

Politecnico di Torino

Corso di Laurea in Ingegneria Elettrica

Tesi di Laurea Magistrale

**Sistema di misura per prove
di tensione composite e combinate**



Relatori:

prof. Gianfranco Chicco (Politecnico di Torino)

ing. Paolo Emilio Roccato (INRiM)

Candidato:

Stefano Emilio Caria

Ottobre 2020

Ringraziamenti

Vorrei dedicare questo spazio alle persone che hanno contribuito al mio percorso di crescita personale e professionale.

Un doveroso ringraziamento va al relatore Gianfranco Chicco, per la pazienza, la disponibilità e la professionalità dimostratami durante il lavoro di tesi.

Un ringraziamento particolare lo dedico al co-relatore Paolo Roccatò, per avermi mostrato la passione che prova nei confronti del lavoro che svolge, i preziosi consigli, e per avermi fornito gli strumenti necessari per finire questo percorso di studio.

Ringrazio Luciano e Gianluca per aver condiviso con me la loro esperienza e per avermi aiutato nella realizzazione della tesi. Colgo l'occasione per ringraziare l'INRiM per avermi dato la possibilità di rientrare in laboratorio nonostante il fenomeno pandemico che ha colpito la nostra società.

Un ringraziamento speciale va alla mia fidanzata Cristiana, per avermi sopportato e supportato nel momento del bisogno, per essermi stata vicino e per avermi spronato a finire il percorso di studi.

Ringrazio mia madre, mio padre e mia sorella per aver sempre creduto in me e per avermi sostenuto nei momenti di difficoltà.

Sento il dovere di ringraziare gli amici fraterni, Stefano, Dario e Federico, per le esperienze fatte assieme in questi anni, per il sostegno e per le birre bevute in compagnia.

Ringrazio infine Daniel, Lorenzo e Roberto, per aver fatto parte del mio percorso di studi, per le giornate di studio e i momenti goliardici passati insieme.

Grazie infinite a tutti.

Sommario

1 – Introduzione	1
2 – Normativa.....	3
2.1 – Norma IEC 60060 – 1:2010-12 [1]	3
2.1.1 – Tensione composita.....	4
2.1.2 – Tensione combinata	5
2.2 – Norma IEC 60060 – 2:2011-01 [2]	7
2.3 – Norma CEI EN 50191:2010 [3]	8
2.4 – Norma CEI EN 62271 – 1:2008 [4]	9
2.5 – Progetto Europeo	10
3 – Simulazione	12
3.1 – Simulazioni con singolo generatore	13
3.1.1 – Generatore sinusoidale	13
3.1.2 – Generatore impulsivo.....	15
3.2 – Simulazione prova composita.....	17
4 – Dispositivo di conversione.....	21
4.1 – Risposta al gradino	25
4.1.1 – Riferimenti normativi tratti da IEC 60060 - 2	25
4.1.2 – Misure.....	27
4.2 – Misura del fattore di scala.....	35
4.2.1 – Riferimenti normativi tratti da IEC 60060 - 2	35
4.2.2 – Misure.....	38
4.3 – Divisore definitivo.....	48
5 – Circuito di prova	50
5.1 – Sicurezza dell’area di prova.....	51
5.2 – Realizzazione circuito di prova	51
5.2.1 – Generatori di tensione.....	52
5.2.2 – Elementi di blocco e accoppiamento	54

5.2.3 – Dispositivo di misura	56
6 – Prove di tensione composita	58
6.1 – Prove di tensione “singole”	58
6.2 – Prove di tensione composita	61
7 – Conclusioni e sviluppi futuri	67
Bibliografia.....	69
Indice delle figure.....	70
Allegati.....	72
Allegato A	72
Allegato B	75

1 – Introduzione

L'aumento di generazione di energia elettrica da fonti rinnovabili sta apportando modifiche su scala globale nella gestione della rete elettrica di alta tensione. La prossima elettrificazione del parco vetture richiederà ulteriori considerazioni, bisogna pertanto verificare che gli elementi collegati alla rete abbiano caratteristiche adeguate a questo cambiamento. È fondamentale che la rete elettrica di alta tensione sia resiliente e in grado di garantire l'affidabilità dell'alimentazione alle sottostazioni di distribuzione. Per questo motivo è di vitale importanza che tutte le apparecchiature facenti parte della rete rispondano a prefissati requisiti.

Lo strumento che la comunità possiede è quello della regolamentazione e della normazione.

Nel campo dell'alta tensione esistono diverse serie di norme che stabiliscono quali siano le prove che gli oggetti devono superare prima di poter essere utilizzati per le loro applicazioni.

Le tecniche di prova in alta tensione sono descritte nella serie di standard IEC 60060: la IEC 60060 – 1:2010-12 [1] riguarda le definizioni generali e le prescrizioni di prova; la IEC 60060 – 2:2011-01 [2] descrive le caratteristiche richieste per i sistemi di misura e la taratura. Questa è una serie normativa che è di carattere generale, cui ogni Comitato Tecnico di prodotto attinge per la definizione degli standard di prova dedicati.

Le prove, secondo le norme citate, riguardano la capacità dielettrica dell'oggetto sotto esame sottoposto a forme d'onda di tensione con:

- Corrente continua
- Corrente alternata
- Impulsi di origine atmosferica
- Impulsi di manovra
- Interazioni che possono verificarsi con la sovrapposizione delle differenti forme d'onda.

Oggetto di questa tesi è l'ultima categoria, che prevede prove in alte tensioni composite o combinate.

Il lavoro è stato suddiviso in diversi obiettivi:

- Studio della normativa esistente
- Studio del fenomeno attraverso lo strumento della simulazione
- Scelta del divisore con le relative modifiche per ottenere le caratteristiche richieste
- Scelta e dimensionamento elementi di blocco e accoppiamento
- Prove sperimentali di tensione composita in bassa tensione.

2 – Normativa

La normazione è lo strumento che la comunità usa per ottenere uniformità nei livelli di sicurezza, di interoperabilità ed affidabilità. In questo specifico caso verrà trattata la sicurezza dei sistemi elettrici di alta tensione, cioè di tutti i sistemi elettrici con tensione nominale superiore a 1000 V.

Lo studio e la comprensione della normativa esistente sono necessari per una comprensione delle tipologie di prove previste, di quali siano le prescrizioni, i circuiti di prova, le caratteristiche richieste dagli strumenti di misura e le caratteristiche richieste ai software di misura.

Le prove con alte tensioni composite e combinate, così come le prescrizioni di prova, sono definite dalla norma IEC 60060 – 1:2010-12 [1].

Le caratteristiche richieste ai sistemi di misura per le prove di alta tensione vengono trattate nella norma IEC 60060 – 2:2011-01 [2].

Per quanto riguarda la sicurezza degli operatori durante la prova, si sono seguite le indicazioni fornite dalla norma CEI EN 50191:2010-10 [3].

Le prescrizioni comuni richieste all'apparecchiatura di manovra e di comando ad alta tensione vengono trattate dalla norma CEI EN 62271-1:2008 [4]

2.1 – Norma IEC 60060 – 1:2010-12 [1]

Questa norma definisce le tipologie di prova per differenti forme d'onda di tensione, indicando quali sono le prescrizioni generali per le prove di tensione. Per ogni prova di tensione “singola” vengono stabiliti i parametri necessari a definire la forma d'onda desiderata e la procedura di prova. Per quanto riguarda le prove di tensione composita e combinata vengono descritte esclusivamente le forme d'onda ed il circuito di prova, senza stabilire i parametri di interesse.

Ai fini di questo elaborato si analizza la parte relativa alla tensione composita e combinata.

2.1.1 – Tensione composita

La norma definisce la tensione composita come la sovrapposizione di tensioni impulsive di origine atmosferica (Lightning Impulse - LI) o generate dalla commutazione di dispositivi di manovra (Switching Impulse - SI), sovrapposte ad alte tensioni in corrente alternata (High Voltage Alternate Current - HVAC) o in corrente continua (High Voltage Direct Current - HVDC). L'oggetto in prova deve essere in grado di sopportare la tensione composita applicata ad uno dei suoi terminali.

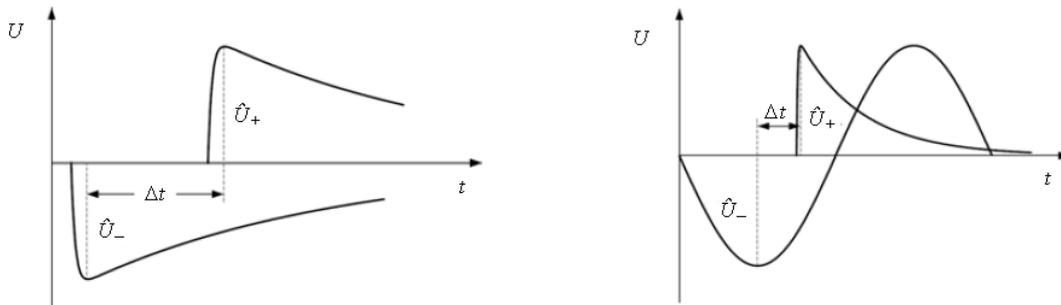


Fig. 1 - Tensione composita con differenti forme d'onda Fonte IEC 60060 - 1

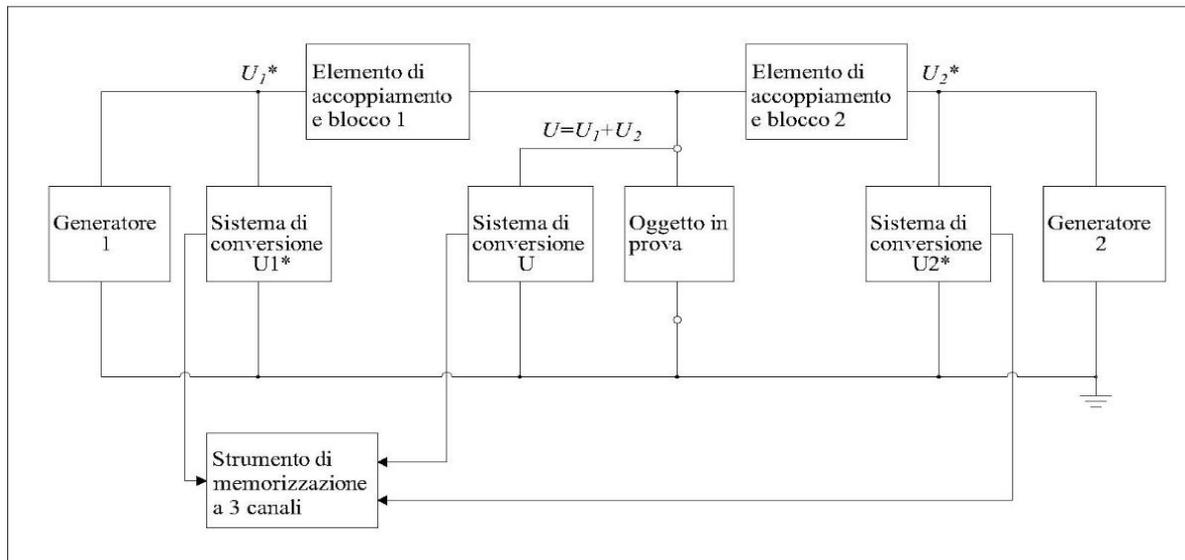
In Fig. 1 è possibile vedere due possibili composizioni di forme d'onda per la tensione composita. Il caso preso in esame è la composizione di una tensione sinusoidale ed una tensione impulsiva di origine atmosferica, dove l'origine dell'impulso si trova sul picco positivo della sinusoide.

Tale tipologia di prove è molto importante, perché simula una condizione reale che avviene frequentemente nella rete elettrica di alta tensione. A causa della conformazione della rete stessa che è costituita principalmente da conduttori non isolati, sospesi in aria al di sopra della sommità degli alberi. Da qui si evince che le scariche atmosferiche possono interagire facilmente con la rete, pertanto è necessario che tutti gli oggetti collegati siano in grado di sopportare tali eventi senza comprometterne il funzionamento e la sicurezza.

Le prove normalmente prevedono che l'oggetto in prova rispetti determinati vincoli: non avvengano scariche tra i terminali (o che siano in numero limitato) e che non vengano compromessi la sicurezza e il corretto funzionamento dell'oggetto, le richieste specifiche vengono stabilite dai Comitati Tecnici di competenza.

La Fig. 2 mostra lo schema circuitale di principio della prova, il quale prevede:

- Due generatori
- Due elementi di blocco ed accoppiamento
- L'oggetto in prova
- Tre sistemi di conversione
- Uno strumento di memorizzazione.



IEC 2222/10

Fig. 2 - Circuito per prove di tensione composite

2.1.2 – Tensione combinata

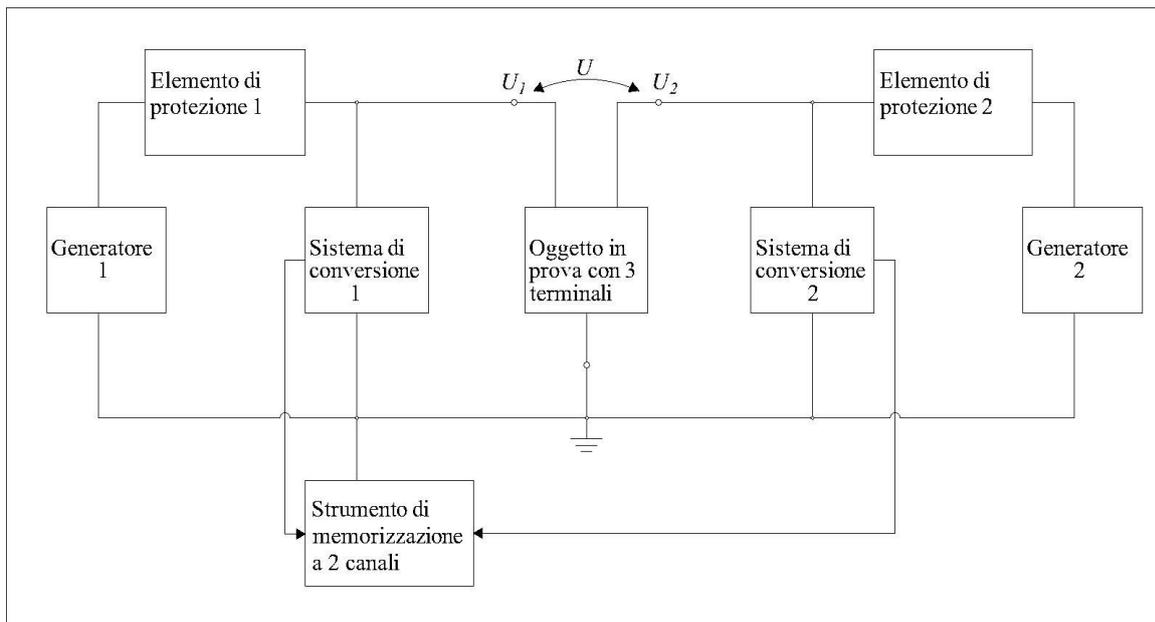
La tensione combinata, definita dalla norma, è la tensione misurata tra due terminali di potenza di un dispositivo con tre terminali, dove il terzo terminale è collegato a terra. I due terminali vengono alimentati con due generatori indipendenti, che possono realizzare qualunque forma d'onda di tensione. Si possono fare prove con la combinazione di tensioni sinusoidali sfasate tra loro nel tempo, oppure due tensioni impulsive differenti applicate ai suoi terminali, oppure combinazioni di tensioni sinusoidali e impulsive.

Questa tipologia di test può essere utilizzata per verificare, per esempio, l'isolamento fase-fase di un interruttore trifase o il sezionamento di un singolo polo.

In Fig. 3 è rappresentato lo schema circuitale di una prova di tensione combinata, dove sono presenti:

- Due generatori
- Due elementi di protezione
- L'oggetto in prova con tre terminali
- Due sistemi di conversione
- Strumento di memorizzazione.

In Fig. 4 viene raffigurata una possibile forma d'onda di tensione combinata.



IEC 2219/10

Fig. 3 – Circuito per prove di tensione combinate

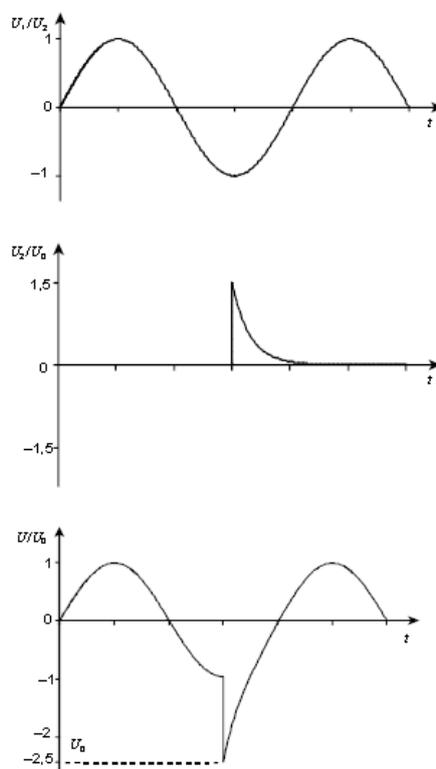


Fig. 4 – Tensione combinata Fonte IEC 60060 - 1

Per le prove di tensione sinusoidale o continua o di natura impulsiva sono ben definiti i parametri di interesse, per queste due tipologie di prove non viene menzionato alcun parametro, quindi si suppone di caratterizzare le singole forme d'onda separatamente per poi studiare il fenomeno.

Nella normativa non vengono fornite informazioni sugli elementi di blocco e accoppiamento e nemmeno sugli elementi di protezione.

2.2 – Norma IEC 60060 – 2:2011-01 [2]

La norma IEC 60060 – 2:2011 stabilisce quali siano le caratteristiche richieste ai sistemi di misura in funzione del test in cui verranno impiegati. Fornisce, inoltre, le procedure da utilizzare per tarare i suddetti sistemi di misura.

Per la prova di tensione composita servirà misurare tensioni continue, tensioni alternate, impulsi generati dalla commutazione di dispositivi di manovra e impulsi di origine atmosferica.

Le caratteristiche richieste per un sistema di misura di riferimento:

- **Tensione continua**

Il dispositivo deve essere in grado di misurare la tensione continua con una incertezza estesa $U_M \leq 1\%$ nel suo campo di misura. L'incertezza non deve essere influenzata da un fattore di ripple superiore al 3%.

- **Tensione alternata**

L'incertezza estesa richiesta per le misure di tensioni alternate è $U_M \leq 1\%$.

- **Impulsi atmosferici pieni e troncati e impulsi di manovra**

Il sistema di misura di riferimento deve essere in grado di misurare con una incertezza estesa $U_{M1} \leq 1\%$ per il valore di picco di impulsi pieni e troncati in coda, $U_{M2} \leq 3\%$ per il picco dell'impulso troncato sul fronte e $U_{M3} \leq 5\%$ per i parametri temporali.

La norma stabilisce i metodi con cui è possibile tarare i sistemi di misura di riferimento, i metodi sono due:

- **Metodo del confronto**

È possibile tarare un sistema di misura confrontando la misura del sistema da tarare con la misura di un sistema a minor incertezza, tali sistemi di misura devono essere riferibili ai sistemi di riferimento dell'Istituto Metrologico Nazionale.

- **Metodo alternativo per tensioni impulsive**

Si può tarare un sistema di misura attraverso la misura del fattore di scala e una valutazione dei parametri della risposta al gradino.

In questa trattazione si utilizzerà il metodo alternativo spiegato in maniera più accurata all'interno del capitolo 4.

2.3 – Norma CEI EN 50191:2010 [3]

All'interno di questa norma vengono definite le prescrizioni per la realizzazione e l'esercizio di stazioni di prova, laboratori di prova e impianti di prova temporanei. Queste prescrizioni sono di primaria importanza per la salvaguardia della vita umana, sia dell'operatore, che di eventuali visitatori non addestrati.

Il circuito di prova realizzato per svolgere il lavoro di tesi rientra nella categoria degli impianti di prova temporanei con tensioni inferiori a 1 kV. In questo caso bisogna impedire l'accesso alle persone non autorizzate attraverso un ostacolo fisico, come una parete o una catena e bisogna prevedere vie di fuga.

Durante l'esercizio dell'impianto sono previste poche regole, chiare e importanti per la sicurezza.

Gli impianti possono essere azionati solo da persone esperte, oppure anche da persone inesperte se l'impianto possiede una protezione automatica contro i contatti diretti.

Solo persone esperte o avvertite possono lavorare su impianti di prova, e tutto il personale deve essere istruito sulle prescrizioni di sicurezza.

Prima dell'accensione, per impianti con tensione inferiore a 1 kV, o se superiore prima che l'impianto sia pronto per l'accensione, il responsabile delle operazioni deve assicurarsi che le istruzioni siano eseguite correttamente.

Infine, due regole fondamentali per salvaguardare la vita delle persone:

- non si devono eseguire contemporaneamente attività di montaggio e di prova;
- prima di toccare gli oggetti in prova bisogna assicurarsi che non ci siano tensioni pericolose sulle parti accessibili mediante la loro messa a terra.

2.4 – Norma CEI EN 62271 – 1:2008 [4]

Questa norma fornisce prescrizioni comuni per l'apparecchiatura di manovra e di comando in alta tensione. Indica quali sono le caratteristiche nominali, a titolo di esempio: tensione nominale, tensione di isolamento e frequenza nominale. Include disposizioni per la progettazione, la costruzione e le prove da eseguire sui dispositivi di manovra.

Esistono due categorie di prove: *prove di tipo*, hanno lo scopo di verificare i valori nominali e le caratteristiche dei dispositivi di manovra, o *prove individuali*, le quali, come dice il nome, sono prove da eseguire su ogni singolo prodotto, con lo scopo di rivelare eventuali errori commessi durante la produzione.

Per questo lavoro si sono studiate principalmente le caratteristiche di tensione nominale e tensione di tenuta all'impulso, ipotizzando che la prova di tensione combinata preveda una combinazione di tensione nominale con sovrapposizione di un impulso di origine atmosferica di valore nominale.

Dovendo creare un circuito di prova in bassa tensione si cerca di mantenere il rapporto tra tensione nominale e tensione impulsiva costante.

Prendendo come riferimento la Tabella 1, si sono calcolati i rapporti tra la tensione sinusoidale U_r e il picco dell'impulso U_p per simulare una configurazione realistica e basata su valori noti, ma con una tensione scalata.

Tabella 1 - Livelli di isolamento nominali per tensioni nominali di campo II Fonte [4]

Tensione nominale U_r kV (valore efficace)	Tensione nominale di tenuta all'impulso U_p kV (valore di picco)	
	Fase – terra	Fase – fase
300	950	1050
362	1050	1175
420	1300	1425
550	1425	1550
800	2100	2100

2.5 – Progetto Europeo

Attualmente la norma non fornisce indicazioni chiare sullo svolgimento della prova di tensione composita, in alcuni casi viene effettuata con due soli sistemi di conversione a monte degli elementi di blocco. Viene elaborato l'andamento della tensione a cui è sottoposto l'oggetto con una sovrapposizione delle due forme d'onda registrate.

La normativa esistente non fornisce indicazioni sulle caratteristiche che devono possedere il sistema di conversione U, lo strumento di memorizzazione, il software di elaborazione dati e gli elementi di blocco.

Il Comitato Tecnico 42 del IEC, che si occupa di tecniche di prova in alte tensioni e forti correnti, ha quindi richiesto agli Istituti Metrologici Europei di approfondire le problematiche sulla riferibilità della misura di tali prove. Ne è scaturito un progetto europeo iniziato nella prima metà del 2020, che ha come obiettivo la revisione di tali norme per colmare le lacune ancora presenti.

Il progetto è strutturato in obiettivi successivi e si prevede che avrà una durata di tre anni. In primo luogo, è necessario stabilire quale sia l'andamento della forma d'onda desiderata e quali parametri sono necessari e sufficienti per descrivere correttamente la prova.

Per esempio, si possono ipotizzare diversi parametri importanti: la tensione massima raggiunta dal picco dell'impulso, il tempo di salita dell'impulso, il valore efficace della tensione sinusoidale, l'istante di tempo di salita dell'impulso riferito a un punto significativo della sinusoide.

Sarà necessario stabilire le caratteristiche del divisore, per poterlo considerare adatto all'utilizzo per questo genere di prove, come l'andamento del fattore di scala in funzione della frequenza e il comportamento dinamico. Bisognerà valutare anche quali saranno le prove adatte a verificare questo componente.

Si prevede la realizzazione di un divisore campione da utilizzare come riferimento per tarare altri divisori disponibili nei laboratori degli Istituti Metrologici Nazionali, lo scopo è quello di verificare più tipologie possibili di divisori.

In parallelo il progetto prevede la realizzazione di un circuito di prova per tensioni combinate e composite in bassa tensione, cioè con tensione massima inferiore a 1000 V al fine dello studio semplificato del problema.

Quest'ultimo aspetto è oggetto di questa tesi, dove si vedrà l'importanza della realizzazione di un circuito di prova in bassa tensione per iniziare ad analizzare, ed eventualmente risolvere, le problematiche legate a questa tipologia di prove.

Per completare il sistema di misura bisognerà realizzare un software di misura in grado di registrare la forma d'onda nei tre punti di misura della prova di tensione composita, e nei

due punti di misura della prova di tensione combinata. I due software avranno il compito di analizzare i dati e fornire i parametri stabiliti all'inizio del progetto e fornire indicazioni sull'andamento della prova stessa.

Questo lavoro di tesi, svolto presso il Laboratorio di Alte Tensioni e Forti Correnti (LATFC) dell'Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (INRiM) è uno degli step iniziali di tale progetto: prevede la realizzazione di un sistema di misura per prove di tensione composite in bassa tensione.

3 – Simulazione

Uno dei passaggi necessari nel processo di ricerca, una volta compresi gli aspetti normativi, è la simulazione del circuito di prova.

La simulazione permette di analizzare le possibili forme d'onda portando alla luce eventuali criticità. Attraverso questo strumento quindi si può verificare l'andamento della tensione e della corrente in diversi punti del circuito, dando così la possibilità a chi progetta di verificare differenti situazioni e dimensionare nella maniera più accurata possibile ogni elemento del circuito di prova.

Alcuni dei software più comunemente usati per la simulazione di circuiti elettrici ed elettronici sono: Micro-Cap, LTspice, PSIM ed OrCAD.

Si è simulata la prova di tensione composta, in quanto il divisore a disposizione era solo uno, inoltre è la prova con più complicazioni, in quanto i due generatori sono direttamente collegati allo stesso nodo dell'oggetto in prova, e quindi sono direttamente collegati tra loro. Invece nella prova di tensione combinata sono necessari almeno due divisori, e i generatori sono collegati a due nodi isolati tra loro, le protezioni sono comunque necessarie per prevenire danni ai generatori in caso di rottura del dielettrico durante la prova.

Per simulare il circuito si è scelto il programma LT-spice, programma open source gratuito, flessibile, di facile e intuitivo utilizzo. Permette di creare visivamente il circuito, e di analizzare l'andamento nel tempo delle variabili desiderate. Inoltre, è possibile parametrizzare le caratteristiche degli elementi, sia quelle principali che le non idealità, permettendo così una rapida modifica del circuito.

Nel caso preso in esame si vogliono valutare e dimensionare il divisore e gli elementi di blocco e accoppiamento. Si è deciso di utilizzare uno spinterometro a sfere come elemento di blocco e accoppiamento del generatore impulsivo, e un resistore come elemento di blocco e accoppiamento per il generatore sinusoidale.

3.1 – Simulazioni con singolo generatore

Si è proceduto per gradi, inizialmente sono stati simulati due circuiti semplici con la presenza di un solo generatore di tensione.

Le simulazioni sono state effettuate considerando la tensione massima che il divisore scelto può sostenere e misurare.

3.1.1 – Generatore sinusoidale

Il circuito simulato è composto da

- Generatore di tensione sinusoidale
- $R5 = 250 \text{ k}\Omega$ resistenza che rappresenta l'elemento di blocco e accoppiamento
- $C1 = 100 \text{ pF}$ carico capacitivo che può rappresentare uno spezzone di conduttore isolato.

In Fig. 5 si può vedere la schermata principale del software con il circuito descritto: la tensione è di tipo sinusoidale con ampiezza pari a 5 kV, la resistenza R5 rappresenta il filtro resistivo usato come elemento di blocco ed accoppiamento per il generatore sinusoidale. Il circuito nel ramo di destra dell'immagine rappresenta il divisore con un rapporto di divisione pari a 1000 in parallelo al carico capacitivo. In blu sono scritti i tre punti di misura della tensione: tensione di uscita del generatore V1, tensione a valle dell'elemento di blocco e accoppiamento V2, e tensione di uscita del divisore V3.

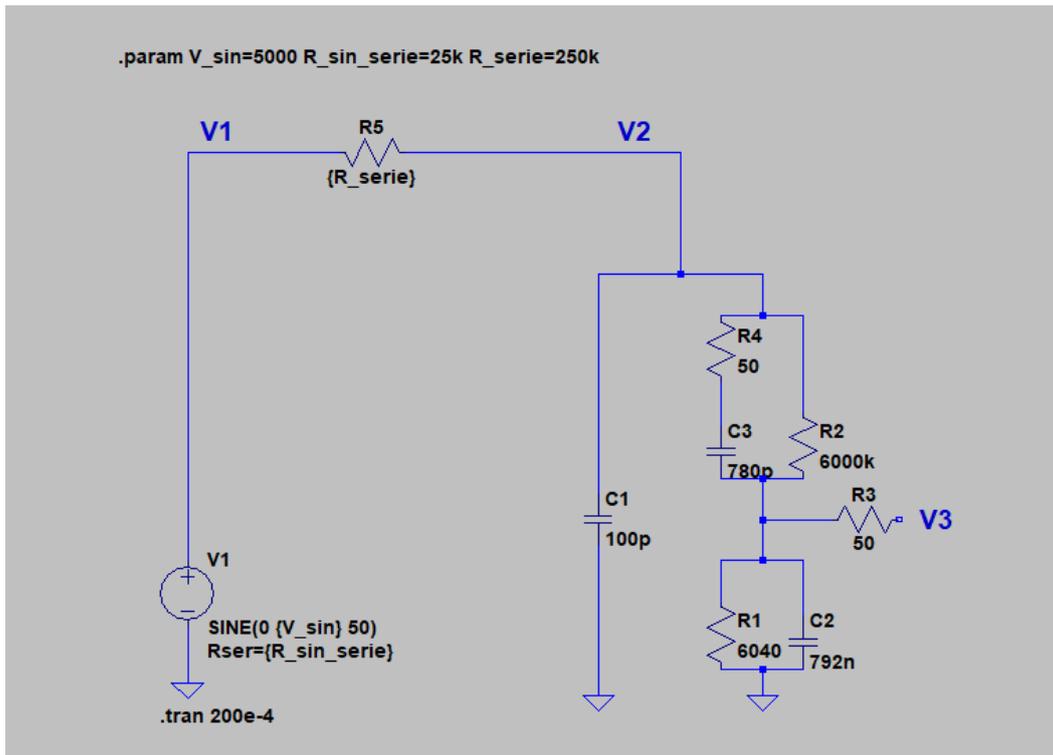


Fig. 5 – Circuito per simulazione con tensione sinusoidale

In Fig. 6 è possibile vedere il risultato della simulazione: l'asse verticale di V1 e V2 è quello principale visibile a sinistra, mentre per V3 l'asse è quello secondario riportato a destra. Si può vedere che la forma d'onda viene mantenuta pressoché sinusoidale, tra V1 e V2 c'è una piccola differenza dovuta alla caduta di tensione sull'elemento di blocco ed un piccolo sfasamento dovuto al carico capacitivo. Si nota però che la tensione all'uscita dal divisore V3 possiede lo stesso andamento di V2 diviso per il fattore di scala del divisore pari a 1000. La simulazione ci mostra come il divisore sia in grado di rappresentare correttamente fenomeni lenti come la sinusoide alla frequenza nominale di 50 Hz.

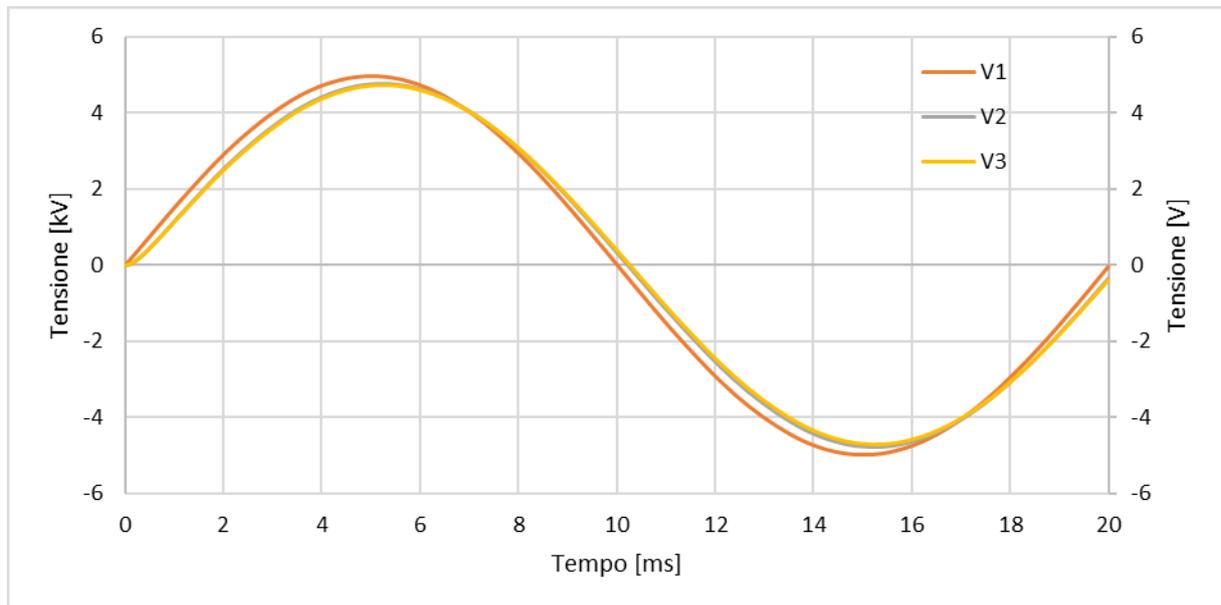


Fig. 6 - Risultati simulazione

3.1.2 – Generatore impulsivo

Nella simulazione successiva si è utilizzato il circuito alimentato dal generatore di tensione impulsiva con il generatore sinusoidale collegato, ma essendo disalimentato viene rappresentato da un carico resistivo. Per generare la tensione impulsiva si è utilizzato un generatore di tensione basato su dei valori presi da tabella. Per generarla è stato utilizzato un programma fornito dall'ente normatore: *IEC 61083 – 2 Test Data Generator*, il quale genera i dati necessari a rappresentare la forma d'onda ideale richiesta dalla norma IEC 61083-2:2013 [5]. La forma d'onda generata dal programma possiede un picco pari a 1 MV, quindi è stata effettuata una modifica per generare una tensione impulsiva con tensione di picco pari a 14 kV.

In Fig. 7 viene rappresentato il circuito utilizzato per simulare l'andamento della tensione nei vari punti quando è in funzione il solo generatore di tensione impulsiva.

Il circuito è composto, partendo da sinistra, da:

- $R5 = 25 \text{ k}\Omega$ resistenza interna del generatore sinusoidale
- $R6 = 250 \text{ k}\Omega$ elemento di blocco e accoppiamento del generatore sinusoidale
- Carico capacitivo e divisore
- $L1 = 2 \text{ nH}$ che corrisponde all'induttanza dell'arco elettrico che si genera tra le sfere dello spinterometro
- Generatore di tensione impulsiva.

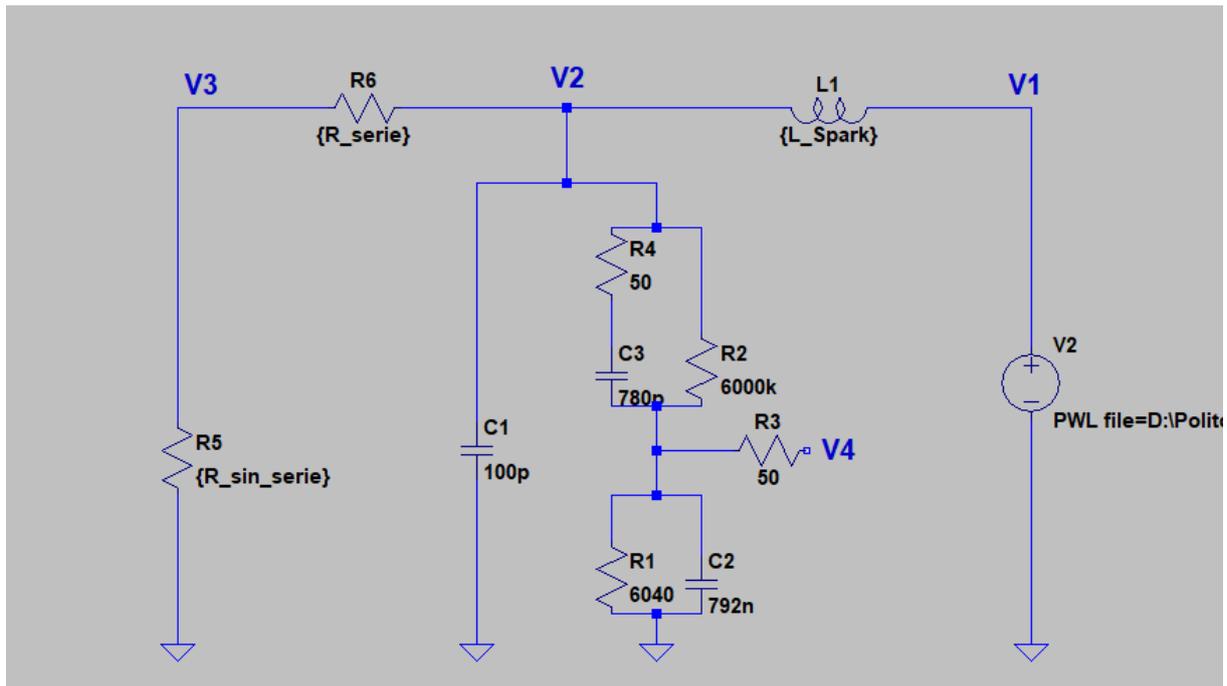


Fig. 7 – Circuito per simulazione con tensione impulsiva

Rappresentare lo spinterometro con una singola induttanza è una approssimazione, in questo caso si ipotizza che una volta innescato l'arco si abbia solo l'induttanza parassita della maglia. In Fig. 8 si osservano gli andamenti delle tensioni nel tempo. Le tensioni viste in legenda corrispondono alle V scritte in blu in Fig. 7. Si osserva che V1, V2 e V3 si riferiscono all'asse principale situato a sinistra, mentre V4 è riferito all'asse secondario situato a destra.

Con questa simulazione si può notare che anche per tensioni impulsive di origine atmosferica il divisore si comporta in maniera ottimale sia per la risposta dinamica, che per il rapporto di divisione. Infatti, le forme d'onda di V1, V2 e V4 sono sovrapposte e tra V4 e V2 c'è un rapporto pari a 1000. V3 corrisponde alla tensione ai capi del generatore di tensione sinusoidale, mostra come la tensione impulsiva venga divisa tra il filtro resistivo ed il generatore, dove la tensione corrisponde ad un decimo di quella subita dall'oggetto in prova.

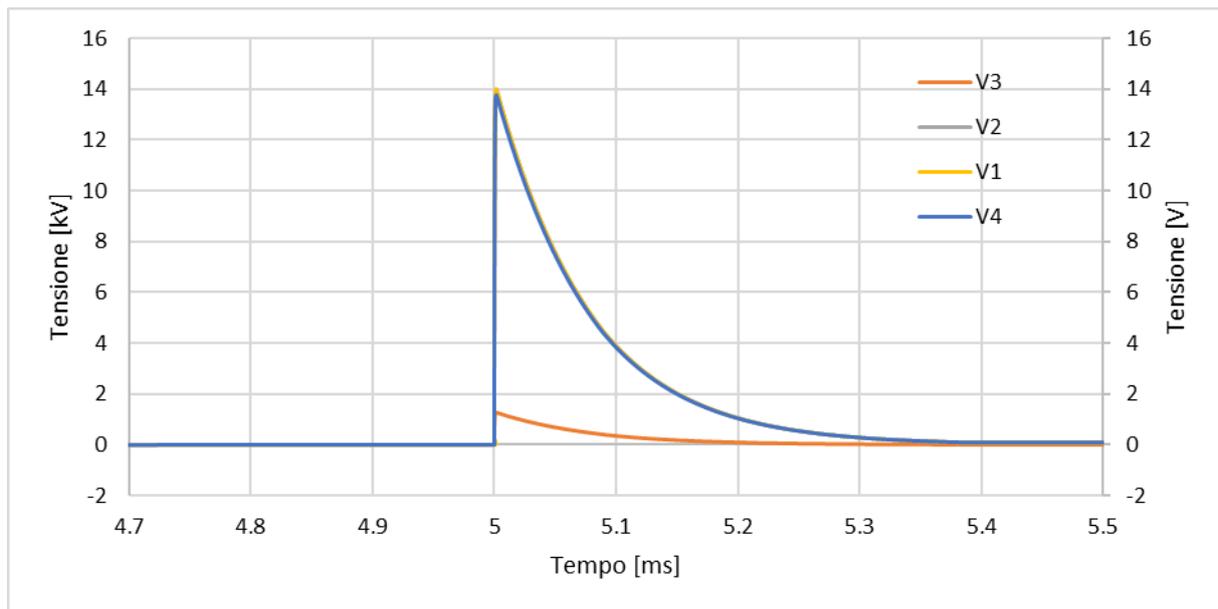


Fig. 8 - Risultati simulazione

I risultati di queste due simulazioni soddisfano diversi aspetti. Il divisore ha un comportamento pressoché ideale con un rapporto di divisione che non varia in funzione della frequenza. Il dimensionamento iniziale dell'elemento di blocco e accoppiamento relativo al generatore di tensione sinusoidale, pur considerando le semplificazioni effettuate, soddisfa la richiesta di ridurre l'impatto dell'impulso sul generatore sinusoidale di un ordine di grandezza, limitando così la sovratensione ad un livello accettabile per gli strumenti presenti in laboratorio.

Nelle due simulazioni però si considera un comportamento dello spinterometro a sfere da interruttore ideale, semplificando il comportamento dell'arco elettrico.

3.2 – Simulazione prova composta

Per poter simulare una prova composta è stato necessario riprodurre il comportamento dello spinterometro a sfere. LT-spice non ha nelle sue librerie tale dispositivo. In letteratura sono presenti diversi articoli sull'argomento, sia sul comportamento dell'arco elettrico che sullo spinterometro. È stato dunque preso come riferimento l'articolo "*A spark gap model for LT-spice and similar circuit simulation software*" [6], il quale tratta nello specifico la simulazione di tale dispositivo in software come LTspice. Con questo metodo si simula la natura dell'arco elettrico in funzione delle grandezze caratteristiche dello spinterometro.

Poiché lo scopo centrale della simulazione non era lo studio del fenomeno spinterometrico, il modello è stato semplificato per avere una simulazione snella e velocizzare i calcoli.

Per questo motivo viene emulato lo spinterometro attraverso un interruttore con una induttanza in serie, la quale rappresenta l'induttanza d'arco costante, ed una capacità in parallelo, che rappresenta la capacità dello spinterometro a sfere. L'interruttore denominato Switch in Fig. 9 è il dispositivo utilizzato nella simulazione per simulare la presenza dell'arco e dunque permettere il passaggio di corrente.

L'interruttore viene comandato in funzione della differenza di tensione misurata ai capi dello spinterometro. Se, nella realtà, la tensione supera la soglia di innesco, l'arco si innesca. Nella simulazione quindi l'interruttore si chiude. Nella realtà l'arco viene sostenuto dall'induttanza e dalla quantità di carica accumulata sulle sfere. Quando la tensione scende sotto un certo valore, la corrente diminuisce e l'arco si estingue, in queste condizioni l'interruttore si apre.

In Fig. 9 viene rappresentato il circuito utilizzato per la simulazione della prova di tensione composita, con il generatore di tensione sinusoidale a sinistra, il generatore di tensione impulsiva a destra, i due elementi di blocco e accoppiamento, il divisore ed il carico.

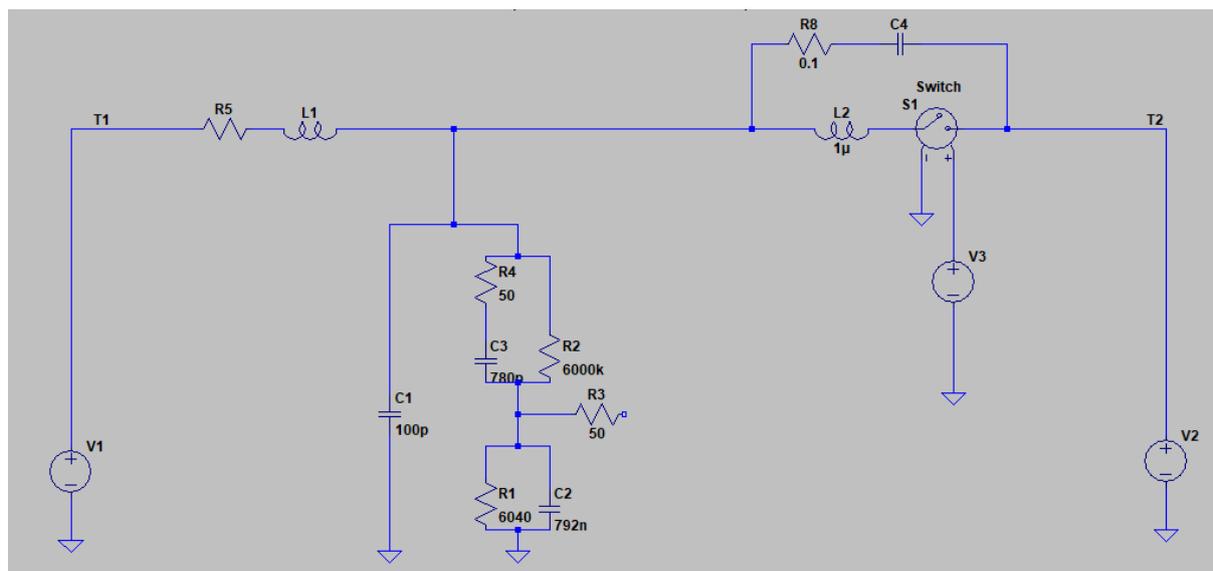


Fig. 9 - Circuito composito

In Fig. 10 è possibile osservare i risultati della simulazione: VAC è la tensione misurata ai capi del generatore di tensione sinusoidale, VLI è la tensione misurata ai capi del generatore di tensione impulsiva, Vcomp è la misura della tensione composita a cui viene sottoposto l'oggetto in prova, mentre Vmis è la tensione di uscita del divisore, quest'ultima traccia è quella che ha come asse verticale quello secondario a destra.

Si osserva che il divisore funziona correttamente e la tensione misurata ha un rapporto 1000 rispetto alla tensione di prova, infatti le due tracce risultano sovrapposte. Il generatore di tensione impulsiva non risente della tensione sinusoidale, mentre il generatore sinusoidale ha un impulso di dimensioni ridotte.

Osservando la Fig. 11, dove viene rappresentato il dettaglio della simulazione durante l'impulso, si nota che la tensione composta risulta essere pari alla sinusoide prima che venga generato l'impulso, segue l'impulso nel tratto di salita e nel primo tratto di discesa. Quando la tensione impulsiva scende al di sotto del valore necessario a mantenere l'arco, la tensione impulsiva e la tensione composta hanno andamenti differenti, la prima segue l'andamento dell'impulso ideale, mentre la seconda segue una evoluzione che la riporta alla tensione sinusoidale.

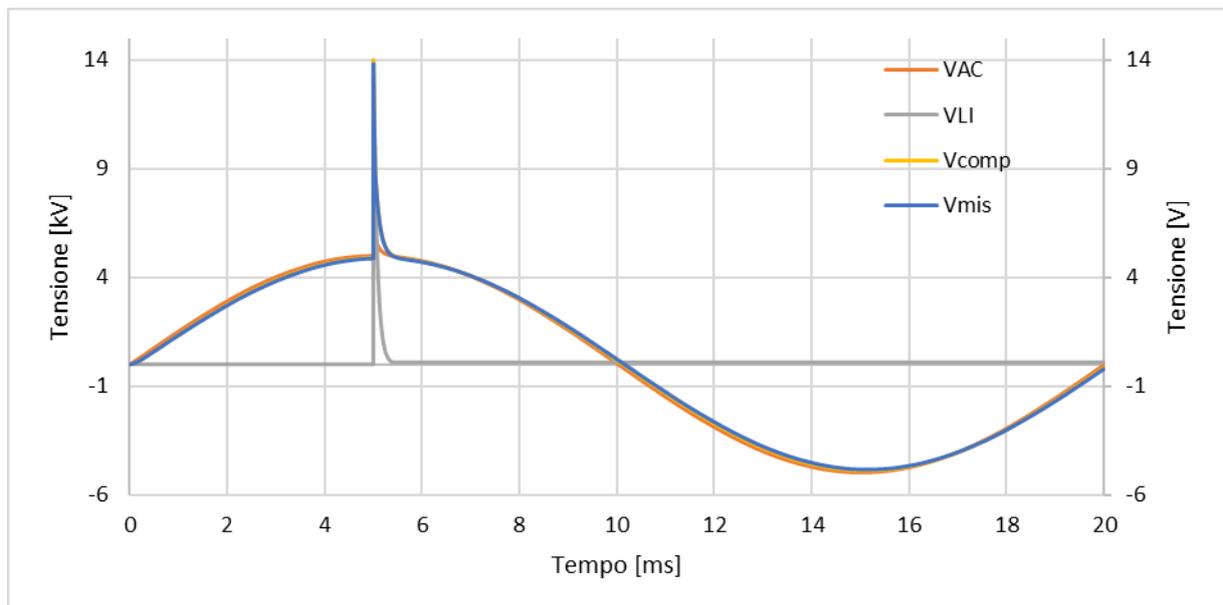


Fig. 10 - Risultati simulazione tensione composta

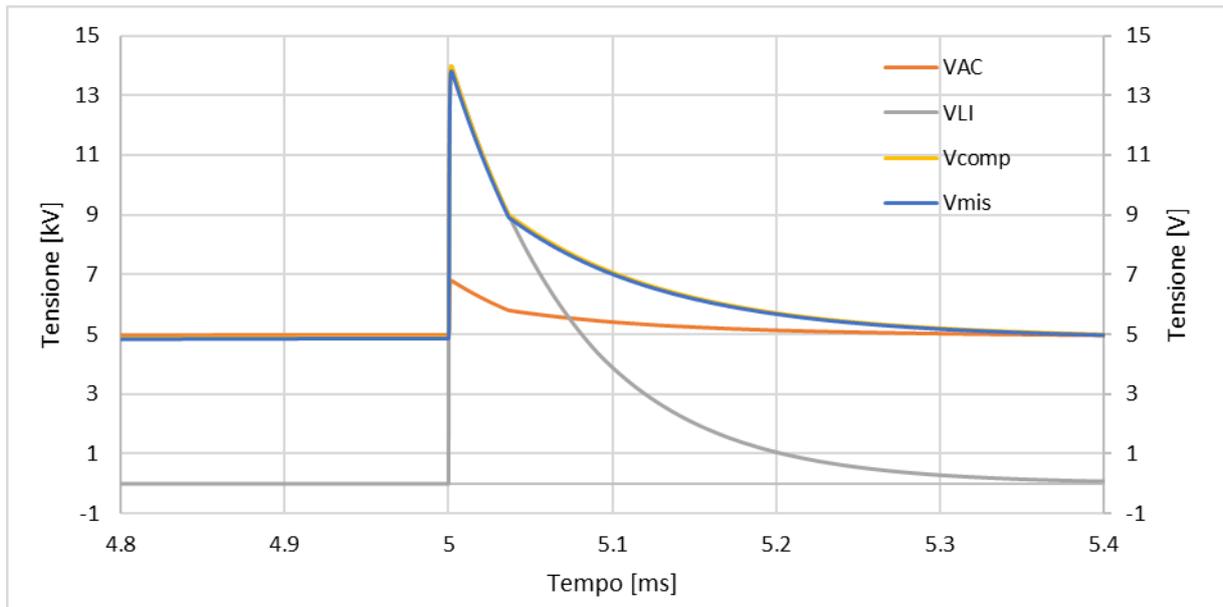


Fig. 11 - Dettaglio simulazione prove composita

Il risultato della simulazione del circuito di prova è conforme con quello auspicato, per permettere la realizzazione di un archetipo in scala, a tensione ridotta, della prova di tensione composita.

Il dispositivo atto alla misurazione funziona correttamente ed anche il comportamento degli elementi di blocco e accoppiamento soddisfa gli obiettivi prefissati.

Si è proceduto quindi alla fase sperimentale del lavoro, partendo dalla scelta e taratura del divisore.

4 – Dispositivo di conversione

L'utilizzo di un dispositivo di conversione è fondamentale quando la grandezza da misurare non è compatibile con lo strumento di misura. Nel caso preso in esame, lo strumento di misura, descritto nel capitolo successivo, è in grado di misurare tensioni fino a 10 V di picco. La simulazione della prova verrà effettuata con tensioni nell'ordine delle centinaia di volt, quindi è necessario utilizzare un dispositivo di conversione.

Come dispositivo di conversione è stato scelto un divisore di tensione. Sulla base della simulazione, e tra quelli in dotazione al LATFC per l'attività sperimentale e di ricerca (non potendo attingere alle apparecchiature utilizzate per prove e tarature, per evidenti ragioni di affidabilità e riferibilità delle stesse) la tipologia scelta è quella di un divisore resistivo - capacitivo.

Questa tipologia di divisori viene denominata partitore di tensione compensato.

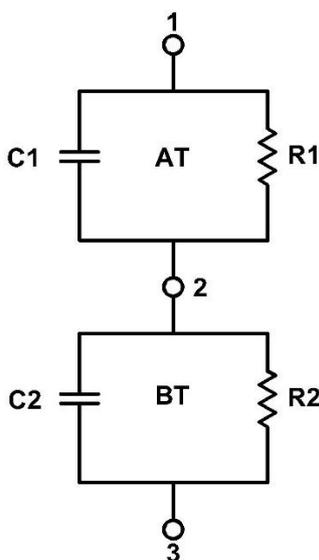


Fig. 12 - Schema di principio divisore compensato

In Fig. 12 viene rappresentato lo schema di principio di un partitore di tensione compensato, esso è composto da un ramo di alta tensione ed un ramo di bassa tensione.

Si collega il nodo 1 del partitore, elettrodo di alta tensione, al punto dove si intende effettuare la misura di tensione, il nodo 3 viene messo a terra. Lo strumento di misura viene collegato al nodo 2, corrispondente alla tensione del ramo di bassa tensione.

Questa tipologia di divisori viene impiegata spesso nelle prove impulsive grazie alle caratteristiche di divisione costanti al variare della frequenza ed una risposta veloce che consente loro di rappresentare in maniera accurata anche fenomeni molto rapidi come gli impulsi di origine atmosferica.

Il partitore risulta compensato se si verifica la seguente condizione:

$$\frac{C_1}{C_1 + C_2} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 0$$

A disposizione, tra le strumentazioni per ricerca e sperimentazione, è presente il divisore rappresentato in Fig. 13. Esso era disponibile per eventuali modifiche, poiché non veniva impiegato per prove o tarature.

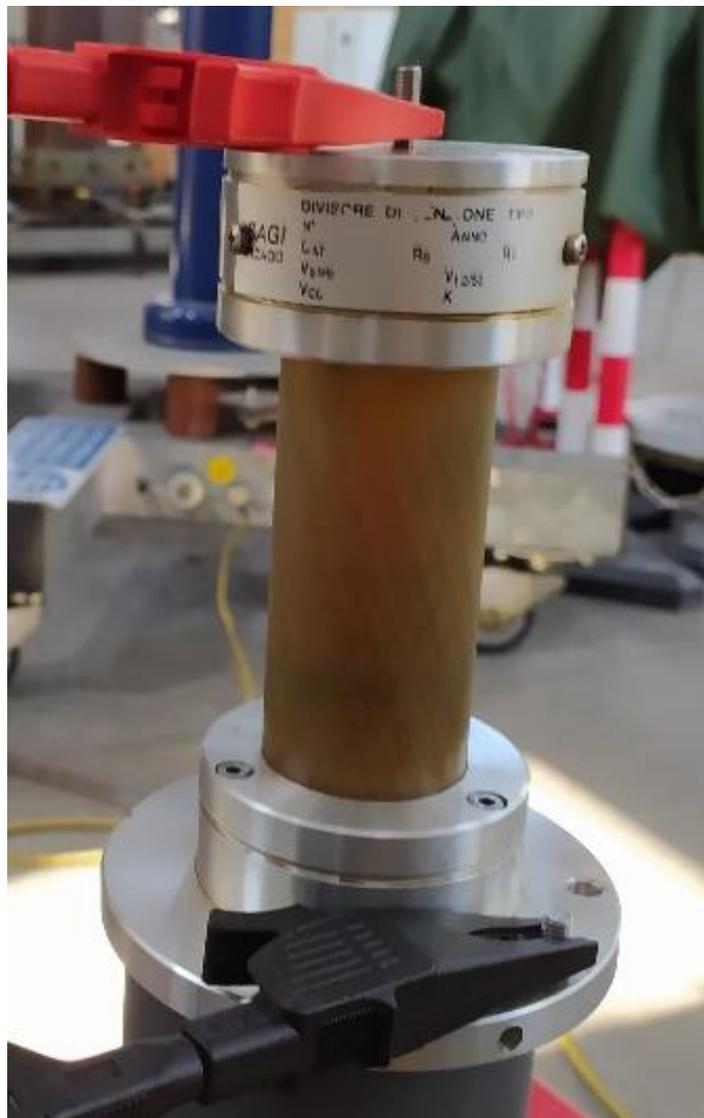


Fig. 13 – Divisore: ramo di alta tensione

Questo dispositivo è composto da due parti distinte, un ramo di alta tensione isolato in olio, ed uno di bassa tensione, rappresentato in Fig. 14, quest'ultimo può essere sostituito per ottenere rapporti di divisione differenti. Quello riportato in foto è il lato di bassa tensione che permette di ottenere il rapporto di partizione 300.

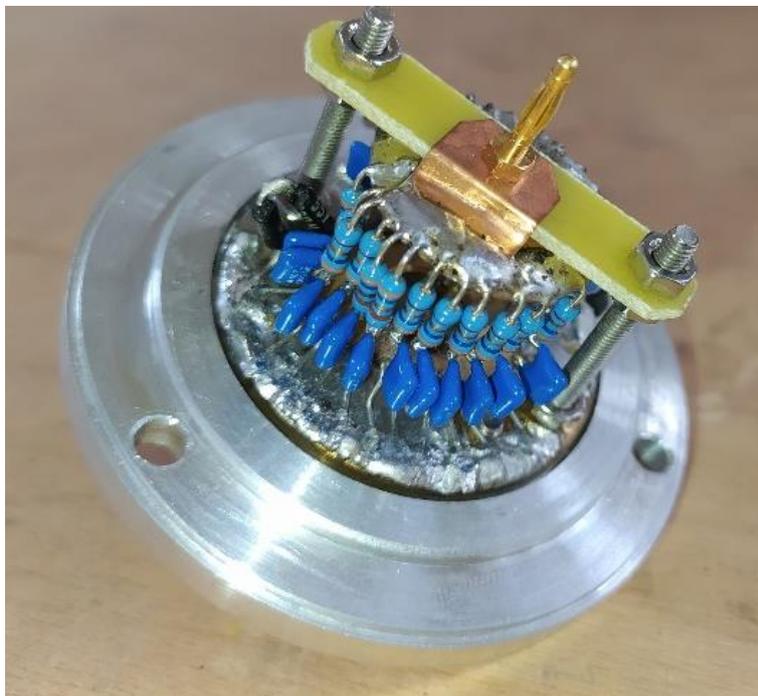


Fig. 14 – Divisore: ramo di bassa tensione 300 prima di effettuare modifiche

Lo schema circuitale di Fig. 15 riporta la rappresentazione completa del ramo di alta tensione del divisore. È composto da un ramo resistivo e da un ramo resistivo-capacitivo.

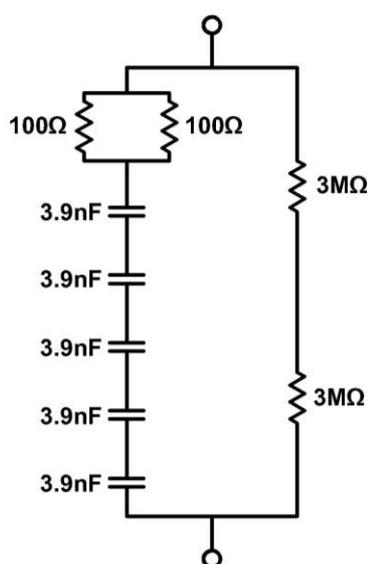


Fig. 15 – Schema circuitale ramo di alta tensione del divisore

Le resistenze sul ramo capacitivo regolano il comportamento dinamico del ramo di alta tensione, in quanto variando tali resistenze varia la costante di tempo del circuito RC.

La resistenza totale sarà $R_{AT} = 6 \text{ M}\Omega$, mentre la capacità nominale sarà $C_{AT} = 780 \text{ pF}$.

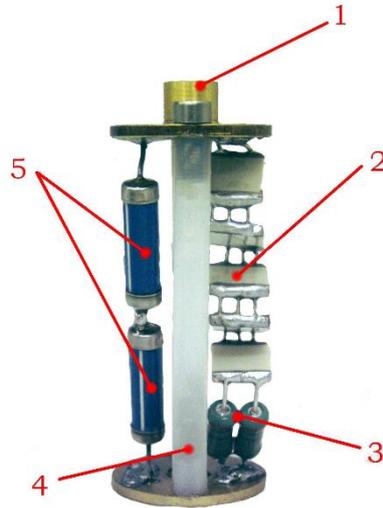


Fig. 16 - Lato AT: 1. Attacco per lato BT 2. Condensatori ceramici 3. Resistenze ramo RC 4. Colonna isolante 5. Resistenze ramo resistivo

In Fig. 16 viene rappresentata la composizione interna del ramo di alta tensione.

I rapporti di divisione disponibili erano tre: 100, 200 e 300. Il processo di scelta ha richiesto diverse prove e molteplici modifiche, le quali hanno portato a un complessivo miglioramento del dispositivo di conversione. Alla fine del processo si è scelto un rapporto di divisione pari a 200, modificato rispetto alla configurazione originale fornita dal costruttore. Di seguito si analizza il processo che ha portato a tale scelta.

Come anticipato nel paragrafo 2.2 – Norma IEC 60060 – 2:2011-01 si segue il metodo alternativo per tarare il dispositivo di conversione, tale metodo prevede:

- Risposta al gradino
- Misura del fattore di scala

Sono state eseguite in questo ordine, poiché le modifiche richieste per ottenere una risposta al gradino adeguata richiedevano maggiore impegno temporale rispetto a quelle da effettuare per modificare il fattore di scala.

4.1 – Risposta al gradino

Per definire in maniera adeguata le caratteristiche dinamiche del divisore si è preso in considerazione il capitolo 10 della IEC 60060 - 2 [2] riguardante le caratteristiche che un sistema di misura deve avere per poter essere considerato di riferimento per altri sistemi di misura. Il quale prevede, come metodo per testare il comportamento dinamico del divisore, di effettuare una misura della risposta al gradino.

Tale prova viene effettuata con un generatore di gradino, il quale realizza la forma d'onda richiesta grazie ad un interruttore al mercurio.

Il mercurio presente all'interno dell'interruttore permette di evitare gli effetti di rimbalzo dei contatti dell'interruttore, eliminando così i rimbalzi di tensione. In questo modo è possibile raggiungere elevati dv/dt in chiusura, il tempo di discesa è inferiore ai 2 ns.

4.1.1 – Riferimenti normativi tratti da IEC 60060 - 2

Si sottopone al gradino il divisore e se ne registra la risposta. La misura viene normalizzata al valore 1 e viene denominata risposta unitaria al gradino $g(t)$ rappresentato in Fig. 17, dove:

- O_1 origine della risposta al gradino
- β_{rs} valore di sovraelongazione di $g(t)$.

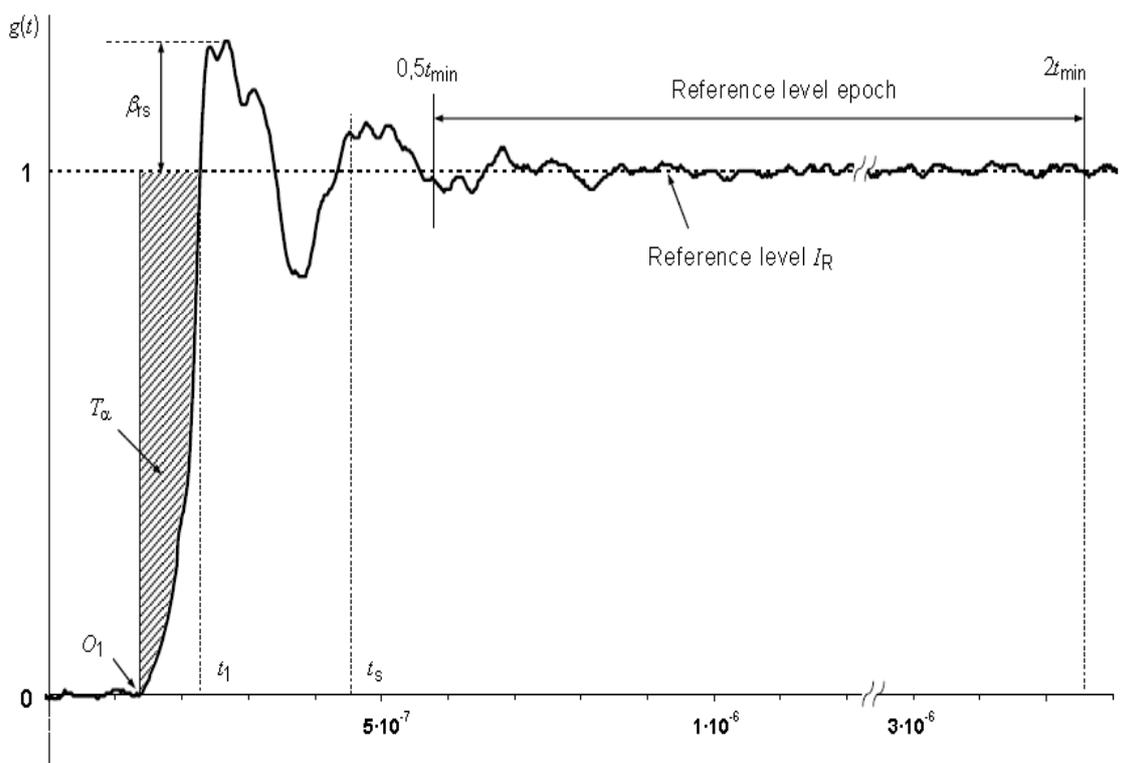


Fig. 17 – Risposta unitaria al gradino $g(t)$. Fonte IEC 60060-2 [2]

Il passaggio successivo è ottenere la risposta integrale al gradino $T(t)$ e tracciarne il grafico, rappresentato in Fig. 18, dove:

$$T(t) = \int_{0_1}^t (1 - g(\tau)) d\tau$$

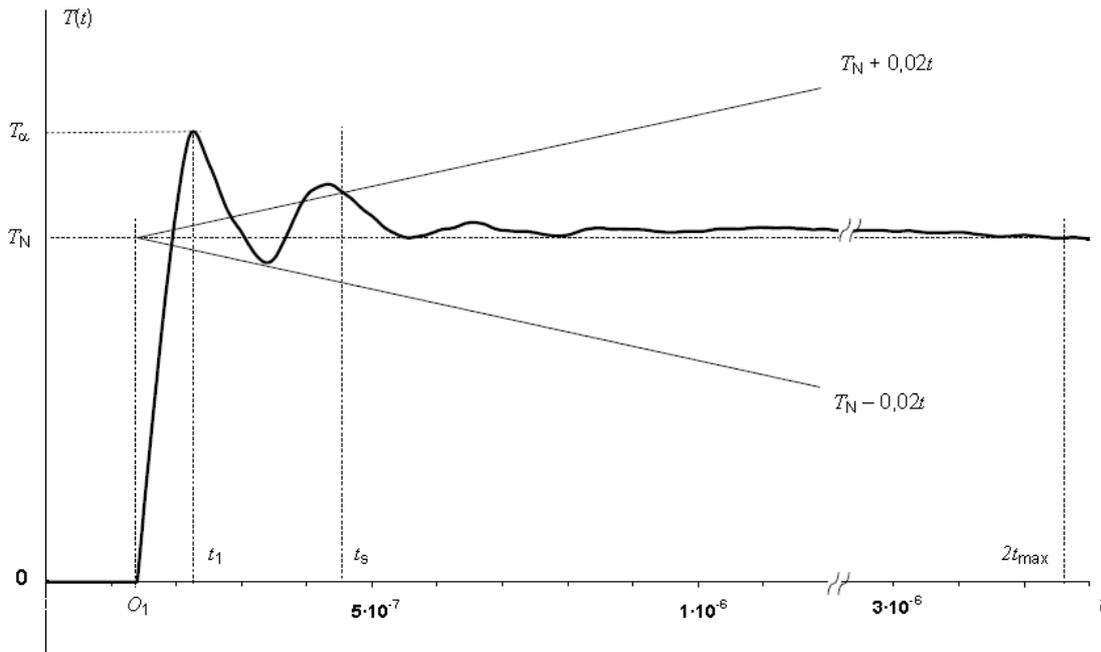


Fig. 18 - Parametri dell'integrale della risposta al gradino $T(t)$. Fonte IEC 60060-2 [2]

I parametri che vengono raccomandati dalla Norma sono tre:

- Tempo di risposta sperimentale

$$T_N = T(2 \cdot t_{max})$$

Corrisponde al valore dell'integrale quando la risposta al gradino deve essere arrivata a regime. Perché t_{max} è il tempo massimo, consentito dalla norma, dell'evento da misurare. Per esempio, se si vuole misurare un impulso di origine atmosferica con tempo di salita $1.2 \mu s$ t_{max} sarà pari a:

$$t_{max} = 1.8 \mu s$$

- Tempo di assestamento t_s , che corrisponde al tempo minimo in cui viene rispettata:

$$|T_N - T(t)| < 0.02 t$$

Questo vuol dire che t_s corrisponde all'istante di tempo in cui $T(t)$ entra, senza più uscirne, nella regione dello spazio compresa tra $T_N+0.02t$ e $T_N-0.02t$.

- Tempo di risposta parziale T_α che corrisponde al massimo valore della risposta integrale.

In Tabella 2 vengono riportati i valori raccomandati dei parametri ottenuti dalla risposta al gradino di sistemi di misura per tensioni impulsive.

Tabella 2 - Parametri raccomandati della risposta al gradino per sistemi di misura di riferimento

Tensione	Raccomandazioni per		
	Impulsi atmosferici completi e tagliati in coda	Impulsi atmosferici tagliati sul fronte	Impulsi di manovra
T_N	≤ 15 ns	≤ 10 ns	-
t_s	≤ 200 ns	≤ 150 ns	≤ 10 μ s
T_α	≤ 30 ns	≤ 20 ns	-

4.1.2 – Misure

Dato che il generatore di gradino funziona meglio in chiusura per via della presenza di un relè al mercurio; il gradino viene effettuato a scendere. Per analizzare la risposta al gradino è stato utilizzato un software creato appositamente per questo scopo nell'ambito delle attività metrologiche del laboratorio per l'utilizzo in taratura.

Il software di programmazione su cui si basa il programma di misura della risposta al gradino è LabVIEW, il quale attraverso una programmazione a oggetti consente di interfacciarsi attraverso il computer con schede di acquisizione dati, programmarle, acquisire ed analizzare i dati e restituire direttamente le informazioni necessarie. In questo caso, le informazioni sono i parametri della risposta al gradino.

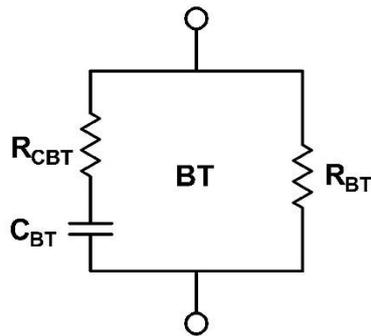


Fig. 19 - Circuito ramo di bassa tensione del divisore

In Fig. 19 viene rappresentato lo schema circuitale del ramo di bassa tensione del divisore preso in esame. È composto da:

- Resistenza R_{BT} pari a:

$$R_{BT} = 30.15 \text{ k}\Omega$$

- 15 condensatori da 10 nF ed un condensatore da 2.2 nF, tutti in parallelo tra loro per formare la C_{BT} :

$$C_{BT} = 15 \times 10 + 1 \times 2.2 = 152.2 \text{ nF}$$

- 15 resistenze da 3.9 Ω e una resistenza da 1.9 Ω , tutte in parallelo tra loro per formare la R_{CBT} :

$$\frac{1}{R_{CBT}} = \frac{15}{3.9} + \frac{1}{1.9} \Rightarrow R_{CBT} = 0.2287 \text{ }\Omega$$

Vengono di seguito illustrate le misure effettuate per il divisore fornito dal costruttore prima di effettuare eventuali modifiche.

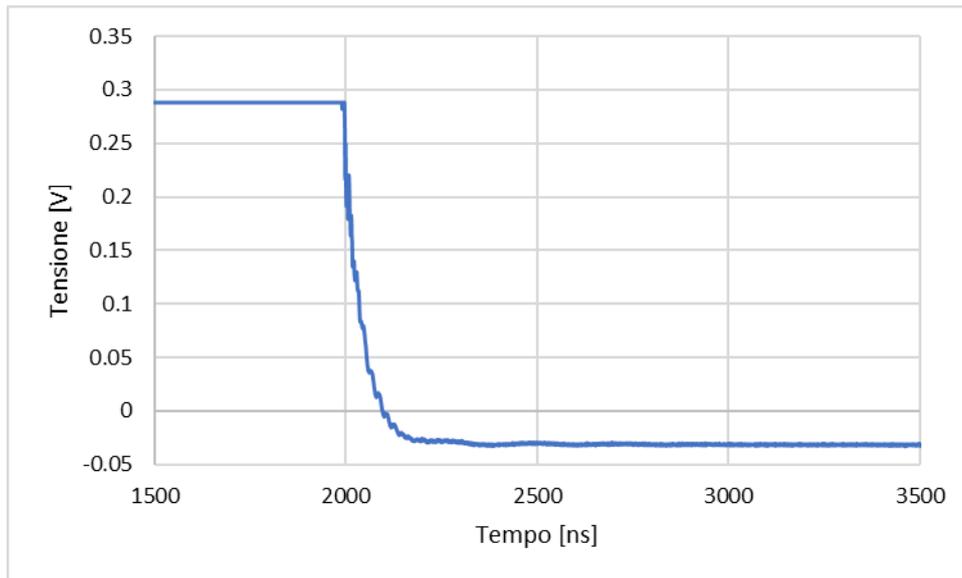


Fig. 20 - dati misurati

In Fig. 20 si può vedere la misura di tensione effettuata da cui normalizzando a 1 si ottiene la funzione $g(t)$ visibile in Fig. 21. Confrontando con il grafico di Fig. 17, si nota un andamento “lento”. Infatti, sono necessari più di 200 ns per arrivare a regime, questo è incompatibile con il fenomeno che si desidera misurare. Con una risposta al gradino di questo tipo sicuramente non si può rappresentare un andamento impulsivo nella maniera corretta, poiché un andamento “lento” introdurrebbe un ritardo nella misura, e questa non rappresenterebbe in maniera riferibile il misurando.

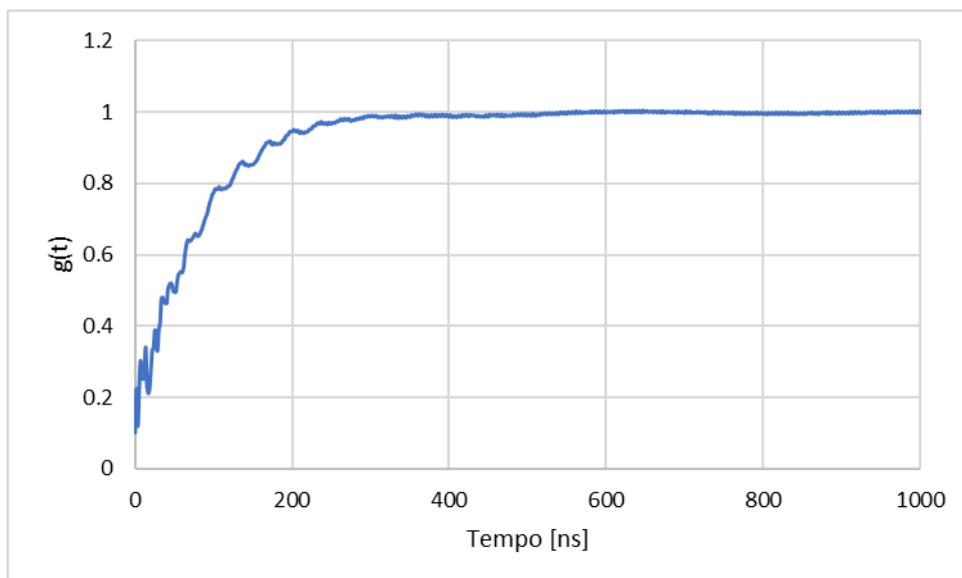


Fig. 21 - $g(t)$

Effettuando l'integrale di $g(t)$ otteniamo $T(t)$ rappresentato in Fig. 22, mentre i parametri della risposta al gradino si possono vedere in Tabella 3.

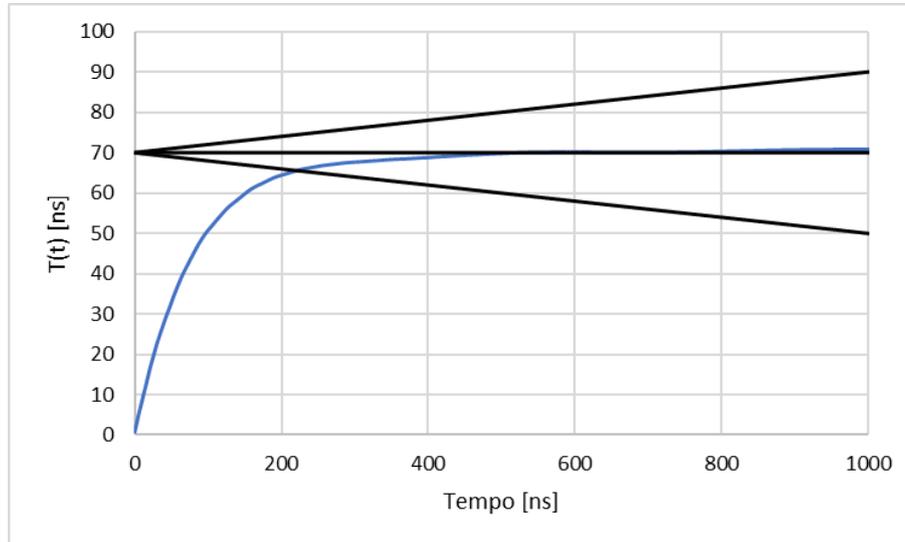


Fig. 22 - $T(t)$

L'andamento "lento" di $g(t)$ comporta un valore di T_N estremamente elevato, pari a circa 70 ns molto al di sopra dei 15 ns massimi ammessi. Anche t_s pari a 220 ns è superiore al valore di 200 ns previsto dalla norma, Questo vuol dire che il partitore di tensione ha una costante di tempo troppo alta e impiega troppo tempo per arrivare a regime. Per T_α possiamo fare le stesse valutazioni, quindi questo divisore non può essere utilizzato per un sistema di misura di riferimento.

Tabella 3 - Parametri risposta al gradino divisore 200 pre-modifica

Parametro	T_N	t_s	B	T_α
Ottenuto	70.05 ns	220 ns	0.6717 ns	70.15 ns
Raccomandato	≤ 15 ns	≤ 200 ns		≤ 30 ns

Provando gli altri due rami di bassa tensione disponibili si sono ottenuti risultati simili, quindi era necessario apportare delle modifiche o creare un ramo di bassa tensione completamente nuovo.

La prima strada intrapresa è stata quella della creazione di un nuovo ramo di bassa tensione con fattore di scala pari a 400, la scelta è stata dettata dai condensatori disponibili in laboratorio che hanno limitato il rapporto raggiungibile. Il difficile approvvigionamento causato dalla situazione pandemica è stata una delle motivazioni che ha portato a tale scelta. Per realizzarlo si sono calcolati i valori di resistenza e capacità necessari per poi assemblare il nuovo ramo di bassa tensione. Il valore della resistenza si calcola grazie al rapporto di divisione desiderato e conoscendo il valore della resistenza di alta tensione con la seguente formula:

$$\frac{R_{BT}}{R_{BT} + R_{AT}} = \frac{1}{400}$$

da cui si ottiene:

$$R_{BT} = \frac{R_{AT}}{399} = 15038 \Omega$$

Per la capacità si ottiene:

$$C_{BT} = 344 \text{ nF}$$

Mentre per la resistenza in serie alla capacità

$$R = 0125 \Omega$$

Assemblando si è ottenuta la struttura visibile in Fig. 23.

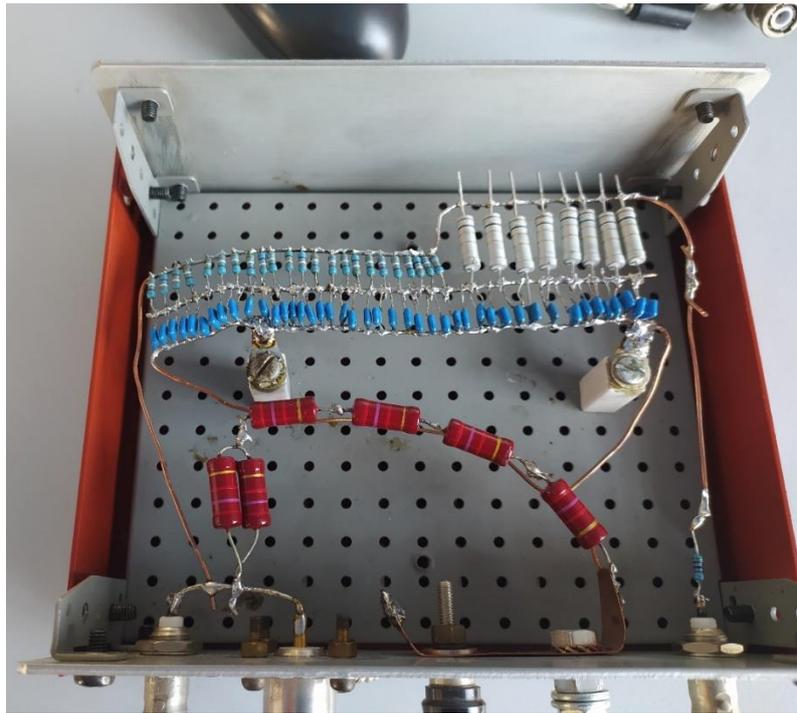
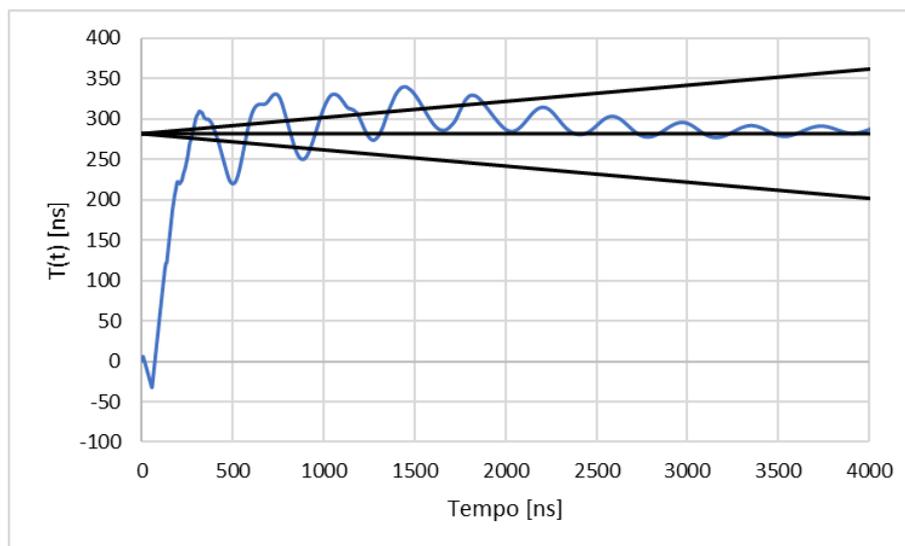


Fig. 23 - Lato di bassa tensione per divisore 400

Questa versione poteva essere interessante in quanto per collegare il ramo di alta tensione a quello di bassa tensione si doveva usare un conduttore, e questo dava la possibilità di portare il lato di bassa tensione vicino allo strumento di misura. In questo modo si sarebbe potuto ridurre il collegamento effettuato in bassa tensione dal divisore allo strumento di misura, questa configurazione era interessante poiché in parallelo a questo progetto si poteva valutare l'influenza della resistenza del cavo di bassa tensione sulla misura.

Effettuando sul dispositivo la prova di risposta al gradino si è notato che il comportamento del divisore peggiorava notevolmente rispetto alla configurazione iniziale. Infatti, osservando la forma di $T(t)$ in Fig. 24, si può notare quanto sia peggiorata la risposta al gradino.

Fig. 24 - $T(t)$ Divisore 400

Osservando i parametri riportati in Tabella 4 si può apprezzare quanto il divisore sia diventato “lento” con questa configurazione.

Tra le possibili cause di tale rallentamento si annoverano nuovi parassitismi generati da una disposizione più estesa dei componenti e dall’aggiunta del cavo di collegamento tra il ramo di alta tensione ed il ramo di bassa tensione, con la configurazione a “cilindro” (più raccolta) i parassitismi non sono in valore tale da incidere sulla risposta al gradino, ed il cavo di collegamento viene sostituito da un connettore.

Tabella 4 - Parametri divisore 400

Parametro	T_N	t_s	β	$T\alpha$
Ottenuto	281.92 ns	18006 ns	81.115 ns	340.21 ns
Raccomandato	≤ 15 ns	≤ 200 ns		≤ 30 ns

Si è deciso quindi di ritornare alla configurazione precedente e si è scelto di modificare il ramo di bassa tensione con rapporto di divisione pari a 200.

Siccome il dispositivo risultava compensato in linea teorica, si è agito sulla resistenza in serie alla capacità. Sfruttando lo strumento di simulazione si è osservato che la risposta avrebbe dovuto essere precisa, quando nella realtà era lenta.

Aumentare la resistenza in serie alle capacità permetteva di avere una sovralongazione della risposta al gradino, quindi si supponeva che nella realtà la risposta sarebbe migliorata.

Sono state apportate diverse modifiche con lo scopo di migliorare la risposta al gradino. Per non appesantire la trattazione si riporta il risultato finale, l’evoluzione è riportata in Allegato A.

In Fig. 25 si può osservare il confronto della funzione $g(t)$ prima che il dispositivo venisse modificato (in arancio) e dopo aver effettuato la modifica (in blu). Si osserva come il dispositivo dopo la modifica abbia una variazione più rapida rispetto alla versione originale, con conseguente miglioramento della risposta ai fenomeni transitori.

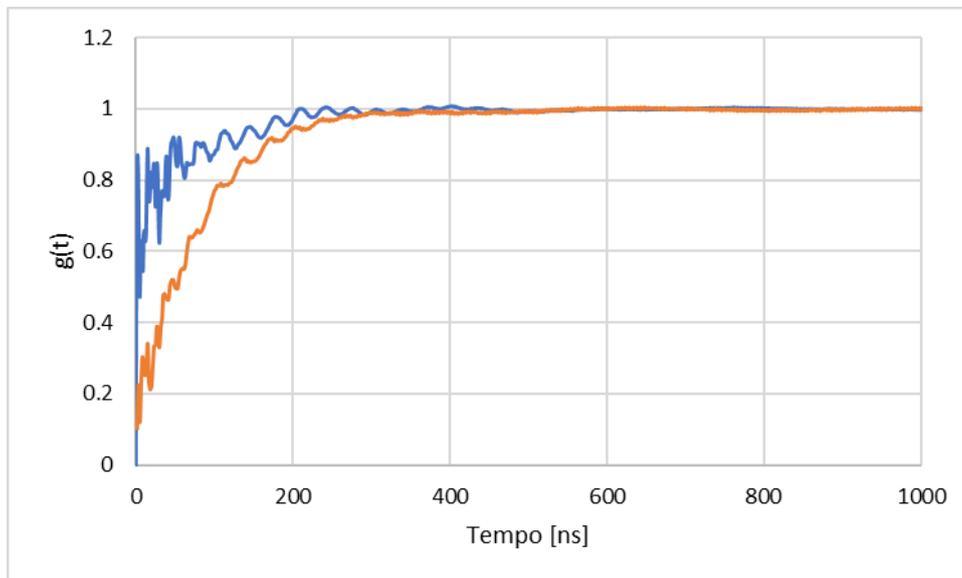


Fig. 25 - confronto $g(t)$: pre-modifica (arancio) modificato(blu)

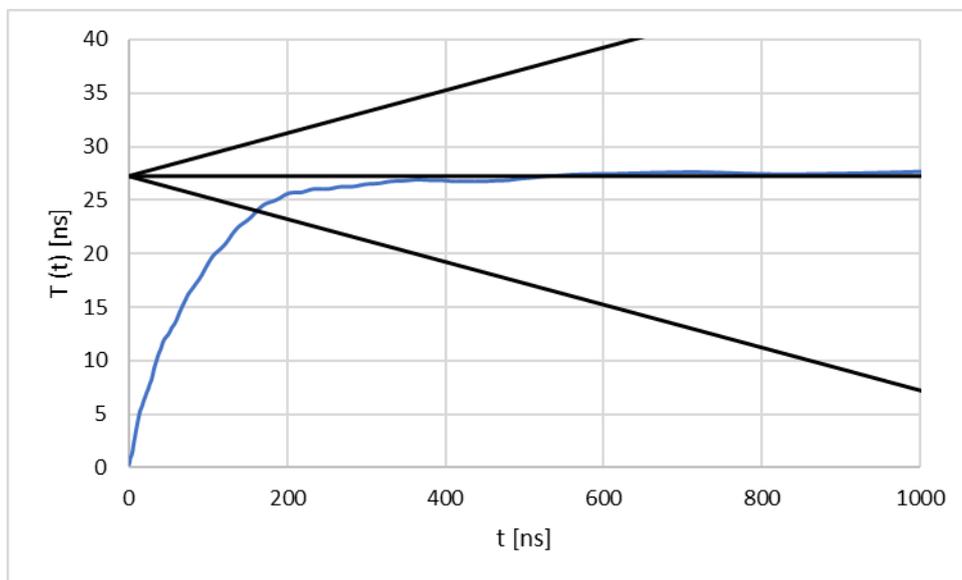


Fig. 26 - $T(t)$ divisore modificato

In Tabella 5 vengono riportati i parametri ottenuti con la risposta al gradino di questo dispositivo confrontato con i parametri raccomandati dalla norma per poter utilizzare un divisore in un sistema di misura di riferimento per l'impulso di origine atmosferica.

Si può vedere che due parametri su tre vengono soddisfatti: t_s e T_α , mentre T_N rimane ancora superiore al valore raccomandato.

Tabella 5 - Parametri della risposta al gradino del divisore modificato

Parametro	T_N	t_s	β	T_α
Ottenuto	27.25 ns	161 ns	0.7431 ns	25.71 ns
Raccomandato	≤ 15 ns	≤ 200 ns		≤ 30 ns

È stato scelto di non fare ulteriori modifiche in quanto non dovendo diventare lo strumento di misura di riferimento, ma un circuito di prova sperimentale la risposta al gradino è soddisfacente.

Si passa quindi alla verifica ed eventuale messa a punto del fattore di scala.

4.2 – Misura del fattore di scala

Il fattore di scala F del dispositivo di conversione è definito come il fattore che moltiplicato per l'uscita del dispositivo V_{div} (tensione misurata) fornisce il valore di ingresso che si vuole misurare V_{mis} , tratto dalla IEC 60060 - 2 [2]:

$$V_{mis} = V_{div} \times F$$

4.2.1 – Riferimenti normativi tratti da IEC 60060 - 2

La misura del fattore di scala può essere determinata tramite una taratura.

Si possono impiegare due metodologie differenti:

- Metodo del confronto

Il fattore di scala dell'intero sistema di misura viene determinato attraverso il confronto con un sistema di misura di riferimento. La tensione deve essere dello stesso tipo, frequenza o forma della tensione da misurare. Per il confronto bisogna collegare in parallelo al sistema di misura da tarare un sistema di misura di riferimento riferibile presso un Istituto Metrologico Nazionale, o in parallelo ad un sistema di misura tarato che possieda una incertezza inferiore a quella desiderata per il sistema di misura da tarare.

Si effettua la taratura alimentando i sistemi di misura ed acquisendo i dati simultaneamente da entrambi i sistemi di misura.

Il valore della grandezza di ingresso ottenuto dal sistema di misura di riferimento viene diviso per il valore rilevato dallo strumento da tarare per ottenere il valore F_i del fattore di scala. Questa procedura viene ripetuta n volte per ottenere il valore medio F_g del fattore di scala alla tensione U_g .

Il valore medio del fattore di scala si calcola come:

$$F_g = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_{i,g}$$

La deviazione standard relativa s_g di F_g si ottiene con:

$$s_g = \frac{1}{F_g} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (F_{i,g} - F_g)^2}$$

E l'incertezza relativa di tipo A u_g del valore medio del fattore di scala F_g è calcolato come:

$$u_g = \frac{s_g}{\sqrt{n}}$$

Il procedimento mostrato fino ad ora si esegue per i differenti valori di tensione U_g per cui viene richiesta la linearità del fattore di scala. Il valore del fattore di scala assegnato F si ottiene come valore medio di tutti i fattori di scala F_g valutato per h livelli di tensione:

$$F = \frac{1}{h} \sum_{g=1}^h F_g \quad \text{per } h \geq 5$$

Mentre l'incertezza standard di tipo A u_A del fattore di scala F è pari al valore massimo dei singoli valori u_g :

$$u_A = \max_h u_g$$

L'effetto della non linearità su F viene stimato come un'incertezza di tipo B espressa da:

$$u_{B0} = \frac{1}{\sqrt{3}} \max_h \left| \frac{F_g}{F} - 1 \right|$$

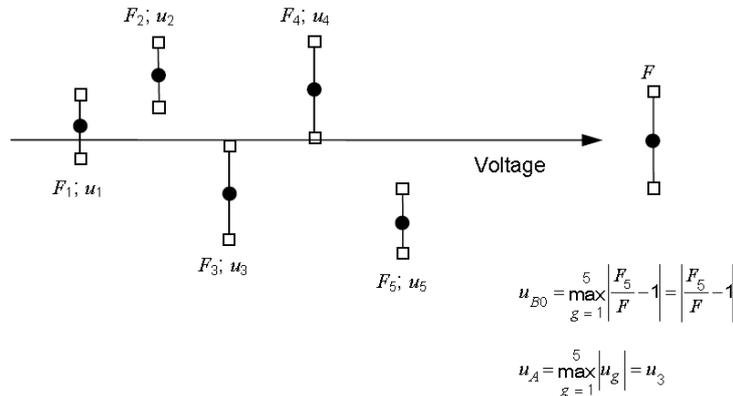


Fig. 27 - Contributo di incertezza della taratura IEC 2596/10

- Determinazione del fattore di scala dal fattore di scala dei suoi componenti

Il fattore di scala di un sistema di misura si può determinare come il prodotto dei fattori di scala del dispositivo di conversione, il sistema di trasmissione, eventuali attenuatori e dello strumento di misura.

Per il dispositivo di conversione e il sistema di conversione si può usare il metodo visto in precedenza. Il fattore di scala dello strumento di misura può essere determinato in accordo con la normativa, per esempio IEC 61083 – 1 e IEC 61083 – 2.

- Comportamento dinamico e determinazione della risposta ampiezza/frequenza

Il comportamento dinamico può essere studiato con differenti metodi, è stata già trattata la risposta al gradino di tensione.

Un ulteriore metodo è quello della determinazione della risposta ampiezza/frequenza. Il sistema è soggetto a una tensione sinusoidale di ampiezza nota, tipicamente in bassa tensione, e ne viene misurata l'uscita.

Questa misura viene ripetuta per un appropriato valore di frequenze e se ne ricava un grafico di ampiezza del fattore di scala in funzione della frequenza.

4.2.2 – Misure

Nel caso preso in esame è stato misurato il fattore di scala del solo dispositivo di conversione. Dovendo usare il dispositivo di conversione per una prova di tensione composita, è stato determinato il fattore di scala con il metodo del confronto. È stato misurato il fattore di scala sia a tensione continua, che in tensione alternata con frequenze da 20 Hz fino a 200 kHz. Per la generazione e il confronto è stato utilizzato un calibratore della FLUKE, il 5502E. Per la misura dell'uscita del divisore è stato utilizzato un multimetro digitale di precisione della HP (ora Keysight Technologies), il 34401A.

I dispositivi sono visibili in Fig. 28:



Fig. 28 - Strumentazione per misura del fattore di scala

- Specifiche calibratore FLUKE 5502E

Il calibratore è uno strumento in grado di erogare una tensione continua ed alternata con una incertezza molto inferiore all'incertezza auspicata per il divisore. Volendo calcolare l'incertezza della forma d'onda generata dal calibratore analizziamo le specifiche fornite dal costruttore. In Tabella 6 si possono vedere le caratteristiche dello strumento nel caso di generazione di tensione continua.

Per un valore di tensione pari a 1000 V, dopo un anno si avrà una incertezza pari a

$$u_{abs} = 1000 V \times 0.000055 + 1500 \mu V = 0.0550 V + 0.0015 V = 0.0565 V$$

Espresso in valore relativo:

$$s_{\%} = \frac{0.0565}{1000} \times 100 = 5.65 \cdot 10^{-3}\% = 56.5 \text{ ppm}$$

Considerando che il divisore deve avere una incertezza $U_M \leq 1\%$, il calibratore può essere utilizzato come sistema di riferimento per le tensioni continue.

Tabella 6 - Specifiche del calibratore FLUKE 5502E - Tensione continua

DC Voltage

Range	Absolute Uncertainty, $\text{tc} \pm 5$ $^{\circ}\text{C} \pm \{\% \text{ of output} + \mu\text{V}\}$		Stability	Resolution (μV)	Max Burden ^[1]
	90 Day	1 Year	24 hours, ± 1 $^{\circ}\text{C}$ $\pm \{\text{ppm of output} + \mu\text{V}\}$		
0 to 329.9999 mV	0.005 + 3	0.006 + 3	5 + 1	0.1	65 Ω
0 to 3.299999 V	0.004 + 5	0.005 + 5	4 + 3	1	10 mA
0 to 32.99999 V	0.004 + 50	0.005 + 50	4 + 30	10	10 mA
30 to 329.9999 V	0.0045 + 500	0.0055 + 500	4.5 + 300	100	5 mA
100 to 1020.000 V	0.0045 + 1500	0.0055 + 1500	4.5 + 900	1000	5 mA
TC Simulate and Measure in Linear 10 $\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ and 1 $\text{mV}/^{\circ}\text{C}$ modes ^[2]					
0 to 329.9999 mV	0.005 + 3	0.006 + 3	5 + 1	0.1	10 Ω

[1] Remote sensing is not provided. Output resistance is $< 5 \text{ m}\Omega$ for outputs $\geq 0.33 \text{ V}$. The AUX output has an output resistance of $< 1 \Omega$. TC simulation has an output impedance of $10 \Omega \pm 1 \Omega$.

[2] TC simulating and measuring are not specified for operation in electromagnetic fields above 0.4 V/m.

Il calibratore può essere utilizzato anche per tensioni alternate. Analizzando le caratteristiche specifiche per la generazione di tensione alternata, riportate in Tabella 7, possiamo calcolare, come nel caso della tensione continua, l'incertezza della forma d'onda generata dal calibratore. Ipotizziamo anche in questo caso una tensione sinusoidale con valore efficace pari a 1000 V. Il calibratore può erogare tale tensione per frequenze che vanno da 45 Hz fino a 10 kHz, considerando la condizione con incertezza più alta, quindi 10 kHz:

$$u_{abs} = 1000 V \times 0.0009 + 20000 \mu V = 0.90 V + 0.02 V = 0.92 V$$

Esprimendolo in valore relativo:

$$s_{\%} = \frac{0.92}{1000} \times 100 = 0.092\% = 920 \text{ ppm}$$

L'incertezza relativa, nel caso della tensione sinusoidale, risulta più alta di quella della generazione di tensione continua, ma comunque di un ordine di grandezza inferiore all'1% richiesto dalla normativa per il sistema di misura.

Anche per la tensione alternata possiamo dunque utilizzare il calibratore preso in esame come generatore e riferimento per la taratura del divisore.

Tabella 7 - Specifiche del calibratore FLUKE 5502E - Tensione alternata

AC Voltage (Sine Wave)

Range	Frequency	Absolute Uncertainty, tcal ±5 °C ±(% of output + μV)		Resolution	Max Burden	Max Distortion and Noise 10 Hz to 5 MHz Bandwidth ±(% of output + floor)
		90 Day	1 Year			
1.0 to 32.999 mV	10 Hz to 45 Hz	0.120 + 20	0.150 + 20	1 μV	65 Ω	0.15 + 90 μV
	45 Hz to 10 kHz	0.080 + 20	0.100 + 20			0.035 + 90 μV
	10 kHz to 20 kHz	0.120 + 20	0.150 + 20			0.06 + 90 μV
	20 kHz to 50 kHz	0.160 + 20	0.200 + 20			0.15 + 90 μV
	50 kHz to 100 kHz	0.300 + 33	0.350 + 33			0.25 + 90 μV
	100 kHz to 500 kHz	0.750 + 60	1.000 + 60			0.3 + 90 μV ^[1]
33 mV to 329.999 mV	10 Hz to 45 Hz	0.042 + 20	0.050 + 20	1 μV	65 Ω	0.15 + 90 μV
	45 Hz to 10 kHz	0.029 + 20	0.030 + 20			0.035 + 90 μV
	10 kHz to 20 kHz	0.066 + 20	0.070 + 20			0.06 + 90 μV
	20 kHz to 50 kHz	0.086 + 40	0.100 + 40			0.15 + 90 μV
	50 kHz to 100 kHz	0.173 + 170	0.230 + 170			0.2 + 90 μV
	100 kHz to 500 kHz	0.400 + 330	0.500 + 330			0.2 + 90 μV ^[1]
0.33 V to 3.29999 V	10 Hz to 45 Hz	0.042 + 60	0.050 + 60	10 μV	10 mA	0.15 + 200 μV
	45 Hz to 10 kHz	0.028 + 60	0.030 + 60			0.035 + 200 μV
	10 kHz to 20 kHz	0.059 + 60	0.070 + 60			0.06 + 200 μV
	20 kHz to 50 kHz	0.083 + 60	0.100 + 60			0.15 + 200 μV
	50 kHz to 100 kHz	0.181 + 200	0.230 + 200			0.2 + 200 μV
	100 kHz to 500 kHz	0.417 + 900	0.500 + 900			0.2 + 200 μV ^[1]
3.3 V to 32.9999 V	10 Hz to 45 Hz	0.042 + 800	0.050 + 800	100 μV	10 mA	0.15 + 2 mV
	45 Hz to 10 kHz	0.025 + 600	0.030 + 600			0.035 + 2 mV
	10 kHz to 20 kHz	0.064 + 600	0.070 + 600			0.08 + 2 mV
	20 kHz to 50 kHz	0.086 + 600	0.100 + 600			0.2 + 2 mV
	50 kHz to 100 kHz	0.192 + 2000	0.230 + 2000			0.5 + 2 mV
	45 Hz to 1 kHz	0.039 + 3000	0.050 + 3000			
33 V to 329.999 V	1 kHz to 10 kHz	0.064 + 9000	0.080 + 9000	1 mV	5 mA, except 20 mA for 45 Hz to 65 Hz	0.15 + 10 mV
	10 kHz to 20 kHz	0.079 + 9000	0.090 + 9000			0.05 + 10 mV
	20 kHz to 50 kHz	0.096 + 9000	0.120 + 9000			0.6 + 10 mV
	50 kHz to 100 kHz	0.192 + 80000	0.240 + 80000			0.8 + 10 mV
						1 + 10 mV
330 V to 1020 V	45 Hz to 1 kHz	0.042 + 20000	0.050 + 20000	10 mV	2 mA, except 20 mA for 45 to 65 Hz	0.15 + 30 mV
	1 kHz to 5 kHz	0.064 + 20000	0.080 + 20000			0.07 + 30 mV
	5 kHz to 10 kHz	0.075 + 20000	0.090 + 20000			0.07 + 30 mV

[1] Max Distortion for 100 kHz to 200 kHz. For 200 kHz to 500 kHz, the maximum distortion is 0.9 % of output + floor as shown.

Note
Remote sensing is not provided. Output resistance is <5 mΩ for outputs ≥0.33 V. The maximum load capacitance is 500 pF, subject to the maximum burden current limits.

- Specifiche multimetro digitale HP 34401A

Il multimetro ha una risoluzione a sei cifre e mezza. Significa che, per esempio, può misurare 9.99999 Vdc su un fondo scala di 10 V. Questo vuol dire avere la risoluzione a sei cifre, ma questo multimetro con una scala di 10 V può misurare fino ad un massimo di 12.00000 Vdc. Questo è il significato di avere una risoluzione a sei cifre e mezza con una capacità di misurare oltre il fondo scala del 20%.

Calcoliamo l'incertezza di misura del multimetro in differenti condizioni di utilizzo.

In Tabella 8 si possono osservare le specifiche per la misurazione di tensioni continue.

Volendo misurare l'uscita del divisore, con una tensione di alimentazione di 1000 V ed un fattore ipotetico di scala pari a 200 otteniamo un valore di uscita della tensione pari a:

$$V_{\text{div}} = \frac{V_{\text{mis}}}{200} = \frac{1000}{200} = 5 \text{ V}$$

Con una tensione di 5 V il multimetro userà un fondo scala di 10 V e considerando l'accuratezza ad 1 anno si calcola l'incertezza assoluta:

$$u_{\text{abs}} = V_{\text{div}} \times 0.000035 + V_{\text{max}} \times 0.000005 = 225 \text{ } \mu\text{V}$$

L'incertezza relativa percentuale sarà:

$$s_{\%} = \frac{u_{\text{abs}}}{V_{\text{div}}} \times 100 = 4.5 \cdot 10^{-3}\% = 45 \text{ ppm}$$

L'incertezza di misura della tensione continua in uscita dal divisore è inferiore all'incertezza della forma d'onda generata dal calibratore.

Tabella 8 - Specifiche del multimetro HP34401A - Misura tensioni continue

■ DC Characteristics

Accuracy Specifications ± (% of reading + % of range) [1]

Function	Range [3]	Test Current or Burden Voltage	24 Hour [2] 23°C ± 1°C	90 Day 23°C ± 5°C	1 Year 23°C ± 5°C	Temperature Coefficient /°C 0°C – 18°C 28°C – 55°C
DC Voltage	100.0000 mV		0.0030 + 0.0030	0.0040 + 0.0035	0.0050 + 0.0035	0.0005 + 0.0005
	1.000000 V		0.0020 + 0.0006	0.0030 + 0.0007	0.0040 + 0.0007	0.0005 + 0.0001
	10.00000 V		0.0015 + 0.0004	0.0020 + 0.0005	0.0035 + 0.0005	0.0005 + 0.0001
	100.0000 V		0.0020 + 0.0006	0.0035 + 0.0006	0.0045 + 0.0006	0.0005 + 0.0001
	1000.000 V		0.0020 + 0.0006	0.0035 + 0.0010	0.0045 + 0.0010	0.0005 + 0.0001

In Tabella 9 sono riportate le caratteristiche del multimetro per la misura di tensioni alternate. Anche in questo caso ci riferiamo alla tensione massima ipotizzata pari a 1000 V e alla frequenza di 10 kHz in uscita dal calibratore, che corrispondono a 5 V in uscita dal divisore. L'incertezza assoluta risulta quindi essere:

$$u_{\text{abs}} = 5 \text{ V} \times 0.0005 + 10 \text{ V} \times 0.0003 = 0.0055 \text{ V}$$

In valore relativo:

$$s_{\%} = \frac{0.0055}{5} \times 100 = 0.11\% = 1.1\text{‰}$$

L'incertezza della misura è data dalla somma quadratica delle incertezze dei due strumenti:

- Per le misure in tensione continua si avrà

$$s_{\text{DC}} = \sqrt{s_{\text{cal,DC}}^2 + s_{\text{Mult,DC}}^2} = 72.23 \text{ ppm}$$

- Per le misure in tensione alternata si avrà

$$s_{\text{AC}} = \sqrt{s_{\text{cal,AC}}^2 + s_{\text{Mult,AC}}^2} = 1.43\text{‰}$$

L'incertezza calcolata, ai fini dell'esperimento di laboratorio, è accettabile e lascia del margine per le altre fonti di incertezza, come quelle del calcolo del fattore di scala, dello strumento di misura e del software.

Tabella 9 - Specifiche multimetro HP34401A - misura tensione alternata

■ AC Characteristics

Accuracy Specifications \pm (% of reading + % of range) [1]

Function	Range [3]	Frequency	24 Hour [2] 23°C \pm 1°C	90 Day 23°C \pm 5°C	1 Year 23°C \pm 5°C	Temperature Coefficient/°C 0°C – 18°C 28°C – 55°C
True RMS AC Voltage [4]	100.0000 mV	3 Hz – 5 Hz	1.00 + 0.03	1.00 + 0.04	1.00 + 0.04	0.100 + 0.004
		5 Hz – 10 Hz	0.35 + 0.03	0.35 + 0.04	0.35 + 0.04	0.035 + 0.004
		10 Hz – 20 kHz	0.04 + 0.03	0.05 + 0.04	0.06 + 0.04	0.005 + 0.004
		20 kHz – 50 kHz	0.10 + 0.05	0.11 + 0.05	0.12 + 0.05	0.011 + 0.005
		50 kHz – 100 kHz	0.55 + 0.08	0.60 + 0.08	0.60 + 0.08	0.060 + 0.008
		100 kHz – 300 kHz [6]	4.00 + 0.50	4.00 + 0.50	4.00 + 0.50	0.20 + 0.02
	1.000000 V to 750.000 V	3 Hz – 5 Hz	1.00 + 0.02	1.00 + 0.03	1.00 + 0.03	0.100 + 0.003
		5 Hz – 10 Hz	0.35 + 0.02	0.35 + 0.03	0.35 + 0.03	0.035 + 0.003
		10 Hz – 20 kHz	0.04 + 0.02	0.05 + 0.03	0.06 + 0.03	0.005 + 0.003
		20 kHz – 50 kHz	0.10 + 0.04	0.11 + 0.05	0.12 + 0.05	0.011 + 0.005
	50 kHz – 100 kHz [5]	0.55 + 0.08	0.60 + 0.08	0.60 + 0.08	0.060 + 0.008	
	100 kHz – 300 kHz [6]	4.00 + 0.50	4.00 + 0.50	4.00 + 0.50	0.20 + 0.02	

- Metodo di taratura

In Fig. 29 si può osservare lo schema di collegamento utilizzato per la taratura del fattore di scala. Il calibratore alimenta gli estremi del divisore, e il multimetro misura la tensione del ramo di bassa tensione.

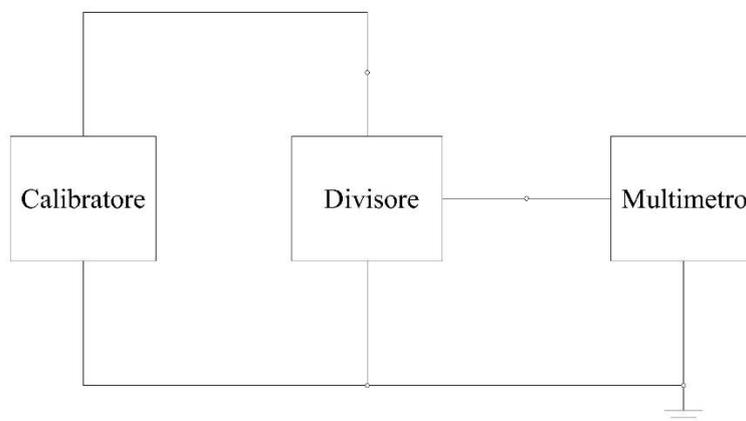


Fig. 29 – Schema di collegamento per la misura del fattore di scala

Per la prima analisi del fattore di scala, il calibratore è stato impostato in maniera che erogasse 1000 V, a frequenze differenti: corrente continua, 50 Hz, 200 Hz, 1 kHz e 5 kHz. La misurazione ha avuto una durata di cinque minuti per ogni frequenza. I dati raccolti sono visibili nell'Allegato B: in Tabella 16 si possono vedere i dati misurati con il multimetro digitale.

In Tabella 17 sono visibili i fattori di scala F_i calcolati con i dati raccolti.

Tabella 10 - Fattori di scala F_g divisore

F_g				
DC	50 Hz	250 Hz	1kHz	5kHz
193.21	191.51	188.12	187.88	187.82

In Tabella 10 sono riportati i valori calcolati per il fattore di scala in funzione della frequenza. Per una migliore leggibilità si riporta l'andamento ampiezza/frequenza in Fig. 30, si può osservare come il fattore di scala sia circa 193 per la tensione continua, mentre salendo di frequenza si ha un valore di circa 188. Analizziamo quanto differiscano i valori rispetto al valore medio di F .

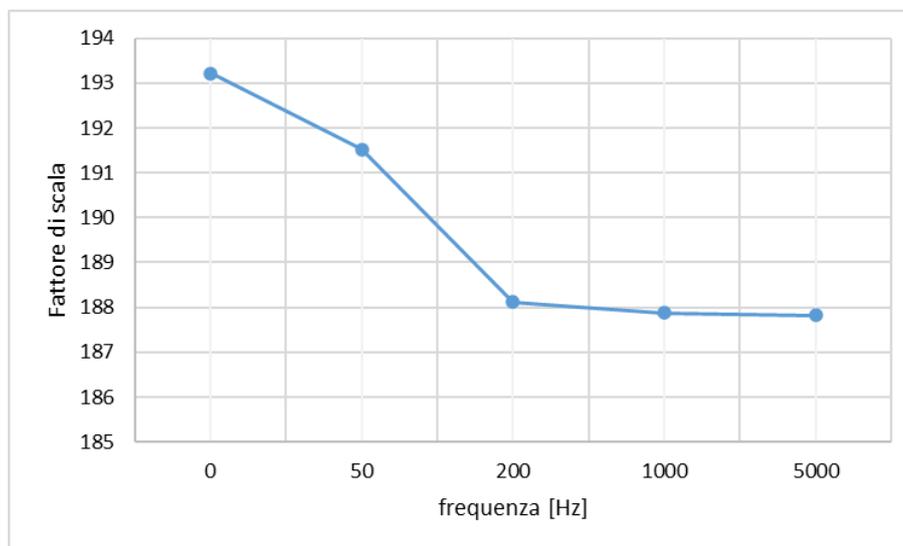


Fig. 30 - Risposta ampiezza/frequenza divisore

Il fattore di divisione F ottenuto è pari a 189.7. Lo scostamento del fattore di scala nel caso di tensione continua è superiore all'1% poiché:

$$\text{scostamento \%} = \frac{193.2 - 189.7}{189.7} \times 100 = 1.85\%$$

L'utilizzo nelle prove di tensione composita richiede un'ampia gamma di frequenze e si richiede che lo scostamento del fattore di scala sia inferiore all'1%.

In questo caso è stato necessario effettuare modifiche al divisore, con lo scopo di avere un andamento migliore della risposta in frequenza.

Dato che lo scostamento più grande sembra essere in tensione continua, è stato modificato il ramo resistivo del lato di bassa tensione del divisore.

La resistenza, misurata con il multimetro digitale, prima della modifica era $R_{BT} = 31.317 \text{ k}\Omega$, mentre la resistenza di alta tensione è di $6 \text{ M}\Omega$.

Il fattore di scala desiderato considerando il comportamento in alta frequenza è $F = 188$.

Se il fattore di scala per la tensione continua si calcola come:

$$F = \frac{R_{AT} + R_{BT2}}{R_{BT2}}$$

Allora la resistenza R_{BT} desiderata si calcola attraverso:

$$R_{BT2} = \frac{R_{AT}}{F - 1} = 32.12 \text{ k}\Omega$$

Il risultato è che bisogna aumentare la resistenza di:

$$\Delta R = R_{BT2} - R_{BT} \cong 800 \Omega$$

Dopo aver eseguito la modifica è stato verificato che la risposta al gradino non risultasse modificata sensibilmente. Successivamente è stata eseguita una nuova taratura per il fattore di scala.

Come nel caso precedente in Allegato B viene riportata la Tabella 18 che riporta le misure effettuate per calcolare il fattore di scala in funzione della frequenza. I fattori di scala calcolati per ogni misura vengono riportati in Tabella 19. La taratura viene effettuata nelle stesse condizioni utilizzate prima della modifica:

- 1000 V in tensione continua, valore efficace per la tensione alternata
- DC, 50 Hz, 200 Hz, 1 kHz, 5 kHz

Tabella 11 - Fattore di scala F_g divisore modificato

F_g				
DC	50 Hz	250 Hz	1kHz	5kHz
186.5846	188.7172	186.8721	187.0883	187.1225

In questo caso è possibile notare che i fattori di scala misurati alle varie frequenze variano tra 186.5 e 188.9.

Riportando l'andamento ampiezza/frequenza in Fig. 31: è possibile vedere che il valore che si discosta maggiormente dagli altri è relativo alla misura a 50 Hz. Si procede alla verifica di variazione inferiore all'1% di F_g rispetto al valore medio del fattore di scala F .

F è pari a 187.45.

$$\text{scostamento \%} = \frac{188.72 - 187.45}{187.45} \times 100 = 0.68\%$$

In questo caso si ha uno scostamento inferiore all'1%. Si ritiene quindi accettabile il risultato ottenuto.

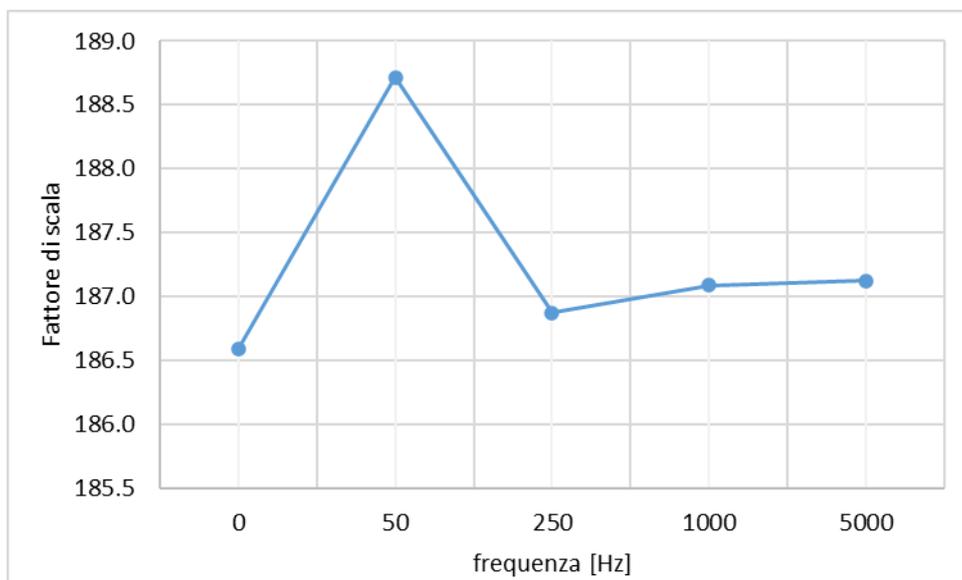


Fig. 31 - Fattore di scala ampiezza/frequenza divisore modificato

Per completare la taratura si effettua la misura del fattore di scala per differenti valori di tensione, per ognuna di queste tensioni si procede alla misura per una gamma di frequenze più ampia rispetto a quelle effettuate fino ad ora.

All'interno dell'Allegato B in Tabella 20 sono riportate tutte le misure effettuate. Le tensioni variano da 1 V fino a 1000 V, con uno spettro di frequenze che varia da 10 Hz fino a 200 kHz. In Tabella 21, nello stesso allegato, vengono riportati i fattori di scala calcolati per ogni misura effettuata.

Tabella 12 - Fattore di scala in funzione della tensione

[V]	F_g	S_g	U_g
1	187.998	0.009275	0.002319
2	187.857	0.009076	0.002269
3	187.864	0.009300	0.002325
5	187.953	0.009467	0.002444
10	187.942	0.009539	0.002463
20	187.888	0.009521	0.002458
30	187.977	0.009426	0.002434
50	187.336	0.003230	0.0008957
100	187.318	0.003210	0.0008903
200	187.314	0.003196	0.0009227
300	187.391	0.003183	0.0008828
500	187.449	0.003494	0.001105
1000	187.468	0.003627	0.001209

In Tabella 12 si riportano i fattori di scala, con le relative incertezze, calcolati secondo la norma IEC 60060 – 2 [2]. Il fattore di scala del divisore calcolato effettuando la media dei fattori di scala ottenuti per la singola tensione, è pari a:

$$F = 187.67$$

Per una migliore leggibilità si riporta il grafico dell'andamento del fattore di scala in funzione della tensione in Fig. 32.

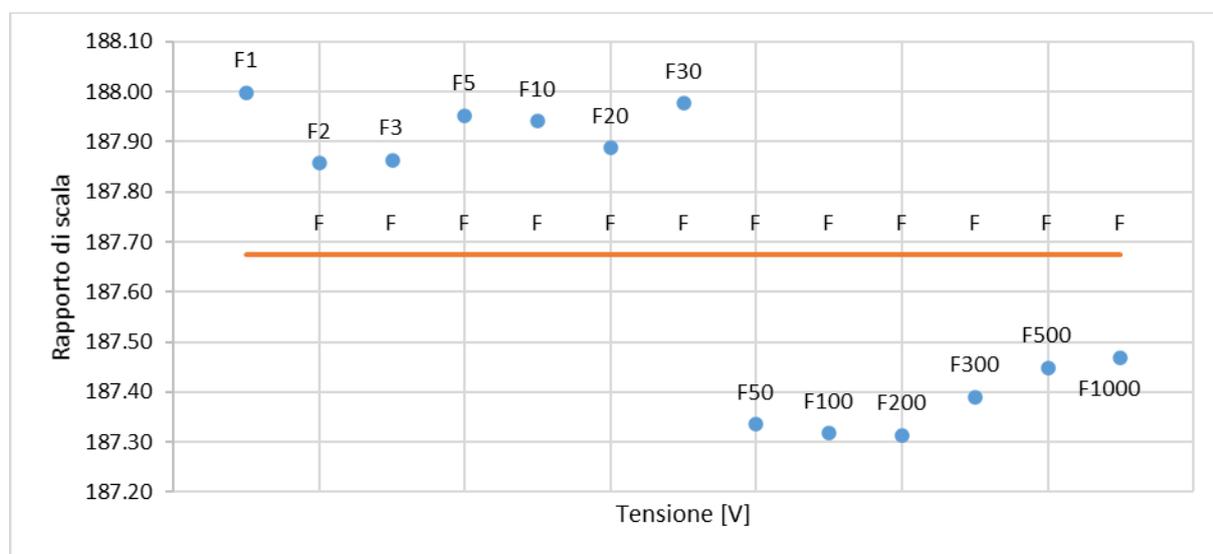


Fig. 32 - Andamento del fattore di scala in funzione della tensione

Si può osservare che per le tensioni inferiori a 50 V il fattore di scala è superiore al fattore di scala complessivo, mentre per le tensioni a partire da 50 V il fattore di scala è inferiore al valore medio. Questa differenza è dovuta dalla possibilità da parte del calibratore di generare tensioni sinusoidali con frequenza minore a 50 Hz. Infatti, osservando la Tabella 21 si può vedere come per basse frequenze il divisore abbia un comportamento differente e questo contribuisce ad alzare il valore medio del fattore di scala.

Nonostante questa variazione si ritiene il fattore di scala pressoché costante al variare della tensione e della frequenza, poiché tutte le variazioni rientrano nel limite di 1% ritenuto accettabile per questa sperimentazione.

4.3 – Divisore definitivo

Si riporta la versione finale del ramo di bassa tensione del divisore a seguito delle modifiche effettuate e descritte in precedenza.

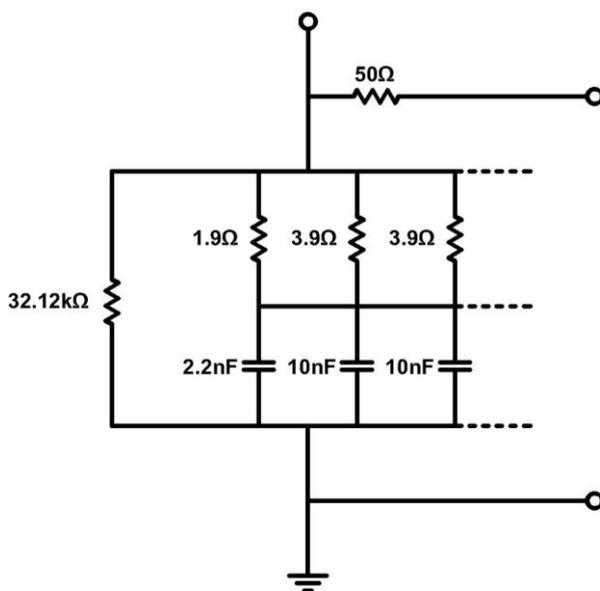


Fig. 33 – Schema circuitale lato di bassa tensione del divisore

Lo schema circuitale del ramo di bassa tensione definitivo viene rappresentato in Fig. 33.

Realizzato con:

- Resistenza R_{BT} pari a:

$$R_{BT} = 32.12 \text{ k}\Omega$$

- 15 condensatori da 10 nF ed un condensatore da 2.2 nF, tutti in parallelo tra loro per formare la C_{BT} :

$$C_{BT} = 15 \times 10 \text{ nF} + 1 \times 2.2 \text{ nF} = 152.2 \text{ nF}$$

- 8 resistenze da 3.9 Ω e una resistenza da 1.9 Ω , tutte in parallelo tra loro per formare la R_{CBT} :

$$\frac{1}{R_{CBT}} = \frac{8}{3.9} + \frac{1}{1.9} \Rightarrow R_{CBT} = 0.388 \Omega$$

- 1 resistenza di interfaccia con il dispositivo di misura con valore:

$$R = 50 \Omega$$



Fig. 34 - Ramo di bassa tensione del partitore di tensione

In Fig. 34 è visibile la realizzazione del dispositivo, gli elementi in blu sono i condensatori in polipropilene, gli elementi in nero sono i resistori messi in serie per formare R_{BT} , mentre gli elementi in azzurro con righe trasversali sono i resistori messi in serie alle capacità. Alle estremità del circuito ci sono due dischi forati di metallo che creano il cortocircuito necessario per mettere tutti i dispositivi in parallelo.

5 – Circuito di prova

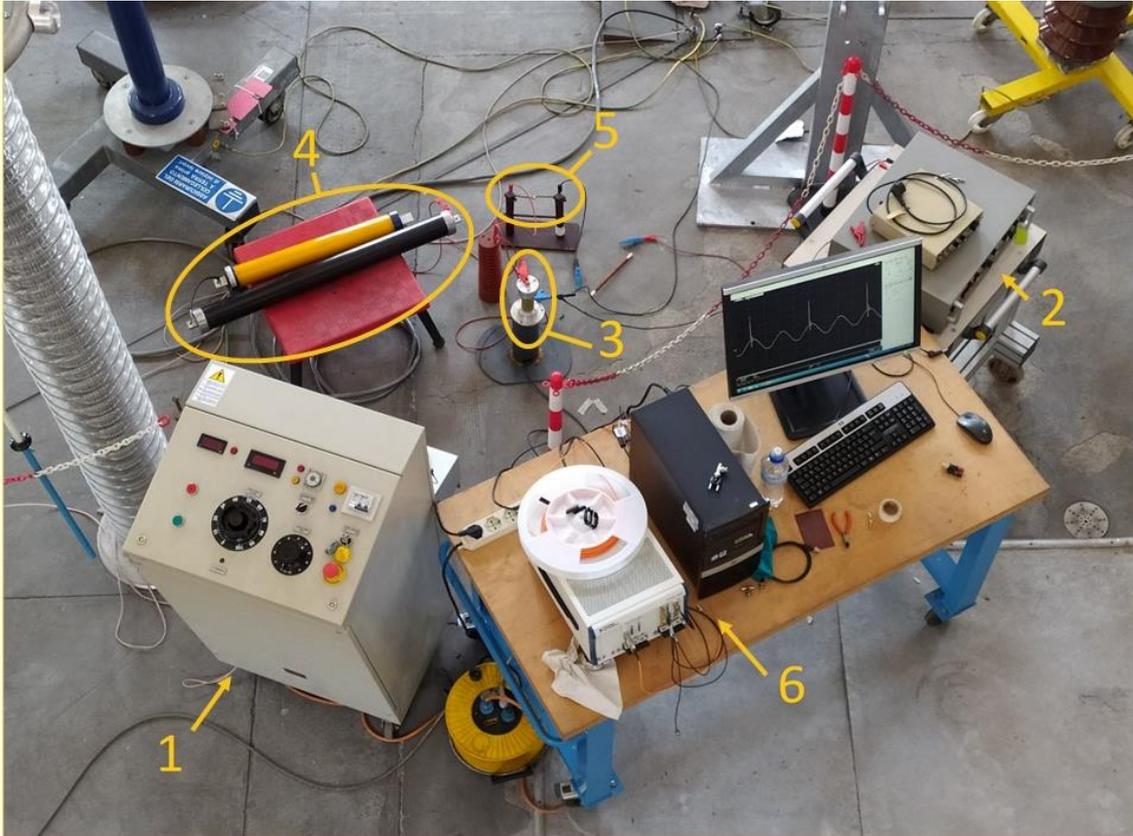


Fig. 35 - Circuito di prova: 1. generatore HVAC; 2. Generatore LI; 3. Divisore; 4. Filtro resistivo; 5. Spinterometro a sfere; 6. Computer e dispositivo di acquisizione dati

Dopo la realizzazione e la taratura del dispositivo di conversione è stato composto il circuito di prova.

Per la ricerca legata a questo lavoro di tesi erano a disposizione, raffigurati in Fig. 35

- Il generatore di tensione sinusoidale della AME, con il numero 1
- Il generatore di tensione impulsiva HAEFELY 481, con il numero 2
- Il divisore, oggetto del capitolo precedente, con il numero 3
- Il dispositivo di misura della National Instruments, con il numero 6.

5.1 – Sicurezza dell'area di prova

Quando si progetta un circuito di prova si pensa in primo luogo alla sicurezza delle persone e successivamente alla sicurezza della strumentazione impiegata.

La norma CEI EN 50191:2011 [3] fornisce le indicazioni relative all'installazione, esercizio e messa in sicurezza degli impianti di prova, siano essi fissi o temporanei.

L'impianto di prova realizzato per questo lavoro di tesi è di tipo temporaneo, e la tensione di esercizio è inferiore a 1000 V.

L'impianto di prova temporaneo è stato installato nel laboratorio di Alta Tensione del LATFC, alla struttura del laboratorio hanno accesso solo persone autorizzate, quali dipendenti del laboratorio stesso, committenti e tesisti. Questo semplifica le operazioni di messa in sicurezza dell'impianto, poiché persone non addette non hanno modo di avvicinarsi all'area di prova.

La normativa stabilisce che per prevenire lo shock elettrico bisogna identificare la zona inibita, che nel nostro caso con tensione inferiore a 1000 V corrisponde alla superficie delle parti attive.

La sicurezza delle persone viene quindi garantita impedendo l'accesso all'area di prova. Essa viene garantita da una distanza fisica dall'oggetto in prova e da un ostacolo costituito da una catena in plastica da dover rimuovere, in maniera da ricordare all'operatore di effettuare le operazioni di messa in sicurezza prima di accedere all'area di prova.

Le operazioni di messa in sicurezza da effettuare prima di poter accedere all'area di prova sono:

- Verificare che i due generatori non stiano erogando tensione
- Scaricare eventuali tensioni residue verso terra attraverso l'utilizzo di un fioretto.

5.2 – Realizzazione circuito di prova

Stabilita la procedura di messa in sicurezza si procede alla protezione della strumentazione impiegata.

Di seguito viene elencata la strumentazione da proteggere:

- Generatore di tensione sinusoidale
- Generatore di tensione impulsiva
- Scheda di acquisizione dati
- Divisore

Ogni generatore di tensione deve essere protetto dalla tensione generata dall'altro. Come descritto nel capitolo riguardante la normativa, essi vengono protetti attraverso degli elementi di blocco e accoppiamento.

Per quanto riguarda il divisore bisogna assicurarsi che sia in grado di sopportare la tensione della prova. Da informazioni fornite dal costruttore, esso è in grado di sopportare tensioni impulsive fino a 12 kV, risultando così abbondantemente protetto per questa applicazione.

Infine, per proteggere la scheda di acquisizione dati bisogna assicurarsi che la tensione in uscita dal divisore sia nel range di misura della scheda. Nel caso in esame la scheda può misurare fino a 10 V ed è in grado di resistere a tensioni superiori; dal divisore escono meno di 4 V, quindi non risulta necessario aggiungere un ulteriore stadio di divisione della tensione.

5.2.1 – Generatori di tensione

Per proteggere i generatori di tensione è necessario conoscere le loro caratteristiche.

Iniziamo ad analizzare il generatore di tensione sinusoidale. È un generatore della Accessori Macchine Elettriche (AME) in grado di erogare tensione sinusoidale variabile per tensioni di valore efficace fino a 15 kV. In questo dispositivo è possibile regolare la tensione erogata attraverso due variac. Il primario che regola la tensione in maniera grossolana, ma consente di arrivare ad alte tensioni, ed il secondo di regolazione secondaria, che consente una regolazione fine della tensione in uscita. La tensione regolata dai due variac è la tensione di alimentazione di un trasformatore. Questa configurazione consente di passare da una tensione di rete a 220 V efficaci ad una tensione regolabile da 0 V fino a 15 kV e di avere isolamento galvanico tra il circuito di prova e l'alimentazione. La potenza massima erogabile è 1 kVA.

Nel nostro caso specifico l'elemento da proteggere sarà l'avvolgimento del trasformatore interno al generatore, quindi bisogna evitare che la tensione impulsiva superi la tensione di isolamento dell'avvolgimento.

Il generatore di tensione impulsiva HAEFELY 481 possiede uno schema circuitale riportato in Fig. 36:

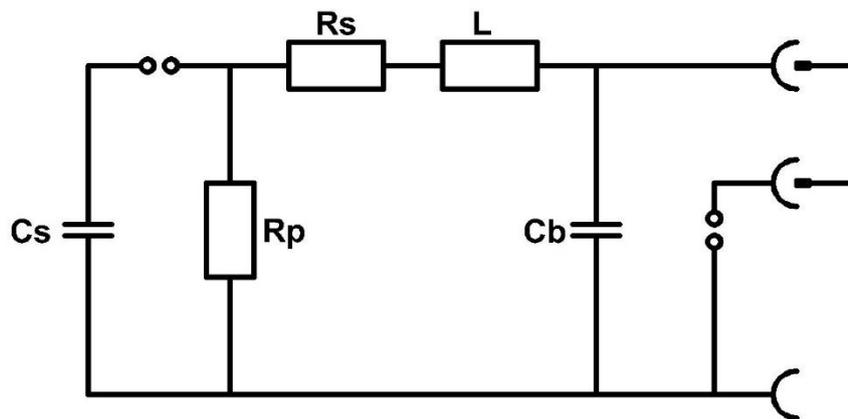


Fig. 36 - Schema circuitale del generatore ad impulsi

Ogni parametro può essere regolato per variare la forma d'onda arbitrariamente in funzione del circuito a cui viene collegato il generatore. Se non fossero sufficienti gli elementi interni al generatore, sarebbe possibile collegare degli elementi scelti dall'operatore a dei morsetti esterni.

In Fig. 37 è visibile una tensione impulsiva conforme alla norma, generato dal dispositivo in esame e misurato attraverso il divisore con il software di misura del laboratorio.

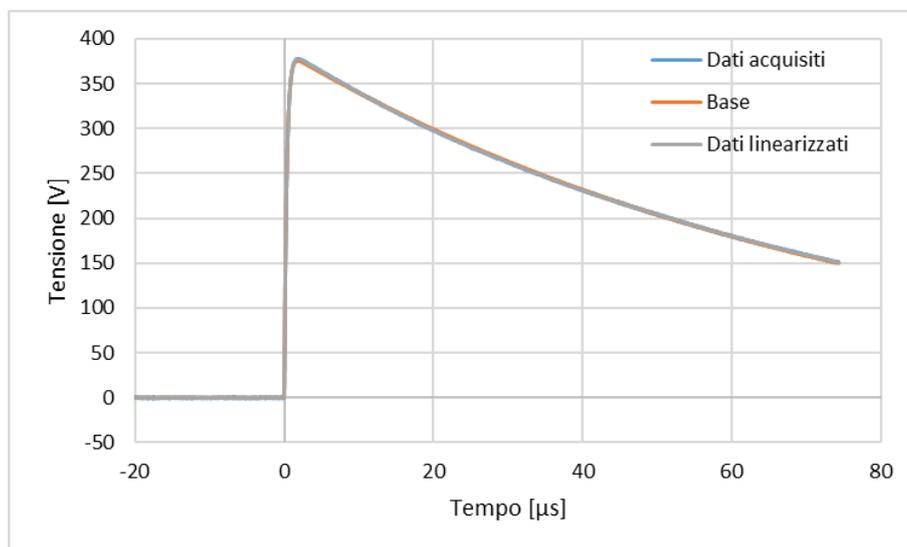


Fig. 37 - Tensione atmosferica impulsiva generata

Se l'uscita del generatore viene collegata direttamente ad una tensione sinusoidale, il generatore annulla la semionda negativa ed aumenta la semionda positiva. Questo perché deve essere presente un filtro all'uscita del generatore che impedisce a una tensione negativa di entrare all'interno del circuito.

Quindi per evitare problemi di misura è necessario separare il generatore di tensione impulsiva dal circuito di prova in maniera da collegarlo nell'istante in cui viene erogata tensione e separarlo nuovamente quando la tensione diminuisce. L'elemento più semplice ed efficace che si può utilizzare è lo spinterometro a sfere.

5.2.2 – Elementi di blocco e accoppiamento

Gli elementi di blocco e accoppiamento sono stati dimensionati in fase di simulazione.

Per quanto riguarda l'elemento di blocco e accoppiamento necessario a salvaguardare il generatore di tensione sinusoidale era stato scelto un filtro resistivo del valore di 250 k Ω .

A disposizione del laboratorio erano presenti 2 resistori di alta potenza visibili in Fig. 38:



Fig. 38 - Resistori disponibili in laboratorio

Il resistore di colore nero ha una resistenza pari a 20 k Ω , mentre quello di colore giallo ha una resistenza di 900 Ω .

Non era possibile realizzare con la strumentazione disponibile il filtro da 250 k Ω , dunque sono state esaminate le varie configurazioni possibili. Con la resistenza di valore 900 Ω il filtro non introduceva abbastanza caduta di tensione, mentre con la resistenza da 20 k Ω la caduta di tensione impulsiva ai suoi capi è risultata sufficiente a proteggere il generatore di tensione. Questo è dovuto al fatto che la resistenza interna al generatore ipotizzata in fase di simulazione era maggiore rispetto alla realtà.

Il dispositivo di blocco e accoppiamento ipotizzato per il generatore di tensione impulsiva durante la simulazione era uno spinterometro a sfere.

All'interno del laboratorio erano disponibili spinterometri a sfere con diametro delle sfere e materiali differenti. Data la bassissima tensione, è stato scelto lo spinterometro a sfere con il diametro delle stesse più piccolo possibile, le sfere sono costituite di ottone. Tale dispositivo richiedeva della manutenzione: uno dei supporti risultava danneggiato e le sfere ossidate.

In Fig. 39 si può vedere il risultato finale della manutenzione.

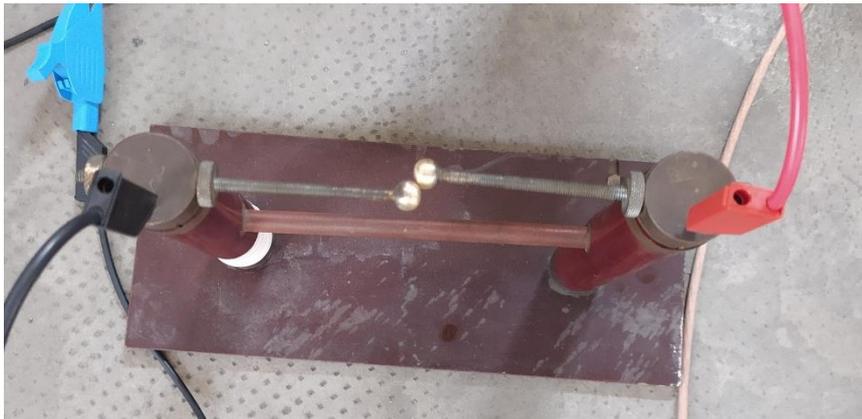


Fig. 39 - Spinterometro a sfere

È stato necessario affacciare le due sfere diagonalmente, poiché longitudinalmente le due sfere presentavano abrasioni causate dall'erosione dell'arco elettrico. Queste abrasioni unite alla bassissima tensione impiegata impedivano l'innesco dell'arco perché aumentavano la distanza tra le sfere.

Per distanziare le sfere è stato usato uno spessimetro dal valore nominale di 0.05 mm.

Con questa distanza l'arco innescava, ma si estingueva prematuramente, compromettendo la prova. Per risolvere il problema è stata introdotta una induttanza aggiuntiva, sia all'interno del generatore di tensione impulsiva, sia una induttanza avvolta in aria, mostrata in Fig. 40.

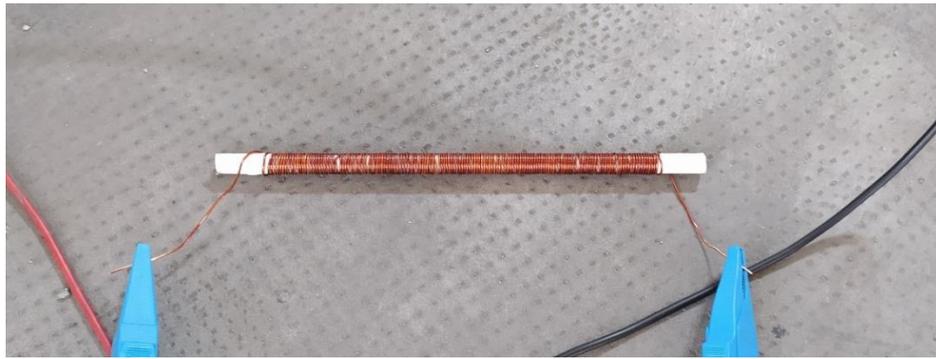


Fig. 40 - Induttanza aggiuntiva

Anche se l'induttanza è inferiore ai 10 μH sommata ai 100 μH del generatore d'impulso consente di sostenere la corrente d'arco il tempo necessario alla prova.

5.2.3 – Dispositivo di misura

Per acquisire i dati era disponibile per esperimenti uno Chassis PXIexpress della National Instruments con diverse schede di acquisizione dati, visibile in Fig. 41:



Fig. 41 - Chassis PXIexpress National Instruments

Per acquisire la tensione in uscita dal divisore sono presenti due schede:

- NI PXI-5105 nello slot numero 6
- NI PXI-5122 nello slot numero 8

Tra le due schede disponibili si è preferito usare quella nello slot numero 6, poiché l'altra in caso di necessità può essere sostituita alla scheda di acquisizione dati usata per le prove di laboratorio e per le tarature.

La NI PXI-5105 è una scheda di acquisizione dati con 8 canali, 12 bit e 60 MS/s. Questo la rende un'ottima candidata per prove dove è necessario acquisire dati simultaneamente da più dispositivi di conversione come nel caso delle prove a tensione composita e combinata.

Per collegare lo Chassis al computer sono state installate due schede di comunicazione e comando, una all'interno del computer ed una nello slot 1 dello Chassis.

La comunicazione, in generale, può avvenire con cablaggi in rame e quindi comunicazione attraverso segnali digitali, oppure in fibra ottica con comunicazioni luminose. È stata scelta la fibra ottica poiché con questo metodo si è certi che non si perdano informazioni, e che venga garantita la sicurezza dell'operatore.

Le schede sono:

- NI PCIe-8381 all'interno del pc
- NI PXIe-8381 nello slot 1 dello Chassis

Sul computer è stato necessario installare il software LabVIEW per permettere il corretto funzionamento del dispositivo e della comunicazione. Attraverso LabVIEW è possibile utilizzare la scheda di acquisizione dati come un oscilloscopio e grazie a questa funzione è stato possibile registrare i dati delle prove realizzate.

6 – Prove di tensione composita

In seguito alla realizzazione del circuito di prova, è stata verificata la capacità dielettrica di un isolatore di media tensione. Si è usato un oggetto che sarebbe stato sicuramente in grado di sopportare la tensione applicata, perché lo scopo dell'attività non include l'analisi del guasto, ma poiché l'obiettivo era quello di analizzare l'andamento della tensione composita generata dal circuito.

Siccome non si conoscono ancora i parametri da misurare per questa tipologia di forma d'onda si effettua un'analisi del comportamento del circuito. I dati sono stati raccolti utilizzando lo strumento, presente in LabVIEW, che consente di utilizzare la scheda di acquisizione dati come fosse un oscilloscopio e salvare i dati direttamente sul computer tramite un file di testo.

6.1 – Prove di tensione “singole”

Si è deciso di iniziare con l'analisi delle due forme d'onda generate separatamente, per verificare che le forme d'onda siano corrette e che il divisore funzioni correttamente.

La prima forma d'onda misurata è stata la tensione sinusoidale, di valore efficace 100 V.

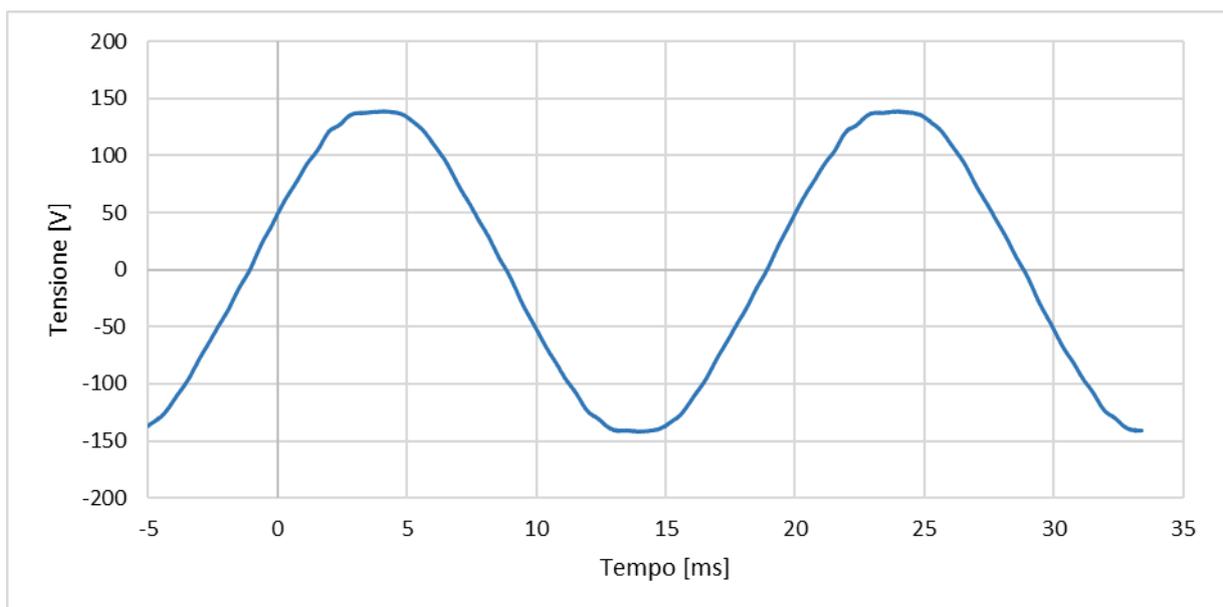


Fig. 42 - Solo tensione sinusoidale

In Fig. 42 si può osservare la forma d'onda di tensione sinusoidale con frequenza pari a 50 Hz misurata dal divisore. Ha un valore efficace di 100 V e una ampiezza di 140 V. In questo caso si nota come il divisore misuri correttamente e non ci siano particolari problemi con la forma d'onda generata.

Passando al solo impulso di origine atmosferica, bisogna ricordare la presenza dello spinterometro a sfere che ha imposto, per via della bassa tensione impiegata, l'impiego di un valore di induttanza pari a 110 μH .

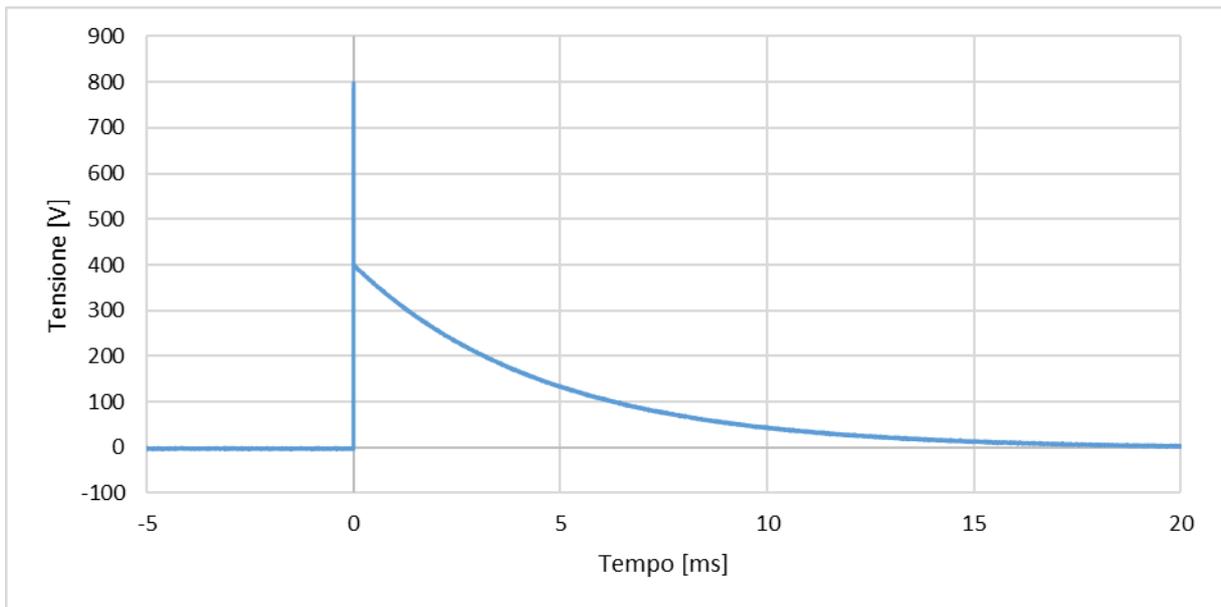


Fig. 43 - Solo impulso di origine atmosferica

In Fig. 43 si può osservare la forma d'onda dell'impulso. Si nota che c'è un picco a circa 800 V che scende altrettanto rapidamente a un valore di 400 V, per poi avere un andamento esponenziale decrescente, probabilmente è l'energia accumulata nel circuito che tende ad esaurirsi con la costante di tempo caratteristica del circuito.

L'impulso normato ha un tempo di salita pari a 1.2 μs , ed un tempo all'emivalore pari a 50 μs . Questo lasso di tempo è troppo breve per poterlo percepire su una scala dei tempi dell'ordine dei millisecondi. Per andare a osservare che cosa avviene durante l'arco elettrico, si riduce la scala dei tempi.

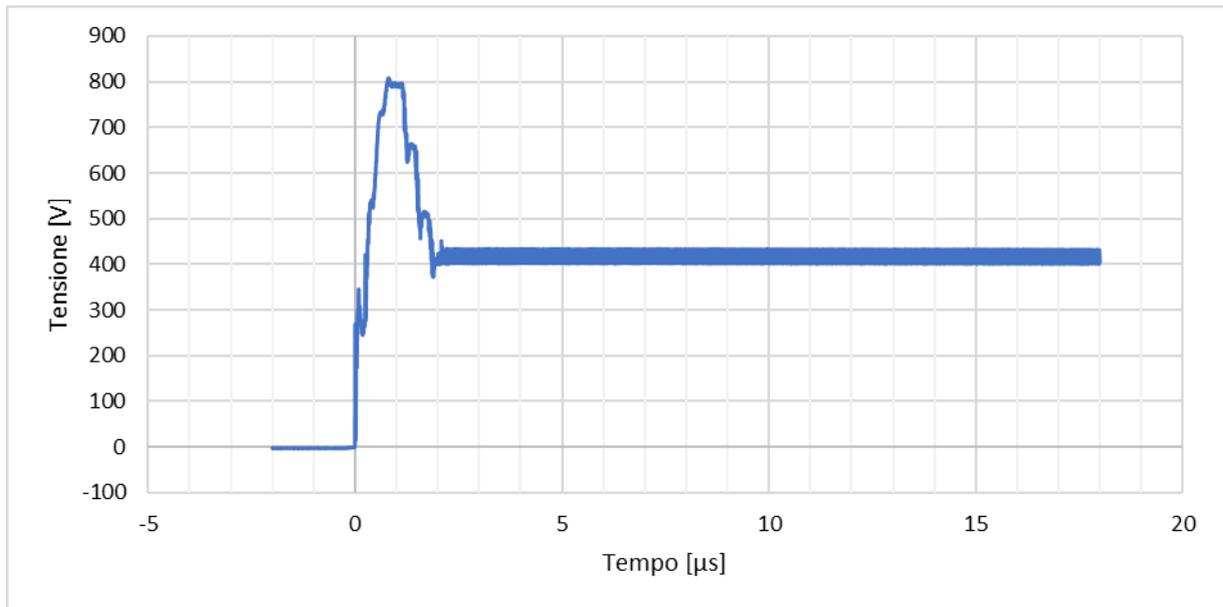


Fig. 44 – Dettaglio della tensione impulsiva

In Fig. 44 si osserva l'impulso con una scala dei tempi dell'ordine dei μs . In questo modo possiamo studiare cosa avviene durante l'arco. Si osserva come la tensione passi da un valore nullo al picco di 800 V in un tempo pari ad 1 μs , tempo di salita accettabile per quanto riguarda l'impulso di origine atmosferica.

La discesa fino a un valore pari a 400 V però è altrettanto rapida. Questa condizione non è ottimale, considerando che la normativa richiede un tempo all'emivalore pari a 50 μs . Nel caso preso in esame si tratta di un tempo pari a 2 μs .

La causa principale di questa situazione è l'utilizzo di una tensione molto bassa, che quindi non è in grado di sostenere l'arco per un lasso di tempo prolungato.

Nel nostro caso ci limitiamo a considerare che è possibile ottenere l'impulso utilizzando lo spinterometro come elemento di blocco ed accoppiamento.

Con un generatore di alte tensioni impulsive si suppone che non si incorra in questo problema. Basti pensare che nei sistemi per generare alte tensioni impulsive si utilizzano più stadi di condensatori caricati in parallelo e poi messi in serie attraverso gli spinterometri, quindi possiamo ritenere che non ci siano problemi causati dagli spinterometri in generale. Per averne la certezza bisognerà provare il sistema con tensioni maggiori.

6.2 – Prove di tensione composita

Dato che le singole prove hanno fornito risultati soddisfacenti, si è provveduto a generare una tensione composita delle due forme d'onda misurate e verificare cosa accade ai capi dei singoli generatori e sull'oggetto in prova.

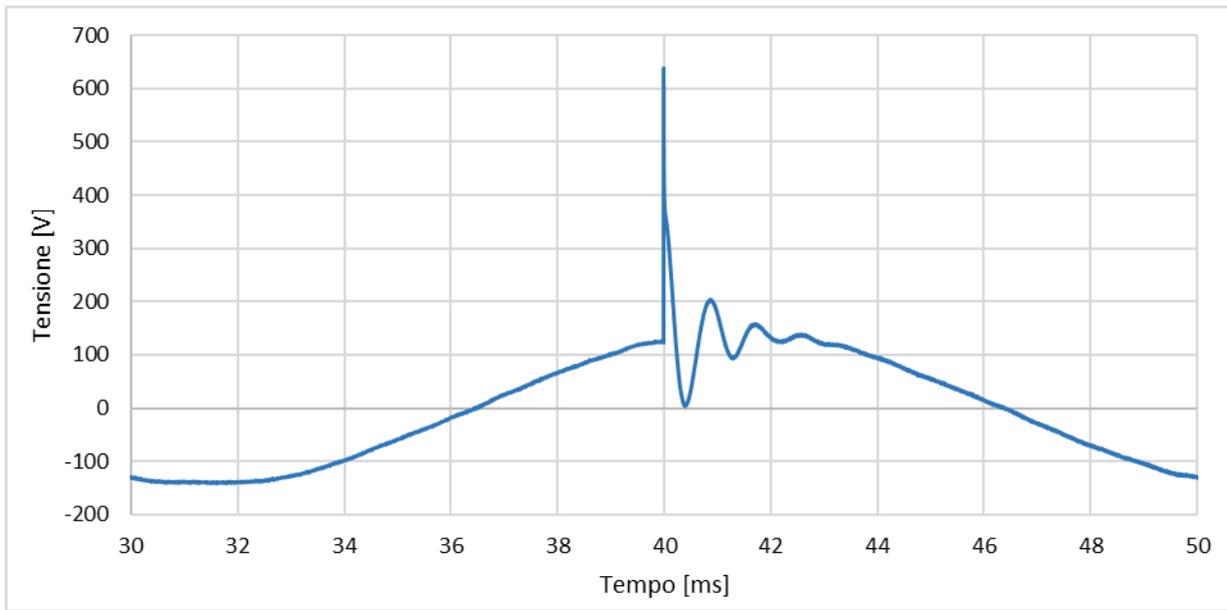


Fig. 45 - Tensione composita

In Fig. 45 viene rappresentata la tensione composita misurata sull'oggetto in prova. Si può osservare l'impulso che si sovrappone alla tensione sinusoidale, la sinusoide ha valore efficace pari a 100 V. L'arco ha una breve durata, sufficiente a portare la tensione da 140 V a 630 V. Quando l'arco si estingue parte un andamento oscillatorio smorzato. Questo comportamento è lontano dalla idealità rappresentata dalla norma.

Nel nostro circuito entrano in gioco l'induttanza del trasformatore presente all'interno del generatore di tensione e la capacità del divisore, le quali si palleggiano l'energia rilasciata dall'impulso. Lo smorzamento è dovuto dalle resistenze presenti nel circuito di prova.

Facendo un confronto con le due prove eseguite separatamente con lo stesso circuito, si può osservare come l'impulso non raggiunga la stessa tensione del caso con il solo generatore di impulso collegato al carico.

Quindi sicuramente il fatto di aver collegato il generatore di tensione sinusoidale e che esso stia erogando tensione, modifica il comportamento del generatore d'impulso. Questo fattore dimostra che la prova di tensione composita richiede una profonda conoscenza degli strumenti che si stanno utilizzando, in particolar modo se sono strumenti da utilizzare per attività di taratura.

Volendo analizzare il comportamento degli elementi di blocco e accoppiamento, e non avendo a disposizione altri divisori, è stato modificato il circuito, posizionando il divisore di tensione ai capi dei due generatori di tensione.

In Fig. 46 si può osservare il circuito di prova con il divisore collegato ai capi del generatore di tensione sinusoidale.



Fig. 46 - Misura della tensione composta ai capi del generatore di tensione sinusoidale

Non avendo modificato il resto del circuito, si suppone che le forme d'onda generate siano le medesime, quindi che l'oggetto in prova subisca la stessa tensione composta.

Con questo circuito verifichiamo il comportamento del filtro resistivo impiegato per proteggere il generatore di tensione sinusoidale dall'impulso di origine atmosferica.

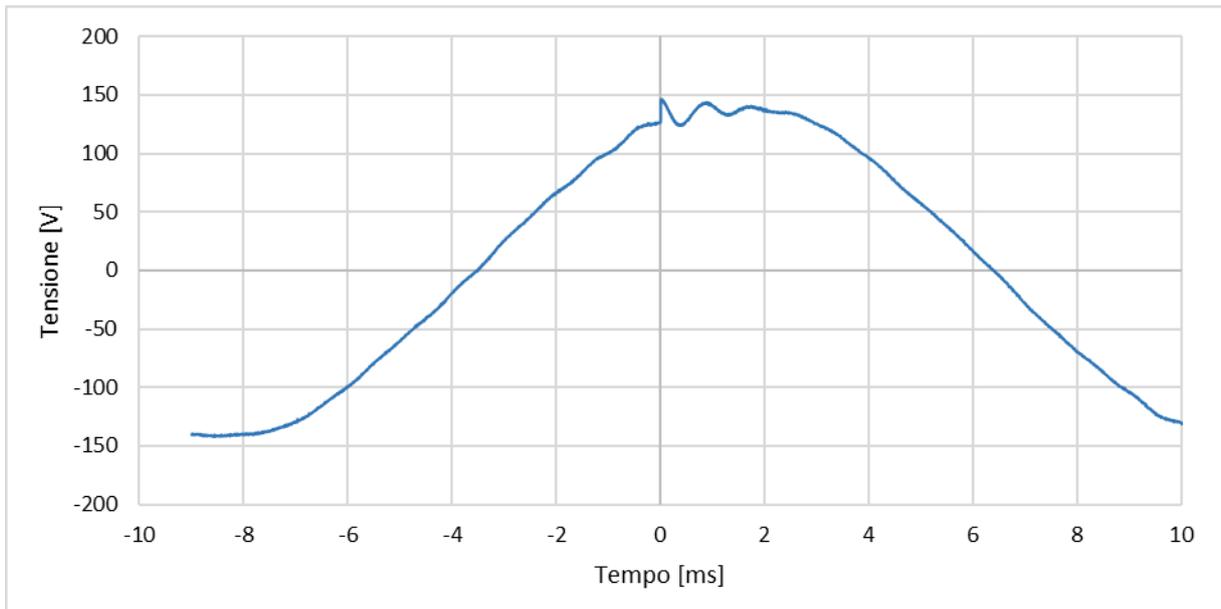


Fig. 47 – Misura della tensione composita ai capi del generatore di tensione sinusoidale

Si ricorda che la tensione sinusoidale ha valore efficace pari a 100 V, che corrisponde ad un valore di picco pari a circa 140 V. Osservando la Fig. 47 si può vedere come la forma d'onda sinusoidale sia riconoscibile.

Si riconosce l'andamento dell'impulso, ma ha una ampiezza molto ridotta rispetto a quella misurata sull'oggetto in prova. Questo vuol dire che il filtro funziona correttamente ed è in grado di ridurre l'impulso a una ondulazione di ampiezza quasi trascurabile.

Se si volesse migliorare ulteriormente l'azione del filtro, si potrebbe aggiungere in serie un induttore che permetta di ridurre la derivata di corrente e di conseguenza la velocità con cui la tensione sale durante l'impulso. Questo potrebbe essere importante nel momento in cui si stressa l'isolamento delle spire del trasformatore presente all'interno del generatore di tensione sinusoidale.

Da questa prova si può inoltre notare come l'impulso non sia esattamente sull'apice della sinusoide, ma parta prima del raggiungimento del massimo di tensione. È importante quindi studiare un meccanismo di trigger tra la tensione sinusoidale e l'impulso, in modo da far generare l'impulso il più possibile nell'istante di tempo desiderato.

Per misurare la tensione composita ai capi del generatore di tensione di origine atmosferica è stato necessario modificare nuovamente l'impianto come mostrato in Fig. 48. Anche in questo caso, si considera la tensione composita pari a quella misurata dall'oggetto in prova. In questo caso, si vuole verificare il comportamento dello spinterometro come elemento di blocco ed accoppiamento.

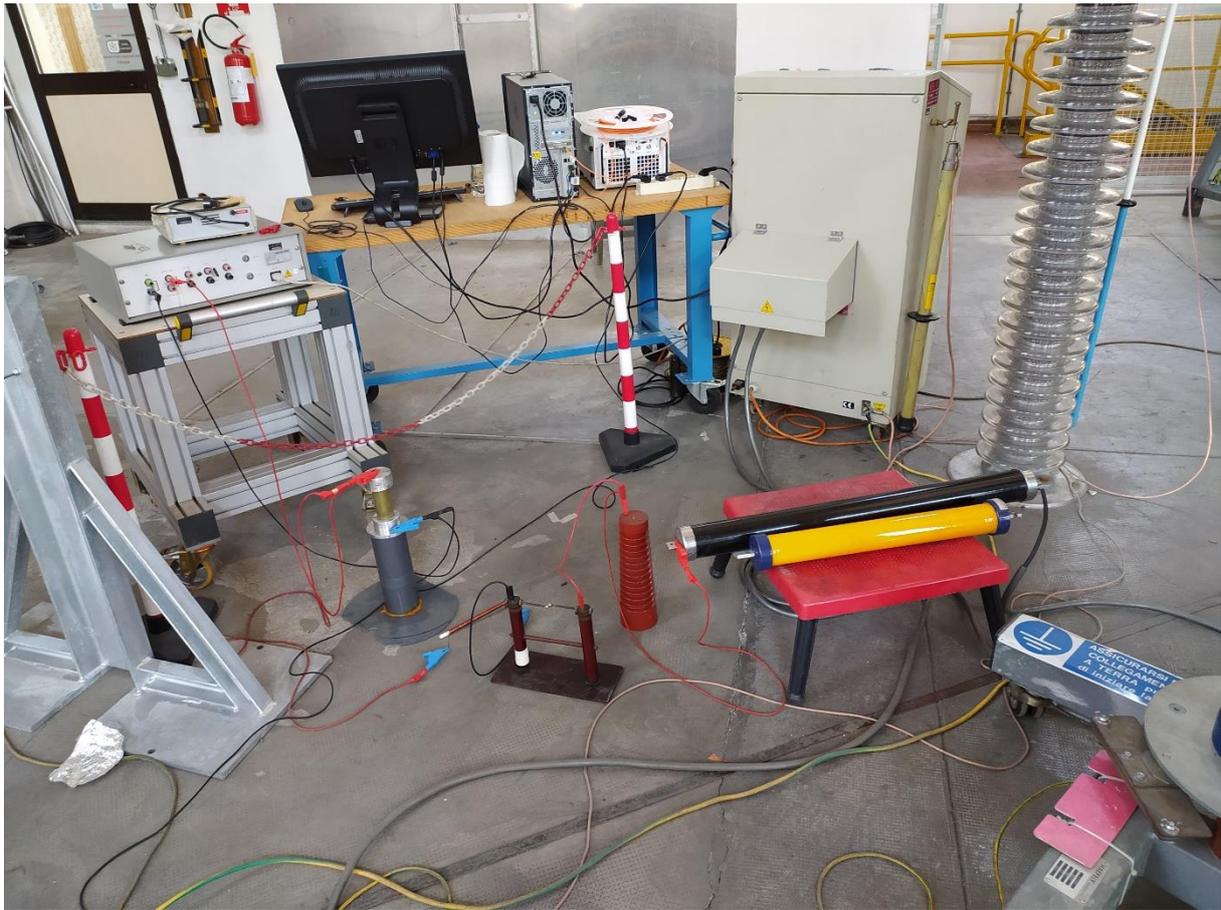


Fig. 48 - Misura della tensione composta ai capi del generatore d'impulso

La misura effettuata ai capi del generatore di tensione impulsiva è visibile in Fig. 49.

Si può osservare che la tensione arriva a valori dell'ordine di 800 V. Questo implica che, se non ci sono differenze di tensione ai capi dell'oggetto in prova, lo spinterometro riduce la tensione di uscita del generatore di tensione impulsiva di un 15%. È una riduzione consistente, ma si tratta di una ipotesi da verificare, poiché come detto in precedenza lo strumento di misura a disposizione era uno solo.

Come nel caso della misura della sola tensione generata dall'impulso, si vuole investigare sui primi istanti di tempo dell'impulso, poiché non è possibile apprezzarne l'andamento con questa scala temporale.

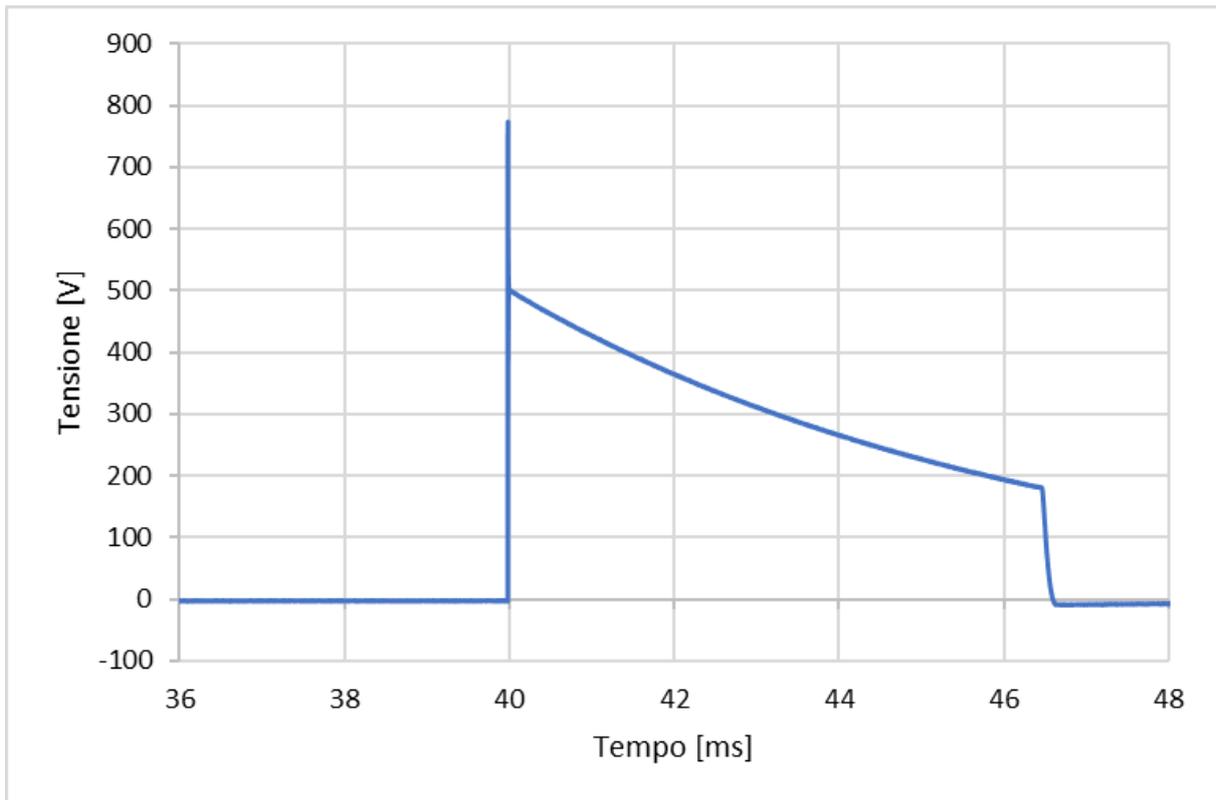


Fig. 49 – Misura della tensione composita dal lato del generatore di tensione impulsiva

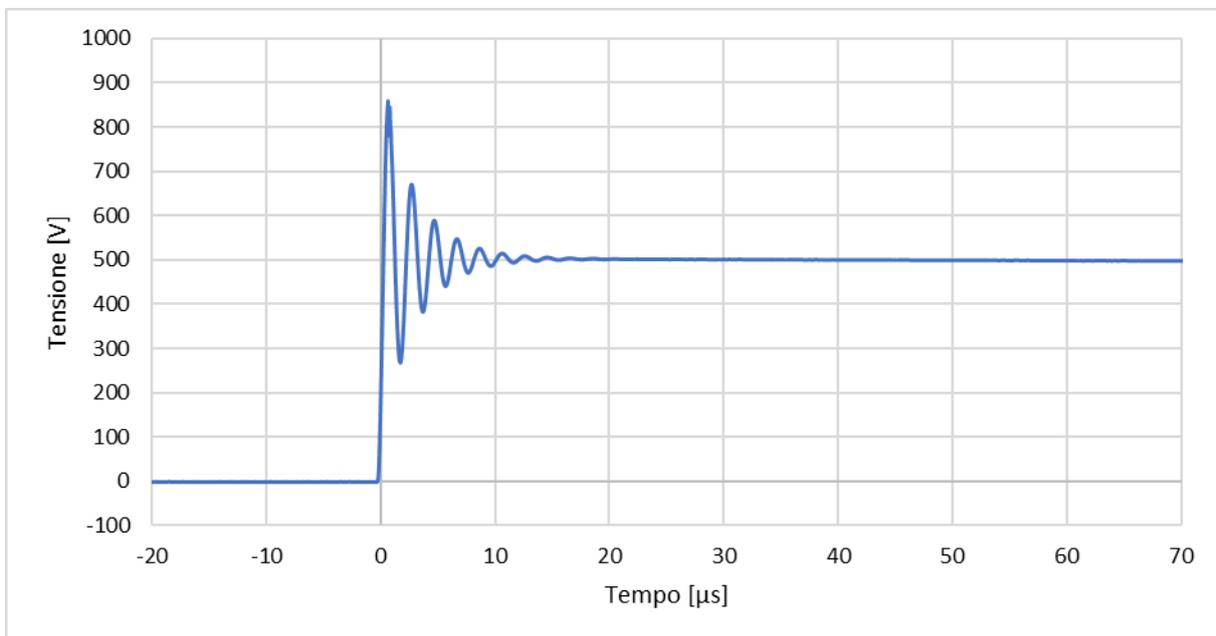


Fig. 50 – Misura della tensione composita dal lato del generatore di tensione impulsiva (dettaglio)

In Fig. 50 si può osservare l'andamento della tensione nei primi istanti di tempo.

Si ha un andamento oscillatorio smorzato, dove la tensione massima raggiunta supera 800 V, arrivando a tensioni dell'ordine degli 850 V. L'andamento oscillatorio in questo caso potrebbe essere causato dalla presenza nel circuito dello stesso partitore di tensione, che causa uno scambio di energia con il generatore di tensione sinusoidale. In questo caso specifico la presenza dell'arco si può osservare nel picco più alto della tensione dove avvengono delle oscillazioni attorno al valore di 840 V.

Come è possibile osservare, non si vede traccia della tensione sinusoidale, quindi come ci si poteva aspettare lo spinterometro risulta essere un buon elemento di blocco ed accoppiamento, purché si riesca ad ottenere la forma d'onda corretta dell'impulso.

Dallo studio dei risultati ottenuti si può osservare come la forma d'onda misurata ai capi del generatore d'impulso risulta avere un picco di tensione di valore superiore alla tensione misurata sull'oggetto in prova, mentre ci si aspettava di trovare valori di tensione paragonabili. Inoltre, non è possibile ricostruire in maniera analitica l'evoluzione della forma d'onda composta agente sull'oggetto in prova a partire dalle misure effettuate a monte degli elementi di blocco.

Si osserva come con il circuito realizzato in laboratorio risulta necessario misurare la forma d'onda composta direttamente ai capi dell'oggetto in prova, altrimenti non si può ottenere la riferibilità della prova.

Come abbiamo visto in precedenza, con una prova a bassa tensione è difficile simulare il comportamento dello spinterometro per alte tensioni. Si presume che con prove a tensione maggiore la problematica riscontrata nel far durare l'arco il tempo necessario alla prova si possa risolvere con semplicità.

7 – Conclusioni e sviluppi futuri

Lo scopo di questa tesi era di creare un circuito di prova che simulasse la prova di tensione composita con tensioni inferiori ai 1000 V partendo dal solo schema di principio riportato dalla norma e visto in Fig. 2. L'obiettivo è stato raggiunto con successo, ma ci sono delle considerazioni importanti da fare. La forma d'onda generata è sicuramente una tensione composita, ma se la tensione sinusoidale si può considerare effettivamente tale, l'impulso di origine atmosferica non ha ancora il comportamento richiesto dalla norma.

Il problema nasce dal fatto che i generatori di tensione impulsiva sono realizzati per essere collegati direttamente all'oggetto in prova, e non a un circuito di prova più complesso. Quindi la prima osservazione che nasce è che per generare la tensione composita richiesta dalla norma, sarà necessario studiare il circuito di prova nella sua interezza, e modificare il generatore di tensione impulsiva in maniera da realizzare la forma d'onda auspicata.

Una delle sfide di questa tesi era quella di realizzare uno strumento di conversione in grado di rappresentare in maniera adeguata sia tensioni continue, che alternate che di natura impulsiva ed anche composizioni di esse. Lo strumento realizzato nel corso del lavoro risulta essere in grado di misurare con l'accuratezza richiesta le singole prove. La complicazione affrontata nella realizzazione di questo strumento è stata quella di ottenere un rapporto di misura costante sia al variare della tensione sia al variare della frequenza. Questo richiederà una progettazione accurata per dispositivi da usare come riferimento, specialmente per tensioni elevate.

Si è realizzato questo circuito con lo scopo di osservare se ci fosse la possibilità di misurare separatamente le due forme d'onda all'uscita dei due generatori e comporre analiticamente la forma d'onda composita.

Con il circuito realizzato in laboratorio appare che questa possibilità vada esclusa, poiché l'introduzione degli elementi di blocco e la dimensione fisica del circuito introducono delle variabili difficili da considerare in fase di progettazione.

Per poterlo fare bisognerebbe analizzare con cura tutti i fenomeni parassiti e considerare il disturbo introdotto dall'arco elettrico che si genera tra le sfere dello spinterometro.

Con questo si intende riportare l'attenzione sul fatto che potenzialmente si può analizzare la forma d'onda composta misurando le tensioni ai capi dei due generatori, ma richiederebbe di modificare il circuito. Quindi la conclusione a cui si è arrivati è che sia più semplice ed accurato misurare la forma d'onda direttamente ai capi dell'oggetto in prova.

In parallelo alla realizzazione del circuito si possono definire dei parametri che sarà necessario misurare o calcolare per rappresentare in maniera riferibile la prova di tensione composta:

- Valore massimo raggiunto dalla forma d'onda di tensione composta
- Valore efficace della tensione
- Tempo di salita dell'impulso
- Punto di partenza dell'impulso, potenzialmente lo zero della tensione impulsiva
- Tempo in cui la tensione dal valore di picco ritorna al valore della sinusoide
- Bisognerà definire il punto in cui ha senso effettuare la prova di tensione composta, si ipotizza che i punti di interesse possano essere il picco positivo della sinusoide ed il picco negativo della sinusoide,

Alcuni di questi parametri sono attualmente in fase di studio.

Il progetto prevede, nel futuro, la realizzazione di un circuito di misura per prove di tensione composite e combinate, in grado di generare una forma d'onda definita e riferibile. Per fare questo devono essere definiti molti parametri e realizzati dispositivi di conversione adatti allo scopo. In funzione del dispositivo di conversione e dei parametri, sarà necessario programmare un software in grado di acquisire i dati, elaborarli e fornire all'operatore i parametri stabiliti.

Bibliografia

- [1] *IEC 60060-1:2010 High-voltage test techniques - Part 1: General definitions and test requirements*, 2010.
- [2] *IEC 60060-2:2010 High-voltage test techniques - Part 2: Measuring systems*, 2010.
- [3] *CEI EN 50191:2010 Installazione ed esercizio degli impianti elettrici di prova*, 2010.
- [4] *CEI EN 62271 - 1:2008 High-voltage switchgear and controlgear - Part 1: Common specifications*, 2008.
- [5] *IEC EN 61083-2:2013 - Instruments and software used for measurement in high-voltage and high-current tests. Part 2: Requirements for software for tests with impulse voltages and currents*, 2013.
- [6] J. M. L. J. Cameron Pouncey, *A spark gap model for LT-spice and similar circuit simulation software*, Albuquerque, NM 87131 USA , 2015.

Indice delle figure

Fig. 1 - Tensione composta con differenti forme d'onda Fonte IEC 60060 - 1.....	4
Fig. 2 - Circuito per prove di tensione composite	5
Fig. 3 – Circuito per prove di tensione combinate	6
Fig. 4 – Tensione combinata Fonte IEC 60060 - 1	6
Fig. 5 – Circuito per simulazione con tensione sinusoidale	14
Fig. 6 - Risultati simulazione	15
Fig. 7 – Circuito per simulazione con tensione impulsiva	16
Fig. 8 - Risultati simulazione	17
Fig. 9 - Circuito composito	18
Fig. 10 - Risultati simulazione tensione composta.....	19
Fig. 11 - Dettaglio simulazione prove composta	20
Fig. 12 - Schema di principio divisore compensato	21
Fig. 13 – Divisore: ramo di alta tensione	22
Fig. 14 – Divisore: ramo di bassa tensione 300 prima di effettuare modifiche	23
Fig. 15 – Schema circuitale ramo di alta tensione del divisore.....	23
Fig. 16 - Lato AT: 1. Attacco per lato BT 2. Condensatori ceramici 3. Resistenze ramo RC 4. Colonna isolante 5. Resistenze ramo resistivo	24
Fig. 17 – Risposta unitaria al gradino $g(t)$. Fonte IEC 60060-2 [2]	25
Fig. 18 - Parametri dell'integrale della risposta al gradino $T(t)$. Fonte IEC 60060-2 [2].....	26
Fig. 19 - Circuito ramo di bassa tensione del divisore	28
Fig. 20 - dati misurati	29
Fig. 21 - $g(t)$	29
Fig. 22 - $T(t)$	30
Fig. 23 - Lato di bassa tensione per divisore 400.....	32
Fig. 24 - $T(t)$ Divisore 400	33
Fig. 25 - confronto $g(t)$: pre-modifica (arancio) modificato(blù).....	34
Fig. 26 - $T(t)$ divisore modificato	34
Fig. 27 - Contributo di incertezza della taratura IEC 2596/10	37
Fig. 28 - Strumentazione per misura del fattore di scala.....	38
Fig. 29 – Schema di collegamento per la misura del fattore di scala.....	43
Fig. 30 - Risposta ampiezza/frequenza divisore.....	44
Fig. 31 - Fattore di scala ampiezza/frequenza divisore modificato.....	46
Fig. 32 - Andamento del fattore di scala in funzione della tensione	47

Fig. 33 – Schema circuitale lato di bassa tensione del divisore	48
Fig. 34 - Ramo di bassa tensione del partitore di tensione.....	49
Fig. 35 - Circuito di prova: 1. generatore HVAC; 2. Generatore LI; 3. Divisore; 4. Filtro resistivo; 5. Spinterometro a sfere; 6. Computer e dispositivo di acquisizione dati	50
Fig. 36 - Schema circuitale del generatore ad impulsi	53
Fig. 37 - Tensione atmosferica impulsiva generata.....	53
Fig. 38 - Resistori disponibili in laboratorio	54
Fig. 39 - Spinterometro a sfere.....	55
Fig. 40 - Induttanza aggiuntiva	56
Fig. 41 - Chassis PXIexpress National Instruments	56
Fig. 42 - Solo tensione sinusoidale.....	58
Fig. 43 - Solo impulso di origine atmosferica.....	59
Fig. 44 – Dettaglio della tensione impulsiva.....	60
Fig. 45 - Tensione composta	61
Fig. 46 - Misura della tensione composta ai capi del generatore di tensione sinusoidale.....	62
Fig. 47 – Misura della tensione composta ai capi del generatore di tensione sinusoidale.....	63
Fig. 48 - Misura della tensione composta ai capi del generatore d'impulso	64
Fig. 49 – Misura della tensione composta dal lato del generatore di tensione impulsiva.....	65
Fig. 50 – Misura della tensione composta dal lato del generatore di tensione impulsiva (dettaglio)	65
Fig. 51 - Modifica 1.....	72
Fig. 52 - modifica 2	73
Fig. 53 - modifica 3	74

Allegati

Allegato A

Modifiche effettuate al divisore

Le modifiche apportate riguardano le sole resistenze messe in serie alle capacità del ramo di bassa tensione sono state eliminate sequenzialmente le resistenze da 3.9 Ω , una nella prima modifica, due nella seconda e tre nella terza per arrivare infine a 7 nella configurazione finale.

- Modifica 1

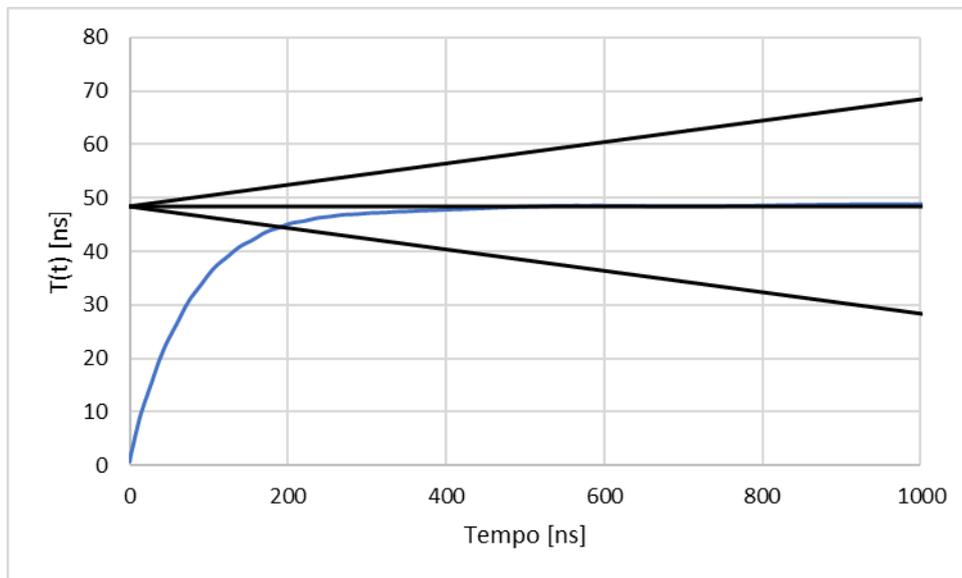


Fig. 51 - Modifica 1

Tabella 13 – Parametri della risposta al gradino - modifica 1

Parametro	T_N	t_s	β	$T\alpha$
Ottenuto	48.42 ns	190 ns	0.3930 ns	48.53 ns
Raccomandato	≤ 15 ns	≤ 200 ns		≤ 30 ns

- **Modifica 2**

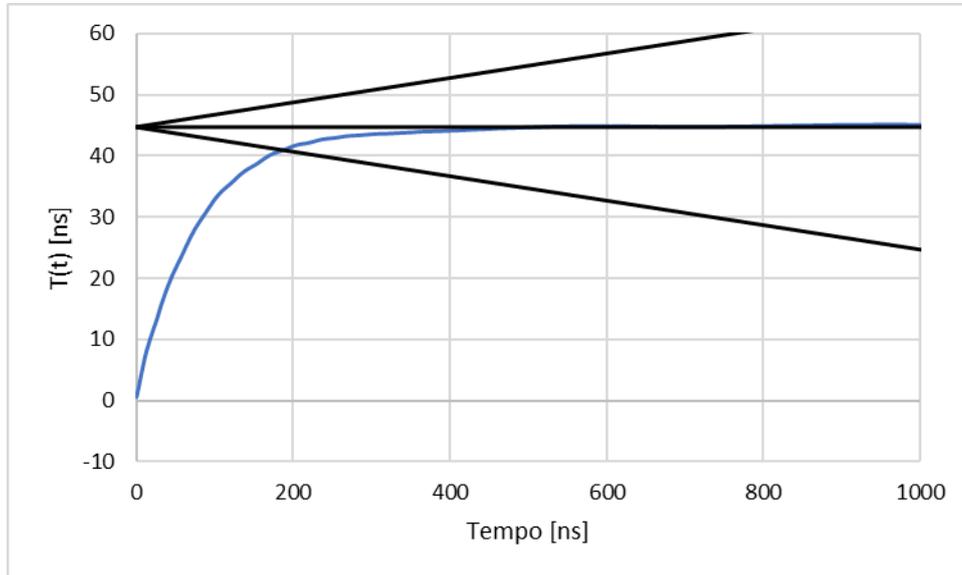


Fig. 52 - modifica 2

Tabella 14 - Parametri della risposta al gradino - modifica 2

Parametro	T_N	t_s	θ	$T\alpha$
Ottenuto	44.73 ns	186.7 ns	0.3556 ns	44.87 ns
Raccomandato	≤ 15 ns	≤ 200 ns		≤ 30 ns

- **Modifica 3**

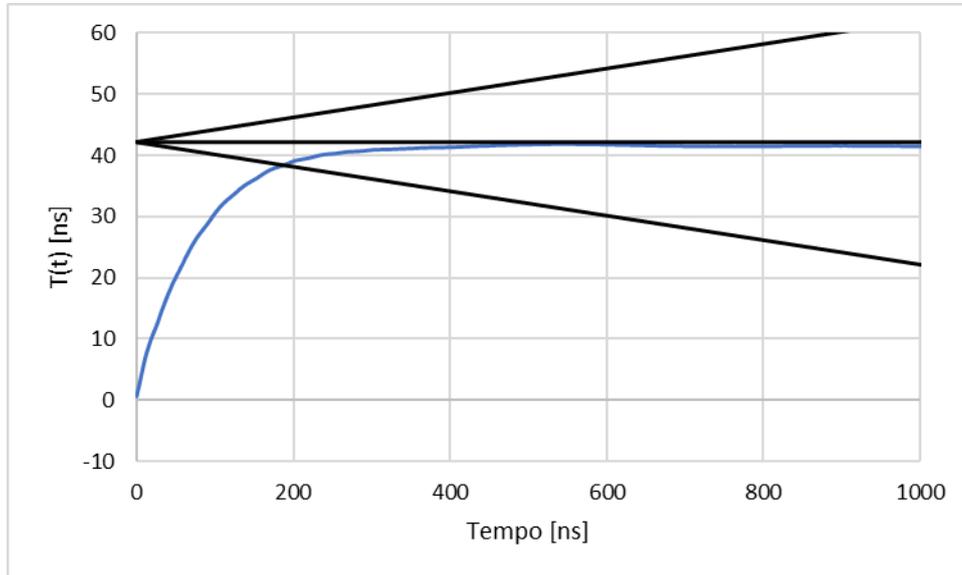


Fig. 53 - modifica 3

Tabella 15 - Parametri della risposta al gradino - modifica 3

Parametro	T_N	t_s	β	$T\alpha$
Ottenuto	42.19 ns	186.7 ns	0.3906 ns	40.96 ns
Raccomandato	≤ 15 ns	≤ 200 ns		≤ 30 ns

Allegato B**Tabelle relative alla misura del fattore di scala.***Tabella 16 - Rilevazione dati per misura del fattore di scala prima della modifica*

Dati 1000 V						
t [s]	f [Hz]	DC	50	200	1k	5k
10		5.1754	5.2215	5.3159	5.3226	5.3248
20		5.1754	5.2215	5.3159	5.3226	5.3245
30		5.1754	5.2215	5.3159	5.3226	5.3243
40		5.1754	5.2215	5.3159	5.3225	5.3243
50		5.1754	5.2215	5.3159	5.3226	5.3243
60		5.1755	5.2215	5.3159	5.3226	5.3243
70		5.1755	5.2215	5.3159	5.3226	5.3243
80		5.1755	5.2216	5.3159	5.3226	5.3243
90		5.1755	5.2215	5.3159	5.3226	5.3243
100		5.1755	5.2215	5.3159	5.3226	5.3243
110		5.1755	5.2215	5.3159	5.3226	5.3243
120		5.1755	5.2215	5.3159	5.3226	5.3243
130		5.1755	5.2215	5.3158	5.3225	5.3243
140		5.1755	5.2215	5.3159	5.3226	5.3243
150		5.1755	5.2215	5.3159	5.3226	5.3243
180		5.1755	5.2215	5.3159	5.3226	5.3243
210		5.1755	5.2215	5.3159	5.3226	5.3243

Tabella 17 - Fattore di scala per divisore 200 prima della modifica

Fattore di scala Fi						
	f [Hz]	DC	50	200	1000	5000
t [s]						
10		193.2218	191.5158	188.1149	187.8781	187.8005
20		193.2218	191.5158	188.1149	187.8781	187.8111
30		193.2218	191.5158	188.1149	187.8781	187.8181
40		193.2218	191.5158	188.1149	187.8816	187.8181
50		193.2218	191.5158	188.1149	187.8781	187.8181
60		193.2180	191.5158	188.1149	187.8781	187.8181
70		193.2180	191.5158	188.1149	187.8781	187.8181
80		193.2180	191.5122	188.1149	187.8781	187.8181
90		193.2180	191.5158	188.1149	187.8781	187.8181
100		193.2180	191.5158	188.1149	187.8781	187.8181
110		193.2180	191.5158	188.1149	187.8781	187.8181
120		193.2180	191.5158	188.1149	187.8781	187.8181
130		193.2180	191.5158	188.1184	187.8816	187.8181
140		193.2180	191.5158	188.1149	187.8781	187.8181
150		193.2180	191.5158	188.1149	187.8781	187.8181
210		193.2180	191.5158	188.1149	187.8781	187.8181
300		193.2180	191.5158	188.1149	187.8781	187.8181

Tabella 18 - Rilevazione dati per misura del fattore di scala con divisore modificato

Dati 1000 V						
	f [Hz]	DC	50	250	1k	5k
t [s]						
10		5.3595	5.2990	5.3512	5.3450	5.3441
20		5.3595	5.2989	5.3513	5.3451	5.3441
30		5.3595	5.2990	5.3512	5.3452	5.3442
40		5.3595	5.2989	5.3513	5.3450	5.3441
50		5.3595	5.2988	5.3513	5.3451	5.3441
60		5.3595	5.2990	5.3513	5.3451	5.3441
70		5.3595	5.2990	5.3512	5.3451	5.3441
80		5.3595	5.2990	5.3513	5.3452	5.3440
90		5.3595	5.2991	5.3513	5.3451	5.3441
100		5.3595	5.2989	5.3512	5.3451	5.3441
110		5.3595	5.2989	5.3513	5.3450	5.3441
120		5.3595	5.2989	5.3512	5.3450	5.3441
130		5.3595	5.2989	5.3513	5.3450	5.3441
140		5.3595	5.2989	5.3512	5.3450	5.3441
150		5.3595	5.2989	5.3512	5.3450	5.3441
180		5.3595	5.2989	5.3513	5.3451	5.3440
210		5.3595	5.2989	5.3512	5.3451	5.3441

Tabella 19 - Fattore di scala con divisore modificato

Fattore di scala Fi						
	f [Hz]	DC	50	250	1000	5000
t [s]						
10		186.5846	188.7149	186.8740	187.0907	187.1222
20		186.5846	188.7184	186.8705	187.0872	187.1222
30		186.5846	188.7149	186.8740	187.0837	187.1187
40		186.5846	188.7184	186.8705	187.0907	187.1222
50		186.5846	188.7220	186.8705	187.0872	187.1222
60		186.5846	188.7149	186.8705	187.0872	187.1222
70		186.5846	188.7149	186.8740	187.0872	187.1222
80		186.5846	188.7149	186.8705	187.0837	187.1257
90		186.5846	188.7113	186.8705	187.0872	187.1222
100		186.5846	188.7184	186.8740	187.0872	187.1222
110		186.5846	188.7184	186.8705	187.0907	187.1222
120		186.5846	188.7184	186.8740	187.0907	187.1222
130		186.5846	188.7184	186.8705	187.0907	187.1222
140		186.5846	188.7184	186.8740	187.0907	187.1222
150		186.5846	188.7184	186.8740	187.0907	187.1222
210		186.5846	188.7184	186.8705	187.0872	187.1257
300		186.5846	188.7184	186.8740	187.0872	187.1222

Tabella 20 - Tensioni misurate in uscita dal partitore, per calcolo del fattore di scala

Dati														
f [Hz]	[V]	1	2	3	5	10	20	30	50	100	200	300	500	1000
DC		5.3610E-03	1.0721E-02	1.6080E-02	2.6799E-02	5.3596E-02	1.0719E-01	1.6079E-01	2.6798E-01	5.3595E-01	1.0719E+00	1.6079E+00	2.6798E+00	5.3596E+00
10		5.1900E-03	1.0375E-02	1.5556E-02	2.5920E-02	5.1840E-02	1.0371E-01	1.5552E-01						
20		5.2350E-03	1.0465E-02	1.5692E-02	2.6148E-02	5.2299E-02	1.0462E-01	1.5689E-01						
50		5.2890E-03	1.0592E-02	1.5873E-02	2.6489E-02	5.2937E-02	1.0594E-01	1.5884E-01	2.6471E-01	5.2949E-01	1.0593E+00	1.5884E+00	2.6470E+00	5.2946E+00
75		5.3220E-03	1.0638E-02	1.5952E-02	2.6580E-02	5.3165E-02	1.0636E-01	1.5949E-01	2.6579E-01	5.3163E-01	1.0636E+00	1.5948E+00	2.6577E+00	5.3160E+00
100		5.3320E-03	1.0658E-02	1.5982E-02	2.6630E-02	5.3266E-02	1.0656E-01	1.5979E-01	2.6629E-01	5.3263E-01	1.0656E+00	1.5978E+00	2.6627E+00	5.3259E+00
250		5.3420E-03	1.0680E-02	1.6020E-02	2.6695E-02	5.3403E-02	1.0682E-01	1.6018E-01	2.6695E-01	5.3396E-01	1.0682E+00	1.6018E+00	2.6694E+00	5.3394E+00
500		5.3480E-03	1.0689E-02	1.6030E-02	2.6709E-02	5.3422E-02	1.0687E-01	1.6026E-01	2.6708E-01	5.3421E-01	1.0687E+00	1.6025E+00	2.6707E+00	5.3420E+00
1k		5.3490E-03	1.0691E-02	1.6032E-02	2.6713E-02	5.3430E-02	1.0689E-01	1.6029E-01	2.6712E-01	5.3429E-01	1.0689E+00	1.6028E+00	2.6713E+00	5.3430E+00
2k		5.3500E-03	1.0692E-02	1.6034E-02	2.6716E-02	5.3435E-02	1.0690E-01	1.6030E-01	2.6716E-01	5.3435E-01	1.0690E+00	1.6030E+00	2.6714E+00	5.3437E+00
5k		5.3510E-03	1.0694E-02	1.6036E-02	2.6719E-02	5.3442E-02	1.0691E-01	1.6032E-01	2.6716E-01	5.3440E-01	1.0691E+00	1.6032E+00	2.6719E+00	5.3445E+00
10k		5.3500E-03	1.0695E-02	1.6038E-02	2.6723E-02	5.3449E-02	1.0693E-01	1.6034E-01	2.6720E-01	5.3448E-01	1.0692E+00	1.6033E+00	2.6723E+00	
20k		5.3490E-03	1.0696E-02	1.6039E-02	2.6728E-02	5.3461E-02	1.0695E-01	1.6035E-01	2.6723E-01	5.3453E-01	1.0694E+00	1.6034E+00		
50k		5.3440E-03	1.0697E-02	1.6046E-02	2.6742E-02	5.3495E-02	1.0703E-01	1.6036E-01	2.6738E-01	5.3484E-01	1.0699E+00	1.6025E+00		
100k		5.3290E-03	1.0694E-02	1.6053E-02	2.6758E-02	5.3545E-02	1.0714E-01	1.6039E-01	2.6769E-01	5.3539E-01				
200k		5.2730E-03	1.0678E-02	1.6061E-02										

Tabella 21 - Fattore di scala in funzione della tensione e della frequenza

Fattore di scala Fi														
f [Hz] \ [V]	1	2	3	5	10	20	30	50	100	200	300	500	1000	
DC	186.5324	186.5498	186.5672	186.5741	186.5811	186.5863	186.5788	186.5811	186.5846	186.5846	186.5788	186.5811	186.5811	
10	192.6782	192.7711	192.8516	192.9012	192.9012	192.8454	192.9012							
20	191.0220	191.1132	191.1802	191.2192	191.2082	191.1626	191.2168							
50	189.0717	188.8218	189.0002	188.7576	188.9038	188.7843	188.8693	188.8860	188.8610	188.8093	188.8693	188.8931	188.8717	
75	187.8993	188.0053	188.0642	188.1114	188.0937	188.0406	188.0996	188.1184	188.1007	188.0477	188.1114	188.1326	188.1114	
100	187.5469	187.6525	187.7112	187.7582	187.7370	187.6877	187.7464	187.7652	187.7476	187.6930	187.7582	187.7793	187.7617	
200	187.1958	187.2659	187.2659	187.3010	187.2554	187.2309	187.2893	187.3010	187.2799	187.2274	187.2893	187.3080	187.2870	
500	186.9858	187.1082	187.1491	187.2028	187.1888	187.1380	187.1958	187.2098	187.1923	187.1398	187.2075	187.2168	187.1958	
1k	186.9508	187.0732	187.1257	187.1748	187.1608	187.1082	187.1608	187.1818	187.1643	187.1082	187.1724	187.1748	187.1608	
2k	186.9159	187.0557	187.1024	187.1538	187.1433	187.0925	187.1491	187.1538	187.1433	187.0907	187.1491	187.1678	187.1363	
5k	186.8810	187.0208	187.0791	187.1328	187.1187	187.0680	187.1257	187.1538	187.1257	187.0715	187.1257	187.1328	187.1082	
10k	186.9159	187.0033	187.0557	187.1047	187.0942	187.0435	187.1024	187.1257	187.0977	187.0487	187.1141	187.1047		
20k	186.9508	186.9858	187.0441	187.0697	187.0522	187.0033	187.0907	187.1047	187.0802	187.0173	187.1024			
50k	187.1257	186.9683	186.9625	186.9718	186.9334	186.8635	187.0791	186.9998	186.9718	186.9316	187.2075			
100k	187.6525	187.0208	186.8810	186.8600	186.7588	186.6664	187.0441	186.7832	186.7797					
200k	189.6454	187.3010	186.7879											