



Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie,  
l'Energia e lo Sviluppo Economico Sostenibile



*Ministero dello Sviluppo Economico*

## RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Convertitori commerciali per applicazioni automotive e studio di  
sistemi di carica rapida per veicoli elettrici

*A. Ometto, F. Parasiliti, L. Di Leonardo*



## CONVERTITORI COMMERCIALI PER APPLICAZIONI AUTOMOTIVE E STUDIO DI SISTEMI DI CARICA RAPIDA PER VEICOLI ELETTRICI

A. Ometto, F. Parasiliti, L. Di Leonardo (Dipartimento di Ingegneria Elettrica e dell'Informazione – Università di L'Aquila)

Settembre 2011

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

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

Progetto: Studio per lo sviluppo di materiali innovativi per il risparmio di energia nel settore elettrico con particolare attenzione ai materiali per i mezzi di trasporto collettivi: Nuovi materiali e componenti innovativi per i mezzi di trasporto

Responsabile Progetto: Giovanni Pede, ENEA

## Inquadramento Programmatico

Il Presente Report si inquadra nella Ricerca di Sistema Elettrico svolta dall'ENEA nell'ambito del relativo Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA.

La Ricerca di Sistema ha come obiettivo l'innovazione del Sistema Elettrico per migliorarne l'economicità, la sicurezza e la compatibilità ambientale, assicurando al Paese le condizioni per uno sviluppo sostenibile.

Per lo svolgimento delle attività di ricerca e sviluppo previste dal Piano Triennale della Ricerca di Sistema Elettrico il Ministero dello Sviluppo Economico ha stipulato Accordi di Programma con ENEA, CNR ed ERSE.

Le attività sono finanziate attraverso un fondo alimentato dalla componente A5 della tariffa di fornitura dell'energia elettrica, il cui ammontare viene stabilito dall'Autorità per l'Energia Elettrica e il Gas.

Nell'Accordo di Programma sono previsti temi di ricerca fondamentale e studi di carattere sistemico e prenormativo a totale beneficio dell'utente di sistema elettrico nazionale.

Le ricerche sono condotte dall'ENEA in collaborazione con le principali Istituzioni universitarie nazionali (oltre 28 Atenei e 65 diversi Dipartimenti coinvolti) e con le partecipate SOTACARBO e FN Nuove Tecnologie Avanzate. Nell'ambito dell'Accordo di Programma Triennale, l'ENEA ha terminato le attività terzo anno di attività.

L'accordo è meglio definito da un piano annuale di realizzazione, suddiviso in Attività. Ogni attività ha un contesto scientifico-programmatico di riferimento, suddiviso in aree e tematiche di ricerca, in ognuna delle quali sono definiti specifici progetti di ricerca, a loro volta suddivisi in obiettivi da perseguire.

Nel dettaglio, l'inquadramento programmatico completo del presente report è il seguente:

**Accordo di Programma MSE-ENEA:** Attività di ricerca e sviluppo di interesse generale per il sistema elettrico nazionale

**Piano Triennale 2006-2008**

**Piano annuale di realizzazione Terza annualità (2008-2009):** da realizzarsi tra l'ottobre 2010 ed il settembre 2011

**Attività:** Risparmio di energia elettrica nei mezzi di trasporto: nuovi materiali e componenti innovativi per i mezzi di trasporto

**Area di riferimento:** razionalizzazione e risparmio nell'uso dell'energia elettrica

**Tematica di ricerca:** risparmio di energia elettrica nei mezzi di trasporto elettrici

**Progetto 3.5:** studio per lo sviluppo di materiali innovativi per il risparmio di energia nel settore elettrico con particolare attenzione ai materiali per i mezzi di trasporto collettivi: nuovi materiali e componenti innovativi per i mezzi di trasporto

**Obiettivo C:** Adattamento di convertitori di piccola potenza ad alto rendimento all'uso nei veicoli elettrici leggeri, e sperimentazione di sistemi di ricarica rapida

## INTRODUZIONE

Il presente documento ha lo scopo di relazionare l'attività svolta dal Dipartimento di Ingegneria Elettrica e dell'Informazione dell'Università dell'Aquila nell'ambito dell'accordo di collaborazione con l'ENEA "Convertitori commerciali di piccola potenza ad alto rendimento per trazione elettrica".

L'attività s'inserisce in un progetto già avviato per la realizzazione di un veicolo a propulsione elettrica per la mobilità urbana, denominato Urb-E. Tale veicolo è attualmente di tipo ibrido e consiste fondamentalmente di un motore a combustione interna, generatore elettrico, motore di trazione elettrico e un pacco di supercondensatori per coprire i picchi di potenza del carico, sia positivi sia negativi, essendo prevista la frenatura elettrica a recupero. Scopo dell'attività è quello di rendere il veicolo "full electric", sostituendo il motore a combustione interna con un pacco batterie e un convertitore DC/DC di connessione tra le batterie stesse e il link in corrente continua. Per poter dimensionare il pacco batterie e il convertitore DC/DC è pertanto necessario conoscere i livelli di potenza richiesti e i valori delle tensioni del sistema in modo da non alterarne l'attuale funzionamento. A tale scopo si è reso necessario uno studio dell'intero sistema tramite la documentazione messa a disposizione dall'ENEA e la tesi di laurea specialistica in Ingegneria dei Sistemi Energetici (Laureando Riccardo Ruggieri; Relatore Prof. Ing. Michele Anatone dell'Università dell'Aquila). È per tale motivo che si riporta di seguito una breve descrizione dell'attuale configurazione del veicolo Urb-E e dei risultati riportati nella documentazione.

## ATTUALE CONFIGURAZION DEL VEICOLO URB-E

### Struttura tubolare e strutture meccaniche per la marcia

La struttura del veicolo è costituita da un telaio realizzato in tubi di ferro saldati, di diametro 30 mm, spessore 2 mm per la parte principale e tubi da 20 mm per le triangolazioni di irrigidimento. Si sono determinate con questo telaio misure di ingombro della vettura, che sono 2,70 in lunghezza per 1,40 m in larghezza.

Per la marcia sono necessarie le seguenti parti meccaniche: sospensioni anteriori e posteriori a parallelogramma deformabile realizzate da un triangolo oscillante superiore e uno inferiore, con molla elicoidale e ammortizzatore coassiale.

La struttura è infine completata da mozzi ruota, cerchi e pneumatici, volante, cremagliera e tiranti dello sterzo, pompa freno e freni a disco, sedili, cinture di sicurezza ed è stata compartimentata con lamiere in lega di alluminio.

### Sistema di trazione

Il sistema scelto è un ibrido serie, composto da:

- un gruppo motogeneratore (GU, Generator Unit), a sua volta composto da un motore termico primario (ICE, Internal Combustion Engine) e da un generatore elettrico (GE) connessi tramite una trasmissione a cinghia a rapporto costante;
- un sistema di accumulo a condensatori (UC, Ultra Capacitors);

- un azionamento elettrico per la trazione anteriore (TM, Traction Motor);
- un nodo di interconnessione elettrica dei sistemi (Link);
- vari convertitori elettrici;
- un sistema di gestione.

#### Motore termico primario – ICE

È stato utilizzato il noto e collaudato motore Piaggio monocilindrico Q.U.A.S.A.R. 250 cc che equipaggia i modelli Vespa GTV e GTS oltre che il Beverly, l'MP3 e il modello X7.

È un motore moderno, a 4 valvole, iniezione elettronica, omologato per motocicli secondo la normativa Euro 3.

I suoi principali dati tecnici sono riportati nella tabella seguente

| <b>Motore a combustione interna</b> |                                         |
|-------------------------------------|-----------------------------------------|
| <b>Tipo</b>                         | Accensione comandata – 4 tempi          |
| <b>Cilindrata</b>                   | Monocilindrico 244,3 cc                 |
| <b>Alesaggio</b>                    | 72 mm                                   |
| <b>Corsa</b>                        | 60 mm                                   |
| <b>Raffreddamento</b>               | A liquido                               |
| <b>Distribuzione</b>                | 4 valvole – monoalbero a camme in testa |
| <b>Potenza Max</b>                  | 16,2 kW (22 CV) a 8250 giri/min         |
| <b>Coppia Max</b>                   | 20,2 Nm @ 6500 giri/min                 |
| <b>Iniezione</b>                    | Elettronica                             |
| <b>Peso del motore</b>              | 36 Kg                                   |
| <b>Omologazione</b>                 | EURO 3 (motocicli)                      |
| <b>Catalizzatore</b>                | Trivalente                              |

#### Generatore elettrico – GE

Il generatore elettrico è una macchina brushless reversibile a magneti permanenti realizzata su specifiche. Le principali caratteristiche tecniche del GE sono riportate nella tabella seguente.

| <b>Generatore elettrico</b> |                               |
|-----------------------------|-------------------------------|
| <b>Tipo</b>                 | Sincrono a magneti permanenti |
| <b>Tensione RMS</b>         | 55 V                          |
| <b>Potenza</b>              | 5 kW                          |
| <b>Potenza</b>              | 8 kW                          |
| <b>Coppia</b>               | 20 Nm                         |
| <b>Regime</b>               | 5000 giri/min                 |
| <b>N° coppie polari</b>     | 3                             |
| <b>Tipo di magneti</b>      | Nd Fe B                       |
| <b>Raffreddamento</b>       | a liquido                     |
| <b>Peso</b>                 | 30 kg                         |

### Gruppo motogeneratore - GU

Si tratta di un generatore elettrico mosso dal motore termico. L'accoppiamento tra le due macchine è stato effettuato tramite il sistema a cinghia e pulegge, con rapporto di trasmissione costante 1 a 1. Si è scelta una trasmissione a cinghia invece che un accoppiamento diretto tramite un giunto poiché esso permette maggiore mobilità reciproca dei due gruppi, un ancoraggio più robusto dell'alternatore, una maggiore semplicità di manutenzione e un minore costo.

### Motore elettrico di trazione - TM

Come per l'alternatore anche il motore elettrico di trazione è stato realizzato su specifiche e si parla sempre di un motore brushless reversibile a magneti permanenti ed è rigidamente assemblato a un gruppo differenziale con riduzione finale 7 a 1 da cui partono i semiassi per le ruote motrici.

Le principali caratteristiche tecniche del TM sono riportate nella tabella seguente.

| <b>Motore elettrico di trazione</b> |                               |
|-------------------------------------|-------------------------------|
| <b>Tipo</b>                         | Sincrono a magneti permanenti |
| <b>Tensione RMS</b>                 | 55 V                          |
| <b>Potenza</b>                      | 8 kW                          |
| <b>Potenza massima</b>              | 16 kW per 5 minuti            |
| <b>Coppia nominale</b>              | 30 Nm                         |
| <b>Coppia Massima</b>               | 48 Nm                         |
| <b>Regime nominale</b>              | 4600 giri/min                 |
| <b>N° coppie polari</b>             | 4                             |
| <b>Tipo di magneti</b>              | Nd Fe B                       |
| <b>Raffreddamento</b>               | a liquido                     |
| <b>Peso</b>                         | 27 kg                         |

### Supercondensatori - UC

Per quanto riguarda i supercondensatori, sono stati scelti sul catalogo Maxwell: sono stati impiegati 4 moduli da 16 V e 500 F collegati in serie. Ogni modulo, pur essendo costituito al suo interno da 6 condensatori elementari, è rigidamente assemblato e scatolato in un contenitore in alluminio.

Le principali caratteristiche tecniche dei supercondensatori utilizzati sono riportate nelle tabelle seguenti.

| <b>Supercondensatori</b>          |                           |
|-----------------------------------|---------------------------|
| <b>Specifiche singolo modulo.</b> |                           |
| <b>Costruttore</b>                | Maxwell                   |
| <b>Modello</b>                    | BMOD0500 E016             |
| <b>Tensione</b>                   | 16,2 V (6 celle da 2,7 V) |
| <b>Capacità</b>                   | 500 F                     |
| <b>Energia spec.</b>              | 3,17 Wh/kg                |

| <b>Sistema completo (4 moduli in serie)</b> |            |
|---------------------------------------------|------------|
| <b>Tensione</b>                             | 64,8 V     |
| <b>Capacità</b>                             | 125 F      |
| <b>Energia</b>                              | 73 Wh      |
| <b>Potenza</b>                              | 124 kW     |
| <b>Volume</b>                               | 18,8 litri |
| <b>Peso</b>                                 | 23 kg      |

### Gruppi di conversione e loro elettronica di controllo

I tre principali componenti elettrici (alternatore, motore, supercondensatori) sono connessi al link in corrente continua tramite adeguati convertitori gestiti da una elettronica di controllo basata su processore DSP (Digital Signal Processing).

### Sistemi di raffreddamento

È stata necessaria l'introduzione di due circuiti separati di raffreddamento: uno per il motore termico e uno per le macchine elettriche e i convertitori.

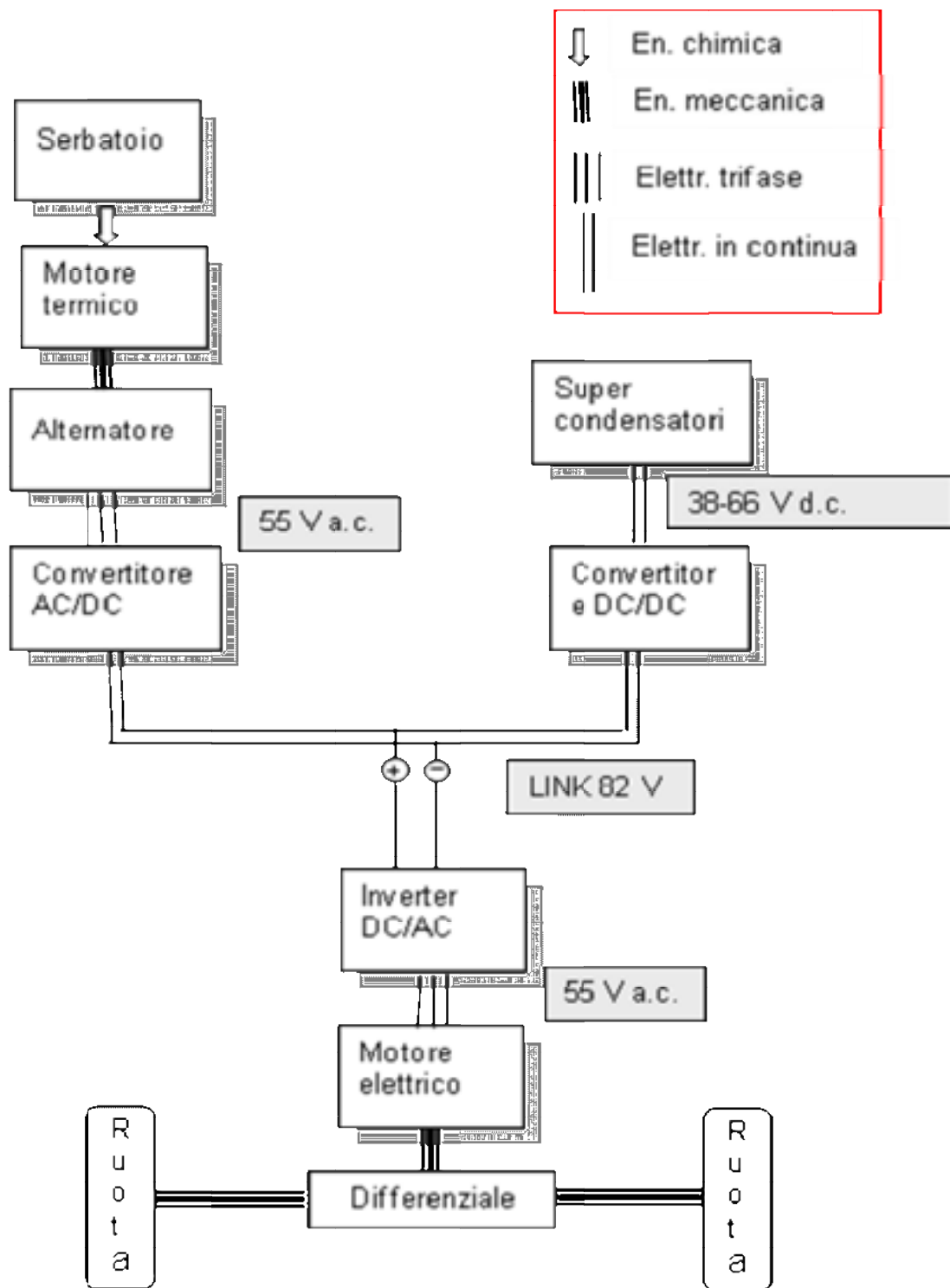
### Obiettivi e struttura dell'architettura elettrica

L'architettura del sistema elettrico è stata progettata in modo da realizzare:

- il controllo dell'alternatore sia in corrente sia in numero di giri;
- escursioni della tensione dei supercondensatori tali da sfruttare quasi al completo la loro capacità di accumulo;
- una tensione stabile al nodo di convergenza dei sistemi (link);
- il controllo in coppia del motore di trazione.

In aggiunta, il sistema permette la retromarcia e la frenatura elettrica a recupero.

Lo schema adottato è mostrato nella figura che segue.



### Controllore di alto livello

Il controllo ad alto livello è effettuato tramite un componente logico multifunzionale (centralina Prometheus) composto da un processore programmabile, un modulo di conversione D/A, una

scheda di alimentazione e una scheda CAN per la comunicazione delle informazioni tra i componenti e con l'unità di controllo.

Il programma di supervisione installato sul processore, al quale pervengono i dati di tutti i sensori, gli attuatori e i dispositivi presenti sulla vettura, ha fundamentalmente i seguenti compiti:

1. gestire il gruppo elettrogeno, determinando, in base alle condizioni di missione, la potenza da richiedere al gruppo stesso. Il controllo del GU avviene contemporaneamente sul motore a combustione interna mediante la farfalla motorizzata e sul generatore elettrico mediante la scelta della coppia resistente;
2. gestire il livello di stato di carica dei supercondensatori in modo che possano svolgere la loro funzione di filtro livellante delle richieste impulsive di potenza e che abbiano, all'occorrenza, la capacità di accumulare surplus di energia provenienti dalla frenatura a recupero;
3. individuare per ogni richiesta di potenza al gruppo GU le migliori condizioni di funzionamento del motore termico, sulla base della mappa di funzionamento dello stesso;
4. effettuare le opportune operazioni di filtraggio, in particolare per quanto riguarda i gradienti di salita della potenza richiesta al motore di trazione e al gruppo motogeneratore;
5. creare un cruscotto virtuale per la visualizzazione delle principali grandezze e per l'esecuzione di alcuni comandi tramite interruttori integrati nel software;
6. effettuare i controlli di sicurezza contro il superamento dei valori limite delle grandezze elettriche e meccaniche;
7. effettuare l'acquisizione delle grandezze misurate durante la missione.

## ANALISI DEI DATI E DIMENSIONAMENTO DEL PACCO BATTERIE E DEL CONVERTITORE

L'attività ha riguardato il dimensionamento di un pacco batterie e relativo convertitore che sostituisce il gruppo motogeneratore – GU, mantenendo gli altri componenti del veicolo inalterati. Si ricerca, inoltre, una componentistica che possa essere facilmente reperibile e che permetta di contenere i costi dell'intero veicolo.

A tal fine sono stati utilizzati i dati ottenuti tramite il modello dinamico a parametri concentrati del veicolo ibrido serie che è stato tarato sulla base della gran mole di dati sperimentali ottenuti nel funzionamento di Urb-E.

Di particolare interesse è la valutazione del flusso di potenza che dovrà gestire il nuovo convertitore da inserire nel veicolo e della quantità di energia che deve essere messa a disposizione dalle batterie.

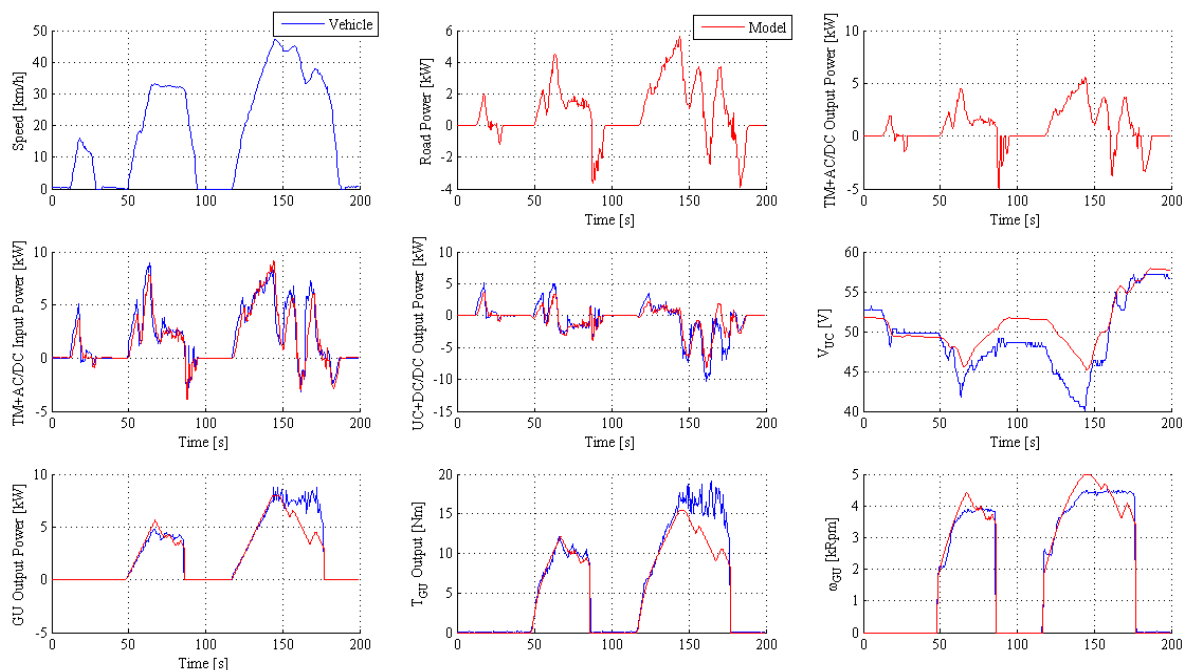
L'utilizzo del modello del sistema propulsivo della vettura ibrida Urb-e, costruito tramite la calibrazione e taratura dei dati incogniti o conosciuti con scarsa precisione, condotta mediante il confronto con le acquisizioni sperimentali, ha permesso il passaggio alla fase progettuale, potendo descrivere dettagliatamente le prestazioni di ogni singolo componente nell'esecuzione di cicli di

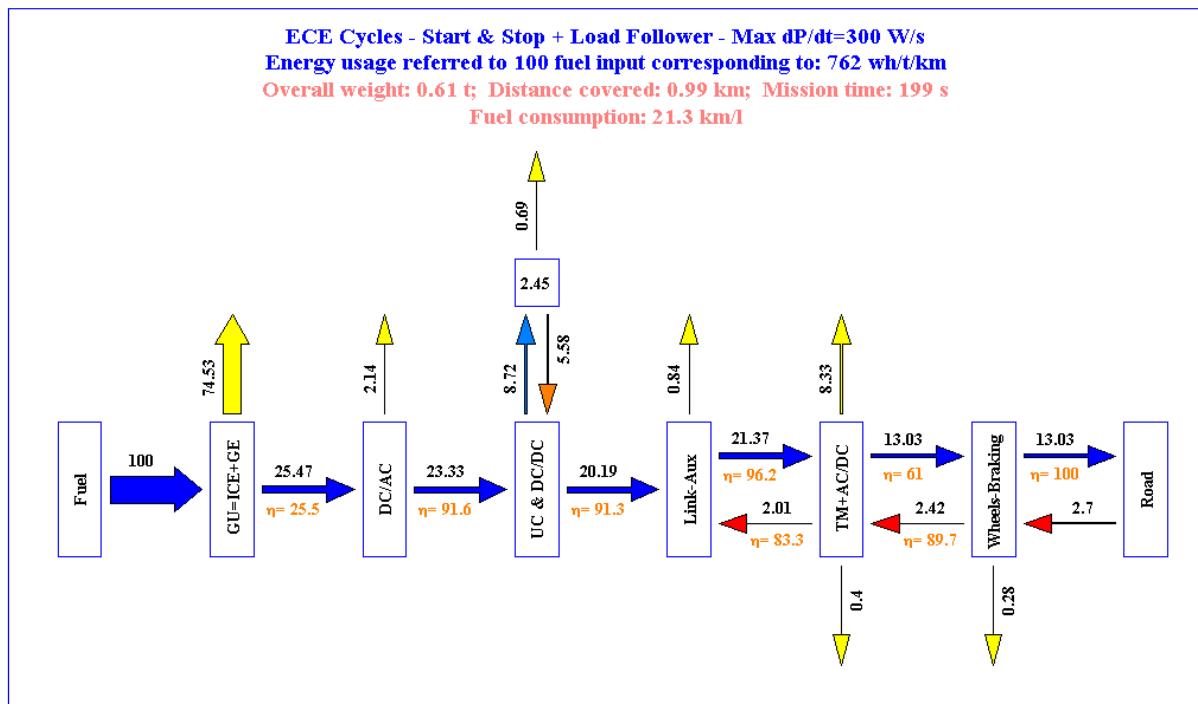
guida urbani. In tal modo è stato possibile sia effettuare il dimensionamento dei nuovi componenti, le batterie e il convertitore DC/DC, sia verificare la loro compatibilità con quelli non sostituiti.

A titolo esemplificativo, alcuni risultati sono schematicamente riportati nel seguito.

Un primo ciclo, detto “ECE Nuovi Punti”, cerca di imitare il ciclo ECE descritto dalla normativa relativa adottando la logica di controllo Load Following, in cui il GU insegue il profilo di potenza istantaneamente richiesto dalla strada. I limiti sul gradiente di potenza del gruppo GU (300 W/s) non permettono di inseguire i transitori di potenza richiesta; in tali condizioni sono i supercapacitori che permettono il bilancio delle potenze istantanee assorbendo o erogando la differenza tra la potenza generata e quella richiesta.

Nella figura sono riportati i carichi. In primo luogo si nota il profilo del ciclo. Negli altri due grafici della prima riga sono riportate la potenza motrice necessaria all’avanzamento (“Road Power [kW]”) e quella erogata dal motore elettrico (“TM+AC/DC Output Power [kW]”). Il primo grafico visibile nella seconda riga è quello della potenza elettrica lato DC dell’inverter di alimentazione del motore di trazione (“TM+AC/DC Input Power [kW]”). Dai grafici riportanti la potenza elettrica erogata dai supercapacitori (“UC+DC/DC Output Power [kW]”) e dal GU (“GU Output Power [kW]”) si evince una corrispondenza molto buona tra la simulazione e le misure, a testimonianza del fatto che viene calcolata correttamente la potenza elettrica necessaria per la trazione. Si evince, inoltre, che la strategia di controllo realizzata nel modello è adeguata a rappresentare quella realmente operante sulla centralina programmabile della vettura, controllando la giusta ripartizione di potenza tra il GU e i supercapacitori. Infine è riportato il diagramma temporale della coppia del GU (“T<sub>GU</sub> Output [Nm]”) e quello della velocità angolare dello stesso (“ $\omega_{GU}$  [krpm]”).





Relativamente al ciclo “ECE Nuovi Punti” sono stati utilizzati anche i valori energetici globali riferiti all’energia elettrica ceduta al motore di trazione, valutata in corrente continua prima dell’inverter, e quella erogata dal GU, calcolata in corrente alternata prima del convertitore AC/DC. I valori reali, calcolati per integrazione nel tempo dei profili di potenza istantanea riportati anche nei grafici, valgono:

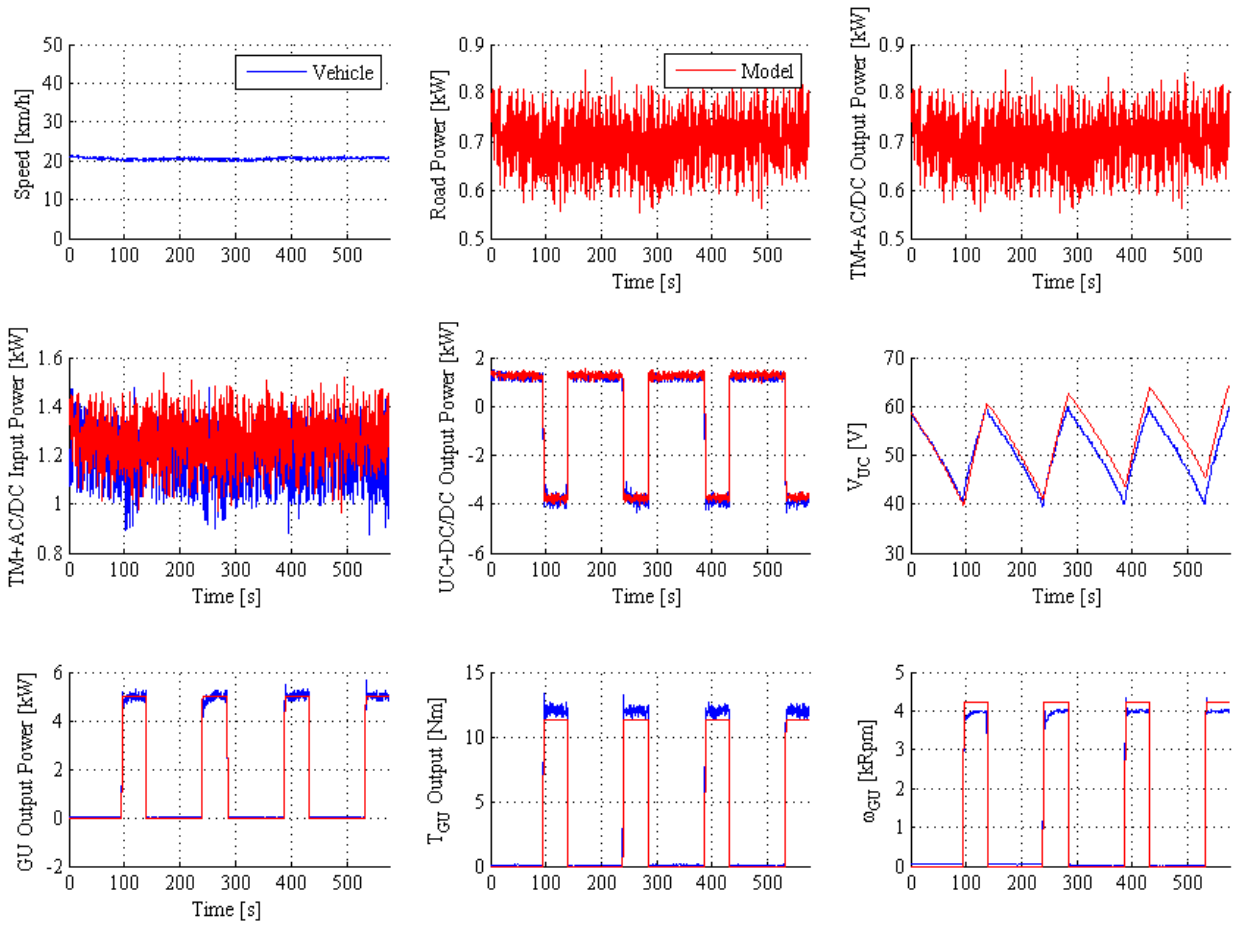
- ETM=406 Wh per l’energia elettrica ceduta al motore di trazione;
- EGU=502 Wh per l’energia elettrica erogata dal GU.

Quest’ultimo valore sarà preso in considerazione per il dimensionamento della componentistica che dovrà andare a sostituire il vecchio modulo GU.

I due cicli “Marathon” sono significativi di una particolare condizione di funzionamento della vettura, poiché percorsi a velocità costante, con pendenza nulla. È inoltre prevista una strategia di controllo che prevede lo spegnimento del motore nelle fasi di sosta, lasciando invece, in quelle attive, la logica del “Load Following”, denominata perciò “ON OFF + Load following”.

Anche per questo tipo di percorso sono state fatte delle analisi simili a quello precedente.

### Marathon 21 km/h - Start & Stop GU Power 5 kW - Max $dP/dt=3000$ W/s

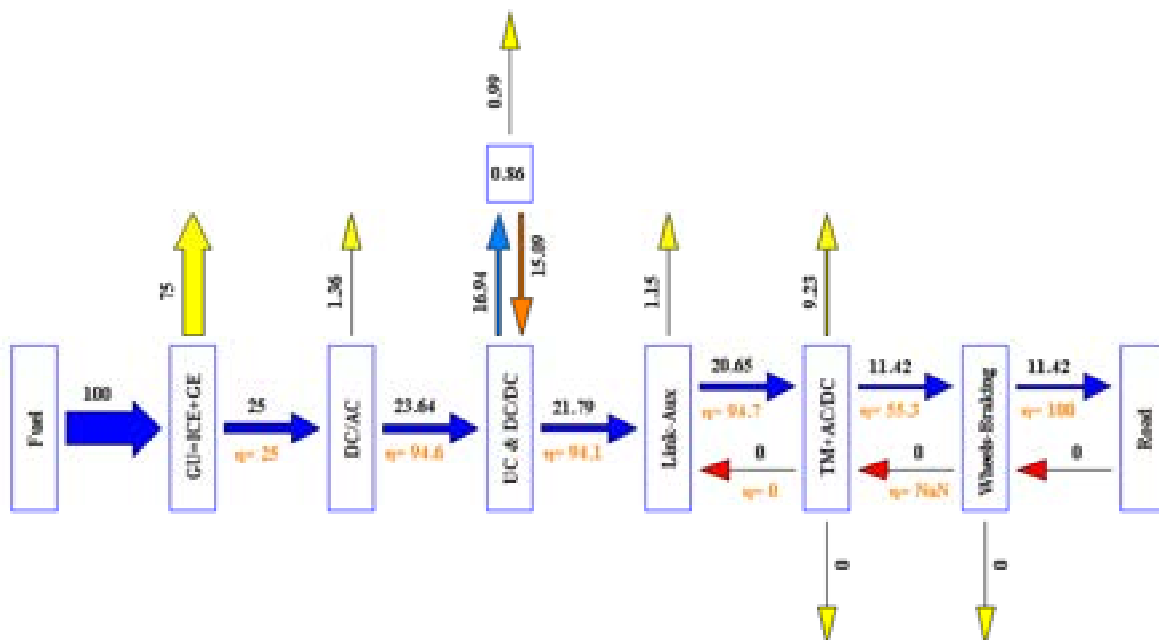


### Marathon 21 km/h - Start & Stop GU Power 5 kW - Max $dP/dt=3000$ W/s

Energy usage referred to 100 fuel input corresponding to: 487 wh/t/km

Overall weight: 0.61 t; Distance covered: 3.28 km; Mission time: 574 s

Fuel consumption: 31 km/l



Simulazioni analoghe sono state condotte con riferimento ai seguenti profili di guida:

- Ciclo “ECE Nuovi Punti Start & Stop + Load Follower”, effettuato al banco a rulli, in cui il profilo di guida è quello del ciclo “ECE Nuovi Punti” già esaminato, prevedendo però lo spegnimento del GU, eseguito manualmente da parte dell’operatore in sede di sperimentazione. Pertanto l’accensione del GU nella simulazione è direttamente impostata dai dati sperimentali relativi al motogeneratore. Nei periodi di accensione, inoltre, è impostata la logica di controllo del “Load Following” con limitazione del gradiente di potenza di 300 W/s.
- Ciclo “ECE Nuovi Punti S&S Auto + Load Follower”, che è sostanzialmente simile al precedente, essendo sempre costituito dal profilo del ciclo “ECE Nuovi Punti”. La differenza di tale simulazione consiste nel fatto che l’accensione e lo spegnimento del GU non sono direttamente desunti dai dati provenienti dalle misure, ma sono gestiti direttamente dal modello di calcolo seguendo la logica di controllo a termostato. Nei periodi di accensione, inoltre, è sempre impostato il “Load Following”, con un gradiente di potenza di 1000 W/s.
- Ciclo MODEM, effettuato al banco a rulli con logica di controllo “Load Following”, e limitazione di 300 W/s; è un ciclo urbano di riferimento meno diffuso del più conosciuto ECE.
- Ciclo “Calcio”, svolto su strada in un percorso ricavato all’interno del centro ricerche Casaccia che costeggia il campo di calcio, adottando il controllo ON OFF più “Load Following” e limitazione di 300 W/s.
- Ciclo OVAL, eseguito ricavando un tragitto ovale nel parcheggio del centro ricerche Casaccia, anch’esso con logica ON OFF più “Load Following”, ma con limitazione di 3000 W/s che rende la risposta del GU pressoché istantanea.
- Ciclo CAPANNA, anch’esso svolto su strada all’interno del centro ricerche Casaccia con la medesima logica di controllo e la stessa limitazione temporale adottata per il ciclo OVAL.

Per ognuno dei cicli è possibile calcolare la potenza media erogata dal GU come integrale della potenza istantanea erogata dal GU nell’intervallo di tempo necessario al veicolo per percorrere i vari cicli:

$$P_{m,GU} = \frac{1}{T} \int_0^T P_{GU}(t) dt$$

| <b>CICLO DI GUIDA</b>              | <b>POTENZA MEDIA GU kW</b> |
|------------------------------------|----------------------------|
| <b>ECE Nuovi Punti</b>             | 2,17                       |
| <b>ECE Nuovi Punti Start &amp;</b> | 2,01                       |
| <b>Calcio</b>                      | 2,24                       |
| <b>Capanna</b>                     | 2,64                       |
| <b>Marathon</b>                    | 1,53                       |
| <b>Oval</b>                        | 1,93                       |

Tali valori sono utili per il dimensionamento del convertitore ipotizzando che la differenza tra la potenza istantanea e quella media sia completamente gestita dai supercondensatori.

I dati riportati mostrano che, per mantenere un minimo margine di sicurezza, è possibile considerare 3 kW come potenza di dimensionamento dei nuovi componenti.

### **Pacco batterie**

Il dimensionamento del pacco batterie, dal punto di vista del livello di tensione, è strettamente legato alla tipologia del convertitore DC/DC che si utilizza. A tal riguardo si deve puntualizzare che il flusso di potenza del convertitore è unidirezionale ma la tensione del pacco batterie varia tra un valore minimo  $V_{B,min}$  e uno massimo  $V_{B,max}$ , mentre la tensione del bus in corrente continua deve rimanere costante (84 V). Si possono considerare tre situazioni per quanto riguarda le relazioni tra la tensione di ingresso e quella di uscita del convertitore DC/DC:

$$1) \quad V_{B,min} < V_{B,max} < 84 \text{ V}$$

$$2) \quad V_{B,min} < 84 \text{ V} < V_{B,max}$$

$$3) \quad 84 \text{ V} < V_{B,min} < V_{B,max}$$

Per ognuna delle tre situazioni è necessario utilizzare una specifica tipologia di convertitore DC/DC: al caso 1) corrisponde la tipologia boost, al 2) la tipologia buck-boost e al 3) la tipologia buck.

Senza dubbio il convertitore buck-boost è quello che permette una maggiore discrezionalità sul dimensionamento del pacco batterie ma è anche quello che, in teoria, è più complesso e, a parità di rendimento, più costoso. Ciò dipende dal fatto che l'energia è trasferita tramite un induttore di potenza che, a parità di fattore di qualità, è più costoso di un condensatore.

Il convertitore boost ha, in aggiunta a quello del buck-boost, lo svantaggio di funzionare con bassi rendimenti quando la differenza tra la tensione di uscita e quella d'ingresso è elevata, caso che si può verificare nell'applicazione specifica quando le batterie sono a fine scarica ( $V_{B,min}$ ).

In conclusione si può affermare che la migliore tipologia di convertitore sia quella buck, per l'uso della quale si deve assicurare che la tensione di ingresso sia sempre maggiore della tensione di uscita; nel caso specifico deve risultare:

$$V_{B,min} > 84 \text{ V}$$

Le batterie disponibili sono di tipologia al piombo 12 V/60 Ah che hanno una tensione di fine carica pari a circa 14 V e una tensione di fine scarica dell'ordine degli 8 V.

Per quanto detto, indicato con  $n$  il numero di batterie in serie, deve risultare:

$$n \geq \frac{84}{8}$$

Il numero minimo di batterie da prevedere in serie è pertanto pari a 11, al quale corrisponde l'intervallo di tensione:

$$88 \text{ V} < V_B < 154 \text{ V}$$

La capacità totale del pacco batterie risulta quindi essere pari a 8 kWh

### Convertitore DC/DC

È già stato visto che la potenza nominale del convertitore è di 3 kW.

Gli ulteriori principali vincoli, per quando riguarda la scelta del convertitore, sono dettati da:

- tensione di ingresso  $V_{IN}$  pari a quella del pacco batterie. Per quanto detto a proposito del pacco batterie, il convertitore deve essere in grado di funzionare con una tensione di ingresso variabile tra 88 e 154 V. In effetti i 154 V si hanno soltanto durante la fase finale di carica delle batterie, in cui il convertitore non è in funzione. L'effettivo intervallo della tensione di ingresso durante il funzionamento del convertitore è:

$$88 \text{ V} < V_B < 132 \text{ V},$$

essendo l'estremo superiore relativo alla tensione nominale del pacco batterie ( $12 \text{ V} \times 11$ ).

- tensione in uscita  $V_{OUT}$  che è quella del link (84 V costante).

Al momento, dopo una attenta indagine, è stato trovato un solo convertitore con caratteristiche tali da poter essere utilizzato nella specifica applicazione. Il convertitore in oggetto, i cui valori di targa sono riportati in tabella, è costruito e commercializzato dalla Zahn Electronics Inc.

| Tensione di ingresso<br>V | Tensione di uscita<br>V | Corrente di uscita continuativa<br>A | Valore di picco della corrente di uscita<br>A | Potenza di uscita (@ $V_{out} = 90\text{V}$ )<br>W | Frequenza di commutazione<br>kHz | MODELLO           | Prezzo, incluso filtro LC (per 1 conv.)<br>\$ |
|---------------------------|-------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------|-------------------|-----------------------------------------------|
| 80 ÷ 160                  | 0 ÷ 155                 | +/-45                                | +/-80                                         | 4050                                               | 31,250                           | CH20045-S, LC225s | 2.304                                         |

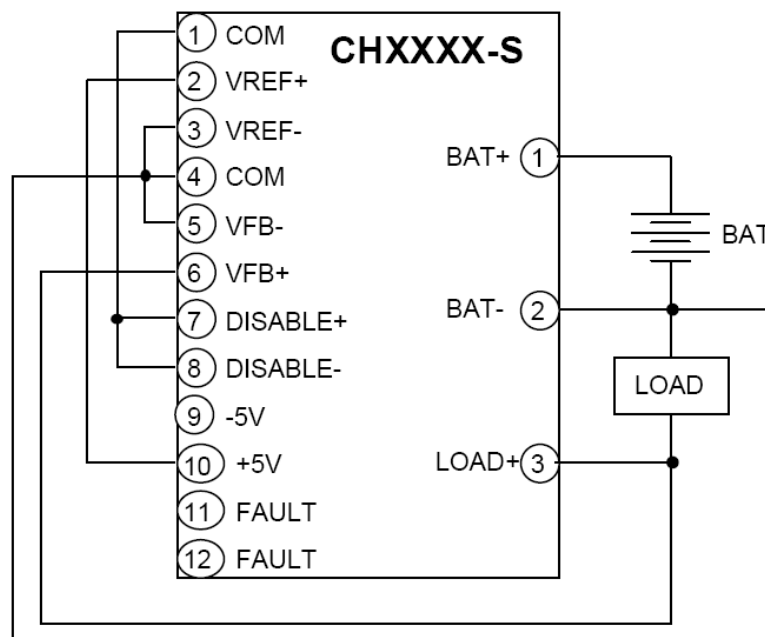
Si può notare che i valori della minima e della massima tensione del pacco batterie sono interni all'intervallo della tensione di ingresso nominale del convertitore. Dato il valore massimo della tensione di ingresso di 160 V, è possibile anche aumentare il numero delle batterie in serie al fine di

aumentare l'autonomia del veicolo. La tensione di uscita può essere scelta in un intervallo che comprende la tensione di 84 V del link ed è controllata con controreazione dal convertitore stesso.

Per quanto riguarda la potenza nominale, il convertitore risulta essere sovradimensionato, ma non così come potrebbe sembrare. La potenza di uscita è infatti data alla tensione di 90 V ed è calcolata come prodotto tra 90 V e 45 A (corrente nominale di uscita continuativa). Nel caso specifico, essendo la tensione di uscita di 84 V, la potenza nominale scende da 4050 W a 3780 W e il convertitore è sovradimensionato in potenza del 20,6%, valore sicuramente accettabile, considerando che è un prodotto commerciale.

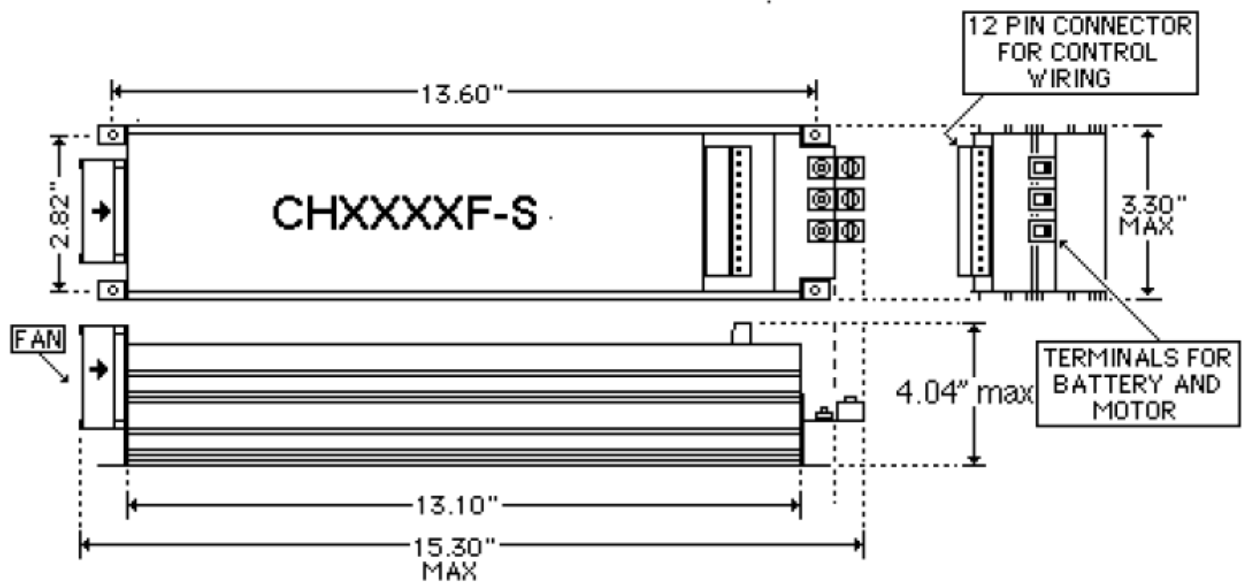
Il CH20045-S, LC225s è un convertitore compatto 2 quadranti ad alte prestazioni, di tipologia buck realizzato con un semiponte H a MOSFET di potenza. Generalmente richiede un filtro di uscita LC esterno. La dinamica è elevata, data l'elevata frequenza di commutazione di 31,250 kHz. Comprende, inoltre, sensori di corrente a effetto Hall per il possibile controllo della corrente di uscita ed è protetto da sovratemperatura, riducendo in automatico la corrente erogata nel caso in cui la temperatura ambiente sia così elevata da non permettere un adeguato raffreddamento.

Di seguito è riportato lo schema del sistema per quanto riguarda le connessioni con il carico, con le batterie e i collegamenti per i segnali di controllo.



Sono infine riportate le dimensioni di ingombro del convertitore e le relative foto

ALL TOLERANCES ARE  $\pm .020$  " EXCEPT MAX DIMENSIONS.





Poiché la Zahn Electronics Inc non ha una rete di distribuzione in Italia, il convertitore è stato ordinato direttamente alla casa madre; ciò ha inevitabilmente dilatato i tempi di acquisto e, al momento, non è ancora stato possibile effettuare delle prove.

## SISTEMI DI CARICA PER VEICOLI ELETTRICI

In attesa del convertitore e di comune accordo con l'Enea l'attività è proseguita sulla carica rapida delle batterie, in modo particolare sui sistemi che permettono tale tipo di ricarica. Dal punto di vista delle batterie il problema è stato affrontato direttamente dai tecnici dell'Enea. Questa attività trae spunto dalle seguenti considerazioni. Attualmente la parziale sostituzione dei veicoli con motori a combustione interna avviene sostanzialmente con veicoli ibridi; le quote di mercato dei veicoli ibridi sono, in effetti, in continua crescita. Lo scopo dei veicoli ibridi è di aumentare l'efficienza e ridurre le emissioni di sostanze inquinanti; ciò è ottenuto facendo funzionare il motore a combustione interna quanto più possibile nella zona di massimo rendimento nel piano velocità-coppia e utilizzando, per quanto possibile, la frenatura elettrica rigenerativa. È però opinione diffusa che a lungo termine le quote di mercato della propulsione ibrida diminuiranno e i veicoli tradizionali saranno sostituiti sempre più con veicoli elettrici.

L'inversione di tendenza, per quanto riguarda i veicoli ibridi, dovrebbe avvenire già nel 2020, anno in cui si prevede il picco di estrazione del petrolio (fig. 1). Mentre la quota di mercato dei veicoli elettrici dovrebbe attestarsi al 20% nel 2040. Tale valore si riferisce ai soli veicoli che vengono "riforniti" tramite energia elettrica, che può essere accumulata all'interno in forma elettrochimica, batterie, o in altre forme. Di fatto si può pensare a un veicolo ibrido serie in cui il gruppo motore a combustione interna – generatore elettrico è sostituito con un sistema di accumulo di energia elettrica.

Ovviamente, al parco di veicoli elettrici dovrà corrispondere un sistema, o meglio più sistemi, di "rifornimento" per tali veicoli. È dato attualmente per scontato che l'utente possa caricare le batterie di bordo tramite il suo impianto elettrico residenziale, ad esempio, durante la notte.

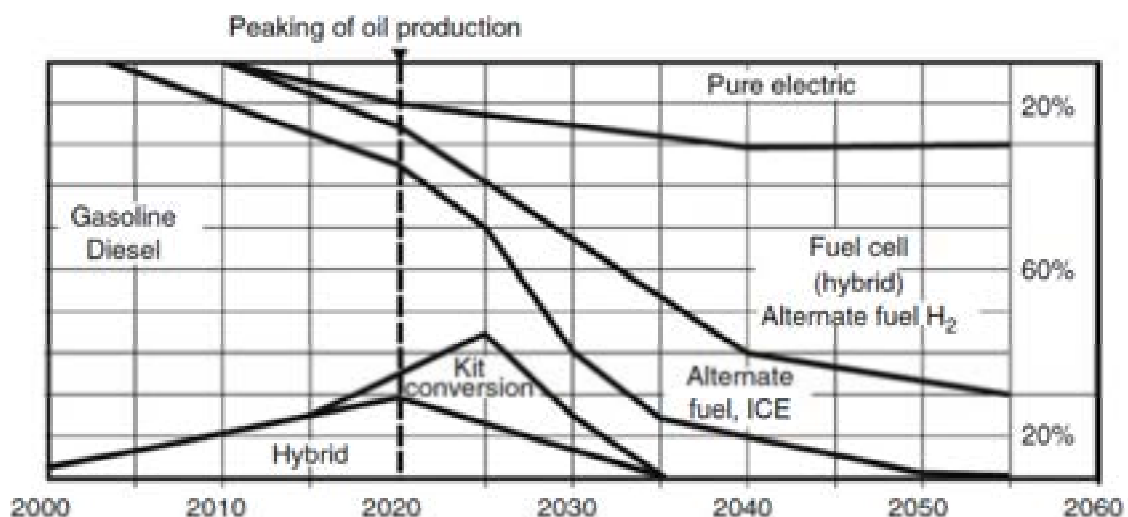


Fig. 1 – Previsione delle quote di mercato dei veicoli in base al sistema di propulsione.

## **NECESSITÀ DELLA CARICA ULTRARAPIDA**

Se si punta a un uso esteso e non solo cittadino dei veicoli elettrici è senza dubbio necessario prevedere delle postazioni di rifornimento dislocate sul territorio, nelle quali l'utente possa caricare le batterie di bordo con tempi piuttosto contenuti. In effetti, pur non essendo ancora molto diffuse, si trovano colonnine di rifornimento in diverse città e si prevede, ad esempio, di installare circa 300 nuove colonnine a Milano e Brescia entro il 2011.

In alternativa si ipotizza direttamente il cambio del pacco batterie dell'autoveicolo, ad esempio la Renault propone un sistema automatizzato del cambio del pacco batterie, chiamato QuickDrop, che permette di effettuare l'operazione in circa tre minuti e che sarà utilizzato sui veicoli elettrici di prossima commercializzazione. Ovviamente è possibile anche ricaricare il pacco batterie tramite l'impianto elettrico residenziale impiegando circa otto ore. Questo sistema presenta alcuni aspetti critici. In particolare necessita una standardizzazione molto spinta del pacco batterie, sia dal punto di vista delle dimensioni sia per quanto riguarda la tensione nominale e la capacità.

Sulla base delle precedenti considerazioni è inevitabile dover prevedere un sistema che permetta la carica del pacco batterie in tempi notevolmente inferiori rispetto a quelli che si possono ottenere con un impianto elettrico residenziale monofase e che sia in grado di caricare diversi tipi di batterie.

Si faccia riferimento a un veicolo medio-piccolo E Mini (basato sulla piattaforma Mini Cooper) che ha le seguenti caratteristiche: tensione della batteria 380 V, capacità massima  $C = 35$  kWh, autonomia di circa 240 km. Poiché il tempo indicato di ricarica è inferiore a 3 h, in tale fase la batteria assorbe circa 12 kW ovvero la carica è effettuata a circa  $C/3$ . In genere con il termine carica rapida si intende un tempo di 1 h e quindi una carica a  $C$ . In questo caso la potenza di carica è quindi pari a 35 kW.

Non è però pensabile che, per lunghi tragitti, si debba sostare un'ora dopo aver percorso 240 km, o meglio, non molti automobilisti sono disposti a passare al veicolo elettrico a queste condizioni. I tempi di attesa dovrebbero essere confrontabili con quelli attualmente necessari per il rifornimento di carburante, ovvero la carica del pacco batterie dovrebbe essere effettuata almeno a  $3C$  in circa 20 minuti, in questo caso si parla di carica ultrarapida.

## **IMPIANTI DI CARICA ULTRARAPIDA**

Nel caso preso ad esempio della E Mini, la carica ultrarapida corrisponde a una potenza in fase di carica di circa 100 kW. Se si considerano anche mezzi pesanti e un impianto con un numero congruo di colonnine si raggiungono facilmente potenze dell'ordine del MW e superiori. Ciononostante, data l'aleatorietà del numero di veicoli in ricarica, la potenza media potrebbe risultare notevolmente inferiore e quella istantanea potrebbe essere nulla.

La carica ultrarapida comporta, in effetti, diversi problemi che riguardano sia il sistema di carica sia la rete di alimentazione dell'impianto stesso.

In teoria un sistema per la carica di batterie di veicoli elettrici può essere di diversi tipi, ma le scelte principali sono sostanzialmente due. La prima riguarda la collocazione del convertitore, ovvero se è opportuno metterlo a bordo del veicolo o fisso, all'interno della colonnina di carica. Il secondo aspetto riguarda il tipo di conversione finale, direttamente AC/DC o DC/DC con precedente conversione AC/DC.

In ogni caso, data la potenza e la variabilità del carico, l'impianto deve essere alimentato in MT tramite un trasformatore da 1,6 o 2 MVA che, per quanto detto, potrebbe funzionare molte ore a basso carico e quindi in modo non ottimale dal punto di vista dell'efficienza. Il costo di installazione dell'intero impianto risulta inoltre essere elevato perché dipende dalla potenza di picco e non dalla potenza media.

### Collocazione del convertitore

Attualmente il convertitore AC/DC è in pratica sempre alloggiato a bordo del veicolo ed è alimentato in monofase alla tensione di rete. Ciò è possibile in quanto, in tal caso, la potenza che esso deve gestire è limitata a qualche kW e pertanto il peso e l'ingombro sono piuttosto contenuti. Un caricabatteria commerciale da 3 kW, ad esempio, ha un peso di 2,3 kg e un volume di circa 1,7 dm<sup>3</sup> (fig. 2). In generale, però, l'utilizzo di un sistema di carica fisso presenta due vantaggi: il primo riguarda il contenimento del peso del veicolo, perseguendo la filosofia che tutto quanto non è indispensabile per la corretta funzionalità del sistema è da considerare un peso superfluo. Il secondo riguarda l'efficienza della conversione dell'energia. È, infatti, più economico e più semplice, da un punto di vista tecnologico, ottenere elevati rendimenti con convertitori fissi rispetto a quelli di bordo che devono necessariamente rispettare rigorosi vincoli di peso e di ingombro.



Fig. 2 – Esempio di caricabatteria commerciale da 3 kW installato a bordo del veicolo.

In particolare, per quanto riguarda il sistema di carica ultrarapida, è necessario un convertitore controllato AC/DC di potenza adeguata, ovvero di potenza non inferiore a 100 kW, senza escludere potenze di 150 o 200 kW. Per problemi relativi al fattore di potenza e al THD delle correnti assorbite, tale convertitore deve necessariamente essere a commutazione forzata con PFC (Power Factor Corrector) e dato l'ingombro e il peso non può essere montato a bordo del veicolo. A riguardo è opportuno precisare che si sta valutando la possibilità di utilizzare, per la carica delle batterie, l'elettronica di potenza già presente a bordo per il normale funzionamento del veicolo. In effetti a bordo è presente l'inverter trifase che alimenta il motore elettrico trifase di trazione ed esso può funzionare da convertitore AC/DC in fase di carica delle batterie. È necessario valutare orientativamente quale è il tempo di carica se si utilizza questa tecnica. Molti veicoli elettrici di

piccola-media taglia sono equipaggiati con motore asincrono di potenza continuativa pari a 30 kW e potenza di picco di 60 kW. La minima potenza continuativa dell'inverter, considerando il fattore di potenza e il rendimento del motore, è di circa 40 kVA, che in fase di carica corrispondono a 40 kW in presenza di PFC. Ammettendo anche una potenza superiore del 20% (circa 50 kW), se si vuole utilizzare il convertitore di bordo anche per la carica ultrarapida, è pertanto necessario sovradimensionarlo, rispetto alla potenza di trazione, circa del 100%. Un'ulteriore considerazione riguarda il fatto che il convertitore a bordo deve essere "universale", nel senso che deve poter funzionare con diversi livelli di tensione alternata e a diverse frequenze industriali. In particolare il funzionamento con diversi livelli di tensione non permette di ottimizzare l'efficienza del convertitore e può determinare una diminuzione della potenza nominale per bassi valori della tensione di alimentazione. Sulla base di queste considerazioni si può quindi concludere affermando che il convertitore deve essere a terra.

In questo caso, poiché il convertitore è controllato in tensione e/o in corrente a seconda del tipo di batteria e del suo stato di carica, il sistema deve necessariamente comprendere uno scambio di informazioni tra il BMS (Battery Management System) di bordo e la colonnina di carica. Ciò non aumenta però la complessità del sistema in quanto lo scambio di informazioni tra veicolo e posto di carica è già presente in molti sistemi per permettere il riconoscimento del veicolo ai fini della fatturazione dell'energia utilizzata per la carica.

### Tipo di conversione finale

Le possibili configurazioni di principio di una "stazione di rifornimento elettrica" con conversione finale a terra sono riportate nelle figure 3 e 4 (a seconda del tipo di conversione finale), in cui i diversi convertitori sono alloggiati nelle colonnine di carica.

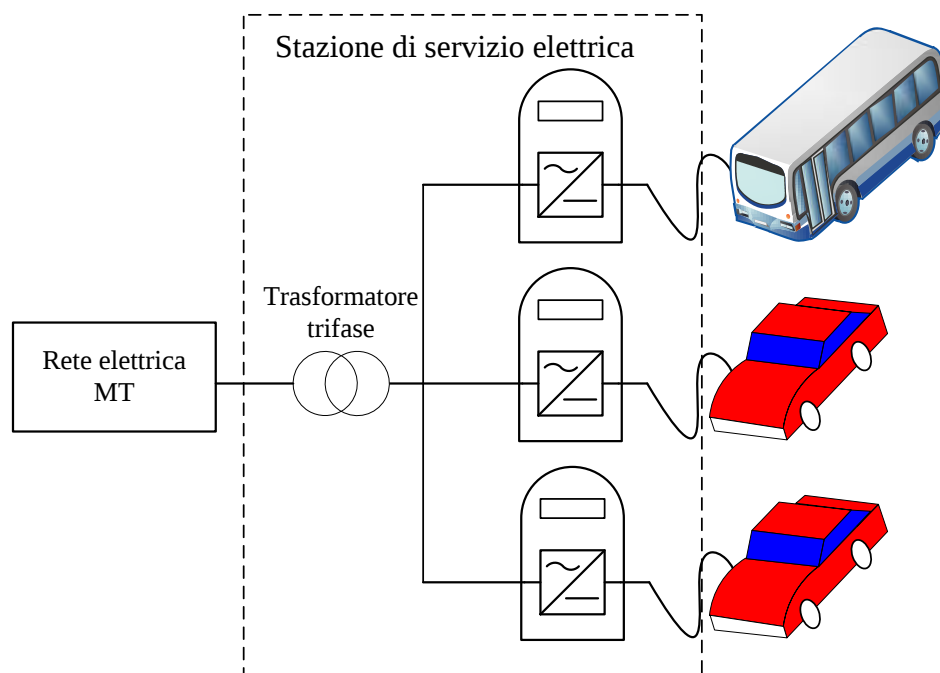


Fig. 3 – Schema di principio della stazione di servizio elettrica con convertitori AC/DC nelle colonnine di carica.

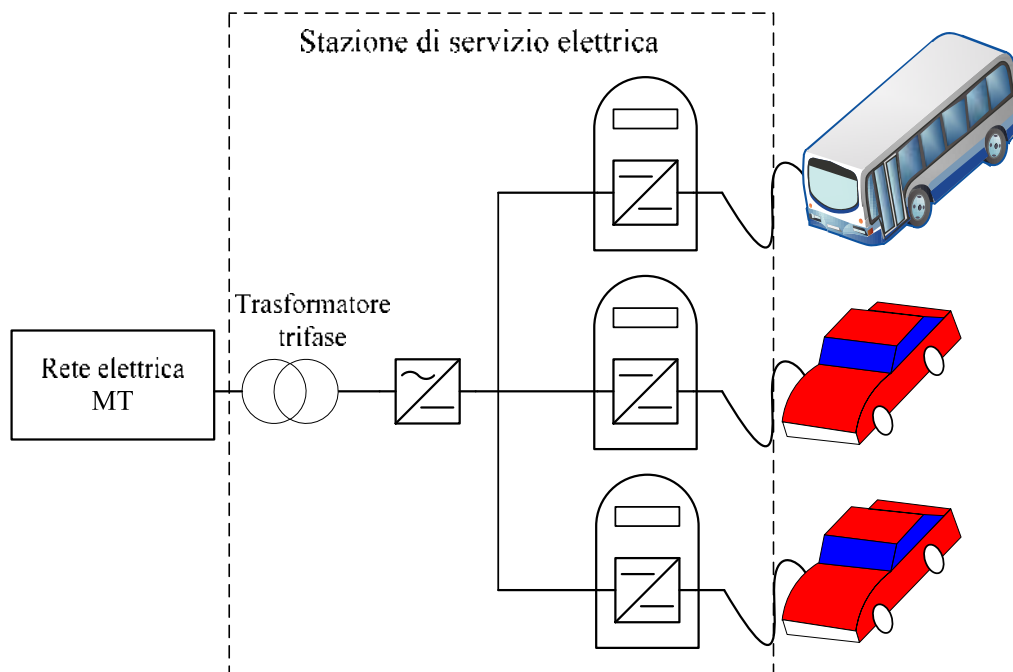


Fig. 4 – Schema di principio della stazione di servizio elettrica con convertitori DC/DC nelle colonnine di carica e conversione AC/DC globale.

Entrambi i sistemi sono in grado di soddisfare le richieste dei diversi tipi di veicoli per quanto riguarda il livello di tensione delle batterie. Considerando inoltre la presenza dei PFC nella conversione AC/DC, idealmente non generano inquinamento armonico sulla rete di alimentazione.

In termini funzionali i due sistemi sono pertanto equivalenti ma si differenziano dal punto di vista dell'efficienza energetica; il sistema con una sola conversione dell'energia è infatti più efficiente e pertanto da preferire.

Rimangono tuttavia irrisolti i problemi legati alla elevata potenza di picco rispetto al possibile basso valore della potenza istantanea e di quella media. A tal riguardo è bene considerare che i problemi diventano sempre più importanti al crescere del numero delle colonnine di carica, che dipende dalla quantità di veicoli che devono essere serviti nell'unità di tempo. Ipotizzando la carica ultrarapida di 20 minuti, per servire trenta veicoli per ora sono necessarie dieci colonnine.

### Stazione di servizio elettrica con accumulo di energia

I problemi legati alla elevata variabilità del carico possono essere risolti con un sistema di accumulo di energia elettrica tramite batterie fisse. In tal caso è possibile caricare le batterie dei veicoli utilizzando contemporaneamente la rete elettrica e le batterie fisse o esclusivamente quest'ultime, nel caso di mancanza temporanea della rete.

Il vantaggio che si ottiene con tale sistema, oltre a quello legato alla continuità del servizio, riguarda principalmente la rete. Il sistema di accumulo dell'energia permette, infatti, di limitare

notevolmente la potenza di corto circuito della rete nel punto di consegna, con un vantaggio economico da parte del gestore della rete stessa.

Ovviamente la soluzione che meglio si adatta allo scopo è quella con conversione finale DC/DC della figura 4 che, considerando il sistema di accumulo, si modifica come riportato nella figura 5.

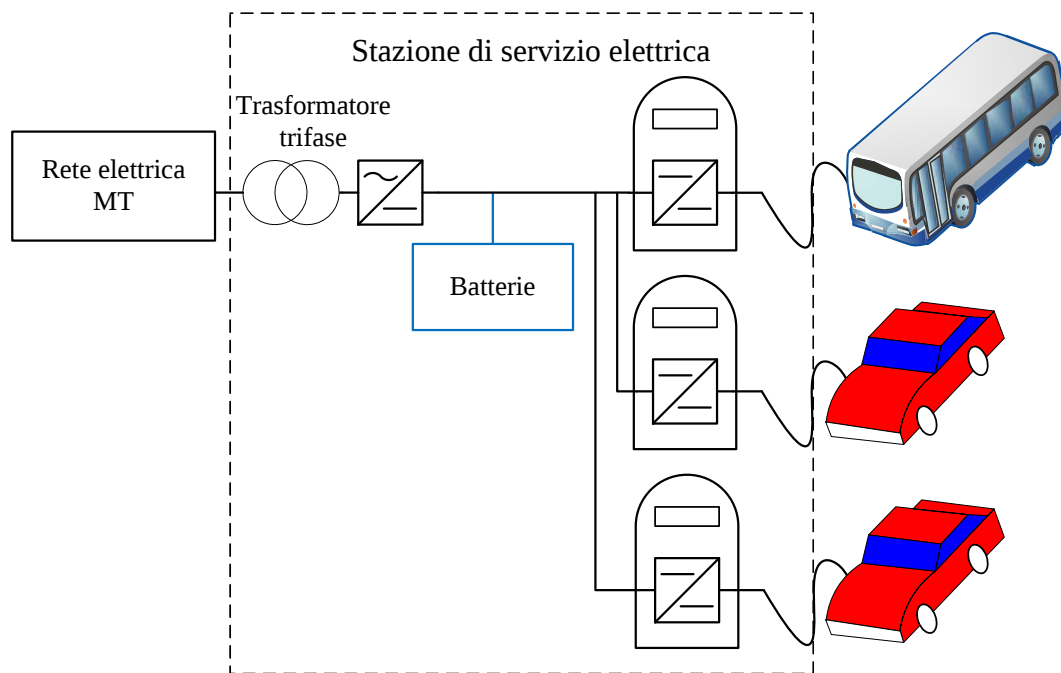


Fig. 5 – Schema di principio di stazione di servizio elettrica con accumulo di energia

Dal punto di vista dell'impianto si ottiene il vantaggio di poter notevolmente diminuire la potenza nominale del trasformatore e del convertitore AC/DC. La potenza nominale di queste due macchine è, infatti, ora inferiore a quella di picco e il suo valore dipende dalla capacità delle batterie fisse e dal diagramma temporale del carico. In ogni caso la scelta del valore ottimale, che ha come limite inferiore la potenza media, deve necessariamente basarsi su un'analisi tecnica ed economica.

Ulteriori vantaggi tecnici si ottengono se si impiega un convertitore AC/DC reversibile e si aumenta la capacità delle batterie fisse (fig. 6).

Potendo erogare potenza in rete, è possibile contribuire a coprire i picchi di carico giornalieri, ricaricando poi le batterie fisse durante le ore di basso carico della rete, come, ad esempio, le ore notturne. Ovviamente, da un punto di vista prettamente energetico, è necessario considerare il rendimento del ciclo di carica e scarica delle batterie, è innegabile, però il vantaggio dovuto al fatto di poter contare su riserve di energia elettrica distribuite sul territorio. Non è da escludere inoltre l'impiego di altri sistemi di accumulo dell'energia, se più efficienti delle batterie, tipo volani ultraveloci con motore-generatore elettrico o serbatoi di idrogeno con celle a combustibile.

In aggiunta ai vantaggi illustrati, raggiungibili in tempi relativamente brevi, è possibile prevederne un altro se, come è opinione comune, nel futuro si passerà da un sistema centralizzato a un sistema distribuito di produzione dell'energia elettrica, con microproduzione da fonti rinnovabili. In tal caso il sistema di accumulo della stazione di servizio elettrica può essere parte integrante e fondamentale di reti di piccola potenza; esso può funzionare da collettore locale di energia elettrica nelle ore in cui la produzione sia in esubero rispetto ai carichi, per poi metterla a disposizione per coprire i picchi di carico. Ciò permetterebbe inoltre di ridurre la distanza di trasmissione dell'energia elettrica e le relative perdite negli elettrodotti.

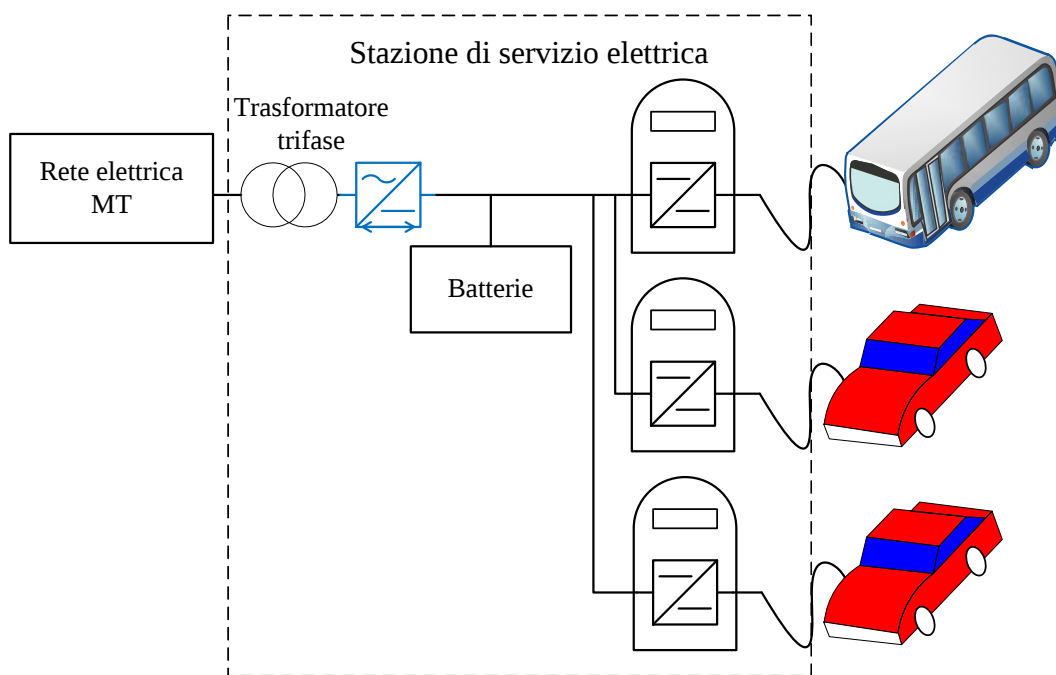


Fig. 6 – Schema di principio di stazione di servizio elettrica con accumulo di energia e convertitore bidirezionale

In conclusione, risulta evidente che le soluzioni tecniche con convertitori fissi analizzate sono tutte valide per effettuare la carica ultrarapida delle batterie di veicoli elettrici. Esse si differenziano notevolmente per quanto riguarda invece l'interazione con la rete di distribuzione dell'energia elettrica. In particolare possono rappresentare un carico elettrico difficile da gestire, un buon carico elettrico (elevato fattore di potenza e limitati picchi di potenza) e, nella migliore delle ipotesi, possono anche essere di aiuto alla rete stessa per la gestione ottimale di richieste di picchi di potenza da parte di altri utenti. La scelta del tipo di impianto dipende da diversi fattori e non può prescindere da un'analisi costi-benefici, in modo particolare per quanto riguarda la presenza di un sistema di accumulo di energia nell'impianto fisso e la sua capacità.

Nella tabella I sono riportate le caratteristiche degli impianti analizzati, compreso quello con caricabatteria a bordo, mettendo in evidenza vantaggi e svantaggi di ogni singolo impianto.

Tab. I – Vantaggi e svantaggi dei sistemi di carica analizzati.

| <b>Convertitore a bordo</b>      |                                                                                                                                         |                                                                                  |
|----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Convertitore dedicato</b>     |                                                                                                                                         |                                                                                  |
| <b>Potenza di carica</b>         | <b>Vantaggi</b>                                                                                                                         | <b>Svantaggi</b>                                                                 |
| C/8                              | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Basso costo d'impianto</li> <li>• Alta efficienza</li> <li>• Alimentazione monofase</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tempi di carica molto lunghi</li> </ul> |
| <b>Convertitore rimodulabile</b> |                                                                                                                                         |                                                                                  |
| <b>Potenza di carica</b>         | <b>Vantaggi</b>                                                                                                                         | <b>Svantaggi</b>                                                                 |
| < C                              | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Basso costo d'impianto</li> <li>• Alta efficienza</li> </ul>                                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tempi di carica lunghi</li> </ul>       |

| <b>Convertitore fisso</b>                                                          |                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                |
|------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Conversione finale AC/DC</b>                                                    |                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                |
| <b>Potenza di carica</b>                                                           | <b>Vantaggi</b>                                                                                                                                     | <b>Svantaggi</b>                                                                                                                                                                               |
| 3C                                                                                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Alta efficienza</li> <li>• Carica ultrarapida</li> </ul>                                                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Problemi per la rete e per l'impianto dovuti alla variabilità del carico</li> <li>• Elevato costo d'impianto</li> </ul>                               |
| <b>Conversione finale DC/DC</b>                                                    |                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                |
| <b>Potenza di carica</b>                                                           | <b>Vantaggi</b>                                                                                                                                     | <b>Svantaggi</b>                                                                                                                                                                               |
| 3C                                                                                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Carica ultrarapida</li> </ul>                                                                              | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Problemi per la rete e per l'impianto dovuti alla variabilità del carico</li> <li>• Doppia conversione</li> <li>• Elevato costo d'impianto</li> </ul> |
| <b>Conversione finale DC/DC con accumulo fisso</b>                                 |                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                |
| <b>Potenza di carica</b>                                                           | <b>Vantaggi</b>                                                                                                                                     | <b>Svantaggi</b>                                                                                                                                                                               |
| 3C                                                                                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Carica ultrarapida</li> </ul>                                                                              | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Doppia conversione</li> <li>• Elevato costo d'impianto</li> </ul>                                                                                     |
| <b>Conversione finale DC/DC con accumulo fisso e conversione AC/DC reversibile</b> |                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                                                |
| <b>Potenza di carica</b>                                                           | <b>Vantaggi</b>                                                                                                                                     | <b>Svantaggi</b>                                                                                                                                                                               |
| 3C                                                                                 | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Carica ultrarapida</li> <li>• “Aiuto” per la rete</li> <li>• Ideale per generazione distribuita</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Doppia conversione</li> <li>• Elevato costo d'impianto</li> </ul>                                                                                     |