



Agenzia nazionale per le nuove tecnologie,
l'energia e lo sviluppo economico sostenibile



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Studio di massima di una stazione di ricarica rapida
per linea di trasporto pubblico urbano

Giovanni Pede, Ennio Rossi, Carlo Villante

Report RdS/2012/092

STUDIO DI UNA STAZIONE DI RICARICA RAPIDA PER LINEA DI TRASPORTO PUBBLICO URBANO

Giovanni Pede, Ennio Rossi, Carlo Villante (ENEA)

Settembre 2012

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Area: Razionalizzazione e risparmio nell'uso dell'energia

Progetto: Nuovi materiali e componenti innovativi per i mezzi di trasporto

Responsabile del Progetto: Giuseppe Barbieri, ENEA

Indice

Sommario	4
PARTE PRIMA	5
1 Introduzione	5
1.1 <i>La rapida evoluzione tecnologica nel settore della ricarica</i>	6
2 Stato dell'arte della ricarica rapida nel trasporto pubblico locale	7
2.1 <i>Esperienze significative</i>	8
2.2 <i>Sistemi di interconnessione</i>	10
PARTE SECONDA	13
3. Lo Smart Ring dell'Aquila	13
4. La missione	14
5. Il veicolo	15
6. Verifica di fattibilità della missione	17
6.1 <i>Verifica energetica</i>	17
6.2 <i>Fasi di ricarica</i>	19
7. La stazione di ricarica	19
7.1 <i>Dimensionamento dell'accumulo stazionario</i>	22
7.2 <i>Il convertitore DC/DC [20]</i>	23
7.3 <i>Considerazioni sulla soluzione con accumulo stazionario [21]</i>	25
7.4 <i>Lo ZeroFilo-Bus[22]</i>	25
8. Valutazioni economiche	26
Conclusioni	26
Riferimenti	27

Sommario

Nell'ambito del programma dell'annualità, all'obiettivo "B. Ricarica rapida e V2G (Vehicle-to-Grid)", è previsto il bench-mark di due soluzioni possibili per la ricarica rapida (1C) di un minibus da 40-50 kW.

Le due soluzioni proposte sono entrambe focalizzate sull'interfaccia verso il veicolo, prevedendo la prima un caricabatteria a bordo veicolo, alimentato da una colonnina in c.a. di potenza adeguata, (Università di Padova), l'altra una stazione di ricarica con convertitore AC/DC come interfaccia verso la rete ed un secondo convertitore DC/DC che alimenta direttamente in c.c. le batterie del mezzo (Università dell'Aquila). Si è fatto riferimento al caso particolare del servizio di trasporto pubblico locale sull'anello di circoscrizione della città dell'Aquila (Progetto "Smart Ring"). Il veicolo considerato è un Fiat Ducato, nella versione elettrificata da MicroVett., equipaggiato con batterie Li-Io "di energia".

Più precisamente, nell'ambito della prima linea di attività è stato effettuato uno studio della riconfigurazione di un convertitore di trazione, indicativamente della potenza di 40-50 kW, per ottenere un caricabatteria bidirezionale a bordo veicolo. Scelto un azionamento di riferimento, note le caratteristiche elettriche del convertitore e del motore di trazione e le caratteristiche di carica degli accumulatori a bordo del veicolo, sono state indagate le possibili riconfigurazioni della topologia del convertitore che consentono di ottenere un caricabatteria bidirezionale, è stata individuata la componentistica aggiuntiva richiesta per l'implementazione del caricabatteria bidirezionale e si sono ricavate le caratteristiche di potenza nel lato in alternata del caricabatteria bidirezionale per determinare la sua disponibilità di potenza per la funzionalità V2G.

Nell'ambito della seconda linea di attività si è effettuato un dimensionamento di massima del sistema, il cui studio, per quanto attiene l'accumulo stazionario ed il convertitore ac/dc lato rete, è partito dalle risultanze (specifica tecnica) prodotte in ENEA da altre attività condotte in ambito "Ricerca di Sistema". Lo studio è proseguito con il dimensionamento di un prototipo di convertitore cc/cc bidirezionale della stessa potenza del caso precedente "caricabatteria a bordo".

Oggetto del presente report è il confronto tecnico-economico tra le due soluzioni, completato, nella prima parte, da una esposizione dello stato dell'arte delle tecnologie di ricarica, in generale e con particolare riferimento al trasporto pubblico locale (TPL).

Dalle conclusioni si evidenzia che tanto i caricabatteria integrali che le soluzioni "tutto a terra" analizzate nel report sono valide alternative per la carica rapida delle batterie di veicoli elettrici.

Le diverse soluzioni si differenziano notevolmente in termini di costo (da 20.000 € a 65.000 €) e difficoltà implementative, per cui la scelta del tipo di impianto 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.

Anche l'evoluzione della normativa tecnica, andando di pari passo con lo sviluppo delle tecnologie, costituirà elemento dirimente per la scelta della soluzione più adatta allo specifico caso.

PARTE PRIMA

1 Introduzione

Grazie agli sviluppi dell'elettrochimica (e delle tecnologie di fabbricazione e di quelle di gestione e controllo, termico ed elettrico, di pacchi batteria formati da centinaia di celle elementari) l'energia specifica di una batteria per trazione di tecnologia Li-ione è 4-5 volte maggiore rispetto al piombo, Fig.1.

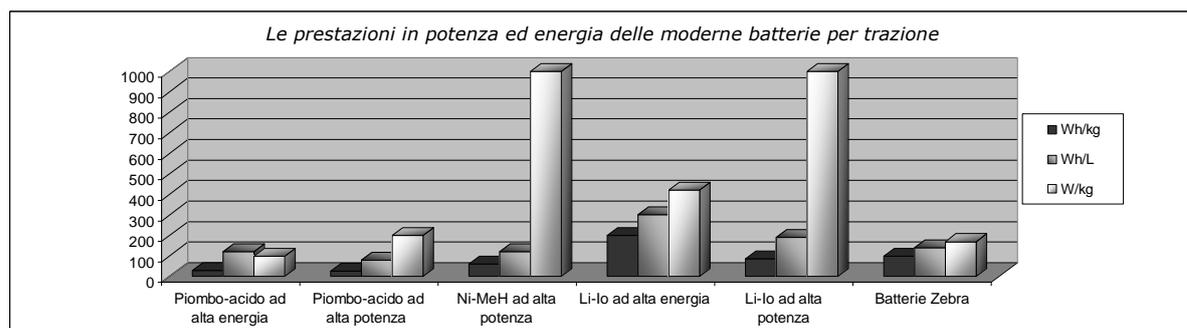


Fig.1

Conseguentemente il rapporto tra le percorrenze possibili con le due motorizzazioni, elettrica e tradizionale, sempre a parità di peso del serbatoio/accumulo, è diminuito dello stesso fattore, passando da circa 100 a 20. Considerando l'equivalente in peso del serbatoio di una automobile diesel di media cilindrata, con 50 kg di batterie Li-ione è quindi possibile percorrere una quarantina di chilometri.

Accettando per la batteria un peso 3-4 volte maggiore, e quindi ancora tollerabile, sono possibili autonomie di 120-160 chilometri, che avvicinano l'uso dell'auto elettrica a quella di una normale "seconda autovettura" [1].

Prestazioni così migliorate si accompagnano però a costi più alti rispetto al piombo, dell'ordine degli 800-1000 Euro/kWh per le batterie Li-lo, che in caso di produzione di massa si ridurrebbero a 3-400 Euro/kWh. Una batteria da 30 kWh, taglia adeguata ad una vettura di classe C, costerà quindi 9-12.000 Euro, che si aggiungono al costo della vettura.

E' evidente che tale costo è difficilmente accettabile dall'utenza all'atto dell'acquisto del veicolo, mentre lo diviene spalmandolo sull'intera vita della batteria, considerato il minor costo d'esercizio del veicolo elettrico (2.5 Euro/100 km contro 7.1 Euro/100 km per il termico, dato di fonte Renault per autovettura di classe B).

Per questa ragione, insieme a considerazioni legate alla manutenzione di veicoli così innovativi rispetto a quelli tradizionali, la formula che sembra più indicata per l'avvio della commercializzazione di questi mezzi è quella del leasing del pacco batterie. Il costo del leasing viene quindi compensato dai minori consumi energetici e dal carico fiscale (sul chilowattora) ridotto dell'energia elettrica rispetto a quello dei carburanti.

Se estendiamo dalla batteria all'intera vettura il concetto "pago l'uso e non la proprietà", si passa al "car sharing" [2], che in effetti sembra particolarmente adatto a favorire l'ingresso delle auto elettriche sul mercato dell'automobile per uso privato. Infatti, ai principali problemi che ostacolano la diffusione dell'auto elettrica:

1. Autonomia ridotta
2. Costo batteria
3. Necessità di infrastrutture

corrispondono dualmente le particolarità del "car sharing":

1. Viaggi brevi

2. Utilizzo elevato = riduzione dei tempi di ammortamento del maggior costo iniziale
3. Parcheggi riservati = pochi punti di ricarica ben sfruttati, e quindi in grado di ripagarsi che ne riducono/annullano le conseguenze negative.

Peso e costo della batteria possono però diminuire, anche considerevolmente, e le strade possibili (e percorribili in parallelo) sono due [3]: ridurre i consumi energetici dell'autovettura e/o accettare una autonomia ridotta tra due ricariche consecutive¹. I rifornimenti all'impianto fisso dovranno allora essere molto più rapidi dell'usuale ricarica di 6-8 ore.

Di qui la necessità della ricarica rapida, un'ora o meno per ricariche parziali, resa possibile dalla grande capacità di accettazione di carica delle batterie di nuova generazione. La ricarica rapida è inoltre particolarmente adatta al caso del trasporto pubblico locale, che consente una programmazione dei tempi di marcia e dei tempi di ricarica [4].

Oltre all'impatto positivo sull'architettura del veicolo, la ricarica rapida ha un impatto positivo anche sulla rete di distribuzione dell'energia elettrica. Infatti, per le potenze elettriche impegnate dalle stazioni di servizio, occorrerebbe provvederle di sistemi di accumulo elettrico stazionari. Queste batterie "a terra" svolgerebbero anche una funzione di "carico caldo" per la riequilibratura della rete, di cui in alcune regioni italiani si sente già la necessità a causa del recente tumultuoso sviluppo delle fonti rinnovabili. In definitiva ciò permetterebbe una estensione del concetto di "smart grid" dalla sola generazione distribuita alla generazione-accumulo distribuito.

1.1 La rapida evoluzione tecnologica nel settore della ricarica

La ricarica rapida 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.

Tanto dal punto di vista delle tecnologie che da quello delle normative, si tratta perciò di una tecnologia in fase di evoluzione, dove le scelte principali non sono ancora congelate [5].

Occorre comunque tener presente, riportando integralmente l'ultima comunicazione dell'Autorità dell'Energia al Parlamento², che

"..... la ricarica rapida (15-30 minuti, sia con tecnologia in corrente continua che in corrente alternata, disponibili anche contemporaneamente presso gli apparati più avanzati) è già oggi una realtà.

Ad esempio, in Portogallo sono state installate 50 stazioni di ricarica rapida con carica batteria a terra, alcune delle quali anche su assi autostradali, al fine di rendere possibili spostamenti interurbani; ciò è avvenuto nell'ambito di un modello di sviluppo della mobilità elettrica programmato a livello statale, mediante la creazione di un consorzio cui è stata affidata la gestione del sistema di ricarica elettrica; tale progetto ha coinvolto oltre 25 città e i principali assi viari del Paese, integrandosi con i progetti di sperimentazione di smart grid, ossia le reti intelligenti di distribuzione dell'energia elettrica.

Occorre inoltre sottolineare che il costo degli apparati di ricarica rapida è in forte diminuzione grazie all'ottimizzazione progettuale e produttiva intervenuta nell'ultimo anno. Infatti, tali apparati sono oggi

¹ Ed è questa la strategia di GM e Toyota, che hanno sviluppato ibridi plug-in, con capacità di marcia in solo elettrico compresa tra 20 e 40 km. Renault, al contrario, ha in produzione autovetture elettriche con autonomie ben maggiori, 150 km, ma anche una microvettura, la Twizy, che riduce peso e costo della batteria a 5 kWh giocando su entrambi i fattori, riduzione di peso e riduzione di autonomia, 80 km.

² Memoria per l'audizione dell'Autorità per l'energia elettrica e il gas presso la VIII Commissione Ambiente Territorio e Lavori Pubblici della Camera dei Deputati, 3 Maggio 2012

disponibili a partire da 10.000 euro circa (connessione esclusa), mentre solo due anni fa avevano un prezzo oscillante fra i 20.000 e i 30.000 euro circa (esclusa la connessione). Peraltro, detti punti di ricarica presentano oggi anche una elevata flessibilità d'utilizzo, poiché permettono "rabbocchi" di energia in emergenza e buoni recuperi di autonomia (5 minuti per 25 km, o 10 minuti per 50 km; 30 minuti per recuperare l'80% della capacità della batteria e 45 minuti circa per il 100%).

In particolare, la rapidità dei tempi di ricarica consente di programmare la realizzazione di una rete di ricarica su suolo pubblico con ridotto numero di punti ad elevate prestazioni, da collocare in punti ad alta frequentazione..... In sostanza, in prospettiva, la ricarica lenta (o quasi lenta) dovrebbe diffondersi soprattutto negli spazi residenziali, aziendali o a lungo stazionamento, mentre la ricarica rapida dovrebbe essere la più utilizzata nei luoghi pubblici o connessi con attività commerciali con accessi non esclusivi o ristretti."

In Italia, per sperimentare la tenuta della rete elettrica e per promuovere la mobilità a zero emissioni, l'Autorità per l'energia elettrica e il gas (Aeeg), in collaborazione con la società pubblica di Ricerca di sistema elettrico (RSE), ha finanziato 5 progetti pilota (su 10 presentati), relativi a due modelli di commercializzazione [6]:

il modello del distributore (DSO), che vede l'infrastruttura di ricarica integrata nella rete di distribuzione, e realizza l'interoperabilità delle reti di ricarica tra distributori sul territorio nazionale grazie alla condivisione di una piattaforma tecnologica comune (sistema) in grado di consentire a clienti che hanno sottoscritto contratti di fornitura per auto elettrica sul mercato libero con venditori differenti di poter accedere alla ricarica con un'unica procedura di accesso (unica carta RFID associata al contratto di fornitura); le misure dei consumi di ogni cliente sono trasferite dal sistema di gestione dei DSO ai venditori di pertinenza affinché questi procedano con la relativa fatturazione nello stesso modo in cui questo avviene comunemente sulle utenze domestiche. Il progetto approvato è quello ENEL Distribuzione-HERA

ed il modello del service Provider (in esclusiva o no), dove l'infrastruttura è di proprietà terza, e la stazione di ricarica è una normale utenza - punto di connessione in prelievo (ed anche in immissione se dotato di sistemi di accumulo elettrico stazionario), che consente l'accesso esclusivamente ai clienti che hanno sottoscritto un contratto con il Service Provider in questione; tale Service Provider deve poi gestire i rapporti con i distributori (DSO) per le connessioni e gli impegni di potenza delle infrastrutture. Le forme contrattuali possono essere diverse ma in ogni caso sottoscrivibili con un unico soggetto, il Service Provider appunto. I progetti "in esclusiva" approvati sono quelli di A2A e della città di Parma. I due progetti "Service provider" in concorrenza, Enel Energia e Class Onlus, prevedono in alcuni punti anche la ricarica rapida. Il primo prevede 26 punti di ricarica a Roma e in provincia di Milano entro il secondo semestre del 2013. Il secondo prevede l'installazione di 150 colonnine, delle quali 43 in provincia di Monza e Brianza e 107 presso supermercati di Roma, Milano, Napoli, Bari, Catania, Genova, Bologna e Varese.

2 Stato dell'arte della ricarica rapida nel trasporto pubblico locale

Le prestazioni in termini di "capacità di accettazione della carica" dei nuovi sistemi di accumulo elettrico (supercondensatori e batterie Li-Ione) avvicinano i consumi energetici ed emissioni gas serra WTW dei veicoli elettrici per servizio pubblico a trazione autonoma di taglia medio-grande (autobus alimentati a batteria), a quelle della trazione elettrica convenzionale (treni, tram etc), che è da sempre molto competitiva, in termini di impatto ambientale ma anche di costo di esercizio, rispetto ai veicoli tradizionali, almeno a partire da certi volumi di traffico [7].

Infatti, grazie alla disponibilità di questi sistemi d'accumulo ed all'uso della ricarica frequente di tipo rapido o extra-rapido, effettuata al solo capolinea o eventualmente pure lungo il percorso, anche i veicoli a batteria possono offrire un servizio giornaliero senza interruzioni, silenzioso e pulito, a costi molto ridotti rispetto a mezzi progettati e realizzati per la sola ricarica notturna, che richiedono l'impiego di batterie aventi una capacità di stoccaggio energetico 3-4 volte più grande, e quindi molto pesanti e costose.

Per avere conferma di tale affermazione basta confrontare il peso del volano (una macchina ad induzione a velocità e frequenza variabile pesante 3 t), installato sul GyroBus, autobus a trazione elettrica

prodotto in una ventina di esemplari dalla Oerlikon negli anni '50, Fig.2, con i 200 kg delle batterie Li-Ioni sufficienti per garantire a un piccolo autobus una autonomia di 5-6 km, erogando una potenza di 50 Kw [9] .

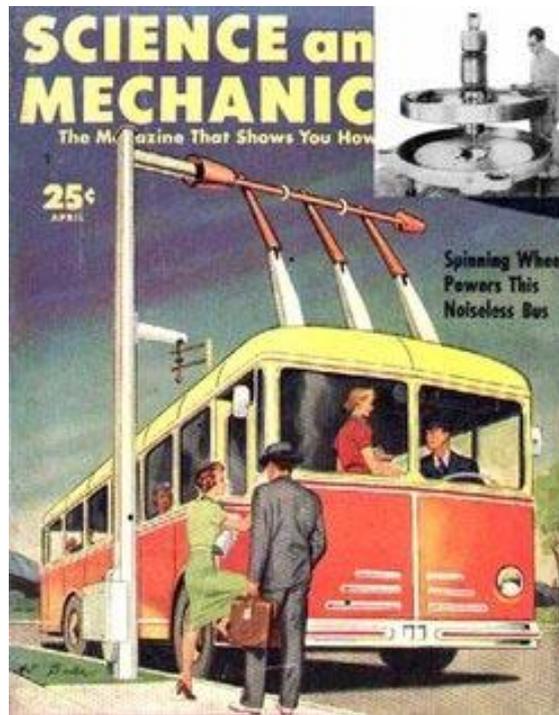


Fig.2

Il Gyrobus, peraltro, viaggiava silenziosamente a trolley abbassato e lo risollevava per la ricarica solo in alcuni punti del percorso, equipaggiati con una terna di conduttori elettrici. Un filobus senza fili quindi, che aveva tutti i vantaggi del filobus (marcia pulita e silenziosa ed utilizzo di un vettore energetico universale come l'elettricità) senza i costi e la rigidità di percorso derivanti da una alimentazione ottenuta dalla sola linea aerea. Il consumo specifico superiore del 30% a quello di un tram, l'effetto giroscopico che rendeva la guida del mezzo particolarmente impegnativa, una affidabilità che lasciava a desiderare condussero all'abbandono di questo concetto, che è stato però ripreso appena si sono resi disponibili sistemi d'accumulo come le batterie Li-Ioni ed i supercondensatori, come illustrato di seguito.

2.1. Esperienze significative

Una prima sperimentazione sul campo inerente autobus elettrici a ricarica rapida e distribuita, Fig.3, è stata fatta in Cina nel 2005-2006, ad opera dello Shanghai Aowei Technology Development Company & Sinautec. I motori di trazione del mezzo, un 12 m., sono alimentati da supercondensatori, ricaricabili in tempi brevissimi perché caratterizzati da una potenza specifica molto elevata, come le batterie Li-Ione, rispetto alle quali, però, non soffrono di asimmetria dei diagrammi di carica e scarica.

Un ciclo operativo molto pesante, che non prevedeva, tra l'altro, un percorso in sede propria, hanno dato luogo ad un peso e volume dei supercondensatori eccessivo, che ha portato al sostanziale fallimento del progetto, probabilmente troppo ambizioso sin dall'origine, per cui i mezzi sono stati riadattati per come normali filobus



Fig.3

Più recentemente il concetto è stato ripreso in California dalla società di trasporto pubblico locale Foothill Transit [10], con l'utilizzo di tre autobus Ecoliner, equipaggiati invece con batterie Li-Ioni Altairnano, entrati in servizio nel Settembre 2011. Le prestazioni in ricarica di questo tipo di batteria sono confrontate in Tab.1 con altri due tipi Li-Ioni [11].

TABELLA 1

Charge rate	Percent Ah to clamp voltage		
	Nickel Cobalt Manganese	Iron Phosphate	Lithium Titanate
3C	81%	92%	99%
4C	76%	90%	98%
5C	72%	85%	96%
6C	----	78%	94%

La batteria TerraVoltTM impiegata in questi autobus è costituita da quattro stringhe gemelle da 368 V - 50 Ah ciascuna, connesse in parallelo per portare la capacità totale a 200 Ah, che permettono di immagazzinare un'energia nominale pari a 74 kWh.

L'autonomia assicurata al mezzo da tale sistema d'accumulo è di circa 50 km, che sarebbero insufficienti per il servizio previsto se non venisse effettuata una ricarica fino al 95% ogni 12 km. In questo modo lo stato di carica della batteria non scende mai sotto il 70% del valore nominale, cosa che permette di garantire una lunga durata di esercizio.

Gli elementi usati per questa batteria sono di tipo LTO, nei quali l'anodo in grafite è sostituito da uno al titanato di litio nanostrutturato, che offre una superficie attiva fino a 100 volte maggiore dell'anodo tradizionale e non reagisce con l'elettrolita: ciò permette di evitare il graduale decadimento delle caratteristiche che affligge invece altri tipi di batterie.

La ricarica della batteria avviene in una stazione automatica equipaggiata con un braccio robotizzato, che provvede ad agganciare appositi contatti di potenza sistemati sul padiglione del bus permettendo di effettuare la ricarica in 10 min.

L'insieme di tali soluzioni ha assicurato il successo dell'iniziativa: gli autobus, Fig. 4, hanno infatti già percorso 25.000 miglia, operando per 16 ore al giorno per 7 giorni a settimana, con una percorrenza giornaliera di 200 km.



Fig.4

2.2 Sistemi di interconnessione

Per quel che riguarda la connessione di potenza tra veicolo e stazione di ricarica, fondamentalmente sinora sono state proposte e sperimentate due tipologie di soluzioni:

- di tipo conduttivo: si tratta della soluzione più ovvia, solitamente associata a una ricarica lenta; prevede, per correnti relativamente limitate, l'impiego di un semplice accoppiamento presa-spina simile a quelli ampiamente utilizzati nelle comuni applicazioni civili ed industriali, mentre per correnti elevate, tipicamente associate alla ricarica rapida ed extra-rapida, spesso prevede l'uso di una coppia strisciante-conduttore appositamente studiata, Fig. 5, nel caso in questione provata fino a 1000 A [12].

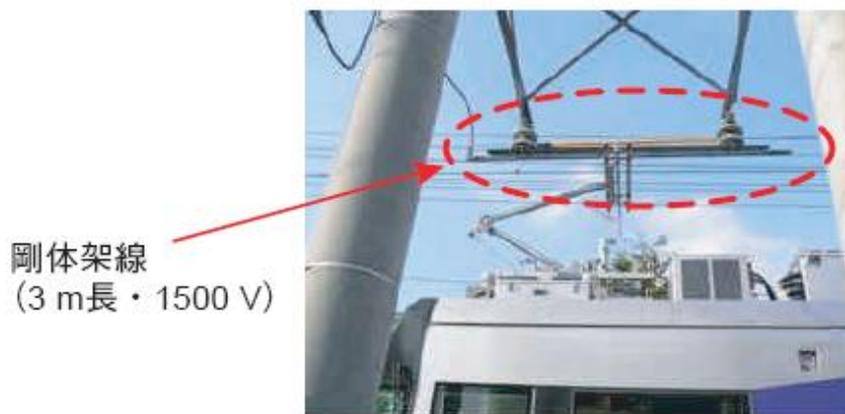


Fig. 5

Un collegamento “automatizzato” può essere realizzato anche utilizzando l’accoppiamento spina-presa, ed in Fig. 6 è rappresentato il concetto proposto dall’ENEA [13] per la realizzazione dello stesso, che utilizza un robot industriale ed un gruppo presa-spina della Marechal.

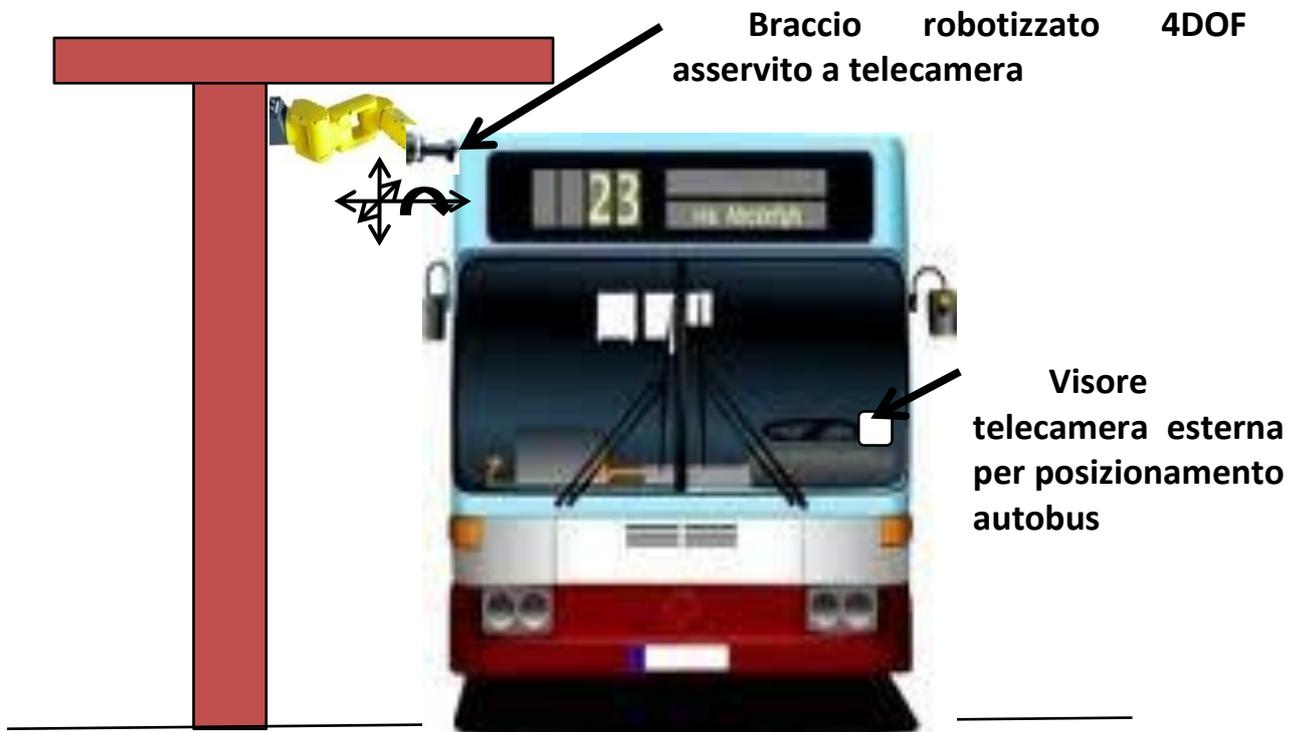


Fig. 6

- di tipo induttivo: in questo caso non vi è alcun contatto elettrico diretto tra veicolo e stazione, ma il trasferimento di potenza avviene attraverso un accoppiamento magnetico. Il convertitore statico dell’apparato trasmettitore alimenta la bobina ad esso collegata con una corrente alternata creando un campo magnetico di intensità variabile che, concatenandosi con la bobina dell’apparato ricevitore, genera ai morsetti di quest’ultima una fem indotta. L’energia associata alla fem indotta è successivamente condizionata da un convertitore statico in modo da fornirla all’utente con le modalità richieste. Questa soluzione, non prevedendo la presenza di alcun punto accessibile in tensione, presenta il massimo livello di sicurezza dal rischio di elettrocuzione che potrebbero correre persone ed animali in prossimità della stazione e del veicolo. Tuttavia è ovviamente più complesso e costoso di quelli conduttivo: pertanto, fino ad oggi è stato sviluppato solo per sistemi di potenza ridotta.

Se la captazione deve avvenire a terra o ad altezza d’uomo, per motivi di sicurezza viene solitamente preferito, e talora imposto, quindi, il sistema ad accoppiamento induttivo; questa soluzione è infatti utilizzata anche nella realizzazione di sistemi di trasporto industriale.

Un esempio tipico di soluzione di questo genere è costituito dal sistema IPS (inductive power system) della Wampfler, utilizzato ad esempio dagli autobus della EPT a Torino, Fig.7: in questa realizzazione, ciascuna stazione di ricarica, posta al capolinea, comprende un avvolgimento primario ed un seminucleo magnetico annegati sotto il manto stradale ed un avvolgimento secondario con seminucleo magnetico posto sotto il pianale dell’autobus, che l’autista può abbassare tramite apposito servocomando per accostarlo al primario. Il trasformatore che si viene a creare in questo modo viene fatto operare ad elevata frequenza e tollera sia un disallineamento che uno spessore massimo di traferro di diversi centimetri, mantenendo comunque la possibilità di operare a prestazioni ed efficienza ridotti anche in un range più esteso di condizioni. La fase di ricarica dura approssimativamente 10 min con la cessione alla batteria di circa 18 Ah, il che comporta un recupero del 7-8% dello stato di carica della stessa. La stazione di ricarica ha

una potenza massima di 70 kW, ma la effettiva velocità di ricarica risulta pari in termini energetici a circa 0.6 kWh/min essendo limitata dalle caratteristiche delle batterie al piombo usate dalla EPT.

Il sistema IPS è anche utilizzato in Giappone per il piccolo autobus già citato, equipaggiato con una batteria Li-Ioni da soli 12 kWh, con una durata di ricarica di 7 min, che tuttavia è sufficiente ad assicurare al mezzo 5-6 km di percorrenza tra una ricarica e la successiva.



Fig. 7

Appartiene alla categoria delle soluzioni di connessione induttive anche il sistema di tipo lineare prodotto da Bombardier per l'alimentazione di tram, recentemente proposto anche per altre tipologie di veicolo ed il sistema OLEV (On-Line Electric Vehicle) [13] proposto da una partnership statunitense e coreana. Questi casi, prevedendo una ricarica "continua" lungo il percorso, esulano però dall'argomento del rapporto.

Sono in corso ricerche su sistemi ad induzione cosiddetti risonanti, che consentono di evitare i vincoli strettissimi, in termini di ampiezza del traferro ed allineamento del veicolo, propri dei sistemi di derivazione industriale.

In questi le bobine trasmettente e ricevente sono collegate in serie o in parallelo con condensatori in modo da risuonare alla stessa frequenza e la frequenza di alimentazione della bobina trasmettente è esattamente pari a quella di risonanza. I sistemi ad induzione risonanti promettono di ottenere una maggiore efficienza di trasferimento energetico rispetto a quelli non risonanti e sono quindi adatti anche al trasferimento di energia a medio raggio. Le ricerche in corso riguardano la struttura e il progetto di sistemi con ragionevoli valori di efficienza del trasferimento energetico quando la bobina trasmettente e quella ricevente non sono perfettamente allineate oppure quando il loro accoppiamento varia nel tempo come accade nel caso di un veicolo in movimento rispetto alla bobina trasmettente, come per esempio quando il veicolo è in fase di avvicinamento o di allontanamento dalla piazzola di sosta [14] [15].

In tutti i casi è ovviamente importante prevedere il transito tra veicolo e stazione non solo di energia elettrica, ma anche di informazioni che consentano l'uso delle tecniche di ricarica più adatte alla batteria presente a bordo, nonché una corretta contabilizzazione dell'energia fornita ed altre funzioni, quali ad esempio il monitoraggio dello stato delle principali parti del veicolo finalizzato alla diagnostica statistica e predittiva etc.

PARTE SECONDA

3. Lo Smart Ring dell'Aquila

L'ENEA ha siglato un protocollo d'intesa con il comune dell'Aquila per le attività di ricostruzione post-sisma il 14 ottobre 2010. Nell'ambito di questo progetto è stata redatta una bozza progettuale del dimostrativo pilota, che prenderà il nome di progetto "Smart Ring" [16]. Il progetto comprende, tra l'altro, servizi di mobilità e di illuminazione intelligente e prevede la realizzazione di uno *smart ring* di circa 4-5km di lunghezza lungo l'anello che racchiude il centro storico della città, che si compone di 4 quadranti.

Lungo l'anello sarà realizzato un servizio di trasporto pubblico tramite un autobus elettrico a ricarica rapida. Questi mezzi, già descritti nella prima parte del rapporto, prevedono l'accumulo di energia elettrica in modalità che consentono la ricarica ad alte correnti (supercapacitori e/o batterie agli ioni litio), limitando la durata della ricarica a pochi minuti. Ciò rende possibile tenere il mezzo elettrico in costante esercizio durante la giornata su un percorso ciclico, operando la ricarica ogni volta che il mezzo raggiunga il capolinea. La ricarica potrà essere conduttiva (con connessioni presa-spina o contatti aerei automatici), ovvero induttiva (senza contatto).

L'autobus sarà inoltre attrezzato con sistemi di analisi dei parametri di funzionamento (posizione, stato di carica batteria, velocità, passeggeri, ecc...) e con la possibilità di trasmissione dati wireless di tali dati in tempo reale lungo il percorso (alle fermate). L'interazione tra l'autobus e la struttura di terra avverrà con dei punti di raccolta della informazione posizionati sui pali intelligenti della illuminazione pubblica, Fig. 8.

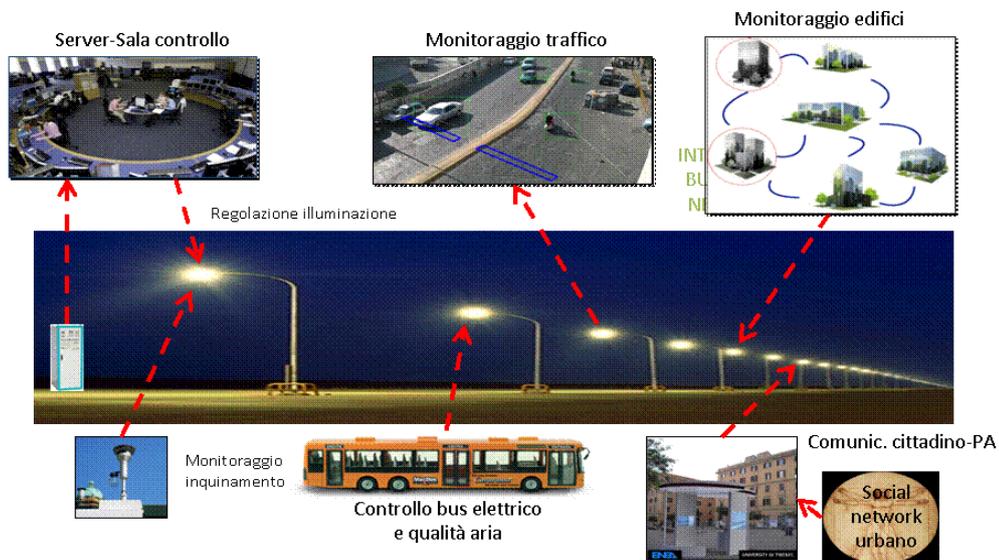


Fig. 8

Questa predisposizione è particolarmente importante per un buon funzionamento della ricarica rapida e frequente, che ha bisogno di una strategia di ottimizzazione continua dei tempi di sosta alle fermate e quindi di un flusso continuo di informazioni che devono essere disponibili in tempo reale :

- sullo stato di carica delle batterie
- sull'andamento dei consumi dell'autobus
- sulle caratteristiche plano-altimetriche del percorso a venire
- sullo stato del traffico
- sulla presenza di utenti alle fermate

.....

4. La missione



Fig. 9

Come può vedersi in Fig. 9, la linea che si è ipotizzato venga servita dagli autobus elettrici è una circolare, dello sviluppo di circa 4 km, che collega anche i principali parcheggi di interscambio realizzati alla periferia del centro storico (lettere A, B, C). Il capolinea, dove verrà realizzata anche la stazione di rifornimento, è in corrispondenza alla lettera O della figura. E' prevista una ricarica di 3 ' netti (5' di sosta) ogni volta che il mezzo arriva al capolinea. In Fig.10 è raffigurato il microciclo elementare.

Si ipotizza che il servizio venga effettuato con due coppie di mezzi; con una velocità media di 16 km/h, 4 autobus assicurano un passaggio ogni 10' per ogni senso di percorrenza, orario ed antiorario, dalle ore 6 antimeridiane alle 10 di sera (16 ore). Il servizio potrà essere diradato nelle ore di stanca, per cui ogni mezzo potrà godere di una sosta di un'ora circa, e quindi (eventualmente) di una ricarica intermedia.

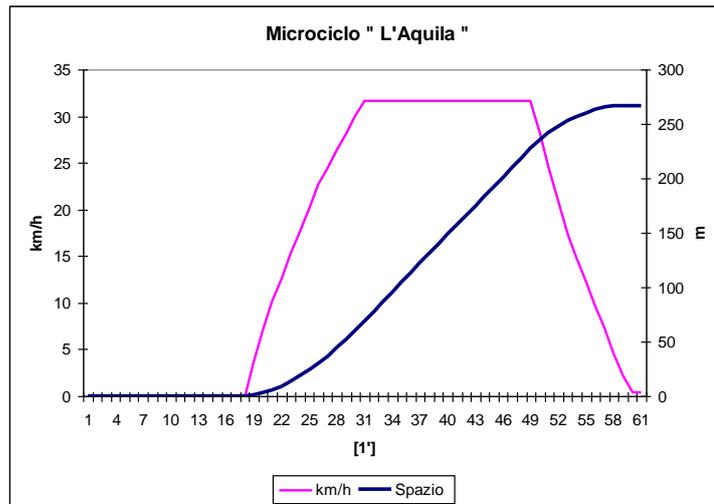


Fig.10

I dati caratteristici della missione sono riportati in Tab.2

TAB.2

VELOCITÀ MEDIA	16	KM/H
Lunghezza percorso	4	km
Durata tratta	15	minuti
N. fermate (compreso il capolinea)	15	
Durata sosta al capolinea	5	minuti
Durata netta ricarica breve	3	minuti
Durata totale di ciclo	20	minuti
Cicli per turno	23	
Durata sosta tra i due turni	60	minuti
Durata totale (n. 2 turni+sosta)	16	ore
Percorrenza totale giornaliera	185	km

Come può vedersi, la percorrenza totale giornaliera è al limite delle possibilità dei mezzi elettrici a batteria, e soltanto l'introduzione di ricariche intermedie, alla massima corrente accettabile dalle batterie (1C, una corrente il cui valore numerico in A è uguale alla capacità della batteria, consentendo perciò una ricarica completa in 1 ora) può permettere l'effettuazione del servizio.

5. Il veicolo

Inizialmente il servizio potrà essere assicurato da piccoli autobus elettrici a 18 posti, sul telaio del Ducato Metropolis elettrico, un veicolo commerciale leggero, puramente elettrico, prodotto da Fiat SpA ed elettrificato da Micro-vett SpA, Fig.11.



Fig.11 Ducato Metropolis Elettrico

Il powertrain è formato da una batteria di trazione e da un azionamento, composto a sua volta da un invertitore trifase e da un motore asincrono. Attualmente il mezzo dispone di un modulo di ricarica da 3 kW; l'azienda ha in programma di connettere 3 moduli di ricarica a stella per portare la potenza di ricarica a 9 kW.

Il veicolo è fornito in più versioni, caratterizzate da autonomia (e costo) crescenti, ma equipaggiate con lo stesso azionamento. Infatti la batteria ha una configurazione modulare, composta da moduli e rami, per cui la tensione ai morsetti della stessa non cambia tra le diverse versioni del mezzo. Ogni modulo è formato da 24 celle collegate in serie, ogni ramo da 3 moduli collegati in serie, in modo da raggiungere la tensione prefissata ($3,6 \text{ V/cella} \times 24 \times 3 = 263 \text{ V}$) di alimentazione dell'azionamento. Più rami possono essere collegati in parallelo per aumentare la corrente erogabile ovvero la capacità installata a bordo veicolo.

Di seguito si riportano le specifiche dell'azionamento ed in Tab.3 quelle delle 4 versioni commercialmente disponibili.

Azionamento

Specifiche dell'invertitore

$V_{inv,cc}$ e $I_{inv,cc}$ indicano la tensione e la corrente nel lato in continua dell'invertitore; $I_{inv,ca}$ indica la corrente nel lato in alternata dell'invertitore.

Tensione nominale lato cc:	$V_{inv,cc,N}=260\div 300 \text{ V}$
Tensione minima di lavoro lato cc:	$V_{inv,cc,min}=190 \text{ V}$
Tensione massima di lavoro lato cc:	$V_{inv,cc,max}=380 \text{ V}$
Corrente massima lato cc:	$I_{inv,cc,max}=280 \text{ A}$
Corrente massima (valore efficace) lato ca:	$I_{inv,ca,rms,max}=400 \text{ A}$
Rendimento (dato stimato 30 kW, condizioni nominali):	$\eta_{inv,N}=0.92$

Specifiche del motore asincrono

Potenza nominale:	$P_{mot,N}=30 \text{ kW}$
Potenza di picco (2'):	$P_{mot,max}=60 \text{ kW}$
Coppia nominale:	$T_N=130 \text{ Nm}$
Coppia massima:	$T_{max}=260 \text{ Nm}(@2300 \text{ rpm})$
Rendimento (dato stimato 30 kW, condizioni nominali):	$\eta_{mot,N}=0.90$

Tab. 3 Specifiche delle diverse versioni commerciali del mezzo:

Codice Micro-Vett:	E9	E12	E15	E18
Categoria:	M2	M2	M2	M2
Posti:	18+1	18+1	18+1	18+1
Trazione:	Elettrica	Elettrica	Elettrica	Elettrica
Motore:	Asincr. 30/60kW	Asincr. 30/60kW	Asincr. 30/60kW	Asincr. 30/60kW
Rapporti:	3 + RM	3 + RM	3 + RM	3 + RM
Frenata:	Recupero	Recupero	Recupero	Recupero
Caricabatterie:	400V – 16A – 9kW			
Batterie:	31,1 kWh Litio	41,5 kWh Litio	51,8 kWh Litio	62,2 kWh Litio
Velocità Massima:	90 km/h	90 km/h	90 km/h	90 km/h
Autonomia (ECE 101):	85 km	115 km	140 km	170 km

La versione che si è scelta per lo Smart-Ring è la E9, che è risultata, dalla simulazione della missione, in grado di assicurare con il necessario margine di sicurezza il soddisfacimento del servizio. Si osservi che l'autonomia dichiarata per il mezzo (85 km) è pari alla metà della percorrenza giornaliera dello stesso (170 km). Le specifiche della batteria di trazione del mezzo, Fig. sono riportate di seguito.

Batteria di trazione

Tensione nominale:	$V_{b,N}=263 \text{ V}$
Tensione massima:	$V_{b,max}=299 \text{ V}$
Tensione minima di lavoro:	$V_{b,min}=216 \text{ V}$
Corrente massima di carica:	$I_{b,car,max}=120 \text{ A}$
Corrente massima di scarica:	$I_{b,scar,max}=360 \text{ A}$
Capacità (@ corrente di scarica di 20 A) :	$C_b=120 \text{ A}\cdot\text{h}$
Energia immagazzinata:	$E_b=31.5 \text{ kW}\cdot\text{h}$

6. Verifica di fattibilità della missione

6.1 Verifica energetica

Assumendo per il nostro veicolo il consumo specifico dichiarato dal costruttore (370 Wh/km), che corrisponde a quanto misurato sul campo nelle prove effettuate in Casaccia lo scorso anno su di un mezzo simile, un Tecnobus Pollicino [17], l'andamento del contenuto energetico della batteria del mezzo, durante il turno di 7.5 ore, è rappresentato in Fig. 12.

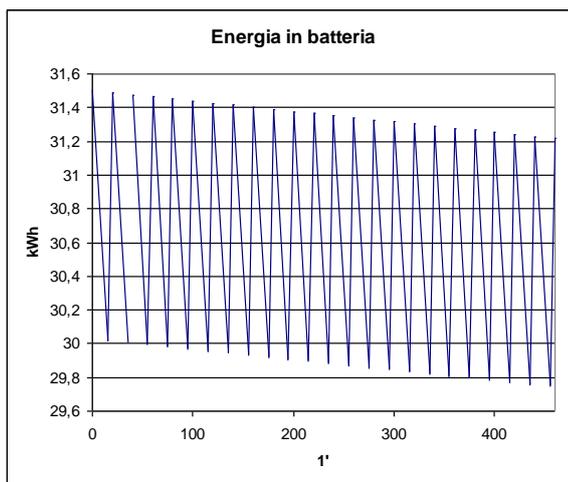


Fig. 12

Nelle condizioni di progetto, quindi, l'autobus non avrebbe bisogno di una ricarica intermedia (la ricarica al capolinea compensa quasi esattamente i consumi) e viaggerebbe con batterie quasi completamente cariche. Maggiorando però del 50% il consumo specifico ($\rightarrow 560 \text{ Wh/km}$), l'andamento del contenuto energetico della batteria del mezzo, durante il turno di 7.5 ore, è rappresentato in Fig. 13:

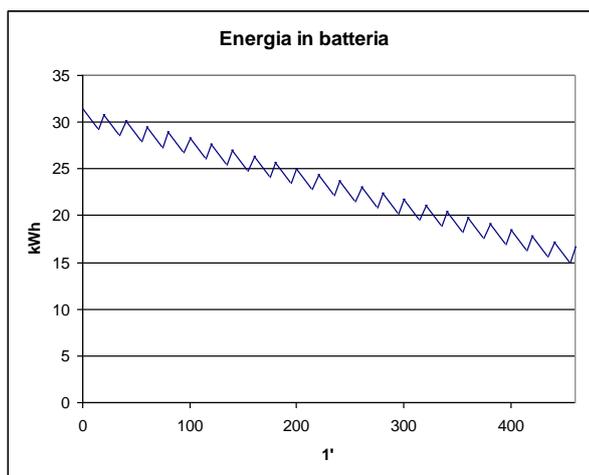


Fig. 13

Come può vedersi, a questo punto è necessaria una ricarica intermedia, di circa 15 kWh, che può essere effettuata agevolmente (a corrente pari alla metà della massima accettabile dalle batterie) nell'ora di sosta prevista per il mezzo, ad esempio distribuendo questi 60' nel corso della giornata.

Anche nel caso peggiore, lo stato di carica della batteria non scende sotto il 50% e quindi l'azionamento può funzionare alla potenza di picco. Infatti la tensione richiesta all'accumulatore affinché il motore eroghi la potenza di picco è 257 V, circa uguale alla tensione nominale dell'accumulatore, tensione disponibile solo quando l'accumulatore è sufficientemente carico.

Considerazioni analoghe potrebbero farsi ipotizzando che la sosta al capolinea abbia una durata inferiore ai 5' previsti, e che perciò le ricariche al capolinea siano (a parità di corrente erogabile che è quella massima accettabile dalla batteria) minori del chilowattora e mezzo, circa, erogabile in 3'.

Si può quindi concludere che anche il modello E9 del Ducato Metropolis, pur costando parecchio di meno del modello E18, sarebbe perfettamente in grado di assicurare il servizio, se messo in grado di essere rifornito al capolinea con le modalità di ricarica rapida.

6.2 Fasi di ricarica

In accordo con le specifiche dell'accumulatore, la potenza assorbita dall'accumulatore, calcolata come prodotto della tensione nominale dell'accumulatore ($V_{B,N}=263\text{ V}$) per la corrente massima di carica ($I_{B,car,max}=120\text{ A}$), è pari a 32 kW, che diventa il valore di specifica per la progettazione della stazione di ricarica con caricabatteria a terra e comunicazione terra bordo (Modo di ricarica 4).

Nell'ipotesi, invece, di adottare il "Modo di ricarica 3", con colonnina in c.a. e caricabatteria a bordo del mezzo, la ricarica a 2C non potrà essere effettuata con il carica batteria di bordo, che come abbiamo detto è disponibile con una Pmax. di 9 kW, ma sarà necessario disporre di un caricabatteria "integrale" [18], che utilizzi cioè l'invertitore di bordo al fine di eseguire la carica ad elevata potenza, Fig. 14:

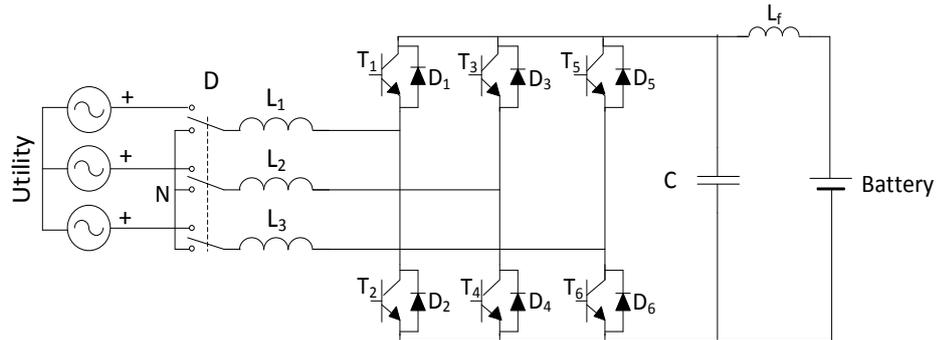


Fig. 14

La topologia in figura richiede che la tensione dell'accumulatore sia superiore al valore di picco della tensione concatenata di rete.

Poiché invece il valore di picco della tensione concatenata di rete ($380\text{ V}_{\text{efficace}} \times 2^{0.5}$) è superiore alla tensione dell'accumulatore (300 V), occorre interporre un trasformatore abbassatore tra la rete e l'ingresso del raddrizzatore attivo, il che richiederà una colonnina di ricarica in c.a. completata da un trasformatore abbassatore da 38 kVA.

7. La stazione di ricarica

La configurazione della "Stazione di rifornimento elettrica" con conversione a bordo veicolo è riportata in Fig. 15, la configurazione con conversione finale a terra è riportata in Fig. 16.

Sono stati previsti n.3 punti di ricarica, per prevedere la presenza contemporanea di n. 3 mezzi (circolare dx + circolare sx + autobus di riserva)

Data la potenza, 100-150 kW, e la variabilità del carico, l'impianto deve essere alimentato in ogni caso in MT tramite un trasformatore 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.

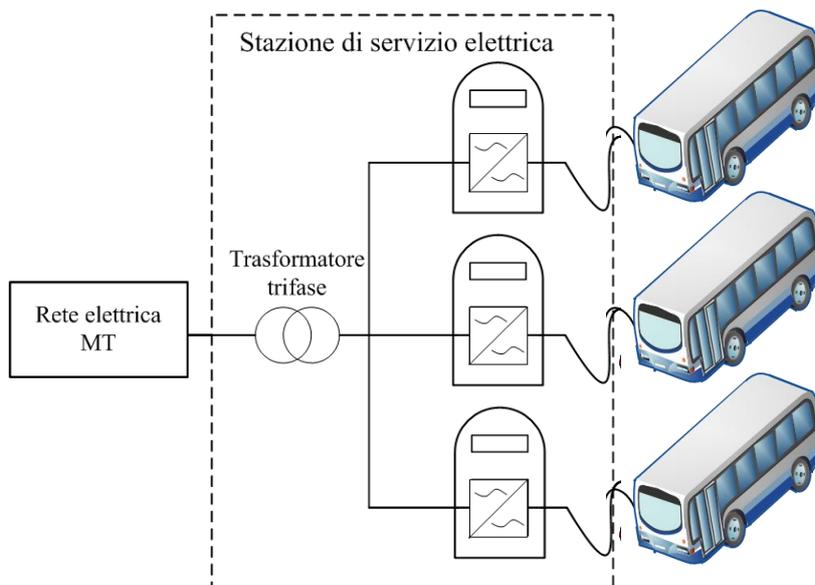


Fig. 15. Soluzione n.1: stazione di servizio elettrica con caricabatteria “integrale”.

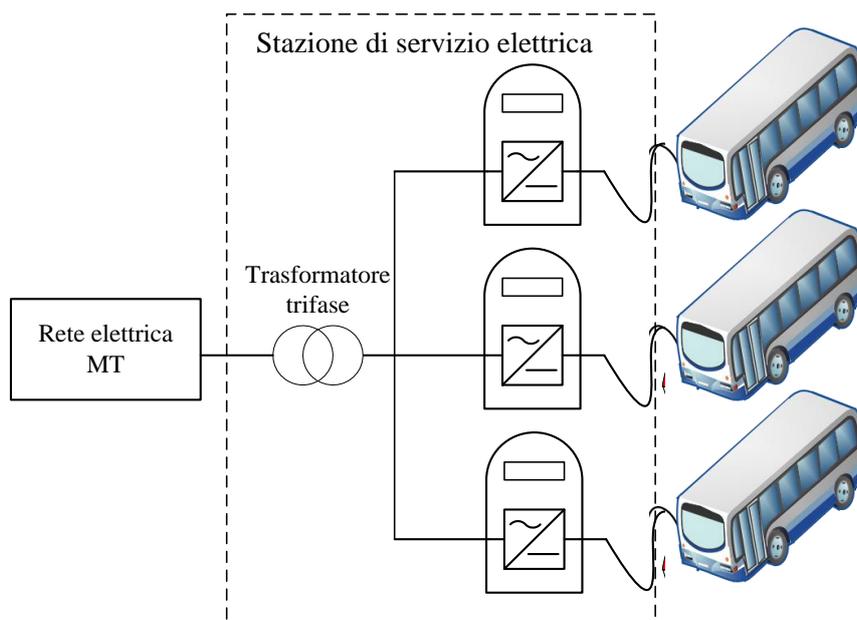


Fig. 16. Soluzione n.2: convertitori AC/DC nelle colonnine di carica (CHAdEMO)

Nel caso in esame, abbiamo n. 4 autobus elettrici in esercizio (+ 1 in riserva) per 16 ore al giorno con una percorrenza giornaliera di 184 km. Considerando un consumo chilometrico medio pari a quello dichiarato dal costruttore, l’energia prelevata da ogni autobus è di 68 kWh/giorno, che corrispondono ad un prelievo a monte delle colonnine, con un rendimento per le stesse pari a 0,9, di 75 kWh, quindi di 300 kWh totali (per i 4 autobus). La potenza media richiesta sulle 16 ore al trasformatore trifase è di poco più di 20 kW, ma la potenza massima di picco, considerando un massimo di 3 autobus in ricarica contemporaneamente (circolare dx + circolare sx + autobus di riserva, anche se per qualche minuto) supera i 100 kW. La potenza di picco del trasformatore trifase richiesta da n. 3 colonnine in c.a. da 43 kW ENEL (soluzione n.1) o n.3 colonnine in c.c. ABB Terra 51, Fig. 17 (soluzione n.2), varia in effetti da 130 a 150 kW.



Fig.17

La soluzione n.3 , Fig. 18, risolve i problemi legati alla elevata variabilità del carico tramite una batteria stazionaria. In tal caso è possibile caricare le batterie dei veicoli utilizzando contemporaneamente la rete elettrica e le batterie fisse o esclusivamente quest'ultime, eventualmente a potenza ridotta e per un arco temporale limitato nel corso della giornata, nel caso di mancanza temporanea della rete.

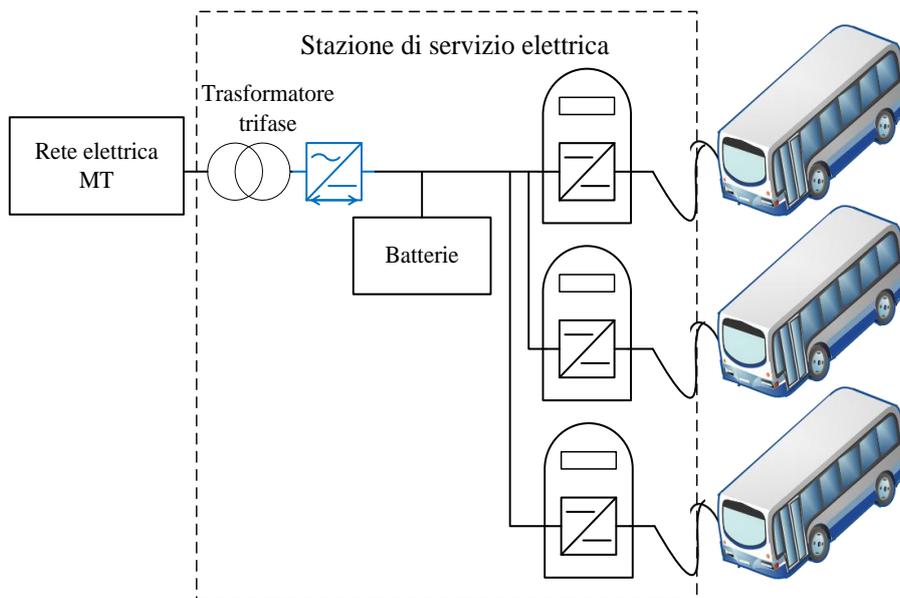


Fig. 18 – Soluzione n.3: stazione di servizio elettrica con accumulo di energia e convertitore bidirezionale

Le specifiche di massima di questo impianto [19] sono illustrate in Fig.19:

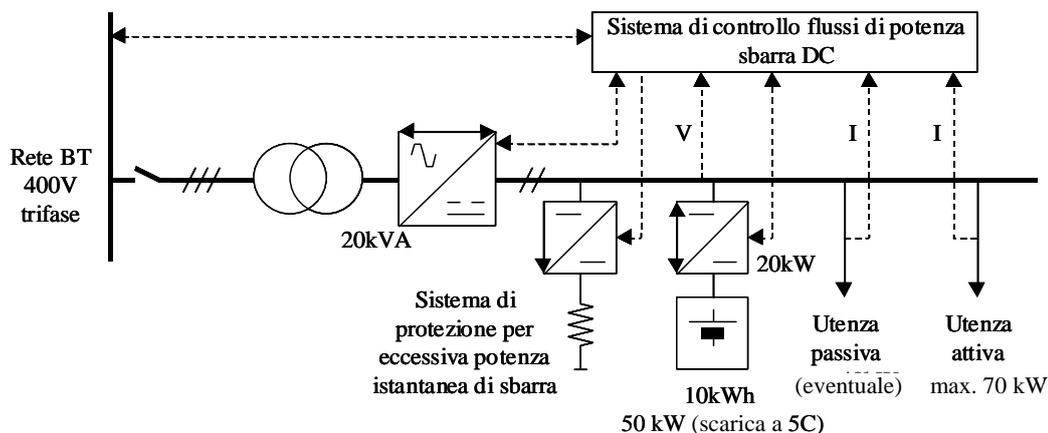


Fig. 19. Schema d’impianto della stazione di servizio elettrica con accumulo di energia e convertitore bidirezionale

7.1. Dimensionamento dell’accumulo stazionario

Il dimensionamento dell’accumulo stazionario indicato in Fig. 18 è stato fatto considerando la contemporanea presenza in stazione di n.2 autobus in ricarica, pur prevedendo una terza colonnina per il 5° autobus in riserva. La simulazione dell’esercizio della stazione, estesa ad 1 ora, è compendiate nel diagramma di Fig. 20.

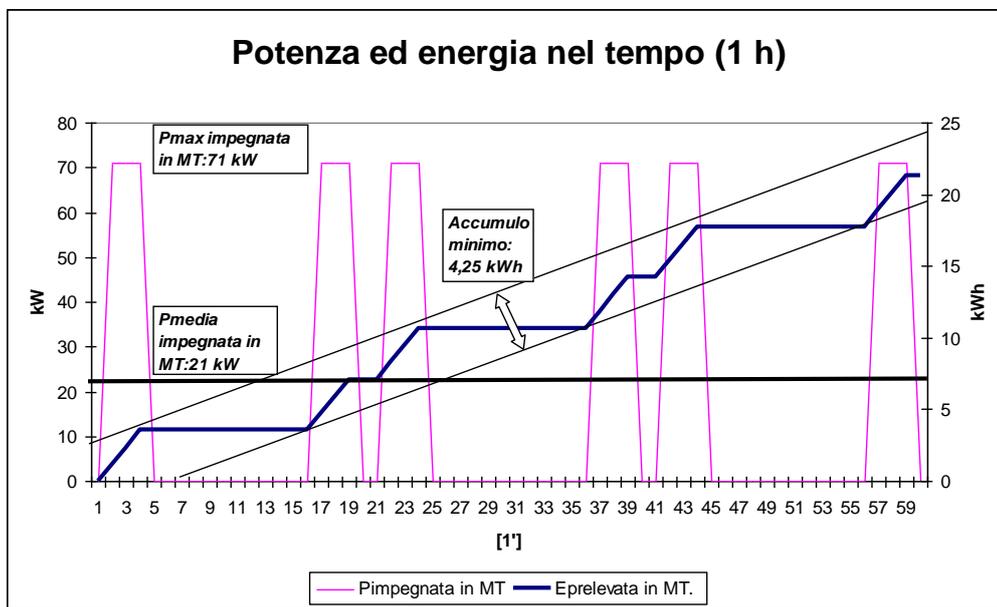


Fig. 20. Andamento nel tempo delle potenze impegnate e dell’energia prelevata

Considerando quindi un accumulo stazionario da 5 kWh, dal punto di vista energetico questo risulterebbe sufficiente al contemporaneo rifornimento di due mezzi, Fig. 21.

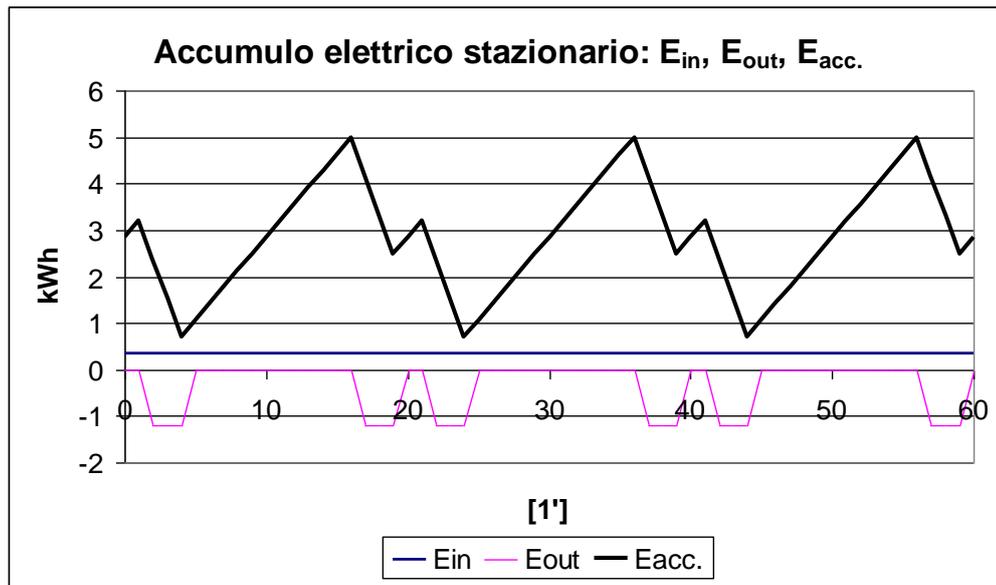


Fig. 21. Andamento nel tempo dell' energia nell'accumulo

Dal punto di vista della potenza, però, scaricare un accumulo da 5 kWh ad una potenza di 50 kW comporta correnti dell'ordine di 10C, che non sono accettabili.

Sono invece possibili, con le batterie di potenza, correnti in scarica di 5C e quindi il contenuto energetico minimo dell'accumulo dovrà raddoppiare, portandosi a 10 kWh, cui corrisponde una potenza di 50 kW, come riportato in Fig.19.

In Fig.22 è raffigurato un sistema d'accumulo di caratteristiche analoghe a quello necessario al caso in oggetto. Si noti la presenza dei ventilatori per la gestione termica del sistema.



Fig. 22. Impianto di accumulo stazionario della funicolare di Bergamo: prove di collaudo in ENEA

7.2. Il convertitore DC/DC [20]

I convertitori di base maggiormente utilizzati per rapporti di trasformazione non molto elevati né troppo piccoli e quando non è necessario l'isolamento galvanico tra ingresso e uscita sono abbastanza economici, ed il costo di un convertitore da 40-50 kW è dell'ordine dei 4-5000 €. Ne abbisognano 3, una per ogni colonnina di ricarica, per cui il costo totale può essere stimato in 12.000 €.

In questo caso, però, poiché sembra necessari l'isolamento tra ingresso e uscita (la normativa non è molto chiara a riguardo), sembrerebbe necessario impiegare convertitori isolati.

L'isolamento tra ingresso e uscita comporta necessariamente l'impiego di un accoppiamento magnetico, ovvero un trasformatore, dimensionato per la massima potenza che il convertitore deve gestire. Tale trasformatore, per ovvi motivi di ingombro e peso, deve funzionare a frequenze molto più elevate di quella industriale. La tensione di alimentazione del trasformatore ad alta frequenza è ottenuta tramite un convertitore CC/CA. Data la natura dei convertitori in oggetto, a valle del trasformatore deve esserci uno stadio CA/CC ad alta frequenza.

Tali convertitori pertanto, da un punto di vista funzionale, devono necessariamente essere costituiti dai seguenti stadi (fig. 23):

1. convertitore CC/CA ad alta frequenza;
2. trasformatore ad alta frequenza;
3. raddrizzatore ad alta frequenza.

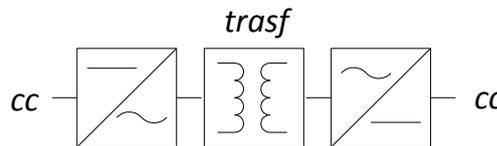


Figura 23. Schema di principio di un convertitore CC/CC isolato.

Lo schema di macchina studiato dall'Università dell'Aquila prevede l'utilizzo di n. 4 convertitori, Fig. 24:

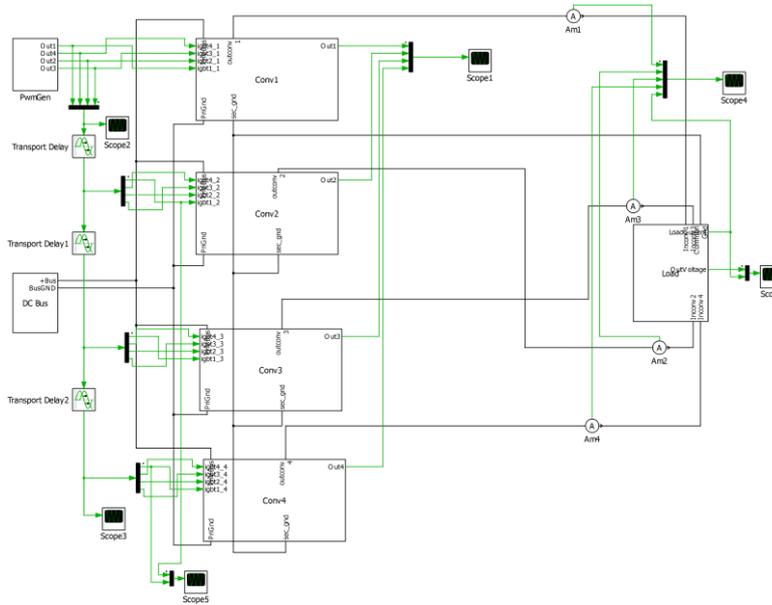


Fig. 24 - Schema di macchina

L'utilizzo di più convertitori permette non solo di ridurre la loro potenza a circa un quarto dell'intera potenza richiesta dal pacco batterie, ma anche di adottare la tecnica dell'interlacciamento (interleaving) in modo tale da avere un ripple di tensione in uscita di frequenza pari a 80 kHz, otto volte più elevata di quella di commutazione (ogni convertitore, essendo di tipo simmetrico, genera due semionde nel periodo T).

7.3. Considerazioni sulla soluzione con accumulo stazionario [21]

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 [22]. Potendo erogare potenza in rete, è inoltre 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.

Dal punto di vista dell'impianto, inserendo un accumulo 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, 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.

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.

7.4. Lo ZeroFilo-Bus[23].

Un'interessante evoluzione della soluzione illustrata come n.3 è quella sviluppata nel corso di un progetto in corso con un importante costruttore italiano di autobus, soluzione che prevede la conversione DC/DC a bordo del mezzo, utilizzando l'inverter come chopper-caricabatteria per la regolazione della carica, grazie all'impiego di opportuni induttori [23].

Una possibile architettura del sistema con rete dedicata in c.c., che centralizza la funzione di raddrizzamento nella stazione di interfaccia, è schematizzata in Fig. 24. Nella parte destra della figura è schematizzata una soluzione per il caricabatteria "integrale" a bordo del mezzo,

La soluzione permette di evitare l'installazione di convertitori DC/DC a terra, con un notevole risparmio economico, semplificando inoltre la gestione delle informazioni terra-bordo e riducendo, probabilmente, i problemi legati alla sicurezza d'esercizio del mezzo.

Quest'ultimo punto, in assenza di normativa consolidata per la ricarica in c.c., v'è naturalmente approfondito in sede progettuale, perché è la normativa che segue la buona tecnica e non il contrario.

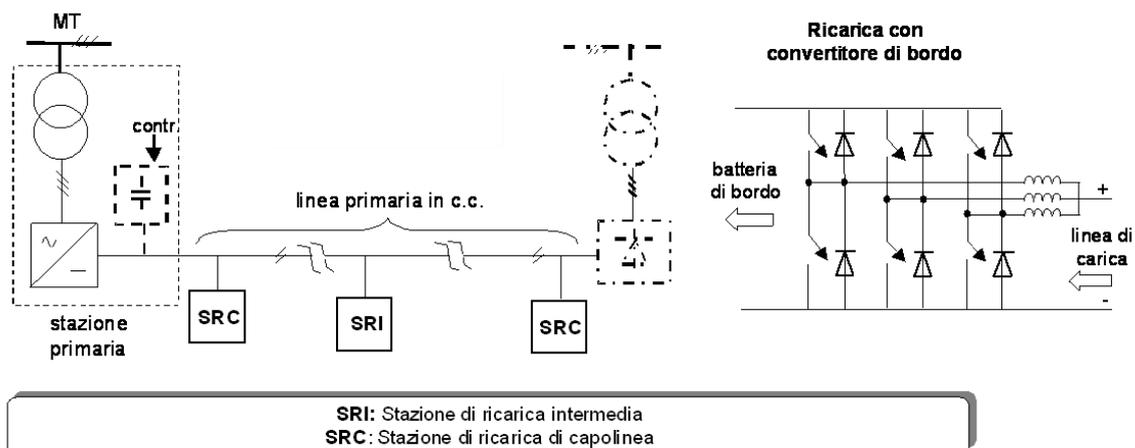


Fig.25

8. Valutazioni economiche

Non è possibile in questa sede un'analisi approfondita degli aspetti economici delle tre soluzioni proposte, per quanto detto e per gli aspetti sistemici (servizio verso la rete etc. del problema).

Alcuni elementi di valutazione delle tre diverse soluzioni sono riportati in Tab. 4:

Tab.4

	<i>Soluzione n.1</i>	<i>Soluzione n.2</i>	<i>Soluzione n.3</i>
Costo stimato	n. 3 colonnine da 43 kW in c.a. (5.000 € cad., compreso trasformatore abbass.) + trasformatore MT (5000 € ³)	60.000 € (n.3 colonnine da 50 KW) + trasformatore MT (5000 €)	30.000 € (stazione da 40 kVA con accumulo da 10 kWh e trasformatore MT) + costo n.3 convertitori DC/DC (minimo 12.000 €)
Pro	Integrazione componenti	Disponibilità sul mercato immediata	Possibilità di utilizzo accumulo stazionario
Contro	Accesso a logiche inverter	Comunicazione bordo/terra	Comunicazione bordo/terra

Conclusioni

In conclusione, risulta evidente che tanto i caricabatteria integrali che le soluzioni tecniche analizzate sono tutte valide per effettuare la carica rapida delle batterie di veicoli elettrici.

Le diverse soluzioni, almeno 3+1 quelle realisticamente proponibili, si differenziano notevolmente in termini di costo (da 20.000 € a 65.000 €) e difficoltà implementative, per cui la scelta del tipo di impianto 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.

Anche l'evoluzione della normativa tecnica, andando di pari passo con lo sviluppo delle tecnologie, costituirà elemento dirimente per la scelta della soluzione più adatta allo specifico caso.

Nel caso del trasporto privato, naturalmente, pur rimanendo valide buona parte delle considerazioni sopra esposte, potrebbero aggiungersene altre legate agli aspetti commerciali, alla facilità di adattamento a mezzi di caratteristiche diverse, alla minore prevedibilità del servizio, alle maggiori difficoltà di gestione dei servizi verso la rete etc.

³ Trasformatore in olio 160 kVA 20000 / 400 V

Riferimenti

1. G. Giuli, M. Mancini, G. Pedè , ENEA, – “Il mercato dell’auto elettrica” – Ingegneria dell’autoveicolo, rivista dell’ATA, Vol. 64 N. 9/10, sett/ott 2011
2. G. Pedè, ENEA, “Electromobility: a real chance for urban transport” MOMO – Car sharing Project, Evaluation Workshop, Roma, 9° giugno 2011
3. G. Giuli, G. Pedè, M. Lelli, ENEA, “Sulla convenienza per il sistema paese dell’incentivazione dei veicoli elettrici”, Convegno AEIT , giugno 2012, Roma
4. G. Pedè , ENEA, “Plug-in Hybrid, quick charging and public transport”, 3rd International Conference ATA, Torino, 2009
5. T. Valentinetti, ENEL Distribuzione, “Stato attuale della normative”, Convegno CEI-CIVES, marzo 2012, Milano
6. D. Bonafede, AEEG, “Lo sviluppo dei sistemi di ricarica per i veicoli elettrici in Italia”, Convegno CEI-CIVES, marzo 2012, Milano
7. G. Pedè, M. Romanazzo, ENEA, “Sistemi di accumulo elettrico innovativi e nuove prospettive per l’elettrificazione del trasporto su gomma”, Congresso ATI 2009, Montesilvano
8. M. Bertoluzzo, G. Buja, Università di Padova, G. Pedè, A. Puccetti, ENEA, “Sistemi di accumulo misto accumulatori-supercondensatori per veicoli elettrici”, Convegno AEIT 2012, Roma
9. T. Pontefract et alii. Waseda University “On-road performance evaluation of the “WEB 1 Advanced” Short Range, Frequent Charging Electric Micro Bus”, EVS -26 , Los Angeles, Maggio 2012
10. L. Festner, G. Karbovski, Foothill Transit, “ Foothill Transit Ecoliner Electric Bus Program”, EVS -26 , Los Angeles, Maggio 2012
11. A. Burke, M. Miller, Hengbing Zhao, University of California Davis, “Fast Charging Test (up to 6C) of lithium titanate cells and modules: electrical and thermal response”, EVS -26 , Los Angeles, Maggio 2012
12. [14] M. Ogasa, “Development of Contact-Wire/battery Hybrid LRV”, Railway Technology No.22-23, 2008.
13. Hikyoo Lee, R. Burns, C. Madden, OLEV Technologies, “Road embedded Wireless Charging for Public Transit and Commercial Fleet Battery Electric Vehicles”, EVS -26 , Los Angeles, Maggio 2012
14. Tomohiro Yamanaka et alii, Saitama University, “10 kW Contactless Power Transfer System for Rapid Charger of Electric Vehicle”, EVS -26 , Los Angeles, Maggio 2012
15. M. Bertoluzzo, M.K. Naik, and G. Buja, “Preliminary investigation on contactless energy transfer for electric vehicle battery recharging”, Proceedings of IEEE 7th International Conference on Industrial and Information Systems, no. 225, pp. 1-6, 2012. ISBN: 978-1-4673-2605-6.
16. G. P. Celata, ENEA, “Tecnologie avanzate per l’efficienza energetica e la mobilità a impatto zero: una sfida per i territori a vocazione turistica del Mezzogiorno”, Il Sole360gradi, ottobre 2011.
17. A. Alessandrini, N. M. Buccino, C. Castaldi, A. Cattivera, C. Galli, F. Ortenzi, R. Ragona, A. Palleschi, F. Sarracco. ENEA-CTL, “Gestione di veicoli elettrici per la mobilità on-demand”, “ Rds/2011/
18. M. Bertoluzzo, G. Buja, Università di Padova, “Progetto di un caricabatteria di bordo derivato da un azionamento di trazione”, Rds/2012/090
19. Università di Pisa, Specifica Tecnica “Realizzazione e sperimentazione di sistemi di accumulo con accumulatori a litio per la gestione di utilizzatori in una logica di “Smart users”
20. A. Ometto, Università dell’Aquila, “Progetto di un convertitore AC/DC per stazioni di ricarica in CC”, Rds/2012/091
21. A. Ometto, F. Parasiliti, L. Di Leonardo, Università dell’Aquila, “Convertitori commerciali per applicazioni automotive e studio di sistemi di carica rapida per veicoli elettrici” Rds/2011/
22. A. Villa*, C. Tornelli*, L. Martini*, A. Brambilla*, L. Piegari**, E. Tironi**(*RSE, **Politecnico di Milano) “Controllo di una microrete sperimentale di distribuzione in corrente continua con presenza di dispositivi di accumulo” Convegno AEIT, 2011
23. P. Bolognesi *, G. Lutzemberger, Università di Pisa “Sistema integrato di autobus elettrici con infrastruttura per ricariche intermedie”, Convegno AEIT 2012, Roma