

Integrated micropower converters in Smart Power technology

Progetto di ricerca

L'avvento dell'Internet delle Cose (IoT) sta progressivamente aumentando il numero dispositivi intelligenti e connessi¹ e, conseguentemente, il livello di pervasività delle tecnologie elettroniche. L'elevato numero delle funzioni implementate da tale tipologia di dispositivi richiede soluzioni per la gestione della potenza con caratteristiche complesse. I diversi sotto-sistemi possono infatti presentare requisiti molto differenti in termini di tensioni, correnti, potenze gestite e possono richiedere la presenza di diversi componenti dedicati alla conversione e gestione della potenza. Tali requisiti possono includere il valore, la stabilità e l'affidabilità delle suddette grandezze, il consumo in stand-by, l'efficienza di conversione. Una tematica rilevante nell'ambito dei sistemi per la gestione dell'energia riguarda in generale, quello di alimentare sistemi elettronici integrati, con particolare riferimento a system-on-chip.

I circuiti per la conversione e gestione della potenza², componenti essenziali in sistemi IoT, sono tipicamente basati su topologie a commutazione e fanno uso di componenti magnetici quali induttanze e trasformatori. Tali topologie offrono elevate efficienze di conversione, consumi intrinseci estremamente bassi³, ma rappresentano uno dei fattori limitanti per quanto attiene alla riduzione di ingombro e dissipazione di potenza. In tale contesto, sono oggetto di ricerca soluzioni basate su frequenze di commutazione elevate che consentano di utilizzare componenti magnetici a dimensioni ridotte⁴. I principali vincoli di progetto risiedono nella necessità di circuiti di controllo ad elevate larghezza di banda, la saturazione dei materiali magnetici e le correnti di picco significativamente più elevate.

Per contro, topologie circuitali basate su condensatori commutati consentono una piena integrazione in tecnologie microelettroniche⁵. Tuttavia, sono caratterizzate da efficienze di conversione altamente dipendenti dalle condizioni operative (ad es. caratteristiche della sorgente e del carico) e spesso limitate. Un'ulteriore limitazione di tali topologie consiste nella difficoltà di effettuare *maximum power point tracking* (MPPT) con carichi e sorgenti di energia discontinui o intermittenti, estraendo quindi meno potenza di quella effettivamente disponibile nelle medesime condizioni. L'assenza di componenti magnetici offre specifici vantaggi laddove la miniaturizzazione delle dimensioni finali del sistema è di particolare interesse, come ad esempio nell'ambito dei sistemi integrati, tra cui system-on-chip, tag RFID integrati, etc.

Inoltre, poiché in applicazioni IoT i carichi sono caratterizzati da consumi di corrente discontinui con alta variabilità e valori di picco elevati, il circuito di controllo del convertitore è normalmente progettato per gestire in maniera efficiente le condizioni più restrittive. Tuttavia, questo risulta in consumi interni elevati ed efficienza ridotta nei regimi di funzionamento caratterizzati da prevalente inattività (es. carico in stand-by). In quest'ottica è strategico cercare di ottenere un adattamento dinamico delle caratteristiche dell'anello di controllo del convertitore rispetto alle condizioni di carico effettivo⁶.

Il progetto di ricerca relativo a questo Assegno di Ricerca si inserisce nel contesto precedentemente descritto ed ha l'obiettivo principale di sviluppare soluzioni circuitali, sia a componenti discreti che in tecnologia CMOS, per la realizzazione di circuiti convertitori DC/DC di micropotenze per applicazioni IoT. Le caratteristiche principali da perseguire saranno la riduzione dell'ingombro, la capacità di operare con potenze in ingresso limitate, la capacità di adattarsi dinamicamente alle caratteristiche della sorgente e del carico.

Tra le potenziali architetture, saranno valutate soluzioni circuitali per l'implementazione di convertitori DC/DC a condensatori commutati in grado di sopperire alle limitazioni indicate in precedenza, con

¹ R. Bogue, "Towards the trillion sensors market," *Sens. Rev.*, vol. 34, no. 2, pp. 137–142, 2014.

² A. Romani, M. Tartagni, and E. Sangiorgi, "Doing a Lot with a Little: Micropower Conversion and Management for Ambient-Powered Electronics," *Computer* (Long Beach, Calif.), vol. 50, no. 6, pp. 41–49, 2017.

³ M. Dini, A. Romani, M. Filippi, and M. Tartagni, "A Nano-Current Power Management IC for Low Voltage Energy Harvesting," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 31, no. 6, pp. 4292–4304, 2015.

⁴ Q. Li, M. Lim, J. Sun, A. Ball, Y. Ying, F. C. Lee, K. D. T. Ngo, "Technology roadmap for high frequency integrated dc-dc converter", *Proc. IEEE 6th Int. Power Electron. Motion Control Conf.*, 2009, pp. 18.

⁵ D. El-Damak and A.P. Chandrakasan, "A 10 nW-1 uW Power Management IC With Integrated Battery Management and Self-Startup for Energy Harvesting Applications," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 51, no. 4, 2016, pp. 943–954.

⁶ S. Gangopadhyay, S. Bin Nasir, A. Raychowdhury, "Integrated Power Management in IoT Devices under Wide Dynamic Ranges of Operation," *Proc. 52nd ACM/EDAC/IEEE Design Automation Conf. (DAC 15)*, 2015, p. 149.

particolare riferimento: (i) alla possibilità di riconfigurare dinamicamente la topologia circuitale modulare del convertitore in modo da adattarla alle condizioni effettive di lavoro, migliorando contemporaneamente la capacità di MPPT e l'efficienza di conversione rispetto a soluzioni standard; (ii) alla riduzione delle perdite di potenza nel convertitore stesso, individuando regioni operative ottime o subottime. A tale scopo saranno sfruttate le potenzialità offerte dalle tecnologie microelettroniche smart power e BCD, con l'obiettivo di progettare e realizzare soluzioni circuitali integrate innovative.

In particolare, l'assegno di ricerca prevede i seguenti obiettivi:

- Sviluppare soluzioni e topologie circuitali microelettroniche innovative per la gestione della potenza, caratterizzati da migliori prestazioni o elementi innovativi rispetto all'attuale stato dell'arte
- Sviluppare soluzioni circuitali, a componenti discreti e in tecnologia CMOS, per la gestione di sensori
- Effettuare progettazione, simulazione e layout dei circuiti progettati in ambiente CAD microelettronico in tecnologia CMOS
- Valutare quantitativamente le prestazioni dei circuiti integrati progettati
- Caratterizzare sperimentalmente i circuiti e dispositivi realizzati tramite l'allestimento di opportuni banchi di misura e la proposta di opportuni protocolli di misura e validazione.
- Proporre applicazioni IoT dimostrative basate sui convertitori e sui sensori oggetto di studio e integranti sistemi a microcontrollore

In sintesi dovranno essere affrontate le seguenti tipologie di attività:

- Progettazione circuitale analogica e mixed-signal integrata
- Caratterizzazione di circuiti elettronici e trasduttori energetici, con allestimento di relativi banchi di misura.
- Progettazione elettronica di sistema per lo sviluppo di dimostratori

Durante il periodo di ricerca, il laboratorio fornirà tutte le competenze, il know-how e la strumentazione necessari per raggiungere gli obiettivi della ricerca. Il ricercatore sarà inserito nell'ambito di un team di progettazione integrata presso il Centro di Ricerca ARCES in cui potrà beneficiare di numerose competenze mutuamente complementari tra loro. In particolare, l'assegnista di ricerca avrà la possibilità di continuare a collaborare e di confrontarsi con i partner industriali del Centro di Ricerca ARCES coinvolti nella ricerca.

Obiettivo parallelo dell'attività sopra descritta sarà la divulgazione dei risultati di rilievo che saranno progressivamente ottenuti mediante la sottomissione di pubblicazioni scientifiche presso riviste internazionali e principali conferenze.

Piano di attività e progetto formativo

Il progetto formativo che si accompagna al progetto di ricerca descritto ha diversi obiettivi:

- O.1 generare conoscenze avanzate relativamente al design di circuiti gestione di micropotenze
- O.2 fornire competenze di progettazione microelettronica avanzata in ambito accademico e industriale
- O.3 fornire competenze avanzate nel settore della ricerca, con particolare riferimento alle tecniche di collaudo e caratterizzazione di componenti elettronici e circuiti integrati;
- O.4 migliorare le capacità di scrittura di testi tecnici e scientifici per la divulgazione
- O.5 fornire competenze circa la gestione, l'organizzazione ed il reporting di progetti di ricerca internazionali e industriali complessi.

Gli obiettivi O.1, O.2 e O.3 sono una diretta conseguenza dell'obiettivo del progetto di ricerca e degli studi ivi previsti. Questi non potranno infatti prescindere da una comprensione chiara delle problematiche di ricerca affrontate ed esplicitate nelle specifiche dei circuiti oggetto di studio. Verranno inoltre studiate le

soluzioni all'attuale stato dell'arte presenti in letteratura scientifica e conferenze internazionali nell'ambito della microelettronica. I suddetti obiettivi saranno raggiunti mediante lo studio diretto, le interazioni con il gruppo di ricerca e con i partner industriali del progetto di ricerca, oltre alla partecipazione a seminari e conferenze nazionali ed internazionali. Inoltre, la disponibilità dei laboratori di ricerca, della relativa strumentazione e di strumenti software CAD EDA microelettronici industriali consentirà di acquisire l'esperienza specifica nel settore della progettazione microelettronica. L'obiettivo O.2 sarà in particolare perseguito sviluppando esperienza nella progettazione e nella possibilità di prototipazione dei sistemi elettronici progettati. La formulazione e lo studio delle specifiche di progetto forniranno una serie di informazioni di riferimento nell'ambito della progettazione microelettronica offrendo una chiara visione dei vincoli di progetto e dei risultati di ricerca attesi. Durante l'attività di progettazione saranno resi disponibili strumenti CAD EDA industriali allo stato dell'arte. Le attività previste nel progetto di ricerca consentiranno dunque di acquisire ulteriore esperienza nel settore della progettazione elettronica.

L'obiettivo O.4. sarà ottenuto mediante la scrittura di relazioni tecniche interne e la sottomissione di articoli scientifici a congressi e riviste internazionali, relativamente alle attività oggetto di ricerca. L'ulteriore feedback atteso dalla *peer review* offrirà la possibilità di migliorare la qualità dei lavori.

L'obiettivo O.5 sarà ottenuto coinvolgendo l'Assegnista di Ricerca nell'attività scientifica del progetto di ricerca e proponendo la partecipazione alle relative riunioni di progetto.

Attività	Periodo			
	Q1	Q2	Q3	Q4
Studio dello stato dell'arte e simulazioni circuitali				
Progetto del convertitore di potenza				
Allestimento banchi di test per caratterizzazione sperimentale				
Divulgazione				

Tabella 1 Organizzazione temporale del periodo di ricerca annuale

Per quanto attiene al piano delle attività, il progetto di svilupperà secondo il modello di organizzazione temporale riportato in Tabella 1.

Entro i primi due trimestri verrà completato lo studio dello stato dell'arte nel settore, insieme all'esecuzione di simulazioni circuitali volte a caratterizzare le topologie di riferimento al fine di individuare le più idonee. Dal secondo trimestre inizierà l'attività di progettazione del circuito convertitore di potenza mediante CAD microelettronico. Tale circuito dovrà sottostare a determinate specifiche di progettazione, atte ad incrementare la robustezza del design, la tolleranza a variazioni di processo e temperatura operativa. Saranno sviluppati blocchi circuitali analogici per il controllo del convertitore, insieme a macrocelle digitali sviluppate eventualmente tramite sintesi logica di descrizioni HDL. Tale fase terminerà con la sottomissione a *silicon foundry* dei circuiti progettati.

Dal terzo trimestre, durante la fabbricazione del circuito presso la *silicon foundry*, l'attività si incentrerà sulla scrittura di documentazione tecnica e sull'allestimento di banchi di test per il circuito integrato, includendo il design di specifici circuiti in tecnologia PCB.

L'ultimo trimestre sarà dedicato alla caratterizzazione sperimentale del sistema e del circuito. L'attività di divulgazione tramite pubblicazioni scientifiche verrà effettuata in previsione negli ultimi due trimestri in seguito alla disponibilità di dati e risultati sperimentali.