



*Università degli Studi di Salerno*

Dottorato di Ricerca in Informatica e Ingegneria dell'Informazione  
Ciclo 31 – a.a 2017/2018

TESI DI DOTTORATO / PH.D. THESIS

# **Methods and Algorithms for Behavioral Modeling of Ferrite Power Inductors**

**KATERYNA STOYKA**

SUPERVISOR: **PROF. NICOLA FEMIA**  
CO-SUPERVISOR: **DR. GIULIA DI CAPUA**

PHD PROGRAM DIRECTOR: **PROF. PASQUALE CHIACCHIO**

Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione ed Elettrica  
e Matematica Applicata  
Dipartimento di Informatica

# Abstract

Le tecnologie dell'informazione consentono di risolvere innumerevoli problemi che riguardano tutti gli aspetti della vita quotidiana, incluse le attività tecniche relative allo sviluppo e alla progettazione di dispositivi e sistemi. Nel settore elettronico si fa largo uso di diverse tipologie di software nella risoluzione di problemi di progettazione circuitale, sia al livello di dispositivo che di sistema. L'elettronica di potenza è attualmente una delle più importanti tecnologie, in quanto grazie ad essa vengono realizzati i sistemi di alimentazione che servono ad alimentare dispositivi e sistemi elettrici ed elettronici in tutte le applicazioni (elettronica di consumo, industriale, automobilistica, aerospaziale, biomedica, ecc). Le caratteristiche degli alimentatori influenzano l'affidabilità e le prestazioni dell'intero sistema in cui essi vengono utilizzati. La progettazione di alimentatori switching (*Switch-Mode Power Supply* - SMPS) è maggiormente guidata da esigenze di alta efficienza ed alta affidabilità. La forte non-linearità di questi sistemi e la difficoltà di applicazione delle metodologie di progettazione avanzate spesso spingono gli ingegneri ad adottare un approccio conservativo, basato sull'utilizzo di metodi semplificati, robusti ed affidabili. Ciò si traduce in soluzioni subottimali di progetto, caratterizzate generalmente da un sovradimensionamento dei componenti elettronici. Questo lavoro di tesi discute applicazioni innovative di tecniche numeriche avanzate e di algoritmi intelligenti alle problematiche di ottimizzazione e di progettazione degli alimentatori switching, con particolare riferimento alla modellazione della saturazione e delle perdite dei componenti magnetici ed al loro utilizzo ottimale nella individuazione di nuove soluzioni di progetto avanzate che superano le limitazioni delle tradizionali soluzioni conservative.

L'elettronica di potenza è in continuo movimento verso una maggiore efficienza ed una maggiore densità di potenza. I componenti magnetici —

induttori e trasformatori — presentano una significativa occupazione dello spazio all'interno degli alimentatori switching, nonché una considerevole dissipazione di potenza. La riduzione delle dimensioni di questi componenti è cruciale onde ottenere un maggior livello di miniaturizzazione degli SMPS. Induttori di potenza in ferrite (*Ferrite Power Inductor* - FPI) sono quelli più frequentemente utilizzati nelle applicazioni SMPS ad elevata efficienza, grazie alle loro basse perdite. Tuttavia, gli FPI sono affetti da una brusca diminuzione dell'induttanza all'aumentare della corrente, dovuta alla saturazione magnetica del loro nucleo. Tradizionalmente, nelle applicazioni switching gli induttori in ferrite vengono fatti lavorare nella regione di *debole saturazione* (entro 20% di decadimento dell'induttanza rispetto al valore nominale). Questa limitazione è dovuta alla mancanza di metodi per una veloce predizione del reale impatto della saturazione degli FPI sulle prestazioni globali di un SMPS. La conseguenza dell'adozione di tale approccio convenzionale è che gli induttori vengono spesso sovradimensionati.

Negli ultimi anni, la saturazione degli induttori è stata oggetto delle diverse indagini scientifiche. Alcuni autori hanno dimostrato che l'utilizzo degli induttori più piccoli che lavorano in moderata saturazione consente di ottenere le soluzioni degli SMPS più compatte, caratterizzate da un accettabile livello delle perdite. Per poter sfruttare i vantaggi offerti dall'uso degli FPI in saturazione controllata, sorge la necessità di disporre di appropriati modelli della saturazione e della potenza dissipata di induttori in ferrite. Per quanto riguarda i modelli della saturazione, recentemente alcuni costruttori degli induttori hanno iniziato a fornire i profili più completi delle curve dell'induttanza *vs* corrente ( $L$  *vs*  $i_L$ ) per i loro componenti, a diverse temperature operative. Per descrivere accuratamente le curve di saturazione degli FPI, in letteratura è stato proposto il modello comportamentale basato sull'utilizzo della funzione *arcotangente*, che può essere utilizzato in combinazione con l'algoritmo numerico sviluppato per ottenere le affidabili ricostruzioni delle forme d'onda di corrente di induttori in ferrite nelle condizioni switching, compreso il funzionamento in saturazione. Tali modello ed algoritmo sono stati validati soltanto per i valori positivi della corrente dell'induttore in modo continuo (*Continuous Conduction Mode* - CCM). Tuttavia, alcune applicazioni possono comportare l'operazione dell'induttore con un elevato ripple di corrente (*High Current Ripple* - HCR), che rappresenta il nuovo trend nei convertitori switching che utilizzano i dispositivi a semicon-

---

duttore ad ampio band-gap, come il Carburo di Silicio (SiC) e il Nitruro di Gallio (GaN). Il funzionamento HCR può risultare nella presenza delle correnti negative nelle topologie di convertitori a rettificazione sincrona, e nel funzionamento dell'induttore in modo discontinuo (*Discontinuous Conduction Mode* - DCM) nelle topologie a rettificazione di diodo. Di conseguenza, l'esistente modello basato sulla funzione arcotangente deve essere esteso ed il relativo algoritmo numerico adattato anche ai casi di funzionamento che comportano le correnti negative e il modo discontinuo, al fine di sviluppare il modello di saturazione generalizzato per gli induttori di potenza in ferrite. Tuttavia, per ottenere le ricostruzioni realistiche delle forme d'onda di corrente in saturazione, occorrono le informazioni affidabili delle curve dell'induttanza  $L$  vs  $i_L$ . Le curve fornite sui datasheet dei costruttori sono caratterizzate da elevati livelli di incertezza (tipicamente,  $\pm 20\%$ ), dovuti alle tolleranze costruttive sui componenti. Inoltre, tali curve vengono misurate in condizioni sinusoidali di piccolo segnale, risultando non sufficientemente affidabili per una stima realistica del ripple picco-picco di corrente dell'induttore nelle condizioni di tensione ad onda quadra imposte dall'applicazione SMPS. Pertanto, si rende necessario lo sviluppo delle procedure sistematiche per l'identificazione delle curve  $L$  vs  $i_L$  nelle condizioni switching.

Per quanto riguarda i modelli delle perdite, la potenza totale dissipata dagli FPI è dovuta alle perdite negli avvolgimenti e le perdite nel nucleo magnetico. Tuttavia, tali perdite non sono facilmente misurabili come contributi separati nelle applicazioni switching. La potenza totale dissipata dagli FPI può essere stimata in modo alternativo sommando i contributi delle perdite in  $DC$  e in  $AC$ . Siccome le perdite in  $DC$  possono essere facilmente calcolate a partire dalla resistenza degli avvolgimenti e dalla componente  $DC$  della corrente dell'induttore, il principale problema consiste nel determinare un modello comportamentale compatto per le perdite in  $AC$ , dato in funzione delle principali condizioni operative direttamente imposte dal convertitore. Infine, i modelli della saturazione e delle perdite devono essere coerenti tra di loro. Le curve di saturazione  $L$  vs  $i_L$  dipendono dalla temperatura dell'induttore che, a sua volta, è dipendente dalla temperatura ambiente e dalle perdite totali dell'induttore, attraverso la resistenza termica del componente. Pertanto la temperatura non può essere considerata un reale *ingresso* del modello dell'induttore bensì un'*uscita* che rappresenta la risposta del dispositivo ad una determinata temperatura ambiente e ad un certo livello delle

perdite. Di conseguenza, la potenza totale dissipata dall'induttore deve essere utilizzata come uno degli ingressi del modello di saturazione, invece della temperatura. Una volta determinati i modelli della saturazione e delle perdite degli FPI, essi possono essere adottati in fase di simulazione del convertitore a livello del sistema, onde scoprire e sfruttare i vantaggi offerti dall'utilizzo degli induttori in saturazione.

Considerando le problematiche esposte, l'obiettivo di questo lavoro di tesi è quello di fornire una risposta organica e sistematica ai problemi di progettazione degli alimentatori switching ad elevata densità di potenza che sfruttano l'utilizzo di induttori in ferrite in moderata saturazione. In particolare, gli obiettivi specifici del lavoro di tesi sono:

- a) sviluppo di tecniche numeriche ed algoritmi intelligenti per la generazione e la scoperta di modelli comportamentali per la saturazione e le perdite di induttori in ferrite nelle applicazioni switching;
- b) sviluppo di algoritmi numerici evoluti che utilizzano i suddetti modelli per un'affidabile predizione del comportamento degli FPI in condizioni SMPS;
- c) sviluppo di algoritmi numerici per l'identificazione automatica degli induttori a minime dimensioni, funzionanti in saturazione sostenibile, che consentono di massimizzare la densità di potenza degli SMPS.

Il lavoro di tesi è strutturato come segue:

Nel Capitolo 1 viene presentato il modello di saturazione generalizzato, basato sulla funzione arcotangente, che descrive accuratamente la curva di saturazione  $L$  vs  $i_L$  di induttori in ferrite. Tale modello può essere utilizzato in combinazione con l'algoritmo numerico proposto per un'affidabile predizione delle forme d'onda di corrente dell'induttore in qualsiasi condizione operativa, inclusa la saturazione.

Nel Capitolo 2 è discusso l'approccio evolutivo per l'identificazione delle curve di saturazione di induttori in ferrite a partire dalle misure sperimentali di tensione, corrente e temperatura dell'induttore nelle applicazioni switching. Di seguito viene presentato l'approccio alternativo basato sulle approssimazioni locali e globali della curva di saturazione, ottenute nelle condizioni di piccolo ripple ed ampio ripple di corrente, rispettivamente.

Nel Capitolo 3 viene presentato il modello non-lineare di induttori in ferrite aventi l'air-gap a gradino. Il modello di saturazione basato sulla funzione arcotangente, proposto nel Capitolo 1 per gli induttori con l'air-gap fissato, è esteso al modello basato sulla *doppia arcotangente*. Tale modello descrive accuratamente la curva di saturazione degli FPI con l'air-gap a gradino e consente di ottenere una corretta predizione delle forme d'onda della loro corrente in saturazione.

Nel Capitolo 4 viene discusso il funzionamento degli FPI in saturazione sostenibile (*Sustainable Saturation Operation* - SSO), che si verifica se il ripple di corrente, le perdite totali e la temperatura dell'induttore rientrano nei limiti di accettabilità e sostenibilità sia per il dispositivo che per il convertitore, nonostante il decadimento dell'induttanza determinato dalla saturazione. Di seguito viene presentato l'algoritmo per l'identificazione automatica degli induttori a minime dimensioni, funzionanti in saturazione sostenibile, che consentono di massimizzare la densità di potenza del convertitore switching preservandone l'efficienza.

Nel Capitolo 5 viene discussa la modellistica comportamentale delle perdite totali degli FPI, seguita dalla modellistica del solo contributo delle perdite in *AC*. Entrambi gli approcci si basano sull'utilizzo dell'algoritmo evolutivo di Genetic Programming che identifica sia la struttura del modello di perdite che i relativi parametri numerici a partire dai dati sperimentali di potenza dissipata dall'induttore nell'ampio range delle condizioni operative SMPS.

Nel Capitolo 6 viene presentato il nuovo modello di saturazione degli FPI dipendente dalla potenza totale dissipata dall'induttore, che fornisce l'induttanza in funzione della corrente, parametrizzata rispetto alle perdite totali dell'induttore in ferrite.