CARATTERIZZAZIONE DI INDUTTORI STAMPATI PER TRASMISSIONE WIRELESS DI ENERGIA ELETTRICA IN RISONANZA

G. Puccetti, U. Reggiani, L. Sandrolini

Dipartimento di Ingegneria dell'Energia Elettrica e dell'Informazione
Università di Bologna - Viale Risorgimento 2, 40136 Bologna - giovanni.puccetti2@unibo.it

Parole chiave: induttore spirale zig-zag, autoinduttanza, mutua induttanza, risonatori.

Negli ultimi anni gli induttori stampati hanno suscitato un notevole interesse per applicazioni elettriche ed elettroniche a radio frequenza (RF), come amplificatori, oscillatori, filtri etc., per la limitata capacità parassita e per l'elevato valore di induttanza che possono presentare. In particolare, induttori stampati (o planari) di varie geometrie (per esempio quadrata, circolare o esagonale) sono stati recentemente studiati anche in applicazioni di trasmissione wireless di energia elettrica con tecnica non radiativa, che si basa sostanzialmente sulla legge dell'induzione elettromagnetica. In questo caso, l'induttore può essere utilizzato come emettitore/ricevitore, come risonatore intermedio o come singola "cella" per comporre un metamateriale (ovvero un *array* di circuiti risonanti) [1, 2]. L'efficienza di un sistema risonante è legata generalmente al fattore di qualità dei singoli induttori e alla loro mutua induttanza (in particolare al coefficiente di accoppiamento) [1, 2] e per questo motivo una buona caratterizzazione degli induttori è necessaria per il progetto e l'ottimizzazione di questi sistemi.

L'attività di ricerca è stata quindi rivolta allo studio di una procedura per il calcolo analitico e numerico dell'autoinduttanza e della mutua induttanza di un particolare tipo di induttore planare, l'induttore spirale a zig-zag (la cui forma è derivata da [3]), che presenta caratteristiche interessanti per i sistemi di trasmissione wireless di energia elettrica [4, 5]. Tale procedura si basa sulla teoria delle induttanze parziali, secondo la quale l'autoinduttanza di un induttore è ottenuta dalla somma delle autoinduttanze parziali di sottoelementi di forma più semplice (come fili, rettangoli o barre) e delle loro relative mutue induttanze parziali. La mutua induttanza, invece, è ottenuta dalla somma delle mutue induttanze parziali tra ciascuna coppia di sottoelementi che compongono due distinti induttori.

Fig. 1 Induttore spirale a zig-zag.

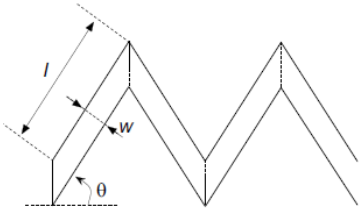

Fig. 2 Sottoelemento dell'induttore spirale a zig-zag a forma di parallelogramma e sue dimensioni geometriche principali.

Per quanto riguarda l'induttore spirale a zig-zag, il sottoelemento che lo compone è il parallelogramma il cui calcolo dell'autoinduttanza parziale è complesso in quanto essa dipende dall'angolo di spirale, θ, oltre che dalla lunghezza del sottoelemento, l, e dalla larghezza della spira, w (Fig. 2). La mutua induttanza parziale tra due parallelogrammi può essere invece calcolata

considerandoli come fili rettilinei e quindi le soluzioni di Campbell [6] per il calcolo della formula di Neumann possono essere utilizzate senza commettere un errore significativo, come dimostrato dai risultati esposti in Tab. 1. La procedura per il calcolo dell'autoinduttanza parziale di un parallelogramma e della mutua induttanza parziale tra due parallelogrammi è esposta dettagliatamente in [4].

Una volta validato il metodo, implementato in un codice Matlab, si è in grado di calcolare anche le mutue induttanze tra due induttori spirale a zig-zag e l'autoinduttanza di un induttore a zig-zag con angolo variabile, come mostrato rispettivamente in Tab. 2 e Fig. 3 [5].

Tab. 1 Valori di autoinduttanza predetti analiticamente, L_{ZSI}, confrontati con simulazioni numeriche ottenute con FastHenry, $L_{ZSI,FH}$, per diversi provini di induttore: n è il numero di giri della spira, N il numero di sottoelementi, l_0 la massima dimensione esterna e s_I è l'interspira.

Sample	n	N	l_0 $[mm]$	w $[mm]$	s_I $[mm]$	θ	L_{ZSI} $[\mu H]$	$L_{ZSI,FH}$ $[\mu H]$
I	11	44	50	1.0	1.2	0	2.52	2.38
II	11	1056	50	1.0	1.2	$\pi/6$	2.82	2.85
III	11	1056	50	1.0	1.2	$\pi/4$	2.97	2.97
IV	11	1056	50	1.0	1.2	$\pi/3$	3.55	3.23
V	11	44	100	2.0	2.4	0	5.03	4.76
VI	11	1056	100	2.0	2.4	$\pi/6$	5.65	5.70
VII	11	1056	100	2.0	2.4	$\pi/4$	5.95	5.95
VIII	11	1056	100	2.0	2.4	$\pi/3$	7.09	6.47

Tab. 2 Valori di mutua induttanza, M, e rispettivo coefficiente di accoppiamento, k, tra alcune coppie di campioni presentati in Tab.1 e posti in un piano a una distanza di circa 15mm.

Sample 1	Sample 2	M $[\mu H]$	$\lvert k \rvert$
V	V	-0.094	0.019
VI	VI	-0.090	0.016
VII	VII	-0.104	0.018
VIII	VIII	-0.115	0.016
VIII	VI	-0.091	0.014

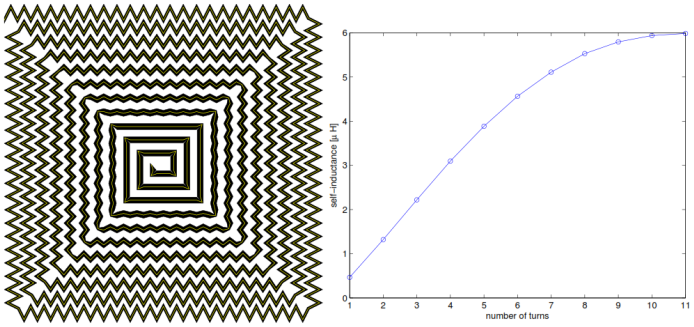

Fig. 3 Induttore spirale a zig-zag con angolo non uniforme e valore della sua autoinduttanza al variare del numero dei giri. Le dimensioni sono le stesse dei provini V-VIII. In questo caso $L_{ZSI,FH}$=5.75 µH per n=11.

BIBLIOGRAFIA

[1] C. Stevens, "Power transfer via metamaterials", *Computers, Materials and Continua*, vol.33, n.1, pp.1-18, 2013.

[2] G. Puccetti, U. Reggiani, L. Sandrolini, "Experimental analysis of wireless power transmission with spiral resonators", *Energies*, vol.6, n.11, pp. 5887-5896, 2013.

[3] W. F. Patterson et Al., "Spiral antenna with zigzag arms to reduce size", Pat. US3454951, July 8, 1969.

[4] L. Sandrolini, U. Reggiani, and G. Puccetti, "Analytical calculation of the inductance of planar zig-zag spiral inductors," *Progress In Electromagnetics Research*, vol.142, pp. 207-220, 2013.

[5] G. Puccetti, U. Reggiani, L. Sandrolini, "Inductance characterization of flat spiral inductors with uniform and nonuniform zig-zag arms", in *Proc. The 30th International Review of Progress in Applied Computational Electromagnetics (ACES)*, Jacksonville, FL, USA, March 23-27, 2014, pp. 37-42.

[6] G. A. Campbell, "Mutual inductances of circuits composed of straight wires," *Physical Review*, 5 (6), pp. 452-458., 1915.