



## Sviluppo e ottimizzazione del sistema modulare dello stadio di conversione del sistema PEF ad alta intensità

S. De Caro, O. Giordano, S. Panarello, T. Scimone, A. Testa



## SVILUPPO E OTTIMIZZAZIONE DEL SISTEMA MODULARE DELLO STADIO DI CONVERSIONE DEL SISTEMA PEF AD ALTA INTENSITÀ

S. De Caro, O. Giordano, S. Panarello, T. Scimone A. Testa (Università di Messina, Dipartimento di Ingegneria)

Settembre 2018

### Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

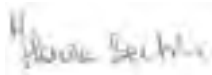
Piano Annuale di Realizzazione 2017

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

Progetto: Processi e macchinari industriali

Obiettivo: Sviluppo e ottimizzazione del sistema modulare dello stadio di conversione del sistema PEF ad alta intensità

Responsabile del Progetto: ing Ilaria Bertini ENEA



Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Sviluppo e ottimizzazione del sistema modulare dello stadio di conversione del sistema PEF ad alta intensità"

Responsabile scientifico ENEA: Ing. Francesca Bonfà

Responsabile scientifico Università di Messina: Ing. Salvatore De Caro

## Indice

INTRODUZIONE .....	4
1 IL SISTEMA MODULARE.....	5
2 REALIZZAZIONE DEL SISTEMA DI GENERAZIONE MODULARE.....	8
3 PROVE SPERIMENTALI.....	12
4 CONCLUSIONI.....	13
5 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI .....	14
6 CURRICULUM SCIENTIFICO DEL GRUPPO DI LAVORO IMPEGNATO NELL'ATTIVITÀ .....	15

## Introduzione

L'attività di ricerca svolta dall'Università di Messina, ha riguardato l'ottimizzazione sia hardware che software del prototipo di generatore di impulsi elettrici ad alta intensità (PEF) per applicazioni di inattivazione batterica negli alimenti, in particolare vino o mosto.

Il sistema è costituito da una combinazione dei singoli moduli progettati e realizzati nel precedente anno di ricerca.

Sono state analizzate le problematiche relative alla generazione di campi elettrici pulsati ad alta intensità, ed individuato nella topologia circuitale, progettata in modo tale da essere un soddisfacente e performante trade-off tra costi di realizzazione ed efficienza, migliorie che sono state implementate e validate mediante una serie di prove sperimentali.

Il prototipo è stato progettato con l'ausilio dei software OrCAD PSpice e PowerSim, grazie ai quali, congiuntamente ai fattivi riscontri sperimentali, si è giunti alla decisione di realizzare il sistema con quattro moduli distinti.

In Figura 1 è riportato lo schema a blocchi del sistema implementato.

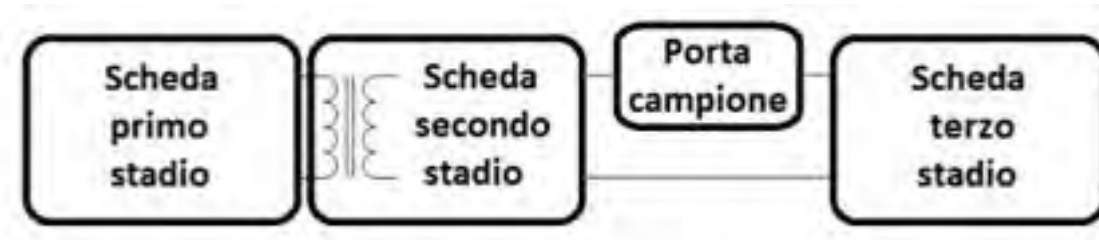


Figura 1. Schema a blocchi del generatore PEF.

Sostanzialmente, le attività di ricerca svolte sono riassumibili nei seguenti punti:

1. analisi energetica e delle condizioni di trasferimento per l'inattivazione batterica;
2. dimensionamento del modulo base del PEF ad alta intensità;
3. ottimizzazione della configurazione modulare del PEF ad alta intensità;
4. sperimentazione.

## 1 Il sistema modulare

Il sistema di generazione di impulsi ad alta intensità è costituito, come detto, è costituito da quattro blocchi fondamentali:

- **circuito di pilotaggio**: ha il compito di fornire i segnali di comando necessari al pilotaggio dei quattro dispositivi del ponte ad H del primo stadio del sistema ed i segnali di comando del tiristore pilota di ciascuna delle schede di interruttori. I segnali sono generati tramite microcontrollore ARDUINO UNO WI-FI e inviati ai driver dei dispositivi tramite collegamento in fibra ottica per ridurre al minimo le interferenze di tipo elettromagnetico sui segnali;

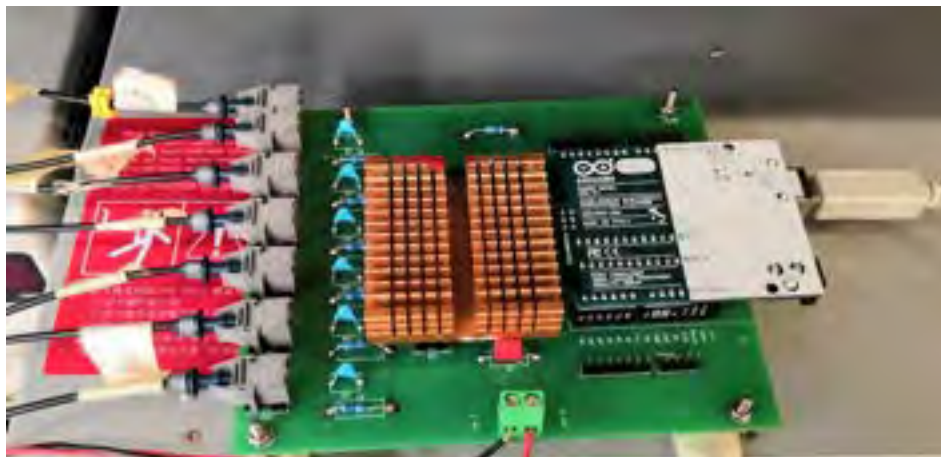


Figura 2. Circuito di pilotaggio.

- **circuito di conversione**: questa scheda contiene un convertitore a ponte intero e il trasformatore di isolamento, con rapporto di trasformazione pari ad  $n_t = 11$ ;

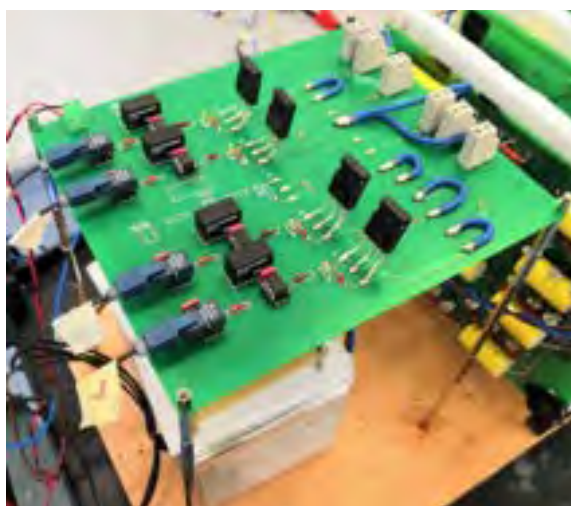


Figura 3. Ponte ad H.

- **circuito di Cockcroft-Walton:** su ognuna di queste schede sono realizzate  $n = 5$  celle elementari del moltiplicatore; all'uscita di ogni singola scheda si ha una tensione pari a  $V_{mult} = 2 \cdot n \cdot n_t \cdot V_{in}$ ;

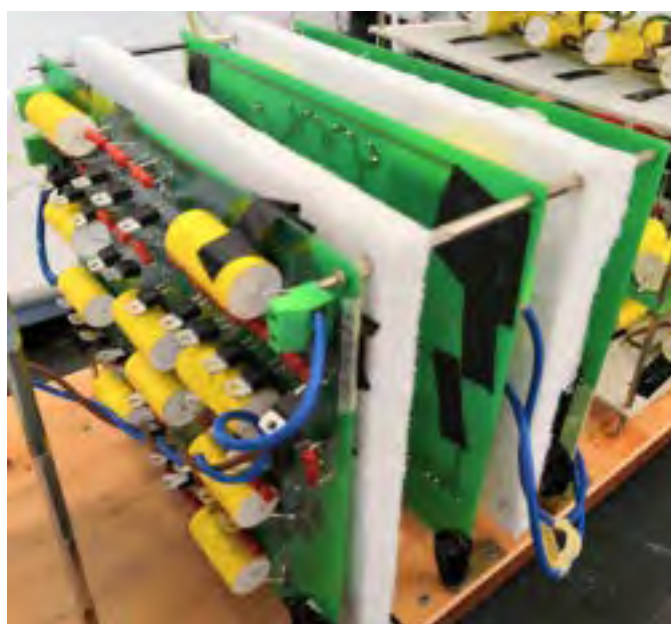
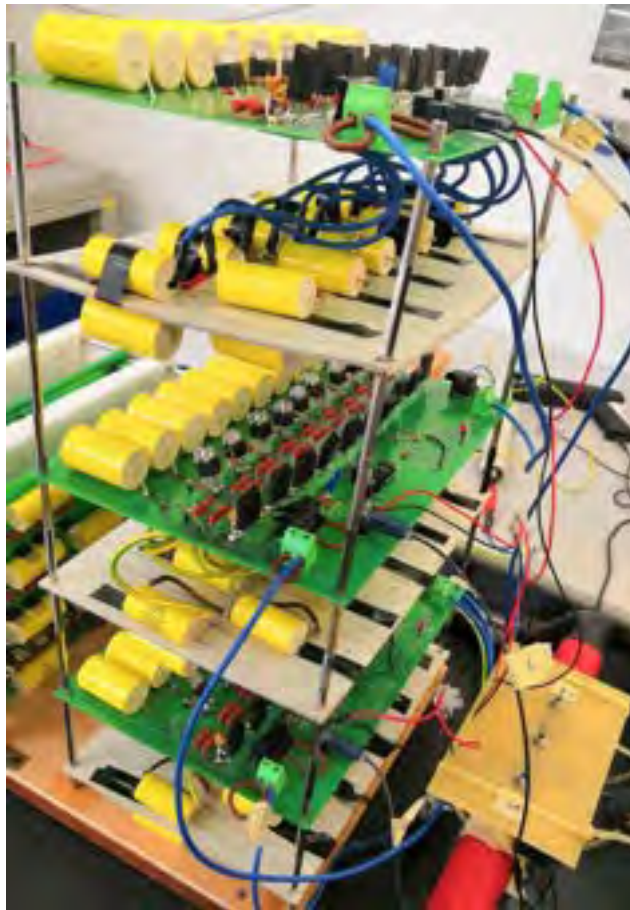


Figura 4. Circuito moltiplicatore.

- **scheda tiristori:** è quella relativa ai tiristori SCR (mostrata in Figura 5). Sulla scheda sono stati previsti i collegamenti necessari a collegare più schede in serie. Esse possono essere utilizzate in due modalità selezionabili cortocircuitando le opportune uscite sui terminali disponibili.

- Modalità non modulare: viene pilotato complessivamente un unico dispositivo. Con questa soluzione i valori delle resistenze di gate sulle schede sono diversi.
- Modalità modulare: viene pilotato un dispositivo per scheda. In questa configurazione le schede sono identiche tra loro.



**Figura 5. Schede SCR.**

La configurazione proposta garantisce al sistema flessibilità e scalabilità, peculiarità del generatore PEF realizzato che sono state validate nel corso di queste ultime attività. Qualora gli esperimenti sull'inattivazione batterica evidenzino la necessità di operare a tensioni di scarica maggiori di quelle raggiungibili con la configurazione attuale, grazie alla modularità del sistema, è facile integrare in esso nuovi moduli di SCR che garantiscano una tensione di uscita maggiore.

L'affidabilità del generatore di impulsi è stata testata nel corso dei trattamenti effettuati sui contaminanti *Lactobacillum plantarum*, *Pseudococcus parvulus* ed *Escherichia coli*. Su questi ceppi sono stati infatti applicati campi elettrici di intensità variabile per intervalli di tempo prolungati.

In Figura 6 è mostrato il sistema PEF nella sua totalità.

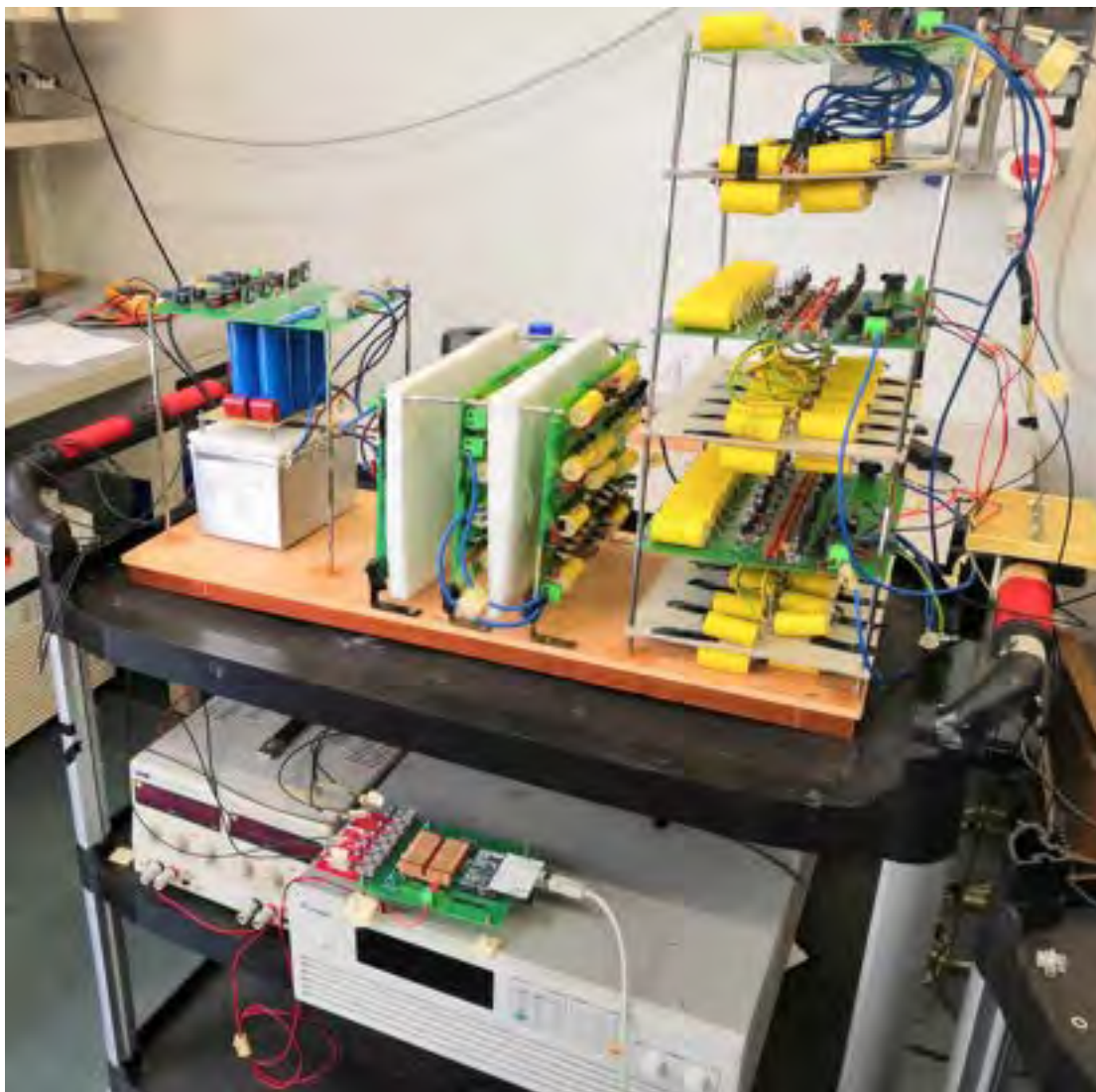


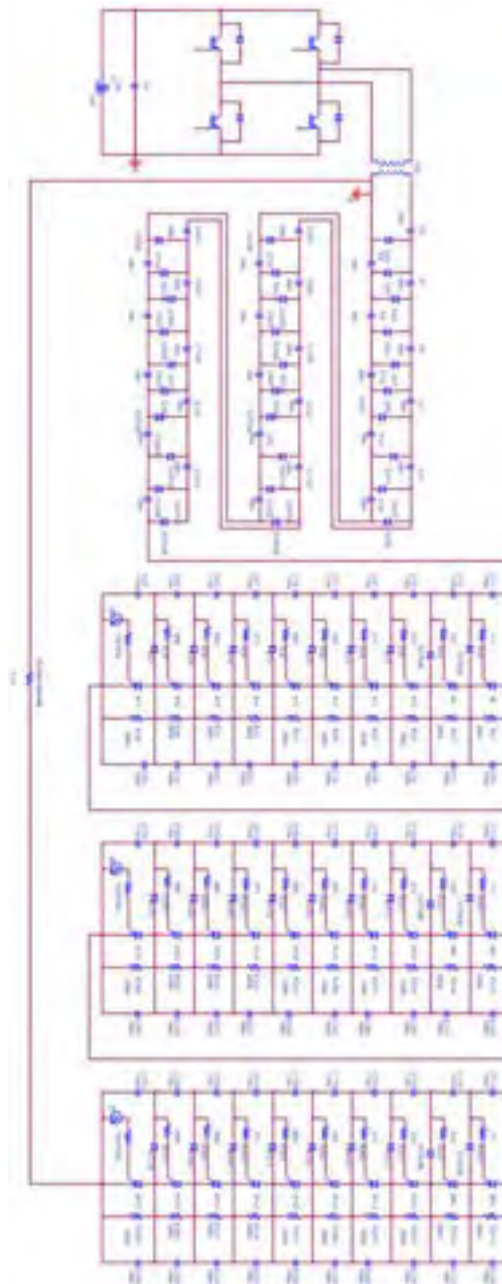
Figura 6. Il generatore PEF.

## 2 Realizzazione del sistema di generazione modulare

La configurazione finale del sistema PEF realizzato, la cui rappresentazione circuitale è riportata nella Figura 7, è costituita da:

- una scheda di controllo per la gestione globale delle componenti del sistema (DC/DC Full Bridge e commutazione tiristori);
- un convertitore Full Bridge, costituente il primo stadio del sistema;
- tre circuiti di Cockcroft-Walton collegati in serie, che costituiscono il secondo stadio del PEF; l'attuale configurazione, riportata in Figura 4, consente di raggiungere una tensione all'uscita del moltiplicatore sino a  $V_{mult} = 30 \text{ kV}$ .

- tre schede SCR (terzo stadio del sistema), anch'esse collegate in serie.



**Figura 7. Schema circuitale del generatore PEF.**

Al fine di conferire scalabilità e modularità al sistema, si è optato per il pilotaggio diretto dei tiristori X17, X172 ed X173 (si veda Figura 8) delle schede degli SCR allo scopo di realizzare un'attivazione in "cascata" degli altri tiristori presenti su ciascuna scheda.

Tale accorgimento consente di replicare ogni modulo tiristori senza alcuna modifica dei parametri circuitali.

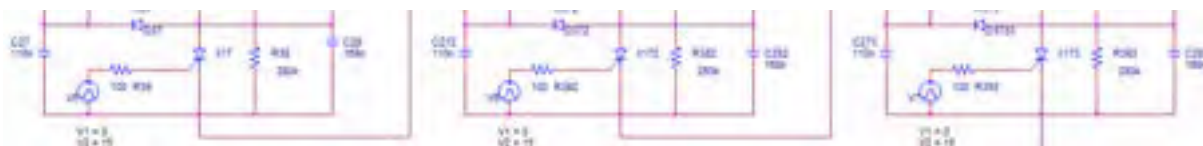


Figura 8. Particolare relativo agli SCR pilotati dal sistema di controllo.

La scelta di realizzare un pilotaggio dedicato per ogni scheda SCR comporta la necessità di produrre ulteriori segnali in uscita al sistema di controllo.

Per tal motivo la scheda di controllo è stata modificata aggiungendo un canale di uscita aggiuntivo, come è possibile notare in Figura 2.

Essendo i tiristori pilotati di ogni scheda (X17, X172 ed X173) a potenziali elettrici assai distanti tra loro, per risolvere il problema dell’isolamento dei segnali di pilotaggio degli stessi, è stato opportunamente realizzato un sistema di alimentazione dedicato, il cui schema è di seguito riportato.

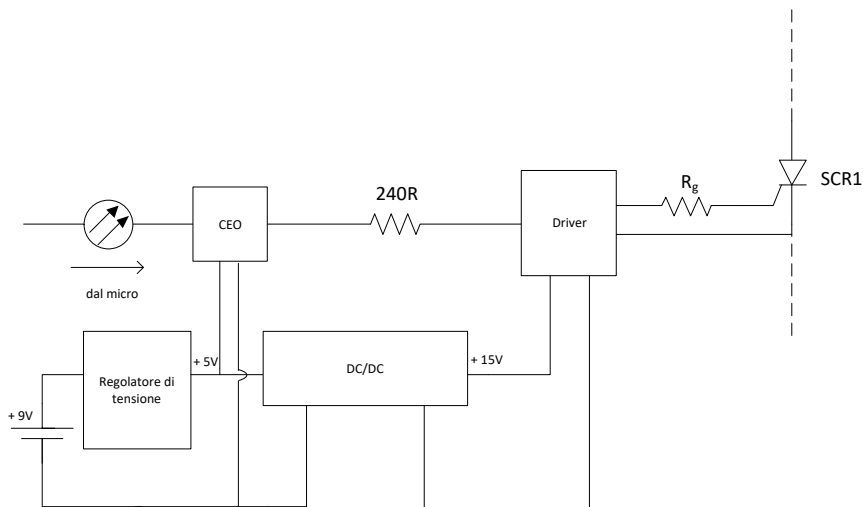


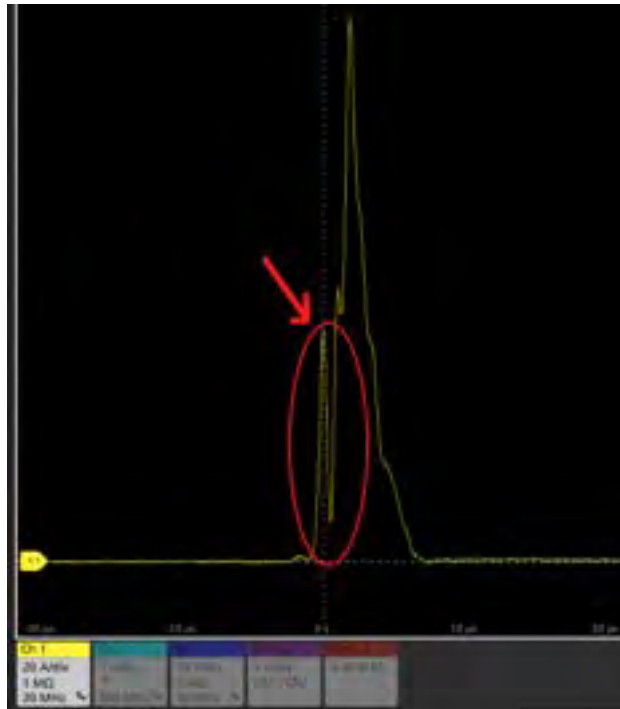
Figura 9. Schema del sistema di pilotaggio degli SCR.

Analizzando il comportamento del sistema di generazione di impulsi, grazie a programmi di simulazione ed al riscontro diretto attraverso misure di tensione e corrente, si è trovato che una asincronia, anche se assai piccola, della risposta dei tiristori ai segnali di pilotaggio, è causa non solo di un minore trasferimento di energia sul campione da trattare, ma anche, considerando scenari peggiori, della rottura dei dispositivi stessi.

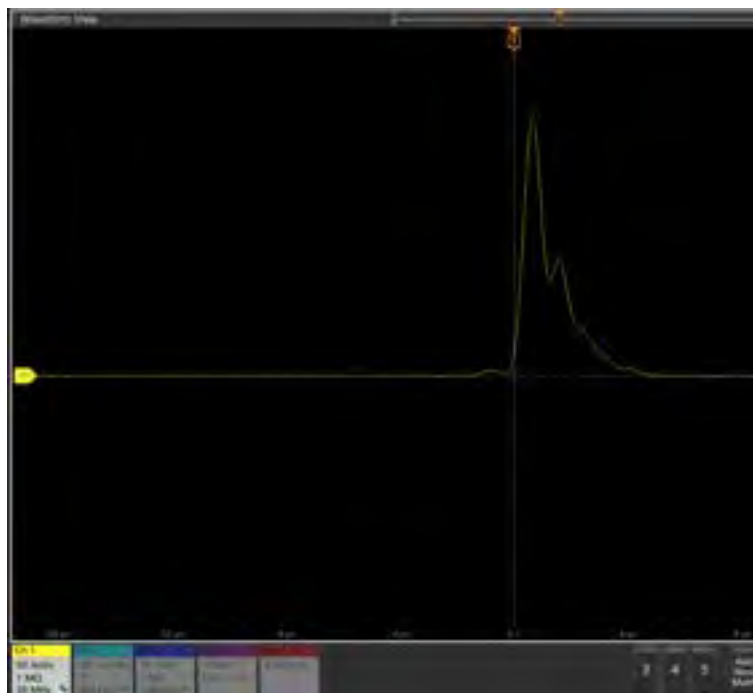
Questo è imputabile sia alle differenze parametriche delle resistenze viste tra gate e catodo (resistenza di ingresso degli SCR) sia alla tolleranza delle resistenze di gate utilizzate. Infatti differenze parametriche degli SCR e differenze anche all’interno dell’intervallo di tolleranza delle

resistenze di gate dei tiristori causano ritardi confrontabili con i tempi di chiusura dei dispositivi stessi, con conseguenze negative sia sull'esito della generazione dell'impulso sia sulla robustezza del sistema (si veda Figura 10).

Questa discrepanza nei tempi di risposta è stata compensata tunando in maniera opportuna la resistenza di gate dei tiristori comandati rispetto ai valori progettuali (Figura 11).



**Figura 10. Distorsione nella corrente di scarica dovuta ad asincronismo nella risposta degli SCR.**



**Figura 11. Impulso di scarica non distorto.**

Anche dal punto di vista del software il sistema è stato ottimizzato attraverso un’interfaccia di controllo che permette all’utente di generare una serie di impulsi di pilotaggio di numero regolabile senza dover modificare e ricompilare il codice sorgente.

Tra la generazione di una serie di impulsi e la successiva l’utente è, adesso, anche in grado di modificare la durata della modulazione del Full Bridge, senza dover ricaricare il firmware su Arduino, per la regolazione della massima tensione raggiunta ai capi del campione prima di effettuare la scarica.

E’ inoltre possibile settare una ripetizione dei cicli di carica e scarica con frequenza variabile, attraverso la funzione Delay. In figura 11 è riportata l’interfaccia utente realizzata:

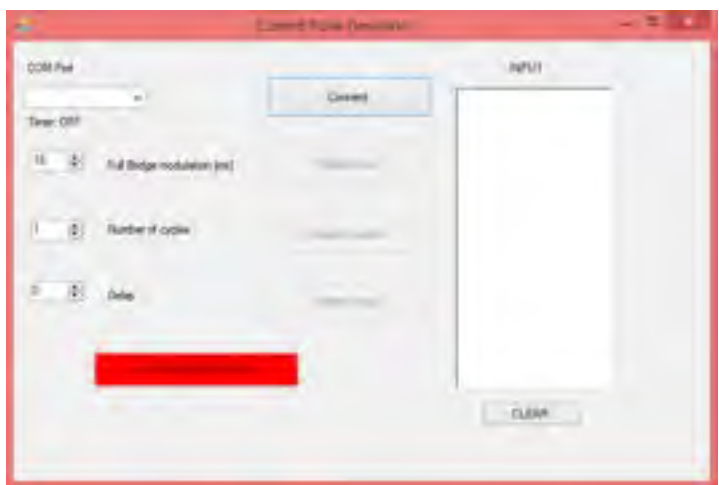


Figura 12. Interfaccia grafica utente

### 3 Prove sperimentali

Il sistema descritto è stato testato sui ceppi elencati precedentemente. Per effettuare gli esperimenti si è fissato il punto di lavoro del generatore PEF a 13,4kV. Il valore di campo elettrico applicato al campione è stato regolato di volta in volta con precisi aggiustamenti della distanza tra le armature del portacampioni. Inoltre è stato variato il numero di scariche effettuate sul campione. Le misure effettuate sono state condotte su due differenti terreni di coltura (mosto e vino); ciascuno di questi substrati è stato contaminato con *Lactobacillum plantarum*, *Pseudococcus parvulus* ed *Escherichia coli*.

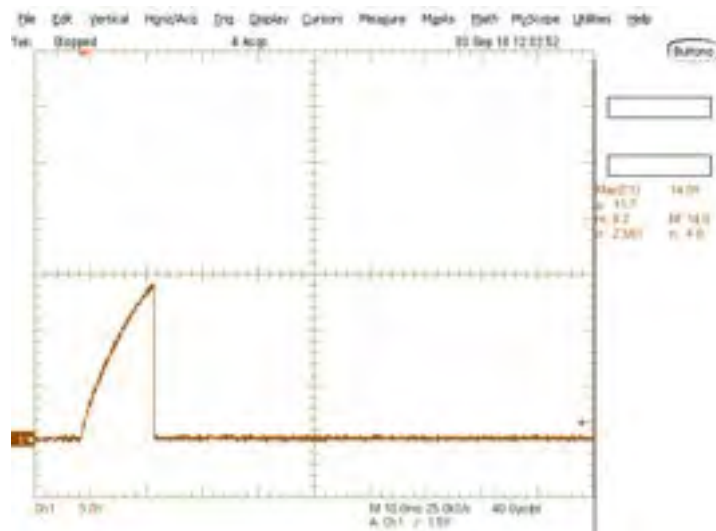
Nella tabella 1 è riportato un quadro sinottico delle misure effettuate.

Parametro	Intervallo
-----------	------------

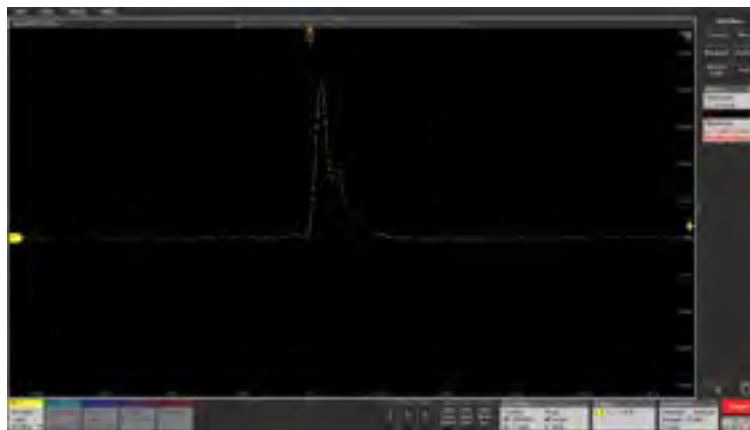
Campo elettrico [kV/cm]	4,467 – 54,4
Corrente di picco [A]	99,75 – 241,6
Numero di impulsi	1 - 200
Frequenza [Hz]	0,2 - 1

**Tabella 1. Condizioni sperimentali.**

Nelle Figg. 13 e 14 sono riportate rispettivamente la tensione e la corrente di scarica, ottenute per una tensione di ingresso  $V_{in} = 100V$  ed un tempo di carica pari a 13 ms.



**Figura 13. Tensione di scarica portacampione sul Ch1= 5kV/div**



**Figura 14. Corrente di scarica portacampione sul Ch6= 50 A/div**

## 4 Conclusioni

L'attività di ricerca svolta dall'Università di Messina si è concentrata sulla realizzazione di un secondo prototipo modulare per la generazione di impulsi elettrici ad alta intensità (PEF), che permette di ottimizzare il trasferimento dell'energia al carico.

Suddetta modularità, inoltre, permette di raggiungere diversi livelli di tensione di scarica sul portacampione al variare del tipo di fluido da trattare, ed al variare della tipologia di batterio da eliminare.

Sono state individuate, affrontate e risolte le problematiche legate al sincronismo dei tiristori.

E' stata infine implementata una interfaccia utente per la gestione delle impostazioni del sistema.

## 5 Riferimenti bibliografici

1. Barbosa-Canovas, G. V., & Seplveda, D. (2005). Present status and the future of PEF technology. *Novel food processing technologies*, 1-44.
2. Cacace, D., & Palmieri, L. (2015). High-intensity pulsed light technology. In *Emerging Technologies for Food Processing (Second Edition)* (pp. 239-258).
3. Cole, M. B. (1997). The outlook for novel preservation technologies: A food industry prospective. In *Fifth Conference of Food Engineering*, Los Angeles.
4. Hamilton, W. A., & Sale, A. J. H. (1967). Effects of high electric fields on microorganisms: II. Mechanism of action of the lethal effect. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-General Subjects*, 148(3), 789-800.
5. Heinz, V., Alvarez, I., Angersbach, A., & Knorr, D. (2001). Preservation of liquid foods by high intensity pulsed electric fields: basic concepts for process design. *Trends in food science & technology*, 12(3), 103-111.
6. Larkin, J. W., & Spinak, S. H. (1996). Regulatory aspects of new/nova! technologies. *New Processing Technologies Yearbook*, 86.
7. Palaniappan, S., Sastry, S. K., & Richter, E. R. (1990). Effects of electricity on microorganisms: A review. *Journal of food processing and preservation*, 14 (5), 393-414.
8. Rashid, M. (2007). *Elettronica di potenza. Dispositivi e circuiti (Vol. 1)*. Pearson Italia Spa.
9. Raso-Pueyo, J., & Heinz, V. (Eds.). (2010). *Electric fields technology for the food industry: fundamentals and applications*. Springer Science & Business Media.
10. Timmermans, R. A. H., Mastwijk, H. C., Knol, J. J., Quataert, M. C. J., Vervoort, L., Van der Plancken, I., ... & Matser, A. M. (2011). Comparing equivalent thermal, high pressure and pulsed electric field processes for mild pasteurization of orange juice. Part I: Impact on overall quality attributes. *Innovative food science & emerging technologies*, 12(3), 235-243.
11. Vaughan, J. G. (1979). *Food microscopy*. London, New York, San Francisco.: Academic Press.

## 6 Curriculum scientifico del gruppo di lavoro impegnato nell'attività

### **SALVATORE DE CARO**

Salvatore De Caro è nato a Frankfurt am Main (Germania) nel 1975. Ha conseguito la laurea in Ingegneria elettronica presso l'università di Messina nel 2000 e il dottorato di ricerca in Ingegneria Elettrica presso l'Università di Catania nel 2004. Nel 2008 è stato titolare di una borsa di studio sul tema "Studio, simulazione e realizzazione di azionamenti elettrici 'sensorless' per applicazioni automobilistiche" nell'ambito del PRIN 2006 "Azionamenti Sensorless per Sistemi Integrati in Applicazioni Industriali e Automobilistiche". Nell'Ateneo messinese ha tenuto a partire dal 2006 il corso di Elettronica di potenza e Sistemi Elettromeccanici.

Dal 2010 ad oggi è Ricercatore Universitario (ING-IND/32) presso il dipartimento di Ingegneria dell'Università degli Studi di Messina ed è membro del Collegio dei Docenti del Dottorato di Ricerca in Ingegneria e Chimica dei Materiali e delle Costruzioni.

Dal 2002 è membro dell'Institute of Electrical and Electronics Engineers di New York (IEEE).

L'ing. De Caro, è stato Responsabile Scientifico del progetto: MIUR PON02 "SEAPORT - "Sviluppo di tecnologie innovative per la Sostenibilità Energetica ed Ambientale di cantieri nautici ed aree PORTuali " SEAPORT - importo unità Università di Messina 326.471,00 Euro, PON02 001532939551 data inizio 01-02-2012, durata 36 mesi (Decreto n. 1139/2013 prot.24277 del 26-04-2013);

L'ing. De Caro è Task Manager del progetto Horizon 2020: Wide band gap Innovative SiC for Advanced Power (WInSiC4AP). Project ID: 737483.

È revisore per le riviste internazionali: IEEE Transactions on Industrial Electronics, IEEE Transactions on Industry Applications, Electric Power Components and Systems, IEEE Transactions on Power Electronics, Elsevier Applied Energy.

È autore di più di 60 articoli pubblicati su riviste tecniche o in atti di congressi internazionali.

### **ANTONIO TESTA**

Il Prof. Antonio Testa ha conseguito la laurea in Ingegneria Elettrotecnica, all'Università di Catania nel 1988. Nel 1989, ha iniziato l'attività di ricerca grazie a borse di studio concesse dalla SGS Thomson e dalla sezione AEI di Catania.

Nel 1998 è stato chiamato come Professore Associato dalla Facoltà di Ingegneria dell'Università di Messina, ove, dal marzo 2000 è Professore Ordinario. Nell'Ateneo messinese il Prof. Testa ha tenuto a partire dal 1994 i corsi di Elettronica industriale di potenza, Macchine elettriche, Elettronica di potenza, Macchine ed azionamenti elettrici, Sensori ed attuatori e Robotica. I maggiori interessi scientifici del Prof. Testa riguardano il controllo degli azionamenti elettrici, la generazione da fonti di energia rinnovabile, sistemi di generazione con fuel cells, sistemi di immagazzinamento dell'energia, la propulsione elettrica, i dispositivi elettronici di potenza e i convertitori switching. Il Prof. Testa è autore di più di 160 articoli pubblicati su riviste tecniche o in atti di congressi internazionali. E' inoltre coautore di tre brevetti internazionali. Dal 1991 è membro della IEEE e collabora alle attività delle società IAS, IES e PELS.

Ha collaborato nell'ambito di vari contratti di ricerca con ST-Microelectronics (Caratterizzazione e simulazione di dispositivi e circuiti elettronici di potenza), con Rockwell Automation (Tecniche di controllo sensorless per azionamenti elettrici), col Centro Ricerche FIAT (controllo di azionamenti per veicoli elettrici ed ibridi), con l'ENEA (ottimizzazione dei flussi energetici su veicoli ibridi) e col CNR (Convertitori per sistemi di generazione distribuita con celle a combustibile). E' inoltre stato responsabile dell'Unità di Messina per i Programmi di Ricerca di Interesse Nazionale: "Attuatori e Sistemi per Applicazioni di Domotica"(1999-2001), "Applicazioni su larga scala di generatori modulari di energia elettrica con celle a combustibile"(2002 - 2004), "Azionamenti Sensorless per Sistemi Integrati in Applicazioni Industriali e Automobilistiche" (2006 - 2008) e coordinatore nazionale e responsabile dell'Unità di Messina del Programma di Ricerca di Interesse Nazionale "Topologie di conversione innovative per azionamenti elettrici" (2003-2005).

### **SAVERIO PANARELLO**

Saverio Panarello è nato a Messina nel 1980. Nel 2006 ha conseguito con lode la laurea in Ingegneria Elettronica presso l'Università degli Studi di Messina. Presso la stessa università, nel 2010, ha conseguito il titolo di Dottore di Ricerca in Tecnologie Fisiche Avanzate per l'Optoelettronica, la Fotonica e Modellizzazione Elettromagnetica. Dal 2010 al 2015 è stato titolare di assegni di ricerca e borse di studio su tematiche concernenti il progetto e lo sviluppo di strumenti di misura per valutazione di affidabilità di dispositivi elettronici di potenza attraverso lo studio della distribuzione termica e della deformazione meccanica prodotta dalle condizioni operative e si è occupato anche dello studio di tecniche di controllo sensorless per azionamenti elettrici e sistemi di conversione di energia ad alta robustezza di funzionamento. Dal 2015 ad oggi fa parte del personale tecnico dell'Università degli Studi di Messina presso il Dipartimento di Ingegneria. È autore di 16 articoli pubblicati su riviste tecniche o in atti di congressi internazionali.

### **TOMMASO SCIMONE**

Tommaso Scimone ha conseguito la laurea in ingegneria elettronica presso l'Università degli Studi di Messina nel 2007 e nel 2010 il dottorato di ricerca in Energetica presso la Scuola Superiore di Catania. Dal 2010 al 2014 è stato titolare di assegno di ricerca dal titolo "Convertitori per sistemi di generazione da energie rinnovabili e con celle a combustibile" presso l'Università degli Studi di Messina. Attualmente è borsista presso il Dipartimento di Ingegneria. È co-autore di più di 30 pubblicazioni su riviste tecniche o in atti di congressi internazionali. I suoi attuali interessi di ricerca comprendono convertitori cc / cc e dc / ac ad alta potenza.

### **ORAZIO GIORDANO**

Orazio Giordano ha conseguito la laurea in Ingegneria Elettronica presso l'Università degli Studi di Messina nel 2010. Nel 2014, nell'ambito del progetto di ricerca STEM STELO "Sviluppo e messa a punto di sistemi e tecnologie per la realizzazione di macchine e per il miglioramento della logistica di progetto e dei trasporti eccezionali" (Codice Progetto PON01\_02380) e nel progetto di formazione STELO "Formazione Sui Trasporti Eccezionali e LOGistica di progetto", promosso da Fagioli S.p.A. in partnership con Politecnico di Bari, Università di Catania ed Università di Messina, ha conseguito il titolo di "Ricercatore esperto in sistemi e tecnologie per la realizzazione di macchine per lo sviluppo dei trasporti eccezionali". Nel 2015 ha conseguito presso l'Università degli Studi di Messina il titolo di Dottore di Ricerca in Tecnologie Fisiche Avanzate per l'Optoelettronica, la Fotonica e Modellizzazione Elettromagnetica. Dal 2014 ad oggi è stato titolare di borse di studio per ricerca su tematiche inerenti la caratterizzazione di dispositivi elettronici, sistemi di energy harvesting e convertitori di potenza. È autore di 7 articoli pubblicati su riviste tecniche o in atti di congressi internazionali e di svariati report tecnici.