

Tesi di dottorato

Titolo: 3-Phase 5-Level E-Type Converter Topologies for Industrial Power Supply Applications

Elenco delle Pubblicazioni

- [1] Lidozzi, M. di Benedetto, S. Bifaretti, L. Solero and F. Crescimbinì, "Resonant Controllers with Three Degrees of Freedom for AC Power Electronic Converters," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 51, no. 6, pp. 4595-4604, Nov.-Dec. 2015.
- [2] M. di Benedetto, A. Lidozzi, L. Solero, F. Crescimbinì and P. J. Grbović, "Low-Frequency State-Space Model for the Five-Level Unidirectional T-Rectifier," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 53, no. 2, pp. 1127-1137, March-April 2017.
- [3] M. di Benedetto, A. Lidozzi, L. Solero, F. Crescimbinì and P. J. Grbović, "Small-Signal Model of the Five-Level Unidirectional T-Rectifier," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 32, no. 7, pp. 5741-5751, July 2017.
- [4] M. di Benedetto, A. Lidozzi, L. Solero, F. Crescimbinì and P. J. Grbović, "Five-Level E-Type Inverter for Grid-Connected Applications," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 54, no. 5, pp. 5536-5548, Sept.-Oct. 2018.
- [5] V. Sabatini, M. Di Benedetto and A. Lidozzi, "Synchronous Adaptive Resolver-to-Digital Converter for FPGA-Based High-Performance Control Loops," in IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 68, no. 10, pp. 3972-3982, Oct. 2019.
- [6] C. M. Verrelli, S. Bifaretti, E. Carfagna, A. Lidozzi, L. Solero, F. Crescimbinì, M. di Benedetto, "Speed Sensor Fault Tolerant PMSM Machines: From Position-Sensorless to Sensorless Control," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 55, no. 4, pp. 3946-3954, July-Aug. 2019.
- [7] M. di Benedetto, A. Lidozzi, L. Solero, F. Crescimbinì and P. J. Grbović, "Low Volume and Low Weight 3-Phase 5-Level Back to Back E-Type Converter," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 55, no. 6, pp. 7377-7388, Nov.-Dec. 2019.
- [8] F. Pulsinelli, M. di Benedetto, A. Lidozzi, L. Solero and F. Crescimbinì, "Power Losses Distribution in SiC Inverter Based Electric Motor Drives," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 55, no. 6, pp. 7843-7853, Nov.-Dec. 2019.
- [9] L. Bigarelli, M. di Benedetto, A. Lidozzi, L. Solero, S. A. Odhano and P. Zanchetta, "PWM-Based Optimal Model Predictive Control for Variable Speed Generating Units," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 56, no. 1, pp. 541-550, Jan.-Feb. 2020.
- [10] M. di Benedetto, A. Lidozzi, L. Solero, F. Crescimbinì and P. J. Grbović, "Reliability and Real-Time Failure Protection of the Three-Phase Five-Level E-Type Converter," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 56, no. 6, pp. 6630-6641, Nov.-Dec. 2020.
- [11] M. di Benedetto, A. Lidozzi, L. Solero, F. Crescimbinì, and P.J., Grbović, (2020), Symmetrical three-phase seven-level E-type inverter for PV systems: design and operation. IET Renew. Power Gener., 14: 2852-2863.
- [12] M. di Benedetto; F. Orteni; A. Lidozzi; L. Solero, 2021. "Design and Implementation of Reduced Grid Impact Charging Station for Public Transportation Applications" World Electr. Veh. J. 12, no. 1: 28.
- [13] L. Bigarelli, M. di Benedetto, A. Lidozzi, L. Solero and P. J. Grbović, "FPGA-Based Permanent Magnet Synchronous Machine Emulator With SiC Power Amplifier," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 57, no. 6, pp. 6117-6130, Nov.-Dec. 2021.
- [14] S. Menicanti, M. di Benedetto, D. Marinelli, F. Crescimbinì, "Recovery of Trains' Braking Energy in a Railway Micro-Grid Devoted to Train plus Electric Vehicle Integrated Mobility," in Energies, 2022; 15(4):1261.

- [15] G. Di Nezio, M. di Benedetto, A. Lidozzi, L. Solero, "Analysis and Design of a High-Efficiency SiC MOSFET 6-Phase Boost Rectifier," in *Energies*, 2022; 15(6):2175.

Roma, 06/06/2022

www.AlboPretorionline.it

Curriculum dell'attività scientifica e didattica

di

Marco di Benedetto

www.AlboPreparatoriOnline.it

INDICE

| | |
|----------------------------------|----|
| I. Informazioni Generali..... | 3 |
| II. Attività didattica | 4 |
| III. Attività scientifica | 5 |
| ELENCO DELLE PUBBLICAZIONI | 18 |

www.Albopretorionline.it

I. Informazioni Generali

Ho conseguito la laurea magistrale in Ingegneria Elettronica nel 2014 presso l'Università degli Studi di Roma "Tor Vergata" con la tesi dal titolo: "Controllori risonanti a compensazione di fase con adattamento al carico per applicazioni di generazione in isola: analisi teorico-sperimentale".

Ho conseguito presso l'Università degli Studi "ROMA TRE" il titolo di dottorato di ricerca in Ingegneria Meccanica e Industriale nel 2017 con la tesi dal titolo: "3-Phase 5-Level E-Type Converter Topologies for Industrial Power Supply Applications". Dal 01/06/2016 al 30/11/2016, nell'ambito dell'attività di dottorato, ho svolto un intenso lavoro di ricerca presso l'azienda HUAWEI TECHNOLOGIES Duesseldorf GmbH (Energy Competence Center Europe –ECCE- Nuremberg/Munich) mirato a sviluppare strutture di conversione statica di energia elettrica utilizzate in ambito industriale.

Dal 01/07/2014 al 01/10/2014 sono stato vincitore di un incarico di collaborazione coordinata e continuativa presso il Dipartimento di Ingegneria dell'Università degli Studi "ROMA TRE". L'attività di collaborazione si è focalizzata sull'analisi delle perdite di un convertitore elettronico di potenza a 5 livelli con funzioni di raddrizzatore.

Dal 01/10/2015 al 01/12/2015 sono risultato vincitore di un incarico di prestazione d'opera occasionale per test di collaudo su moduli elettronici di potenza per applicazioni multilivello. L'attività si è svolta presso il Dipartimento di Ingegneria dell'Università degli Studi "ROMA TRE".

Dal 01/04/2017 al 31/08/2017 sono risultato vincitore di un incarico di prestazione d'opera occasionale per il calcolo analitico e modellizzazione reale di un sistema per l'identificazione delle perdite di potenza in un convertitore elettronico di tipo DC-AC con dispositivi a carburo di silicio. L'attività si è svolta presso il Dipartimento di Ingegneria dell'Università degli Studi "ROMA TRE".

Dal 1/11/2017 al 31/10/2018 sono risultato vincitore di un assegno di ricerca nel settore scientifico disciplinare ING-IND/32 Convertitori, Macchine e Azionamenti Elettrici presso il Dipartimento di Ingegneria dell'Università degli Studi "ROMA TRE". L'attività di ricerca è stata incentrata sulla progettazione, realizzazione e collaudo di un sistema elettronico di potenza da impiegare come gruppo statico di continuità (UPS).

Dal 01/11/2018 al 30/10/2019 sono risultato vincitore di un assegno di ricerca nel settore scientifico disciplinare ING-IND/32 Convertitori, Macchine e Azionamenti Elettrici, presso il Dipartimento di Ingegneria dell'Università degli Studi "ROMA TRE". L'attività di ricerca è volta alla progettazione di un prototipo di convertitore elettronico di potenza, per stazioni di ricarica di nuova generazione utilizzate da veicoli Elettrici e Ibridi. in grado di consentire scambi energetici bidirezionali con la rete elettrica di distribuzione.

Dal 02/11/2019 ad oggi sono ricercatore TD di tipo A nel Settore disciplinare 09/E2 – S.S.D ING-IND/32 presso il Dipartimento di Ingegneria dell'Università degli Studi "ROMA TRE". L'impegno orario complessivo per le attività di ricerca, di didattica, di didattica integrativa e servizi agli studenti prevede 1500 ore annue, di cui 350 per le attività di didattica, di didattica integrativa e servizi agli studenti.

Dal 01/02/2022 ho conseguito l'Abilitazione Scientifica Nazionale alle funzioni di professore universitario di Seconda Fascia nel Settore Concorsuale 09/E2 - Ingegneria dell'Energia Elettrica.

Le mie competenze specifiche fanno riferimento alla progettazione e al controllo di sistemi elettronici di potenza per diverse applicazioni, quali gruppi statici di continuità, sistemi di generazione da fonti rinnovabili e le smart grid, veicoli ibridi ed elettrici. Negli ultimi anni ho acquisito competenze nell'ambito dell'implementazione di algoritmi di controllo basati su FPGA e Digital Signal Processor dedicati all'elettronica di potenza e agli azionamenti elettrici. Inoltre, ho acquisito competenze sia con software per lo sviluppo di acquisizione, analisi e controllo in real-time e in FPGA, quale LabVIEW®, sia con software di sviluppo per la progettazione e il controllo di sistemi elettronici di potenza ed azionamenti elettrici, quali Altium Designer (per la realizzazione del layout delle schede elettroniche), Matlab®, Simulink® (per calcolo scientifico delle simulazioni di sistemi dinamici) e PLECS® (per la simulazione di sistemi elettronici di potenza).

II. Attività didattica

Dal 2015 al 2018 ho svolto attività di docenza nell'ambito dei corsi ufficiali National Instruments LabVIEW Core I e LabVIEW Core II.

Dal 02/11/2017 al 28/02/2018 ho ottenuto un incarico per la didattica integrativa del corso "Macchine e Azionamenti Elettrici" nell'ambito del corso di laurea magistrale in ingegneria meccanica presso il Dipartimento di Ingegneria dell'Università degli Studi "ROMA TRE", per un numero totale di 20 ore.

Dal 15/11/2018 al 28/02/2019 ho ottenuto un incarico per la didattica integrativa del corso "Macchine e Azionamenti Elettrici" nell'ambito del corso di laurea magistrale in ingegneria

meccanica presso il Dipartimento di Ingegneria dell'Università degli Studi "ROMA TRE", per un numero totale di 15 ore.

Dal 01/10/2018 al 04/10/2018 ho svolto attività di docenza per un numero totale di 20 ore presso la "School of Engineering & Physics of the University of South Pacific – USP" del corso "Graphical Programming for DSP-FPGA based Control Platforms in Power Electronics Systems" rivolto a studenti di laurea magistrale, dottorandi e assegnisti di ricerca.

Dal 2017 al 2019 ho ottenuto un contratto di insegnamento in quanto responsabile del corso di Elettrotecnica nell'ambito del corso di Laurea in Ingegneria Informatica presso la facoltà di Scienze e Tecnologie Applicate dell'Università degli Studi "Guglielmo Marconi", Via Plinio, 44, 00193 Roma RM.

Dal 08/07/2019 al 30/10/2019 ho avuto un incarico di docenza per i corsi di "Power Electronics", e di "Power Electronics for distributed Generation and Renewable Energy System" per un numero totale di 196 ore presso la "School of Engineering & Physics of the University of South Pacific – USP".

Dal 2020 ad oggi svolgo presso il Dipartimento di Ingegneria dell'Università degli Studi "ROMA TRE" attività didattica in un corso nella Laurea Magistrale di Ingegneria Meccanica. In particolare, sono responsabile del corso di "Sistemi Elettronici per l'Ingegneria Meccanica". Il corso prevede, oltre a lezioni ed esercitazioni numeriche, verifiche sperimentali e applicazioni pratiche in laboratorio sugli argomenti di maggiore rilievo. Il corso intende fornire i concetti di base inerenti all'elettronica analogica e digitale, di segnale e di potenza. Verranno illustrate le caratteristiche dei principali dispositivi elettronici a commutazione naturale e forzata con esempi e relative applicazioni, le configurazioni analogiche fondamentali per amplificazione e filtraggio di segnali elettrici, l'algebra booleana ed i circuiti digitali. Bus e protocolli di comunicazione in ambito industriale.

Svolgo, inoltre, presso il Dipartimento di Ingegneria dell'Università degli Studi "ROMA TRE" attività di supporto alla didattica dei corsi di laurea magistrale di seguito elencati:

- Elettronica di Potenza, Prof. Fabio Crescimbin;
- Progetto di Convertitori Statici di Potenza, Prof. Luca Solero;

III. Attività scientifica

La mia attività scientifica, condotta presso il Dipartimento di Ingegneria dell'Università degli Studi "ROMA TRE", è iniziata nel 2014. Con l'esperienza maturata nel corso della preparazione alla tesi e durante il periodo di collaborazione coordinata e continuativa con il

Dipartimento di Ingegneria dell'Università degli Studi "Roma Tre", mi sono interessato a strutture di conversione di energia elettrica e tecniche di controllo per i sistemi di generazione grid-connected e stand-alone.

Successivamente, durante il periodo del dottorato di ricerca, ho avuto l'opportunità di collaborare con il Prof. Petar Grbovic (attualmente Professore presso l'Università di Innsbruck) nell'ambito di sistemi di conversione statica di potenza di tipo multilivello per applicazioni da fonte di energia rinnovabili, generazione ad alta velocità, aerospaziale e gruppi statici di continuità.

La mia attività di ricerca scientifica si basa principalmente sulla progettazione e sul controllo di sistemi elettronici di conversione statica di potenza, con l'obiettivo di individuare e testare soluzioni innovative in diversi ambiti applicativi. In particolare, mi sono occupato di apparati elettronici di conversione nei seguenti settori applicativi: sistemi di generazione sia connessi alla rete elettrica che isolati dalla rete elettrica, apparati di generazione basati su macchine sincrone ad elevata frequenza di uscita, gruppi statici di continuità ad elevati valori di efficienza e densità di potenza. Inoltre, nel corso del 2018 la mia attività scientifica si è focalizzata sull'analisi di strutture di conversione statica di potenza, con caratteristiche di modularità, per stazioni di ricarica di veicoli elettrici.

Dal 2016 ad oggi ho partecipato in qualità di relatore alle seguenti conferenze internazionali: IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), IEEE Industrial Electronics Society (IECON), PhD Research in Microelectronics and Electronics (PRIME), International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM).

Attività di ricerca e pubblicazioni scientifiche

I risultati della mia attività di ricerca hanno portato a pubblicazioni scientifiche di rilievo internazionale. Tali elaborati, possono essere raggruppati in tre filoni di ricerca:

1. sistemi di generazione connessi alla rete elettrica e in isola,
2. sistemi di generazione basati su macchine sincrone ad elevata frequenza,
3. gruppi statici di continuità ad elevati valori di efficienza e densità di potenza.

1. Sistemi di generazione connessi alla rete elettrica e in isola

La liberalizzazione del settore elettrico e la necessità di utilizzare combustibili meno inquinanti hanno portato negli ultimi anni al miglioramento delle tecnologie e all'avanzamento delle strategie di controllo per la generazione distribuita basata sull'utilizzo

di convertitori statici di potenza. In particolare, i sistemi di generazione isolati dalla rete elettrica permettono di fornire potenza elettrica anche nelle zone più impervie dove la rete pubblica non è disponibile. In questo caso, le strutture di conversione hanno la funzione di erogare, ad un certo numero di carichi, potenza elettrica con caratteristiche quanto più possibile simili a quelle della normale rete di distribuzione in bassa tensione. Per questo motivo, i dispositivi di conversione devono possedere caratteristiche sufficienti a garantire la necessaria continuità e affidabilità nell'erogazione della potenza in tutte le condizioni di carico, incluso carichi non lineari e distorcenti, rispettando gli standard qualitativi richiesti. In questo ambito, la mia attività di ricerca si è focalizzata sullo studio di algoritmi di controllo in grado di alimentare carichi con bassissimo THD. L'analisi teorico-sperimentale effettuata su un particolare regolatore, detto regolatore risonante, ha permesso di ricavare una nuova forma di controllore in grado di agire sulla fase del sistema. Come risultato di tale studio, in [1], [4] è stato proposto un algoritmo di controllo, basato sull'utilizzo di più regolatori risonanti, in grado di ridurre fortemente il THD della tensione in uscita dal convertitore DC-AC a 4 rami. Tale algoritmo, in funzione della potenza attiva e reattiva stimata in uscita, permette di compensare le variazioni di ampiezza e di fase provocate dall'interazione filtro-carico per ogni armonica, fornendo i valori del guadagno e della fase da compensare per ogni regolatore risonante facente parte della struttura di controllo. In questo modo, la struttura di controllo è in grado di cambiare sia l'ampiezza che la fase di ogni regolatore risonante in base alle condizioni del carico, migliorando sia la stabilità del sistema che l'accuratezza del controllo. L'algoritmo è stato implementato su DSP e testato su un prototipo di inverter a 4 rami con un filtro di uscita appositamente progettato. Al fine di migliorare il THD della tensione in uscita dall'inverter a 4 rami e, nel contempo, migliorare il comportamento dinamico del controllo, il regolatore risonante è stato combinato con un osservatore di disturbo [18] e [56]. In questo caso, l'armonica fondamentale della tensione di uscita viene controllata dal regolatore risonante e l'osservatore di disturbo consente di compensare tutte le altre armoniche di tensione. L'algoritmo di controllo è stato implementato su FPGA tramite ambiente LabVIEW e testato sul convertitore DC-AC a 4 rami utilizzando una scheda di controllo appositamente progettata per dispositivi elettronici di potenza [8]. In [50] è stata proposta una strategia di controllo avanza che mira a rilevare e a gestire i guasti in un sistema di conversione di tipo DC-AC a 4 rami. La strategia di rilevamento dei guasti e di protezione del convertitore è stata implementata utilizzando la combinazione di un controllore risonante in $\alpha\beta$ e un osservatore ripetitivo. Tale strategia di controllo è stata inizialmente validata attraverso simulazioni eseguite in ambiente in ambiente MATLAB/Simulink e successivamente è stata testata sul prototipo di inverter a 4

rami. In [52] è stato presentato un algoritmo di controllo basato sul regolatore ripetitivo a frequenza variabile. In tale contributo viene proposta una variante di regolatore ripetitivo in grado di avere ottime prestazioni anche quando il segnale di riferimento presenta una frequenza variabile. Tale algoritmo è stato validato sperimentalmente mediante l'utilizzo di un inverter sia connesso che disconnesso dalla rete. In [58] è stata effettuata una analisi sullo stato dell'arte del regolatore ripetitivo utilizzato nell'elettronica di potenza e negli azionamenti elettrici. Sempre in termini di stato dell'arte vengono trattati i concetti di base del controllo ripetitivo, le diverse strutture e i metodi di progettazione. Vengono, inoltre, riportati alcuni esempi di algoritmi di controlli basati su regolatori ripetitivi applicati ai sistemi di conversione.

Un'altra strategia di controllo applicata ad un inverter di tipo multilivello per applicazione in isola è stata analizzata in [17]. La strategia di controllo proposta in tale articolo, chiamata concurrent control, utilizza un regolatore ripetitivo combinato ad un regolatore proporzionale integrale che, grazie ad un circuito di rilevamento della corrente, consente anche la protezione del sistema di conversione da eventuali sovracorrenti. Infatti, in tale strategia di controllo ci sono due modalità di funzionamento. Nella prima modalità, il controllo regola la tensione in uscita dall'inverter in tutte le condizioni di carico. Quando il circuito di rilevamento della corrente individua un cortocircuito si entra nella seconda modalità ed il controllo passa a regolare la corrente.

Negli ultimi anni l'idea di sfruttare l'energia rinnovabile per alimentare il consumo di elettricità degli impianti off-shore di petrolio e gas, ha guadagnato sempre più attenzione, soprattutto per le conseguenze in termini di riduzione delle emissioni di CO₂. In tale ambito, in [28] è stato implementato un algoritmo di predizione per gestire i flussi di potenza nelle piattaforme petrolifere off-shore con fonti rinnovabili. Sono state effettuate simulazioni per diversi scenari al fine di verificare la robustezza non solo della struttura dell'algoritmo di controllo proposto ma anche del dimensionamento degli elementi della microgrid, ovvero turbina a gas, parco eolico e stoccaggio elettrochimico. La struttura di controllo è stata validata attraverso simulazioni effettuate in ambiente MATLAB. I risultati sono presentati per diversi scenari che dimostrano la robustezza e l'efficacia della strategia di controllo proposta.

I sistemi di conversione connessi alla rete elettrica sono concettualmente e funzionalmente differenti dai sistemi per applicazioni isolate. Lo scopo di questi dispositivi, a differenza degli inverter per applicazioni isolate, non è più quello di regolare la tensione di uscita per fornire un servizio elettrico idoneo ma quello di regolare la corrente in uscita dall'inverter e iniettarla in rete nel modo più efficiente possibile. Lo studio di configurazioni per convertitori elettronici

di potenza con connessione alla rete elettrica ha portato alla pubblicazione [20]. In [20] è stata proposta una nuova configurazione di convertitore di tipo multilivello, chiamata inverter trifase di tipo E-Type ($3\Phi 5L$ E-Type Converter), che consente di ottenere un'elevata efficienza di conversione, alta densità di potenza e bassa distorsione armonica della tensione di uscita. In tale configurazione, sono state calcolate le perdite associate ai dispositivi a semiconduttore, switch e diodi, utilizzando il software di simulazione PLECS toolbox di Simulink che lavora in ambiente Matlab. In aggiunta, è stata implementata una nuova strategia di controllo, basata su regolatore risonante, che permette di far lavorare il convertitore anche isolato dalla rete. La topologia di tipo E-Type è basata sui semiconduttori di potenza a commutazione rapida. Questi dispositivi di potenza rappresentano la parte fragile dell'intero sistema di conversione e, pertanto, un eventuale guasto a tali dispositivi dovrà essere gestito adeguatamente per evitare la rottura dell'intero sistema. In tal senso, la mia ricerca si è focalizzata sulla tolleranza ai guasti inverter trifase a 5 livelli di tipo E-Type. In particolare, in [30] e [40] sono stati analizzati due tipi di guasti dei dispositivi di potenza: guasti in corto circuito e guasti a circuito aperto. Successivamente, è stato implementato un algoritmo di controllo in grado di rilevare, isolare e gestire i guasti, garantendo, in alcuni casi, il normale funzionamento del sistema. L'efficacia della strategia di controllo proposta è stata validata analiticamente sul prototipo del convertitore a 5 livelli confermando che il convertitore è in grado di alimentare il carico in determinate condizioni di guasto, mentre in altre condizioni di guasto l'algoritmo di controllo riesce a spegnere tempestivamente il sistema, evitando, di fatto, ulteriori danni a cose e persone.

In [26] e [41] è stata proposta, analizzata e progettata una nuova struttura di tipo multilivello, chiamata inverter trifase simmetrico a 7-livelli di tipo E-Type ($S-3\Phi 7L$ E-Type), basata sulla topologia E-Type per applicazioni fotovoltaiche. Grazie alla topologia proposta è possibile estendere il range di tensione del DC-bus e utilizzare dispositivi di potenza con una bassa tensione di blocco, consentendo il miglioramento dell'efficienza di conversione. In particolare, la procedura analitica di progettazione proposta per la realizzazione del convertitore è stata poi validata con la realizzazione di un prototipo monofase dell'inverter. I risultati sperimentali, inoltre, confermano la validità della procedura di dimensionamento proposta e provano la capacità di tale topologia a raggiungere elevate efficienze di conversione. In [51] è stata proposta una variante della topologia E-Type di tipo multilivello con una tecnica di modulazione in grado di risolvere il problema dello sbilanciamento di tensione ai capi delle capacità del DC-link. Vengono presentate le modalità di funzionamento, le caratteristiche del convertitore proposto e la tecnica di modulazione a larghezza di impulso. L'analisi del convertitore proposto è stata validata sia attraverso il

modello digitale realizzato in ambiente Matlab/Simulink che sperimentalmente sul prototipo del convertitore.

In [31] viene descritto il sistema di controllo per un convertitore trifase AC-AC di tipo Neutral Point Clamp (NPC) connesso a rete quando in ingresso è presente un accumulo di energia elettromeccanico come il volano. In questo caso vengono utilizzati un controllo diretto di coppia (direct torque control) e un controllo orientato alla tensione (VOC) per controllare il raddrizzatore e l'inverter in configurazione back to back. Inoltre, viene utilizzato un controllo proporzionale-integrale frazionario (FOPI) per regolare la tensione del DC link. I risultati simulati mostrano la buona risposta dinamica del sistema proposto.

Negli ultimi decenni si è assistito ad un aumento significativo del numero di veicoli elettrici per il trasporto pubblico e privato, utilizzati in tutto il mondo. Ciò ha comportato un'elevata richiesta di potenza alla rete elettrica, soprattutto quando è richiesta la ricarica rapida e ultraveloce. L'obiettivo principale dell'attività di ricerca affrontata in [29], [35] e [38] è stato progettare una particolare topologia di convertitore di potenza multi-porta, di tipo modulare e bidirezionale, in grado di ricaricare un sistema di accumulo a bordo dei veicoli elettrici in maniera rapida (la cosiddetta "ultra-fast charge") utilizzando un sistema di accumulo e una sorgente fotovoltaica. Il sistema è realizzato attraverso il collegamento di quattro DC-DC full-bridge (Dual-Active Bridge -DAB) interconnessi tra loro da un singolo nucleo magnetico in grado di garantire isolamento galvanico tra le quattro porte. Rispetto allo stato dell'arte delle colonnine di ricarica, la soluzione proposta consente di ridurre fortemente l'ingombro dell'intero sistema andando, di fatto, ad aumentare la densità di potenza. Infatti, l'idea di realizzare un nodo magnetico con un trasformatore ad alta frequenza consente di eliminare alcuni stati di conversione dell'intero sistema oltre a garantire un isolamento galvanico. Grazie alle caratteristiche modulari del sistema di conversione proposto, è possibile estendere sia il numero di sorgenti che il numero di veicoli elettrici da ricaricare. In aggiunta, grazie alla possibilità di poter lavorare in isola non si ha il bisogno di modificare le infrastrutture della rete elettrica esistente nelle aree di installazione della colonnina di ricarica proposta. La rete elettrica esistente nelle aree di installazione della colonnina può essere utilizzata solo per ricaricare il sistema di accumulo evitando, così, picchi di potenza sulla rete elettrica di distribuzione. In [21] e [32] è stato progettato un sistema di ricarica rapida basato su super condensatori utilizzati nelle applicazioni di trasporto pubblico urbano. La stazione di ricarica è stata pensata con l'utilizzo di ultracondensatori sia a bordo del bus elettrico che alle diverse fermate. Lo studio di sistemi di ricarica alla fermata, per il trasporto elettrico urbano, è di grande interesse in quanto la sua applicazione comporterebbe l'ottimizzazione del dimensionamento tecnico-economico in diverse condizioni di esercizio.

Infatti, un veicolo progettato per essere ricaricato alla fermata ha a bordo una ridotta potenza a vantaggio di costi, pesi e ingombri. Inoltre, l'utilizzo di super condensatori permette di effettuare una ricarica alla fermata con potenza elevata in poco tempo, fornendo l'energia necessaria per arrivare alla fermata successiva. In base al livello di carica del bus elettrico, il sistema di ricarica rapida proposto è in grado di fornire una potenza massima di 180 kW senza superare i 30 secondi. Al fine di limitare la massima corrente di carica, l'autobus elettrico viene caricato in tre fasi attraverso tre diversi connettori posti tra i super condensatori a bordo dell'autobus e il sistema di ricarica rapida. L'analisi teorica e le funzionalità dell'architettura di ricarica sono stati validati attraverso test sperimentali sul prototipo realizzato. In [42] è stata progettata, implementata e testata una stazione di ricarica rapida connessa a rete per applicazioni di trasporto pubblico. La stazione di ricarica è stata realizzata con convertitori multilivello e un accumulo di energia elettromeccanico. Nello specifico, l'accumulo di energia è realizzato da un volano appositamente progettato che consente di aiutare la rete nel fornire energia ai carichi.

Una rassegna sui sistemi di conversione di tipo multi-porta utilizzati nei sistemi di distribuzione CC e CA o ibridi in uno scenario di "Internet of Energy" è stata affrontata in [57]. In particolare, le topologie di trasformatori a stato solido (SST) multi-porta sono state classificate in base a diverse caratteristiche. Inoltre, sono stati presentati e discussi due casi studio di topologie multi-porta: il primo è un convertitore CC-CC bidirezionale isolato in configurazione H-Bridge utile nelle applicazioni di ricarica rapida e il secondo caso riguarda un convertitore di tipo AC-AC a tre porte in configurazione H-Bridge in grado di replicare sia un nodo attivo di rete che controllare l'energia in diverse condizioni operative.

La pubblicazione [34] presenta i risultati di uno studio di fattibilità che è stato sviluppato per dimensionare sia un sistema di conversione che un sistema di accumulo di energia che potrebbe essere disposto nelle sottostazioni ferroviarie AC/DC per il recupero dell'energia di frenatura dei treni in sistemi ferroviari DC a 3 kV. Sulla base della valutazione dell'energia recuperabile durante un giorno di funzionamento in una data stazione ferroviaria, l'articolo presenta una configurazione adatta per un sistema di recupero dell'energia che potrebbe essere utilizzato per alimentare delle utenze. Sulla base dei risultati ottenuti in [34], nella pubblicazione [54] è stato proposto un modello quasi stazionario di una sottostazione per valutare la quantità di energia recuperabile in ogni singola giornata di esercizio dei treni in partenza e in arrivo. In tale contributo è stato proposto un sistema di conversione di tipo multi-porta bidirezionale isolata in configurazione H-Bridge e una struttura di controllo utilizzata per la regolazione del flusso di potenza dalla catenaria alla micro-rete durante un transitorio di recupero energetico.

2. Sistemi di generazione basati su macchine sincrone ad elevata frequenza

Lo scenario dei sistemi di generazione di potenza elettrica si sta rapidamente spostando verso l'utilizzo di macchine con velocità di rotazione elevata, impiegate in ambito aeronautico e automobilistico. Lo sviluppo generale della tecnologia, che ha portato alla progettazione di veicoli e velivoli sempre più complessi, ha determinato, nel tempo, un uso più intenso e diversificato dell'energia elettrica a bordo di tali sistemi. Logicamente, all'aumentare della potenza elettrica, aumentano le dimensioni dei sistemi elettronici di potenza necessari ad alimentare anche eventuali carichi ausiliari. Infatti, gli aeromobili moderni, così come i veicoli a propulsione elettrica, sono un'integrazione di complessi componenti tecnologiche interagenti alimentate da una sofisticata architettura di distribuzione della potenza. In spazi limitati, l'aumento delle dimensioni del sistema elettrico è considerato lo svantaggio principale. Pertanto, la necessità di riduzione dei pesi e dei volumi dell'unità di generazione ha portato piuttosto a concentrarsi sull'aumento di velocità di rotazione dei motori primi per ottenere maggior potenza spingendo, in tal modo, la frequenza elettrica fondamentale in uscita dall'unità di generazione a valori sempre maggiori (ordine dei kHz). Tali generatori ad elevata velocità sono direttamente accoppiati alle turbine al fine di fornire, per esempio attraverso un convertitore elettronico di potenza, l'alimentazione al sistema di distribuzione elettrica a bordo di veicoli e velivoli. Di riflesso, è di interesse l'individuazione di idonee configurazioni per la conversione statica che possano lavorare a elevate frequenze di commutazione limitando, quanto più possibile, la dissipazione di potenza.

In tale ambito, l'obiettivo della mia ricerca è stato quello di identificare e analizzare una particolare topologia di convertitore di tipo multilivello operante a 5 livelli di tensione. La pubblicazione [7] illustra le prestazioni in termini di rendimento e l'analisi specifica delle perdite di potenza nei dispositivi della topologia di convertitore trifase a 5 livelli. Nel convertitore in esame la conversione statica di energia avviene attraverso due stadi: il convertitore multilivello AC/DC (5L E-Type Rectifier) e il convertitore multilivello DC/AC (5L E-Type Inverter). Tale configurazione è stata chiamata three-phase Back to Back E-Type 5-Level Converter (3 Φ 5L BTB E-Type Converter). Lo scopo della mia ricerca è stato realizzare un sistema che riducesse sensibilmente le perdite di potenza, senza trascurare, comunque, la possibilità di riduzione del peso del sistema stesso. Il lavoro è stato affrontato in modo da prestare particolare attenzione all'analisi delle perdite dei dispositivi a semiconduttore utilizzati all'interno della topologia proposta. L'attività di investigazione è stata condotta con riferimento a diverse tecnologie di dispositivi di potenza (IGBT, SiC).

Lo studio sui sistemi di conversione statica di tipo multilivello impiegati nelle unità di generazione per le applicazioni aeronautiche ha portato alla pubblicazione [2]. Nella ricerca in oggetto sono state investigate nuove soluzioni per bilanciare le tensioni sui condensatori di uscita dal convertitore di tipo multilivello, senza l'utilizzo di circuiti passivi. In particolare, in [2] è stata presentata una struttura di conversione a 5 livelli di tensione, operante da raddrizzatore AC-DC, capace di fornire una tensione in corrente continua a $\pm 270V$, a partire da generatori elettrici con elevata velocità di rotazione e forza elettromotrice a frequenza fondamentale. In uscita dal raddrizzatore AC-DC vengono utilizzati dei convertitori DC-DC in configurazione ISOP (Input-Series Output-Parallel) per alimentare carichi a 28V. Inoltre, sono state proposte due strategie di controllo, denominate Coupled Balancing Control Strategy- CBCS e Decoupled Balancing Control Strategy - DBCS, in grado di bilanciare le tensioni sui quattro condensatori in serie in uscita dal raddrizzatore e, nel contempo, regolare la tensione di uscita a 28V.

Una soluzione più avanzata del convertitore statico di potenza di tipo multilivello descritto in [2] è stata proposta in [16]. In questo lavoro, la struttura del raddrizzatore a 5 livelli viene modificata per avere migliori prestazioni in termini di efficienza. La nuova configurazione è stata analizzata considerando la combinazione di diverse tecnologie di dispositivi di potenza (CoolMOSFET, OptiMOSFET e SiC).

In generale, diverse topologie di motore primo, come ad esempio motori a combustione interna, turbine eoliche e turbine idrauliche, sono spesso accoppiate a generatori elettrici a velocità variabile. Questo è il caso descritto nella pubblicazione [11], in cui sono stati eseguiti test sperimentali condotti su una struttura di conversione AC-DC direttamente connessa a una unità di generazione a velocità variabile azionata da un motore primo nel caso di applicazioni per veicoli ibridi.

I convertitori statici di potenza normalmente richiedono circuiti di controllo per garantire una corretta regolazione delle grandezze elettriche di interesse. Per progettare accuratamente l'anello di controllo dei convertitori, è necessario realizzare il modello dinamico dei convertitori. A causa della natura non lineare del convertitore a commutazione è difficile prevederne le caratteristiche dinamiche. Per superare questo problema, è necessario un modello analitico basato sulla conoscenza del comportamento fisico del circuito. Lo studio del modello ai grandi segnali del convertitore a 5 livelli proposto in [2] è descritto in [3] e [9]. Utilizzando la tecnica State Space Averaging è stata ricavata l'espressione analitica rappresentativa del modello medio del convertitore in esame. Il modello ai grandi segnali del convertitore proposto è stato validato attraverso il confronto diretto con il modello switching realizzato in ambiente Matlab/Simulink. Sulla base del modello ai grandi segnali

è stato proposto in [6] e [12] il modello ai piccoli segni del convertitore a 5 livelli. Il modello proposto è validato sperimentalmente su un prototipo trifase di raddrizzatore a 5 livelli. Tali analisi forniscono informazioni utili sia sul funzionamento statico che dinamico dell'intero sistema consentendo di dimensionare al meglio il sistema di controllo.

In diverse applicazioni, così come in ambito aeronautico, sono richieste adeguate ridondanze di tutti i sistemi al fine di garantire alte condizioni di sicurezza. A tal fine, la mia ricerca si è focalizzata sulla tolleranza ai guasti del raddrizzatore multilivello utilizzato in coppia con un generatore sincrono a magneti permanenti. In [5] sono state analizzate le varie modalità di guasto dei dispositivi di potenza in diverse condizioni operative del raddrizzatore a 5 livelli. In più, è stata proposta una strategia di controllo in grado di identificare il guasto di un dispositivo di potenza posizionato in uno dei rami del convertitore e di contenere il guasto stesso permettendo la continuità del funzionamento, anche a potenza ridotta.

L'utilizzo di algoritmi di controllo predittivi, nei quali l'azione di controllo, identificata attraverso l'ottimizzazione di una funzione obiettivo, permette la regolazione simultanea di diverse grandezze di interesse. Con riferimento alle applicazioni di generazione ad elevata frequenza della fondamentale, in [15] è stato introdotto un algoritmo di predizione che ha permesso di regolare la tensione del DC-link agendo sul controllo della potenza attiva e reattiva, superando, così, le complessità di carattere matematico introdotte dalla non linearità del sistema considerato. La strategia di regolazione implementata in [15] fornisce come azione di controllo lo stato discreto che l'inverter dovrà assumere durante l'intero periodo di controllo; ne consegue un funzionamento degli switch a frequenza di commutazione variabile. Per superare questo limite e di conseguenza migliorare la qualità della forma d'onda delle correnti in uscita dall'inverter, in [19] e [33] è stato sviluppato un algoritmo di controllo predittivo che, diversamente dal controllo in [15], restituisce il valore di tensione da applicare ai morsetti della macchina elettrica. Poiché tale sistema di controllo fa uso di un modulatore a larghezza di impulsi, la frequenza di commutazione risulta essere costante consentendo di migliorare la qualità della forma d'onda delle correnti di fase. La strategia di controllo è stata sviluppata in FPGA tramite l'ausilio di LabVIEW e testata su un prototipo di inverter.

Nelle applicazioni in cui è necessario controllare un azionamento elettrico, l'encoder o il resolver sono i trasduttori più utilizzati e diffusi in commercio. Questi dispositivi hanno bisogno di ulteriori circuiti elettronici per poter funzionare correttamente. Una semplice soluzione utilizzata in commercio per convertire in digitale il segnale analogico in uscita dal resolver viene offerta dai circuiti integrati chiamati resolver-to-digital-converter (RDC).

Tuttavia, in alcune applicazioni, in cui il costo e la risoluzione digitale sono fattori chiave, la soluzione integrata non rappresenta la scelta più opportuna. Nella pubblicazione [22] viene proposto e testato un algoritmo di demodulazione sincrono, utilizzato per avere misure accurate di velocità e di posizione a partire da un resolver senza l'utilizzo di circuiti integrati RDC. Tale algoritmo è stato implementato in FPGA attraverso il linguaggio di programmazione LabVIEW e testato utilizzando la scheda di controllo PED-Board.

In [23] sono stati proposti osservatori sensorless utilizzati all'interno di un sistema di controllo per inseguire il riferimento di velocità in un motore sincrono a magneti permanenti. Gli osservatori sensorless sono ottenuti a partire dalla lettura della velocità del rotore e dalla lettura di correnti e tensioni dello statore. La stima della velocità del rotore viene fornita dal filtro Kalman lineare del terzo ordine. I risultati sperimentali illustrano l'efficacia dell'approccio proposto in condizioni di tolleranza ai guasti del sensore di velocità.

In [47] è stata proposta una variante della struttura di controllo FOC per azionamenti elettrici basata sul regolatore proporzionale integrale di ordine frazionario (Fractional Order PI - FOPI). Tale regolatore è stato utilizzato all'interno dell'anello di velocità per migliorarne le prestazioni in termini dinamici. La struttura di controllo proposta, facente uso del regolatore FOPI, è stata implementata in FPGA, testata su di un azionamento elettrico e confrontata con i regolatori PI e IP. In [48] è stato proposto un osservatore non lineare (Nonlinear Unknown Input Observer – NUIO) all'interno della struttura FOC per stimare la coppia di carica e la velocità in un azionamento elettrico. L'analisi proposta è validata da risultati sperimentali effettuati su un sistema reale.

Grazie al continuo miglioramento delle tecnologie, i dispositivi a commutazione realizzati con materiali Wide-Band-Gap (WBG), come i dispositivi a carburo di silicio (SiC), hanno raggiunto un elevato livello di maturità nella maggior parte delle applicazioni industriali. Nell'ambito degli azionamenti elettrici, i SiC MOSFET sono già una valida alternativa per sostituire gli IGBT. Tuttavia, ci sono alcuni inconvenienti quando il convertitore, che fa uso di dispositivi SiC, è collegato con lunghi cavi ad un azionamento elettrico. In tale ambito, le pubblicazioni [25], [27] e [44] mostrano i risultati delle attività condotte sui dispositivi SiC quando vengono utilizzati nelle applicazioni drives. In particolare, è stata condotta un'analisi sperimentale per evidenziare il problema delle sovratensioni ai capi di un azionamento elettrico quando è connesso ad un convertitore con lunghi cavi. È stato poi discusso un caso di studio di un inverter trifase a due livelli con l'aggiunta di circuiti snubber per risolvere il problema della sovratensione. Tale inverter è stato realizzato secondo una procedura di progettazione analitica. Rispetto a un classico inverter trifase, i risultati sperimentali

confermano l'efficacia del convertitore progettato nel ridurre sensibilmente le sovratensioni ai morsetti del motore pur evidenziando una buona efficienza di conversione.

Oggigiorno, una delle soluzioni che consentono di emulare i diversi sistemi industriali, tra cui le macchine elettriche, risiede nel Power-Hardware-in-the-Loop (PHIL). In [36] e [45] viene affrontato il problema di emulare una macchina sincrona a magneti permanenti isotropa utilizzando un sistema di conversione basato sui dispositivi SiC. In particolare, è stata proposta una procedura di progettazione per poter emulare diverse caratteristiche elettriche e meccaniche dell'azionamento, come la forza controelettrica, il comportamento resistivo e induttivo, l'inerzia e il coefficiente di attrito. L'obiettivo dell'articolo proposto in [37] è, invece, emulare il comportamento ad alta frequenza di una macchina sincrona a magneti permanenti. In particolare, è stata proposta una procedura analitica per emulare l'ondulazione di corrente alla frequenza di commutazione. Quest'analisi permette di comprendere il comportamento della corrente di fase quando l'induttanza fisica installata nel PHIL è diversa da quella del sistema emulato. I risultati della simulazione confermano l'efficacia dell'analisi proposta nell'emulare il comportamento di un azionamento alla frequenza di commutazione. In [46] e [55] è stato progettato e testato sperimentalmente un sistema di conversione AC-DC di tipo esa-fase per applicazione di tipo wind offshore. In particolare, viene affrontato il dimensionamento dei dispositivi attivi mediante lo studio del voltage rating e del current rating e viene effettuata un'analisi analitica per calcolare le perdite di potenza del modulo selezionato. In seguito, vengono dimensionati analiticamente i dispositivi passivi che compongono il DC-link, attraverso lo studio della corrente efficace sul condensatore e del ripple di tensione ai capi del condensatore. L'analisi proposta è stata poi validata mediante una campagna sperimentale sul prototipo del convertitore. In [49] è stata proposta la progettazione di un generatore lineare per migliorare l'efficienza di conversione per applicazioni di raccolta di energia delle onde marine. In tale sistema sono stati utilizzati due convertitori: uno di tipo AC-DC direttamente connesso al generatore lineare e l'altro di tipo DC-AC utilizzato come front-end tra il DC-link e la rete. I convertitori proposti sono realizzati utilizzando dispositivi al Carburo di Silicio (SiC) al fine di migliorarne l'efficienza. Inoltre è stata implementata la strategia di controllo per regolare le correnti lato generatore e lato rete. Il sistema proposto è stato infine validato utilizzando il banco prova Hardware-In-the-Loop (HIL).

3. Gruppi statici di continuità ad elevati valori di efficienza e densità di potenza

Differenti strutture di conversione statica di potenza vengono impiegate con funzionamento da UPS quando sono richieste basse distorsioni armoniche della corrente iniettata in rete e

una elevata qualità della tensione che alimenta i carichi. In tale ambito, il mio lavoro di ricerca ha avuto l'obiettivo di investigare e analizzare una topologia di configurazione di convertitore elettronico multilivello in grado di soddisfare al meglio i requisiti richiesti da un UPS. In [14] l'attività di ricerca è stata incentrata su una topologia del convertitore operante come doppia conversione AC/DC-DC/AC per applicazioni UPS. Al fine di selezionare opportunamente i semiconduttori di potenza di tale configurazione, sono state valutate analiticamente le sollecitazioni di tensione dei dispositivi, calcolati gli stress di corrente dei dispositivi e, infine, stimate le perdite di potenza dei dispositivi e gli stress termici associati. In [13] e [24] viene proposta una procedura analitica per selezionare i valori di induttanza e capacità dei filtri di ingresso e di uscita del convertitore multilivello AC/DC-DC/AC di tipo Z-Type, avendo come obiettivi l'elevata efficienza di conversione energetica, il miglioramento del contenuto armonico della tensione di uscita e la riduzione sia del peso che dell'ingombro della struttura. In aggiunta, viene discussa la progettazione e l'implementazione dei dispositivi magnetici, quali l'inter-cell transformer e l'induttore. Simulazioni e test sperimentali su un prototipo per applicazioni trifasi AC-AC da 20kVA hanno permesso di validare lo studio condotto. Successivamente, l'attività di ricerca si è focalizzata sull'ottimizzazione delle prestazioni del convertitore trifase AC-AC a 5 livelli. In particolare, sulla base del sistema di conversione studiato in [13] e in [14], è stata ottenuta una nuova configurazione circuitale in [10]. Tale configurazione ha permesso di migliorare alcuni aspetti critici della precedente topologia, quale il voltage rating dei semiconduttori di potenza e l'ottimizzazione dei percorsi di corrente. In [39], [43] e [53] è stata condotta una profonda analisi della nuova struttura di conversione, sia a livello di simulazione che a livello analitico, avendo come riferimento gli obiettivi precedentemente citati: elevata efficienza, qualità delle forme d'onda e elevata densità di potenza. Il prototipo del convertitore realizzato è stato costruito per validare l'analisi teorica. La campagna sperimentale mostra buone prestazioni del raddrizzatore e dell'inverter multilivello in termini di peso, volume ed efficienza.

Compiti Organizzativi Internazionali

Dal 2017 sono membro di IEEE, IEEE Young Professionals, IEEE Industry Applications Society.

A partire dal 29 gennaio 2018 sono Associate Editor per la rivista internazionale *Electrical Systems in Transportation (IET)*.

Dal 10/09/2018 al 13/09/2018 sono stato track chair alla conferenza "*4th International Forum on Research and Technologies for Society and Industry - RTSI*" tenutasi a Palermo.

Sono stato Session Chair alla conferenza IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE) 2018 nella sessione dal titolo "AC-DC Single-Phase 2 (S192)" in sostituzione del Dott. Grant Pitel.

Sono stato Session Chair alla conferenza IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE) 2019 nella sessione dal titolo "Single Phase Multilevel Converters 2 (S136)".

Sono stato Session Chair alla conferenza IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE) 2020 nella sessione dal titolo "Single Phase Multilevel Converters 1 (S19)".

Sono stato Session Chair alla conferenza IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE) 2021 nella sessione dal titolo "Multilevel Converters – Topologies – 2 (E21)".

Sono stato Topic Chair alla conferenza IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE) 2020 nella sessione dal titolo "Multilevel Converters 1 (S19)".

Sono stato Topic Chair alla conferenza IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE) 2020 nel sub-track E08 "Multilevel Converters"

Svolgo, inoltre, attività di revisione per IEEE Industry Applications Society (IAS) e IET Electrical Systems in Transportation.

Awards

Nel 2020 ho ricevuto il premio "First Industrial Power Converters Committee (IPCC) Prize Paper Award" nell'ambito della conferenza ECCE 2020 (IEEE Energy Conversion Congress and Exposition) per la pubblicazione dell'articolo "Failure Mode Analysis of the 3-Phase 5-Level E-Type Converter" [30].

Nel 2018 ho ricevuto il premio "2018 Best Young Researcher" nella categoria junior nell'ambito della riunione Annuale CMAEL (Power Electronics, Electrical Machines, Electrical Drives).

Nel 2017 ho ricevuto il premio "Student Travel Grant" nell'ambito della conferenza ECCE 2017 (IEEE Energy Conversion Congress and Exposition), Cincinnati (USA).

Elenco delle Pubblicazioni

[1] A. Lidozzi, L. Solero, F. Crescimbeni, M. di Benedetto and S. Bifaretti, "Resonant controllers with three-degree of freedom for AC power electronic converters," 2014

- IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Pittsburgh, PA, 2014, pp. 1663-1670
- [2] M. di Benedetto, A. Lidozzi, L. Solero, P. J. Grbovic and S. Bifaretti, "ISOP DC-DC converters equipped 5-level unidirectional T-Rectifier for aerospace applications," 2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Montreal, QC, 2015, pp. 1694-1700.
- [3] M. Di Benedetto, A. Lidozzi, L. Solero, F. Crescimbinì and P. J. Grbovic, "Low frequency state-space model for the five-level unidirectional T-rectifier," 2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Montreal, QC, 2015, pp. 5102-5109.
- [4] Lidozzi, M. di Benedetto, S. Bifaretti, L. Solero and F. Crescimbinì, "Resonant Controllers with Three Degrees of Freedom for AC Power Electronic Converters," in **IEEE Transactions on Industry Applications**, vol. 51, no. 6, pp. 4595-4604, Nov.-Dec. 2015.
- [5] Lidozzi, M. di Benedetto, L. Solero, F. Crescimbinì and P. J. Grbovic, "Fault tolerance analysis for the 5-level unidirectional T-Rectifier," 2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Milwaukee, WI, 2016, pp. 1-7.
- [6] M. Di Benedetto, A. Lidozzi, L. Solero, F. Crescimbinì and P. J. Grbovic, "Small-signal model for the ISOP DC-DC converters in the 5-level T-rectifier," 2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Milwaukee, WI, 2016, pp. 1-8.
- [7] M. di Benedetto, A. Lidozzi, L. Solero, F. Crescimbinì and P. J. Grbovic, "Five-level back to back E-Type converter for high speed gen-set applications," IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Florence, 2016, pp. 3409-3414.
- [8] A. Lidozzi, M. di Benedetto, V. Sabatini, L. Solero and F. Crescimbinì, "Towards LabVIEW and system on module for power electronics and drives control applications," IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Florence, 2016, pp. 4995-5000.
- [9] M. di Benedetto, A. Lidozzi, L. Solero, F. Crescimbinì and P. J. Grbovic, "Low-Frequency State-Space Model for the Five-Level Unidirectional T-Rectifier," in **IEEE Transactions on Industry Applications**, vol. 53, no. 2, pp. 1127-1137, March-April 2017.
- [10] M. di Benedetto, L. Solero, F. Crescimbinì, A. Lidozzi and P. J. Grbović, "5-Level E-type back to back power converters—A new solution for extreme efficiency and power

- density," 2017 13th Conference on Ph.D. Research in Microelectronics and Electronics (PRIME), Giardini Naxos, 2017, pp. 341-344.
- [11] F. Crescimbin, S. Bifaretti, M. di Benedetto, A. Lidozzi, S. Pipolo and L. Solero, "Variable speed generating unit for vehicle on-board applications," 2017 International Conference of Electrical and Electronic Technologies for Automotive, Torino, 2017, pp. 1-5.
- [12] M. di Benedetto, A. Lidozzi, L. Solero, F. Crescimbin and P. J. Grbovic, "Small-Signal Model of the Five-Level Unidirectional T-Rectifier," in **IEEE Transactions on Power Electronics**, vol. 32, no. 7, pp. 5741-5751, July 2017.
- [13] M. di Benedetto, A. Lidozzi, L. Solero, F. Crescimbin and P. J. Grbovic, "Analysis and design of LC filters for the 5-level 3-phase Back to Back E-Type Converter," 2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Cincinnati, OH, 2017, pp. 3816-3821.
- [14] M. di Benedetto, A. Lidozzi, L. Solero, F. Crescimbin and P. J. Grbovic, "Performance assessment of the 5-level 3-phase back to back E-type converter," 2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Cincinnati, OH, 2017, pp. 2106-2113.
- [15] V. Sabatini, L. Bigarelli, M. di Benedetto, A. Lidozzi, L. Solero and G. Brown, "FPGA-based Model Predictive Control for High Frequency Variable Speed Generating Units," 2018 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), Amalfi, Italy, 2018, pp. 1364-1369.
- [16] M. di Benedetto, A. Lidozzi, L. Solero, F. Crescimbin and P. J. Grbovic, "Analyis and Design of 5-Level E-Type ISOP Rectifier for High Speed Gen-Set Applications," 2018 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), Amalfi, Italy, 2018, pp. 667-672.
- [17] M. di Benedetto, A. Lidozzi, L. Solero, F. Crescimbin and P. J. Grbovic, "Concurrent Control for Three-Phase Four-Wire Five Levels E-Type Inverter for Microgrids," 2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Portland, OR, 2018, pp. 202-207.
- [18] M. di Benedetto, A. Lidozzi, L. Solero, M. Tang, A. Formentini and P. Zanchetta, "Disturbance-Observer Assisted Controller for Stand-Alone Four-Leg Voltage Source Inverter," 2018 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Portland, OR, 2018, pp. 2265-2270.
- [19] L. Bigarelli, A. Lidozzi, M. di Benedetto, L. Solero, S. Odhano and P. Zanchetta, "Modulated Optimal Model Predictive Control for Variable Speed Gen-Sets," 2018

- IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Portland, OR, 2018, pp. 6859-6865.
- [20] M. di Benedetto, A. Lidozzi, L. Solero, F. Crescimbinì and P. J. Grbović, "Five-Level E-Type Inverter for Grid-Connected Applications," in **IEEE Transactions on Industry Applications**, vol. 54, no. 5, pp. 5536-5548, Sept.-Oct. 2018.
- [21] F. Ortenzi, M. Pasquali, G. Pede, A. Lidozzi, M. di Benedetto, "Ultra-fast charging infrastructure for vehicle on-board ultracapacitors in urban public transportation applications", 31st International Electric Vehicle Symposium and Exhibition, EVS 2018 and International Electric Vehicle Technology Conference 2018, EVTeC 2018; Kobe Convention Center Kobe City; Japan;
- [22] V. Sabatini, M. Di Benedetto and A. Lidozzi, "Synchronous Adaptive Resolver-to-Digital Converter for FPGA-Based High-Performance Control Loops," in **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, vol. 68, no. 10, pp. 3972-3982, Oct. 2019.
- [23] C. M. Verrelli, S. Bifaretti, E. Carfagna, A. Lidozzi, L. Solero, F. Crescimbinì, M. di Benedetto, "Speed Sensor Fault Tolerant PMSM Machines: From Position-Sensorless to Sensorless Control," in **IEEE Transactions on Industry Applications**, vol. 55, no. 4, pp. 3946-3954, July-Aug. 2019.
- [24] M. di Benedetto, A. Lidozzi, L. Solero, F. Crescimbinì and P. J. Grbović, "Low Volume and Low Weight 3-Phase 5-Level Back to Back E-Type Converter," in **IEEE Transactions on Industry Applications**, vol. 55, no. 6, pp. 7377-7388, Nov.-Dec. 2019.
- [25] F. Pulsinelli, M. di Benedetto, A. Lidozzi, L. Solero and F. Crescimbinì, "Power Losses Distribution in SiC Inverter Based Electric Motor Drives," in **IEEE Transactions on Industry Applications**, vol. 55, no. 6, pp. 7843-7853, Nov.-Dec. 2019.
- [26] M. d. Benedetto, A. Lidozzi, L. Solero, F. Crescimbinì and P. J. Grbović, "Symmetrical Three-Phase 7-Level E-Type Inverter for PV Applications," 2019 International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP), Otranto, Italy, 2019, pp. 419-426.
- [27] F. Pulsinelli, M. di Benedetto, A. Lidozzi, L. Solero and F. Crescimbinì, "Experimental Characterization of the Passive Soft-Switching Snubber Inverter in SiC Motor Drive Applications," 2019 21st European Conference on Power Electronics and Applications (EPE '19 ECCE Europe), Genova, Italy, 2019, pp. P.1-P.9.
- [28] L. Bigarelli, A. Lidozzi, M. di Benedetto, L. Solero and S. Bifaretti, "Model Predictive Energy Management for Sustainable Off-Shore Oil and Gas Platforms," 2019 21st

European Conference on Power Electronics and Applications (EPE '19 ECCE Europe), Genova, Italy, 2019, pp. P.1-P.10.

- [29] M. L. Mendola, M. di Benedetto, A. Lidozzi, L. Solero and S. Bifaretti, "Four-Port Bidirectional Dual Active Bridge Converter for EVs Fast Charging," 2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Baltimore, MD, USA, 2019, pp. 1341-1347.
- [30] M. d. Benedetto, A. Lidozzi, L. Solero, F. Crescimbinì and P. J. Grbović, "Failure Mode Analysis of the 3-Phase 5-Level E-Type Converter," 2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Baltimore, MD, USA, 2019, pp. 6396-6403.
- [31] M. di Benedetto, A. Lidozzi, D. M. Kumar, H. K. Mudaliar and M. Cirrincione, "Control Strategy for Flywheel Energy Storage Systems on a Three-Level Three-Phase Back-To-Back Converter," 2019 International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics (ACEMP) & 2019 International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM), Istanbul, Turkey, 2019, pp. 372-376.
- [32] Ortenzi, F.; Pasquali, M.; Prosinì, P.P.; Lidozzi, A.; Di Benedetto, M. Design and Validation of Ultra-Fast Charging Infrastructures Based on Supercapacitors for Urban Public Transportation Applications. **Energies** 2019, 12, 2348.
- [33] L. Bigarelli, M. di Benedetto, A. Lidozzi, L. Solero, S. A. Odhano and P. Zanchetta, "PWM-Based Optimal Model Predictive Control for Variable Speed Generating Units," in **IEEE Transactions on Industry Applications**, vol. 56, no. 1, pp. 541-550, Jan.-Feb. 2020.
- [34] S. Menicanti, M. di Benedetto, A. Lidozzi, L. Solero and F. Crescimbinì, "Recovery of Train Braking Energy in 3 kV DC Railway Systems: a case of study," 2020 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), Sorrento, Italy, 2020, pp. 589-594.
- [35] M. di Benedetto, A. Lidozzi, L. Solero, F. Crescimbinì and S. Bifaretti, "SiC-based Four-Port DAB Converter for High Power Density Fast Charging Station," 2020 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), Sorrento, Italy, 2020, pp. 120-125.
- [36] L. Bigarelli, M. di Benedetto, A. Lidozzi, F. Crescimbinì and P. J. Grbović, "Design Issues for Real-Time PMSM Power-Hardware-in the-Loop: Analysis at Switching Frequency," 2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Detroit, MI, USA, 2020, pp. 6298-6305.
- [37] L. Bigarelli, M. di Benedetto, A. Lidozzi, L. Solero and P. J. Grbović, "Design Issues for a Real-Time PMSM Power-Hardware-in-the-Loop: Analysis at Fundamental

- Frequency," 2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Detroit, MI, USA, 2020, pp. 6306-6311.
- [38] M. di Benedetto, A. Lidozzi, L. Solero, F. Crescimbin and S. Bifaretti, "Hardware design of SiC-based Four-Port DAB Converter for Fast Charging Station," 2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Detroit, MI, USA, 2020, pp. 1231-1238.
- [39] M. di Benedetto, A. Lidozzi, L. Solero, F. Crescimbin and P. J. Grbović, "Design of High-Power Density Interleaved 3-Phase 5-Level E-Type Back-to-Back Converter," 2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Detroit, MI, USA, 2020, pp. 3957-3964.
- [40] M. di Benedetto, A. Lidozzi, L. Solero, F. Crescimbin and P. J. Grbović, "Reliability and Real-Time Failure Protection of the Three-Phase Five-Level E-Type Converter," in **IEEE Transactions on Industry Applications**, vol. 56, no. 6, pp. 6630-6641, Nov.-Dec. 2020.
- [41] M. di Benedetto, Lidozzi, A., Solero, L., Crescimbin, F. and Grbović, P.J. (2020), Symmetrical three-phase seven-level E-type inverter for PV systems: design and operation. **IET Renew. Power Gener.**, 14, 2852-2863.
- [42] di Benedetto, M.; Ortenzi, F.; Lidozzi, A.; Solero, L. 2021. "Design and Implementation of Reduced Grid Impact Charging Station for Public Transportation Applications". **World Electr. Veh. J.** 12, no. 1: 28.
- [43] di Benedetto, M.; Lidozzi, A.; Solero, L.; Crescimbin, F.; Grbović, P.J. "High-Performance 3-Phase 5-Level E-Type Multilevel–Multicell Converters for Microgrids". **Energies** 2021, 14, 843.
- [44] di Benedetto, M.; Bigarelli, L.; Lidozzi, A.; Solero, L. "Efficiency Comparison of 2-Level SiC Inverter and Soft Switching-Snubber SiC Inverter for Electric Motor Drives". **Energies** 2021, 14, 1690.
- [45] L. Bigarelli, M. di Benedetto, A. Lidozzi, L. Solero and P. J. Grbovi, "FPGA-Based Permanent Magnet Synchronous Machine Emulator With SiC Power Amplifier," in **IEEE Transactions on Industry Applications**, vol. 57, no. 6, pp. 6117-6130, Nov.-Dec. 202.
- [46] Di Nezio G., Di Benedetto M., Lidozzi A., Solero L. (2021). Design of a SiC Mosfet 6-Phase Boost Rectifier. In: Proceedings of 2021 21st International Symposium on Power Electronics, Ee 2021. p. 1-6, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., ISBN: 978-1-6654-0187-6, srb, 2021.

- [47] Kumar, Dhirendran M., Cirrincione, Maurizio, Mudaliar, Hiye Krishan, di Benedetto, Marco, Lidozzi, Alessandro, Fagiolini, Adriano (2021). Development of a Fractional PI controller in an FPGA environment for a Robust High-Performance PMSM Electrical Drive. In: 2021 IEEE 12th Energy Conversion Congress & Exposition - Asia (ECCE-Asia).
- [48] Mudaliar, Hiye Krishan., Kumar, Dhirendran Munith, Cirrincione, Maurizio, di Benedetto, M., Fagiolini, Adriano (2021). Improving the speed estimation by load torque estimation in induction motor drives: an MRAS and NUIO approach. In: 2021 IEEE 12th Energy Conversion Congress & Exposition - Asia (ECCE-Asia). p. 2421-2426, ISBN: 978-1-7281-6344-4.
- [49] D. Curto, M. di Benedetto, V. Franzitta, A. Lidozzi and L. Solero, "Power Conversion System for Improved Linear Generator in sea wave energy harvesting applications," Global Oceans 2020: Singapore – U.S. Gulf Coast, 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/IEEECONF38699.2020.9389381.
- [50] Tang M., Zanchetta P., di Benedetto M., Lidozzi A., Solero L. (2021). Fault Detection and Management of the Three-Phase 4-Leg Voltage Source Inverter. In: 2021 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2021 - Proceedings. p. 3615-3622, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., ISBN: 978-1-7281-5135-9, can, 2021.
- [51] Di Benedetto M., Lidozzi A., Solero L., Crescimbin F., Grbovic P. J. (2021). Self-Balancing 3-phase 5-Level Flying E-Type Inverter for Photovoltaic Applications. In: 2021 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2021 - Proceedings. p. 2588-2594, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., ISBN: 978-1-7281-5135-9, can, 2021.
- [52] di Benedetto M., Faro A., Bigarelli L., Lidozzi A., Solero L. (2021). Variable Frequency Repetitive-Resonant Combined Control for Grid-Tied and Intentional Islanding Operations. In: 2021 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2021 - Proceedings. p. 3366-3371, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., ISBN: 978-1-7281-5135-9, can, 2021.
- [53] di Benedetto M., Lidozzi A., Solero L., Crescimbin F., Grbovic P. J. (2021). Low Voltage Stress 3-Phase 5-Level Multicell E-Type Converter for Photovoltaic Applications. In: 2021 23rd European Conference on Power Electronics and Applications, EPE 2021 ECCE Europe. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., bel, 2021.

- [54] S. Menicanti, M. di Benedetto, D. Marinelli, F. Crescimbeni, "Recovery of Trains' Braking Energy in a Railway Micro-Grid Devoted to Train plus Electric Vehicle Integrated Mobility," in **Energies**, 2022; 15(4):1261.
- [55] G. Di Nezio, M. di Benedetto, A. Lidozzi, L. Solero, "Analysis and Design of a High-Efficiency SiC MOSFET 6-Phase Boost Rectifier," in **Energies**, 2022; 15(6):2175.
- [56] Di Benedetto M., Tang M., Lidozzi A., Solero L., Formentini A., Zanchetta P. (2022). Resonant and a new disturbance-observer combined control for off-grid voltage source inverter. **International Journal of Power Electronics and Drive systems**, vol. 13, p. 223-236, ISSN: 2088-8694.
- [57] Granata S, Di Benedetto M, Terlizzi C, Leuzzi R, Bifaretti S, Zanchetta P., "Power Electronics Converters for the Internet of Energy: A Review," in **Energies**. 2022; 15(7):2604.
- [58] M. Tang, M. di Benedetto, S. Bifaretti, A. Lidozzi and P. Zanchetta, "State of the Art of Repetitive Control in Power Electronics and Drive Applications," in IEEE Open Journal of Industry Applications, vol. 3, pp. 13-29, 2022.

Roma, 06/06/2022

www.albopretorioonline.it