



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



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Realizzazione e prova di un sistema di controllo ed interfaccia per sistemi combinati accumulo-FER

Report 2 - Progettazione esecutiva, realizzazione del prototipo e prova

M.G. Ippolito, E. Telaretti, G. Zizzo

M. Conte, G. Graditi, M. Pasquali



DIEETCAM
Università degli Studi di Palermo

Report RdS/2012/305

REALIZZAZIONE E PROVA DI UN SISTEMA DI CONTROLLO ED INTERFACCIA PER SISTEMI COMBINATI
ACCUMULO-FER

REPORT 2 – PROGETTAZIONE ESECUTIVA, REALIZZAZIONE DEL PROTOTIPO E PROVA

Mariano G. Ippolito (Responsabile scientifico - Università degli Studi di Palermo ,DIEETCAM)

M.G. Ippolito, E. Telaretti, G. Zizzo (Università degli Studi di Palermo , DIEETCAM)

M. Conte, G. Graditi, M. Pasquali (ENEA)

Settembre 2012

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Area: Governo, gestione e sviluppo del sistema elettrico nazionale

Progetto: Sistemi avanzati di accumulo di energia

Responsabile del Progetto: Mario Conte, ENEA

Indice

Sommario	4
1. Introduzione	5
2. Schema elettrico esecutivo del dispositivo	6
3. Sviluppo sperimentale del sistema di interfaccia e controllo	11
4. Test e prove	18
4.1. Applicazioni e test dell' algoritmo di gestione in ambiente simulato	18
<i>4.1.1. Risultati delle simulazioni</i>	<i>19</i>
4.2. Prove sperimentali (in laboratorio)	28
<i>4.2.1. Specifiche dei componenti utilizzati per la fase di test</i>	<i>28</i>
<i>4.2.2. Elenco delle prove</i>	<i>32</i>
<i>4.2.3. Risultati delle prove</i>	<i>35</i>
5. Conclusioni	47
Riferimenti bibliografici	48
Acronimi e abbreviazioni	49
Curriculum Vitae del gruppo di ricerca	50
Appendice 1	
Appendice 2	
Appendice 3	

Sommario

Il presente Documento riferisce sui contenuti e sui risultati della seconda fase delle attività svolte nell'ambito della ricerca dal titolo: *“Progettazione, realizzazione e test di un sistema di controllo ed interfaccia per sistemi combinati accumulo-FER”*, oggetto di un Accordo di Collaborazione tra ENEA e DIEETCAM (Università degli Studi di Palermo) nel quadro delle attività relative al Piano Annuale di Realizzazione 2011 dell'Accordo di Programma MSE-ENEA sulla Ricerca di Sistema Elettrico.

Nel corso della seconda fase delle attività, a partire dal lavoro di definizione delle specifiche tecniche di tutti i componenti, e dell'insieme delle funzionalità del dispositivo in progetto, si è proceduto alla progettazione esecutiva del dispositivo, nonché alla realizzazione di un prototipo.

E' stata infine condotta una campagna di test e prove al fine di:

- applicare e validare in ambiente simulato l'algoritmo di gestione del sistema combinato per profili di variabilità della domanda tipici di alcune utenze di media taglia del settore terziario;
- verificare sperimentalmente (attraverso specifici test condotti in laboratorio) il regolare funzionamento dei singoli componenti di potenza del sistema, sotto diverse condizioni operative di funzionamento (in modalità *stand-alone* e *grid-connected*);
- verificare sperimentalmente (attraverso specifici test condotti in laboratorio) l'operatività delle funzioni di protezione e comunicazione (verso la rete) implementate.

Le attività sono state condotte in sinergia con il personale tecnico di ENEA e con la collaborazione dell'azienda *Layer Electronics s.r.l.* di Erice (TP).

1. Introduzione

Nella seconda fase delle attività si è proceduto allo sviluppo sperimentale e alla realizzazione prototipale di un sistema di controllo ed interfaccia verso la rete di un sistema combinato di accumulo elettrico-generatore tipo FER (eolico, fotovoltaico), della taglia di 20 kW (potenza nominale del convertitore), progettato in modo da garantire tutti i servizi di rete individuati in [1].

Il presente documento riferisce su tale attività.

Relativamente alla fase di progettazione esecutiva, con riferimento alle specifiche di sistema, meglio definite nelle sezioni 4.1 e 4.3 di [1], di seguito sono riportati gli schemi elettrici esecutivi e le specifiche dei singoli componenti utilizzati per la realizzazione del dispositivo.

La sezione de presente documento riguardante i test eseguiti in laboratorio riporta l'elenco delle prove eseguite ed i singoli risultati delle misure e delle verifiche nelle diverse condizioni di prova considerate, previste dalle Norme CEI.

Nella sezioni 4.1 del presente documento si trovano, infine, i risultati delle simulazioni al calcolatore effettuate al fine di testare l'algoritmo di ottimizzazione del sistema di controllo del dispositivo in sei diverse condizioni operative.

2. Schema elettrico esecutivo del dispositivo

Lo schema elettrico esecutivo del dispositivo è riportato in appendice 1 insieme alla corrispondente legenda.

In figura 2.1 è mostrato un particolare dell'ingresso in corrente continua dal pacco batterie.

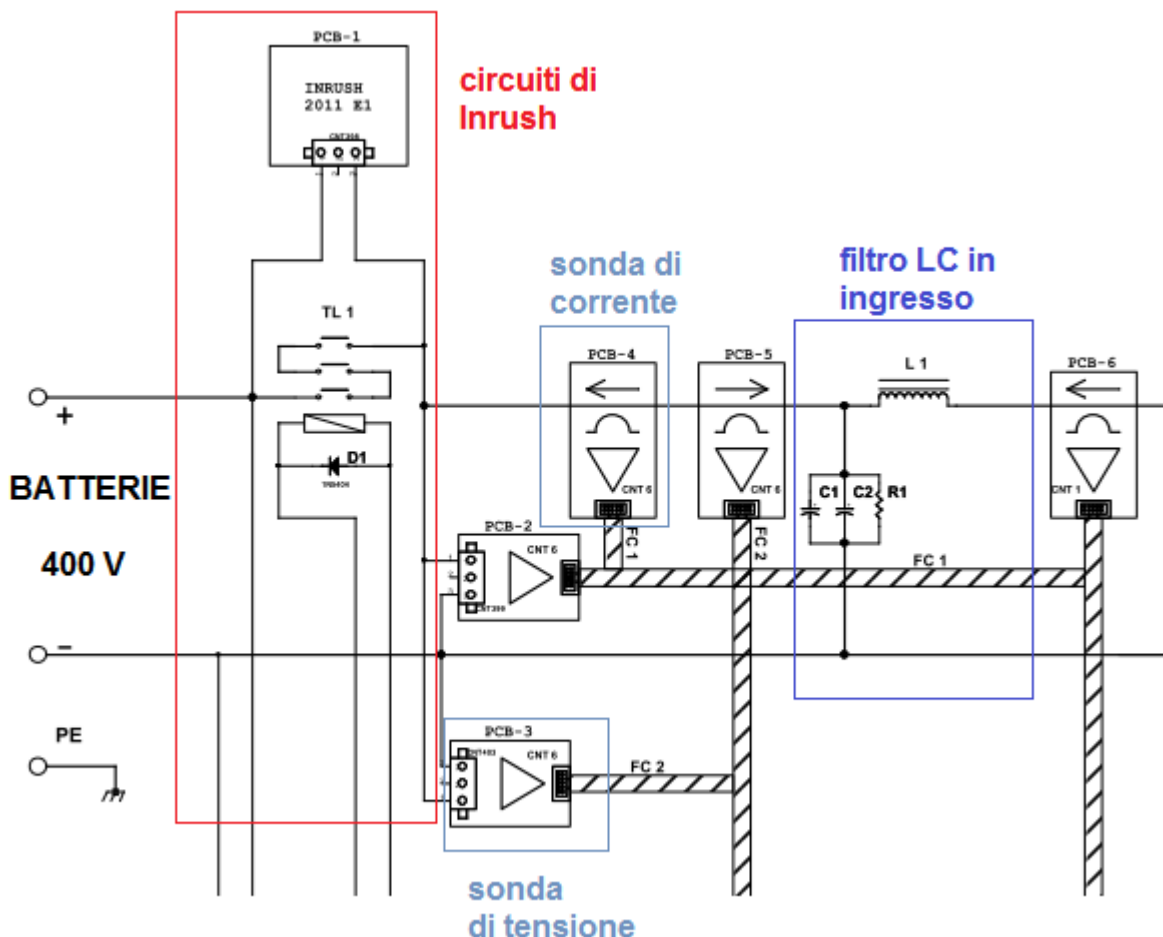


Fig. 2.1 – Particolare della sezione di ingresso del dispositivo.

La tensione nominale di ingresso dal pacco batterie è pari a 400V. Sono accettabili valori di tensione compresi tra 350V e 450V. Sono ottimali tutti i valori di tensione compresi tra 390V e 410V.

In figura 2.1 sono stati messi in evidenza:

- il circuito di INRUSH, che limita l'assorbimento di corrente lato batterie durante il transitorio di accensione del dispositivo;
- le sonde di tensione e di corrente, che consentono al sistema di controllo di monitorare le grandezze in ingresso al (o in uscita dal, a seconda della modalità di funzionamento) successivo stadio;
- il filtro LC in ingresso.

I data-sheet delle sonde di tensione (marca LEM modello LV 20 P) e corrente (marca LEM modello LA 100 P) utilizzate sono riportate in appendice 2.

In figura 2.2 è rappresentato il convertitore DC/DC (convertitore #1) che provvede a trasferire potenza dal pacco batterie al successivo DC-link, in condizioni di bidirezionalità.

Il convertitore è costituito da una coppia di IGBT longitudinale (gamba del ponte) che viene pilotata attraverso un circuito "driver" dai segnali generati dal modulatore del convertitore (circuito stampato denominato "MDL 2012").

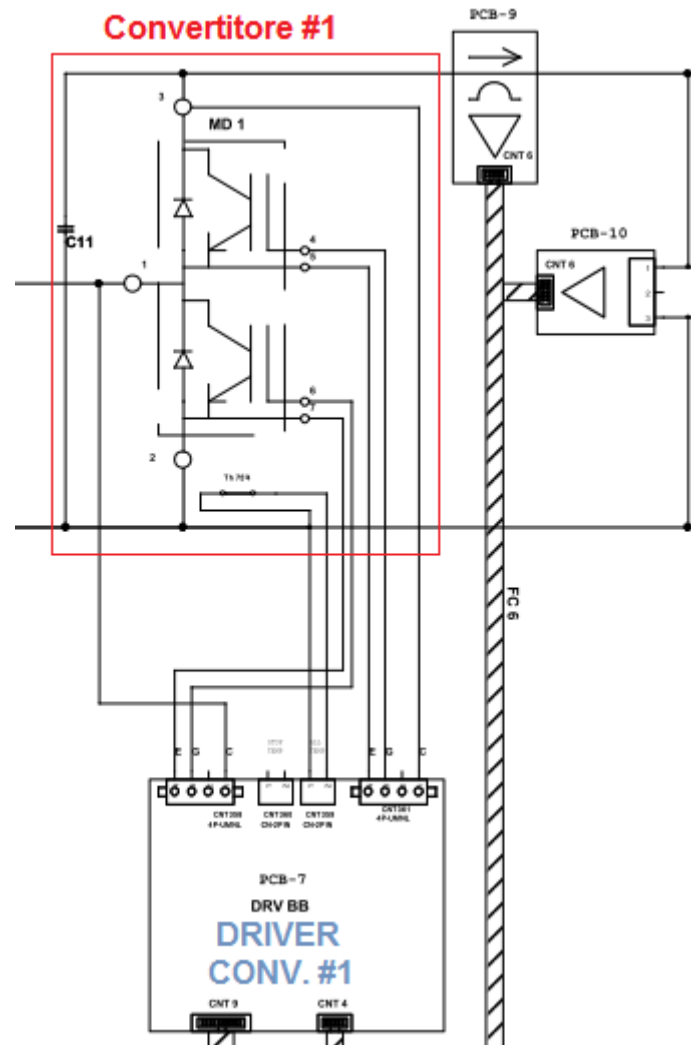


Fig. 2.2 – Particolare dello schema esecutivo con il convertitore #1 ed il relativo driver.

Gli IGBT utilizzati sono il modello SKM 100GB128D della ditta SEMIKRON. Il data-sheet degli IGBT è riportato in appendice 2.

In figura 2.3 è rappresentato il convertitore DC/AC bidirezionale (convertitore #2) che provvede a trasferire potenza dal DC-link alla rete in c.a. (o al carico privilegiato, in modalità di funzionamento stand-alone) o viceversa.

In figura è evidenziato il ponte ad "H" costituito da 6 IGBT (3 gambe) identici a quelli utilizzati nel convertitore #1. Si notano i tre distinti driver delle tre gambe del ponte pilotati dal modulatore del convertitore (circuito stampato "MDL 2012").

Inoltre si nota il filtro LC del DC-LINK realizzato con n.8 condensatori della Keindel da 2,2 mF ciascuno, collegati in serie e parallelo in moda da ottenere una capacità complessiva di 4,4 mF.

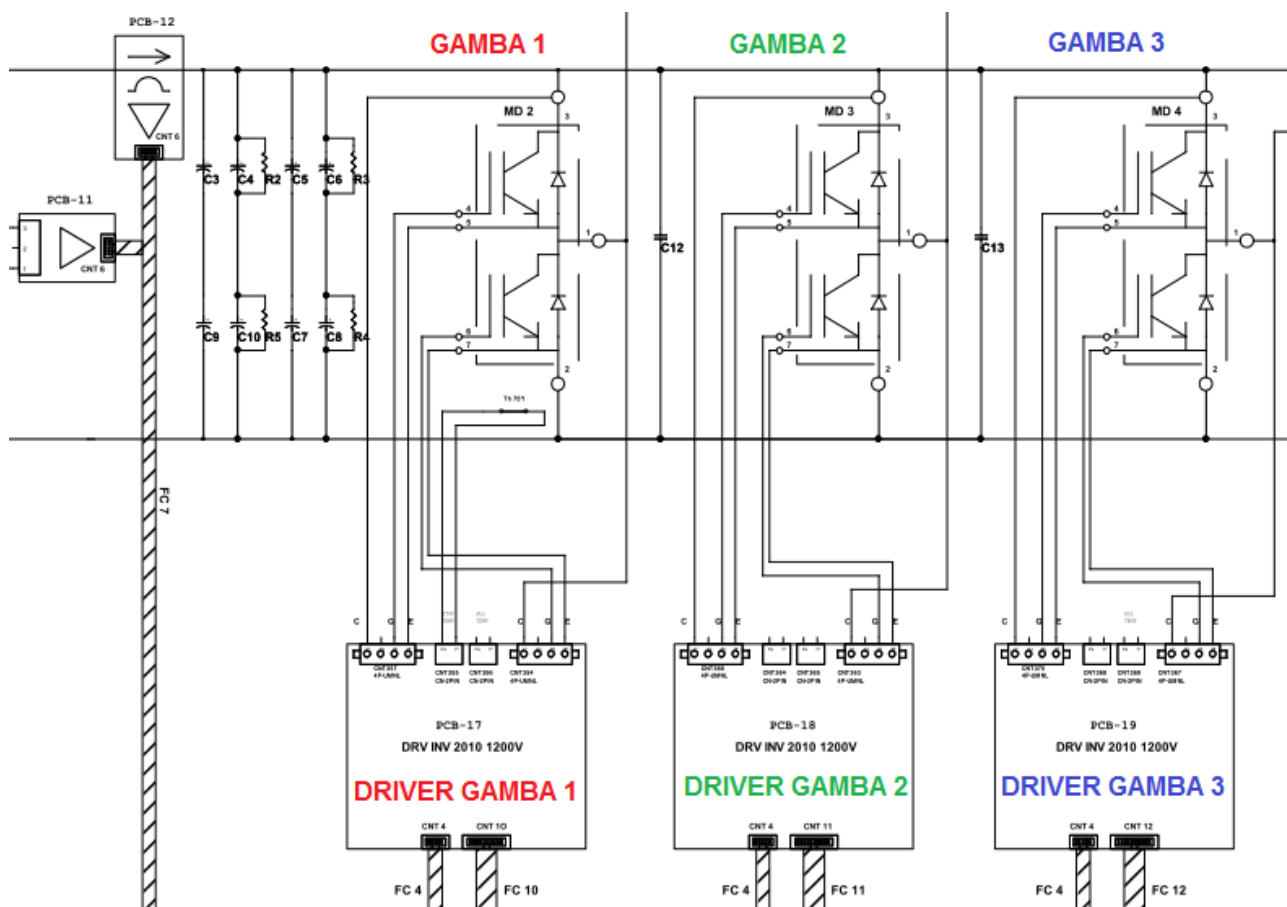


Fig. 2.3 – Particolare dello schema esecutivo con il convertitore #2 ed i relativi driver.

In figura 2.4 è rappresentata la sezione di uscita lato rete del convertitore.

Si notano:

- il circuito di INRUSH, che limita l'assorbimento di corrente lato rete durante il transitorio di accensione del dispositivo;
- le sonde di tensione e di corrente;
- il filtro LC lato rete;
- il trasformatore TR1 400/230 V/V per l'alimentazione dei circuiti ausiliari;
- l'interruttore IG1 del tipo magnetotermico da 50A 400V per la protezione del dispositivo lato rete.

Infine, in figura 2.5, è rappresentata la piastra denominata "CTR 2012" che è la scheda madre dell'apparecchiatura, dove risiede il microcontrollore TI, ed i collegamenti con i modulatori dei convertitori #1 e #2, con i driver, il display LCD e la scheda di comando dei circuiti ausiliari.

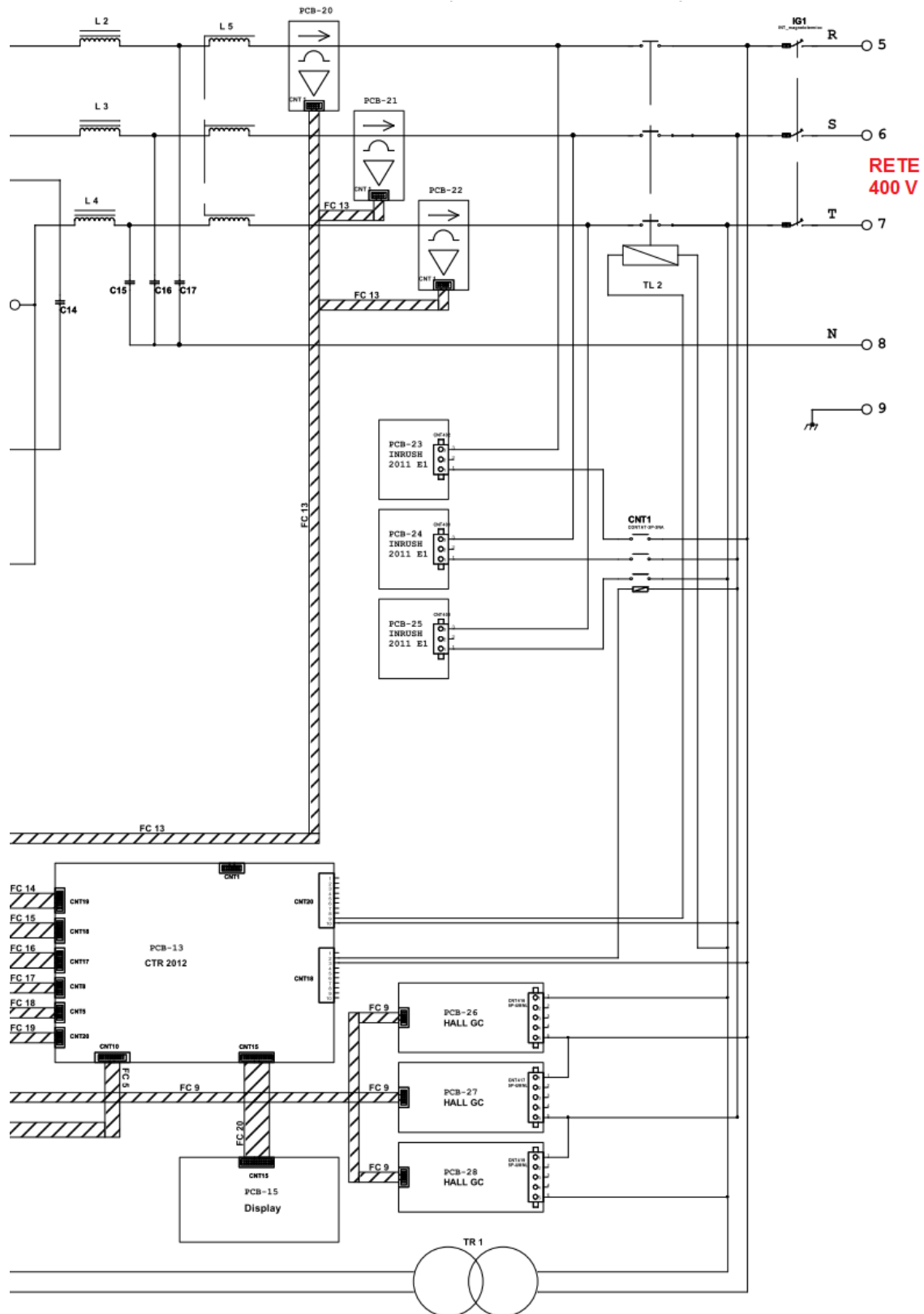


Fig. 2.4 – Particolare dello schema esecutivo con la sezione lato rete del dispositivo.

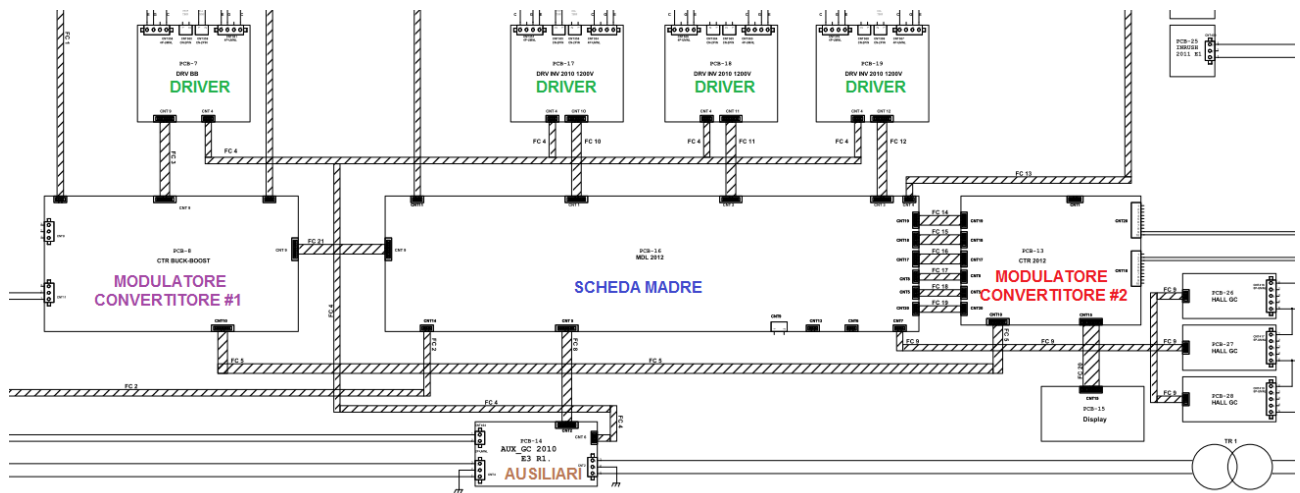


Fig. 2.5 – Particolare dello schema esecutivo con schede elettroniche.

3. Sviluppo sperimentale del sistema di interfaccia e controllo

La fase di sviluppo sperimentale ha riguardato la realizzazione prototipale del sistema di controllo ed interfaccia ibrido del sistema combinato accumulo/FER, le cui specifiche tecniche e funzionalità sono state elencate in [1] ed il cui schema elettrico esecutivo è stato presentato nella sezione 2 del presente documento.

In figura 3.1 è mostrato l'intero blocco di potenza, costituito dai convertitori #1 e #2, all'interno del quale è possibile visualizzare lo stadio di potenza, le schede di controllo dei convertitori, i condensatori ed induttori, l'alimentatore ausiliario, il display LCD e la morsettiera di collegamento.

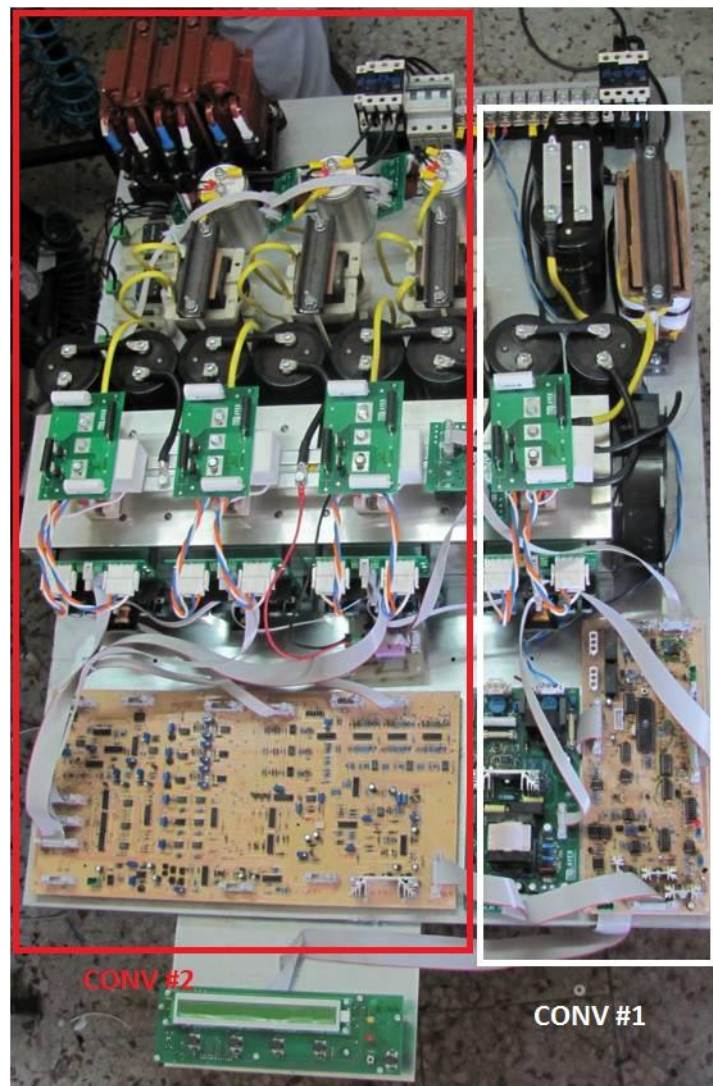


Fig. 3.1 - Visione d'insieme dettagliata dell'intero blocco di potenza.

Le figure da 3.2 a 3.10 mostrano, con una migliore definizione, le singole parti del prototipo di figura 3.1.

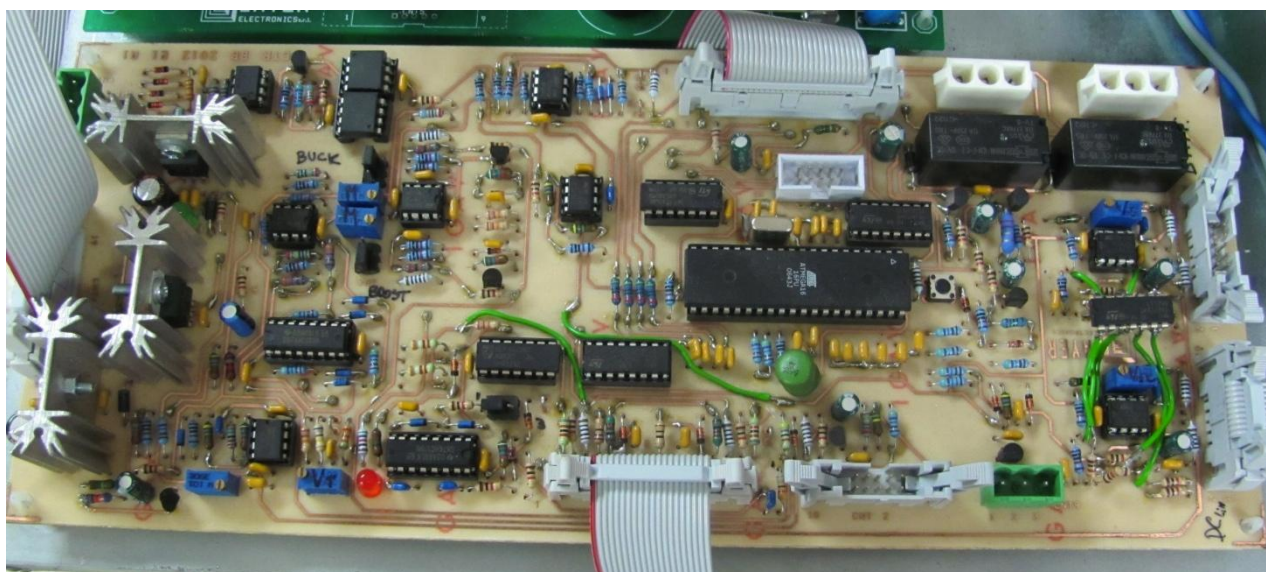


Fig. 3.2 - Scheda di controllo convertitore #1.

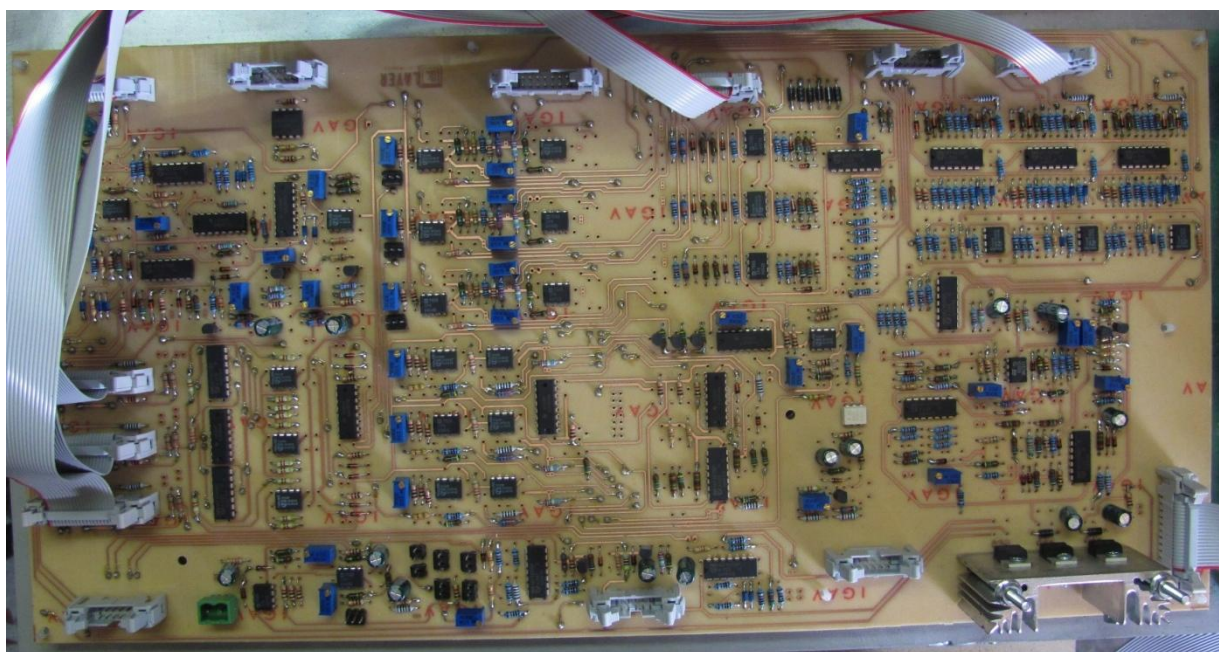


Fig. 3.3 - Scheda di controllo convertitore #2.

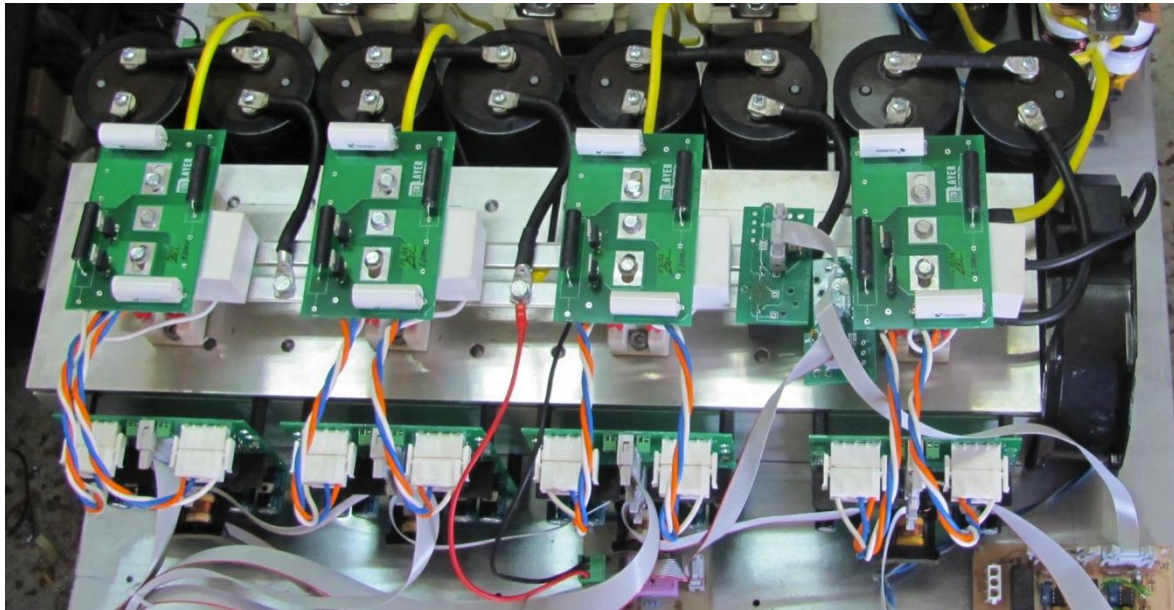
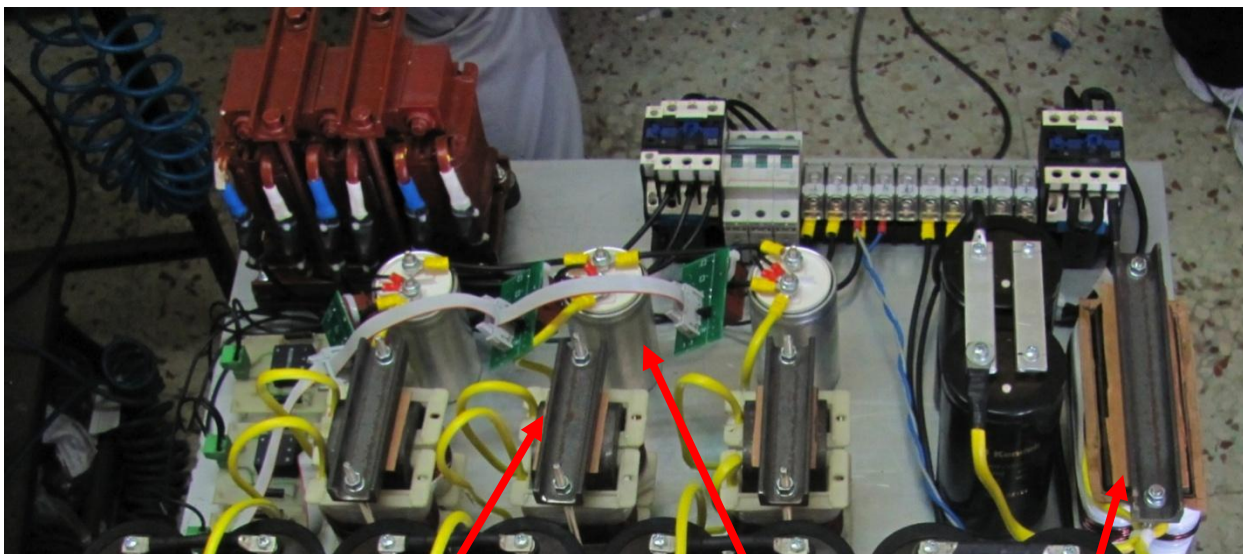


Fig. 3.4 - Stadio di potenza in cui si notano le “gambe” dei convertitori #1 e #2 ed i condensatori.



Induttori ad alta frequenza

induttore convertitore #1

condensatori di filtro

Fig. 3.5 – Particolare sugli induttori e condensatori della sezione “rete”.

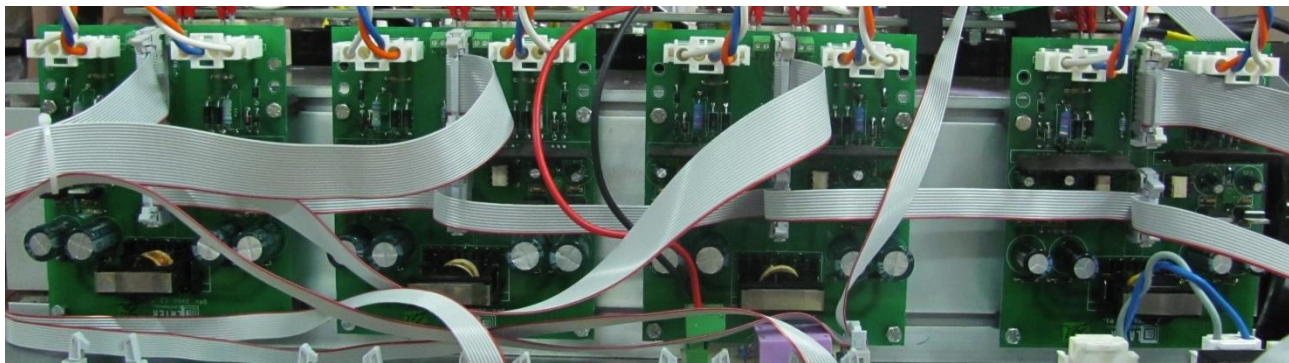


Fig. 3.6 - Driver IGBT.

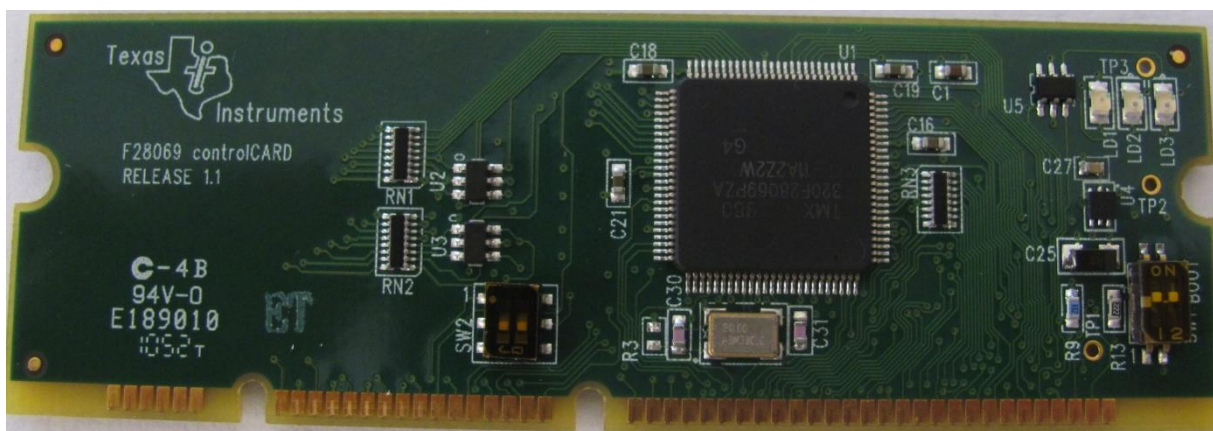


Fig. 3.7 - Unità di controllo POWER ELETTR. (MICRO TI).

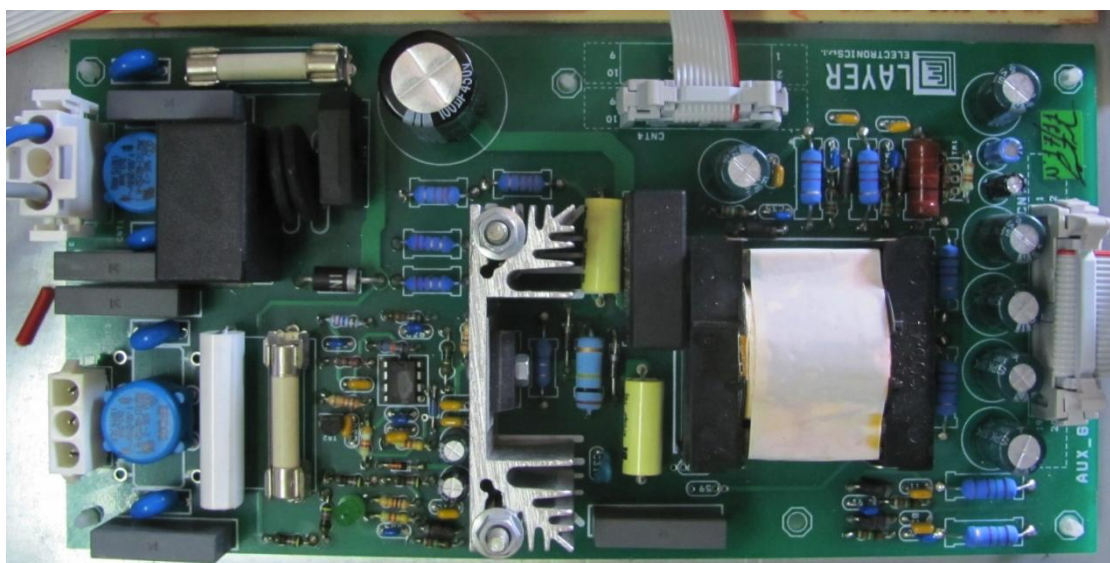


Fig. 3.8 - Alimentatore ausiliario.



Fig. 3.9 - Display LCD.



Fig. 3.10 - Induttore trifase (lato rete) .

La figura 3.11 evidenzia, infine, la morsettiera di collegamento agli elementi esterni.

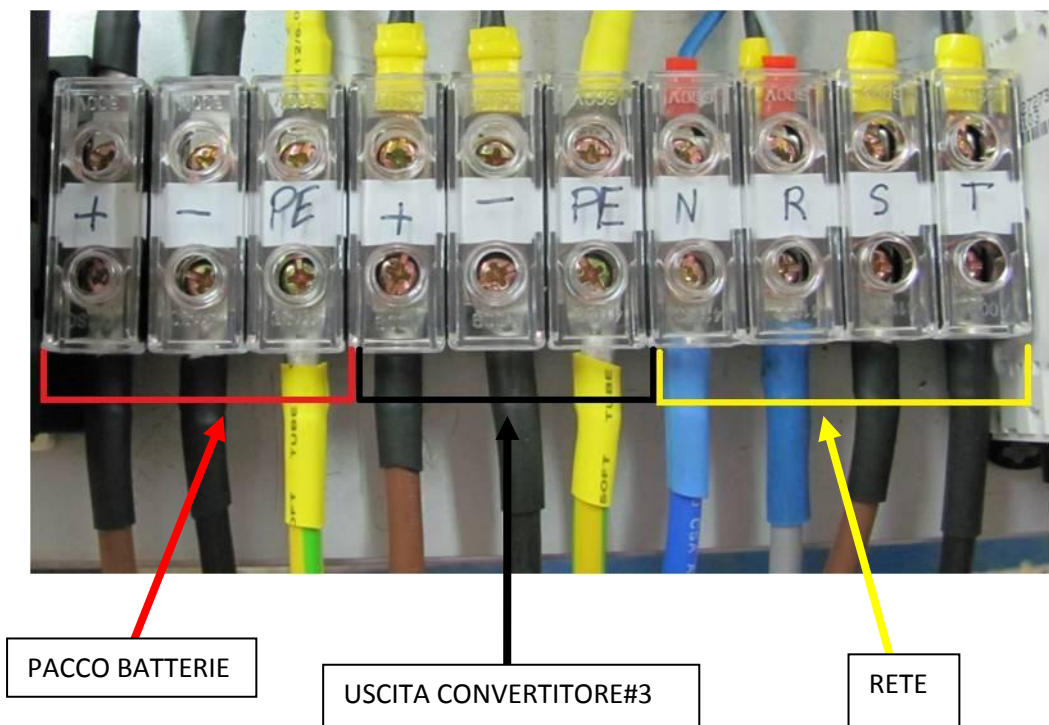


Fig. 3.11 - Morsetti di collegamento

Il DDI è stato realizzato utilizzando schede di sviluppo di costruzione *STMicroelectronics*. Lo schema a blocchi per la realizzazione dell’hardware è mostrato in fig. 3.12, in cui è possibile notare come l’hardware viene scomposto in una sezione metrologica e in una sezione di elaborazione e trasmissione dati.

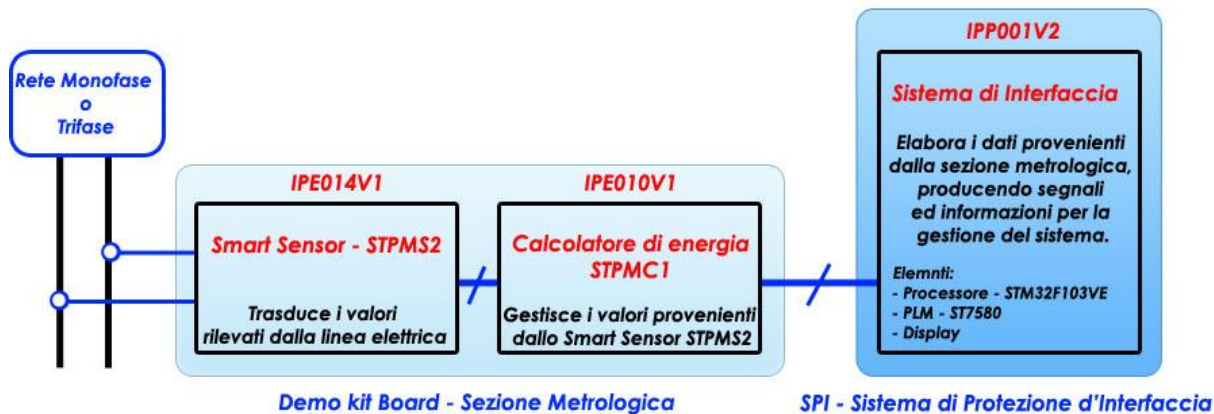


Fig. 3.12 - Schematizzazione dell’hardware del DDI.

Andando nel dettaglio dell’hardware, le *board STMicroelectronics* (mostrate in fig. 3.13), che sono state utilizzate per il progetto, sono le seguenti:

- **Demo Kit Board.** (sezione metrologica) È composta dalle schede STEVAL-IPE014V1 e STEVAL-IPE010V1, le cui funzioni sono rispettivamente la trasduzione dei segnali da misurare attraverso lo *Smart Sensor* STPMS2 e l’elaborazione e la memorizzazione dei segnali provenienti dal trasduttore tramite il calcolatore di energia STPMC1.
- **E-meter board.** Costituita dalla scheda STEVAL-IPP001V2 che si interfaccia con l’impianto di generazione da FER svolgendo le funzioni di gestione e controllo del medesimo, manipolando i dati provenienti dalla sezione metrologica. La scheda è stata progettata per includere funzionalità avanzate e per soddisfare i requisiti di prossima generazione per le misure di

energia, ed è possibile avere caratteristiche supplementari inserendo dei moduli extra per una completa personalizzazione e riprogrammando in modo opportuno il software residente in memoria.

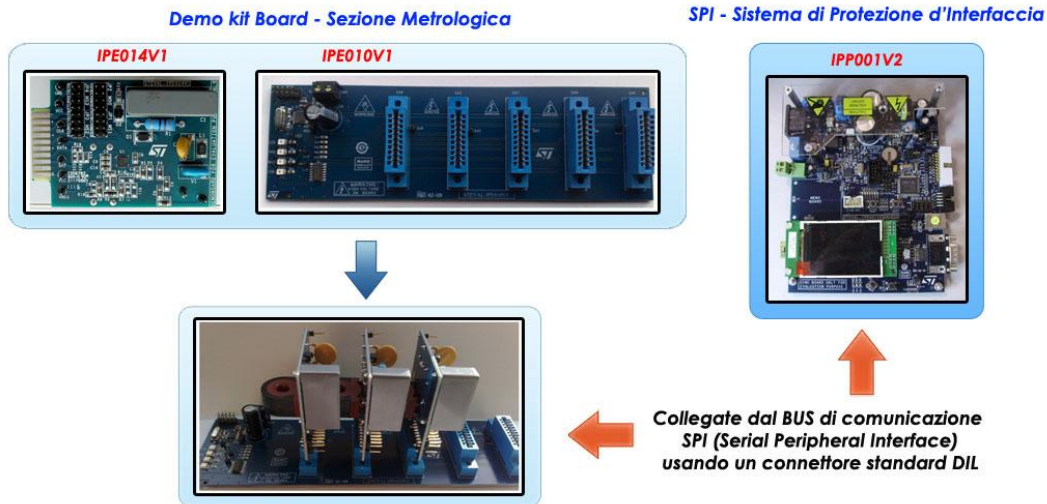


Fig. 3.13 – Foto dei componenti hardware utilizzati

Il *firmware* è stato sviluppato in modo da implementare le seguenti funzionalità:

- protezione di massima e minima tensione con due soglie;
- protezione di massima e minima frequenza con due soglie;
- gestione dello sgancio del dispositivo;
- gestione della comunicazione con il distributore via *power line* ed *ethernet*;
- gestione dell'inverter via RS 232.

L'ambiente di sviluppo utilizzato per l'implementazione del *firmware* per la realizzazione del DPI è *Atollic TrueSTUDIO®*. La programmazione è stata fatta via *JTAG probes* utilizzando *ST-Link/V2* di *STMicroelectronics*.

4. Test e prove

Nell'ultima fase delle attività è stata condotta una campagna di test e prove al fine di:

- applicare e validare in ambiente simulato l'algoritmo di gestione del sistema combinato per profili di variabilità della domanda tipici di alcune utenze di media taglia del settore terziario;
- verificare sperimentalmente (attraverso specifici test condotti in laboratorio) il regolare funzionamento dei singoli componenti di potenza del sistema, sotto diverse condizioni operative di funzionamento (in modalità stand-alone e grid-connected);
- verificare sperimentalmente (attraverso specifici test condotti in laboratorio) l'operatività delle funzioni di protezione e comunicazione (verso la rete) implementate.

4.1. Applicazioni e test dell'algoritmo di gestione in ambiente simulato

L'algoritmo di gestione illustrato in [1] è stato implementato e applicato in ambiente simulato con riferimento alle condizioni di seguito sintetizzate.

Parametri di riferimento del dispositivo di accumulo

I parametri di riferimento assunti per la batteria al litio sono riportati in tabella 4.1:

Capacità C [kWh]	Velocità di carica v [1/timeslot]	Efficienza η [%]
16	4	90

Tab. 4.1 – Parametri di riferimento del dispositivo di accumulo

Profili base del diagramma di carico

Per ciascuna tipologia di utenza sono stati individuati due diagrammi di carico giornalieri, ciascuno dei quali fa riferimento ad una determinata stagione convenzionale:

- stagione invernale dal 01/10 al 31/03;
- stagione estiva dal 01/04 al 30/09.

I diagrammi di carico sono riportati nelle successive figure da 4.1 a 4.6.

Profili di produzione dell'impianto FV

Ai fini delle simulazioni si è tenuto conto della presenza di un impianto fotovoltaico di potenza di picco pari a 15 kW.

La produzione dell'impianto fotovoltaico è stata stimata per il periodo invernale facendo riferimento al mese di gennaio e per il periodo estivo facendo riferimento al mese di luglio. Per la determinazione del profilo di potenza prodotta nei due giorni tipo invernale ed estivo dall'impianto fotovoltaico si è ricorso al database internazionale di JRC's Institute for Energy and Transport – PV-GIS [2], scegliendo per il calcolo della radiazione solare la città di Erice (TP) dove è stato sviluppato il prototipo.

I profili della potenza prodotto dall'impianto fotovoltaico sono riportati nelle successive figure da 4.1 a 4.6, insieme ai diagrammi di carico. Si è assunto convenzionalmente un segno positivo per la potenza assorbita dal carico ed un segno negativo per la potenza prodotta dall'impianto fotovoltaico.

Piano tariffario

Come valori del PUN sono stati assunti gli effettivi valori riscontrati nell'anno 2011 per i mesi di gennaio e luglio, pubblicati dal GME (Gestore del Mercato Elettrico) [3].

I valori giornalieri, riportati nella tabella 4.2 per il periodo invernale e per quello estivo, sono calcolati come media dei valori orari di tutti i giorni dei mesi di gennaio e di luglio 2011.

Ora	INV	EST	Ora	INV	EST
0	61,95	69,21	12	73,42	89,65
1	55,86	67,69	13	70,15	75,06
2	49,41	59,44	14	67,13	70,54
3	46,38	55,18	15	68,09	72,68
4	43,27	51,12	16	69,15	73,19
5	42,00	49,70	17	71,14	74,24
6	47,05	49,75	18	80,69	73,92
7	58,87	56,77	19	81,31	72,20
8	64,88	61,84	20	78,13	74,09
9	70,55	69,77	21	74,37	78,83
10	73,38	79,23	22	71,68	85,14
11	73,91	87,68	23	67,30	76,72

Tab. 4.2 – Valori del PUN in €/MWh per giorno tipo invernale (INV) ed estivo (EST)

4.1.1. Risultati delle simulazioni

Nelle figure da 4.1 a 4.6, sono raffigurati, per le tre utenze simulate e per i due periodi invernale ed estivo, i diagrammi rappresentanti gli andamenti giornalieri della potenza assorbita dal carico ("Load" linea azzurra), della potenza prodotta dall'impianto fotovoltaico ("FV" linea rossa) e della potenza erogata e assorbita dal convertitore lato AC ("Convertitore" linea verde). Sotto ogni diagramma è riportato l'andamento orario dei valori del PUN assunto alla base delle simulazioni.

In tutti i diagrammi i valori positivi indicano potenza assorbita e i valori negativi indicano potenza erogata. A completamento, per ognuno dei tre casi simulati è riportata una tabella (tabella da 4.3 a 4.8) recante i possibili stati di funzionamento del convertitore con riferimento al processo di carica e scarica delle batterie (carica C, scarica S o stand-by SB) determinati applicando l'algoritmo di ottimizzazione.

Si evidenzia che per ciascun intervallo di simulazione l'effettivo stato di funzionamento può non corrispondere con quello possibile indicato nelle suddette tabelle in relazione all'effettiva capacità della batteria di caricarsi o scaricarsi nell'intervallo considerato nel rispetto dei vincoli massimi e minimi sul SOC (State Of Charge).

4.1.1.1. Caso 1: Struttura ospedaliera

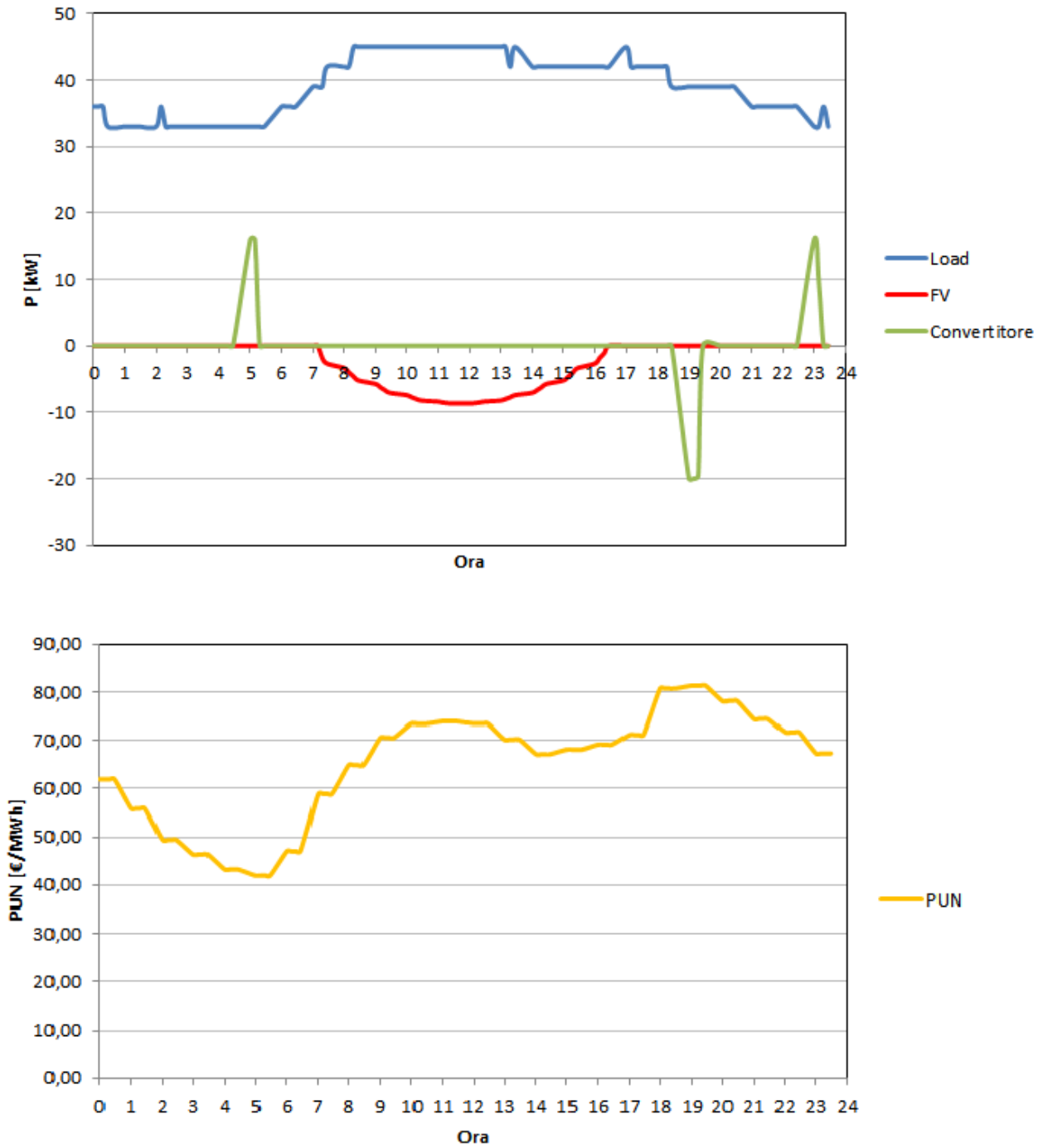


Fig. 4.1 – Valori della potenza assorbita dall’utenza ospedaliera, della potenza prodotta dall’impianto FV e della potenza assorbita o erogata dal convertitore in un giorno tipo invernale.

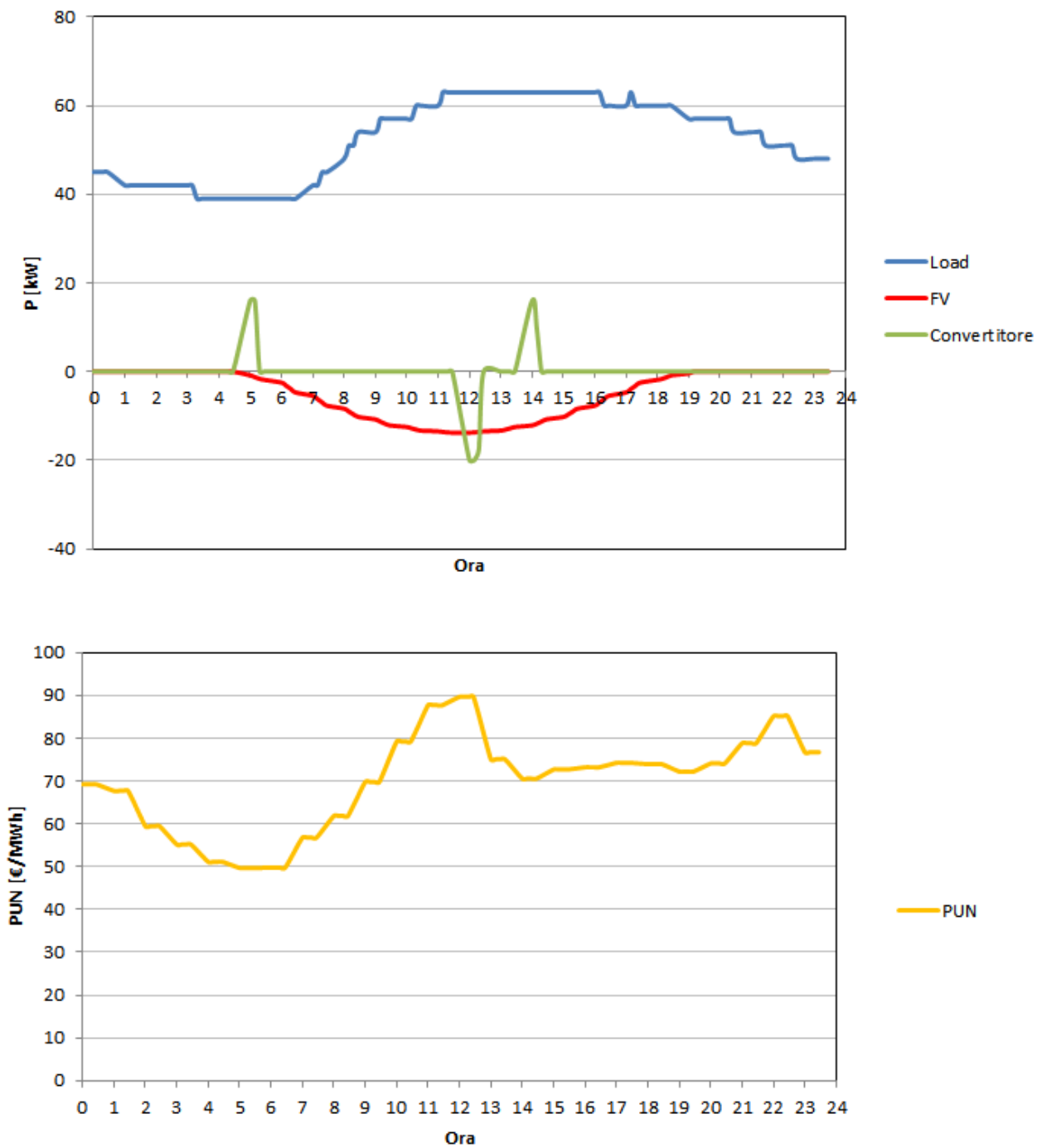


Fig. 4.2 – Valori della potenza assorbita dall’utenza ospedaliera, della potenza prodotta dall’impianto FV e della potenza assorbita o erogata dal convertitore in un giorno tipo estivo.

Ora		Ora	
0	C	12	C
1	C	13	C
2	C	14	C
3	C	15	C
4	C	16	C
5	C	17	C
6	C	18	C
7	C	19	SB
8	C	20	S
9	C	21	SB
10	C	22	C
11	C	23	C

Tab. 4.3 – Stati di possibile funzionamento del convertitore nelle 24 ore del giorno tipo invernale per utenza ospedaliera.

ora		ora	
0	C	12	S
1	C	13	C
2	C	14	C
3	C	15	C
4	C	16	C
5	C	17	C
6	C	18	C
7	C	19	C
8	C	20	C
9	C	21	C
10	SB	22	SB
11	SB	23	C

Tab. 4.4 – Stati di possibile funzionamento del convertitore nelle 24 ore del giorno tipo estivo per utenza ospedaliera.

4.1.1.2. Caso 2: Struttura commerciale

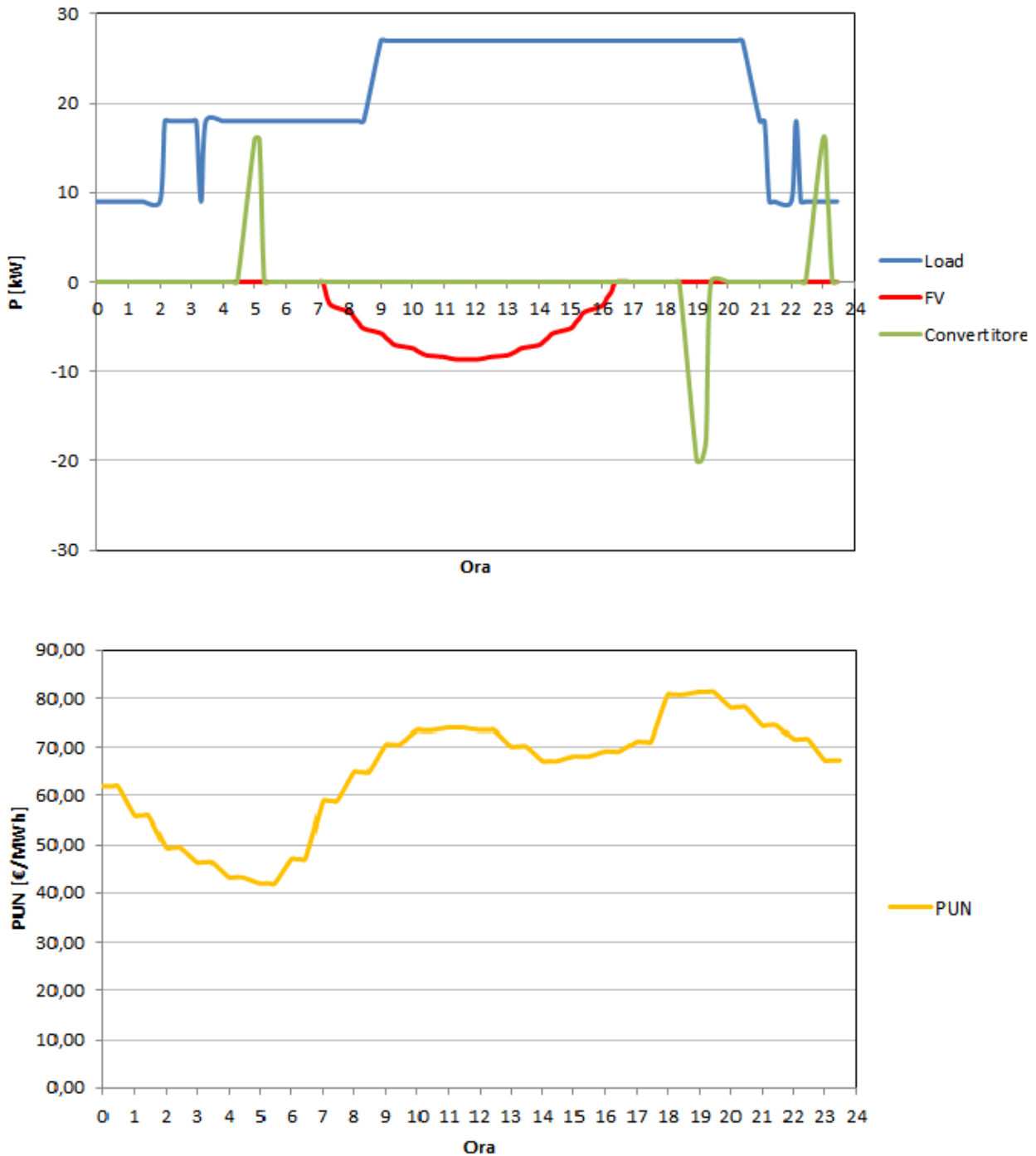


Fig. 4.3 – Valori della potenza assorbita dall’utente commerciale, della potenza prodotta dall’impianto FV e della potenza assorbita o erogata dal convertitore in un giorno tipo invernale.

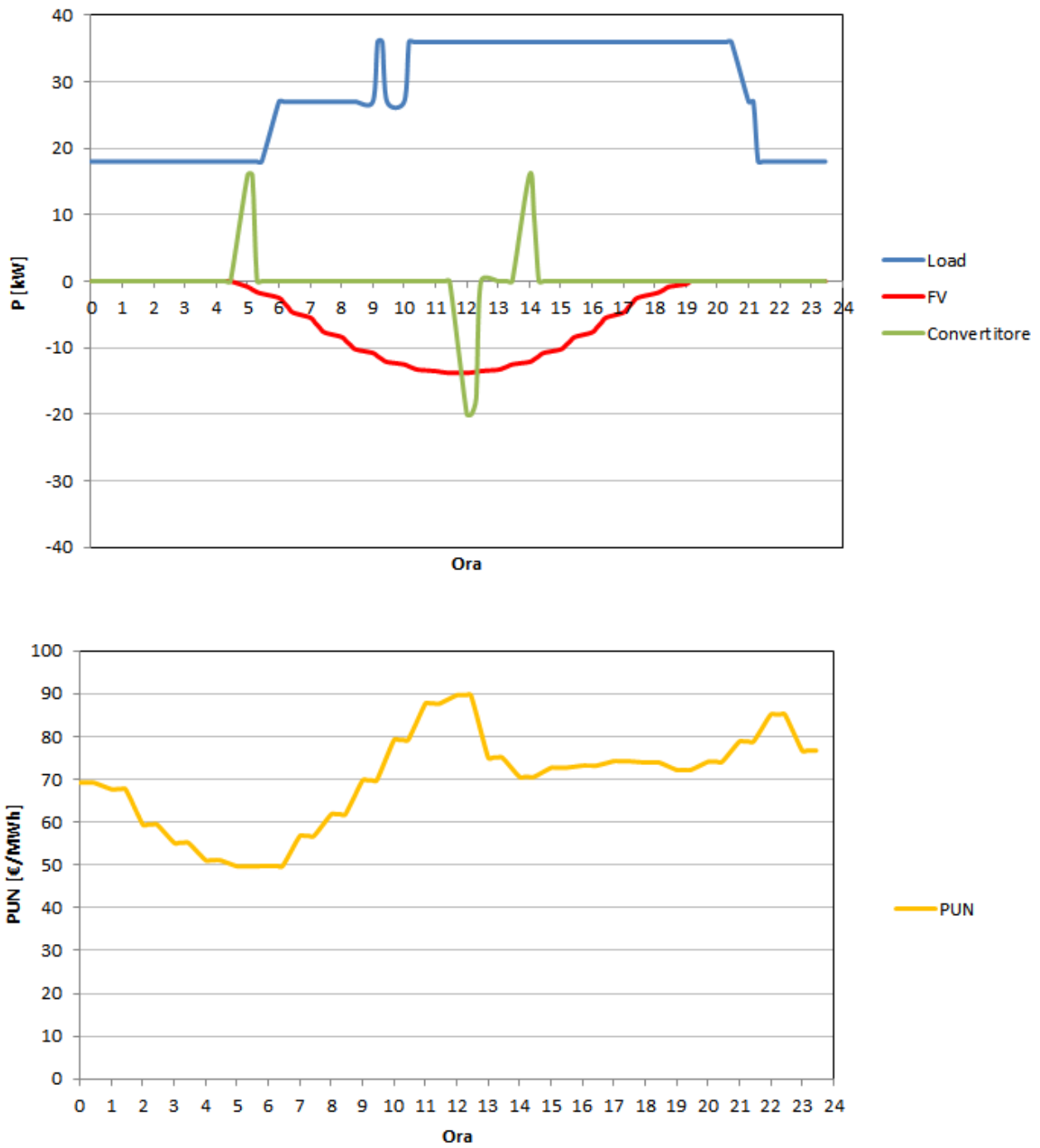


Fig. 4.4 – Valori della potenza assorbita dall’utente commerciale, della potenza prodotta dall’impianto FV e della potenza assorbita o erogata dal convertitore in un giorno tipo estivo.

ora		ora	
0	C	12	C
1	C	13	C
2	C	14	C
3	C	15	C
4	C	16	C
5	C	17	C
6	C	18	SB
7	C	19	S
8	C	20	S
9	C	21	SB
10	C	22	C
11	C	23	C

Tab. 4.5 – Stati di possibile funzionamento del convertitore nelle 24 ore del giorno tipo invernale per utenza commerciale.

ora		ora	
0	C	12	SB
1	C	13	S
2	C	14	C
3	C	15	C
4	C	16	C
5	C	17	C
6	C	18	C
7	C	19	C
8	C	20	C
9	C	21	C
10	C	22	SB
11	SB	23	C

Tab. 4.6 – Stati di possibile funzionamento del convertitore nelle 24 ore del giorno tipo estivo per utenza commerciale.

4.1.1.3. Caso 3: Dipartimento universitario (DIEETCAM – Università di Palermo)

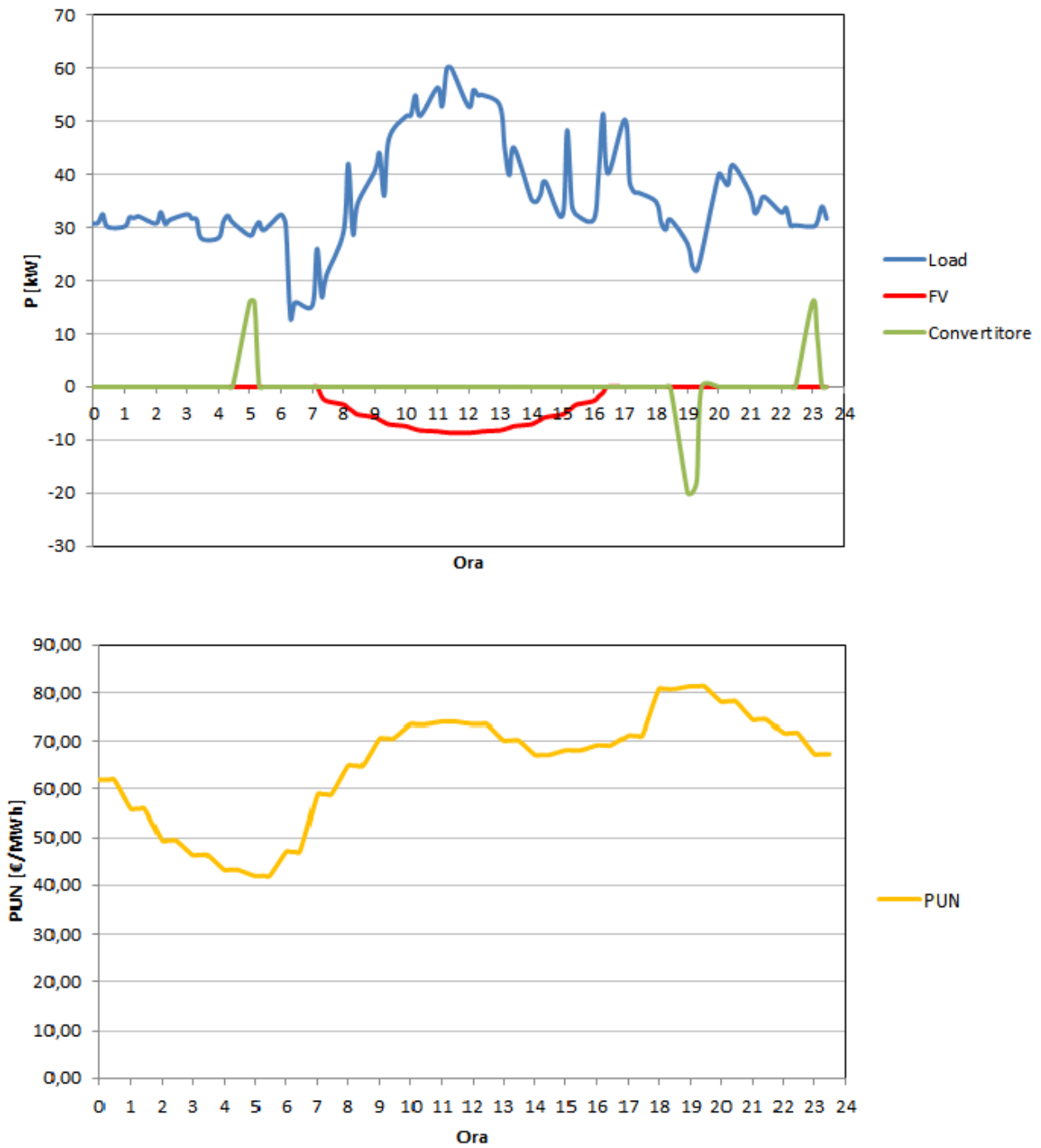


Fig. 4.5 – Valori della potenza assorbita dall’utenza dipartimento universitario, della potenza prodotta dall’impianto FV e della potenza assorbita o erogata dal convertitore in un giorno tipo invernale.

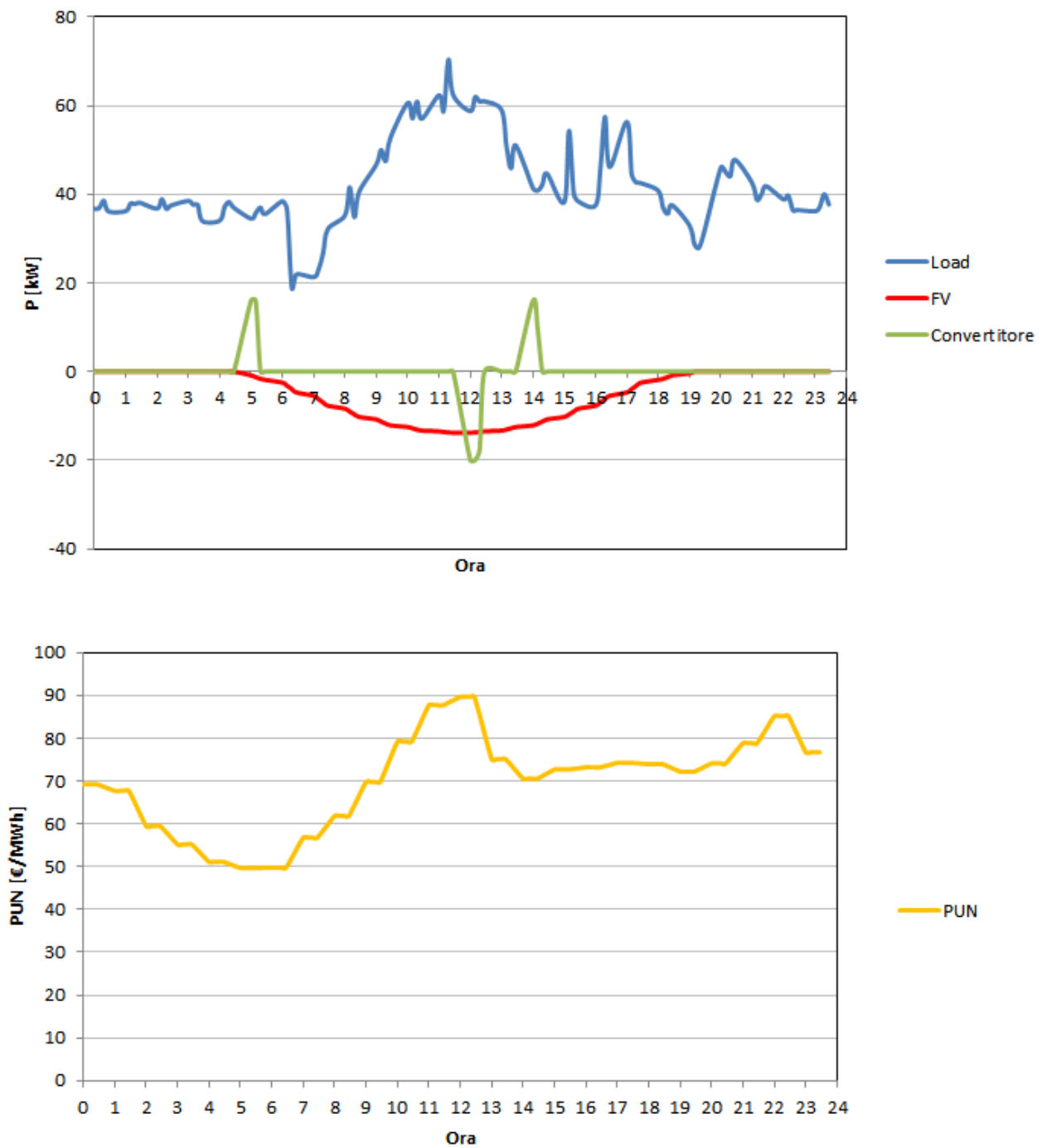


Fig. 4.6 – Valori della potenza assorbita dall'utenza dipartimento universitario, della potenza prodotta dall'impianto FV e della potenza assorbita o erogata dal convertitore in un giorno tipo estivo.

ora		ora	
0	C	12	C
1	C	13	C
2	C	14	C
3	C	15	C
4	C	16	C
5	C	17	C
6	C	18	C
7	C	19	SB
8	C	20	S
9	C	21	SB
10	C	22	C
11	C	23	C

Tab. 4.7 – Stati di possibile funzionamento del convertitore nelle 24 ore del giorno tipo invernale per il dipartimento universitario.

ora		ora	
0	C	12	S
1	C	13	C
2	C	14	C
3	C	15	C
4	C	16	C
5	C	17	C
6	C	18	C
7	C	19	C
8	C	20	C
9	C	21	C
10	SB	22	SB
11	SB	23	C

Tab. 4.8 – Stati di possibile funzionamento del convertitore nelle 24 ore del giorno tipo estivo per il dipartimento universitario.

4.2. Prove sperimentali (in laboratorio)

4.2.1. Specifiche dei componenti utilizzati per la fase di test

Specifiche del campo fotovoltaico

Gli impianti FV pilota sono due, il primo ha un campo FV costituito da moduli in silicio monocristallino, mentre il secondo sfrutta la tecnologia del silicio amorfo a film sottile.

Il campo FV in silicio monocristallino (campo 1) è formato da 12 moduli FV Sharp NTS5E3E, suddivisi in 2 stringhe, ciascuna delle quali costituita da 6 moduli in serie, come evidenziato in figura 4.7.

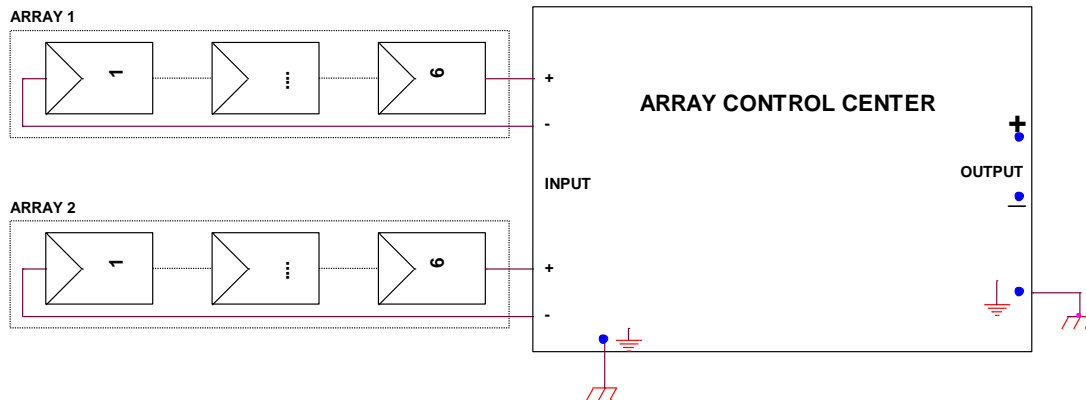


Fig. 4.7 – Configurazione del campo FV con pannelli in silicio monocristallino (campo 1).

Ogni modulo presenta le seguenti caratteristiche:

- Potenza nel punto di massima potenza: $P_{mpp} = 185 \text{ W}$;
- Tensione nel punto di massima potenza: $U_{mpp} = 36,21 \text{ V}$;
- Corrente nel punto di massima potenza: $I_{mpp} = 5,11 \text{ A}$;
- Tensione a vuoto $U_{oc} = 44,9 \text{ V}$;
- Corrente di corto circuito $I_{sc} = 5,75 \text{ A}$.

Le specifiche tecniche relative all'intero campo FV sono le seguenti:

- Potenza nel punto di massima potenza: $P_{mpp} = 185 \times 12 = 2220 \text{ W}$;
- Tensione nel punto di massima potenza: $U_{mpp} = 36,21 \times 6 = 217,26 \text{ V}$;
- Corrente nel punto di massima potenza: $I_{mpp} = 5,11 \times 2 = 10,22 \text{ A}$;
- Tensione a vuoto $U_{oc} = 44,9 \times 6 = 269,4 \text{ V}$;
- Corrente di corto circuito $I_{sc} = 5,75 \times 2 = 11,5 \text{ A}$.

Il campo FV realizzato in film sottile (campo 2) è composto da 14 moduli Sharp NAF121(G5) suddivisi in 2 stringhe, ciascuna delle quali costituita da 7 moduli in serie, come evidenziato in figura 4.8.

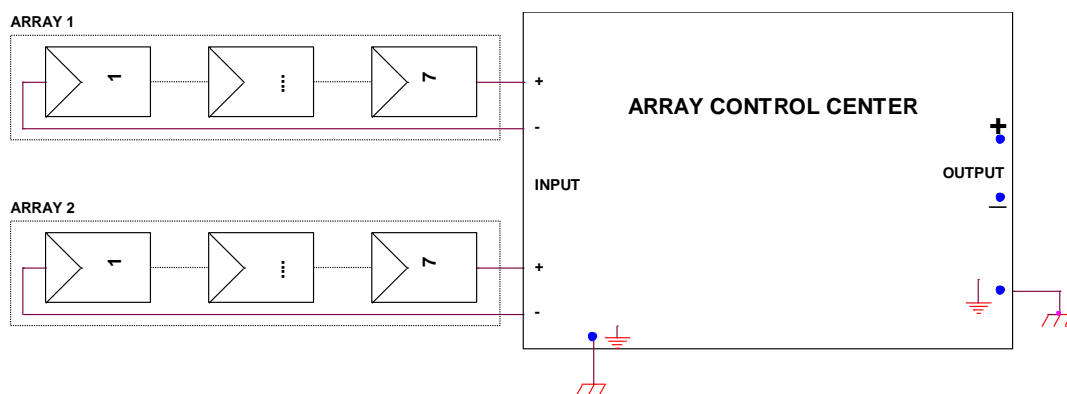


Fig. 4.8 – Configurazione del campo FV con pannelli a film sottile (campo 2).

Ogni modulo presenta le seguenti caratteristiche:

- Potenza nel punto di massima potenza: $P_{mpp} = 121 \text{ W}$;
- Tensione nel punto di massima potenza: $U_{mpp} = 45 \text{ V}$;
- Corrente nel punto di massima potenza: $I_{mpp} = 2,69 \text{ A}$;
- Tensione a vuoto $U_{oc} = 59,2 \text{ V}$;
- Corrente di corto circuito $I_{sc} = 3,35 \text{ A}$.

Le specifiche tecniche relative all'intero campo FV sono le seguenti:

- Potenza nel punto di massima potenza: $P_{mpp} = 121 \times 14 = 1694 \text{ W}$;
- Tensione nel punto di massima potenza: $U_{mpp} = 45 \times 7 = 315 \text{ V}$;
- Corrente nel punto di massima potenza: $I_{mpp} = 2,69 \times 2 = 5,38 \text{ A}$;
- Tensione a vuoto $U_{oc} = 59,2 \times 7 = 414,4 \text{ V}$;
- Corrente di corto circuito $I_{sc} = 3,35 \times 2 = 6,7 \text{ A}$

Nelle figure 4.9 e 4.10 sono mostrati i campi FV utilizzati per la fase di test.



Fig. 4.9 - Campo FV in silicio policristallino utilizzato per la fase di test (campo 1).



Fig. 4.10 - Campo FV in silicio amorfo utilizzato per la fase di test (campo 2).

Specifiche del carico

Per la simulazione del carico resistivo è stato utilizzato un banco di resistori trifase da 15 kW (circa 3,52 Ω) e tre banchi di resistori monofase ciascuno da 75 kW (circa 0,7 Ω).

Le figure 4.11 e 4.12 mostrano, rispettivamente, il banco di resistori trifase e monofase.



Fig. 4.11 - Banco di resistori trifase da 15 kW.



Fig. 4.12 - Banco di resistori monofase da 75 kW.

4.2.2. *Elenco delle prove*

Come già precisato, la fase di test è stata finalizzata a valutare il regolare funzionamento dei singoli componenti del sistema, sotto diverse condizioni operative di funzionamento.

Nelle more che le batterie al litio della Alchemy (descritte in Appendice 3) siano rese fisicamente disponibili presso i laboratori del DIETCAM(*), le prove di seguito elencate sono state eseguite con un sistema di accumulo elettrochimico costituito da n.33 batterie al Pb (12V/100Ah) collegate in serie, per ottenere una tensione complessiva di 396 V. Le batterie utilizzate sono riportate in figura 4.13.

Di seguito si riporta una sintetica elencazione delle prove sperimentali effettuate.

Test sul convertitore DC/AC #2

Nei test effettuati il sistema di accumulo è collegato in ingresso al convertitore #1 funzionante in modalità step-up. In parallelo all'uscita del convertitore #1 è connesso il convertitore #3 alimentato dal campo FV precedentemente descritto. Si sottolinea la riesecuzione di parte dei test in risposta al transitorio di bypass dalla modalità GRID-CONNECTED alla modalità STAND-ALONE.

In tabella 4.9 sono elencati i test eseguiti sul convertitore DC/AC.



Fig. 4.13 – Batterie al PB usate per i test.

(*) ENEA, come previsto nell'accordo di collaborazione, ha già provveduto all'ordine di acquisto.

N°	TEST	STAND ALONE	GRID CONNECTED
1	MISURA TENSIONE DI DC-LINK A PIENO CARICO (100%)	X	X
2	MISURA E VERIFICA TENSIONE D'USCITA	X	
3	MISURA E VERIFICA FREQUENZA D'USCITA	X	
4	VERIFICA CONDIZIONI OPERATIVE A CARICO LINEARE (resistivo)	X	X
5	VERIFICA CONDIZIONI OPERATIVE A CARICO DISTORCENTE	X	X
6	VERIFICA CONDIZIONI OPERATIVE A $\cos \varphi \neq 1$	X	X
7	MISURA THD TENSIONE D'USCITA	X	X
8	VERIFICA TEMPERATURA DISSIPATORE	X	X
9	VERIFICA TEMPERATURA INTERNA DOPO 2h A PIENO CARICO	X	X

Tab. 4.9 – Elenco delle prove eseguite sul convertitore #2 operante in modalità inverter.

Sul convertitore #2, operante in modalità raddrizzatore (per la carica delle batterie) e con il convertitore #1 in modalità step-down, sono state effettuate, inoltre, le prove elencate in tabella 4.10.

N.	TEST
10	MISURA DEL $\cos \varphi$ LATO RETE E VERIFICA DELLE PRESTAZIONI COME COMPENSATORE REATTIVO
11	MISURA TENSIONE DI DC-LINK A PIENO CARICO (100%)
12	VERIFICA DELLA TENSIONE DI RIPPLE DC LINK

Tab. 4.10 – Elenco delle prove eseguite sul convertitore #2 operante in modalità raddrizzatore.

Test sul convertitore DC/DC #1

Le verifiche effettuate si riferiscono alle condizioni operative di carica/scarica delle batterie in risposta a segnali di controllo provenienti dal DSP Texas Instruments.

In tabella 4.11 sono elencati i test eseguiti sul convertitore DC/AC.

N°	TEST	MODALITÀ STEP-UP	MODALITÀ STEP-DOWN
1	MISURA TENSIONE DI BATTERIA (A VUOTO)	X	
2	MISURA TENSIONE DI BATTERIA (IN CARICA)		X
3	MISURA TENSIONE DI DC-LINK A VUOTO	X	
4	MISURA TENSIONE NOMINALE DI DC-LINK A PIENO CARICO (100%)	X	X
5	VERIFICA CONDIZIONI OPERATIVE IN FASE DI CARICA		X
6	VERIFICA CONDIZIONI OPERATIVE IN FASE DI SCARICA	X	

Tab. 4.11 – Elenco delle prove eseguite sul convertitore #1.

Test sul DDI per le funzioni di protezione e comunicazione

Sul DDI sono state eseguite, con esito positivo, le seguenti prove:

- Verifica del funzionamento della protezione di massima e minima tensione con due soglie;
- Verifica del funzionamento della protezione di massima e minima frequenza con due soglie;
- Verifica del funzionamento della gestione dello sgancio al DDI, comandando un contattore;
- Verifica del funzionamento della comunicazione utilizzando la seriale RS 232.

In figura 4.14 è mostrato il banco di prova allestito in laboratorio per la verifica delle funzioni di protezione e comunicazione.

In figura 4.15 è mostrato, in particolare, il display del controllore con i valori misurati e le soglie di intervento.

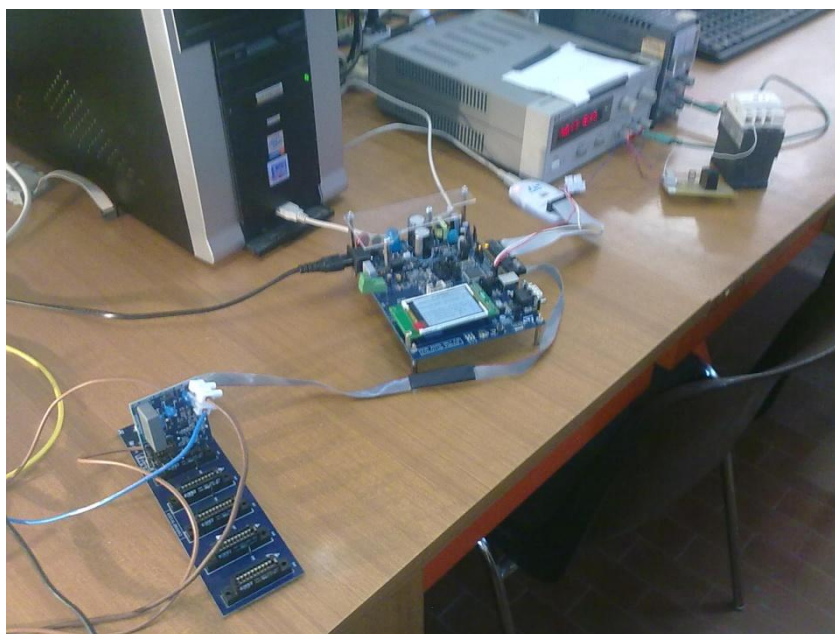


Fig. 4.14 – Sistema realizzato per la verifica, in laboratorio, del funzionamento del DDI realizzato.



Fig. 4.15 – Particolare del display realizzato che visualizza la tensione, la corrente e la frequenza ed il rispetto delle soglie previste.

4.2.3. Risultati delle prove

4.2.3.1. Convertitore #2

PROVA 1: MISURA TENSIONE DC-LINK A PIENO CARICO (100%)

La misura della tensione del DC-Link a pieno carico (100%) è indice della capacità della sorgente di alimentazione a monte di mantenere stabile detta tensione al variare della potenza assorbita dall'inverter. Tale misura è stata eseguita mediante un multimetro digitale sia in modalità grid-connected che in modalità stand-alone.

Si è riscontrato un valore di 795V (figura 4.16) in modalità grid-connected e di 791V (figura 4.17) in modalità stand-alone, con uno scarto quindi di circa lo 0,6% rispetto al valore di 800 V.



Fig. 4.16 – Particolare del multimetro digitale riportante il valore di tensione misurato in modalità grid-connected.



Fig. 4.17 – Particolare del multimetro digitale riportante il valore di tensione misurato in modalità stand-alone.

PROVA 2: MISURA E VERIFICA TENSIONE DI USCITA.

La misura della tensione d’uscita è di fondamentale importanza in quanto consente di valutare se la forma d’onda in uscita è quella desiderata. Si precisa che il valore della tensione in uscita deve essere lo stesso in presenza di carico oppure a vuoto. Detta misura viene eseguita sia con un analizzatore di rete che con un oscilloscopio. La figura 4.18 mostra le schermate dei due strumenti dalle quali è evidente l’esito positivo della prova (valore delle tensioni sulle tre fasi pari a 230V e forme d’onda delle tensioni di fase perfettamente sinusoidali).

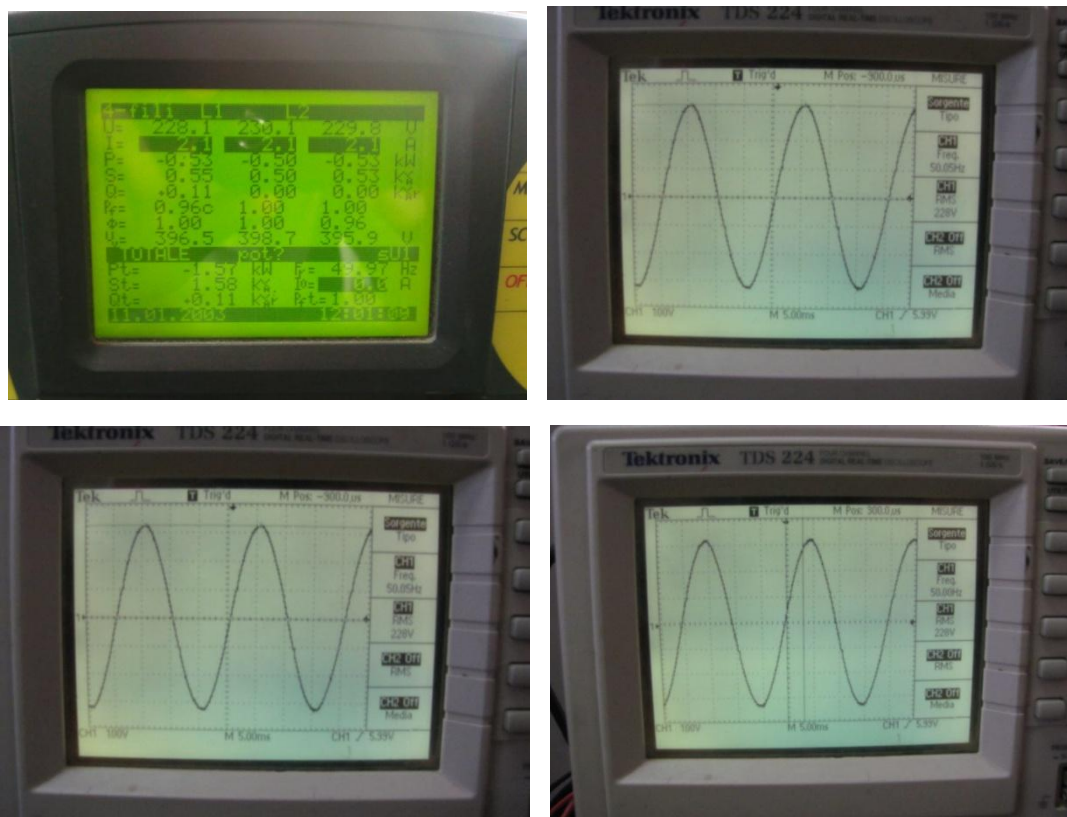


Fig. 4.18 – Schermate dell’analizzatore di rete e dell’oscilloscopio.

PROVA 3: MISURA E VERIFICA DELLA FREQUENZA DI USCITA

La misura della frequenza d'uscita riveste un ruolo fondamentale. In figura 4.19 sono riportate le schermate dell'oscilloscopio utilizzato per la prova, dalle quali si evince come la frequenza misurata risulti pari a 50,00Hz su tutte e tre le fasi.

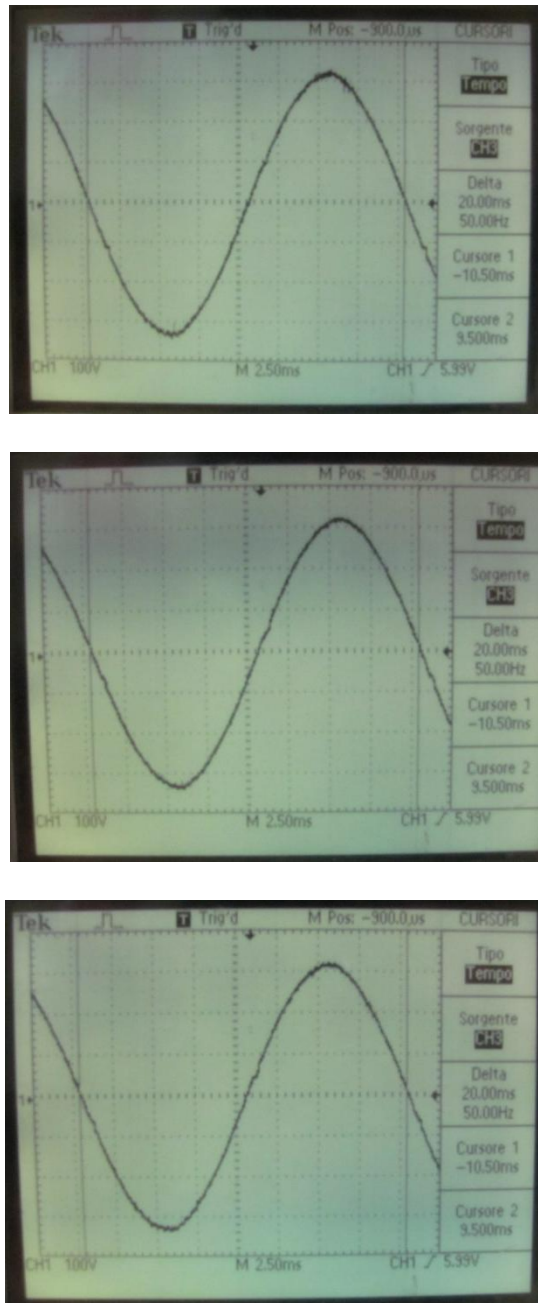


Fig. 4.19 – Schermate dell'oscilloscopio.

PROVA 4: VERIFICA DELLE CONDIZIONI OPERATIVE A CARICO LINEARE (RESISTIVO)

Il test consente di verificare le condizioni operative in presenza di carico lineare di natura resistiva. Per condizioni operative s'intende l'insieme dei parametri di funzionamento vitali del convertitore, quindi la

correttezza dei segnali di gestione e/o comando da parte della scheda di controllo. Le schermate dell'analizzatore di rete e dell'oscilloscopio riportate in figura 4.20 mostrano la massima potenza raggiunta (19,77kW), e come le correnti erogate siano perfettamente in fase con le tensioni (rispettivamente per ogni fase).

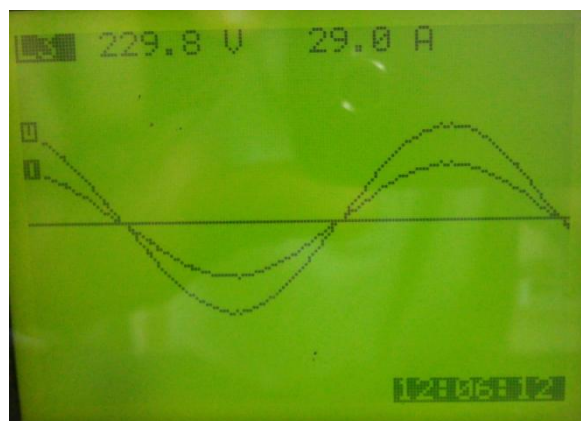
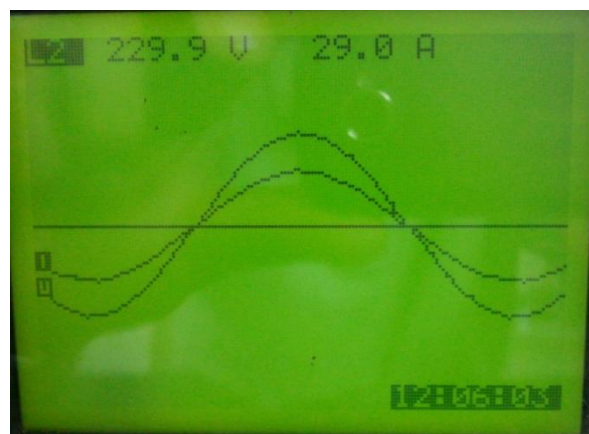
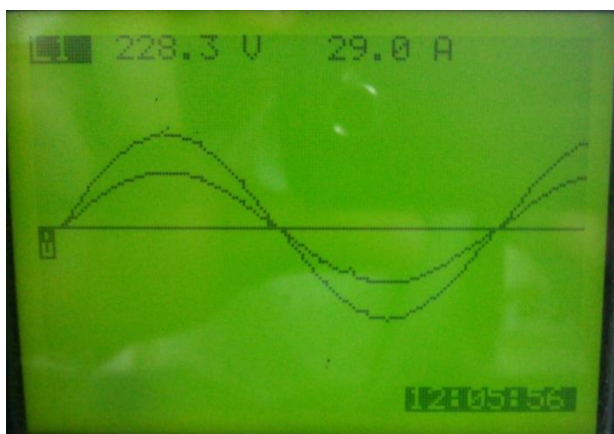


Fig. 4.20 – Schermate dell'analizzatore di rete e dell'oscilloscopio.

PROVA 5: VERIFICA DELLE CONDIZIONI OPERATIVE A CARICO DISTORCENTE

Il test consente di verificare le condizioni operative del dispositivo alimentante un carico distorto.

La prova è stata eseguita in accordo con la norma CEI 0-21, ovvero collegando all'uscita dell'apparecchiatura un ponte raddrizzatore trifase avente come carico dei condensatori in parallelo ad un carico resistivo. Le forme d'onda ed i parametri misurati sono riportati in figura 4.21.

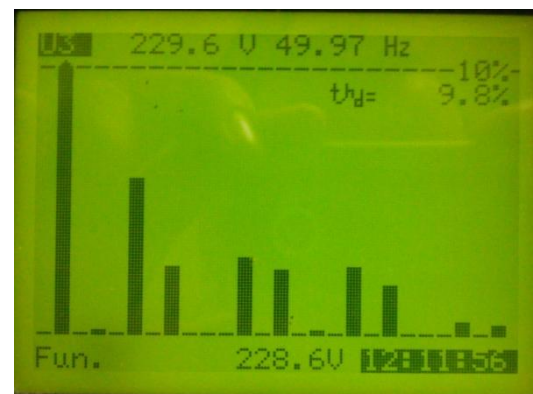
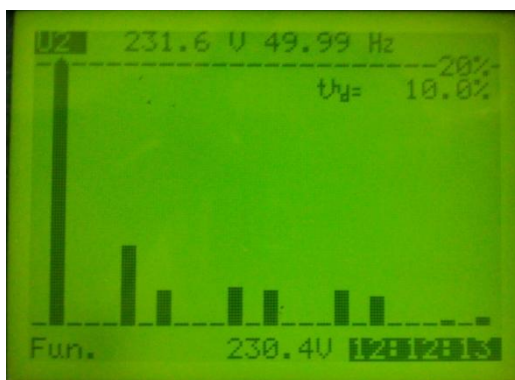
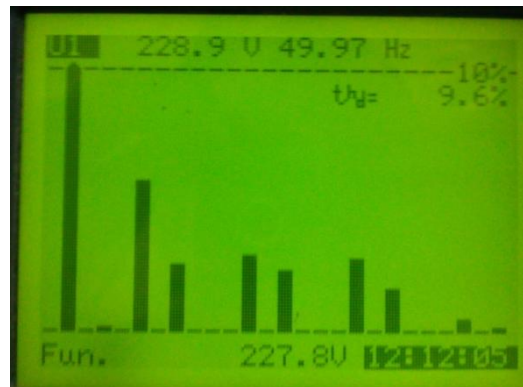
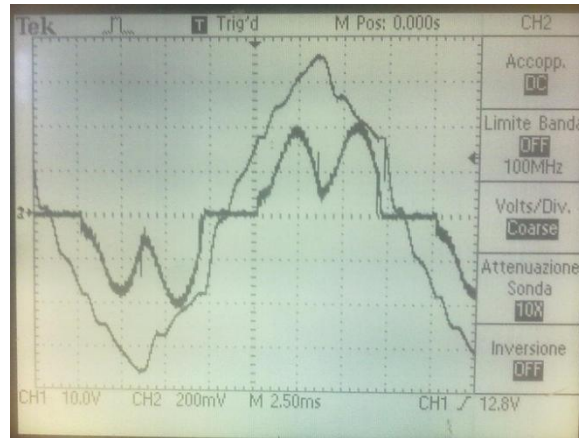


Fig. 4.21 – Schermate dell'analizzatore di rete e dell'oscilloscopio.

PROVA 6: VERIFICA DELLE CONDIZIONI OPERATIVE A $\cos \varphi \neq 1$

Il test consente di verificare le condizioni operative del dispositivo alimentante un carico attivo e reattivo. In particolare, le condizioni di prova mostrate in figura 4.22 si riferiscono all'alimentazione di un carico ohmico-capacitivo. La prova eseguita ha permesso di verificare il corretto funzionamento del dispositivo nell'alimentazione di questa tipologia di carichi.

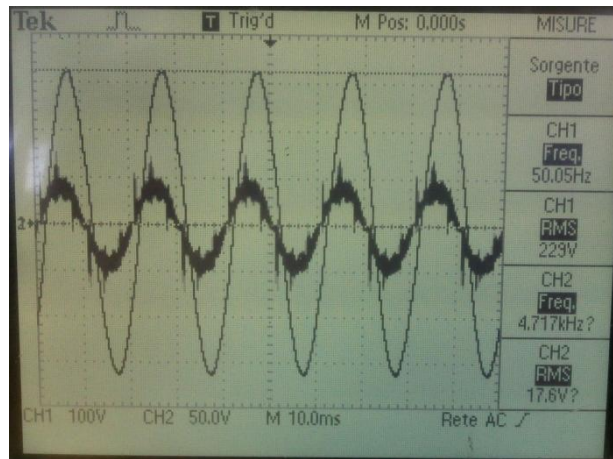
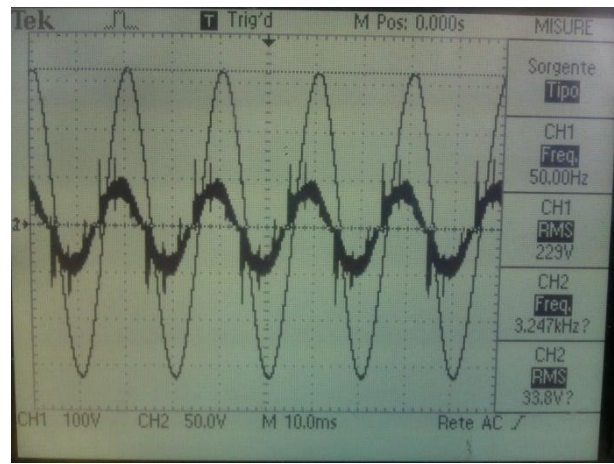
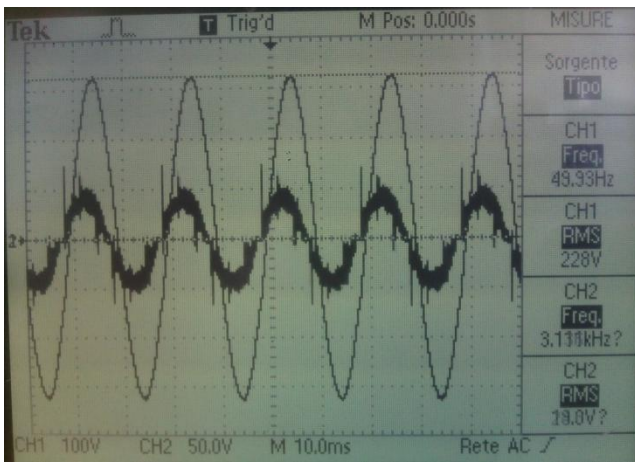


Fig. 4.22 – Schermate dell'analizzatore di rete e dell'oscilloscopio.

PROVA 7: MISURA DEL THD DELLA TENSIONE DI USCITA

Questa misura serve a valutare il tasso di distorsione armonica iniettato sulla rete. E' assolutamente importante ottenere valori di THD (total harmonic distorsion) contenuti al fine di rispettare i requisiti di qualità imposti dalla Norma CEI EN 50160 [4] e dal gestore della rete pubblica. Nelle figure 4.23 e 4.24 sono riportati i valori di THD misurati, rispettivamente, nel funzionamento grid-connected ed in quello stand-alone.

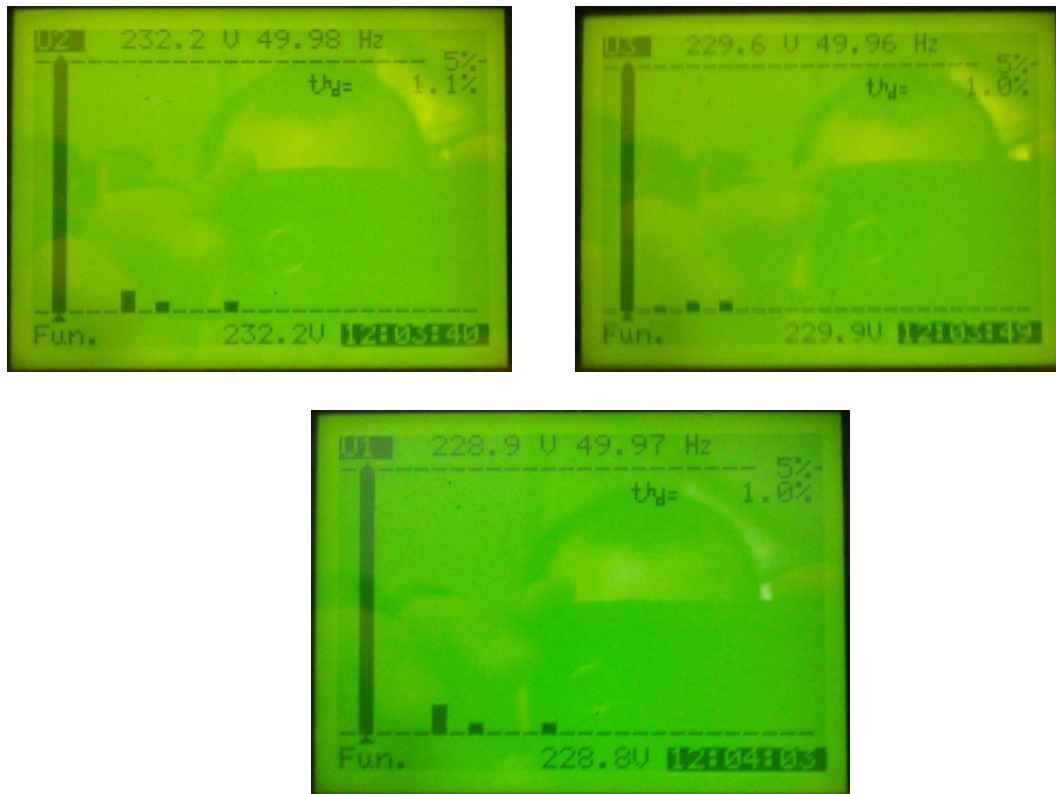


Fig. 4.23 – Schermata riportante i valori di THD misurati in modalità grid-connected.

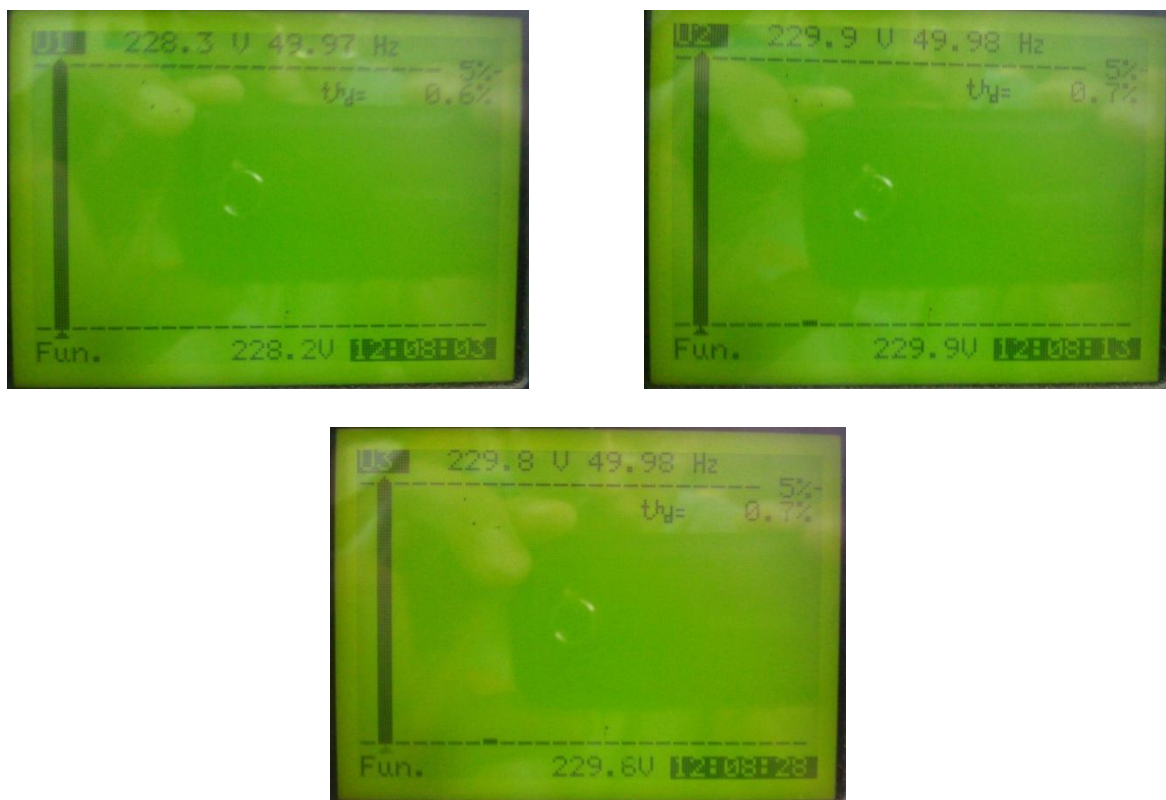


Fig. 4.24 – Schermata riportante i valori di THD misurati in modalità stand-alone.

La misura effettuata evidenzia dei valori di THD prossimi o inferiore all'unità sulla terna delle tensioni d'uscita. Tale valore è pienamente entro i limiti imposti da [4].

PROVA 8: VERIFICA DELLA TEMPERATURA DEL DISSIPATORE

Il valore della temperatura del dissipatore è un indice del corretto raffreddamento dell'apparecchiatura. La misura si svolge portando il dispositivo dallo stato di riposo a quello di pieno carico e mantenendolo in questo stato per 2 ore. Si effettua, quindi, la misura della temperatura del dissipatore servendosi dell'ausilio di un termometro ad infrarossi. La misura è stata ripetuta in due diverse giornate con il dispositivo funzionante in modalità grid-connected (figura 4.25) ed in modalità stand-alone (figura 4.26).

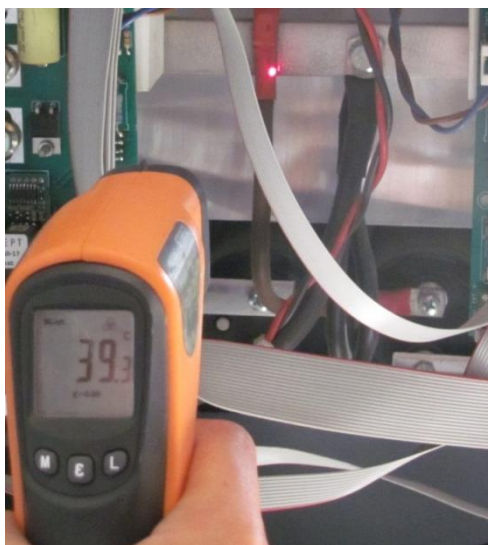


Fig. 4.25 – Schermata del termometro a infrarossi riportante il valore misurato della temperatura del dissipatore con dispositivo in modalità grid-connected.



Fig. 4.26 – Schermata del termometro a infrarossi riportante il valore misurato della temperatura del dissipatore con dispositivo in modalità stand-alone.

Si sono riscontrate, in entrambi i casi, temperature di pochi gradi superiori alla temperatura dell'ambiente di installazione e quindi pienamente accettabile.

PROVA 9: VERIFICA DELLA TEMPERATURA INTERNA DOPO 2 h A PIENO CARICO

Il test seguente è analogo al primo con la sola differenza che la temperatura rilevata non è quella del dissipatore ma quella interna all'apparecchiatura. I risultati delle misure sono mostrati nelle figura 4.27 e 4.28 e sono relative al dispositivo funzionante in modalità grid-connected ed in modalità stand-alone, rispettivamente.



Fig. 4.27 – Schermata del termometro a infrarossi riportante il valore misurato della temperatura interna con dispositivo in modalità grid-connected.

Si è riscontrata una temperatura di 31,4°C, valore di pochi gradi superiore alla temperatura dell'ambiente di installazione e quindi pienamente accettabile.



Fig. 4.28 – Schermata del termometro a infrarossi riportante il valore misurato della temperatura interna con dispositivo in modalità stand-alone.

Si è riscontrata una temperatura di 30,7°C, valore di pochi gradi superiore alla temperatura dell'ambiente di installazione e quindi pienamente accettabile.

PROVA 10: MISURA DEL $\cos\phi$ LATO RETE E VERIFICA DELLE PRESTAZIONI COME COMPENSATORE REATTIVO

Questa misura consente di verificare l'assorbimento sinusoidale (a differenza dei normali raddrizzatori), del dispositivo, anche quando si trova ad alimentare un carico con elevato tasso armonico. La prova ha dato esito positivo (figura 4.29).

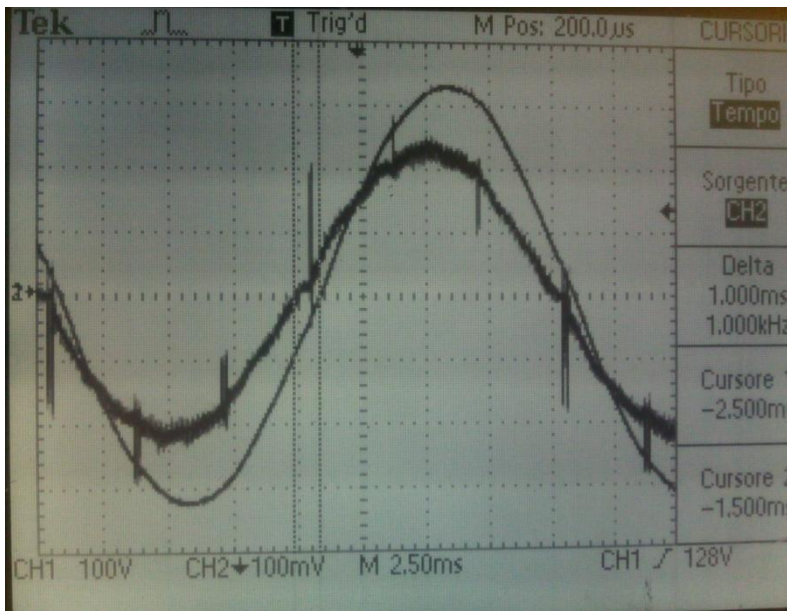


Fig. 4.29 – Schermata dell’oscilloscopio.

PROVA 11: MISURA DELLA TENSIONE NOMINALE DI DC-LINK A PIENO CARICO (100%)

Questa misura consente di verificare il corretto valore della tensione di uscita, quando al convertitore "under-test" è applicato il 100% del carico, ovvero quando il convertitore #1 si trova ad erogare la massima potenza. Il valore misurato (servendosi di un multimetro digitale) è di 796V, il quale si ritiene pienamente accettabile (figura 4.30).



Fig. 4.30 – Particolare del multimetro digitale riportante il valore di tensione misurato.

PROVA 12: VERIFICA DELLA TENSIONE DI RIPPLE DEL DC-LINK

Tale test svolge un ruolo di primaria importanza in quanto il valore della tensione di ripple deve essere piuttosto contenuto pena la possibilità di arrecare dei danni alle apparecchiature collegate al dispositivo (convertitore #1 alla massima potenza nel caso in esame). In figura 4.31 è mostrato l'esito della prova effettuata con un oscilloscopio.

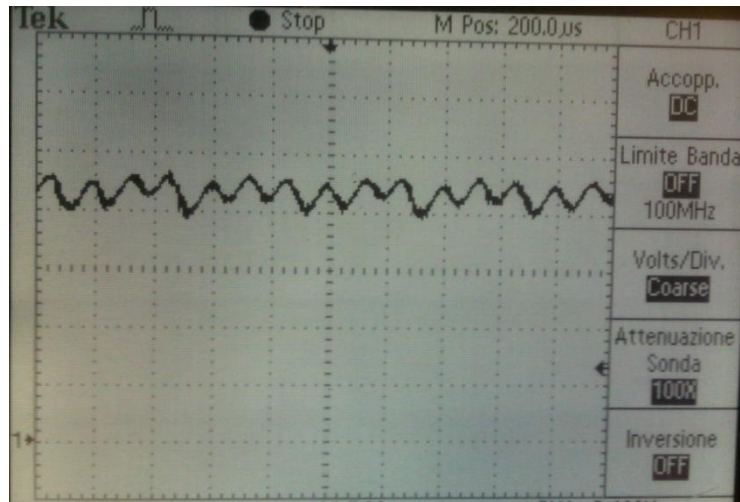


Fig. 4.31 – Schermata dell'oscilloscopio.

4.2.3.2. Convertitore #1

PROVA 1: MISURA DELLA TENSIONE DI BATTERIA (A VUOTO)

La misura della tensione di batteria è stata eseguita a vuoto con il convertitore funzionante in modalità step-up. Il test è necessario al fine di valutare il corretto range di tensione d'ingresso (del pacco batterie) accertandosi del corretto collegamento. Avendo utilizzato per la prova 33 batterie connesse in serie, è accettabile una tensione compresa tra 390V e 410V. Il risultato della misura è stato di 396,9V (figura 4.32).



Fig. 4.32 – Particolare del multimetro digitale riportante il valore di tensione misurato.

PROVA 2: MISURA TENSIONE DI BATTERIA (IN CARICA)

Il test è stato eseguito con il convertitore funzionante in modalità step-down riversando energia sul pacco batterie (appositamente scaricato a priori). La misura consiste nel verificare il corretto valore della tensione di carica del pacco batterie. Tale valore è risultato pari a 436,1V (figura 4.33).



Fig. 4.33 – Particolare del multimetro digitale riportante il valore di tensione misurato.

PROVA 3: MISURA DELLA TENSIONE DI DC-LINK A VUOTO.

La misura consente di verificare il corretto valore della tensione del dc-link nel convertitore. Tale misura è fondamentale al fine di salvaguardare eventuali convertitori o apparecchiature collegati come carico al convertitore "under test". Il valore misurato, pari a 809V, è poco più dell'1% al di sopra della tensione nominale del dc-link e quindi pienamente accettabile.



Fig. 4.34 – Particolare del multimetro digitale riportante il valore di tensione misurato.

PROVA 4: MISURA DELLA TENSIONE NOMINALE DI DC-LINK A PIENO CARICO (100%).

Il test consiste nel misurare la tensione del dc-link quando il dispositivo è connesso ad un carico che permetta al convertitore di erogare il 100% della potenza nominale. E' fondamentale che in dette condizioni il valore di tale tensione rimanga all'interno di un range prestabilito, essendo questo un importante indice della capacità del convertitore di stabilizzare la tensione del dc-link al variare del carico.

Il valore misurato è pari a 791V nel funzionamento step-up (figura 4.35), e 794V nel funzionamento step-down (figura 4.36). Tra la condizione di funzionamento a vuoto e a pieno carico si è misurata quindi una differenza di tensione massima pari al 2,2% della tensione nominale del dc-link e quindi pienamente accettabile.



Fig. 4.35 – Particolare del multimetro digitale riportante il valore di tensione misurato in modalità step-up.



Fig. 4.36 – Particolare del multimetro digitale riportante il valore di tensione misurato in modalità step-down.

5. Conclusioni

Nel presente documento sono stati presentati i risultati della seconda fase delle attività svolte nell'ambito della ricerca dal titolo: *“Progettazione, realizzazione e test di un sistema di controllo ed interfaccia per sistemi combinati accumulo-FER.*

In particolare:

- è stato mostrato e commentato lo schema elettrico esecutivo del dispositivo realizzato;
- è stato mostrato il prototipo nel suo insieme e nelle singole parti;
- sono stati presentati i risultati della fase di test in laboratorio del dispositivo ed in ambiente simulato dell'algoritmo di controllo.

I risultati dei test effettuati hanno confermato le prestazioni attese.

Ulteriori sviluppi della fase di messa a punto e verifica potranno essere condotti non appena il sistema di accumulo previsto nel progetto (batterie al Litio) sarà fisicamente disponibile.

Riferimenti bibliografici

1. A. Cataliotti, M.G. Ippolito, E. Telaretti, G. Zizzo, M. Conte, G. Graditi, M. Pasquali, “Progettazione di un sistema di controllo ed interfaccia per sistemi combinati accumulo-FER”, Settembre 2012, RdS/2012/248.
2. European Commission - <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/#content> - JRC's Institute for Energy and Transport – PV-GIS
3. GME – Gestore del Mercato Elettrico - <http://www.mercatoelettrico.org/It/Default.aspx>.
4. Norma CEI EN 50160: Caratteristiche della tensione fornita dalle reti pubbliche di distribuzione dell'energia elettrica.

Abbreviazioni ed acronimi

AC: Alternative current

BT: Bassa Tensione

CEI: Comitato Elettrotecnico Italiano

DC: Direct Current

DDI: Dispositivo di Interfaccia

DG: Dispositivo Generale

FER: Fonti energetiche rinnovabili

FV: Fotovoltaico

GD: Generazione Distribuita

IGBT: Insulated Gated Bipolar Transistor

MT: Media Tensione

PLC: Power Line Communication

PWM: Pulse Width Modulation

SPI: Sistema di protezione di interfaccia

Curriculum Vitae del Gruppo di Ricerca

Mariano Giuseppe Ippolito (1965) è laureato in Ingegneria Elettrica all'Università di Palermo, presso la quale ha conseguito nel 1994 il titolo di Dottore di Ricerca in Ingegneria Elettrica. Dal 1995 al 2001 ha lavorato presso il DIEETCAM come Ricercatore. Attualmente è Professore Associato alla Facoltà di Ingegneria dell'Università di Palermo.

I suoi principali interessi di ricerca riguardano l'analisi dei sistemi elettrici di potenza, l'ottimizzazione della pianificazione, della progettazione e del controllo delle reti di distribuzione e la power quality.

Negli ultimi anni la sua attività di ricerca ha riguardato l'integrazione dei sistemi di produzione da FER e dei sistemi di accumulo nelle reti elettriche e nelle Smart Grids. In questi campi ha pubblicato più di 100 articoli tra atti di convegni e riviste scientifiche nazionali ed internazionali.

Enrico Telaretti (1975) è laureato in Ingegneria Elettrica all'Università di Palermo, presso la quale ha conseguito nel 2008 il titolo di Dottore di Ricerca in Ingegneria Elettrica. Dal 2008 lavora presso il DIEETCAM come assegnista di ricerca. E' stato membro dell'AEIT.

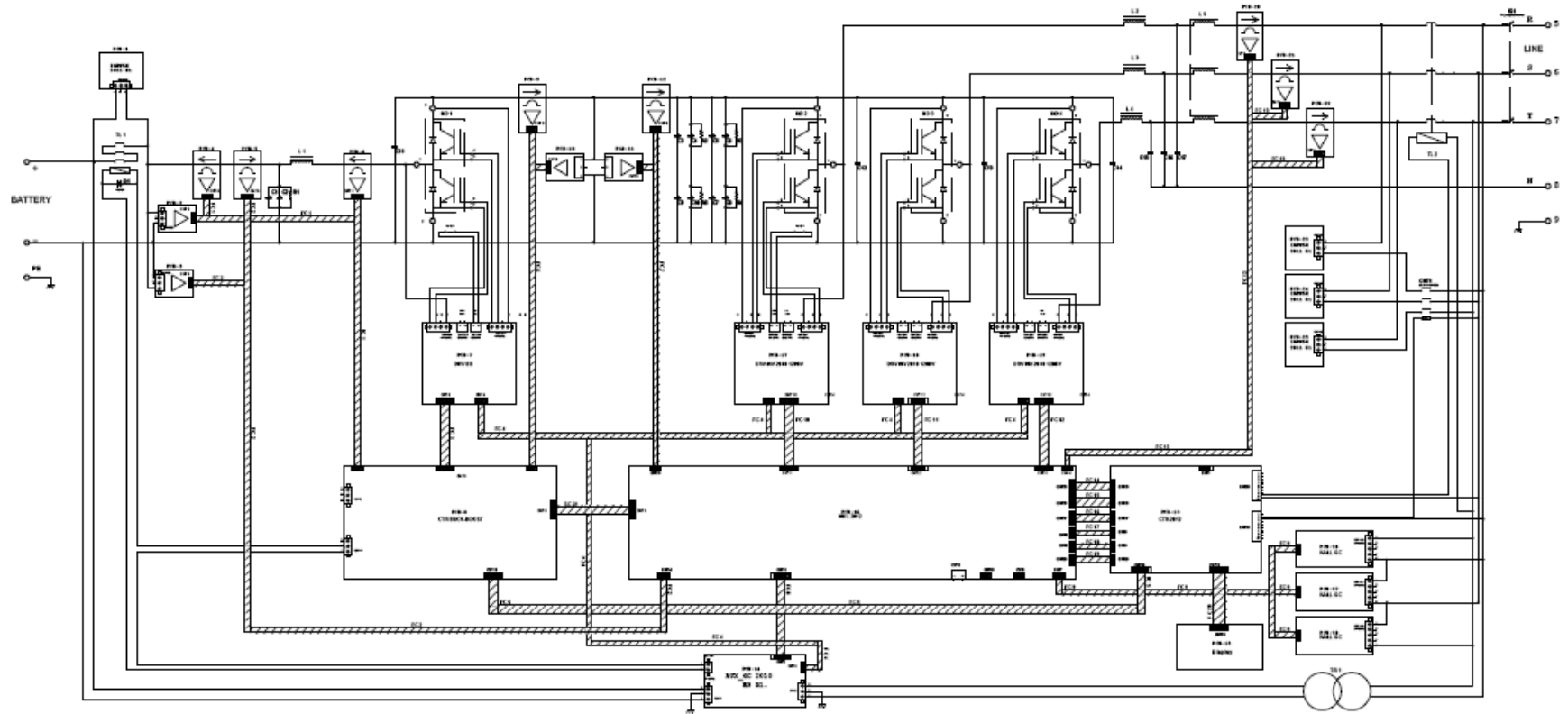
I suoi principali interessi di ricerca sono nel campo dell'analisi dei sistemi elettrici di potenza, dello studio dei guasti nelle reti di distribuzione, della generazione distribuita e del suo impatto sulle reti. Negli ultimi anni si è occupato dell'integrazione dei sistemi di produzione da FER e dei sistemi di accumulo nelle reti elettriche e nelle Smart Grids. E' autore di numerosi articoli pubblicati su riviste e su proceedings di convegni internazionali.

Gaetano Zizzo (1976) è laureato in Ingegneria Elettrica all'Università di Palermo, presso la quale ha conseguito nel 2007 il titolo di Dottore di Ricerca in Ingegneria Elettrica. Dal 2007 lavora presso il DIEETCAM come assegnista di ricerca. Dal 2012 è Ricercatore nel settore Sistemi Elettrici per l'Energia presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università di Palermo.

I suoi principali interessi di ricerca riguardano l'analisi dei sistemi elettrici di potenza, la sicurezza elettrica nelle reti MT e AT, gli impianti di terra globali, la diagnostica nelle reti di distribuzione e trasmissione, il fotovoltaico e la generazione distribuita in genere, le politiche di incentivazione di impianti da FER e le applicazioni della domotica e della building automation. E' autore di numerosi articoli pubblicati su riviste e su proceedings di convegni nazionali ed internazionali.

Appendice 1

SCHEMA ELETTRICO ESECUTIVO



Appendice 2
DATA-SHEET DEI COMPONENTI UTILIZZATI

Current Transducer LA 100-P

For the electronic measurement of currents : DC, AC, pulsed...,
with a galvanic isolation between the primary circuit (high power)
and the secondary circuit (electronic circuit).

$$I_{PN} = 100 \text{ A}$$



Electrical data						
I_{PN}	Primary nominal r.m.s. current	100	A			
I_{Pr}	Primary current, measuring range	0 .. ±150	A			
R_{iA}	Measuring resistance @	$T_A = 70^\circ\text{C}$	$T_A = 85^\circ\text{C}$			
		$R_{iA \text{ min}}$ $R_{iA \text{ max}}$	$R_{iA \text{ min}}$ $R_{iA \text{ max}}$			
		with ±12 V	@ ±100 A _{max}	0 50	0 42	Ω
		@ ±120 A _{max}	0 22	0 14	Ω	
with ±15 V	@ ±100 A _{max}	0 110	20 102	Ω		
@ ±150 A _{max}	0 33	20 25	Ω			
I_{sN}	Secondary nominal r.m.s. current	50	mA			
K_{sN}	Conversion ratio	1 : 2000				
V_C	Supply voltage (±5 %)	±12 .. 15	V			
I_C	Current consumption	10 (@ ±15 V) + I_0	mA			
V_d	R.m.s. voltage for AC isolation test, 50 Hz, 1 min	2.5	kV			

Features

- Closed loop (compensated) current transducer using the Hall effect
- Printed circuit board mounting
- Insulated plastic case recognized according to UL 94-V0.

Advantages

- Excellent accuracy
- Very good linearity
- Low temperature drift
- Optimized response time
- Wide frequency bandwidth
- No insertion losses
- High immunity to external interference
- Current overload capability.

Accuracy - Dynamic performance data			
X	Accuracy @ I_{Pr} , $T_A = 25^\circ\text{C}$	@ ±15 V (±5 %)	±0.45 %
		@ ±12 .. 15 V (±5 %)	±0.70 %
\mathcal{E}_L	Linearity		< 0.15 %
I_0	Offset current @ $I_P = 0$, $T_A = 25^\circ\text{C}$	Typ	±0.10 mA
		Max	±0.15 mA
I_{out}	Residual current ¹⁾ @ $I_P = 0$, after an overload of $3 \times I_{Pr}$		±0.25 mA
I_{dr}	Thermal drift of I_0	-25°C .. +85°C	±0.05 mA
		-40°C .. -25°C	±0.10 mA
t_{sr}	Reaction time @ 10 % of I_{Pr}	< 500	ns
t_r	Response time ²⁾ @ 90 % of I_{Pr}	< 1	µs
d/dt	d/dt accurately followed	> 200	A/µs
f	Frequency bandwidth (-1dB)	DC .. 200	kHz

Applications

- AC variable speed drives and servo motor drives
- Static converters for DC motor drives
- Battery supplied applications
- Uninterruptible Power Supplies (UPS)
- Switched Mode Power Supplies (SMPS)
- Power supplies for welding applications.

General data			
T_A	Ambient operating temperature	-40 .. +85	°C
T_S	Ambient storage temperature	-50 .. +95	°C
R_s	Secondary coil resistance @	$T_A = 70^\circ\text{C}$	120
		$T_A = 85^\circ\text{C}$	128
m	Mass	18	g
	Standards ³⁾	EN 50178 (57-1001)	

Notes : ¹⁾ The result of the coercive field of the magnetic circuit
²⁾ With a d/dt of 100 A/µs
³⁾ A list of corresponding tests is available.

030819/7

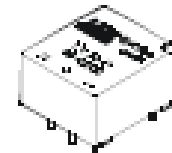


Voltage Transducer LV 20-P

For the electronic measurement of voltages : DC, AC, pulsed..., with a galvanic isolation between the primary circuit (high voltage) and the secondary circuit (electronic circuit).

$$I_{PN} = 10 \text{ mA}$$

$$V_{PN} = 10 \dots 500 \text{ V}$$



Electrical data

I_{PN}	Primary nominal r.m.s. current	10	mA		
I_P	Primary current, measuring range	0 .. ± 14	mA		
R_{sP}	Measuring resistance	R_{sPmin}	R_{sPmax}		
				with ± 12 V	@ ± 10 mA _{max}
		@ ± 14 mA _{max}	30	100	Ω
	with ± 15 V	@ ± 10 mA _{max}	100	350	Ω
	@ ± 14 mA _{max}	100	190	Ω	
I_{sN}	Secondary nominal r.m.s. current	25	mA		
K_{sN}	Conversion ratio	2500 : 1000			
V_C	Supply voltage (± 5 %)	± 12 .. 15	V		
I_C	Current consumption	10 (@ ± 15 V) + I_{sN}	mA		
V_d	R.m.s. voltage for AC isolation test ¹⁾ , 50 Hz, 1 mm	2.5	kV		

Features

- Closed loop (compensated) voltage transducer using the Hall effect
- Insulated plastic case recognized according to UL 94-V0
- Optimized.

Principle of use

- For voltage measurements, a current proportional to the measured voltage must be passed through an external resistor R_i , which is selected by the user and installed in series with the primary circuit of the transducer.

Accuracy - Dynamic performance data

X_{sP}	Overall Accuracy @ I_{sN} , $T_A = 25^\circ\text{C}$	@ ± 12 .. 15 V	± 1.1	%	
		@ ± 15 V (± 5 %)	± 1.0	%	
ϵ_L	Linearity		< 0.2	%	
I_o	Offset current @ $I_P = 0$, $T_A = 25^\circ\text{C}$	Typ	Max	mA	
I_{dr}	Thermal drift of I_o	0°C .. + 25°C	± 0.10	± 0.30	mA
		+ 25°C .. + 70°C	± 0.14	± 0.40	mA
t_r	Response time ²⁾ @ 90 % of V_{Pmax}	40		µs	

Advantages

- Excellent accuracy
- Very good linearity
- Low thermal drift
- Low response time
- High bandwidth
- High immunity to external interference
- Low disturbance in common mode.

General data

T_A	Ambient operating temperature	0 .. + 70	°C
T_S	Ambient storage temperature	- 25 .. + 85	°C
R_p	Primary coil resistance @ $T_A = 70^\circ\text{C}$	250	Ω
R_s	Secondary coil resistance @ $T_A = 70^\circ\text{C}$	110	Ω
m	Mass	22	g
	Standards ³⁾	EN 50178	

Applications

- AC variable speed drives and servo motor drives
- Static converters for DC motor drives
- Battery supplied applications
- Uninterruptible Power Supplies (UPS)
- Power supplies for welding applications.

Notes : ¹⁾ Between primary and secondary
²⁾ $R_i = 25 \text{ k}\Omega$ (LIR constant, produced by the resistance and inductance of the primary circuit)
³⁾ A list of corresponding tests is available

010802/0

SKM 100GB128D



SEMITRANSTM 2

SPT IGBT Module

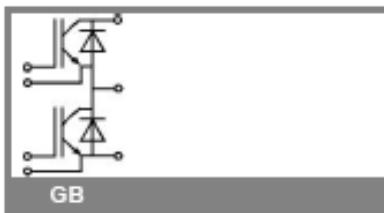
SKM 100GB128D

Features

- Homogeneous Si
- SPT = Soft-Punch-Through technology
- V_{CEsat} with positive temperature coefficient
- High short circuit capability, self limiting to $6 \times I_C$

Typical Applications

- AC inverter drives
- UPS
- Electronic welders at f_{sw} up to 20 kHz



Absolute Maximum Ratings		$T_c = 25^\circ\text{C}$, unless otherwise specified	
Symbol	Conditions	Values	Units
IGBT			
V_{CES}		1200	V
I_C	$T_c = 25 (80)^\circ\text{C}$	145 (106)	A
I_{CRM}	$t_p = 1 \text{ ms}$	150	A
V_{OES}		± 20	V
T_{vj} (T_{stg})	$T_{OPERATION} \leq T_{stg}$	- 40 ... + 150 (126)	$^\circ\text{C}$
V_{isol}	AC, 1 min.	4000	V
Inverse diode			
I_F	$T_c = 25 (80)^\circ\text{C}$	95 (65)	A
I_{FRM}	$t_p = 1 \text{ ms}$	150	A
I_{FSM}	$t_p = 10 \text{ ms; sin; } T_j = 150^\circ\text{C}$	720	A

Characteristics		$T_c = 25^\circ\text{C}$, unless otherwise specified			
Symbol	Conditions	min.	typ.	max.	Units
IGBT					
$V_{GE(th)}$	$V_{GE} = V_{CE}; I_C = 3 \text{ mA}$	4,6	6,5	6,46	V
I_{CES}	$V_{GE} = 0, V_{CE} = V_{CES}; T_j = 25 (126)^\circ\text{C}$		0,1	0,3	mA
$V_{CE(TH)}$	$T_j = 25 (126)^\circ\text{C}$	1 (0,9)		1,16 (1,06)	V
r_{CE}	$V_{GE} = 15 \text{ V}, T_j = 25 (126)^\circ\text{C}$	13 (16)		16 (20)	m Ω
$V_{CE(sat)}$	$I_C = 75 \text{ A}, V_{GE} = 15 \text{ V}$, chip level	1,9 (2,1)		2,36 (2,66)	V
C_{oss}	under following conditions		6,2		nF
C_{oss}	$V_{GE} = 0, V_{CE} = 26 \text{ V}, f = 1 \text{ MHz}$		0,74		nF
C_{res}			0,71		nF
L_{CE}				30	nH
R_{GD+EB}	res., terminal-chip $T_c = 25 (126)^\circ\text{C}$		0,76 (1)		m Ω
$t_{d(on)}$	$V_{CE} = 600 \text{ V}, I_C = 75 \text{ A}$		176		ns
t_r	$R_{GD} = R_{GDoff} = 4,7 \Omega, T_j = 126^\circ\text{C}$		38		ns
$t_{d(off)}$	$V_{GE} = \pm 15 \text{ V}$		370		ns
t_f			66		ns
$E_{on} (E_{off})$			9 (7,6)		mJ
Inverse diode					
$V_F = V_{EO}$	$I_F = 75 \text{ A}; V_{GE} = 0 \text{ V}; T_j = 25 (126)^\circ\text{C}$		2 (1,8)	2,6	V
$V_{(TO)}$	$T_j = 25 (126)^\circ\text{C}$		1,06	1,3	V
r_T	$T_j = 25 (126)^\circ\text{C}$		13	16	m Ω
I_{FRM}	$I_F = 75 \text{ A}; T_j = 126 ()^\circ\text{C}$		88		A
Q_{rr}	$di/dt = 2600 \text{ A}/\mu\text{s}$		13		μC
E_{rr}	$V_{GE} = 0 \text{ V}$		3,9		mJ
Thermal characteristics					
$R_{th(j-c)}$	per IGBT			0,21	K/W
$R_{th(j-c)D}$	per Inverse Diode			0,6	K/W
$R_{th(c-a)}$	per module			0,06	K/W
Mechanical data					
M_b	to heatsink M6	3		6	Nm
M_t	to terminals M6	2,6		6	Nm
w				160	g

SKM 100GB128D

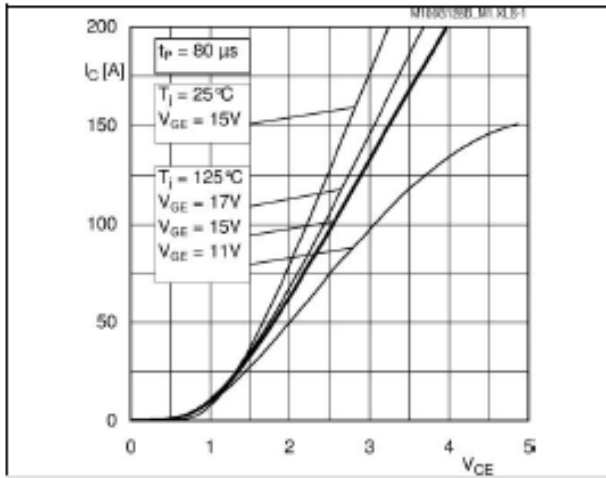


Fig. 1 Typ. output characteristic, inclusive R_{CC+EE}

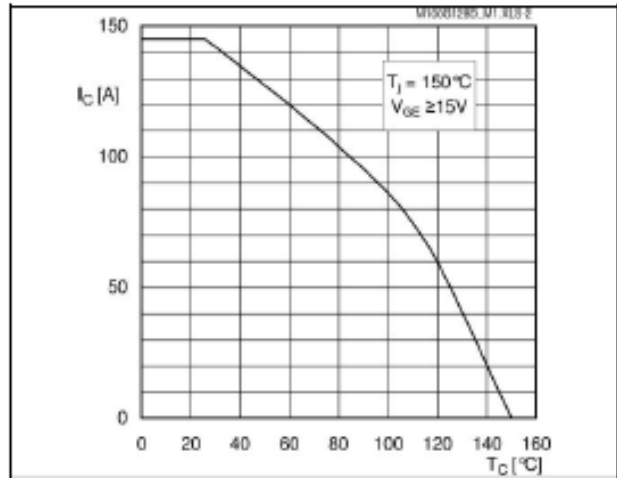


Fig. 2 Rated current vs. temperature $I_C = f(T_C)$

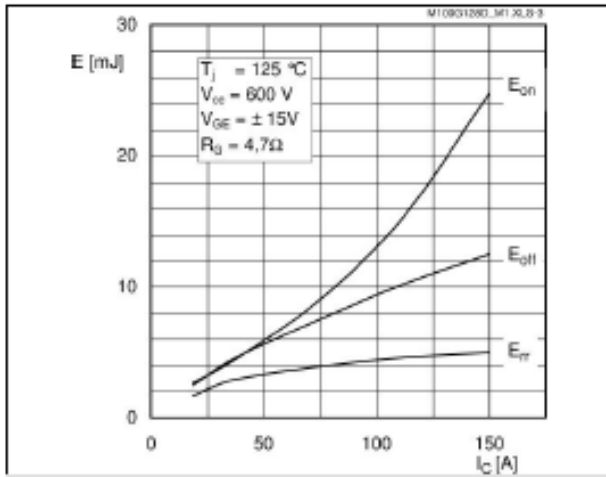


Fig. 3 Typ. turn-on /-off energy = $f(I_C)$

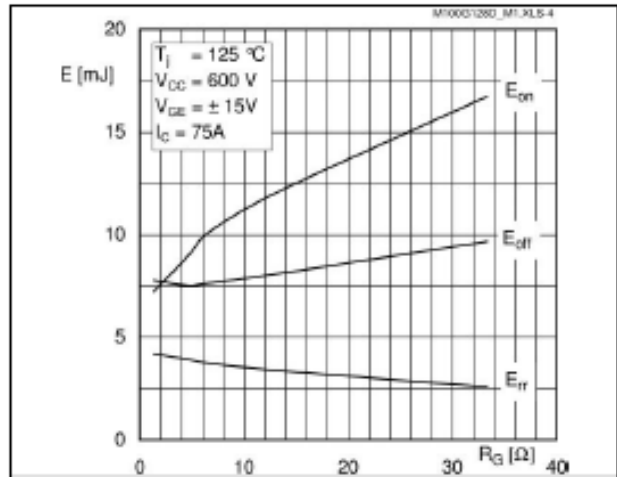


Fig. 4 Typ. turn-on /-off energy = $f(R_G)$

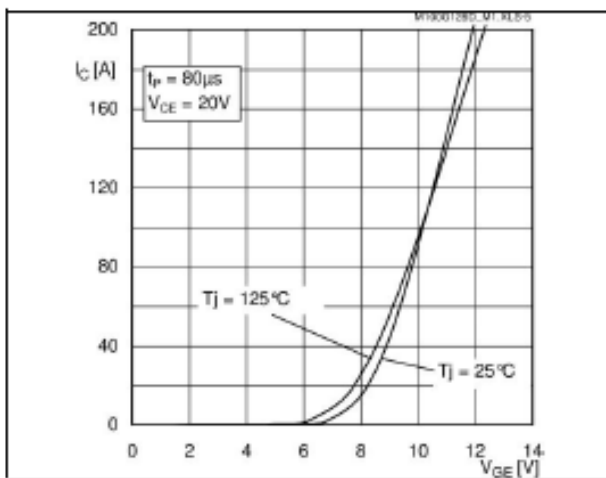


Fig. 5 Typ. transfer characteristic

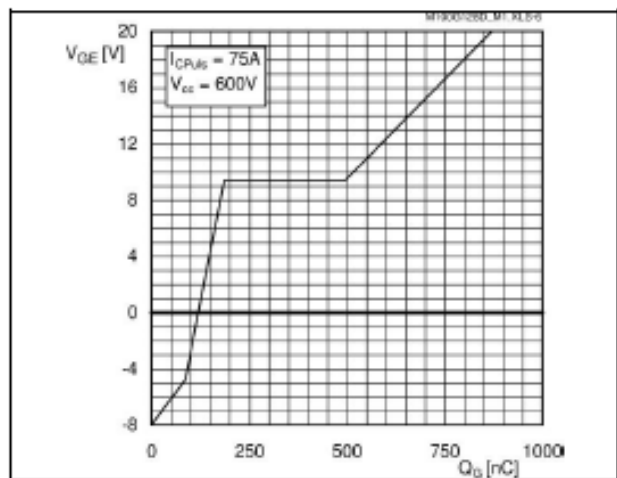


Fig. 6 Typ. gate charge characteristic

SKM 100GB128D

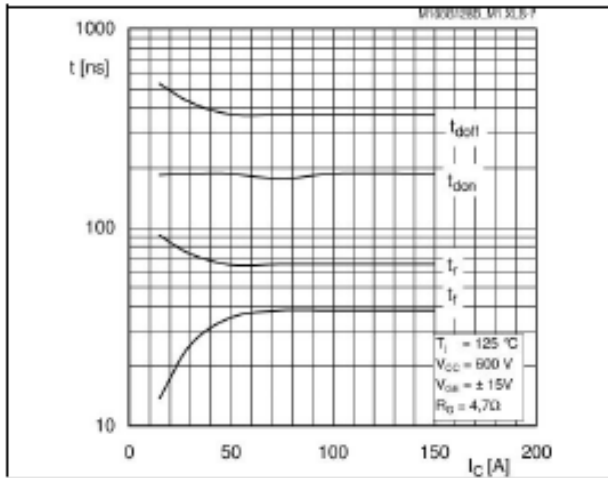


Fig. 7 Typ. switching times vs. I_C

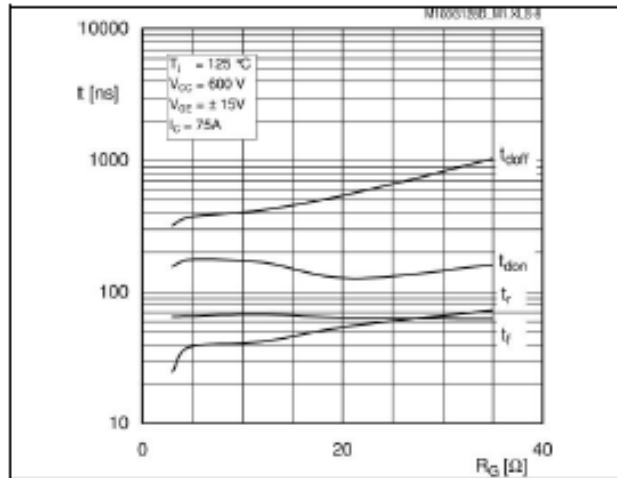


Fig. 8 Typ. switching times vs. gate resistor R_G

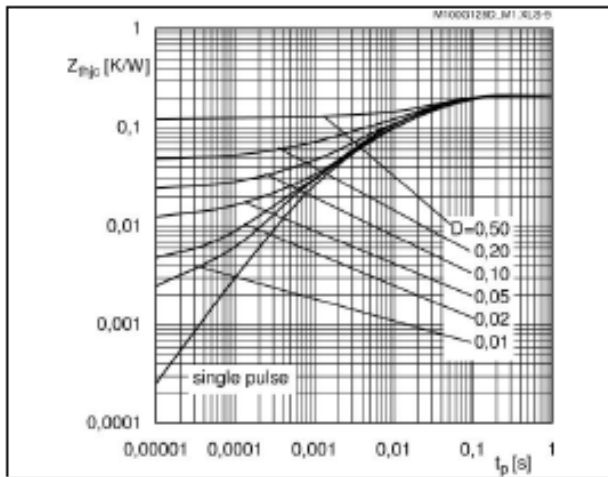


Fig. 9 Transient thermal impedance of IGBT

$$Z_{th(j-c)} = f(t_p); D = \frac{t_p}{t_c} = t_p \cdot f$$

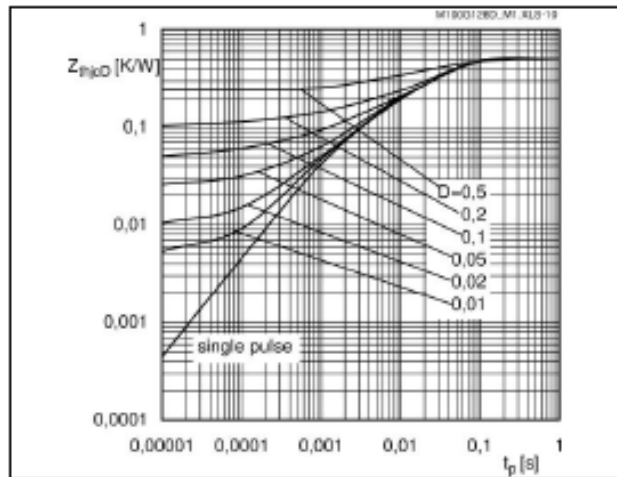


Fig. 10 Transient thermal impedance of FWD

$$Z_{th(j-c)} = f(t_p); D = \frac{t_p}{t_c} = t_p \cdot f$$

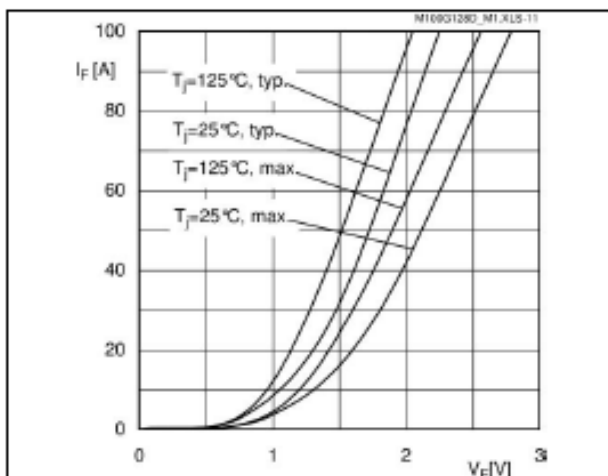


Fig. 11 CAL diode forward characteristic

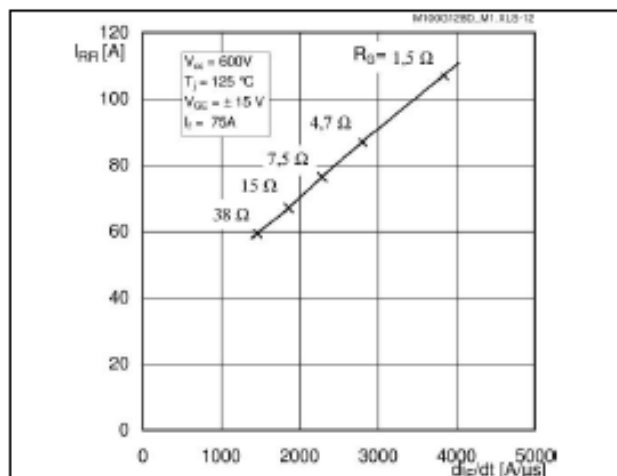


Fig. 12 Typ. CAL diode peak reverse recovery current

SKM 100GB128D

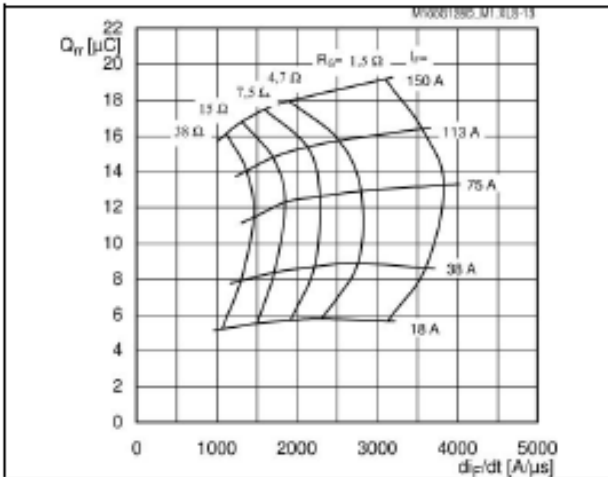
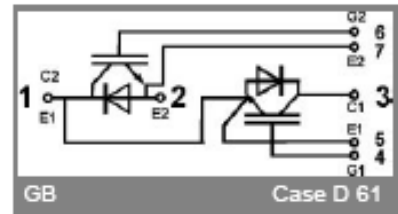
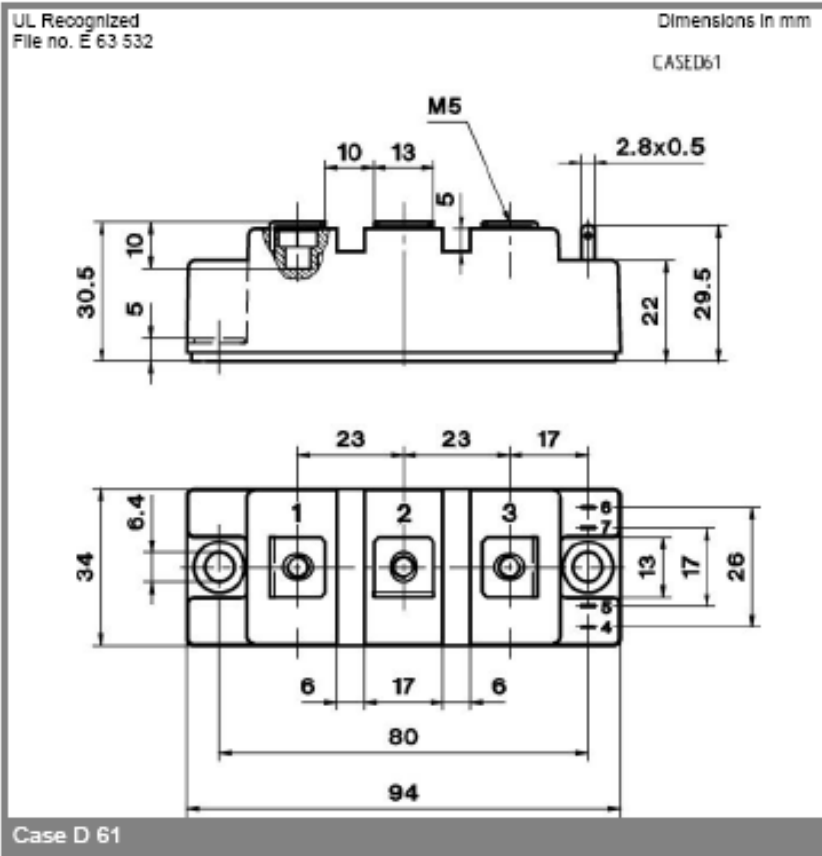


Fig. 13 Typ. CAL diode recovered charge



This is an electrostatic discharge sensitive device (ESDS), international standard IEC 60747-1, Chapter IX.

This technical information specifies semiconductor devices but promises no characteristics. No warranty or guarantee expressed or implied is made regarding delivery, performance or suitability.

PMB



Metallized polypropylene film capacitor MKP - Snubber capacitor

Main applications: Snubber, energy conversion and control in power semiconductor circuits, IGBT modules protection and SMPS protection circuits, high voltage, high current and high pulse applications

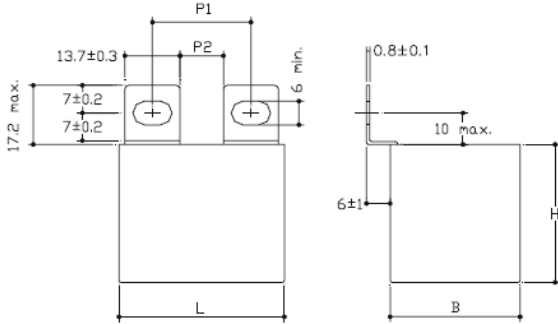


Dielectric	Polypropylene		
Electrodes	Vacuum deposited metal layers		
Coating	Solvent resistant plastic case with resin sealing. Flame retardant execution (UL 94 V-0)		
Construction	Extended double side metallized carrier film with internal series connection and metallized film (refer to general technical information)		
Leads	Tinned copper lugs for screw fixing or soldering on PCBs (please refer to article table)		
Degree of protection	IP00		
Installation	Whatever position assuring correct heat dissipation. Arrangement of many components with box walls in contact not admitted; suggested minimum distance between side by side elements $\geq 1/8$ of the box thickness.		
Reference standard	IEC 61071, IEC 60068		
Climatic category	40/85/56 (IEC 60068/1), GPD (DIN40040)		
Operating temperature range(case)	-40°...+85°C		
Max. permissible ambient temperature	+70°C (operation at rated power, rated current and natural cooling)		
Rated capacitance (Cr)	0,047 μ F to 5,6 μ F. Refer to article table		
Capacitance tolerance (at 1kHz)	$\pm 10\%$ (code=K), $\pm 5\%$ (code=J) and $\pm 20\%$ (code=M). Other tolerances upon request		
Capacitance temperature coefficient	Refer to graphs in general technical information		
Long term stability (at 1kHz)	Capacitance variation $\leq \pm 1\%$ after a period of 2 years at standard environmental conditions		
Rated voltage (Ur)	700, 850, 1000, 1200, 1500, 2000, 2500, 3000 Vdc		
Non Recurrent Surge Voltage (Upk)	1000, 1200, 1400, 1600, 2000, 2400, 3000, 3500 Vdc		
Self inductance	≤ 1 nH/mm of fixing pitch		
Maximum pulse rise time	Refer to article table		
Maximum peak current (Ipeak)	Refer to article table. Max. non repetitive Ipk = 1,5 x Ipeak		
Dissipation factor (DF), max.	(tg δ x 10 ⁻⁴ , measured at 25 \pm 5°C)		
	Freq.	Cr $\leq 1,0\mu$ F	Cr > 1,0 μ F
	1kHz	4	6
Insulation resistance (IR)	30000s but need not exceed 30G Ω (typical value), after 1 minute of electrification at 100Vdc (25 \pm 5°C).		
Test voltage between terminals (Ut)	2xUr (DC) applied for 10s at 25 \pm 5°C (1 minute for type test)		
Test voltage between terminals and case (Utc)	3kV 50=60Hz applied for 60s at 25 \pm 5°C		
Damp heat test (steady state)	Test conditions: Temperature= +40 \pm 2°C Relative humidity= 93 \pm 2% Test Duration= 56 days	Performance: Capacitance change $\leq \pm 2\%$ DF change $\leq 0,0010$ at 1kHz IR $\geq 50\%$ of initial limit value	
Typical capacitance change versus operating time	-3% after 30'000 hours at Urms or after 100'000 hours at Ur		
Life expectancy	$\geq 30'000$ hours		
Failure quota	300/10 ⁹ component hours		

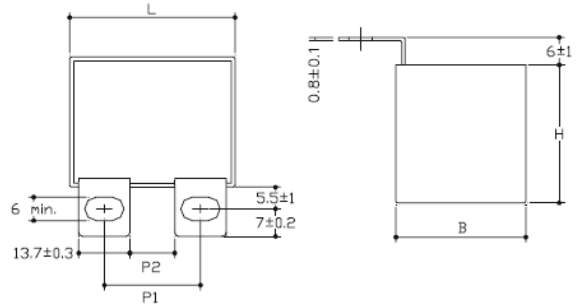
PMB



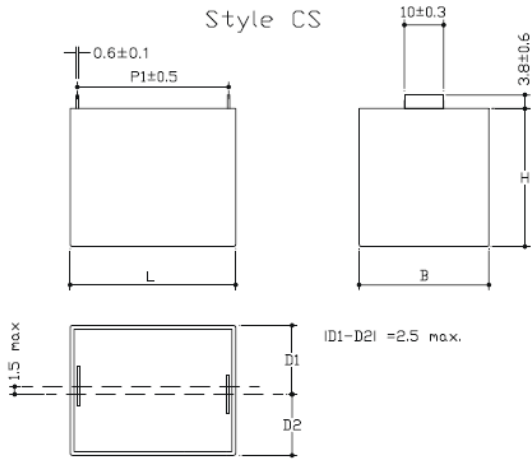
Style SP/SR



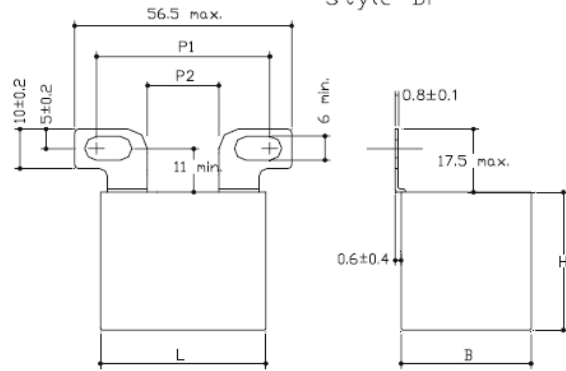
Style VP/VR



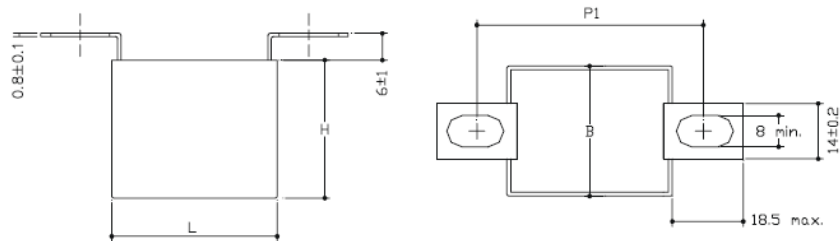
Style CS



Style BP



Style AP



Fixing pitch and distance between lugs (mm)												
L	Style SP		Style SR		Style VP		Style VR		Style BP		Style AP	Style CS
	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P1
42.5	23+28 (M6)	11	20+25 (M6)	8	23+28 (M6)	11	20+25 (M6)	8	34+45 (M6)	17	51+64 (M8)	38.5
57.5	37+42 (M6)	24	34+39 (M6)	21	37+42(M6)	24	34+39 (M6)	21	-	-	65+78 (M8)	52.5

PMB



PMB article table (different values available upon request)

Ur Vdc	Urms Vac ⁽⁴⁾	Upk Vdc	Cap. μF	Dimension in mm			du/dt V/μs	Ipeak A	Irms ⁽²⁾ A	ESR ⁽³⁾ mΩ	ICEL Code ⁽¹⁾
				B	H	L					
700	380	1000	1,2	24,5	27,5	42,5	325	390	16,5	3,1	PMB1704120*##
700	380	1000	2	33,5	35,5	42,5	325	650	22	2,5	PMB1704200*##
700	380	1000	2,5	33,5	35,5	42,5	325	812	23	2,2	PMB1704250*##
700	380	1000	3	33	45	42,5	325	975	26	2,1	PMB1704300*##
700	380	1000	3,5	33	45	42,5	325	1140	27	2	PMB1704350*##
700	380	1000	4	30	45	57,5	200	800	27	2,3	PMB1704400*##
700	380	1000	4,7	35	50	57,5	200	940	31	2,1	PMB1704470*##
700	380	1000	5,6	35	50	57,5	200	1120	32	2	PMB1704560*##
850	450	1200	0,82	24,5	27,5	42,5	400	328	15,5	3,1	PMB1853820*##
850	450	1200	1	24,5	27,5	42,5	400	400	17,5	2,7	PMB1854100*##
850	450	1200	1,5	33,5	35,5	42,5	400	600	23	2,2	PMB1854150*##
850	450	1200	1,75	33,5	35,5	42,5	400	700	23,5	2,2	PMB1854175*##
850	450	1200	2	33	45	42,5	400	800	26,5	2	PMB1854200*##
850	450	1200	2,2	33	45	42,5	400	880	27	2	PMB1854220*##
850	450	1200	2,5	33	45	42,5	400	1000	28	1,9	PMB1854250*##
850	450	1200	3	30	45	57,5	275	825	28,5	2,2	PMB1854300*##
850	450	1200	3,3	30	45	57,5	275	907	29,5	2,1	PMB1854330*##
850	450	1200	4	35	50	57,5	275	1100	32	1,9	PMB1854400*##
1000	480	1400	0,68	24,5	27,5	42,5	500	340	15	3,3	PMB2103680*##
1000	480	1400	0,75	24,5	27,5	42,5	500	375	15,5	3,2	PMB2103750*##
1000	480	1400	1,2	33,5	35,5	42,5	500	600	22	2,5	PMB2104120*##
1000	450	1400	1,5	33,5	35,5	42,5	500	750	23,5	2,2	PMB2104150*##
1000	450	1400	1,75	33	45	42,5	500	875	25,5	2,1	PMB2104175*##
1000	450	1400	2	33	45	42,5	500	1000	26,5	2	PMB2104200*##
1000	450	1400	2,2	30	45	57,5	320	704	26,5	2,5	PMB2104220*##
1000	450	1400	3	35	50	57,5	320	960	31	2,1	PMB2104300*##
1000	450	1400	3,3	35	50	57,5	320	1060	32	2	PMB2104330*##
1200	500	1600	0,33	24,5	27,5	42,5	650	210	12	5,1	PMB2123330*##
1200	500	1600	0,39	24,5	27,5	42,5	650	254	13	4,6	PMB2123390*##
1200	500	1600	0,47	24,5	27,5	42,5	650	306	14	4,1	PMB2123470*##
1200	500	1600	0,56	24,5	27,5	42,5	650	365	14,5	3,7	PMB2123560*##
1200	500	1600	0,68	33,5	35,5	42,5	650	442	19	3,3	PMB2123680*##
1200	500	1600	0,82	33,5	35,5	42,5	650	533	20	3	PMB2123820*##
1200	500	1600	1	33,5	35,5	42,5	650	650	20,5	2,7	PMB2124100*##
1200	500	1600	1,2	33	45	42,5	650	780	23,5	2,4	PMB2124120*##
1200	500	1600	1,5	33	45	42,5	650	975	25	2,1	PMB2124150*##
1200	500	1600	2	30	45	57,5	350	700	27	2,4	PMB2124200*##
1200	500	1600	2,2	35	50	57,5	350	770	30	2,3	PMB2124220*##
1200	500	1600	2,5	35	50	57,5	350	875	31	2,1	PMB2124250*##
1500	575	2000	0,33	24,5	27,5	42,5	800	264	13,5	4,6	PMB2153330*##
1500	575	2000	0,39	24,5	27,5	42,5	800	312	14	4,3	PMB2153390*##
1500	575	2000	0,47	33,5	35,5	42,5	800	376	18	3,7	PMB2153470*##
1500	575	2000	0,68	33,5	35,5	42,5	800	544	19,5	3,1	PMB2153680*##
1500	575	2000	0,75	33,5	35,5	42,5	800	600	20,5	2,8	PMB2153750*##
1500	575	2000	1,0	33	45	42,5	800	800	23	2,5	PMB2154100*##
1500	575	2000	1,2	30	45	57,5	500	600	25	2,8	PMB2154120*##
1500	575	2000	1,5	35	50	57,5	500	750	28	2,5	PMB2154150*##
1500	575	2000	1,8	35	50	57,5	500	900	29,5	2,3	PMB2154180*##
2000	630	2400	0,1	24,5	27,5	42,5	1000	100	8	13	PMB2203100*##
2000	630	2400	0,15	24,5	27,5	42,5	1000	150	10,5	7,5	PMB2203150*##
2000	630	2400	0,22	24,5	27,5	42,5	1000	220	12	5,1	PMB2203220*##
2000	630	2400	0,33	33,5	35,5	42,5	1000	330	16,5	4,1	PMB2203330*##
2000	630	2400	0,39	33,5	35,5	42,5	1000	390	17,5	3,6	PMB2203390*##
2000	630	2400	0,47	33	45	42,5	1000	470	20,5	3,2	PMB2203470*##
2000	630	2400	0,56	33	45	42,5	1000	560	21,5	3	PMB2203560*##
2000	630	2400	0,68	30	45	57,5	580	394	22,5	3,5	PMB2203680*##
2000	630	2400	0,82	30	45	57,5	580	475	24	3,1	PMB2203820*##
2000	630	2400	1	35	50	57,5	580	580	27	2,8	PMB2204100*##
2000	630	2400	1,2	35	50	57,5	580	696	29	2,4	PMB2204120*##

(1)Change the * symbol with the needed capacitance tolerance code: J=±5%, K=±10%, M=±20% and the ## characters with the needed style code - (2) Maximum values at 100kHz, +70°C - (3) Typical values at 100kHz- (4)Not suitable for across the line application.

PMB



Ur Vdc	Urms Vac ⁽⁴⁾	Upk Vdc	Cap. μF	Dimension in mm			du/dt V/μs	Ipeak A	Irms ⁽²⁾ A	ESR ⁽³⁾ mΩ	ICEL Code ⁽¹⁾
				B	H	L					
2500	700	3000	0,1	24,5	27,5	42,5	1350	135	9	11,2	PMB2253100*##
2500	700	3000	0,15	24,5	27,5	42,5	1350	202	11	7,2	PMB2253150*##
2500	700	3000	0,22	33,5	35,5	42,5	1350	297	15	5,2	PMB2253220*##
2500	700	3000	0,33	33,5	35,5	42,5	1350	445	18	3,8	PMB2253330*##
2500	700	3000	0,47	33	45	42,5	1350	634	22	3	PMB2253470*##
2500	700	3000	0,56	30	45	57,5	750	420	22,5	3,5	PMB2253560*##
2500	700	3000	0,68	35	50	57,5	750	510	25	3,2	PMB2253680*##
2500	700	3000	0,82	35	50	57,5	750	615	26	2,9	PMB2253820*##
3000	750	3500	0,047	24,5	27,5	42,5	1600	75	7,5	16,5	PMB2302470*##
3000	750	3500	0,068	24,5	27,5	42,5	1600	109	9	11,5	PMB2302680*##
3000	750	3500	0,1	33,5	35,5	42,5	1600	160	12	8,5	PMB2303100*##
3000	750	3500	0,15	33,5	35,5	42,5	1600	240	14,5	6,1	PMB2303150*##
3000	750	3500	0,22	33	45	42,5	1600	352	18	4,3	PMB2303220*##
3000	750	3500	0,33	30	45	57,5	875	288	20,5	4,3	PMB2303330*##
3000	750	3500	0,47	35	50	57,5	875	411	23	3,8	PMB2303470*##

(1)Change the * symbol with the needed capacitance tolerance code: J=±5%, K=±10%, M=±20% and the ## characters with the needed style code - (2) Maximum values at 100kHz, +70°C - (3) Typical values at 100kHz - (4)Not suitable for across the line application.

Appendice 3

SPECIFICHE DI ACQUISTO DELLA BATTERIA DI PROVA

Scelta ed acquisto del pacco batterie

L'ENEA ha avuto il compito di individuare il sistema di accumulo più adatto, come compromesso funzionale ed economico, alla sperimentazione in esame.

L'Università di Palermo aveva posto l'attenzione sui Moduli Saft del tipo Synerion 24 M da 24 V, 84 Ah; essendo la tensione nominale richiesta al pacco di 400 V si evince che per la sua realizzazione sarebbero occorsi diciassette di tali moduli da porre in serie tra di loro. La corrente massima di ricarica continuativa degli accumulatori suddetti è pari a 34 A, quella di scarica a 160 A; tuttavia l'applicazione oggetto del contratto di ricerca in essere tra ENEA e Università di Palermo non prevede scariche continuative superiori a 110 A.

Le Synerion 24 M sono classificate da Saft come moduli Litio Ione 'Medium Power' riferendosi alla loro densità di energia: l'energia accumulabile è un modulo è pari a 2 kWh, la densità di energia specifica è di 118 Wh/l e 104 Wh/kg.

Le dimensioni del modulo sono di 448 * 131 * 292 mm per un peso di 19.2 kg.

L'indicazione fornita dall'Università sul modello da acquistare non era vincolante, costituiva invece il riferimento su cui basarsi per la ricerca di un pacco di batterie adatto all'applicazione in esame che avesse caratteristiche simili a quelle del modello Saft.

L'ENEA ha osservato che, essendo l'applicazione considerata di tipo stazionario, non è indispensabile che le batterie presentino una alta densità di energia e di potenza in quanto i problemi di ingombro e peso sono in questo caso trascurabili; di conseguenza si è deciso di effettuare la ricerca sia considerando moduli di batteria adatti alla trazione, facilmente reperibili nel mercato e caratterizzati appunto da alte densità di potenza ed energia, sia tipologie di batterie adatte ad un utilizzo stazionario, meno costose, a volte più efficienti delle prime, ma inferiori a queste come valori di densità di potenza ed energia.

L'esperienza passata (applicazione di un accumulo per il recupero energetico su una funicolare Report RdS/2011/308) ha messo in evidenza il fatto che la scelta del modello di cella è solo una parte del lavoro necessario a definire le caratteristiche del pacco, altri due aspetti fondamentali sono quelli della scelta delle caratteristiche del case con cui i moduli vengono assemblati e di quelle del BMS che gestirà il tutto.

La scelta del case va fatta considerando sia il grado di protezione che occorre conferirgli, grado che dipende dall'ambiente in cui verrà posto e dalle caratteristiche dell'applicazione (ad es. se è automotive occorre anche considerare la presenza di accelerazioni, frenature, l'eventualità di un incidente ecc.), sia la sua capacità di smaltimento del calore delle singole celle, legata anche essa alla applicazione considerata.

Il BMS deve gestire il pacco batterie scambiando informazioni con l'elettronica che pilota i convertitori ad esse associate, quindi anche il BMS deve essere scelto in funzione della possibilità di integrarlo con il resto del sistema. L'Enea ha una esperienza diretta su queste tematiche avendo sviluppato in passato un suo case per una particolare applicazione stazionaria e gestito tutta la fase di integrazione tra un BMS sviluppato per i veicoli elettrici ed il sistema di gestione dell'elettronica associata a questa applicazione.

Dato che non è possibile fornire in modo univoco delle specifiche sul case e sul BMS Enea ha prima trasmesso ai possibili fornitori le sole specifiche relative alle caratteristiche elettriche richieste all'accumulo, e solo successivamente, in base alle risposte ricevute, li ha contattati per discutere sulla personalizzazione del contenitore e del BMS. In accordo con l'Università di Palermo si è deciso di effettuare la ricerca sia per un pacco di capacità maggiore o uguale ad 80 Ah sia per uno di capacità maggiore o uguale a 40 Ah, questa seconda possibilità implica la necessità di rivedere il profilo delle prove ma, nel caso in cui il pacco sia realizzato con celle di capacità dell'ordine di 20/30 Ah, si ha che la complessità della sua costruzione viene a diminuire e, per contro, la sua affidabilità ad aumentare.

Quindi le specifiche che Enea ha trasmesso ai possibili fornitori sono le seguenti:

Capacità \geq 80 AH oppure Capacità \geq 40 Ah

Tensione nominale: 400 V

Corrente nominale: \geq 110 A

Corrente continua di ricarica: \geq 30 A

I fornitori contattati sono stati i seguenti:

M.i.r.m.u. Srl

Via Balducci, 40

20158 Milano

OXYGEN S.P.A.

Via Ponticello, 44 35129 Padova

Alchemy Italia s.r.l.

Sede Legale: Via Scalzi 20 – IT 37122 Verona.

Sede Comm.le: V.le del Lavoro 19/b1 – 37030 Colognola ai Colli (VR)

XBW s.r.l.

via Sicilia, 31

42122 - Reggio Emilia - Italy

Kemet

Via San Lorenzo 19, Sasso Marconi (BO), 40037 Italy

Le risposte fornite sono state molto diverse tra di loro in termini di costi e tempi e modalità di realizzazione del pacco, questo si spiega con il fatto che le celle elementari che lo compongono proposte da ogni fornitore possiedono caratteristiche molto diverse tra di loro, in particolare si hanno celle ad altissima potenza specifica, celle ad altissima energia specifica, e celle più adatte ad un utilizzo stazionario e, come detto, meno spinte dal punto di vista della riduzione degli ingombri e pesi.

In particolare la forchetta di prezzo per il modello con una capacità maggiore o uguale ad 80 Ah andava da 17.600 Euro + IVA a 45.464,00 Euro + IVA in entrambi i casi escludendo il montaggio del pacco, invece per il pacco da 40 Ah da 17.100 Euro + IVA a 48.280 Euro + IVA in entrambi i casi comprendendo il montaggio

L'offerta da 17.100 Euro + IVA è pervenuta dalla Alchemy, i tempi di consegna del materiale sono compatibili con la scadenza del progetto, anche se le prove andranno comunque fatte dopo il mese di settembre 2012; le caratteristiche del pacco sono state customizzate per le esigenze della sperimentazione, e si è deciso di fare altrettanto per il BMS. Il BMS effettua oltre alla rilevazione delle tensioni parziali di ogni elemento del pacco e delle temperature di cella anche la sua equalizzazione, questa viene effettuata utilizzando componenti passivi quando il sistema è a riposo. Il BMS sarà personalizzato in modo da eseguire il reset del calcolo dello stato di carica tramite la lettura della tensione totale del pacco e della sua temperatura media eseguita in base ad un comando esterno, allo stesso modo sarà possibile eseguire l'equalizzazione delle tensioni sempre con un comando esterno in modo indipendente dallo stato di carica delle batterie (in genere la si fa solo a batteria completamente carica ndr).

Di seguito vengono riportate le caratteristiche delle singole celle costituenti il pacco:

- Modello: ALCH.F20-225150010
- Tipologia: litio-ferro-fosfato
- Capacità nominale: 20 Ah (condizioni di scarica CC/CV - 0,5 C)
- Tensione nominale: 3,2 V
- Resistenza interna: $\leq 3 \text{ m}\Omega$
- Tensione massima di carica: 3,65 V
- Tensione minima di scarica: 2 V
- Massima corrente impulsiva di scarica: 100 A per 8 secondi (corrispondente ad una corrente di 5C, misurata ad una temperatura ambiente di 25%)
- Condizioni di carica standard: 0,5 C (CC/CV a 25 °C)
- Condizioni di carica veloce: 1 C (CC/CV a 25 °C)
- Condizioni di scarica standard: 0,5 C (CC a 25 °C)
- Condizioni di scarica veloce: 2 C (CC a 25 °C)
- Bilanciamento delle tensioni di cella: BMS passivo
- Peso della batteria: 535 g
- Volume della batteria: 225 x 150 x 10 mm

Le figure seguenti riportano le caratteristiche di carica e scarica delle batterie:

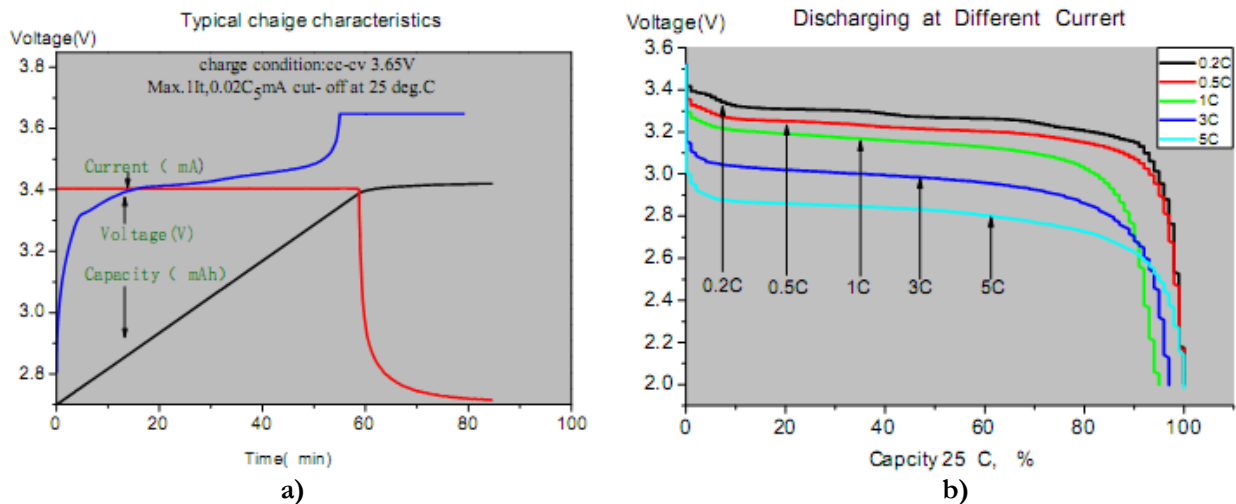


Fig. 3.1 – a) Caratteristica di carica della cella b) di scarica a vari regimi

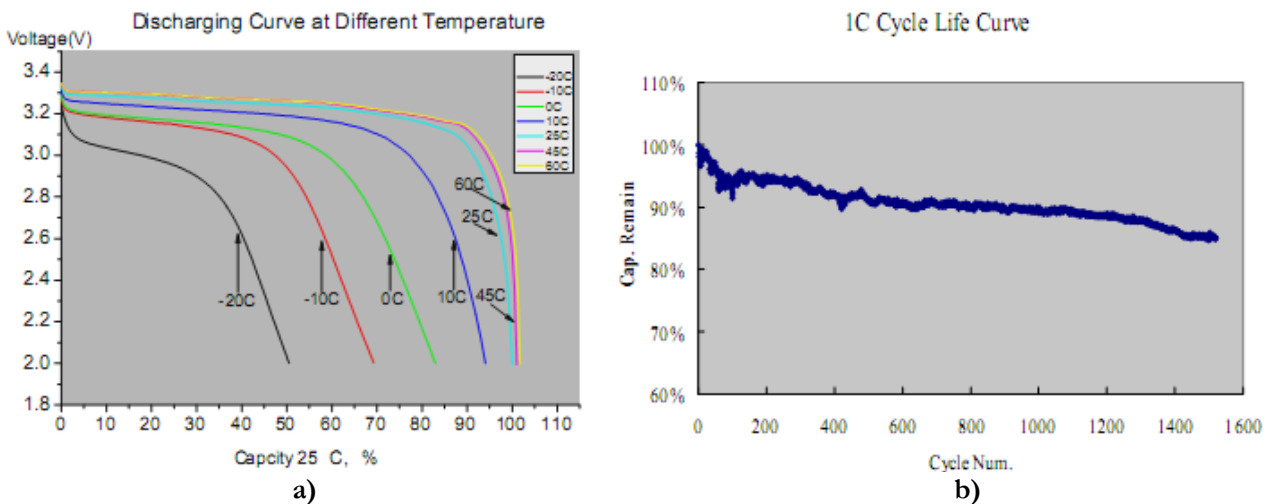


Fig. 3.2 – a) Capacità in funzione della temperatura b) Ciclo di vita