzionamento V2G.....	82
<i>Figura 41</i> - Andamento giornaliero delle grandezze in modalità V2G.....	83
<i>Figura 42</i> - Andamento delle grandezze in modalità V2G nel caso di carica eccessiva.....	84
<i>Figura 43</i> - Capacità di regolazione limitata dallo stato di carica della batteria.....	85
<i>Figura 44</i> - Struttura logica di una colonnina di ricarica.....	86
<i>Figura 45</i> - Perdita della capacità in funzione del numero di cicli di carica/scarica.....	92

<i>Figura 46</i> - Andamento della tensione durante la carica CC-CV.....	97
<i>Figura 47</i> - Andamento della corrente durante la carica CC-CV.....	97
<i>Figura 48</i> - Andamento della tensione durante la carica CV-CC a durata limitata.....	97
<i>Figura 49</i> - Andamento della corrente durante la carica CV-CC a durata limitata.....	98
<i>Figura 50</i> - Richiesta di potenza della stazione di carica nel caso peggiore ipotizzato.....	99

<i>Figura 51</i> - Struttura logica di una stazione di carica.....	100
<i>Figura 52</i> - Possibili configurazioni per un caricabatterie.....	102
<i>Figura 53</i> - Gradimento all'installazione di impianti di cogenerazione nel proprio edificio.....	111
<i>Figura 54</i> - Flessibilità sull'utilizzo degli elettrodomestici.....	112

INDICE TABELLE

<i>Tabella 1</i> - Impatto sulla rete delle diverse tipologie di carica	45
<i>Tabella 2</i> - Dati utilizzati per la simulazione	49
<i>Tabella 3</i> - Elenco casi utilizzati per la simulazione	52
<i>Tabella 4</i> - Flusso di traffico di ogni singola area	59

<i>Tabella 5</i> - Richieste di potenza di carica dopo la prima suddivisione.....	60
<i>Tabella 6</i> - Richieste di potenza dopo l'ottimizzazione	61
<i>Tabella 7</i> - Numero di caricabatterie per stazione	61
<i>Tabella 8</i> - Risultati della simulazione	101