



Ricerca di Sistema elettrico

Ottimizzazione in ottica smart di un sistema di trasporto con ricarica flash

Manlio Pasquali

OTTIMIZZAZIONE IN OTTICA SMART DI UN SISTEMA DI TRASPORTO CON RICARICA FLASH

Manlio Pasquali (ENEA)

Dicembre 2018

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2017

Area: Trasmissione e distribuzione dell'energia elettrica

Progetto: Sistemi di accumulo di energia per il sistema elettrico

Obiettivo: Studi sulla realizzazione di sistemi ibridi.

Responsabile del Progetto: Pier Paolo Prosini, ENEA

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	5
2.1 IL SISTEMA DI RICARICA FLASH.....	5
2.2 CARATTERISTICHE DI UNA RETE DI RICARICA FLASH	6
2.3 GESTIONE 'SMART' DELLA RETE DI RICARICA	13
2.3.1 <i>Criteri di gestione</i>	13
2.3.2 <i>Strutture dati per la descrizione della rete</i>	15
2.3.3 <i>Esempio di gestione della rete</i>	16
2.3.4 <i>Analisi dei risultati</i>	21
2.3.5 <i>Indicazioni per il progettista</i>	24
2.3.6 <i>Altre possibili funzioni dei condensatori posti a terra</i>	25
3 CONCLUSIONI.....	28
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	29

Sommario

Il presente documento si inserisce nello studio coordinato dall'Enea sui sistemi di ricarica Flash per trasporto pubblico, studio svolto nell'ambito della ricerca di sistema elettrico.

La ricarica Flash consiste nel ricaricare ad alta potenza e bassa energia, in brevissimo tempo, decine di secondi, il veicolo (Bus) ad ogni una/due fermate fornendogli l'autonomia necessaria per giungere al successivo punto di ricarica.

Lo studio svolto finora ha preso in considerazione le caratteristiche della stazione di ricarica e quelle del veicolo, fino a giungere alla realizzazione di un prototipo di entrambi, ma non ha preso in considerazione la gestione di insieme di più linee di trasporto e più stazioni di ricarica.

Il presente lavoro introduce questo aspetto del problema, fornisce i criteri di costruzione di una linea Flash Charge e della sua gestione, a scopo illustrativo viene presentato un esempio applicativo semplificato e ne vengono analizzati i risultati. Oltre a questo a fine lavoro vengono anche discussi brevemente possibili utilizzi alternativi dei supercondensatori che equipaggiano la stazione di ricarica di terra.

Il lavoro costituisce una introduzione al problema della costruzione/gestione della rete, problema che potrà essere approfondito in attività successive.

1 Introduzione

Nell'ambito delle attività della ricerca di sistema elettrico Enea ha introdotto il tema della Flash Charge per il trasporto pubblico, ovvero la ricarica veloce di un Bus elettrico equipaggiato con dei supercondensatori di bordo, che vengono ricaricati ogni una/due fermate (800-1000 m) in un tempo di 15-30 s e dotati dell'energia necessaria per giungere al punto di ricarica successivo.

La Flash Charge richiede che anche a terra siano previsti dei supercondensatori, e presenta il vantaggio che, grazie agli SC di terra, non richiede alla rete elettrica primaria una elevata potenza di ricarica.

Lo studio svolto finora ha permesso di arrivare alla realizzazione di una stazione di ricarica e a quella di un Bus dotato di un sistema di accumulo misto batterie/supercondensatori e di un pantografo che gli permette di essere ricaricato dalla stazione di terra.

Il presente lavoro estende lo studio alla rete di ricarica nel suo insieme, la rete è vista come l'insieme delle stazioni di ricarica, delle fermate, delle varie linee di Bus che percorrono i loro itinerari ed hanno bisogno di essere ricaricati ad ogni una/due stazioni.

Lo studio prende in considerazione il tema della definizione delle caratteristiche della rete e della sua gestione, il lavoro costituisce un primo approccio al problema ed ha lo scopo di evidenziare le principali problematiche connesse a questa attività ed il modo di risolverle.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

2.1 Il sistema di ricarica Flash

La figura 1 presenta il sistema di ricarica Flash già descritto in [1],[2].

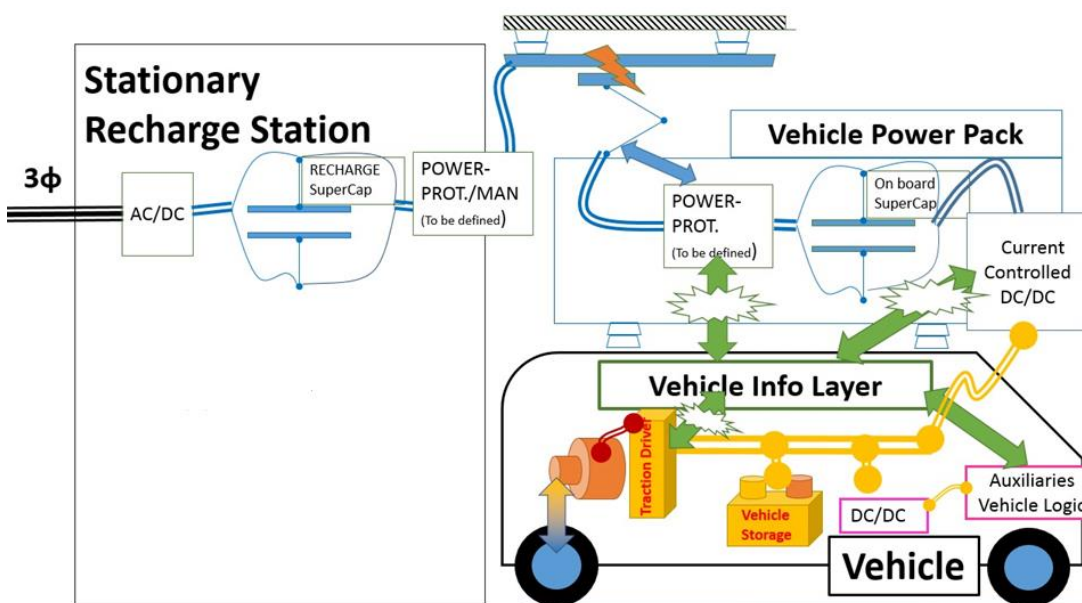


Figura 1. Sistema di ricarica Flash proposto da Enea

La particolarità del sistema proposto da Enea è nella presenza dei supercondensatori a bordo del veicolo ed a terra, nella stazione di ricarica: la rete elettrica ricarica a bassa potenza i condensatori in un tempo 'lungo'

dell'ordine dei minuti, al passaggio del veicolo i condensatori di terra si scaricano su quelli di bordo in breve tempo, ad altissima potenza.

Il vantaggio di questa soluzione è che la rete primaria viene disaccoppiata dal veicolo, fornisce l'energia di trazione al Bus, ma lo fa a bassa potenza, non viene quindi sovraccaricata dalla presenza della rete di ricarica del Bus; il limite è invece nel fatto che i condensatori possono immagazzinare una quantità limitata di energia e di conseguenza assicurano al veicolo una autonomia limitata dell'ordine dei centinaia di metri/ un chilometro, di conseguenza occorre prevedere diversi punti di ricarica durante il percorso.

Per assicurare al veicolo la possibilità di eseguire una missione completa anche in caso di mancanza dei punti di ricarica è stato introdotto a bordo un accumulo misto, costituito da batterie e supercondensatori: le batterie alimentano normalmente i soli servizi ausiliari, ma se i condensatori dovessero essere scarichi possono intervenire portando il veicolo nel punto di ricarica successivo o facendogli percorrere un intero giro senza necessità di ricarica. In una soluzione tradizionale il veicolo viene o ricaricato al capolinea, nel tempo di sosta tra due corse, o ricaricato al deposito quando non è in funzione, è poi possibile adottare una soluzione 'mista' con un biberonaggio nel capolinea seguito da una ricarica notturna completa: nella soluzione proposta da Enea invece il veicolo viene ricaricato ad 'impulsi' durante il tragitto e, per i soli ausiliari, nel tempo di sosta o al deposito. La differenza tra le possibili scelte è nelle potenze impegnate dalla rete durante le ricariche e nel dimensionamento/costo delle singole stazioni di ricarica e del loro numero complessivo: una analisi economica è proposta per es. in [4], [5].

2.2 Caratteristiche di una rete di ricarica Flash

Per definire le caratteristiche di una rete di alimentazione Flash Charge si immagina di costruirla sostituendo/integrando quella esistente in un caso reale.

In figura 2 per esempio è riportata la mappa della rete di trasporto pubblico del Lido di Venezia

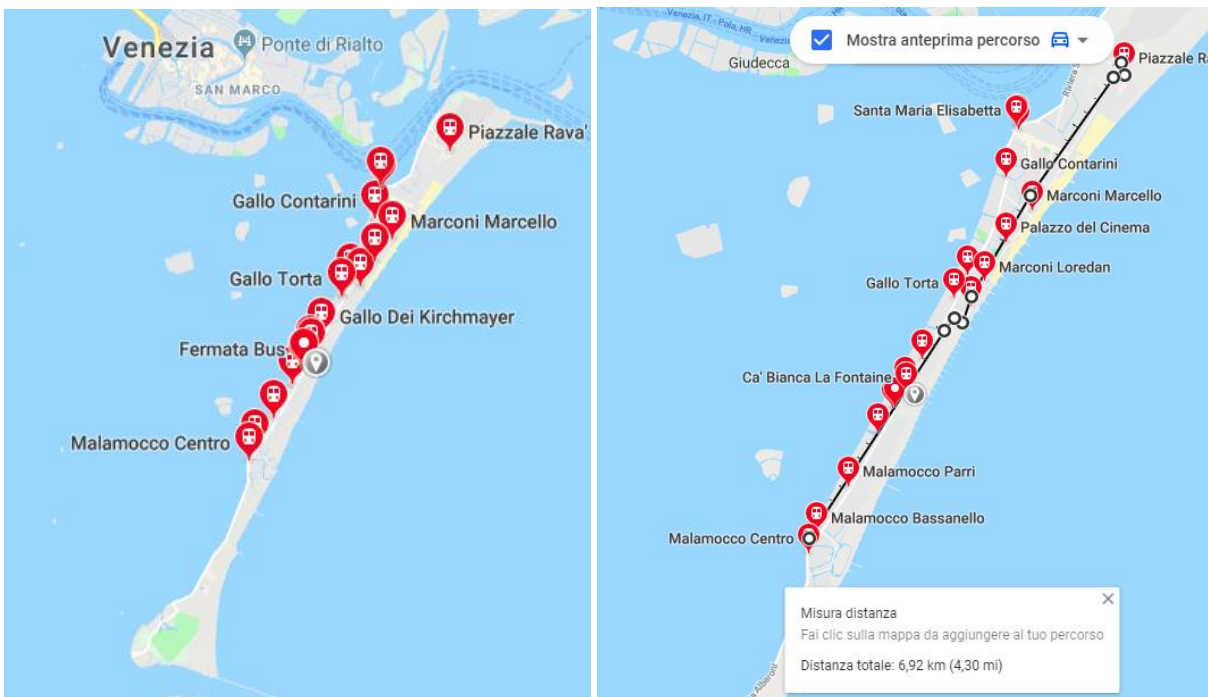


Figura 2. Rete di trasporto pubblico del lido di Venezia

La lunghezza massima delle strade del Lido è di circa 12 km, sono presenti diverse linee di trasporto pubblico, le linee hanno orari, e quindi frequenze di transito nelle stazioni, differenziati tra estate ed inverno e tra giorni feriali e festivi, la lunghezza media delle linee è di 6-7 km.

Le singole fermate sono disposte ad una distanza media di 400-600 metri l'una dall'altra, la grossa parte è disposta sulla strada che percorre la dorsale principale dell'isola, isola che come forma si presenta molto stretta in relazione alla sua lunghezza.

Il dettaglio del percorso di una linea permette di apprezzare la disposizione delle singole fermate:

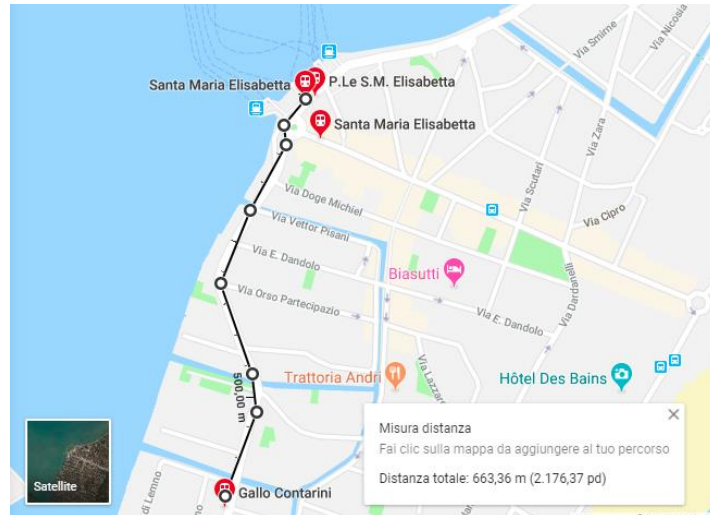


Figura 3. Percorso di una linea - dettaglio

Ogni fermata corrisponde a due pensiline legate al verso di percorrenza del bus: secondo gli studi presentati fino ad ora ad ogni pensilina sarebbe associata una stazione di ricarica con i suoi supercondensatori di terra (es: [4],[5],[1]).

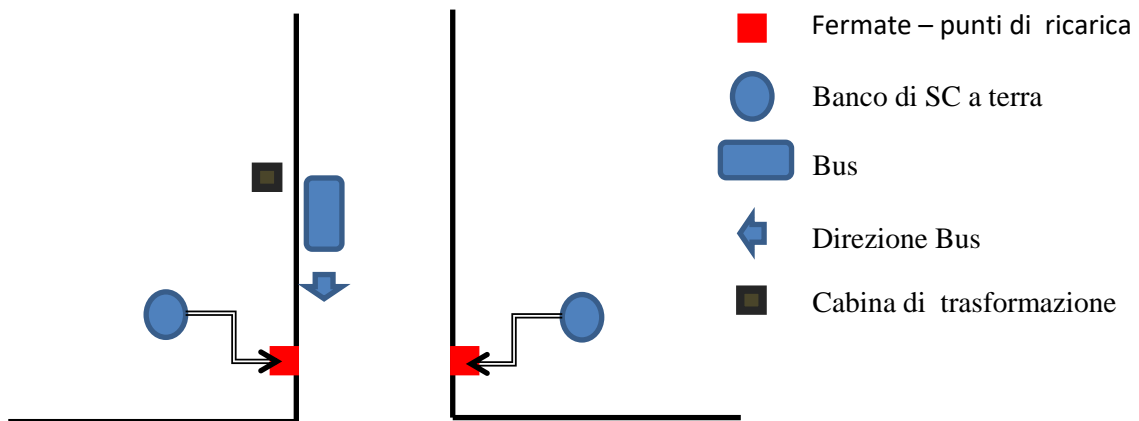


Figura 4. Possibile schema di alimentazione delle stazioni di ricarica

Dal momento che i due lati della strada sono poco distanti tra di loro nasce invece l'idea di collegare le due pensiline allo stesso banco di supercondensatori:

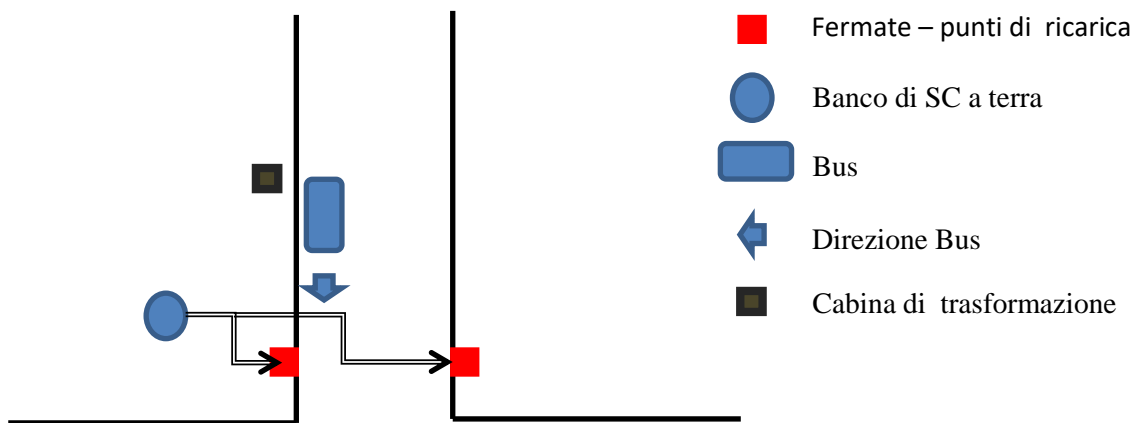


Figura 5. Interconnessione di un solo banco SC

Il vantaggio di questa soluzione è nel fatto che si è risparmiato un banco di SC, ma se la frequenza di passaggio dei veicoli fosse molto elevata, per esempio inferiore a due minuti di attesa tra l'uno e l'altro, la ricarica dei condensatori di terra richiederebbe una potenza elevata rendendo così meno conveniente l'adozione del sistema smart charge. In caso di frequenza di passaggio elevata, in particolare maggiore in una pensilina rispetto all'altra, sarebbe invece possibile migliorare le prestazioni della rete di ricarica interconnettendo le due stazioni ed i rispettivi banchi di supercondensatori.

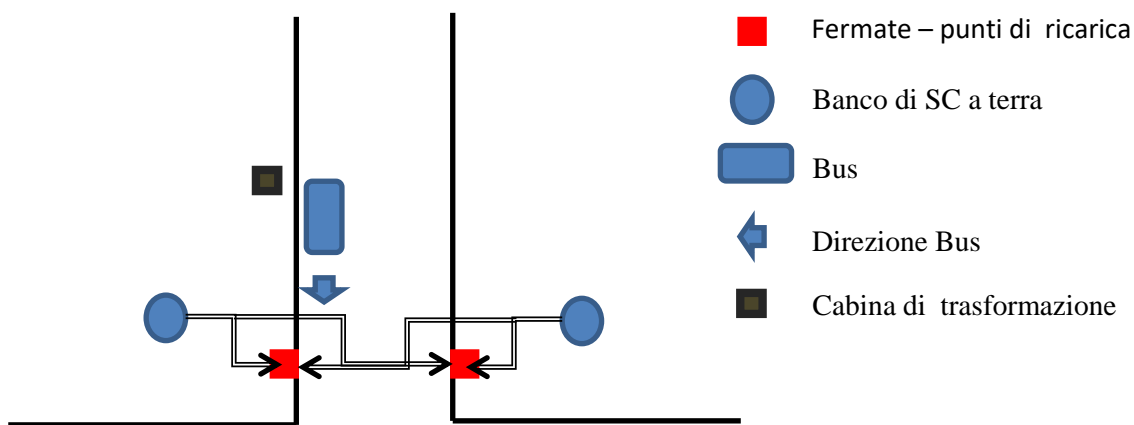


Figura 6. Interconnessione di due stazioni con due banchi di SC

In figura 7 a) è riportato lo schema elettrico della singola stazione di ricarica, che è descritto in dettaglio in [9] mentre in 7 b) è descritta in linea di principio una possibile struttura di una cabina che ospita quattro stazioni di terra che possono essere alimentate separatamente dalla rete e connesse di volta in volta a diverse pensiline: non si entra nel dettaglio di come costruire il Bus di collegamento, che utilizzerà una serie di interruttori e barre.

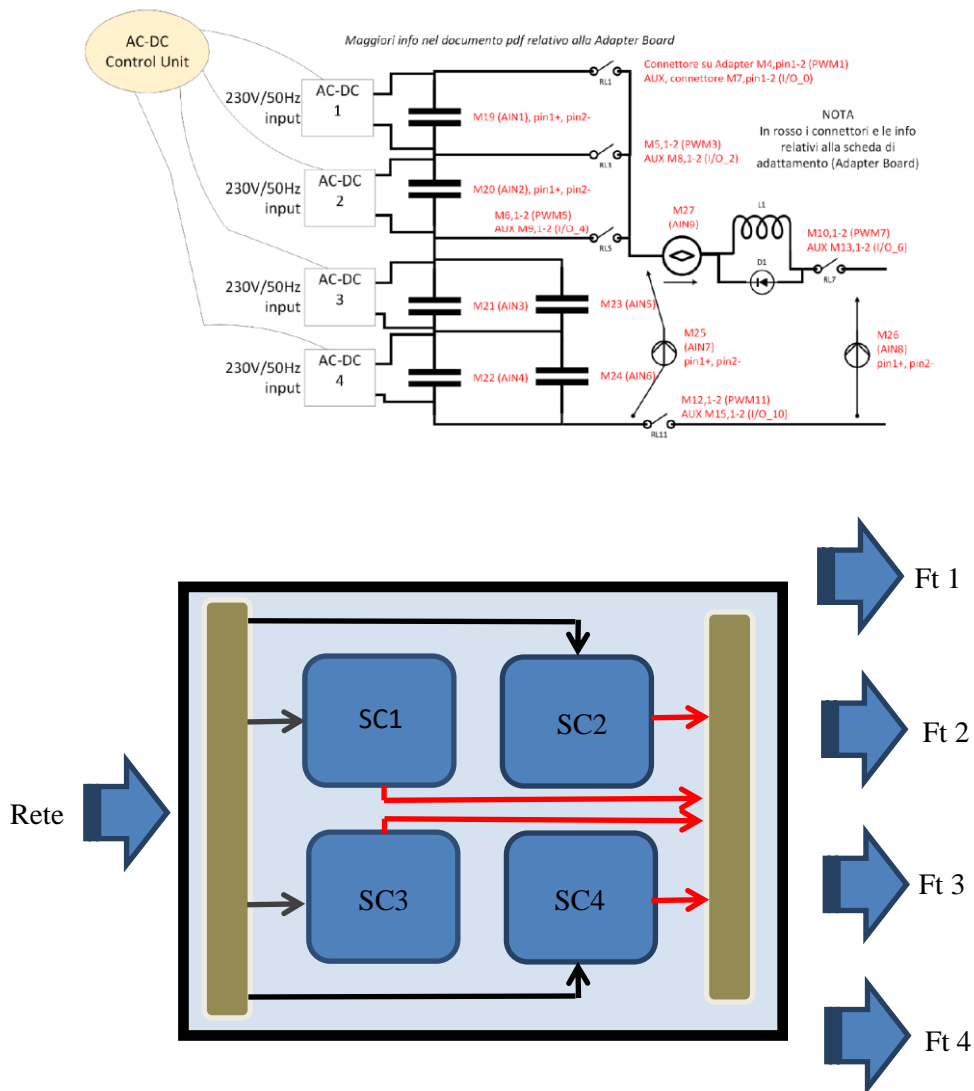


Figura 7. a) Schema circuitale di una stazione flash charge b) ipotesi concettuale di cabina con più stazioni di ricarica

Le prestazioni del sistema possono variare sensibilmente in funzione della variazione della induttanza e della resistenza che collegano i banchi a terra con quelli a bordo del veicolo: di conseguenza il progettista della rete di ricarica dovrà operare delle scelte sulle caratteristiche dei conduttori e sulle distanze delle stazioni che vuole interconnettere.

In base a considerazioni generali tuttavia è difficile pensare di connettere tra di loro delle stazioni la cui distanza è dell'ordine dei km mentre risulta abbastanza agevole collegare due stazioni/fermate poste a meno di 100 metri una dall'altra.

In figura 7 a) sono presenti dei convertitori AC/DC, nello schema ne sono indicati 4: anche questa è una scelta progettuale, potrebbe essere presente come minimo un solo convertitore per accumulo di SC o uno per ogni condensatore. La scelta del numero di convertitori da utilizzare e della loro potenza massima influenza il tempo di ricarica dei condensatori e la potenza richiesta alla rete primaria.

Se i convertitori possono essere controllati in corrente/potenza è possibile variare il tempo di ricarica della stazione e di conseguenza la potenza richiesta alla rete primaria: se i convertitori fossero reversibili sarebbe possibile scambiare energia/potenza con la rete.

Tornando all'esempio della rete di trasporto del Lido di Venezia si osserva come molte fermate siano raggruppate all'interno di incroci o piazze pubbliche, e quindi, come visto precedentemente, possano essere alimentate da più punti.

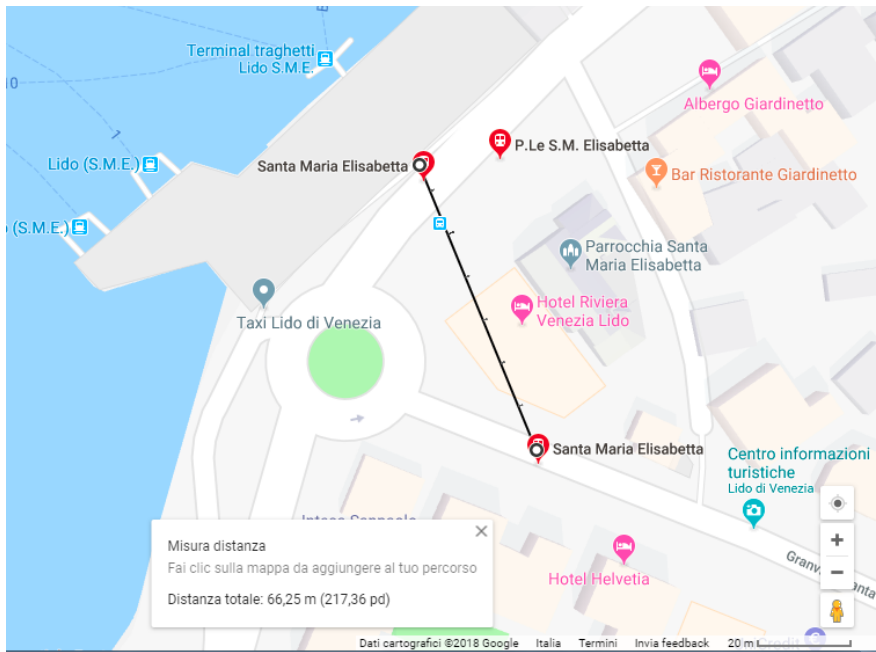


Figura 8. Fermate limitrofe

Ad ogni fermata è associata una tabella oraria che definisce i tempi di passaggio dei Bus con la relativa direzione e che nel caso in esame può essere interpretata come pensilina di ricarica:

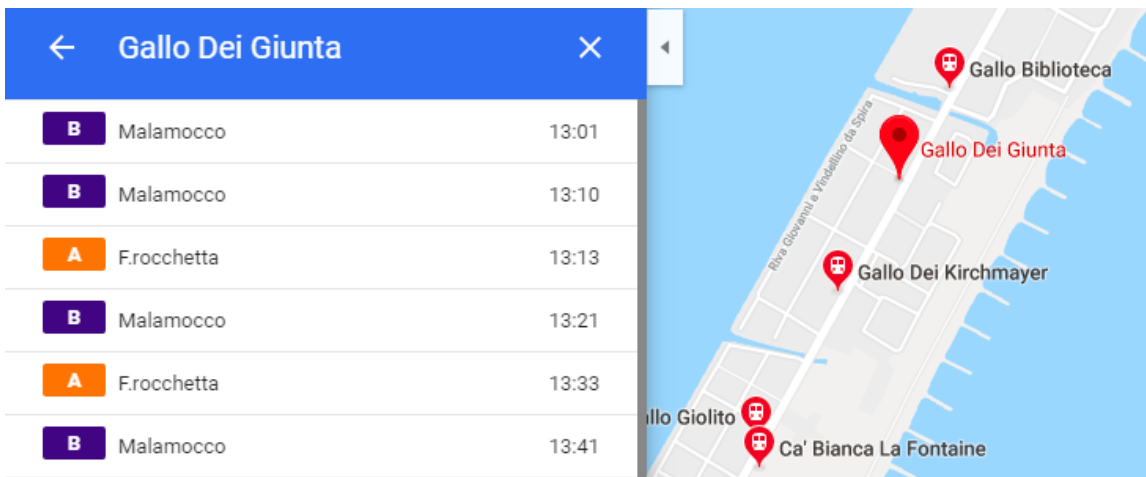


Figura 9. Tempi 'lungi' di passaggio dei Bus

Se i tempi di attesa del passaggio due Bus sono 'lungi' (dell'ordine dei 10' come in figura 9 per esempio) è possibile pensare di utilizzare un solo banco di SC per entrambe le pensiline, se invece sono 'brevi' (inferiori ai 2' per esempio) sarà meglio optare per due alimentazioni separate, tra questi estremi possono esserci casi intermedi come quello mostrato in figura 10.

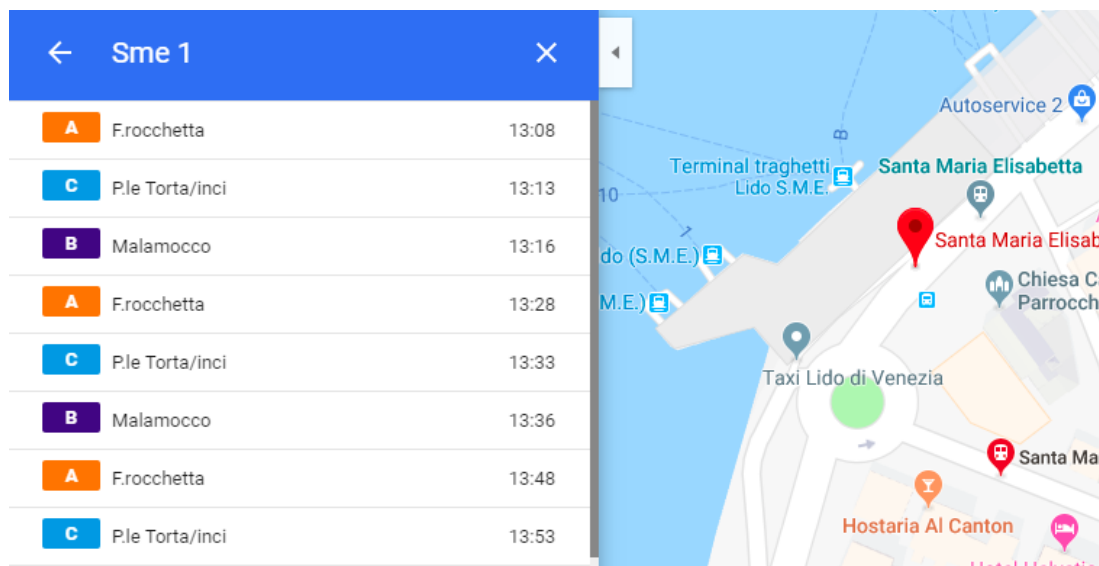


Figura 10. Tempi 'medi' di passaggio dei Bus

La scelta del numero di banchi di SC di terra da impiegare, dei collegamenti reciproci tra punti di ricarica e delle potenze dei convertitori che ricaricano gli stessi Supercondensatori è legata alle caratteristiche della linea di trasporto, alla distanza reciproca delle fermate, alla frequenza di passaggio dei Bus, a criteri di economicità dell'investimento ed all'impatto che si vuole avere, in termini di potenza prelevata, sulla rete elettrica.

La base di partenza per il dimensionamento del sistema è l'energia richiesta dal Bus per percorrere la tratta tra le due stazioni di ricarica, da questa si deduce l'energia e la potenza erogate dal banco di condensatori di terra per poi proseguire fino a costruire tutta la struttura della rete.

La figura 11 presenta una generica struttura di una rete di alimentazione Flash Charge.

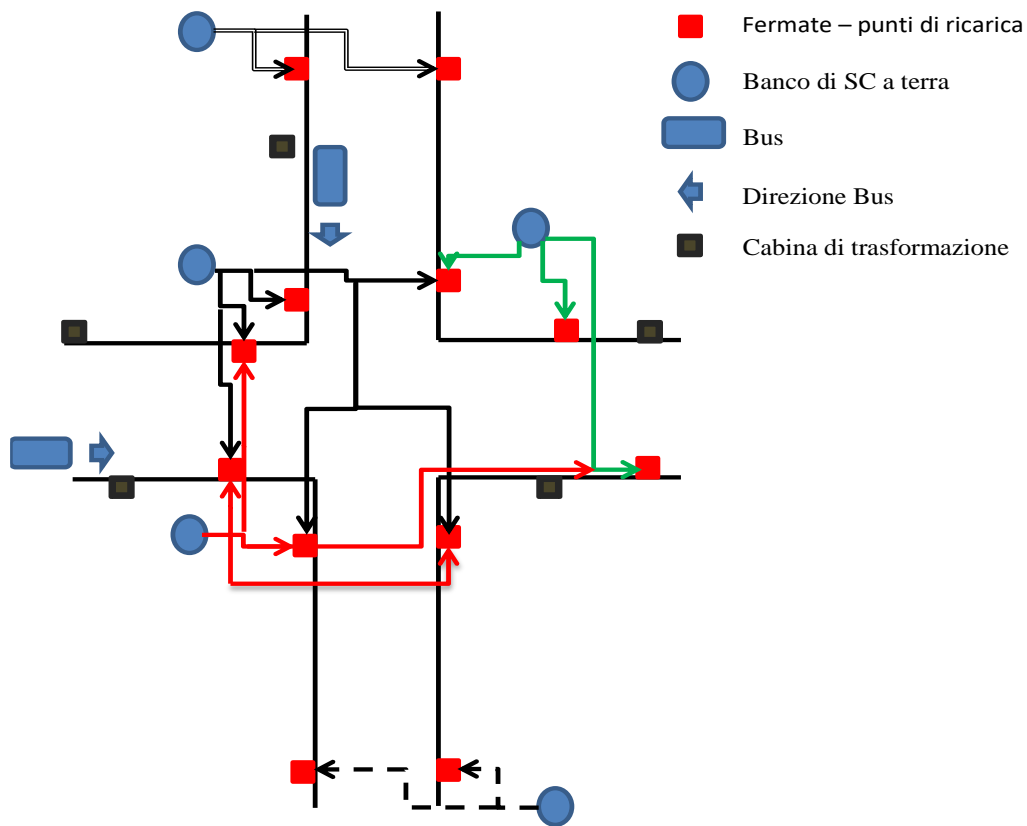


Figura 11. Possibile struttura di una rete Flash Charge

La rete non viene più vista come una struttura stazionaria costituita dall'insieme di stazioni di ricarica separate tra di loro e che agiscono in modo indipendente l'una dall'altra, ma come l'insieme delle fermate/pensiline, dei banchi di condensatori a terra, delle possibili interconnessioni tra banchi di SC e pensiline e dei Bus stessi.

La rete diviene quindi una struttura dinamica, che evolve nel tempo in funzione della posizione dei Bus, della loro direzione/velocità e dello stato di carica dei condensatori.

2.3 Gestione 'smart' della rete di ricarica

Una volta costruita la rete di alimentazione dei Bus occorre definire un modo di gestirla, ovvero stabilire in funzione dei passaggi dei Bus quali condensatori a terra vadano collegati alla stazione e la potenza con cui vengono ricaricati.

2.3.1 Criteri di gestione

La figura 12 introduce il problema della gestione della rete smart charge.

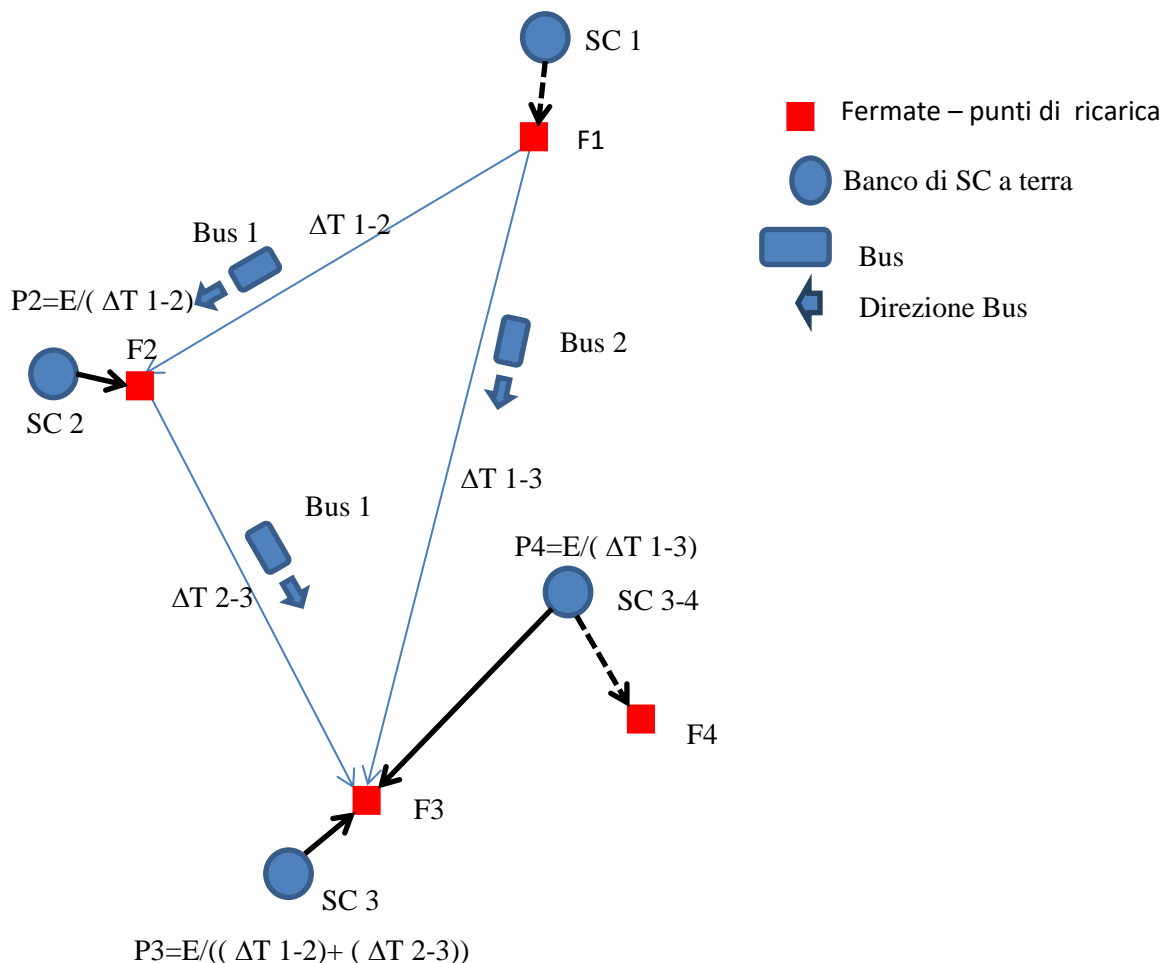


Figura 12. Introduzione alla gestione della rete

Nella figura sono mostrati due bus che seguono due percorsi differenti: il Bus 1 parte dalla stazione 1, passa per la stazione 2 ed infine si porta verso la stazione 3, il bus 2 passa direttamente dalla 1 alla 3.

Le stazioni 1 e 2 sono alimentate ognuna da un singolo banco di SC, la 3 invece è 'puntata' da due banche di condensatori.

Stabilito che l'energia di ricarica del Bus è la stessa ad ogni fermata è possibile definire la potenza di ricarica degli SC in base ai tempi di attesa del loro arrivo in fermata. Nella figura è indicato tra gli altri il banco SC 3-4 che punta a due fermate e che è impegnato nella alimentazione della fermata 3, di conseguenza non potrebbe essere utilizzato per un passaggio contemporaneo di un mezzo nella fermata 4.

Nella situazione semplificata illustrata in figura il Bus1 impiega un tempo T per passare dalla fermata 1 alla 2, ed un tempo 2T per passare dalla 1 alla 3, il Bus 2 impiega il tempo T per andare da 1 a 3: in queste

condizioni, se si utilizzano gli SC3-4 per caricare il Bus 2, e gli SC2 ed SC3 per il Bus 1 ed è P la potenza che serve per ricaricare gli SC2 ed SC3-4 nel tempo T quella per caricare SC3 potrà essere $P/2$.

Nella figura 12 sono descritte le relazioni che possono essere introdotte per scegliere la potenza di ricarica partendo dall'ipotesi progettuale che l'energia necessaria per percorrere il tratto tra due stazioni sia sempre invariante: se l'energia varia è possibile raffinare il ragionamento e considerare l'approccio descritto per es. in [1].

La gestione della rete quindi si può riassumere nella scelta dei collegamenti dei banchi di supercondensatori e della potenza con cui ricaricarli: la scelta può avvenire in funzione di criteri come la minimizzazione della potenza di ricarica degli SC, o dei tempi di ricarica, o altri ancora.

Dall'esempio si evince come per gestire la rete occorre:

- 1) Avere una descrizione topologica della rete e delle possibilità di connessione degli SC di terra
- 2) Avere una descrizione temporale del percorso dei Bus, fermate e tempi di arrivo
- 3) Aver stabilito un valore di potenza e tempo di ricarica minimo e massimo degli SC di terra

La gestione della rete consiste nel definire:

- 1) Le connessioni dei banchi di SC di terra
- 2) Le potenze di ricarica degli SC di terra
- 3) Le eventuali fermate che non possono essere alimentate al passaggio del Bus, che deve recuperare alla successiva

2.3.2 Strutture dati per la descrizione della rete

Per gestire la rete di ricarica tramite un algoritmo occorre definire una struttura dati che possa descriverla, di seguito viene indicata una possibile struttura dati adottabile per questo scopo.

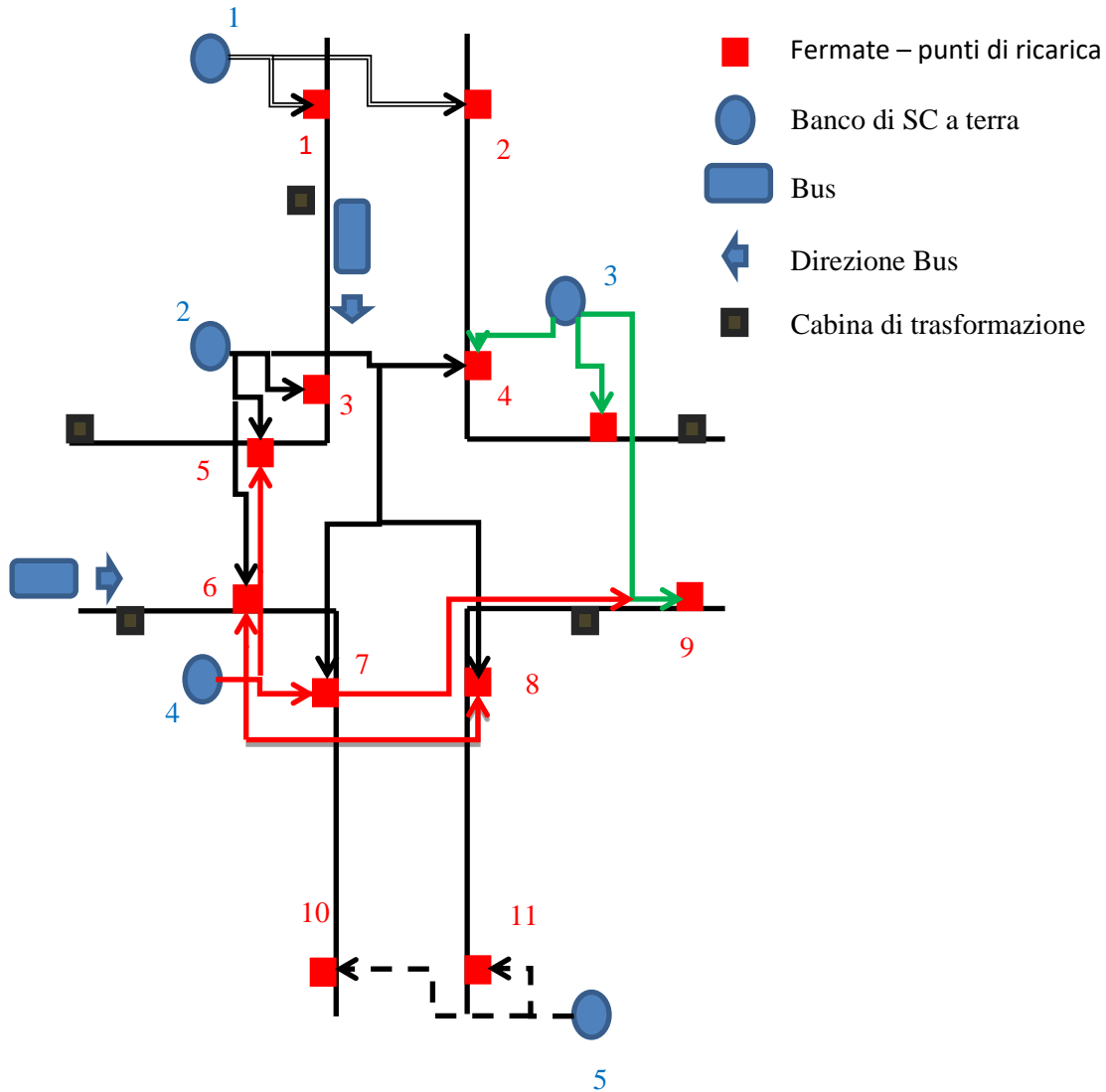


Figura 13. Struttura di una rete Flash Charge – numerazione dei componenti

La figura 13 riprende la 11, ma introduce la numerazione dei singoli componenti della rete. Con riferimento alla figura 12 ogni fermata può essere caratterizzata da un numero, dalla indicazione dei blocchi di condensatori a cui può essere collegata e dai tempi di passaggio dei Bus.

$F(\text{Numero fermata, SC a cui può essere collegata, tempi di attesa Bus})$

Anche i blocchi di SC possono essere descritti con una struttura simile

$SC(\text{Numero blocco, Nfermata a cui è collegato, Attivo/Non Attivo, Potenza di ricarica})$

Il singolo Bus potrebbe essere introdotto come

$Bus(\text{Numero Bus, Fermata, tempo di passaggio alla Fermata})$

Sono possibili ovviamente scelte alternative a quelle proposte, in ogni caso la struttura deve essere coerente con se stessa e costituire la base su cui costruire l'algoritmo di gestione.

In aggiunta ad una caratterizzazione minima, se il lavoro viene raffinato si potrebbero introdurre per esempio informazioni riguardanti le cabine di trasformazione, il loro collegamento con gli SC di terra e la potenza massima di ricarica che gli si vuole riservare ed altre che il progettista potrebbe valutare di volta in volta. Dal punto di vista della programmazione le definizioni delle strutture dati per la descrizione di fermate, blocchi di SC a terra e Bus sono interconnesse, devono quindi essere compatibili tra di loro e vengono scelte dal programmatore.

I criteri di gestione da adottare potrebbero essere quelli di assicurare la ricarica del maggior numero di veicoli possibile, tutti se possibile, e se la rete in un certo momento non ha la possibilità di ricaricarli tutti stabilire quale veicolo escludere dallo step di ricarica; ci potrebbero essere poi quelli della minimizzazione della potenza erogata dalle singole cabine di alimentazione delle stazioni di terra o altri di interesse del gestore della rete.

2.3.3 Esempio di gestione della rete

Fino ad ora si è descritto il processo che porta alla definizione delle caratteristiche di una rete Flash Charge e dei criteri di gestione, in particolare:

- 1) Si è considerato un contesto di riferimento (linea di trasporto pubblico del Lido di Venezia)
- 2) Si sono considerate le fermate della linea di trasporto ed i tempi di passaggio dei Bus
- 3) Si è mostrato come scegliere il numero di SC a terra e le loro interconnessioni con le fermate/stazioni di ricarica
- 4) Si è fornito un criterio di gestione degli SC a terra
- 5) Si è mostrata una possibile struttura dati per la memorizzazione delle caratteristiche della rete

Tutto questo è stato fatto in linea di principio: per chiarire i concetti può essere utile introdurre un esempio illustrativo, per quanto semplificato.

Si riprenda in considerazione lo schema di figura 13, riportato di seguito per semplicità di lettura:

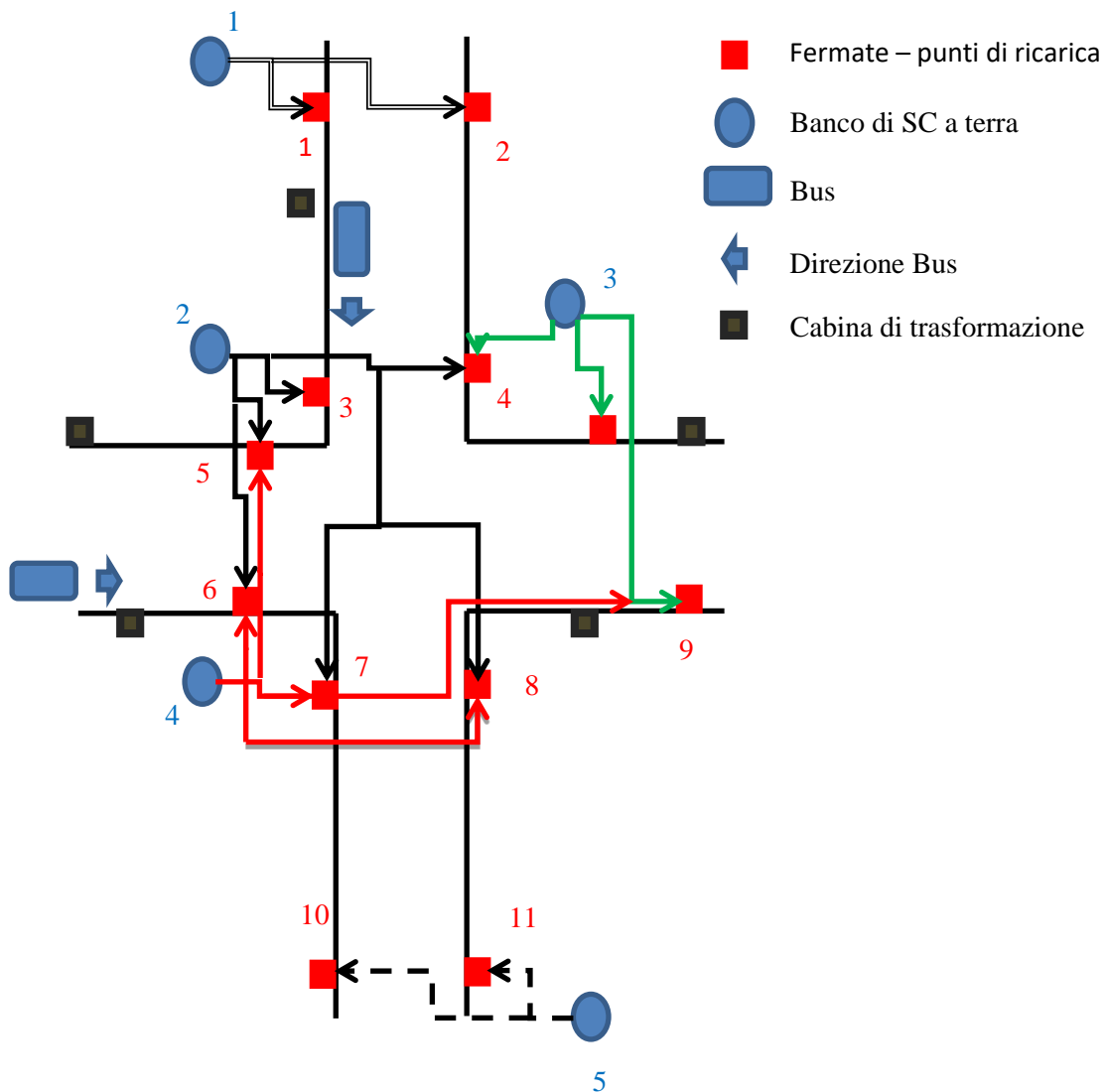


Figura 13. Struttura di una rete Flash Charge – numerazione dei componenti

Si consideri un intervallo temporale di 15 minuti, in essi nella sezione di rete considerata passano 4 bus secondo la seguente sequenza:

Tabella 1. Tempi di percorrenza dei Bus e relative fermate

Tempo (min)	0	3	6	9	12	15
Bus 1	N	1	N	3	N	9
Bus 2	N	6	7	10	N	N
Bus 3	N	11	N	4	2	N
Bus 4	N	N	11	N	N	9

N=nessuna fermata

In tabella 1 il tempo è stato discretizzato con un passo di 3 minuti: se si considera il veicolo di riferimento utilizzato negli gli studi presentati da Enea [10] questo percorre mediamente un km con 400 Wh di consumo, che in 3 minuti corrispondono ad una potenza media erogata dagli SC di bordo pari ad 8 kW: in questo esempio si stabilisce di caricare gli SC di terra con 400 Wh ad una potenza massima di 8 kW per poi scaricarli sul Bus in un tempo di decine di secondi.

Stabilita la potenza di ricarica massima degli SC sono possibili diverse alternative:

- 1) Adottare una sola potenza di ricarica
- 2) Adottare una potenza minima ed una massima di ricarica settabili in modo continuo
- 3) Adottare un set di valori discreto di potenze di ricarica

Le diverse alternative implicano anche i diversi tempi di ricarica che possono essere considerati nei vari casi, e quindi una differente gestione temporale degli SC lato terra.

Nell'esempio che si vuole fare per apprezzare la diversa gestione della rete di ricarica si metteranno a confronto le opzioni 1 e 3: per la 1 la potenza sarà di 8 kW, per la 3 si stabiliscono tre soglie 8, 4 e 2.7 kW, corrispondenti a tempi di ricarica degli SC pari a 3,6 e 9 minuti.

Dalla tabella 1 si evince la tabella 2, che fornisce il numero di Bus passanti per ogni singola fermata al tempo considerato

Tabella 2. Tempi di percorrenza ed occupazione delle fermate

Tempo (min)	N Bus F1	N Bus F2	N Bus F3	N Bus F4	N Bus F5	N Bus F6	N Bus F7	N Bus F8	N Bus F9	N Bus F10	N Bus F11
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
6	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
9	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0
12	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	<u>2</u>	0	0

In tabella 2 appare la fermata 9 che viene occupata da due Bus in contemporanea: nell'esempio i tempi sono discretizzati e sono relativi ai soli tempi di ricarica degli SC a terra e per contemporaneità si intende che i due bus passano nella stessa fermata nel tempo di sosta, qui non considerato, che può essere anche di oltre un minuto (una sosta di un Bus ed una operazioni di ricarica, con il prototipo realizzato da Enea, ha una durata di 30 s).

Ponendosi nell'opzione 1 e stabilendo una potenza di ricarica continuativa di 8 kW il singolo banco di SC sarà collegato alla fermata di interesse solo nello step temporale precedente al passaggio del veicolo: una possibile evoluzione della configurazione della rete in queste condizioni è rappresentata nella tabella seguente.

Tabella 3. Possibile set dei SC di terra con Pricarica=8 kW

Tempo (min)	C ₁	C _{1F}	C ₂	C _{2F}	C ₃	C _{3F}	C ₄	C _{4F}	C ₅	C _{5F}
0	8	1	8	6	0	0	0	0	8	11
3	0	0	0	0	0	0	8	7	8	11
6	0	0	8	3	8	4	0	0	8	10
9	8	2	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	8	9	8	9	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Nella tabella 3 con C_i sono indicate le potenze di ricarica associate al banco di supercondensatori I e con C_{iF} la stazione di ricarica a cui sono collegati.

Per esempio al tempo t=3' il banco di SC 4 è in ricarica a P=8 kW ed è collegato alla fermata 7, mentre il banco 5 è in ricarica a P=8 kW ed è collegato alla fermata 11.

In tabella 2 al tempo $t=15'$ la fermata 9 è impegnata da 2 Bus, da tabella 3 si evince che i banchi di ricarica per i due Bus saranno il 3 ed il 4.
 Analizzando le tabelle 1 e 3 è possibile visualizzare la posizione dei Bus e la relativa configurazione della rete ad ogni intervallo temporale considerato, ad esempio per $T > 6$ e $T < 9$ si ha la configurazione seguente:

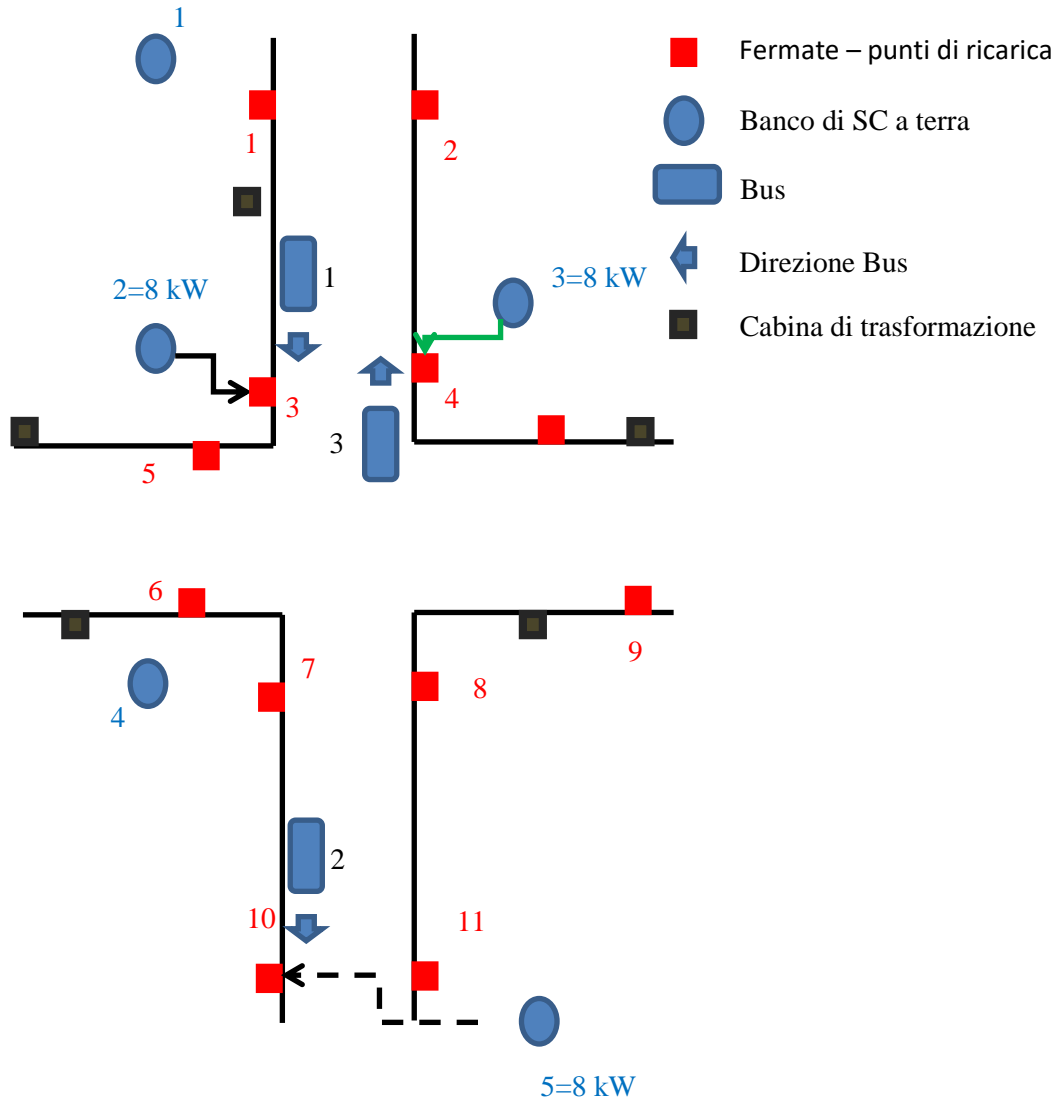


Figura 14. Posizione dei Bus e configurazione della rete di ricarica per $6' < T < 9'$ per $P_{ricarica}=8$ kW

Se ci si pone nell'ipotesi di gestione 3) una possibile ottimizzazione del sistema è riportata in tabella 4.

Tabella 4. Possibile set dei SC di terra con $P_{ricarica}=8,4, 2,7$ kW

Tempo (min)	C ₁	C _{1F}	C ₂	C _{2F}	C ₃	C _{3F}	C ₄	C _{4F}	C ₅	C _{5F}
0	8	1	2.7	3	2.7	4	8	6	8	11
3	2.7	2	2.7	3	2.7	4	8	7	8	11
6	2.7	2	2.7	3	2.7	4	2.7	9	8	10
9	2.7	2	0	0	4	9	2.7	9	0	0
12	0	0	0	0	4	9	2.7	9	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Rispetto alla soluzione di tabella 3, laddove i tempi di passaggio alle fermate e la struttura della rete lo rendano possibile, si possono scegliere configurazioni attive per un intervallo temporale maggiore ma a potenza di ricarica minore del caso precedente.

La figura 15 è l'equivalente della 14 ma costruita nella ipotesi 3)

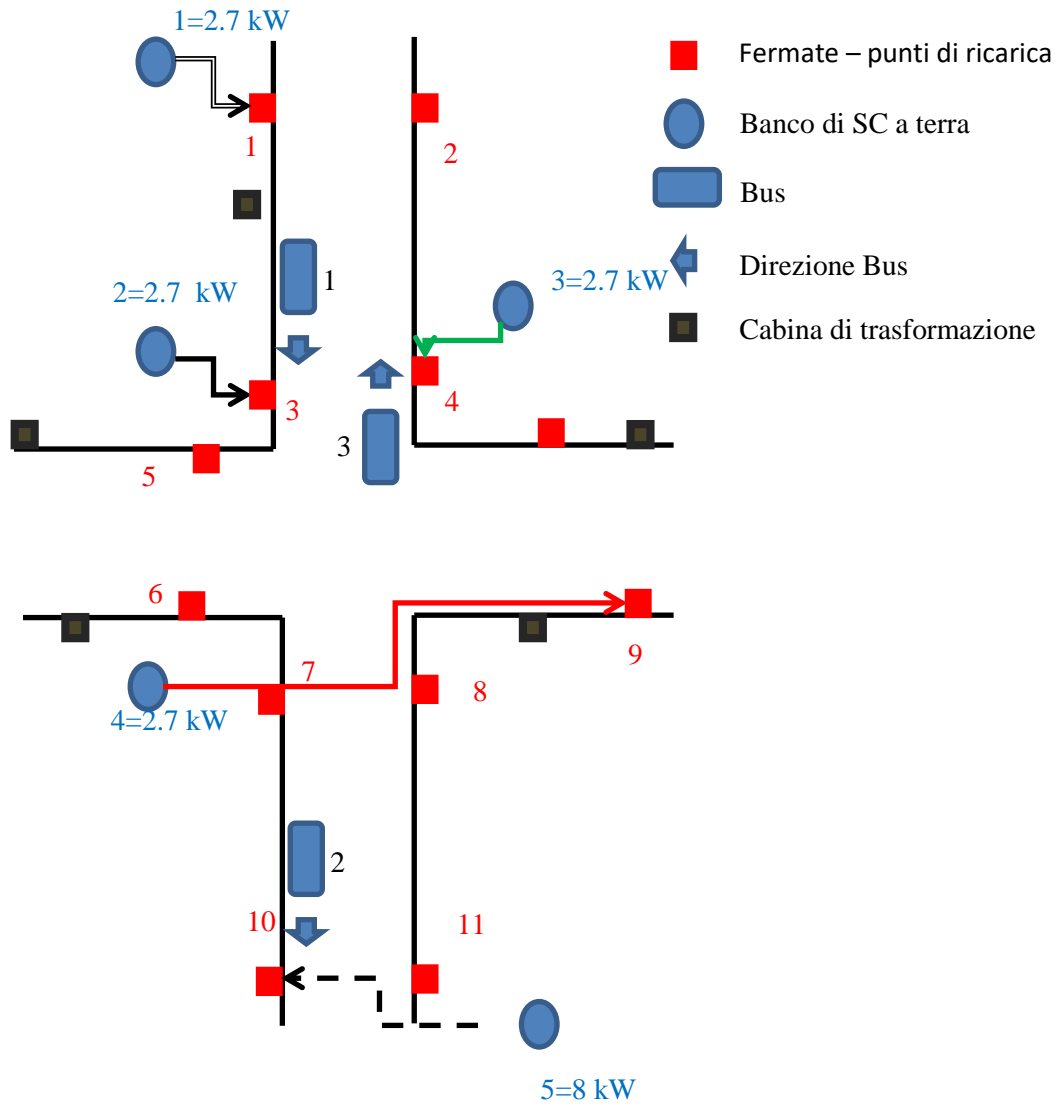


Figura 15. Posizione dei Bus e configurazione della rete di ricarica per $6' < T < 9'$ per $P_{ric}=2.7,4,8$ kW

2.3.4 Analisi dei risultati

Le figure 14 e 15 rendono visivamente la differenza della configurazione di rete che deriva da una differente impostazione delle soglie di ricarica dei banchi di condensatori: per completezza di esposizione si vogliono comparare i risultati ottenuti nell'intervallo di tempo considerato.

La tabella 5 compara i risultati ottenuti con le due soluzioni trovate, con 'OP' è indicata la gestione che prevede le tre soglie di potenza, mentre le ultime due colonne comparano le potenze totali erogate dalla rete primaria nei due casi.

Tabella 5. Comparazione dei risultati

tempo	C ₁	C _{1OP}	C ₂	C _{2OP}	C ₃	C _{3OP}	C ₄	C _{4OP}	C ₅	C _{5OP}	ΣC _i	ΣC _{iop}
0	8	8	8	2.7	0	2.7	0	8	8	8	24	29.3
3	0	2.7	0	2.7	0	2.7	8	8	8	8	16	24
6	0	2.7	8	2.7	8	2.7	0	2.7	8	8	24	18.6
9	8	2.7	0	0	0	4	0	2.7	0	0	8	9.3
12	0	0	0	0	8	4	8	2.7	0	0	16	6.6
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

L'energia totale erogata dalla rete verso i Bus deve rimanere invariata, di conseguenza operando con una gestione rispetto all'altra varia l'andamento temporale della potenza erogata, che negli intervalli considerati dovrà giocoforza prevedere momenti in cui una delle modalità sia più impegnativa per la rete dell'altra e viceversa. Con la gestione OP i singoli banchi di condensatori vengono ricaricati ad una potenza uguale o minore di quella prevista per la gestione ad una sola soglia di Pric, ma i tempi di ricarica sono generalmente più lunghi. Volendo vedere una differenza energetica tra le due impostazioni, a rigori le perdite di rete connesse alla gestione OP saranno inferiori a quelle della gestione ad una sola soglia: infatti le tre soglie sono state scelte considerando che il prodotto $P_{ric} * \Delta T$ rimanga costante e ΔT sia un multiplo di 3 (1,2,3), di conseguenza, approssimando e considerando uguale la tensione nei tre casi, e proporzionale la corrente, si ha:

$$P_j = R_{linea} \left(\frac{I}{n}\right)^2 (n\Delta T) = R_{linea} \frac{I^2 \Delta T}{n}$$

La gestione OP, vista dalla singola cabina di distribuzione, ha il vantaggio di minimizzare le perdite di linea, ma soprattutto di richiedere generalmente una potenza uguale o inferiore a quella della gestione ad una soglia, anche se per tempi più lunghi.

Nello schema di figura 13 le fermate 1,2 e le 10,11 sono servite da rispettivamente dai soli condensatori SC1 ed SC5, nel caso delle fermate 1,2 è apprezzabile il diverso comportamento del sistema di gestione in quanto l'intervallo di passaggio tra due Bus è superiore ai 3 minuti

Tabella 6. Gestione delle fermate 1-2 e del banco SC1

Tempo (min)	N Bus F1	N Bus F2	C ₁	C _{1OP}
0	0	0	8	8
3	1	0	0	2.7
6	0	0	0	2.7
9	0	0	8	2.7
12	0	1	0	0
15	0	0	0	0

Nel caso delle fermate F1 ed F2 è possibile minimizzare la potenza di ricarica connessa al passaggio del secondo Bus, come visibile anche in figura 16.

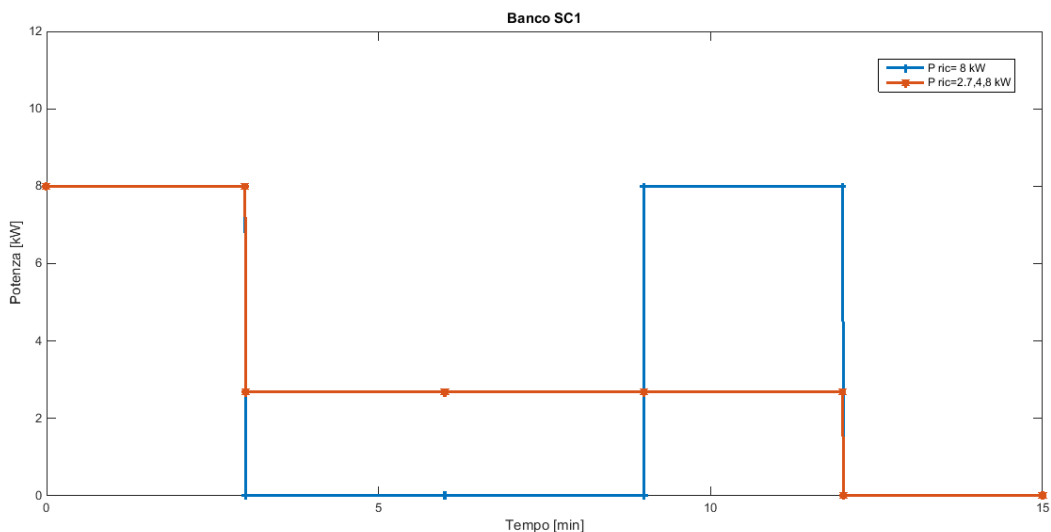


Figura 16. Potenza di ricarica degli SC1 con le due gestioni

Nel caso delle fermate 10 ed 11 non è possibile distinguere le due tipologie di gestione in quanto la tabella oraria ‘obbliga’ i due sistemi a scegliere la stessa potenza di lavoro.

Tabella 7. Gestione delle fermate 10-11 e del banco SC5

Tempo (min)	N Bus F10	N Bus F11	C ₅	C _{5OP}
0	0	0	8	8
3	0	1	8	8
6	0	1	8	8
9	1	0	0	0
12	0	0	0	0
15	0	0	0	0

L’incrocio è servito dai banchi di condensatori 2,3,4

Tabella 8. Gestione delle fermate 3,4,5,6,7 e dei banchi SC2,SC3,SC4

Tempo (min)	N Bus F3	N Bus F4	N Bus F5	N Bus F6	N Bus F7	N Bus F8	N Bus F9	C ₂	C _{2OP}	C ₃	C _{3OP}	C ₄	C _{4OP}
0	0	0	0	0	0	0	0	8	2.7	0	2.7	0	8
3	0	0	0	1	0	0	0	0	2.7	0	2.7	8	8
6	0	0	0	0	1	0	0	8	2.7	8	2.7	0	2.7
9	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	2.7
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	4	8	2.7
15	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0

Qui i due sistemi hanno diverse possibilità di scelta (non esiste una soluzione univoca per la gestione della tratta) ed in generale la soluzione a tre soglie di potenza permette di minimizzare la potenza massima richiesta agli SC, come è possibile vedere graficamente dalle figure seguenti.

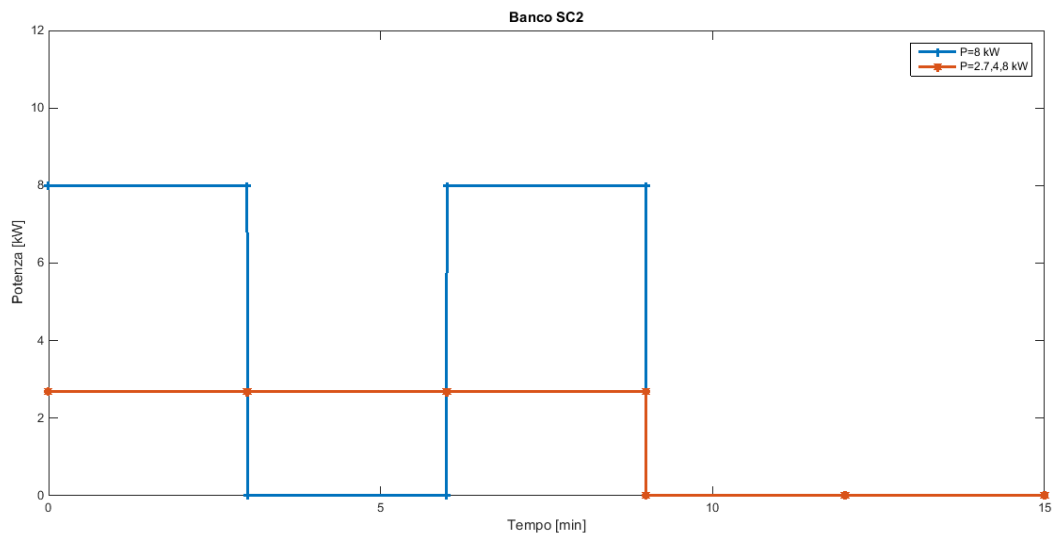


Figura 17. Potenza di ricarica degli SC2 con le due gestioni

Nel caso del banco 2 la potenza di ricarica è sempre sulla soglia minima.

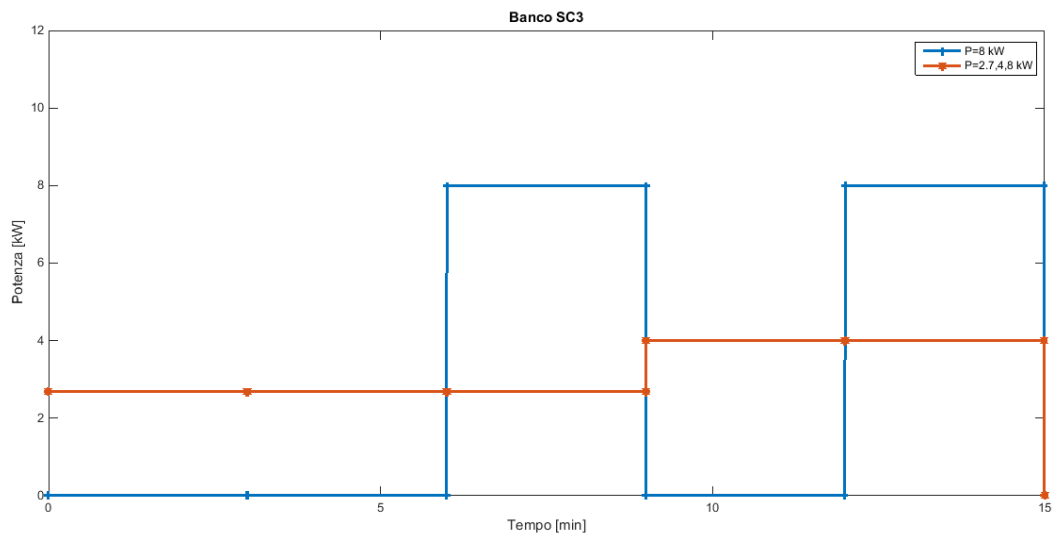


Figura 18. Potenza di ricarica degli SC3 con le due gestioni

Per il banco 3 si arriva alla seconda soglia di lavoro, ma non alla più alta. Diverso ancora è il caso del banco 4, rappresentato di seguito.

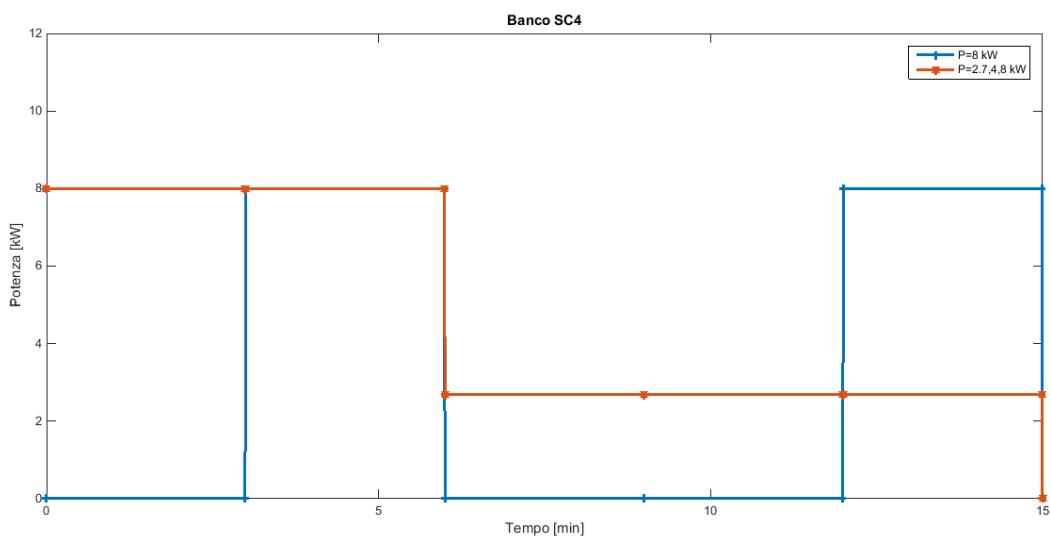


Figura 19. Potenza di ricarica degli SC4 con le due gestioni

Con la strategia OP il banco 4 è sempre utilizzato, rispetto alla strategia di base presenta anche maggiori perdite di linea, ma nel complesso permette ai banchi 2 e 3 di ridurre le loro.

2.3.5 Indicazioni per il progettista

L'esempio considerato non rappresenta un caso reale, ma ha solo un valore illustrativo, per stabilire i set di potenza non si sono utilizzati algoritmi specifici, ma un processo di tentativi su un foglio di lavoro.

Nella realtà occorrerà memorizzare la topologia della rete utilizzando una descrizione come ad es. quella suggerita nel paragrafo 2.3.2 e studiare degli algoritmi di ottimizzazione che potranno rispondere ad un obiettivo specifico o alla combinazione di più obiettivi pesati tra di loro con appositi coefficienti.

Ma l'esempio ha anche messo in evidenza alcune esigenze e criticità che un progettista di una rete Flash Charge dovrebbe tenere in considerazione, per esempio nel caso della gestione dell'incrocio: se fossero passati più bus di quelli presenti in tabella 8 sarebbe stato necessario considerare l'inserzione di un altro banco di condensatori o la possibilità di far 'saltare' un rifornimento a qualche Bus.

Per il caso di Tabella 6 è corretto prevedere un solo banco di condensatori, per la tabella 7 al contrario si potrebbe valutare il beneficio dell'inserzione di un secondo banco.

In generale in un caso reale il progettista sarà vincolato ad inserire un numero di banchi di condensatori di terra minimo, legato alle distanze tra le stazioni di ricarica e alle caratteristiche della rete elettrica e del luogo in cui opera, e potrà decidere se ridondare questo numero minimo in funzione delle frequenze di passaggio dei veicoli e della flessibilità che vuol dare al sistema.

Una scelta importante che dovrà fare è il criterio di ricarica delle batterie di bordo, che in un caso ideale dovrebbero servire solo per alimentare gli ausiliari anche se devono garantire comunque almeno un percorso completo del servizio: se decide di ricaricarle totalmente al capolinea, oppure nella rimessa notturna, o parzialmente nel capolinea e nella rimessa, otterrà un diverso costo dell'impianto ed impatto di potenza sulla rete primaria, sono scelte che vanno valutate di volta in volta.

Ad esempio, se l'impatto di potenza sulla rete delle stazioni fisse di ricarica dovesse essere molto elevato allora potrebbe essere preferibile installare un numero di banchi di SC tale da garantire sempre la ricarica Flash del veicolo, se fosse trascurabile si potrebbe prevedere la possibilità di 'saltare' qualche ricarica in fermata.

2.3.6 Altre possibili funzioni dei condensatori posti a terra

Lo schema di ricarica Flash presentato in figura 1 non è reversibile: con esso è possibile caricare i condensatori dalla linea elettrica e scaricarli su quelli di bordo ma non utilizzare i condensatori per livellare i picchi di potenza richiesti alla rete. Il vantaggio della soluzione proposta in questo studio è la mancanza di una elettronica di potenza associata ai condensatori, il sistema risultante è robusto, economico e presenta un altissimo rendimento, per contro non è flessibile.

E' possibile aumentare la flessibilità del sistema sfruttando l'elettronica di potenza, fino ad arrivare come caso estremo a poter interfacciare i condensatori con la linea elettrica primaria di alimentazione ed anche, se presente, con una eventuale linea elettrica alimentata in continua, secondo lo schema di figura 20.

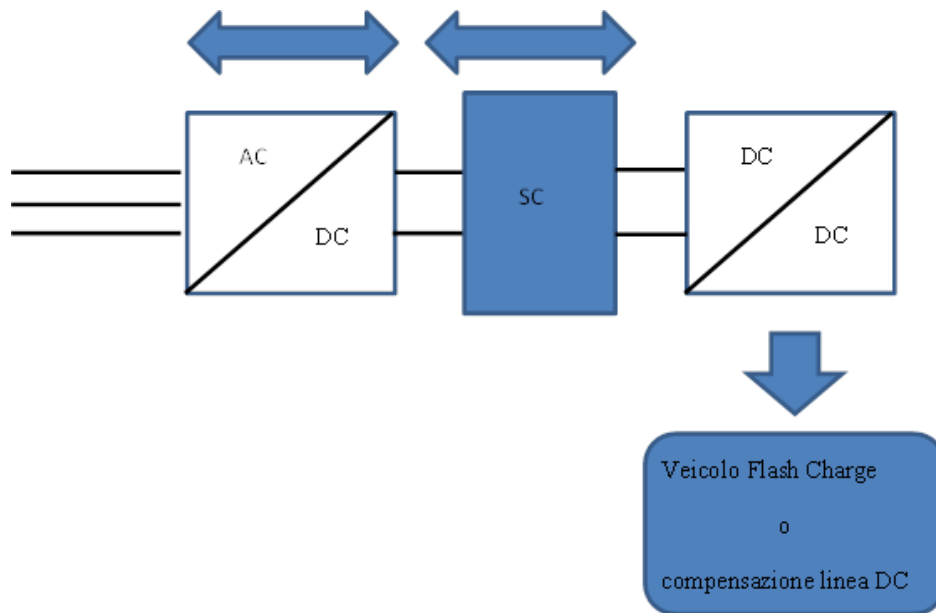


Figura 20. Interfacciamento con una linea in AC ed una DC

Una linea in DC può essere per esempio quella che alimenta un filobus, una linea che sarà soggetta a delle grandi variazioni di carico ogni volta che il mezzo si trova in accelerazione o in frenatura, introducendo i supercondensatori nel filobus si potrebbe realizzare un sistema 'ibrido' tra un filobus ed un Bus Flash Charge, ma la configurazione mostrata in figura 20 può avere un impiego come compensatore di potenza in una normale linea elettrica che alimenta un filobus tradizionale.

Di seguito viene presentata una registrazione della potenza richiesta in linea di un Filobus Van Hool A 330T mentre copre una distanza di 450 metri, in pianura, con la velocità massima di 25 km/h (registrazione eseguita da Enea in collaborazione CTM Cagliari e Kiepe Van Hool).

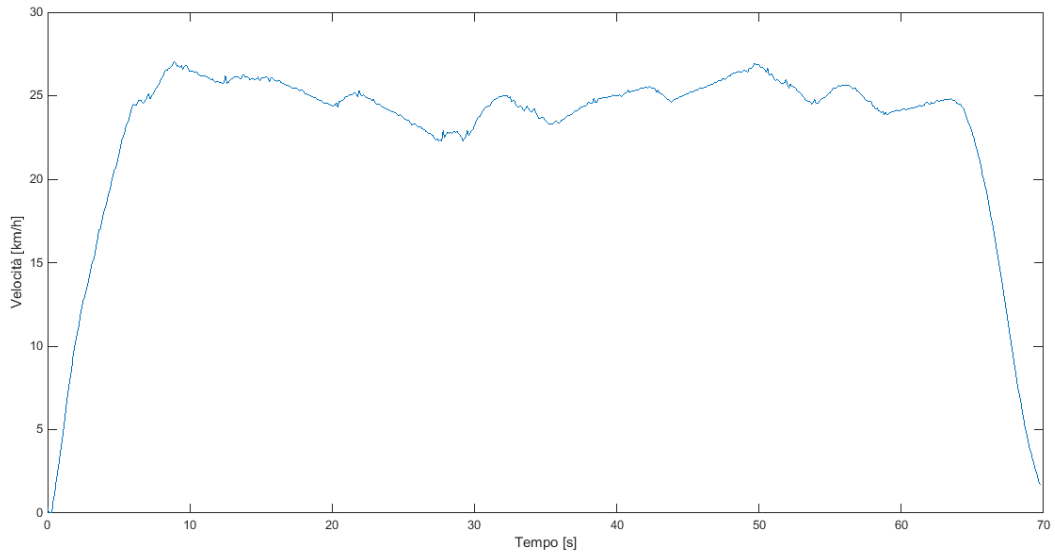


Figura 21. Filobus Van Hool A 330T Profilo di velocità tra due fermate successive

Il veicolo si porta alla velocità desiderata in circa 10 s, per poi proseguire fino alla fermata successiva.

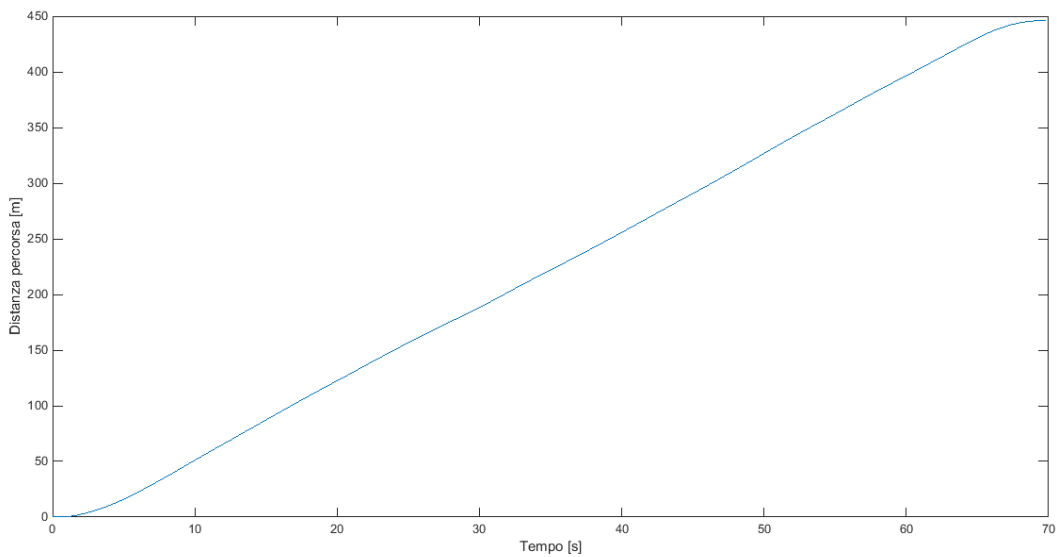


Figura 21. Filobus Van Hool A 330T Spazio percorso tra le due fermate

Per eseguire questa prestazione il veicolo assorbe dalla rete in continua, alimentata a 600 V, una potenza massima superiore ai 100 kW.

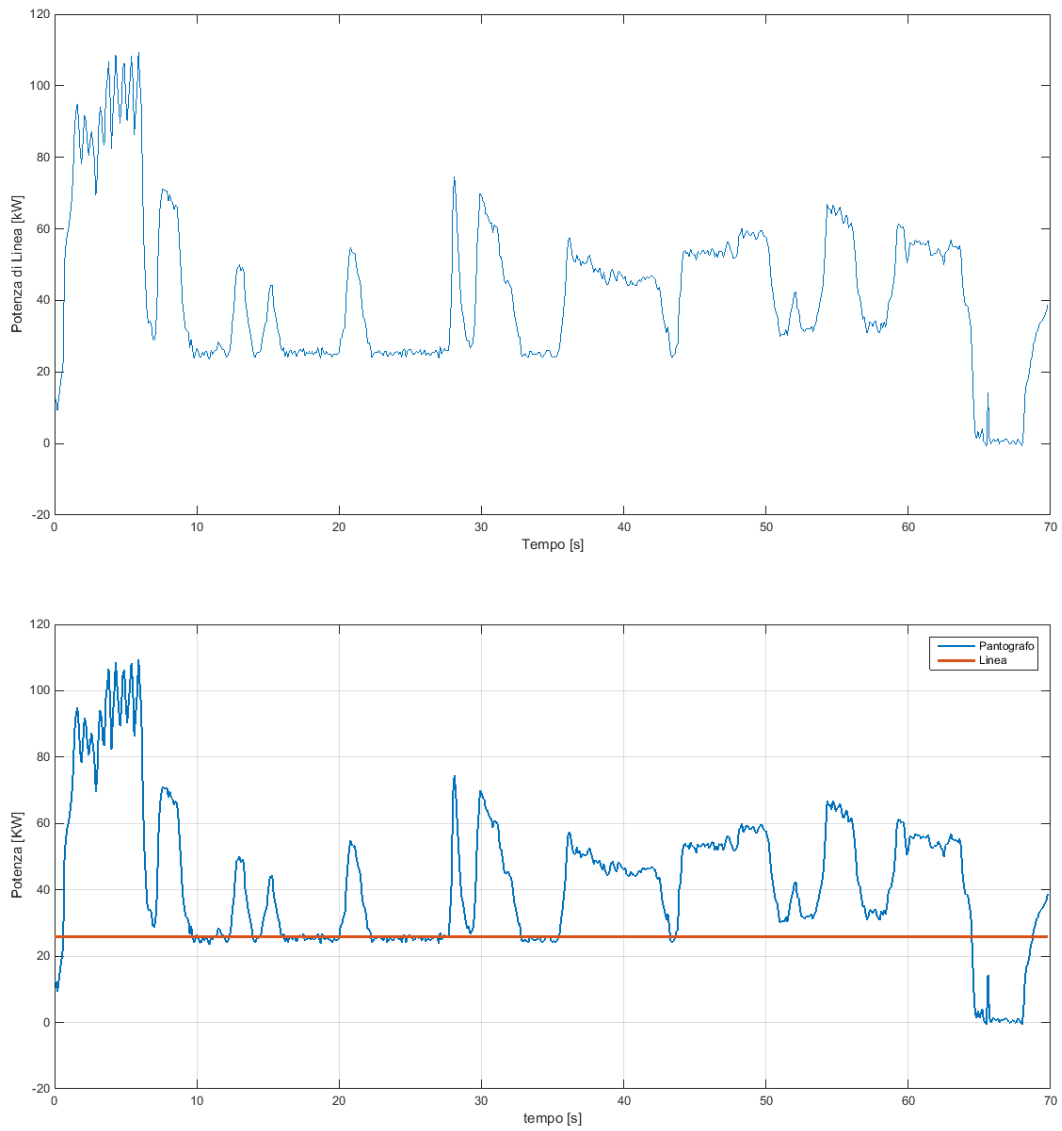


Figura 22. Filobus Van Hool A 330T Potenza assorbita dalla rete in continua

Per coprire la distanza tra le due fermate il veicolo assorbe dalla rete in continua circa 520 kWh.

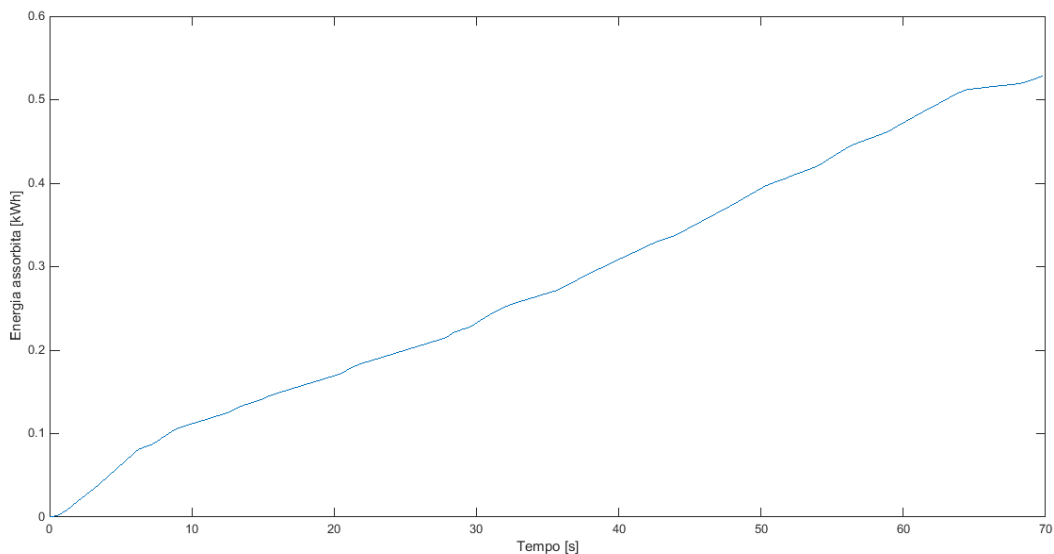


Figura 22. Filobus Van Hool A 330T Energia assorbita dalla rete in continua

E' importante notare che nei primi 10 secondi si rileva la potenza massima assorbita dalla rete, a questa richiesta di potenza corrisponde un assorbimento di energia pari a 112 Wh.

Il sistema di Flash Charge studiato da Enea è stato dimensionato su un veicolo molto più piccolo, in grado di assorbire una potenza massima di 12 kW e di percorrere un chilometro con 400 Wh: immaginando di integrare le due modalità di trasporto la presenza dei condensatori, interfacciati anche con la rete DC secondo lo schema di figura 20 potrebbe essere sfruttata anche per compensare le variazioni di potenza richieste alla rete di alimentazione dei Filobus.

3 Conclusioni

Il lavoro ha mostrato come sia possibile ottimizzare la progettazione e la gestione di una rete di ricarica Flash per trasporto pubblico considerandola come un insieme di stazioni di ricarica, fermate dei Bus e Bus stessi che può essere gestita in modo dinamico collegando le stazioni di ricarica ad una o più fermate e considerando posizione e direzione dei Bus, la rete diviene quindi un 'sistema' che evolve nel tempo in cui lo stato è dato dalla carica residua dei condensatori a terra, dalla posizione/direzione/velocità dei Bus e dal collegamento stazione di ricarica/pensilina.

La struttura iniziale della rete viene stabilita in funzione delle caratteristiche del trasporto pubblico, inteso come numero di linee che passano in una certa zona e frequenza di passaggio ed in funzione delle caratteristiche del territorio in cui vanno installate le stazioni di ricarica a terra.

Lo studio è stato presentato in linea di principio, ma è possibile, partendo dalla impostazione che si è mostrata, applicarlo ad un caso reale, per esempio approfondendo di più l'esempio relativo al trasporto pubblico del Lido di Venezia, che qui è stato mostrato a solo scopo illustrativo.

4 Riferimenti bibliografici

1. F. Ortenzi, M. Pasquali, G. Pedè, S. Costà, F. Sacco “Sperimentazione in scala ridotta di un sistema di ricarica ibrido per travaso di supercondensatori per TPL” report RDS par 2016
2. F. Ortenzi, M. Pasquali, F. Sacco “Sperimentazione in scala reale di un sistema di ricarica flash con pantografo, al banco e su strada” Report RDS Par 2017
3. Fernando Ortenzi, Giovanni Pedè, Silvia Orchi “Analisi delle prestazioni di un sistema di ricarica ibrido per TPL”, report RDS/2015
4. F. Ortenzi, S. Orchi, G. Pedè, Technical and economical evaluation of hybrid flash-charging stations for electric public transport, Industrial Technology (ICIT), 2017 IEEE International Conference on, 549-554
5. Fernando Ortenzi, Silvia Orchi, Pedè Giovanni, Technical And Economical Evaluation Of Hybrid Fast-Charging Stations For Electric Public Transport, 2017, Evs30 - Electric Vehicle Symposium & Exhibition
6. A. Lidozzi, M. Di Benedetto, M. Di Giacomo, V. Sabatini, “Studio di fattibilità di un sistema di ricarica “Flash” per Trasporto Pubblico Urbano (TPL) con trasferimento di energia tra supercondensatori: progettazione e dimensionamento di un sistema in scala ridotta ma significativa ed in scala reale collegato alla rete elettrica di illuminazione pubblica”, report RDS/2016
7. Di Rienzo, F. Baronti, F. Vellucci, F. Cignini, F. Ortenzi, G. Pedè, R. Roncella, and R. Saletti, Experimental Analysis of an Electric Minibus with Small Battery and Fast Charge Policy, ESARS-ITEC 2016
8. M. Conte, A. Genovese, F. Ortenzi, F. Vellucci, Hybrid battery-supercapacitor storage for an electric forklift: a life-cycle cost assessment, Journal of Applied Electrochemistry 44 (4), 523-532
9. A. Lidozzi, L. Bigarelli, V. Sabatini “Progettazione di un prototipo di sistema di ricarica “Flash” per travaso tra supercondensatori per TPL collegato alla rete elettrica” Report RDS Par 2017
10. S. Orchi, F. Ortenzi, G. Valenti, M.P. Valentini, V. Fabrizi “Analisi di elettrificazione del TPL in contesti ITC: lo smart ring dell’Aquila” Report RdS/PAR2013/102