



Ricerca di Sistema elettrico

Analisi di fattibilità tecnica dell'impiego di batterie al titanato di litio e di volani nella ricarica ultrarapida di bus urbani

A. Lidozzi, L. Bigarelli

ANALISI DI FATTIBILITÀ TECNICA DELL'IMPIEGO DI BATTERIE AL TITANATO DI LITIO E DI VOLANI NELLA RICARICA ULTRARAPIDA DI BUS URBANI

A. Lidozzi, L. Bigarelli (Dipartimento di Ingegneria, Università degli Studi ROMA TRE)

Dicembre 2018

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2018

Area: Efficienza Energetica e risparmio di energia negli usi finali elettrici e interazione con altri vettori energetici

Progetto: D.8 Mobilità elettrica sostenibile

Obiettivo: a. Strumenti a supporto del TPL

Responsabile del Progetto: Maria Pia Valentini, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione *“Valutazione di possibili innovazioni sulle stazioni di ricarica fast e flash per la produzione e l'accumulo di energia elettrica”*

Responsabile scientifico ENEA: Ing. Fernando Orteni

Responsabile scientifico Università di Roma Tre: Prof. Alessandro Lidozzi

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI, SISTEMA MINIBUS	5
2.1 STAZIONE DI TERRA CON ACCUMULO ELETTROCHIMICO AL TITANATO DI LITIO	6
2.1.1 <i>Sistema di conversione per accumulo elettrochimico al Titanato di Litio</i>	8
2.1.2 <i>Principali produttori e modelli per accumulatori LTO</i>	9
2.2 STAZIONE DI TERRA CON ACCUMULO ELETTROMECCANICO BASATO SU VOLANI.....	10
2.2.1 <i>Sistema di conversione per accumulo elettromeccanico basato su volani</i>	13
2.2.2 <i>Dimensionamento iniziale per il sistema di accumulo basato su volani</i>	13
3 ESTENSIONE DELL'ANALISI AD UN BUS DI 18 M	14
3.1 STAZIONE DI RICARICA CON SC ED ELETTRONICA DI POTENZA.....	14
3.2 CONFIGURAZIONE DELL'ACCUMULO LTO SENZA ISOLAMENTO GALVANICO.....	16
3.3 CONFIGURAZIONE DELL'ACCUMULO LTO CON ISOLAMENTO GALVANICO	17
3.4 IMPIEGO DI VOLANI ELETTROMECCANICI PER LA RICARICA FLASH ALLA FERMATA	18
4 CONCLUSIONI.....	20
5 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	21
6 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	21

Sommario

Il presente lavoro ha riguardato lo studio di fattibilità preliminare nell'impiego di accumulatori al Titanato di Litio (LTO) o volani elettromeccanici in luogo dei supercondensatori per la stazione di ricarica flash di terra (alla fermata) in applicazioni di trasporto pubblico urbano. L'attività qui presentata prenderà alcuni risultati chiave già illustrati nel corso dei progetti PAR2016 e PAR2017 nell'ambito del trasferimento diretto di energia tra supercondensatori.

Per quanto riguarda la possibilità di impiego di accumulatori elettrochimici LTO, sono stati identificati i principali produttori ed effettuato un primo dimensionamento sia energetico che di potenza con riferimento ad un accumulatore campione. L'analisi così svolta è assolutamente applicabile a qualsiasi altro sistema di accumulo in relazione all'applicazione ed alla missione da svolgere.

L'analisi relativa alla possibile adozione di volani elettromeccanici, è partita da alcuni concetti base, espressioni analitiche, per poi concentrarsi su un possibile dimensionamento della massa rotante. Le procedure applicate hanno portato allo sviluppo di un codice di calcolo in Matlab che potrà se necessario essere utilizzato per il dimensionamento delle masse rotanti, applicando eventualmente anche criteri di ottimizzazione.

Lo studio preliminare ha mostrato che è sicuramente possibile realizzare una stazione di ricarica flash alla fermata con sistemi di accumulo LTO, caratterizzati da elevati correnti di scarica rispetto alla loro capacità amperometrica. Ne risulterebbe però un sistema sovradimensionato dal punto di vista energetico, ovvero, il prelievo di energia durante le fasi di 'travaso' stazione-bus è estremamente modesto rispetto all'energia a disposizione negli accumulatori LTO. L'applicazione a cui ci si riferisce è più di 'potenza' che di 'energia' come si vedrà nel seguito del report. Come punto a favore, è necessario fa notare che sia il volume che il peso del pacco batteria risultano contenuti. Sembrano non essere disponibili informazioni sulla vita media degli accumulatori LTO quando sottoposti a correnti di scarica con c-rate elevati. Questa parte potrà essere oggetto di ulteriori investigazioni, sia di natura analitica che soprattutto sperimentale.

Per l'applicazione oggetto di questo studio, sembra che l'impiego di volani sia per lo meno energeticamente più coerente, essendo sistemi di accumulo di potenza più che di energia. Il dimensionamento preliminare ha fornito alcune caratteristiche che sembrano essere molto promettenti, anche se l'analisi è stata svolta solo da punto di vista tecnico e di fattibilità. La grande flessibilità che può aversi relativamente alla velocità di rotazione, può essere sfruttata per aumentare, compatibilmente con i materiali utilizzati, l'energia disponibile associata alla massa rotante.

L'analisi svolta per un minibus è stata estesa al caso di un autobus da 18 m, quindi con requisiti energetici diversi, ma associati sempre ad un analogo tempo in cui trasferire l'energia necessaria. Questo ha permesso di valutare i requisiti energetici di una eventuale stazione posta alla fermata confrontando i risultati ottenuti con quelli relativi al sistema minibus. Nel caso specifico sono state valutate tre distinte tipologie di sorgenti, quali supercondensatori (SC), accumulatori al Titanato di Litio e volani elettromeccanici.

Anche qui è stato fatto notare il sovradimensionamento energetico relativo all'impiego di accumulatori elettrochimici LTO: ne risulta un sistema dimensionato prevalentemente in corrente piuttosto che in energia. L'analisi estesa ad accumulo con SC e volani ha permesso di dimensionare questi sistemi coerentemente con il fabbisogno energetico, in luogo della corrente di scarica.

1 Introduzione

L'attività oggetto di questo di questo report si inquadra come successiva a quanto svolto nei PAR2016 e PAR2017, nell'ambito delle tecnologie per la ricarica flash per applicazioni di trasporto pubblico urbano. La Figura 1 mostra un'illustrazione di massima dell'architettura del sistema di trasporto pubblico, dove il bus durante la discesa e salita dei passeggeri effettua una ricarica flash in circa 30 s, tramite un pantografo posizionato sul tetto. La stazione di terra posta alla fermata quindi, dovrà essere in grado di trasferire una certa quantità di energia nei 30 s a disposizione. Questo impone la gestione di potenze non trascurabili, che hanno richiesto l'impiego di supercondensatori (SC) come dispositivo di storage.

La presente attività ha lo scopo di valutare dal punto di vista tecnico il possibile impiego di sistemi di energy storage alternativi ai SC, sempre con riferimento alla specifica applicazione. In dettaglio, si andrà a valutare la fattibilità tecnica di accumulatori al Titanato di Litio (LTO) o in alternativa l'uso di volani elettromeccanici.



Figura 1. Schema di una architettura di ricarica flash alla fermata per mezzi di trasporto pubblico urbani.

L'analisi verrà poi estesa al caso di un bus da 18 m che si immagina necessiti della ricarica alla fermata. Per questa specifica analisi si farà riferimento a ipotesi iniziali ricavate da sistemi esistenti, seppur con architettura del sistema di trasporto completamente diversa. In questo caso si procederà alla valutazione della fattibilità tecnica di batterie al Titanato di Litio, volani e supercondensatori, che si immagina faranno parte della stazione di ricarica flash alla fermata.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati, sistema minibus

Il punto di partenza per la valutazione tecnica di sistemi alternativi ai supercondensatori per la stazione di ricarica posta alla fermata, sono i risultati ottenuti dai PAR2016 e PAR2017, dove quest'ultimo ha sostanzialmente validato i risultati proposti inerenti il dimensionamento dell'ESS (Energy Storage System).

Di conseguenza, ci si riferirà al caso che venne denominato 'high voltage' (HV), quindi con il sistema in scala 1:1 per un bus modello Gulliver.

La Tab. 1 mostra alcuni dei risultati ottenuti durante l'operazione di 'travaso' per diverse correnti di soglia (per ulteriori informazioni si consiglia di fare riferimento al report relativo al PAR2016). La condizione che rispetta le specifiche di tempo, ovvero i 30 s ipotizzati per la ricarica flash, sembrò essere il caso con soglie 25-15-10 A; e proprio rispetto a questo caso verrà impostata l'analisi seguente.

Tab. 1 - Tabella riassuntiva delle prestazioni del sistema HV per 'travaso' diretto SC-SC (PAR2016)

Correnti di soglia [A]	Tempo di ricarica [s]	Tensione nominale [V]	Percentuale di ricarica %	Picco di corrente [A]
$10^{-2} - 10^{-2} - 10^{-2}$	~ 95	371.90	98.35	455.3
20 - 10 - 5	32.70	369.70	97.19	470.3
25 - 15 - 10	29.15	369.55	97.11	472.9
30 - 20 - 15	26.75	368.70	96.67	478.2
35 - 25 - 20	24.90	367.80	96.20	482.0
40 - 30 - 25	23.45	366.95	95.75	485.8
45 - 35 - 30	22.20	366.10	95.31	488.8

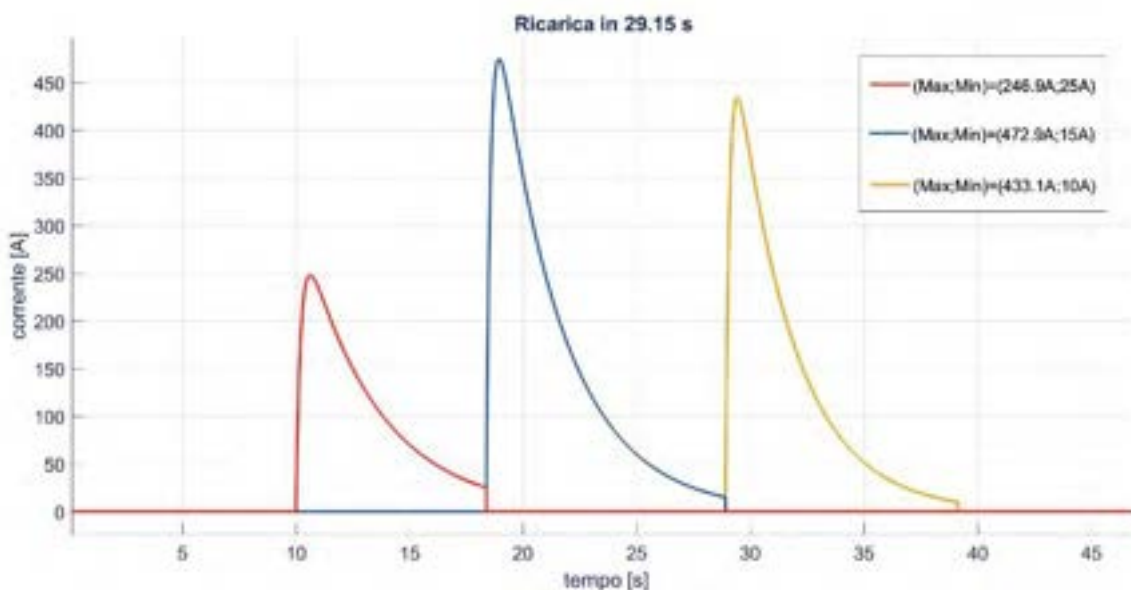


Figura 2. Corrente vs. tempo per trasferimento diretto SC-SC (PAR2016).

Dall’attività conclusasi con il PAR2016 si è visto come la scarica con soglie 25-15-10 A (Figura 2) rientri nelle specifiche e dia un’alta efficienza di trasferimento quando si considera un ‘travaso’ diretto tra supercondensatori: stazione di terra verso veicolo. Nei 30 secondi imposti dalla specifica, vengono trasferiti circa 1240 kJ, con una potenza media calcolata pari a circa 40 kW e con una corrente media di circa 120 A (rispetto quindi alla Figura 2 e considerando un’unica forma d’onda data dalle tre scariche). Sulla base di questi valori vengono di seguito analizzate due possibili soluzioni alternative all’utilizzo di supercondensatori nella stazione di terra posta alla fermata del bus.

2.1 Stazione di terra con accumulo elettrochimico al Titanato di Litio

Nel presente paragrafo viene presentato lo studio per l’eventuale fattibilità tecnica considerando l’impiego di batterie LTO al posto dei SC. Sarà assolutamente necessario considerare la presenza di una elettronica di gestione, quindi di un apposito stadio di conversione DC-DC che sarà regolato in corrente. In questo caso però, il sistema lavorerà sulla corrente media associata al processo di trasferimento e non con una corrente impulsiva.

Di seguito vengono presentate le caratteristiche degli accumulatori LTO e successivamente elencati i principali costruttori con i loro prodotti di riferimento. L’analisi svolta è stata condotta prendendo come riferimento accumulatori prodotti dalla Toshiba essendo uno dei principali player mondiali circa batterie LTO. Nello specifico ci si riferirà a:

- Toshiba Scib, Type 3-20 2P12S o Type 2-23 2P12S (<https://www.scib.jp/en/product/module.htm>).

Ogni modulo è composto da due sottosistemi collegati in parallelo, ognuno dei quali è caratterizzato da 12 celle collegate in serie. La versione è specifica per applicazioni industriali stazionarie. Altre due versioni (20Ah 2P12S, 20Ah 2P9S) sono invece dedicate ad applicazioni automotive.

Il modulo 3-20 2P12S può fornire un’energia nominale che si aggira intorno ai 4÷5 MJ con una tensione estremamente bassa rispetto al campo di interesse per l’applicazione in esame. Di conseguenza, con l’impiego di accumulatori elettrochimici per soddisfare le richieste di corrente valutate a tensioni ben maggiori di quelle del singolo modulo qui presentato, sarà richiesto il collegamento in serie di diversi moduli con conseguente aumento dell’energia disponibile. Questa energia però, in relazione alla specifica applicazione, non verrà mai utilizzata. Durante la fase di trasferimento da stazione di terra a veicolo, si andrà ad intaccare una piccolissima parte dell’energia disponibile in questi accumulatori.

Il sistema così pensato risulterebbe molto sovradimensionato (energeticamente), appunto perché l’applicazione a cui si fa riferimento è più di orientata a ‘potenza’ piuttosto che di ‘energia’.

Analogamente, considerando un solo accumulatore si avrebbero correnti richieste di molto superiori a quelle massime poiché sarebbe necessaria un'interfaccia di conversione statica di tipo 'boost', ovvero innalzatrice. Considerando i valori massimi delle tensioni lato veicolo, il fattore di boost sarebbe pari a $375 \text{ V} / 32.4 \text{ V} \approx 11.5$. Questo imporrà che la corrente lato batteria sarà circa 11.5 volte maggiore della corrente lato veicolo nel caso peggiore. Allo stesso modo, il collegamento in parallelo dei moduli batteria aumenterebbe la disponibilità energetica per soddisfare caratteristiche di potenza, rendendo il sistema mal dimensionato. Inoltre, con un sistema basato su accumulo elettrochimico, bisognerà tenere conto nel dimensionamento effettivo, anche l'efficienza di scarica delle batterie quando sottoposto a correnti elevate rispetto al loro valore nominale (elevati C). In queste condizioni, a seconda delle caratteristiche specifiche di ogni accumulatore, si potrà pensare di effettuare dei test preliminari atti a caratterizzare il sistema di storage in condizioni di scarica a C-rate elevati (spesso i costruttori non forniscono dati sull'efficienza e sui cicli di vita in queste condizioni).



Name	Type3-20 2P12S module	Type3-23 2P12S module
Model	FM01202CC04A	FM01202CC01A
Cell configuration	2 in Parallel x 12 in Series (24 pcs of 20Ah cells)	2 in Parallel x 12 in Series (24 pcs of 23Ah cells)
Nominal capacity	40Ah (25°C, at 0A discharge)	45Ah (25°C, at 0A discharge)
Nominal voltage	27.6V	
Voltage range	18.0 to 32.4V	
Ambient temperature	-30 to 45°C	
Ambient humidity	85%RH or less (No condensation)	
Maximum charge/discharge current	160A (continuous), 350A (in-rush current) (Not over 45°C at module temperature)	
Dimensions	W190 x D361 x H125 mm (Not include protruding portion)	
Weight	Approx. 14kg	Approx. 15kg

Figura 3. Caratteristiche e struttura dell'accumulatore al Titanato di Litio prodotto dalla Toshiba.

Per il dimensionamento di un pacco batteria in versione 'high voltage' faremo riferimento all'intervallo operativo della tensione lato pantografo quando il bus si presenta alla stazione di ricarica di terra. Questo sarà nell'intervallo $187 \text{ V} \div 375 \text{ V}$, con il valore minimo nel caso peggiore. Di conseguenza il valore massimo di tensione dell'intera stringa di accumulatori non dovrà essere superiore ai 187 V così da semplificare l'interfaccia di conversione statica come verrà illustrato nel seguito. Con riferimento al modulo da 40 Ah riportato in Figura 3, sarebbero necessari 5 moduli collegati in serie per avere circa 162 V massimi considerando come tensione il valore di 32.4 V. Il peso totale del sistema a singola stringa così composto sarebbe di circa 75 kg con le dimensioni riportate in Figura 4. Come si potrà notare, sono state considerate due stringe composte da 5 moduli, dove la seconda è collegata in parallelo alla prima per motivi di corrente. Infatti, dovendo la stazione di terra fornire una potenza media nei circa 30 s di 'travaso' pari a 40 kW, la corrente erogata dal singolo pacco batterie sarebbe superiore a quella che può desumersi dai data-sheet del prodotto: con i 27.6 V x 5 nominali si avrebbero circa 290 A (continuativi per 30 s). Tale valore risulta essere al limite delle capacità di erogazione di questo specifico accumulatore. Da qui la necessità di una seconda serie di accumulatori, che portano il peso complessivo a circa 150 kg.

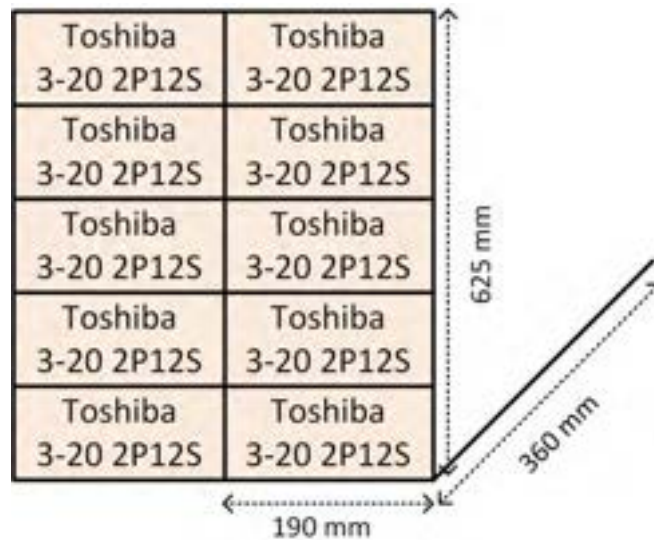


Figura 4. Doppia stringa per configurazione 'high voltage' (5S2P).

2.1.1 Sistema di conversione per accumulo elettrochimico al Titanato di Litio

L'adozione di accumulatori elettrochimici in luogo dei supercondensatori nella stazione di terra richiederà un sistema di conversione statica per la regolazione della corrente di carica durante l'operazione di 'travaso', verso il banco SC a bordo del veicolo. La struttura del convertitore sarà fortemente influenzata dai livelli di tensione del banco BU (Battery Unit) di terra. In generale, per limitare il numero di elementi connessi in serie, se renderà necessario un convertitore DC-DC con elevato fattore di boost, che quindi potrà essere ottenuto solamente grazie all'impiego di trasformatori appositamente progettati e realizzati. D'altro canto, questa soluzione aumenterà la corrente richiesta al sistema di accumulo, necessaria per soddisfare le specifiche di potenza. Nel caso specifico di analisi riferito al minibus Gulliver, la tensione lato pantografo ha un intervallo di variabilità durante il processo di ricarica flash, da ≈ 187 V a 375 V massimi.

Il vantaggio che si avrebbe con l'adozione di accumulatori è relativo alla curva di scarica che sarebbe quasi piatta durante il processo di trasferimento. Questa caratteristica consente di dimensionare il sistema di conversione statica in maniera molto più vicina a quella del suo impiego con valori nominali di corrente e tensione. La ricarica del banco a bordo del veicolo avverrà a corrente costante, con controllo in retroazione, fino al raggiungimento della tensione massima ammessa dal banco SC a bordo del bus.

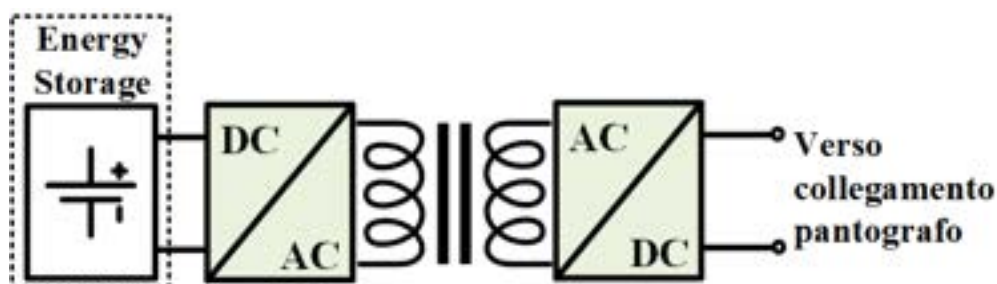


Figura 5. Schema del sistema di conversione per la gestione dell'accumulatore elettrochimico (versione con isolamento, fattore di boost elevato).

Nel caso in cui venissero utilizzati più moduli collegati in serie che quindi fornirebbero nel complesso una tensione maggiore, il sistema di conversione statica potrebbe essere semplificato poiché il fattore di boost necessario sarebbe inferiore e tale da poter essere soddisfatto da sistemi DC-DC non isolati. Lo schema relativo è riassunto in Figura 6.

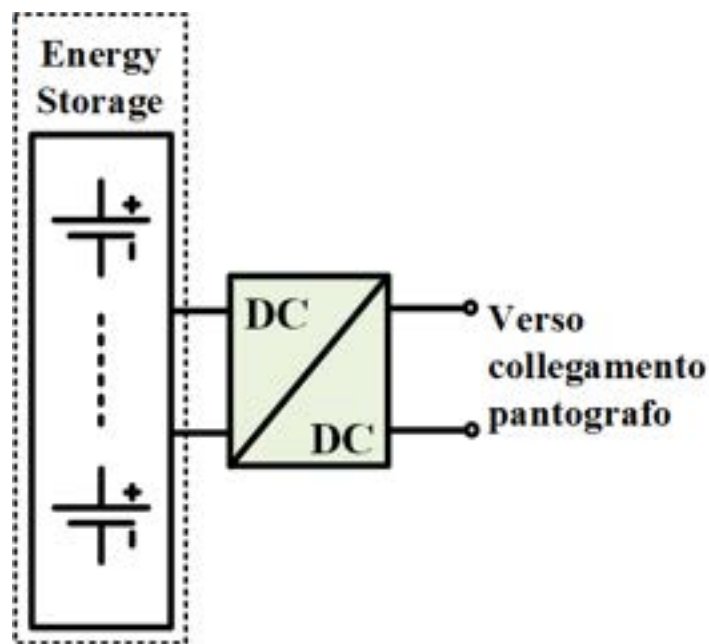


Figura 6. Schema del sistema di conversione per la gestione dell'accumulatore elettrochimico (versione senza isolamento, fattore di boost ridotto).

2.1.2 Principali produttori e modelli per accumulatori LTO

Oltre a Toshiba con i modelli presentati in questo report, altri produttori mondiali forniscono accumulatori al Titanato di Litio. Di seguito viene riportato un elenco ed i principali modelli che potrebbero essere d'interesse per questa specifica applicazione.

- Altairnano (altairnano.com)

Batteria 24 V – 70 Ah con corrente simmetrica carica/scarica. 500 A corrente continuativa.



Performance Characteristics	
Voltage range ¹	17.0 V – 27.5 V
Capacity (Minimum/Typical) ²	65 Ah / 67.4 Ah
Typical discharge energy ²	1,450 Wh
Peak power (discharge/charge) ²	22.6 kW / 38.3 kW
Energy density ²	108 Wh/l
Power density (discharge/charge) ³	1,682 W/l / 2,704 W/l
Specific energy ²	51.8 Wh/kg
Specific power (discharge/charge) ³	806 W/kg / 1,296 W/kg
Internal impedance during discharge (Typical) ²	3.9 mΩ
Internal impedance during charge (Typical) ³	4.0 mΩ
Max continuous discharge or charge current	500 A
Max 10 sec Pulse discharge or charge current	900 A
Life Characteristics	
Cycle life at 2C charge and 2C discharge, 100% DOD, 25°C	>25,000 to 80% initial capacity
Cycle life at 2C charge and 2C discharge, 100% DOD, 55°C	>6,000 to 80% initial capacity
Calendar life at 25°C	25 years
Temperature Limits	
Operating and Storage temperature range ⁴	-50°C to +65°C cell temperature
Module Dimensions	
Length (L) x Width (W) x Height (H)	279.1 mm x 158.6 mm x 303.2 mm
Length (L) x Width (W) x Height (H) (Include Module Terminals)	279.1 mm x 158.6 mm x 333.2 mm
Weight	28.0 kg

Figura 7. Caratteristiche dell'accumulatore LTO prodotto da Altairnano.

In particolare, questa batteria con prestazioni così elevate potrebbe essere utilizzata con il sistema di conversione mostrato in Figura 5, quindi con elevato fattore di boost, riducendo drasticamente il numero di elementi connessi in serie, e quindi l'energia complessivamente disponibile. Ne risulterebbe un sistema sicuramente meno sovradimensionato.

- KOK Power (kokpower.com)

KOK Power è un altro produttore di celle al Titanato di Litio, di seguito sono riportate le informazioni di uno degli accumulatori prodotti, che presenta le migliori prestazioni.



Items	Specifications
Nominal Voltage	13.8V
Nominal Capacity	58Ah
Cell Inside	LTO 2.3V 58Ah cell
Configuration	6S1P
Standard Charge Current	0.2C-0.5C
Max. Charge Current	1C
Battery management System (BMS)	BMS-LTO4S150150A
Continuous Discharge Current	200A
Peak Discharge Current	400A
Full Charged Voltage	13.8V (2.3V per cell)
Charge Cut-off Voltage	16.8V (2.8V per cell)
Discharge Cut-off Voltage	9V (1.5V per cell)
Net Weight	15kg
Dimensions	350(L)*230(W)*210(H)mm (With case)
Operating Temperature	Charging: 0°C ~ 45°C Discharging: -20°C ~ 55°C
Storage Temperature	(Recommended to store 20 ± 5°C for long term storage)
Cycle Life	30000 times (80% of initial capacity at 0.2C rate, IEC Standard)

Figura 8. Caratteristiche dell'accumulatore LTO prodotto dalla KOK Power.

Di seguito vengono riportati ulteriori produttori di accumulatori LTO:

- Hybria (hybria.fi)
- YABO Power Technology (yabopower.com)
- Microvast (microvast.com)

2.2 Stazione di terra con accumulo elettromeccanico basato su volani

Nel caso di impiego di volani elettromeccanici, la cui struttura generale è mostrata in Figura 9, si rende necessario valutare l'energia che sarà possibile prelevare per soddisfare i requisiti precedentemente esposti, e quindi valutare dimensioni e peso dell'intero sistema a volano elettromeccanico.

Per la valutazione energetica necessaria a valutarne l'effettiva applicabilità nel caso preso in esame, è necessaria una premessa inerente alcune espressioni di base utili per il dimensionamento del sistema di accumulo inerziale.

Con riferimento alla Figura 10, il momento di inerzia di un cilindro di massa m pieno di raggio R è esprimibile come

$$I = \frac{1}{2} mR^2 .$$

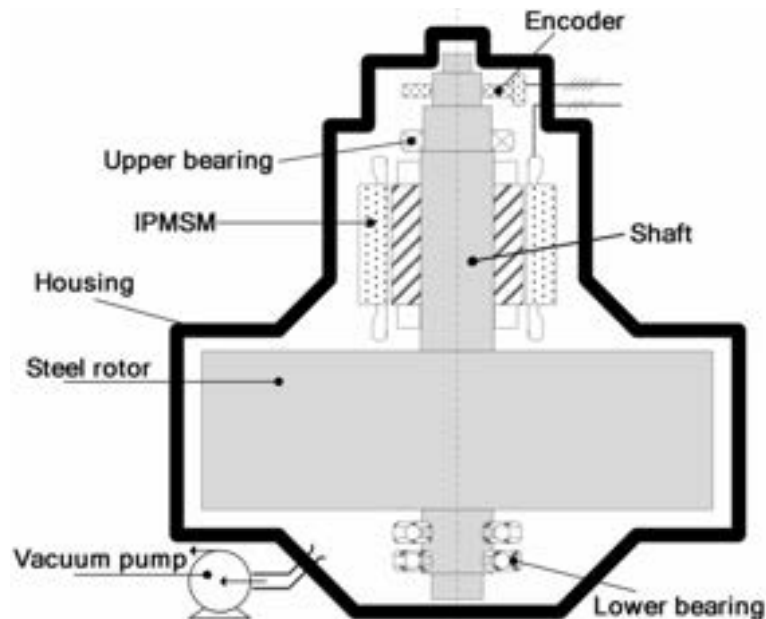


Figura 9. Struttura di un volano elettromeccanico [3].

Qualora il cilindro che costituisce il volano presenti una apertura interna, ad esempio necessaria per l'ancoraggio intorno all'asse di rotazione, il momento di inerzia di un cilindro cavo, dove R_1 e R_2 sono i due raggi, interno e esterno risulta essere pari a

$$I = \frac{1}{2} m (R_2^2 + R_1^2).$$

Di conseguenza possiamo esprimere la massa del cilindro pieno di altezza L

$$m = \pi R^2 L \rho ,$$

e la massa del cilindro di altezza L e vuoto all'interno, avente raggi R_1 e R_2 :

$$m = \pi (R_2^2 - R_1^2) L \rho ,$$

dove ρ è densità del materiale che compone il volano.

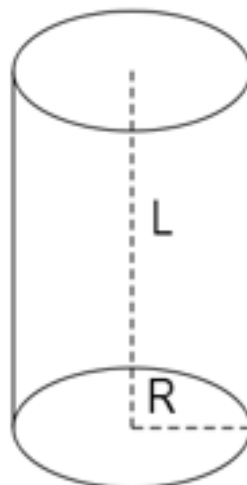


Figura 10. Rappresentazione di un volano elettromeccanico come cilindro pieno.

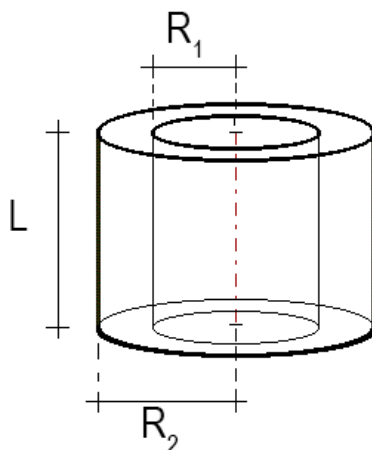


Figura 11. Rappresentazione di un volano elettromeccanico come cilindro cavo.

Tab. 2 – Densità acciaio

Tipi d'acciaio inox	Densità acciaio inossidabile (kg/m ³)
Acciaio inox 304	7930
Acciaio inox 316	7980
Acciaio inox 321	8020
Acciaio inox 400	7730
Acciaio inox con 12% di cromo	7600
Acciaio con circa 3% di tungsteno	8000
Acciaio con circa 6% di tungsteno	8200
Acciaio con circa 12% di tungsteno	8400
Acciaio con circa 18% di tungsteno	8700

Considerando una densità dell'acciaio presa nell'intervallo medio di variabilità a seconda della sua composizione come riportato in Tab. 2, l'energia associata ad una massa m in rotazione è esprimibile dalla seguente espressione funzione del momento di inerzia I e della velocità di rotazione ω_m :

$$E_{fw} = \frac{1}{2} I \omega_m^2.$$

Considerando la possibilità di estrarre energia dal volano ad una certa velocità minima per non avere rendimenti di conversione degli stati AC-DC-DC troppo bassi, l'energia effettivamente utilizzabile è

$$E_u = \frac{1}{2} I (\omega_{m2}^2 - \omega_{m1}^2),$$

dove ω_{m1} è la velocità minima del sistema a volano. Se vengono inclusi i rendimenti del generatore sincrono a magneti permanenti (η_g) e del convertitore AC-DC-DC (η_c), che ad esempio possono essere considerati costanti per una prima analisi e variabili con la potenza trasferita per un dimensionamento più accurato, si ottiene:

$$E_t = \frac{1}{2} I (\omega_{m2}^2 - \omega_{m1}^2) \eta_g \eta_c,$$

dove con E_t si vuole indicare l'energia effettivamente trasferita al sistema di accumulo a bordo del veicolo, a meno delle perdite dell'apparato di connessione: cavi e connettori.

2.2.1 Sistema di conversione per accumulo elettromeccanico basato su volani

Per la gestione del sistema di accumulo basato su volano è necessario l'utilizzo di un sistema di conversione basato su una macchina elettrica, in genere sincrona a magneti permanenti, e di un sistema di conversione statica dell'energia. Come mostrato in Figura 12, il convertitore AC-DC-DC ha una struttura tale da rendere compatibile l'inserzione tramite pantografo dei supercondensatori presenti sul veicolo (bus). Un dimensionamento dettagliato metterà in evidenza la struttura di conversione più idonea, da un semplice Boost Rectifier, o ad esempio strutture più complesse come lo Swiss Rectifier o lo Z-Source inverter.

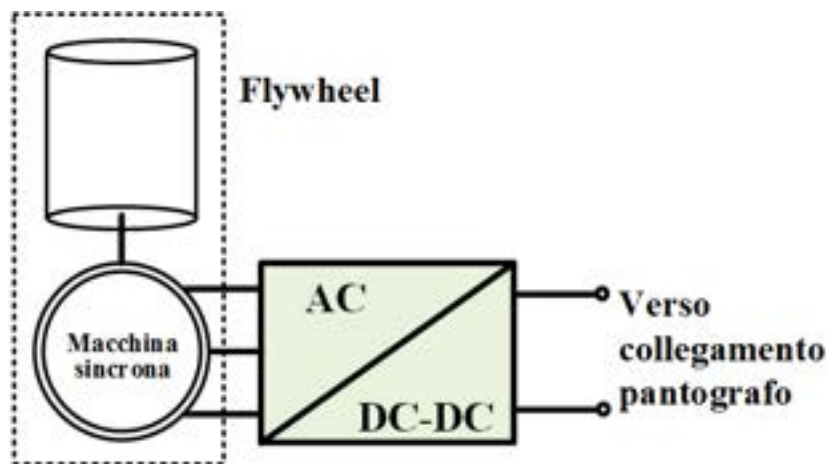


Figura 12. Schema del sistema di accumulo basato su volano elettromeccanico.

2.2.2 Dimensionamento iniziale per il sistema di accumulo basato su volani

Considerando le espressioni riportati ed i dati di input del sistema di accumulo, si può procedere ad un primo dimensionamento. È stato quindi realizzato un apposito script Matlab che effettua i calcoli necessari restituendo come output le caratteristiche del volano. Si ipotizza in questa fase un rendimento costante per il sistema di conversione meccanica-elettrica.

Il target sarà fornire i circa 1245 kJ. Se si considera un volano avente parametri riportati in Tab. 3, con velocità nominale pari a 2000 rpm, e velocità minima pari a 1000 rpm (massima scarica), realizzato in acciaio con densità pari a 7600 kg/m³, si possono estrarre circa 1274 kJ. Il sistema risulta sufficientemente compatto seppur caratterizzato da un peso non trascurabile, che comunque caratterizza tali sistemi. Dal punto di vista dell'installazione, questi apparati sono posizionati non a livello, quindi in appositi vani ricavati al di sotto del manto stradale, che soprattutto in aeree urbane ne riduce l'occupazione di suolo così come l'impatto acustico e visivo.

Tab. 3 – Parametri caratteristici del volano elettromeccanico

$R_2=0.35$ m	$R_1=0.05$ m	$L=0.5$ m	$\rho(\text{acciaio})=7600$ kg/m ³
Peso stimato massa rotante ~1400 kg	$\omega_{m2}=2000$ rpm	$\omega_{m1}=1000$ rpm	$\eta_g=0.93$ $\eta_c=0.93$

Quello qui proposto è un dimensionamento di massima, il peso del volano può essere certamente ridotto aumentandone la velocità massima di rotazione considerando che l'energia disponibile è proporzionale al quadrato della stessa. Quindi solo a titolo di esempio, aumentando la ω_{m2} a 4000 rpm con la ω_{m1} a 2000 rpm (considerando sempre una scarica al 50 %), la massa del volano potrebbe avere le dimensioni $R_1=0.25$ m (-28 %), $R_2=0.05$ m, $L=0.48$ m ed un peso di 688 kg (-51 %).

Vengono infine elencate alcune delle principali aziende produttrici di volani elettromeccanici:

- <https://vyconenergy.com/>
- <http://www.activepower.com/en-US>
- <https://amberkinetics.com/>
- <http://power-thru.com/index.html>
- <http://beaconpower.com/>

3 Estensione dell'analisi ad un bus di 18 m

Il presente paragrafo ha lo scopo di estendere lo studio di fattibilità, seppur in maniera meno dettagliata rispetto a quanto finora illustrato, ad un sistema di trasporto pubblico basato su bus di 18 m, con accumulo LTO a bordo.

Dai dati forniti, la stazione di ricarica posta alla fermata (ma non in tutte le fermate) deve effettuare un trasferimento di energia a circa $P_t=600$ kW per $T_t=20$ s, con una tensione di uscita pari a circa 600 V e quindi una corrente media risultante di 1000 A in uscita. Di conseguenza l'energia da trasferire è pari a

$$E_t = P_t T_t = 12 \text{ MJ}$$

Si può notare come l'energia sia circa 10 volte quella richiesta nel caso precedentemente illustrato, ovvero con riferimento al minibus Gulliver con supercondensatori a bordo. Per questo, la prima analisi verrà svolta considerando un ipotetico accumulo a SC posto alla fermata. Questa volta però l'impiego dell'elettronica di potenza si renderà necessario per via delle elevate potenze e quindi correnti in gioco.

Con riferimento agli accumulatori Toshiba 2-23 2P12S le cui caratteristiche sono riassunte in Figura 3, si procederà al dimensionamento del sistema di accumulo posto alla fermata. Per lo schema del convertitore statico si può fare riferimento a quanto illustrato in Figura 5 e Figura 6, ovvero con e senza isolamento galvanico a seconda della normativa. Inoltre, data l'elevata potenza, sicuramente si ricorrerà all'interleaving tra i vari stadi DC-DC. L'analisi verrà estesa anche al caso di volani elettromeccanici, per una valutazione preliminare dell'architettura e del peso e dimensioni.

3.1 Stazione di ricarica con SC ed elettronica di potenza

Si ipotizzerà in questo caso l'impiego di moduli SC Maxwell BCAP0063P125, caratterizzati da una tensione nominale di 125 V e una capacità di 63 F (gli stessi moduli sono stati già utilizzati all'interno della stazione alla fermata già illustrata nel caso del minibus Gulliver)

- Capacità 63 F
- Resistenza serie equivalente (ESR) 18 mΩ
- Tensione nominale 125 V
- Corrente massima 1900 A (Absolute Maximum Current)
- Tensione massima 136 V (Absolute Maximum Voltage)
- Massima tensione serie 1500 V

Essendo la tensione nominale di esercizio pari a 600 V, si possono considerare inizialmente 4 elementi SC collegati in serie per complessivi 500V nominali, nell'ipotesi di un sistema di conversione statica privo di isolamento e elevatore 'boost-type': ne risulta un'architettura molto semplice come mostrato in Figura 13. Rispetto al caso dei volani elettromeccanici, già si nota un limite superiore imposto dalla tensione, mentre questo limite sarà molto meno stringente per i flywheel potendo agire sulla velocità massima.

Verrà ipotizzata una scarica al 50 % a cui corrisponde un prelievo di energia pari a circa il 75 % della massima disponibile (Figura 20), ed un raddoppio della corrente erogata a parità di potenza da trasferire (600 kW per 20 s). Questo tipo di configurazione però limita fortemente l'energia immagazzinata nel banco SC per via della modesta tensione massima ottenibile.

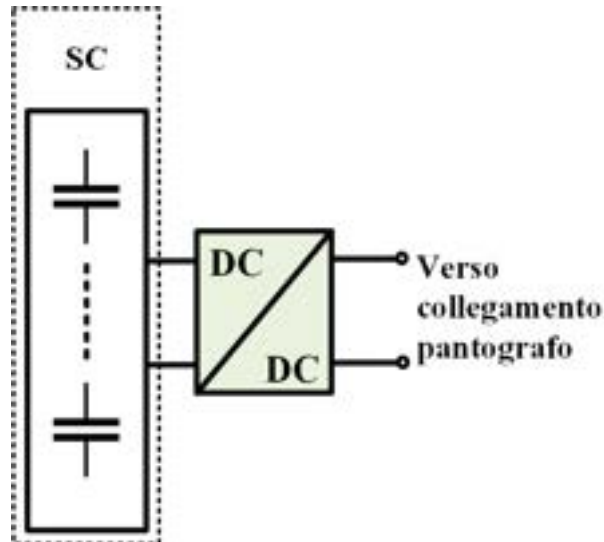


Figura 13. Architettura con supercondensatori (SC) ed elettronica di potenza.

Con una diversa architettura del sistema di conversione di tipo 'buck-type' che consenta di estendere il range di tensione del banco di supercondensatori, si otterrebbe un diverso dimensionamento dell'ESS alla fermata. Potendo ad esempio aumentare la tensione fino ai 1500 V DC massimi consentiti (12 moduli SC collegati in serie), e considerando sempre una scarica al 50 %, si estrarrebbe un'energia pari a circa 4.4 MJ sulla singola stringa SC, ovvero poco più di 1/3 di quella richiesta. Considerando un rendimento medio dell'interfaccia di conversione statica pari a $\eta_c=93\%$, l'energia netta trasferita sarebbe di circa 4.1 MJ, circa 1/3 di quella richiesta.

Quindi con tre diverse stringhe di SC composte ognuna da 12 elementi BCAP0063P125 collegati in serie, ed equipaggiate con tre distinti convertitori DC-DC si potrebbero soddisfare i requisiti energetici di una ricarica flash in 20 s alla fermata per un bus di 18 m, dove ogni sistema si troverebbe ad erogare una potenza di circa 200 kW.

Altro parametro riguarderà la valutazione della corrente erogata dalla singola stringa SC. Questa può essere calcolata come mostrato di seguito per il caso peggiore, ovvero a metà della tensione massima. Si può notare che il valore risultante non presenta alcun problema di gestione e rientra ampiamente nelle possibilità della stringa SC.

$$V_{rate} = 12 \cdot 125 = 1500 \text{ V}$$

$$I_{max} = \frac{200 \text{ kW}}{0.5 \cdot V_{rate}} \approx 266 \text{ A}$$

Quanto illustrato è riassunto in Figura 14. Alternativamente, si potrebbe pensare di collegare in parallelo le tre stringe SC ed utilizzare un solo convertitore statico.

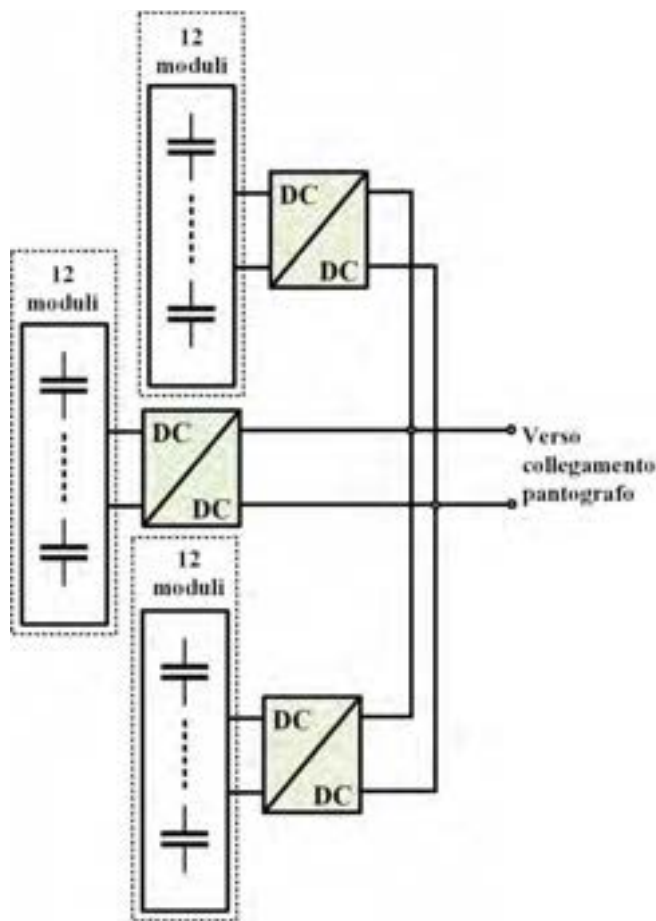


Figura 14. Possibile architettura con supercondensatori.

3.2 Configurazione dell'accumulo LTO senza isolamento galvanico

In base ai pochi dati disponibili relativi alla curva di scarica di tali accumulatori, un primo dimensionamento abbastanza al limite può essere fatto considerando la singola stringa del sistema di accumulo composta da 16 moduli Toshiba 2-23 2P12S in collegamento serie, per complessivi $V_{max}=518.4$ V con 32.4 V per modulo ($V_{rate}=27.6$ V x 16 = 441.6 V nominali), ed ipotizzando una scarica ad una corrente massima pari a $I_{rate}=340$ A ($7.55C^1$) per 20 s. Alla tensione nominale si avrebbero circa 150 kW per stringa, quindi sarebbero necessarie quattro stringe, ognuna equipaggiata con il relativo sistema di conversione DC-DC.

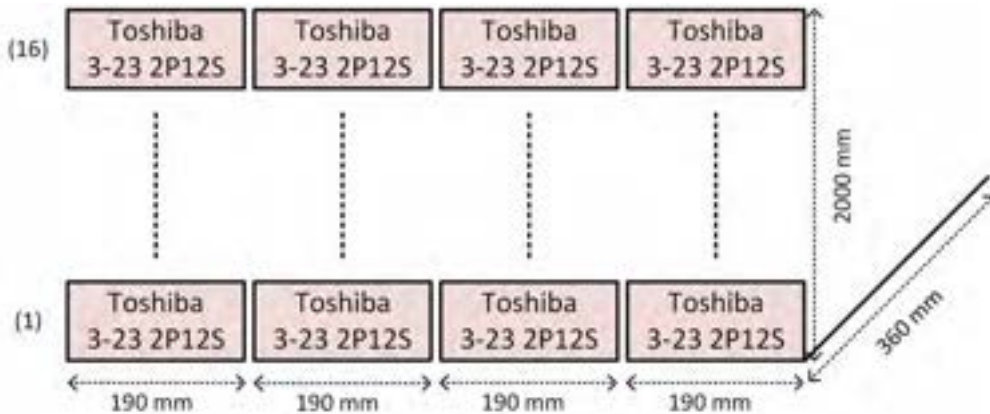


Figura 15. Possibile configurazione senza isolamento del sistema di storage alla fermata.

¹ | 340 A sono molto vicini alla corrente limite definita di in-rush sul data-sheet, per quando Toshiba non fornisca alcun dato inerente la curva di scarica tempo vs. Corrente.

Alternativamente, per ridurre la corrente di batteria della singola stringa, si potrebbe pensare ad una configurazione con 30 moduli collegati in serie, da cui risulterebbe una tensione massima di $V_{max}=972\text{ V}$ ($30 \times 32.4\text{ V}$), nominale di $V_{rate}=828\text{ V}$ ($30 \times 27.6\text{ V}$) ed una corrente media alla tensione nominale pari a circa $I_{rate}=240\text{ A}$ (5.33C) per una potenza di stringa nominale di 200 kW. In totale servirebbero 3 stringhe distinte.

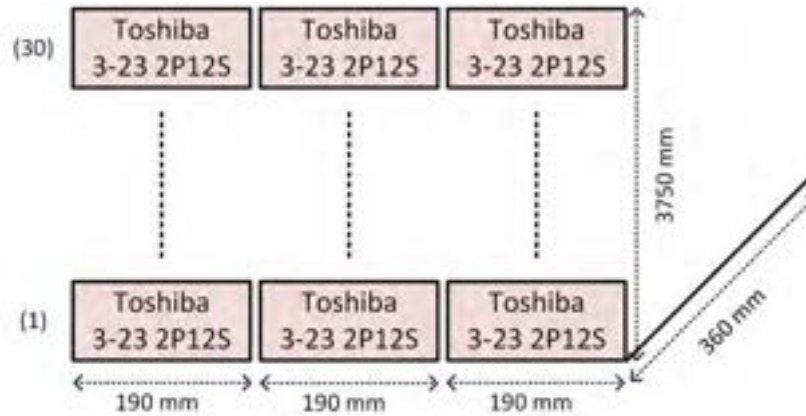


Figura 16. Possibile configurazione alternativa senza isolamento del sistema di storage alla fermata (corrente LTO ridotta).

Sicuramente utilizzando accumulatori LTO con prestazioni in scarica migliori come ad esempio quello prodotto dalla Altairnano (Figura 7), il sistema potrebbe avere una configurazione leggermente differente e più compatta, seppur conservando la caratteristica modulare e l'eventuale interleaving tra i convertitori DC-DC sia della stessa stringa, che eventualmente tra stringhe.

3.3 Configurazione dell'accumulo LTO con isolamento galvanico

Per ragioni di sicurezza elettrica l'isolamento galvanico tra la stazione di terra ed il sistema di accumulo posto sul bus può essere un requisito imprescindibile. La presenza quindi di un trasformatore a media o alta frequenza fornisce una certa variabilità nel progetto dell'interfaccia di conversione statica, avendo ad esempio come parametro anche il numero di spire degli avvolgimenti ed il numero degli stessi. In questa prima analisi si farà riferimento ad un trasformatore con un primario ed un secondario, eventualmente sempre in configurazione modulare, quindi di potenza ridotta rispetto ai 600 kW richiesti. La struttura sarà quella di Figura 5. In questo caso il DC-DC isolato, spesso in configurazione Dual-Active Bridge (DAB), sarà in grado di fornire una tensione di uscita maggiore e/o minore di quella del sistema di accumulo al suo ingresso. Questa flessibilità verrà sfruttata per determinare una prima configurazione, con un'analisi rivolta principalmente alla corrente erogata dalla singola stringa di LTO.

In questo caso si possono considerare 4 stringhe ognuna composta da 20 moduli collegati in serie, dove per una potenza per stringa pari a 150 kW si ottengono i valori sotto riportati circa le tensioni e la corrente di scarica:

$$V_{max} = 20 \cdot 32.4 = 648\text{ V}$$

$$V_{rate} = 20 \cdot 27.6 = 552\text{ V}$$

$$I_{rate} = \frac{150\text{ kW}}{V_{rate}} = 272\text{ A}$$

Lo schema di massima del sistema è mostrato in Figura 17, dove si notano le 4 stringhe di accumulatori LTO ognuna composta da 20 moduli collegati in serie, ed i 4 DC-DC isolati che avranno le rispettive uscite collegate in parallelo verso il collegamento al pantografo del bus.

La quarta stringa potrebbe essere rimossa portando la potenza la potenza di ogni array a 200 kW, da cui risulterebbe una corrente nominale pari a

$$I_{rate} = \frac{200 \text{ kW}}{V_{rate}} = 362 \text{ A}$$

Che risulterebbe al limite (e forse oltre il massimo consentito) per il modulo LTO Toshiba da 45 Ah.

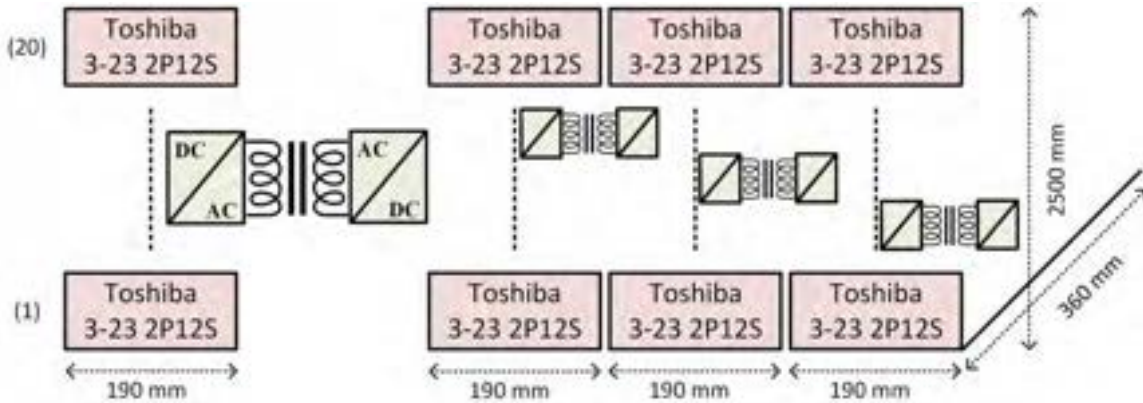


Figura 17. Possibile configurazione con isolamento del sistema di storage alla fermata (corrente LTO ridotta).

3.4 Impiego di volani elettromeccanici per la ricarica flash alla fermata

Al posto degli accumulatori elettrochimici si potrebbe pensare di impiegare volani elettromeccanici, ed in questo paragrafo se ne vuole valutare in via preliminare la fattibilità tecnica. L'energia da trasferire è già stata calcolata e pari a 12 MJ. Inizialmente si può immaginare il sistema come composto da un'unica massa rotante con l'ipotesi di dividere la potenza complessivamente da gestire, quindi calettare sul volano tre macchine elettriche coassiali (tre generatori) ognuna gestita dal suo convertitore statico, Figura 18.

Alternativamente, si potrebbe pensare ad un sistema modulare composto da più di un volano funzionante in maniera indipendente dagli altri come mostrato in Figura 19. Così facendo si potrebbero trovare interessanti fattori comuni tra i diversi sistemi da ricaricare, magari espressi come le diverse taglie dei bus.

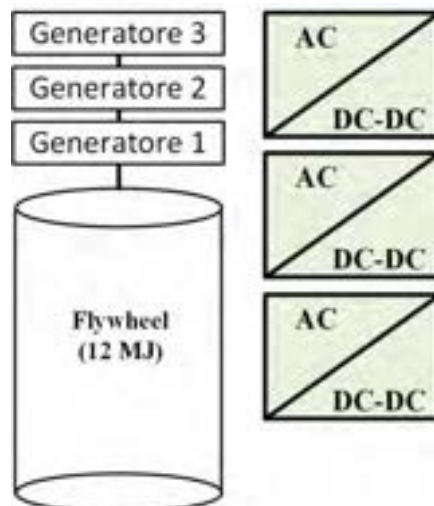


Figura 18. Configurazione iniziale per un volano da 600 kW per 20 s.

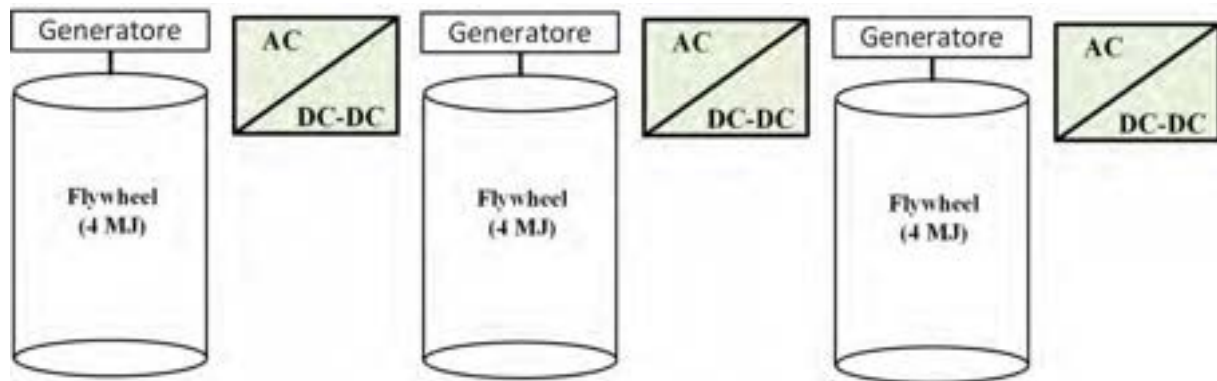


Figura 19. Configurazione modulare multi-volano.

Se si analizzano i risultati ottenuti col dimensionamento del volano per il minibus, si può vedere che solamente aumentando leggermente la velocità di rotazione a valori ancora decisamente modesti, si possono ottenere facilmente i 4 MJ richiesti, ovvero 1/3 dell'energia complessiva da trasferire nei 20 s imposti dalla specifica. I parametri riportati in Tab. 4 sono sostanzialmente gli stessi della Tab. 3 dove però sono state aggiornate la velocità massima e la velocità minima. Anche se la massa rotante è rimasta invariata, sia il generatore che il sistema di conversione statica verro dimensionati per una potenza decisamente maggiore (~200 kW x 20 s). Questa è stata comunque scelta come il 50 % della massima per non aumentare eccessivamente la corrente del generatore e perché l'energia estraibile da un volano non varia linearmente con la velocità. La Figura 20 mostra in dettaglio la curva dell'energia effettivamente estratta da un volano (pura massa rotante) rispetto alla velocità minima², dove si può notare dettagliatamente quanto sopra esposto.

Tab. 4 – Parametri caratteristici del volano elettromeccanico (~4 MJ)

$R_2=0.35$ m	$R_1=0.05$ m	$L=0.5$ m	$\rho(\text{acciaio})=7600$ kg/m ³
Peso stimato massa rotante ~1400 kg	$\omega_{m2}=3600$ rpm	$\omega_{m1}=1800$ rpm	$\eta_g=0.93$ $\eta_c=0.93$

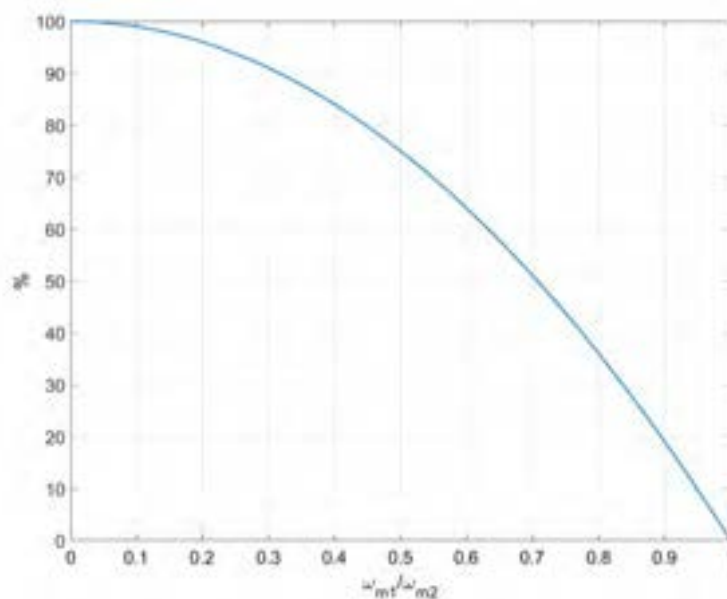


Figura 20. Relazione tra energia estratta e velocità minima (finale) per un volano elettromeccanico.

² La stessa curva si avrebbe per un sistema a supercondensatori, dove la velocità minima verrebbe sostituita con la tensione minima a cui scaricare il banco SC.

4 Conclusioni

L'attività svolta a valle dei precedenti PAR2016 e PAR2017 ha consentito di analizzare seppur in via preliminare la possibilità di impiego di sistemi di accumulo alternativi ai SC per la stazione di terra posta alla fermata. L'analisi ha tenuto conto sempre delle caratteristiche associate alla ricarica flash, quindi i tipici tempi che risultano essere estremamente brevi, dell'ordine della decina di secondi. Si è visto come l'impiego di accumulatori al Titanato di Litio può certamente soddisfare le richieste di potenza associate alla ricarica flash, con però un sovradimensionamento energetico non trascurabile del ESS presente in stazione. I volani elettromeccanici invece, pur presentando pesi nettamente superiori, sono veri e propri ESS di potenza. Un primo dimensionamento ha mostrato che effettivamente sarebbe possibile impiegare tali strutture in applicazione di ricarica flash.

Un'ulteriore analisi condotta per il caso di un bus di 18 m, ha consentito di valutare il dimensionamento del sistema di storage alla fermata sempre realizzato tramite supercondensatori, accumulatori LTO o volani. Anche in questo caso è emerso un forte sovradimensionamento energetico del sistema di accumulo elettrochimico associato ad una operativa estremamente stressata delle batterie. Il volano o la combinazione di sistemi a volano, oltre l'effettiva fattibilità tecnica, risultano energeticamente dimensionati per la specifica applicazione e data la loro caratteristica di potenza. Per quanto riguarda il sistema con SC, si nota come la tensione massima di esercizio limiti l'energia prelevabile dalla stringa stessa, per quanto delle possibili soluzioni esistano e siano effettivamente realizzabili non presentando alcuna criticità tecnologica.

La Tab. 5 riassume le principali caratteristiche dei vari sistemi di accumulo con riferimento ai due casi applicativi: minibus e bus di 18 m.

Tab. 5 – Tabella riassuntiva delle principali caratteristiche per i sistemi di accumulo alla fermata

Minibus			Energia~1.24 MJ
	Configurazione		
LTO	5S2P		
Volano	1x	1400 kg	2000 rpm, 1000 rpm
	1x	360 kg	6000 rpm, 3000 rpm
SC	2S2P+2S		
Bus 18 m			Energia ~12 MJ
LTO	16S4P 30S3P 20S4P	Possibili configurazioni in funzione dell'isolamento dello stadio di conversione e della corrente da erogare	
Volano	3x	1400 kg	3600 rpm, 1800 rpm
	1x	1500 kg	6000 rpm, 3000 rpm
	3x	690 kg	6000 rpm, 3000 rpm
SC	12S3P		

5 Riferimenti bibliografici

1. J. Mei, E. K. W. Cheng and Y. C. Fong, "Lithium-titanate battery (LTO): A better choice for high current equipment," 2016 International Symposium on Electrical Engineering (ISEE), Hong Kong, 2016, pp. 1-4.
2. X. Zhang, H. Peng, H. Wang and M. Ouyang, "Hybrid Lithium Iron Phosphate Battery and Lithium Titanate Battery Systems for Electric Buses," in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 67, no. 2, pp. 956-965, Feb. 2018.
3. L. Zhou and Z. ping Qi, "Modeling and control of a flywheel energy storage system for uninterruptible power supply," 2009 International Conference on Sustainable Power Generation and Supply, Nanjing, 2009, pp. 1-6.
4. Wencong Su, Tao Jin and Shaohui Wang, "Modeling and simulation of short-term energy storage: Flywheel," 2010 International Conference on Advances in Energy Engineering, Beijing, 2010, pp. 9-12.

6 Abbreviazioni ed acronimi

ESS	Energy Storage system
HV	Sistema 'high voltage'. Si riferisce all'impianto in scala 1:1.
LTO	Accumulatori al Titanato di Litio
SC	Supercondensatori
BU	Battery Unit, sistema di accumulo elettrochimico
DC-DC	Convertitore statico continua-continua
AC-DC	Convertitore statico alternata-continua
AC-DC-DC	Convertitore statico alternata continua, con eventuale ulteriore stadio in continua