



Ricerca di Sistema elettrico

Dimensionamento, realizzazione e verifica
sperimentale di un accumulatore al litio utilizzato
per la gestione di un sistema fotovoltaico per
l'alimentazione di un'utenza domestica

Stefano Barsali, Romano Giglioli

DIMENSIONAMENTO, REALIZZAZIONE E VERIFICA SPERIMENTALE DELLE SOLLECITAZIONI DI UN
ACCUMULATORE AL LITIO UTILIZZATO PER LA GESTIONE DI UN SISTEMA FOTOVOLTAICO PER
L'ALIMENTAZIONE DI UN'UTENZA DOMESTICA

Stefano Barsali, Romano Giglioli (Università di Pisa, Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, dei Sistemi, del
Territorio e delle Costruzioni – DESTEC)

Settembre 2013

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2012

Area: Governo, gestione e sviluppo del sistema elettrico nazionale

Progetto: Sistemi avanzati di accumulo dell'energia

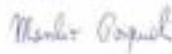
Obiettivo: Sperimentazione, e caratterizzazione di moduli e sistemi al litio

Responsabile del Progetto: Mario Conte, ENEA



Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione *“Definizione delle sollecitazioni
tipo e criteri di dimensionamento della capacità energetica di accumulatori al litio in piccoli sistemi elettrici per il miglioramento
della gestione”*

Responsabile scientifico ENEA: Manlio Pasquali



Responsabile scientifico DESTEC- Università di Pisa: Romano Giglioli

Si ringrazia per la collaborazione prestata l'Ing. Maurizio Barcaglioni e l'Ing. Alessio Bechini.

Indice

SOMMARIO.....	4
PREMESSA.....	5
1 DESCRIZIONE DEL SISTEMA REALIZZATO	6
1.1 L'UTENZA DOMESTICA	6
1.2 IL GENERATORE FOTOVOLTAICO.....	7
1.3 IL SISTEMA DI ACCUMULO.....	9
2 LA LOGICA DI GESTIONE DEL SISTEMA.....	10
2.1 CONTROLLO PER PEAK SHAVING	10
2.2 CONTROLLO PER MINIMIZZARE LO SCAMBIO CON LA RETE.....	11
2.3 INTEGRAZIONE DI ALTRI SERVIZI DI RETE.....	12
3 LA SPERIMENTAZIONE	13
4 LA CARATTERIZZAZIONE DELLE SOLLECITAZIONI DEL SISTEMA DI ACCUMULO	17
5 CONCLUSIONI.....	19
6 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	20
7 APPENDICE.....	21

Sommario

Sono presentate la verifica sperimentale e l'analisi delle sollecitazioni di un accumulatore al litio utilizzato per la gestione di un sistema fotovoltaico per l'alimentazione di un'utenza domestica (cfr rapporto "Gestione energetica di un'abitazione mediante accumulo di energia elettrica e termica", settembre 2012).

L'impianto è stato realizzato in modo da poter verificare il funzionamento con: un accumulo minimo, ma in grado di limitare la potenza massima assorbita dalla rete, con un sistema di accumulo di più ampie dimensioni in modo da rendere minimo lo scambio di energia con la rete (massimizzazione dell'uso locale dell'energia prodotta dall'impianto fotovoltaico).

In entrambe le condizioni di funzionamento sopra riportate sono state individuate le sollecitazioni in corrente dei sistemi di accumulo.

Premessa

L'attività presentata è in continuazione con quanto svolto nel periodo ottobre 2011-settembre 2012 relazionata nel rapporto "Gestione energetica di un'abitazione mediante accumulo di energia elettrica e termica. Cicli tipici di sollecitazione del sistema di accumulo".

E', però, da notare che rispetto al programma previsto si sono dovute apportare alcune varianti in relazione a difficoltà autorizzative incontrate e a non disponibilità di spazi e prodotti verificatesi durante questo anno di attività.

In particolare:

- Era prevista l'installazione dell'impianto fotovoltaico sul tetto della casa del custode dell'area sperimentale di "San Piero a Grado" dell'Università di Pisa, ma questo si è rivelato non adatto per motivi strutturali per cui è stato necessario installare l'impianto a terra in prossimità dell'abitazione (come riportato di seguito nel presente rapporto).
- L'area di sperimentazione è all'interno del parco di "San Rossore" e questo ha causato ritardi nella realizzazione dell'impianto causa "lungaggini" per l'autorizzazione.
- Si è potuto avere la disponibilità di accumulatori al litio, predisposti in contenitori adatti a garantirne la sicurezza e dotati di sistema di monitoraggio e di bilanciamento attivo della carica, con capacità ed energia più elevata di quella strettamente necessaria (0,5 kWh) per effettuare la riduzione del picco di potenza richiesto dall'utenza.
- A seguito di quanto esposto si è ritenuto più interessante ed attuale procedere modificando in parte gli obiettivi della ricerca ampliandola a verificare sia l'energia e la sollecitazione dell'accumulatore per effettuare la funzione di riduzione del picco di potenza assorbita dall'utenza, sia l'energia e la sollecitazione dell'accumulatore con l'obiettivo della minima energia ceduta alla rete dall'impianto (quest'ultimo argomento è oggi di notevole interesse a causa della riduzione o annullamento degli incentivi all'energia prodotta da fonti rinnovabili).
- Con la riformulazione di parte dell'obiettivo è risultato poco utile l'accumulo termico predisposto per ridurre le punte avendo questo una potenza di circa 150W, quindi di scarso peso. Questo parte sarà ripresa nella continuazione della sperimentazione dal parte di questo Dipartimento che autofinanzierà l'installazione di un sistema di accumulo termico di maggiori dimensioni previsto come accumulo del freddo adatto al sistema di climatizzazione estiva che si installerà nella casa del custode e che costituirà un'aggiunta di richiesta di potenza all'utenza domestica in sperimentazione.

1 Descrizione del sistema realizzato

Al fine di verificare sperimentalmente e analizzare le sollecitazioni di un accumulatore al litio utilizzabile per la gestione di un sistema fotovoltaico per l'alimentazione di un'utenza domestica, è stata realizzata una configurazione di impianto come rappresentata nello schema.

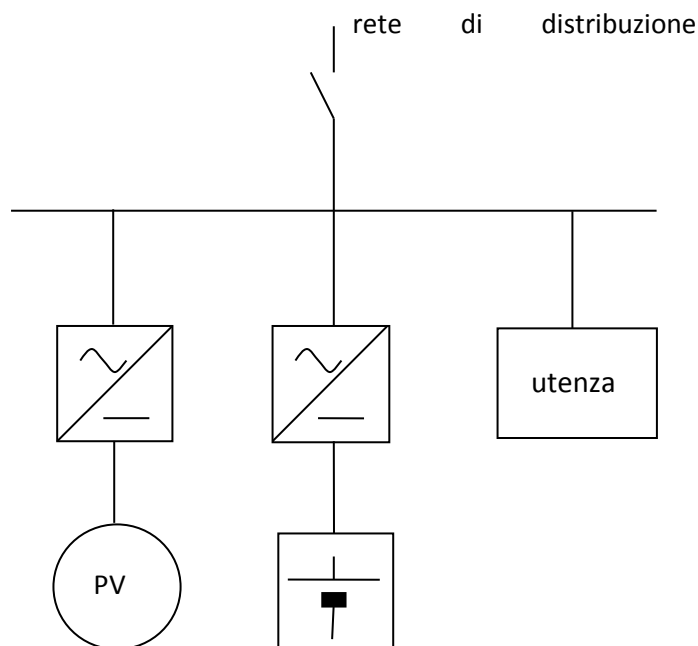


Figura 1. Configurazione dell'impianto sperimentale

Le sezioni di misura sono state individuate in corrispondenza dei morsetti in c.a. dei diversi apparati: generatore fotovoltaico, accumulatore, utenza domestica.

Di seguito è data una sintetica descrizione dei singoli componenti e apparati utilizzati

1.1 L'utenza domestica

Il sito scelto è la casa del guardiano dei laboratori dell'Università di Pisa nella sede di San Piero a Grado (cfr rapporto "Gestione energetica di un'abitazione mediante accumulatore di energia elettrica e termica", settembre 2012).



Figura 2. L'abitazione scelta quale caso studio per l'utenza domestica

I carichi elettrici della casa sono costituiti essenzialmente dagli elettrodomestici e dai sistemi di visione e di informazione oggi normalmente presenti nelle case, oltre all'illuminazione; è assente l'impianto di climatizzazione estiva.

La casa è abitata dal guardiano e da sua moglie, casalinga.

Il carico elettrico dell'utenza è caratterizzato per la settimana presa a riferimento dalle energie giornaliere riportate in tabella.

Tabella 1. Carico elettrico settimanale

Giorno	18	19	20	21	22	23	24
Energia FM [Wh]	3127	3207	3150	2843	4126	3006	3160
Energia Luce [Wh]	2534	2689	4228	2586	5196	2701	2737
Energia Tot [Wh]	5661	5896	7378	5429	9322	5707	5897

1.2 Il generatore fotovoltaico

E' costituito (vedi fig. 3.) da 14 pannelli fotovoltaici, ripartiti in 2 stringhe collegabili in serie o in parallelo, fissati su una struttura metallica appoggiata al suolo e orientata verso sud con inclinazione di 30°.

I dati caratteristici dei pannelli, modello SOLSONICA610SP, sono:

potenza nominale di picco 249 W

Voc / Vmp 37,16 V / 30,02 V

Isc / Imp

8,78 A / 8,28 A



Figura 3. I pannelli fotovoltaici collegati a formare due stringhe

E' stato deciso di installare i pannelli a livello del suolo, anziché sul tetto dell'edificio, in base alle seguenti considerazioni:

- necessità di verificare l'adeguatezza dell'attuale copertura della casa, con attuazione di interventi straordinari ai fini della sicurezza che avrebbero comportato autorizzazioni e lavori di durata tale da non permettere di avviare la sperimentazione nel periodo di ricerca previsto,
- disponibilità di adeguata superficie a fianco dell'abitazione ed in prossimità dei laboratori di questo Dipartimento non altrimenti utilizzata,
- facilità di intervento per l'esecuzione di eventuale manutenzione (pulizia dei pannelli, ecc) e modifiche eventualmente necessarie in opera per sviluppare le attività sperimentali.

Durante le prove è stata utilizzata la configurazione con le due stringhe collegate in parallelo, per cui i dati caratteristici del generatore sono:

Voc 260,12 V Potenza nominale di picco 3486 W

Per la conversione cc/ca è stato utilizzato un inverter Power-One Aurora modello PVI-3,6-TL-OUTD (vedi fig. 4), i cui dati caratteristici sono:

potenza nominale in c.c. 3,75 kW
tensione di ingresso per la connessione alla rete da 0,7xVstart a 580 V (nominale 360 V)
tensione di attivazione Vstart da 120 Vcc a 350 Vcc (nominale 200 Vcc)
tensione di ingresso per l'inseguimento del punto di massimo assoluto della potenza da 120 V a 530 V



linea di collegamento
con la sbarra in c.a.

sezionamento delle 2 linee in
c.c. dal generatore fotovoltaico

Figura 4. L'inverter utilizzato e le linee elettriche ad esso connesse

1.3 Il sistema di accumulo

Come accumulo elettrico sono stati utilizzati due pacchi di accumulatori al litio polimero prodotti da Kokam con il sistema di monitoraggio e di bilanciamento attivo della carica sviluppato dalla società EEI S.p.A installato a bordo (vedi fig 5).



Figura 5. Pacco di accumulatori al litio polimero

Ogni pacco è costituito da 12 accumulatori collegati in serie, ciascuno con dati caratteristici:

corrente di scarica a 1 ora	70 Ah	V nominale	3,6 V
massima corrente di scambio	500 A per 10 s.		

2 La logica di gestione del sistema

La gestione in energia dell'accumulo associato a un'utenza domestica in presenza di una produzione fotovoltaica può avere diversi obiettivi. Le modalità di gestione che, al momento, consentono di migliorare l'economicità della fornitura di energia elettrica nel suo complesso per l'utenza in questione sono sostanzialmente il peak shaving e la minimizzazione dello scambio con la rete.

Il peak shaving consente, a seconda del tipo di contratto stipulato, di evitare di pagare le penali per superamento della potenza contrattuale o, come più comune nelle piccole utenze domestiche, di evitare il superamento della soglia che provoca il distacco della fornitura. In quest'ultimo caso il beneficio consiste essenzialmente nel poter stipulare un contratto per una potenza più bassa di quella complessivamente assorbita dai carichi nella condizione di picco, con conseguente risparmio sui costi legati alla potenza contrattuale. Nel caso italiano, in particolare, poter mantenere il contratto D2 usi domestici residenti da 3kW consente anche di mantenere la struttura tariffaria per scaglioni che, per consumi fino a circa 2.5MWh annui, consente, a parità di consumo, un risparmio rispetto ad un contratto D3 usi domestici sempre da 3kW.

Nella prospettiva poi che le varie forme di incentivazione della produzione da fonte fotovoltaica si vadano via via riducendo, arrivando, di fatto, ad una remunerazione dell'impianto derivante dal mancato acquisto di una parte di energia dalla rete e dalla vendita di energia alla rete stessa, la massimizzazione del ricavo possibile deriva dalla minimizzazione dell'energia scambiata con la rete. Infatti le componenti legate al trasporto vengono pagate per la sola energia effettivamente scambiata con la rete e le quote relative all'acquisto e vendita di energia risultano differenziate risultando più basso il prezzo di cessione alla rete rispetto a quello di acquisto. Venendo poi ad esaurirsi i meccanismi di compensazione tipo "scambio sul posto" la minimizzazione del costo della fornitura non deriva dal minimizzare il saldo tra energia acquistata e ceduta, ma dal minimizzare la somma, non algebrica, dell'energia acquistata e di quella ceduta, ovvero dal mantenere il più possibile costante (ed eventualmente nullo) lo scambio con la rete.

Entrambi gli obiettivi di gestione possono anche essere associati ad eventuali servizi di rete (come la regolazione della frequenza) che, in prospettiva, l'utente potrà trovare conveniente rendere disponibili.

È comunque da evidenziare la necessità di un sistema di stima dello stato di carica dell'accumulo che si basi, nel breve termine, sull'integrale della corrente scambiata per essere poi periodicamente riallineato mediante misure effettuate in periodi di inattività (ad esempio di notte).

2.1 Controllo per peak shaving

Il sistema più semplice per controllare il sistema di accumulo per la funzione di peak shaving è di far erogare all'inverter di interfacciamento la differenza tra la potenza assorbita dall'insieme utenza-generazione e la potenza di soglia predefinita per esigenze prettamente contrattuali. L'anello di controllo agisce pertanto in maniera unidirezionale al superamento della soglia definita con uno schema di principio molto semplice illustrato in figura 6:

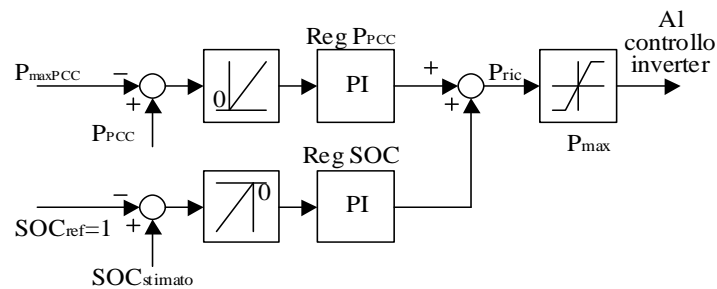


Figura 6. Logica di controllo per il Peak Shaving

Se la potenza al punto di connessione (P_{PCC} , positiva se assorbita) supera il valore predefinito, il regolatore PI provvede a far erogare all’inverter una potenza (positiva se erogata dall’inverter) tale da riportare a zero lo scambio. L’azione integrale svolge tale funzione.

Un secondo anello consente di ripristinare lo stato di carica dopo ciascun intervento. Esso ha l’obiettivo di inseguire lo stato di piena carica ($SOC=1$) sempre con un’azione proporzionale integrale, ma con parametri tali da intervenire in tempi più lunghi e quindi di non influenzare l’azione della limitazione della potenza al PCC.

Un’alternativa può essere costituita da un selettore dell’anello di controllo attivo che esclude il controllo del SOC quando agisce l’altro. Tuttavia la prima scelta appare più ragionevole in quanto, con una opportuna taratura dei parametri ed eventualmente utilizzando una caratteristica di intervento non lineare (anziché la semplice saturazione rappresentata in figura 7), il controllo del SOC può cominciare ad avere il suo effetto progressivo man mano che l’accumulo si scarica, evitando il perdurare dell’azione di limitazione di potenza fino al suo repentino annullamento al raggiungimento del SOC minimo.

Ovviamente possono anche essere fatte scelte diverse come quella di far ricaricare le batterie quando c’è esubero di produzione, ovvero quando il segno dello scambio con la rete, in assenza dell’accumulo si invertirebbe. In sostanza si tratta di duplicare il controllo di limitazione di potenza invertendo i segni della saturazione ed usando come riferimento $P_{minPCC}=0$, come illustrato in figura 7.

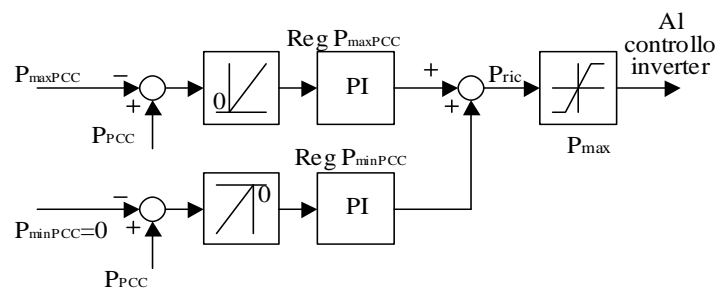


Figura 7. Controllo per la ricarica delle batterie in caso di esubero di produzione

2.2 Controllo per minimizzare lo scambio con la rete

Quando il sistema di accumulo fosse dimensionato in modo da poter accumulare, nelle ore in cui il fotovoltaico produce in esubero, l’energia necessaria nelle ore di assenza di produzione o di carico superiore alla produzione, la logica di gestione più semplice è quella di mantenere costante e, in prima battuta pari a zero, lo scambio con la rete. Lo schema di controllo può essere analogo al precedente, in quanto si tratta ancora di inseguire un valore di potenza di scambio agendo però in maniera bidirezionale sia per scostamenti positivi che negativi.

L'elemento più critico in questo caso è l'incertezza della produzione e del carico che può far raggiungere all'accumulo uno dei suoi limiti di carica (SOC_{max} o SOC_{min}) senza poter quindi proseguire nello svolgimento della funzione prevista.

Questo inconveniente può essere evitato adeguando il set point P_{refPCC} del regolatore sulla base di previsioni giornaliere di produzione e consumo. Ad esempio se dai dati statistici disponibili si prevede per il giorno successivo un consumo di 10kWh e, dai dati meteo, una produzione di 7.5kWh sarà opportuno impostare a $2.5/24=0.1kW$ il set point della potenza assorbita dalla rete. Se invece si prevedono 15kWh di produzione si può impostare il set point a 0.2kW in erogazione. Eventualmente si può correggere il set point per il giorno successivo per tenere conto degli errori accumulati nel giorno precedente.

Una logica più evoluta consiste nel prevedere giorno per giorno un profilo di SOC che dovrebbe risultare dall'azione di compensazione del sistema, a partire dai dati statistici di carico e di produzione, oltre al valore complessivo delle energie. In questo modo, oltre a poter definire il set point più opportuno come appena descritto, l'azione di un controllore del SOC, che agisca con peso via via crescente man mano che ci si allontana dal profilo ipotizzato, consente di compensare gli eventuali scostamenti che potrebbero ridurre notevolmente l'efficacia dell'azione di compensazione.

Lo schema di principio è riportato nella figura 8. È da sottolineare che, ancora una volta, i parametri del regolatore del SOC devono essere scelti in maniera da agire con tempi molto più lenti dell'altro e la sua azione deve essere più consistente per scostamenti elevati. Può essere opportuno, come già accennato, introdurre un elemento non lineare che ne amplifichi l'effetto per scostamenti dal profilo ipotizzato superiori ad un certo valore e lo mantenga pressoché in stand-by altrimenti.

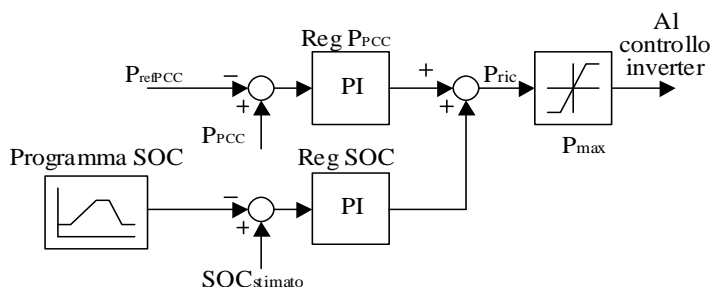


Figura 8. Regolazione temporale dello stato di carica

2.3 Integrazione di altri servizi di rete

Eventuali altre funzioni che comportano uno scambio di potenza con piccole quantità di energia associata (come regolazione della frequenza), non presenti comunque al momento in un'applicazione domestica, possono essere previsti con un'azione temporanea che si esaurisca nell'arco di alcune decine di secondi o di qualche minuto. L'azione degli altri regolatori con una retroazione sullo stato di carica consente comunque di compensare gli scostamenti introdotti.

Il controllo può essere organizzato come mostrato in figura 9:

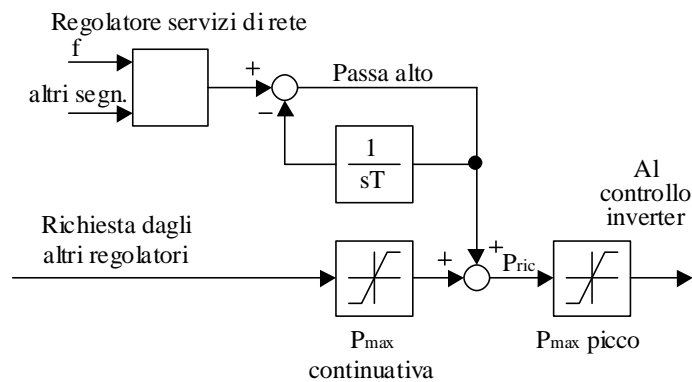


Figura 9. Implementazione dei servizi di rete

La richiesta dell'apposito regolatore viene trattata da un filtro passa alto che consente al sistema di lavorare durante i transitori, ma che annulla il suo contributo a regime. La scelta della costante di tempo T (da alcuni secondi a qualche minuto) dipende dalla dinamica che si vuole inseguire.

3 La sperimentazione

Per verificare le sollecitazioni del sistema di accumulo è stata attivata una campagna di misure. Le sezioni di misura sono state scelte in corrispondenza dei morsetti in c.a. dei diversi componenti; per l'utenza domestica è stata considerata la potenza complessivamente assorbita.

Le grandezze misurate e registrate in ogni sezione sono state: potenza attiva, potenza reattiva, potenza apparente, fattore di potenza, tensione, corrente. (vedi fig. 10)

La potenza, la corrente e la tensione nella sezione di alimentazione della batteria sono acquisite dal sistema di controllo.



a)



b)

Figura 10. Postazioni per la misura del carico domestico a) e della generazione b)

Di seguito sono riportati (figure 11 e 12) i diagrammi di carico giornalieri tipici dell'utenza domestica e la potenza generata dall'apparato fotovoltaico registrati sull'impianto sperimentale.

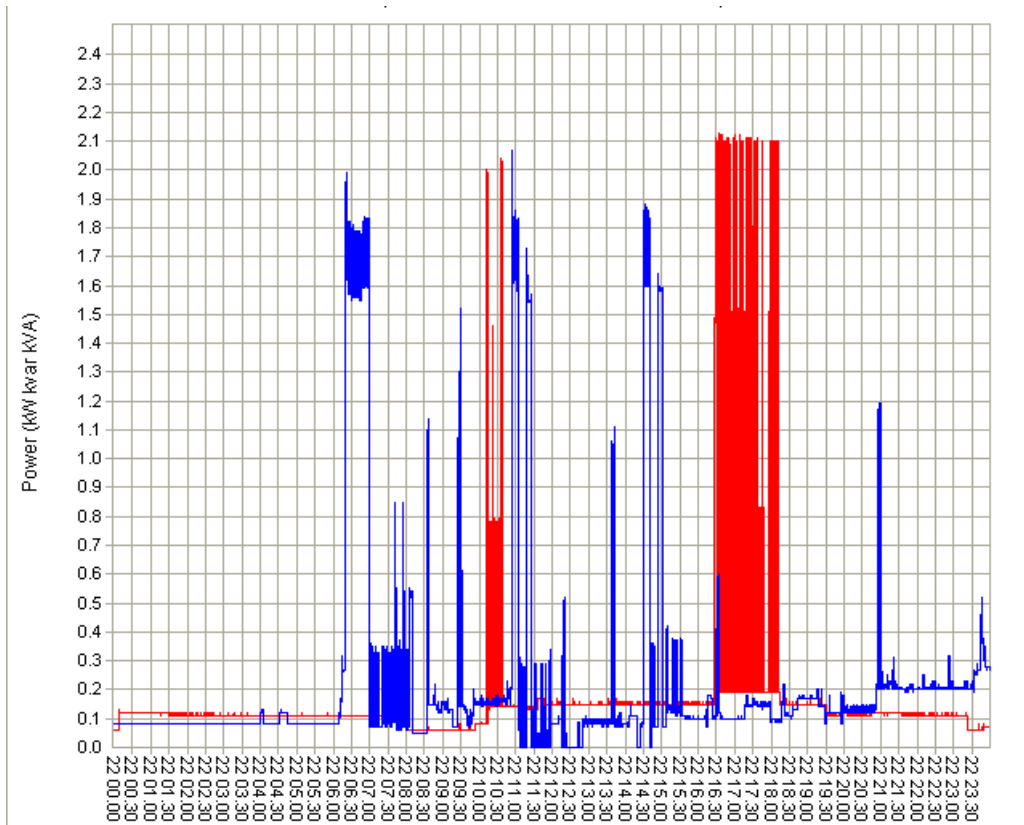


Figura 11. Potenze assorbite dall'utenza: in blu quella relativa al circuito luce e in rosso quella del circuito forza motrice.

Nella figura 12 sono indicate la potenza totale assorbita dal carico e la potenza prodotta dal generatore fotovoltaico.

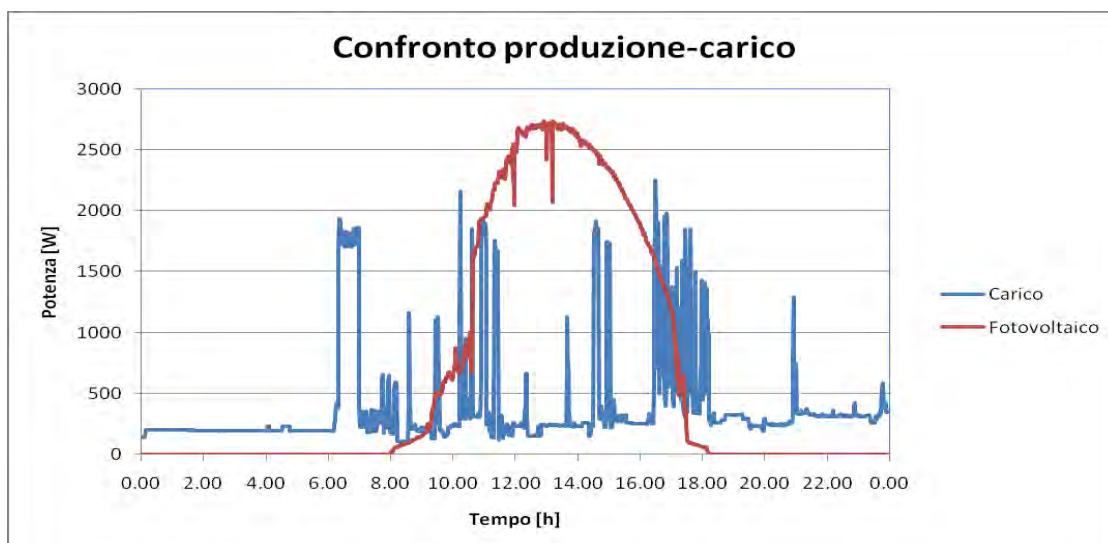


Figura 10. Potenza complessiva assorbita dall'utenza in blu e potenza generata in rosso.

Nei grafici successivi (figure 13 e 14) sono riportati, in sequenza, e a titolo di esempio gli assorbimenti dell'utenza domestica e la produzione fotovoltaica in due giorni consecutivi con maggiore nuvolosità.

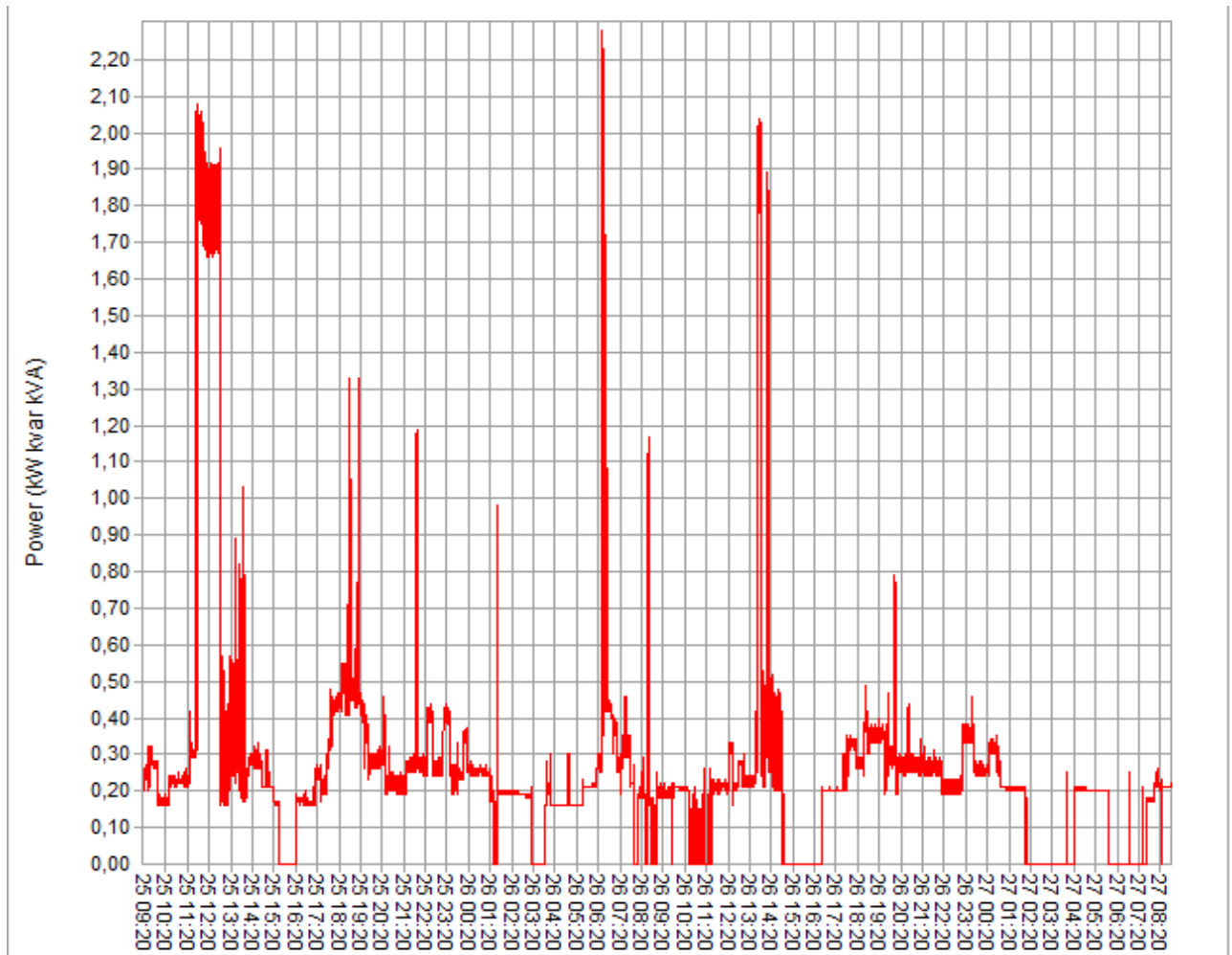


Figura 13. Potenza complessiva assorbita dall'utenza in due giorni consecutivi.

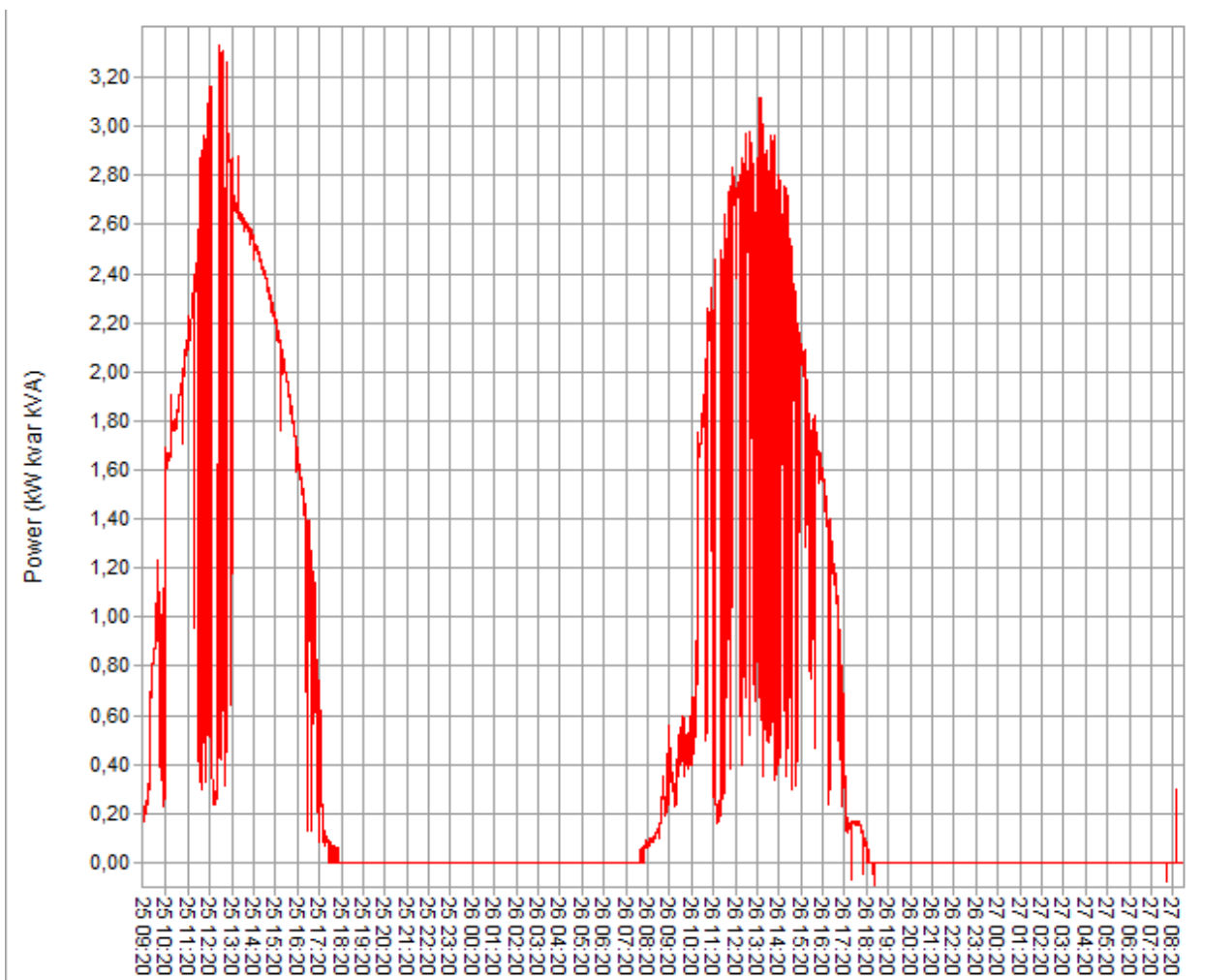


Figura 14. Potenza generata dall'impianto fotovoltaico in due giorni consecutivi

Si può notare che gli assorbimenti dell'utenza si assestano tra i 5 e i 6 kWh, mentre la produzione del fotovoltaico è comunque tra il 12 e il 15 kWh confermando un deciso esubero non gestibile completamente dal sistema di accumulo e quindi con una cessione alla rete di alcuni kWh al giorno.

4 La caratterizzazione delle sollecitazioni del sistema di accumulo

Nella tabella 2 è espresso il bilancio energetico dell'impianto sperimentale relativo ad un giorno.

Tabella 2. Bilancio Energetico dell'impianto in una giornata di lavoro

Energia giornaliera		
Carico 22-09-13 [Wh]	Fotovoltaico [Wh]	Differenza [Wh]
9302	15840	6538

La politica di gestione adottata in questa prima sperimentazione è stata, come premesso, : minimo scambio con la rete.

In relazione al fatto che l'accumulo è stato gestito in modo da essere completamente scarico all'inizio della produzione del solare, il primo giorno è stato possibile scambiare con la rete pochissima energia (meno di 1 kWh), ma con l'accumulo praticamente pieno a fine giornata. Ciò ha implicato che nel giorno successivo lo scambio con la rete è stato molto maggiore (circa 8 kWh).

Essendo un periodo ancora di alta insolazione e con un carico con un assorbimento mediamente più piccolo rispetto al giorno rappresentato (dalla tabella di caratterizzazione dell'utenza e dalle registrazioni riportate si può notare come normalmente l'energia giornaliera assorbita sia dell'ordine di 5-6 kWh), con l'accumulo installato, la cui capacità è sufficiente per bilanciare l'energia richiesta mediamente dall'utenza, l'esubero di energia giornaliera in rete è prevedibile che si attesterà tra gli 8 ed i 10 kWh giornalieri.

Per contro l'accumulo risulta ben dimensionato per i periodi più critici (periodo invernale), con un esubero di energia in rete praticamente nullo.

Il grafico seguente (fig. 15) rappresenta l'andamento della corrente scambiata dalla batteria.

Si può notare che la massima corrente in carica sia di circa 30 A in corrispondenza al picco di produzione fotovoltaica, mentre la massima corrente in scarica, di poco più di 20°, sia in corrispondenza al massimo assorbimento dell'utenza.

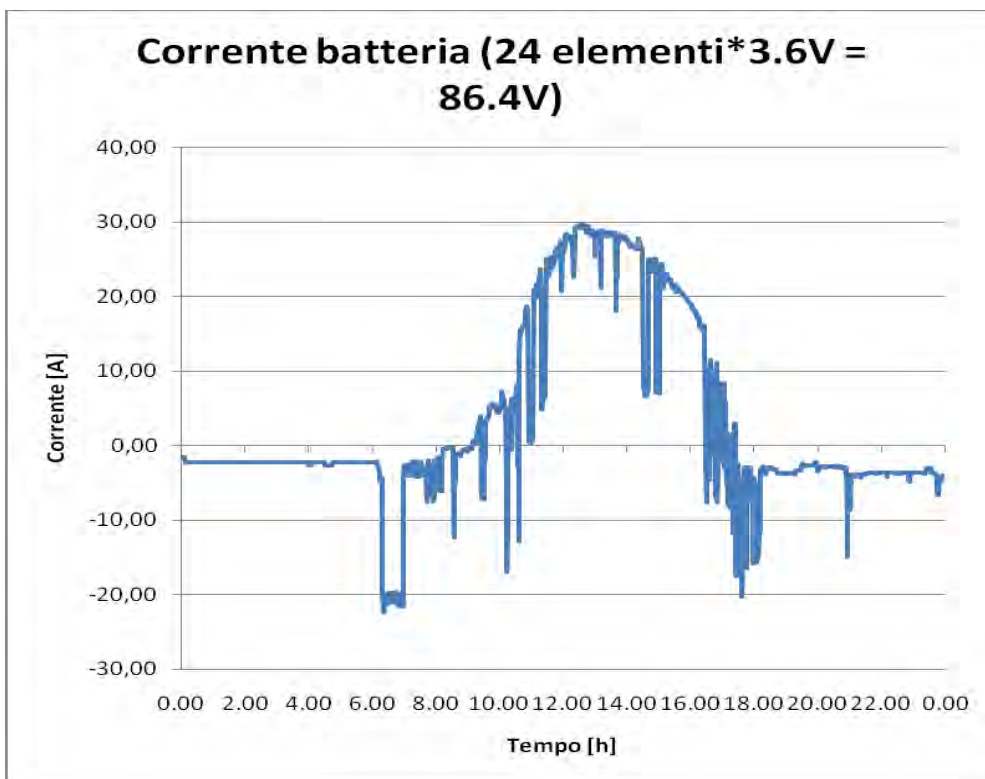


Figura 15. Corrente in batteria

E' da ritenere questo un aspetto generale.

Lo sfasamento temporale tra produzione ed utilizzazione comporta, per un accumulo di bilanciamento energetico, la massima corrente assorbita in corrispondenza al picco di produzione e la massima corrente in erogazione in corrispondenza della massima potenza assorbita dall'utenza, essendo i due picchi sempre sfasati per questo tipo di applicazione.

Quanto osservato facilita molto la scelta ed il dimensionamento del sistema di accumulo per questo tipo di applicazioni con utenze domestiche.

A riprova, nella figura 16 sono stati sovrapposti il grafico dell'andamento della potenza prodotta dal fotovoltaico in sperimentazione con il grafico relativo all'assorbimento tipico di un'utenza domestica, con riferimento a una famiglia di quattro persone.

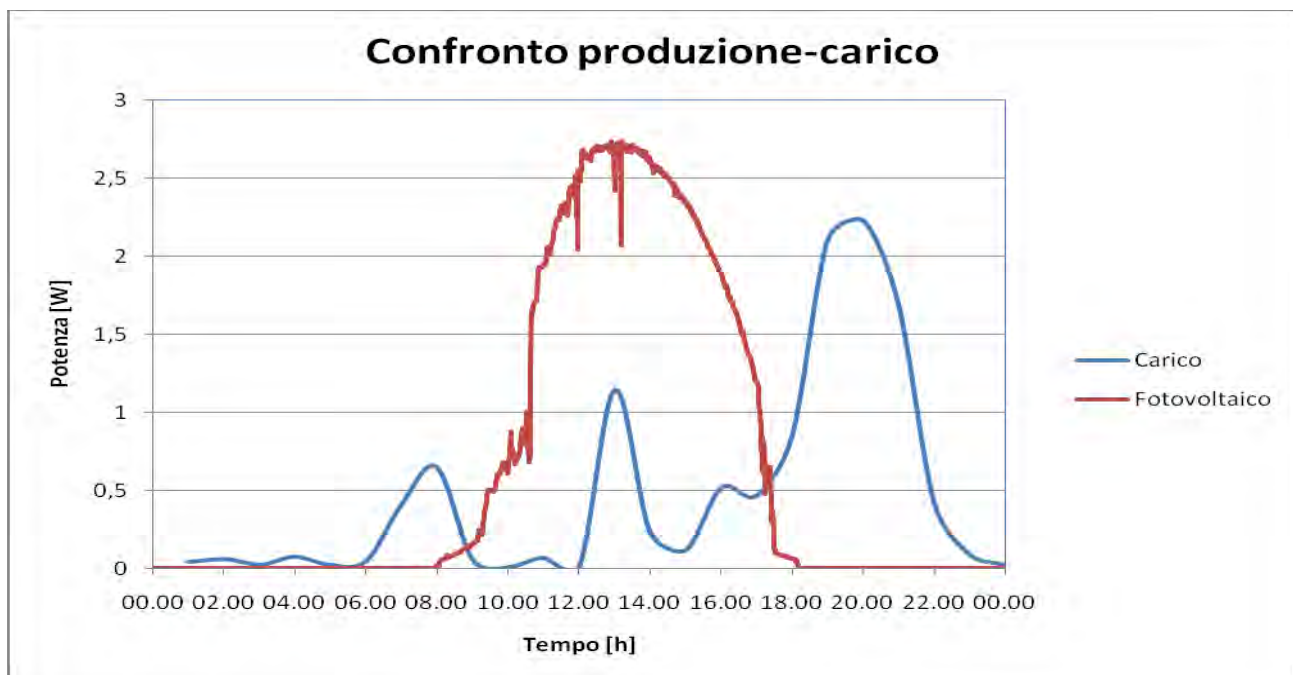


Figura 16. Potenza generata e diagramma di carico tipico di un'utenza domestica

Nel caso di una gestione tesa a limitare i picchi di potenza richiesta alla rete, le correnti di scambio dell'accumulatore sono ridotte e in relazione alla potenza massima "tagliata".

Ad esempio nel caso dell'impianto sperimentale se si pone la massima potenza scambiata con la rete a 1,5 kW, la massima potenza erogata dalla batteria sarebbe di poco meno di 1 kW, mentre quella assorbita per la ricarica può essere limitata a valori ancora più bassi avendo da caricare un'energia di circa 0,5 kWh per poter effettuare correttamente il servizio di limitazione del picco.

Questi valori sono analoghi a quelli che si possono facilmente dedurre anche in riferimento al carico tipico dell'utenza domestica.

5 Conclusioni

E' stato realizzato un impianto sperimentale di produzione di energia elettrica con pannelli fotovoltaici di potenza nominale 3,75 kW di picco per l'alimentazione di un'utenza domestica con contratto di alimentazione dalla rete di distribuzione di 3 kW. L'impianto è stato corredato con un sistema di accumulo dell'energia elettrica della capacità di 6 kWh e di un sistema di controllo in grado di attuare politiche di gestione dell'impianto complessivo (utenza, generatore fotovoltaico e sistema di accumulo dell'energia).

La sperimentazione effettuata conferma che i periodi di massimo assorbimento di potenza da parte dell'utenza domestica non coincidono con il periodo di massima generazione fotovoltaica.

Questo permette di definire le massime sollecitazioni in corrente del sistema di accumulo rispettivamente per la carica in corrispondenza del picco di produzione del generatore fotovoltaico e della scarica in corrispondenza del picco di potenza assorbita, nel caso di perseguire una politica di gestione del sistema complessivo con l'obiettivo gestionale di rendere minima l'energia scambiata con la rete.

Con l'obiettivo gestionale di minimo scambio di energia con la rete occorre, in prima approssimazione, dimensionare un sistema di accumulo con capacità pari all'assorbimento medio giornaliero dell'utenza (questo è il criterio di massima adottato per il dimensionamento dell'impianto sperimentale, naturalmente per un corretto dimensionamento occorrerebbe sviluppare una procedura di ricerca dell'ottimo economico relativamente all'utenza considerata con strumenti più complessi e onerosi basti su simulazioni stocastiche

dei profili di potenza dell'utenza e della produzione) e, in relazione a queste capacità di accumulo, le sollecitazioni in corrente della batteria risultano ben minori dei valori nominali.

Con un obiettivo di gestione del sistema di accumulo di peak shaving della potenza assorbita dall'utenza, la massima corrente di sollecitazione dell'accumulo è in scarica ed è quella derivante dalla massima potenza "tagliata", che è quella di dimensionamento in potenza dell'accumulatore. E' invece possibile gestire la ricarica dell'accumulatore con profili scelti in relazione al tipo di accumulatore utilizzato, poiché la quantità di energia da reintegrare è piccola [1] (nel caso specifico dell'impianto sperimentale 0,5 kWh) e facilmente reperibile con gli esuberanti di produzione.

In genere si può ritenere che i profili di corrente di sollecitazione degli accumulatori per la compensazione di utenze domestiche non siano critici per il dimensionamento dei sistemi di accumulo, mentre una standardizzazione degli stessi potrà essere molto utile ai fini di stimarne la vita in particolare modo mediante prove di durata in laboratorio.

6 Riferimenti bibliografici

1. S. Barsali, R. Giglioli, D. Poli, "Gestione energetica di un'abitazione mediante accumulo di energia elettrica e termica", Report Ricerca di Sistema Elettrico RdS/2012/251.

7 Appendice

Breve curriculum scientifico del gruppo di lavoro impegnato nell'attività.

Stefano Barsali

Stefano Barsali è nato a Pisa il 26 settembre 1969. Ha conseguito la laurea in Ingegneria Elettrica con lode nel 1994 ed il titolo di Dottore di Ricerca in Ingegneria Elettrotecnica nel 1998.

Tra il 1994 ed il 1999 ha svolto attività di collaborazione con il Dipartimento di Sistemi Elettrici e Automazione (DSEA) dell'Università di Pisa e con la società di Ingegneria *3E Ingegneria S.r.l.* per attività riguardanti lo studio, la modellazione, la simulazione e la progettazione di componenti e impianti elettrici.

Nell'anno 1998 è stato incaricato dall'*Associazione Elettrotecnica ed Elettronica Italiana (AEI)* per attività di consulenza al "Gruppo di Studio sulla Liberalizzazione del mercato dell'energia elettrica".

Dal 2000 è in servizio presso il Dipartimento di Sistemi Elettrici e Automazione dell'Università di Pisa prima come ricercatore poi, dall'ottobre 2006, come professore associato nel settore scientifico disciplinare "Sistemi Elettrici per l'Energia".

Ha avuto affidati compiti didattici relativi alle esercitazioni ed a corsi relativi al settore scientifico disciplinare di appartenenza. Attualmente è titolare del modulo di "Dinamica e controllo dei sistemi elettrici per l'energia (6CFU)" e del modulo di "Centrali elettriche (6CFU)", rispettivamente per gli allievi del I e del II anno del corso di laurea specialistica in Ingegneria Elettrica.

Svolge attività di ricerca prevalentemente sui temi della riaccensione del sistema elettrico a seguito di black-out, dell'analisi e modellazione del mercato libero dell'energia elettrica, dei sistemi di accumulo elettrochimico ed applicazioni in veicoli a propulsione ibrida, della generazione distribuita dell'energia elettrica, dei sistemi di distribuzione e delle fonti rinnovabili.

In questi ultimi ambiti, ha svolto la funzione di segretario dello Study Committee C6 *CIGRÉ* su "Distribution Systems and Dispersed Generation" nell'ambito del quale è stato membro di due task force.

È autore di una sessantina di pubblicazioni su riviste ed in atti di convegni internazionali e nazionali.

Romano Giglioli

Nato a San Gimignano (SI) il 02/06/1951, laureato con lode in Ingegneria Elettrotecnica nel 1976, nello stesso anno ha ricevuto il premio di Economia e Tecnica dell'Energia "G. Levi Cases".

Dal 1994 è Professore Ordinario e ricopre la cattedra di "Sistemi Elettrici per l'Energia e tecnica ed Economia dell'energia".

Attività di ricerca.

Nell'arco di più di trenta anni di attività nel settore della ricerca, in collaborazione con strutture di ricerca pubbliche e private, sia nazionali che internazionali, ha contribuito, con studi teorici e sperimentali, all'innovazione e allo sviluppo di sistemi e dispositivi per la produzione, trasporto ed accumulo (in particolare elettrochimico) dell'energia elettrica e dei sistemi di conversione energetica, nonché dei sistemi di trasporto con propulsione elettrica ed ibrida. L'attività è testimoniata da oltre un centinaio di pubblicazioni, dalla titolarità di alcuni brevetti utilizzati nell'ambito dei sistemi elettrici per l'energia ed in quelli di conversione energetica e dalla realizzazione di numerosi sistemi e dispositivi prototipali.

Tale attività è stata ed è sviluppata anche come responsabile di numerosi contratti di ricerca e coordinatore di gruppi di lavoro nell'ambito dei Sistemi per l'Energia e di quelli per il Trasporto.

Incarichi direttivi nell'ambito dell'Amministrazione Universitaria.

Dal 1995 al 2002 ha assunto l'incarico di Direttore del Dipartimento di Sistemi Elettrici e Automazione dell'Università di Pisa.

Dal 2005 al 2009 è stato Direttore del Master post laurea "Pianificazione e gestione di sistemi per l'energia da fonti rinnovabili", istituito dall'Università di Pisa con ENEL Produzione, CONFINDUSTRIA, Kyoto Club, Legambiente.

Dal 2006 è nel comitato direttivo del consorzio Interuniversitario CRIBE per la ricerca sulle biomasse ad uso energetico, che ha contribuito a costituire.

Dal 2007 è nel comitato direttivo del consorzio Nazionale Interuniversitario ENSIEI per la ricerca sui Sistemi per l'Energia, che ha contribuito a costituire.

Dal gennaio 2007 è membro del Consiglio di Amministrazione dell'Università di Pisa

Incarichi in strutture esterne all'Università.

Dal 2003 al 2009 è membro del Consiglio di Amministrazione della società ITALCERTIFER (del gruppo Ferrovie dello Stato), società per la ricerca nell'ambito dei sistemi di trasporto e per l'omologazione dei mezzi di trasporto ferroviario. Dal 2005 al 2008 è stato delegato italiano nel mirror europeo per le "smartgrids". È coordinatore scientifico nell'ambito del Consorzio Regionale per l'energia CET, di cui è stato promotore. Dal maggio del 2007 è membro del Consiglio del CEI (Comitato Elettrotecnico Italiano per la normativa elettrica). Valutatore di progetti di sviluppo precompetitivo L.n. 46/82 per conto del Ministero delle Attività Produttive e, per lo stesso Ministero, nel 2008 ha fatto parte del gruppo di esperti, con il compito di sviluppare l'analisi fattuale in ambito energia ed ambiente, per l'indirizzamento dei fondi strutturali per le regioni del mezzogiorno. Esperto per la valutazione dei progetti di Ricerca di Sistema per il Settore Elettrico per la CCSE. Esperto per la valutazione per il MIUR dei progetti PRIN e dei progetti PON.