POLITECNICO DI TORINO

Dipartimento Energia – Collegio di ingegneria elettrica

Corso di Laurea magistrale in Ingegneria Elettrica



Tesi di Laurea Magistrale

Testing e modellistica di condensatori per wireless power transfer



Relatori: Prof. Maurizio REPETTO Ing. Vincenzo CIRIMELE Laureando: Marco CASCINO matricola: 236211

ANNO ACCEDEMICO 2017 - 2018

Ringraziamenti

Vorrei ringraziare prima di tutto le persone che hanno permesso la nascita di questa tesi, il professor Maurizio Repetto e l'ingegner Vincenzo Cirimele. Proprio a quest'ultimo rivolgo un ringraziamento speciale per avermi seguito nelle varie fasi di test sperimentale, per avermi insegnato ad utilizzare gli strumenti di laboratorio necessari allo svolgimento delle prove e anche per avermi illustrato l'utilizzo di nuovi software. Inoltre, vorrei ringraziare gli inventori di questa nuova tecnologia di condensatori: il professor Paolo Guglielmi, il professor Fabio Freschi e Vincenzo Cirimele, che mi hanno permesso di lavorare su questa tecnologia prototipale. In particolare, ringrazio il professor Gugliemi per aver messo a disposizione il convertitore ed il relativo software per il controllo adoperato durante la fase di testing.

Vorrei anche ringraziare la mia famiglia e la mia ragazza per avermi supportato e sopportato durante questi cinque anni di studio. Infine, vorrei ringraziare i miei amici nonché compagni di corso Alberto Cavalera, Riccardo Cifalinò, Ivan Tafuro, Luca Roggio, Matteo Notarnicola, Marco Moraschi e Lorenzo Solida per aver condiviso con me questo percorso per diventare ingegneri elettrici.

Sommario

Elenco Figure	5
Elenco Tabelle	9
1. Introduzione	11
1.1 Power wireless transfer WPT	12
1.2 POLITO Charge While Driving	14
2. Stato dell'arte sui condensatori alta potenza e alta frequenza	16
2.1 Condensatori in film	16
2.2 Condensatori in mica	20
2.3 Invenzione di una nuova tecnologia di condensatori: RES POWER CAP	22
3. Nascita e sviluppi dei prototipi	23
3.1 Simulazioni FEM del condensatore	25
3.2 Condensatori RES CAP1005050 e CAP505025	27
3.2.1 Saldatura diretta di una lamella	29
3.2.2 Saldatura diretta di una lamella nastrata in Kapton	30
3.2.3 Saldatura diretta di un pin	30
4. Stato dell'arte su norme CEI e standard IEEE in materia di condensatori	31
5. Prove con l'impedenzimetro	34
5.1 Cenno teorico sul circuito equivalente di un condensatore	36
5.2 Misure sui condensatori RES CAP1005050 e CAP505025	38
5.3 Tolleranza dei condensatori RES CAP1005050 e CAP505025	42
5.4 Fattore di dissipazione	45
5.4.1 Confronto RES POWER CAP con condensatori in film e condensatori mica	in 48
6. Prove ad impulsi	49
6.1 Setup di laboratorio per la prova ad impulsi	51
6.2 Prove ad impulsi su condensatori RES CAP505025	53
6.2.1 Prove ad impulsi a 2000 V su CAP505025_1	54
6.2.2 Prove ad impulsi a 3000 V su CAP505025_1	55
6.2.3 Prove ad impulsi a 4000-5000-6000-7000-8000 e 9000 V su CAP505025_1	56
6.2.4 Stima preliminare del dato di targa su CAP505025_3	59
6.2.5 Prove ad impulsi a 9000 V su CAP505025_3	60
6.3 Dato di targa condensatori RES CAP505025	62
6.4 Prove impulsive su condensatori RES CAP1005050	63
6.4.1 Stima preliminare del dato di targa su CAP1005050_1	64

6.4.2 Prove ad impulsi a 9000 V su CAP1005050_1	. 66
6.5 Dato di targa condensatori RES CAP1005050	. 67
6.6 Confronto in termini di tensione impulsiva tra condensatore Kemet in film e RES POWER CAP	69
7. Prove di tensione alternata	. 71
7.1 Introduzione	. 71
7.2 Realizzazione del banco prova	. 77
7.2.1 Stima del valore d'induttanza degli avvolgimenti con simulazioni FEMN	179
7.2.2 Costruzione e risultati del banco prova	. 83
7.2.3 Modifiche apportate al banco prova	. 86
7.3 Setup di laboratorio per la prova di tensione alternata	. 88
7.3.1 Realizzazione del banco di condensatori Kemet	. 90
7.3.2 Procedura di esecuzione delle prove	. 95
7.4 Prove di tensione alternata su RES CAP1005050	. 97
7.4.1 Testing preliminare: prima fase	. 97
7.4.2 Testing intensivo: seconda fase	100
7.4.3 Conclusioni CAP1005050	103
7.5 Prove di tensione alternata su RES CAP505025	104
7.5.1 Testing preliminare: prima fase	104
7.5.2 Testing intensivo: seconda fase	106
7.5.3 Conclusioni CAP505025	108
7.6 Conclusioni al termine delle prove di tensione alternata	109
8. Confronto RES POWER CAP con le altre tecnologie di condensatori	110
8.1 Confronto dimensionale	111
8.2 Confronto dei costi	113
9. Datasheet e conclusioni	114
9.1 Principali specifiche riportate nei datasheet	114
9.2 Datasheet CAP1005050	116
9.3 Datasheet CAP505025	119
9.4 Conclusioni finali	122
Bibliografia	123

Elenco Figure

Figura 1.1 Rappresentazione schematica di un sistema per la ricarica induttiva di u EV1	ın 2
Figura 1.2 POLITO CWD [1]1	4
Figura 2.1 Processo di produzione per la tecnologia wound [4]1	7
Figura 2.2 Processo di produzione per la tecnologia stacked [4]1	8
Figura 2.3 Limiti sulla tensione alternata rms [4]1	8
Figura 2.4 Celem CP 30/75 [5]2	20
Figura 2.5 Corrente, Potenza reattiva e Tensione in funzione della frequenza per C 30/75 da C = 0.1 μF [5]2	P 20
Figura 3.1 Schema rappresentativo del RES POWER CAP2	23
Figura 3.2 Evoluzione costruttiva del RES CAP5025252	23
Figura 3.3 Distribuzione intensità di campo elettrico su condensatore sano2	25
Figura 3.4 Distribuzione intensità di campo elettrico su condensatore che present una bolla d'aria2	ta 26
Figura 3.5 Zoom della bolla d'aria2	26
Figura 3.6 Vista in pianta di un CAP1005050 e di un CAP5050252	27
Figura 3.7 Piazzola per la realizzazione delle connessioni	28
Figura 3.8 Saldatura diretta di una lamella2	29
Figura 3.9 Saldatura diretta di una lamella nastrata in Kapton	30
Figura 3.10 Saldature diretta di un pin3	30
Figura 5.1 Pannello frontale HIOKI 3532-50 LCR HiTESTER [14]	34
Figura 5.2 Circuito equivalente del circuito di misura dai terminali dello strumento fin al campione da misurare [14]	10 35
Figura 5.3 Circuito equivalente di un condensatore, che tiene conto dell'induttanz parassita e degli effetti resistivi3	<u>za</u> 36
Figura 5.4 Rappresentazione dei valori di capacità misurati sui CAP1005050 cc barre errore al 2.5%4	on 4
Figura 5.5 Rappresentazione dei valori di capacità misurati sui CAP505025 con barı errore al 2.5%4	re 4
Figura 5.6 Diagramma vettoriale delle tensioni4	5
Figura 5.7 Andamento $tan\delta$ in funzione della frequenza per CAP1005050_2 CAP1005050_44	е 6
Figura 5.8 Andamento $tan\delta$ in funzione della frequenza per CAP505025_2 CAP505025_44	е 17
Figura 5.9 Confronto in termini di $tan\delta$ tra CAP1005050_2 e CAP505025_24	17
Figura 5.10 Confronto in termini $tan\delta$ tra RES CAP, Kemet e Celem4	8

Figura 6.1 Forma d'onda della tensione generata dal generatore di impuls VCS5000N10
Figura 6.2 Setup di laboratorio per la prova ad impulsi
Figura 6.3 Terminali di uscita del generatore ad impulsi con collegamento della bobina di Rogosky
Figura 6.4 Connessione del condensatore ai terminali del generatore
Figura 6.5 Display del generatore ad impulsi impostato a 2000 V 53
Figura 6.6 Primo impulso a 2000V/µs sul condensatore CAP505025_1 54
Figura 6.7 Centesimo impulso a 2000V/µs sul condensatore CAP505025_1 54
Figura 6.8 Centesimo impulso a 3000V/µs sul condensatore CAP505025_1 55
Figura 6.9 Impulso a 4000V/µs sul condensatore CAP505025_1 56
Figura 6.10 Impulso a 5000V/µs sul condensatore CAP505025_1 56
Figura 6.11 Impulso a 6000V/µs sul condensatore CAP505025_1 57
Figura 6.12 Impulso a 7000V/µs sul condensatore CAP505025_1 57
Figura 6.13 Impulso a 8000V/µs sul condensatore CAP505025_1 57
Figura 6.14 Impulso a 9000V/µs sul condensatore CAP505025_1 58
Figura 6.15 Prova impulsiva a 2000 V/μs59
Figura 6.16 Prova impulsiva a 2500 V/μs59
Figura 6.17 Primo impulso a 9000V/µs sul condensatore CAP505025_3 60
Figura 6.18 Cento ottantasettesimo impulso a 9000V/µs sul condensatore CAP505025_3
Figura 6.19 Cento ottantottesimo impulso a 9000V/µs sul condensatore CAP505025_3 - Scarica
Figura 6.20 Foto del CAP505025_3 con scarica sullo spigolo67
Figura 6.21 Primo impulso a 2100 V/ μ s sul condensatore CAP505025 62
Figura 6.22 Millesimo impulso a 2100 V/µs sul condensatore CAP505025 62
Figura 6.23 Confronto corrente al primo impulso (nera) e corrente al millesimo impulso (rossa) su CAP505025
Figura 6.24 Impulso a 2000 V/µs sul condensatore CAP1005050_164
Figura 6.25 Impulso a 2500 V/µs sul condensatore CAP1005050_164
Figura 6.26 Primo impulso a 9000 V/µs sul condensatore CAP1005050_166
Figura 6.27 Millesimo impulso a 9000 V/µs sul condensatore CAP1005050_1 66
Figura 6.28 Primo impulso a 2300 V/µs sul condensatore CAP1005050 67
Figura 6.29 Millesimo impulso a 2300 V/µs sul condensatore CAP1005050 67
Figura 6.30 Confronto corrente al primo impulso (nera) e corrente al millesimo impulso (rossa) su CAP1005050
Figura 6.31 Impulso a 2000 V/µs sul Kemet69
Figura 6.32 Impulso a 2000 V/µs sul CAP50502569
Figura 6.33 Impulso a 2000 V/µs sul CAP100505069

Figura 7.1 Illustrazione meccanismo induttivo di trasmissione della potenza (IPT)	.71
Figura 7.2 Rappresentazione circuitale del sistema IPT illustrato [2]	.72
Figura 7.3 Circuito equivalente del receiver [2]	. 73
Figura 7.4 Circuito equivalente con compensazione serie	. 74
Figura 7.5 Rappresentazione circuitale in condizioni di risonanza ed RL a zero	. 76
Figura 7.6 Sezione del rocchetto utilizzato per realizzare il banco prova	. 77
Figura 7.7 Schematizzazione del filo litz con vista dei singoli trefoli [27]	. 78
Figura 7.8 Foto del filo litz	. 78
Figura 7.9 Schematizzazione del banco prova completo dei due avvolgimenti	. 78
Figura 7.10 Impostazioni materiale litz in FEMM	. 80
Figura 7.11 Disegno FEMM configurazione 1 dell'avvolgimento superiore	. 80
Figura 7.12 Disegno FEMM configurazione 2 dell'avvolgimento superiore	. 81
Figura 7.13 Plot della densità di corrente configurazione 1	. 82
Figura 7.14 Plot della densità di corrente configurazione 2	. 82
Figura 7.15 Foto realizzazione avvolgimento transmitter	. 83
Figura 7.16 Foto banco prova completo di entrambi gli avvolgimenti	. 83
Figura 7.17 Foto parte terminale dell'avvolgimento	. 84
Figura 7.18 Andamento Z-f dell'avvolgimento trasmettitore	. 85
Figura 7.19 Andamento Z-f dell'avvolgimento ricevitore	. 85
Figura 7.20 Foto della scarica nel tratto terminale dell'avvolgimento ricevitore scatt a luce spenta	ata . 86
Figura 7.21 Soluzioni adottate per eliminare i fenomeni di scarica	. 87
Figura 7.22 Foto dei terminali modificati dell'avvolgimento trasmettitore	. 87
Figura 7.23 Foto frontale contente la strumentazione utilizzata per la prova	. 89
Figura 7.24 Foto laterale contente la strumentazione utilizzata per la prova	. 89
Figura 7.25 Foto del Ponte-H e delle connessioni all'avvolgimento trasmettitore	. 90
Figura 7.26 Kemet C4C assiale [15]	. 91
Figura 7.27 Schema circuitale del banco di condensatori	. 92
Figura 7.28 Foto del parallelo di 5 condensatori	. 94
Figura 7.29 Foto banco di condensatori Kemet utilizzato per le prove	. 94
Figura 7.30 Rappresentazione circuitale del banco prova con $R_L=0$. 95
Figura 7.31 Andamenti delle grandezze misurate a $VC = 4.5 kV$ ($VDC = 500$ Tensione in uscita dal ponte ad H in fucsia, corrente sul condensatore in test in gia corrente in uscita dal ponte ad H in azzurro	V). illo, . 98
Figura 7.32 Foto delle modifiche apportate al pin	. 99
Figura 7.33 Foto CAP1005050_6 che mostra la formazione dei gas	. 99

Figura 7.34 Andamenti delle grandezze misurate su CAP1005050_9 a $VC = 3.68 kV$ ($VDC = 400 V$). Tensione in uscita dal ponte ad H in fucsia, corrente sul condensatore in test in giallo, corrente in uscita dal ponte ad H in azzurro
Figura 7.35 Foto termiche CAP1005050 durante la prova a $VC = 3.5 kV$
Figura 7.36 Foto termica del regime di temperatura su CAP1005050_9101
Figura 7.37 Andamenti delle grandezze misurate su CAP1005050_2 a $VC = 3.68 kV$ ($VDC = 400 V$). Tensione in uscita dal ponte ad H in fucsia, corrente sul condensatore in test in giallo, corrente in uscita dal ponte ad H in azzurro
Figura 7.38 Foto termica del regime di temperatura su CAP1005050_2 102
Figura 7.39 Foto del condensatore CAP1005050_8 esploso sul bordo 103
Figura 7.40 Andamenti delle grandezze misurate su CAP505025_4 a $VC = 3.1 kV$ ($VDC = 350 V$). Tensione in uscita dal ponte ad H in fucsia, corrente sul condensatore in test in giallo, corrente in uscita dal ponte ad H in azzurro
Figura 7.41 Foto del condensatore CAP505025_4 scoppiato 106
Figura 7.42 Foto termiche CAP505025 durante la prova a $VC = 3.1 kV$ 107
Figura 7.43 Foto termica del regime di temperatura su CAP505025_7 107
Figura 7.44 Foto termica del regime di temperatura su CAP505025_8 108
Figura 8.1 Configurazione a)realizzata con CAP1005050 b)realizzata con CAP505025
Figura 8.2 Configurazione c)realizzata con i Kemet d)realizzata con Celem 111
Figura 8.3 Dimensioni dei condensatori utilizzati per il confronto
Figura 9.1 Foto, dimensioni del CAP1005050 e rappresentazione del terminale (pin)
Figura 9.2 Andamento $\Delta C/C$ in funzione della frequenza per CAP1005050 117
Figura 9.3 Andamento $tan\delta$ in funzione della frequenza per CAP1005050 117
Figura 9.4 Andamento dell'impedenza Z in modulo in funzione della frequenza per CAP1005050
Figura 9.5 Foto, dimensioni del CAP505025 e rappresentazione del terminale (pin)
Figura 9.6 Andamento $\Delta C/C$ in funzione della frequenza per CAP505025 120
Figura 9.7 Andamento $tan\delta$ in funzione della frequenza per CAP505025 120
Figura 9.8 Andamento dell'impedenza Z in modulo in funzione della frequenza per CAP505025

Elenco Tabelle

Tabella 2.1 Costanti dielettriche dei materiali più comuni [3]1	17
Tabella 5.1 Misure su condensatori RES CAP10050503	38
Tabella 5.2 Misure su condensatori RES CAP5050253	38
Tabella 5.3 Coefficienti C, D ed E per il calcolo del Test accuracy	39
Tabella 5.4 Coefficienti A e B per la valutazione della Basic accuracy [14]4	10
Tabella 5.5 Valutazione Basic accuracy per i condensatori CAP10050504	1
Tabella 5.6 Valutazione Basic accuracy per i condensatori CAP5050254	11
Tabella 5.7 Valutazione Test accuracy per i condensatori CAP10050504	1
Tabella 5.8 Valutazione Test accuracy per i condensatori CAP5050254	12
Tabella 5.9 Calcolo tolleranza % per i condensatori RES CAP10050504	13
Tabella 5.10 Calcolo tolleranza % per i condensatori RES CAP5050254	13
Tabella 6.1 dV/dt dei principali condensatori alta tensione e alta frequenza4	19
Tabella 7.1 Caratteristiche C4C da 10 nF9) 1
Tabella 7.2 Misure sui condensatori Kemet da 10 nF9) 3
Tabella 7.3 Livelli di tensioni applicati al DC-LINK, rispettive correnti e tensioni si condensatore per CAP10050509	ul 98
Tabella 7.4 Livelli di tensioni applicati al DC-LINK, rispettive correnti e tensione si condensatore per CAP50502510	ul)4
Tabella 8.1 Confronto dei volumi delle diverse tecnologie di condensatori	2
Tabella 8.2 Confronto dei pesi delle diverse tecnologie di condensatori	2
Tabella 8.3 Confronto dei costi delle diverse tecnologie di condensatori11	3
Tabella 9.1 Dimensioni e peso CAP100505011	6
Tabella 9.2 Datasheet CAP100505011	6
Tabella 9.3 Dimensioni e peso CAP100505011	9
Tabella 9.4 Datasheet CAP50502511	9

1. Introduzione

La penetrazione dell'energia elettrica è in forte aumento nella vita di ognuno di noi, grazie alla notevole diffusione di oggetti elettrici ed elettronici di uso quotidiano (es. cucine ad induzione, ricarica dei telefoni) ma anche alla diffusione di mezzi di trasporto elettrici (bus e autoveicoli). Questo è dovuto in parte a progetti e direttive europee che promuovono l'utilizzo dell'energia elettrica allo scopo di ridurre le emissioni di inquinanti (CO₂ e NO_x). I veicoli elettrici rappresentano una di queste realtà che si sta diffondendo nell'ultimo decennio, chiaramente con essi si stanno sviluppando nuove soluzioni di ricarica degli stessi veicoli. Tra queste soluzioni vi è il così detto inductive power transfer (IPT) che è una tecnologia basata sul principio di induzione magnetica che consente il trasferimento di energia alla batteria del veicolo in modo del tutto wireless. Un sistema di ricarica IPT è un sistema in cui vi sono in gioco alte frequenze, alte tensioni e correnti. Il condensatore oggetto di questo elaborato è stato proprio pensato per essere inserito in uno di questi sistemi di ricarica wireless per veicoli elettrici al fine di realizzare la compensazione degli elementi induttivi.

Lo scopo di questo elaborato è stato quello di testare condensatori prototipali destinati proprio per le applicazioni appena elencate. Sono state condotte varie tipologie di test su questa nuova tecnologia di condensatori, tuttora in fase di brevettazione, basati sulla tecnologia dei circuiti stampati multistrato. Il condensatore multistrato verrà chiamato nel seguito anche RES POWER CAP (capacitors for high-power resonant circuits), nome dato degli inventori del componente. Molte volte, in questo scritto, verranno chiamati in modo più abbreviativo RES CAP.

Nella fase preliminare a quella dei test, sono state svolte due analisi sullo stato dell'arte. La prima è stata un'analisi dello stato dell'arte sulle tecnologie di condensatori attualmente presenti sul mercato, nel campo di applicazione di interesse, confrontando ove possibile queste tecnologie di condensatori con il prototipo oggetto delle prove. La seconda è stata un'analisi dello stato dell'arte normativo riguardante i test su condensatori nel campo di funzionamento d'interesse. Queste analisi sono servite in primo luogo per valutare quali fossero i principali parametri forniti dai costruttori di condensatori e in secondo luogo sono servite per comprendere al meglio come testare i condensatori. Ogni fase è stata descritta in un capitolo dedicato. La prima fase di testing, descritta nel capitolo 5, è stata condotta mediante l'impedenzimetro al fine di valutare i principali parametri caratteristici del componente. Nella seconda fase, il condensatore è stato sottoposto a degli impulsi di tensione, riferimento al capitolo 6. Infine, nel capitolo 7, i condensatori sono stati testati applicando ai loro capi una tensione alternata di un valore prestabilito per periodi di durata diversa. Le prove effettuate hanno avuto lo scopo di caratterizzare i componenti definendone i principali parametri. Questa tesi è stata sviluppata nell'ambito del proof of concept. L'obiettivo finale delle prove effettuate, sui condensatori, è stato quello di definire un datasheet dei componenti.

1.1 Power wireless transfer WPT

Al giorno d'oggi la diffusione dei veicoli elettrici è fortemente ostacolata principalmente da due fattori; il primo legato al costo delle batterie del veicolo elettrico (EV), il secondo legato alla carenza di infrastrutture di ricarica. Al fine di promuovere la diffusione degli EVs, il parlamento europeo ha richiesto agli stati membri l'installazione di un certo numero di postazioni per la ricarica (colonnine di ricarica). Oltre ai sistemi di ricarica delle batterie convenzionali che prevedono una connessione elettrica fisica (plug-in di un cavo), si stanno sviluppando sistemi di ricarica che non prevedono la presenza di contatto elettrico (sistemi wireless). La tecnologia di condensatore, oggetto di questa tesi, può trovare impiego in tutte quelle applicazioni industriali per la quale è richiesta la compensazione capacitiva di elementi fortemente induttivi. Esempi tipici sono il riscaldamento induzione, la tempra e la saldatura ad induzione, ma esso è nato per l'impiego nei sistemi di **ricarica** induttiva wireless per veicoli elettrici. Tale applicazione è anche nota come IPT (resonant inductive power transimission) ed essa rappresenta un sottoinsieme delle applicazioni WPT (wireless power transfer). Un sistema di ricarica induttivo è essenzialmente basato sull'accoppiamento magnetico di due induttori. Il primo di essi viene detto bobina trasmittente (transmitter), posto solitamente a terra, il secondo detto bobina ricevente (receiver) installato a bordo veicolo. La bobina trasmittente viene alimentata tramite un convertitore DC/AC che fornisce una corrente alternata. La bobina trasmittente genera in questo modo un campo magnetico alternato che viene concatenato dalla bobina ricevente. Tramite il fenomeno dell'induzione magnetica, avrà dunque luogo il trasferimento di energia elettrica dal terreno al veicolo. La corrente indotta nella bobina ricevente viene raddrizzata tramite un convertitore AC/DC, ciò permette la ricarica della batteria del veicolo. Uno schema rappresentativo è riportato in Figura 1.1.



Figura 1.1 Rappresentazione schematica di un sistema per la ricarica induttiva di un EV

La distanza tra veicolo e suolo varia da un veicolo all'altro, ma in genere però tale valore è compreso tra 10 e 30 cm. La presenza di un così elevato tratto in aria tra bobina ricevente e bobina trasmittente comporta un accoppiamento magnetico tra le due estremamente basso (circa il 10%). Per far fronte a tale carenza di accoppiamento è necessario elevare la frequenza della corrente che alimenta la bobina trasmittente. Tipicamente le frequenze di alimentazione usate vanno da qualche decina al centinaio di kilohertz. Per questi valori di frequenza la bobina stessa con il suo valore di impedenza rappresenta una forte limitazione al trasferimento di potenza. Tale limitazione può essere superata connettendo alle bobine uno o più condensatori, che vengono appunto detti **condensatori di compensazione**. I valori di capacità di questi condensatori sono scelti in modo da poter entrare in risonanza con la rispettiva bobina alla quale vengono connessi alla frequenza di alimentazione del sistema.

In questo modo i condensatori cancellano il contributo di impedenza degli induttori massimizzando il trasferimento di potenza. Allo stesso tempo, l'inserzione dei condensatori permette di ridurre la potenza nominale del convertitore DC/AC che alimenta il sistema con conseguenti benefici in termini di costo. Questi sistemi così realizzati sono sistemi risonanti ad alta frequenza, pertanto i condensatori utilizzati devono poter tollerare alte tensioni in un ambiente dove le correnti sono fortemente variabili nel tempo. Inoltre, il fatto di operare in condizioni di risonanza richiede un'ottima precisione nella realizzazione del valore di capacità per permettere all'elettronica di potenza di operare in condizioni ottimali in termini di compatibilità ed efficienza.

Il numero di produttori di condensatori con le specifiche richieste è limitato sul mercato, inoltre, svolgendo delle ricerche, non sono stati trovati dei singoli componenti in grado di soddisfare tutte le specifiche richieste. È pertanto necessario utilizzare più componenti per raggiungere l'obiettivo richiesto in termini di tensione applicabile e in termini di valore complessivo di capacità.

1.2 POLITO Charge While Driving

Negli ultimi anni grazie al progetto europeo FABRIC, il gruppo di ingegneria elettrica del Politecnico di Torino ha realizzato, nei pressi di Susa, una soluzione di ricarica wireless dinamica, dunque una soluzione che prevede la ricarica di un veicolo in movimento. Uno schema rappresentativo della soluzione denominata Polito Charge While Driving è illustrato nella Figura 1.2.



Figura 1.2 POLITO CWD [1]

La soluzione realizzata, come descritto in [2], prevede la presenza di più bobine trasmittenti, in numero pari a 50, posti ad una distanza di 50 cm. Ogni transmitter è alimentato da un ponte ad H dedicato. La serie dei convertitori DC/AC viene alimentata da una linea DC. Dunque, l'intero sistema è alimentato da un unico convertitore trifase attivo AC/DC. In questo modo è stata realizzata una corsia di ricarica per un veicolo elettrico. Dunque, il team del Politecnico ha realizzato un sistema *IPT dinamico* in cui l'EV è in grado di ricaricare le proprie batterie in movimento. La realizzazione di una corsia, costituita dalla serie delle bobine, consente la ricarica del veicolo senza la necessità che esso sia fermo al di sopra della singola bobina. Il sistema POLITO CWD è un sistema caratterizzato da: una potenza nominale di 20 kW, una frequenza operativa di 85 kHz, una corrente nell'avvolgimento primaria I_{1_rms} pari a 40 A ed una tensione di picco sul condensatore \hat{V}_C di circa 8 kV. Tutti i sistemi con lo stesso livello di potenza di riferimento hanno valori simili a quelli appena citati.

In entrambi i sistemi IPT statico e dinamico il processo di ricarica inizia automaticamente nel momento in cui il veicolo si trova al di sopra del transmitter ed avviene senza la necessità di alcuna azione umana (senza connessione del cavo di ricarica della batteria ad una sorgente). L'utilizzo di questi sistemi risolve alcune problematiche. In primo luogo, si risolve il problema del range, ovvero dei chilometri massimi percorribili con una ricarica della batteria. Vengono risolte anche le problematiche legate agli agenti atmosferici che possono danneggiare le postazioni di ricarica nel tempo, ma allo stesso tempo si ha un aumento in termini di sicurezza per le persone.

2. Stato dell'arte sui condensatori alta potenza e alta frequenza

Nei circuiti fortemente induttivi come ad esempio applicazioni di saldatura, tempra, riscaldo ad induzione e la ricarica wireless dei veicoli elettrici, è necessario ricorrere a sistemi di compensazione capacitiva al fine di massimizzare la potenza trasferita e di permettere all'elettronica di potenza di operare in condizioni ottimali, [2]. I condensatori utilizzabili in queste applicazioni devono essere dei condensatori in grado di sopportare alte tensioni che sono dell'ordine dei kilovolt e devono avere bassi valori di perdita alle frequenze di impiego dell'applicazione. Solitamente i valori di frequenze sono dell'ordine delle decine-centinaia di kilohertz. Le tecnologie di condensatori attualmente presenti sul mercato adatte a tali scopi sono principalmente condensatori in film e condensatori in mica. Per raggiungere il valore di capacità richiesto e la tensione necessaria per le applicazioni d'interesse, come l'IPT, è necessario connettere in serie e in parallelo più condensatori in quanto il singolo condensatore che sia in film o in mica, non sono in grado di sopportare tali tensioni. Quindi, usando le tecnologie presenti sul mercato, risulta necessaria la creazione di un banco di condensatori rendendo più massiccia, voluminosa, pesante e costosa la struttura del risonatore.

2.1 Condensatori in film

I condensatori detti in film sono dei condensatori in cui il dielettrico è costituito da un film di materiale plastico. Il film dielettrico utilizzato può essere differente a seconda delle caratteristiche richieste nell'applicazione d'impiego del condensatore. La Tabella 2.1 riporta alcuni dei materiali dielettrici più comunemente usati e i relativi valori di costanti dielettriche, tale tabella è stata derivata da [3].

I tipi di dielettrico principalmente utilizzati per i condensatori in film sono:

- Poliestere (polietilene tereptalato) PET
- Polipropilene PP
- Polietilene naftalato PEN

Materiale Dielettrico	Costante Dielettrica
Vapore	1.0
Aria	1.0006
Polipropilene PP	2.2
Solfuro di Polifenile PPS	3.0
Poliestere PET	3.3
Poliestere PEN	3.0
Carta impregnata	2.0-6.0
Mica	6.8
Ossido di alluminio	8.5
Ossido di tantalio	27.7
Ceramica paraelettrica (classe 1)	5 - 90
Titanato di bario	3000 - 8000

Tabella 2.1 Costanti dielettriche dei materiali più comuni [3]

Tale tecnologia di condensatori viene anche classificata in base alla costruzione. Distinguendo tra condensatori in film "arrotolato" (wound technology) realizzati avvolgendo il film (dielettrico) e il materiale metallico (elettrodi) lungo un asse, e condensatori in film "impilato" (stacked film technology) in cui si avvolge un film metallizzato su un grande anello di diametri fino a 60 cm. In questa seconda tecnica realizzativa, quando gli anelli vengono tagliati per produrre condensatori a film "impilato", si ottengono dei condensatori molto omogenei. In Figura 2.1 e Figura 2.2, vengono riportate rispettivamente due immagini delle tecniche di produzione di condensatori in film, come indicato in [4].



Figura 2.1 Processo di produzione per la tecnologia wound [4]



Figura 2.2 Processo di produzione per la tecnologia stacked [4]

Inoltre, la tecnologia dei condensatori in film viene classificata anche in base al tipo di terminali, si possono distinguere terminali radiali, assiali, SMD (surface mounted device) e altre tipologie customizzate.

I condensatori in film sono caratterizzati da un valore di tensione alternata rms dell'ordine delle centinaia di volt. Ad esempio, i condensatori Kemet utilizzati nella compensazione dell'avvolgimento trasmettitore del banco prova usato per le prove di tensione alternata, trattate nel capitolo 7, hanno un dato di targa di 750 Vrms. Si vede appunto come tale valore di tensione non sia sufficiente per le applicazioni citate all'inizio del capitolo dove le tensioni sono di poco inferiori ai 10 kV. È importante sottolineare, inoltre, che il valore di tensione è funzione della frequenza. Si possono distinguere tre regioni al crescere della frequenza, vedi Figura 2.3, ognuna delle quali limitata da tre differenti fattori, come mostrato in [4].



Figura 2.3 Limiti sulla tensione alternata rms [4]

 Regione a: fissa il limite in cui inizia l'effetto Corona alla tensione V_{CD} Al di sotto della frequenza f₁ la tensione AC applicata Vrms non supera la tensione V_{CD} a cui inizia l'effetto Corona.

• Regione b: limite legato alla potenza termica dissipata

Al di sopra della frequenza f_1 la tensione alternata ammissibile deve essere ridotta per mantenere la potenza dissipata all'interno del corpo del condensatore (P_{gen}) inferiore alla potenza che può essere dissipata dalla superficie del condensatore stesso (P_{diss}).

$$Eq. 2.1$$

 $P_{aen} \le P_{diss}$

$$P_{gen} = V_{rms}^{2} 2\pi f C \tan \delta$$

$$P_{diss} = \alpha A \Delta T$$

Dall'equazione Eq. 2.1 si ottiene:

Eq. 2.4

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{\alpha \, A \, \Delta T}{2\pi f \, C \, tan \delta}} \sim \frac{1}{f} \cdot \sqrt[4]{f}$$

• Regione c: limite legato alla massima corrente gestibile

Al di sopra del limite di frequenza f_2 la tensione alternata ammissibile è limitata dalla massima corrente I_c che può passare nella connessione tra i reofori e metallizzazione del film, senza causare surriscaldamento per via di perdite resistive associate.

Eq. 2.5

$$V_{rms} \leq \frac{I_c}{2\pi f C}$$

Concludendo, nei condensatori in film, la tensione tollerabile si abbassa a poche centinaia di volt per le frequenze superiori alla decina di kilohertz, che sono le frequenze di interesse nelle applicazioni compensazione dei carichi fortemente induttivi.

2.2 Condensatori in mica

Un'alternativa all'utilizzo dei condensatori in film è rappresentata dai condensatori realizzati in mica. La mica è minerale che viene usato come dielettrico con caratteristiche tali da consentire il funzionamento del condensatore ad alte temperature e alte frequenze (fino a 100MHz). Un esempio di tale tecnologia è il condensatore realizzato dall'azienda israeliana Celem, riportato nella Figura 2.4.



Figura 2.4 Celem CP 30/75 [5]

Il costruttore riporta nel datasheet del componete, reperibile online [6], che utilizzando la mica come materiale dielettrico il condensatore presenta un più basso angolo di perdita (indicato in letteratura con $tan\delta$), un'alta costante dielettrica ($\varepsilon_r \approx 8$) indipendente dalla temperatura ed un range di temperatura fino a 150 °C. Anche questa tecnologia di condensatori presenta valori massimi di tensioni tollerate che sono tipicamente dell'ordine di uno o due kilovolt e tali valori di tensioni e risultano stabili fino alle centinaia di kilohertz come mostrato nella figura sottostante (il grafico si riferisce ad un Celem CP 30/75 con valore di capacità di 0,1 µF):



Figura 2.5 Corrente, Potenza reattiva e Tensione in funzione della frequenza per CP 30/75 da C = 0.1 μ F [5]

Dunque, utilizzando la tecnologia di condensatori in mica non si hanno più problemi di derating della tensione in quanto le frequenze di lavoro sono dell'ordine delle decine di kilohertz. Ma anche in questo caso si evince la necessità di comporre insieme più condensatori in mica al fine di realizzare un banco in grado di tollerare la tensione richiesta. I condensatori realizzati dal costruttore Celem in mica sono una tecnologia costruttiva brevettata. Inoltre, questi condensatori sono caratterizzati da un costo molto elevato, che si aggira indicativamente intorno 100 € per ogni unità acquistata.

2.3 Invenzione di una nuova tecnologia di condensatori: RES POWER CAP

Come già si è potuto intuire da quanto illustrato nei capitoli precedenti l'utilizzo di condensatori attualmente presenti sul mercato, comporta la realizzazione di soluzioni pesanti e voluminose per le quali è richiesto un gran numero di componenti. Inoltre, bisogna considerare la tolleranza sul valore di capacità, che sono all'incirca del 20% ma possono scendere fino al 5% per realizzazioni particolarmente precise e dunque più costose. In alternativa se si accettano tempi lunghi di consegna e costi maggiori, alcune case costruttrici ricorrono alla campionatura dei componenti prodotti. La realizzazione di valori di capacità affidabili, ovvero con basso discostamento dal valore nominale dichiarato, permette all'elettronica di potenza di operare nei punti ottimali di risonanza del sistema previsti in fase di progetto. Nei sistemi IPT questo porta anche ad un beneficio in termini di massimizzazione della potenza trasferita alla bobina ricevente. Tale beneficio si ripercuote sull'efficienza del convertitore stesso che operando in condizioni note e stabili di risonanza opera in condizioni di minime perdite per commutazione.

Ponendosi come obiettivo quello di ottenere un componente preciso, di dimensioni contenute, di elevata tensione sopportata e costo contenuto è nata l'idea, all'ing. Vincenzo Cirimele ed i professori Fabio Freschi e Paolo Guglielmi del dipartimento di Energia del Politecnico di Torino, giungendo all'ideazione di una nuova tecnologia di condensatori che sfruttasse la tecnologia dei circuiti stampati multistrato. Questa nuova tecnologia di condensatori è in grado di coprire campi tecnologici finora non coperti da nessun componente presente sul mercato riuscendo a soddisfare tutte le caratteristiche richieste nelle applicazioni di IPT. In particolare, i vantaggi introdotti da questo prototipo di condensatore riguardano: tensioni sopportabili dalla singola unità maggiori rispetto a quanto fatto dai competitor presenti sul mercato, una resistenza equivalente serie ESR (a 100kHz) inferiore e cioè perdite inferiori, precisione relativa sul valore di capacità più alta e cioè tolleranza più bassa, volume del singolo componente nettamente ridotto ed un costo unitario inferiore. Tuttora il condensatore si trova in fase prototipale. In particolare, all'inizio di questo lavoro di tesi il componente si trovava in uno stato di TRL 4 ed è stato previsto di raggiungere la fase del brevetto TRL 6 entro il prossimo anno.

Lo scopo di questa tesi è stato quello di valutare i parametri caratteristici e le prestazioni effettivamente raggiungibili da questa tecnologia di condensatori, per arrivare a definire dei valori significativi che possano esprimere i dati di targa del componente. La tecnologia di condensatori prende il nome di RES POWER CAP (capacitors for high-power resonant circuits). Nel capitolo 3 viene in primo luogo descritta la nascita del primo prototipo di condensatore, il RES CAP502525, le problematiche riscontrate in fase di testing di tale prototipo e le soluzioni che sono state pensate per risolvere tali problemi con la conseguente nascita di due nuovi prototipi. Per poter eseguire un confronto il più accurato possibile tra la nuova famiglia di condensatori e le altre tecnologie disponibili sul mercato è stato prima necessario definire, tramite misure e test, i valori caratteristici e punti di lavoro del RES POWER CAP. I risultati del confronto sono riportati nel capitolo 8.

3. Nascita e sviluppi dei prototipi

L'idea alla base della nascita del primo RES POWER CAP è stata quella di sfruttare una tecnologia già esistente, quelle per la realizzazione dei circuiti stampati multistrato, per applicarla alla costruzione di condensatori. Il primo prototipo era caratterizzato dall'avere uno spessore di materiale dielettrico (nastro di poliammide) di 50 μ m, uno spessore di cover layer (ovvero lo spessore del rivestimento esterno del condensatore) di 25 μ m ed uno spessore di colla pari a 25 μ m. Uno schema rappresentativo di tale condensatore è rappresentato in Figura 3.1.



Figura 3.1 Schema rappresentativo del RES POWER CAP

La Figura 3.2 mostra i primi prototipi di condensatori realizzati e nella parte sinistra dell'immagine il supporto utilizzato per il test di nuovi materiali.



Figura 3.2 Evoluzione costruttiva del RES CAP502525

Nel dettaglio il componente di destra è stato realizzato con un tipo di fibra di vetro denominato FR4. Questo prototipo è servito per validare l'idea alla base del prototipo

sullo stesso sono anche stati riscontrati i primi problemi di scarica parziale esterna nonché valori elevati di ESR $\approx 3 \Omega$. Successivamente è stato utilizzato il supporto (mostrato nella parte sinistra dell'immagine) con lo scopo di testare in modo rapido nuovi materiali dielettrici. Infine, è stato creato il primo prototipo di condensatore (CAP502525) con un dielettrico in nastro di poliammide. Il RES CAP502525 ha presentato fin dai primi test delle prestazioni interessanti in termini di tensione, perdite e precisione, ciò ha spinto gli inventori ad indagare ulteriormente su tale tecnologia con l'obiettivo di brevettarla. Dai primi test effettuati è risultato che tale condensatore era in grado di sopportare tensioni alternate di poco inferiori ai 3 kV di picco, ma oltre tale valore il componente in prova scaricava perforando il dielettrico. L'obiettivo preposto che si voleva raggiungere con i RES POWER CAP erano i 10 kV di picco di tensione alternata. Le ipotesi sulle cause di tali scariche, furono sostanzialmente due, la prima ipotesi legata allo spessore interno di dielettrico e di come questo non fosse sufficiente a reggere il campo interno e la seconda ipotesi fatta legata alla presenza di bolle d'aria (interne e/o esterne). Le bolle d'aria interne al condensatore causano discontinuità del mezzo dielettrico, portando ad un aumento locale del gradiente di campo elettrico. Nel paragrafo 3.1 viene proposta una simulazione agli elementi finiti (sfruttando il software Femm [7]) che mostra il comportamento del condensatore in assenza/presenza di bolle d'aria. Per risolvere queste due problematiche è stata pensata la creazione di due nuovi prototipi:

- 1. Il RES CAP1005050. Questo condensatore cerca di risolvere entrambi i problemi avendo spessori raddoppiati. Raddoppiando lo spessore del materiale dielettrico si cerca di risolvere il problema legato al campo interno, mentre aumentando lo spessore di cover layer si cerca di risolvere il secondo problema, ovvero quello legato alle bolle d'aria (aria esterna). L'aumento di spessore del cover layer dovrebbe permettere di allontanare l'aria esterna al condensatore offrendo allo stesso tempo una rigidità dielettrica superiore, ma non si risolvono eventuali problemi interni al condensatore.
- 2. Il RES CAP505025. In questo secondo condensatore è stato raddoppiato esclusivamente lo spessore del cover layer al fine di valutare se le problematiche presentate dal primo prototipo di condensatore fossero legate allo spessore insufficiente del dielettrico oppure se fossero legate allo spessore del cover layer per presenza d'aria o eccessiva prossimità. Chiaramente aumentando lo spessore del cover layer si riesce ad allontanare l'aria esterna al componente ma non si risolvono eventuali problemi interni al condensatore.

Entrambi i cover layer dei nuovi prototipi sono stati realizzati tramite un processo produttivo di pressatura a caldo che mira ad eliminare le eventuali bolle d'aria (interne) che si potrebbero formare tra cover layer e armatura. Tale processo però non garantisce la totale assenza di aria tra gli strati che compongono il condensatore. Inoltre, entrambi i nuovi prototipi sono caratterizzati dall'assenza di colla tra il dielettrico e l'armatura del condensatore al fine di ridurre le perdite. È stata anche realizzata una terza versione, che non è stata oggetto di test in questo elaborato, la quale è stata pensata per localizzare i punti di comparsa del fenomeno di scarica superficiale e per testare nuove soluzioni per l'applicazione dello strato cover (es. potting sotto vuoto). Questa versione è stata realizzata a seguito dei test in tensione alternata (descritte nel capitolo 7) e verrà utilizzata per investigazioni future.

3.1 Simulazioni FEM del condensatore

Per comprendere al meglio cosa accade se all'interno del condensatore vengono a formarsi delle bolle d'aria è stato deciso di realizzare delle simulazioni tramite il software FEMM. Tale software è basato sull'uso del metodo degli elementi finito e offre la possibilità di risolvere problemi di campo magnetico o elettrostatico come i casi qui presenti. Nelle simulazioni è stato innanzitutto disegnato il condensatore in tutti i suoi vari strati, definendo per ognuno di essi il materiale utilizzato per la sua realizzazione. Dopodiché sono state definite sia le condizioni sulla tensione imposta alle armature ($V_{armatura_sup} = 1000 V$ e $V_{armatura_inf} = 0 V$) che le condizioni al contorno, utilizzando la condizione di Dirichlet, ovvero assegnando al potenziale magnetico vettore un valore nullo ($\vec{A} = 0$) lungo i bordi del dominio. Sono state messe in atto due simulazioni: la prima costituita da un condensatore "sano" nel quale non vi sono bolle d'aria mentre nella seconda simulazione viene modellizzato un condensatore nel quale è presente una bolla d'aria tra il rame dell'armatura e il cover layer. Per valutare cosa accade nelle due situazioni sono state lanciate le due simulazioni, confrontando la distribuzione d'intensità di campo elettrico |E| in entrambi i casi.

Se il condensatore è sano, come nella Figura 3.3, la maggior parte del campo elettrico si trova confinato nel dielettrico. L'intensità massima di campo elettrico viene raggiunta sugli spigoli delle armature.



Figura 3.3 Distribuzione intensità di campo elettrico su condensatore sano

Se invece ci troviamo in presenza di un condensatore difettoso, che al proprio interno presenta la formazione di una bolla d'aria, di raggio 0.02 millimetri, la distribuzione dell'intensità di campo elettrico è quella di Figura 3.4 e Figura 3.5.



Figura 3.4 Distribuzione intensità di campo elettrico su condensatore che presenta una bolla d'aria



Figura 3.5 Zoom della bolla d'aria

In questo secondo caso si può osservare che l'intensità massima di campo elettrico viene raggiunta proprio all'interno della bolla e non più in prossimità degli spigoli del dielettrico. È proprio tale incremento locale del campo che può dare origine a fenomeni locali di scarica. Dunque, la formazione di bolle d'aria interne, tra strato in rame e cover layer, può portare alla scarica locale del condensatore con conseguente danneggiamento del componente.

3.2 Condensatori RES CAP1005050 e CAP505025

Tutte le prove descritte ed eseguite in questo elaborato sono state svolte sulle due tipologie di RES POWER CAP, riportate nella Figura 3.6.



Figura 3.6 Vista in pianta di un CAP1005050 e di un CAP505025

Per identificate tutti i componenti testati in modo sistematico, è stato adottato un codice alfanumerico come di seguito riportato:

Il materiale utilizzato da entrambe le versioni prototipali consiste un materiale poliammidico.

Un punto cruciale di questa tecnologia di condensatori riguarda la realizzazione della connessione verso l'esterno delle armature del condensatore. Per entrambe le versioni, è stata realizzata una piazzola tramite una maschera quadrata ricavata direttamente sul cover layer similmente a come mostrato in Figura 3.7.

Figura 3.7 Piazzola per la realizzazione delle connessioni

Per valutare se una tipologia di connessione sia migliore rispetto ad un'altra e dunque valutare eventuali differenze si è deciso di realizzare:

- 2 condensatori del tipo CAP505025 e CAP1005050 con saldatura diretta di una lamella in rame
- 2 condensatori del tipo CAP505025 e CAP1005050 con saldatura diretta di una lamella in rame nastrata in Kapton
- 5 condensatori del tipo CAP505025 e CAP1005050 con saldatura diretta di un pin in rame più spesso realizzato con taglio laser

La seconda soluzione, in cui la parte centrale della lamella e la parte iniziale (dopo la fase di saldatura) sono state nastrate con del Kapton, è stata pensata per valutare le eventuali differenze con la prima in cui la lamella è stata semplicemente saldata. Un'altra possibile soluzione per realizzare le connessioni verso i circuiti esterni consiste nel realizzare la saldatura tramite un'apposita colla conduttiva per la saldatura in forno.

3.2.1 Saldatura diretta di una lamella

A due condensatori per tipologia è stata saldata una lamella in rame di spessore 0.2 mm come terminale del componente. In particolare, durante il processo, si è impostato la temperatura del saldatore a 300°C per evitare di compromettere le prestazioni del condensatore danneggiando il cover layer ed il materiale dielettrico a causa dell'alta temperatura. Per monitorare la temperatura raggiunta durante la fase di saldatura si è utilizzata una termocoppia, posizionata ad una distanza di circa 1 cm dal punto di saldatura, collegata ad un multimetro. In ogni istante del processo di saldatura è stata monitorata la temperatura, verificando che la temperatura raggiunta nel punto di misura fosse inferiore alla massima temperatura sopportabile dall'isolante (che per il materiale poliammidico utilizzato per tali condensatori si aggira in torno ai 400°C). Con un margine di almeno 200 °C.

Le temperature misurate sono le seguenti:

- Per il condensatore CAP505025 una ⊖max ≈ 68°C
- Per il condensatore CAP1005050 una ⊖max ≈ 66°C

Il risultato ottenuto al termine del processo è riportato in Figura 3.8.

Figura 3.8 Saldatura diretta di una lamella

3.2.2 Saldatura diretta di una lamella nastrata in Kapton

Il processo eseguito in questo caso è pressoché il medesimo di quello già descritto, con l'unica differenza che prima di essere saldata la lamella è stata avvolta nella parte centrale con del nastro di Kapton. In un secondo momento si è proceduto alla saldatura della lamella sul condensatore ed infine è stato posizionato uno strato sottile di nastro di Kapton sulla piazzola di saldatura della lamella. Ottenendo il risultato mostrato nella Figura 3.9. Questa soluzione che comprendere l'aggiunta del nastro di Kapton è stata pensata per prevenire l'effetto Corona.

Figura 3.9 Saldatura diretta di una lamella nastrata in Kapton

3.2.3 Saldatura diretta di un pin

In questo caso prima della saldatura del pin (spesso 0.6 mm) è stato eseguito un foro sullo stesso. La foratura (M4) risulta utile per la connessione meccanica del condensatore. Il processo di saldatura eseguito è lo stesso dei casi precedenti, prestando sempre attenzione alla temperatura raggiunta durante il processo (Θ max $\approx 80^{\circ}$ C temperatura raggiunta superiore rispetto ai casi precedenti perché la superficie in rame del pin è maggiore, dunque impiega più tempo per raggiungere una temperatura tale da consentire allo stagno sottostante e circostante di fondere). Il risultato ottenuto è riportato in Figura 3.10.

Figura 3.10 Saldature diretta di un pin

4. Stato dell'arte su norme CEI e standard IEEE in materia di condensatori

Dopo aver realizzato le connessioni esterne del condensatore è stato necessario comprendere come testare tali componenti per valutarne i parametri e le prestazioni allo scopo di produrre un datasheet preliminare. Nello specifico, al fine di comprendere al meglio come poter testare i RES POWER CAP è stata svolta una ricerca sulle norme CEI e sugli standard americani IEEE che definiscano lo svolgimento di prove su condensatori. In particolari si è interessati allo svolgimento di prove ad alta tensione e alta frequenza (dell'ordine dei 100 kHz) in quanto, come già specificato, i condensatori oggetto di questa tesi e dunque dei test sono destinati a lavorare in questo range d'applicazione.

Il contenuto delle norme CEI analizzate è di seguito riassunto:

- Norma CEI 60871-1 Condensatori statici di rifasamento per impianti di energia a corrente alternata con tensione nominale superiore a 1000 V [8]. Tale norma non fornisce informazioni direttamente applicabili agli scopi di interesse. Infatti, nell'abstract della norma viene esplicitamente scritto che: "Questa Norma si applica alle unità e alle batterie di condensatori previste per essere utilizzate, in particolare, per il rifasamento di impianti di energia in corrente alternata con tensione nominale superiore a 1000 V e frequenza compresa tra 15 Hz e 60 Hz". Viene, dunque, fatto riferimento ad un range di frequenza di validità ed applicazione della norma che non risulta essere compatibile con quello d'interesse.
- Norma CEI 60143 Condensatori serie destinati all'impiego sulle reti di potenza [9]. Questa norma contiene delle prescrizioni sui fusibili interni previsti per isolare elementi capacitivi, dunque non si rivela utile allo scopo d'interesse.
- Norma CEI 61071 Condensatori per circuiti di elettronica di potenza [10]. Un estratto della norma riporta: "Questa Norma si applica ai condensatori per elettronica di potenza. La frequenza di funzionamento dei sistemi nei quali questi condensatori sono utilizzati è generalmente inferiore a 15 kHz, mentre le frequenze degli impulsi possono essere 5 o 10 volte superiori. Nella Norma si fa distinzione tra condensatori per corrente alternata e continua". Anche in questo caso la norma non fa riferimento alle frequenze d'interesse dei RES POWER CAP in quanto viene fatto chiaramente riferimento che la norma ha validità per condensatori operanti fino ad una frequenza pari a 15 kHz (al di sotto dei valori d'interesse). Al suo interno, però, la norma contiene informazioni utili su come misurare la *C*, la *ESR* ed il $tan\delta$ e viene espressamente detto che tali parametri possono essere misurati alla tensione e alla frequenza desiderata dal costruttore.

Per quanto concerne gli standard IEEE, sono stati trovati ed analizzati i seguenti standard:

- IEEE Standard Requirements For Capacitor Switches For AC System (Std C37.66[™]-2005). Lo standard C37.66[™]-2005 descrive le caratteristiche che devono rispettare gli interruttori nei circuiti capacitivi, inoltre in tale standard [11] viene fatto riferimento a sistemi in alternata operanti alla frequenza di rete, dunque esso non contiene informazioni rilevanti.
- IEEE Standard for Series Capacitor Banks in Power Systems (Std 824™-2004). Lo standard in questione, [12], ha il seguente abstract: "This standard applies to outdoor series capacitor banks and to the major components of a bank that are required to form a complete system for the insertion of capacitors in series with a transmission line. These major components include capacitors, varistors, bypass gaps, bypass switches, discharge current limiting reactors, insulated structures, and protection and control systems. This standard defines the major requirements for the bank and these components. Design and production tests for all of the components are outlined. Disconnect switches associated with the series capacitor bank are not discussed in detail. This standard applies to fixed series capacitor banks where the inserted reactance is primarily established by the reactance of the capacitors. Not included in this standard are power electronic devices for the insertion or bypassing of the bank. In addition, series capacitor banks applied to distribution circuits are not within the scope of this standard". Esso contiene un paragrafo relativo allo svolgimento di prove che però si riconducono ad uno standard antecedente lo Std18-1992, pertanto è stato cercato ed analizzato anch'esso.
- IEEE Standard For Shunt Power Capacitor (Std18[™]-1992). In questo caso nella fonte [13] viene fatto riferimento a: "Capacitors rated 216 V or higher, 2.5 kvar or more, and designed for shunt connection to alternating-current transmission and distribution systems operating at a nominal frequency of 50 or 60 Hz are considered". Dunque, anch'esso si riferisce a condensatori destinati ad operare nella rete di distribuzione alla frequenza di rete ma al suo interno viene riportata l'esecuzione di prove di stabilità termica e le prove d'impulso. Entrambe queste prove sono indipendenti dalla frequenza d'esercizio del condensatore. Lo standard illustra, nel dettaglio, lo svolgimento della prova di stabilità termica elencando le caratteristiche in termini di temperatura ambiente, tensione di test e misura della temperatura, ma illustra anche le caratteristiche che devono avere gli impulsi applicati a tali condensatori. Quindi lo Std18[™]-1992 può essere ritenuto un testo riferimento per lo svolgimento di prove riguardanti la stabilità termica dei condensatori.

Riassumendo, dalle normative e dagli standard trovati ed analizzati non è emerso nessun particolare riferimento a prove su condensatori destinati ad applicazioni alta frequenza ed alta tensione. Ma è emerso che i parametri tipici ($C,ESR e tan\delta$) possono essere valutati a tensione e frequenza scelta dal costruttore e che l'impulso d'applicare ad un condensatore deve rispettare la classica forma d'onda impulsiva 1.2/50 µs. Dunque, per la misura dei parametri del componente si è seguita la norma CEI 61071 mentre per valutare le restanti prestazioni dei RES POWER CAP è stato necessario inventare delle prove. Sono state definite ed eseguite tre differenti prove. La prima prova prevede l'utilizzo di un impedenzimetro, tramite il quale sono stati ricavati i valori di capacità, di resistenza equivalente serie ESR, di tolleranza sul valore

di capacità e di fattore di perdita $tan\delta$ (dissipation factor). Le seconda prova consiste in una prova ad impulso, ovvero prove di variazione della derivata di tensione, in cui vengono generati uno o più impulsi di tensione, i guali sono applicati direttamente ai terminali del condensatore. Tale prova è molto utile perché consente di valutare la massima variazione di tensione nel tempo che il condensatore è in grado di sopportare. Questo parametro viene fornito nel datasheet di quasi tutti i costruttori di condensatori. Un altro parametro fondamentale per i condensatori è la tensione efficace $V_{AC rms}$. Anche questo parametro viene sempre fornito per ogni componente ed indica la massima tensione efficace che il condensatore è in grado di sostenere ai propri capi. Pertanto, la terza prova eseguita è stata una prova di tensione alternata al fine di ottenere un valore di tensione alternata V_{AC rms} del componente in prova. Per la realizzazione della prova di tensione alternata è stato necessario costruire un apposito sistema, il cui scopo è quello di applicare ai terminali del condensatore una tensione alternata alla frequenza desiderata (circa 100 kHz) per un tempo prestabilito. Per la realizzazione della seconda e della terza prova è stato necessario utilizzare una serie di strumenti di misura che verranno descritti nei capitoli relativi alle prove.

In questo elaborato, per ognuna delle prove appena citate, è stato dedicato un capitolo. Nei rispettivi capitoli 5, 6 e 7 sono stati descritti i procedimenti di esecuzione della prova, la strumentazione utilizzata per lo svolgimento ed infine vengono i risultati prodotti dalla prova stessa.

5. Prove con l'impedenzimetro

La prima fase di testing sui condensatori RES CAP è stata realizzata tramite un impedenzimetro. Per le misure è stato utilizzato un impedenzimetro HIOKI 3532-50 LCR HITESTER. Questo strumento consente la misura dei parametri fondamentali come la capacità equivalente serie del condensatore C_S e la resistenza equivalente serie del condensatore *C*_S e la resistenza equivalente serie del condensatore *ESR* alla frequenza desiderata. Per effettuare le misure sui componenti lo strumento di misura è stato impostato in modo che ai suoi morsetti d'uscita venga applicata una tensione costante (modalità CC dello strumento). L'impedenzimetro misura la corrente in uscita calcolando il valore d'impedenza, in modulo e fase, del campione in test. Dalle misure si ricavano i parametri di interesse tramite le relazioni riportate di seguito:

$$X_C = Z \sin \theta$$

$$ESR = Z \cos \theta$$

dunque:

L'impedenzimetro utilizzato effettua una misura a quattro morsetti. Nella Figura 5.1 viene raffigurato il pannello frontale dello strumento di misura.

 $\begin{cases} C_s = \frac{1}{\omega X_c} \\ FSR = Z \cos \theta \end{cases}$

Figura 5.1 Pannello frontale HIOKI 3532-50 LCR HITESTER [14]

Lo strumento, oltre a consentire l'impostazione della frequenza desiderata e della tensione entro i limiti definiti nel datasheet [14], consente la scelta del range dell'impedenza da misurare. Se non viene impostato nulla il range viene selezionato automaticamente dallo strumento. Lo HIOKI 3532-50 LCR è uno strumento che consente, prima di iniziare le misure, di effettuare la compensazione di circuito aperto e la compensazione di cortocircuito. La compensazione di circuito aperto è utile per ridurre l'influenza dell'impedenza del cavo e dei morsetti, previa impostazione della

Eq. 5.2

Ea 51
lunghezza del cavo, e quindi consente di migliorare la precisione di misurazione. È efficace per campioni di prova la cui impedenza è relativamente alta. La compensazione di circuito aperto può essere effettuata su tutto lo spettro di frequenze di funzionamento dello strumento (ALL) oppure solamente per un certo valore di frequenza (SPOT). Nel caso d'interesse il valore d'impedenza, e quindi di C_s e ESR, interessa ad una frequenza di 100 kHz pertanto è stata effettuata una compensazione SPOT. La compensazione di cortocircuito è stata anche realizzata chiudendo i morsetti dei cavi di misura dello strumento in cortocircuito, al fine di ridurre l'influenza dell'impedenza del cavo e dei morsetti. Tale compensazione risulta efficace per campioni di prova la cui impedenza è relativamente bassa, e anch'essa può essere effettuata su tutto lo spettro o solamente per un valore di freguenza. Entrambe le compensazioni devono essere impostate prima di iniziare la misura sul campione in quanto altrimenti il valore di impedenza mostrato sul display dallo strumento Z_m non rappresenterà il valore reale del componente che si vuole misurare Z_x . Questo accade perché la misura sarà affetta dalle componenti di impedenza residua dello strumento di misura, cioè sarà affetta dalla componente di impedenza di cortocircuito e dall'impedenza di circuito aperto.

Una rappresentazione circuitale del circuito di misura, dai terminali dello strumento fino al campione da misurare, è quella rappresentata in [14] e qui riportata in Figura 5.2.



Figura 5.2 Circuito equivalente del circuito di misura dai terminali dello strumento fino al campione da misurare [14]

5.1 Cenno teorico sul circuito equivalente di un condensatore

Un condensatore reale è un condensatore che presenta sia effetti resistivi che fenomeni di induttanza parassita, quindi esso può essere modellizzato dal circuito equivalente di Figura 5.3.



Figura 5.3 Circuito equivalente di un condensatore, che tiene conto dell'induttanza parassita e degli effetti resistivi

Dove:

- Il parametro *C*, anche indicato come C_s , rappresenta la capacità equivalente serie del condensatore ovvero la quantità di carica elettrica che un condensatore può immagazzinare per unità di tensione. Il valore di capacità di riferimento C_{target} di un condensatore è il valore per cui esso è stato progettato. Ogni condensatore è caratterizzato dall'avere una tolleranza sul valore di capacità, essa esprime la deviazione ammissibile della capacità reale dal valore C_{target} .
- Il parametro *ESR*, rappresenta la resistenza equivalente serie data dalla somma della resistenza di contatto più i contributi di resistenza dovuti a tre componenti: i reofori, la resistenza dell'elettrodo e la perdita nel dielettrico. Un valore alto della *ESR* implica un alto valore delle perdite Joule sul componente con conseguente aumento del surriscaldamento del condensatore. Tale surriscaldamento a lungo andare comporta una variazione dei parametri del dielettrico. Questo può causare la riduzione della vita utile del componente. L'*ESR* viene misurata a frequenze diverse, a seconda delle condizioni d'impiego del condensatore. Si può affermare che il parametro *ESR* è il principale fattore limitante dell'impiego di un condensatore alle alte frequenze.
- Il parametro *ESL*, rappresenta l'induttanza equivalente serie e rappresenta, tramite un parametro concentrato, le induttanze distribuite associate ad un condensatore reale. La *ESL* non è rilevante alle basse frequenze ma lo diventa alle alte, dove può dar luogo a fenomeni di auto-risonanza del componente.

• Il parametro $R_{parallelo}$, anche chiamata in alcuni testi resistenza di isolamento, rappresenta la resistenza del dielettrico del condensatore. La $R_{parallelo}$ esprime il fatto che un condensatore reale ha un dielettrico con resistenza di valore finito, dunque tale resistenza consente alla carica Q immagazzinata di scaricarsi più o meno lentamente nel tempo (il tempo con cui avviene la scarica dipende dalla costante di tempo $\tau = R_{parallelo} \cdot C$). Solitamente i valori di correnti di leakage (correnti di dispersione) legati a questo fenomeno sono molto bassi, dell'ordine del microampere o meno, ma tale corrente può aumentare con il degenerare del dielettrico nel tempo e per calore.

I test con l'impedenzimetro sono stati mirati alla misura dei due parametri C_s e *ESR*. Tramite le misure è stato verificato che la *ESL* è trascurabile per questo condensatore nel range d'applicazione, ciò è ampiamente visibile nella Figura 9.4 del capitolo 9. In tale figura è stato rappresentato l'andamento del modulo dell'impedenza in funzione della frequenza, e si vede che nel range di frequenze considerato il comportamento del condensatore è puramente capacitivo. Inoltre, è stata considerata trascurabile anche la $R_{parallelo}$, considerando pertanto tutti i termini resistivi del condensatore imputati alla sola *ESR*.

5.2 Misure sui condensatori RES CAP1005050 e CAP505025

Una volta impostato correttamente l'impedenzimetro, e dopo aver selezionato il valore di frequenza desiderato (100 kHz) è stato possibile iniziare la misura vera e propria sui componenti. Per entrambe le tipologie di condensatori sono stati valutati i seguenti parametri:

- Impedenza in modulo e fase
- Capacità equivalente serie C_s
- Resistenza equivalente serie ESR

La resistenza equivalente serie è stata valutata rispettivamente per tre valori di frequenza similmente a quanto fatto da alcuni costruttori che forniscono i valori di *ESR* a 20 kHz mentre altri la forniscono a 100 kHz. È stato valutato anche il valore a 85 kHz in quanto rappresenta un valore di frequenza d'interesse per i sistemi IPT. Le misure sono state effettuate su nove condensatori CAP1005050 e su altrettanti CAP505025. Questi condensatori sono stati progettati e realizzati per un valore target di capacità di 6.2 nF. I risultati ottenuti dalle misurazioni sono riportati in Tabella 5.1 ed in Tabella 5.2.

MISURE CAP1005050_XX										
	Valore target di capacità C = 6.2 nF									
	Tipo di terminali	Ζ (Ω)	θ(°)	Cs (nF)	ESR @ 85 kHz (Ω)	ESR @ 20 kHz (Ω)	ESR @ 100 kHz (Ω)			
CAP1005050_1	LAMELLA in saldatura diretta	308.7	-89.77	6.065	1.23	2.10	1.22			
CAP1005050_2	LAMELLA in saldatura diretta	308.8	-89.76	6.065	1.22	2.05	1.17			
CAP1005050_3	LAMELLA in saldatura diretta	308.9	-89.77	6.061	1.21	2.00	1.20			
CAP1005050_4	LAMELLA in saldatura diretta	308.9	-89.76	6.062	1.22	2.13	1.19			
CAP1005050_5	PIN in saldatura diretta	307.8	-89.79	6.085	1.10	2.11	1.00			
CAP1005050_6	PIN in saldatura diretta	307.8	-89.78	6.088	1.20	2.11	1.10			
CAP1005050_7	PIN in saldatura diretta	307.9	-89.78	6.083	1.20	2.11	1.10			
CAP1005050_8	PIN in saldatura diretta	307.9	-89.79	6.081	1.10	2.11	1.10			
CAP1005050_9	PIN in saldatura diretta	307.8	-89.78	6.084	1.20	2.11	1.10			

Tabella 5.1 Misure su condensatori RES CAP1005050

Tahella	5 2 Misure	su condensatori	RES	CAP505025
i abella	J.Z IVIISUIE	Su conuchsalon	NLO	CAF 303023

MISURE CAP505025_XX										
	Valore target di capacità C = 6.2 nF									
	Tipo di terminali	Ζ (Ω)	θ(°)	Cs (nF)	ESR @ 85 kHz (Ω)	ESR @ 20 kHz (Ω)	ESR @ 100 kHz (Ω)			
CAP505025_1	LAMELLA in saldatura diretta	302.1	-89.77	6.197	1.23	2.12	1.21			
CAP505025_2	LAMELLA in saldatura diretta	302.4	-89.73	6.192	1.24	2.12	1.20			
CAP505025_3	LAMELLA in saldatura diretta	304.3	-89.77	6.152	1.24	2.17	1.21			
CAP505025_4	LAMELLA in saldatura diretta	305.3	-89.76	6.134	1.26	2.17	1.20			
CAP505025_5	PIN in saldatura diretta	303.4	-89.81	6.172	1.10	2.15	0.90			
CAP505025_6	PIN in saldatura diretta	308.4	-89.81	6.071	1.10	2.14	0.90			
CAP505025_7	PIN in saldatura diretta	301.7	-89.82	6.205	1.00	2.15	0.80			
CAP505025_8	PIN in saldatura diretta	302.1	-89.82	6.198	1.00	2.15	0.90			
CAP505025_9	PIN in saldatura diretta	301.4	-89.82	6.213	1.00	2.15	0.90			

Come si può osservare dai risultati i CAP505025 hanno un valore di capacità che si avvicina maggiormente al target di 6.2 nF, questo è legato al fatto che i CAP505025 hanno uno spessore che è la metà rispetto ai CAP1005050. Per entrambe le versioni testate, la *ESR* alla frequenza di 100 kHz si attesta ad un valore medio di **1.1 ohm**.

Nel manuale dell'impedenzimetro, [14], viene fornita una relazione per valutare l'accuratezza del test, cioè della misura effettuata. La "**test accuracy**" è basata sulla "**basic accuracy**" e su dei coefficienti. Come riportato nell' Eq. 5.3. La basic accuracy a sua volta è definita da due componenti: l'accuratezza sull'impedenza Z (in percento) e l'accuratezza sull'angolo di fase Θ (in gradi).

$$Test \ accuracy = Basic \ accuracy \ \cdot C \cdot D + E$$

Eq. 5.3

Dove:

- C: coefficiente legato alla velocità del test (velocità di misura);
- D: coefficiente legato lunghezza del cavo;
- E: coefficiente di temperatura;

Per valutare i valori di questi tre coefficienti nel manuale dello strumento vengono fornite rispettivamente tre tabelle, qui riassunte nell'unica Tabella 5.3.

Coefficiente C	Test speed	FAS	ST NORMAL	SLOW	SLOW2
	С	5	2	1.5	1
	_				
Coefficiente D	Cable length	0 m	m 1 m		
	D	1	(100 kHz max) 1.5 + 0.015×f [kHz]		
	D	1	(100.1 kHz min) 1.5 + 0.3×f [MHz]		
Coefficiente E	Temperatur	e	Operating ten	nperature	e = T ℃

Tabella 5 3	Coefficienti C	D ed F	ner il calcolo	del Test accuracy
rabella 0.5	Coemcienti C,	DeuL		

Per quanto riguarda la valutazione dell'accuratezza base, lo stesso manuale fornisce la relazione da utilizzare. L'espressione si basa su due coefficienti A e B i cui valori dipendono dalla frequenza a cui si è effettuata la prova, dal range di misurazione della Z e dal livello di tensione utilizzato per la prova. Per i condensatori testati il range di misura dell'imprendenza si trova sopra i 100 Ω , perché i valori di Z misurati sono dell'ordine dei trecento ohm, pertanto le relazioni per valutare la basic accuracy, [14],sono le seguenti:

$$Basic\ accuracy\ Z = \pm A\ \frac{B\ |10 \cdot Z(\Omega) - range(\Omega)|}{range(\Omega)} \tag{\%}$$
$$Basic\ accuracy\ \theta = \pm A\ \frac{B\ |10 \cdot Z(\Omega) - range(\Omega)|}{range(\Omega)} \tag{\%}$$

Eq. 5.4

Noto il valore di tensione a cui si è effettuato il test, che è stato di 5 V, esiste una apposita tabella fornita dal costruttore dell'impedenzimetro che consente di valutare i valori dei coefficienti A e B da utilizzare. Per ricavare i valori di A e B si entra in Tabella 5.4 con il valore di frequenza a cui è stata effettuato il test e con il rispettivo range in ohm. Una volta individuata la casella corrispondente sono presenti in totale quattro valori, rispettivamente due valori di A e B relativi all'accuratezza di Z (esprimono dei valori percentuali) mentre quelli inferiori fanno riferimento all'accuratezza dell'angolo di fase (esprimono dei valori in gradi).

Range	42Hz t	o 99.9Hz	100Hz	to 1kHz	1.001kH	z to 10kHz	_10.01kHz	to 100kHz	100.1kH	z to 1MHz	1.001MHz to 5MHz
100M Ω	A= 6.75 A= 6	B= 6 B= 3	A= 3.75 A= 3	B= 3 B= 2.25	A= 3.75 A= 3	B= 3 B= 2.25					
10M Ω	A= 1.5 A= 3	B= 0.6 B= 0.45	A= 0.75 A= 0.45	B= 0.3 B= 0.15	A= 0.75 A= 0.45	B= 0.3 B= 0.15	A= 1.8 A= 1.8	B= 0.75 B= 0.75		÷.,	
1ΜΩ	A= 0.75 A= 0.6	B= 0.15 B= 0.3	A= 0.3 A= 0.3	B= 0.075 B= 0.03	A= 0.3 A= 0.3	B= 0.075 B= 0.03	A= 0.75 A= 0.75	B= 0.12 B= 0.12	A= 4.8 A= 4.8	B= 1.5 B= 0.75	
100k Ω	A= 0.6 A= 0.45	B= 0.015 B= 0.03	A= 0.225 A= 0.12	B= 0.015 B= 0.015	A= 0.3 A= 0.15	B= 0.015 B= 0.015	A= 0.45 A= 0.3	B= 0.06 B= 0.045	A= 1.5 A= 0.75	B= 0.45 B= 0.45	
10kΩ	A= 0.6 A= 0.45	B= 0.015 B= 0.015	A= 0.225 A= 0.12	B= 0.015 B= 0.015	A= 0.225 A= 0.12	B= 0.015 B= 0.015	A= 0.375 A= 0.15	B= 0.03 B= 0.03	A= 1.05 A= 0.3	B= 0.075 B= 0.03	
1kΩ	A= 0.6 A= 0.45	B= 0.015 B= 0.015	A= 0.225 A= 0.12	B= 0.015 B= 0.015	A= 0.225 A= 0.12	B= 0.015 B= 0.015	A= 0.375 A= 0.15	B= 0.03 B= 0.03	A= 0.75 A= 0.3	B= 0.075 B= 0.03	
1 0 0 Q	A= 0.6 A= 0.45	B= 0.03 B= 0.015	A= 0.225 A= 0.12	B= 0.03 B= 0.015	A= 0.225 A= 0.12	B= 0.03 B= 0.015	A= 0.375 A= 0.15	B= 0.03 B= 0.03	A= 0.75 A= 0.3	B= 0.075 B= 0.03	
10 Q	A= 0.75 A= 0.525	B= 0.06 B= 0.3	A= 0.375 A= 0.225	B= 0.06 B= 0.03	A= 0.375 A= 0.225	B= 0.06 B= 0.03	A= 0.375 A= 0.3	B= 0.06 B= 0.03	A= 1.05 A= 0.6	B= 0.15 B= 0.075	
1Ω	A= 1.2 A= 3	B= 0.75 B= 0.3	A= 0.75 A= 0.45	B= 0.6 B= 0.3	A= 0.75 A= 0.45	B= 0.6 B= 0.3	A= 0.75 A= 0.45	B= 0.6 B= 0.3	A= 2.1 A= 1.2	B= 1.5 B= 1.5	
100m Ω	A= 7.5 A= 5.25	B= 6 B= 3	A= 6 A= 3.75	B= 3 B= 1.5	A= 6 A= 3.75	B= 3 B= 1.5	A= 6 A= 3.75	B= 3 B= 1.5			

Tabella 5.4 Coefficienti A e B per la valutazione della Basic accuracy [14]

Una volta note tutte le informazioni sui coefficienti, è stato possibile valutare l'accuratezza delle misure effettuate con l'impedenzimetro. I valori di accuratezza base ottenuti sono riportati in Tabella 5.5 e Tabella 5.6 mentre quelli relativi all'accuratezza del test sono in Tabella 5.7 e Tabella 5.8.

Valutazione della Basic accuracy CAP1005050_XX										
	Ζ (Ω)	θ(°)	Az	Bz	A _θ	Β _Θ	Basic accuracy Z (%)	Basic accuracy Θ (°)		
CAP1005050_1	308.7	-89.77	0.375	0.03	0.15	0.03	0.438	0.207		
CAP1005050_2	308.8	-89.76	-	-	-	-	0.438	0.207		
CAP1005050_3	308.9	-89.77	-	-	-	-	0.438	0.207		
CAP1005050_4	308.9	-89.76	-	-	-	-	0.438	0.207		
CAP1005050_5	307.8	-89.79	-	-	-	-	0.437	0.207		
CAP1005050_6	307.8	-89.78	-	-	-	-	0.437	0.207		
CAP1005050_7	307.9	-89.78	-	-	-	-	0.437	0.207		
CAP1005050_8	307.9	-89.79	-	-	-	-	0.437	0.207		
CAP1005050_9	307.8	-89.78	-	-	-	-	0.437	0.207		

Tabella 5.5 Valutazione Basic accuracy per i condensatori CAP1005050

Tabella 5.6 Valutazione Basic accuracy	per i condensatori CAP505025
--	------------------------------

Valutazione della Basic accuracy CAP505025_XX										
	Ζ (Ω)	θ(°)	Az	Bz	A _e	Β _Θ	Basic accuracy Z (%)	Basic accuracy Θ (°)		
CAP505025_1	302.1	-89.77	0.375	0.03	0.15	0.03	0.436	0.207		
CAP505025_2	302.4	-89.73	-	-	-	-	0.436	0.207		
CAP505025_3	304.3	-89.77	-	-	-	-	0.436	0.207		
CAP505025_4	305.3	-89.76	-	-	-	-	0.437	0.207		
CAP505025_5	303.4	-89.81	-	-	-	-	0.436	0.207		
CAP505025_6	308.4	-89.81	-	-	-	-	0.438	0.207		
CAP505025_7	301.7	-89.82	-	-	-	-	0.436	0.207		
CAP505025_8	302.1	-89.82	-	-	-	-	0.436	0.207		
CAP505025_9	301.4	-89.82	-	-	-	-	0.435	0.207		

Valutazione della Test accuracy CAP1005050_XX									
	C (slow)	D	Ez	EΘ	Test accuracy Z (%)	Test accuracy Θ (°)			
CAP1005050_1	1.500	2.775	0.044	0.021	1.865	0.882			
CAP1005050_2	-	-	-	-	1.865	0.882			
CAP1005050_3	-	-	-	-	1.866	0.882			
CAP1005050_4	-	-	-	-	1.866	0.882			
CAP1005050_5	-	-	-	-	1.864	0.882			
CAP1005050_6	-	-	-	-	1.864	0.882			
CAP1005050_7	-	-	-	-	1.864	0.882			
CAP1005050_8	-	-	-	-	1.864	0.882			
CAP1005050_9	-	-	-	-	1.864	0.882			

Valutazione della Test accuracy CAP505025_XX										
	C (slow)	D	Ez	EΘ	Test accuracy Z (%)	Test accuracy Θ (°)				
CAP505025_1	1.500	2.775	0.044	0.021	1.857	0.882				
CAP505025_2	-	-	-	-	1.857	0.882				
CAP505025_3	-	-	-	-	1.860	0.882				
CAP505025_4	-	-	-	-	1.861	0.882				
CAP505025_5	-	-	-	-	1.858	0.882				
CAP505025_6	-	-	-	-	1.865	0.882				
CAP505025_7	-	-	-	-	1.856	0.882				
CAP505025_8	-	-	-	-	1.857	0.882				
CAP505025_9	-	-	-	-	1.856	0.882				

Tabella 5.8 Valutazione Test accuracy per i condensatori CAP505025

Dai risultati ottenuti si può affermare che le misure realizzate con lo HIOKI sono presentano un errore, commesso dallo strumento, sulla misura d'impedenza inferiore al 2% ed un errore commesso sull'angolo di fase inferiore ad 1°. Si è poi passato a valutare la tolleranza dei RES POWER CAP.

5.3 Tolleranza dei condensatori RES CAP1005050 e CAP505025

Per la costruzione di un datasheet preliminare risulta fondamentale ricavare il valore di tolleranza del campione in prova. Dalle misure effettuate è stato possibile valutare la tolleranza di entrambi i tipi di condensatori in test, in particolare è stato possibile dimostrare che entrambe le tipologie di RES POWER CAP presentano una **tolleranza percentuale inferiore al 2.5%** rispetto al valore target di capacità. La tolleranza percentuale è stata calcolata con l'Eq. 5.5.

Eq. 5.5

$$tolleranza \% = \pm \frac{C_{misurata} - C_{target}}{C_{target}} \cdot 100 \qquad (\%)$$

Dove il valore di $C_{target} = 6,2 nF$ sia per i condensatori CAP505025 che per i CAP1005050. I risultati di tali calcoli sono riportati in Tabella 5.9 ed in Tabella 5.10. Oltre alla tolleranza percentuale è stato calcolato anche un valore medio di capacità. Il quale è stato utilizzato per il calcolo dello scostamento dal valor medio di capacità di ogni singolo condensatore, con riferimento all'Eq. 5.6. I risultati di questo calcolo sono riportati, anch'essi, nelle tabelle Tabella 5.9 e Tabella 5.10.

scostamento valor medio % =
$$\frac{|C_{misurata} - C_{media}|}{C_{media}} \cdot 100$$
 (%)

Calcolo tolleranza % CAP1005050_XX							
	Cs (nF)	Cmedia (nF)	Scostamento v. medio %	tolleranza (p.u)	tolleranza %		
CAP1005050_1	6.065	6.075	0.16	0.0218	2.18		
CAP1005050_2	6.065	-	0.17	0.0219	2.19		
CAP1005050_3	6.061	-	0.23	0.0225	2.25		
CAP1005050_4	6.062	-	0.21	0.0223	2.23		
CAP1005050_5	6.085	-	0.17	0.0185	1.85		
CAP1005050_6	6.088	-	0.22	0.0181	1.81		
CAP1005050_7	6.083	-	0.14	0.0189	1.89		
CAP1005050_8	6.081	-	0.10	0.0192	1.92		
CAP1005050_9	6.084	-	0.15	0.0187	1.87		

Tabella 5.9 Calcolo tolleranza % per i condensatori RES CAP1005050

Tabella 5.10 Calcolo tolleranza % per i condensatori RES CAP505025

Calcolo tolleranza % CAP505025_XX							
	Cs (nF)	Cmedia (nF)	Scostamento v. medio %	tolleranza (p.u)	tolleranza %		
CAP505025_1	6.197	6.170	0.44	0.0004	0.04		
CAP505025_2	6.192	-	0.35	0.0013	0.13		
CAP505025_3	6.152	-	0.30	0.0077	0.77		
CAP505025_4	6.134	-	0.60	0.0107	1.07		
CAP505025_5	6.172	-	0.03	0.0045	0.45		
CAP505025_6	6.071	-	1.61	0.0208	2.08		
CAP505025_7	6.205	-	0.56	0.0008	0.08		
CAP505025_8	6.198	-	0.45	0.0003	0.03		
CAP505025_9	6.213	-	0.69	0.0021	0.21		

Come si può osservare dai risultati sia per i condensatori con spessore di dielettrico doppio (CAP1005050) che per quasi tutti i condensatori CAP505025, tranne il RES CAP505025_6, il valore di capacità misurato si discosta dal valore medio per meno dell'1%.

Risulta ancor più significativo lo scostamento dal valore di capacità di progetto, ovvero la tolleranza di tale tecnologia di condensatori. Per i RES CAP1005050 è risultata una tolleranza inferiore al 2.5% mentre i RES CAP505025 hanno presentato una tolleranza inferiore all'1.1%. L'errore maggiore che si ha sui CAP1005050 è imputabile all'aumento di spessore del dielettrico rispetto ai CAP505025 (parità di tolleranza).Tale differenza può essere facilmente compensata in fase di design in future realizzazioni.

Per visualizzare al meglio la tolleranza di ogni singolo condensatore, per entrambe le tipologie di RES POWER CAP, è stata data una rappresentazione grafica con barre d'errore al 2.5%. Tramite questa rappresentazione, riportate in Figura 5.4 ed in Figura 5.5, si riesce a visualizzare al meglio come ogni componente non superi mai la banda d'errore prestabilita.



Figura 5.4 Rappresentazione dei valori di capacità misurati sui CAP1005050 con barre errore al 2.5%



Figura 5.5 Rappresentazione dei valori di capacità misurati sui CAP505025 con barre errore al 2.5%

Si può dunque concludere affermando che un buon dato di targa in termini di tolleranza sul valore di capacità per entrambe le tipologie di condensatori è del ± 2.5 %, che corrisponde ad utilizzare la lettera H del codice di tolleranza dei condensatori.

5.4 Fattore di dissipazione

La presenza della *ESR* porta ad avere uno sfasamento tra la tensione e la corrente inferiore ai 90°. La differenza tra 90° e l'angolo theta (θ) viene indicata con l'angolo δ come indicato in Figura 5.6. Alla tangente di tale angolo viene dato il nome di **fattore di dissipazione** $tan\delta$. Il fattore di dissipazione ha importanza nelle applicazioni in corrente alternata.



Figura 5.6 Diagramma vettoriale delle tensioni

Il fattore di dissipazione (dissipation factor) può essere calcolato con la seguente relazione:

$$tan\delta = \frac{ESR}{X_C} = ESR \cdot 2\pi f \cdot C$$

Quanto più piccola è la resistenza equivalente serie, tanto più piccolo è il $tan\delta$ cioè tanto migliore sarà la qualità del condensatore. Se ci si trova in condizioni per cui *ESL* è trascurabile e ci si trova a frequenze ben lontane da quelle di risonanza naturale del condensatore, si può considerare il $tan\delta$ una composizione di tre termini, riferimento all'Eq. 5.8. Il primo termine legato alla resistenza delle parti conduttrici (contributo serie $tan\delta_S$), il secondo termine legato alla resistenza d'isolamento (contributo parallelo $tan\delta_P$) ed infine il terzo termine legato alle perdite dielettriche ($tan\delta_D$).

Eq. 5.8 $tan\delta = tan\delta_{S} + tan\delta_{P} + tan\delta_{D}$

Essendo il fattore di dissipazione legato alla *ESR*, ed essendo la *ESR* funzione della frequenza allora anche il $tan\delta$ varierà al variare della frequenza. Il fattore di dissipazione, inoltre, varia con le ore di funzionamento del condensatore, con la temperatura e con l'umidità.

Eq. 5.7

Per ottenere il fattore di dissipazione è stato utilizzato l'impedenzimetro con l'ausilio del software in dotazione con lo strumento stesso. Per realizzare questa misura si è connesso l'impedenzimetro, tramite un apposito cavo seriale-USB, al computer. Tramite il software è stata eseguita una prova in un range di frequenze che varia da 1 kHz fino ad 1 MHz. In questo range sono stati misurati impedenza (in modulo e fase), la capacità serie e la resistenza serie. Per la realizzazione di queste prove sono stati utilizzati due condensatori CAP1005050, in modo da poter verificare che i risultati ottenuti sul primo condensatore siano congruenti a quelli ottenuti con il secondo. Un procedimento del tutto analogo eseguito per i condensatori CAP505025.

Gli andamenti del fattore di dissipazione in funzione della frequenza, ottenuti plottando il $tan\delta$ ricavato dalle misure effettuate, per i due RES CAP1005050 sono riportati in Figura 5.7.



Figura 5.7 Andamento $tan\delta$ in funzione della frequenza per CAP1005050_2 e CAP1005050_4

Gli andamenti per i due condensatori sono pressoché i medesimi. Si può osservare che a 100 kHz l'andamento di $tan\delta$ presenta un picco, questo picco in realtà non rappresenta l'andamento reale del fattore di dissipazione ma è dovuto al fatto che, in corrispondenza di tale valore di frequenza, l'errore commesso dall'impedenzimetro è massimo. Superati i 100 kHz lo strumento passa in una fascia successiva dove l'errore commesso sulla misura è inferiore. Infatti, superati i 100kHz l'andamento di $tan\delta$ si abbassa. La stessa situazione è presente in tutte le misure effettuate essendo un fenomeno legato allo strumento di misura e non al campione in prova.

L'andamento del $tan\delta$ in funzione della frequenza per i RES CAP505025 è rappresentato nella Figura 5.8.



Figura 5.8 Andamento $tan\delta$ in funzione della frequenza per CAP505025_2 e CAP505025_4

Confrontando gli andamenti delle due tipologie di RES POWER CAP si ottengono gli andamenti di Figura 5.9, da cui si può osservare che il fattore di dissipazione assume valori pressoché identici per le due tipologie di condensatori.



Figura 5.9 Confronto in termini di $tan\delta$ tra CAP1005050_2 e CAP505025_2

5.4.1 Confronto RES POWER CAP con condensatori in film e condensatori in mica

Il fattore di dissipazione è un parametro che viene fornito, nella maggior parte dei casi, dai costruttori di condensatori. Proprio per tale motivo si è voluto confrontare l'andamento del $tan\delta$ dei RES CAP con i condensatori attualmente disponibili sul mercato nel campo di applicazione d'interesse, che come già spiegato nei precedenti capitoli, sono i condensatori in mica ed i condensatori in film. Per il confronto sono stati utilizzati: un condensatore del costruttore Celem (condensatore in mica) il CP30/75 da 14.7 nF ed un condensatore della Kemet (condensatore il film) della serie C4C da 10 nF. Il confronto che si esegue è un confronto qualitativo che ha lo scopo di capire, nello spettro di frequenza analizzato, che valori assume il $tan\delta$ per le varie tecnologie. Questo perché per realizzare un confronto significativo anche dal punto di vista numerico sarebbe necessario che le tre tecnologie di condensatori confrontate (RES CAP, film e mica) avessero tutte lo stesso valore di capacità di riferimento. Gli andamenti ottenuti dal test sono riportati in Figura 5.10.



Figura 5.10 Confronto in termini $tan\delta$ tra RES CAP, Kemet e Celem

Dagli andamenti può essere osservato che per frequenze più basse dei 500 kHz il fattore di dissipazione del Kemet e del Celem è inferiore del 6% rispetto a quello dei RES POWER CAP, ma oltre il valore di frequenza indicato, le perdite dei Celem e dei Kemet diventano superiori (circa l'8%) a quelle dei RES CAP. Tuttavia, i valori di $tan\delta$ misurati per le diverse tecnologie di condensatori restano paragonabili.

6. Prove ad impulsi

Uno dei parametri con cui vengono targati i condensatori è il così detto dV/dt che indica la massima variazione della tensione nel tempo che può essere tollerata dal condensatore. Pertanto, è stato fondamentale testare i condensatori, oggetto di questo elaborato, allo scopo di definire il valore di derivata di tensione che sono in grado di sostenere ai propri terminali. Prima dell'esecuzione del test ad impulsi è stata eseguita una ricerca dei valori di tensione impulsiva con cui vengono targati i principali condensatori, nel campo d'applicazione di un sistema IPT, disponili sul mercato. Nella Tabella 6.1 sono riportati i valori di dV/dt di alcune case costruttrici di condensatori nel range di funzionamento d'interesse [15], [16], [17], [5].

Costruttore	Serie	dV/dt (V/μs)	
Kemet	C4C	2100	
Vishay	MMKP 386	2500	
Elettronic Concept	MP88CD104	3125	
Celem	CP 30/75	non fornito	

Tabella 6.1 dV/dt dei principali condensatori alta tensione e alta frequenza

I test ad impulso sono stati realizzati utilizzando il generatore di impulsi EMTEST VCS5000N10. Questo generatore ha la capacità di generare impulsi con ampiezza fino a 10 kV di tensione e per una corrente massima di 5 kA [18]. Il generatore fornisce in uscita la tensione impulsiva standard 1.2/50 μ s, dove il tempo di 1.2 μ s indica la durata del fronte di salita mentre il tempo di 50 μ s rappresenta il tempo all'emivalore del fronte di discesa (tempo in cui la tensione si riduce a metà del valore massimo).

Dal pannello frontale del generatore è possibile impostare l'ampiezza di tensione tra il 10% e il 90% (il valore di picco effettivamente raggiunto sarà superiore a quello impostato), il numero di impulsi consecutivi che si vogliono generare e anche il tempo tra un impulso ed il successivo.

Per targare i condensatori in termini di derivata di tensione si considera l'intervallo per il quale la forma d'onda di tensione impulsiva è approssimabile con una retta e tipicamente viene assunto come l'intervallo compreso tra il 10 e il 90% del picco di tensione (vedi Figura 6.1).



Figura 6.1 Forma d'onda della tensione generata dal generatore di impulsi VCS5000N10

La prova viene eseguita collocando l'elemento in prova ai terminali di uscita del generatore di impulsi, dopodiché viene impostato il generatore ad impulsi selezionando la tensione desiderata ed infine dal pannello frontale del generatore viene avviato il test. Per visualizzare le forme d'onda e misurare la corrente sono necessari degli strumenti di misura dedicati, descritti nel seguito.

6.1 Setup di laboratorio per la prova ad impulsi

Il generatore VCS5000N10 utilizzato è dotato di tre canali per la visualizzazione che, una volta collegati ad un oscilloscopio, consento di poter visualizzare le forma d'onda di tensione e di corrente in uscita dal generatore. Per effettuare delle prove ad impulsi è stato realizzato un setup costituito da (Figura 6.2):

- Generatore VCS5000N10
- Oscilloscopio LeCroy Wavesurfer 3000
- Bobina di Rogosky



Figura 6.2 Setup di laboratorio per la prova ad impulsi

Per monitorare la corrente durante i test, non è stato utilizzato il relativo canale del generatore ad impulsi ma una bobina di Rogosky, come mostrato nella Figura 6.3. La bobina di Rogosky permette una misura più pulita e più affidabile. Prima di iniziare il test vero e proprio e dunque applicare la tensione impulsiva è necessario connettere il condensatore in prova ai terminali d'uscita del generatore ad impulsi come mostrato nella Figura 6.3.



Figura 6.3 Terminali di uscita del generatore ad impulsi con collegamento della bobina di Rogosky



Figura 6.4 Connessione del condensatore ai terminali del generatore

Il generatore oltre a consentire la scelta del valore di tensione, consente di generare una serie di impulsi consecutivi distanti un certo tempo l'uno dell'altro. Il tempo minimo tra due impulsi dipende dall'ampiezza di tensione scelto per la prova, in quanto più si sale in tensione e più tempo sarà necessario al generatore per caricare i condensatori interni utilizzati per fornire l'impulso. Il fatto di poter impostare il numero di impulsi desiderato ed il fatto di avere un oscilloscopio in grado di salvare le forme d'onda ad ogni "evento di trigger", [19], ha consentito l'automatizzazione della prova. Dal pannello frontale del generatore, per ogni livello di tensione scelto per le prove, è stata impostata la generazione di N impulsi consecutivi. Ogni volta che l'impulso viene applicato al condensatore la forma d'onda viene visualizzata e salvata dall'oscilloscopio. I risultati così ottenuti vengono salvati in formato binario in un apposito file rinominati ogni volta dall'oscilloscopio stesso. Dopodiché tramite l'utilizzo di uno script Matlab, contenente una funzione di lettura ed interpretazione del codice binario generato dall'oscilloscopio LeCroy, è stato possibile ottenere due strutture. La prima delle quali contiene i valori di tensione assunti nel tempo, e la seconda contiene i valori di corrente assunti durante la prova. Una volta noti i vettori tensione, corrente e tempo è stato sufficiente plottarli al fine di ottenere le forme d'onda d'interesse.

6.2 Prove ad impulsi su condensatori RES CAP505025

Il valore di tensione impulsiva di partenza per le prove è stato scelto considerando i valori di dV/dt riportati nei cataloghi dei competitor presenti sul mercato (alcuni di questi riportati nella Tabella 6.1). È stato considerato come un buon valore di partenza quello di 2000 V/µs. Per completezza è stata riportata una foto (Figura 6.5) del pannello frontale dove sono stati impostati i principali parametri degli impulsi generati.



Figura 6.5 Display del generatore ad impulsi impostato a 2000 V

La procedura di esecuzione del test seguita, per entrambe le tipologie di RES CAP, è descritta di seguito. È stato scelto un valore di tensione impulsiva da cui iniziare le prove. Se la prova al livello di tensione iniziale, 2000 V/µs, viene superata dal componente ovvero il dielettrico resta inalterato (no danneggiamenti e/o perforazioni) allora si incrementa l'impulso di tensione di un'ampiezza pari a 1000 V. II superamento della prova da parte del condensatore avviene nel momento in cui esso sopporta cento impulsi consecutivi. Se, invece, la prova non viene superata cioè termina prima dei cento impulsi, allora si stabilisce il livello di tensione e il numero di cicli che il condensatore in prova è stato in grado di sopportare. Se il condensatore sopporta tutti i livelli di tensione crescenti applicati ai suoi terminali si arriva al raggiungimento della massima tensione impulsiva fornibile dal generatore, che nel caso del VCS5000N10 è pari a 10 kV. Durante lo svolgimento delle prove è stato riscontrato che il generatore presenta dei problemi nel realizzare una serie di impulsi consecutivi a questo livello di tensione pertanto ci si è fermati ad un'ampiezza di 9000 V. Al termine di ogni prova il condensatore è stato sottoposto ad una prova con impedenzimetro per valutarne lo stato e verificarne eventuali cambiamenti. Le prove sono iniziate testando il condensatore numero CAP505025 1.

6.2.1 Prove ad impulsi a 2000 V su CAP505025_1

Sono state effettuate cento prove a 2000 V sul condensatore CAP505025_1. Ogni 12 secondi il generatore ad impulsi applicava sul condensatore un impulso d'ampiezza pari a 2000 V in un tempo di 1 μ s, questo fino ad arrivare al centesimo impulso. I risultati del primo impulso sono riportati in Figura 6.6 e quelli del centesimo sono riportati in Figura 6.7.



Figura 6.6 Primo impulso a 2000V/µs sul condensatore CAP505025_1



Figura 6.7 Centesimo impulso a 2000V/µs sul condensatore CAP505025_1

Dai grafici ottenuti è stato stabilito che il condensatore risponde bene ad un impulso di 2000 V/µs in quanto non viene riscontrata la presenza di alcuna scarica parziale ed inoltre non è possibile notare alcuna differenza tra il primo test ed il centesimo test. La distorsione che si vede nella forma d'onda della corrente è dovuta al **campionamento** eseguito dall'oscilloscopio e dalla scala scelta per campionare (V/divisione). Nel momento in cui si innesca una scarica parziale compaiono degli impulsi di corrente transitori di durata limitata (della decina di nanosecondi). Dunque, l'evento di scarica parziale può essere rilevato come una variazione molto piccola della corrente assorbita dal condensatore sottoposto agli impulsi di tensione [20].

6.2.2 Prove ad impulsi a 3000 V su CAP505025_1

Una volta superata la prova a 2000 V/µs il condensatore è stato testato a 3000 V/µs, i risultati ottenuti per il centesimo impulso sono riportati in Figura 6.8. Come si può constatare, a tale livello di tensione iniziano le prime scariche parziali che risultano visibili nella parte iniziale della semionda positiva della corrente. Queste scariche parziali però non hanno causato nessun danneggiamento e/o perforazione del dielettrico. Per accertarsi di ciò il condensatore è stato misurato al termine della prova, riscontrando che il valore della capacità e della *ESR* non erano stati alterati dalla prova.



Figura 6.8 Centesimo impulso a 3000V/µs sul condensatore CAP505025_1

Pur essendo presenti fenomeni di scarica parziale il condensatore ha resistito a cento impulsi consecutivi non perforando il dielettrico, dunque, è stato possibile continuare nel testing del componente per livelli di tensione impulsiva crescenti seguendo sempre la procedura descritta.

6.2.3 Prove ad impulsi a 4000-5000-6000-7000-8000 e 9000 V su CAP505025_1

La procedura seguita per il testing è stata ripetuta fino a raggiungere i 9000 V/ μ s. Le forme d'onda relative a tali prove sono riprodotte in Figura 6.9, Figura 6.10, Figura 6.11, Figura 6.12, Figura 6.13 e in Figura 6.14.



Figura 6.9 Impulso a 4000V/µs sul condensatore CAP505025_1



Figura 6.10 Impulso a 5000V/µs sul condensatore CAP505025_1



Figura 6.11 Impulso a 6000V/µs sul condensatore CAP505025_1



Figura 6.12 Impulso a 7000V/µs sul condensatore CAP505025_1



Figura 6.13 Impulso a 8000V/µs sul condensatore CAP505025_1



Figura 6.14 Impulso a 9000V/µs sul condensatore CAP505025_1

Dai test effettuati è stato possibile notare che le scariche parziali diventano più frequenti e d'ampiezza maggiore al crescere dell'ampiezza di tensione impulsiva impostata, inoltre esse hanno una durata temporale via via crescente. Il livello di tensione di 9000V/µs, rappresenta la situazione più critica per il condensatore. Nonostante le scariche parziali il RES CAP505025_1 non ha presentato alcun danneggiamento evidente resistendo a cento impulsi di ampiezza pari a 9000 V.

Per stabilire il livello di derivata di tensione massima sopportabile dal RES CAP505025, ed il numero massimo di cicli tollerabile è stato deciso di procedere al testing del componete CAP505025_3. Tale decisione è stata presa perché continuando il testing sul condensatore numero 1 non si sarebbe stati in grado di stabilire se la scarica del condensatore (cedimento del dielettrico) sarebbe avvenuta a causa del raggiungimento del numero massimo di cicli sopportabili oppure se a causa degli stress delle prove precedenti già sostenute dal componente.

6.2.4 Stima preliminare del dato di targa su CAP505025_3

Il condensatore CAP505025_3 è stato utilizzato in una prima fase di testing, costituita da circa dieci test, a livelli di stress più bassi tra i 2000 V/µs ed i 3000 V/µs. Questa procedura è stata utile per individuare un plausibile range di dV/dt che sia rappresentativo per questa tipologia di RES POWER CAP. Dal paragone con il comportamento dei Kemet, al proprio dV/dt di targa, è stato deciso di prendere come dato di targa il massimo valore di dV/dt per il quale non compaiono fenomeni di scarica parziale ovvero oscillazioni sulla corrente .Dalle prove è emerso che un valore di tensione che non causi fenomeni di scariche parziali si trova al di sotto dei 2500 V/µs.

Confrontando la Figura 6.15 e la Figura 6.16 è possibile osservare come a livelli di tensione di 2000 V le scariche parziali non sono presenti mentre a 2500 V iniziano ad essere visibili sul fronte positivo di salita della corrente. Da questi andamenti è stato possibile dedurre che un dato di targa rappresentativo dei RES CAP505025 si trovi all'interno di questo range di valori di tensioni impulsiva.



Figura 6.15 Prova impulsiva a 2000 V/µs

Figura 6.16 Prova impulsiva a 2500 V/µs

Questa stima preliminare è servita come punto di partenza per un'analisi più accurata che è stata effettuata tramite l'utilizzo di un ulteriore condensatore, il CAP505025_2.

Terminate questa fase di testing, il condensatore in questione è stato testato alla massima tensione erogabile dal generatore ad impulsi (9000 V/ μ s) al fine di determinare il numero massimo di impulsi consecutivi che esso è in grado di sopportare.

6.2.5 Prove ad impulsi a 9000 V su CAP505025_3

Nella seconda fase di testing il CAP505025_3, è stato utilizzato per valutare a 9000 V/µs il numero di cicli sopportati. La prova ha portato alla conclusione che questa tecnologia di condensatori è in grado di sopportare un numero massimo pari a 188 cicli (impulsi) consecutivi con valore di tensione tra il 10% e il 90% di 9000V. Si sottolinea che il picco di tensione effettivamente applicato al condensatore è poco superiore 10000 V. Nelle figure sottostanti sono raffigurati gli andamenti misurati con l'oscilloscopio, in particolare sono stati riportati gli andamenti relativi al primo impulso (Figura 6.17), all'impulso antecedente la scarica (Figura 6.18) e all'impulso corrispondente alla perforazione del dielettrico (Figura 6.19).



Figura 6.17 Primo impulso a 9000V/µs sul condensatore CAP505025_3



Figura 6.18 Cento ottantasettesimo impulso a 9000V/µs sul condensatore CAP505025_3



Figura 6.19 Cento ottantottesimo impulso a 9000V/µs sul condensatore CAP505025_3 -Scarica

È stato osservato che dopo i primi cento cicli il comportamento delle scariche parziali diventa via via più significativo e visibile questo fino ad arrivare agli ultimi impulsi prima della scarica dove le scariche parziali assumono ampiezza e durata sempre maggiori. Il cento ottantottesimo ciclo ha causato la rottura del condensatore (scarica totale) venendo meno le proprietà d'isolante del dielettrico con relativo scoppio del componente. Dalla Figura 6.19 si può osservare che nell'istante in cui il condensatore ha scaricato, la corrente ha assunto valori molto elevati uscendo dal fondo scala impostato sull'oscilloscopio. In Figura 6.20 è visibile una foto del condensatore esploso, in cui è ben visibile il cedimento del dielettrico avvenuto sul bordo del condensatore.



Figura 6.20 Foto del CAP505025_3 con scarica sullo spigolo

6.3 Dato di targa condensatori RES CAP505025

Avendo l'obiettivo di targare, in termini di dV/dt, il RES POWER CAP505025, si è partiti dalle informazioni raccolte dal condensatore numero 3, e dunque della conoscenza che un plausibile valore per il datasheet si trovi all'interno del range 2000-2500 V/µs. Effettuando ulteriori test, nel range prestabilito, con step di tensioni crescenti ed un passo ravvicinato tra di loro (2000 - 2100 - 2150 - 2200 e 2300 V) è stato possibile definire un valore di tensione impulsiva che caratterizza il condensatore in questione. Questa prova, per step crescenti ravvicinati (50/100 V), ha portato a stabilire come dato di targa un valore di dV/dt pari a **2100 V/µs**. Per la tensione scelta, le scariche risultano praticamente assenti o comunque non riconoscibili a causa della presenza del campionamento dell'oscilloscopio. Salendo con l'ampiezza dell'impulso di tensione, cioè passando a 2150 - 2200 e 2300 V/µs, le scariche parziali sul condensatore iniziano a diventare visibili e non più confondibili con il campionamento.

Per accertarsi che la scelta fatta sia corretta, e cioè che il valore selezionato possa essere definito come parametro del datasheet di questa famiglia di RES POWER CAP, si sono effettuate mille prove a 2100 V/µs. È stato verificato in primo luogo che il condensatore è in grado di sopportare i mille impulsi consecutivi e in secondo luogo che il condensatore non presenta delle differenze tra i primi impulsi e gli ultimi. I risultati di questo test sono riportati in Figura 6.21 ed in Figura 6.22.



Figura 6.21 Primo impulso a 2100 V/µs sul condensatore CAP505025



Figura 6.22 Millesimo impulso a 2100 V/µs sul condensatore CAP505025

Osservando l'andamento della tensione (forma d'onda blu) si può vedere come il valore di 2100 V impostato per la prova è il valore tra il 10 e il 90% ma che al condensatore è stato applicato un valore di tensione di picco pari a 2350 V.

Per visualizzare al meglio come non vi siano differenze tra il primo e l'ultimo impulso sono stati riportati, sullo stesso grafico, le forme d'onda delle due correnti come mostrato nella Figura 6.23.



Figura 6.23 Confronto corrente al primo impulso (nera) e corrente al millesimo impulso (rossa) su CAP505025

Con riferimento al grafico si può vedere che gli andamenti sono pressoché gli stessi a meno di un lieve offset temporale. Inoltre, eseguendo uno zoom sul grafico si può affermare che la frastagliatura dell'andamento è dovuto al campionamento dell'oscilloscopio. Come per tutte gli altri test impulsivi, al termine della prova il condensatore è stato misurato utilizzando l'impedenzimetro e non è stata riscontrata alcuna differenza nei valori di C_s e *ESR* rispetto a quelli antecedenti la prova. Concludendo, i risultati del test hanno confermato che il valore di **2100 V/µs** esprime un buon dato di targa per la famiglia dei **RES CAP505025**.

6.4 Prove impulsive su condensatori RES CAP1005050

Questa tipologia di condensatori si differenzia rispetto ai primi in quanto ha uno spessore doppio di dielettrico e di cover layer. La procedura di test eseguita è del tutto analoga a quella usata per i CAP505025. Un primo condensatore CAP1005050 1, è stato utilizzato per eseguire due tipi di prove: la prima tipologia di prova svolta a livelli di tensione più bassi, compresi trai 2000 e i 3000 V/µs, consentendo in questo modo la stima preliminare di un range per il dato targa, mentre il secondo tipo di test impulsivo consiste nella valutazione del numero impulsi che lo stesso condensatore è in grado di sopportare ad una tensione impulsiva di ampiezza pari a 9000 V/µs. Infine, un secondo condensatore (CAP1005050 3) è stato utilizzato per eseguire le prove che hanno consentito di raffinare la stima preliminare e di confermare un valore di dV/dt. Per questa tipologia di condensatori è stato possibile risparmiare un componente in quanto si conosceva già il comportamento per valori di tensioni impulsive intermedie (simile a quello dei CAP505025) ed inoltre si era a conoscenza sia che il dato di targa fosse in un range compreso tra i 2000 e i 3000 V/µs e sia che il valore di dV/dt che potrebbe causare il danneggiamento del condensatore (perforazione del dielettrico) è il massimo fornibile dal generatore.

6.4.1 Stima preliminare del dato di targa su CAP1005050_1

Dalle prove a livelli di tensione più basso, tra i 2000 V/µs ed i 3000 V/µs, è emerso che un livello di tensione che non causi fenomeni di scariche parziali si trovi poco al di sotto dei 2500 V/µs. Come si vede dalle figure sotto riportate, a 2000 V (Figura 6.24) le scariche non sono presenti mentre a 2500 V (Figura 6.25) iniziano ad esserlo. Dunque, un possibile valore di targa si trova all'interno di questo range di tensioni impulsiva.



Figura 6.24 Impulso a 2000 V/µs sul condensatore CAP1005050_1



Figura 6.25 Impulso a 2500 V/µs sul condensatore CAP1005050_1

Per tensioni impulsive di 3000 V/µs il fenomeno di scarica parziale diventa ancora più evidente. La stima preliminare, effettuata con questo condensatore, è servita come punto di partenza per un'analisi più accurata tramite l'utilizzo del CAP1005050_3, realizzata allo scopo di definire un valore impulsivo da inserire nel datasheet.

6.4.2 Prove ad impulsi a 9000 V su CAP1005050_1

In una seconda fase lo stesso condensatore è stato utilizzato per valutare a 9000 V/µs il numero di impulsi sopportabili dalla famiglia di condensatori CAP1005050. Il condensatore in questione ha sopportato mille impulsi, con un relativo picco di circa 10800 V, senza mai scaricare. Al contempo sono avvenute delle scariche parziali d'ampiezza più significativa al crescere del numero d'impulsi come visibile in Figura 6.26 ed in Figura 6.27.



Figura 6.26 Primo impulso a 9000 V/µs sul condensatore CAP1005050_1



Figura 6.27 Millesimo impulso a 9000 V/µs sul condensatore CAP1005050_1

6.5 Dato di targa condensatori RES CAP1005050

Per fornire un dato di targa del RES POWER CAP1005050 si è partiti dalle informazioni raccolte sul condensatore numero 1, cioè della conoscenza che un plausibile dato per il datasheet si trovi all'interno del range di tensione impulsiva 2000-2500 V/µs. Sul CAP1005050_3 sono stati effettuati ulteriori test per step di tensioni crescenti ravvicinati tra loro (2000 - 2100 - 2200 - 2300 e 2400 V). Questi test hanno portato ad affermare che un plausibile valore di tensione impulsiva da riportare nel datasheet sia di **2300 V/µs**. Per targare il RES CAP1005050, analogamente a quanto fatto sulla prima tipologia di RES CAP, è stato scelto un valore di tensione impulsiva che non presenti fenomeni di scariche parziale visibili. Per accertarsi della validità del valore scelto, il condensatore è stato sottoposto a mille impulsi a 2300V/µs verificando che non vi siano differenza tra i primi impulsi e gli ultimi, e dunque che non vi sia un degrado della prestazione del condensatore con l'aumentare del numero di impulsi. Gli andamenti ottenuti da questo test sono in Figura 6.28 e Figura 6.29.



Figura 6.28 Primo impulso a 2300 V/µs sul condensatore CAP1005050



Figura 6.29 Millesimo impulso a 2300 V/µs sul condensatore CAP1005050

Si riporta nella Figura 6.30 gli andamenti delle correnti riguardanti il primo e l'ultimo impulso, in modo da notare come non vi siano differenze.



Figura 6.30 Confronto corrente al primo impulso (nera) e corrente al millesimo impulso (rossa) su CAP1005050

Si ricorda che il valore di 2300 V impostato per la prova è il valore tra il 10 e il 90 % ma il condensatore ha sopportato un valore di picco della tensione di circa 2600 V. Infine, anche in questo caso, al termine del test il condensatore è stato rimisurato non riscontrando alcuna differenza nei valori di *Cs* e di *ESR* rispetto a quelli antecedenti la prova.

Concludendo, dalle prove impulsive effettuate e dai risultati da esse ottenute si può confermare che il valore di **2300 V/µs** esprima un buon dato di targa impulsivo per i componenti **RES CAP1005050**.

6.6 Confronto in termini di tensione impulsiva tra condensatore Kemet in film e RES POWER CAP

In questo ultimo paragrafo si è scelto di riportare un confronto tra i condensatori RES POWER CAP e un condensatore in film. Il confronto è stato effettuato utilizzando un condensato in film della Kemet, appartenente alla serie C4C. Tale condensatore è caratterizzato dall'avere un valore di $C_S = 10 nF$ e viene targato dal costruttore per un $dV/dt = 2100 V/\mu s$. Dunque, il Kemet utilizzato per il confronto ha un valore di capacità simile a quello dei RES CAP (il cui valore di progetto è pari a 6.2 nF). Avendo i Kemet un valore di tensione impulsiva pari a 2100 V/ μ s, come riportato nel datasheet [15], il primo test sul condensatore in film è stato eseguito applicando un impulso di 2000 V/ μ s. I risultati ottenuti sono stati confrontati con quelli precedentemente ottenuti sui RES CAP.



Figura 6.31 Impulso a 2000 V/µs sul Kemet



Figura 6.32 Impulso a 2000 V/µs sul CAP505025



Figura 6.33 Impulso a 2000 V/µs sul CAP1005050

Nella Figura 6.31 e Figura 6.32 sono stati messi a confronto gli andamenti del Kemet con gli andamenti del RES CAP505025, mentre nella Figura 6.31 e nella Figura 6.33 il confronto eseguito è quello tra Kemet e CAP1005050. Ciò che emerge dal confronto è che per questo livello di tensione impulsiva entrambe le tecnologie rispondono allo stesso modo. Dunque, nessuna delle due tecnologie presenta fenomeni di scarica parziali visibili. Passando a livelli di tensione impulsiva superiori, ad esempio 3000 V/µs, il RES CAP inizia a presentare scariche parziale più evidenti rispetto al Kemet. Questo accade in quanto i Kemet sono condensatori *auto-cicatrizzanti* (self healing), ovvero il condensatore è in grado di isolare le scariche parziali (cortocircuiti) nel dielettrico mediante l'evaporazione dello strato di metallizzazione attorno al punto di perforazione [21]. Si giunge alla conclusione che confrontare il Kemet ed i RES POWER CAP per valori di tensioni impulsive successive a quelle riportate sia poco sensato per via del comportamento, appena descritto, del condensatore in film.
7. Prove di tensione alternata

7.1 Introduzione

Per la realizzazione delle prove di tensione alternata è stato costruito un sistema che consente di alimentare in AC, alla tensione e frequenza desiderate, il condensatore in prova. Il sistema in questione è stato costruito in quanto dall'analisi delle norme e degli standard non è stato trovato nessun sistema per effettuare tali prove. Tale banco prova è costituito da due induttori mutuamente accoppiati. Dunque, per effettuare questa tipologia di test è stato realizzato un sistema di IPT (inductive power transfer) basto sul principio dell'induzione magnetica, secondo il quale se un avvolgimento di N1 spire è interessato da una corrente variabile nel tempo $i_1(t)$ esso genera un flusso magnetico variabile $\Phi_1(t)$. Come presentato in Figura 7.1.



Figura 7.1 Illustrazione meccanismo induttivo di trasmissione della potenza (IPT)

La relazione che lega la tensione ai terminali dall'avvolgimento $v_1(t)$ con la corrente $i_1(t)$ è espressa nella Eq. 7.1, dove il parametro L_1 indica *l'auto induttanza* dell'avvolgimento.

$$v1(t) = L_1 \frac{di_1}{dt}$$
Eq. 7.2

$$L_1 = N_1 \frac{d\Phi_1}{di_1}$$

In prossimità dell'avvolgimento N1 è presente un secondo avvolgimento di N2 spire che concatenerà un flusso $\Phi_{12}(t)$. Quindi per via di tale flusso ai capi dell'avvolgimento secondario sarà presente una tensione variabile nel tempo (legge di Faraday). La tensione misurata direttamente ai terminali dell'avvolgimento secondario in condizioni di assenza di carico ($R_L = 0$) può essere chiamata tensione a vuoto ed è espressa dalla relazione sottostante (Eq. 7.3):

Eq. 7.3

$$v_{oc}(t) = N_2 \frac{d\Phi_{12}}{di_1} \frac{di_1}{dt} = M \frac{di_1}{dt}$$

$$M = N_2 \frac{d\Phi_{12}}{di_1}$$
Eq. 7.4

Dove *M* è la *mutua induttanza* tra gli avvolgimenti. Ponendo al secondario un carico R_L , come rappresentato in Figura 7.1, la bobina secondaria costituisce un circuito chiuso in cui può circolare una corrente $i_2(t)$. In questo modo può avvenire lo scambio di potenza tra i due avvolgimenti. Le equazioni nel dominio del tempo che governano tale sistema sono le seguenti (Eq. 7.5):

$$\begin{cases} v1(t) = R_1 i_1(t) + L_1 \frac{di_1}{dt} - M \frac{di_2}{dt} \\ M \frac{di_1}{dt} = v_{oc}(t) = R_2 i_2(t) + L_2 \frac{di_2}{dt} + R_L i_2(t) \end{cases}$$
 Eq. 7.5

Dove R_1 e R_2 rappresentano le resistenze dei rispettivi avvolgimenti. Tale sistema può essere schematizzato come raffigurato in Figura 7.2



Figura 7.2 Rappresentazione circuitale del sistema IPT illustrato [2]

Sul sistema appena descritto è possibile applicare **l'approssimazione di prima armonica** (*first harmonic approximation*) [2], ciò significa che si considera il sistema funzionante ad una singola frequenza. Questa assunzione consente l'utilizzo della notazione fasoriale. Quindi implica che le equazioni (Eq. 7.5) posso essere riscritte attraverso la pulsazione angolare ω , come riportato nell'Eq. 7.6:

Eq. 7.6

$$\begin{cases} \bar{V}_1 = R_1 \bar{I}_1 + j\omega L_1 \bar{I}_1 - j\omega M \bar{I}_2 \\ j\omega M \bar{I}_1 = R_2 \bar{I}_2 + j\omega L_2 \bar{I}_2 + R_L \bar{I}_2 \end{cases}$$

Dalla seconda equazione dell'Eq. 7.5 è possibile ricavare la corrente \bar{I}_2 in funzione della corrente nell'avvolgimento primario \bar{I}_1 .

Sostituendola nell'equazione dell'avvolgimento primario si giunge ad una relazione che lega la tensione della sorgente \bar{V}_1 alla corrente \bar{I}_1 (Eq. 7.7).

$$\bar{V}_1 = (R_1 + j\omega L_1)\bar{I}_1 + \frac{\omega^2 M^2}{R_2 + j\omega L_2 + R_L} \bar{I}_1$$

Facendo il rapporto tra tensione primaria e corrente primaria si ottiene l'impedenza equivalente vista al primario dal generatore. Questa impedenza viene chiamata impedenza totale \bar{Z}_T :

$$\frac{\bar{V}_1}{\bar{I}_1} = \bar{Z}_T = (R_1 + j\omega L_1) + \frac{\omega^2 M^2}{R_2 + j\omega L_2 + R_L}$$
Eq. 7.8

L'avvolgimento primario viene solitamente denominato circuito trasmettitore o in inglese **transmitter**, mentre il circuito secondario viene detto circuito ricevitore o **receiver.** Il primo termine dell'equazione Eq. 7.8 è detto impedenza del solo circuito trasmettitore in assenza di accoppiamento \bar{Z}_1 (Eq. 7.9), mentre il secondo termine rappresenta l'effetto che il receiver ha, quando è accoppiato, sul transmitter anche definita **impedenza riflessa** \bar{Z}_R (Eq. 7.10).

$$\bar{Z}_{1} = (R_{1} + j\omega L_{1})$$
Eq. 7.9
$$\bar{Z}_{R} = \frac{\omega^{2} M^{2}}{R_{2} + j\omega L_{2} + R_{L}}$$

Si osserva, con riferimento al circuito in Figura 7.3, che il denominatore della \bar{Z}_R è equivalente all'impedenza che il receiver mostra al generatore \bar{V}_{oc} .



Figura 7.3 Circuito equivalente del receiver [2]

Dal lato transmitter l'impedenza ωL_1 implica la presenza una potenza apparente S_1 più elevata della potenza attiva fornita P_1 . L'avere $S_1 \gg P_1$ evidenzia come la potenza fornita dal generatore sia molto maggiore della potenza attiva trasmessa, come descritto in [22]. Lato receiver l'impedenza ωL_2 riduce la corrente \bar{I}_2 ; ne consegue una forte riduzione nella capacità di trasferire potenza. Quanto detto ha come conseguenze; prima di tutto la limitazione della potenza trasferita, un aumento del costo degli switch di potenza sul lato di generazione e la necessità di far operare gli switch in condizioni di hard-switching con conseguente riduzione dell'efficienza, [23], [24], [25].

Per ovviare a queste limitazioni è possibile inserire su entrambi i lati del sistema IPT dei condensatori al fine di ottenere la compensazione delle componenti induttive delle impedenze $\bar{Z}_1 \, e \, \bar{Z}_2$. Dunque, i condensatori devono essere scelti in modo da eseguire la cancellazione della componente induttiva di entrambi gli avvolgimenti alla stessa frequenza. In questo modo si è realizzato un **sistema con compensazione serie**, come illustrato in Figura 7.4.



Figura 7.4 Circuito equivalente con compensazione serie

È possibile verificare che la condizione di massimo trasferimento di potenza è quella in cui il trasferimento di potenza reattiva è nullo [26], ovvero quando la serie dei due bipoli (reattivo induttivo e reattivo capacitivo) è pari a zero ma ciò significa ricondursi alla definizione di **risonanza**, ovvero:

 $C_2 = \frac{1}{\omega_0^2 L_2}$

Eq. 7.11

Dove ω_0 è la pulsazione di risonanza ed è legata alla frequenza di risonanza f_0 , tramite la nota espressione $\omega_0 = 2\pi f_0$. In modo del tutto analogo, nel caso di risonanza serie, per il condensatore C_1 lato transmitter in quanto esso deve semplicemente compensare l'auto induttanza del transmitter indipendentemente dall'accoppiamento.

Dopo aver inserito i condensatori di compensazione C_1 e C_2 le equazioni del sistema si modificano, e nell'ipotesi di poter trascurare i contributi resistivi di entrambi gli avvolgimenti $R_1 = R_2 = 0$, diventano:

$$\bar{Z}_{T} = j(\omega L_{1} - \frac{1}{\omega C_{1}}) + \frac{\omega^{2} M^{2}}{(j\omega L_{2} - \frac{1}{\omega C_{2}}) + R_{L}}$$
Eq. 7.12

Alla pulsazione di risonanza del sistema ω_0 , avendo scelto correttamente i valori di capacità in modo da far risuonare il sistema alla frequenza desidera, l'impedenza totale risulta:

$$\bar{Z}_T|_{\omega=\omega_0} = \frac{\omega^2 M^2}{R_L}$$

In queste condizioni la tensione indotta sul receiver diventa:

Ricordando che $\bar{I}_1 = \frac{\bar{V}_1}{\bar{Z}_T}$ si può riscrivere l'Eq. 7.14 sostituendo il valore \bar{Z}_T in condizioni di risonanza, ottenendo in questo modo la tensione \bar{V}_{oc} e la corrente nel circuito ricevitore \bar{I}_2 in condizioni di risonanza:

 $\bar{V}_{oc} = j\omega_0 M \bar{I}_1$

Eq. 7.15

$$\bar{V}_{oc} = j\omega_0 M \frac{\bar{V}_1}{\bar{Z}_T} = j\omega_0 M \bar{V}_1 \frac{R_L}{\omega_0^2 M^2} = jR_L \frac{\bar{V}_1}{\omega_0 M}$$

$$\bar{I}_2 = \frac{\bar{V}_{oc}}{R_L} = jR_L \frac{\bar{V}_1}{\omega_0 M} \frac{1}{R_L} = j\frac{\bar{V}_1}{\omega_0 M}$$
Eq. 7.16

Quindi, alla pulsazione di risonanza ω_0 , la corrente secondaria \bar{I}_2 dipende solo dalla tensione di alimentazione primaria e dal mutuo accoppiamento tra i due avvolgimenti (vedi Eq. 7.16). Inoltre, tale corrente \bar{I}_2 risulta in perfetta quadratura (presenza del termine *j*) rispetto alla tensione di alimentazione \bar{V}_1 .

Se si fa tendere il carico R_L a zero (ovvero i terminali del receiver vengono semplicemente posti in cortocircuito), con riferimento alla Figura 7.5 ciò significherebbe:

$$R_L \to 0 \Rightarrow \bar{Z}_T \to \infty \Rightarrow \bar{I}_1 \to 0$$

Dunque, in questa condizione il sistema assorbe al primario (lato transmitter) una corrente idealmente nulla.



Figura 7.5 Rappresentazione circuitale in condizioni di risonanza ed R_L a zero.

Per la realizzazione delle prove di tensione alternata sul RES POWER CAP è stata sfruttata tale condizione caratteristica di funzionamento di un sistema IPT con compensazione serie. Dunque, i vantaggi nell'utilizzo del sistema di prova creato alla pulsazione di risonanza ω_0 e in condizione di carico $R_L = 0$ sono:

- 1. Una corrente assorbita dall'avvolgimento primario \bar{I}_1 prossima a zero, nella realtà la \bar{I}_1 sarà maggiore di zero in quanto la sorgente deve fornire tutte le perdite del sistema.
- 2. Un livello di tensione del convertitore V_{DC} un ordine di grandezza inferiore rispetto alla tensione applicata ai capi del condensatore.
- 3. Un sistema intrinsecamente protetto, in quanto in caso di esplosione del condensatore in prova per proteggere il resto del sistema è sufficiente impostare una protezione via software (protezione di corrente attivata).
- 4. Facile scorporo delle perdite nel circuito primario (trascurando le perdite del convertitore) dalle perdite dell'intero sistema. Questo accade perché la corrente secondaria è un ordine di grandezza superiore rispetto a quella primaria e ciò consente di poter ricavare con facilità, una volta scorporate le perdite primarie, le perdite sul condensatore.

7.2 Realizzazione del banco prova

Per la realizzazione del sistema di test è dunque necessaria la presenza di due induttori mutuamente accoppiati. In un primo momento è stato pensato di realizzare gli induttori del banco prova, tramite la serie di componenti induttivi presenti sul mercato in modo da raggiungere il valore di induttanza richiesto. Ciò non è stato possibile in quanto la maggior parte degli induttori trovati non rispettava la specifica richiesta in corrente e la restante parte di induttori trovati presentava un valore di induttanza troppo basso. Il che significa che per raggiungere il valore target di induttanza sarebbe servito un numero troppo elevato di componenti. La soluzione pensata per la realizzazione del banco è stata quella di costruire delle bobine usando del **filo litz**. Il filo litz è stato avvolto su un rocchetto di legno al fine di realizzare i due avvolgimenti, quello lato transmitter e quello lato receiver. In questo modo è stato possibile raggiungere il target di induttanza richiesto, che per il testing di condensatori del valore C = 6.2 nF ed una frequenza di risonanza di f = 100 kHz è pari a:

$$L = \frac{1}{\omega^2 C} = \frac{1}{(2\pi f)^2 C} = 408.6 \,\mu H$$

Il rocchetto utilizzato per creare il banco prova è rappresentato in Figura 7.6.



Figura 7.6 Sezione del rocchetto utilizzato per realizzare il banco prova

Con riferimento alla Figura 7.7 e Figura 7.8 il filo litz utilizzato per realizzare l'avvolgimento presenta le seguenti caratteristiche:

- 2000 trefoli
- Copertura Doppio Mylar (isolante)
- Sezione 15.7 mm² rettangolarizzato 4.6x6.7mm

Eq. 7.17

Mentre il singolo trefolo è caratterizzato dall'avere:

- Diametro nominale 0.10 mm
- Classe termica (°C): 155
- Grado dello smalto G1
- Tipo di smalto: saldabile in poliuretano



Figura 7.7 Schematizzazione del filo litz con vista dei singoli trefoli [27]



Figura 7.8 Foto del filo litz

L'avvolgimento primario (lato transmitter) è stato realizzato sulla base del rocchetto mentre l'avvolgimento secondario (lato receiver) è stato realizzato su una base movibile in legno il che consente di variare la distanza tra i due avvolgimenti e quindi il muto accoppiamento tra gli stessi. Per la realizzazione delle prove la base è stata posta ad una distanza di 14 cm dall'ultima spira del primo avvolgimento. In Figura 7.9 è riportata uno schema rappresentativo del banco IPT completo di entrambi gli avvolgimenti.



Figura 7.9 Schematizzazione del banco prova completo dei due avvolgimenti

Per il progetto delle bobine è stato utilizzato il software FEMM.

7.2.1 Stima del valore d'induttanza degli avvolgimenti con simulazioni FEMM

Prima della realizzazione costruttiva degli avvolgimenti è stata svolta una stima d'induttanza tramite simulazioni eseguite con il software FEMM. Considerando che la frequenza d'interesse per le applicazioni (IPT) è di circa 100 kHz, le simulazioni sono state impostate a tale valore frequenza. Nel software è possibile impostare un problema di tipo assialsimmetrico in guanto la geometria. le proprietà dei materiali e le sorgenti di campo (in questo caso sono gli avvolgimenti) presentano simmetria assiale rispetto all'asse di mezzeria del rocchetto. Dopo aver introdotto i dati iniziali che definiscono il problema è possibile disegnare la geometria che si vuole analizzare. In questo caso non si conosce quale sia la configurazione dell'avvolgimento che porta ad ottenere il valore di induttanza richiesto, sono guindi stati svolti una serie di tentativi. Prima di passare alla risoluzione del problema è necessario definire le condizioni al contorno note con il termine di Boundary conditions che in questo caso sono state definite usando la condizione di Dirichlet. Questa condizione significa assegnare un valore del potenziale magnetico vettore lungo le linee appartenenti al boundary, è stato assegnato $\vec{A} = 0$. I boundary sono stati impostati ad una distanza pari a cinque volte la semi-altezza del rocchetto al fine di poter considerare come assunzione valida che il potenziale magnetico vettore sia nullo lungo i boundary. Un ulteriore passaggio necessario prima di passare alla soluzione vera e propria della simulazione FEMM è quello di scegliere il materiale con cui è realizzato l'avvolgimento.

In una prima fase di simulazione è stato impostato un filo realizzato in rame pieno ed in un secondo momento della simulazione è stato impostato un filo realizzato in litz, essendo questa una opzione offerta da Femm [28]. Selezionando questa seconda impostazione il software tende a rendere uniforme la densità di corrente nella sezione del conduttore sulla base di alcuni coefficienti. Le due simulazioni sono state fatte per valutare le differenze nel realizzare l'avvolgimento con un filo in rame pieno oppure con un filo in litz con le caratteristiche specificate. I risultati ottenuti utilizzando il filo in rame pieno sono differenti da quelli ottenuti usando il filo litz questo a causa dell'**effetto di prossimità** [29]. Utilizzando il filo in rame pieno l'effetto prossimità è presente ed è ben visibile tra conduttori che costituiscono l'avvolgimento, invece utilizzando un filo in litz ciò non accade (effetto prossimità praticamente trascurabile). Proprio per questi motivi gli avvolgimenti sono stati realizzati con il filo litz. Impostando in modo definitivo come materiale in simulazione il litz con le caratteristiche già elencate, vedi Figura 7.10, sono state trovate due possibili configurazioni degli avvolgimenti.

lock Property			×
Name	Copper		
B-H Curve	Linear B-H Re	lationship 💌	
Linear Material	Properties		
Relative μ_r	1	Relative μ_z 1	
$\phi_{\rm hr}$, deg	0	∲ _{hz} , deg 0	
Nonlinear Mater	ial Properties —		_
Edit	B-H Curve	Phmax , deg	
Coercivity		Electrical Conductivity	
H _c ,A/m	0	C , MS/m 58	
Source Current	Density		
J, MA/m^2	0		
Special Attribut	es: Lamination (& Wire Type	
Litz wire			•
Lam thickness, m	m 0	Lam fill factor	_
Number of stran	ds 2000	Strand dia, mm 0.1	
	,	OK Car	ncel

Figura 7.10 Impostazioni materiale litz in FEMM

Prima configurazione: caratterizzata dall'avere 26 spire avvolte in 5 file ciascuna costituita da 5 spire più un'ultima spira avvolta in cima a tutte le altre. Soluzione, dunque, non perfettamente simmetrica. In Figura 7.11 è raffigurato il disegno creato su Femm dell'avvolgimento superiore, che in simulazione è stato chiamato circuito 1 (circuito transmitter) in cui scorre una corrente $\hat{l}_1 = 1 A$. Mentre l'avvolgimento inferiore in simulazione è stato soprannominato circuito 2 (circuito receiver) nel quale non scorre alcuna corrente.



Figura 7.11 Disegno FEMM configurazione 1 dell'avvolgimento superiore

Questa configurazione alla frequenza di 100 kHz è caratterizzata da un valore di induttanza ottenuto come:

$$L_{config 1} = \frac{\oint \vec{A} \cdot \vec{J_1}}{I_1} = 426.5 \,\mu H$$

Dunque, la configurazione porta ad avere un valore di poco superiore rispetto a quello desiderato.

Seconda configurazione: caratterizzata dall'avere 27 spire avvolte in 3 file da 9 spire ciascuna. Tale soluzione è dunque simmetrica. In Figura 7.12 è riportato il disegno creato su FEMM dell'avvolgimento superiore che anche in questo caso in simulazione è stato chiamato circuito 1 (circuito transmitter), nel quale scorre una corrente $\hat{l}_1 = 1 A$. Analogamente alla prima configurazione l'avvolgimento inferiore è identico a quello superiore ed in simulazione è stato soprannominato circuito 2 (circuito receiver) con corrente nulla.



Figura 7.12 Disegno FEMM configurazione 2 dell'avvolgimento superiore

Questa configurazione alla frequenza di 100 kHz è caratterizzata da un valore di induttanza ottenuto come:

$$L_{config 2} = \frac{\oint \vec{A} \cdot \vec{J_1}}{I_1} = 406.9 \,\mu H$$

La seconda configurazione dunque presenta un'induttanza molto prossima al valore target di *L*.

Nella Figura 7.13 e nella Figura 7.14 viene mostrato, per entrambe le soluzioni simulate con il litz, la distribuzione della densità di corrente. Per entrambe le configurazioni la densità è uniforme tra le varie spire che costituiscono l'avvolgimento.



Figura 7.13 Plot della densità di corrente configurazione 1



Figura 7.14 Plot della densità di corrente configurazione 2

In conclusione, è stato deciso di realizzare la seconda configurazione costituita da 3 file da 9 spire per un totale di 27 spire per una duplice ragione; sia per perché questa configurazione fornisce un valore di induttanza più prossimo al valore richiesto per l'applicazione sia perché questa configurazione essendo simmetrica risulta più facile da realizzare in fase di costruzione del coil.

7.2.2 Costruzione e risultati del banco prova

Il processo costruttivo è stato svolto in due fasi. In un primo momento, sulla base del rocchetto, è stato avvolto il litz al fine di creare l'avvolgimento che verrà collegato al convertitore. Dunque, sulla base è stato realizzato l'avvolgimento trasmettitore. Il risultato di tale processo è mostrato in Figura 7.15.

Dopodiché è stato avvolto il filo litz sulla parte movibile del sistema, che per i test è stata posizionata ad una distanza fissa dal primo avvolgimento di 14 cm, realizzando in questo modo l'avvolgimento ricevitore. Nella Figura 7.16 è riportata un'immagine del banco prova completo di entrambi gli avvolgimenti.



Figura 7.15 Foto realizzazione avvolgimento transmitter



Figura 7.16 Foto banco prova completo di entrambi gli avvolgimenti

Come si può osservare dall'immagine sono stati applicati sugli avvolgimenti dei sostegni in legno in quanto in fase di realizzazione dell'avvolgimento non sono state utilizzate né colle né siliconi, pertanto con lo scopo di mantenere gli avvolgimenti compatti sono stati incollati alla struttura i quattro sostegni in legno.

I terminali di entrambi gli avvolgimenti sono stati realizzati con un processo di saldatura che prevede l'utilizzo di un pozzetto di saldatura contenente stagno fuso. Il processo di saldatura consiste nello svolgimento di una sequenza di operazioni:

- 1. Togliere l'isolante (mylar) dal filo di litz;
- 2. Applicare ai trefoli del filo uno strato di flussante denso;
- 3. Immergere la parte "spelata" di litz nel pozzetto per qualche secondo;
- 4. Estrarre dal pozzetto e mediante l'utilizzo di guanti termici compattare la saldatura appena eseguita.

Terminato il processo di saldatura ad entrambe le estremità degli avvolgimenti sono stati applicati dei capicorda con foro passante M5 in modo da consentire la

connessione degli avvolgimenti con i circuiti esterni. Sempre nella parte terminale è stata applicata di guaina termorestringente di lunghezza pari a 5 cm in modo da realizzare una protezione per la parte terminale che è stata sottoposta a saldatura (Figura 7.17). L'applicazione della guaina è avvenuta mediante l'utilizzo della pistola termica (phon), tale guaina è stata inserita per rendere più affidabile e rigido il terminale dell'avvolgimento.



Figura 7.17 Foto parte terminale dell'avvolgimento

Dopo aver realizzato il banco prova è stato necessario caratterizzare gli avvolgimenti allo scopo di verificare che non vi siano fenomeni di auto-risonanza. Gli avvolgimenti sono stati misurati sempre con l'impedenzimetro HIOKI già usato per le altre misure. In particolare, le misure sono state effettuate a 100 kHz restituendo i seguenti risultati:

 $L_{inf_transmitter} = 451.3 \,\mu H$ $L_{sup receiver} = 419.2 \,\mu H$

I valori di induttanza dei due avvolgimenti sono diversi in quanto sono state apportate delle modifiche diverse sui due avvolgimenti in quanto nelle prime fasi di testing sono state riscontrate alcune criticità, descritte nel sotto paragrafo 7.2.3. I valori di induttanza ottenuti si discostano dal valore di progetto, ottenuto mediante il software FEMM, del 10% pertanto si può quindi ritenere ingegneristicamente significativo il valore della simulazione. Chiaramente avendo ottenuto degli avvolgimenti con valori di *L* superiori a quelli di progetto il sistema risuonerà ad una frequenza leggermente diversa da quella prevista. Dopo aver misurato le bobine alla frequenza a cui verranno effettuate le prove, è stata eseguita un'analisi del comportamento in frequenza in quanto le impedenze di entrambi gli avvolgimenti devono avere un comportamento lineare in tutto lo spettro fino ai 100 kHz. Quanto detto deve essere valido altrimenti il banco prova costruito non potrà essere utilizzato a causa dei fenomeni capacitivi tra le spire (auto-risonanza). Dunque, per valutare il comportamento degli avvolgimenti nello spettro di frequenza, è stato utilizzato l'impedenzimetro HIOKI. La misura degli avvolgimenti è stata realizzata nello spettro di frequenza 1 kHz - 1 MHz.

Elaborando i dati ottenuti dalle misure dell'avvolgimento trasmettitore e quelli dell'avvolgimento ricevitore, sono stati ricavati i due andamenti del modulo dell'impedenza in funzione della frequenza visibili in Figura 7.18 e in Figura 7.19.



Figura 7.18 Andamento Z-f dell'avvolgimento trasmettitore



Figura 7.19 Andamento Z-f dell'avvolgimento ricevitore

Con riferimento alla Figura 7.18 e alla Figura 7.19, si osserva che la risposta in frequenza dei due avvolgimenti è diversa, questo è dovuto alle modifiche che sono state apportate sugli avvolgimenti e dunque alla diversa composizione degli avvolgimenti. Entrambi gli avvolgimenti presentano un picco di risonanza oltre il quale il comportamento dell'avvolgimento passa da induttivo a capacitivo, tale picco è

spostato a frequenze superiori per l'avvolgimento trasmettitore sempre a causa della diversa composizione. Inoltre, si può osservare che l'avvolgimento del receiver presenta un comportamento multi-risonante tra i 350 e i 380 kHz ma ciò non rappresenta un problema perché questa frequenza non verrà mai raggiunta durante le prove. Il banco prova realizzato costituito dai due avvolgimenti presenta dunque un comportamento perfettamente lineare, cioè il banco prova si comporta perfettamente come due induttori mutuamente accoppiati, nel range di frequenza di funzionamento del sistema.

7.2.3 Modifiche apportate al banco prova

Durante la fase preliminare di testing del sistema di prova e dei condensatori sono emerse delle problematiche relative al banco prova ovvero al sistema costituito dai due avvolgimenti. L'avvolgimento secondario, cioè quello **ricevitore**, per valori di tensione $V_{DC} \ge 400 V$ ha presentato un evidente fenomeno di scarica sulla parte terminale dell'avvolgimento.

Le parti terminali dell'avvolgimento ricevitore, ovvero le porzioni dell'avvolgimento più vicine, presentano la massima differenza di potenziale e sono soggette fenomeno di scarica. Un'immagine di questo fenomeno è riportata in Figura 7.20. Nella parte sinistra della figura è visibile una foto di tutto il banco prova mentre nella parte destra è riportata una foto della parte terminale dell'avvolgimento che presenta fenomeno di scarica (foto del tratto terminale scattata a luce spenta).



Figura 7.20 Foto della scarica nel tratto terminale dell'avvolgimento ricevitore scattata a luce spenta

Questo problema sul tratto terminale dell'avvolgimento è stato risolto semplicemente allontanando tra di loro le porzioni di avvolgimento interessate dal fenomeno. Riprendendo il testing preliminare è stata riscontrata la presenza di scarica tra i conduttori, in particolare tra gli strati che compongono l'avvolgimento ricevitore, cioè tra uno strato di spire e lo strato immediatamente adiacente. Per far fronte a questo problema è stato modificato l'avvolgimento secondario. L'avvolgimento è stato quindi riavvolto interponendo tra uno strato ed il successivo degli spessori in PVC in modo da aumentare la distanza tra i layer che compongono l'avvolgimento. I distanziali in PVC utilizzati hanno uno spessore di 3 mm.

Apportando queste modifiche all'avvolgimento ricevitore è stato possibile eliminare sia il fenomeno di scarica, evitando in questo modo di danneggiare il filo litz, che il

fenomeno di scarica tra i layer. Garantendo il corretto funzionamento dell'intero sistema per tensioni crescenti. Queste modiche apportate all'avvolgimento ricevitore spiegano i diversi valori d'induttanza e dunque il diverso comportamento in frequenza tra i due coil. Nella Figura 7.21 è raffigurato il risultato ottenuto dopo le modifiche apportate al coil.



Figura 7.21 Soluzioni adottate per eliminare i fenomeni di scarica

Per proteggere anche il circuito trasmettitore e il ponte ad H è stata inserita una protezione software (protezione di corrente) ed è stato modificato il tratto terminale dell'avvolgimento primario. Le modifiche apportate sull'avvolgimento primario riguardano solo il tratto terminale dello stesso in quanto tale tratto rappresenta la porzione di filo litz in cui si ha la massima differenza di potenziale spira-spira. Quindi si è provveduto ad aumentare il grado di isolamento dei tratti terminali inserendo della guaina termorestringente su entrambe le estremità come si può osservare dalla Figura 7.22.



Figura 7.22 Foto dei terminali modificati dell'avvolgimento trasmettitore

7.3 Setup di laboratorio per la prova di tensione alternata

Per effettuare la prova di tensione alternata, oltre ad utilizzare il banco prova costruito, sono necessari: un sistema che consenta di alimentare l'intero sistema, un convertitore e degli strumenti di misura che consentono di misurare e visualizzare le grandezze d'interesse. Nel dettaglio, per effettuare la prova è stata utilizzata la seguente strumentazione:

- Alimentatore DC: tale alimentatore è stato utilizzato per alimentare direttamente gli ingressi del DC-LINK del ponte ad H. Le uscite dell'alimentatore sono state collegate direttamente ai morsetti DC del convertitore. L'alimentatore utilizzato è in grado di fornire una tensione massima di 600 V e una corrente di 2 A.
- Convertitore: il convertitore utilizzato in questa prova è stato un ponte ad H, costruito dal professor Paolo Guglielmi per il progetto FABRIC, il quale esegue la conversione DC/AC alla frequenza desiderata. Un'uscita del ponte H è stata collegata al condensatore di compensazione serie mentre il secondo terminale d'uscita è stato collegato direttamente ad uno dei due terminali dell'avvolgimento inferiore (transmitter).
- **Banco di condensatori Kemet:** per realizzare la compensazione serie lato transmitter, cioè con riferimento ai circuiti introdotto ad inizio capitolo ci si sta riferendo al condensatore C_1 , è stato realizzato un banchetto di condensatori con valore di capacità pari a quelle in test (6.2 nF). La realizzazione di questo banchetto viene illustrata nel capitolo 7.3.1.
- Alimentatore da banco DC: questo alimentatore è stato utilizzato per fornire tensione ai gate di comando degli switch di potenza, dunque è stato utilizzato per fornire l'alimentazione al circuito di segnale del convertitore. Esso è in grado di erogare fino ad un massimo di 48 V.
- Sonda di corrente: per misurare e visualizzare la corrente lato transmitter e lato receiver sono state utilizzate due sonde di corrente della LeCroy della serie CP150, con fondo scala a 150 A. La prima pinza amperometrica è stata posta lungo il tratto terminale dell'avvolgimento lato transmitter, mentre la seconda pinza è stata posizionata lungo il tratto terminale dell'avvolgimento receiver subito prima del condensatore in test. Le sonde di corrente utilizzate sono marchiate LeCroy in quanto devono essere compatibili con l'oscilloscopio.
- Sonda differenziale di tensione: è stata utilizzata per visualizzare la tensione differenziale ai morsetti d'uscita del ponte ad H. La sonda utilizzata è anch'essa della LeCroy ed è della serie ADP300. Anche in questo caso la sonda di tensione utilizzata è marchiata LeCroy per essere compatibile con l'oscilloscopio.

- **Oscilloscopio LeCroy Wavesurfer 3000**: l'oscilloscopio è stato utilizzato per visualizzare gli andamenti delle grandezze misurate nel tempo.
- Computer: per controllare il ponte ad H è stato utilizzato un computer collegato direttamente al convertitore mediante un apposito cavo seriale (RS232). Dal computer con l'ausilio di un apposito script Matlab è possibile interfacciarsi e controllare il ponte H, variando la frequenza del convertitore *f_{sw}* e la fase. Lo script Matlab per il controllo del convertitore è stato realizzato dal professor Gugliemi.
- **Cronometro:** il cronometro è stato usato per controllare la durata dei test eseguiti.

Le due figure seguenti (Figura 7.23 e Figura 7.24) mostrano il setup di laboratorio completo di tutti la strumentazione utilizzata e di tutte le connessioni realizzate.



Figura 7.23 Foto frontale contente la strumentazione utilizzata per la prova



Figura 7.24 Foto laterale contente la strumentazione utilizzata per la prova

Dalla Figura 7.24 si vede come il condensatore in prova viene connesso tramite viti in ottone ai terminali dell'avvolgimento ricevitore. Proprio per rendere più semplice questa connessione i pin saldati sul condensatore sono stati precedentemente forati. Infine, viene riportata la foto (Figura 7.25) delle connessioni dell' H-bridge al banco di condensatori Kemet e all'avvolgimento inferiore (trasmettitore) del banco prova.



Figura 7.25 Foto del Ponte-H e delle connessioni all'avvolgimento trasmettitore

Il banchetto di condensatori realizzato con componenti Kemet è stato dotato, anch'esso, di connettori con parte terminale costituita da una lamella forata per rendere la connessione con i circuiti esterni più semplice. Come si può notare il banchetto è collegato in modo da eseguire la compensazione serie.

7.3.1 Realizzazione del banco di condensatori Kemet

Per effettuare le prove di tensione alternata è stato necessario costruire un banchetto di condensatori in film. Sono stati utilizzati condensatori in film del costruttore Kemet per via della loro precisione, delle basse perdite e per via dell'affidabilità. Nel dettaglio sono stati utilizzati condensatori della serie C4C costituiti da un film di polipropilene metallizzato e poliestere in foglio metallizzato doppio. Con riferimento a [15] vengono riportati i benefici che si hanno nell'utilizzo di questo tipo di condensatore:

- Self-healing
- Perdite basse
- Alta corrente di ripple
- Elevata affidabilità del contatto
- Adatto per applicazioni ad alta frequenza

Una foto e un disegno con le principali caratteristiche dimensionali del condensatore Kemet C4C è riportato in Figura 7.26.



Figura 7.26 Kemet C4C assiale [15]

Questa famiglia di condensatori è adatta per applicazioni alta tensione e alta frequenza (ordine del centinaio di kHz), sono quindi adatti ad operare nel sistema di testing creato che è stato pensato per operare ad una frequenza di 100 kHz. Lo scopo del banchetto sarà quello di risuonare con l'induttanza dell'avvolgimento trasmettitore L_1 . Chiaramente per risuonare alla frequenza prestabilita anche questo banco di condensatori deve avere un valore di capacità pari alla capacità in test utilizzata lato receiver, cioè la capacità equivalente del banchetto deve essere di 6.2 nF. Per la realizzazione di questo valore di capacità è stato utilizzato il condensatore C4C da 10 nF. Le caratteristiche dei condensatori utilizzati per la realizzazione del banchetto sono riportate nella Tabella 7.1.

Tabella 7.1	Caratteristiche	C4C da	10 nF
l abella 7.1	Caratteristiche	C4C da	10 nF

Codice	C (nF)	Vn Vdc (V)	Vrms Vac (V)	dV/dt (V/µs)	lpkr (A)	ESR max @ 100kHz (mΩ)	Irms 100kHz @70°C (A)	D (mm)	L (mm)	d (mm)
C4CAYUB2100AA0J	10	3000	750	2100	21	90.3	3	12	33	0.8

Al fine di raggiungere il valore prestabilito sono stati combinati 40 condensatori realizzando prima otto paralleli da 5 unità. Le capacità usate per formare il parallelo sono state selezionate in modo da minimizzare l'errore sul valore di capacità cioè per la realizzazione del singolo parallelo sono stati scelti valori di capacità tali che la $C_{eq \ parallelo}$ fosse uguale agli altri paralleli. Successivamente gli otto paralleli sono stati connessi in serie secondo lo schema di Figura 7.27.



Figura 7.27 Schema circuitale del banco di condensatori

Per la costruzione del banco è stato quindi necessario misurare tutti i singoli componenti in modo da posizionarli in maniera ottimale garantendo che i valori $C_{eq \ parallelo}$ dei diversi paralleli fossero il più simile possibile tra di loro e garantendo in questo modo una equa ripartizione della tensione. Le misure dei condensatori sono state effettuate con l'impedenzimetro e sono in Tabella 7.2.

MISURE CONDENSATORI KEMET					
Misure su condensatori da 10 nF					
	Ζ (Ω)	θ (gradi)	Cs (nF)	Rs (Ω)	CLASSIFICAZIONE
1	191.17	-89.70	9.795	0.980	В
2	191.63	-89.71	9.771	0.978	В
3	190.66	-89.71	9.821	0.969	С
4	189.83	-89.71	9.864	0.965	С
5	187.41	-89.71	9.991	0.945	D
6	191.82	-89.71	9.762	0.968	В
7	188.52	-89.71	9.932	0.952	D
8	188.63	-89.71	9.926	0.951	D
9	194.33	-89.71	9.635	0.978	A
10	192.21	-89.71	9.742	0.964	В
11	188.26	-89.71	9.946	0.943	D
12	189.98	-89.71	9.856	0.808	С
13	190.06	-89.75	9.852	0.818	С
14	190.15	-89.76	9.847	0.803	С
15	191.09	-89.76	9.799	0.818	В
16	191.68	-89.76	9.768	0.817	В
17	188.34	-89.75	9.941	0.818	D
18	189.10	-89.75	9.902	0.817	D
19	188.94	-89.75	9.910	0.812	D
20	189.73	-89.75	9.869	0,,811	С
21	192.09	-89.76	9.748	0.820	В
22	190.16	-89.76	9.847	0.813	С
23	190.47	-89.76	9.831	0.811	С
24	189.60	-89.76	9.876	0.806	С
25	192.03	-89.75	9.751	0.822	В
26	189.42	-89.75	9.885	0.810	С
27	188.45	-89.75	9.936	0.812	D
28	189.91	-89.75	9.860	0.821	С
29	188.80	-89.75	9.917	0.812	D
30	190.00	-89.75	9.855	0.810	С
31	191.58	-89.76	9.774	0.819	В
32	189.97	-89.75	9.856	0.811	С
33	191.14	-89.75	9.796	0.816	В
34	189.96	-89.75	9.857	0.810	С
35	189.65	-89.75	9.873	0.812	С
36	187.33	-89.75	9.995	0.803	D
37	180.14	-89.75	9.848	0.817	С
38	192.48	-89.76	9.728	0.820	В
39	193.47	-89.76	9.678	0.811	A
40	188.85	-89.76	9.915	0.808	D

Tabella 7.2 Misure sui condensatori Kemet da 10 nF

Per selezionare con più facilità i condensatori, da utilizzare nel singolo parallelo, i componenti sono stati classificati usando un ordine alfabetico crescente, cioè lo scaglione di condensatori con valori di capacità più piccoli sono stati classificati con la lettera "A" mentre lo scaglione con valori immediatamente superiori sono stati classificati con la lettera "B" e così via. Dopo aver classificato i condensatori si è proceduto alla realizzazione dei vari paralleli. Il singolo parallelo di cinque elementi capacitivi è stato realizzato piegando di 90° i reofori dei condensatori e saldandoli tra di loro in modo da rendere il parallelo il più compatto possibile come visibile nella Figura 7.28.



Figura 7.28 Foto del parallelo di 5 condensatori

Dopodiché è stata realizzata la serie dei vari paralleli. Le connessioni serie sono state realizzate saldando delle lamelle di rame tra un parallelo e il suo adiacente. Infine, sono state realizzate le connessioni terminali del banchetto saldando, anche in questo caso, una lamella di rame la cui estremità è costituita da un pin forato. Il risultato del banchetto è riportato Figura 7.29.



Figura 7.29 Foto banco di condensatori Kemet utilizzato per le prove

Il banchetto così realizzato è caratterizzato dall'avere Cs = 6.142 nF ed una $ESR = 1.16 \Omega$ a 100 kHz.

7.3.2 Procedura di esecuzione delle prove

Una volta fornita l'alimentazione di segnale al ponte ad H e controllata la corretta comunicazione con esso (via software), è stato alimentato il BUS del convertitore. Dopodiché viene fatto modulare il convertitore e sull'avvolgimento ricevitore verrà indotta una tensione e circolerà una corrente. Tale avvolgimento è stato posto in una condizione caratteristica di funzionamento, ovvero in assenza di carico $R_L = 0$ (condizione di cortocircuito). In questa condizione il condensatore in test C_2 , cioè il RES CAP, funge da carico e l'unica potenza attiva richiesta al convertitore è quella per sostenere le perdite del sistema. Durante i test sono controllate: la frequenza *f* che viene mantenuta costante a 100 kHz (frequenza tipica di studio usata come riferimento per prodotti commerciali), la corrente I_c nel condensatore, la tensione fornita dalla sorgente DC, la corrente e la tensione in uscita dal ponte H. Nell'avvolgimento lato receiver circolerà un corrente di picco che è legata alla tensione di alimentazione tramite l'Eq. 7.20:

$$=\frac{\hat{V}_1}{\omega M}$$

Dove il picco della fondamentale della tensione è legata alla tensione del DC-LINK tramite il fattore $4/\pi$:

Î2

$$\hat{V}_{1} = \frac{4}{\pi} V_{DC}$$
Eq. 7.21
$$\hat{V}_{C} = \frac{\hat{I}_{2}}{\omega C}$$

Una volta nota la corrente che scorre nell'avvolgimento secondario è possibile applicare la relazione esatta ai capi di un condensatore, in regime sinusoidale, per ricavare la tensione ai capi del condensatore come mostrato nell'equazione di sopra (Eq. 7.22).



Figura 7.30 Rappresentazione circuitale del banco prova con R_L=0

In questo modo è possibile conoscere la tensione di picco alternata che il condensatore sta sostenendo ai suoi capi (vedi Figura 7.30) e quindi il valore d'interesse che si vuole ricavare da questa prova.

La procedura di svolgimento dei test seguita per entrambe le tipologie di condensatori, sia CAP1005050 che CAP505025, è composta da due di fasi:

- **Prima fase:** durante questa fase si eseguono dei test a livelli di tensione di DC-LINK crescenti (V_{DC} crescenti). Valutando il comportamento del condensatore ad ogni livello di tensione applicato. Ogni tensione deve essere sostenuta dal condensatore per 60 secondi continuativi. Al termine di questa fase si stabilisce un plausibile livello di tensione a cui eseguire i test della seconda fase.
- Seconda fase: dopo aver individuato con maggiore precisione il livello di tensione che il condensatore è in grado di sopportare per 1 minuto senza danneggiarsi. Si passa all'esecuzione di un test intensivo di durata pari ad un'ora alla tensione prestabilita. La prova può terminare con esiti differenti. Il condensatore potrebbe non superare la prova terminando il test prima dello scadere del tempo. In questo caso si dovranno eseguire delle valutazioni sul livello di tensione scelto ed eventualmente ridurlo. Oppure il condensatore potrebbe superare la prova resistendo al livello di tensione applicatagli per tutta la durata della prova, in questo caso si sceglierebbe un altro condensatore per ripetere la prova e confermare i risultati ottenuti dal test intensivo sul primo condensatore.

7.4 Prove di tensione alternata su RES CAP1005050

Le prove di tensione alternata sono state condotte iniziando il testing sui componenti RES CAP1005050 in quanto essi presentano prestazioni più interessanti, confermato dai test precedenti, per la futura brevettazione del componente. In una prima fase sono stati svolti dei test preliminari, allo scopo di valutare quale fosse il livello di tensione più adeguato d'applicare al componente. Una volta stabilito ciò si è poi passati a testare in maniera intensiva i condensatori applicando ai loro capi la tensione stabilita dalla prova precedente per un tempo di 3600 secondi.

7.4.1 Testing preliminare: prima fase

In questa fase il condensatore RES CAP1005050 è stato testato per valori di tensione del DC-LINK V_{DC} crescenti, e dunque tensioni ai capi del condensatore stesso crescenti secondo le relazioni riportate a pagina 95. Ogni valore di tensione è stato mantenuto per 60 secondi a meno di comportamenti anomali del condensatore. I test preliminari sono stati iniziati impiegando il condensatore RES **CAP1005050_5** partendo da valori di tensioni $V_{DC} = 50 V$ fino ad arrivare a valori di $V_{DC} = 400 V$, a questo ultimo valore di V_{DC} è stato misurato un valore di $\hat{I}_2 = 13.5 A$ a cui corrisponde un picco di tensione sul condensatore pari a:

Eq. 7.23

$$\hat{V}_C = \frac{\hat{I}_2}{\omega C} = 3.68 \, kV$$

Dunque, in queste condizioni ai capi del condensatore è stata applicata una tensione di picco alternata poco superiore a 3.5 kV. Quindi questa pima fase di test è stata interrotta ad un valore di $V_{DC} = 400 V$ per via delle problematiche di scarica riscontrate sull'avvolgimento ricevitore. Una volta risolti i problemi, riavvolgendo il coil superiore e aumentando la distanza delle parti terminali del coil, è stato possibile continuare con i test preliminari. Per il proseguimento dei test preliminari, sempre della durata di 60 secondi, è stato deciso di continuare con un nuovo condensatore con il **CAP1005050_7**.

Vengono riportate, nella Figura 7.31, le forme d'onda acquisite durante la prova a tensione alternata a $V_{DC} = 500 V$ cioè $\hat{V}_C = 4.5 kV$. La corrente di picco sul condensatore (andamento in giallo – C1) è di 17.5 A con andamento perfettamente sinusoidale indice del fatto che il sistema risuona perfettamente alla frequenza di 100.2 kHz. La corrente all'uscita del ponte ad H (andamento in blu – C3) ha un andamento più distorto ed è diversa da zero in quanto serve a sopperire a tutte le perdite dell'intero sistema di prova. Inoltre, dagli andamenti si può osservare come la corrente secondaria sia esattamente in **quadratura** rispetto alla tensione all'uscita primaria come è stato dimostrato nell'Eq. 7.16.



Figura 7.31 Andamenti delle grandezze misurate a $\hat{V}_c = 4.5 \ kV \ (V_{DC} = 500 \ V)$. Tensione in uscita dal ponte ad H in fucsia, corrente sul condensatore in test in giallo, corrente in uscita dal ponte ad H in azzurro.

I livelli di tensioni crescenti applicati al RES CAP1005050_7 vengono riassunti in Tabella 7.3.

$V_{DC}(V)$	$\hat{I}_2(A)$	$\hat{V}_{C}(V)$
50	2	523
100	3.8	994
200	7.3	1909
300	10.7	2798
400	13.5	3680
500	17.5	4576

Tabella 7.3 Livelli di tensioni applicati al DC-LINK, rispettive correnti e tensioni sul condensatore per CAP1005050

Tutti questi livelli di tensione sono state sopportate dal condensatore per 60 secondi.

Una volta raggiunto il valore $V_{DC} = 500 V$ è stato avvertito un "ronzio/rumore" proveniente dal condensatore in prova. È stato scoperto che la causa del rumore è l'effetto Corona sui pin del condensatore. La soluzione pensata per risolvere tale problema è stata quella di piegare i pin modo da aumentare il più possibile la distanza del pin dal bordo del condensatore. Nella Figura 7.32 vengono mostrate entrambe le soluzioni, sia quella con pin semplicemente saldato (soluzione base di partenza) che quella con pin saldato e piegato. Questa soluzione si è dimostrata vincente, facendo sparire l'effetto Corona sul pin.



Figura 7.32 Foto delle modifiche apportate al pin

Sono state effettuate delle prove con valori di tensione del DC-LINK superiori a quelli finora testati, cioè valori superiori ai 500 V, ma in queste condizioni d'alimentazione il condensatore presentava evidenti fenomeni d'effetto Corona su tutti i bordi esterni. Dunque, si è concluso che il valore $\hat{V}_C = 4.56 \, kV \, (V_{DC} = 500 \, V)$ segna il limite di tensione da non superare ai capi del componente oltre il quale si avrà un degrado del componente stesso. È stato valutato anche il tempo massimo per cui il condensatore CAP1005050_7 è in grado di resistere $\hat{V}_C = 4.56 \, kV$, con un risultato pari a 3 minuti dopodiché è avvenuta la scarica del condensatore.

Dai risultati di quest'ultimo test, sul CAP1005050_7 a $V_{DC} = 500 V$, è chiaramente emerso che tale livello di tensione non può essere utilizzato per i test intensivi di durata 60 minuti in quanto con molta probabilità il condensatore si danneggerebbe prima del termine della prova. La conferma definitiva di questa affermazione è arrivata dopo aver utilizzato un altro condensatore RES **CAP1005050_6**. In particolare, il CAP1005050_6 dopo circa 1 minuto e 19 secondi è sopraggiunto l'effetto Corona che ha portato al danneggiamento del componente con formazione di gas tra il cover layer e l'armatura (Figura 7.33).



Figura 7.33 Foto CAP1005050_6 che mostra la formazione dei gas

Dunque, è stato stabilito come valore a cui eseguire le prove intensive, cioè la seconda fase del testing in tensione alternata, una tensione $V_{DC} = 400 V$ che corrisponde all'avere ai capi del condensatore una tensione di picco \hat{V}_C di poco superiore ai 3.5 *kV*.

7.4.2 Testing intensivo: seconda fase

Dopo aver concluso la prima fase delle prove e dopo aver stabilito un possibile valore di tensione a cui effettuare la seconda fase di testing, è stato possibile iniziare le prove per le quali si applica il valore di tensione prestabilito per un tempo continuativo di 3600 secondi. Per la famiglia di condensatori RES CAP1005050 è stato stabilito come possibile valore per le prove intensive una tensione $V_{DC} = 400 V$. Ad una tensione del bus di 400 V corrisponde una corrente di picco secondaria di 13.2 A il che significa avere una tensione di poco superiore a $\hat{V}_C = 3.5 kV$ ai capi del condensatore in prova. Il primo test è stato effettuato sul **CAP1005050_9**, il quale presenta un pin semplicemente saldato su cui è stata realizzata la piegatura. Le forme d'onda di questa prova sono nella Figura 7.34.



Figura 7.34 Andamenti delle grandezze misurate su CAP1005050_9 a $\hat{V}_c = 3.68 \ kV \ (V_{DC} = 400 \ V)$. Tensione in uscita dal ponte ad H in fucsia, corrente sul condensatore in test in giallo, corrente in uscita dal ponte ad H in azzurro.

Il CAP1005050_9 ha resistito per tutta la durata della prova (60 minuti) alla tensione applicata, non presentando nessuna forma di deterioramento (nessun cedimento dell'isolante, nessun effetto Corona ai bordi del condensatore). Per completezza si è voluto valutare anche il comportamento termico del condensatore durante la prova intensiva. Proprio a tale scopo è stata utilizzata una termocamera, tramite la quale sono state scattate delle foto termiche del RES POWER CAP in diversi istanti di tempo. La termocamera ha consentito di valutare durante la prova, la temperatura massima raggiunta, la distribuzione di temperatura sul componente e il tempo per raggiungere il regime termico.

Le foto termiche sono state scattate: ad 1 minuto, a 3 minuti, a 5 minuti, a 10 minuti, a 20 minuti e 40 minuti dall'inizio della prova. Nelle Figura 7.35 vengono riportate solo alcune foto termiche, utili per comprendere il comportamento del componente. Dalle immagini si osserva che la temperatura sul bordo è maggiore rispetto a quella

misurata nella parte centrale del condensatore, dunque non si ha una distribuzione di temperatura uniforme.



Figura 7.35 Foto termiche CAP1005050 durante la prova a $\hat{V}_c = 3.5 \ kV$

Dopo 40 minuti, è stato raggiunto il regime termico del componete con valore di temperatura massima pari a 78.3 °C, la temperatura sui bordi rimane comunque, di qualche grado centigrado più elevata, di quella misurata sul restante corpo del condensatore come si osserva dalla Figura 7.36.



Figura 7.36 Foto termica del regime di temperatura su CAP1005050_9

Per confermare che la tecnologia CAP1005050 è in grado di resistere al livello di \hat{V}_{C} = 3,68 *kV* (V_{DC} = 400 *V*) è stato utilizzato un altro componente il RES **CAP1005050_2**. Utilizzando questo condensatore, per avere lo stesso valore di corrente \hat{I}_2 = 13.2 *A* e dunque di tensione \hat{V}_C , è stato necessario abbassare di qualche volt la tensione del DC-LINK a 393 V.

Gli andamenti di tensione e correnti sono in Figura 7.37, e come si può notare dal grafico sono gli stessi già misurati con il primo componente in prova.



Figura 7.37 Andamenti delle grandezze misurate su CAP1005050_2 a $\hat{V}_c = 3.68 \ kV \ (V_{DC} = 400 \ V)$. Tensione in uscita dal ponte ad H in fucsia, corrente sul condensatore in test in giallo, corrente in uscita dal ponte ad H in azzurro.

Il risultato della prova è stato positivo in quanto anche questo condensatore ha resistito per 3600 secondi ad una tensione $\hat{V}_C = 3.5 \, kV$ (mantenendo un margine di circa 200 V rispetto al valore realmente sopportato) ai propri terminali. Anche in questo caso nei primi minuti della prova la temperatura è molto disuniforme con bordi caldi e corpo del condensatore più freddo.

Il regime termico è stato raggiunto dopo 20 minuti con una temperatura massima di 78.2 °C.



Figura 7.38 Foto termica del regime di temperatura su CAP1005050_2

7.4.3 Conclusioni CAP1005050

Lo svolgimento delle prove di tensione alternata sui condensatori **CAP1005050** ha permesso di stabilire che tali componenti **sono in grado di tollerare una tensione di picco applicata ai propri terminali di** $\hat{V}_c = 3.5 \, kV$. Il che corrisponde ad un valore di tensione efficace $V_{C_rms} = 2.48 \, kV$ per un tempo di 60 minuti. Inoltre, si può affermare che nei primi istanti di test la temperatura non ha una distribuzione uniforme sul componente ma dopo poco più di 20 minuti la temperatura risulta pressoché costante avendo raggiunto il regime termico, ma permane la differenza di temperatura tra bordo e parte centrale del condensatore. Le prove effettuate hanno messo in evidenza che la criticità di questa famiglia di condensatori è legata all'effetto Corona sui bordi e che lo scoppio del componente avviene sempre in prossimità del bordo e degli spigoli.

Al fine di trarre le ultime conclusioni è stato testato il condensatore CAP1005050_8 al quale è stato applicato uno strato di lacca per prevenire l'effetto Corona. Questo condensatore è stato testato ad una tensione di $V_{DC} = 450 V$ cioè $\hat{V}_C = 4 kV$. Esso è esploso (scarica superficiale) dopo 3 minuti e 33 secondi di prova in uno dei sui bordi come si vede dalla Figura 7.39:



Figura 7.39 Foto del condensatore CAP1005050_8 esploso sul bordo

Quest'ultimo test ha permesso di dedurre che inspessendo il cover layer tramite della lacca e quindi allontanando l'aria esterna dall'armatura interna del condensatore non avviene più l'effetto Corona, di conseguenza è possibile applicare più tensione. Però aumentando lo spessore non viene risolta la criticità degli spigoli del componente e di eventuali bolle d'aria nei bordi, che restano sempre i punti deboli di questa tecnologia. Anche durante le prove ad impulsi l'esplosione del condensatore è avvenuta proprio in corrispondenza dello spigolo.

Nei prototipi che verranno realizzati in futuro si cercherà di risolvere il problema costruendo dei bordi arrotondati.

7.5 Prove di tensione alternata su RES CAP505025

Le prove di tensione alternata sui condensatori RES CAP505025 sono state svolte in modo del tutto analogo a quelle svolte sui RES CAP100. Dunque, anche per i CAP505025 i test sono stati svolti in due fasi. Quella preliminare e quella intensiva. Per questi condensatori è stato possibile sfruttare la conoscenza del fatto che le prestazioni in tensione applicabile saranno sicuramente inferiori a quelle dei CAP1005050 avendo spessore di dielettrico dimezzato. Inoltre, è stato possibile sfruttare le informazioni relative alle prove di tensione alternata già effettuate, ovvero la conoscenza che i RES POWER CAP non hanno problemi per basse tensioni cioè per $\hat{V}_C < 1 \ kV$. Per tali motivi le prove preliminari sono state iniziate da valori di tensioni $V_{DC} = 200 \ V$.

7.5.1 Testing preliminare: prima fase

In questa fase il RES CAP505025 è stato testato per valori di tensione del DC-LINK V_{DC} crescenti, e dunque tensioni ai capi del condensatore stesso crescenti. Le prove sono state condotte partendo dal valore di $V_{DC} = 200 V$ conoscendo già il comportamento del componente alle basse tensioni. Ogni valore di tensione è stato mantenuto per 60 secondi a meno di comportamenti anomali del condensatore. Il condensatore **CAP505025_4** è stato utilizzato per effettuare i test preliminari. I test sono terminati per valori di $V_{DC} = 350 V$. Per questo valore di V_{DC} è stata misurata un valore di $\hat{I}_2 = 11.8 A$, a cui corrisponde un picco di tensione sul condensatore pari a:

Eq. 7.24

$$\hat{V}_C = \frac{\hat{I}_2}{\omega C} = 3.1 \, kV$$

Nella Tabella 7.4 sono state riportate le tensioni V_{DC} applicate durante la fase di testing preliminare sui CAP505025.

$V_{DC}(V)$	$\hat{I}_2(A)$	$\hat{V}_c(V)$
200	7.13	1854
300	10.7	2782
350	11.8	3068

Tabella 7.4 Livelli di tensioni applicati al DC-LINK, rispettive correnti e tensione sul condensatore per CAP505025

Gli andamenti della prova a $V_{DC} = 350 V$ ($\hat{V}_C = 3.1 \text{ kV}$) sono riportati nella Figura 7.40.



Figura 7.40 Andamenti delle grandezze misurate su CAP505025_4 a $\hat{V}_c = 3.1 \ kV$ ($V_{DC} = 350 \ V$). Tensione in uscita dal ponte ad H in fucsia, corrente sul condensatore in test in giallo, corrente in uscita dal ponte ad H in azzurro.

Esattamente come nel caso precedente la corrente secondaria misurata (andamento in giallo – C1) ha un andamento perfettamente sinusoidale indice che il sistema sta risuonando in modo perfetto a 99.3 kHz. La corrente primaria (andamento in blu – C3) ha un andamento più distorto ed è diversa da zero perché serve a sopperire a tutte le perdite del sistema. Dunque, il sistema funziona in modo del tutto analogo al precedente con l'unica differenza che il campione in prova è un condensatore con parametri leggermente differenti. Proprio per via dei diversi parametri del condensatore, e quindi della reattanza capacitiva X_c , il sistema risuona ad una frequenza poco diversa rispetto alla precedente.

Il condensatore ha resistito, per 60 secondi, a tutti i livelli di tensione riportati nella tabella. Chiaramente salire ulteriormente in tensione risulterebbe poco sensato in quanto come già detto questa famiglia di condensatori presenta prestazioni ridotte rispetto ai CAP1005050 (testati a tensione $V_{DC} = 400 V$). Quindi è stato stabilito come plausibile valore di tensione del DC-LINK, a cui effettuare le prove intensive, una tensione $V_{DC} = 350 V$ e dunque una tensione di picco sul componente di $\hat{V}_C = 3.1 kV$. Prima di passare alla fase di test intensiva si è voluto valutare per quanto tempo il CAP505025_4 fosse in grado di tenere tale livello di tensione ai propri capi. La prova si è conclusa dopo 1 minuto e 40 secondi a causa dell'effetto Corona sui bordi del componente che ha portato alla formazione di gas all'interno del condensatore con la successiva esplosione (scarica nella bolla d'aria), vedi Figura 7.41.

Nonostante l'esplosione, sul condensatore utilizzato per i test preliminari avvenuta a $V_{DC} = 350 V$, è stato deciso di testare a questo livello di tensione, in modo intensivo, un componente valutandone il comportamento. Questa decisione è stata presa perché lo scoppio del CAP505025_4 potrebbe esser stato causato sia dai test effettuati a tensioni più basse che dai difetti costruttivi. Con il termine "difetti costruttivi"

si sta facendo riferimento alla non perfetta assenza di aria tra il cover layer e l'armatura del condensatore che possono portare alla formazione di gas. Le bolle d'aria possono essere presenti in quanto il processo di pressatura a caldo utilizzato per applicare il cover non garantisce l'assenza d'aria. Per queste ragioni appena illustrate i test intensivi sono stati condotti applicando una tensione pari a $V_{DC} = 350 V$. Nel caso d'esplosione di questo secondo componente si provvederà a rivalutare la tensione di test, riducendola a valori più adatti per i CAP505025.



Figura 7.41 Foto del condensatore CAP505025_4 scoppiato

7.5.2 Testing intensivo: seconda fase

Dopo aver concluso la prima fase delle prove e dopo aver stabilito un possibile valore di tensione \hat{V}_c , è stato possibile effettuare la seconda fase di tesing, nella quale si applica il valore di tensione scelto per un tempo continuativo pari a 3600 secondi. Per la famiglia dei RES CAP505025 è stato stabilito come possibile valore di test una tensione sul DC-LINK di $V_{DC} = 350 V$ cioè $\hat{V}_c = 3.1 kV$.

Il primo test è stato effettuato sul **CAP505025_7**, il cui pin è stato appositamente piegato prima di iniziare la prova. Gli andamenti delle grandezze misurate (tensione differenziale, corrente lato trasmettitore e corrente lato ricevitore) sono esattamente gli stessi già misurati durante la prima fase di prova. Il RES CAP505025_7 ha superato la prova, resistendo per 3600 secondi ad una tensione di $\hat{V}_c = 3.1 \, kV$ ai propri terminali, non presentando nessuna forma di deterioramento.

Per completezza, anche per questa famiglia di RES CAP, è stato valutato il comportamento termico del condensatore durante la prova intensiva con l'utilizzo della termocamera. Valutando la temperatura massima raggiunta, la distribuzione di temperatura di temperatura sul componente e il tempo per raggiungere il regime termico. Le foto termiche sono state scattate in diversi istanti di tempo della prova: ad 1 minuto, a 3 minuti, a 5 minuti, a 10 minuti, a 20 minuti e 40 minuti dall'inizio della prova. Solo alcune di queste foto termiche vengo riportate nella figura successiva per capire il comportamento del condensatore.
Nella Figura 7.42 si può osservare come il condensatore raggiunga in breve tempo temperature più elevate rispetto a quelle raggiunte dal RES CAP1005050. Anche questo condensatore presenta una distribuzione non uniforme del calore, con bordi che raggiungo temperature più elevate.



Figura 7.42 Foto termiche CAP505025 durante la prova a $\hat{V}_c = 3.1 \ kV$

Con riferimento alla Figura 7.43 il regime termico del condensatore viene raggiunto dopo 20 minuti dall'inizio della prova con temperature massime nella parte centrale del condensatore all'incirca di 98.5 °C, mentre la temperatura sui bordi rimane di qualche grado centigrado più elevata come accadeva già per il CAP1005050.



Figura 7.43 Foto termica del regime di temperatura su CAP505025_7

Dunque, questo primo test ha dimostrato che i RES CAP505025 sono in grado di sopportare una tensione di $\hat{V}_c = 3.1 \, kV$ per la durata di un'ora, attestando l'esatto contrario di quanto si sarebbe potuto concludere dopo i test sul CAP505025_4.

Come ulteriore conferma di ciò è stata ripetuta la stessa prova su un nuovo componente, sul **CAP505025_8**. Il quale ha superato anch'esso la prova, resistendo per tutta la durata alla tensione applicatagli di $\hat{V}_C = 3.1 \, kV \, (V_{DC} = 350 \, V)$. Questo ha permesso di convalidare che la tecnologia RES CAP505025 è in grado sostenere ai propri capi un picco di tensione alternata di $3.1 \, kV$. Inoltre, ha confermato che con grande probabilità il cedimento del CAP505025_4 è avvenuto a causa di difetto costruttivo del componente e non a causa della tensione troppo elevata applicata ai propri capi. Con il CAP505025_8 il regime termico è stato raggiunto dopo 20 minuti dall'inizio del test con temperature massime nella parte centrale del condensatore di 89.2 °C, dunque inferiori rispetto al precedente componente testato.



Figura 7.44 Foto termica del regime di temperatura su CAP505025_8

7.5.3 Conclusioni CAP505025

Al termine dello svolgimento delle prove di tensione alternata sui condensatori **CAP505025** è stato possibile stabilire che tali componenti **sono in grado di sostenere una tensione di picco ai propri terminali di** $\hat{V}_c = 3.1 \, kV$. Il che corrisponde ad un valore di tensione efficace $V_{C_rms} = 2.19 \, kV$ per tempo di 3600 secondi. Inoltre, si può affermare che nei primi istanti di test la temperatura non ha una distribuzione uniforme sul componente ma dopo poco più di 20 minuti la temperatura risulta costante nel tempo (regime termico), ma si riscontra una differenza di qualche grado centigrado tra bordo e corpo del componente.

Queste prove effettuate, sulla famiglia dei CAP505025, hanno messo in evidenza come i punti "deboli" di questa tecnologia siano i bordi e gli spigoli del componente, ovvero i punti nei quali sono state registrate la totalità delle scariche.

7.6 Conclusioni al termine delle prove di tensione alternata

Nello svolgimento di questi test sono state riscontrate due principali forme di cedimento del componente:

- 1. Cedimento a seguito di scariche superficiali (bordi del componente)
- 2. Cedimento a seguito della scarica nell'intercapedine (bolla d'aria) tra rame e cover layer

Il verificarsi del primo tipo di cedimento rinforza la considerazione di dover inspessire lo strato del cover layer per allontanare l'aria esterna in prossimità dello strato di rame. Il secondo tipo di cedimento è avvenuto su entrambe le tipologie di RES POWER CAP ed è causato dalla formazione di un rigonfiamento (formazione di gas dovuti alla ionizzazione della bolla d'aria e della colla) con la conseguente scarica del condensatore. Il secondo fenomeno ha luogo in prossimità di un bordo e vicino agli angoli, nello stesso punto in cui si sono verificati gli altri tipi di cedimento. Questo cedimento è imputabile alla presenza d'aria tra rame e cover layer. Dunque, quanto riscontrato indica la necessità di garantire un ottimo grado di sottovuoto durante la fase di realizzazione del componente.

I risultati ottenuti hanno portato alle seguenti deduzioni:

- Il fenomeno di scarica non sembra essere dipendente dallo strato interno di dielettrico in quanto, nonostante una differenza di un fattore due sugli spessori di dielettrico nei due prototipi, il valore di tensione alla quale si manifesta la scarica superficiale è molto simile.
- Il fenomeno di scarica sembra riguardare il solo strato del cover layer poiché anche al sopraggiungere delle scariche superficiali il condensatore continua a funzionare per un breve periodo senza assistere a fenomeni di rottura.
- Necessità di inspessire lo strato di cover layer.
- Necessario investigare sulla possibilità di sostituire il cover layer con un potting sotto vuoto di opportuno materiale non ancora indentificato. Per tale scopo verranno utilizzati i prototipi, citati nel capitolo 3.
- Sostituire gli spigoli a 45 gradi dello strato di rame con spigoli arrotondati. Al fine di comprendere se la causa di alcune scariche è dovuto ad accumulo di cariche sulle punte.

8. Confronto RES POWER CAP con le altre tecnologie di condensatori

l risultati ottenuti dalle prove svolte e descritte nei rispettivi capitoli hanno permesso un confronto tra i RES POWER CAP, i condensatori in mica (Celem) ed i condensatori in film (Kemet). Finora i condensatori sono stati confrontati in termini di fattore di perdita $tan\delta$, nel capitolo relativo alle prove svolte con l'impedenzimetro, in termini di tensione impulsiva dV/dt applicabile ai capi del componente stesso nel capitolo 6. Ora si vuole eseguire un confronto delle tre diverse tecnologie di condensatori in termini di numero di componenti utilizzati, di dimensioni, di pesi e di costo.

Si suppone di considerare un'applicazione in cui viene richiesta la compensazione di un carico fortemente induttivo. In tale sistema viene richiesto di operare ad una tensione alternata di 7 kV di picco, dunque si suppone che i condensatori debbano sostenere ai propri terminali una tensione di 4.95 kV rms. Per semplicità si approssima tale valore per eccesso a 5 kV rms. Si vuole mettere in luce la differenza, in termini numero di componenti utilizzati, per sostenere la tensione richiesta e per raggiungere un valore di capacità di 6.2 nF con le diverse tecnologie. Per rispettare le condizioni richieste mediante l'uso dei RES POWE CAP da 6.2 nF, su cui sono stati svolti i test, sono necessari rispettivamente 4 condensatori del tipo CAP1005050 (configurazione a) e 9 condensatori del tipo CAP505025 (configurazione b), come visibile in Figura 8.1.



Figura 8.1 Configurazione a)realizzata con CAP1005050 b)realizzata con CAP505025

Utilizzando i condensatori Kemet in film da 10 nF, riferimento allo schema di Figura 8.2. (configurazione c), sono necessari 40 condensatori. Il singolo condensatore è in grado di sopportare 750 Vrms ma per raggiungere il valore di capacità richiesto è necessario comporre in serie e parallelo utilizzando dunque un numero di condensatori più elevato. Mentre se per la realizzazione del banco vengono usati condensatori in mica della Celem, ad esempio i CP 30-75 da 10 nF con tensione

alternata 1000 Vrms fornita nel datasheet [5], sono necessari 15 componenti come mostrato in Figura 8.2 (configurazione d).



Figura 8.2 Configurazione c)realizzata con i Kemet d)realizzata con Celem

Dunque, come si può evincere, la tecnologia dei RES POWER CAP consente un risparmio nel numero di componenti utilizzati, in quanto essi sopportano una tensione alternata di picco superiore. Si sottolinea come il confronto sia stato eseguito a parità di tensione minima sopportabile (7 kV di picco) e di capacità equivalente. La tecnologia dei RES CAP1005050 risulta notevolmente vantaggiosa in quanto prevede l'utilizzo di solo quattro componenti per rispettare entrambe le specifiche richieste.

8.1 Confronto dimensionale

Si ipotizza di voler continuare il confronto tra le diverse tecnologie di condensatori ma considerando ora le dimensioni ed i volumi richiesti per realizzare le quattro configurazioni di banchi di condensatori. Nell'immagine seguente (Figura 8.3) vengono riportate, per le quattro tipologie di condensatori utilizzati, le dimensioni del singolo componente. Le dimensioni dei componenti Kemet e Celem sono state reperite dai rispettivi cataloghi [5] e [15].





È stata creata una tabella riassuntiva (Tabella 8.1) che definisce il volume occupato dal singolo componente e il volume totale occupato dal banco completo di tutti i condensatori.

	CAP1005050	CAP505025	Kemet	Celem
Numero componenti	4	9	40	15
Volume singolo condensatore (cm ³)	9.2	3.8	3.7	72.9
Volume banco (cm ³)	36.8	34.2	280.5	1093.5

Tabella 8.1 Confronto dei volumi delle diverse tecnologie di condensatori

Il volume del banco di condensatori della Kemet è stato ottenuto misurando le dimensioni reali del banchetto dopo la sua realizzazione, vedi Figura 7.29. Con riferimento alla Tabella 8.1, i risultati ricavati mostrano che realizzando un banco di condensatori con la tecnologia RES POWER CAP sono richiesti dei volumi notevolmente più ridotti. Volendo fornire un ordine di grandezza, il banco di condensatori realizzato con i RES CAP apporta una riduzione del volume pari all'87% rispetto ad una soluzione realizzata con componenti Kemet ed una riduzione pari all'97% rispetto ad un banco realizzato con i Celem.

Se si considera, ad esempio, come campo d'applicazione dei banchi appena descritti quello **automotive**, oltre alle dimensioni fisiche (volumi occupati) ricoprono un ruolo fondamentale anche i pesi. Il confronto in termini di pesi tra le varie soluzioni proposte è mostrato in Tabella 8.2.

	CAP1005050	CAP505025	Kemet	Celem
Numero componenti	4	9	40	15
Peso singolo condensatore (g)	30	18	4	355
Volume banco (g)	120	162	193	5325

Tabella 8.2 Confronto dei pesi delle diverse tecnologie di condensatori

Dalla tabella si evince chiaramente come soluzioni realizzate con i RES POWER CAP apportino una riduzione di pesi del 20% rispetto ad una soluzione realizzata con i Kemet ed una riduzione di pesi pari all'97% rispetto ad una soluzione realizzata con condensatori in mica (Celem). Dunque, si è voluto dimostrare quanto affermato nei capitoli introduttivi, ovvero che la realizzazione banchi capacitivi tramite la tecnologia dei RES CAP consente di ottenere: soluzioni con un numero di componenti inferiore, soluzioni più compatte (meno ingombranti), soluzioni meno massicce e pesanti.

8.2 Confronto dei costi

Prima di concludere il capitolo 8 si è voluto mostrare, per le soluzioni realizzative pensate (Figura 8.1 e Figura 8.2) un confronto che evidenzi i costi delle tre tecnologie. In questo modo si vuole mettere in luce quale sia la soluzione più vantaggiosa dal punto di vista economico. Per eseguire questa comparazione, sia per i condensatori Celem che per i Kemet, sono stati utilizzati i prezzi a cui è possibile reperire i componenti sul mercato. Questo ragionamento, chiaramente, non può essere applicato ai RES CAP che sono in fase prototipale e quindi non sono tutt'ora acquistabili sul mercato. Per tale tecnologia di condensatori è stato ipotizzato un prezzo di vendita di 25€/unità, considerando un costo di produzione di circa 10€ ad unità per mille unità prodotte. Il confronto in termini di costi è riassunto tramite la Tabella 8.3.

	CAP1005050	CAP505025	Kemet	Celem
Numero componenti	4	9	40	15
Costo singolo condensatore (€/unità)	25	25	10	100
Costo totale banco (€)	100	225	400	1500

Tabella 8.3 C	Confronto dei cost	i delle diverse te	ecnologie di co	ondensatori
---------------	--------------------	--------------------	-----------------	-------------

In conclusione, dunque, utilizzare i RES CAP per la costruzione di un banco di condensatori rappresenta anche un notevole vantaggio in termini economici, con risparmi che possono anche superare i 200 € per la singola applicazione di tipo induttiva in cui viene richiesta la compensazione. Ad esempio, se si avesse un sistema di tipo IPT costituito da 10 coil, per ognuno dei quali è richiesta la compensazione tramite carico capacitivo. In questo caso, ammettendo di non avere problemi di spazio e di pesi, il vantaggio economico nell'utilizzare questa tecnologia di condensatori (RES POWER CAP) risulta ancora più evidente. Pensando, invece, ad una soluzione come quella realizzata dal progetto *Polito Charge While Driving* in cui sono presenti 50 avvolgimenti che necessitano della compensazione tramite banchi di condensatori allora il vantaggio economico che se ne trae è ancora maggiore.

9. Datasheet e conclusioni

La creazione del datasheet del componente è stata ispirata a cataloghi di condensatori presenti sul mercato. Valutando quali fossero i parametri indicati dai costruttori nella scheda tecnica dei propri componenti. I dati riportati nel seguente datasheet sono stati ottenuti effettuando prove e misure sul condensatore, e ripetendo le stesse più volte al fine di confermare la validità dei risultati ottenuti. La misura dei parametri del componente è stata realizzata a tensione e frequenza desiderate (norma CEI 61071) mentre per valutare le restanti prestazioni dei RES POWER CAP sono stato inventate delle prove, per quanto già scritto nei capitoli precedenti.

9.1 Principali specifiche riportate nei datasheet

Nel seguito vengono elencate le specifiche principali e le relative condizioni di riferimento.

- Capacità C (μF): il valore di capacità misurato ad una temperatura tra 20°C ±5°C @ 100 kHz
- **Tolleranza**: la massima deviazione ammessa dal valore di riferimento di capacità misurata a 20°C (±2,5% codice H, ±5% codice J,...)
- ESR: è la resistenza serie equivalente dovuta alla resistività di elettrodi, connessioni interne e perdite dielettriche. L'ESR è misurata in milliohm (o in alcuni casi in Ω) a 20 °C ± 5 °C ad una frequenza di 10 kHz, anche se spesso viene fornito il valore a 100kHz.
- **Dissipation factor**: il $tan\delta$ è il rapporto tra la ESR e la reattanza capacitiva Xc, le condizioni standard di misura sono ad 1 kHz ma vengono anche usate frequenze tra i 10-100 kHz per determinare il dissipation factor.
- **Terminali**: sono le connessioni estreme che permettono la connessione del condensatore stesso con il restante circuito.
- Life expectancy: la vita prevista dal componente. Non è stato possibile valutare tale parametro a causa dei tempi troppo lunghi che richiederebbe.
- *dV/dt* (V/µs): tale valore indica il tempo massimo di salita/discesa della tensione è espresso in volt per microsecondo e non può essere superato.
- V_{AC} : anche nota come Vrms ed è il massimo valore di tensione rms sinusoidale che può essere applicata al condensatore.

- V_{DC} : è la massima tensione che può essere applicata al condensatore con continuità in entrambe le polarità, ma senza inversione. Tale valore non è stato possibile valutarlo sperimentalmente a causa della mancanza di un generato DC con le specifiche adatte.
- **Max** *I*_{*rms*}: La corrente rms nominale è il valore rms massimo che può percorrere il condensatore quando la temperatura esterna è di 70 °C (in caso di temperature più alte è necessario un derating).

9.2 Datasheet CAP1005050



Figura 9.1 Foto, dimensioni del CAP1005050 e rappresentazione del terminale (pin)

Tabella 9.1	Dimensioni e p	peso CAP1005050

Lunghezza (mm)	Larghezza (mm)	Spessore (mm)	Peso (g)
220	110	0.38	30

|--|

Capacità (nF)	6.2
Tolleranza	H= ± 2.5%
Dissipation factor - tanδ @100kHz	6.67·10 ⁻³
ESR (Ω) @100kHz	1.1
Terminali	Lamella in rame saldata e forata
dV/dt (V/µs)	2300
V _{AC rms} (V) @100 kHz	2480
V_{DC} (V)	10500 ¹
Irms (A) @100 kHz	9.5
Temperatura ambiente di funzionamento	-15°C – 60 °C ²

¹ Il valore di V_{DC} è stato stimato applicando un fattore 3 rispetto alla tensione massima tensione AC rms ² Tale range di funzionamento è stato verificato sperimentalmente durante l'anno facendo lavorare il condensatore sia d'inverno che d'estate (con temperature dell'asfalto prossime ai 60°C)



Figura 9.2 Andamento $\Delta C/C$ in funzione della frequenza per CAP1005050



Figura 9.3 Andamento $tan\delta$ in funzione della frequenza per CAP1005050



Figura 9.4 Andamento dell'impedenza Z in modulo in funzione della frequenza per CAP1005050

9.3 Datasheet CAP505025



Figura 9.5 Foto, dimensioni del CAP505025 e rappresentazione del terminale (pin)

Lunghezza (mm)	Larghezza (mm)	Spessore (mm)	Peso (g)
140	90	0.3	18

Tabella 9.4 Datasheet CAP505025

Capacità (nF)	6.2
Tolleranza	H= ± 2.5%
Dissipation factor - tanδ @100kHz	6.66·10 ⁻³
ESR (Ω) @100kHz	1.1
Terminali	Lamella in rame saldata e forata
dV/dt (V/µs)	2100
V _{AC rms} (V) @100 kHz	2190
V_{DC} (V)	9300 ³
Irms (A) @100 kHz	8.4
Temperatura ambiente di funzionamento	-15°C – 60 °C ⁴

 $^{^3}$ Il valore di V_{DC} è stato stimato applicando un fattore 3 rispetto alla tensione massima tensione AC rms 4 Tale range di funzionamento è stato verificato sperimentalmente durante l'anno facendo lavorare il condensatore sia d'inverno che d'estate (con temperature dell'asfalto prossime ai 60°C)



Figura 9.6 Andamento $\Delta C/C$ in funzione della frequenza per CAP505025



Figura 9.7 Andamento $tan\delta$ in funzione della frequenza per CAP505025



Figura 9.8 Andamento dell'impedenza Z in modulo in funzione della frequenza per CAP505025

9.4 Conclusioni finali

Le prove effettuate e descritte in questo elaborato hanno permesso di ricavare un datasheet preliminare del componente, ma hanno permesso di evidenziare sia i punti di forza della tecnologia RES POWER CAP che i punti di debolezza su cui è necessario investigare in futuro. In particolare, dalle prove realizzate con l'impedenzimetro sui RES CAP è emerso che essi presentano dei valori di ESR e quindi di $tan\delta$ leggermente più elevati (del 6%) rispetto ai componenti presenti sul mercato dunque si può affermare che le diverse tecnologie restano paragonabili. Allo stesso tempo i RES CAP sono caratterizzati da un bassissimo valore di tolleranza (indice di alta precisione del componente). Dunque, in futuro sarà necessario valutare l'utilizzo di nuovi materiali che consentiranno di ridurre ulteriormente le perdite sul componente. Dalle prove ad impulso e dalle prove di tensione alternata è stato possibile concludere che: il fenomeno di scarica del condensatore avviene sempre in prossimità del bordo o dello spigolo (interno) del componente. Inoltre, è stato possibile dedurre che la scarica del componente non sembra essere dipendente dallo strato interno di dielettrico, ma sembra riguardare il solo strato del cover layer. Per risolvere il problema legato agli spigoli è stato pensato di sostituire gli spigoli a 45 gradi dello strato di rame con spigoli arrotondati. Al fine di comprendere se la causa di alcune scariche è dovuto ad accumulo di cariche sulle punte. Mentre per problematica di scarica sui bordi è stato pensato di inspessire lo strato di cover layer ma è stata pensata anche la possibilità di sostituire il cover laver con un potting sotto vuoto di opportuno materiale non ancora indentificato.

Nonostante le problematiche appena elencate la tecnologia dei RES POWER CAP si prospetta, al termine della fase di prototipazione, una valida alternativa rispetto a condensatori presenti sul mercato. In quanto essa prospetta notevoli risparmi in termini economici, di pesi e di volumi.

Bibliografia

- [1] Locandina FABRIC, "Wireless dynamic charging for Electric Vehicles", Giugno 2018.
- [2] V. Cirimele, PhD_thesis,"Design and integration of a dynamic IPT", Febbraio 2017.
- [3] KEMET, "Introduction to Capacitor Technologies", 2013.
- [4] TDK, "Film Capacitors", Settembre 2015.
- [5] Celem, "CP 30/75 Conduction-cooled capacitor".
- [6] Celem , http://www.celem.com/Page.aspx?id=12&hmenu=13.
- [7] Software FEMM, http://www.femm.info/wiki/HomePage.
- [8] CEI 60871-1, "Condensatori statici di rifasamento per impianti di energia a corrente alternata con tensione nominale superiore a 1000 V", Ottobre 2015.
- [9] CEI 60143, "Condensatori serie destinati all'impiego sulle reti di potenza", Giugno 2016.
- [10] CEI 61071, "Condensatori per circuiti di elettronica di potenza", Ottobre 2007.
- [11] Std C37.66[™], "IEEE Standard Requirements For Capacitor Switches For AC System", Settembre 2005.
- [12] Std 824[™], "IEEE Standard for Series Capacitor Banks in Power Systems", 2004.
- [13] Std18[™], "IEEE Standard For Shunt Power Capacitor", Settembre 1992.
- [14] HIOKI, "INSTRUCTION MANUAL, 3532-50 LCR HITESTER", Settembre 2006.
- [15] KEMET, "Power electronics film capacitors".
- [16] Vishay, "Double Metallized Polypropylene Film Capacitor", Marzo 2013.
- [17] Electronic Concepts, "MP88-PT88, Metallized Polypropylene and Polypropylene & Foil Constructions".
- [18] EMTEST, "Manual For Operation VCS 500Nx", Settembre 2014.
- [19] Teledyne Lecroy, "Operator's Manual WaveSurfer 3000 Oscilloscopes", Novembre 2014.
- [20] "Scarica parziale", https://it.m.wikipedia.org/wiki/Scarica_parziale.
- [21] COMAR condensatori, "Condensatori per elettronica di potenza", Luglio 2002.

- [22] A. Fratta, "Appunti di Conversione Statica", Ottobre 2017.
- [23] A. Pevere, R. Petrella, C. Mi, and S. Zhou, "Design of a high efficiency 22 kW wireless power transfer system for EVs fast contactless charging stations,", Dicembre 2014.
- [24] N. Mohan, T. Undeland, and W. Robbins, "Power Electronics: Converters, Applications and Design", 1989.
- [25] R. Erickson and D. Maksimovic, "Fundamentals of Power Electronics", 2001.
- [26] V. Cirimele, S. G. Rosu, P. Guglielmi e F. Freschi, "Performance evaluation of wireless power transfer systems for electric vehicles using the opposition method", 2015.
- [27] Elektrisola, https://www.elektrisola.com/hf-litz-wire/products/profiling.html.
- [28] D. Meeker, "Finite Element Method Magnetics User's Manual", Ottobre 2015.
- [29] M. Tartaglia, "Appunti di Elettromagnetismo Applicato", 2016.