



ISTITUTO NAZIONALE DI RICERCA METROLOGICA Repository Istituzionale

Divisore di tensione riferibile per tensioni Composite inferiori a 1 kV

Original

Divisore di tensione riferibile per tensioni Composite inferiori a 1 kV / Caria, STEFANO EMILIO; Galliana, Flavio; Roccatò, PAOLO EMILIO. - (2021), pp. 1-40.

Availability:

This version is available at: 11696/70650 since: 2021-07-15T18:48:12Z

Publisher:

Published

DOI:

Terms of use:

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

Publisher copyright

(Article begins on next page)

S.E. Caria, F. Galliana, P.E. Roccatò

**Divisore di tensione riferibile per tensioni
composite inferiori a 1 kV**

R.T. 19/2021

Luglio 2021

Indice

Abstract	3
Sommario	3
1	Introduzione	4
2	Definizioni di tensioni composite e combinate	4
	2.1. – <i>Tensione composta</i>	5
	2.2. – <i>Tensione combinata</i>	5
3	Ambito del lavoro svolto all’ INRiM	7
4	Simulazione	7
	4.1 – <i>Fasi del processo di simulazione</i>	8
	4.2 – <i>Simulazione con tensione composta</i>	9
5	Divisore	11
6	Modifiche al divisore originale	13
	6.1 – <i>Risposta al gradino</i>	13
	6.2 – <i>Misura del fattore di scala</i>	16
	6.3 – <i>Comportamento dinamico e determinazione della risposta ampiezza/frequenza</i>	18
	6.3 – <i>Divisore definitivo</i>	21
7	Incertezza di taratura del fattore di scala del divisore	22
8	Prestazione del divisore	26
	8.1 – <i>Generatori di tensione</i>	26
	8.2 – <i>Elementi di blocco e accoppiamento</i>	28
	8.3 – <i>Dispositivo di misura</i>	28
9	Prove di tensione composta	29
	9.1 – <i>Prove di tensione “singole”</i>	29
	9.2 – <i>Prove di tensione composta</i>	33
	9.3 – <i>Effetti degli elementi di blocco ed accoppiamento</i>	34
10	Conclusioni e obiettivi futuri	37
Bibliografia	39

Abstract

In the framework of the European Project 19NRM07 HV-com² supporting the standardization in high voltage testing with composite and combined wave shapes, a divider to employ in a test setup for validation of electrical devices submitted to composite voltages below 1 kV has been developed at INRiM. After a simulation stage, an available divider has been modified to comply with the IEC 60060 requirements in terms of step response and of scale factor. To be fast in replying to step voltages, an adjustment of the components of the low voltage arm has been made. It has been calibrated with traceability to the relevant National Standards and characterized exploiting its scale factor at different voltages and frequencies. The divider was then inserted in a setup with a sinusoidal generator, an impulse generator, coupling and blocking elements and an acquisition system to carry out tests at low single voltages (below 1 kV). In these tests, the divider showed satisfactory attitude as converting device and a suitable uncertainty. Finally, the divider itself has been also submitted to composite voltage. Analyzing these last tests, it can be concluded that it is necessary to measure the composite waveform directly on the object under test otherwise the traceability of the test is not assured.

Sommario

Nell'ambito del progetto europeo 19NRM07 HV-com² che supporta la standardizzazione nelle prove di alta tensione con forme d'onda composite e combinate, è stato sviluppato presso l'INRiM un divisore da utilizzare in un circuito di prova per la validazione di dispositivi elettrici sottoposti a basse tensioni composite (inferiori a 1 kV). Dopo una fase di simulazione, un divisore disponibile è stato modificato per soddisfare i requisiti IEC 60060 in termini di risposta al gradino e fattore di scala. Per essere veloce nel rispondere al gradino di tensione, è stata effettuata una regolazione dei componenti del ramo di bassa tensione. È stato tarato con riferibilità ai campioni nazionali e caratterizzato valutandone il fattore di scala a diverse tensioni e frequenze. Il divisore è stato quindi inserito in un circuito con un generatore sinusoidale, un generatore di impulsi, elementi di accoppiamento e blocco e un sistema di acquisizione per effettuare prove a basse tensioni singole (minori di 1 kV). In questi test, il divisore ha mostrato un comportamento soddisfacente come dispositivo di conversione con adeguata incertezza. Infine, il divisore stesso è stato sottoposto a tensione composta. Analizzando quest'ultime prove si può concludere che è necessario misurare la forma d'onda composta direttamente sull'oggetto in prova, altrimenti non si garantisce la riferibilità della prova.

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 modifiche, bisogna pertanto verificare che gli elementi collegati alla rete abbiano caratteristiche adeguate a questo cambiamento. Per questo motivo è di vitale importanza che le apparecchiature della rete rispondano a requisiti prefissati [1]. Pertanto esse devono essere sottoposte a prove come l'applicazione di forme d'onda composite e combinate per verificare se resistono ai fenomeni elettrici come previsto dalle norme di prodotto e requisiti generali per misure di alta tensione [2, 3]. Ad esempio, trasformatori, sistemi isolati in gas o cavi di alta tensione sono frequentemente sottoposti a forme d'onda composite o combinate e quindi devono essere verificati per fenomeni quali prevalentemente impulsi di origine atmosferica (LI) o impulsi di manovra (SI) sovrapposti ad alte tensioni alternate o continue (HVAC, HVDC). Sfortunatamente, la normativa corrispondente è carente in quanto considera che i sistemi di misura e i divisori di tensione dei laboratori di prova siano adatti per tensioni composite e combinate anche solo mediante taratura separata rispetto a LI, SI, HVDC e HVAC. Poiché queste tensioni presumibilmente interferiscono a vicenda, la taratura di sistemi di misura rispetto a queste forme d'onda solo separatamente non garantisce che tali sistemi siano riferimenti corretti se sottoposti a tali tensioni simultaneamente. In questi casi la riferibilità delle forme d'onda potrebbe non essere corretta causando risultati di prova non validi. Poiché attualmente non ci sono campioni di riferimento e servizi di taratura per forme d'onda composite e combinate, le risultanti di queste forme d'onda devono essere studiate per ottenere sistemi di misura riferibili e riproducibili per validare i dispositivi elettrici quando sottoposti a tali forme d'onda. Il Comitato Tecnico 42 dell'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 il progetto europeo 19NRM07 HV-com² che ha come obiettivo la revisione della normativa per colmare le lacune ancora presenti.

2 Definizioni di tensioni composite e combinate

In [1–4] vengono fornite le definizioni delle tensioni composite e combinate rispetto al dispositivo a cui vengono applicate e una descrizione delle forme d'onda principali e delle configurazioni di prova per entrambe.

2.1. – Tensione composta

La [2] definisce la tensione composta 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 composta applicata ad uno dei suoi terminali.

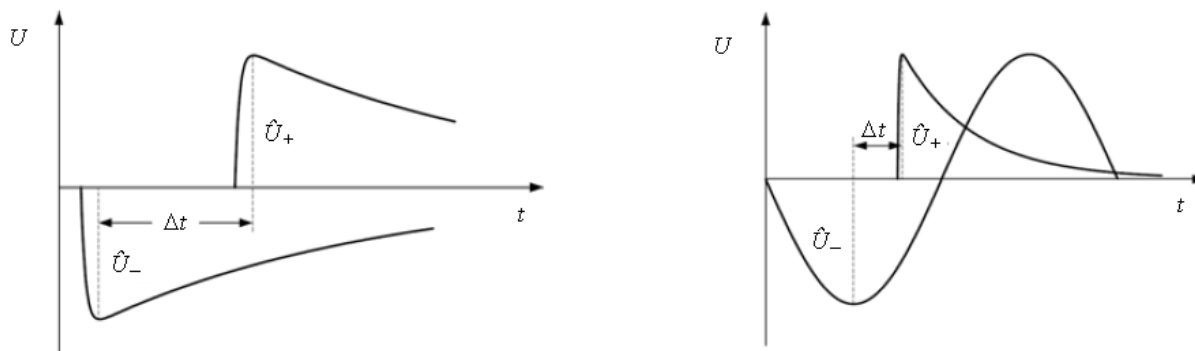


Fig. 1. Tensione composta con differenti forme d'onda, fonte [2].

In Fig. 1 sono presenti due composizioni di forme d'onda per la tensione composta. Il caso in esame è la composizione di una tensione sinusoidale ed un LI, dove l'origine dell'impulso si trova sul picco positivo della sinusoide. Tale composizione simula una condizione reale che avviene nella rete elettrica di alta tensione composta principalmente da conduttori non isolati, sospesi in aria al di sopra degli alberi per cui le scariche atmosferiche interagiscono con la rete. È quindi necessario che tutti gli oggetti collegati siano in grado di sopportare tali eventi senza comprometterne funzionamento e sicurezza. Le prove prevedono che l'oggetto in prova rispetti determinati vincoli: che non avvengano scariche tra i terminali (o che siano in numero limitato) e che non vengano compromessi sicurezza e corretto funzionamento dell'oggetto. Le richieste specifiche vengono stabilite dai Comitati Tecnici di competenza.

2.2. – Tensione combinata

La tensione combinata 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 prova può essere utilizzata per verificare, per esempio, l'isolamento fase-fase di un interruttore trifase o il sezionamento di un singolo polo. In Fig. 2 viene raffigurata una possibile forma d'onda di tensione combinata.

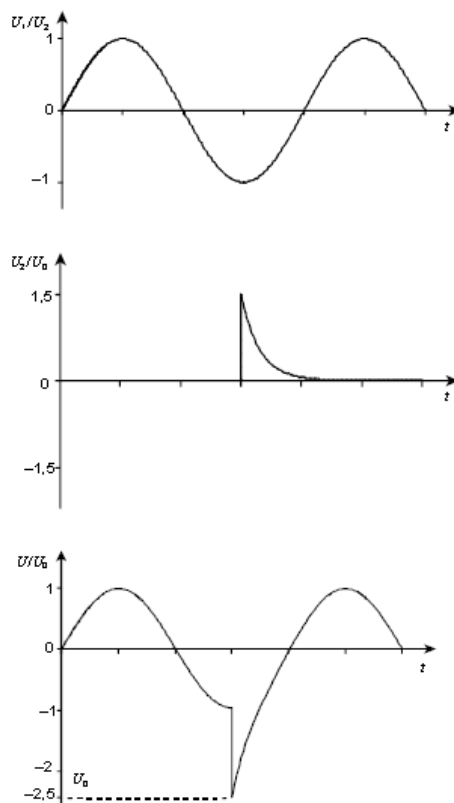


Fig. 2. Tensione combinata Fonte [2].

Per le prove di tensione sinusoidale o continua o impulsive sono ben definiti i parametri di interesse, mentre per le prove con tensioni composite e combinate non vengono definiti. Pertanto si suppone di caratterizzare le singole forme d'onda separatamente per poi studiare il fenomeno. I circuiti di prova per le tensioni composite e combinate, oltre agli oggetti in prova, prevedono l'utilizzo di due generatori, elementi di blocco ed accoppiamento, sistemi di conversione e strumenti di memorizzazione. Nella normativa non vengono fornite informazioni sugli elementi di blocco e accoppiamento e sugli elementi di protezione.

3 Ambito del lavoro svolto all'INRIM

Il progetto europeo 19NRM07 HV-com² prevede anche lo sviluppo di un circuito di prova per forme d'onda combinate e composite a tensioni inferiori a 1000 V per uno studio semplificato del problema. All'INRIM, in qualità di partner del progetto, l'attenzione è stata posta su quest'ultimo aspetto concentrandosi su prove con tensioni composite. Una sfida del progetto europeo prevede altresì: *"Saranno progettati e realizzati nuovi divisori di tensione di riferimento per tensioni sovrapposte"...."sarà progettato e costruito un divisore di tensione universale modulare (riferimento riferibile) per tarare sistemi di misura individuati per misurare forme d'onda composite e combinate"*. Un tale divisore non è attualmente disponibile. La specificità del lavoro all'INRIM è stata quindi la realizzazione di un prototipo di divisore adatto a misure di forme d'onda composite ai capi di un dispositivo in prova riproducendo al meglio le condizioni di lavoro di tali dispositivi o le condizioni in cui sono sottoposti nelle prove di validazione. Sono stati studiati il fenomeno e l'influenza degli elementi del circuito di prova sulla misura. In questa fase è stata utilizzata una configurazione a bassa tensione, come previsto dal progetto europeo, per eseguire prove e ricerche preliminari. Con queste prove è stata anche verificata e studiata la riferibilità del divisore rispetto ai Campioni Nazionali. Questi studi saranno utili per estendere la ricerca a un divisore che copra l'intera scala, in grado di dividere correttamente HVDC, HVAC, LI e SI simultaneamente. Il lavoro è consistito prima nello studio del problema tramite simulazione, poi nella scelta di un divisore da modificare per ottemperare alle caratteristiche richieste per la prova di impulso, a tensione continua e alternata.

4 Simulazione

La simulazione, mediante LT-spice, ha permesso di analizzare le possibili forme d'onda evidenziandone le criticità. 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. Nel nostro caso si volevano 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. 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.

4.1 – Fasi del processo di simulazione

Inizialmente si sono eseguite simulazioni con singolo generatore, prima con generatore sinusoidale e poi con quello impulsivo. In Fig. 3a e 3b si rappresentano i circuiti usati per la simulazione rispettivamente con generatore sinusoidale e poi con quello impulsivo.

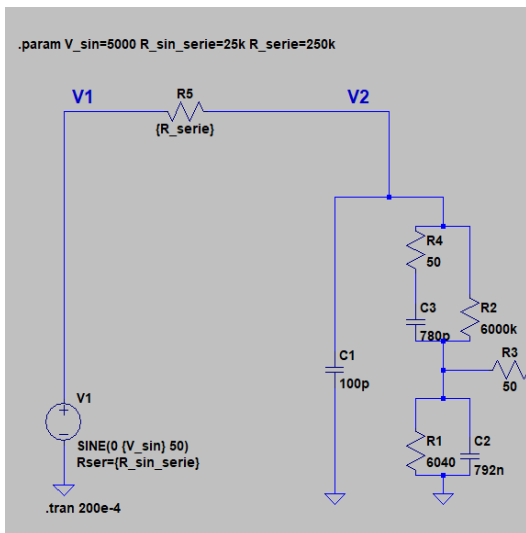


Fig. 3a. Circuito per simulazione con tensione sinusoidale

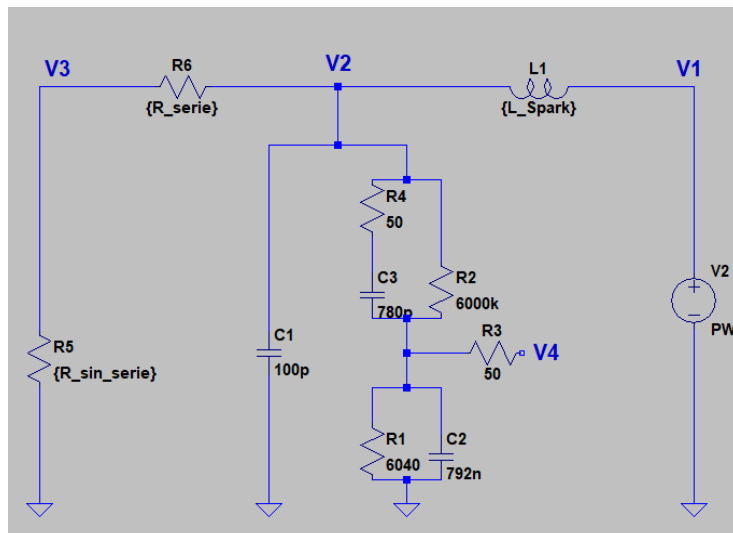


Fig. 3b. Circuito per simulazione con tensione impulsiva

Le Fig. 4 e 5 mostrano i risultati della simulazione con i due circuiti.

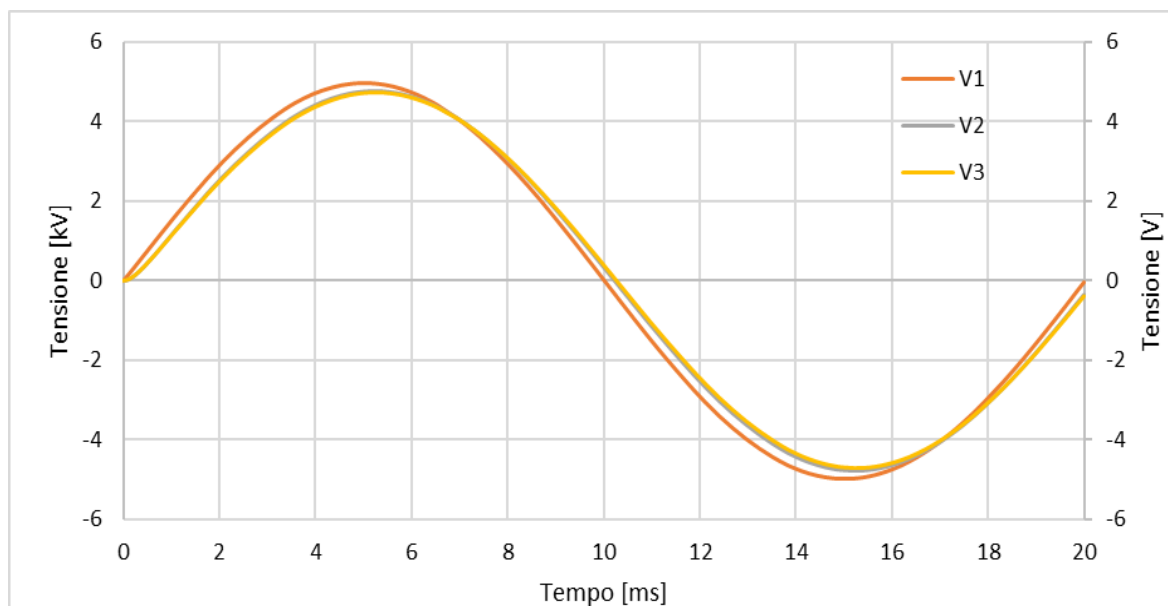


Fig. 4. Risultato della simulazione con tensione sinusoidale.

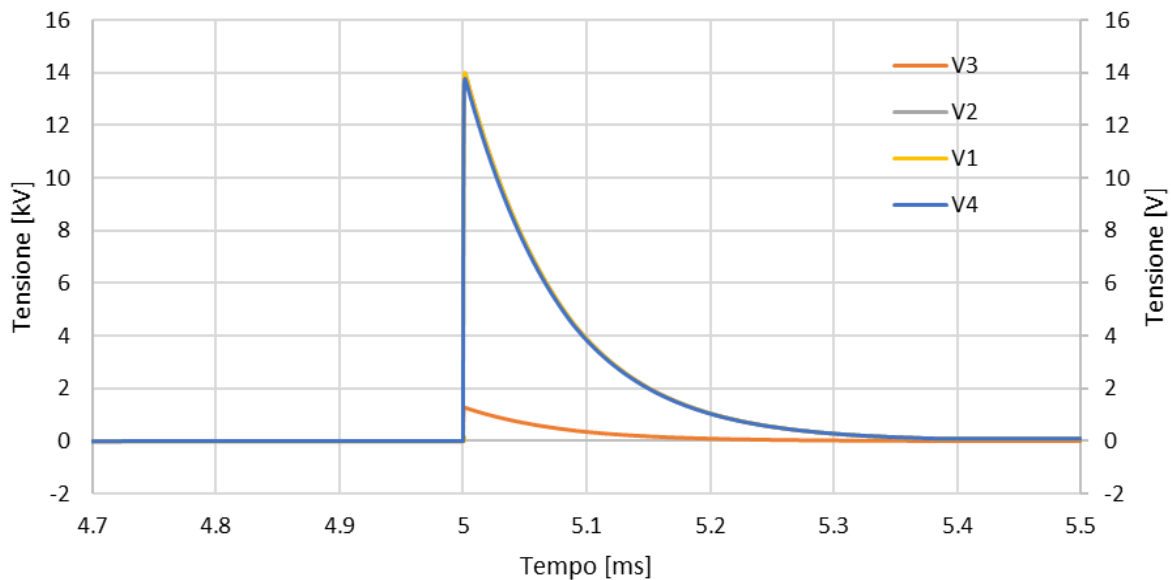


Fig. 5. Risultato della simulazione con tensione impulsiva.

La prima simulazione mostra come il divisore sia in grado di rappresentare correttamente fenomeni lenti come una sinusoide a 50 Hz. Anche per tensioni impulsive di origine atmosferica il divisore si comporta in modo ottimale sia per la risposta dinamica, che per il rapporto di divisione. Il divisore ha un comportamento pressoché ideale con rapporto di divisione invariante in frequenza.

4.2 – Simulazione con tensione composta

Per simulare una prova composta è stato emulato lo spinterometro attraverso un interruttore con una induttanza in serie, che rappresenta l'induttanza d'arco costante ed una capacità in parallelo, che rappresenta invece la capacità dello spinterometro a sfere. In Fig. 6 è rappresentato il circuito per la simulazione della prova di tensione composta, 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. La Fig. 7 mostra i risultati della simulazione. Si osserva che il divisore funziona correttamente e la tensione misurata ha rapporto 1000 rispetto alla tensione di prova in quanto le due tracce risultano sovrapposte. Il generatore di tensione impulsiva non risente della tensione sinusoidale, mentre il generatore sinusoidale ha impulso di dimensioni ridotte. Durante la prova, la tensione composta risulta pari alla sinusoide prima della generazione dell'impulso, segue l'impulso nel tratto di salita e nel primo tratto di discesa. Quando la tensione impulsiva scende al di sotto del

valore per mantenere l'arco, la tensione impulsiva e la tensione composita hanno andamenti differenti, la prima segue l'andamento dell'impulso ideale, mentre la seconda segue una evoluzione che la riporta alla tensione sinusoidale. Il risultato della simulazione del circuito di prova è conforme con quello auspicato, permettendo la realizzazione di un prototipo, a tensione ridotta, della prova di tensione composita. Il divisore risultava funzionare correttamente ed anche il comportamento degli elementi di blocco e accoppiamento soddisfaceva gli obiettivi prefissati. Si è proceduto quindi alla fase sperimentale del lavoro, partendo dalla scelta e taratura del divisore.

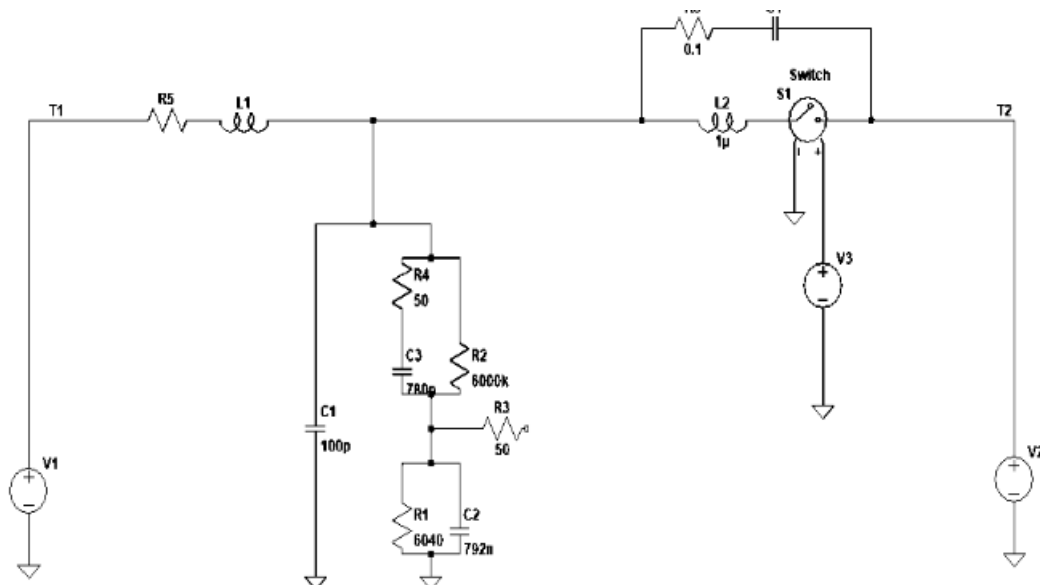


Fig. 6. Circuito per la simulazione della prova di tensione composita

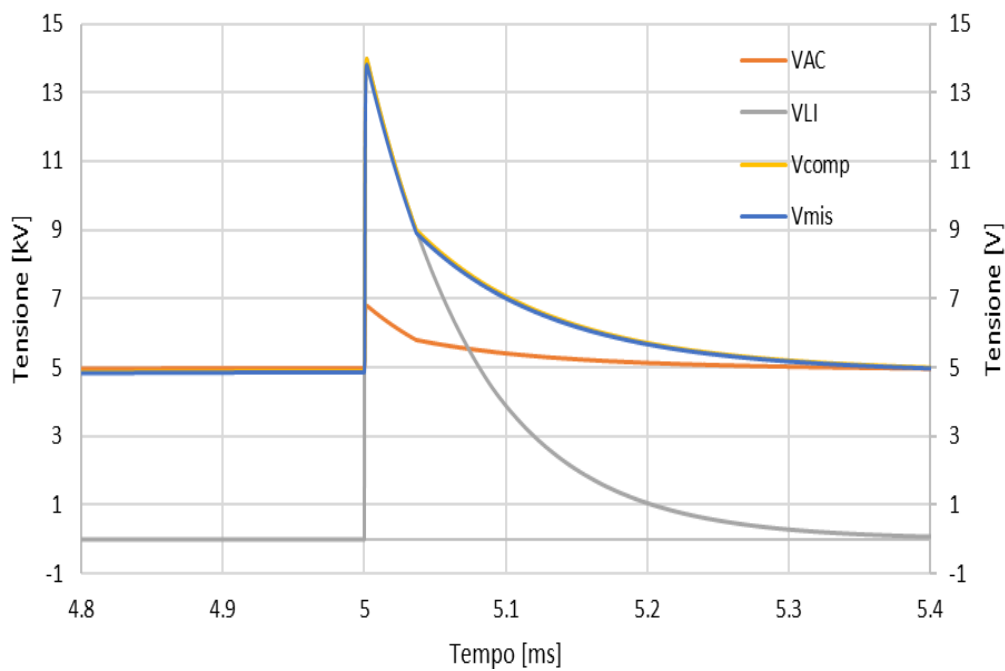


Fig. 7. Risultati della simulazione: V_{AC} è la tensione del generatore sinusoidale, V_{LI} è la tensione del generatore impulsivo, V_{comp} è la tensione composta sull'oggetto in prova, mentre V_{mis} è la tensione di uscita del divisore.

5 Divisore

I divisori di tensione hanno svolto e svolgono tuttora un ruolo strategico nella metrologia per le tensioni sia basse che alte sia continue [5–14], sia alternate [15–18] e impulsive [19–21]. In base alla simulazione, quale dispositivo di conversione del Laboratorio forti alte tensioni e correnti (LATFC) è stato scelto un divisore resistivo-capacitivo (partitore compensato).

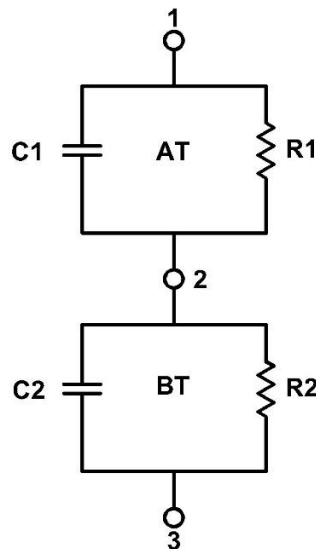


Fig. 8. Schema di divisore compensato.

Un partitore compensato è composto da un ramo di alta tensione ed uno di bassa tensione. Si collega il nodo 1, elettrodo di alta tensione, al punto dove si misura la tensione, il nodo 3 viene messo a terra. Lo strumento di misura si collega al nodo 2 di tensione del ramo di bassa tensione. Questi divisori sono impiegati nelle prove impulsive per le caratteristiche di divisione costanti in frequenza ed una risposta veloce per rappresentare correttamente fenomeni rapidi come gli impulsi di origine atmosferica. Il partitore è compensato se:

$$\frac{C_1}{C_1 + C_2} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} = 0 \quad (1)$$

Il divisore scelto è composto da un ramo di alta tensione isolato in olio Fig. 9a, ed uno di bassa tensione Fig. 9b che può essere sostituito per variare i rapporti di divisione. Originariamente si aveva il rapporto 200.



Fig. 9a. Divisore: ramo di alta tensione.



Fig. 9b. Divisore: ramo di bassa tensione.

In Fig. 10a, 10b e 10c si riportano rispettivamente: schema del ramo di alta tensione, vista interna dello stesso e lo schema del ramo di bassa tensione.

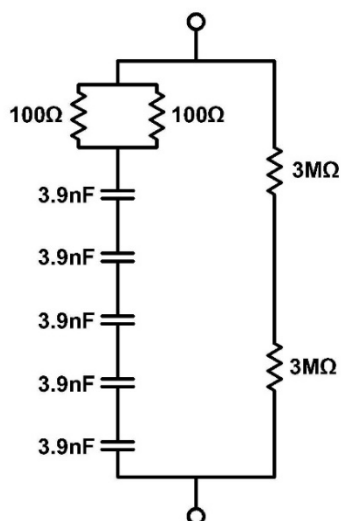


Fig. 10a. Schema circuitale ramo di alta tensione.

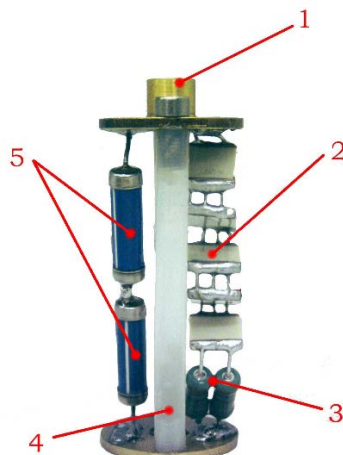


Fig. 10b. Lato AT: 1) Attacco per lato BT 2) Condensatori di ceramici 3) Resistenze ramo RC 4) Colonna isolante 5) Resistenze ramo resistivo.

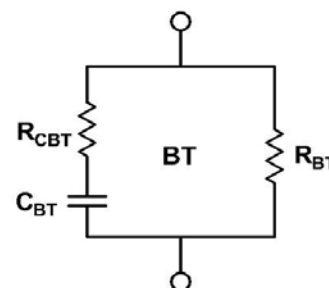


Fig. 10c. Schema del ramo di bassa tensione del divisore.

Lo schema circuitale del ramo di bassa tensione è composto da una resistenza $R_{BT}= 30,15 \text{ k}\Omega$, 15 condensatori da 10 nF ed un condensatore da 2,2 nF, in parallelo tale che $C_{BT}= 152,2 \text{ nF}$, 15 resistenze da 3,9 Ω e una da 1,9 Ω , in parallelo tale che $R_{CBT}=0,2287 \text{ }\Omega$.

6 Modifiche al divisore originale

Le modifiche al divisore sono state dettate dalle esigenze di taratura dello stesso. Nella [2] si è seguito il metodo alternativo per tarare il dispositivo di conversione che prevede la determinazione della risposta al gradino e la misura del fattore di scala. Le modifiche sono pertanto state fatte allo scopo che il divisore modificato soddisfacesse ai criteri previsti dalla norma.

6.1 – Risposta al gradino

La [2] definisce le caratteristiche che un sistema di misura deve avere per poter essere considerato di riferimento. Una di queste prevede la misura della risposta al gradino mediante un generatore di gradino che realizza la forma d'onda grazie ad un interruttore al mercurio che evita gli effetti di rimbalzo dei contatti dell'interruttore e i rimbalzi di tensione. La prova si esegue allo scopo di testare il comportamento dinamico del divisore e prevede di sottoporre al gradino il divisore e se ne registra la risposta. La misura viene normalizzata al valore 1 e definita risposta unitaria al gradino $g(t)$. In

Tabella 1 sono riportati i valori raccomandati [2] dei parametri ottenuti dalla risposta al gradino di sistemi di misura per tensioni impulsive.

Tabella 1 - Parametri raccomandati della risposta al gradino per sistemi di misura di riferimento

<i>Tensioni</i>	<i>Impulsi atmosferici completi e tagliati in coda</i>	<i>Impulsi atmosferici tagliati sul fronte</i>	<i>Impulsi di manovra</i>
T_N	≤ 15 ns	≤ 10 ns	-
t_s	≤ 200 ns	≤ 150 ns	≤ 10 μ s
T_α	≤ 30 ns	≤ 20 ns	-

Dove T_N , t_s e T_α sono rispettivamente: il tempo di risposta sperimentale corrispondente al valore dell'integrale $T(t)$ di $g(t)$ con la risposta al gradino a regime, il tempo di assestamento e il tempo di risposta parziale corrispondente al massimo valore della risposta integrale. Per queste prove è stato realizzato un programma in LabVIEW. In Fig. 11 e 12 sono visibili rispettivamente le risposte al gradino di $g(t)$ ed integrale $T(t)$ del divisore prima delle modifiche. Rispetto alle condizioni ideali il divisore risultava "lento" in quanto arrivava a regime in più di 200 ns. Tale risposta al gradino non rappresenta un andamento impulsivo in modo corretto. In Tabella 2 sono riportati i parametri risposta al gradino del divisore pre-modifica e i valori raccomandati.

Tabella 2 - Parametri risposta al gradino del divisore pre-modifica

<i>Parametro</i>	T_N	t_s	β	T_α
Ottenuto	70.05 ns	220 ns	0.6717	70.15 ns
Raccomandato	≤ 15 ns	≤ 200 ns		≤ 30 ns

Sono state apportate quindi diverse modifiche al divisore allo scopo di migliorarne la risposta al gradino. La configurazione finale del divisore modificato riporta i parametri di Tabella 3.

Tabella 3 - Parametri risposta al gradino del divisore modificato

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

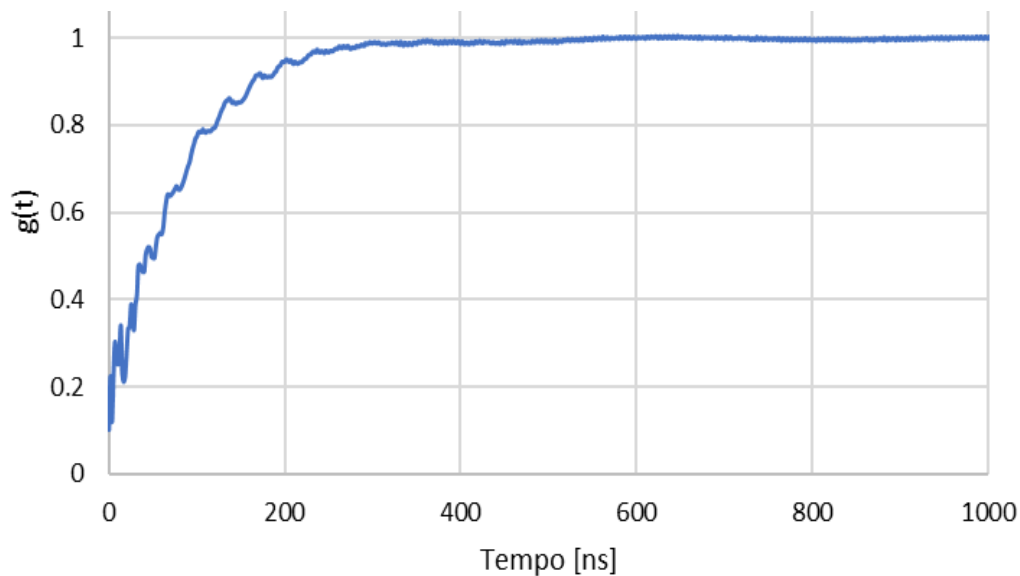


Fig. 11. Andamento della funzione $g(t)$ normalizzata a 1 del divisore originale.

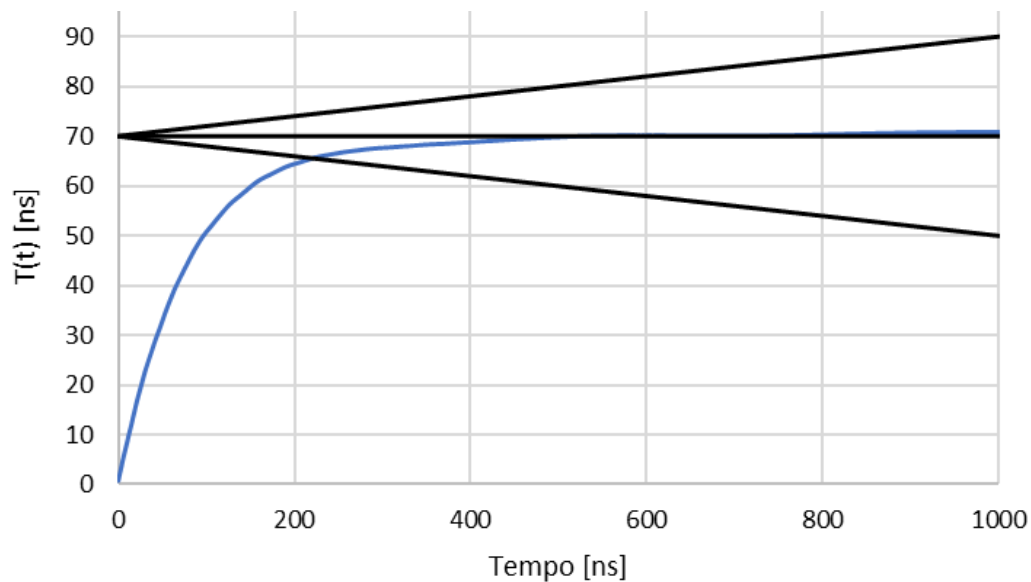


Fig. 12. Andamento della funzione $T(t)$ del divisore originale.

In Fig. 13 si può osservare il confronto della funzione $g(t)$ del divisore originale (arancio) e dopo le modifiche (blu). Il divisore dopo l'ultima modifica ha una variazione più rapida rispetto all'originale, migliorando la risposta a fenomeni transitori.

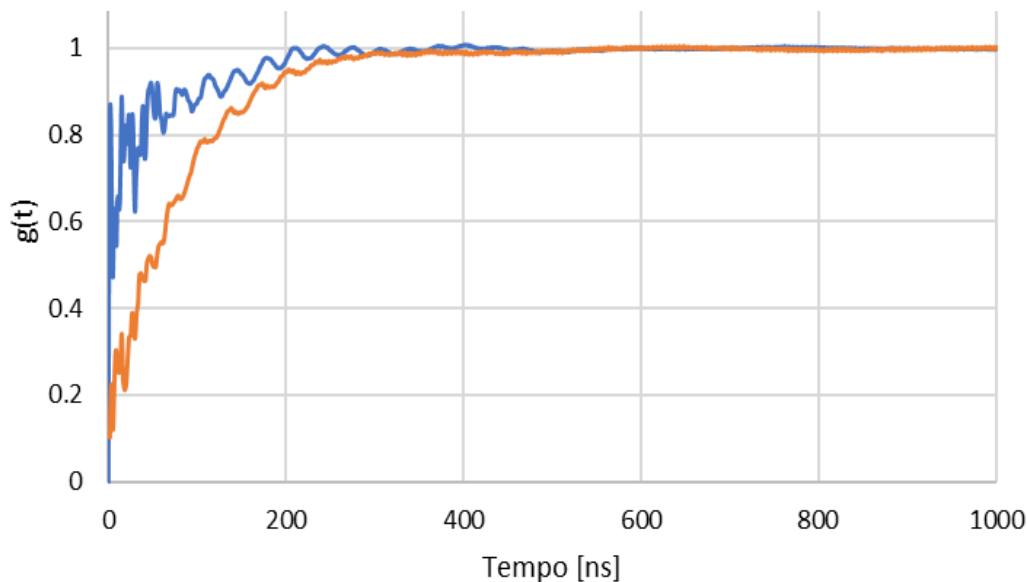


Fig. 13. Confronto $g(t)$ del divisore: pre-modifica (arancio) modificato(blu).

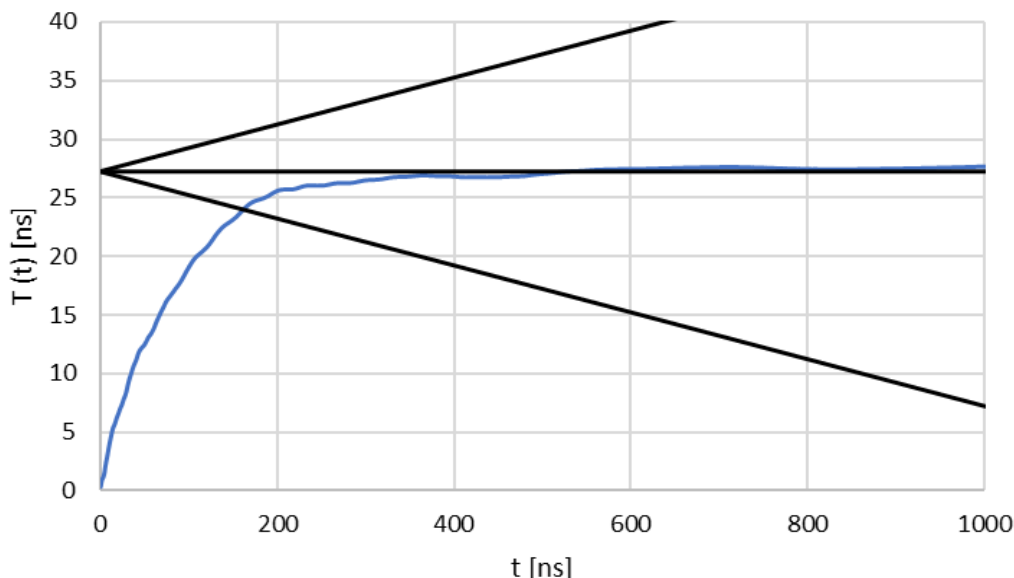


Fig. 14. $T(t)$ del divisore modificato.

6.2 – Misura del fattore di scala

Il fattore di scala F del divisore è il numero che moltiplicato per l'uscita del dispositivo V_{div} (tensione) fornisce il valore di ingresso incognito V_{mis} [2]:

$$V_{mis} = V_{div} \times F \quad (2)$$

Il fattore di scala si determina mediante taratura con due metodi alternativi. Col metodo del confronto, il fattore di scala di un sistema di misura si ottiene per confronto con un sistema di misura di riferimento collegando in parallelo i due sistema di misura. Il fattore di scala F si ottiene come

media dei fattori di scala alle diverse tensioni. La taratura del fattore di scala del divisore modificato è stata effettuata mediante metodo del rapporto di tensioni con il circuito di misura di Fig. 15 sia in tensione continua che alternata da 20 Hz a 200 kHz. Per la misura sono stati utilizzati un calibratore J. Fluke 5502E e un multimetro digitale (DMM) HP 34401A rispettivamente per fornire la tensione di alimentazione e per misurare la tensione all'uscita del divisore.

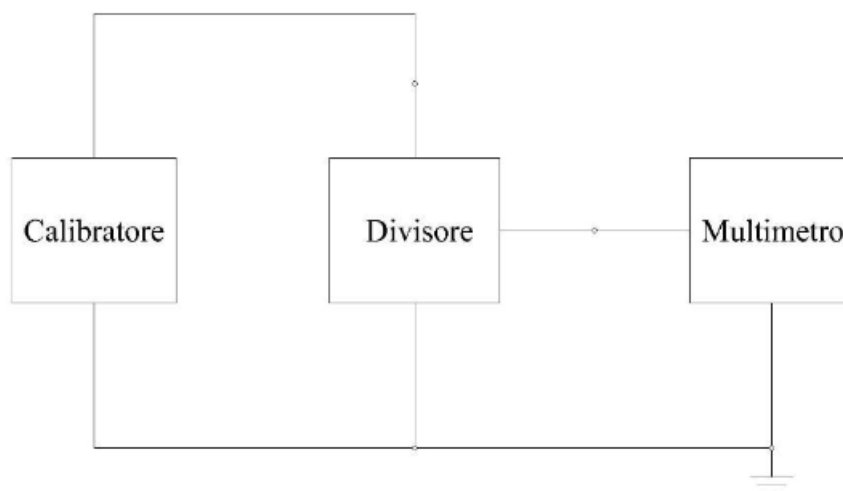


Fig. 15. Schema di collegamento per la misura del fattore di scala.

Si ripete la procedura n volte per ottenere il valore medio F_g del fattore di scala ad una determinata tensione. Il procedimento si esegue per differenti tensioni U_g ottenendo la linearità del fattore di scala. Il valore del fattore di scala F si ottiene come valore medio di tutti i fattori di scala F_g per h livelli di tensione:

$$F = \frac{1}{h} \sum_{g=1}^h F_g \quad h \geq 5 \quad (3)$$

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

$$u_{B0} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left| \frac{F_g}{F} - 1 \right| \quad (4)$$

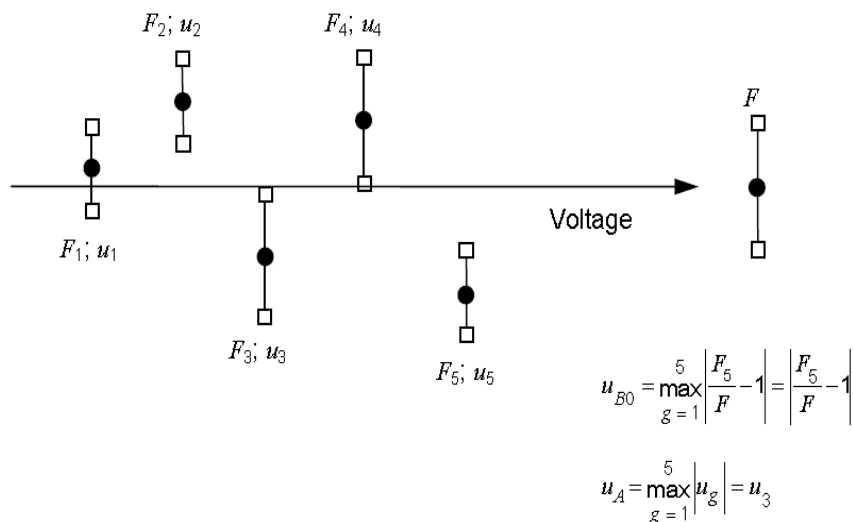


Fig. 16. Contributo all'incertezza di taratura [2].

6.3 – Comportamento dinamico e determinazione della risposta ampiezza/frequenza

Il comportamento dinamico del divisore viene anche studiato mediante la risposta ampiezza/frequenza. Il sistema viene sottoposto ad una tensione sinusoidale di valore noto 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. In Fig. 17 si riporta l'andamento ampiezza/frequenza. Il fattore di scala è circa 193 per la tensione continua, mentre salendo di frequenza si ha un valore di circa 188.

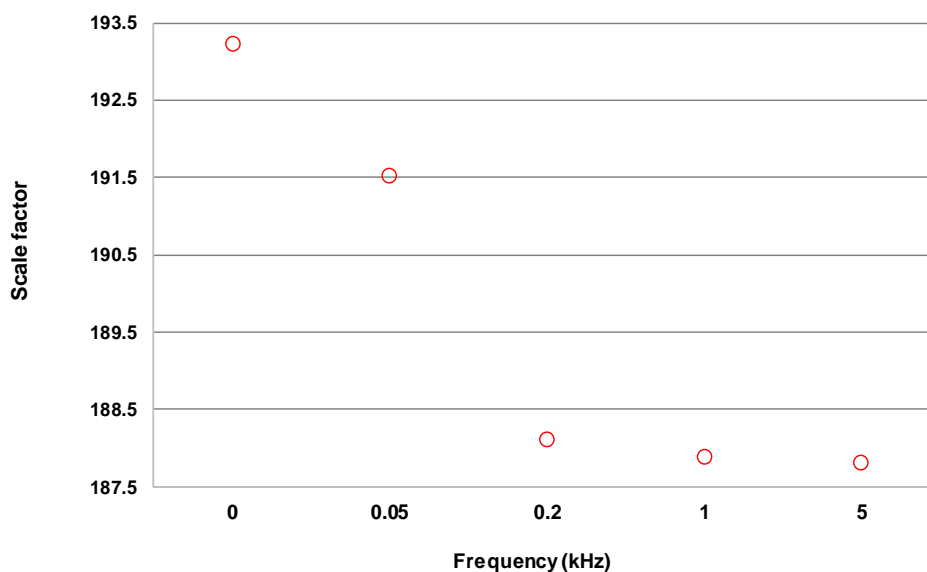


Fig. 17. Risposta ampiezza/frequenza del divisore.

Il fattore di divisione medio F ottenuto nel nostro caso è stato 189.7. Lo scostamento del fattore di scala nel caso di tensione continua risultava superiore all'1%:

$$\text{scostamento \%} = \frac{193.2 - 189.7}{189.7} \times 100 = 1.85\% \quad (5)$$

Siccome l'utilizzo nelle prove di tensione composita richiede un'ampia gamma di frequenze, lo scostamento del fattore di scala deve essere inferiore all'1%. Pertanto è stato necessario effettuare ulteriori modifiche al divisore, per avere un andamento migliore della risposta in frequenza. È stato modificato il ramo resistivo del lato di bassa tensione del divisore. La resistenza, misurata con il multimetro, 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 $F = 188$ per avvicinarci il più possibile al valore in alta frequenza dove prevale l'effetto capacitivo, mentre in tensione continua le capacità non influenzano la misura. Il fattore di scala per la tensione continua è:

$$F = \frac{R_{AT} + R_{BT2}}{R_{BT2}} \quad (6)$$

$$\text{Per cui: } R_{BT2} = \frac{R_{AT}}{F-1} = 32.12 \text{ k}\Omega \quad (7)$$

$$\text{Per cui bisognava aumentare la resistenza di: } \Delta R = R_{BT2} - R_{BT} \cong 800 \Omega \quad (8)$$

Dopo aver eseguito la modifica è stato verificato che la risposta al gradino non si fosse modificata. Successivamente è stata eseguita una nuova taratura del fattore di scala nelle stesse condizioni utilizzate prima della modifica. In Fig. 18 si riporta l'andamento ampiezza/frequenza del divisore ulteriormente modificato. Nella medesima figura i valori di F sono compresi delle barre d'incertezza pari ad un intervallo di fiducia del 95 %. In questo caso lo scostamento del fattore di scala nel caso di tensione continua risultava inferiore all'1%:

$$\text{scostamento \%} = \frac{188.72 - 187.45}{187.45} \times 100 = 0.68\% \quad (9)$$

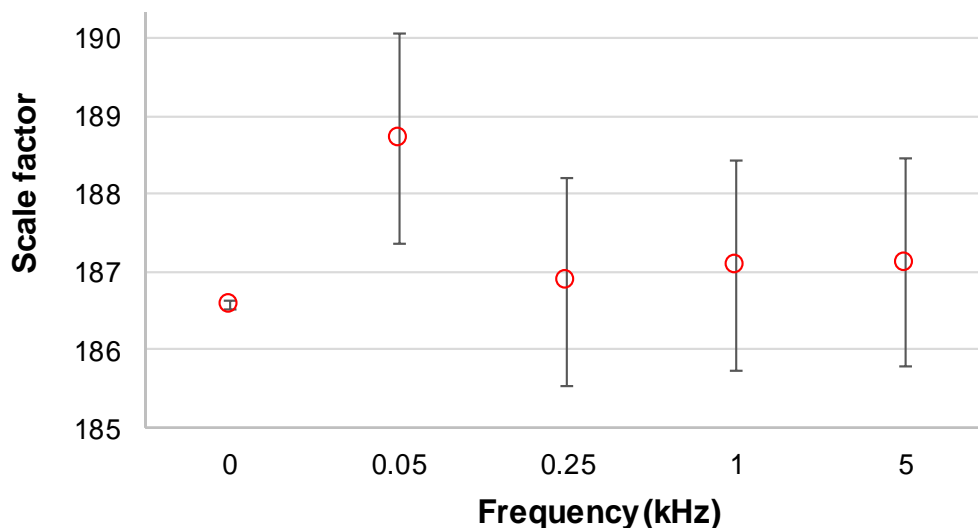


Fig. 18. Risposta ampiezza/frequenza del divisore dopo l'ultima modifica.

Per completare la taratura, si è effettuata la misura del fattore di scala per più tensioni, e per ognuna ad una gamma di frequenze più ampia. In Fig. 19 si riporta il comportamento del fattore di scala rispetto alla tensione. In questa figura ogni punto è la media dei valori del fattore di scala alle frequenze: DC, 50 Hz, 75 Hz, 100 Hz, 200 Hz, 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz, 5 kHz, 10 kHz, 20 kHz, 50 kHz, 100 kHz e 200 kHz.

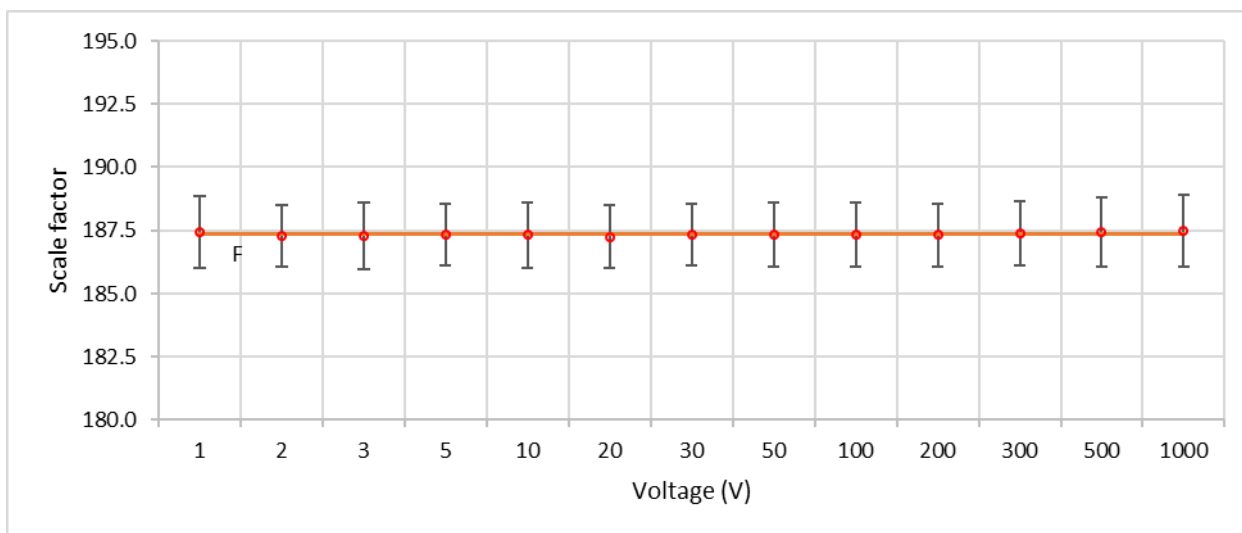


Fig. 19. Dipendenza del fattore di scala del divisore rispetto alla tensione dopo l'ultima modifica.

Si è ritenuto il fattore di scala pressoché costante al variare della tensione e della frequenza, poiché tutte le variazioni rientrano nel limite di 1% ritenuto accettabile.

6.3 – Divisore definitivo.

In Fig. 20a e 20b si riportano rispettivamente schema e foto della versione finale del ramo di bassa tensione del divisore. In Fig. 21 si riporta invece la foto dell'intero divisore in configurazione finale.

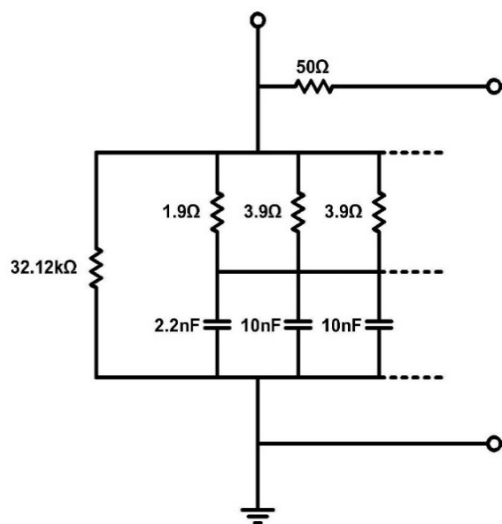


Fig20a. Schema del lato di bassa tensione del divisore. $R_{BT}=32.12 \text{ k}\Omega$.
 $C_{BT}=15 \times 10 \text{ nF} + 1 \times 2.2 \text{ nF} = 152.2 \text{ nF}$.
 $R_{CBT} = 0.388 \Omega$

Fig. 20b. Ramo di bassa tensione del divisore. In blu i condensatori in polipropilene, in nero i resistori in serie per R_{BT} , in azzurro con righe trasversali i resistori in serie alle capacità. Due dischi forati di metallo creano il cortocircuito per mettere i dispositivi in parallelo.



Fig. 21. Foto del divisore nella configurazione finale.

7 Incertezza di taratura del fattore di scala del divisore

Poiché uno degli obiettivi del progetto europeo 19NRM07 HV-com² è: “*the determination of the uncertainty of the existing voltage dividers and measurement systems*” sono discussi due esempi di valutazione dell'incertezza, secondo [23] di taratura del fattore di scala del divisore, uno per la tensione continua l'altro per la tensione alternata. Il modello di misura può essere scritto come:

$$F = \frac{V_{cal_acc} + V_{cal_cal}}{V_{DMM_acc} + V_{DMM_cal}} r \quad (10)$$

Dove:

- $F(\cong 188.6)$ è il fattore di scala del divisore;
- V_{cal_acc} è la tensione fornita dal calibratore ($\cong 1000$ V) il cui scarto tipo corrisponde alle specifiche ad un anno del calibratore;
- V_{cal_cal} è un valore additivo di tensione ($\cong 0$ V) il cui scarto tipo si ottiene dal certificato di taratura del calibratore;
- V_{DMM_acc} è la tensione misurata dal multimetro ($\cong 5$ V) il cui scarto tipo corrisponde alle specifiche ad un anno del multimetro;
- V_{DMM_cal} è un valore additivo di tensione ($\cong 0$ V) il cui scarto tipo si ottiene dal certificato di taratura del multimetro;
- $r \cong 1$ è un fattore correttivo delle misure di rapporto di tensione la cui incertezza tipo è lo scarto tipo della media delle r misure. L'incertezza tipo di F è:

$$u^2(F) = \left(\frac{r}{V_{DMM_acc} + V_{DMM_cal}} \right)^2 [u^2(V_{cal_acc}) + u^2(V_{cal_cal})] + \left(\frac{r(V_{cal_acc} + V_{cal_cal})}{-(V_{DMM_acc} + V_{DMM_cal})^2} \right)^2 [u^2(V_{DMM_acc}) + u^2(V_{DMM_cal})]^2 + \left(\frac{V_{cal_acc} + V_{cal_cal}}{V_{DMM_acc} + V_{DMM_cal}} \right)^2 u^2(r) \quad (11)$$

semplificata in:

$$u^2(F) = \left(\frac{1}{5V} \right)^2 [u^2(V_{cal_acc}) + u^2(V_{cal_cal})] + \left(\frac{1000V}{-5V^2} \right)^2 [u^2(V_{DMM_acc}) + u^2(V_{DMM_cal})]^2 + (186^2 u^2(r)) \quad (12)$$

dove: $c_1 = \frac{r}{V_{DMM_acc} + V_{DMM_cal}}$, $c_2 = \frac{r(V_{cal_acc} + V_{cal_cal})}{-(V_{DMM_acc} + V_{DMM_cal})^2}$ e $c_3 = \frac{V_{cal_acc} + V_{cal_cal}}{V_{DMM_acc} + V_{DMM_cal}}$
sono i coefficienti di sensibilità rispettivamente di V_{cal_acc} , $V_{cal_cal}(c_1)$; V_{DMM_acc} , $V_{DMM_cal}(c_2)$ e $r(c_3)$.

In Tabelle 4 e 5 sono riportati rispettivamente i budget di incertezza per la taratura del fattore di scala del divisore a 1000 V in tensione continua e a 1000 V a 5 kHz in tensione alternata.

Tabella 4 - Budget d'incertezza per la taratura del fattore di scala del divisore in tensione continua a 1000 V

Grandezza	Stima	$u(x_i)$	Tipo	c_i	$u_i(F)$	ν_i
V_{cal_acc}	$\cong 1000$ V	56,5 mV [24]	B	$\cong 0,2$ V ⁻¹	$6,1 \times 10^{-3}$	$\cong \infty$
V_{cal_cal}	$\cong 0$ V	10 mV	B	$\cong 0,2$ V ⁻¹	$1,1 \times 10^{-3}$	$\cong \infty$
V_{DMM_acc}	$\cong 5,36$ V	225 μ V [25]	B	-186,6 V ⁻¹	$2,4 \times 10^{-2}$	$\cong \infty$
V_{DMM_cal}	$\cong 0$ V	13 μ V	B	-186,6 V ⁻¹	$1,4 \times 10^{-3}$	$\cong \infty$
r	$\cong 1$	$7,4 \times 10^{-17}$	A	186,6	$1,4 \times 10^{-14}$	17
$F(y)$	186,6			$u(F)$	$1,3 \times 10^{-4}$	$\nu_{eff} \cong \infty$
$F(y)$	186,6			$U(F)$	$2,7 \times 10^{-4}$	$k \cong 1,96$

Tabella 5 - Budget d'incertezza per la taratura del fattore di scala del divisore in tensione alternata a 1000 V 5 kHz

Grandezza	Stima	$u(x_i)$	Tipo	c_i	$u_i(F)$	ν_i
V_{cal_acc}	$\cong 1000$ V	0,92 V [22]	B	$\cong 0,2$ V ⁻¹	$9,9 \times 10^{-2}$	$\cong \infty$
V_{cal_cal}	$\cong 0$ V	35 mV	B	$\cong 0,2$ V ⁻¹	$3,8 \times 10^{-3}$	$\cong \infty$
V_{DMM_acc}	$\cong 5,38$ V	5,5 mV [25]	B	-186,0 V ⁻¹	$5,9 \times 10^{-1}$	$\cong \infty$
V_{DMM_cal}	$\cong 0$ V	27 μ V	B	-186,0 V ⁻¹	$2,9 \times 10^{-3}$	$\cong \infty$
r	$\cong 1$	$2,4 \times 10^{-6}$	A	186,0	$4,5 \times 10^{-4}$	17
$F(y)$	186,0			$u(F)^b$	$3,2 \times 10^{-3}$ ¹	$\nu_{eff}=153$
$F(y)$	186,0			$U(F)^d$	$6,4 \times 10^{-3}$	$k \cong 2$

Il trattamento può essere semplificato mediante le due tabelle seguenti.

¹ Questo valore si ottiene dalla radice quadrata della somma quadratica delle componenti $u_i(F)$, normalizzata al valore di F.

Tabella 6 - Budget semplificato per la taratura del fattore di scala in tensione continua a 1000 V.

Componente	Tipo	$1 \delta (\times 10^{-3})$
Accuratezza del calibratore	B	6,1
Taratura del calibratore	B	1,1
Accuratezza del multimetro	B	24
Taratura del multimetro	B	1,4
Ripetibilità delle misure	A	Negl.
Incertezza tipo		0,14 ²
Incertezza estesa		0,27

Tabella 7 - Budget semplificato per la taratura del fattore di scala in tensione alternata a 1000 V 5 kHz.

Componente	Tipo	$1 \delta (\times 10^{-3})$
Accuratezza del calibratore	B	99
Taratura del calibratore	B	3,8
Accuratezza del multimetro	B	590
Taratura del multimetro	B	29
Ripetibilità delle misure	A	0,45
Incertezza tipo		3,2 ²
Incertezza estesa		6,4

Le maggiori componenti sono dovute all'accuratezza degli strumenti. Tuttavia, le componenti dovute alla ripetibilità delle misure e alla taratura degli strumenti non sono da considerare sempre trascurabili, per lo più in punti critici di misura per gli strumenti stessi e per strumenti di minore accuratezza. Il valore di F si ottiene secondo [3] mediandone i valori alle varie tensioni. Le incertezze di tipo A e di tipo B devono essere valutate rispettivamente mediante la deviazione standard della media delle misure di F e mediante la non linearità alle diverse tensioni. Dai risultati delle Tabelle 4-7 si può concludere che il fattore di scala del divisore INRiM ha un'incertezza d'uso [26], anche includendo le componenti di incertezza della valutazione del valore medio, rientrante nel limite richiesto dalle norme ($\leq 1\%$). Il comportamento dinamico con forme d'onda di tensione ad alta frequenza è già considerato nell'analisi della risposta al gradino. I bassi valori nel tempo di risposta del divisore consentono di considerarne l'incertezza come nella caratterizzazione in frequenza secondo [2].

² Questo valore si ottiene dalla radice quadrata della somma quadratica delle componenti $u_i(F)$, normalizzata al valore di F .

8 Prestazione del divisore

Come primo passo, è stata verificata l'affidabilità del divisore in circuiti di prova con generatori di tensione sinusoidale o impulsiva, elementi di accoppiamento e blocco e una scheda di acquisizione dati. In Fig. 22 i componenti utilizzati.

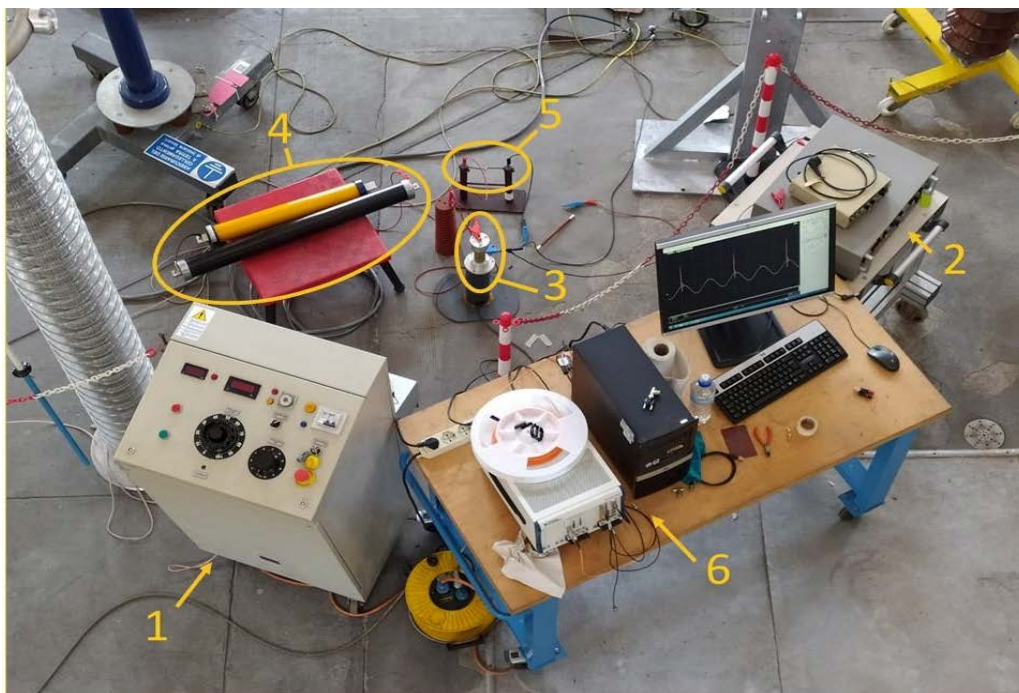


Fig. 22. Elementi del circuito di prova: 1). Generatore HVAC AME; 2). Generatore LI Haefely 481; 3). Divisore; 4). Filtro resistivo; 5). Spinterometro a sfere; 6). Computer e dispositivo di acquisizione dati.

L'impianto di prova è stato installato nel laboratorio di Alta Tensione del LATFC, alla cui struttura hanno accesso solo persone autorizzate. La [27] prescrive che per prevenire lo shock elettrico bisogna identificare la zona inibita, che nel nostro caso con tensione inferiore a 1 kV corrisponde alla superficie delle parti attive. La sicurezza è stata garantita impedendo l'accesso all'area di prova da una distanza dall'oggetto in prova e da una catena per ricordare all'operatore di effettuare le operazioni di messa in sicurezza prima di accedere all'area di prova.

8.1 – Generatori di tensione

Il generatore di tensione sinusoidale è un generatore della Accessori Macchine Elettriche (AME) che eroga tensione sinusoidale variabile fino valore efficace di 15 kV. È possibile regolare la tensione 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 alimenta un trasformatore consentendo 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. L'elemento da proteggere è l'avvolgimento del trasformatore interno al generatore, quindi bisogna evitare che la tensione impulsiva superi la tensione di isolamento dell'avvolgimento. Ogni parametro del generatore di tensione impulsiva Haefely 481 può essere regolato per variare la forma d'onda in funzione del circuito a cui viene collegato il generatore. Se non fossero sufficienti gli elementi interni al generatore, è possibile collegare elementi scelti dall'operatore a dei morsetti esterni. La Fig. 23 rappresenta lo schema del generatore impulsivo.

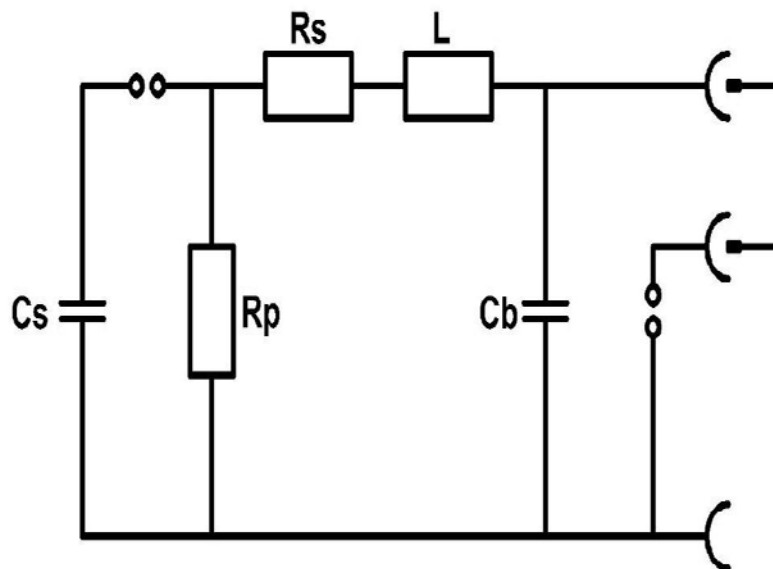


Fig. 23. Schema circuitale del generatore ad impulsi

Se l'uscita del generatore viene collegata direttamente ad una tensione sinusoidale, il generatore annulla la semionda negativa ed aumenta la semionda positiva per cui è necessario un filtro all'uscita del generatore che impedisca ad una tensione negativa di entrare all'interno del circuito. Il generatore di tensione impulsiva deve essere quindi collegato al circuito di prova nell'istante in cui viene erogata tensione e separato nuovamente quando la tensione diminuisce, per cui è stato usato lo spinterometro a sfere quale elemento di blocco.

8.2 – Elementi di blocco e accoppiamento

L'elemento di blocco per salvaguardare il generatore di tensione sinusoidale scelto in fase di simulazione era un filtro da 250 k Ω . Per il circuito in laboratorio era disponibile un resistore di alta potenza da 20 k Ω (Fig. 22 n.4) con il quale la cui caduta di tensione impulsiva ai capi era sufficiente a proteggere il generatore di tensione in quanto la resistenza interna al generatore ipotizzata in fase di simulazione era maggiore rispetto alla realtà. Data la bassissima tensione, quale elemento di blocco e protezione per il generatore d'impulso è stato scelto lo spinterometro con il diametro delle sfere in ottone più piccolo possibile. È stata effettuata manutenzione e affacciate le due sfere diagonalmente, poiché longitudinalmente le due sfere erano erose per effetto dell'arco elettrico. Queste abrasioni, unite alla bassissima tensione impiegata, impedivano l'innesco dell'arco perché aumentavano la distanza tra le sfere. Queste sono state distanziate con uno spessimetro di 50 μm . In questo modo l'arco innescava ma si estingueva prematuramente, compromettendo la prova. Per evitare ciò è stata introdotta una induttanza aggiuntiva, sia all'interno del generatore di tensione impulsiva, sia una induttanza avvolta in aria da 10 μH che sommata ai 100 μH del generatore consentivano di sostenere l'arco per il tempo della prova. In Fig. 24a e 24b sono visibili rispettivamente lo spinterometro dopo la manutenzione e l'induttanza aggiuntiva.



Fig. 24a. Spinterometro a sfere dopo la manutenzione



Fig. 24b. Induttanza aggiuntiva da 10 μH

8.3 – Dispositivo di misura

Per acquisire i dati era disponibile uno Chassis PXIexpress National Instruments, Fig. 25. Per acquisire la tensione in uscita dal divisore erano disponibili due schede: NI PXI-5105 slot 6 e NI PXI-5122 slot 8. La NI PXI-5105 è a 8 canali, 12 bit e 60 MS/s per acquisire dati simultaneamente da più dispositivi di conversione come nelle prove a tensione composita. Per collegare lo Chassis al pc sono state installate due schede di comunicazione, una nel pc ed una nello slot 1 dello Chassis.



Fig. 25. Chassis PXIexpress National Instruments

9 Prove di tensione composita

9.1 – Prove di tensione “singole”

Per sviluppare un divisore adatto per tensioni composite, in una prima fase, è stata effettuata la verifica dell'affidabilità del divisore come dispositivo di conversione quando sottoposto a singole forme d'onda. In Fig. 26 e 27 sono riportate le forme d'onda misurate all'uscita del divisore e fornite rispettivamente dal generatore sinusoidale e dal generatore di impulsi senza gli elementi di blocco e accoppiamento. La forma d'onda di tensione sinusoidale a 50 Hz misurata dal divisore ha valore efficace 100 V e ampiezza 140 V. Il divisore riproduce correttamente la forma d'onda sinusoidale. In Fig. 27 è stato verificato come il divisore risponde ad un impulso conforme alla norma. Anche in questo caso il divisore riproduce correttamente la forma d'onda.

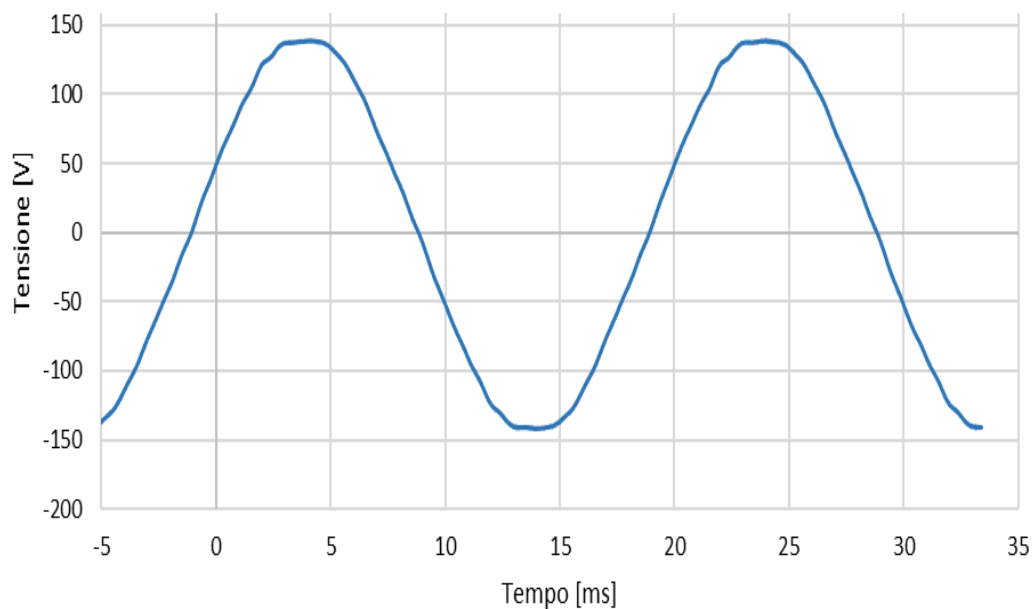


Fig. 26. Forma d'onda della sola tensione sinusoidale misurata ai capi del divisore.

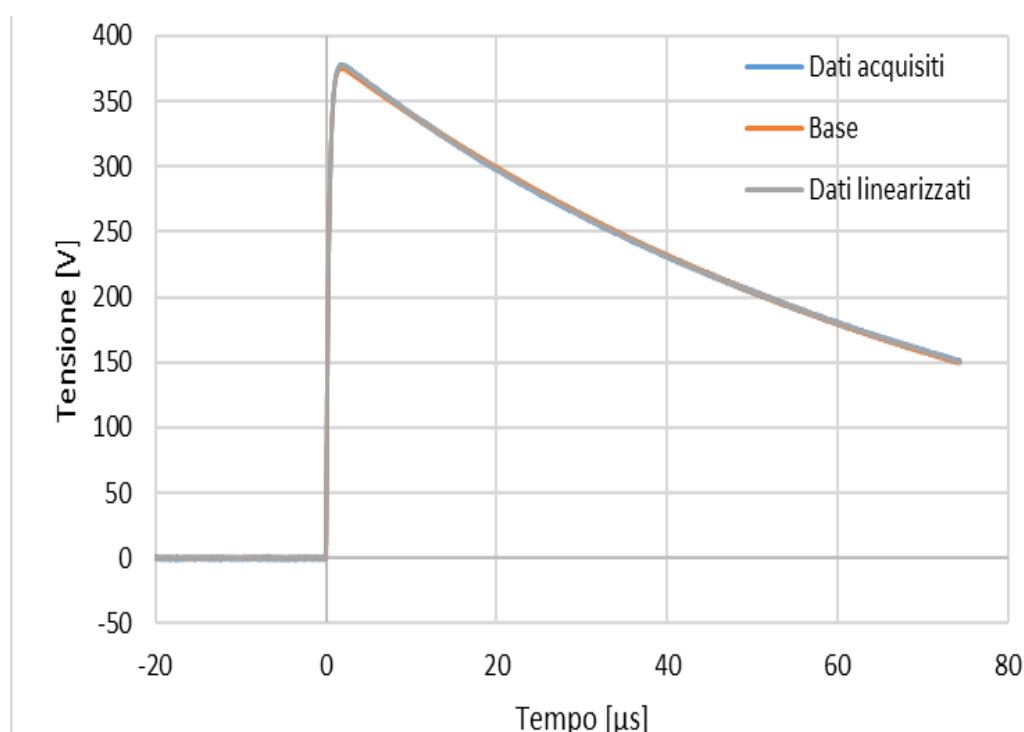
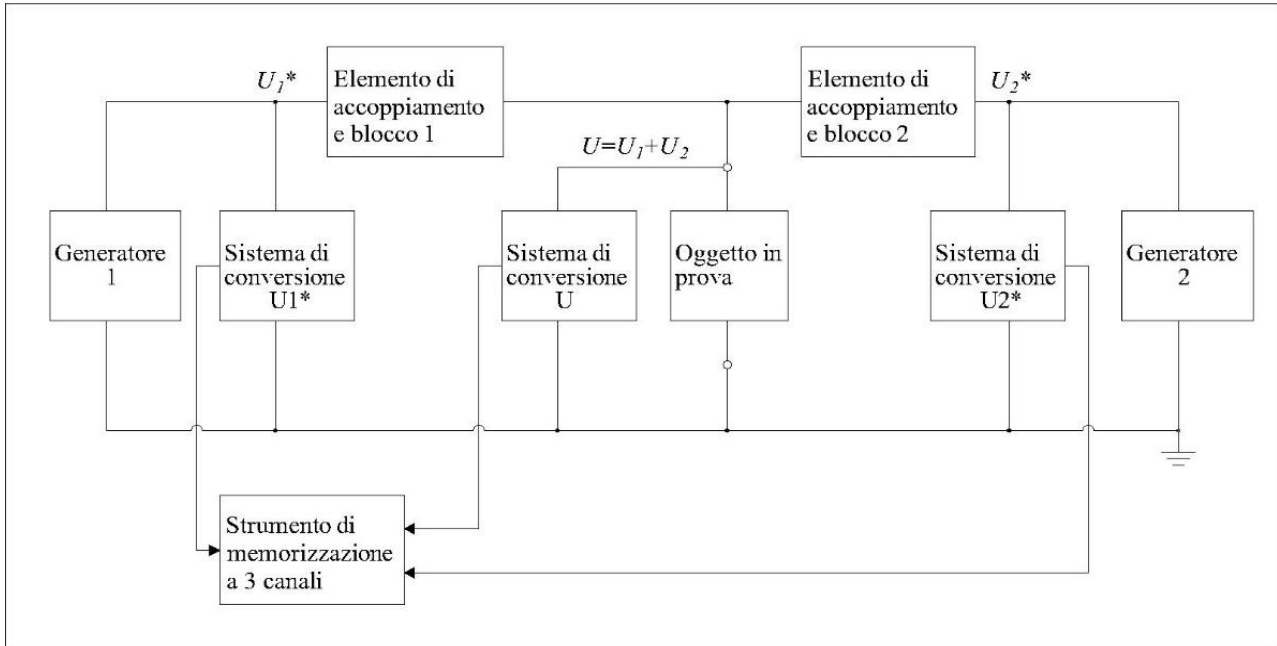


Fig. 27. Forma d'onda del solo impulso di origine atmosferica conforme alla norma e misurata ai capi del divisore.

In una seconda fase il divisore è stato inserito in un circuito di prova per tensioni composite [2] § 9.2.3 con gli elementi di blocco (Fig. 28) ma senza inserire i due dispositivi di conversione (U_1

e U_2). Le stesse prove sono state ripetute alimentando il circuito di misura alternativamente con i due generatori. In Fig. 29 e 30 sono riportate le forme d'onda misurate all'uscita del divisore nelle due diverse situazioni.



IEC 2222/10

Fig. 28. Circuito per prove di tensione composite.

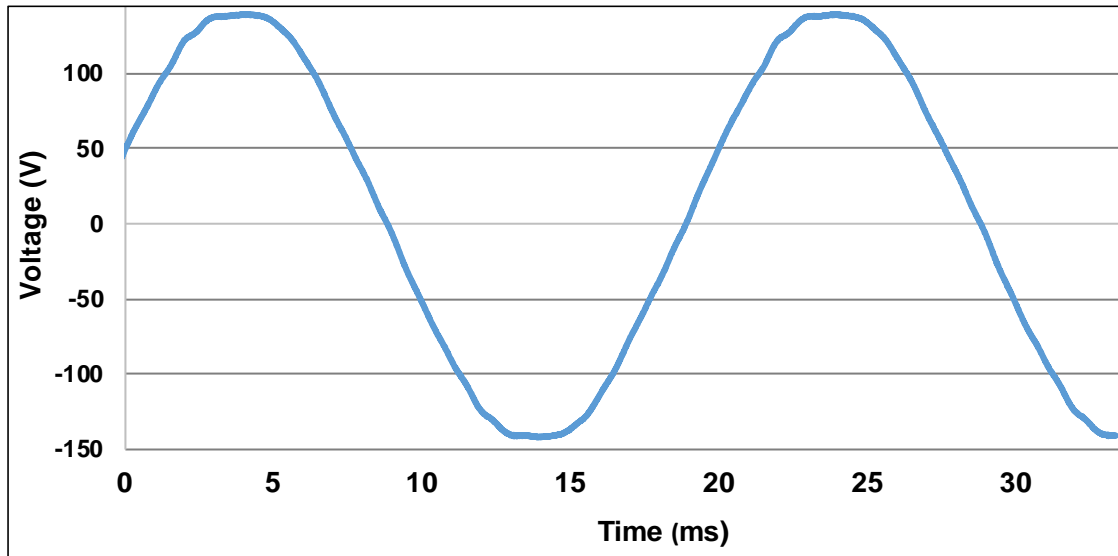


Fig. 29. Tensione sinusoidale, con valore efficace 100 V e ampiezza 140 V misurata ai capi del divisore attraverso il resistore da 20 k Ω .

Anche in questo caso la tensione misurata ai capi del divisore attraverso il resistore da 20 k Ω ha valore efficace di 100 V e ampiezza di 140 V.

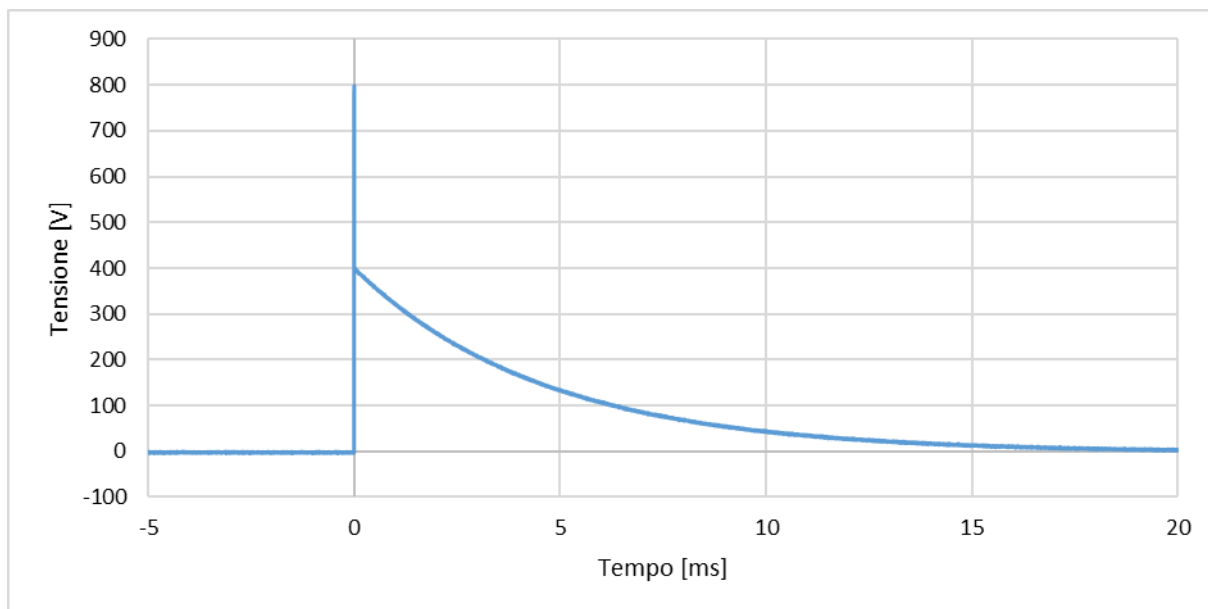


Fig. 30. Solo impulso atmosferico misurato ai capi del divisore attraverso lo spinterometro a sfere.

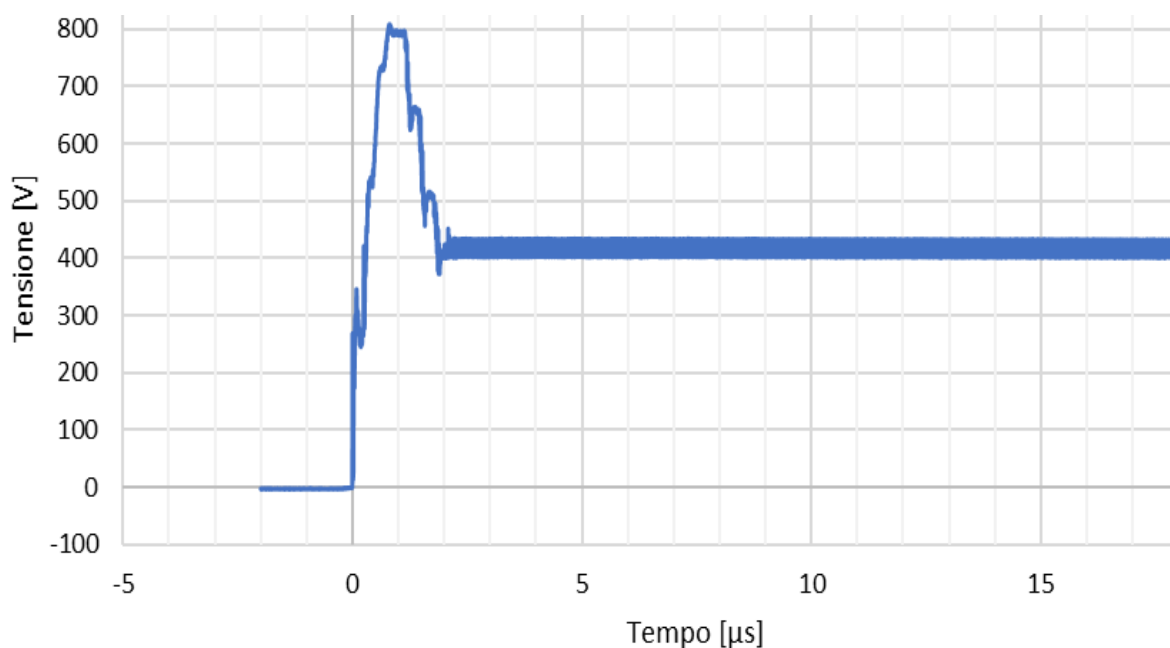


Fig. 31. Solo impulso atmosferico misurato ai capi del divisore attraverso lo spinterometro a sfere (dettaglio).

Per l'impulso vi è un picco a circa 800 V che sale da 0 V al picco in 1 μ s (accettabile per l'impulso atmosferico) che scende in 2 μ s a 400 V per poi calare esponenzialmente per l'energia accumulata nel circuito che si esaurisce con la costante di tempo del circuito. L'impulso previsto dalla norma ha invece tempo di salita di 1,2 μ s, ed un tempo all'emivalore di 50 μ s. I tempi non ottimali

rilevati sono causati dall'utilizzo di una tensione bassa che non è in grado di sostenere l'arco per un tempo prolungato.

9.2 – Prove di tensione composita

Dato che le singole prove hanno fornito risultati soddisfacenti, si è generata una tensione composita delle due forme d'onda per verificare cosa accadeva ai capi dei singoli generatori e sull'oggetto in prova. Il circuito di prova è lo stesso descritto nel paragrafo precedente, con il divisore collegato ai capi dell'oggetto in prova, con i due generatori funzionanti simultaneamente. In Fig. 32 si mostra la tensione composita misurata sull'oggetto in prova. L'impulso si sovrappone alla tensione sinusoidale, la sinusoide ha valore efficace 100 V. L'arco ha breve durata, sufficiente a portare la tensione da 140 V a 630 V. Quando l'arco si estingue parte un andamento oscillatorio smorzato discostandosi da ciò che richiede la norma. In questo circuito entrano in gioco l'induttanza nel generatore di tensione e la capacità del divisore che si palleggiano l'energia rilasciata dall'impulso. Lo smorzamento è dovuto dalle resistenze nel circuito di prova. Facendo un confronto fra le due prove eseguite separatamente con lo stesso circuito, si osserva che l'impulso non raggiunge la stessa tensione del caso in cui vi è il solo generatore di impulso collegato al carico.

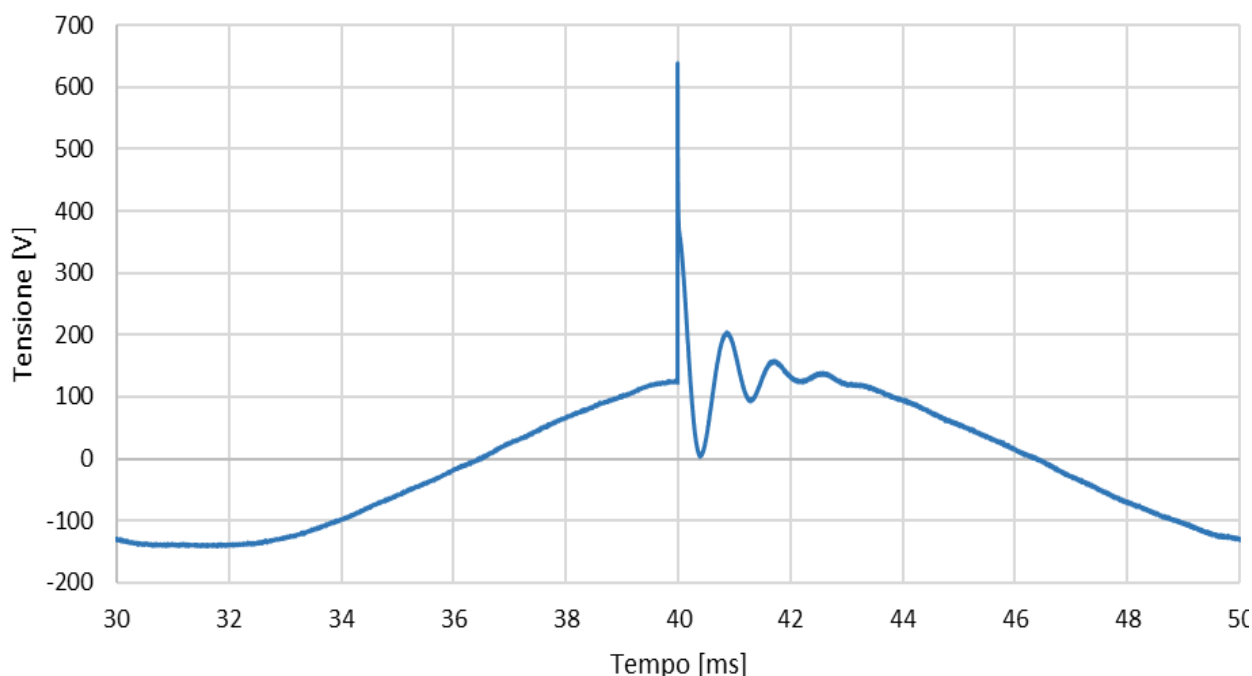


Fig. 32. Tensione composita sull'oggetto in prova misurata ai capi del divisore posto in parallelo all'oggetto in prova.

9.3 – Effetti degli elementi di blocco ed accoppiamento

Per analizzare il comportamento degli elementi di blocco e accoppiamento, in mancanza di altri divisori, è stato modificato il circuito, posizionando il divisore ai capi dei due generatori di tensione. In Fig. 33 si riporta il circuito di prova con il divisore collegato ai capi del generatore di tensione sinusoidale. Non avendo modificato il resto del circuito, si supposeva che le forme d'onda generate fossero le stesse, quindi che l'oggetto in prova fosse sottoposto alla stessa tensione composta, vale a dire tensione sinusoidale di valore efficace 100 V e picco di circa 140 V. In Fig. 34 la forma d'onda sinusoidale è riconoscibile e si individua l'andamento dell'impulso con ampiezza molto ridotta rispetto a quella misurata sull'oggetto in prova. Quindi il filtro funziona correttamente riducendo l'impulso ad una ondulazione di ampiezza quasi trascurabile.



Fig. 33. Circuito per la misura della tensione composta sul generatore di tensione sinusoidale.

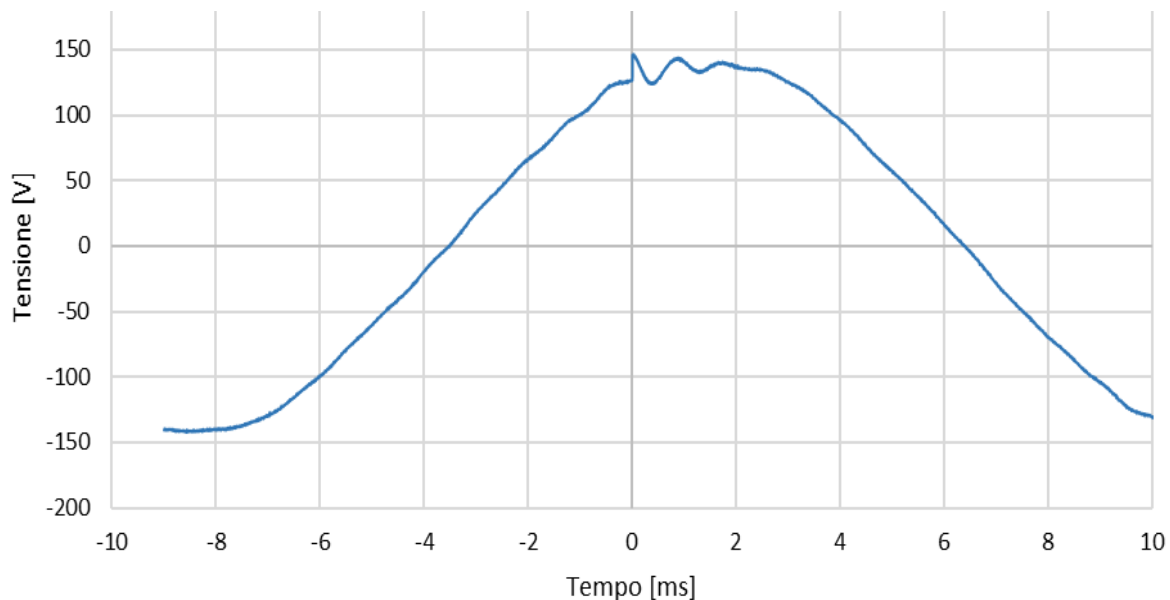


Fig. 34. Misura della tensione composta sul generatore di tensione sinusoidale.

Per misurare la tensione composta ai capi del generatore di impulso atmosferico si è modificato nuovamente il circuito (Fig. 35). Anche in questo caso, si è considerata la tensione composta uguale a quella sull'oggetto in prova. L'obiettivo era quello di verificare il comportamento dello spinterometro come elemento di blocco ed accoppiamento.

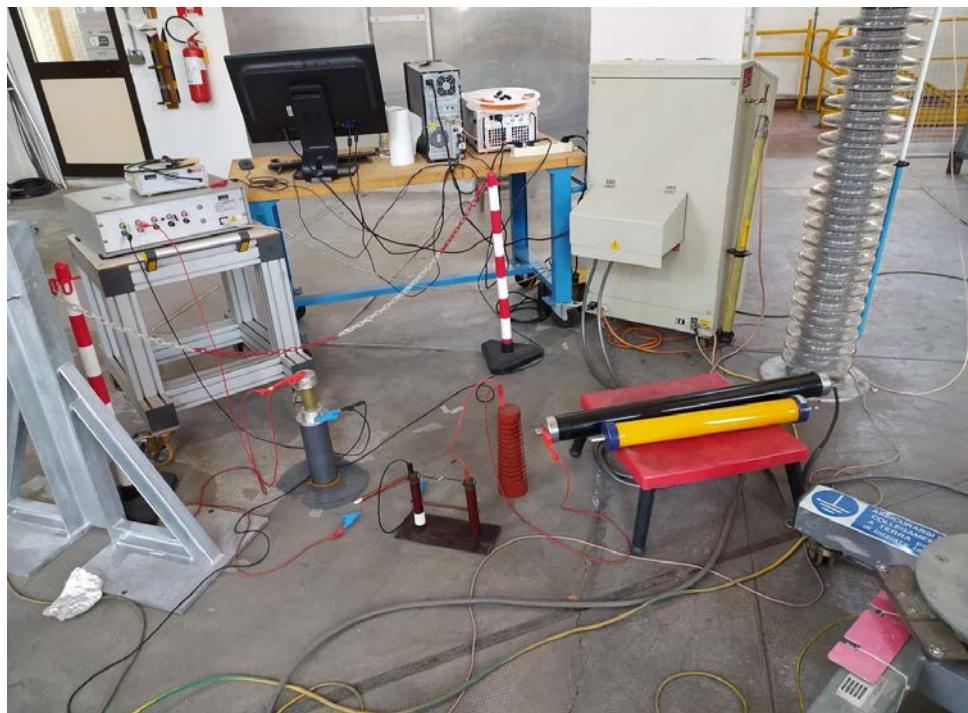


Fig. 35. Circuito di misura della tensione composta ai capi del generatore d'impulso.

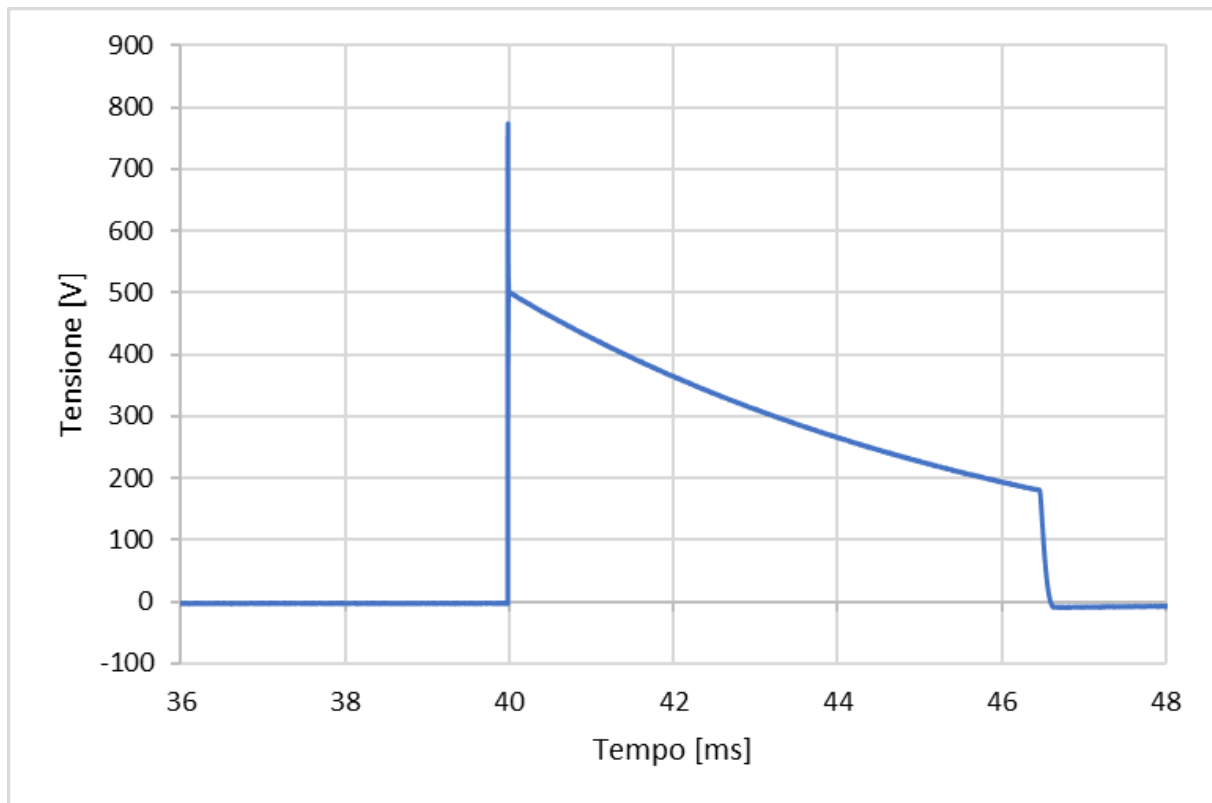


Fig. 36. Misura della tensione composta dal lato del generatore di tensione impulsiva.

In Fig. 36 si riporta la misura ai capi del generatore di tensione impulsiva. La tensione arriva a circa 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 considerevole 15% sull'oggetto in prova (Fig. 32). Analizzando in dettaglio i primi istanti di tempo (Fig. 37) si ha un andamento oscillatorio smorzato, dove la tensione massima supera 800 V, arrivando a 850 V.

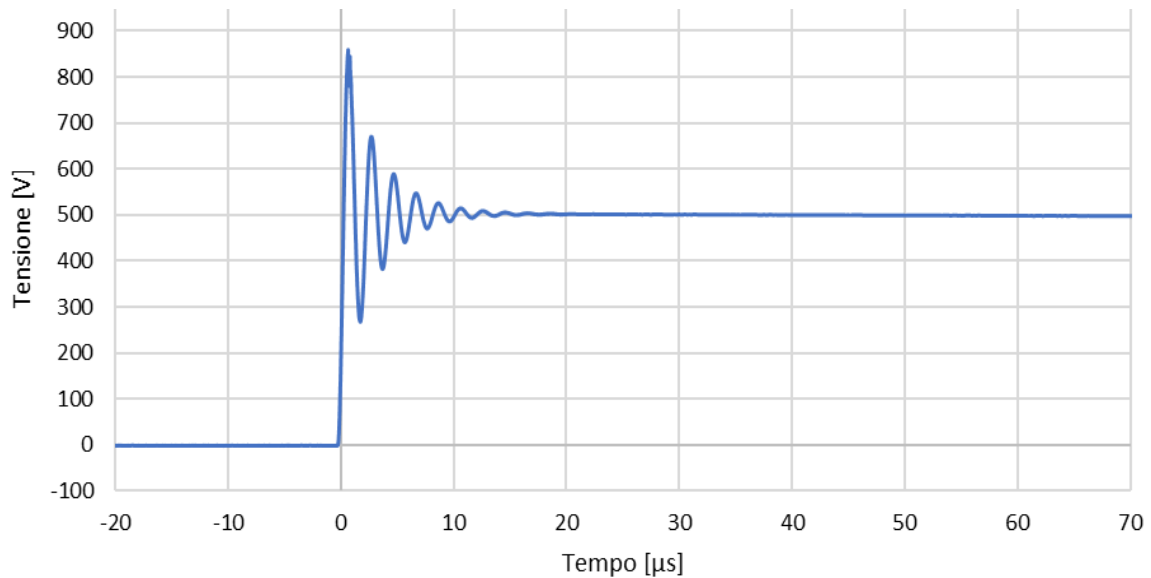


Fig. 37. Misura della tensione composta dal lato del generatore di tensione impulsiva (dettaglio)

L'andamento oscillatorio potrebbe essere causato dalla presenza nel circuito del divisore di tensione che causa uno scambio di energia con il generatore di tensione impulsiva. L'arco si rileva al picco di tensione dove sono presenti oscillazioni attorno a 840 V. Non vi è traccia della tensione sinusoidale quindi lo spinterometro è un buon elemento di blocco ed accoppiamento. Dai risultati ottenuti tuttavia la forma d'onda misurata ai capi del generatore d'impulso ha un picco di tensione superiore alla tensione misurata sull'oggetto in prova. Inoltre, non è possibile ricostruire in maniera analitica l'evoluzione della forma d'onda composta sull'oggetto in prova a partire dalle misure effettuate a monte degli elementi di blocco. È pertanto necessario misurare la forma d'onda composta direttamente ai capi dell'oggetto in prova, altrimenti la prova non è affidabile. Purtroppo, a bassa tensione è difficile simulare il comportamento dello spinterometro per alte tensioni. Si presume che con prove a tensione maggiore l'arco duri per il tempo necessario alla prova.

10 Conclusioni e obiettivi futuri

Lo scopo di questo lavoro prevedeva l'allestimento di un circuito di prova che simulasse la prova di tensione composta con tensioni inferiori ai 1000 V partendo dal solo schema di principio riportato dalla norma. L'obiettivo è stato raggiunto, tuttavia, se la componente di tensione sinusoidale della forma d'onda di tensione composta generata si può ritenere soddisfacente, la componente impulsiva non rispetta il comportamento richiesto dalla norma. La causa di ciò risiede presumibilmente nel 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 per generare la tensione composta richiesta dalla norma, è necessario studiare il circuito di prova nella sua interezza, e modificare il generatore di tensione impulsiva per realizzare la forma d'onda richiesta. Un altro obiettivo era quello 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 è risultato capace 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. Con il circuito di prova realizzato si dimostra che misurare separatamente le due forme d'onda all'uscita dei due generatori e comporne analiticamente la forma d'onda composta non riproduce correttamente la forma d'onda composta ai capi dell'oggetto in prova poiché gli elementi di blocco e la dimensione fisica del circuito introducono variabili difficili da considerare in fase di progettazione. Per la realizzazione di un circuito affidabile bisognerebbe analizzare tutti i fenomeni parassiti e considerare il disturbo introdotto dall'arco elettrico generato tra le sfere dello spinterometro. È più semplice ed accurato misurare la forma d'onda direttamente ai capi dell'oggetto in prova. In parallelo alla realizzazione di tale circuito si dovranno 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 sinusoidale.
- Bisognerà definire il punto in cui ha senso effettuare la prova di tensione composta, quali il picco positivo della sinusoidale ed il picco negativo della sinusoidale. Il progetto europeo 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 dovranno 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 62271:2021 Series: High-voltage switchgear and controlgear, 201.
- [2] IEC 60060-1:2010 High-voltage test techniques - Part 1: General definitions and test requirements.
- [3] IEC 60060-2:2010 High-voltage test techniques - Part 2: Measuring systems, 2010.
- [4] J. Meisner et al (2020) Support for standardisation of high voltage testing with composite and combined wave shapes in VDE High Voltage Technology 2020; ETG-Symp. :1–5
- [5] F. Galliana et al (2018) Automated precision DC voltage fixed ratios divider Measurement 122 :291–296
- [6]. Y. Sakamoto et al (2000) Automated dc voltage divider to calibrate voltages up to 1 kV in: Prec. El. Measur. Conf. CPEM:363–364
- [7] Tadashi Endo et al (1991) Automated voltage divider to calibrate a 10-V output of Zener voltage standard IEEE Trans. Instrum. Meas. 40 (2) :333– 336
- [8] H. Hirayama et al (1974) 10-kV High-Accuracy Dc Voltage Divider IEEE Trans. Instrum. Meas. 23 (4) :314– 317
- [9] Yi Li Miyuru K. et al (2001) Development of precision DC high-voltage dividers IEEE Trans. Instrum. Meas. 60 (7) :211–2216
- [10] R.B.D. Knight, P. Martin (2005) A high voltage divider having an uncertainty of 5 p.p.m. at 100 kV IEEE Trans. Instrum. Meas. 54 (5) :568–570
- [11] N. Dragounova (1993) Precision high-voltage dc dividers and their calibration IEEE Trans. Instrum. Meas. 42 (2):1911–1915
- [12] A. Mereva, Ö. Kalenderli (2009) The construction of a dc high voltage precision divider Journal of Electrostatics 67 (5) 741–745
- [13] Yi Li et al (2011) Development of Precision DC High-Voltage Dividers IEEE Trans. Instrum. Meas. 60 (7) 2211–2216.
- [14] S. D’Emilio et al (1985) Calibration of DC Voltage Dividers up to 100 kV IEEE Trans. Instrum. Meas. IM 34):224–227
- [15] Atsuya Arada et al (1976) Development of a high voltage universal divider Dividers IEEE Trans. Power App. Syst. PAS 95 (2) :595–603
- [16] Liu Linxiang et al. (1988) A New Precision AC Resistance Divider IEEE Trans. Instrum. Meas. 37 (3) :462–464.

- [17] B. Karlset al (2019) Characterization of high-precision resistive voltage divider and buffer amplifier for ac voltage metrology t. J. Metrol. Qual. Eng. 10 (8) <https://doi.org/10.1051/ijmqe/2019006>.
- [18] Zhaozhi Long et al (2018), Design and performance of a wideband precision capacitive divider for AC and impulse voltage measurement Rev. Sci. Instrum. 89 (11) 10.1063/1.5031910
- [19] J. Schwab and J. H. W. Pagel (1972) Precision Capacitive Voltage Divider for Impulse Voltage Measurements IEEE Trans. Power App. Syst. PAS 91 (6) :2376–2382
- [20] T. Harada, T.Wakimoto, S.Sato and M.Saeki (1999) Development of National Standard Class Reference Divider for impulse Voltage Measurements In: 11th Int. Symp. on High Voltage Eng. London, UK pp 13–16
- [21] S. Jayaram, X. Yu Xu, and J. D. Cross (2000) High-Divider-Ratio Fast-Response Capacitive Dividers for High-Voltage Pulse Measurements IEEE Trans. Power App. Syst. PAS 36 (3) :920–922
- [22] G. Crotti et al (2010) Development of a RC Medium Voltage Divider for on-site Use. In: Proc. IEEE 2010 Prec. Elec. Meas. Conf., Daejeon Korea pp 655–656
- [23] JCGM 100:2008 Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement First edition
- [24] J. Fluke 5502A Multi-Product Calibrator (2012), Operators Manual
- [25] Hewlett&Packard (1996) HP 34401A Multimeter User Manual
- [26] W. Bich, F. Pennechi (2004) On the in-use uncertainty of an instrument, in: P. Ciarlini, M. G. Cox, E. Filipe, F. Pavese, D. Richter (Eds), Adv. Math. Comp. Tools in Metrology, World Scientific. 59–169.
- [27] CEI EN 50191:2010 Installazione ed esercizio degli impianti elettrici di prova, 2010.