



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA SISTEMA ELETTRICO

Sistema di accumulo con batterie al litio nel terziario: l'applicazione ad una funivia

M. Conte, M. Pasquali, F. Vellucci

SISTEMA DI ACCUMULO CON BATTERIE AL LITIO NEL TERZIARIO: L'APPLICAZIONE AD UNA FUNIVIA

M. Conte, M. Pasquali, F. Vellucci (ENEA)

Settembre 2010

Report Ricerca Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Area: Usi finali

Tema: Valutazione dell'impatto dell'utilizzo delle batterie al litio nelle applicazioni stazionarie

Responsabile Tema: Ennio Ferrero, ENEA

INDICE

INTRODUZIONE	5
SELEZIONE DELL'APPLICAZIONE	6
DIMENSIONAMENTO DEL SISTEMA DI ACCUMULO	7
TENSIONE DI LAVORO	7
NUMERO DI CELLE	8
CAPACITÀ	8
COSTRUZIONE DEL MODELLO MATEMATICO E CALCOLI DI SIMULAZIONE	8
<i>Modello matematico del pacco batterie</i>	9
<i>Schema di simulazione</i>	10
<i>Risultati della simulazione: valore della potenza installata verso rete.</i>	12
SPECIFICHE DEL SISTEMA DI ACCUMULO.	16
PROVE SULLA BATTERIA KOKAM	16
OPERAZIONI DI MESSA A PUNTO DEL SISTEMA ELETTRONICO DI GESTIONE E CONTROLLO.....	17
PROVE ESEGUITE SUL SISTEMA BATTERIE PILOTA.....	18
SCELTA DEL NUOVO SISTEMA ACCUMULO	19
SCELTA DELLE CELLE	19
DIMENSIONAMENTO FINALE	20
<i>Aggiornamento del modello</i>	20
<i>Risultati della simulazione</i>	20
<i>Comportamento globale</i>	22
<i>Comportamento della singola cella</i>	23
<i>Verifica della batteria prescelta mediante confronto dei valori forniti dalla simulazione con quelli indicati dal</i> <i>Costruttore delle celle.</i>	25
<i>Il sistema di accumulo definitivo</i>	27
PROVE DI VALIDAZIONE PRELIMINARE	28
ESECUZIONE DEI COLLEGAMENTI.....	28
ESECUZIONE DI PROVE DI VALIDAZIONE PRELIMINARE	29
PROSECUZIONE DELLE ATTIVITÀ	33
CONCLUSIONI	34
BIBLIOGRAFIA	34

INDICE DELLE FIGURE E DELLE TABELLE

FIGURA 1. LA FUNICOLARE DI BERGAMO "COLLE APERTO – S. VIGILIO".	6
FIGURA 2. SCHEMA A BLOCCHI DEL SISTEMA DI ACCUMULO E GRUPPO DI CONVERSIONE.....	8
FIGURA 3. SCHEMA ELETTRICO EQUIVALENTE DELLA BATTERIA.	9
FIGURA 4- CURVE DI SCARICA PER BATTERIE AL LITIO DI GRANDE CAPACITÀ ED ALTA POTENZA (FONTE KOKAM).....	9
FIGURA 5. SCHEMA IMPIEGATO PER LA SIMULAZIONE.....	10
FIGURA 6. BLOCCO BATTERIA.	11
FIGURA 7. CALCOLO DI SOC.	11
FIGURA 8. CURVA DI POTENZA MISURATA SULL'IMPIANTO UTILIZZATORE.....	12
FIGURA 9. DIAGRAMMI DELLO STATO DI CARICA (A) ED ENERGIA (B).	13
FIGURA 10. DIAGRAMMI DI TENSIONE (A) E CORRENTE (B) DELLA BATTERIA.	14

FIGURA 11. DIAGRAMMI DI TENSIONE DELLA SINGOLA CELLA (A) E CORRENTE ESPRESSA COME MULTIPLIO DELLA CAPACITÀ NOMINALE (B).	15
FIGURA 12. BATTERIA IN PROVA KOKAM DA 74 CELLE AL LITIO IN SERIE, USATA COME SISTEMA “PILOTA”.	17
FIGURA 13. DISPOSITIVI IMPIEGATI PER LE PROVE SUL SISTEMA “PILOTA”: CAMERA CLIMATICA (SINISTRA), CICLATORE (DESTRA), SISTEMA DI ACQUISIZIONE DATI (CENTRO).	17
FIGURA 14. COMPONENTI AGGIUNTIVI RICHIESTI PER CONSENTIRE IL DIALOGO TRA BMS E CICLATORE.	18
FIGURA 15. DISPERSIONE DEI VALORI DI TENSIONE DELLE SINGOLE CELLE.	19
FIGURA 16. CURVE DI SCARICA PER LA BATTERIA AL LITIO EIG MODELLO C020.	20
FIGURA 17. POTENZA SPECIFICA EROGABILE/ASSORBIBILE IN FUNZIONE DELLA PROFONDITÀ DI SCARICA.	21
FIGURA 18. ANDAMENTO DELLO STATO DI CARICA (SOC) PER IL SISTEMA BATTERIE EIG – PROPOSTA N. 4.	22
FIGURA 19. ANDAMENTO DELLA TENSIONE TOTALE PER IL SISTEMA BATTERIE EIG – PROPOSTA N. 4.	22
FIGURA 20. ANDAMENTO DELLA CORRENTE DI PACCO PER IL SISTEMA BATTERIE EIG – PROPOSTA N. 4.	23
FIGURA 21. ANDAMENTO DELLA TENSIONE DI CELLA PER IL SISTEMA BATTERIE EIG – PROPOSTA N. 4.	23
FIGURA 22. ANDAMENTO DEL TASSO DI CORRENTE (C_{RATE}) PER IL SISTEMA BATTERIE EIG – PROPOSTA N. 4.	24
FIGURA 23. ANDAMENTO DELLA POTENZA SPECIFICA PER IL SISTEMA BATTERIE EIG – PROPOSTA N. 4.	24
FIGURA 24 (B). SCHEDA TECNICA DELLA CELLA EIG MODELLO C020 (PARTE 2).	26
FIGURA 25. IL SISTEMA DI ACCUMULO DEFINITIVO.	27
FIGURA 26. SCHEDA MASTER (SINISTRA) ED UNITÀ SLAVE (DESTRA).	27
FIGURA 27. ANDAMENTO DELLA CORRENTE IN FUNZIONE DEL TEMPO.	30
FIGURA 28. ANDAMENTO DELLA TENSIONE TOTALE IN FUNZIONE DEL TEMPO.	30
FIGURA 29. ANDAMENTO CUMULATIVO DELLA CORRENTE E DELLA TENSIONE TOTALE IN FUNZIONE DEL TEMPO.	31
FIGURA 30. ANDAMENTO TEMPORALE DELLA CARICA ACCUMULATA IN BATTERIA.	31
FIGURA 31. BILANCIO DEGLI AH DI CARICA E SCARICA RELATIVAMENTE ALL’ESECUZIONE DEL CICLO N. 2.	32
FIGURA 32. PROFILO IMPIEGATO PER LA DETERMINAZIONE DELLA RESISTENZA INTERNA.	32
FIGURA 33. PARTICOLARE DEL DIAGRAMMA CORRENTE – TEMPO RELATIVO AL PROFILO DI FIGURA 32.	33
FIGURA 34. PARTICOLARE DEL DIAGRAMMA TENSIONE – TEMPO RELATIVO AL PROFILO DI FIGURA 32.	33
TABELLA 1. CARATTERISTICHE PRELIMINARI DEL SISTEMA DI ACCUMULO.	16
TABELLA 2. PROPOSTE DI CELLE E SISTEMI AL LITIO ESAMINATE.	19
TABELLA 3. DATI TRASMESSI DAL BMS.	28

INTRODUZIONE

Gli ambiti di applicazione più promettenti dell'accumulo elettrico nel terziario sono quelli della produzione e distribuzione dell'energia elettrica e dei servizi. In particolare, l'accumulo di energia elettrica diventa interessante se può essere utilmente ed economicamente impiegato in alcuni usi finali dell'energia con una o più delle seguenti caratteristiche:

1. Utilizzatori in modo intensivo di energia elettrica con richieste di potenze di picco rilevanti rispetto al valore medio;
2. Applicazioni che possono effettuare recuperi di energia elettrica per la presenza di fasi di frenatura;
3. Sistemi per i quali è conveniente disaccoppiare la richiesta di energia elettrica da parte dell'utente dalla fornitura da parte della rete, come ad esempio in alcuni sistemi di trasporto (impianti di risalita), per la gestione del recupero energetico;
4. Servizi per i quali è necessaria la disponibilità di energia di riserva per far fronte a necessità di sicurezza a fronte di mancanza dell'alimentazione principale proveniente dalla rete pubblica.

I vantaggi ottenibili in queste applicazioni dall'uso di sistemi di accumulo non sono facilmente determinabili, giacché fortemente condizionati dalla specificità dell'applicazione e dalle caratteristiche delle tecnologie adottate. Dopo una preliminare valutazione teorica sono state individuate alcune applicazioni che riuniscono una o più delle caratteristiche favorevoli all'introduzione dei sistemi di accumulo elettrico, con particolare riferimento a sistemi di tipo elettrochimico, quali le batterie ed i supercondensatori.

Per poter meglio valutare le potenzialità tecniche ed economiche in condizioni di reale utilizzo, sono state progettate alcune applicazioni dimostrative, che potenzialmente potevano garantire risparmi energetici e ritorni economici consistenti. Una delle tecnologie identificate per il potenziale di miglioramento dell'efficienza energetica in questi settori ha riguardato l'utilizzo di un sistema di accumulo costituito da batterie al litio che permetta, opportunamente applicato ad un impianto a fune (funivia o funicolare), di recuperare l'energia prodotta dal motore dello stesso in fase di discesa e riutilizzarla per la fase di risalita. A seguito di uno studio preliminare, è stata individuata una funivia (o funicolare) con l'obiettivo di ridurre l'impegno di potenza verso la rete pubblica di alimentazione ed i consumi di energia.

Le attività del primo anno si erano concluse con l'acquisto di un sistema di accumulo (una batteria al litio completa di tecnologia avanzata), di caratteristiche tali da poter essere utilizzato come sistema pilota per effettuare una campagna di sperimentazione in laboratorio. Poi, nel secondo anno, descritto nel presente rapporto tecnico, la scelta iniziale di installazione del sistema di accumulo in un impianto a fune del tipo funivia è stata modificata, avendo individuato la possibilità di spostare la sperimentazione su una tipologia analoga di impianto a fune del tipo però funicolare. Quest'applicazione, adibita nel caso specifico al trasporto persone in ambito urbano per l'intero anno, presenta un maggiore interesse sperimentale per la valutazione del sistema di accumulo e dei vantaggi energetici ed economici ad esso collegati. All'inizio del secondo anno si è pertanto deciso di completare la campagna di sperimentazione sulla batteria acquisita per comprendere l'utilizzabilità del sistema di accumulo acquistato per questa nuova applicazione. In base ai risultati di tale sperimentazione, integrati dalle indagini sperimentali sulla funicolare selezionata, svolte dall'Università di Pisa, è stato eseguito il dimensionamento definitivo del sistema di accumulo. La scelta finale del sistema di accumulo è stata basata sulle simulazioni e sulle indagini sperimentali, ma è stata anche condizionata da ragioni logistiche e pratiche, dovute alla scelta del fornitore in grado di soddisfare le caratteristiche tecniche, economiche ed operative (tempi rapidi di consegna con collegata assistenza nella fase di avvio) del sistema prescelto. Il sistema finale è stato quindi acquistato e collaudato con prove preliminari di laboratorio presso il Centro Ricerche ENEA Casaccia, in previsione della prossima installazione

e collaudo presso l'utenza finale, identificata nell'impianto funicolare di Bergamo – S. Vigilio, messo a disposizione dalla società ATB (Azienda Trasporti Bergamo), che gestisce il trasporto urbano nella città di Bergamo e che ha intrapreso da tempo un percorso volto a massimizzare l'impiego di fonti di energia a basso impatto ambientale ed a favorire la riduzione dell'utilizzo dell'auto privata. La campagna sperimentale sull'impianto dimostrativo, per motivi di sicurezza e per intervenuti interventi programmati di manutenzione ordinaria della funicolare, troverà la sua piena esecuzione nel prossimo anno.

Il presente rapporto tecnico riporta sulle principali attività di progettazione, dimensionamento, acquisizione e fornitura del sistema. Nel dettaglio, le attività descritte sono le seguenti:

- Scelta dell'applicazione.
- Individuazione dell'impianto di destinazione.
- Dimensionamento preliminare del sistema di accumulo.
- Esecuzione di una campagna di prove sul sistema batterie acquistato di dimensioni significative (acquistato nell'anno precedente di attività).
- Progettazione esecutiva ed acquisizione del sistema di accumulo.
- Collaudo del sistema finale.

SELEZIONE DELL'APPLICAZIONE

L'applicazione da utilizzare per la sperimentazione e la dimostrazione dei risultati attesi è stata individuata nell'impianto funicolare "Colle Aperto – San Vigilio", sito in Bergamo, messo a disposizione dalla società ATB (Azienda Trasporti Bergamo), che gestisce il trasporto urbano nella città di Bergamo e che ha intrapreso da tempo un percorso volto a massimizzare l'impiego di fonti di energia a basso impatto ambientale e a favorire la riduzione dell'utilizzo dell'auto privata. La Figura 1 mostra una foto della funicolare selezionata.



Figura 1. La funicolare di Bergamo "Colle Aperto – S. Vigilio".

In una prima fase di identificazione dell'impianto di applicazione, era stata indicata la funivia FUNIFORM – SAN MARTINO, costituita da una sola cabina che viaggia sospesa a funi attraverso un primo tratto sostanzialmente in salita, con dislivello verticale nel punto più alto rispetto alla stazione di partenza di 289

m, ed un successivo tratto in discesa, con dislivello verticale tra la stazione di partenza e quella di arrivo di 66 m. La definitiva identificazione dell'impianto ha invece condotto alla funicolare "Colle Aperto – San Vigilio", che collega la città di Bergamo Alta (porta S. Alessandro) con il colle panoramico di San Vigilio attraverso un percorso di 620 m per un dislivello di 90 m. La linea è percorsa da una sola vettura, collegata ad una fune traente ad anello, che viaggia sul terreno vincolata a binari.

La differente tipologia di impianto di sperimentazione (cabina sospesa a fune nel caso della funivia, cabina su binari nel caso della funicolare) e la diversa configurazione del percorso, non hanno comunque portato a modifiche sostanziali rispetto al programma previsto per la progettazione ed esecuzione della dimostrazione.

DIMENSIONAMENTO DEL SISTEMA DI ACCUMULO

Tensione di lavoro

La funicolare Bergamo "San Vigilio" unisce Bergamo bassa a Bergamo alta, superando un dislivello di circa 90 m fra le due stazioni di partenza ed arrivo, con una corsa di circa 620 m, e prevede una fornitura trifase in basse tensione (400V) che viene trasformata in continua, con la quale si alimenta il motore elettrico di trazione, il cui albero risulta accoppiato mediante un riduttore di giri all'albero lento della puleggia che movimentata la fune di trazione. Il picco di potenza richiesta alla rete elettrica è di circa 220 kW.

La potenza impegnata verso rete viene ridotta dagli attuali 220 kW a 100 kW: nei tratti in cui la potenza richiesta dall'impianto è inferiore o uguale a 100 kW, essa viene integralmente fornita dalla rete elettrica, non appena la potenza richiesta supera il valore di 100 kW il sistema di accumulo interviene a fornire il surplus di potenza. In tal modo si riduce la forte variabilità dell'assorbimento di potenza tipica degli impianti a fune che, come tutti gli impianti di trasporto per brevi distanze, sono caratterizzati da un moto ed un carico trasportati estremamente variabili nel tempo: da questa situazione ne traggono vantaggio sia l' esercente dell'impianto, il quale beneficia di una riduzione delle spese di gestione, che il distributore dell'energia, il quale vede attenuarsi il fattore penalizzante di dover mettere a disposizione una potenza rilevante a fronte di un transito di energia piuttosto limitato.

La riduzione delle spese di gestione da parte dell' esercente dell'impianto si verifica per effetto della diminuzione di una quota delle tariffe dell'energia elettrica legate alla potenza, ed in virtù della limitazione dell'assorbimento di energia elettrica dalla rete: per ogni salita a pieno carico, il sistema di accumulo consente di risparmiare (nel senso di non assorbire dalla rete) circa 1 kWh. Pertanto la riduzione dell'energia prelevata dalla rete può stimarsi come segue:

- nella giornata media (62 corse): circa 60 kWh, pari al 20% dell'energia giornaliera attualmente prelevata,
- in un anno (270giorni): circa 16.200 kWh, pari a 3.240 € al costo di 0,2 €/kWh.

Durante la fase di discesa, si recupera l'energia di frenatura, che viene impiegata per la ricarica delle batterie.

Oltre a ridurre la potenza assorbita dalla rete elettrica, il sistema che verrà installato, tramite un banco di condensatori alloggiati all'interno del quadro elettrico di comando, realizza un "effetto rifasatore del carico", che si traduce nella stabilizzazione della tensione nel punto di consegna: corrente e tensione assorbite dalla rete sono in fase e si riduce la caduta di tensione sull'impedenza di rete. Anche in questo caso si può apprezzare il beneficio apportato in termini di miglioramento della "power quality": il gestore della rete beneficia di una diminuzione delle perdite in linea di trasmissione, l'impianto funicolare risulta più funzionale e meglio integrato con la rete elettrica, secondo il concetto di "smart grid".

Ulteriore, e non ultimo, beneficiario dei miglioramenti apportati è sicuramente l'ambiente: la quota parte di energia erogata dal sistema di accumulo, che andrebbe altrimenti fornita dalla rete elettrica, si ripercuote in termini di "emissioni evitate di CO₂" e quindi in una sostanziale riduzione dell'impatto ambientale.

A tutto quanto sopra si aggiunga la caratteristica di poter assicurare, grazie alle batterie, la continuità di servizio a potenza ridotta in caso accadano interruzioni dell'alimentazione dalla rete elettrica. Ipotizzando, quindi, che tra la rete e l'accumulo ci sia un raddrizzatore trifase a ponte di Graetz ed un convertitore a corrente continua di tipo Buck-Boost, con riferimento alla Figura 2, si può stabilire che:

- la tensione V_{cd} , a valle del convertitore AC/DC è 600 V, pari al prodotto $400 \cdot 1.5 = 600$ V
- la tensione V_{ab} , a valle del convertitore DC/DC, quindi a monte del sistema di accumulo, deve variare, per il buon funzionamento del sistema, nell'intervallo definito dal valore minimo $600 \cdot 0.7 = 420$ V, ed il valore massimo $600 \cdot 0.9 = 540$ V.

Queste relazioni possono variare secondo la configurazione adottata e le scelte di gestione della stessa. In questo rapporto queste relazioni costituiscono la base di partenza per il dimensionamento di massima del sistema di accumulo che è stato poi rivisto in base alle scelte finali.

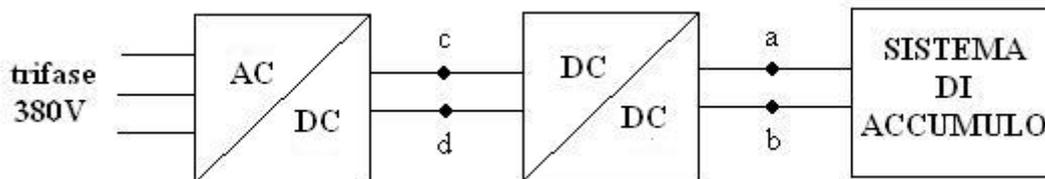


Figura 2. Schema a blocchi del sistema di accumulo e gruppo di conversione.

Numero di celle

La tensione V_{ab} coincide con la tensione ai morsetti del sistema di accumulo, quindi, assumendo il limite superiore di tensione per la singola cella del pacco batterie pari a 4,2 V (riferimento tipico per alcune tipologie di celle al litio), dal suo valore massimo si deduce che il numero di celle deve essere pari al rapporto $462/4.2=110$.

Capacità

La capacità è invece in stretta connessione con la vita richiesta: 62 corse al giorno per 320 – 360 giorni all'anno, determinano un totale di circa 100.000 cicli in 5 anni; tra l'altro, trattandosi di un impianto funicolare collocato in zona montana, bisogna anche aggiungere che tale prestazione deve poter essere effettuata anche a bassa temperatura (-20°C). Quindi la capacità deve essere tale che all'energia rilasciata dal sistema di accumulo nella fase di salita, corrisponda una bassa profondità di scarica: attraverso il calcolo dell'energia suddetta, valutata in 1.610 Wh ed assumendo un variazione di DOD (Depth of Discharge = Profondità di Scarica) pari al 5%, si ottiene per la capacità il valore preliminare di progetto di 70 Ah.

Costruzione del modello matematico e calcoli di simulazione

Tramite una simulazione si è verificato che il dimensionamento sia coerente con le specifiche richieste, di seguito vengono riportate le ipotesi adottate per simulare il comportamento del sistema di accumulo elettrochimico.

MODELLO MATEMATICO DEL PACCO BATTERIE

In prima approssimazione, si assume che la batteria di celle al litio (di seguito nominato semplicemente "batteria") sia rappresentata, vedi in Figura 3 il circuito elettrico equivalente, da una forza elettromotrice a vuoto E_0 in serie con una resistenza interna r_i , dove V_{ab} è la tensione della batteria.

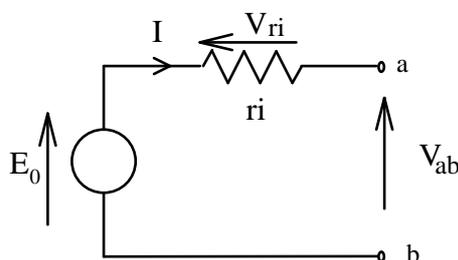


Figura 3. Schema elettrico equivalente della batteria.

Per fissare un riferimento reale si è deciso di parametrizzare il modello con i dati delle celle agli ioni di litio di grande capacità (large cell) ed alta potenza (high power cell) costruite dalla Kokam [1]. In particolare, per quanto riguarda la forza elettromotrice a vuoto E_0 , in mancanza di altro dato disponibile, si fa riferimento alle curve di scarica di Figura 4, assumendo per la definizione di E_0 i valori della curva di scarica 0,3C: con questa approssimazione si trascura a questo valore di corrente, la caduta di tensione sulla resistenza interna r_i , quindi si sottostima leggermente E_0 . La scelta della cella di riferimento è dovuta al fatto che la batteria acquistata nel primo anno di attività contiene celle prodotte dalla Kokam.

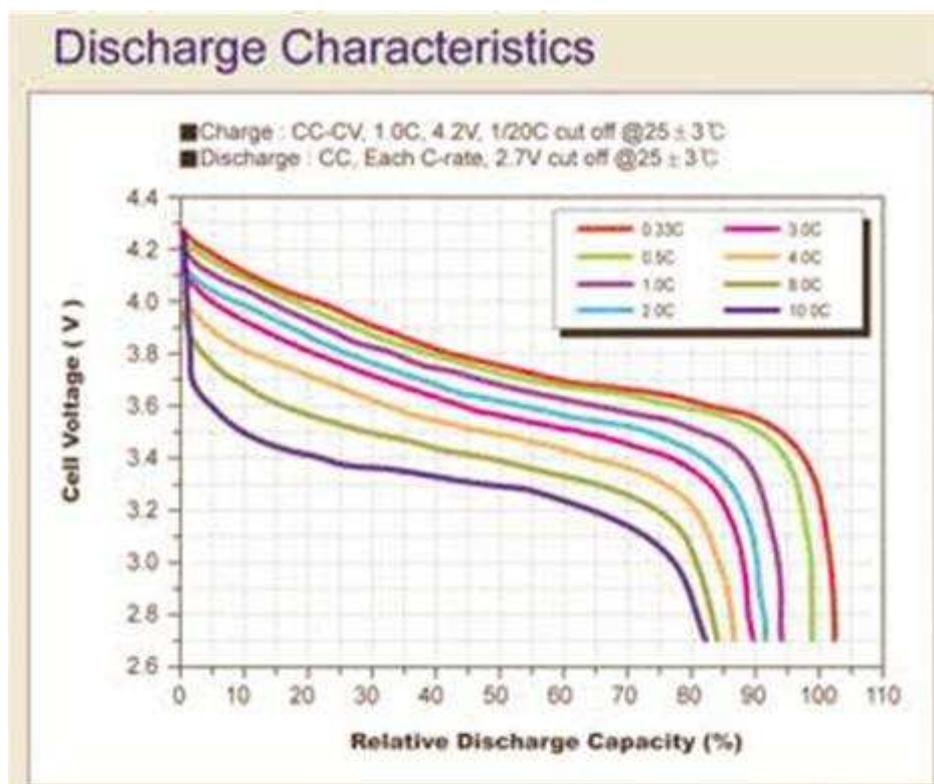


Figura 4- Curve di scarica per batterie al litio di grande capacità ed alta potenza (fonte Kokam).

Per quanto concerne la resistenza interna r_i , sempre con riferimento alla Figura 4, essa è stata stimata tramite il rapporto tra la caduta di tensione ΔV che si ha tra la curva di scarica a 0.3 C ed a 10 C nel tratto iniziale delle stesse (DOD 0 %). Si ottiene pertanto per r_i il valore pari al rapporto $(4,3 - 3,7)/700$, uguale a

0,00085 Ω . Tale valore è stato confermato tramite l'analisi delle curve di scarica riferite ad altri valori di corrente. Si è poi considerata costante la capacità della batteria, indipendentemente dal regime di scarica, ipotesi che può sembrare in contraddizione con la figura 4, ma che si giustifica pienamente con il fatto che nell'esercizio previsto la batteria sarà soggetta a correnti impulsive e non a scariche costanti nel tempo.

SCHEMA DI SIMULAZIONE

Il modello suddetto è stato quindi inserito nello schema di simulazione, realizzato in Simulink (tool riferito a Matlab 7.0) e riportato in Figura 5: in essa l'input è costituito dal profilo di potenza che, vedi Figura 8, le batterie devono erogare/assorbire per livellare la potenza di rete.

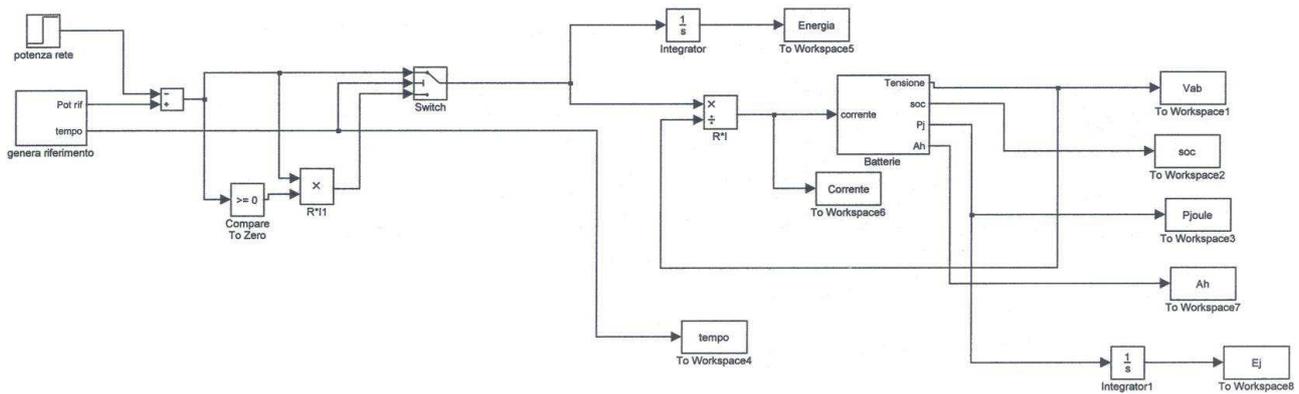


Figura 5. Schema impiegato per la simulazione.

Nella Figura 6 è presentato il dettaglio relativo al blocco batteria, realizzato utilizzando il circuito semplificato di Figura 3. Si notano i grafici nello schema che interpolano l'andamento della tensione a vuoto e delle resistenze interne in funzione dello stato di carica: nel caso presente, come detto, la resistenza viene considerata indipendente dallo stato di carica (SOC = State-Of-Charge), in quanto per prudenza si decide di assumere per esso un valore maggiorato rispetto alla normale condizione di funzionamento.

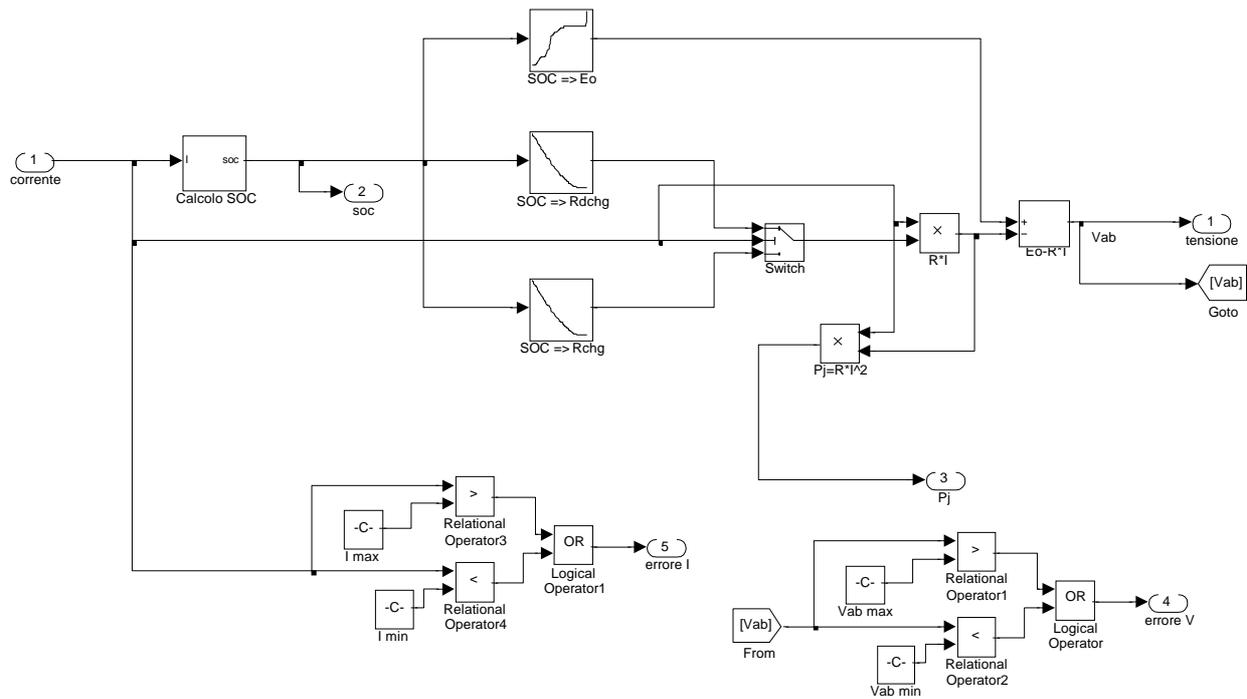


Figura 6. Blocco batteria.

Il funzionamento è il seguente: al variare della corrente di ingresso si calcolano lo stato di carica, la tensione a vuoto e la caduta dovuta alla resistenza interna, oltre alle perdite per effetto Joule.

Infine la Figura 7 mostra il dettaglio del calcolo dello stato di carica per il caso considerato.

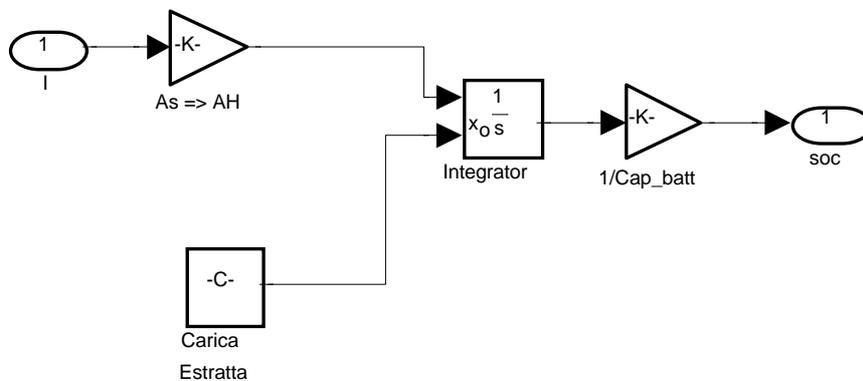


Figura 7. Calcolo di SOC.

Lo stato di carica (SOC) viene valutato integrando la corrente in ingresso e riferendosi ad uno stato di carica iniziale.

Per eseguire le simulazioni si sono scelte quattro soglie diverse di potenza di rete: 0 kW (la rete non eroga), 90 kW, 100 kW e 120 kW. I profili di potenza sono riportati in Figura 8: la rete eroga solo nella fase di salita della funicolare. Per selezionare questi valori, è stato considerato il diagramma della potenza scambiata con la rete elettrica, misurata dal gestore dell'impianto.

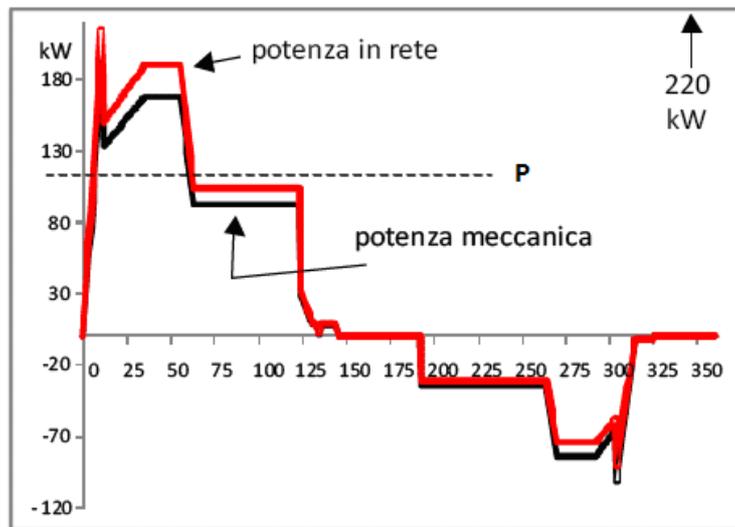


Figura 8. Curva di potenza misurata sull'impianto utilizzatore.

RISULTATI DELLA SIMULAZIONE: VALORE DELLA POTENZA INSTALLATA VERSO RETE.

Lo studio del dimensionamento ha anche incluso la scelta dello stato di carica iniziale: se si partisse con SOC=100 %, si potrebbe incorrere nel superamento del limite di tensione massima ammissibile per l'integrità della batteria, per questo si è scelto di partire dal valore di SOC=85 %.

Come detto, la simulazione è stata condotta per diversi valori della potenza impegnata verso la rete elettrica: 120 kW, 100 kW, 90 kW, 0 kW (caso estremo corrispondente all'impiego del solo sistema di accumulo). La Figura 9 mostra come con la potenza di 100 kW l'accumulo a fine ciclo si ritrovi nelle stesse condizioni di partenza.

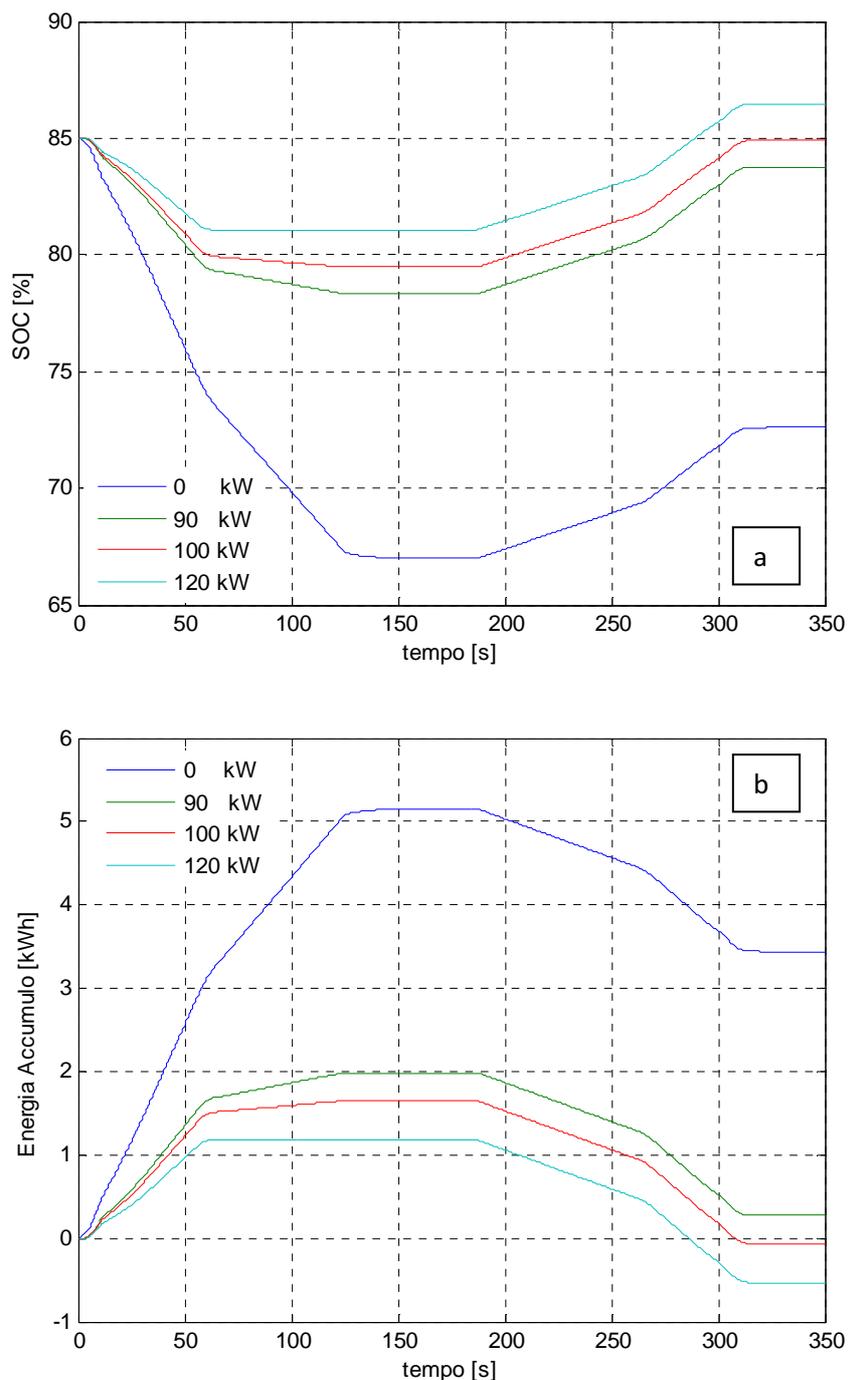


Figura 9. Diagrammi dello stato di carica (a) ed energia (b).

La simulazione a 120 kW mostra che le batterie sarebbero caricate nella fase di discesa molto più di quanto sarebbero scaricate nella successiva fase di salita, comportando un valore di SOC finale maggiore di quello iniziale: ciò vuol dire che non sarebbe possibile utilizzare nella fase di salita, tutta l'energia che l'azionamento restituisce nella precedente fase di discesa. In conformità a tali considerazioni, si consiglia pertanto di ridurre il valore della soglia di potenza prelevata dalla rete, in modo da risparmiare ulteriormente sul costo dell'impianto elettrico di rete e consentire al sistema di accumulo di recuperare l'energia restituita dall'azionamento durante la discesa e riutilizzarla tutta (ovviamente a meno delle perdite) durante la salita seguente. Limitando a 100 kW il valore della potenza di scambio verso rete, pur subendo un aumento dei valori di corrente (comunque ancora accettabili dalle batterie), si raggiunge il voluto equilibrio energetico: si accumula tutta l'energia che l'azionamento restituisce nella fase di discesa e

tale energia si riutilizza tutta nella successiva fase di salita. La Figura 10 riporta i valori di tensione e corrente assunti dalla batteria durante il funzionamento:

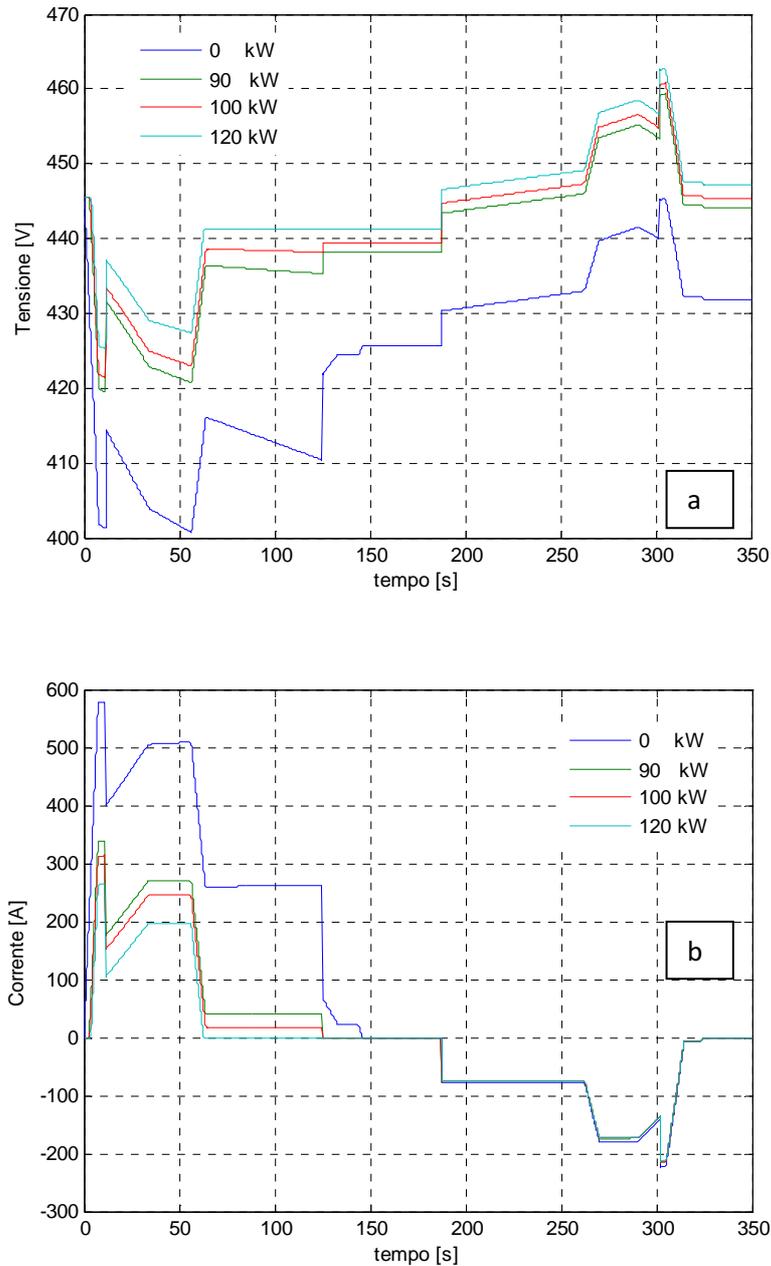


Figura 10. Diagrammi di tensione (a) e corrente (b) della batteria.

Il diagramma delle tensioni (Figura 10) dimostra che la tensione complessiva del sistema di accumulo rimane all'interno dell'intervallo 360V – 462 V, definito nel paragrafo relativo al dimensionamento, mentre la corrente aumenta al diminuire della potenza installata verso rete: la soluzione 0 kW corrisponde, ovviamente, alla condizione di maggiore sollecitazione per la batteria.

E' interessante osservare il comportamento della singola cella della batteria, in termini di tensione di cella e di corrente relativa alla capacità alla quale è sottoposta:

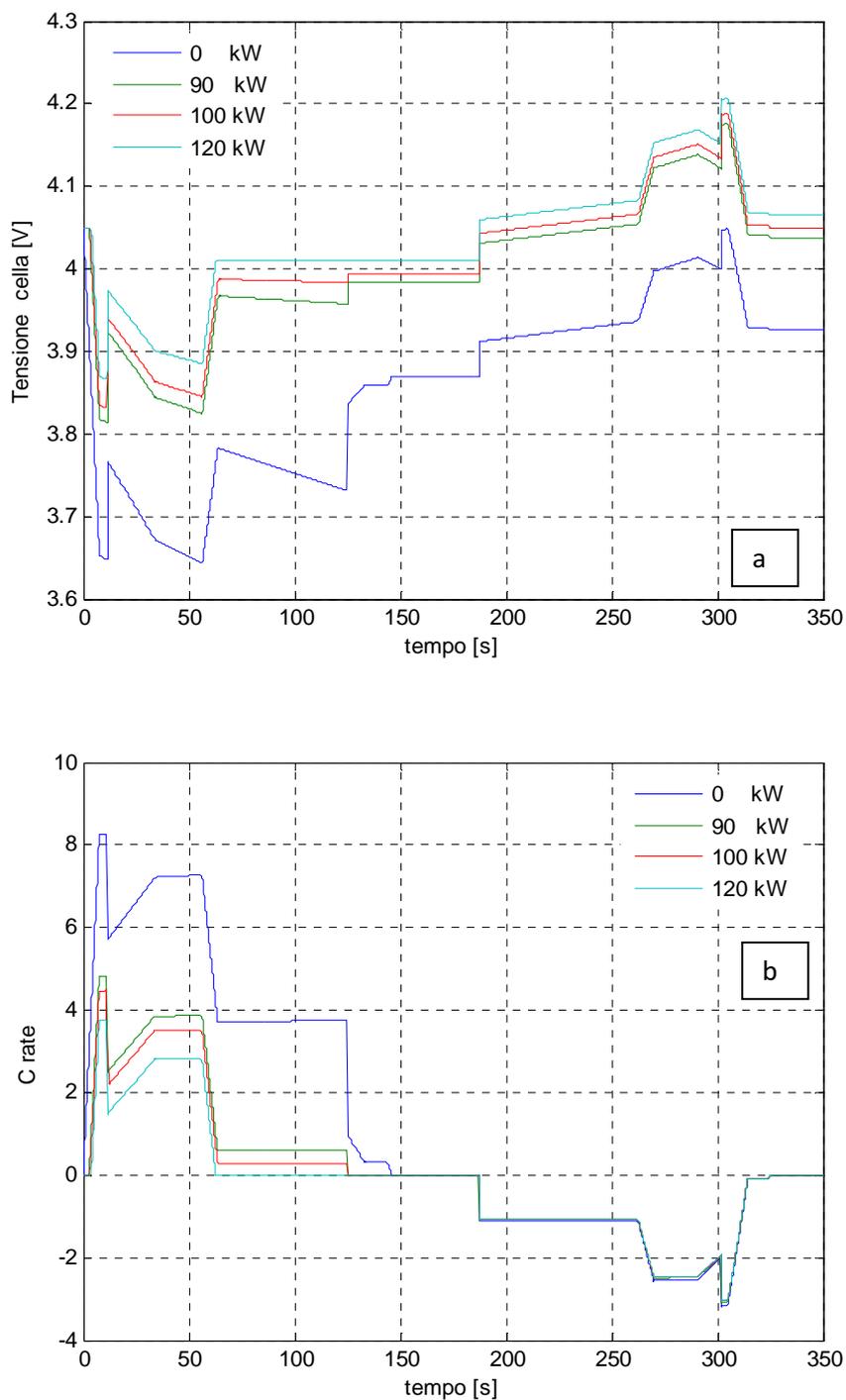


Figura 11. Diagrammi di tensione della singola cella (a) e corrente espressa come multiplo della capacità nominale (b).

Riportando i risultati dell'analisi a livello di singolo elemento della batteria (Figura 11), dal diagramma della tensione si può verificare che la cella lavora in un campo contenuto all'interno dei valori minimo e massimo raccomandati dal costruttore della batteria, e la corrente nel caso prescelto (potenza di rete installata 100kW) assume valori di picco inferiori a 5 C in scarica e 3C in carica, valori massimi continui inferiori a 4C in scarica e poco al di sopra di 2.5 C in carica: tali valori possono essere sopportati con facilità dalle batterie.

SPECIFICHE DEL SISTEMA DI ACCUMULO.

Sulla base dai dati sperimentali misurati sull'impianto dall'Università di Pisa e della simulazioni svolte in diverse condizioni prevedibili di lavoro, è stato possibile definire le specifiche di massima del sistema di accumulo elettrochimico, riassunte nella Tabella 1.

Tabella 1. Caratteristiche preliminari del sistema di accumulo.

Caratteristiche	Scelte
Tipologia di cella	celle al litio di alta potenza
Numero di celle	110
Collegamento	serie
Capacità della singola cella	70Ah
Tensione massima della batteria	circa 462 V
Tensione minima della batteria	circa 359 V
Corrente di picco in scarica	320 A x 10 sec
Corrente massima continuativa in scarica	250A
Corrente di picco in carica	210A x 5sec
Corrente massima continuativa in carica	180A
Vita ciclica	circa 100.000 cicli @ 5%DOD, -20°C;
sistema BMS	Si; con funzione di protezione e bilanciamento delle celle

PROVE SULLA BATTERIA KOKAM

La disponibilità delle curve di funzionamento dell'impianto e della batteria acquisita nel precedente periodo di attività ha consentito di realizzare un programma completo di prove di laboratorio, anche se la batteria ha caratteristiche tecniche inferiori a quelle previste in fase di simulazione e progettazione definitiva.

Le prove in laboratorio hanno avuto una molteplice valenza: 1) verifica delle caratteristiche effettive del sistema di accumulo in relazione a diversi cicli di lavoro; 2) controllo della funzionalità della parte elettronica associata alla batteria; 3) compatibilità delle caratteristiche tecniche e del comportamento in relazione alle specifiche richieste dall'applicazione individuata.

Le attività di prova sono state svolte su un sistema completo, costituito dalla connessione in serie di 74 celle agli ioni di litio da 3,7 V nominali – 12 Ah ciascuna, di marca Kokam, e relativo sistema elettronico "battery management system" (BMS) di monitoraggio, gestione e controllo, mostrato in Figura 12. La tipologia delle celle, "high power – large capacity", con anodo di grafite e catodo a base di una lega NMC (nichel, manganese e cobalto), garantiva al sistema di possedere le caratteristiche peculiari richieste dall'applicazione su impianti a fune. I requisiti della batteria acquistata ne facevano un ottimo banco di prova per effettuare una sperimentazione di laboratorio, sulla base della quale definire il dimensionamento definitivo ed emettere le specifiche per l'acquisto della batteria definitiva. Lo stesso sistema, replicato in più unità connesse in serie per raggiungere il livello di tensione richiesto dall'applicazione, poteva essere un candidato per l'installazione presso l'impianto di destinazione finale.



Figura 12. Batteria in prova KOKAM da 74 celle al litio in serie, usata come sistema “pilota”.

Operazioni di messa a punto del sistema elettronico di gestione e controllo.

L’inizio delle prove è stato preceduto da una lunga fase di messa a punto del sistema elettronico BMS, costituito da una serie di schede elettroniche TX (acquisitore/trasmittitore, uno per ogni pacchetto di 6 celle in serie) che vengono utilizzate per trasmettere via radio ad una unità centrale RX (ricevitore centrale per elaborazione dei dati) le tensioni e le temperature delle singole celle. L’unità centrale RX gestisce tali dati ed attiva gli allarmi predisposti quando si è in prossimità del raggiungimento delle condizioni limite di tensione e/o temperatura per una qualunque delle celle, garantendo in tal modo condizioni di esercizio in sicurezza.

Il primo problema da risolvere è stato quello di consentire all’unità centrale RX di dialogare con le macchine (ciclatori, vedi Figura 13) utilizzate per l’esecuzione dei test, in modo da interrompere la prova o passare a condizioni di funzionamento meno impegnative in prossimità del raggiungimento delle condizioni (limite, raccomandate dal costruttore) di sicurezza.



Figura 13. Dispositivi impiegati per le prove sul sistema “pilota”: camera climatica (sinistra), ciclatore (destra), sistema di acquisizione dati (centro).

Ciò ha richiesto la necessità di approvvigionare e installare alcuni dispositivi aggiuntivi, illustrati in Figura 14, costituiti essenzialmente da relè che commutano il loro stato in corrispondenza di una segnalazione di allarme proveniente dal BMS (per il raggiungimento dei limiti di tensione o temperatura della singola cella) o dal sistema di acquisizione dati esterno (utilizzato principalmente come ausilio per il monitoraggio delle temperature già acquisite dal BMS). Tale commutazione viene sfruttata per trasmettere la condizione di allarme all'apposito ingresso del ciclatore, il quale, a seconda dell'impostazione con cui è stato programmato, interrompe la prova o passa a condizioni di lavoro meno impegnative per le batterie.



Figura 14. Componenti aggiuntivi richiesti per consentire il dialogo tra BMS e ciclatore.

Un altro problema affrontato è stato quello riguardante il sistema di trasmissione wireless, che si è dimostrato facilmente vulnerabile, dando luogo spesso a situazioni di assenza di trasmissione che generavano l'attivazione degli allarmi di minima tensione o temperatura in corrispondenza dei canali, e quindi delle celle, di cui si perdeva l'acquisizione, e rendevano quindi impossibile il controllo del sistema e l'esecuzione dei test. A seguito di ciò, è stata necessaria un'attività rivolta a migliorare la trasmissione. Tale attività è consistita nella pulizia dei contatti faston delle schede di trasmissione TX e nell'esecuzione di fori sulla custodia del pacco batterie e dell'unità ricevente RX, in modo da creare una via di comunicazione diretta tra schede TX ed unità RX.

Prove eseguite sul sistema batterie pilota.

La campagna di prove sperimentali al banco è stata finalizzata principalmente alla valutazione dell'intera batteria in condizioni controllate, e del BMS installato. Sono stati condotti test di capacità a temperatura ambiente a regimi di scarica rappresentativi delle condizioni di esercizio pianificate. Profili di carica e scarica sono stati derivati e adattati dalle procedure di test esistenti. Il sistema di accumulo è stato infatti provato nelle condizioni seguenti:

- Carica: corrente costante e quindi tensione costante (CC-CV) @ +23°C, limite superiore di tensione di cella 4,2V (conformemente a quanto riportato dal Costruttore nella scheda tecnica);
- Scarica: corrente costante @ +23°C, limite inferiore di tensione di cella 3 V (superiore a quanto riportato dal Costruttore nella scheda tecnica).

L'esecuzione dei test ha evidenziato una riduzione della capacità del sistema batterie rispetto a quella dichiarata dal costruttore per le singole celle, a causa di fenomeni di disequalizzazione, cioè di dispersione dei valori di tensione delle singole celle, come è evidente in Figura 15.

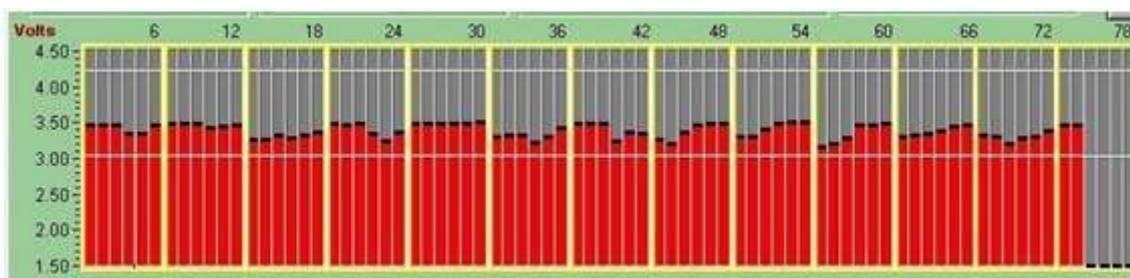


Figura 15. Dispersione dei valori di tensione delle singole celle.

Tali fenomeni possono essere contrastati, e quindi le prestazioni del sistema batterie ottimizzate, se il sistema elettronico di controllo e gestione svolge, oltre alle funzioni di monitoraggio e protezione, anche quella di bilanciamento. Nel caso del sistema pilota quest'ultima funzione non viene eseguita, per cui la disegualizzazione è stata particolarmente evidente. Nel dimensionamento definitivo che ne è conseguito, è stata pertanto richiesta la presenza di un sistema di controllo e gestione con funzione di equalizzazione.

Alla luce di quanto emerso dalle prove e dall'affinamento dei calcoli, sono state emesse le specifiche definitive del sistema d'accumulo.

SCelta DEL NUOVO SISTEMA ACCUMULO

La scelta del nuovo sistema di accumulo è stata effettuata sulla base del dimensionamento di massima precedente (vedi paragrafo 3) e delle informazioni suggerite dalla sperimentazione condotta sul sistema batterie Kokam, tenendo conto di cosa è disponibile in commercio. A tale scopo, vista la delicatezza dell'acquisto, è stata posta particolare attenzione nella scelta dei fornitori da interpellare per le richieste di offerta, per cui ci si è limitati a considerare solamente fornitori in grado di provvedere sia le batterie al litio, che la relativa elettronica di controllo, di tecnologia provata, con le specifiche richieste, ed in tempi e costi ragionevoli, garantendo nel contempo un'adeguata assistenza. I fornitori prescelti, localizzati in Italia, non erano produttori diretti delle celle e dell'elettronica ma rappresentavano od assemblavano celle e moduli di aziende straniere.

Scelta delle celle

Le proposte di fornitura ricevute sono riassunte nella Tabella 2.

Tabella 2. Proposte di celle e sistemi al litio esaminate.

PROPOSTE DI FORNITURA									
Proposta	Cella			Sistema					
	Costruttore	V _{nom} [V]	Capacità [Ah]	Paralleli	Serie	V _{nom} [V]	Capacità [Ah]	BMS	Fornitore
1	EIG	3,65	20	3	112	408,8	60	no	A
2	EIG	3,65	20	2	96	350,4	40	no	A
3	EIG	3,65	20	2	120	438,0	40	no	A
4	EIG	3,65	20	2	120	438,0	40	si	B
5	Kokam	3,70	100	1	120	444,0	100	si	B

Tutte le proposte di fornitura si riferiscono a sistemi di batterie realizzati mediante la connessione serie – parallelo di celle elementari agli ioni di litio con catodo di tipo NMC (Li[NiCoMn]O₂) ed anodo in grafite.

Le proposte da 1 a 3 sono state escluse in quanto l'offerta non era comprensiva del sistema elettronico di gestione e controllo (BMS), la cui presenza è un requisito fondamentale, come dimostrato dalle esperienze

di prova condotte sul sistema batterie Kokam che ha svolto il ruolo di sistema pilota su cui eseguire la sperimentazione preliminare.

La proposta 5 risulta invece esuberante rispetto a quanto richiesto dal dimensionamento ed inoltre sfavorita in termini di costo rispetto alla proposta 4, che si configura come il miglior compromesso tecnico – economico.

Dimensionamento finale

Il dimensionamento finale ha riguardato l'analisi di comportamento della batteria rappresentato dalla proposta 4 mediante simulazione secondo il modello matematico precedentemente sviluppato e nella verifica dei risultati forniti dal calcolo mediante confronto con le specifiche della cella elementare fornite dal costruttore.

AGGIORNAMENTO DEL MODELLO

Per quanto riguarda la forza elettromotrice a vuoto E_0 , in mancanza di altro dato disponibile, come nel precedente capitolo dedicato ad un primo dimensionamento del sistema di accumulo, si fa riferimento alle curve di scarica per il modello di cella EIG C020, cui fa riferimento la proposta di fornitura n. 4, assumendo per la definizione di E_0 i valori della curva di scarica 0,3C (vedi Figura 16): con questa approssimazione si trascura, a questo valore di corrente, la caduta di tensione sulla resistenza interna r_i , quindi si sottostima leggermente E_0 [2].

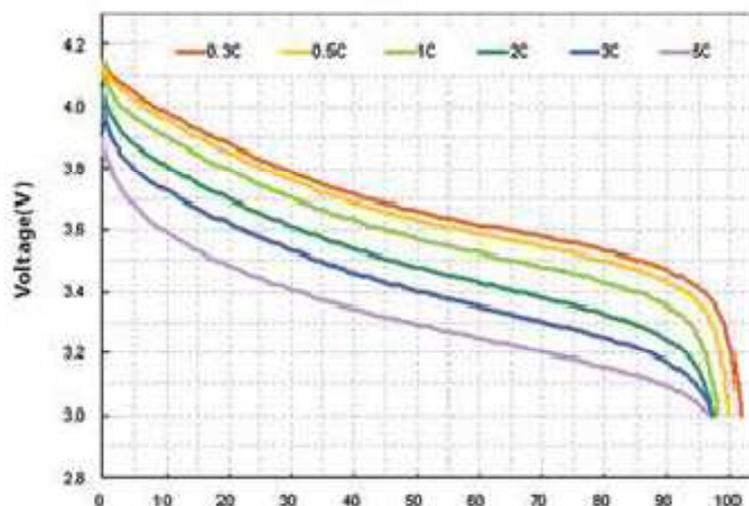


Figura 16. Curve di scarica per la batteria al litio EIG modello C020.

Per quanto riguarda la resistenza interna r_i , si è assunto il valore $3\text{m}\Omega$, come suggerito dalla documentazione del Costruttore, valore confermato da quanto stimabile attraverso il rapporto tra la caduta di tensione ΔV che si ha tra la curva di scarica a 0.3C ed a 5C nel tratto iniziale delle stesse (DOD 0 %).

Il modello è stato inoltre aggiornato modificando il valore della capacità da 70 a 20Ah ed inserendo la nuova configurazione del sistema batterie (il numero di elementi in serie $n_s = 120$ e di paralleli $n_p = 2$) come suggerito dal paragrafo precedente.

RISULTATI DELLA SIMULAZIONE

Della simulazione sono riportati i seguenti risultati:

- 1) L'andamento dello stato di carica (identico per il sistema completo e per la singola cella)

- 2) L'andamento della tensione ai capi del convertitore AC/DC
- 3) L'andamento della corrente totale del pacco
- 4) L'andamento della tensione di cella
- 5) Il rapporto tra la corrente erogata/assorbita da una cella e la sua capacità nominale
- 6) L'andamento della potenza specifica erogata/assorbita

La simulazione utilizza come stato di carica iniziale il valore 50 %, che è stato scelto per aumentare la vita della batteria. È noto infatti quanto possa essere un fattore di invecchiamento la ricarica delle batterie al litio in prossimità della piena carica (DOD≈0). La Figura 17 mostra la potenza specifica erogabile/assorbibile in funzione della profondità di scarica, e rende una delle motivazioni della scelta e del fatto che, per i motivi precedentemente detti, la capacità nominale installata è stata ridotta da 70Ah (come richiesto dal dimensionamento iniziale) a 40Ah, si vedano in proposito i risultati delle simulazioni successive [2].

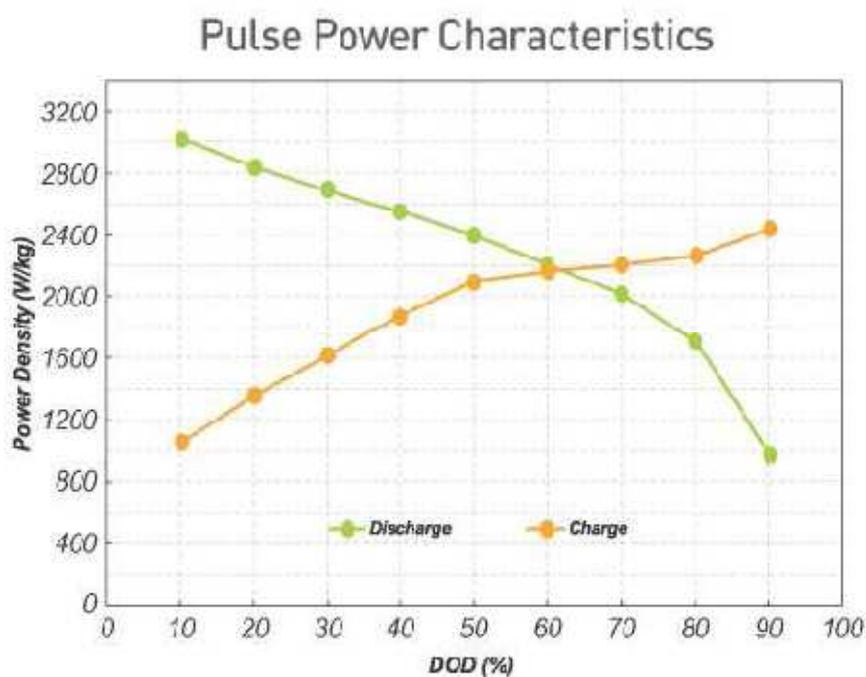


Figura 17. Potenza specifica erogabile/assorbibile in funzione della profondità di scarica.

E' possibile vedere di seguito i risultati della simulazione. Si osserva che vengono rispettati i vincoli sulla tensione ipotizzati per il corretto funzionamento del sistema, inoltre il C_{rate} (la corrente espressa come multiplo o sottomultiplo della capacità nominale della cella,) di carica/scarica massimo è 5.5 ed il continuativo è circa 4.3, che non dovrebbero comportare un veloce degrado della batteria. Considerando il diagramma precedente, non si eccede la potenza specifica erogabile dalla batteria.

COMPORAMENTO GLOBALE

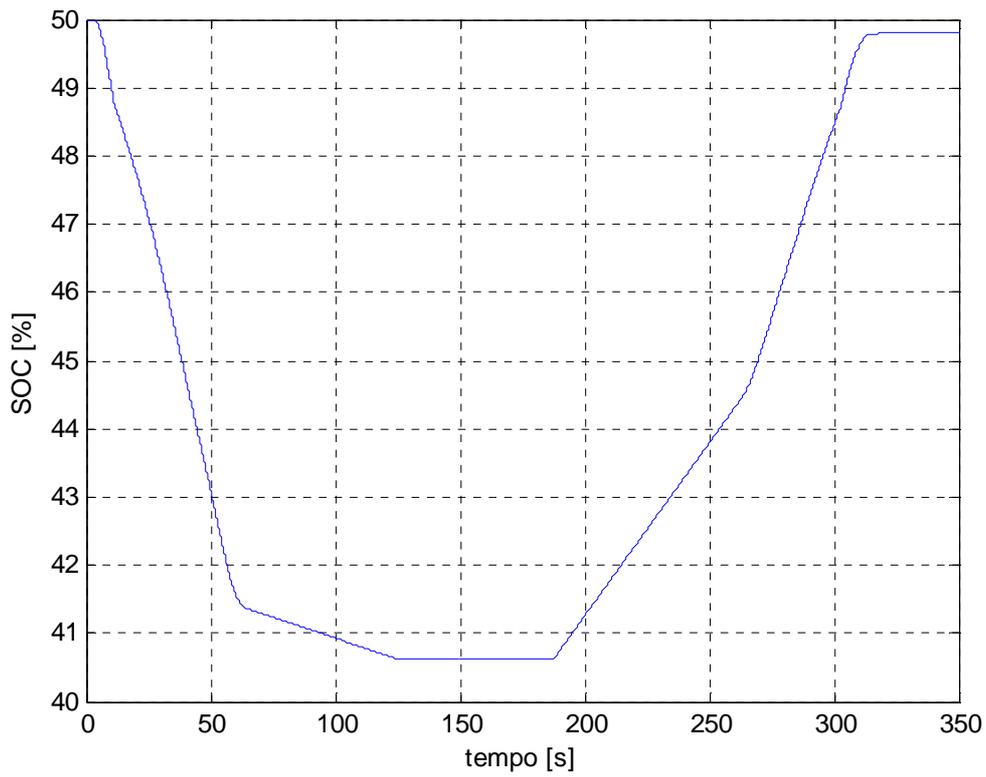


Figura 18. Andamento dello stato di carica (SOC) per il sistema batterie EIG – proposta n. 4.

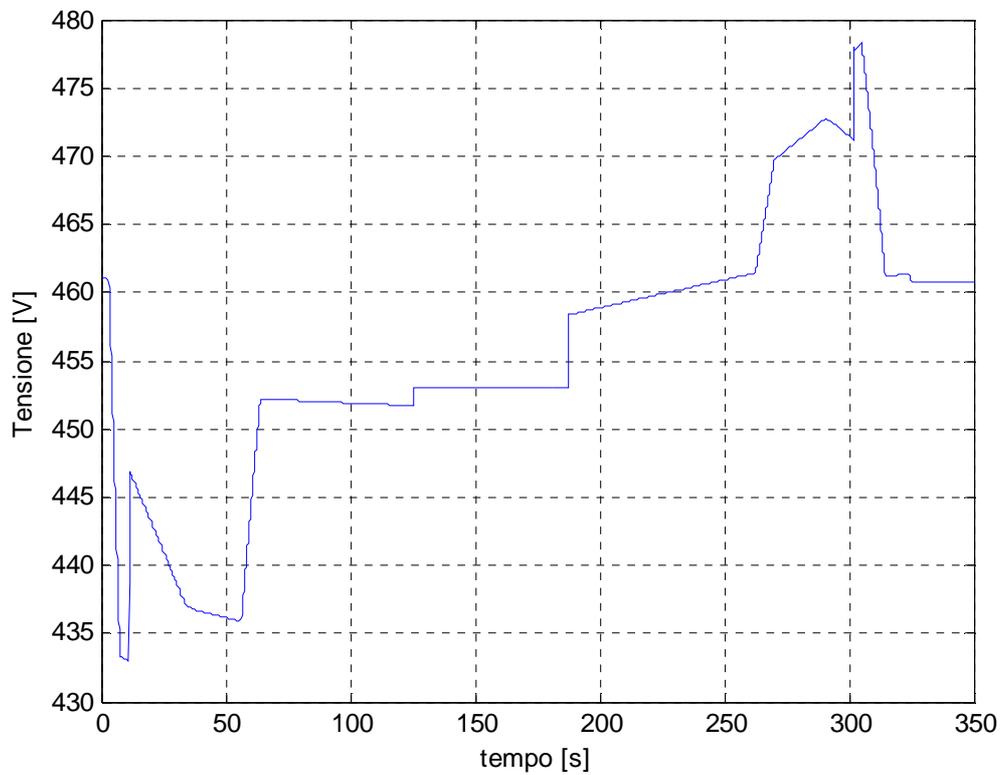


Figura 19. Andamento della tensione totale per il sistema batterie EIG – proposta n. 4.

Da tale diagramma si ricavano i valori minimo e massimo della tensione di batteria: $V_{ab \text{ min}}=433$, $V_{ab \text{ max}}=478$

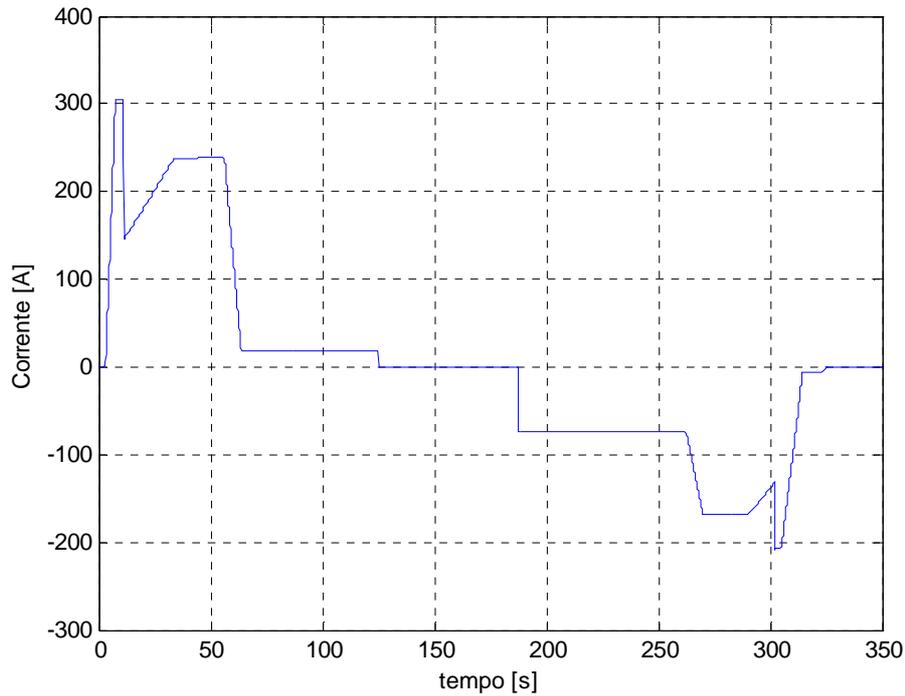


Figura 20. Andamento della corrente di pacco per il sistema batterie EIG – proposta n. 4.

COMPORTAMENTO DELLA SINGOLA CELLA

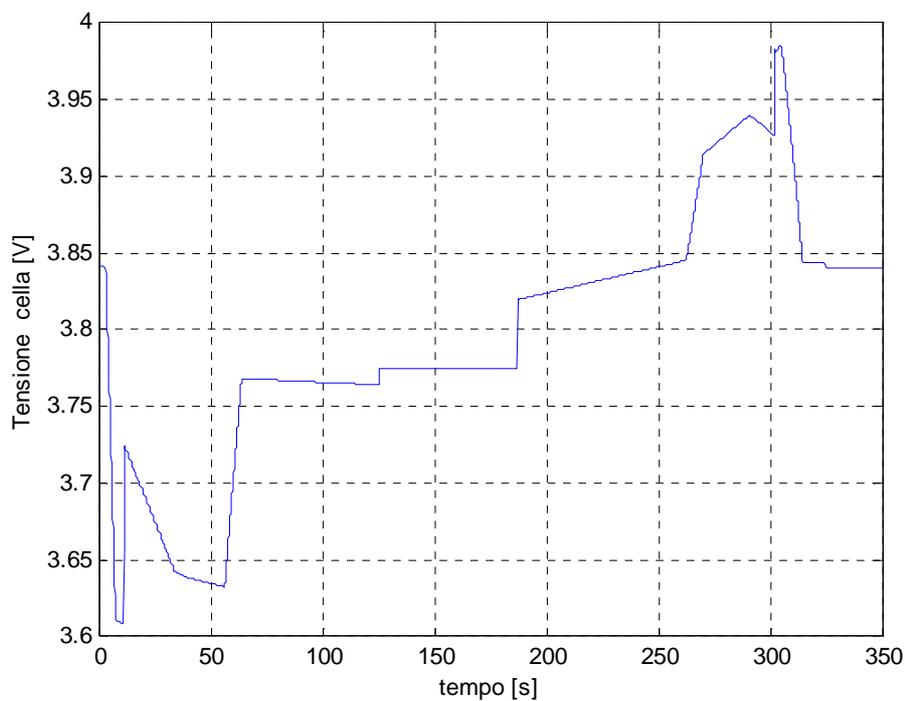


Figura 21. Andamento della tensione di cella per il sistema batterie EIG – proposta n. 4.

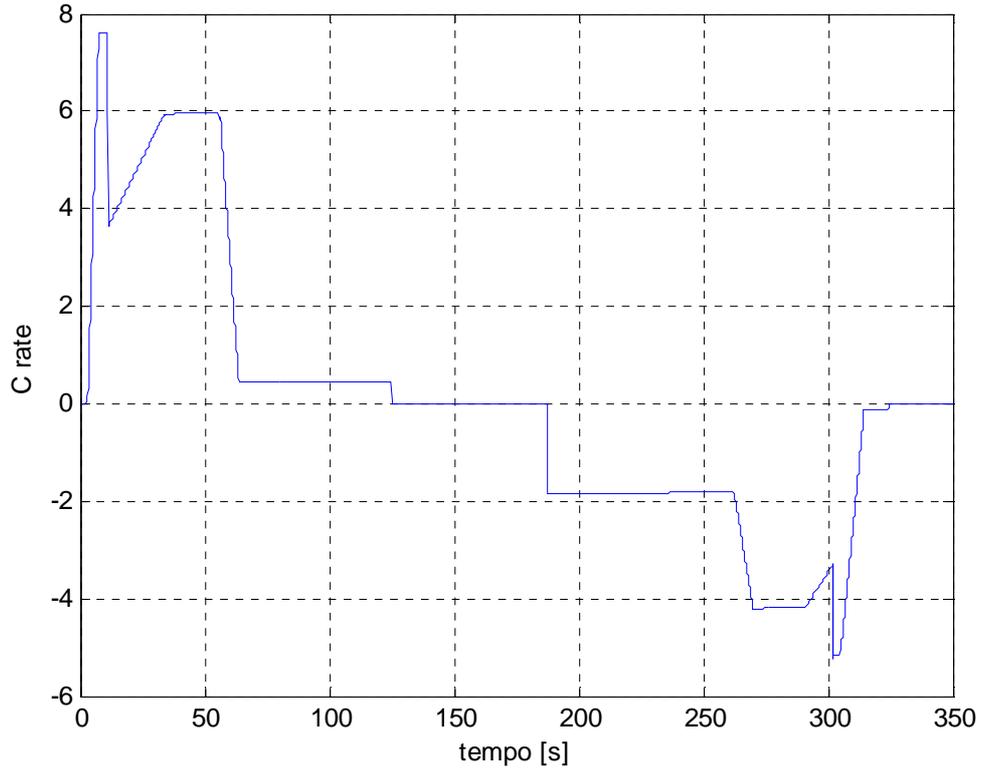


Figura 22. Andamento del tasso di corrente (C_{rate}) per il sistema batterie EIG – proposta n. 4.

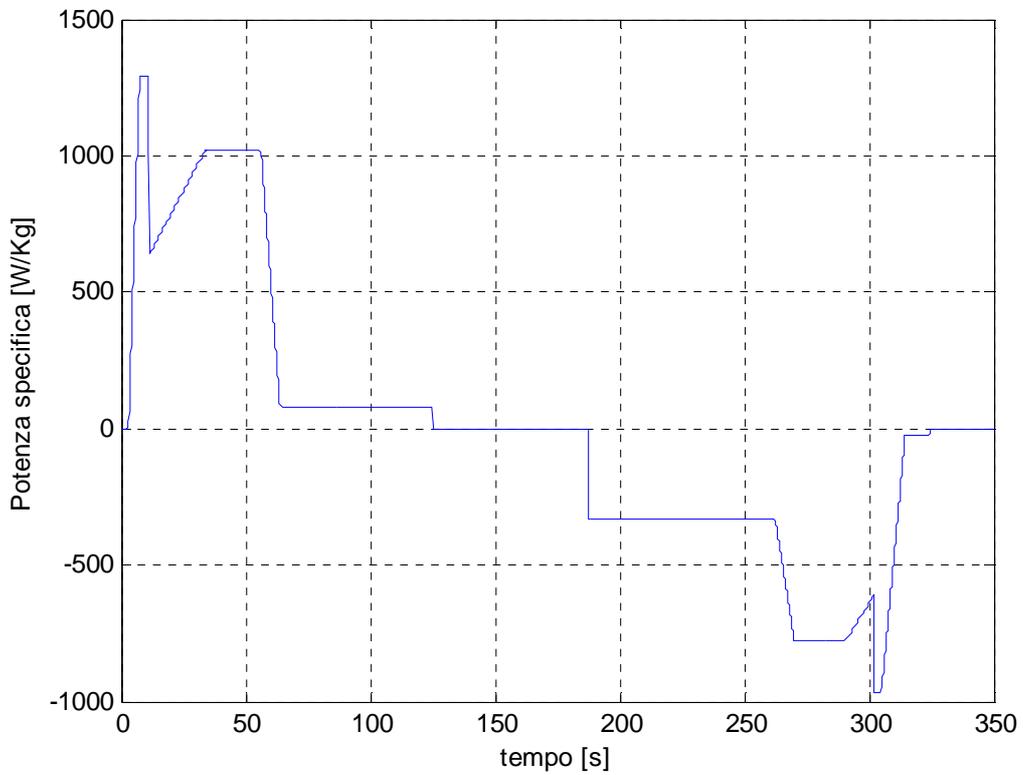


Figura 23. Andamento della potenza specifica per il sistema batterie EIG – proposta n. 4.

VERIFICA DELLA BATTERIA PRESCELTA MEDIANTE CONFRONTO DEI VALORI FORNITI DALLA SIMULAZIONE CON QUELLI INDICATI DAL COSTRUTTORE DELLE CELLE.

I valori dei calcoli simulanti le prestazioni che il sistema di accumulo deve fornire durante l'esercizio secondo la curva di potenza riportata in Figura 8 pag 9 del presente documento, sono stati confrontati con quelli riportati nel data sheet della cella (vedi Figura 24) [2].

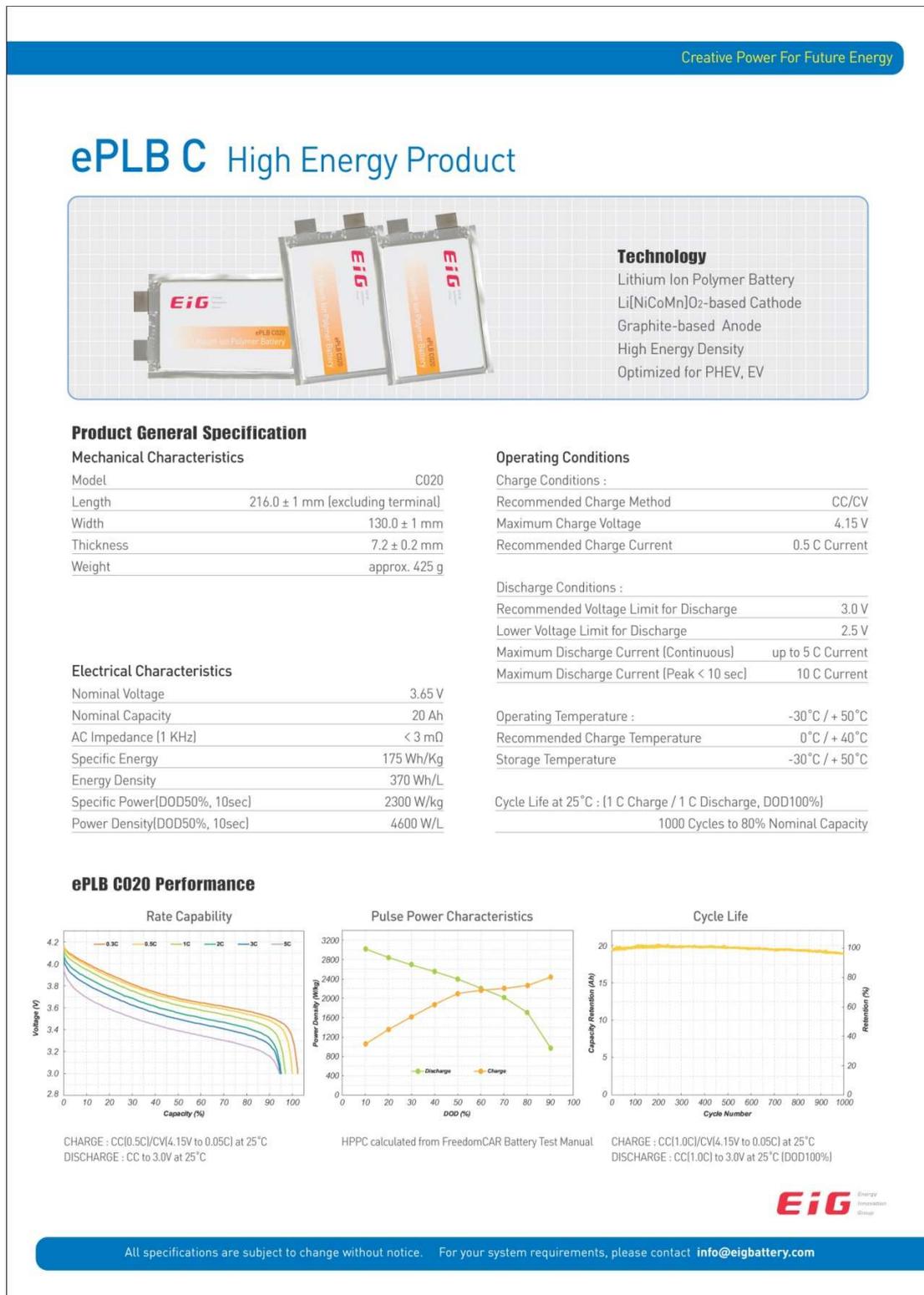


Figura 24 (a). Scheda tecnica della cella EIG modello C020 (parte 1).

Major Performance of ePLB	
1 High Energy Density	<ul style="list-style-type: none"> ▣ Its energy density is 2-5 times greater than that of lead-acid battery, and is 2 times greater than that of Ni-MH allowing the solution to be light and small, ▣ Over 180 Wh/kg for cell, Over 380 Wh/kg for pack
1 High Power Density	<ul style="list-style-type: none"> ▣ It has high power density so its capacity is slightly different from rated capacity even under rapid discharging. It has small heat generation so it is easy to control temperature, ▣ Maximum power: Continuous 3C, Momentary (5 seconds) 10C
1 Long Cycle Life	<ul style="list-style-type: none"> ▣ It has long cycle life for reduced maintenance costs ▣ Over 1000 times (DOD 100%), Over 5000 times 5000 (DOD 50%)
1 Quick Charging	<ul style="list-style-type: none"> ▣ Quick charging is possible, and high workability and convenience are guaranteed, ▣ Capacity for 10-minute charging: Maximum 90%

Figura 24 (b). Scheda tecnica della cella EIG modello C020 (parte 2).

Nel calcolare le prestazioni della cella, considerando che le celle elementari sono connesse in parallelo a due a due, bisogna moltiplicare per due i valori riportati nella scheda tecnica, ovvero considerare la capacità pari a 40 Ah anziché 20 Ah.

Si riporta di seguito il confronto:

- corrente di picco in scarica: il valore fornito dalla simulazione è circa 300A per 3 sec., mentre la scheda tecnica dichiara che si può sopportare una corrente pari a 10C (10 volte la capacità nominale, quindi, per quanto sopra detto, 400A) per 10 sec.;
- massima corrente continuativa di scarica: la scheda tecnica riporta un valore pari a 5C (valore in A pari a 5 volte il valore della capacità nominale, quindi 200A). Il diagramma della corrente di pacco batterie fornito dalla simulazione indica che durante la fase di scarica la corrente supera tale valore per circa 35 secondi, assumendo un valore massimo di 240A per circa 25 secondi: tale situazione si inquadra come una delle situazioni possibili che sono intermedie tra i due casi limite di 200A continuativi e 400A per 10 sec.;
- massima corrente di carica: la scheda tecnica indica che la condizione di “quick charging” è possibile. In 10 minuti di carica si può immettere nella batteria il 90% (massimo) della capacità, il che corrisponde ad una corrente di 216A per 10 minuti: tale situazione limite appare compatibile con il profilo di carica che si registra durante la fase di discesa della funicolare, in cui la corrente di carica raggiunge 80A per 80 sec., 170 A per 25 sec. ed un picco di 200 A per 3 sec.;
- vita: il Costruttore garantisce 5000 cicli con profondità di scarica del 50%. Nel nostro caso si realizzano dei micro cicli con profondità di scarica del 10% (vedi diagramma SOC) a partire da uno stato di carica iniziale pari a 0,5: tali fattori concorrono nell’apportare benefici alle batterie in termini di riduzione dell’invecchiamento e quindi aumento della vita utile delle batterie, in quanto il sistema si trova a lavorare nel campo in cui la resistenza interna assume il suo valore minimo.

IL SISTEMA DI ACCUMULO DEFINITIVO

Come detto in precedenza, il pacco batterie definitivo è costituito da una serie di 120 coppie (paralleli) di celle elementari EIG modello C020, aventi ciascuna la capacità di 20 Ah. Fisicamente tale pacco viene realizzato mediante la connessione in serie di 5 moduli da $86,4V_{nom} - 40Ah$, ciascuno costituito dalla serie di 24 coppie di celle elementari (vedi Figura 25).



Figura 25. Il sistema di accumulo definitivo.

Al suddetto pacco batterie si aggiunge l'elettronica di controllo e gestione, costituita da 5 schede elettroniche "slave", una per ogni modulo, situata in corrispondenza del coperchio del modulo stesso, ed una scheda elettronica "master", che verrà alloggiata nel quadro generale del convertitore ed avrà il compito di ricevere le informazioni di tensione parziale e temperatura delle singole coppie di celle trasmesse via CAN dalle schede slave, e gestire le stesse dialogando con il convertitore in modo da garantire un esercizio sicuro (protezione in caso dell'approssimarsi o del verificarsi di condizioni anomale di tensione, corrente e temperatura) ed ottimizzato (equalizzazione delle celle, in modo da consentire all'insieme batterie di fornire le prestazioni dichiarate dal costruttore per la singola cella).



Figura 26. Scheda master (sinistra) ed unità slave (destra).

L'insieme costituito dal pacco batterie più l'elettronica di monitoraggio, gestione e controllo, costituisce il sistema batterie completo.

PROVE DI VALIDAZIONE PRELIMINARE

Ricevuti i componenti del sistema batterie, si è proceduto all'esecuzione dei collegamenti e successivamente all'esecuzione di alcune prove di carica – scarica.

Esecuzione dei collegamenti.

All'atto della ricezione della fornitura, sono state attivate le procedure di accettazione in ingresso, consistenti nella verifica dell'integrità del materiale e nella misura della tensione a vuoto dei singoli moduli. Quest'ultima ha consentito anche una verifica delle polarità indicate dal fornitore sullo chassis di ogni singolo modulo.

Successivamente si è proceduto alla realizzazione delle connessioni di segnale: la scheda "slave" di ogni modulo è stata collegata, per mezzo di appositi cablaggi, con quella del modulo adiacente per la realizzazione del cosiddetto "anello di comunicazione CAN". L'ultimo modulo raggiunto dalla catena così costituita, è stato collegato all'apposito ingresso della scheda "master". L'unità "master" è stata poi collegata mediante cavo seriale ad un PC, su cui era stato preventivamente installato il software "Teraterm" del BMS. In questo modo è stato possibile introdurre i vari parametri (numero di celle, numero di serie – paralleli, capacità) di configurazione e quindi verificare la trasmissione dei dati da parte del BMS e la loro visualizzazione. In particolare è stata verificata la trasmissione (e la correttezza dei valori) di tensione parziale delle singole coppie di celle e di alcune temperature (vedi Tabella 3).

Tabella 3. Dati trasmessi dal BMS.

COM1:115200baud - Tera Term VT							
File	Edit	Setup	Control	Window	Help		
00-00-ba-31	009		3.609	3.607	3.605	N.C.	N.C.
00-00-ba-39	010		3.605	3.594	3.609	N.C.	N.C.
00-00-ba-52	011		3.603	3.608	3.616	N.C.	N.C.
00-00-ba-59	012		3.610	3.612	3.614	N.C.	N.C.
00-00-af-c2	013		3.609	3.603	3.616	N.C.	N.C.
00-00-ba-32	014		3.612	3.602	3.615	N.C.	N.C.
00-00-ba-3a	015		3.604	3.597	3.605	N.C.	N.C.
00-00-ba-53	016		3.614	3.615	3.609	21.3	20.9
00-00-ba-5a	017		3.608	3.601	3.618	N.C.	N.C.
00-00-af-c3	018		3.614	3.616	3.612	21.9	21.0
00-00-ba-33	019		3.613	3.618	3.612	21.3	21.3
00-00-ba-3b	020		3.615	3.615	3.613	22.0	21.2
00-00-ba-54	021		3.618	3.602	3.603	N.C.	N.C.
00-00-ba-5b	022		3.612	3.615	3.614	22.1	21.7
00-00-af-c4	023		3.620	3.603	3.610	N.C.	N.C.
00-00-ba-34	024		3.616	3.610	3.603	N.C.	N.C.
00-00-ba-3c	025		3.610	3.603	3.604	N.C.	N.C.
00-00-ba-55	026		3.607	3.616	3.605	N.C.	N.C.
00-00-ba-5c	027		3.610	3.603	3.612	N.C.	N.C.
00-00-af-c5	028		3.602	3.615	3.608	N.C.	N.C.
00-00-ba-35	029		3.604	3.613	3.614	N.C.	N.C.
00-00-ba-3d	030		3.608	3.614	3.614	N.C.	N.C.
00-00-ba-56	031		3.612	3.619	3.615	N.C.	N.C.
00-00-ba-5d	032		3.602	3.615	3.607	N.C.	N.C.
00-00-af-c6	033		3.615	3.610	3.609	N.C.	N.C.
00-00-ba-36	034		3.616	3.610	3.610	N.C.	N.C.
00-00-ba-3e	035		3.616	3.612	3.616	N.C.	N.C.
00-00-ba-57	036		3.613	3.607	3.616	20.7	21.5
00-00-ba-5e	037		3.613	3.610	3.608	N.C.	N.C.
00-00-af-c7	038		3.627	3.615	3.619	21.0	21.5
00-00-ba-37	039		3.607	3.618	3.607	21.2	21.8
00-00-ba-3f	040		3.607	3.626	3.612	21.1	21.5
00-00-ba-5f	041		3.613	3.612	3.614	21.9	22.2

SOC:		LEN:		PWM:		0%	Vtot:
Tl:	2.958V	Tih:	3.443V	Tih:	3.540V		
Vmin:	3.594V	00-00-ba-39	n	2	Vmax:	3.627V	00-00-af-c7 n 1

Infine sono state realizzate le connessioni di potenza mediante barrette di rame di sezione sufficiente per l'esecuzione di alcune prove di validazione preliminare.

Esecuzione di prove di validazione preliminare.

Dopo aver realizzato le connessioni elettroniche di segnale e potenza, il sistema batterie completo è stato collegato al ciclatore ed è stato sottoposto ad una serie di prove preliminari a temperatura ambiente aventi lo scopo di testare la integrità ed il buon funzionamento di tutte le celle costituenti il pacco batterie e dell'elettronica ad esso associata.

Le prove sono costituite essenzialmente da profili di carica e scarica aventi anche lo scopo di misurare la capacità effettiva del pacco e rilevare la sua resistenza interna. In particolare si sono applicati i seguenti profili:

profilo n. 1

- Scarica a corrente costante di valore pari alla metà della capacità nominale ($C/2$, corrispondente a 20 A). Arresto della scarica in corrispondenza della tensione minima 360 V (corrispondente a 3 V per cella);
- Pausa 300 sec.;
- Carica CC/CV a corrente costante $C/2$ (20 A) fino a tensione 498 V (corrispondente a 4,15 V per cella) e quindi a tensione costante e corrente decrescente. L'arresto della carica avviene per raggiungimento del valore di capacità (predisposto a 45 Ah) o del limite inferiore di corrente (predisposto ad 1 A).
- Pausa 300 sec.

profilo n. 2

- Scarica a corrente costante di valore pari alla capacità nominale ($1C$, corrispondente a 40 A). Arresto della scarica in corrispondenza della tensione minima 360V (corrispondente a 3V per cella);
- Pausa 1800 sec.;
- Carica a corrente costante $1C$ (40A) fino a tensione 468 V (corrispondente a 3,9 V per cella);
- Carica CC/CV a corrente costante $C/2$ (20 A) fino a tensione 498V (corrispondente a 4,15 V per cella) e quindi a tensione costante e corrente decrescente. L'arresto della carica avviene per raggiungimento del valore di capacità (predisposto a 45Ah) o del limite inferiore di corrente (predisposto ad 1 A).
- Pausa 3600 sec.

Il profilo di prova n. 1 è il primo a cui è stato sottoposto il sistema batterie: si tratta pertanto di un ciclo non impegnativo, che è stato eseguito per verificare il corretto funzionamento del BMS ed osservare il comportamento delle celle durante la scarica e la carica al fine di verificare la presenza di eventuali problemi (ad es. la presenza di qualche cella non funzionante).

Il profilo 2 è stato eseguito per effettuare una prima stima della capacità del sistema. Di seguito si riportano i diagrammi delle grandezze rilevate in questa seconda prova.

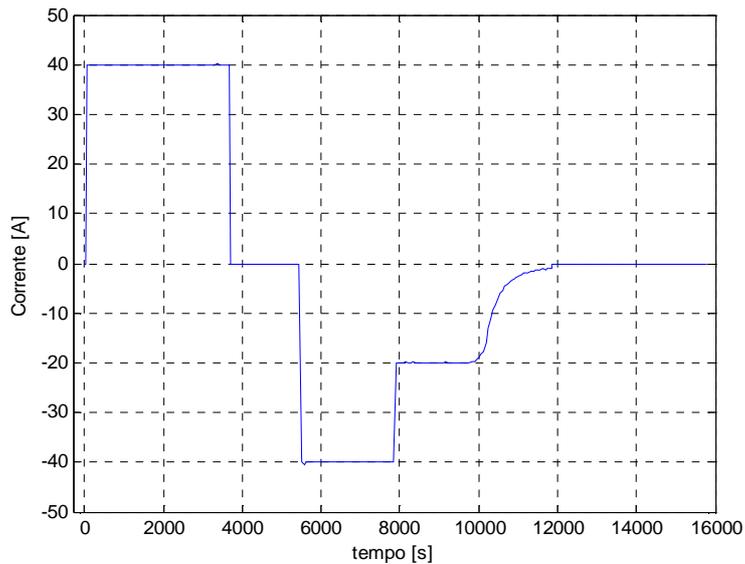


Figura 27. Andamento della corrente in funzione del tempo.

La corrente di scarica (in Figura 27) è costante e pari a 40 A, mentre quella di carica viene prima posta allo stesso valore e successivamente dimezzata: questo è stato fatto perché in carica la batteria, una volta superato il valore di SOC di 0,5 % a parità di corrente si scalda maggiormente (come specificato dal fornitore).

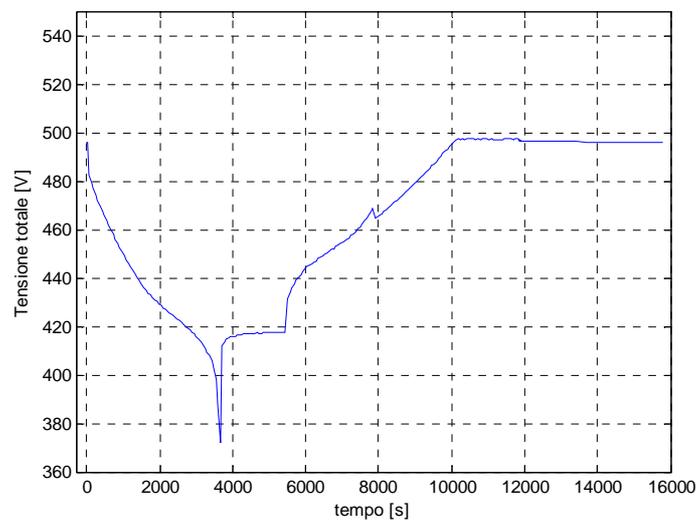


Figura 28. Andamento della tensione totale in funzione del tempo.

La Figura 28 riporta l'andamento temporale della tensione, solo a fine scarica (SOC < 0.1) si ha un crollo della stessa, non è possibile riportare i dati delle tensioni parziali delle singole monocelle, ma l'elettronica di controllo ha mostrato come la differenza tra il valore minimo e massimo di queste sia stato contenuto in 0.004 V in tutta la prova, ad eccezione della fase finale a SOC < 1. Successivamente, nella fase di pausa, l'elettronica ha riequilibrato le tensioni parziali.

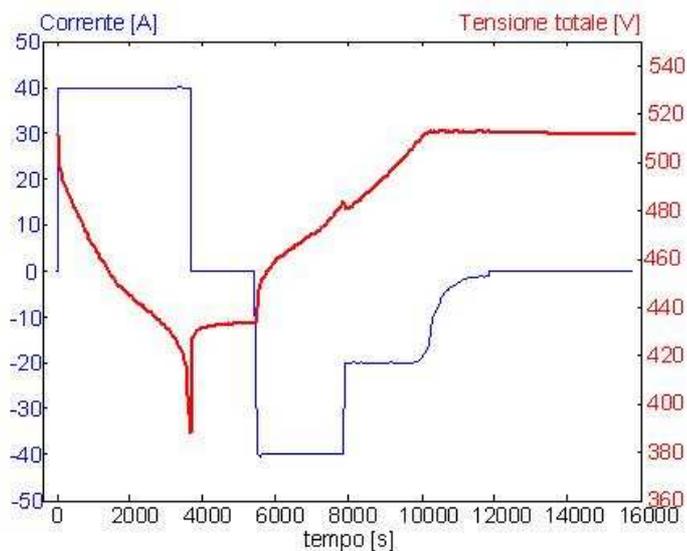


Figura 29. Andamento cumulativo della corrente e della tensione totale in funzione del tempo.

La Figura 29 permette un confronto diretto tra gli andamenti temporali di corrente e tensione, si apprezza la dinamica delle batterie e si vede come ad un certo punto la batteria sia praticamente carica ed occorre diminuire la corrente per effettuare una carica a $V=\text{costante}$.

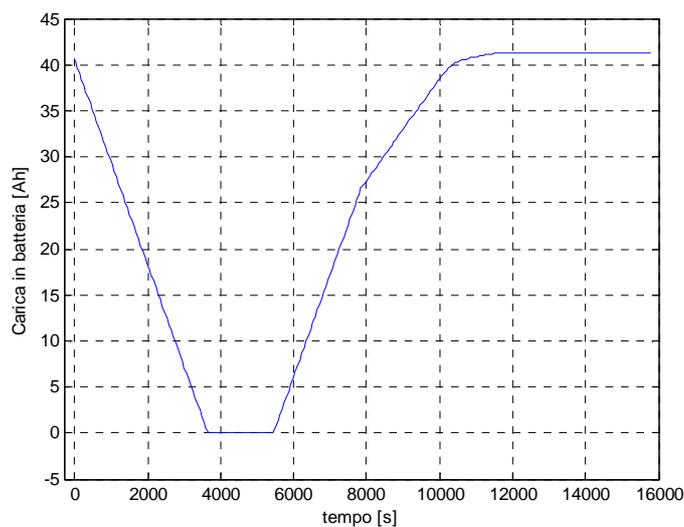


Figura 30. Andamento temporale della carica accumulata in batteria.

La Figura 30, che è stata costruita dopo l'analisi dei risultati, mostra che durante la prova la batteria ha prima scaricato 40.4 Ah e ne ha successivamente accumulati 41.3, in linea con le specifiche richieste.

Quanto detto è confermato dalla figura successiva, che mostra la schermata finale del ciclatore in Figura 31.

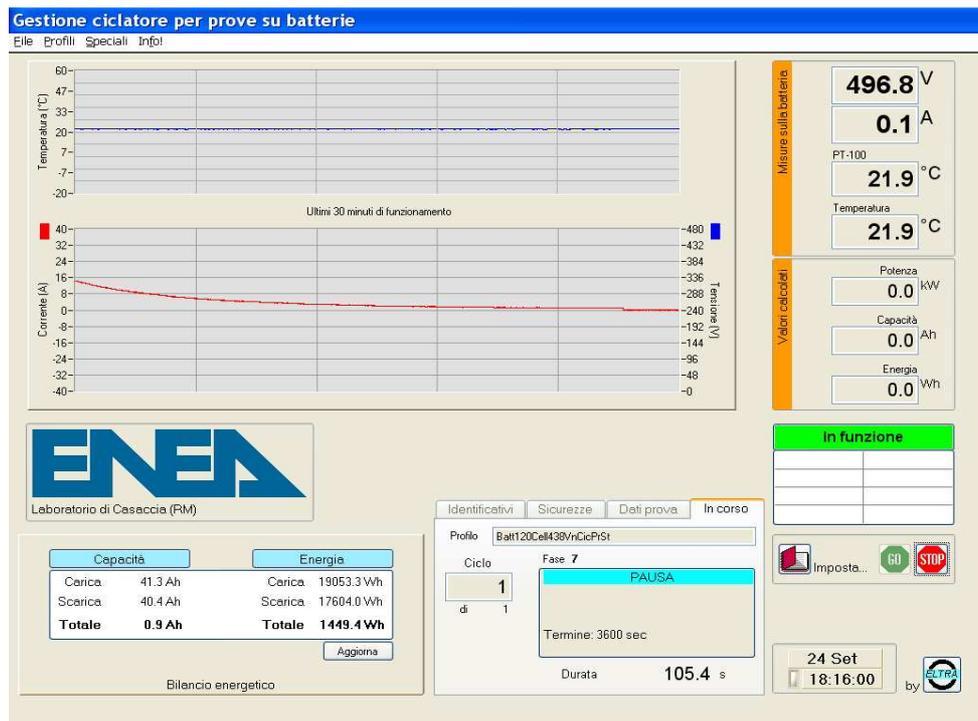


Figura 31. Bilancio degli Ah di carica e scarica relativamente all'esecuzione del ciclo n. 2.

Dopo aver ottenuto questi primi risultati si è impostato un profilo di scarica pensato per eseguire il rilievo della resistenza interna della batteria ed anche, in prospettiva, dei parametri necessari per caratterizzare la dinamica del pacco. L'intervallo di stato di carica considerato è quello compreso tra l'80 % ed il 20 %, il rilievo viene eseguito ad intervalli del 10%. La Figura 32 mostra la schermata del ciclatore con l'impostazione della prova, la Figura 33 l'andamento della corrente e la Figura 34 il corrispondente andamento della tensione.

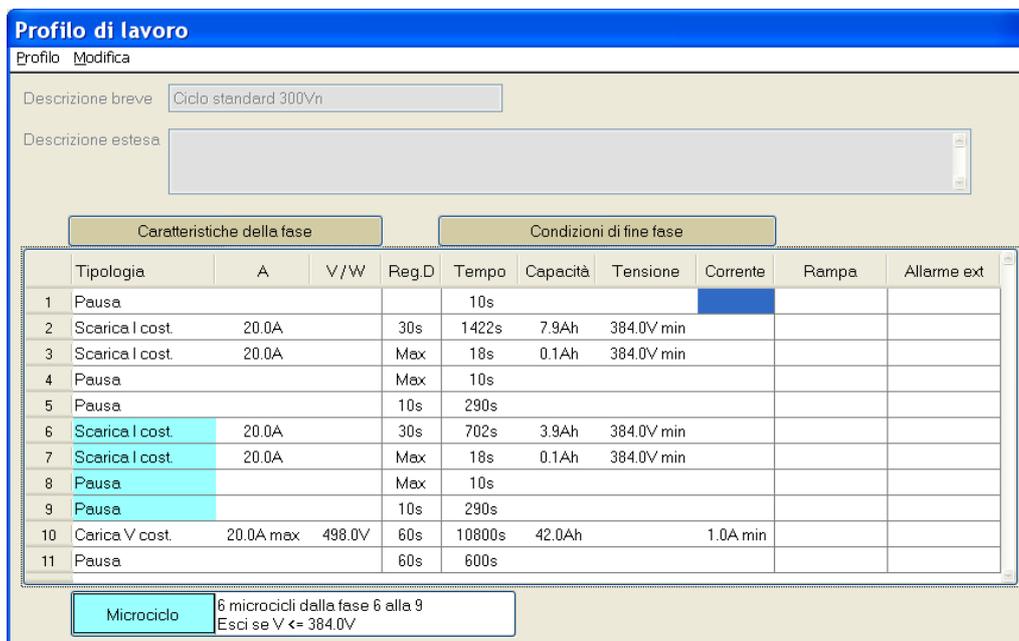


Figura 32. Profilo impiegato per la determinazione della resistenza interna.

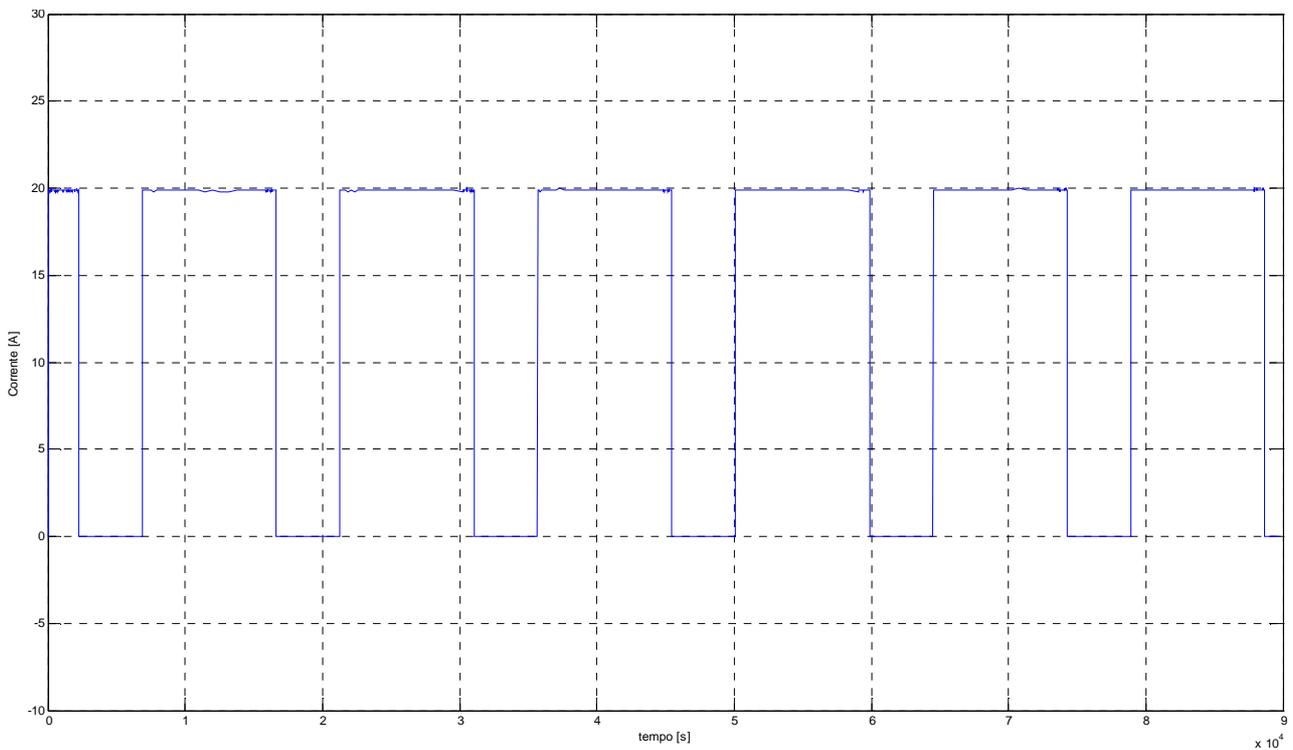


Figura 33. Particolare del diagramma corrente – tempo relativo al profilo di Figura 32.

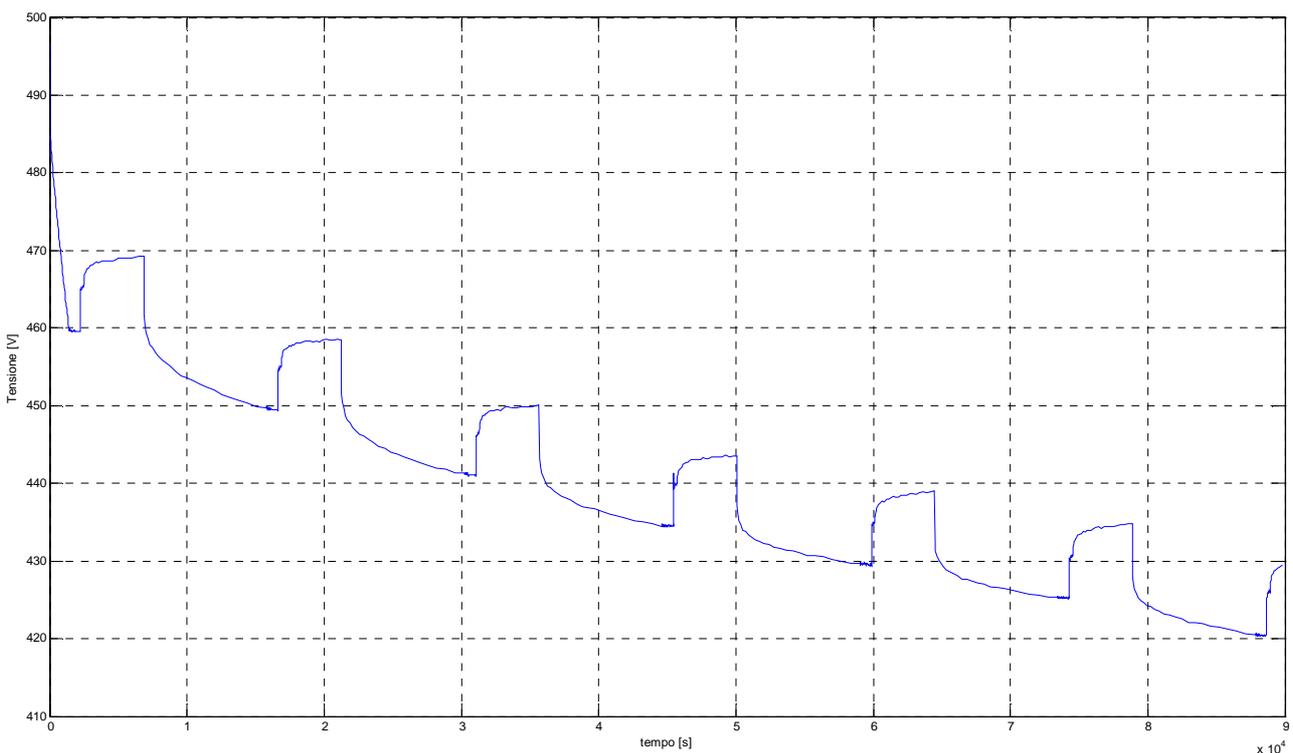


Figura 34. Particolare del diagramma tensione – tempo relativo al profilo di Figura 32.

PROSECUZIONE DELLE ATTIVITÀ

Il fermo impianto che avverrà a Bergamo a causa della revisione ventennale, impedisce l'installazione presso la destinazione d'uso finale, per cui il sistema batterie è stato consegnato a Vicenza presso la sede dell'azienda EEI S.r.l. ("Equipaggiamenti Elettronici Industriali") dove verrà interfacciato con il convertitore prototipo. In tale sede, a partire da ottobre 2010, proseguirà la sperimentazione, che prevede la

sollecitazione a correnti più elevate per effettuare la verifica delle sezioni dei conduttori interni al pacco batterie e lo studio della dissipazione termica, al fine di valutare e realizzare un eventuale raffreddamento. A completamento della procedura, il sistema batterie verrà quindi sottoposto a cicli di carica – scarica secondo il profilo di potenza reale, già noto ed ulteriormente implementato dalle ultime rilevazioni sperimentali condotte dall’Università di Pisa. Terminata questa fase di sperimentazione presso la sede dell’azienda EEI, nel mese di gennaio – febbraio 2011 il sistema batterie sarà poi trasferito ed installato insieme alla versione finale del convertitore presso la funicolare Bergamo – S. Vigilio, destinazione d’uso finale, dove è prevista un’ulteriore fase di sperimentazione e collaudo che avrà termine il 31 marzo 2011, giorno di riapertura al pubblico dell’impianto.

CONCLUSIONI

L’uso di sistemi di accumulo nelle reti elettriche può consentire di migliorare la gestione e l’economia degli impianti utilizzatori finali. L’ENEA ha individuato, a seguito di un’indagine svolta negli anni precedenti, alcune applicazioni in cui dimostrare e verificare la fattibilità tecnica ed economica dell’uso dei sistemi di accumulo in alcune specifiche applicazioni delle reti elettriche. Un impianto a fune messo a disposizione dall’ATB (Azienda dei Trasporti di Bergamo) è stato selezionato. La progettazione preliminare ed esecutiva del sistema di accumulo ha portato a selezionare un tipo di batteria di tecnologia avanzata a base di litio. La simulazione condotta, sulla base dei dati sperimentali raccolti sull’impianto reale, in collaborazione con l’Università di Pisa e con l’EEI, ha portato al dimensionamento finale del sistema di accumulo ed alla valutazione dei vantaggi energetici ed economici ottenibili nell’uso reale. Le attività sperimentali condotte su due diverse tecnologie e dimensioni di batterie al litio hanno consentito di individuare i limiti tecnologici ed i miglioramenti da introdurre nella versione finale della batteria alla fine acquisita. La campagna sperimentale sull’impianto finale è stata posticipata per alcuni motivi fondamentali: 1) è stato scelto un impianto a fune diverso da quello selezionato nell’anno precedente per la disponibilità ricevuto dall’utilizzatore finale (ATB); 2) è stato necessario rivedere la scelta preliminare della batteria acquistata precedentemente a causa di alcune migliorie tecnologiche evidenziate durante la fase di sperimentazione in laboratorio a carico della parte elettronica che potevo introdurre problemi di affidabilità e di sicurezza nell’uso presso l’utente finale; 3) la progettazione ed acquisizione della batteria finale, a cause dei problemi al punto 2, hanno pertanto ritardato l’avvio dell’installazione e sperimentazione sull’impianto finale, per i quali è poi sopravvenuto il periodo programmato di manutenzione e fermo.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Catalogo Kokam “*Superior Lithium Polymer Battery*”, www.kokam.com
- [2] Catalogo EIG, www.eigbattery.com