

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Elettrica

Tesi di Laurea Magistrale

**Prove sperimentali con tensioni combinate su apparecchiature di
bassa tensione**



**Politecnico
di Torino**

Relatore:

Prof. Enrico Pons (Politecnico di Torino)

Co-relatori:

Ing. Paolo Emilio Roccato (INRiM)

Ing. Stefano Emilio Caria (INRiM)

Candidato:

Stefano Scaraffia

Marzo 2024

Ringraziamenti

Desidero ringraziare il relatore Enrico Pons, per avermi supportato nella stesura del seguente elaborato di tesi.

Un doveroso ringraziamento va ai co-relatori Paolo Roccato e Stefano Caria, per avermi supportato nell'esecuzione delle prove e nella stesura dell'elaborato, fornendomi tutti gli strumenti necessari per svolgere l'attività.

INDICE

1	Introduzione	1
1.1	Introduzione	1
1.2	Laboratorio di Alte Tensioni e Forti Correnti (LATFC)	3
2	Riferimenti Normativi.....	5
2.1	Norma EN 60898-1: 2019.....	5
2.2	Norma EN 61180: 2016.....	5
2.2.1	Generatore di tensione impulsiva	6
2.2.2	Generatore sinusoidale.....	7
2.3	Norma EN 60060	7
2.3.1	Tensione combinata	8
2.3.2	Tensione composta	9
2.4	Norma EN 60947	10
3	Generatori e Strumentazione	11
3.1	Generatore di impulso GTP 32	11
3.2	Generatore sinusoidale UH 28M	12
3.3	Dispositivo di conversione.....	13
3.4	Oscilloscopio da banco	15
3.5	Pinza amperometrica Fluke 360	16
3.6	Sonda alte tensioni	16
3.6.1	Scheda di acquisizione PXIe 4081.....	17
3.7	Oscilloscopio Siglent SHS 820.....	18
3.8	Sonda di campo.....	18
3.9	Spinterometro.....	19
3.10	Sicurezza area prova	20
4	Verifiche Preliminari	21

4.1	Requisiti di prova.....	22
4.1.1	Prova di rigidità dielettrica dei circuiti principali.....	22
4.1.2	Verifica della tensione di tenuta a impulso.....	23
4.1.3	Verifica delle correnti di dispersione attraverso i contatti aperti...24	
4.2	Risultati verifiche preliminari.....	25
4.3	Prova di massima tenuta di tensione dell'interruttore prelevato dal campo	26
5	Prove su Interruttori Prelevati dal Campo con Tensione Combinata	28
5.1	Esecuzione prova	28
5.2	Circuito di prova senza controllo dell'istante di inserzione	29
5.2.1	Risultati.....	31
5.3	Circuito di prova con comando manuale	36
5.4	Misura flottante sulla resistenza serie.....	40
5.4.1	Risultati.....	41
5.5	Analisi misurazione della corrente di un impulso	42
5.5.1	Rogowski	43
5.5.2	Pinza amperometrica.....	43
5.5.3	Shunt	44
5.5.4	Risultati.....	45
5.5.5	Misura della corrente su circuito della tensione combinata.....	48
6	Analisi Fenomeno di Scarica	50
6.1	Pre-analisi su spinterometro.....	50
6.1.1	Risultati.....	52
6.2	Analisi su interruttori	56
6.2.1	Risultati.....	58
7	Prove sugli Interruttori Nuovi.....	60
7.1	Verifiche preliminari.....	60

7.2	Prova tensione combinata	62
8	Invecchiamento Interruttori	66
8.1	Processo di invecchiamento.....	66
8.2	Risultati invecchiamento interruttori	67
8.3	Inserzione tensione combinata dopo invecchiamento	69
9	Metodo di Misurazione con Sonda di Campo	72
9.1	Prove su spinterometro con sonda di campo	72
9.2	Risultati prove con sonda di campo svolte su spinterometro.....	73
9.2.1	Impulso singolo positivo e negativo	74
9.2.2	Regime sinusoidale	76
9.2.3	Acquisizione scarica e non scarica applicando tensione combinata..	76
9.3	Risultati prove con sonda di campo svolte su interruttori prelevati dal campo	78
9.4	Scarica della tensione combinata con sonda di campo	82
10	Prove Supplementari.....	84
	Conclusioni	86
	Appendice A	88
	Appendice B	91
	Appendice C	95
	Appendice D	101
	Bibliografia	107
	Indice delle figure	108

1 INTRODUZIONE

1.1 INTRODUZIONE

Le prove rappresentano uno strumento utile durante lo studio di un dispositivo elettrico, che si tratti di un cavo o di un interruttore magnetotermico residenziale, sono essenziali per garantire la sicurezza e le prestazioni di questi ultimi. In questo caso, trattandosi di prodotti che saranno messi in commercio, le prove che andranno ad essere eseguite sono regolamentate dalle norme, e sono suddivise in tre macro categorie: le prove tipo, ovvero prove che vengono svolte su prototipi; le prove di routine, ovvero prove nelle quali ogni dispositivo viene testato prima di essere messo in commercio; le prove speciali, che possono considerarsi di come aggiunte alle precedenti. In questo elaborato di tesi ci si focalizzerà sugli interruttori magnetotermici di bassa tensione, per i quali la normativa richiede una continua ottimizzazione delle prove da svolgere per accrescere la resilienza, l'affidabilità e la sicurezza in condizioni normali e anormali per l'impianto elettrico in cui essi vengono installati. Un impianto di questo tipo può essere esposto a problematiche ambientali importanti, ad esempio un'improvvisa scarica elettrica causata da un fulmine che colpisca una linea di distribuzione, questo porterebbe ad una pericolosa sovratensione sulla rete per le persone e per gli apparecchi elettrici ed elettronici. Lo scopo dell'attività che verrà descritta è quello di eseguire prove di tensione combinata su diversi campioni di interruttori di bassa tensione, alcuni nuovi ed alcuni sottoposti ad usura, quindi già utilizzati. Le prove a tensione combinata consistono nell'utilizzo di un generatore di tensione impulsiva che va ad affaticare il dispositivo in prova già alimentato con un generatore sinusoidale. In base a come si collegano i generatori ai morsetti dell'interruttore, si configura la prova di tensione composita o la prova di tensione combinata sul dispositivo in prova. Rispetto alle prove in ambito alta tensione, dove la differenza di tensione tra i due generatori è più marcata, in bassa tensione la differenza è minore. L'ente normatore non contempla queste prove nella norma EN 61180: 2016 [1] riguardante le prove sui dispositivi di bassa tensione, ma definisce, per ora, solo le prove di tensione di impulso e di tensione sinusoidale. Quindi, per svolgere queste

prove, si è fatto riferimento alle indicazioni della norma EN 60060-1: 2010 [2], la quale indica come eseguire le prove di tensione composita e combinata in alta tensione. Prima di iniziare le prove sulle tensioni combinate sono state verificate le prestazioni degli interruttori.

Prima dell'inizio delle prove è stato analizzato il circuito di prova senza e con controllo dell'inserzione dell'impulso, misurando le tensioni ai capi dei generatori imponendo impulsi positivi e negativi. Sono state eseguite misure della corrente di un impulso attraverso tre metodi: con sonda Rogowski, con pinza amperometrica, e con resistenza di shunt. Si è passati a studiare un metodo per analizzare il fenomeno di scarica, misurando la tensione combinata ai capi del contatto, prima sullo spinterometro e dopo sugli interruttori. Inoltre, è stato analizzato un metodo alternativo con sonda di campo per rimuovere i dispositivi di misura collegati direttamente all'interruttore. Dopo aver svolto queste prove sugli interruttori prelevati dal campo si è passati all'analisi della tensione combinata su una parte degli interruttori nuovi, con i restanti è stata eseguita una procedura di invecchiamento prima di procedere all'applicazione della tensione combinata.

1.2 LABORATORIO DI ALTE TENSIONI E FORTI CORRENTI (LATFC)

Il LATFC fa parte dell'INRiM, Istituto Nazionale di Ricerca Metrologia nato nel 2006 dall'unificazione tra l'Istituto Elettrotecnico Nazionale Galileo Ferraris e l'Istituto di Metrologia Gustavo Colonnetti. La sede principale dell'INRiM è ubicata a Torino in Strada delle Cacce, mentre il laboratorio di Alte Tensioni e Forti Correnti (LATFC) è ancora situato nella sede storica di Corso Massimo d'Azeglio.

Quest'ultimo è suddiviso principalmente in tre aree:

- Area alte tensioni, dove si eseguono attività con alte tensioni alternate fino a 200 kV ed impulsive fino a 800 kV;
- Area Forti Correnti di cortocircuito, dove si eseguono attività con tensioni fino a 1500 V e correnti fino a 250 kA di picco;
- Area Forti Correnti stazionarie, dove si eseguono attività fino a 10 kA AC ed 8 kA DC.

In questo laboratorio ci si occupa principalmente di ricerca in campo elettrotecnico, servizi di taratura e di verifica delle apparecchiature elettriche, attraverso prove di sovratemperatura, di cortocircuito, di misura di tensione e prove dielettriche.

Le aree di prova del LATFC vengono alimentate tramite quattro trasformatori e per le prove di cortocircuito viene utilizzato un alternatore risalente agli inizi del 1900, avviato tramite un motore asincrono calettato sull'albero motore. Questa macchina, alternatore trifase della S.A. Brown Boveri & Cie (Figura 1-1) ha le seguenti caratteristiche: potenza di cortocircuito (S_{cc}) = 60 MVA, corrente di cortocircuito (I_{cc}) = 8700 A, peso rotore = 15 t, peso statore = 20 t, numero di giri rotore nominali (n_r) = 1000 rpm, S_n = 5 MVA, 6 poli e un diametro del rotore pari a 1,5 m.

Nell'area di Alte Tensioni sono svolte le prove dielettriche. Per eseguire i test, in laboratorio sono presenti vari sistemi di generazione di tensioni in alternata e di tensioni impulsive.



Figura 1-1: Alternatore - Brown Boveri & Cie

Nel LATFC è situato anche un impianto di prova del grado di protezione IP contro i liquidi e un laboratorio metrologico.

2 RIFERIMENTI NORMATIVI

Nel seguente capitolo verranno illustrati i riferimenti normativi riguardanti gli interruttori di bassa tensione e le normative inerenti alle prove condotte nel campo di bassa tensione. Il termine “bassa tensione” è presente sul dizionario elettrotecnico internazionale dell’IEC 60050, esso identifica impianti di utenze civili e industriali con tensione nominale inferiore o uguale a 1000 V AC e 1500 V DC. La norma EN 60898-1: 2019 [3] viene utilizzata con l’ausilio della norma EN 61180: 2016 [1], la quale definisce le caratteristiche dei generatori di tensione. A questa si aggiunge la norma EN 60947-1: 2021 [4] contenente le prescrizioni generali dei dispositivi di comando e di manovra. Per quanto concerne per le prove a tensione combinata si farà riferimento alla norma EN 60060-1: 2010 [2].

2.1 NORMA EN 60898-1: 2019

La norma EN 60898-1: 2019 [3] (“Interruttori automatici per la protezione dalle sovracorrenti per impianti domestici e simili, Parte 1 – Interruttori automatici per funzionamento in corrente alternata”) viene applicata nello specifico agli interruttori automatici ad estinzione dell’arco in aria con tensione nominale tra le fasi non superiore a 440 V funzionanti a 50 Hz e/o 60 Hz, fino a correnti nominali di 125 A e corrente di cortocircuito nominale minore di 25 kA.

Al capitolo 9.7 definisce le prove delle prestazioni dielettriche degli interruttori di bassa tensione, le quali saranno spiegate nel capitolo 4.1.

2.2 NORMA EN 61180: 2016

La norma EN 61180: 2016 [1] (“Tecniche di prova ad alta tensione per apparecchiature di bassa tensione, Parte 1: definizioni, prescrizioni relative alle prove e alle procedure, apparecchiatura di prova”) riguarda le prove dielettriche con tensione continua, tensione alternata o impulsiva, e le apparecchiature utilizzate per l’esecuzione delle stesse prove per apparecchiature di bassa tensione con tensione

nominale inferiore a 1 kV in alternata e 1,5 kV in continua. Per ogni tensione di prova vengono trattati: i requisiti della tensione di prova, i requisiti per la generazione della tensione di prova e la procedura della prova. Verranno analizzati in dettaglio le tensioni di prova d'impulso e le tensioni di prova sinusoidali.

2.2.1 Generatore di tensione impulsiva

Per il caso in studio verrà generato un impulso atmosferico standard (Figura 2-1) per simulare la condizione più gravosa a cui i sistemi di bassa tensione possono essere sottoposti.

Un impulso atmosferico per essere definito tale deve soddisfare i seguenti requisiti:

- Il tempo di salita (T_1) viene calcolato come $T / 0,6$. L'intervallo di tempo (T) è definito tra il punto A e B corrispondente tra 30 % e il 90 % della tensione. Questi 2 punti servono anche a definire l'origine virtuale O_1 con il tempo $T' = 0,3 T_1$;
- Il tempo di discesa (T_2) è definito come l'intervallo tra O_1 e l'istante in cui la tensione ha raggiunto il 50 % del valore di picco.

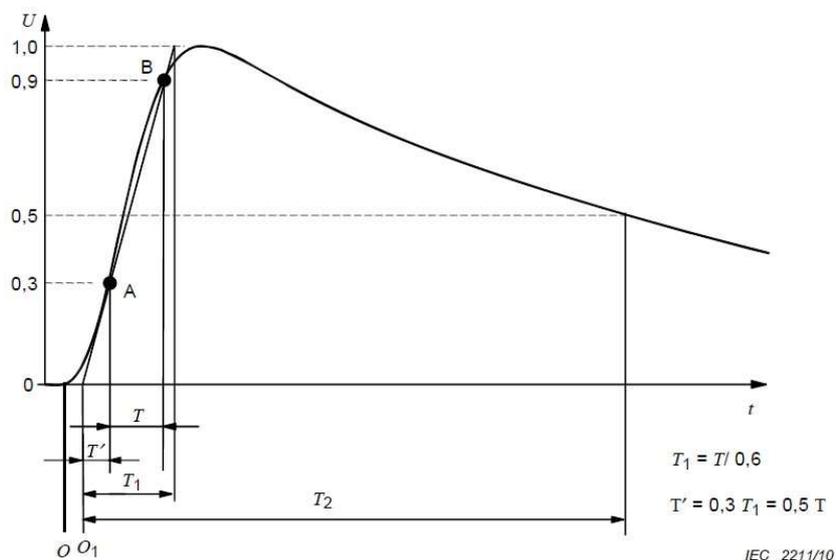


Figura 2-1: Forma d'onda dell'impulso

2.2.2 Generatore sinusoidale

La forma d'onda deve essere sinusoidale con il rapporto tra il valore di picco e il valore efficace di $\sqrt{2} \pm 3\%$. La frequenza della tensione generata può essere tra 45 e 65 Hz. Nel nostro caso, essendo in Europa utilizzeremo una tensione a una frequenza di 50 Hz, ovvero quella nominale del dispositivo in prova.

2.3 NORMA EN 60060

La norma EN 60060-1: 2010 [2] (“Tecniche di prova in alta tensione, Parte 1 – Definizioni generali e prescrizioni di prova”) descrive le tipologie di prove dielettriche per dispositivi con tensione massima di apparecchiatura superiore a 1 kV.

Vengono trattate prove dielettriche con:

- Tensione continua;
- Tensione alternata;
- Tensione ad impulso;
- Tensioni combinate e composite delle precedenti forme d'onda.

Nello specifico, ogni prova dielettrica viene descritta in tre sottoparagrafi generali: definizioni, tensione di prova e procedura di prova. Il primo sottoparagrafo tratta le definizioni richieste nella specifica prova. Nel secondo sottoparagrafo (tensione di prova) vengono analizzati i requisiti richiesti per la tensione di prova, le proprietà dei generatori, il metodo di misura della tensione di prova e il metodo di misurazione della corrente. Nell'ultimo sottoparagrafo (procedure di prova), vengono definiti gli obiettivi per il superamento della prova.

Nella seconda parte della normativa (EN 60060-2: 2011 [5]) vengono trattati i sistemi di misura e le loro componenti, descrivendo la stima dell'incertezza per le misure in alte tensioni.

2.3.1 Tensione combinata

La tensione combinata viene descritta dalla norma EN 60060-1: 2010 [2] come la tensione misurata tra due terminali (1 e 2) di un dispositivo con tre terminali. Al terminale 1 e 2 sono applicate tensioni di prova separate e il terzo terminale viene collegato a terra (Figura 2-2).

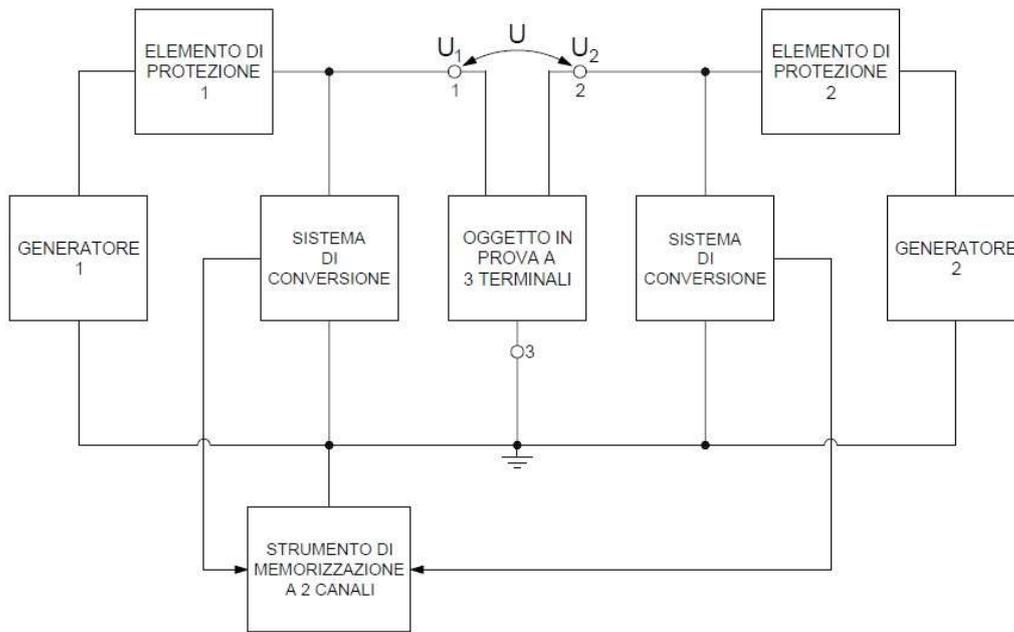


Figura 2-2: Schema prova tensione combinata

La Figura 2-2 rappresenta lo schema che si utilizzerà per collegare gli interruttori in prova. Nel caso in esame, il primo generatore (generatore 1) di tensione sarà di tipo impulsivo con forma d'onda di tipo atmosferica ((Lighting Impulse – LI) o di commutazione di dispositivi di manovra (Switching Impulse – SI) e il secondo (generatore 2) sarà un generatore di tensione sinusoidale a 50 Hz. Il terzo terminale sarà, in questo caso specifico, l'involucro esterno dell'interruttore che verrà collegato al potenziale di terra. La differenza di potenziale tra i morsetti dei poli U_1 e U_2 è la tensione combinata, la quale sarà calcolata dalle acquisizioni dei segnali delle due sorgenti attraverso dei divisori e un software di acquisizione.

2.3.2 Tensione composta

La norma definisce la tensione composta come la sovrapposizione di tensioni impulsive di origine atmosferica (Lighting Impulse – LI) o generate dalla commutazione di dispositivi di manovra (Switching Impulse – SI) e tensioni sinusoidali, lo schema rappresentativo è illustrato nella Figura 2-3.

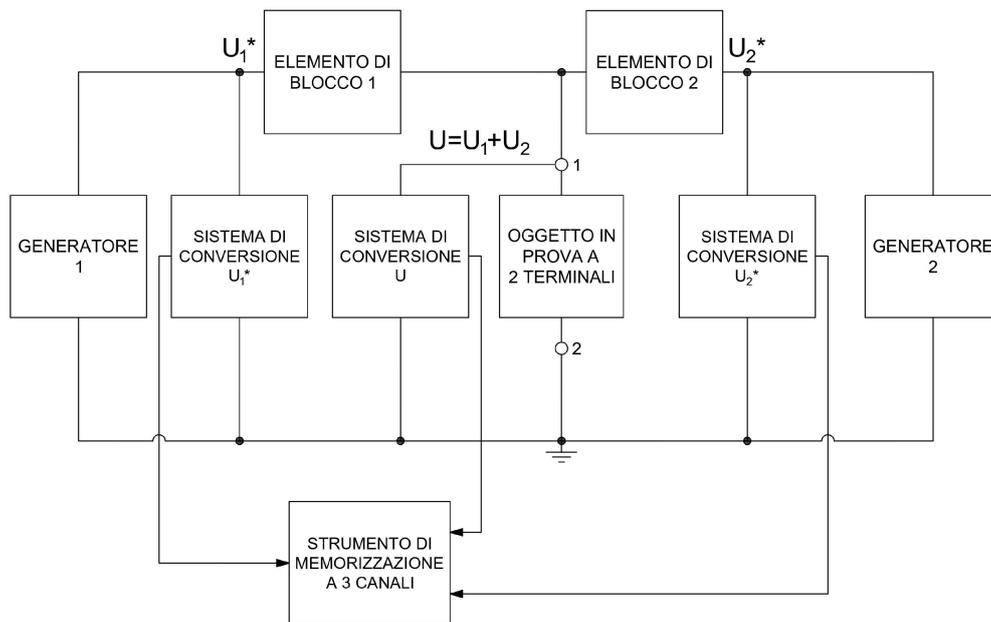


Figura 2-3: Schema prova della tensione composta

La Figura 2-3, rappresenta lo schema per la prova di tensione composta, dove i due segnali generati dal “generatore 1” (U_1) e “generatore 2” (U_2) saranno collegati su un unico cavo a monte dell’interruttore. I generatori dovranno avere in serie degli elementi di blocco per non avere propagazione del segnale verso il generatore opposto. La tensione combinata U sarà quella misurata ai due terminali dell’interruttore, questa sarà calcolata come somma dei due segnali U_1 e U_2 . Nel caso in esame, la tensione U_1 è l’impulso e la U_2 è la sinusoidale.

2.4 NORMA EN 60947

La norma EN 60947-1: 2021 [4] (“Apparecchiature a bassa tensione, parte 1 – Regole generali”) raggruppa le prescrizioni di carattere generale riguardanti le apparecchiature di manovra e comando installate nei circuiti di bassa tensione indicando le prescrizioni di tutte le fasi dell’esercizio, montaggio e verifiche finali. In particolare, si fa riferimento anche alla norma EN 60947-2: 2020 [6] (“Apparecchiature a bassa tensione, parte 2 – interruttori automatici”) dove sono presenti le prescrizioni specifiche per gli interruttori automatici.

3 GENERATORI E STRUMENTAZIONE

Nel presente capitolo introduciamo i generatori e la strumentazione utile per lo svolgimento delle prove sperimentali.

3.1 GENERATORE DI IMPULSO GTP 32



Figura 3-1: Generatore di impulso Passoni Villa

In Figura 3-1 possiamo vedere il generatore di tensione impulsiva della Passoni Villa modello GTP 32 che genera impulsi fino a 32 kV. All'interno sono presenti uno stadio di elevazione della tensione tramite trasformatore, un raddrizzatore a ponte di diodi, uno spinterometro, resistenze e condensatori. Per regolare il fronte di salita e discesa dell'impulso sono presenti all'interno diverse resistenze, le quali possono essere configurate in vari modi. La capacità interna viene utilizzata dal generatore per accumulare energia che sarà trasferita al dielettrico dell'oggetto in prova. Questo generatore permette di generare impulsi sia positivi che negativi e, ovviamente, di regolare la tensione di scarica. Il processo di scarica può avvenire automaticamente oppure manualmente tramite pulsante, in base a come si configura. Nel momento in cui si spegne il generatore viene messa a terra l'uscita per scaricare le tensioni residue del circuito interno ed esterno. Prima di toccare l'oggetto in prova si deve eseguire una manovra di messa in sicurezza, la quale prevede di toccare l'oggetto con il fioretto.

3.2 GENERATORE SINUSOIDALE UH 28M



Figura 3-2: Generatore sinusoidale Elektrotechn. Laboratorium UH28M

Il generatore sinusoidale della Elektrotechn Laboratorium modello UH28M (Figura 3-2), viene alimentato alla tensione di rete di 230 V e può generare una tensione efficace in uscita fino a 5 kV con una corrente massima di 200 mA. Questo generatore è utilizzato per le prove di tenuta dielettrica. Inoltre, è provvisto di segnali luminosi che avvisano i diversi stati di funzionamento. In ausilio al generatore per disalimentare il circuito dopo l'intervallo di tempo richiesto dalla prova è stato collegato un temporizzatore regolabile come accessorio esterno. (Figura 3-3)



Figura 3-3: Accessorio temporizzatore

3.3 DISPOSITIVO DI CONVERSIONE

Il dispositivo di conversione, chiamato in gergo tecnico “divisore di tensione”, permette di interfacciare le grandezze di misura con lo strumento di misura. Dunque, nell’acquisizione dell’impulso è stato utilizzato il “Divisore 1”. Questo dispositivo presente in laboratorio è stato modificato in un precedente lavoro [7] per essere utilizzato per le misure di tensione combinata, motivo per il quale tutti i componenti al suo interno sono già noti e la procedura di taratura è stata eseguita in precedenza. Il lato di alta tensione è composto da una resistenza totale (R_{AT}) di $6\text{ M}\Omega$ e una capacità nominale (C_{AT}) di 780 pF . In Figura 3-4 viene mostrato lo stadio di alta tensione.

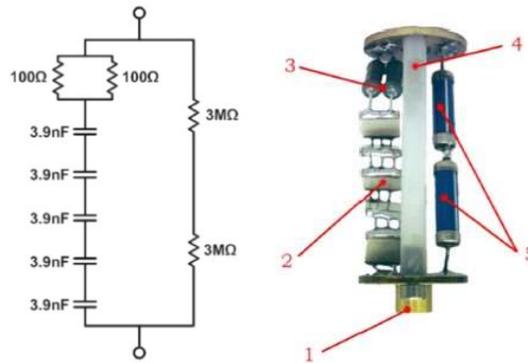


Figura 3-4: Schema e foto lato alta tensione del "divisore 1"- 1. Attacco per lato BT 2. Condensatori ceramici 3. Resistenze ramo RC 4. Colonna isolante 5. Resistenze ramo resistivo [7]

Il lato di bassa tensione, invece, è formato da una resistenza da $32,12\text{ k}\Omega$ con in parallelo gruppi di resistenze e condensatori in serie per un totale di $R_{CBT} = 0,388\ \Omega$ e $C_{BT} = 152,2\text{ nF}$, mostrati in Figura 3-5.

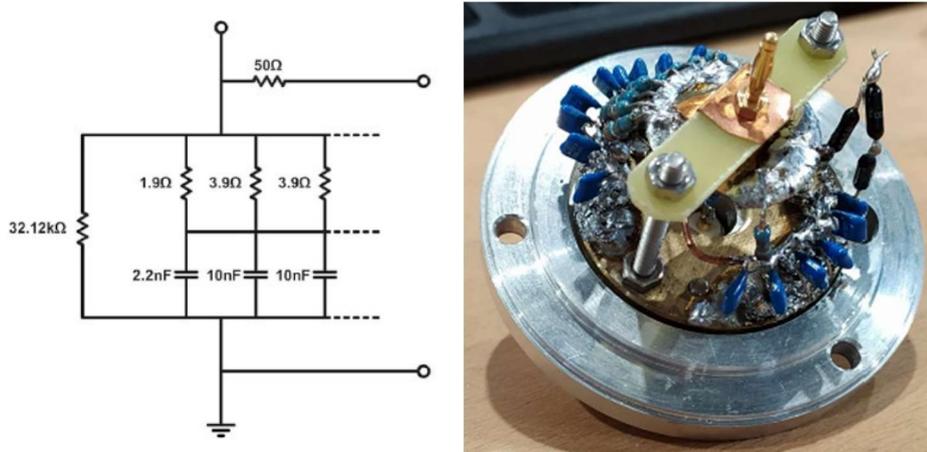


Figura 3-5: Schema e foto lato di bassa tensione [7]

I componenti dello stadio di alta tensione sono chiusi dentro un involucro contenente olio per isolare il tutto. Invece i componenti dello stadio di bassa tensione sono chiusi in un involucro contenente aria. Si presenta alla vista come in Figura 3-6.

Il fattore di scala del divisore in tensione continua (DC), calcolato secondo la norma EN 60060-2: 2011 [5] è di 187,67, con incertezza del 0,14 %.



Figura 3-6: "Divisore 1" [7]

3.4 OSCILLOSCOPIO DA BANCO

L'oscilloscopio utilizzato è della Tektronix modello TDS 3012C (Figura 3-7) da banco è costituito da due canali con una banda passante di 100 MHz e una frequenza di campionamento di 1,25 GSa/s (Giga Sample al secondo). Ogni canale può acquisire fino a tensioni di 42 V di picco. Per salvare i dati delle forme d'onda ed elaborarle come richiesto dalla normativa EN 60060-2: 2011 [5], è stato collegato l'oscilloscopio al computer tramite un cavo di comunicazione apposito. Sul computer si utilizza un software sviluppato e validato dal personale del laboratorio per acquisire i dati e le relative forme d'onda delle prove. Il salvataggio dei dati acquisiti avviene sempre con un intervallo antecedente (programmabile) all'istante di trigger.

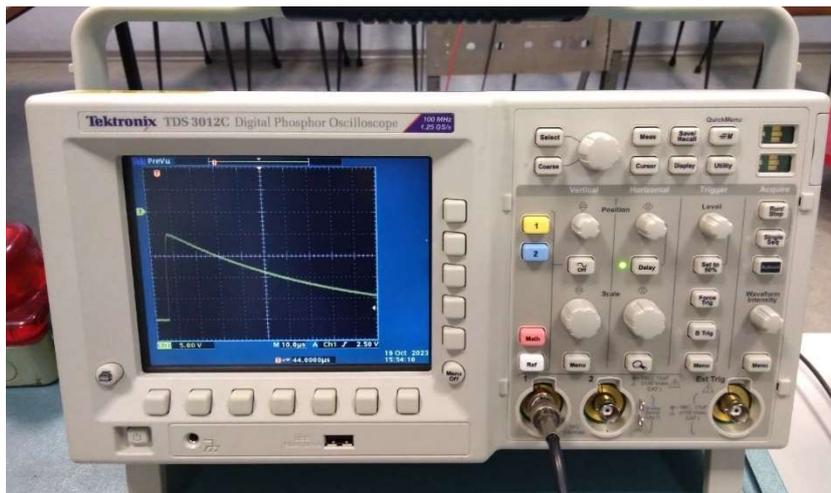


Figura 3-7: Oscilloscopio Tektronix TDS 3012C

3.5 PINZA AMPEROMETRICA FLUKE 360

Per misurare la corrente dispersa quando si applica la tensione sinusoidale nella prova preliminare è stata impiegata la pinza amperometrica della Fluke modello 360 (Figura 3-8), la quale può leggere la corrente tramite due scale A e mA. La pinza ha una accuratezza nella scala dei milliampere (quella utilizzata per lo scopo) del $\pm 1\% + 5$ cifre.



Figura 3-8: Pinza amperometrica Fluke 360

3.6 SONDA ALTE TENSIONI

La sonda utilizzata è la SHT40kV (Figura 3-9), della Chauvin Arnoux, che divide la tensione di 1000 volte, quindi, misurando 1 kV in uscita leggeremo 1 V. Può essere utilizzata in alternata fino a $28 \text{ kV}_{\text{rms}}$ e in continua fino a 40 kV. La minima tensione che può misurare è 1 kV. L'accuratezza dichiarata dal datasheet dello strumento per la tensione continua fino a 20 kV è del $\pm 1\%$ e per $V_{\text{DC}} > 20 \text{ kV}$ aumenta a $\pm 2\%$, in tensione alternata con frequenza 50 Hz è del $\pm 5\%$.



Figura 3-9: Sonda SHT40kV

Questa sonda è stata collegata al sistema di acquisizione della National Instruments tramite la scheda di elaborazione PXIe 4081, e sarà utilizzata esclusivamente per la misura della tensione alternata nel punto B lato generatore sinusoidale.

3.6.1 Scheda di acquisizione PXIe 4081

La scheda di acquisizione della National Instruments PXIe 4081 raggiunge una frequenza di campionamento di 1,8 MSa/s ed è alloggiata nello chassis PXIe - 1062Q (Figura 3-10). Questa scheda, che per lo scopo di questo elaborato sarà utilizzata per campionare la forma d'onda, possiede le stesse funzionalità di un multimetro da banco, ma esegue anche la digitalizzazione della forma d'onda e può sostenere tensioni in ingresso fino a ± 1000 V e ha una risoluzione di $7 \frac{1}{2}$ Digit. L'accuratezza di misura della funzione di digitalizzazione per la scala utilizzata (10 V) è di 125 ppm/lettura + 75 ppm/scala. Nella Figura 5-3 del paragrafo 5.2 riporto lo schema di collegamento.

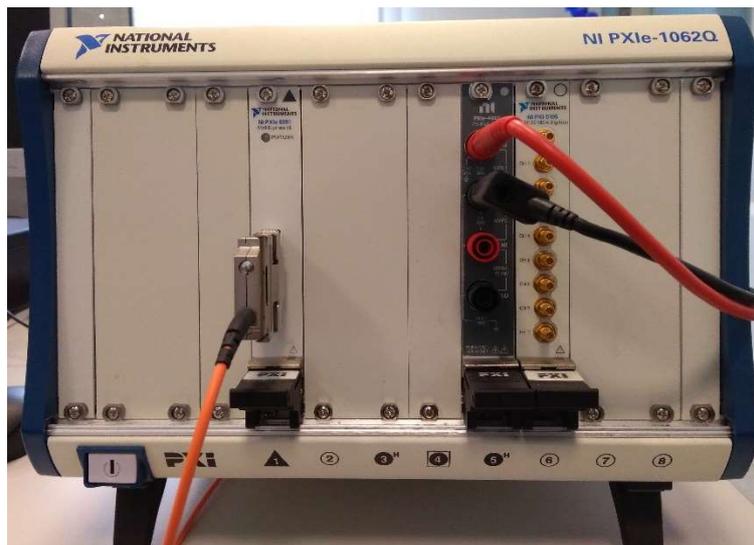


Figura 3-10: Scheda di acquisizione PXIe 4081 (slot 5) all'interno dello chassis della National Instruments

I dati acquisiti dalla scheda vengono visualizzati utilizzando un software programmato in labVIEW, il quale permette il salvataggio automatico dei dati e la modifica dell'interfaccia grafica all'utente, fondamentale per poter configurare per ogni prova un pannello di controllo specifico.

3.7 OSCILLOSCOPIO SIGLENT SHS 820

L'oscilloscopio Siglent modello SHS 820 è un dispositivo portatile composto da due canali BNC, multimetro, registratore dei dati e schermo integrato. Ha una banda passante di 200 MHz e una frequenza di campionamento di 500 MSa/s. La tensione massima che può acquisire è di 600 V e integra anche la funzione trigger. Lo si utilizzerà per la sua funzione di oscilloscopio.



Figura 3-11: Oscilloscopio SIGLENT SHS820

È stato scelto questo strumento perché dovendo misurare una tensione flottante, cioè non riferita a terra, non possiamo toccare il dispositivo durante la prova, dispositivo che non deve inoltre essere collegato all'alimentazione.

Il collegamento con il circuito è stato eseguito con connettori a cocodrillo / BNC.

3.8 SONDA DI CAMPO

La sonda di campo (Figura 3-12) è un dispositivo di misura utile per situazioni dove non sono presenti divisori adatti e strumenti in grado di sostenere le tensioni applicate. La particolarità della sonda di campo è quella di misurare la variazione di campo elettrico nelle sue vicinanze, non richiedendo perciò il collegamento fisico per la misura. Essa è vista come il lato/ramo di bassa tensione di un divisore capacitivo, con fattore ignoto, dove l'armatura ad alta tensione è costituita da tutto

il circuito in alta tensione. Il collegamento per la misura avviene tramite cavo BNC / BNC ed è presente un altro morsetto per il collegamento del dispositivo verso terra. La sonda è stata collegata all'oscilloscopio portatile Siglent SHS 820.



Figura 3-12: Sonda di campo

3.9 SPINTEROMETRO

In laboratorio è presente lo spinterometro raffigurato in Figura 3-13. Il difetto dello spinterometro è che, essendo in aria libera, la condizione di scarica cambia in base all'umidità, alla temperatura e alla posizione delle sfere. Quindi appena le condizioni ambientali variano, bisogna apportare correzioni per far scaricare la tensione al valore voluto.



Figura 3-13: Spinterometro

3.10 SICUREZZA AREA PROVA

Progettando un circuito di prova bisogna tenere in considerazione sia la sicurezza delle persone *in primis*, sia la sicurezza della strumentazione impiegata.

La normativa sulla sicurezza dell'area di prova è la CEI EN 50191:2011 [8] (cita: "le indicazioni relative all'installazione, esercizio e messa in sicurezza degli impianti elettrici di prova fissi o temporanei").

L'impianto di prova progettato per questa tesi prevede modifiche di assemblaggi, i quali si classificano negli impianti di prova temporanei.

Nel LATFC, nell'area delle alte tensioni, si è installato l'impianto di prova temporaneo. Le operazioni di messa in servizio dell'impianto sono semplificate, dato che l'accesso all'area è consentito solo al personale autorizzato, quali dipendenti del laboratorio e tesisti.

La normativa stabilisce che per assicurare la protezione contro i contatti diretti, le parti attive devono essere isolate con coperture, con involucri o con distanze di sicurezza.

Nel nostro caso sono presenti tensioni maggiori di 1000 V, quindi la norma richiede che la zona inibita dal contatto della parte attiva, ci sia una distanza di almeno 25 mm applicando tensioni di 4 kV. La norma prescrive che per impianti maggiori di 1000 V debbano essere installati segnali luminosi rossi e verdi che indicano lo stato di funzionamento, accompagnati da ostacoli che delimitano l'area.

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

- Verificare che tutti i generatori siano in condizioni di sicurezza (non erogino tensione);
- Scaricare eventuali tensioni residue verso terra per mezzo dell'utilizzo di un fioretto.

4 VERIFICHE PRELIMINARI

Prima di svolgere le prove di tensione combinata e composita, vanno verificate le prestazioni degli interruttori per accertarne il corretto funzionamento. La normativa EN 60947-1: 2021 [4] definisce in generale che per le apparecchiature di bassa tensione, possono essere effettuate tre tipologie di prove: prove tipo, prove routine o individuali, prove a campione. Queste vengono poi affrontate in modo specifico nella normativa EN 60898-1: 2019 [3] per gli interruttori in bassa tensione per utilizzi residenziali, in particolare le prove di tipo e le prove di routine.

Le prove tipo sono prove che devono essere effettuate su campioni rappresentativi di ogni particolare interruttore (prototipi), invece, le prove di routine o individuali sono svolte su ogni interruttore. Le prime, possono essere svolte in sequenza o eseguite indipendentemente, ma solamente nel caso in cui le prove precedenti non influenzino i risultati delle successive.

Tra queste, la più importante è quella che permette di verificare la tenuta del dielettrico di un interruttore, come si vedrà nel paragrafo successivo (4.1) in conformità alle prescrizioni della normativa EN 60898: 2019 [3].



Figura 4-1: Interruttori prelevati dal campo

4.1 REQUISITI DI PROVA

La norma EN 60898: 2019 [3] prescrive le seguenti prove dielettriche da effettuare sui dispositivi:

1. Prova di rigidità dielettrica dei circuiti principali;
2. Verifica della tensione di tenuta a impulso;
3. Verifica delle correnti di dispersione attraverso contatti aperti.

Per eseguire le prove l'interruttore è stato posizionato su un supporto guida DIN, a contatto con una piastra metallica conforme ai requisiti di norma.

4.1.1 Prova di rigidità dielettrica dei circuiti principali

La prima prova consiste nel seguire le indicazioni scritte nel paragrafo 9.7.3 della EN 60898: 2019 [3], applicando la tensione di prova indicata al paragrafo 9.7.3 [3]. L'esecuzione della prova consiste nel collegare l'interruttore a un generatore sinusoidale 50 Hz a 2 kV per 1 minuto con riferimento al paragrafo 9.7.2 [3], il quale specifica le tipologie di collegamento. Durante l'esecuzione della prova, la tensione generata deve essere aumentata gradualmente partendo da un valore inferiore al 50 % della tensione di prova, per poi raggiungere la tensione di prova in meno di 5 secondi. Gli interruttori provati sono bipolari tranne uno e sono stati collegati con i seguenti schemi rappresentativi:

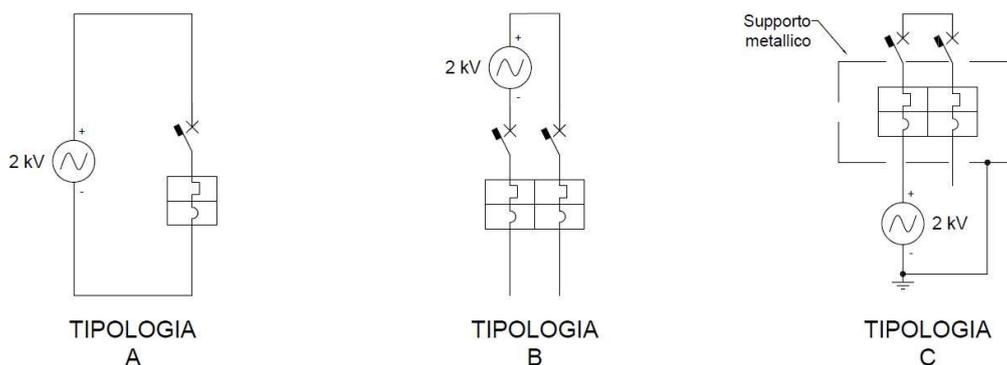


Figura 4-2: Schemi collegamenti 1° prova interruttori

Le prove di Figura 4-2 sono:

- Tipologia A: prevede di collegare ogni polo dell'interruttore separatamente, se per esempio l'interruttore ha due poli verranno eseguite due prove.
- Tipologia B: prevede di collegare il generatore a turno, tra ogni polo e gli altri collegati tra loro; quindi, se ci sono interruttori con quattro poli dovrà essere applicato a rotazione su ogni polo il segnale.
- Tipologia C: prevede di testare la tenuta dielettrica dell'interruttore verso terra.

Nella prova A il contatto dell'interruttore deve essere in posizione aperta; invece, nelle prove B e C la posizione del contatto deve essere chiusa.

Al punto 9.7.2 [3] della norma vengono indicate altre due tipologie D ed E, ma non avendo parti metalliche dell'interruttore accessibili e/o interruttori con involucri metallici rivestiti in materiale isolante, non sono state eseguite.

4.1.2 Verifica della tensione di tenuta a impulso

La seconda prova consiste nel seguire le indicazioni al punto 9.7.5 [3] applicando cinque impulsi positivi e negativi come richiesto per gli interruttori. L'impulso atmosferico generato deve avere queste caratteristiche 1,2/50 μ s, con tensione di picco V_{pk} di 4 kV, con lo schema di Figura 4-3.

Ricordandosi che tra un impulso e l'altro deve esserci almeno un intervallo di 1 secondo e tra impulsi di polarità opposta almeno 10 secondi, la prova ha esito positivo se l'interruttore non scarica.

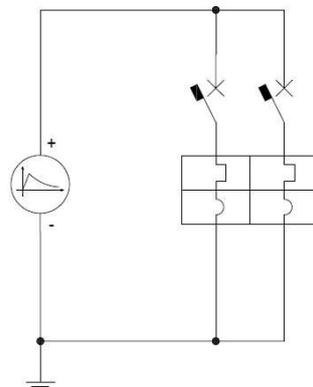


Figura 4-3: Schema collegamento 2° prova

4.1.3 Verifica delle correnti di dispersione attraverso i contatti aperti

Questa verifica consiste come spiegato al paragrafo 9.7.5.3 [3] nell'applicare a contatti aperti una tensione efficace di 1,1 volte la tensione nominale di impiego per un minuto e controllare la corrente dispersa nel circuito che non superi 2 mA.

In questo caso la tensione nominale indicata sui dispositivi è di 400 V, quindi la tensione di prova è 440 V.

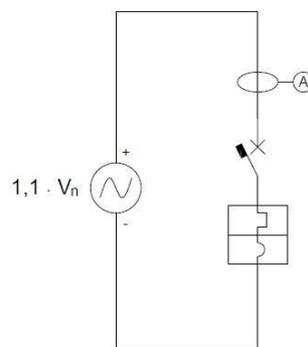


Figura 4-4: Schema collegamento 3° prova

4.2 RISULTATI VERIFICHE PRELIMINARI

Nella Tabella 1 sono riassunti i dati principali delle prove per il primo interruttore e i risultati. Nell'appendice A sono elencanti tutti i risultati degli altri interruttori provati.

Tabella 1: Risultati prove 1,2 e 3 per l'interruttore 1 (prelevato dal campo)

<u>INT.</u> <u>1</u>	I_{disp} [mA]	Note	Tipo prova	Posizione interruttore	Esito prova
Prova 1	0,033	P ₁	A	APERTO	✓
	0,011	P ₂	A	APERTO	✓
	0,024	-	B	CHIUSO	✓
	0,038	-	C	CHIUSO	✓
Prova 2	-	-	-	APERTO	✓
Prova 3	0	P ₁	-	APERTO	✓
	0	P ₂	-	APERTO	✓

N.B. P₁= 1° polo; P₂= 2° polo;

Le prove hanno dato riscontro positivo su tutti gli interruttori tranne "l'interruttore 6" (quadripolare) che ha fallito la prova dell'impulso e "l'interruttore 7", di cui solo il quarto polo ha avuto riscontro positivo.

Tutti gli interruttori che hanno passato la prova, nonostante siano stati utilizzati, sono rientrati abbondantemente nei requisiti previsti.

4.3 PROVA DI MASSIMA TENUTA DI TENSIONE DELL'INTERRUTTORE PRELEVATO DAL CAMPO

La prova consiste nel testare l'interruttore prelevato dal campo, alimentandolo prima con solo la tensione di impulso e dopo con solo la tensione sinusoidale, aumentando gradualmente le tensioni fino ad arrivare al limite della sua tenuta dielettrica. Questa prova è stata eseguita "sull'interruttore 4", collegando i generatori ai capi dei contatti.

Vengono utilizzati per la prova i generatori precedenti, Passoni Villa e Laboratorium UH 28M.

La massima tensione di impulso che riesce a sostenere l'interruttore è di 5,8 kV. Dopo è stato alimentato l'interruttore con tensione sinusoidale. Il valore raggiunto è stato di 3,8 kV_{rms}.

Si riporta in Figura 4-5 l'interruttore aperto, dopo le prove di massima tensione di tenuta.

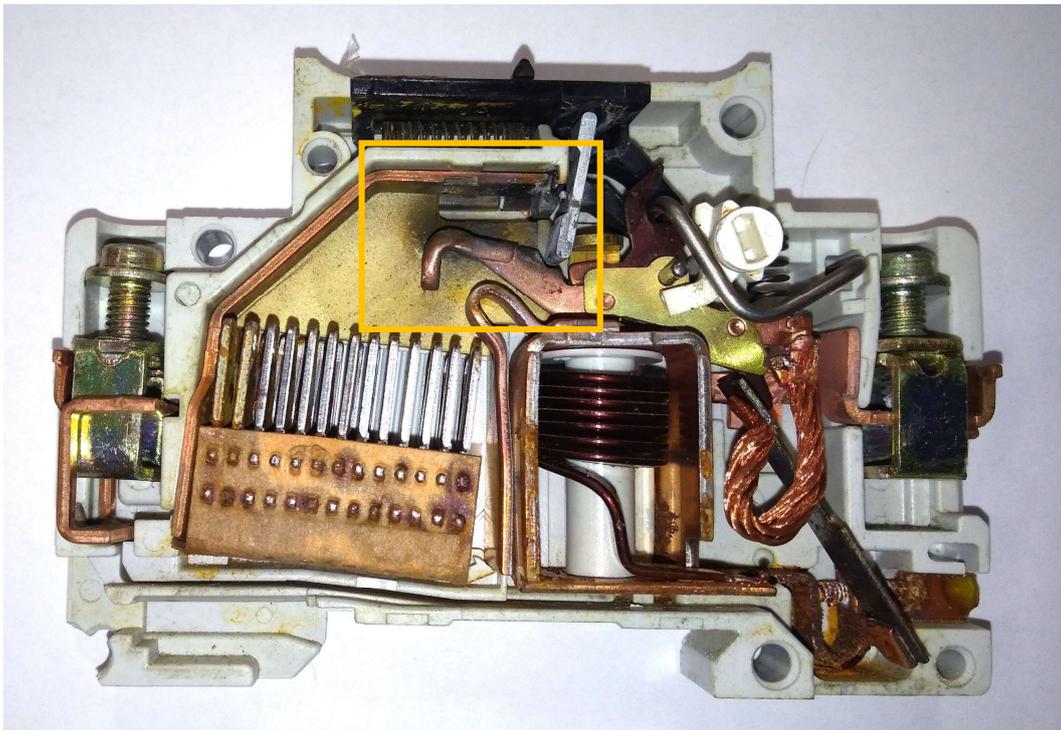


Figura 4-5: Foto "interruttore 4" aperto per ispezione

Come si può notare dalla Figura 4-5 la zona in cui si innesca l'arco elettrico (evidenziata) è quella del contatto mobile. In basso a sinistra è presente la camera di estinzione dell'arco, dove quest'ultimo si allunga e di conseguenza si spegne. Nella zona centrale inferiore possiamo notare la bobina che ha lo scopo di intervenire quando le correnti superano il valore della corrente magnetica. Da un'accurata ispezione dell'interruttore si identificano anche delle tracce di ruggine.

5 PROVE SU INTERRUTTORI PRELEVATI DAL CAMPO CON TENSIONE COMBINATA

Dopo aver controllato le prestazioni iniziali dei dispositivi, ora possiamo passare alla realizzazione del circuito per la tensione combinata. Le fasi preliminari sono sempre:

- Decidere quali generatori impiegare in base alle tensioni che si vogliono generare;
- Studiare analiticamente il circuito per capire se i divisori supportano il tipo di tensione e la corrente;
- Controllare che i sistemi di acquisizione siano in grado di leggere tensioni maggiori di quelle in uscita dai divisori;
- Controllare le bande passanti degli strumenti;
- Settare i software, per acquisire i segnali.

5.1 ESECUZIONE PROVA

In accordo con la normativa EN 60060-1: 2010 [2], la prova consiste nel combinare la risposta all'impulso con valore di tensione di picco di 4 kV e il segnale sinusoidale di 2 kV efficaci come vuole la normativa. Quindi sono stati riutilizzati i generatori precedentemente descritti nel capitolo 3. Per acquisire l'impulso è stato utilizzato il "divisore 1" (Figura 3-6). Per il segnale sinusoidale è stata utilizzata la sonda SHT40kV.

5.2 CIRCUITO DI PROVA SENZA CONTROLLO DELL'ISTANTE DI INSERZIONE

Nello schema seguente viene illustrato il collegamento dell'interruttore in prova con la strumentazione.

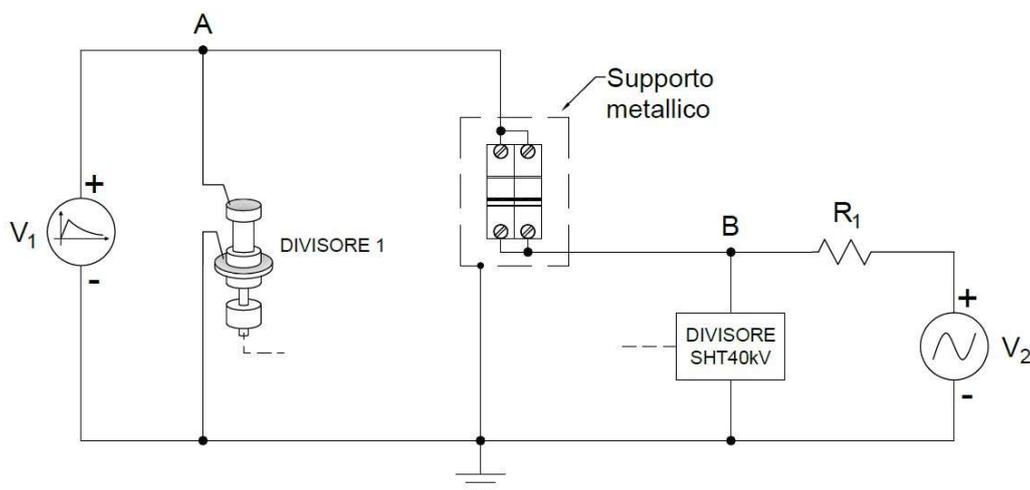


Figura 5-1: Schema circuito con tensione combinata - Layout 1

È stata inserita una resistenza “R₁” da 900 Ω come elemento di protezione al fine di proteggere il generatore sinusoidale da eventuali scariche pericolose derivanti dal segnale impulsivo.

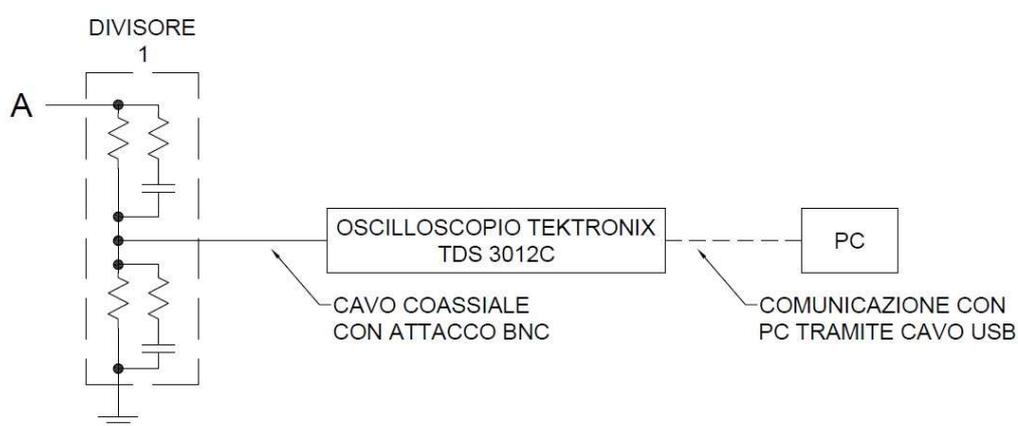


Figura 5-2: Schema del sistema di acquisizione della tensione d'impulso

Per acquisire il segnale di impulso, come ho detto precedentemente utilizzo il divisore di tensione creato nel laboratorio collegandolo all'oscilloscopio e tramite software della National Instruments vengono definiti i parametri dell'oscilloscopio e acquisito l'impulso tramite trigger. (Figura 5-2)

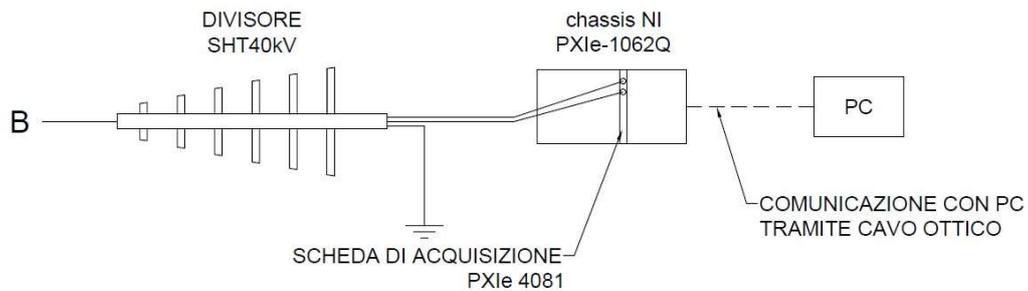


Figura 5-3: Schema di acquisizione della tensione sinusoidale

Come spiegato nel capitolo 3.6, il segnale sinusoidale è acquisito come illustrato nella Figura 5-3. La comunicazione tra la scheda di acquisizione e il computer avviene tramite cavo ottico.

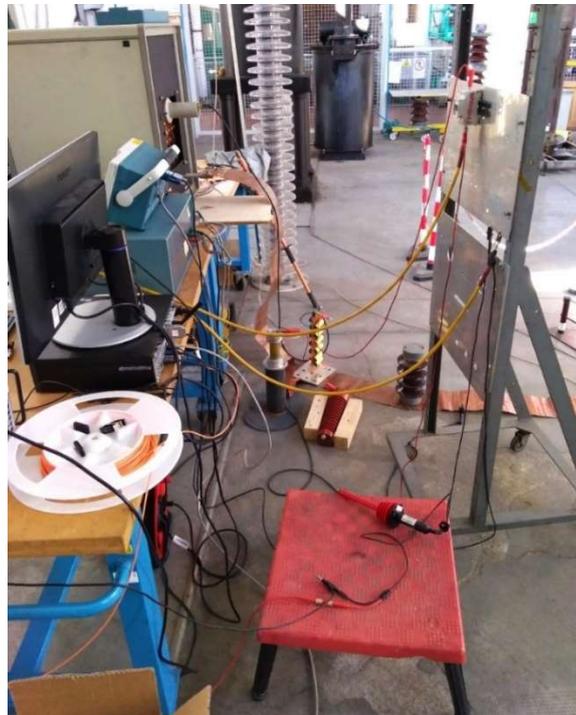


Figura 5-4: Schema pratico

Tabella 2: Riassunto strumentazione

	Generatori	Divisori	Acquisizione
Misura AC	UH28M	SHT40kV	PXIe 4081
Misura impulso	Passoni Villa	“Divisore 1”	Tektronix TDS3012C

5.2.1 Risultati

Per raccogliere un numero adeguato di informazioni è stato deciso di eseguire cinque impulsi positivi automatici con un intervallo di circa 4 secondi e altrettanti con impulso negativo, in contemporanea al segnale sinusoidale.

Ho eseguito queste due serie di prove per tutti gli interruttori. Riporto un esempio acquisito di impulso positivo e negativo.

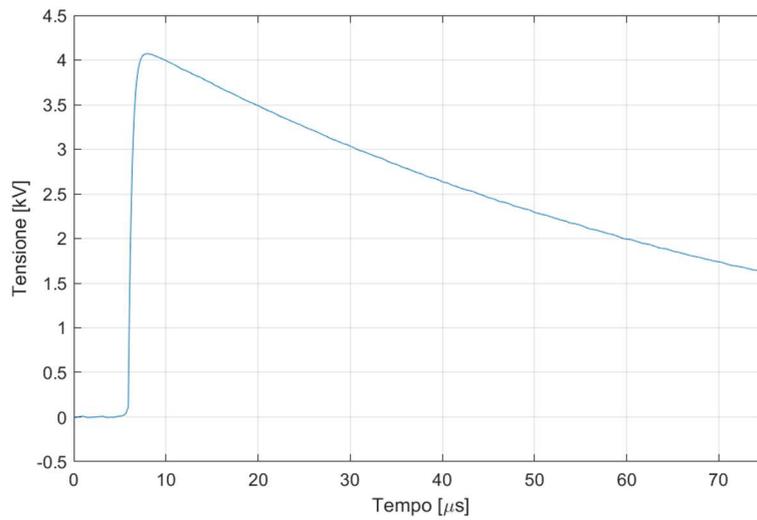


Figura 5-5: Acquisizione impulso positivo $V_1(t)$ nel punto A

Prove su Interruttori Prelevati dal Campo con Tensione Combinata

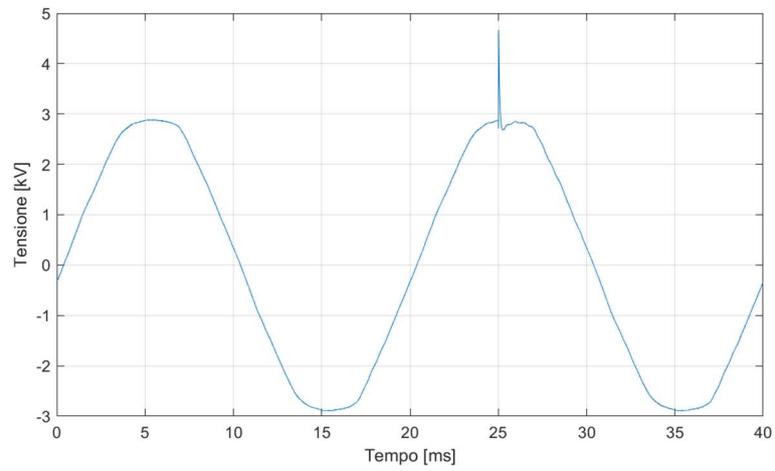


Figura 5-6: Risultato all'impulso positivo nel punto B

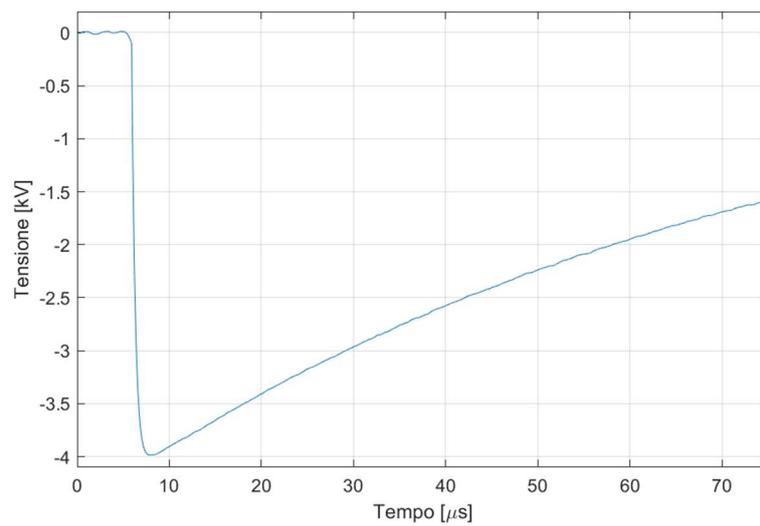


Figura 5-7: Acquisizione impulso negativo $V_I(t)$ nel punto A

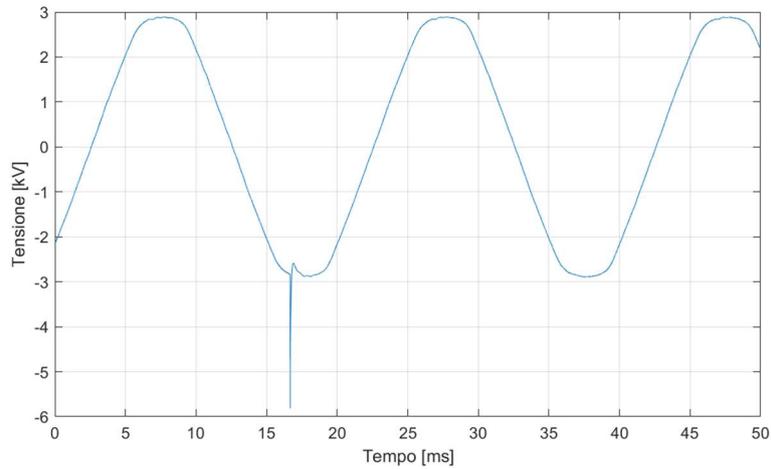


Figura 5-8: Risultato all'impulso negativo nel punto B

I grafici degli impulsi (Figura 5-5, Figura 5-7), hanno una scala tempi adeguata a visualizzare correttamente l'impulso, cioè in microsecondi (μs). Invece nei grafici nel "punto B" dovendo acquisire una tensione sinusoidale di 50 Hz, equivalente a un periodo di 20 ms, è stata utilizzata una scala in millisecondi (ms). Per quanto riguarda l'asse verticale acquisendo una tensione sinusoidale di 2 kV efficaci, il valore di picco è 2,8 kV.

Possiamo notare che l'onda sinusoidale viene distorta nell'istante di inserzione dell'impulso in Figura 5-6 e in Figura 5-8, si capirà in seguito il motivo di quanto appena visto.

Prima di ogni prova con generatori spenti vengono eseguite delle acquisizioni nel "punto B", per constatare che il sistema di misura non presenti incongruenze. Da questa riflessione è stato pensato di acquisire la tensione nel punto B con generatore sinusoidale spento ed eseguire un impulso. (Figura 5-9)

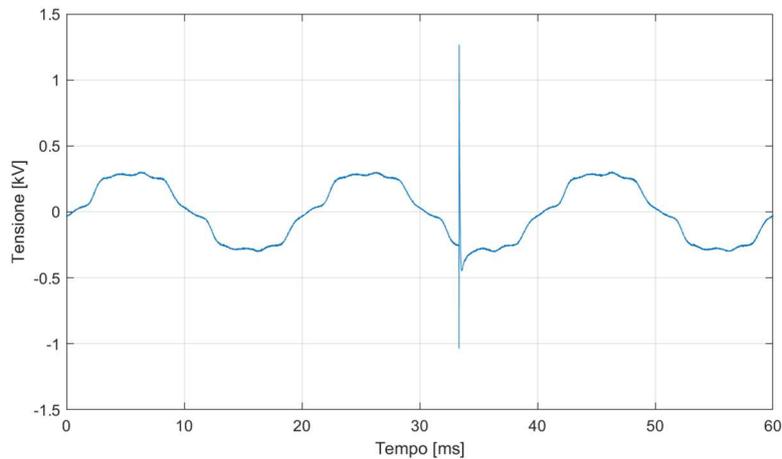


Figura 5-9: Risultato generatore sinusoidale spento nel punto B con inserzione impulso

Da questa prova si evince, in Figura 5-9, la presenza di una forma d'onda a 50 Hz a vuoto e nell'istante dell'innescò dell'impulso si visualizza un fenomeno veloce. La forma d'onda sovrapposta all'impulso è un disturbo di qualche centinaio di millivolt dovuto al fatto che la sonda SHT40kV capta segnali nelle vicinanze, probabilmente causati dalla rete elettrica.

Analizzando la scala tempi del fenomeno veloce e i valori di picco, si intuisce che è un rumore causato dall'impulso, ma nella realtà non ha scaricato l'interruttore. Confrontando con la prova con il generatore sinusoidale acceso, visti in Figura 5-6 e Figura 5-8, vediamo che hanno la stessa forma, quindi constatiamo che è soltanto rumore. Questi picchi sono creati dalla ionizzazione dell'aria all'interno dell'interruttore nel momento dell'innescò dell'impulso, il quale fa variare il campo elettrico all'interno.

La tensione combinata si misura tra i morsetti dei contatti, per far questo è stato usato un metodo analitico con la seguente Equazione 5-1 estrapolando il valore della sinusoide nell'istante dell'impulso (t_1) e il valore di picco massimo dell'impulso calcolato.

Equazione 5-1

$$\Delta V = V_2(t_1) - V_1(t_1)$$

L'incertezza di misura è stata calcolata nell'appendice 1.

Per l'interruttore 1:

Tabella 3: Valori di tensioni combinate con impulso positivo e negativo dell'interruttore 1

N°	IMPULSO POSITIVO			IMPULSO NEGATIVO		
	V ₂ [kV]	V ₁ [kV]	ΔV [kV]	V ₂ [kV]	V ₁ [kV]	ΔV [kV]
1	2,875	4,088	- 1,212 ± 0,035	- 2,236	- 3,942	1,706 ± 0,049
2	2,535	4,085	- 1,551 ± 0,045	- 0,205	- 4,076	3,871 ± 0,112
3	2,873	4,083	- 1,210 ± 0,035	- 2,827	- 3,986	1,159 ± 0,034
4	2,208	4,078	- 1,869 ± 0,054	- 2,106	- 4,043	1,937 ± 0,056
5	2,884	4,071	- 1,187 ± 0,034	- 2,716	- 3,998	1,282 ± 0,037

Analizzando i valori della Tabella 3 si può notare come la maggior parte delle volte gli impulsi capitino nella zona limitrofa del picco della sinusoide in base alla sua polarità. Studiando i casi è stato notato che l'interruttore non si trova nella condizione peggiore, perché il generatore di tensione impulsiva scarica l'impulso positivo/negativo nell'istante corrispondente al picco positivo/negativo della sinusoide, con inserzione automatica della scarica.

5.3 CIRCUITO DI PROVA CON COMANDO MANUALE

Questa prova prevede di aggiornare la prova precedente (paragrafo 5.2), cercando di scaricare l'impulso nell'istante di picco della semionda negativa se impulso è di polarità positiva. Per far questo è stato configurato il generatore di tensione impulsiva in inserzione manuale, quindi la scarica dell'energia avviene quando si preme un pulsante. Eseguendo diverse prove "sull'interruttore 3" è stato osservato che in modo casuale e con un pizzico di fortuna scaricare l'impulso nell'istante voluto è fattibile.

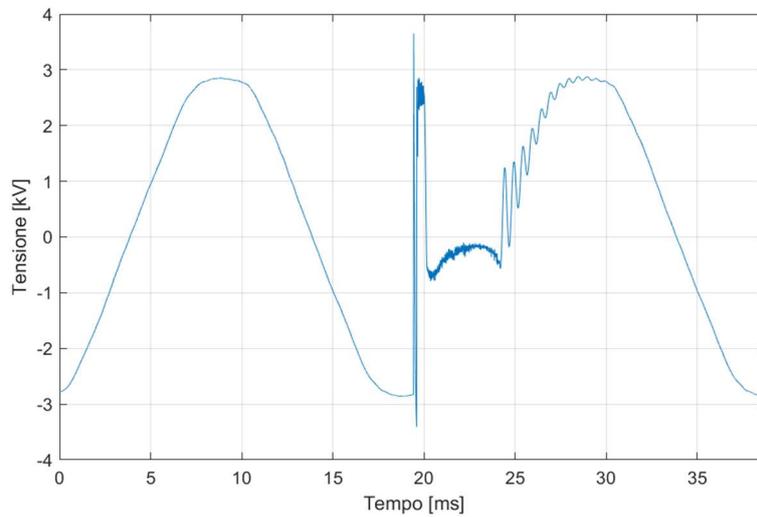


Figura 5-10: Risultato impulso positivo con comando manuale nel punto B – "Interruttore 3"

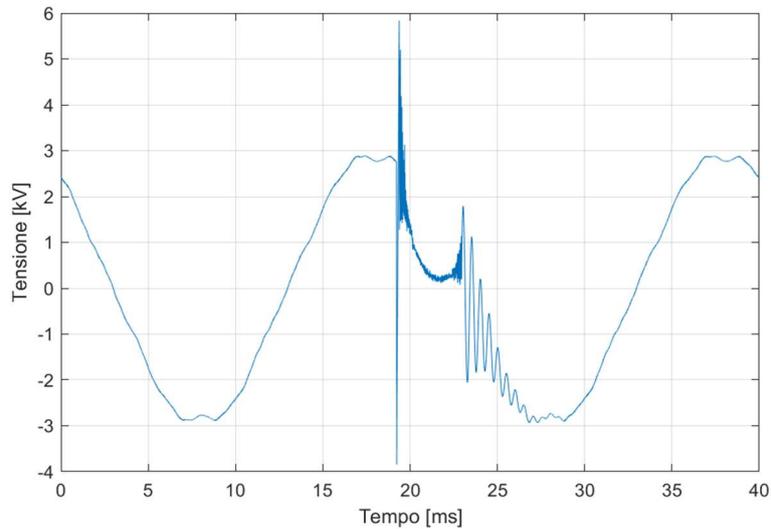


Figura 5-11: Risultato impulso negativo con comando manuale nel punto B – “Interruttore 3”

Dalle prove eseguite si possono osservare disturbi maggiori rispetto all’inserzione manuale. Con impulso negativo nel caso tipo di Figura 5-11, il generatore sinusoidale è andato in protezione aprendo l’interruttore interno, però la corrente di soglia era di 10 mA. Nelle prove successive, è stata aumentata la soglia di corrente del generatore sinusoidale a 100 mA e con “l’interruttore 3” non andava più in protezione. Una minima corrente di dispersione c’è sempre lo si nota nelle prove di prestazione dell’interruttore, quindi, il valore di quella corrente non può essere considerata una corrente di scarica. Proseguendo con gli altri interruttori possiamo notare che gli “interruttori 1 e 2” che sono più giovani rispetto gli altri, non presentano disturbi eccessivi. (Figura 5-12)

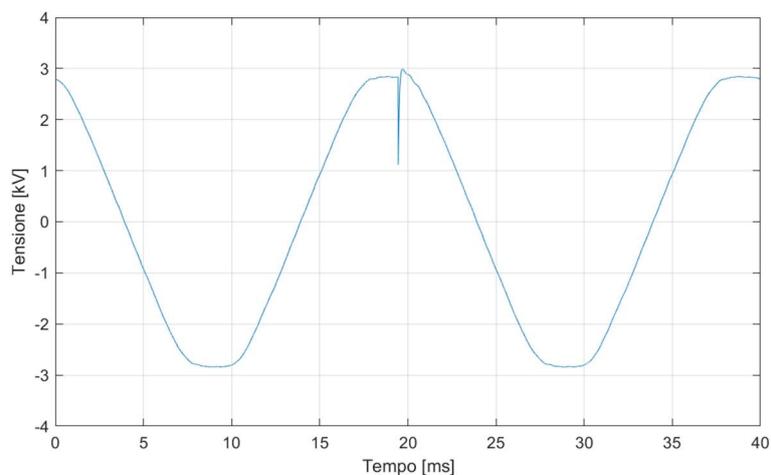


Figura 5-12: Risultato impulso negativo con comando manuale nel punto B – “Interruttore 2”

Viene riportato un set di nuove misure di tensioni combinate della prova sull’ “interruttore 5” che ha avuto i migliori risultati.

Tabella 4: Tensioni combinate “interruttore 5” con impulso a comando manuale positivo e negativo

N°	IMPULSO POSITIVO			IMPULSO NEGATIVO		
	V ₂ [kV]	V ₁ [kV]	ΔV [kV]	V ₂ [kV]	V ₁ [kV]	ΔV [kV]
1	- 2,549	4,106	- 6,655 ± 0,193	2,904	- 4,103	7,007 ± 0,203
2	- 2,501	4,215	- 6,716 ± 0,195	2,853	- 4,030	6,883 ± 0,199

Dalla Tabella 4 si può constatare che rispetto alla prova precedente (Tabella 3) la tensione combinata in questo caso è la somma delle due tensioni, quindi si delinea il caso peggiore.

In questa prova gli “interruttori 1, 2, 3, 5, 7” hanno passato la prova vedendo la forma d’onda dell’impulso. Invece, “l’interruttore 4” con il generatore sinusoidale limitato in corrente a 100 mA, interveniva comunque con impulso negativo su semionda positiva, però la forma d’onda vista dal “divisore 1” non era quella aspettata di Figura 5-13, ma di un normalissimo impulso.

Prove su Interruttori Prelevati dal Campo con Tensione Combinata

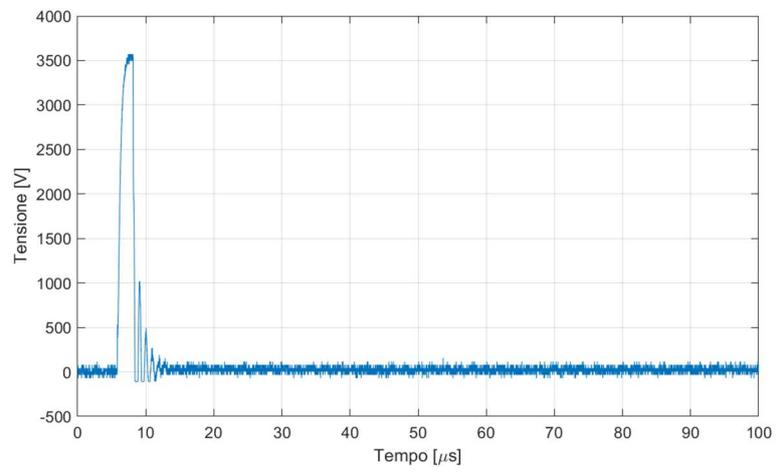


Figura 5-13: Forma d'onda impulso quando scarica a terra

5.4 MISURA FLOTTANTE SULLA RESISTENZA SERIE

Dalla prova precedente dato che il generatore sinusoidale interviene e toglie alimentazione, abbiamo colto l'occasione di analizzare la caduta di tensione ai capi dell'elemento di blocco (R_1). Per salvaguardare il generatore sinusoidale è stata sostituita la resistenza da 900Ω con una serie di sei resistenze da 570Ω (Figura 5-15) per un totale di $3,4 \text{ k}\Omega$. La caduta di tensione ai capi di una resistenza delle sei viene acquisita attraverso un oscilloscopio portatile (paragrafo 3.7).

In Figura 5-14 si riporta lo schema di collegamento.

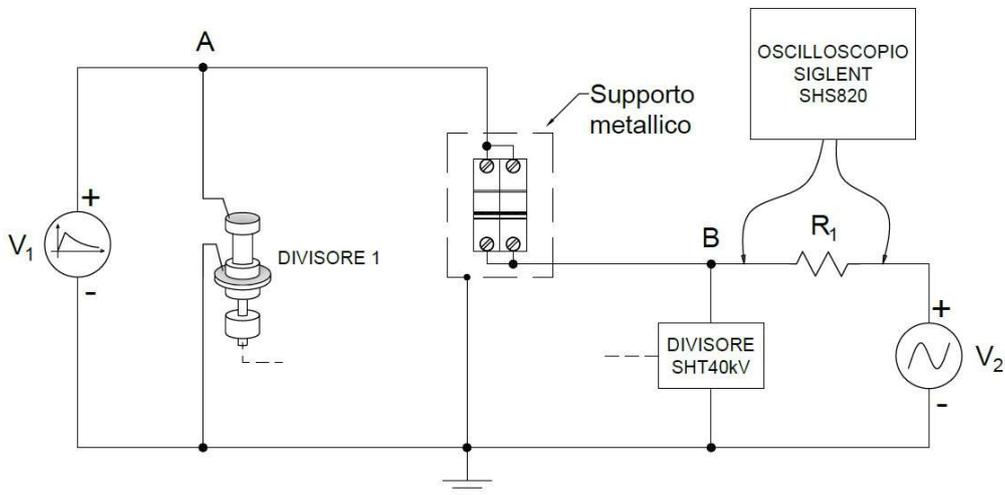


Figura 5-14: Schema tensione combinata layout 2



Figura 5-15: Sei resistenze ognuna da 570Ω in serie al generatore sinusoidale

5.4.1 Risultati

I risultati delle forme d'onda dei "punti A e B" non sono cambiati modificando il valore della resistenza R_1 . L'oscilloscopio portatile è stato programmato in modo da poter acquisire l'istante di inserzione dell'impulso. Vediamo in Figura 5-16 che in corrispondenza dell'impulso negativo su semionda positiva, la caduta di tensione sulle resistenze è circa a 500 V con saturazione, per la legge di Ohm $I = V / R$, la corrente è maggiore di 800 mA.

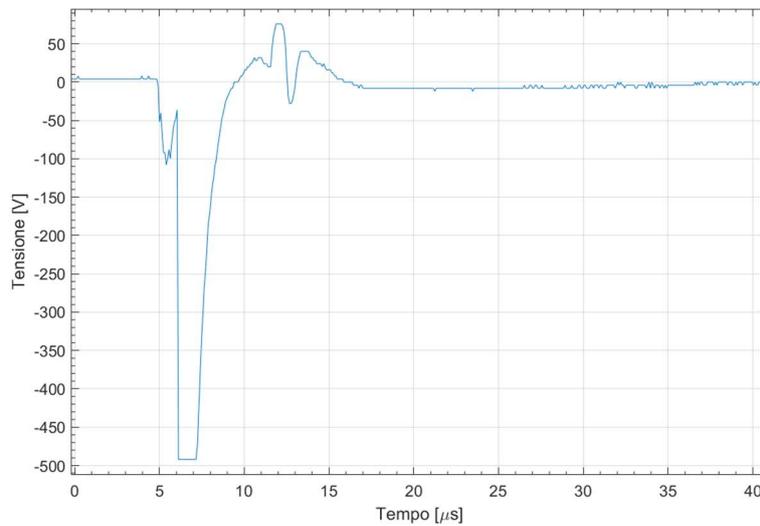


Figura 5-16: Acquisizione oscilloscopio portatile

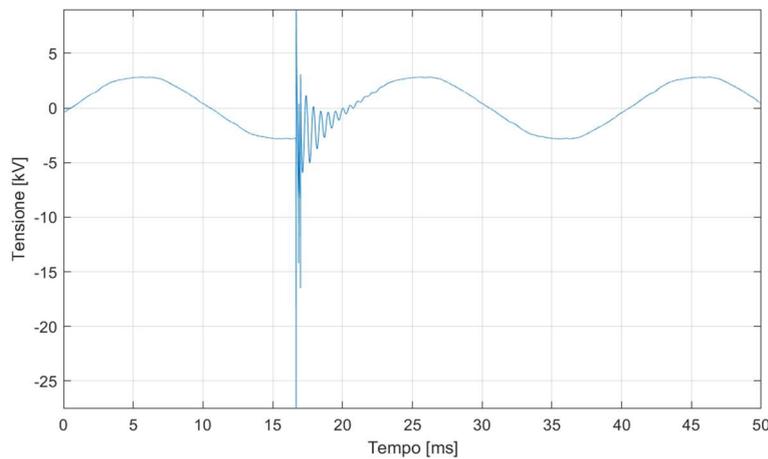


Figura 5-17: Acquisizione tensione nel punto B

Non capendo se questa corrente provenisse dal generatore sinusoidale o dal generatore di impulso abbiamo eseguito la prova successiva.

5.5 ANALISI MISURAZIONE DELLA CORRENTE DI UN IMPULSO

Il problema di misurare la corrente con altri metodi era che gli strumenti in laboratorio hanno fondo scala dell'ordine di centinaia di ampere e banda passante bassa, dunque non si può acquisire in modo corretto le variazioni della tensione dell'ordine di μs . Quindi, si è proceduto a confrontare una Rogowski, una pinza amperometrica, e infine uno shunt, tutti dispositivi presenti in laboratorio. Per semplificare l'interpretazione dei risultati, è stato pensato di svolgere delle prove collegando il generatore di impulsi in serie a uno spinterometro e misurare la corrente passante verso terra attraverso i tre dispositivi. Nei paragrafi successivi si introducono i tre dispositivi e lo spinterometro.

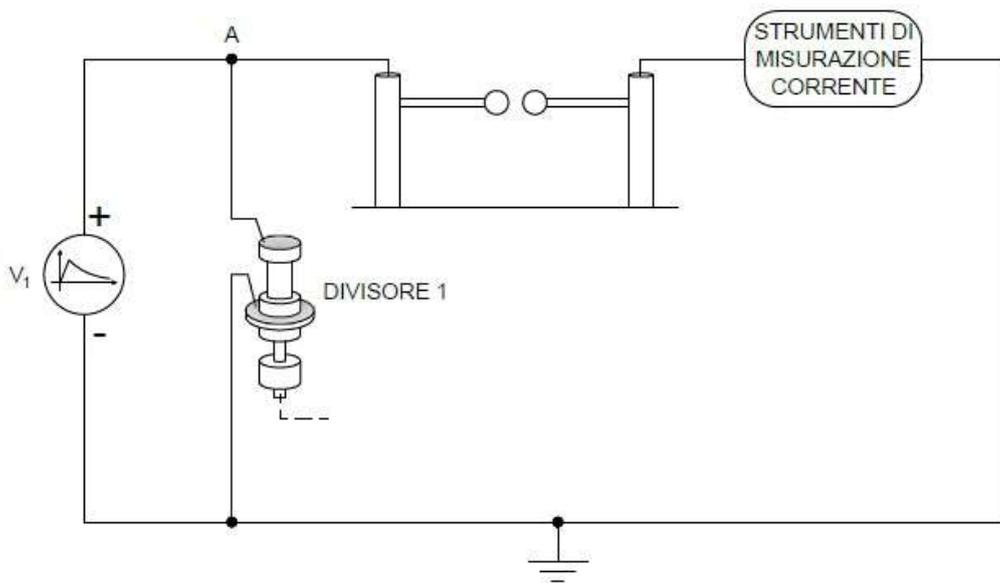


Figura 5-18: Schema generale del collegamento per misurare la corrente con i tre strumenti

5.5.1 Rogowski

La bobina di Rogowski (Figura 5-19) che è stata utilizzata può sostenere una corrente di 2,5 kA efficaci e in uscita la tensione efficace massima è di 5 V. Quindi il fattore di scala è di 2 mV/A. La sua banda passante è dell'ordine dei GHz.



Figura 5-19: Rogowski

5.5.2 Pinza amperometrica

La pinza amperometrica della CHAUVIN ARNOUX modello PAC 12 (Figura 5-20), alimentata a batteria con due fattori di scala 1 mV/A e 10 mV/A, ha una banda passante di 2 kHz e può dare in uscita verso oscilloscopio un massimo di ± 3 V.



Figura 5-20: Pinza amperometrica PAC 12

Ci aspettiamo di vedere la corrente generata dall'impulso, ma essendo il segnale di frequenza molto maggiore sarà ritardato e ridotto in ampiezza.

5.5.3 Shunt

Lo shunt è una resistenza da 100 Ω (Figura 5-21), la quale si trova chiusa in una scatola metallica. Questa aggiunta dell'involucro garantisce una schermatura dai disturbi. Dato che la tensione letta sarà piccola è stato aggiunto un amplificatore di segnale, il quale non amplifica solo il segnale, ma lo filtra. Questo metodo, essendo direttamente collegato alla parte conduttrice di misura, è il più affidabile.



Figura 5-21: Shunt di resistenza 100 Ω

5.5.4 Risultati

Per avere una migliore comprensione dei risultati è stato acquisito, tramite la pinza amperometrica e la Rogowski, il segnale durante la scarica e non scarica dello spinterometro, così è possibile visualizzare gli eventuali disturbi.

Questi strumenti sono stati collegati al secondo canale dell'oscilloscopio, il quale utilizza il primo canale come riferimento per acquisire.

Le acquisizioni sono in tensione e per trasformarli in corrente, basta dividere per il fattore di conversione dei singoli strumenti.

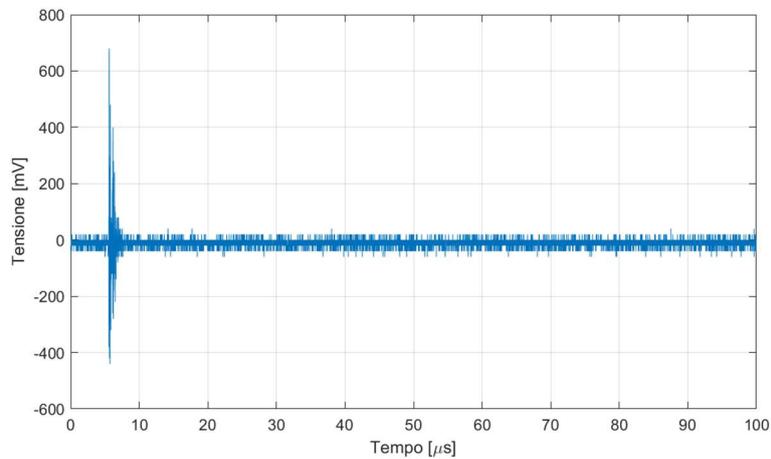


Figura 5-22: Acquisizione corrente tramite Rogowski – Caso senza scarica

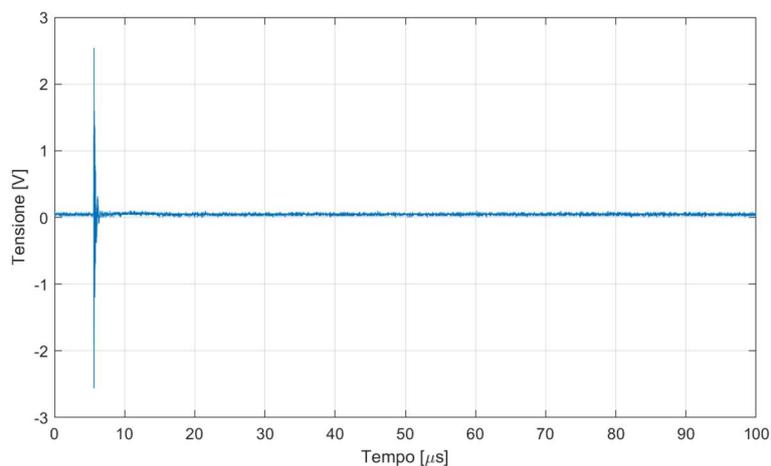


Figura 5-23: Acquisizione corrente tramite pinza amperometrica - Caso senza scarica

Dai grafici delle acquisizioni delle tensioni dei due strumenti, si può notare che nell'istante di inserzione dell'impulso si vedono gli effetti di disturbo già visti nelle prove precedenti.

Ora riportiamo i risultati dell'impulso con i tre strumenti quando si ha il caso di scarica.

Rogowski:

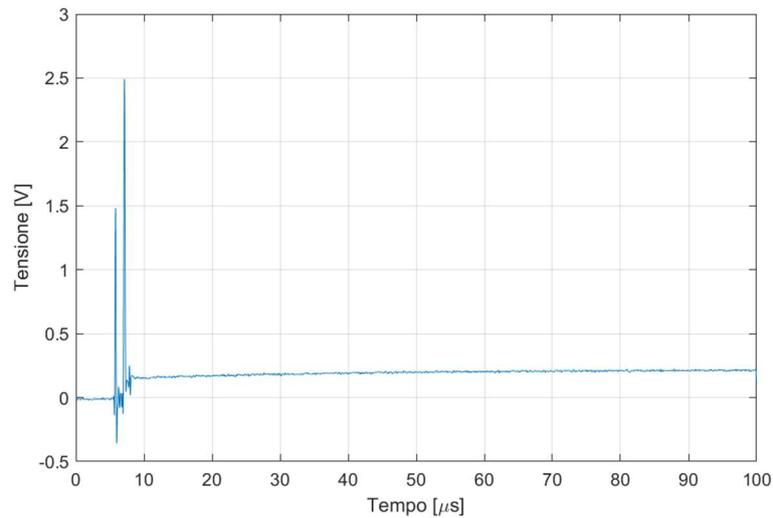


Figura 5-24: Acquisizione corrente tramite Rogowski con $f_i = 1\text{MHz}$ - Caso di scarica

Pinza amperometrica:

Si riporta il risultato filtrato con filtro passa basso con frequenza di 2 kHz, uguale alla banda passante della pinza amperometrica.

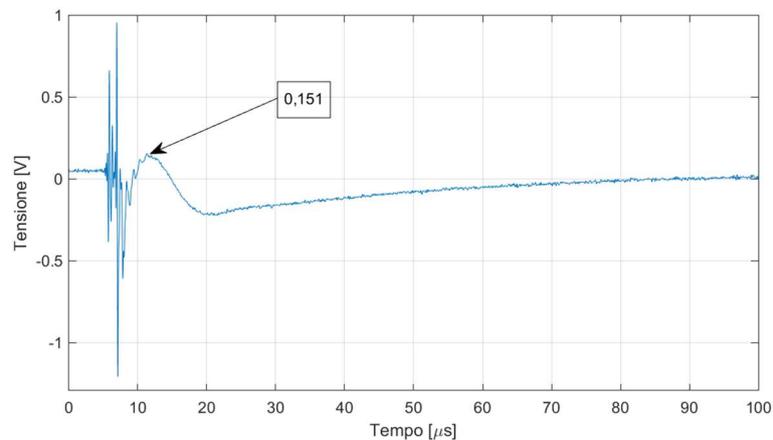


Figura 5-25: Acquisizione pinza amperometrica con filtro passa basso di $f_i = 2\text{kHz}$ - Caso scarica

Resistenza di shunt:

Il risultato seguente è stato filtrato dai disturbi introdotti dalla banda passante degli strumenti troppo alta.

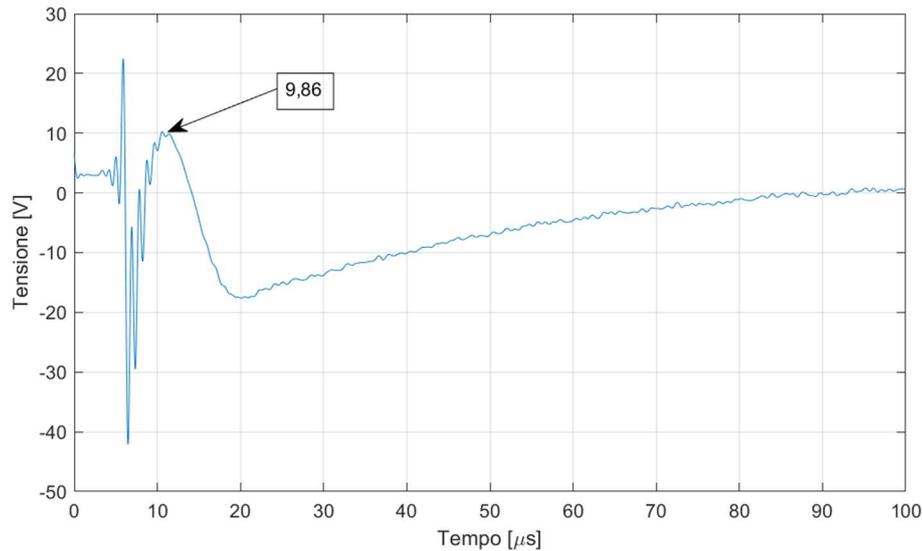


Figura 5-26: Acquisizione tensione dello shunt - Caso scarica

Confrontando i tre strumenti possiamo affermare che lo strumento di riferimento migliore è la misura della tensione ai capi dello shunt, perché misura direttamente sul circuito. Lo strumento che si avvicina di più al risultato della Figura 5-26 è la pinza amperometrica. La Rogowski avendo una banda passante molto elevata, capta qualsiasi disturbo nelle vicinanze, quindi il risultato di Figura 5-24, si ritiene poco affidabile per la misura di correnti piccole. Il valore di corrente rilevato dallo shunt è di circa 1 A che è plausibile, invece la corrente della pinza amperometrica rilevata nel primo picco è di 15 A.

Dopo questa prova di valutazione degli strumenti eseguiamo le misure di corrente con pinza amperometrica e shunt sul circuito della tensione combinata.

5.5.5 Misura della corrente su circuito della tensione combinata

Dato che per la misura della corrente avviene attraverso il collegato della pinza amperometrica e dello shunt sullo stesso canale dell'oscilloscopio Tektronix, non è possibile acquisire entrambi gli strumenti in una singola prova.

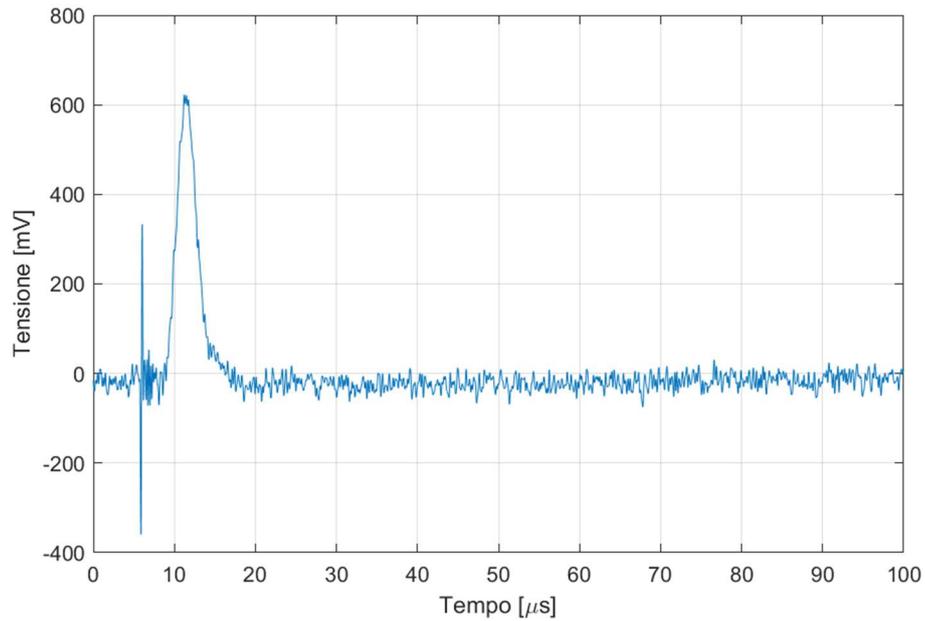


Figura 5-27: Acquisizione con shunt da 100 Ω , con filtro passa basso con $f_c = 1$ MHz

Dalla Figura 5-27, si può notare una tensione di 600 mV, la quale convertita in corrente equivale a circa 60 mA. Questo ci fa intendere che non è avvenuta nessuna scarica, dato che dovrebbe raggiungere il valore di 1 A.

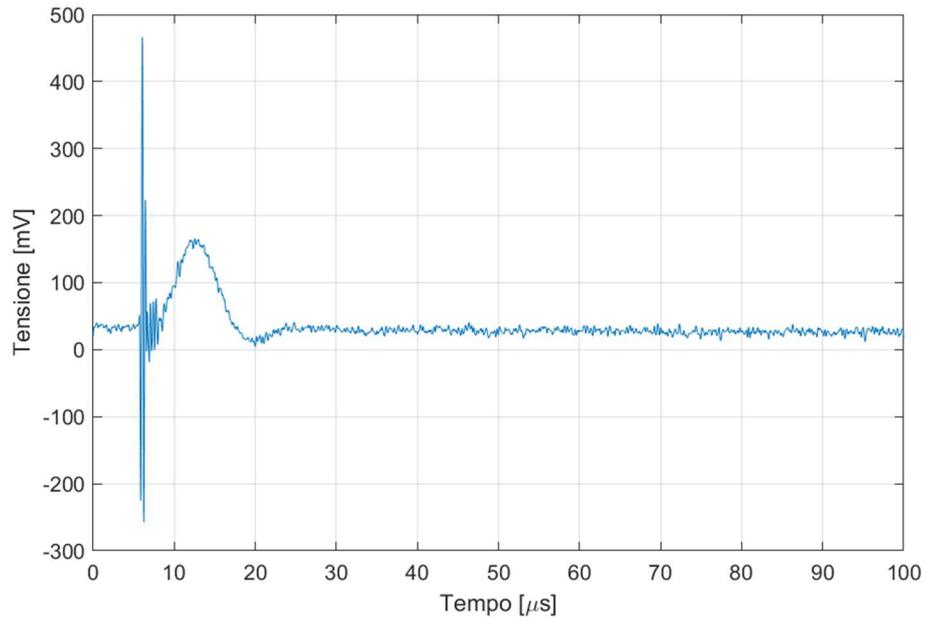


Figura 5-28: Acquisizione attraverso pinza amperometrica con filtro $f_i = 2 \text{ kHz}$

Nella Figura 5-28 vediamo che la pinza amperometrica, impostata sulla scala 10 mV/A, rileva due picchi di 15 A e 1,4 A. E rispetto alle altre prove è presente un offset prima e dopo l'innesco dell'impulso.

Da questa prova non si riesce a identificare in modo accettabile il fenomeno di scarica e quindi trarre conclusioni soddisfacenti analizzando solo la corrente percorsa. Però si sono comparati diversi modi di acquisizione della corrente e capito quali metodi siano migliori per osservare il fenomeno della prova.

6 ANALISI FENOMENO DI SCARICA

Per analizzare il fenomeno di scarica che dovrebbe avvenire all'interno dell'interruttore è stato necessario sostituire quest'ultimo con uno spinterometro a sfere, ovvero due sfere di ottone in aria che replicano un contatto aperto in aria.

6.1 PRE-ANALISI SU SPINTEROMETRO

La prova consiste nel misurare la tensione combinata ai capi delle sfere imponendo una tensione impulsiva positiva nell'istante di semionda negativa della tensione sinusoidale. Si lavorerà per ottenere i seguenti casi:

- 1°) non scarica del dispositivo, lettura di differenza di potenziale ai capi;
- 2°) scarica del dispositivo, assenza di differenza di potenziale ai capi;

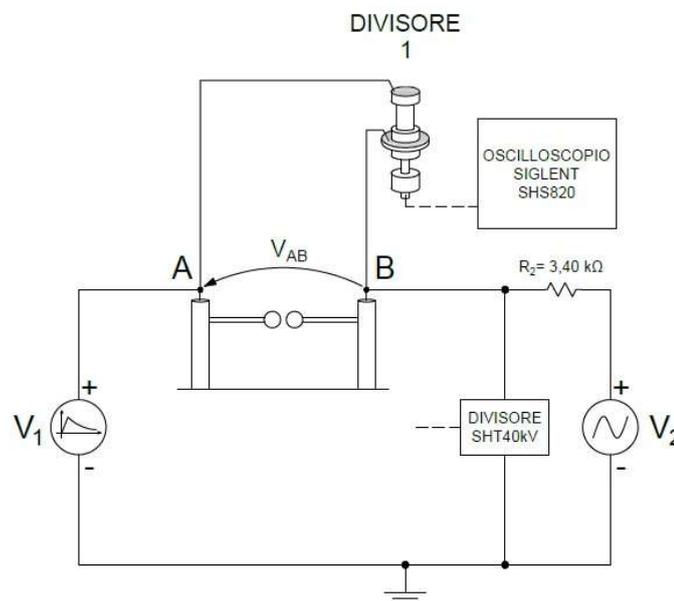


Figura 6-1: Schema collegamento spinterometro

La misura della tensione ai capi dei contatti (V_{ab}) sarà eseguita con il “divisore 1”, collegato all'oscilloscopio portatile. Questa misura (detta “flottante”), non essendo

riferita a terra, è pericolosa perché i due terminali sono a potenziale diverso. La misura flottante ci porta a prendere precauzioni maggiori perché durante la prova il dispositivo di misura va a potenziale, quindi deve essere appoggiato su un oggetto isolato da terra e distanziato dal possibile contatto accidentale del personale. Durante la prova il dispositivo non dovrà essere collegato all'alimentazione di rete. Nella Figura 6-2 si riporta la disposizione degli strumenti nell'area di prova.



Figura 6-2: Zona prova per analisi fenomeno di scarica con spinterometro

Prima di procedere ad alimentare le due sorgenti di tensioni in contemporanea, è stata svolta la prova alimentando solo con la sorgente di tensione sinusoidale impostando sull'oscilloscopio portatile ("Siglent") un trigger minore della tensione massima sinusoidale. Questa prova serve a controllare l'assenza di disturbi nella misura.

6.1.1 Risultati

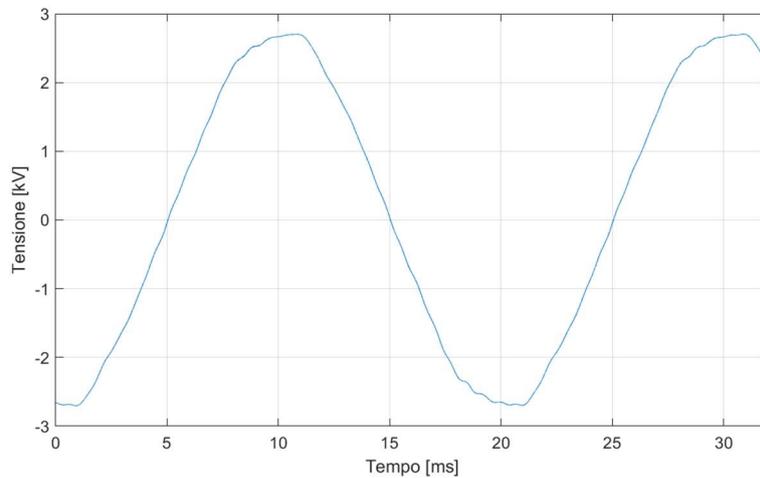


Figura 6-3: Acquisizione con sonda SHT40kV

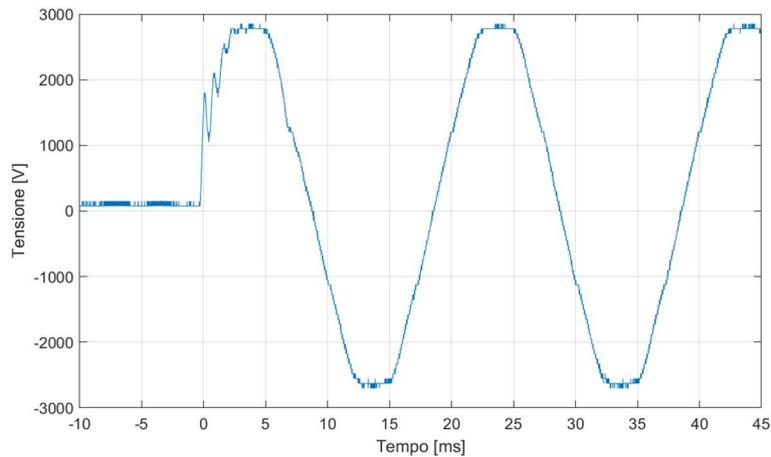


Figura 6-4: Tensione combinata V_{ab} , applicando solo tensione sinusoidale

In Figura 6-3 possiamo notare che la forma d'onda della sinusoide non è perfetta, questo è causato da disturbi sulla rete causati dai carichi dell'utenza.

Con le Figura 6-3 e Figura 6-4 si confronta la tensione sinusoidale acquisita da due sistemi differenti, confermando le previsioni. Si osserva in Figura 6-4 che il Siglent ha acquisito dall'istante in cui si è data alimentazione, quindi è normale vedere dei disturbi nei momenti iniziali, si conferma che non ci sono infiltrazioni di disturbi.

Ora che siamo certi che il sistema è configurato in modo corretto e non ci sono disturbi dannosi, possiamo procedere ad acquisire il segnale della tensione combinata con tutte e due le tensioni applicate simultaneamente.

Per acquisire il segnale, nel primo caso, è stato configurato lo spinterometro in modo che non si potesse innescare l'arco elettrico ("scarica"). Da questa prova ci si aspetta che la tensione combinata sia la differenza tra le due tensioni.

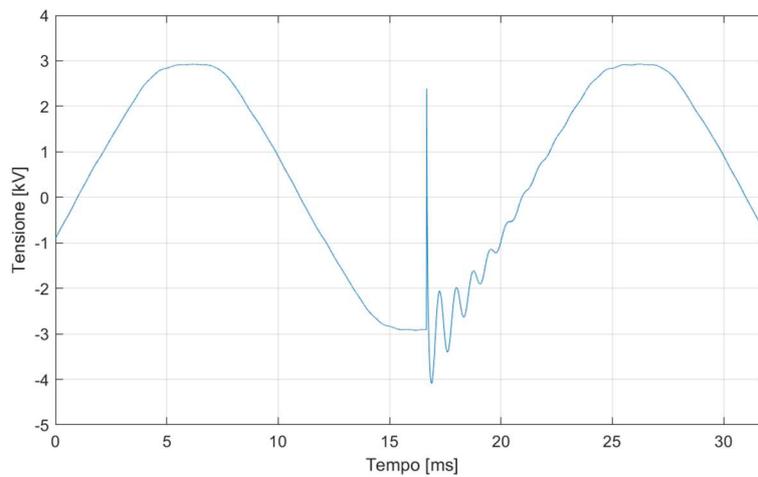


Figura 6-5: Acquisizione 1° caso con sonda SHT40kV nel punto B

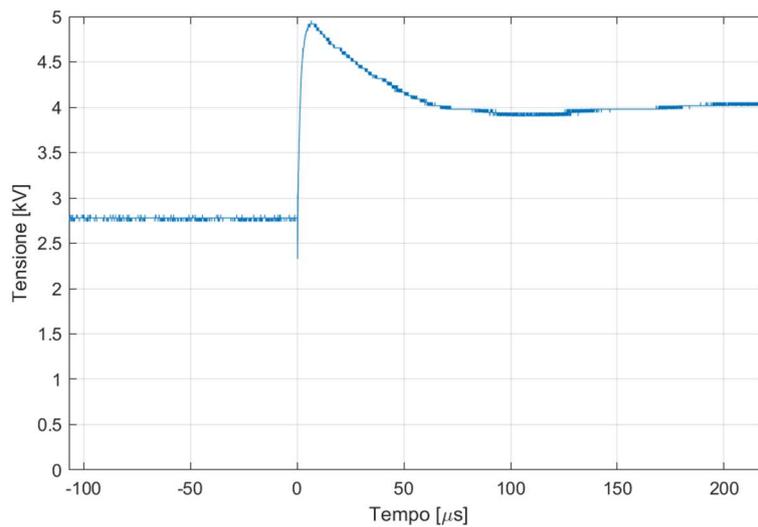


Figura 6-6: V_{ab} - 1° caso di non scarica

In Figura 6-6, per $t < 0$ si osserva una tensione di 2,8 kV che corrisponde al valore di picco della tensione sinusoidale nell'intervallo prima dell'evento (Figura 6-5) e di segno opposto perché è stato collegato con polarità negativa.

Per $t > 0$ ci si aspettava la differenza tra le due tensioni, invece si nota che la tensione letta è ridotta. Bisogna considerare anche che la tensione sinusoidale nella finestra temporale dell'impulso è dell'ordine dei μs , quindi può essere considerata costante.

Per collaudare il secondo caso è stata regolata la distanza delle sfere dello spinterometro con le seguenti due condizioni:

1. applicando tensione sinusoidale di $2 \text{ kV}_{\text{rms}}$ non deve scaricare;
2. applicando tensione impulsiva di 4 kV deve scaricare;

Notiamo che le sfere dello spinterometro, avendo una vita pregressa, presentano delle imperfezioni superficiali dovute all'ossidazione durante le scariche, quindi si è dovuto arrivare ad un compromesso per validare le due condizioni. I valori finali sono 4,45 kV di tensione di impulso e 1,92 kV di tensione sinusoidale efficace con distanziamento delle sfere di 0,50 mm.

Nel secondo caso vediamo:

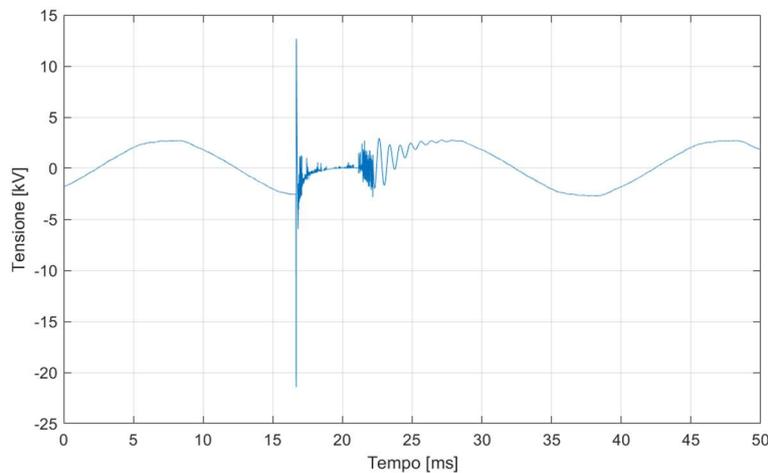


Figura 6-7: Acquisizione 2° caso con sonda SHT40kV nel punto B - Scarica

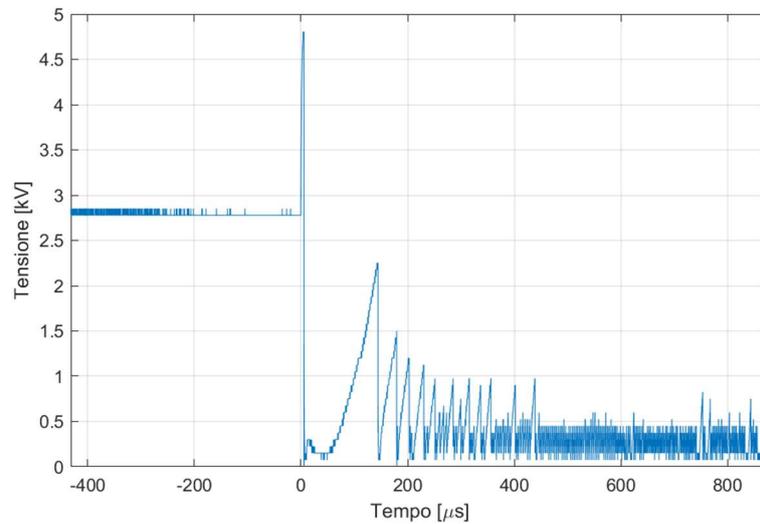


Figura 6-8: V_{ab} 2° caso – Scarica

In Figura 6-8 si può osservare che la tensione combinata “ V_{ab} ”, nel momento di inserzione dell’impulso raggiunge un potenziale, il quale le sfere non riescono a sostenere quindi crolla a zero e si delinea la scarica. Dopo $t = 0$ osserviamo delle oscillazioni dovute alla presenza dell’arco elettrico.

Ora si può procedere con la sostituzione dello spinterometro con l’interruttore.

6.2 ANALISI SU INTERRUTTORI

Dopo aver eseguito i test sullo spinterometro, per accertare il corretto funzionamento dei due casi, sostituiamo lo spinterometro con l'interruttore. Lo schema elettrico di Figura 6-1 non cambia.



Figura 6-9: Zona prova per analisi fenomeno di scarica con interruttore

Le tensioni di prova combinata non cambiano, sempre 4 kV di tensione di impulso e 2 kV_{rms} di tensione sinusoidale.

In laboratorio non erano presenti tre divisori per acquisire in contemporanea tutte le tipologie di tensioni, quindi è stato deciso di acquisire solo la tensione sinusoidale e la tensione combinata. Di conseguenza, il generatore di tensione impulsiva è stato regolato prima della prova ed è stata salvata l'acquisizione dell'impulso.

Riportiamo le acquisizioni della tensione di impulso positiva e negativa eseguite in fase preliminare.

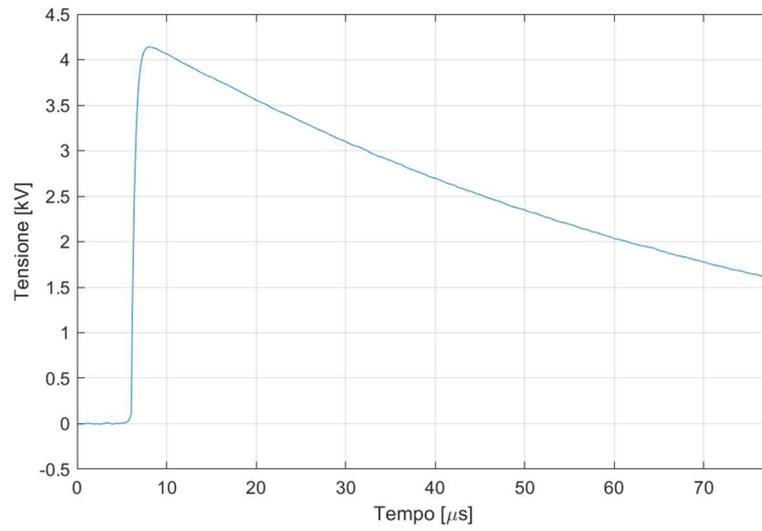


Figura 6-10: Impulso positivo di $V_1 = 4138 V$

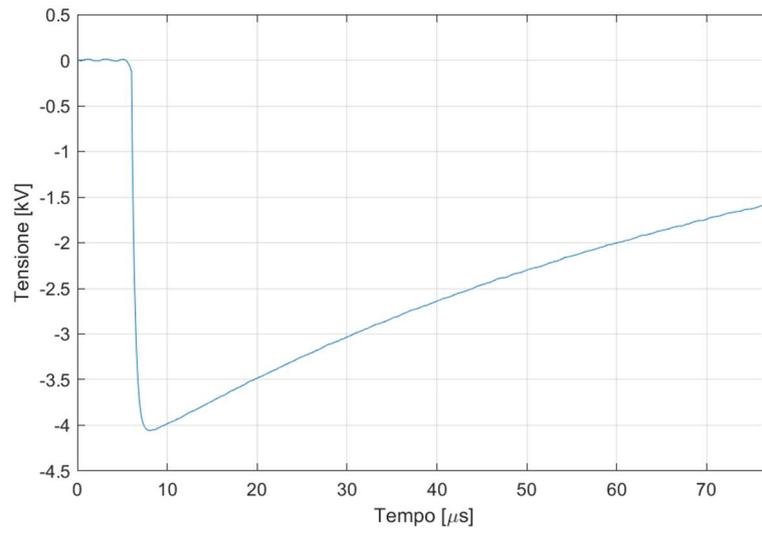


Figura 6-11: Impulso negativo di $V_1 = -4055 V$

6.2.1 Risultati

Eseguendo due impulsi positivi e due negativi nel caso peggiore, per ogni interruttore prelevato dal campo è possibile osservare che non si presentano eventi di scarica sugli interruttori.

Si riporta un risultato per impulso positivo e negativo di un interruttore.

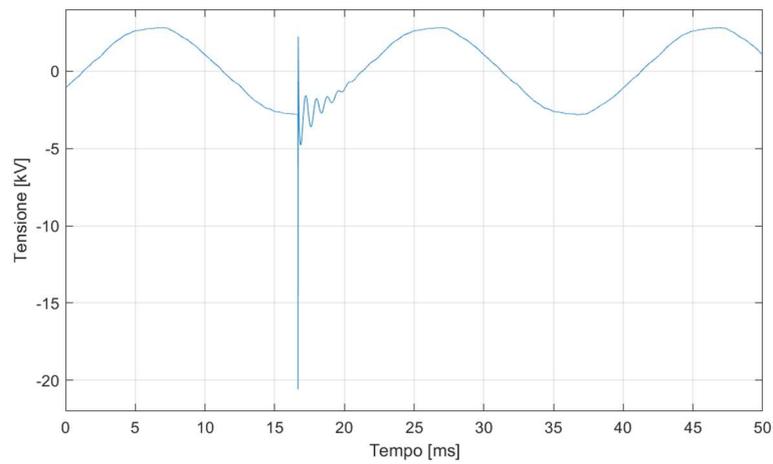


Figura 6-12: Risultato prova con impulso positivo - Tensione V_b

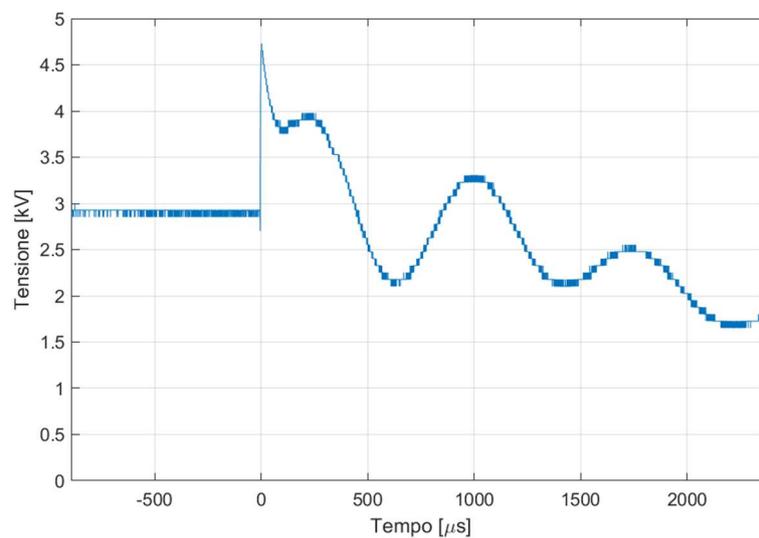


Figura 6-13: Risultato prova con impulso positivo - Tensione V_{ab}

In Figura 6-13 si osserva che la tensione combinata è molto simile a quella dello spinterometro.

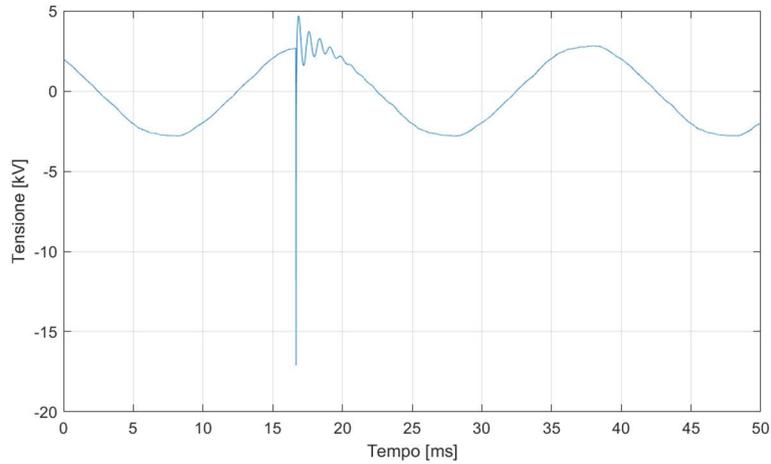


Figura 6-14: Risultato prova con impulso negativo - Tensione V_b

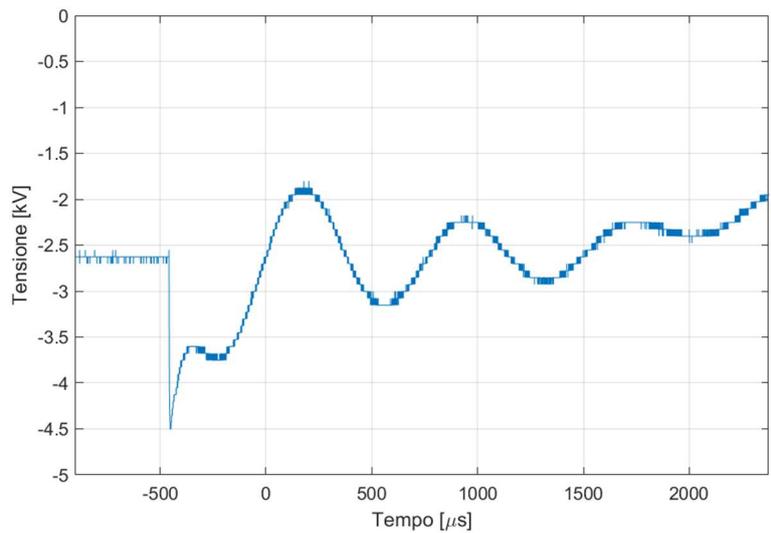


Figura 6-15: Risultati prova con impulso negativo – Tensione V_{ab}

Si evince dalle Figura 6-13 e Figura 6-15 riguardati la tensione combinata che l'interruttore non ha scaricato ed ha sostenuto la differenza di potenziale applicato ad esso.

Per gli altri interruttori prelevati dal campo si sono ottenuti risultati simili, i quali non hanno evidenziato nessun comportamento di scarica.

7 PROVE SUGLI INTERRUTTORI NUOVI

Dopo aver eseguito vari test sugli interruttori da campo e aver identificato un modo efficace per interpretare la scarica dell'interruttore applicando tensioni combinate, ora possiamo eseguire i test sugli interruttori nuovi.

Sono stati provati i seguenti interruttori di bassa tensione di diversi fornitori e tipologia:

- interruttori magnetotermici bipolari a due moduli "A - E";
- interruttori magnetotermici bipolari compatti a un modulo "D";
- interruttori magnetotermici unipolari "B - F - G";
- interruttori magnetotermici differenziali unipolari a due moduli "C";
- interruttori sezionatori "H".

Per ogni modello sono presenti due interruttori nominati, con una lettera e un numero che indentifica il primo e il secondo interruttore dello stesso tipo.

7.1 VERIFICHE PRELIMINARI

Come per gli interruttori prelevati dal campo, anche per gli interruttori nuovi devono essere svolte prove preliminari descritte nel capitolo 4.1, per conoscere il loro stato iniziale.

Riporto in Tabella 5 i risultati delle tre prove riguardante l'interruttore magnetotermico bipolare a due moduli (A1). I risultati delle prove dei rimanenti interruttori sono catalogati nella appendice C.

Tabella 5: Riepilogo prove preliminari "interruttore A1"

<u>DISP.</u> <u>A1</u>	I_{disp} [mA]	Note	Tipo prova	Posizione interruttore	Esito prova
Prova 1	0,028	P ₁	A	APERTO	✓
	0,028	P ₂	A	APERTO	✓
	0,019	-	B	CHIUSO	✓
	0,029	-	C	CHIUSO	✓
Prova 2	-	-	-	APERTO	✓
Prova 3	0	P ₁	-	APERTO	✓
	0	P ₂	-	APERTO	✓

Dopo lo svolgimento è stato notato che nell'ultima prova, dove si alimentano i contatti dell'interruttore ad 1,4 volte la tensione nominale, non è presente una corrente di dispersione.

7.2 PROVA TENSIONE COMBINATA

La seguente prova consiste nello svolgere le prove del capitolo 6.2 dove si misura la tensione combinata attraverso l'oscilloscopio portatile, imponendo una tensione di impulso di 4 kV e una tensione sinusoidale di 2 kV. Analizzando se l'interruttore scarichi, applicando 5 impulsi positivi e negativi. La prova è stata eseguita collegando solo il primo polo per ogni tipologia di interruttore.

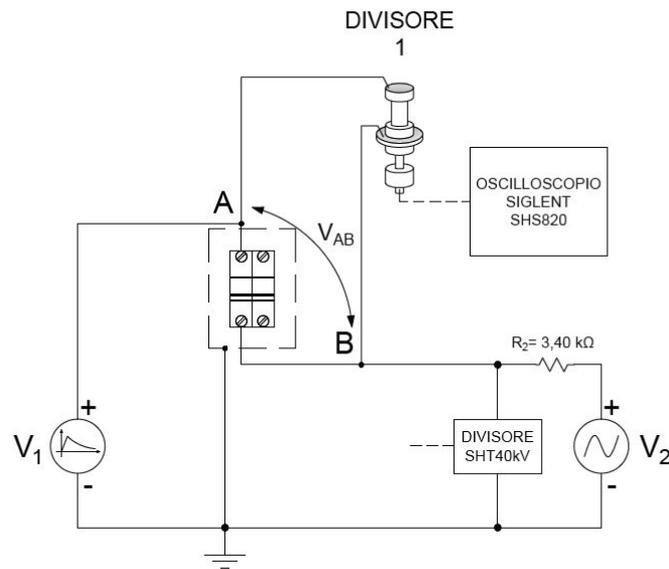


Figura 7-1: Schema collegamento strumentazione a interruttori in prova

Riporto i risultati dell'interruttore magnetotermico bipolare "A1":

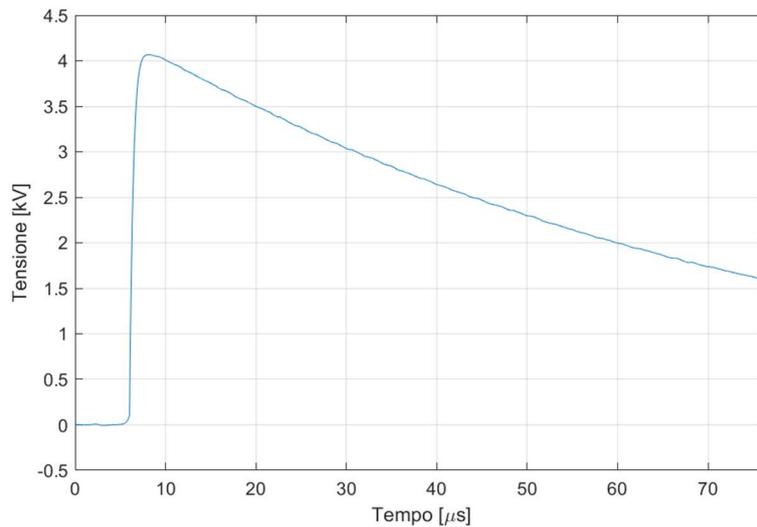


Figura 7-2: Impulso positivo applicato al "interruttore A1"

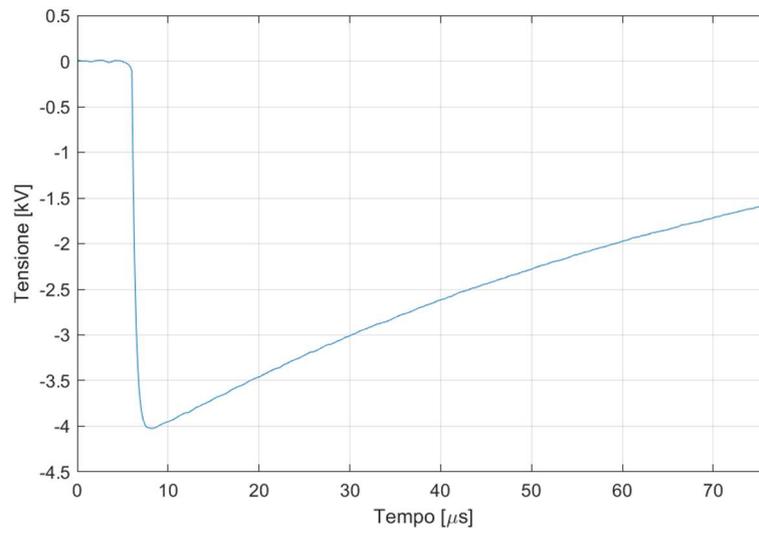


Figura 7-3: Impulso negativo applicato al "interruttore A1"

Risultati applicando impulso positivo:

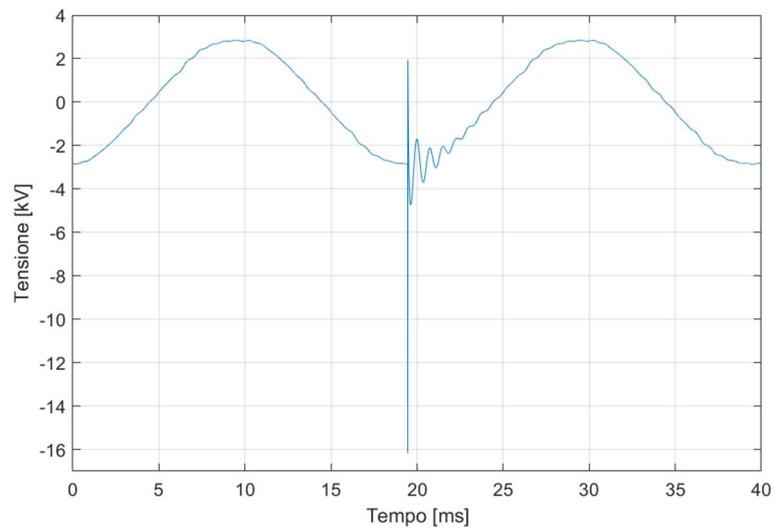


Figura 7-4: Acquisizione nel punto B - impulso positivo - "Interruttore A1"

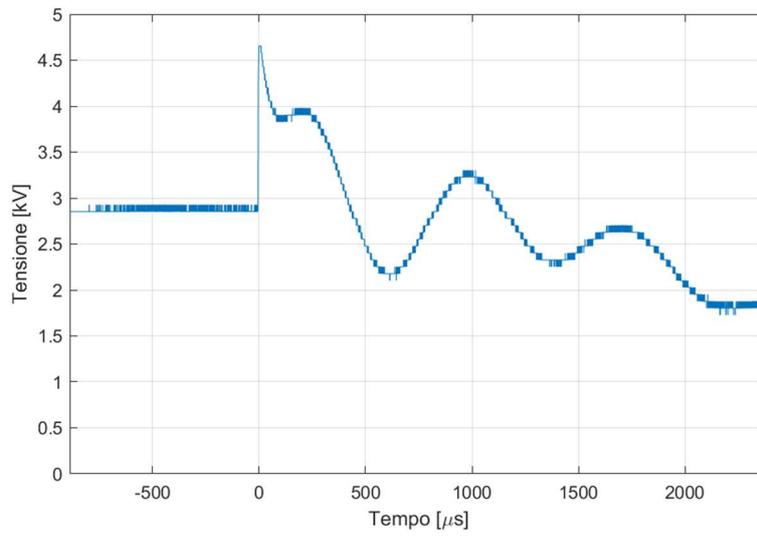


Figura 7-5: Tensione combinata - impulso positivo - "interruttore A1"

Risultati applicando impulso negativo:

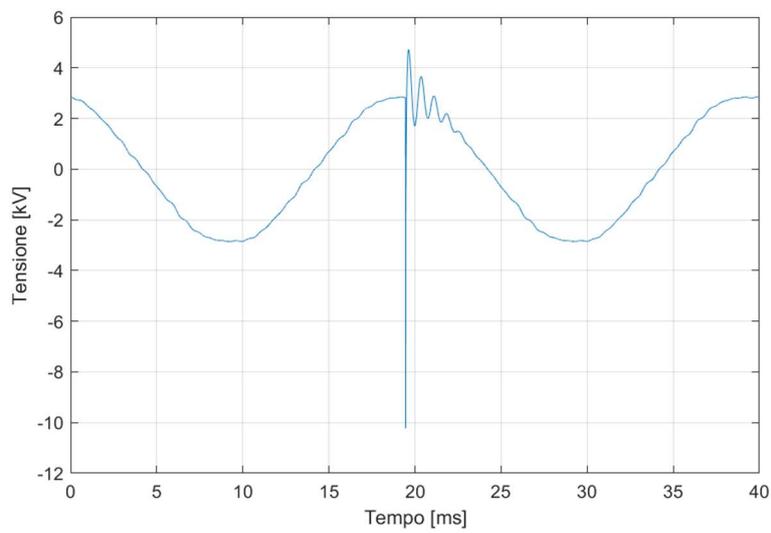


Figura 7-6: Acquisizione nel punto B - impulso negativo - "Interruttore A1"

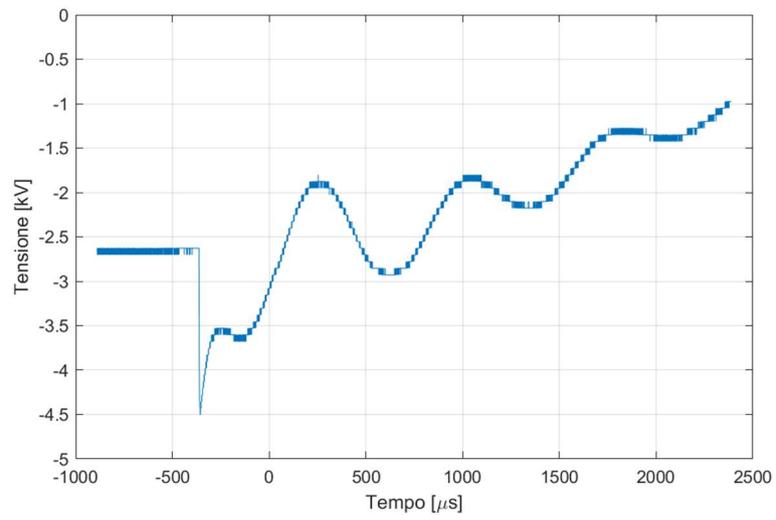


Figura 7-7: Tensione combinata - impulso negativo – “Interruttore A1”

8 INVECCHIAMENTO INTERRUITORI

Dopo aver eseguito le prove di tensione combinata sulla prima serie di interruttori nuovi, sono state eseguite anche su interruttori invecchiati appositamente.

8.1 PROCESSO DI INVECCHIAMENTO

Sugli interruttori sono state eseguite delle manovre di intervento automatico con una corrente tra le 4 e le 5 volte la corrente nominale. Questo intervallo di corrente è stato scelto perché è il limite dello sgancio termico della curva di intervento C. Ci si aspetta che il contatto si “sporchi” dovendo aprire correnti elevate.

Per eseguire questa prova sono stati divisi gli interruttori in base alla loro corrente nominale. A monte degli interruttori è stato collegato un generatore di corrente e a valle si sono cortocircuitati i poli.



Figura 8-1: Generatore di corrente collegato agli interruttori

Si sono collegati in parallelo massimo tre interruttori, così da ridurre i tempi richiesti dalla prova.

Per capire se l'interruttore stesse invecchiando è stata controllata, dopo un certo numero di manovre, la corrente dispersa dal contatto alla tensione di $2 \text{ kV}_{\text{rms}}$.

8.2 RISULTATI INVECCHIAMENTO INTERRUTTORI

Di seguito vengono riportate le tabelle riassuntive per ogni interruttore delle correnti disperse a $2 \text{ kV}_{\text{rms}}$ dopo un certo numero di manovre.

Tabella 6: Interruttore C2 - Prova invecchiamento

Int. C2	N° manovre	I_{disp} [mA] (P ₁)	I_{disp} [mA] (P ₂)
	0	0,031	0,031
	410	0,033	0,034
	1000	0,036	0,037

L'interruttore della Tabella 6 è stato alimentato con una corrente di 80 A, corrispondente a 4 volte la corrente nominale. Si può constatare che la corrente dispersa dopo un numero di manovre è aumentata.

Tabella 7: Interruttore A2 - Prova invecchiamento

Int. A2	N° manovre	I_{disp} [mA] (P ₁)	I_{disp} [mA] (P ₂)
	0	0,033	0,033
	1000	0,034	0,035
	2000	0,037	0,037

Tabella 8: Interruttore E2 - Prova invecchiamento

Int. E2	N° manovre	I_{disp} [mA] (P ₁)	I_{disp} [mA] (P ₂)
	0	0,034	0,034
	1000	0,034	0,034
	1600	0,036	0,036

Gli interruttori A2 e E2 sono stati alimentati con una corrente di 64 A, dato che la loro corrente nominale è di 16 A. Rispetto all'interruttore C2 sono state aumentate

le manovre dato che a 1000 non sono state osservate grandi differenze di corrente dispersa.

L'interruttore E2 a 1600 manovre è stato evidenziato un problema di usura meccanica del meccanismo di riarmo manuale, tale per cui l'interruttore non riesce a rimanere nella posizione di chiuso.

Tabella 9: Interruttore B2 - Prova invecchiamento

Int. B2	N° manovre	I _{disp} [mA] (P ₁)	I _{disp} [mA] (P ₂)
	0	0,032	0,033
	500	0,034	0,035

Tabella 10: Interruttore F2 - Prova invecchiamento

Int. F2	N° manovre	I _{disp} [mA] (P ₁)	I _{disp} [mA] (P ₂)
	0	0,033	0,032
	500	0,036	0,035

Tabella 11: Interruttore G2 - Prova invecchiamento

Int. G2	N° manovre	I _{disp} [mA] (P ₁)	I _{disp} [mA] (P ₂)
	0	0,033	0,033
	500	0,036	0,037

Gli interruttori B2, F2 e G2 sono unipolari con corrente nominale di 16 A e sono stati alimentati con una corrente di 64 A ciascuno. Ci siamo fermati a 500 manovre dato che è stato presentato un guasto all'interruttore F2, dove il polo della termica non si richiude più.

Tabella 12: Interruttore D2 - Prova invecchiamento

Int. D2	N° manovre	I_{disp} [mA] (P ₁)	I_{disp} [mA] (P ₂)	R [mΩ] (P ₁)	R [mΩ] (P ₂)
	0	0,028	0,031	11,820	12,190
	200	0,032	0,033	12,200	11,370

L'interruttore D2 è bipolare compatto in un solo modulo con corrente nominale di 10 A ed è stato alimentato con una corrente di 40 A. Dato che si sono verificati guasti nelle prove precedenti, è stato deciso di limitare il numero di manovre a massimo 200. Per questo interruttore è stato pensato di misurare la resistenza del polo prima e dopo le manovre a freddo con metodo voltamperometrico. Constatando che la resistenza a contatto chiuso è variata si può considerare che la prova è andata a buon fine.

Dalla prova di invecchiamento degli interruttori eseguendo una procedura più dura rispetto alla prova eseguita dalla normativa è stato osservato che gli interruttori si scaldano dopo un certo numero di manovre senza sosta e dissipano questo calore con tempi diversi. Sono stati stressati sia per l'elevata corrente, ma anche per le temperature raggiunte internamente.

8.3 INSERZIONE TENSIONE COMBINATA DOPO INVECCHIAMENTO

Ora si può eseguire la prova di tensione combinata come svolto per la prima serie di interruttori (vedi capitolo 7.2) calibrando la tensione di impulso a 4 kV e tensione sinusoidale 2 kV_{rms}. Si riporta il risultato di un interruttore nel caso di impulso positivo e negativo.

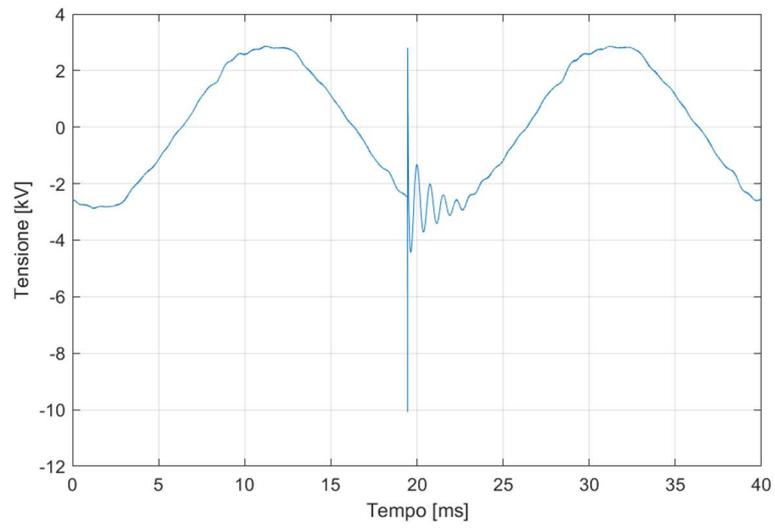


Figura 8-2: Acquisizione nel punto B - impulso positivo – “Interruttore A2”

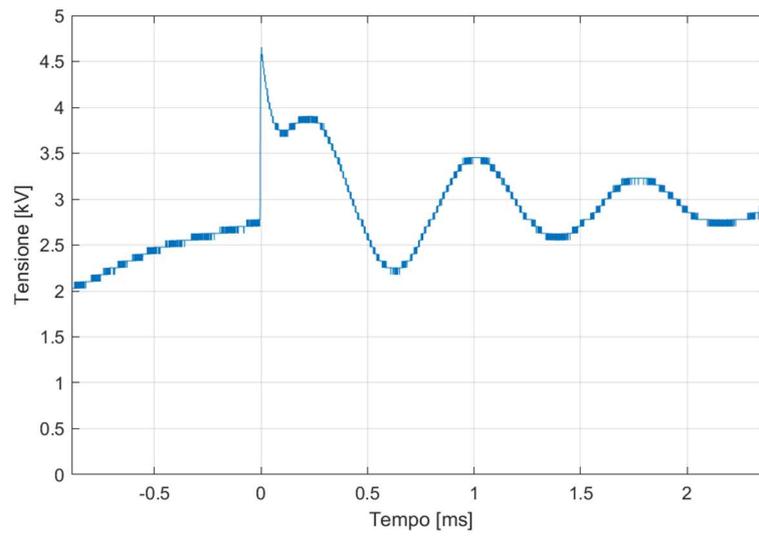


Figura 8-3: Tensione combinata - Impulso positivo - “Interruttore A2”

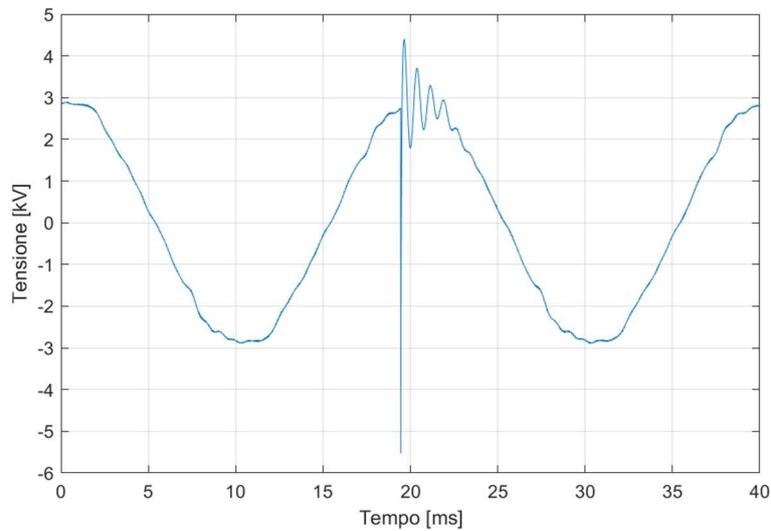


Figura 8-4: Acquisizione nel punto B - impulso negativo - "Interruttore A2"

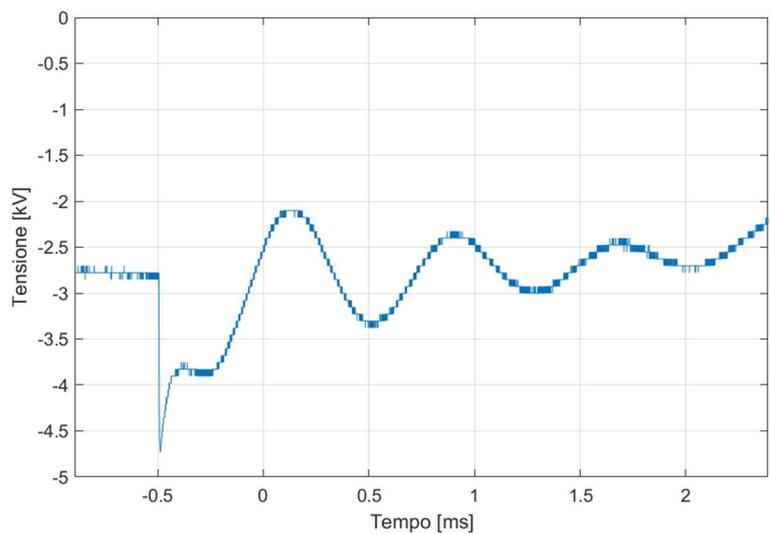


Figura 8-5: Tensione combinata - Impulso negativo - "Interruttore A2"

Riassumendo tutte le prove eseguite sugli interruttori non si osservano variazioni di forme d'onda e i risultati sono simili a quelli delle figure da Figura 8-2 a Figura 8-5. Questo risultato ci porta a concludere che il metodo utilizzato per invecchiare gli interruttori non ha peggiorato le superfici conduttrici all'interno dell'interruttore.

9 METODO DI MISURAZIONE CON SONDA DI CAMPO

Nel seguente capitolo è stata trattata la misurazione con sonda di campo delle scariche provocate dalla presenza di tensione combinata. La sonda di campo permette di leggere variazioni di campo elettrico nelle vicinanze e di proteggere i dispositivi di misura dai guasti, dato che in questo modo non sono direttamente collegati al circuito di prova. Essendo un metodo di analisi nuovo e non precedentemente collaudato, sono stati eseguiti prima dei test sullo spinterometro e poi sugli interruttori.

9.1 PROVE SU SPINTEROMETRO CON SONDA DI CAMPO

Non conoscendo il comportamento della sonda di campo è stato eseguito un test preliminare sullo spinterometro dato che, quest'ultimo, nelle prove precedenti del capitolo 6.1 ha dato buoni risultati, confrontabili con quelli degli interruttori in prova.

La sonda è stata collocata ad una certa distanza tale per cui non si verificano scariche verso di essa.



Figura 9-1: Disposizione dispositivi con sonda di campo

9.2 RISULTATI PROVE CON SONDA DI CAMPO SVOLTE SU SPINTEROMETRO

Sono state eseguite le seguenti prove:

- 1°) impulso singolo positivo (4 kV) e negativo (- 4 kV);
- 2°) regime sinusoidale (2 kV_{rms});
- 3°) tensione combinata, impulso sovrapposto alla tensione sinusoidale.

9.2.1 Impulso singolo positivo e negativo

È stato applicato un impulso positivo e negativo alla tensione di 4 kV allo spinterometro, sono stati identificati 2 casi:

- 1) sfere con distanza maggiore di 55 cm, certezza di non scarica (Figura 9-2, Figura 9-3);
- 2) sfere a 50 cm di distanza, certezza di scarica. (Figura 9-4)

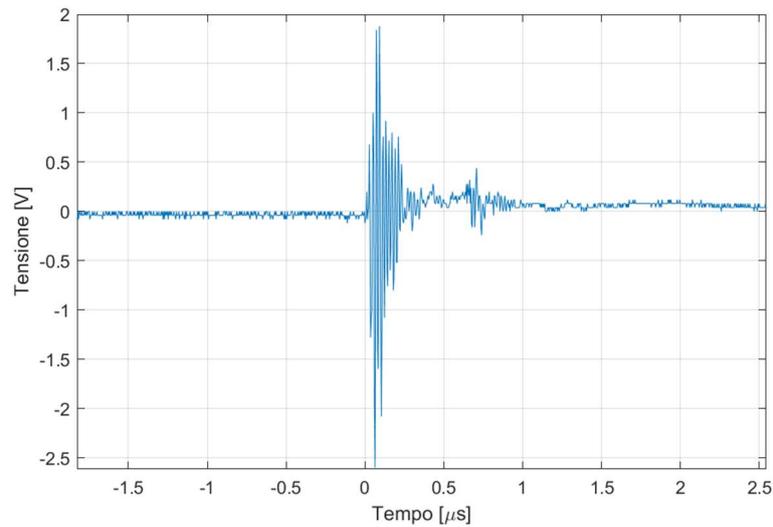


Figura 9-2: Impulso positivo applicato allo spinterometro, acquisito dalla sonda di campo

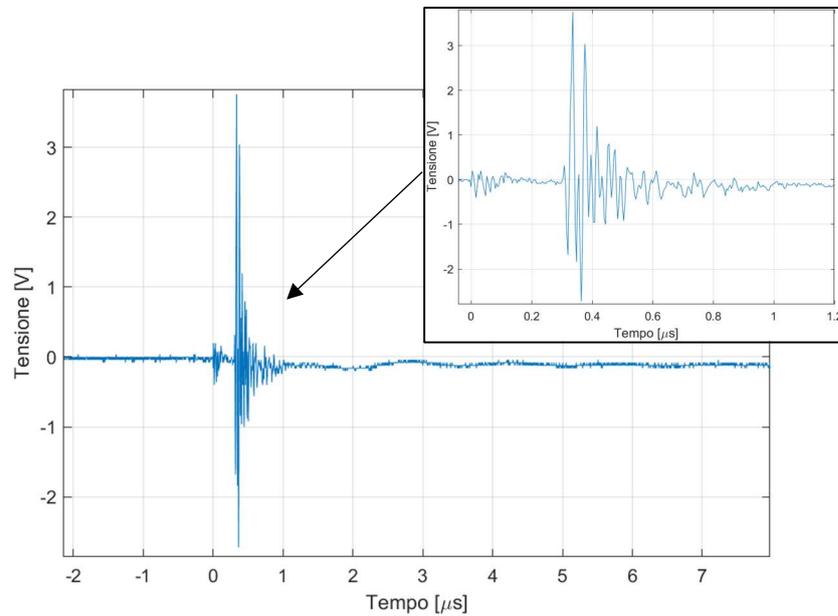


Figura 9-3: Impulso negativo applicato allo spinterometro, acquisito dalla sonda di campo

Dall'analisi dettagliata delle Figura 9-2 e Figura 9-3, si identifica un fenomeno oscillatorio che dura dai 150 ÷ 200 ns in tutti i casi di non scarica e per entrambe le polarità.

Verrà analizzata la scarica di un impulso in Figura 9-4.

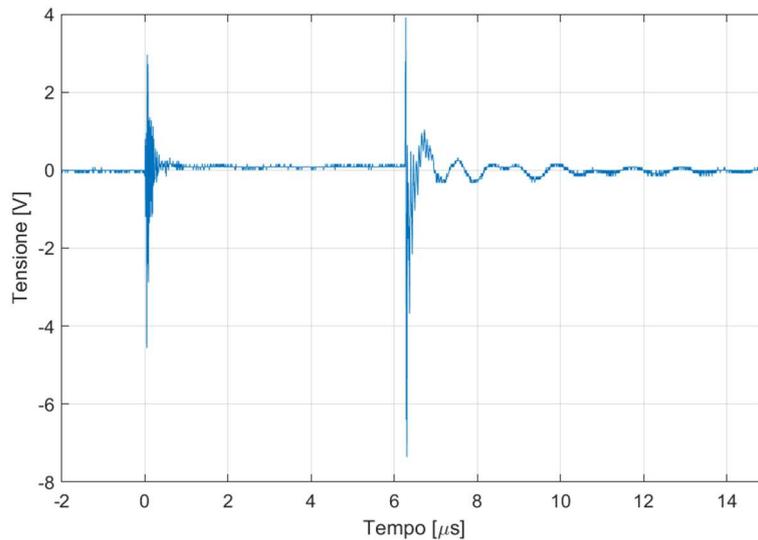


Figura 9-4: Scarica impulso positivo applicato allo spinterometro, acquisito dalla sonda di campo

La sonda di campo capta due variazioni, il primo fenomeno è simile al comportamento delle figure di non scarica (Figura 9-2, Figura 9-3), mentre il secondo evidenzia delle oscillazioni smorzate con scala dei μs che caratterizzano la scarica.

9.2.2 Regime sinusoidale

La tensione sinusoidale applicata è di $2 \text{ kV}_{\text{rms}}$, per ottenere una lettura adeguata è stata regolata nuovamente la distanza tra la sonda di campo e lo spinterometro.

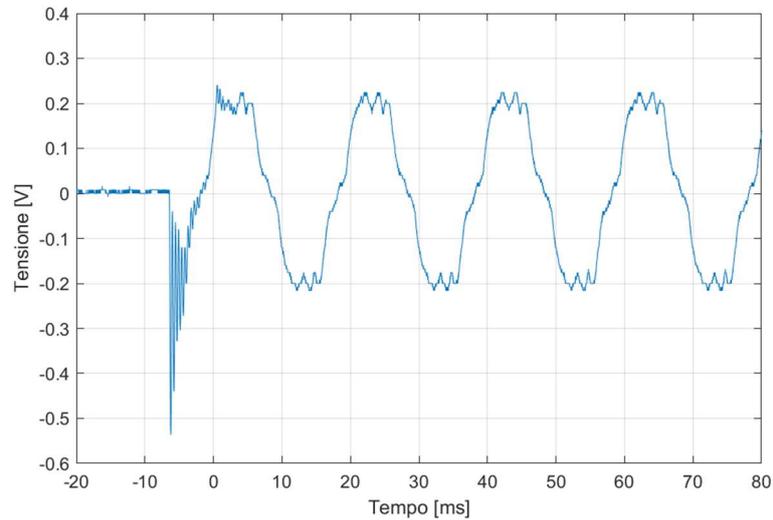


Figura 9-5: Acquisizione con sonda di campo del segnale sinusoidale $2 \text{ kV}_{\text{rms}}$

I primi picchi della Figura 9-5 sono dovuti all'accensione del generatore sinusoidale. Il segnale visualizzato è distorto in ampiezza, ma la frequenza resta di 50 Hz come evidenziato dal periodo di 20 ms.

9.2.3 Acquisizione scarica e non scarica applicando tensione combinata

Per questo test sono state applicate due tensioni: una di impulso dal valore di $V_1 = 4,59 \text{ kV}$ e una sinusoidale dal valore di $V_2 = 1,8 \text{ kV}$ (valori di compromesso per avere la tenuta del segnale sinusoidale e la scarica dell'impulso accettabili).

È stata ridotta la scala tempi per rendere ottimale la visualizzazione della misura, rispetto ai casi precedenti.

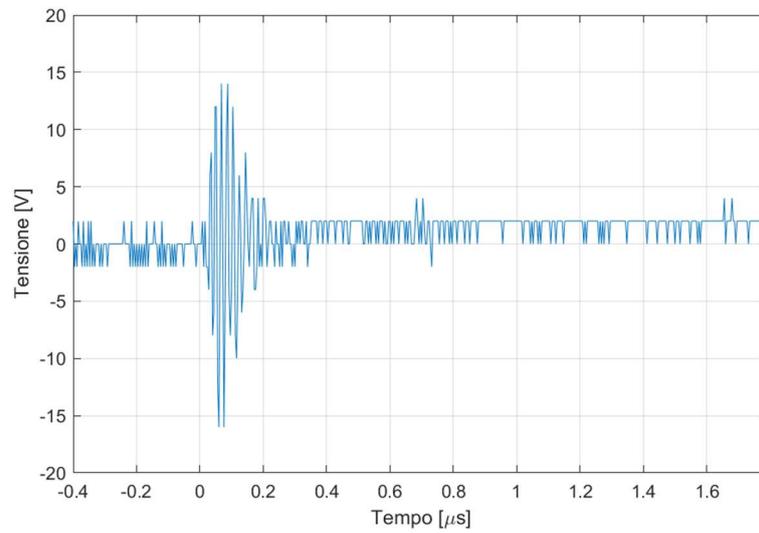


Figura 9-6: Non scarica della tensione combinata acquisito dalla sonda di campo

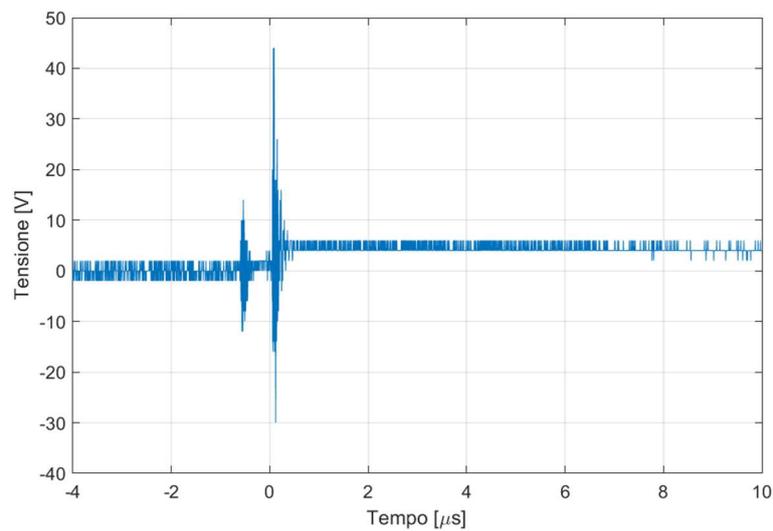


Figura 9-7: Scarica nel caso di tensione combinata acquisito dalla sonda di campo

Si evince dalla Figura 9-7 che la scarica con tensione combinata ha lo stesso andamento della scarica con solo impulso. Ora, avendo contraddistinto la scarica dalla non scarica, è possibile eseguire le prove sugli interruttori.

9.3 RISULTATI PROVE CON SONDA DI CAMPO SVOLTE SU INTERRUTTORI PRELEVATI DAL CAMPO

Prima di applicare tensioni maggiori di quelle utilizzate sul test dello spinterometro, è stata ripetuta la prova $4 \text{ kV} / 2 \text{ kV}_{\text{rms}}$ ed è stata sistemata la sonda di campo in modo adeguato (vedi Figura 9-8).



Figura 9-8: Disposizione dispositivi per acquisizione con sonda di campo

Prima di imporre la tensione combinata all'interruttore 3 è stato tarato il generatore con una prova di impulso a $4 \text{ kV} / - 4 \text{ kV}$ acquisendo la tensione con sonda di campo, di cui in seguito il risultato:

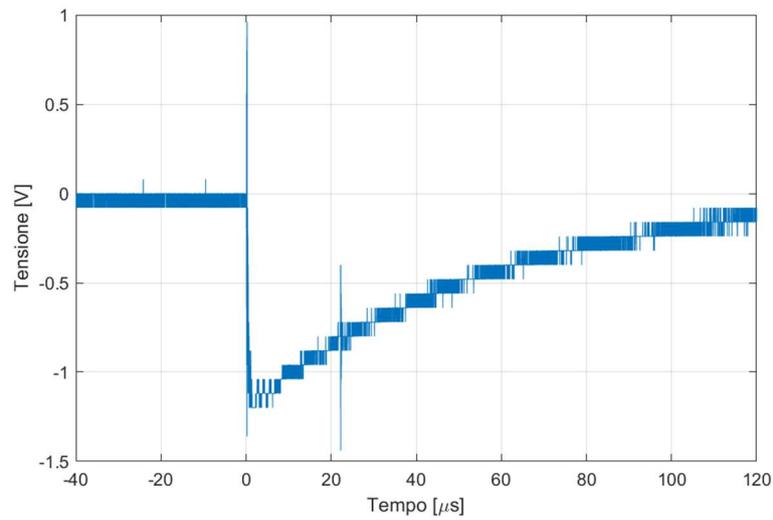


Figura 9-9: Impulso negativo $V_1 = -4$ kV, visto da sonda di campo applicato all'interruttore

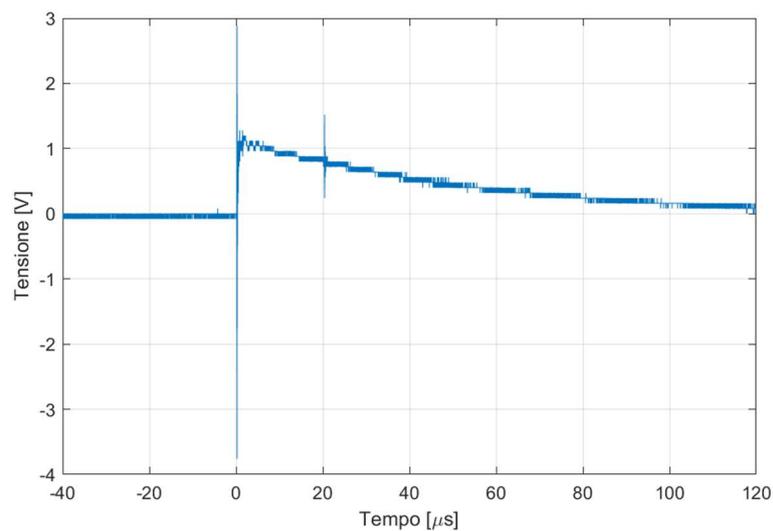


Figura 9-10: Impulso positivo $V_1 = 4,07$ kV, visto da sonda di campo applicato all'interruttore

Il risultato è completamente differente dal comportamento con spinterometro, comunque rispecchia la caratteristica dell'impulso.

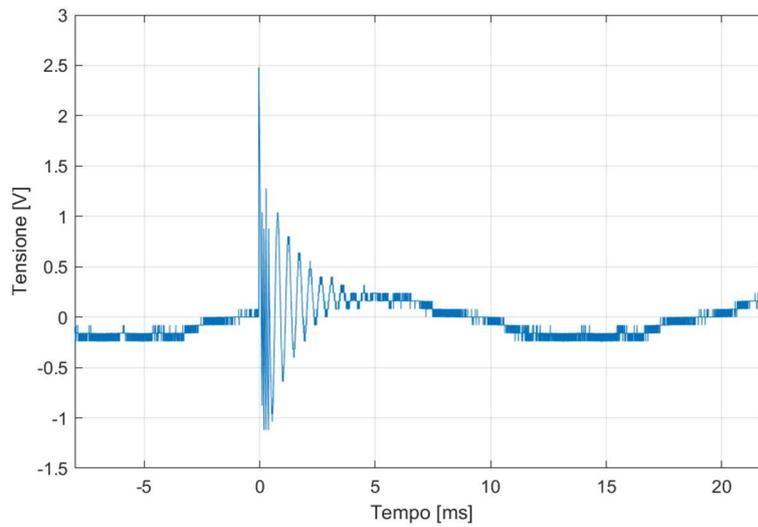


Figura 9-11: Tensione combinata applicata all'interruttore 3, acquisita dalla sonda di campo

In Figura 9-11 si evince lo stesso comportamento dell'acquisizione tramite sonda SHT40kV (paragrafo 6.2). I dati acquisiti, essendo digitali e dovendo utilizzare delle scale di compromesso per non saturare il segnale e acquisire fenomeni veloci e lenti dell'ordine dei μ s e ms, hanno imposto una risoluzione minore.

La stessa prova è stata ripetuta nello stesso ordine su un interruttore nuovo, ricercando nuovamente la posizione attuale della sonda di campo:



Figura 9-12: Miglioramento disposizione apparecchiatura per acquisizione con sonda di campo

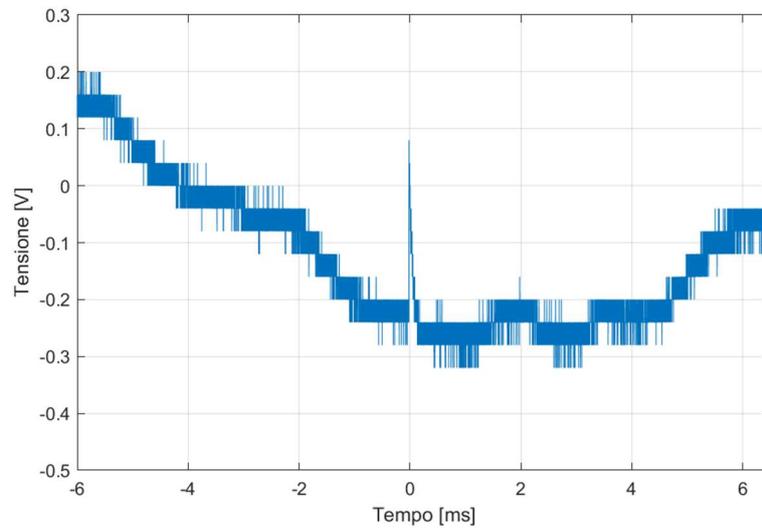


Figura 9-13: Tensione combinata su interruttore nuovo, acquisizione attraverso sonda di campo

Si evince dalle diverse prove eseguite con tensione combinata che il comportamento nell'istante di inserzione dell'impulso sugli interruttori prelevati dal campo è diversa da quelli nuovi.

9.4 SCARICA DELLA TENSIONE COMBINATA CON SONDA DI CAMPO

Per questa prova è stato utilizzato il secondo contatto “dell’interruttore 7” prelevato dal campo, il quale non aveva passato i test preliminari. Comunque, quest’ultimo sopporta $1,6 \text{ kV}_{\text{rms}}$ ed è stato provato con una tensione combinata con impulsi di valori crescenti da 4 kV fino a $7,5 \text{ kV}$ e $1,6 \text{ kV}_{\text{rms}}$.

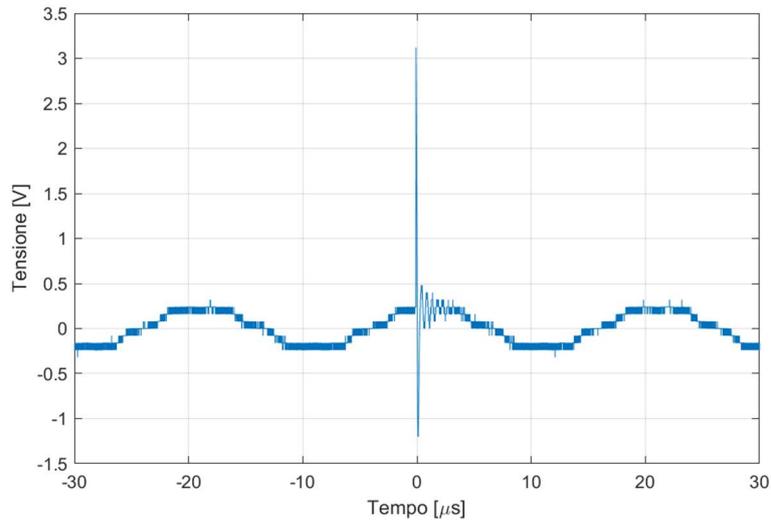


Figura 9-14: $V_1 = 5,8 \text{ kV}$ e $V_2 = 1,6 \text{ kV}_{\text{rms}}$

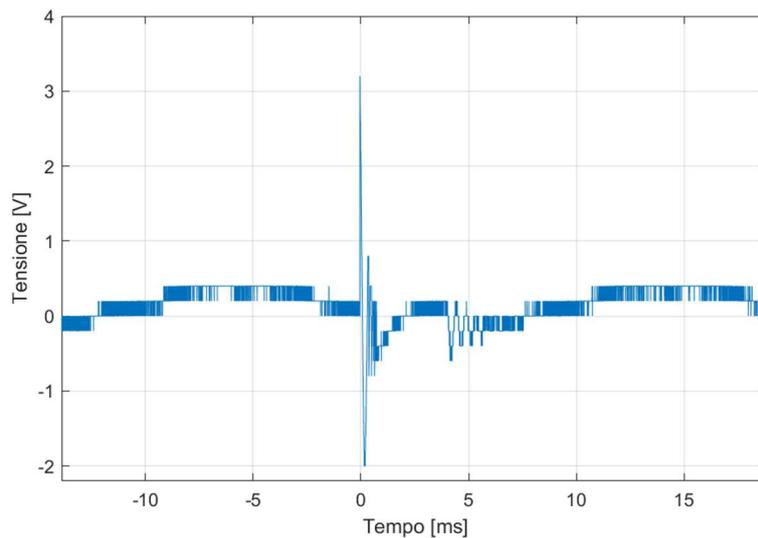


Figura 9-15: $V_1 = 7,5 \text{ kV}$ e $V_2 = 1,6 \text{ kV}_{\text{rms}}$ (scaricato)

La Figura 9-15 identifica come scarica a 7,5 kV (udibile anche durante la prova), questo però è successo anche a valori più bassi, ma senza udire nulla, di conseguenza questa metodologia non può essere considerata come alternativa per identificare la scarica dell'interruttore.

10 PROVE SUPPLEMENTARI

Nel presente capitolo vengono trattate delle prove aggiuntive dove viene analizzata la scarica dell'impulso verso terra e la scarica dell'impulso con in serie il generatore sinusoidale (Figura 10-1). Per eseguire questa prova è stato utilizzato lo spinterometro.

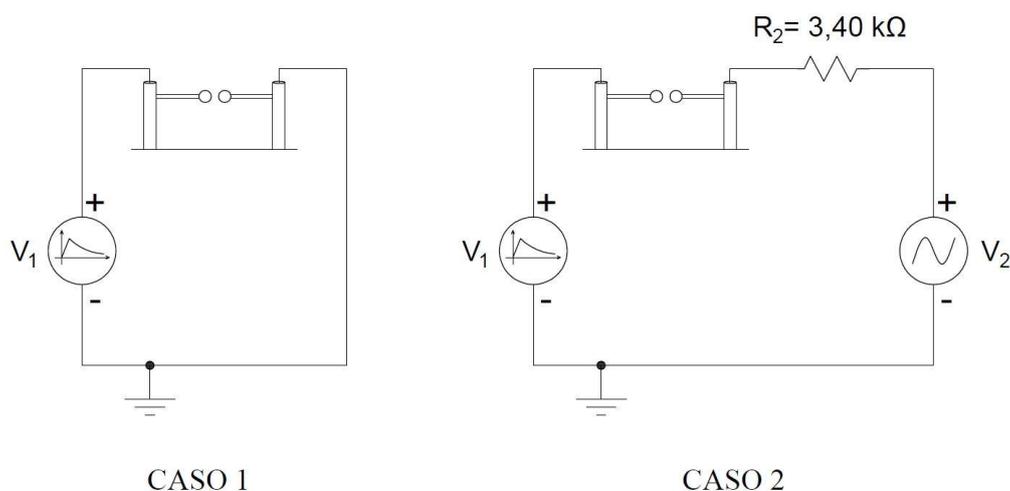


Figura 10-1: Schemi dei casi 1 e 2 di analisi

Prima di procedere alle prove è stato tarato lo spinterometro con distanza tra le sfere di 0,50 mm corrispondenti ai 4 kV, questo è stato fatto con lo schema del caso 1 della Figura 10-1. Quindi possiamo affermare dalla constatazione visiva della scarica (Figura 10-2) che è avvenuta.

Ora si passa al caso con generatore sinusoidale in serie alla terra. Si identificano due possibili prove con il generatore sinusoidale:

- 1) Con chiave su 0 (spento);
- 2) Con chiave su 1 (accesso) con tensione 0 V;

In ognuna delle prove lo spinterometro non scarica, quindi si pensa che c'è qualcosa che impedisce la scarica nel circuito del "caso 2" della Figura 10-1.

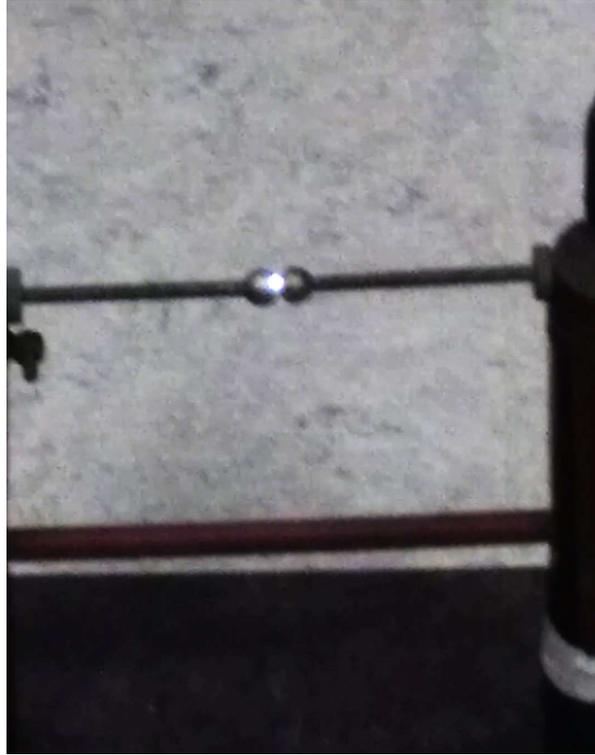


Figura 10-2: Istante di scarica su spinterometro

Da un'ulteriore analisi è stato pensato di togliere la resistenza di protezione in serie al generatore sinusoidale. Questa prova ha evidenziato una scarica minima non come nel caso 1.

CONCLUSIONI

Lo scopo di questo elaborato era quello di analizzare e studiare la prova di tensione combinata su diversi campioni di interruttori magnetotermici di bassa tensione nuovi e usurati (prelevati dal campo), partendo dallo schema a blocchi della normativa vigente. Analizzando le prove di tensione combinata con inserzione automatica e manuale della tensione impulsiva su interruttori prelevati dal campo, è stato evidenziato che la differenza di potenziale massima ai capi dell'interruttore si ha quando l'inserzione dell'impulso positivo / negativo avviene nell'istante di picco negativo / positivo della sinusoide. L'analisi della corrente nel circuito con i tre metodi (sonda Rogowski, pinza amperometrica, resistenza di shunt) è stata svolta preventivamente sullo spinterometro in condizione di scarica e di non scarica per valutare quale fosse la metodologia migliore. È stato dedotto che per fenomeni veloci e valori di corrente dell'ordine dei mA gli strumenti migliori sono la pinza amperometrica e la resistenza di shunt, perché la Rogowski ha una banda passante elevata e capta anche disturbi; comunque, i risultati non identificano in modo accettabile il fenomeno di scarica, perché non si è trovato un metodo univoco per riconoscere il fenomeno della scarica. La sostituzione dell'interruttore in determinate prove con lo spinterometro ha permesso di provare condizioni che con l'interruttore non erano possibili. Con lo schema iniziale di misura delle tensioni nel punto A e B riferiti verso terra non è possibile capire se l'interruttore scarica, quindi è stata misurata la tensione combinata. Questo layout di misurazione ci permette di identificare il risultato della prova. Gli interruttori nuovi e quelli invecchiati non hanno scaricato, quindi sembrerebbe che la prova fatta in questo modo non sia necessaria, ma non vi è certezza poiché dopo sono stati riscontrati problemi nella topologia della prova. Volendo analizzare il caso di scarica sull'interruttore sono state condotte prove con sonda di campo, la quale ci ha permesso di alzare i livelli di tensione, ma il risultato dell'acquisizione della scarica non è univoco e quindi non è un metodo utilizzabile per il presente scopo. Durante lo svolgimento delle ultime prove è stato notato che collegando lo spinterometro in serie al solo generatore di impulso tarato per scaricare, avviene la scarica, invece nel momento che si inserisce lo spinterometro nel circuito di tensione combinata con generatore sinusoidale acceso a 0 V la scarica dell'impulso non avviene. Successivamente è stata eseguita un'ulteriore prova togliendo la resistenza di

protezione in serie al generatore sinusoidale e come risultato è stata ottenuta una scarica debole.

In seguito alle analisi fatte precedentemente si può arrivare alla seguente conclusione: il circuito di prova presentato dalla normativa potrebbe non essere completo, dato che per scaricare lo spinterometro ha bisogno di non avere il generatore sinusoidale a valle.

Il problema riscontrato nell'esecuzione delle prove è stato riuscire ad applicare l'impulso manualmente nell'istante della sinusoide voluto. Se ci fosse un sistema che applica l'impulso nell'istante corretto automaticamente si ridurrebbero anche i tempi di esecuzione delle prove e sarebbe molto più semplice ripetere le prove su più dispositivi.

Dalle prove svolte in questo elaborato sugli interruttori non avendo avuto nessuna scarica si potrebbe pensare che forse i valori delle tensioni dei generatori non siano appropriati per gli interruttori di bassa tensione, dato che sono simili.

Un possibile lavoro futuro può essere il collaudo con tensioni combinate componendo un circuito di prova idoneo e progettando un sistema in grado di applicare l'impulso in un punto qualunque della sinusoide, così da avere un sistema con facile ripetibilità della prova.

APPENDICE A

Risultati prove preliminari interruttori prelevati dal campo:

<u>INT.</u> <u>1</u>	I _{disp} [mA]	Note	Tipo prova	Posizione interruttore	Esito prova
Prova 1	0,033	P ₁	A	APERTO	✓
	0,011	P ₂	A	APERTO	✓
	0,024	-	B	CHIUSO	✓
	0,038	-	C	CHIUSO	✓
Prova 2	-	-	-	APERTO	✓
Prova 3	0	P ₁	-	APERTO	✓
	0	P ₂	-	APERTO	✓

<u>INT.</u> <u>2</u>	I _{disp} [mA]	Note	Tipo prova	Posizione interruttore	Esito prova
Prova 1	0,022	P ₁	A	APERTO	✓
	0,023	P ₂	A	APERTO	✓
	0,051	-	B	CHIUSO	✓
	0,050	-	C	CHIUSO	✓
Prova 2	-	-	-	APERTO	✓
Prova 3	0,002	P ₁	-	APERTO	✓
	0,002	P ₂	-	APERTO	✓

<u>INT.</u> <u>3</u>	I _{disp} [mA]	Note	Tipo prova	Posizione interruttore	Esito prova
Prova 1	0,032	P ₁	A	APERTO	✓
	0,032	P ₂	A	APERTO	✓
	0,045	-	B	CHIUSO	✓
	0,069	-	C	CHIUSO	✓
Prova 2	-	-	-	APERTO	✓
Prova 3	0,003	P ₁	-	APERTO	✓
	0,003	P ₂	-	APERTO	✓

<u>INT.</u> <u>4</u>	I_{disp} [mA]	Note	Tipo prova	Posizione interruttore	Esito prova
Prova 1	0,020	P ₁	A	APERTO	✓
	0,019	P ₂	A	APERTO	✓
	0,047	-	B	CHIUSO	✓
	0,122	-	C	CHIUSO	✓
Prova 2	-	-	-	APERTO	✓
Prova 3	0,003	P ₁	-	APERTO	✓
	0,003	P ₂	-	APERTO	✓

<u>INT.</u> <u>5</u>	I_{disp} [mA]	Note	Tipo prova	Posizione interruttore	Esito prova
Prova 1	0,056	P ₁	A	APERTO	✓
	0,051	P ₂	A	APERTO	✓
	0,056	-	B	CHIUSO	✓
	0,143	-	C	CHIUSO	✓
Prova 2	-	-	-	APERTO	✓
Prova 3	0,004	P ₁	-	APERTO	✓
	0,004	P ₂	-	APERTO	✓

<u>INT.</u> <u>6</u>	I_{disp} [mA]	Note	Tipo prova	Posizione interruttore	Esito prova
Prova 1	0,042	P ₁	A	APERTO	✓
	0,038	P ₂	A	APERTO	✓
	0,039	P ₃	A	APERTO	✓
	/	P ₄	A	APERTO	✗
	0,041	-	B	CHIUSO	✓
	0,051	-	B	CHIUSO	✓
	0,043	-	B	CHIUSO	✓
	0,079	-	C	CHIUSO	✓
Prova 2	-	-	-	APERTO	✗
Prova 3	/	P ₁	-	APERTO	✗
	/	P ₂	-	APERTO	✗

<u>INT.</u> <u>7</u>	I _{disp} [mA]	Note	Tipo prova	Posizione interruttore	Esito prova
Prova 1	0,022	P ₁	A	APERTO	✓
	/	P ₂	A	APERTO	✗
	/	C'è solo un polo	B	CHIUSO	-
	-	-	C	CHIUSO	✓
Prova 2	-	-	-	APERTO	✓
Prova 3	0,002	P ₁	-	APERTO	✓

APPENDICE B

La stima dell'incertezza tipo calcolata in seguito è una semplificazione utilizzata durante l'attività di laboratorio.

L'incertezza della misura $\Delta V (V_2 - V_1)$ è di tipo composta, perché è ricavata da uno strumento per ogni misura di tensione. Per svolgere la valutazione dell'incertezza è stato utilizzato il metodo di "valutazione dell'incertezza tipo di categoria B", il quale consiste nel reperire le informazioni sulle incertezze da modi alternativi differenti dal calcolo attraverso una serie di misure eseguite sullo stesso campione (categoria A).

Nella tabella sottostante sono stati raccolti i valori di incertezza estesa e accuratezza provenienti da datasheet e certificati di taratura degli strumenti utilizzati.

Tabella 13: Incertezze estese dei dispositivi

STRUMENTO	Fonte	INCERTEZZA ESTESA	ACCURATEZZA
SHT40kV	Datasheet	-	-5 % @ 50 Hz AC
PXIe 4081	Datasheet	-	125 ppm /lettura + 75 ppm /scala
Divisore 1	Metodo statistico	0,27 %	-
Oscilloscopio Tektronix	Certificato di taratura	-	0,40 %

I valori di incertezza estesa prima di essere utilizzati devono essere convertiti in incertezza tipo, il quale consiste nel dividere per il fattore di copertura k differente in base al metodo utilizzato per il calcolo. Per le incertezze ottenute dal datasheet $k = \sqrt{3}$, il quale trasforma la distribuzione di probabilità da una rettangolare a una normale. Invece le incertezze ottenute dal certificato di taratura specificano un $k = 2$, il quale corrisponde ad una probabilità di copertura di circa il 95 %.

Nel caso del PXIe 4081 si esegue un passaggio aggiuntivo per ricavare l'incertezza.

$$u_{SHT40kV} = \frac{U_{SHT40kV}}{k} = \frac{5 \%}{\sqrt{3}} = 2,88 \%$$

$$u_{PXIe\ 4081} = \frac{\text{lettura} \cdot 125 \cdot 10^{-6} + \text{scala} \cdot 10^{-6}}{\text{lettura}} \cdot \frac{1}{k} \cdot 100\%$$

$$u_{div_1} = \frac{U_{div_1}}{k} = \frac{0,27}{2} \% = 0,14\%$$

$$u_{oscill} = \frac{U_{oscill}}{k} = \frac{0,4}{2} \% = 0,2\%$$

Il calcolo dell'incertezza tipo composta attraverso le incertezze relative con distribuzione gaussiana si traduce in una somma quadratica:

$$u = \sqrt{u_{SHT40kV}^2 + u_{PXIe\ 4081}^2 + u_{div_1}^2 + u_{oscill}^2}$$

Nella pagina successiva sono riportate le tabelle con i calcoli per ogni misura.

Si riportano le tabelle riassuntive dei calcoli eseguiti sulle misure.

Tabella 14: Calcolo incertezza per "l'interruttore 1" con impulso positivo senza controllo dell'istante di inserzione

	V ₂	u _{sht40kV}	u ₄₀₈₁	u ₄₀₈₁	V ₁	u _{div}	u _{oscill}	ΔV	u	u
unità	kV	%	V	%	kV	%	%	kV	%	kV
1	2,875	2,887	0,00111	0,02228	4,088	0,14	0,2	- 1,212	2,897	0,035
2	2,535	2,887	0,00107	0,0243	4,085	0,14	0,2	- 1,551	2,897	0,045
3	2,873	2,887	0,00111	0,02229	4,083	0,14	0,2	- 1,210	2,897	0,035
4	2,208	2,887	0,00103	0,02682	4,078	0,14	0,2	- 1,869	2,897	0,054
5	2,884	2,887	0,00111	0,02223	4,071	0,14	0,2	- 1,187	2,897	0,034

Tabella 15: Calcolo incertezza per "l'interruttore 1" con impulso negativo senza controllo dell'istante di inserzione

	V ₂	u _{sht40kV}	u ₄₀₈₁	u ₄₀₈₁	V ₁	u _{div}	u _{oscill}	ΔV	u	u
unità	kV	%	V	%	kV	%	%	kV	%	kV
1	- 2,236	2,887	0,00103	0,02658	- 3,942	0,14	0,2	1,706	2,897	0,049
2	- 0,205	2,887	0,00078	0,21827	- 4,076	0,14	0,2	3,871	2,905	0,112
3	- 2,827	2,887	0,0011	0,02254	- 3,986	0,14	0,2	1,159	2,897	0,034
4	- 2,106	2,887	0,00101	0,02778	- 4,043	0,14	0,2	1,937	2,897	0,056
5	- 2,716	2,887	0,00109	0,02316	- 3,998	0,14	0,2	1,282	2,897	0,037

Tabella 16: Calcolo dell'incertezza per "l'interruttore 5" con impulso positivo con controllo dell'istante di inserzione

	V ₂	u _{sht40kV}	u ₄₀₈₁	u ₄₀₈₁	V ₁	u _{div}	u _{oscill}	ΔV	u	u
unità	kV	%	V	%	kV	%	%	kV	%	kV
1	- 2,549	2,887	0,00107	0,02421	4,106	0,14	0,2	-6,655	2,897	0,193
2	- 2,501	2,887	0,00106	0,02453	4,215	0,14	0,2	-6,716	2,897	0,195

Tabella 17: Calcolo incertezza per "l'interruttore 5" con impulso negativo con controllo dell'istante di inserzione

	V ₂	u _{sht40kV}	u ₄₀₈₁	u ₄₀₈₁	V ₁	u _{div}	u _{oscill}	ΔV	u	u
unità	kV	%	V	%	kV	%	%	kV	%	kV
1	2,904	2,887	0,00111	0,02213	- 4,103	0,14	0,2	7,007	2,897	0,203
2	2,853	2,887	0,00111	0,02239	- 4,030	0,14	0,2	6,883	2,897	0,199

APPENDICE C

Risultati delle prove preliminari degli interruttori nuovi:

<u>INT.</u> <u>A1</u>	I_{disp} [mA]	Note	Tipo prova	Posizione interruttore	Esito prova
Prova 1	0,028	P ₁	A	APERTO	✓
	0,028	P ₂	A	APERTO	✓
	0,019	-	B	CHIUSO	✓
	0,029	-	C	CHIUSO	✓
Prova 2	-	-	-	APERTO	✓
Prova 3	0	P ₁	-	APERTO	✓
	0	P ₂	-	APERTO	✓

<u>INT.</u> <u>A2</u>	I_{disp} [mA]	Note	Tipo prova	Posizione interruttore	Esito prova
Prova 1	0,043	P ₁	A	APERTO	✓
	0,047	P ₂	A	APERTO	✓
	0,048	-	B	CHIUSO	✓
	0,035	-	C	CHIUSO	✓
Prova 2	-	-	-	APERTO	✓
Prova 3	0	P ₁	-	APERTO	✓
	0	P ₂	-	APERTO	✓

<u>INT.</u> <u>B1</u>	I_{disp} [mA]	Note	Tipo prova	Posizione interruttore	Esito prova
Prova 1	0,018	P ₁	A	APERTO	✓
	0,018	P ₂	A	APERTO	✓
	0,026	-	B	CHIUSO	✓
	0,033	-	C	CHIUSO	✓
Prova 2	-	-	-	APERTO	✓
Prova 3	0	P ₁	-	APERTO	✓
	0	P ₂	-	APERTO	✓

<u>INT.</u> <u>B2</u>	I_{disp} [mA]	Note	Tipo prova	Posizione interruttore	Esito prova
Prova 1	0,040	P ₁	A	APERTO	✓
	0,042	P ₂	A	APERTO	✓
	0,038	-	B	CHIUSO	✓
	0,040	-	C	CHIUSO	✓
Prova 2	-	-	-	APERTO	✓
Prova 3	0	P ₁	-	APERTO	✓
	0	P ₂	-	APERTO	✓

<u>INT.</u> <u>C1</u>	I_{disp} [mA]	Note	Tipo prova	Posizione interruttore	Esito prova
Prova 1	0,017	P ₁	A	APERTO	✓
	0,020	P ₂	A	APERTO	✓
	0,029	-	B	CHIUSO	✓
	0,033	-	C	CHIUSO	✓
Prova 2	-	-	-	APERTO	✓
Prova 3	0	P ₁	-	APERTO	✓
	0	P ₂	-	APERTO	✓

<u>INT.</u> <u>C2</u>	I_{disp} [mA]	Note	Tipo prova	Posizione interruttore	Esito prova
Prova 1	0,040	P ₁	A	APERTO	✓
	0,039	P ₂	A	APERTO	✓
	0,038	-	B	CHIUSO	✓
	0,078	-	C	CHIUSO	✓
Prova 2	-	-	-	APERTO	✓
Prova 3	0	P ₁	-	APERTO	✓
	0	P ₂	-	APERTO	✓

<u>INT.</u> <u>D1</u>	I_{disp} [mA]	Note	Tipo prova	Posizione interruttore	Esito prova
Prova 1	0,026	P ₁	A	APERTO	✓
	0,025	P ₂	A	APERTO	✓
	0,041	-	B	CHIUSO	✓
	0,024	-	C	CHIUSO	✓
Prova 2	-	-	-	APERTO	✓
Prova 3	0	P ₁	-	APERTO	✓
	0	P ₂	-	APERTO	✓

<u>INT.</u> <u>D2</u>	I_{disp} [mA]	Note	Tipo prova	Posizione interruttore	Esito prova
Prova 1	0,040	P ₁	A	APERTO	✓
	0,039	P ₂	A	APERTO	✓
	0,043	-	B	CHIUSO	✓
	0,096	-	C	CHIUSO	✓
Prova 2	-	-	-	APERTO	✓
Prova 3	0	P ₁	-	APERTO	✓
	0	P ₂	-	APERTO	✓

<u>INT.</u> <u>E1</u>	I_{disp} [mA]	Note	Tipo prova	Posizione interruttore	Esito prova
Prova 1	0,027	P ₁	A	APERTO	✓
	0,027	P ₂	A	APERTO	✓
	0,036	-	B	CHIUSO	✓
	0,053	-	C	CHIUSO	✓
Prova 2	-	-	-	APERTO	✓
Prova 3	0	P ₁	-	APERTO	✓
	0	P ₂	-	APERTO	✓

<u>INT.</u> <u>E2</u>	I _{disp} [mA]	Note	Tipo prova	Posizione interruttore	Esito prova
Prova 1	0,040	P ₁	A	APERTO	✓
	0,036	P ₂	A	APERTO	✓
	0,036	-	B	CHIUSO	✓
	0,061	-	C	CHIUSO	✓
Prova 2	-	-	-	APERTO	✓
Prova 3	0	P ₁	-	APERTO	✓
	0	P ₂	-	APERTO	✓

<u>INT.</u> <u>F1</u>	I _{disp} [mA]	Note	Tipo prova	Posizione interruttore	Esito prova
Prova 1	0,021	P ₁	A	APERTO	✓
	0,021	P ₂	A	APERTO	✓
	0,036	-	B	CHIUSO	✓
	0,026	-	C	CHIUSO	✓
Prova 2	-	-	-	APERTO	✓
Prova 3	0	P ₁	-	APERTO	✓
	0	P ₂	-	APERTO	✓

<u>INT.</u> <u>F2</u>	I _{disp} [mA]	Note	Tipo prova	Posizione interruttore	Esito prova
Prova 1	0,032	P ₁	A	APERTO	
	0,031	P ₂	A	APERTO	✓
	0,035	-	B	CHIUSO	✓
	0,035	-	C	CHIUSO	✓
Prova 2	-	-	-	APERTO	✓
Prova 3	0	P ₁	-	APERTO	✓
	0	P ₂	-	APERTO	✓

<u>INT.</u> <u>G1</u>	I_{disp} [mA]	Note	Tipo prova	Posizione interruttore	Esito prova
Prova 1	0,020	P ₁	A	APERTO	✓
	0,020	P ₂	A	APERTO	✓
	0,036	-	B	CHIUSO	✓
	0,029	-	C	CHIUSO	✓
Prova 2	-	-	-	APERTO	✓
Prova 3	0	P ₁	-	APERTO	✓
	0	P ₂	-	APERTO	✓

<u>INT.</u> <u>G2</u>	I_{disp} [mA]	Note	Tipo prova	Posizione interruttore	Esito prova
Prova 1	0,037	P ₁	A	APERTO	✓
	0,037	P ₂	A	APERTO	✓
	0,040	-	B	CHIUSO	✓
	0,047	-	C	CHIUSO	✓
Prova 2	-	-	-	APERTO	✓
Prova 3	0	P ₁	-	APERTO	✓
	0	P ₂	-	APERTO	✓

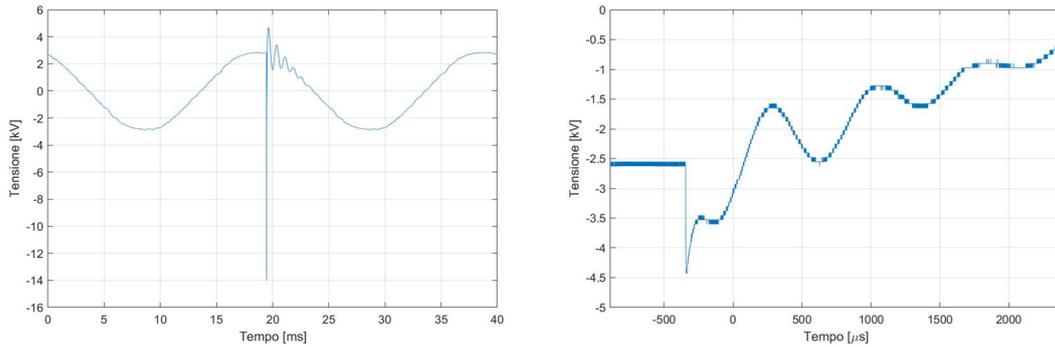
<u>INT.</u> <u>H1</u>	I_{disp} [mA]	Note	Tipo prova	Posizione interruttore	Esito prova
Prova 1	0,015	P ₁	A	APERTO	✓
	0,015	P ₂	A	APERTO	✓
	0,028	-	B	CHIUSO	✓
	0,054	-	C	CHIUSO	✓
Prova 2	-	-	-	APERTO	✓
Prova 3	0	P ₁	-	APERTO	✓
	0	P ₂	-	APERTO	✓

<u>INT.</u> <u>H2</u>	I_{disp} [mA]	Note	Tipo prova	Posizione interruttore	Esito prova
Prova 1	0,037	P ₁	A	APERTO	✓
	0,037	P ₂	A	APERTO	✓
	0,042	-	B	CHIUSO	✓
	0,065	-	C	CHIUSO	✓
Prova 2	-	-	-	APERTO	✓
Prova 3	0	P ₁	-	APERTO	✓
	0	P ₂	-	APERTO	✓

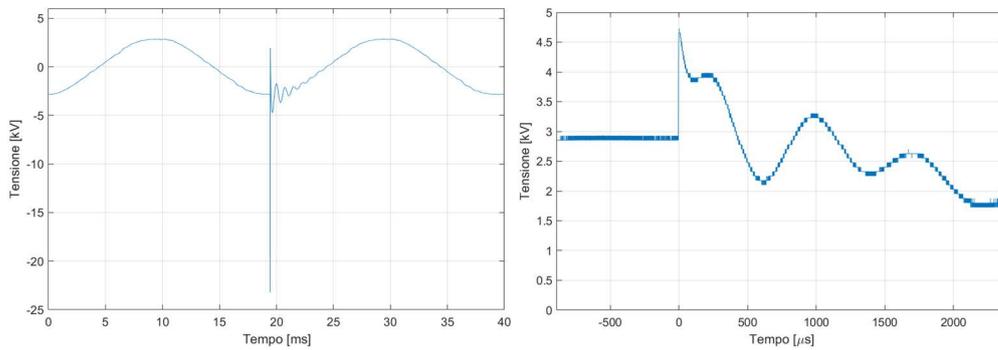
APPENDICE D

Risultati tensione combinata su interruttori nuovi si sono riportati solo un impulso positivo e negativo per ogni interruttore, essendo i risultati praticamente simili; A sinistra acquisizione tramite sonda SHT40kV e a destra tensione combinata acquisita con oscilloscopio portatile.

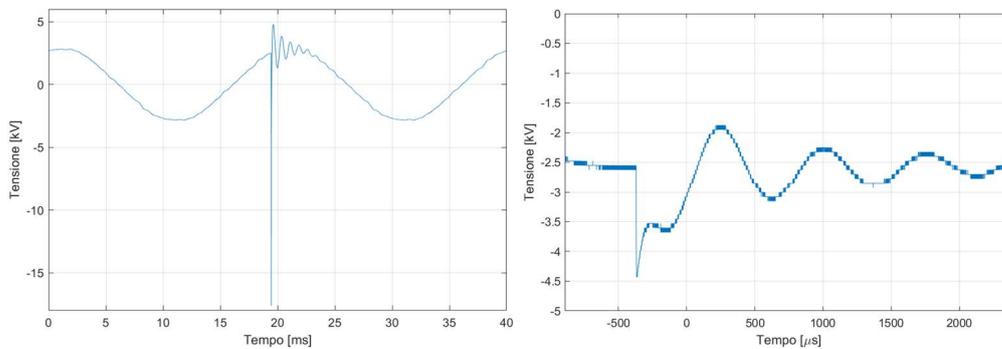
Interruttore “A1” impulso negativo:



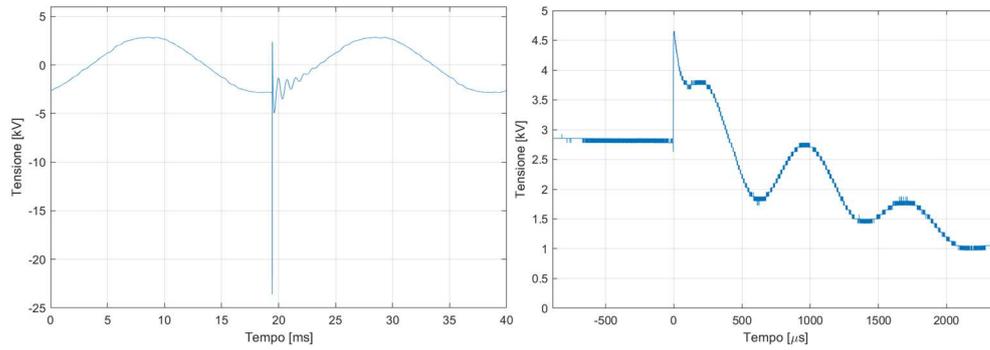
Interruttore “A1” impulso positivo:



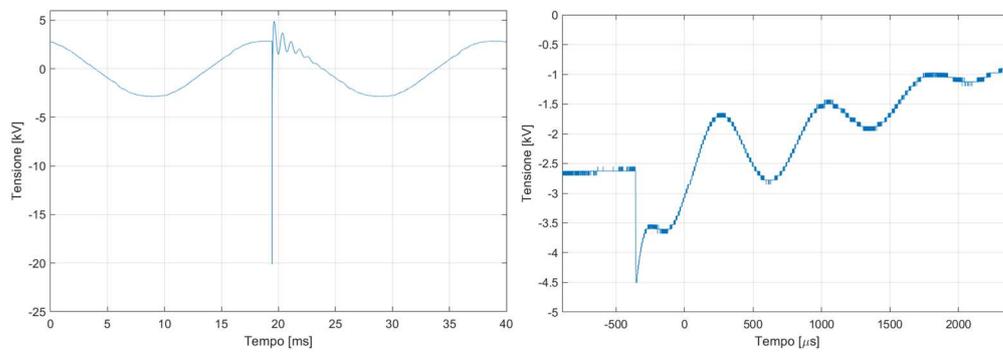
Interruttore “B1” impulso negativo:



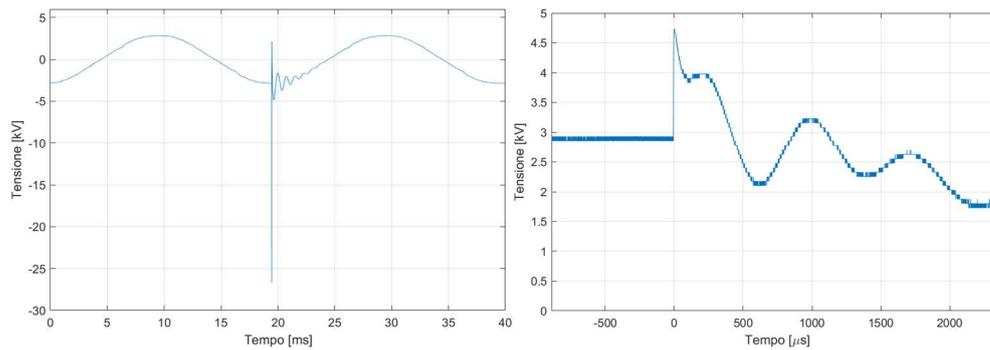
Interruttore "B1" impulso positivo:



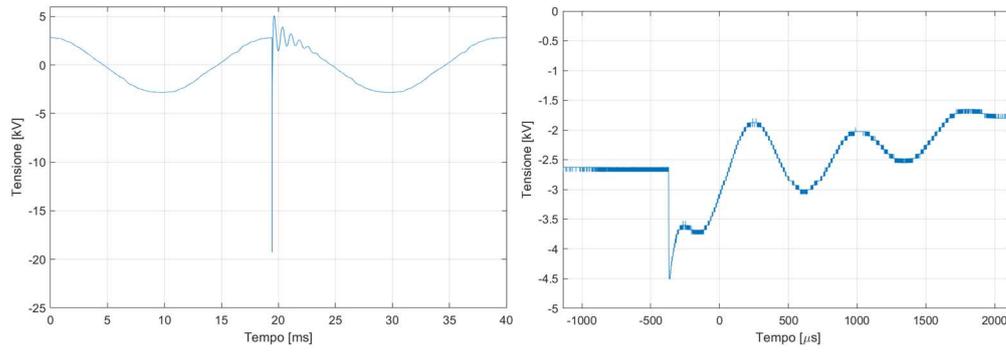
Interruttore "C1" impulso negativo:



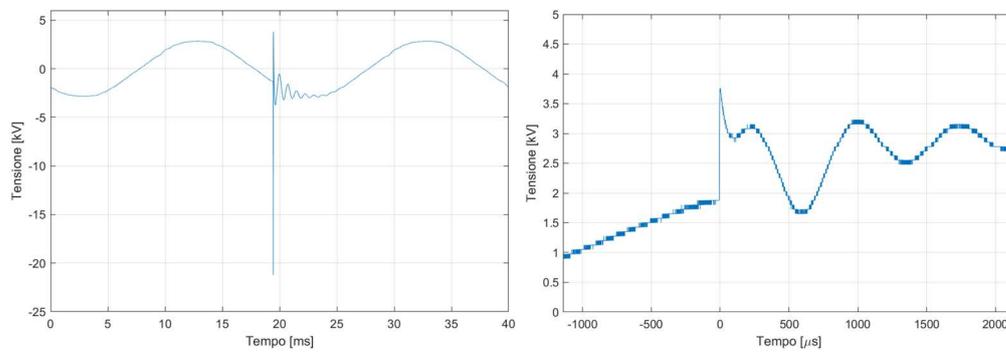
Interruttore "C1" impulso positivo



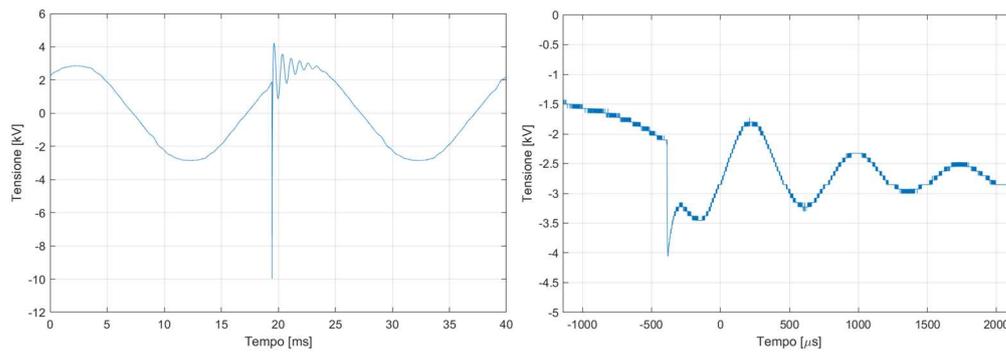
Interruttore "D1" impulso negativo:



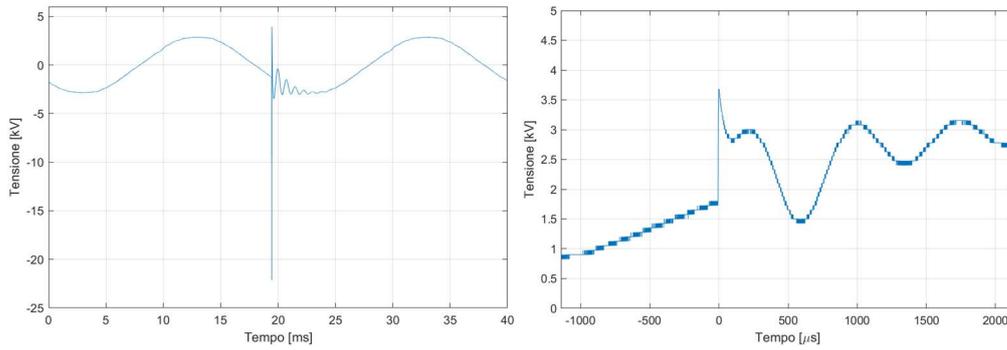
Interruttore "D1" impulso positivo:



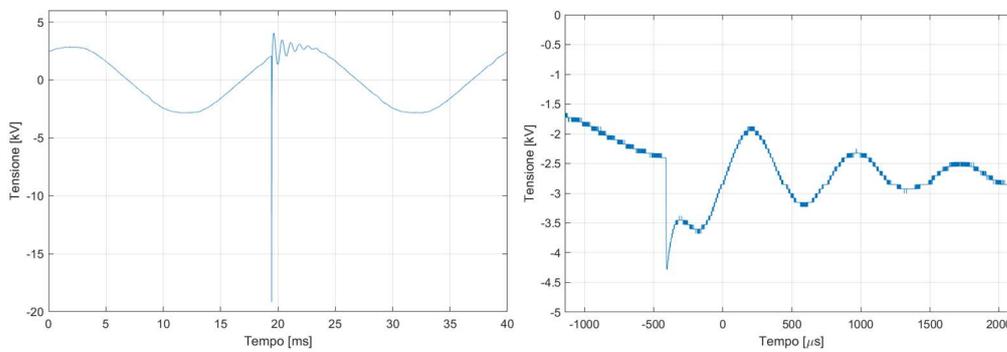
Interruttore "E1" impulso negativo:



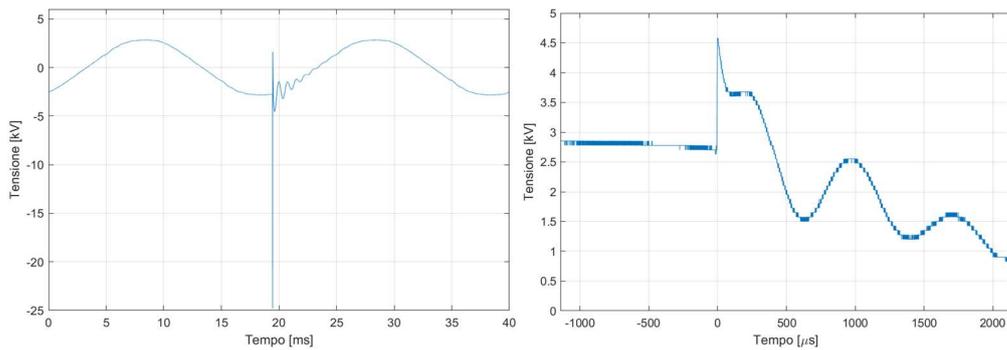
Interruttore "E1" impulso positivo:



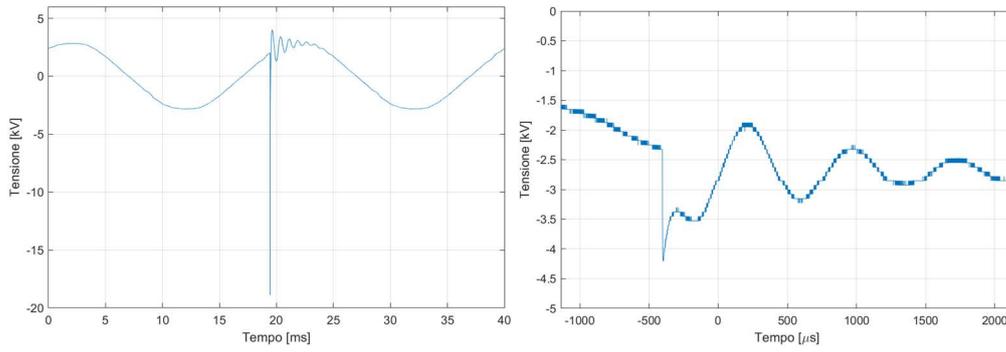
Interruttore "F1" impulso negativo



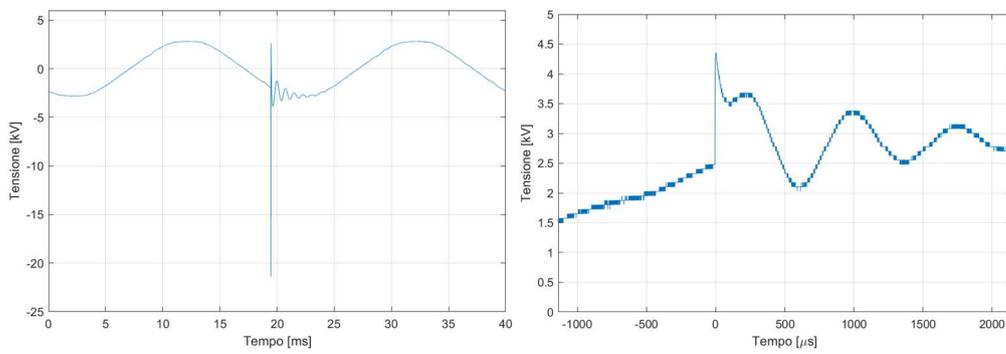
Interruttore "F1" impulso positivo



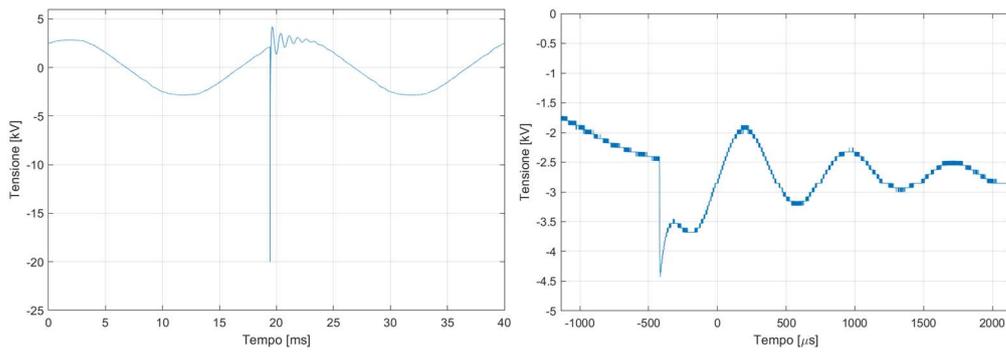
Interruttore "G1" impulso negativo



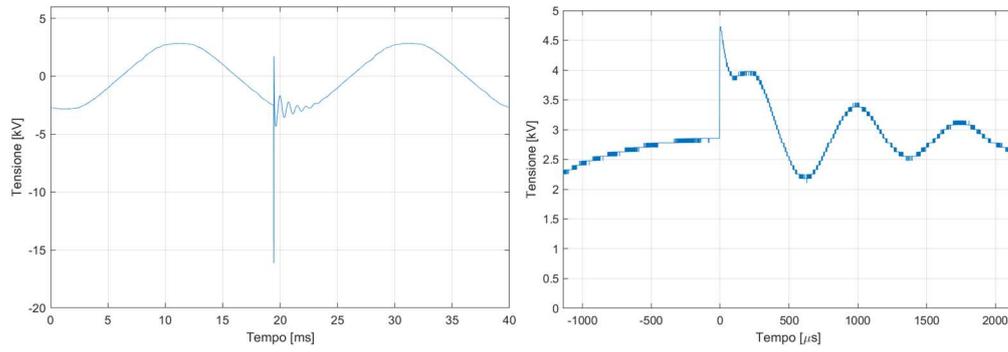
Interruttore "G1" impulso positivo



Interruttore "H1" impulso negativo



Interruttore "H1" impulso positivo



BIBLIOGRAFIA

- [1] EN 61180: 2016, *High-voltage test techniques for low-voltage equipment — Definitions, test and procedure requirements, test equipment*, 2016.
- [2] EN 60060-1: 2010, *High-voltage test techniques - Part 1: General definitions and test requirements*, 2010.
- [3] EN 60898-1: 2019, *Circuit-breakers for overcurrent protection for household and similar installations - Part 1: Circuitbreakers for a.c. operation*, 2019.
- [4] EN 60947-1: 2021, *Low-voltage switchgear and controlgear - Part 1: General rules*, 2021.
- [5] EN 60060-2: 2011, *High-voltage test techniques - Part 2: Measuring systems*, 2011.
- [6] EN 60947-2: 2020, *Low-voltage switchgear and controlgear - Part 1: Circuit-breakers*, 2020.
- [7] F. Gallina, S. E. Caria e P. E. Roccatò, *Towards a traceable divider for composite voltage waveforms below 1 kV*, vol. 104, *Electrical Engineering* (2022), 08/2021, p. 1121–1130.
- [8] CEI EN 50191: 2011, *Installazione ed esercizio degli impianti elettrici di prova*, 2011.
- [9] E. L. Wolfgang Hauschild, «Tests with Combined and Composite Voltages,» in *High-Voltage Test and - Measuring Techniques*, Springer, pp. 401- 411.
- [10] S. E. Caria, *Sistema di misura per prove di tensione composita e combinate*, 2020.
- [11] «Alte Tensioni Forti Correnti - INRIM,» Gennaio 2024. [Online]. Available: <https://latfc.inrim.it/home-page>.

INDICE DELLE FIGURE

<i>Figura 1-1: Alternatore - Brown Boveri & Cie</i>	4
<i>Figura 2-1: Forma d'onda dell'impulso</i>	6
<i>Figura 2-2: Schema prova tensione combinata</i>	8
<i>Figura 2-3: Schema prova della tensione composita</i>	9
<i>Figura 3-1: Generatore di impulso Passoni Villa</i>	11
<i>Figura 3-2: Generatore sinusoidale Elektrotechn. Laboratorium UH28M</i>	12
<i>Figura 3-3: Accessorio temporizzatore</i>	12
<i>Figura 3-4: Schema e foto lato alta tensione del "divisore 1"- 1. Attacco per lato BT 2. Condensatori ceramici 3. Resistenze ramo RC 4. Colonna isolante 5. Resistenze ramo resistivo [7]</i>	13
<i>Figura 3-5: Schema e foto lato di bassa tensione [7]</i>	14
<i>Figura 3-6: "Divisore 1" [7]</i>	14
<i>Figura 3-7: Oscilloscopio Tektronix TDS 3012C</i>	15
<i>Figura 3-8: Pinza amperometrica Fluke 360</i>	16
<i>Figura 3-9: Sonda SHT40kV</i>	16
<i>Figura 3-10: Scheda di acquisizione PXIe 4081 (slot 5) all'interno dello chassis della National Instruments</i>	17
<i>Figura 3-11: Oscilloscopio SIGLENT SHS820</i>	18
<i>Figura 3-12: Sonda di campo</i>	19
<i>Figura 3-13: Spinterometro</i>	19
<i>Figura 4-1: Interruttori prelevati dal campo</i>	21
<i>Figura 4-2: Schemi collegamenti 1° prova interruptori</i>	22
<i>Figura 4-3: Schema collegamento 2° prova</i>	23
<i>Figura 4-4: Schema collegamento 3° prova</i>	24
<i>Figura 4-5: Foto "interruttore 4" aperto per ispezione</i>	26
<i>Figura 5-1: Schema circuito con tensione combinata - Layout 1</i>	29
<i>Figura 5-2: Schema del sistema di acquisizione della tensione d'impulso</i>	29
<i>Figura 5-3: Schema di acquisizione della tensione sinusoidale</i>	30
<i>Figura 5-4: Schema pratico</i>	30
<i>Figura 5-5: Acquisizione impulso positivo $V_1(t)$ nel punto A</i>	31
<i>Figura 5-6: Risultato all'impulso positivo nel punto B</i>	32
<i>Figura 5-7: Acquisizione impulso negativo $V_1(t)$ nel punto A</i>	32
<i>Figura 5-8: Risultato all'impulso negativo nel punto B</i>	33
<i>Figura 5-9: Risultato generatore sinusoidale spento nel punto B con inserzione impulso</i>	34
<i>Figura 5-10: Risultato impulso positivo con comando manuale nel punto B – "Interruttore 3"</i>	36
<i>Figura 5-11: Risultato impulso negativo con comando manuale nel punto B – "Interruttore 3"</i>	37
<i>Figura 5-12: Risultato impulso negativo con comando manuale nel punto B – "Interruttore 2"</i>	38
<i>Figura 5-13: Forma d'onda impulso quando scarica a terra</i>	39
<i>Figura 5-14: Schema tensione combinata layout 2</i>	40

Figura 5-15: Sei resistenze ognuna da 570 Ω in serie al generatore sinusoidale	40
Figura 5-16: Acquisizione oscilloscopio portatile	41
Figura 5-17: Acquisizione tensione nel punto B	41
Figura 5-18: Schema generale del collegamento per misurare la corrente con i tre strumenti	42
Figura 5-19: Rogowski	43
Figura 5-20: Pinza amperometrica PAC 12	44
Figura 5-21: Shunt di resistenza 100 Ω	44
Figura 5-22: Acquisizione corrente tramite Rogowski – Caso senza scarica	45
Figura 5-23: Acquisizione corrente tramite pinza amperometrica - Caso senza scarica	45
Figura 5-24: Acquisizione corrente tramite Rogowski con $f_t = 1\text{MHz}$ - Caso di scarica	46
Figura 5-25: Acquisizione pinza amperometrica con filtro passa basso di $f_t = 2\text{kHz}$ - Caso scarica	46
Figura 5-26: Acquisizione tensione dello shunt - Caso scarica	47
Figura 5-27: Acquisizione con shunt da 100 Ω , con filtro passa basso con $f_t = 1\text{MHz}$	48
Figura 5-28: Acquisizione attraverso pinza amperometrica con filtro $f_t = 2\text{kHz}$	49
Figura 6-1: Schema collegamento spinterometro	50
Figura 6-2: Zona prova per analisi fenomeno di scarica con spinterometro	51
Figura 6-3: Acquisizione con sonda SHT40kV	52
Figura 6-4: Tensione combinata V_{ab} , applicando solo tensione sinusoidale	52
Figura 6-5: Acquisizione 1° caso con sonda SHT40kV nel punto B	53
Figura 6-6: V_{ab} - 1° caso di non scarica	53
Figura 6-7: Acquisizione 2° caso con sonda SHT40kV nel punto B - Scarica	54
Figura 6-8: V_{ab} 2° caso – Scarica	55
Figura 6-9: Zona prova per analisi fenomeno di scarica con interruttore	56
Figura 6-10: Impulso positivo di $V_1 = 4138\text{V}$	57
Figura 6-11: Impulso negativo di $V_1 = -4055\text{V}$	57
Figura 6-12: Risultato prova con impulso positivo - Tensione V_b	58
Figura 6-13: Risultato prova con impulso positivo - Tensione V_{ab}	58
Figura 6-14: Risultato prova con impulso negativo - Tensione V_b	59
Figura 6-15: Risultati prova con impulso negativo – Tensione V_{ab}	59
Figura 7-1: Schema collegamento strumentazione a interruttori in prova	62
Figura 7-2: Impulso positivo applicato al “interruttore A1”	62
Figura 7-3: Impulso negativo applicato al “interruttore A1”	63
Figura 7-4: Acquisizione nel punto B - impulso positivo – “Interruttore A1”	63
Figura 7-5: Tensione combinata - impulso positivo – “interruttore A1”	64
Figura 7-6: Acquisizione nel punto B - impulso negativo – “Interruttore A1”	64
Figura 7-7: Tensione combinata - impulso negativo – “Interruttore A1”	65
Figura 9-1: Generatore di corrente collegato agli interruttori	66
Figura 9-2: Acquisizione nel punto B - impulso positivo – “Interruttore A2”	70
Figura 9-3: Tensione combinata - Impulso positivo - “Interruttore A2”	70
Figura 9-4: Acquisizione nel punto B - impulso negativo – “Interruttore A2”	71

<i>Figura 9-5: Tensione combinata - Impulso negativo - "Interruttore A2"</i>	71
<i>Figura 9-1: Disposizione dispositivi con sonda di campo</i>	73
<i>Figura 9-2: Impulso positivo applicato allo spinterometro, acquisito dalla sonda di campo</i>	74
<i>Figura 9-3: Impulso negativo applicato allo spinterometro, acquisito dalla sonda di campo</i>	74
<i>Figura 9-4: Scarica impulso positivo applicato allo spinterometro, acquisito dalla sonda di campo</i>	75
<i>Figura 9-5: Acquisizione con sonda di campo del segnale sinusoidale 2 kV_{rms}</i>	76
<i>Figura 9-6: Non scarica della tensione combinata acquisito dalla sonda di campo</i>	77
<i>Figura 9-7: Scarica nel caso di tensione combinata acquisito dalla sonda di campo</i>	77
<i>Figura 9-8: Disposizione dispositivi per acquisizione con sonda di campo</i>	78
<i>Figura 9-9: Impulso negativo V₁= -4 kV, visto da sonda di campo applicato all'interruttore</i>	79
<i>Figura 9-10: Impulso positivo V₁= 4,07 kV, visto da sonda di campo applicato all'interruttore</i>	79
<i>Figura 9-11: Tensione combinata applicata all'interruttore 3, acquisita dalla sonda di campo</i>	80
<i>Figura 9-12: Miglioramento disposizione apparecchiatura per acquisizione con sonda di campo</i>	80
<i>Figura 9-13: Tensione combinata su interruttore nuovo, acquisizione attraverso sonda di campo</i>	81
<i>Figura 9-14: V₁= 5,8 kV e V₂= 1,6 kV_{rms}</i>	82
<i>Figura 9-15: V₁= 7,5 kV e V₂= 1,6 kV_{rms} (scaricato)</i>	82
<i>Figura 10-1: Schemi dei casi 1 e 2 di analisi</i>	84
<i>Figura 10-2: Istante di scarica su spinterometro</i>	85