



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Ingegneria Industriale DII

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria dell'Energia Elettrica

QUALIFICAZIONE DI UN SISTEMA DI MISURA
PER IMPULSI DI TENSIONE A FRONTE RIPIDO

Relatore: Prof. Renato Gobbo

Laureando: Matteo Peruzzi

Matricola: 1130874

Anno Accademico 2019/2020

Qualificazione di un sistema di misura
per impulsi di tensione a fronte ripido

Qualification of a measuring system
for fast front impulse voltages

Matteo Peruzzi

Introduzione

Questo documento, in primo luogo ha lo scopo di valutare la tenuta dell'avvolgimento spira-spira effettuando il così detto «inter-turn test» su bobine campione utilizzando impulsi di tensione a fronte ripido.

In secondo luogo invece si vuole garantire la veridicità ed affidabilità del test andando ad effettuare una qualificazione del sistema di misura utilizzato. Questo verrà fatto realizzando due sistemi di misura distinti: entrambe le forme d'onda verranno campionate e registrate da un oscilloscopio digitale. Per la parte di elaborazione dei dati verrà invece scritto un programma in MATLAB.

I primi due capitoli offrono al lettore una panoramica teorica sia sul motivo per il quale viene effettuato l' «interturn test» sia sulle normative che descrivono in modo minuzioso la caratterizzazione del sistema di misura. Ampio spazio è lasciato all'analisi teorica dei divisori di tensione (resistivi e capacitivi).

Il sistema di misura è presentato nel terzo capitolo dove inoltre si verificheranno tutti i vari parametri dei trasduttori utilizzati (risposta in frequenza e fattore di scala), invece il collaudo del sistema è lasciato al quarto e quinto capitolo.

Di maggior importanza è il sesto capitolo nel quale vengono esposti i concetti teorici di riproducibilità e ripetibilità del sistema di misura al fine di ottenere affidabilità e quindi la qualificazione dello stesso.

Negli ultimi due capitoli vengono esposti e discussi i risultati delle varie prove: analizzando e spiegando la discordanza delle misure rilevate, descrivendo la soluzione adottata.

Tutte le prove e misurazioni sono state svolte nel rispetto delle normative in vigore e sono state eseguite nel Laboratorio di Alte Tensioni presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale dell'Università degli studi di Padova con sede in via Gradenigo 6/A in Padova.

Indice

Introduzione	2
1 Interruttori e motori in media tensione	6
1.1 Costruzione e caratteristiche dell' avvolgimento	9
2 Studio teorico delle normative	12
2.1 Richiami teorici normativa IEC 60071-1	12
2.2 Richiami teorici della normativa IEC 60060-1	14
2.2.1 Classificazione degli impulsi di tensione	15
2.2.2 Andamento della curva impulsiva	16
2.3 Richiami teorici dalla normative IEC 60034-15	17
2.3.1 Main insulation test con curva di fulminazione standard 1,2/50 μ s	17
2.3.2 Interturn insulation test con curva a fronte ripido	18
2.4 Richiami teorici normativa IEEE 522	18
2.4.1 Curva standard 3.5 p.u	19
2.4.2 Livelli di tensione ridotti	20
2.5 Richiami teorici dalla normativa IEC 60060-2	21
2.5.1 Generatore di impulsi	21
2.5.2 Divisore di tensione	24
2.5.3 Dispositivi di registrazione o di rivelazione	28
3 Configurazione sistema di misura	30
3.1 Concetto di ripetibilità e di riproducibilità	30
3.2 Strumenti di misura utilizzati	31
3.2.1 Divisore di tensione Uni_PD_01	31
3.2.2 Sonda Tektronix P6015A	32
3.3 Verifica del fattore di scala	39
4 Confronto del sistema di misura in bassa tensione	41
4.1 Analisi delle misure di confronto	42
5 Collaudo del sistema di misura con interturn test	58
5.1 Esposizione risultati interturn test	60
5.2 Analisi risultati interturn test	64

INDICE

6	Qualificazione del sistema di misura	65
6.1	Prima ipotesi: rilevatore di tensione	65
6.2	Seconda ipotesi: variazione della capacità di alta della sonda . . .	69
6.3	Soluzione adottata	74
7	Interturn test finale	75
7.1	Prima configurazione - impulso standard 1,2/50 μ s	76
7.2	Seconda configurazione - impulso fronte ripido	76
7.3	Terza configurazione - impulso aggiuntivo	79
7.4	Quarta configurazione - impulso a fronte più lungo	79
7.5	Quinta configurazione - scaricatore di tensione	82
	Conclusioni	84
	Bibliografia	86
	Ringraziamenti	88

Capitolo 1

Interruttori e motori in media tensione

Negli ultimi decenni si è diffuso sempre di più l'utilizzo di motori elettrici. Motori ai quali spesso è affidato un ruolo centrale nei processi industriali e vista la loro versatilità e velocità di attivazione risultano essere idonei per l'avviamento dei servizi nelle centrali elettriche di vario tipo. Servizi che possono essere sia di primaria importanza che di fascia secondaria. Ad esempio, possono essere affidati ai suddetti motori tutti quei servizi che si occupano dell'attivazione di pompe ad acqua, ventilatori per il raffreddamento e operazioni generiche nelle centrali termoelettriche. La diffusione dei motori si ha avuto anche nell'industria pesante: sia in acciaierie, cementerie, raffinerie e cartiere ma anche ad esempio negli impianti petroliferi offshore. Sempre più frequentemente si è chiamati a dover garantire una continuità di servizio.

Ricerche pregresse hanno evidenziato che la causa principale di malfunzionamento del motore, oltre all'usura dello stesso, è data dal guasto dell'avvolgimento, circa il 40% dei guasti complessivi. Il guasto dell'avvolgimento dello statore viene causato dal cedimento interno dell'isolamento tra spira e terra o molto più frequentemente dal cedimento dell'isolamento tra spira e spira.

Il cedimento dell'isolamento spira-terra nell'avvolgimento statorico generalmente può essere riscontrato nei casi seguenti:

- Dall'introduzione di piccoli frammenti metallici nello statore
- Dal riscaldamento, causato precedentemente dal cortocircuito spira-spira.
- Dal deterioramento e dall'usura dell'isolamento stesso (molto raro).

Solitamente, se un punto in tensione dell'avvolgimento viene a contatto con un punto di terra, si registra un incremento del campo elettrico verso massa anche in altri punti del rotore. Facilmente quindi si verifica un secondo cortocircuito spira-terra in un differente punto dell'avvolgimento. Come conseguenza del duplice guasto le forze magnetiche che agiscono nel motore risultano alterate

e squilibrate. In queste condizioni, le vibrazioni che si registrano sono tali da causare la messa fuori servizio del motore.

Invece, il cedimento dell'isolante tra le spire porta sia uno sbilanciamento termico che magnetico nel rotore. Questo cortocircuito tra spire non comporta l'immediata messa fuori servizio della macchina se il sistema di media tensione è a neutro isolato. Comunque ciò risulta pericoloso in quanto viene a generarsi una corrente di circolazione nelle spire (precedentemente cortocircuitate) molto elevata. Il riscaldamento così generato induce una rapida espansione del guasto a una porzione più grande dell'avvolgimento.

Come principale conseguenza del cedimento dell'isolamento tra le spire si registra un importante incremento delle vibrazioni nel rotore. Fintanto che esse rientrano entro i limiti di accettabilità, il motore può continuare il suo esercizio.

Il guasto dell'isolamento spira-spira in minima parte può essere dovuto ad un errore di fabbricazione durante la costruzione degli avvolgimenti del motore. Qualora per mancanza di attenzione si manifestasse questo problema vi è la possibilità di causare un difetto nel sottile strato di isolamento tra i conduttori della bobina (isolamento spira-spira). Un guasto di tale natura è molto raro e presto escluso in quanto i costruttori stessi, una volta assemblato il prodotto procedono a test specifici per garantirne la qualità.

Si identifica che come principale causa del guasto spira-spira vi sia il fronte molto ripido della tensione transitoria. Tale tensione normalmente si viene a generare durante le manovre degli interruttori atti a comandare l'accensione o lo spegnimento del motore. Gli organi di manovra sono chiamati a dover separare galvanicamente i contatti al fine di separare le parti del circuito. Negli anni sessanta, sono iniziati diversi studi al fine di individuare una tecnologia sicura ed affidabile in grado di sostituire contattori in olio fin lì utilizzati; sono stati introdotti nel mercato sezionatori in vuoto (vacuum circuit breakers). Oltre ad essere meno ingombranti dei comuni dispositivi ad olio, risultano essere robusti, a prova di fiamma e più sicuri contro vibrazioni sismiche. Risultano inoltre più ecologici di quelli che operano in SF₆ in quanto utilizzando l'esaffluoruro di zolfo. La resistenza dielettrica del vuoto è circa otto volte maggiore di quella dell'aria e quattro volte maggiore di quella del gas SF₆. Presentano inoltre una elevata rigidità dielettrica che consente di estinguere l'arco in uno spazio di contatto molto ridotto rispetto agli altri due dispositivi. Per questi motivi, più degli altri, gli interruttori a vuoto sono idonei a soddisfare i requisiti richiesti per la commutazione dei motori in media tensione. In queste circostanze essi sono in grado di interrompere la corrente nominale in un tempo molto inferiore. Ad ogni modo, nonostante i molti pregi descritti, vanno considerati gli effetti dovuti al troncamento della corrente (chopping current) e alle riaccensioni spontanee.

Troncamento della corrente (current chopping)

La corrente di chopping nei dispositivi in questione si manifesta a causa della prematura soppressione della corrente prima che essa arrivi al «livello zero» nor-

malmente richiesto dal dispositivo. A seconda dell'energia magnetica che viene trattenuta dall'induttanza di carico durante il fenomeno di commutazione $\frac{1}{2}LI^2$, è possibile stimare anche la massima sovratensione transitoria $V = I_C \sqrt{L_b/C_s}$. Dove I_C rappresenta il livello di corrente troncata, mentre $\sqrt{L_b/C_s}$ è l'impedenza caratteristica del carico.

Troncamento della corrente virtuale (virtual current chopping)

Bisogna considerare che il quadro di controllo, dove è locato il sezionatore in vuoto, spesso si trova a considerevoli distanze. Le induttanze e le capacità presenti nel sistema risultano essere molto grandi in quanto sono proporzionalmente influenzate dalla lunga lunghezza dei cavi di collegamento. In particolare nello studio di questo fenomeno ha rilevanza considerare le capacità verso terra delle fasi. Può accadere che vi sia una circolazione di corrente in una fase dovuta ad una riaccensione (per esempio consideriamo ia sulla fase A). Questo fenomeno provoca, attraverso le capacità parassite verso terra lato carico, una circolazione di corrente ad alta frequenza nelle altre due fasi (fase B e C) pari a metà del valore di ia. $i_b = i_c = i_a/2$.

Considerando il sistema trifase e simmetrico, le due correnti ia e ib ritornano nella fase A sfruttando le capacità verso terra lato sorgente. Le correnti nelle fasi B e C, sono tra loro identiche (stessa polarità e ampiezza), ma sono di polarità inversa rispetto alla corrente nella fase A. Nel caso in analisi, l'interruttore a vuoto è in grado interrompere repentinamente le correnti forzandole a zero andando quindi ad operare un "troncamento virtuale della corrente". A causa delle polarità inverse delle correnti, esse si avvicinano allo zero in modo opposto. Pertanto vi sono delle forti sovratensioni indotte nelle fasi considerate a terra da considerare nel transitorio durante la manovra.

Riaccensioni multiple

Può accadere che a seguito di una prima apertura dell'interruttore (a corrente zero) la distanza fra i contatti non sia sufficientemente grande per garantire la separazione galvanica nel circuito. In queste occasioni dopo un primo tentativo di separazione dei contatti avviene una riaccensione spontanea. Possono manifestarsi diverse riaccensioni in breve tempo (massimo 10 volte) fino a quando la distanza tra i contatti non risulta essere grande in modo da vincere il valore di ripristino spontaneo (transient recovery voltage). La conseguenza è la scarica delle capacità di rete sull'induttanza da entrambi i lati dell'interruttore. Si viene a creare quindi una corrente oscillante ad alta frequenza (in genere 100-200 kHz) con valore di picco crescente ad ogni successiva riaccensione. Il fenomeno di riaccensione multipla avviene durante l'apertura dei contatti. Seppur in modo meno significativo ed importante anche in fase di chiusura vi si presenta una situazione analoga (ripetitive pre-ignition).

Come appena descritto il valore effettivo del picco della sovratensione complessiva è stimabile dalla somma di molteplici parametri quali: lunghezza del cavo di collegamento, il numero di riaccensioni, il tipo di circuito e l'impedenza

di cortocircuito della sorgente a monte sul terminale dell'interruttore. Le riaccensioni e quindi le sovratensioni transitorie impulsive che vengono a generarsi avvengono con una frequenza dell'ordine di alcuni micro-secondi. L'avvolgimento del motore MT risulta quindi soggetto a forti sollecitazioni con la possibilità di portare al cedimento l'isolante spira-spira. Il guasto appare come un foro passante tra i vari avvolgimenti di rame della bobina ormai fusi.

Visto quanto detto, per garantire il funzionamento ininterrotto (servizio continuo) del motore, e quindi l'affidabilità del sistema in generale, è doveroso mantenere intatto l'isolamento spira-spira dei motori industriali e quindi testare la tenuta dello stesso (interturn test).

1.1 Costruzione e caratteristiche dell' avvolgimento

La fabbricazione degli avvolgimenti è realizzata in modo diverso in base alla potenza e tensione nominale della macchina.

Bassa tensione

Per motori di bassa tensione e quindi di piccola taglia, l'avvolgimento è realizzato mediante l'uso di filo smaltato. Tra singole matasse vengono interposti vari strati di carta isolante (almeno due). Successivamente, vengono collegate fra loro le singole matasse o in serie o in parallelo per formare interi avvolgimenti di fase del motore. La parte iniziale e finale della matassa (definite "testate") vengono legate anche con un filo di nylon, in modo da risultare più compatte. Vengono inoltre avvolte con un nastro isolante.

Infine il tutto viene trattato o con resina epossidica o viene impregnato con vernice isolante sintetica. Quanto detto viene fatto per preservare l'intera struttura dall'umidità e da fattori esterni come l'inquinamento.

Al fine di incrementare lo spessore del materiale isolante che ricopre l'avvolgimento, possono verificarsi più processi di verniciatura o più cicli di cottura in forno. Questo dipende soprattutto dall'affidabilità richiesta al motore.

Sempre restando in bassa tensione ma considerando potenze superiori, vengono utilizzate le "matasse pre-formate". Il conduttore smaltato viene avvolto secondo il numero di spire stabilito ed in seguito viene eseguita la sagomatura delle testate in modo da aggiustare l'apertura della matassa. È preferibile costruire un avvolgimento embricato al fine di avere le matasse uguali su tutto l'avvolgimento. Successivamente l'avvolgimento viene ricoperto di nastro in fibra di vetro o mica. Oltre alla cottura in forno, utilizzata per rimuovere le impurità e l'umidità, viene eseguita o l'impregnazione con vernice isolante o l'impregnazione sottovuoto (VPI). Quest'ultima viene eseguita solo se si vuole realizzare una macchina di qualità superiore. Per essere eseguita necessita di particolari attrezzature specifiche. Tutto ciò risulta notevolmente vantaggioso in fase di

manutenzione o sostituzione in quadro sarà semplicemente necessario rimuovere la singola matassa danneggiata con una nuova.

Media tensione

Per potenze molto elevate, oltre qualche centinaio di kW è necessario alimentare in media tensione l'avvolgimento del motore. La costruzione dell'avvolgimento in media tensione si può realizzare in due modi differenti:

Il primo metodo è molto simile a quello visto per l'avvolgimento a matasse preformate in bassa tensione. Quindi tutte le matasse dopo essere state formate, vengono impregnate con la resina epossidica e testate singolarmente. La matassa così realizzata (impregnata in resina) risulta essere dura e fragile pertanto bisogna prestare attenzione nella sua collocazione.

Il secondo metodo invece risulta favorito in quanto prevede prima la disposizione delle matasse nella propria sede e poi l'impregnazione sottovuoto (VPI). Successivamente il tutto viene immerso in un bagno di resina. Quest'ultimo passaggio tuttavia rende difficile la sostituzione di una singola matassa perché ricoperta di resina. Si è riscontrato che le macchine realizzate con impregnazione sottovuoto siano meno soggette a guasti rispetto alle macchine realizzate con il primo metodo.

Sia nella Figura 1.1.1 A e sia nella Figura 1.1.1 B viene rappresentato l'avvolgimento visto in sezione.

Nella prima immagine è possibile vedere come vi siano tre tipi di isolamento diversi all'interno dell'avvolgimento:

- L'isolamento tra spire (turn insulation),
- L'isolamento tra conduttori (stand insulation),
- L'isolamento verso terra (ground insulation).

Nella seconda figura invece si rilevano alcuni dettagli caratteristici aggiuntivi come:

- Il separatore verticale (vertical separator) di tela di vetro preimpregnata con resina epossidica. Solitamente viene posto tra le colonne di piattine.
- I vuoti di trasposizione (transposition filler), sulla parte superiore ed inferiore della barra. Normalmente questi vuoti sono riempiti di carta isolante o di strisce di mastice micato.

In seguito verranno analizzate le principali normative in vigore per verificare la tenuta dell'isolamento tra spire.

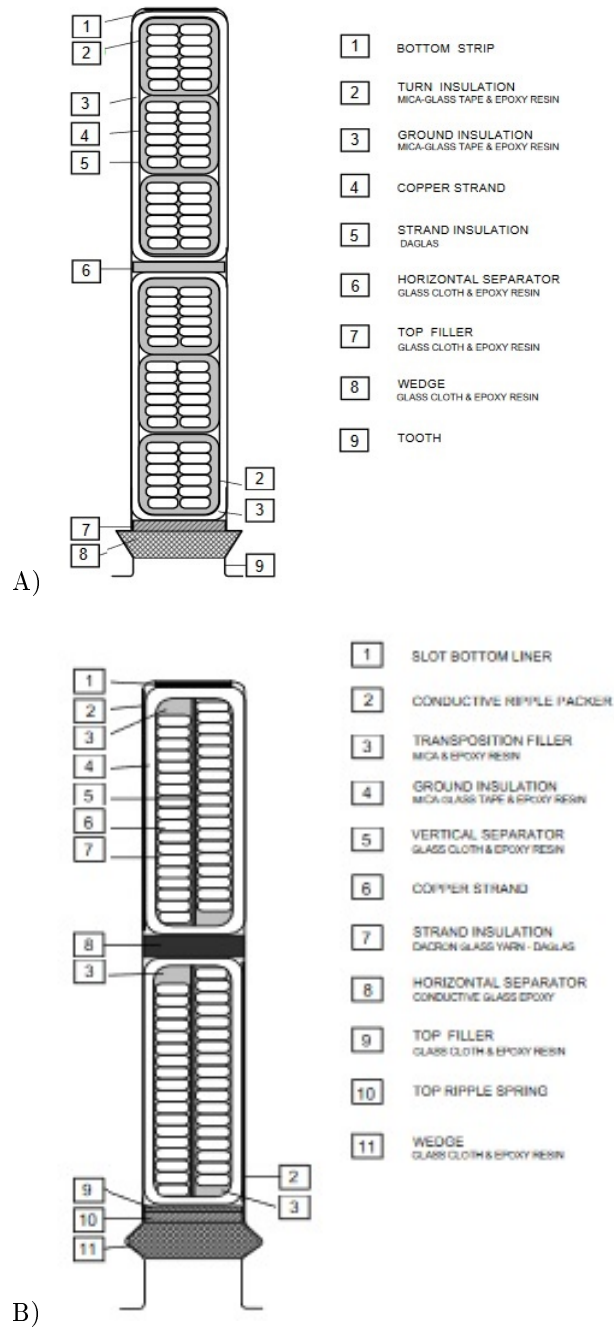


Figura 1.1.1: Struttura interna di un avvolgimento in media tensione

Capitolo 2

Studio teorico delle normative

2.1 Richiami teorici normativa IEC 60071-1

La prima parte della normativa IEC 60071 prende come riferimento sistemi elettrici trifasi dove le tensioni massime presenti sulle apparecchiature sono superiori ad 1kV. La normativa espone la procedura per la selezione delle tensioni nominali di tenuta per l'isolamento fase-terra, fase-fase e longitudinale delle apparecchiature. Fornisce inoltre gli elenchi delle tensioni di tenuta standard da cui selezionare la tensione di tenuta nominale da applicare a seconda della tipologia di test richiesto.

A seconda di cosa si vuole analizzare, le tensioni e le sovratensioni che sollecitano l'isolamento devono essere determinate in ampiezza, forma e durata.

Nella Figura 2.1.1 vengono sinteticamente esposte tutte le forme d'onda (voltage or over-voltage shapes) a cui la macchina solitamente potrebbe essere esposta.

Ad ognuna di queste forme d'onda la normativa associa una curva normalizzata (standard voltage shapes) da considerare in sede di collaudo per testare l'isolamento.

Poichè gli impulsi che ci proponiamo di realizzare, al fine di testare l'isolamento tra spire dell'avvolgimento, presentano un fronte d'onda veloce, l'impulso standard più vicino a quelle caratteristiche è il «lightning impulse voltage».

Quindi anche se le norme non definiscono una curva normalizzata (e quindi un sistema di misura) per tensioni impulsive così veloci, prenderemo comunque come riferimento la normativa 60060-1.

Class	Low frequency		Transient		
	Continuous	Temporary	Slow-front	Fast-front	Very-fast-front
Voltage or over-voltage shapes					
Range of voltage or over-voltage shapes	$f = 50 \text{ Hz}$ or 60 Hz $T_t \geq 3 \text{ 600s}$	$10 \text{ Hz} < f < 500 \text{ Hz}$ $0,02 \text{ s} \leq T_t \leq 3 \text{ 600 s}$	$20 \mu\text{s} < T_p \leq 5 \text{ 000 } \mu\text{s}$ $T_2 \leq 20 \text{ ms}$	$0,1 \mu\text{s} < T_1 \leq 20 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 300 \mu\text{s}$	$T_f \leq 100 \text{ ns}$ $0,3 \text{ MHz} < f_1 < 100 \text{ MHz}$ $30 \text{ kHz} < f_2 < 300 \text{ kHz}$
Standard voltage shapes	 $f = 50 \text{ Hz}$ or 60 Hz T_t^a	 $48 \text{ Hz} \leq f \leq 62 \text{ Hz}$ $T_t = 60 \text{ s}$	 $T_p = 250 \mu\text{s}$ $T_2 = 2 \text{ 500 } \mu\text{s}$	 $T_1 = 1,2 \mu\text{s}$ $T_2 = 50 \mu\text{s}$	a
Standard withstand voltage test	a	Short-duration power frequency test	Switching impulse test	Lightning impulse test	a

^a To be specified by the relevant apparatus committees.

Figura 2.1.1: Classi e forme di sovratensione standard

La Figura 2.1.2 invece mostra lo schema elettrico equivalente di un avvolgimento, utile per schematizzare la ripartizione della tensione tra i vari tipi di isolanti presenti al suo interno.

In particolare l'isolamento verso terra viene rappresentato dalla capacit  C_t mentre l'isolamento tra spire   rappresentato dalla capacit  C_s . Le induttanze L_s invece rappresentano le singole spire.

Un circuito di questo tipo poich  presenta parametri passivi di tipo induttivo e capacitivo possiede una propria frequenza di risonanza.

Quando viene applicata una tensione impulsiva sulle testate della matassa, risulta evidente come la distribuzione della stessa non sia uniforme su tutto l'avvolgimento. Questo avviene proprio per la presenza della capacit  poste in parallelo all'induttanza. Le testate dell'avvolgimento sono chiamate a sopportare una tensione pi  elevata rispetto alle altre.

Per tensioni impulsive con fronte di salita dolce, le capacit  non influiscono di molto e il circuito pu  essere semplificato ulteriormente andando a considerare una unica induttanza equivalente senza la presenza delle capacit  C_s .

Viceversa se la forma d'onda presenta un fronte di salita molto veloce la distribuzione della tensione applicata deve avvenire considerando anche le ca-

pacità in gioco.

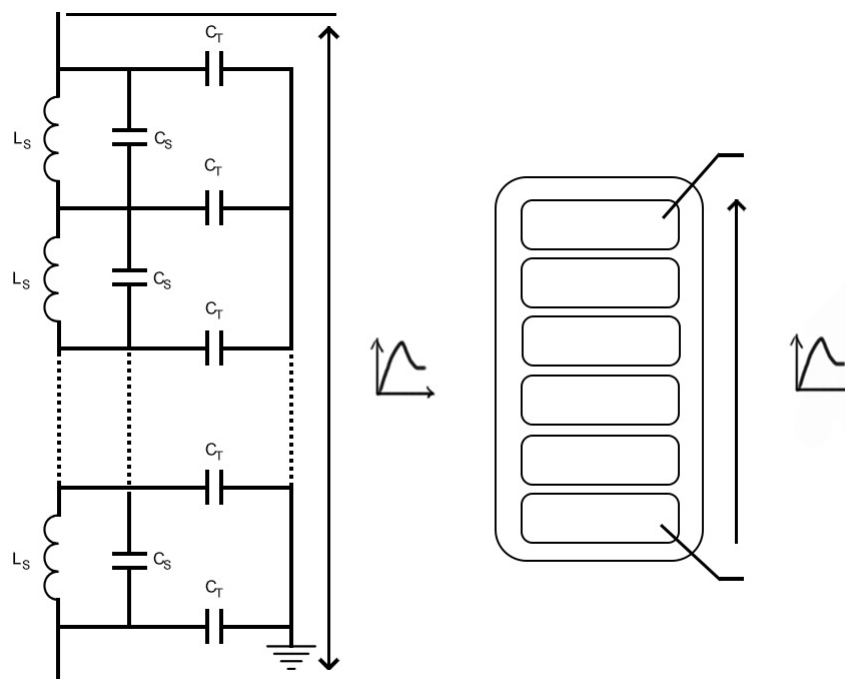


Figura 2.1.2: Sezione avvolgimento e schema elettrico equivalente

2.2 Richiami teorici della normativa IEC 60060-1

La normativa IEC 60060-1 descrive in modo accurato quelle che sono le curve impulsive, caratterizzandone alcuni parametri.

Le curve impulsive si presentano come l'unione di due esponenziali: il primo con pendenza positiva caratterizza il “fronte della curva”, il secondo con pendenza negativa caratterizza la “coda della curva”. Fondamentali per la caratterizzazione di tali curve risultano essere due specifici intervalli di tempo che prendono il nome di:

- Tempo di fronte T1: definito come 1.67 volte l'intervallo di tempo tra A (30% del valore di cresta) e B (90 % del valore di cresta).
- Tempo all'emivalore T2: definito come l'intervallo di tempo che intercorre tra l'origine dell'onda e quel valore (sulla coda) pari al 50% del valore di cresta.

Se consideriamo l'impulso denominato «switching», anzichè considerare il tempo di fronte si prende come riferimento il tempo alla cresta. Ovvero l'intervallo di tempo che intercorre tra l'origine e il massimo della curva.

2.2.1 Classificazione degli impulsi di tensione

La classificazione delle curve impulsive viene fatta valutando le costanti di tempo sopra descritte. Gli impulsi di fulminazioni (lightning impulse voltages) hanno un tempo di salita inferiore ai 20 μs mentre gli impulsi di manovra (switching impulse voltages) superiore ai 20 μs .

Valori normalizzati per gli impulsi di fulminazione:

tempo di fronte (T1) 1,2 μs ,
tempo all'emivalore (T2) 50 μs .

Valori normalizzati per gli impulsi di manovra::

tempo alla cresta 250 μs ,
tempo all'emivalore (T2) 2500 μs .

Anche le tolleranze e le incertezze richieste dalle normative variano a seconda del tipo di impulso come riportato nelle seguenti tabelle.

	TOLLERANZA	INCERTEZZA
Valore di cresta Up	3%	3%
Tempo di fronte T1	30%	10%
Tempo all'emivalore T2	20%	10%

Tabella 2.2.1: Valori percentuali di tolleranze ed incertezze per impulsi di fulminazione

	TOLLERANZA	INCERTEZZA
Valore di cresta Up	3%	3%
Tempo alla cresta	20%	10%
Tempo all'emivalore T2	60%	10%

Tabella 2.2.2: Valori percentuali di tolleranza ed incertezza per impulsi di manovra

Le normative prevedono stringenti accorgimenti soprattutto per quanto concerne la tolleranza e la incertezza sul valore di cresta che devono essere molto piccole (3%).

Le tensioni impulsive a fronte molto ripido (very fast front impulse voltages) invece posso venire a crearsi a seguito dell'improvviso intervento di sezionatori e commutatori presenti all'interno di blindati denominati GIS (Gas-insulated

switchgear) isolati in SF6, o da forti interruzioni della tensione della linea, o dal cedimento dell'isolamento delle linee aeree o dal funzionamento di un parafulmine. I valori normalizzati per un impulso di questo tipo prevedono un fronte d'onda dai 10 ns fino a valori dell'ordine dei 100ns. Non esiste uno standard definito per le tensioni di prova da utilizzare ma viene utilizzato un circuito simile a quelli per impulsi di fulminazione con alcune accortezze e aggiunte. Anche se fortunatamente si manifestano molto raramente esistono tensioni impulsive con fronte d'onda ben più piccolo di 10ns. In questo caso si parla Nuclear Electromagnetic Pulse (NEMP) e sono onde previste in caso di esplosione nucleare. Queste curve impulsive molto elevate e veloci vengono raramente utilizzate nei test di tenuta.

2.2.2 Andamento della curva impulsiva

Al fine di simulare le principali sollecitazioni che vengono a manifestarsi nelle varie apparecchiature elettriche si usano tensioni impulsive di fulminazione. Tali tensioni risultano essere idonee a simulare sia le scariche atmosferiche sia i transitori che come abbiamo visto si manifestano durante le manovre degli interruttori preposti al comando.

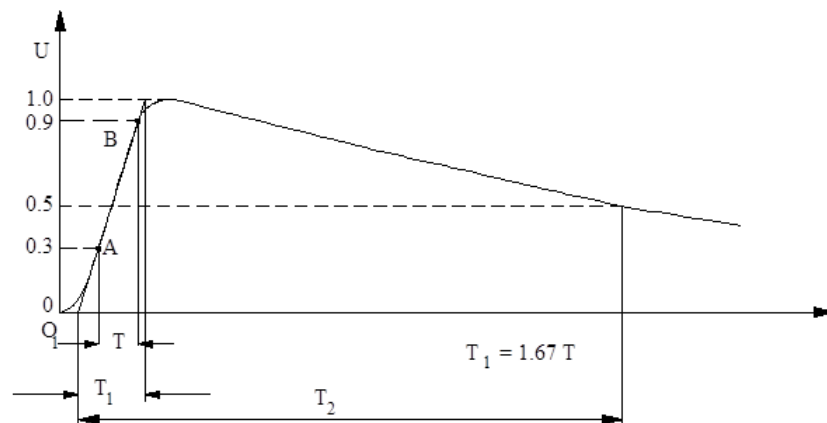


Figura 2.2.1: Curva impulsiva

Sostanzialmente la curva, dal punto di vista matematico, può essere rappresentata dalla seguente espressione:

$$v(t) = KU_p \left(e^{-\frac{t}{\tau_c}} - e^{-\frac{t}{\tau_f}} \right) \quad (2.2.1)$$

Dove i valori di τ_f e τ_c rappresentano le costanti di tempo rispettivamente del fronte e della coda.

Si parla invece di «onda tronca» se il fronte o la coda curva viene tagliata. I motivi che ne determinano un tale andamento sono due: l'onda o viene scaricata

a terra per mezzo di particolari dispositivi (detti scaricatori) oppure è presente un cedimento dell'isolante tale da comprometterne il corretto andamento.

2.3 Richiami teorici dalla normative IEC 60034-15

Come detto in precedenza la normativa CEI 60071-1 specifica i requisiti generali delle curve impulsive da realizzare per testare i vari tipi di isolamento nelle apparecchiature e sistemi trifasi.

Lo scopo della normativa 60034-15 invece è di specificare tali requisiti per le macchine elettriche rotanti.

Quando si manifesta una tensione impulsiva tra un terminale della macchina e la terra, la fase corrispondente non può istantaneamente adottare lo stesso potenziale in tutti i punti. Nell'avvolgimento si verificano due tipi di tensioni: la tensione tra il conduttore e la terra (tensione trasversale) e la tensione lungo il conduttore (tensione longitudinale).

Mentre la tensione trasversale sollecita l'isolamento della parete principale, la tensione longitudinale sollecita l'isolamento spira-spira.

La normativa in esame viene utilizzata per eseguire l'interturn test su singoli avvolgimenti al fine di verificare la tenuta dell'isolamento tra spire. Si può affermare che il valore massimo della tensione impulsiva applicata alla bobina campione durante la prova è uguale al valore di picco della tensione impulsiva che si avrebbe sull'avvolgimento completo nel normale funzionamento del motore.

2.3.1 Main insulation test con curva di fulminazione standard 1,2/50 μ s

Il circuito di prova viene dimensionato al fine di poter generare una curva simile a quella di fulminazione normalizzata vista in precedenza con riferimento ai valori di tolleranza imposti dalla norma CEI 60060-1. Vengono generati e scaricati sull'avvolgimento almeno 5 impulsi (polarità positiva) tra i conduttori (collegati in parallelo) e la massa. La prova può dirsi superata se l'isolamento verso terra non subisce cedimento.

Nella tabella sottostante si riportano i parametri caratteristici richiesti dalla normativa:

Tempo di fronte	$T1 = 1,2\mu s$	$\pm 30\%$
Tempo all'emivalore	$T2 = 50\mu s$	$\pm 20\%$
Tensione di picco	$U_p = 4U_n + 5kV$	$\pm 3\%$

2.3.2 Interturn insulation test con curva a fronte ripido

In questo caso la curva che bisogna realizzare risulta avere un tempo di salita molto inferiore. Per generare tale curva impulsiva si frutta la scarica di un condensatore.

Anche in questo caso la prova si dichiara superata se l'avvolgimento resiste a 5 impulsi di fulminazione con polarità positiva.

Nella tabella sottostante si riportano i parametri caratteristici richiesti dalla normativa:

Tempo di fronte fino a 35kV	$T1 = 0,2\mu s \quad \pm 0,1 \mu s$
oltre 35kV	$T1 = 0,2\mu s \quad + 0,3 \mu s / - 0,1 \mu s$
Tempo all'emivalore	$T2 = 50\mu s \quad \pm 20\%$
Tensione di picco	$U_p' = 0.65 U_p \quad \pm 3\%$

La seguente tabella estratta dalla normativa EN 60030-15 riporta alcuni valori di tensione di picco comunemente utilizzati per effettuare le prove appena descritte

Valore di tensione nominale	Valore di picco per curva impulsiva standard 1,2/50 μs	Valore di picco per curva impulsiva a fronte ripido
U_N	U_P	U_P'
kV	kV	kV
2,3	14	9
3	17	11
3,3	18	12
4	21	14
6	29	19
6,6	31	20
10	45	29
11	49	32
13,2	58	38
13,8	60	39
15	65	42

Tabella 2.3.1: Livelli di tensione per le prove interturn

2.4 Richiami teorici normativa IEEE 522

Mentre la norma IEC 60034-15 descrive la prova interturn su bobine campione intiere separate dallo statore e testate singolarmente, la norma IEEE 522 analizza anche le prove sugli avvolgimenti nelle diverse fasi della costruzione della macchina e le prove sulle macchina completa. In particolare è possibile applicare il test:

- a) Ai singoli avvolgimenti prima della loro introduzione nello statore.
- b) Agli avvolgimenti dopo la loro collocazione nello statore, ma prima di applicare i collegamenti.
- c) Agli avvolgimenti prima di isolarli e disporli in gruppi.
- d) All'intero sistema ottenuto con gli avvolgimenti collegati ed isolati corretta-

mente.

Questo test può essere eseguito: negli avvolgimenti di nuova fabbricazione, negli avvolgimenti di macchinari usati e negli avvolgimenti di macchine in servizio per determinarne l'idoneità per futuri impieghi (test di manutenzione preventiva).

2.4.1 Curva standard 3.5 p.u

Per testare l'isolamento tra spire si suggerisce di utilizzare gli impulsi con un tempo di fronte compreso tra 0,1 a 0,2 μs . I test eseguiti con tempi di salita più lunghi ($> 1,2\mu\text{s}$) tendono a sollecitare l'isolamento verso terra. In generale, le bobine devono avere un isolamento tra spire e verso terra tale da resistere ad una sollecitazione elettrica riportata nella Figura 2.4.1. Anche in questo caso il numero di impulsi che l'avvolgimento deve sostenere senza cedere è pari a cinque.

La Figura 2.4.1 riporta quindi l'involuppo di una curva impulsiva: viene determinato il valore di picco della tensione impulsiva in funzione del tempo di fronte desiderato.

Considerando la tensione nominale della macchina V_L e definita la tensione $V_1 = \sqrt{\frac{2}{3}}V_L$, se si vogliono realizzare impulsi con fronte compresi tra 0,1 e 0,2 μs si può utilizzare una tensione di picco pari a $V_2 = 3.5V_1 = 2.86V_L$. Mentre se il tempo di fronte desiderato è più lungo (superiore a 1,2 μs), verrà considerata una tensione di picco pari a $V_3 = 5V_1$.

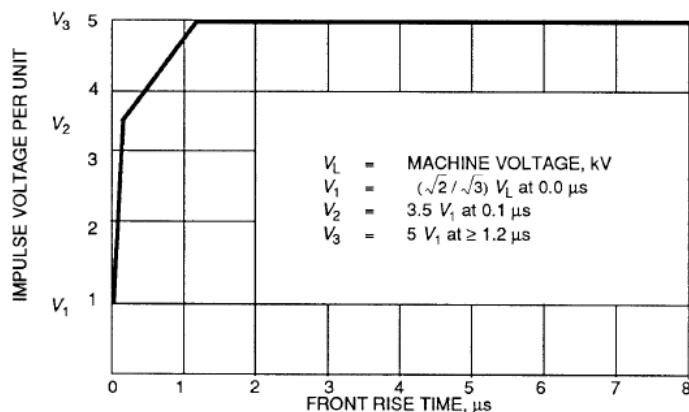


Figura 2.4.1: Involppo impulso elettrico per interturn test

Se vi è accordo tra costruttore e utente è possibile considerare una curva impulsiva con fronte d'onda molto più lungo (maggiore di 5 μs). In tal caso la tensione richiesta è pari a $V_3 = 1.25\sqrt{2}(2V_1 + 1)$.

2.4.2 Livelli di tensione ridotti

Rispetto a quanto appena detto, la normativa IEEE 522 prevede di utilizzare livelli di tensione ridotti nei seguenti casi:

1. Per evitare di sollecitare eccessivamente le bobine non impregnate (legate a secco), la tensione di prova può essere ridotta ad una frazione tra il 60 e l'80% del valore specificato.

2. Per evitare di sovraccaricare le bobine in resina, la tensione di prova può essere ridotta ad una frazione tra il 40 e il 60% del valore specificato.

Generalmente per le prove condotte sul campo si effettua una riduzione di circa il 75% (clausola 6 della norma IEEE 522). È buona norma ottenere l'approvazione dal produttore delle bobine prima di qualsiasi programma di prova.

Nella Figura 2.4.2 vengono riportati per un confronto alcuni valori di picco della tensione impulsiva per eseguire l'interturn test a seconda della tipologia di avvolgimento presente e della normativa considerata.

Nella Figura 2.4.3 invece è riportato l'andamento del valore di picco in funzione della tensione nominale della macchina.

Sia dalla tabella che dal grafico si può notare che la normativa IEC 60034-15 (curva verde) e la normativa IEEE 522 (curva blu) presentano valori di picco differenti per bobine al di sotto di una tensione nominale di 6kV. Mentre per tensioni nominali superiori, compresi tra 6 e 14kV, i valori sono molto simili.

Surge Test Voltages (V) for New Form Coils										
RMS Line to Line Voltage	460	575	1,000	2,300	3,300	4,160	6,600	11,000	12,000	13,800
IEEE 522-2004, New fully cured coils: $V = 2.86 \cdot E$	1,315	1,643	2,858	6,573	9,431	11,888	18,861	31,435	34,293	39,437
IEEE 522, Unimpregnated coils: 60-80%, 70% used here	920	1,150	2,000	4,601	6,601	8,322	13,203	22,005	24,005	27,606
IEEE 522, Uncured resin rich coils: 40-60%, 50% used here	657	822	1,429	3,286	4,715	5,944	9,431	15,718	17,146	19,718
IEC 60034-15-2009 New sample coils not installed in stator: $V = 0.65(4E+5000)$	4,446	4,745	5,850	9,230	11,830	14,066	20,410	31,850	34,450	39,130
IEC 60034-15 New coils installed in stator, before processing/connections: 40-80%, 60% used here	2,668	2,847	3,510	5,538	7,098	8,440	12,246	19,110	20,670	23,478

Figura 2.4.2: Valori per la tensione di picco - Norme a confronto

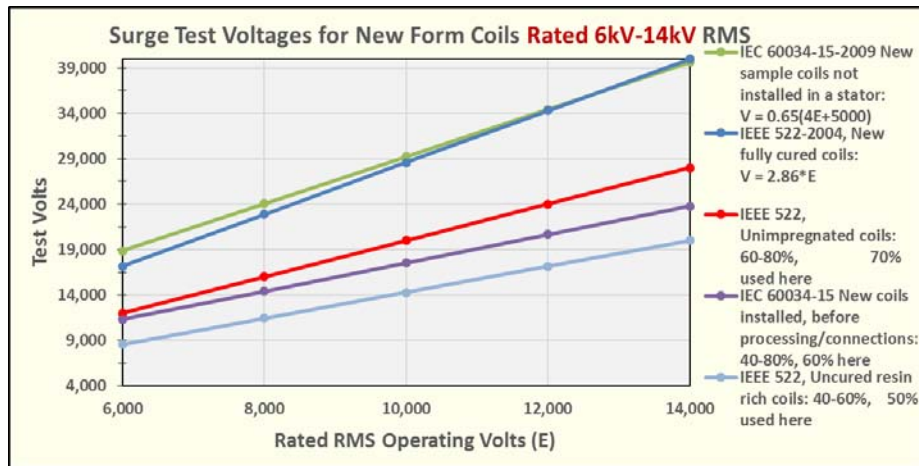


Figura 2.4.3: Valori per la tensione di picco - Norme a confronto

2.5 Richiami teorici dalla normativa IEC 60060-2

La normativa EN 60060-2 a differenza di quelle analizzate finora, principalmente incentrate nel descrivere teoricamente le curve e le prove sull'avvolgimento, ci fornisce tutte le indicazioni sulla tipologia dei sistemi di misura da utilizzare. La normativa infatti analizza i requisiti che devono avere i sistemi di misura, dando spazio alla descrizione dei circuiti per effettuare test impulsivi, andando ad analizzare tutte le apparecchiature coinvolte nel sistema di misura.

2.5.1 Generatore di impulsi

Circuito semplificato

Per realizzare un'onda del tipo di Figura 2.1.1 avente una funzione matematica "a doppio esponenziale" (2.1.1) è necessario utilizzare lo schema di Marx semplificato rappresentato nella seguente figura.

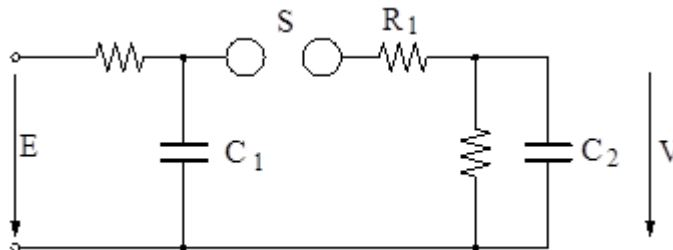


Figura 2.5.1: Schema di Marx semplificato

Qualora si voglia generare un unico impulso di prova, è possibile affidarsi all'uso o di interruttori elettromeccanici o di spinterometri. Questo dipende dall'entità dell'impulso che si vuole generare.

Generalmente gli spinterometri riescono a realizzare una scarica in breve tempo con basse dispersioni.

Lo schema di schema di Figura 2.5.1 è possibile generare quindi un impulso sfruttando lo spinterometro S che viene innescato per mezzo di un impulso manuale.

Simultaneamente il condensatore C1, precedentemente caricato alla tensione E, si scarica sul condensatore C2.

La costante di tempo di tale scarica è:

$$\tau_f = R_1 \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \quad (2.5.1)$$

Successivamente i due condensatori, che si trovano caricati in parallelo, si scaricano con una costante di tempo pari a:

$$\tau_c = R_2(C_1 + C_2) \quad (2.5.2)$$

Note quindi le due costanti di tempo è possibile quindi conoscere l'andamento della curva impulsiva che si vuole generare:

$$v(t) = KU_p \left(e^{-\frac{t}{\tau_c}} - e^{-\frac{t}{\tau_f}} \right) \quad (2.5.3)$$

Quanto detto è applicabile solo in forma teorica in quanto anticipare e descrivere in modo rigoroso la curva impulsiva non è semplice. Bisogna sempre considerare la presenza di elementi parassiti come le induttanze e le capacità distribuite lungo il circuito o la presenza di campi elettromagnetici nelle vicinanze del circuito che spesso non sono noti.

In linea generale un generatore di questo tipo viene classificato in due modi:

- In base alla sua energia immagazzinata W:

$$W = \frac{1}{2}CE^2 \quad (2.5.4)$$

- In base al suo rendimento η , considerando che la tensione massima in uscita è minore di quella iniziale di carica del condensatore:

$$\eta = \frac{C_1}{C_1 + C_2} \quad (2.5.5)$$

Nel calcolo del rendimento però vanno considerati sia la resistenza che della capacità in gioco.

Circuito a N stadi

Nella realtà, per produrre impulsi con picco più elevato vengono utilizzati generatori di Marx con N stadi come quelli in Figura 2.5.2

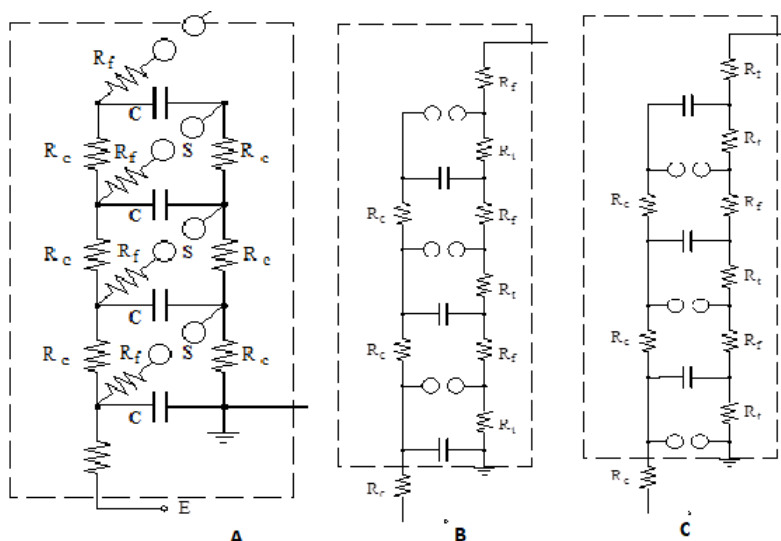


Figura 2.5.2: Esempi di generatori con N stadi

Attraverso le resistenze R_c , i condensatori C sono caricati simultaneamente tutti in parallelo dalla sorgente E.

Quando vengono attivati ed innescati gli spinterometri S, i condensatori C vengono disposti in serie andando a costituire un condensatore unico $C_1 = C/N$ (caricato alla tensione NE).

Solitamente viene comandato solo uno spinterometro, i successivi spinterometri vengono auto innescati dal circuito (che per sua caratteristica ne facilita l'attivazione).

Ai capi di ogni spinterometro viene a generarsi una sovratensione indotta dalla scarica dello spinterometro precedente.

La forma d'onda, per quando detto ed entro certi limiti, è prevedibile grazie alla conoscenza dei parametri del circuito. Tuttavia essa deve essere verificata e deve rientrare nelle tolleranze ed incertezze richieste.

Gli N stadi possono avere differenti costanti di tempo di carica (in quanto la resistenza di carica che vedono è diversa).

Bisogna quindi, prima di effettuare la prova, aspettare un tempo sufficientemente lungo affinché la totalità dei condensatori siano carichi (alla stessa tensione).

2.5.2 Divisore di tensione

Il divisore di tensione è un tipo di trasduttore. Ovvero è un dispositivo che consente di misurare le tensioni di prova utilizzate adattandone i livelli affinché esse possano essere adeguatamente misurate dagli strumenti di rivelazione (oscilloscopi o registratori).

Possono essere utilizzate diverse tipologie di divisori di tensione, l'importante è che non siano influenzati da circolazioni di correnti presenti nell'oggetto di prova.

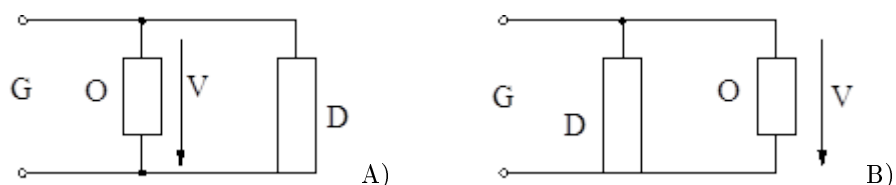


Figura 2.5.3: A) Configurazione corretta. B) Configurazione non corretta

Tra le due configurazioni di Figura 2.5.3. viene pertanto preferita la configurazione A in quanto l'oggetto di prova O viene disposto dalla parte opposta del generatore G. Il divisore di tensione D (che si trova in mezzo) risulta essere in parallelo con l'oggetto di prova.

Divisore resistivo puro

Il divisore di tensione resistivo puro è semplicemente un partitore di tensione caratterizzato da due resistenze disposte in serie. Generalmente è utilizzato per la misura di grandezze continue. Qualora si volessero rilevare grandezze non continue è necessario tenere conto delle capacità parassite verso terra C_e .

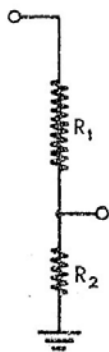


Figura 2.5.4: Divisore resistivo puro

Considerando una tensione di ingresso $V_i(t)$ e una tensione di uscita pari a $V_o(t)$, il divisore resistivo è caratterizzato da un fattore di scala (o fattore di riduzione) pari a K .

$$V_o(t) = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_i(t) \quad (2.5.6)$$

$$K = \frac{V_o(t)}{V_i(t)} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (2.5.7)$$

Le relazioni (2.5.6) e (2.5.7) valgono soprattutto se i segnali generati sono grandezze periodiche a bassa frequenza o grandezze continue. Quando la grandezza di ingresso è rapidamente variabile entrano in gioco diversi fattori come le capacità parassite e le induttanze circuitali. Tuttavia anche in questo caso le due formule danno una buona approssimazione del fattore di scala.

Divisore resistivo compensato

Si tratta sempre di un divisore di tipo resistivo dotato di uno schermo o di un dispositivo di compensazione. Per questo motivo, molto spesso, sono presenti strutture metalliche con lo scopo di schermare il dispositivo dai campi elettromagnetici.

Grazie a queste accortezze è possibile ridurre l'effetto dei termini capacitivi fino ad un 40%.

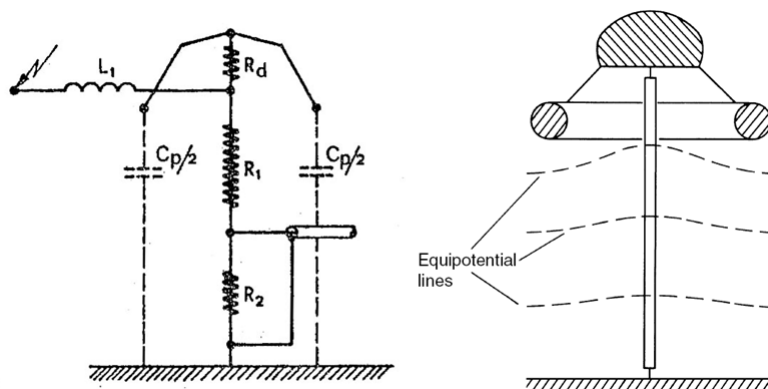


Figura 2.5.5: Divisore resistivo compensato dotato di schermo e resistenza di smorzamento R_d

Per tali motivi i divisori resistivi schermati (o compensati) risultano più idonei per misurare transistori molto rapidi come gli impulsi di fulminazione. Risulta necessario inoltre introdurre una resistenza di smorzamento R_d come in Figura 2.3.5. Questo viene fatto al fine di rendere meno oscillante la risposta del sistema al gradino.

Divisore capacitivo serie

Quanto visto per il divisore resistivo serie è applicabile anche per il divisore capacitivo andando a inserire in serie due condensatori.

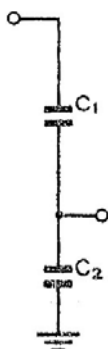


Figura 2.5.6: Divisore capacitivo serie

Un divisore capacitivo ideale è in grado di misurare le onde impulsive, garantendo un errore costante sull'ampiezza.

Poichè è idoneo a misurare anche impulsi di grande intensità il condensatore lato alta tensione C_2 deve essere molto ben progettato. Su C_2 ricade infatti quasi la totalità della tensione di ingresso: quindi deve essere in grado di gestire tensioni molto elevate.

Nel caso di divisore capacitivo il fattore la funzione che descrive la tensione d'uscita $V_o(t)$:

$$V_o(t) = \frac{C}{C_1 + C_2} V_i(t) \quad (2.5.8)$$

Mentre il fattore di scala K diventa:

$$K = \frac{V_o(t)}{V_i(t)} = \frac{C_2}{C_1 + C_2} \quad (2.5.9)$$

Divisore di tensione RC

Ricadono in questa tipologia tutti i divisori che presentano al loro interno sia componenti resistivi che componenti capacitivi.

In figura 2.5.7 vengono riportate le due configurazioni più diffuse:

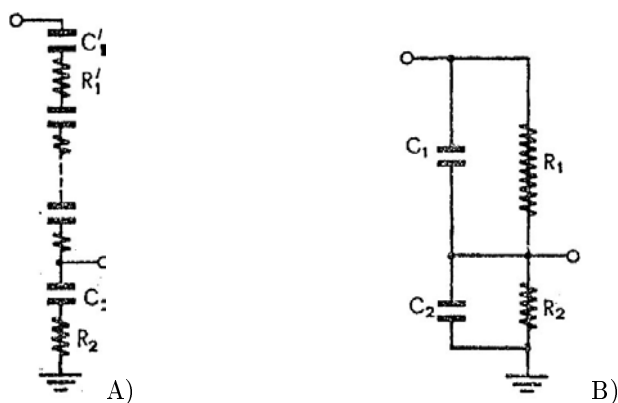


Figura 2.5.7: A) Divisore RC serie. B) Divisore RC parallelo

La configurazione A) riporta un divisore RC serie mentre la figura B) riporta un divisore RC in configurazione parallelo.

Entrambe le configurazioni sono idonee per misurare tensioni impulsive di valore elevato e le loro funzionalità sono riportate nella seguente tabella:

	Divisore di tensione RC serie	Divisore di tensione RC parallelo
Per $t \rightarrow 0$		
Equazione	$V_o(0) = \frac{R_2}{R_1+R_2} V_i$	$V_o(0) = \frac{C_1}{C_1+C_2} V_i$
Fattore di scala	$K_0 = \frac{R_2}{R_1+R_2}$	$K_0 = \frac{C_1}{C_1+C_2}$
Per $t \rightarrow \infty$		
Equazione	$V_o(\infty) = \frac{C_1}{C_1+C_2} V_i$	$V_o(\infty) = \frac{R_2}{R_1+R_2} V_i$
Fattore di scala	$K_\infty = \frac{C_1}{C_1+C_2}$	$K_\infty = \frac{R_2}{R_1+R_2}$

Tabella 2.5.1: Comportamento divisori di tensioni RC

Come si vede dalla precedente tabella i due divisori RC si comportano in modo differente esaltando i loro parametri capacitivi o resistivi a seconda della configurazione e al variare del tempo.

Il divisore RC serie è principalmente utilizzato per misurare tensioni impulsive anche di forte entità con valore di cresta elevato anche di onde tronche. Quindi si presenta idoneo a misurare sia impulsi di fulminazione che di manovra.

Il divisore RC parallelo invece non fornisce garanzia sulla misurazione delle onde impulsive tronche ma grazie alle capacità disposte in serie garantisce protezione contro i campi elettromagnetici esterni.

Nel caso ideale, per entrambe le configurazioni si può affermare che la costante di tempo del ramo in AT sia uguale alla costante di tempo BT.

Ciò avviene quando:

$$K_0 = K_\infty \quad (2.5.10)$$

$$\frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{C_1}{C_1 + C_2} \quad (2.5.11)$$

$$R_1 C_1 = R_2 C_2 \quad (2.5.12)$$

Solo in una situazione dove $R_1 C_1 = R_2 C_2$ si può ottenere una risposta al gradino lineare e precisa come quella di Figura 2.5.8 C.

Altrimenti si avrebbe una curva di risposta sovracompensata o sottocompensata come quelle di Figura 2.5.8 A e B.

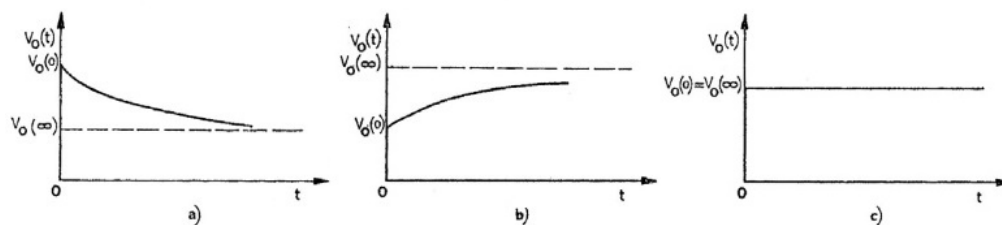


Figura 2.5.8: A) $R_1 C_1 > R_2 C_2$, B) $R_1 C_1 < R_2 C_2$, C) $R_1 C_1 = R_2 C_2$

2.5.3 Dispositivi di registrazione o di rivelazione

Dispositivi di registrazione (oscilloscopi) o di rivelazione (volmetri di cresta) vengono collegati al lato bassa tensione del divisore di tensione al fine di misurare ed eventualmente esaminare la grandezza in esame.

Normalmente si utilizzano gli oscilloscopi: in primo luogo perchè ci danno la possibilità di rilevare graficamente la curva impulsiva, in secondo luogo perchè sono disponibili più canali di ingresso e quindi vi è la possibilità di confrontare tra loro più segnali. L'oscilloscopio viene collegato tramite un cavo coassiale al fine di evitare riflessioni e quindi errori dovuti al rumore.

Viene utilizzato anche per tarare gli strumenti. Inoltre il software presente all'interno offre la possibilità di effettuare le prime analisi numeriche in tempo reale direttamente sulla curva impulsiva rilevata.

Sono da prediligere gli oscilloscopi digitali in quanto la presenza di memoria permette di acquisire e visualizzare permanentemente un evento transitorio di pochi millesimi di secondo, cosa non possibile con quelli analogici (dove era necessario fotografare le scie dei segnali).

In seguito inoltre è possibile campionare il segnale registrato e quindi esportarlo al fine di analizzarlo e manipolarlo digitalmente con altri programmi.

Qualora invece si voglia solo misurare il valore di picco della curva è possibile utilizzare volventri di cresta i quali risultano sicuramente più precisi degli oscilloscopi ma meno versatili.

Per tutti questi dispositivi è essenziale verificare che il valore presunto da misurare rientri nella scala massima utilizzata dallo strumento stesso. In caso contrario è possibile aggiungere in ingresso un attuatore di segnale facendo attenzione a non variare l'impedenza di ingresso.

Capitolo 3

Configurazione sistema di misura

In accordo con le normative descritte nel Capitolo 2 si vuole realizzare un circuito in grado di misurare correttamente l'impulso generato.

Inoltre si vuole garantire e qualificare il sistema utilizzato. Bisogna quindi garantirne sia la riproducibilità che la ripetibilità, nel rispetto delle tolleranze e delle incertezze imposte dalle normative. Ovvero un'incertezza inferiore al 3% sul valore di cresta ed un'incertezza inferiore al 10% sulle misure del tempo di fronte e del tempo all'emivalore.

Si è scelto quindi di realizzare due sistemi di misura utilizzando due strumenti differenti che a livello teorico dovrebbero fornire lo stesso risultato.

3.1 Concetto di ripetibilità e di riproducibilità

Un sistema di misura è dotato di ripetibilità quando, a parità di condizioni esterne, è presente una giustificata concordanza tra una serie di misure effettuate su una stessa grandezza da verificare.

Questa definizione è valida a patto che restino immutate le condizioni di misura, ovvero:

1. sia mantenuto lo stesso metodo di misurazione;
2. siano effettuate dallo stesso operatore e con lo stesso strumento di misura;
3. siano fatte nel medesimo luogo in un breve periodo;
4. gli strumenti utilizzati siano soggetti alle medesime condizioni di utilizzo.

Qualora vi siano discordanze fra le misure effettuate si può affermare che il sistema di misura è soggetto ad errori casuali. Bisognerà quindi capire se le discordanze rilevate siano tali da rendere la misura significativa o meno. Garantire la ripetibilità del sistema di misura è fondamentale per sostenere la precisione

della misura stessa. Qualora il sistema sia ritenuto ripetibile bisognerà considerare la presenza di errori sistematici propri del sistema di misura.

Un sistema di misura è dotato di riproducibilità quando, pur cambiando una o più condizioni, è presente una giustificata concordanza tra una serie di misure effettuate su una stessa grandezza da verificare.

Per cambiare le condizioni di misura è possibile:

1. modificare il metodo di misurazione;
2. cambiare l'operatore alla misura o lo strumento di misura;
3. spostandosi in luogo differente in tempi anche lunghi;
4. gli strumenti utilizzati non siano soggetti alle medesime condizioni di utilizzo.

In questo caso qualora non vi siano sostanziali discordanze tra le misure effettuate si può garantire che il sistema di misura è stabile e non soggetto ad errori sistematici. Garantire la riproducibilità di un sistema di misura risulta essenziale quando si suppone che una o più condizioni al contorno inducano significative influenze sulle misure.

3.2 Strumenti di misura utilizzati

Per garantire i risultati ottenuti si è scelto di utilizzare due tipologie di divisori di tensione differenti: un divisore di tensione resistivo (Uni_PD_01) caratterizzerà il primo sistema di misura mentre la sonda ohmico-capacità (Tektronix P6015A) caratterizzerà il secondo sistema di misura.

3.2.1 Divisore di tensione Uni_PD_01

Il divisore di tensione Uni_PD_01 è un divisore di tensione puramente resistivo realizzato nel Laboratorio di Alte Tensioni di proprietà dell'Università di Padova. Si tratta di un divisore schermato in quanto su di esso sono installati degli schermi metallici in grado di ridurre le influenze dei campi elettrici esterni.

Questo divisore di tensione resistivo in passato è stato già utilizzato, con ottimi risultati, per la misura di impulsi (anche a fronte ripido). È stato scelto come riferimento per numerosi confronti tra sistemi di misura. Si tratta di un dispositivo con buone qualifiche, certificato sia dall'Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (INRiM) sia dal Centro Elettrotecnico Sperimentale Italiano (CESI).

Studi hanno dimostrato che questo divisore resistivo è in grado di misurare impulsi fino a 100kV con incertezze inferiori del 1% per i valori di cresta e con incertezze inferiori del 5% per i tempi di salita.

Per il suo utilizzo non è necessario eseguire alcuna compensazione o aggiustamento (come in seguito si dovrà fare con la sonda Tektronix P6015A).

Teoricamente il suo fattore di scala (di riduzione) è di 160. Spesso si vogliono analizzare onde ed impulsi con picchi molto elevati, per tale motivo, per aumentare la scala di misurazione del dispositivo di registrazione (oscilloscopio) ad esso collegato, il divisore viene accoppiato con un attenuatore.

Nel caso specifico si tratta di un attenuatore resistivo a Π da 75Ω in grado di operare un'ulteriore riduzione del fattore di scala dividendo per 10. In conclusione quindi il fattore teorico di riduzione determinato dall'accoppiamento del divisore di tensione con l'attenuatore resistivo è pari a 1600.



Figura 3.2.1: Divisore di tensione Uni_PD_01

3.2.2 Sonda Tektronix P6015A

La sonda Tektronix P6015A è un dispositivo ad alta tensione con attenuazione di 1000X. È utilizzata al fine di incrementare la capacità di misurazione (in alta tensione) negli oscilloscopi e negli altri dispositivi di misurazione. Presenta una impedenza interna di tipo ohmico capacitiva ($100\text{ M}\Omega$ e $3,0\text{ pF}$) e presenta un fattore di scala di circa 1:1000. Per essere correttamente sfruttata la sonda si deve accoppiare con oscilloscopi o sistemi di rilevazione grafica aventi una resistenza di ingresso da $1\text{ M}\Omega$ e una capacità di ingresso da 7 pF a 49 pF .

La sonda P6015A è costituita da due componenti principali: il corpo della sonda e la scatola di compensazione.

Il primo ospita la punta, la testa della sonda ed il cavo coassiale di messa a terra. Il corpo della sonda è realizzato in materiale termoplastico per alte

tensioni che fornisce protezione meccanica per i componenti interni della sonda e protezione elettrica per l'utente. Per il suo funzionamento è necessario collegare il cavo coassiale a terra mediante una molletta a coccodrillo.

Il secondo componente, ovvero la scatola di compensazione, per mezzo di un cavo collega il corpo della sonda con l'oscilloscopio. Al suo interno presenta delle viti di regolazione grazie alle quali sarà possibile procedere alla taratura della sonda.

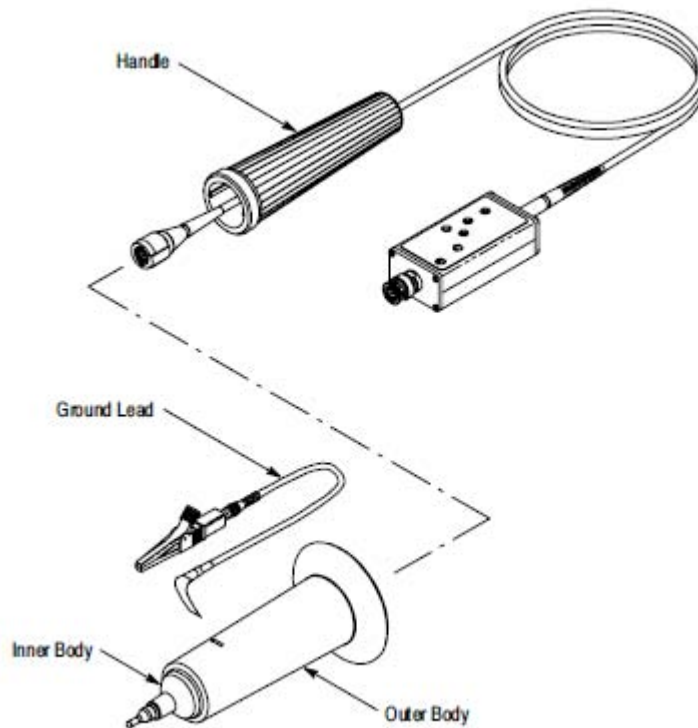


Figura 3.2.2: Sonda Tektronix P6015A

Questa sonda in particolar modo si propone di misurare segnali DC tra 1.5 kV e 20kV (con picco in AC) ed impulsi fino a 40 kV di picco massimo. Il funzionamento della sonda è influenzato anche da alcuni parametri esterni. In linea di principio si ha un declassamento del valore massimo di misura nelle seguenti condizioni:

- Duty cycle del segnale misurato superiore al 10% o durata superiore ai 100ms (frequenza inferiore ai 10Hz).
- Umidità relativa superiore al 80% alla temperatura di 25°C.
- Altitudine superiore ai 2440 metri sul livello del mare.

Il primo punto è dovuto ad un limite della sonda in quanto non riesce a misurare

correttamente basse frequenze. Il secondo ed il terzo punto invece sono limiti da tenere in considerazione per problemi legati alla sicurezza elettrica in particolar modo alla tenuta del dielettrico.

Compensazione ed aggiustamento sonda Tektronix P6015A

1. *Valori di misura residui nell'oscilloscopio*

Al fine di effettuare una buona misurazione è doveroso capire se in assenza di segnale da misurare l'oscilloscopio presenti o meno un valore di offset. Se presente è necessario resettare automaticamente lo strumento. Nonostante questa operazione se il valore persiste significa che l'oscilloscopio nel suo interno presenta lievi disturbi. Quindi bisognerà considerare il valore di offset misurato e detrarlo dal valore che si andrà a rilevare in seguito.

2. *Verificare il punto di massa*

È necessario non dare per scontato che il circuito di messa a terra da testare sia lo stesso del circuito di messa a terra dell'oscilloscopio. Pertanto bisogna assicurarsi che non vi sia differenza di potenziale tra la massa dell'oscilloscopio e la massa del circuito da testare. Qualora non vi fosse differenza di potenziale i due punti sono da definirsi equipotenziali e di conseguenza entrambi validi e verificati.

Durante la misura i due punti potrebbero non avere lo stesso potenziale in quanto potrebbe essere presente una corrente di circolazione interna tra i due punti di misura.

3. *Compensazione della sonda*

(a) *Attenuazione DC della sonda*

Con l'ausilio di un generatore di segnali viene generata un'onda quadra. Si tratta di un segnale con duty cycle del 50% e valore di picco di 10V. Il manuale d'utilizzo della sonda chiede una forma d'onda quadra con picco di 50V, quest'onda risulta difficilmente realizzabile con gli strumenti a disposizione nel laboratorio.

Vengono registrati graficamente da un oscilloscopio simultaneamente sia l'onda quadra generata dal dispositivo libera da alcun filtro, che il segnale filtrato dalla sonda con un fattore di scala teorico $K=1000$. Con l'utilizzo della regolazione DC ATTEN (R9) presente nella scatola di compensazione della sonda Tektronix P6015A bisogna fare in modo che la parte alta della curva sia il più possibile piatta.

(b) *Compensazione in frequenza della sonda*

Utilizzando lo stesso procedimento per l'attenuazione DC viene utilizzato un segnale ad onda quadra con le stesse caratteristiche. Scopo di questa regolazione è fare in modo che non vi siano lenti transitori. Graficamente quindi il fronte di salita deve risultare il più pulito possibile. Questo viene fatto sfruttando la regolazione LF COMP (C5) presente nella scatola di compensazione. Inoltre attraverso le regolazioni MID 1, MID 2, MID 3 è stato possibile appiattire e livellare

meglio la parte alta della curva in vicinanza al fronte di salita al fine di far coincidere.

Una volta effettuate queste due regolazioni graficamente è visibile uno scostamento tra le due curve nella parte alta circa 1.45%. La Figura 3.2.3 mostra in blu l'onda quadra ideale (misurata direttamente dal generatore di segnali) mentre in rosso l'onda quadra attenuata dalla sonda di un fattore teorico 1000. Si è riscontrato che la disposizione della sonda risulta influenzare la bontà della misura. In particolar modo si nota come l'ambiente esterno interferisca con la rilevazione del segnale. Questo perché la capacità interna della sonda 3pF trovandosi vicina al punto di misurazione (punta della sonda) è molto esposta facilmente influenzabile anche da piccole capacità parziali esterne che vengono a manifestarsi. Si è quindi dovuti passare ad una nuova configurazione di misura disponendo la sonda in modo perpendicolare all'ingresso dell'oscilloscopio.

In Figura 3.2.4 si riportano le stesse due curve e si nota, a parità di condizioni, una riduzione dello scostamento dimostrando un miglioramento della situazione.

Nella seguente tabella invece vengono riportati i valori numerici dei due confronti. Seppur di poco, inserendo la sonda in modo perpendicolare al punto di misura la differenza relativa percentuale tra i due segnali migliora passando dal 1.45% allo 0.87%.

	Valore onda ideale dal generatore (curva blu)	Valore onda attenuata dalla sonda (curva rossa)	Differenza assoluta [V]	Differenza relativa [%]
Sonda disposta in modo non corretto Figura 3.2.2.	10.33 V	10.18 V	0.15 V	1.45 %
Sonda disposta in modo corretto Figura 3.2.3	10.33 V	10.42 V	0.09 V	0.87%

Tabella 3.2.1: Analisi configurazione sonda

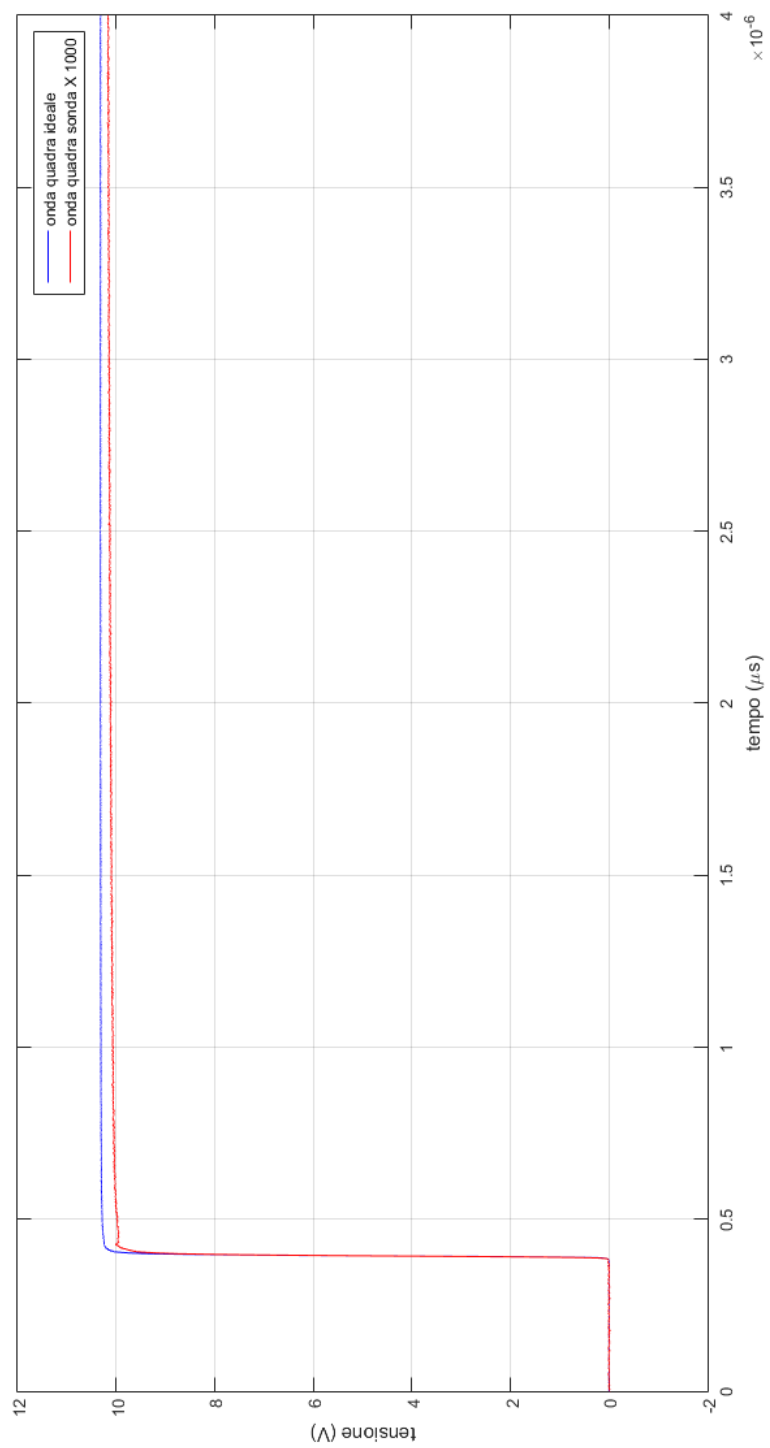


Figura 3.2.3: Sonda disposta in modo non corretto

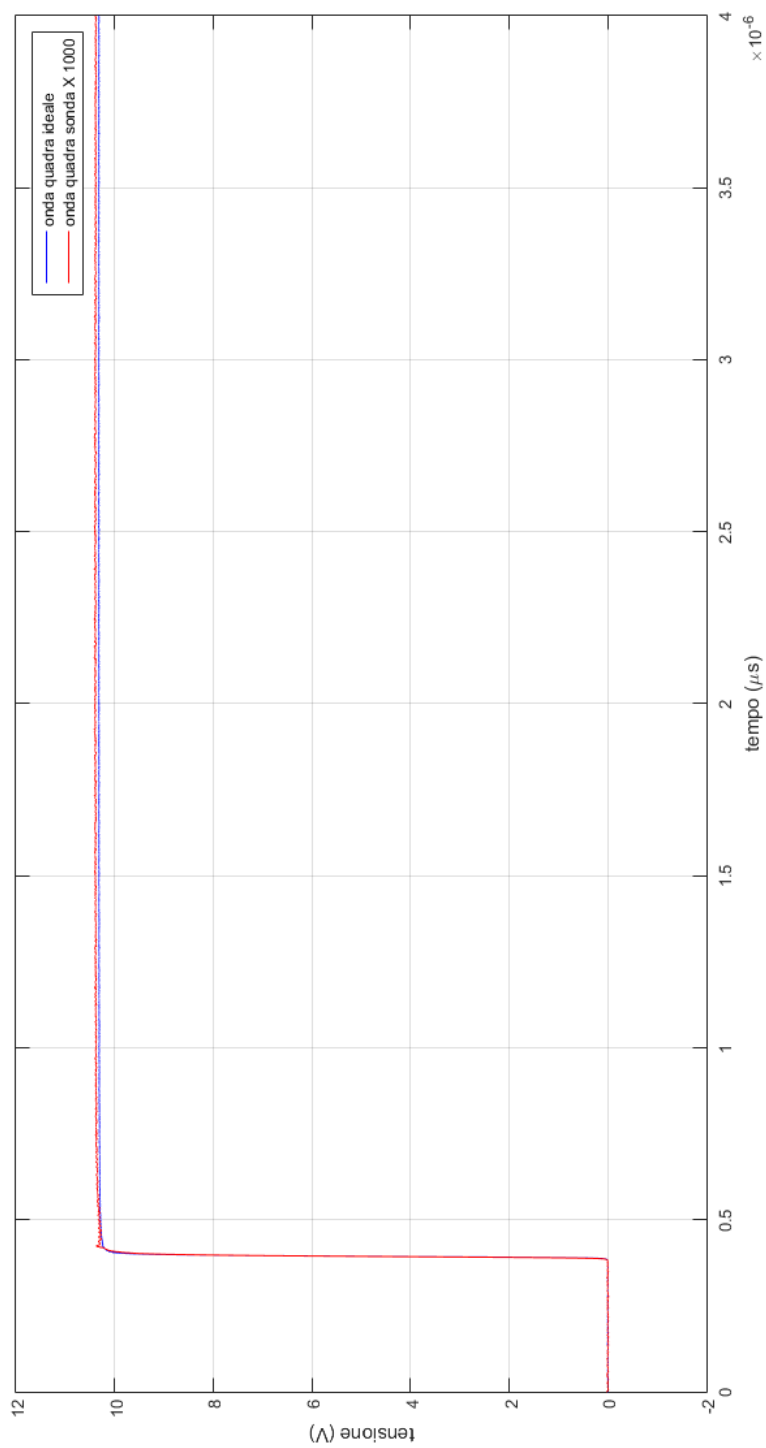


Figura 3.2.4: Sonda disposta in modo corretto

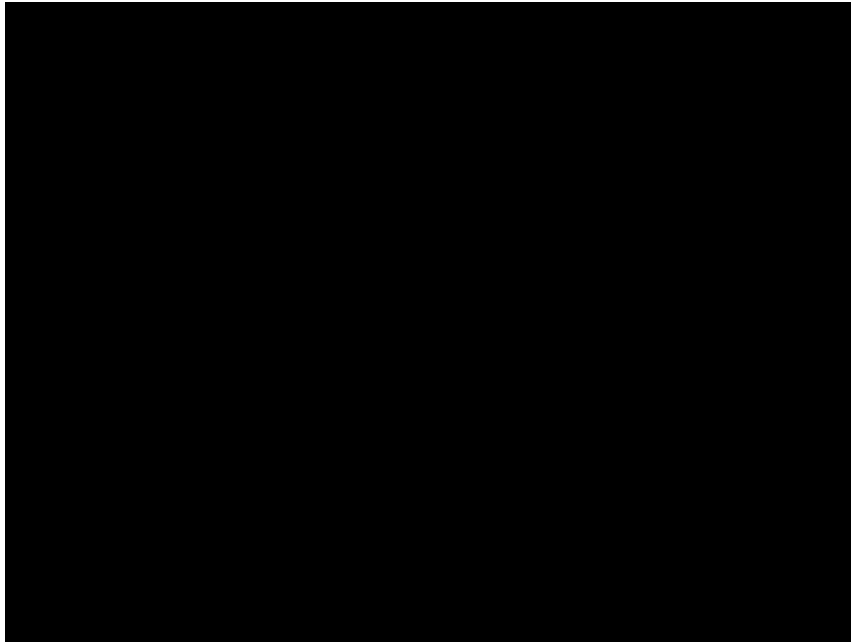


Figura 3.2.5: Configurazione utilizzata per tarare sonda Tektronix P6015A

(c) Banda passante e scelta del cavo di collegamento

A seconda della lunghezza del cavo di connessione tra oscilloscopio e sonda varia la frequenza della banda passante del sistema di misura. In particolar modo:

- Se il cavo è di 3 metri (come nel caso preso in analisi), dovremo considerare una banda passante di 75MHz
- Se il cavo è di 7 metri, la frequenza della banda passante scende a 25 MHz.

La banda passante influisce sulla risoluzione temporale rilevabile dal sistema di misura utilizzato. In prima approssimazione, grazie alla seguente equazione, è possibile stimare il più piccolo tempo di fronte che il sistema riesce visualizzare correttamente.

$$t_B [ns] = \frac{350}{f_{BP} [MHz]} \quad (3.2.1)$$

Considerando segnali impulsivi con fronte d'onda ripido, maggiore sarà la banda passante della sonda $f_{BP} [MHz]$, più accurata sarà la misura del tempo di fronte $t_B [ns]$ misurabile dal sistema.

3.3 Verifica del fattore di scala

Entrambi gli strumenti sono caratterizzati da uno specifico fattore di scala (o fattore di riduzione) dovuto alla loro costruzione interna.

In linea teorica la sonda ohmico-capacitiva Tektronix P6015A presenta un fattore di scala $K'_S = 1000$ mentre il divisore di tensione resistivo Uni_PD_01 una fattore di scala $K'_D = 160$.

Per verificare se tali valori teorici corrispondono a quelli effettivi di utilizzo viene eseguita una verifica in corrente continua utilizzando due volmetri ad alta precisione.

Fattore di scala divisore tensione

Vengono eseguite 3 misure dove il volmetro V1 è collegato direttamente al generatore DC, mentre il volmetro V2 è collegato in uscita al divisore di tensione in analisi.

N°	Volmetro V1 [V]	Volmetro V2 [V]	Fattore di scala $K_{DN} = \frac{V1}{V2}$
1	101.84	0.6629	153.63
2	201.61	1.312	153.67
3	301.37	1.9607	153.71

Tabella 3.3.1: Rilevazione fattore di scala del divisore di tensione

Il fattore di scala sarà ottenuto come media dei valori ottenuti.

$$K_D = \frac{K_{D1} + K_{D2} + K_{D3}}{3} \approx 153.7 \quad (3.3.1)$$

Allo stesso modo viene calcolato il fattore di scala del divisore di tensione accoppiato con l'attuatore Π resistivo da 75Ω .

N°	Volmetro V1* [V]	Volmetro V2* [V]	Fattore di scala $K_{DN*} = \frac{V1*}{V2*}$
1	301.37	0.18980	1587.83
2	201.36	0.12680	1588.01
3	101.34	0.06382	1587.90

Tabella 3.3.2: Rilevazione fattore di scala del divisore di tensione con attenuatore

Il fattore di scala sarà ottenuto come media dei valori ottenuti.

$$K_{D*} = \frac{K_{D1*} + K_{D2*} + K_{D3*}}{3} \approx 1588 \quad (3.3.2)$$

Si nota che l'aggiunta dell'attuatore resistivo comporta un aumento del fattore di scala pari a 10.33 rispetto a quello teorico di 10.

Fattore di scala della sonda

Definito e considerato il valore del fattore di scala del divisore di tensione bisogna analizzare il valore di quello della sonda.

Per determinarlo deve essere utilizzato lo stesso canale dell'oscilloscopio precedentemente usato per eseguire la compensazione della sonda.

Per poter rilevare correttamente le curve, su questo canale viene preimpostato un fattore di scala pari a 1000.

N°	Volmetro V1 [V]	Oscilloscopio x1000	Fattore di scala $K_{SN} = \frac{V1}{oscilloscopio} 1000$
1.1	101.84	104.0 {50mV/div}	979
1.2		104.1 {100mV/div}	978
2.1	201.61	205.5 {50mV/div}	981
2.2		205.3 {100mV/div}	982
3.1	301.37	307.8 {100mV/div}	979
3.2		307.2 {200mV/div}	981

Tabella 3.3.3: Rilevazione fattore di scala del divisore di tensione

Ancora una volta il fattore di scala sarà ottenuto come media dei valori ottenuti.

$$K_S = \frac{K_{S1.1} + K_{S1.2} + K_{S2.1} + K_{S2.2} + K_{S3.1} + K_{S3.2}}{6} \approx 980 \quad (3.3.3)$$

In queste condizioni si può notare come il fattore di riduzione della sonda reale $K_S = 980$ sia diverso da quello teorico $K'_S = 1000$

I fattori di scala così rilevati sono di fondamentale importanza in quanto i sistemi di rivelazione utilizzati dovranno essere pre configurati con tali valori.

Capitolo 4

Confronto del sistema di misura in bassa tensione

Prima di passare alla prova interturn sulle bobine campione dove sono presenti tensioni elevate è stato preferibile eseguire dei confronti in bassa tensione. Questo viene fatto utilizzando un generatore di impulsi in bassa tensione con configurazione di tipo Marx semplificato (Figura 2.5.1).

Questo generatore è in grado di variare l'andamento del fronte di salita e di discesa agendo su delle regolazioni. In particolare mantenendo costanti i valori dei parametri di coda $R_C = 1k\Omega$ $C_C = 69nF$ è possibile agendo sui parametri di fronte (R_C , C_C) modificarne l'andamento.

I valori sono stati registrati per mezzo di un oscilloscopio digitale ed elaborati tramite un programma in MATLAB.

Nel canale 2 viene registrata la curva in uscita dal divisore di tensione, nel canale 4 la curva in uscita dalla sonda Tektronix P6015A così come da Figura 4.0.1

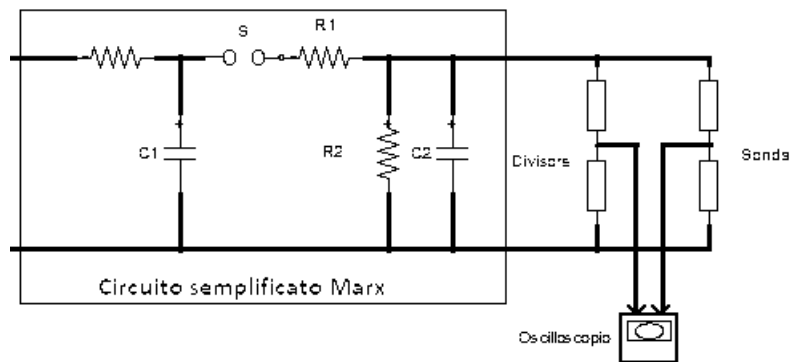


Figura 4.0.1: Schema di collaudo per impulsi in bassa tensione

4.1 Analisi delle misure di confronto

Nella Tabella 4.1.1 e nella Tabella 4.1.2 vengono riportati ed analizzati i risultati delle misure di confronto sia per il divisore di tensione che per la sonda.

Nello specifico, al variare di resistenza e capacità di fronte, vengono riportati i valori:

- Tempo di salita T1;
- Tempo all'emivalore T2;
- Valore di picco Vpp

La seconda tabella (a differenza della prima) presenta l'accoppiamento tra divisore resistivo e attuatore resistivo a Π .

Invece nelle Tabella 4.1.3, per ognuna delle misure eseguite, si riporta lo scostamento relativo percentuale delle grandezze precedentemente calcolate.

Si nota come tutti gli scostamenti rientrino nei parametri di incertezza e tolleranza espressamente richiesti dalla normativa (Capitolo 2).

In prima battuta è possibile sostenere che i due sistemi di misura si comportano correttamente presentando caratteristiche di ripetibilità e di riproducibilità.

Per semplificare la lettura del documento, in forma grafica vengono riportate solo le misure 000, 002, 006, 007.

Per ognuna di esse vengono ricavate e studiate, tramite un programma MATLAB, tre immagini:

1. In blu la curva impulsiva rilevata dal divisore di tensione resistivo (con eventuale attuatore);
2. In rosso la curva impulsiva rilevata dalla sonda Tektroinx P6015A;
3. Confronto tra le curve e relativi scostamenti percentuali.

CAPITOLO 4. CONFRONTO DEL SISTEMA DI MISURA IN BASSA TENSIONE

Figura N°	Misura N°	Resistenza di fronte R_F [Ω]	Capacità di fronte C_F [nF]	Strumento	Tempo di salita T1 [μ s]	Tempo all'emivalore T2 [μ s]	Valore di picco V_{pp} [V]
Figura 4.1.1	000	200	4.4	Ch2 divisore	1.19359	49.75279	624.5
Figura 4.1.2				Ch4 sonda	1.19314	48.14303	634.3
	001	200	2.2	Ch2 divisore	2.25456	51.97285	602.1
				Ch4 sonda	2.19670	50.63528	609.1
	002	5	0.5	Ch2 divisore	1.30129	48.67538	630.0
				Ch4 sonda	1.28649	47.07631	639.6
Figura 4.1.4	003	10	1	Ch2 divisore	0.17830	40.76721	722.9
Figura 4.1.5				Ch4 sonda	0.17437	39.20853	738.1
	004	100	4.4	Ch2 divisore	0.19858	40.05836	727.9
				Ch4 sonda	0.19790	38.35307	743.6
	005	200	4.4	Ch2 divisore	1.19192	49.78534	624.5
				Ch4 sonda	1.19026	48.30147	633.4

Tabella 4.1.1: Misure effettuate con impulso di prova senza attuatore resistivo a II

Figura N°	Misura N°	Resistenza di fronte $R_F[\Omega]$	Capacità di fronte $C_F[\text{nF}]$	Strumento	Tempo di salita T1 [μs]	Tempo all'emivalore T2 [μs]	Valore di picco V_{pp} [V]
Figura 4.1.7	006	100	4.4	Ch2 divisore	1.19730	49.76415	624.6
Figura 4.1.8				Ch4 sonda	1.17943	48.42769	634.0
Figura 4.1.10	007	5	0.5	Ch2 divisore	0.17637	40.90727	718.9
Figura 4.1.11				Ch4 sonda	0.17592	39.11191	737.4
	008	10	1	Ch2 divisore	0.19728	40.52631	724.2
				Ch4 sonda	0.19729	38.37385	741.9

Tabella 4.1.2: Misure effettuate con impulso di prova con attuatore resistivo a Π

Figura N°	Misura N°	Resistenza di fronte $R_F[\Omega]$	Capacità di fronte $C_F[\text{nF}]$	Differenza tempo di salita $\Delta T1\%$	Differenza tempo all' emivalore $\Delta T2\%$	Differenza valore di picco $\Delta V_{pp}\%$
Figura 4.1.3	000	200	4.4	0.0379	3.24	1.54
	001	200	2.2	2.57	2.57	1.15
	002	5	0.5	1.14	3.29	1.5
Figura 4.1.6	003	10	1	2.2	3.82	2.06
	004	100	4.4	0.344	4.26	2.1
	005	200	4.4	0.139	2.98	1.41
Figura 4.1.9	006	100	4.4	1.49	2.69	1.49
	007	5	0.5	0.255	4.39	2.5
Figura 4.1.12	008	10	1	0.0051	5.31	2.39

Table 4.1.3: Differenze percentuali dei valori rilevati rispetto alle precedenti tabelle

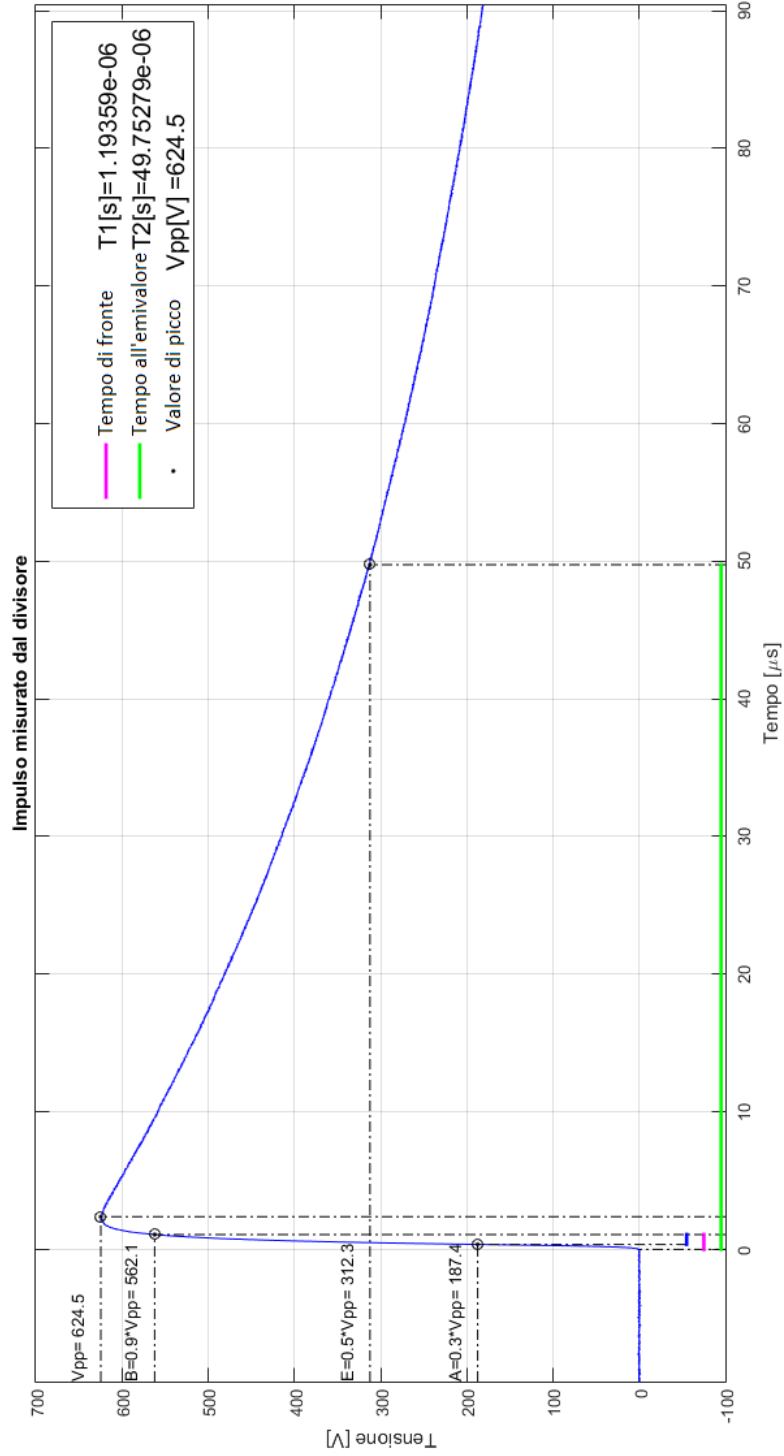


Figura 4.1.1: Misura 000 - $R_f = 100\Omega$ $C_f = 4.4nF$ - Impulso del divisore

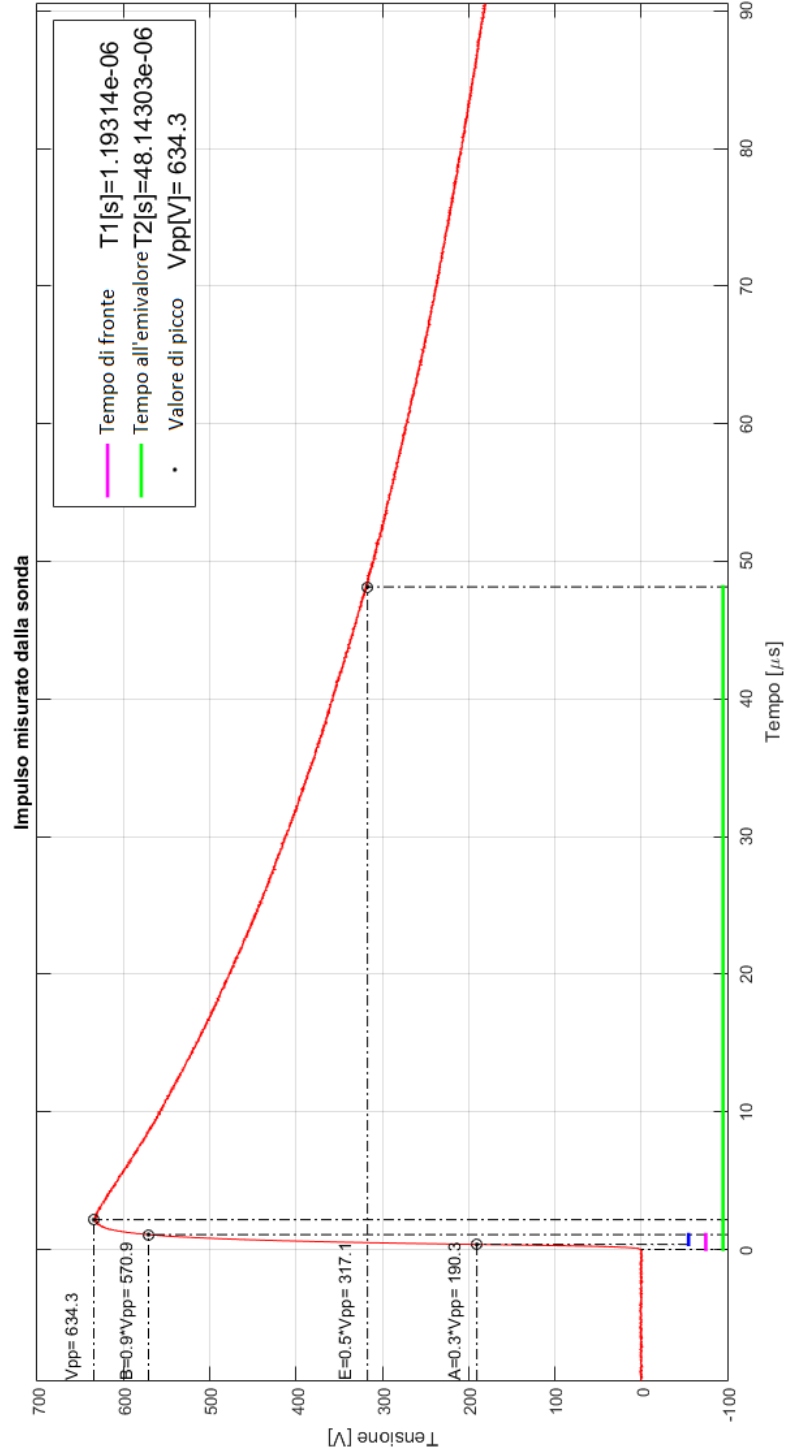


Figura 4.1.2: Misura 000 - Rf=1000Ω Cf=4.4nF - Impulso della sonda

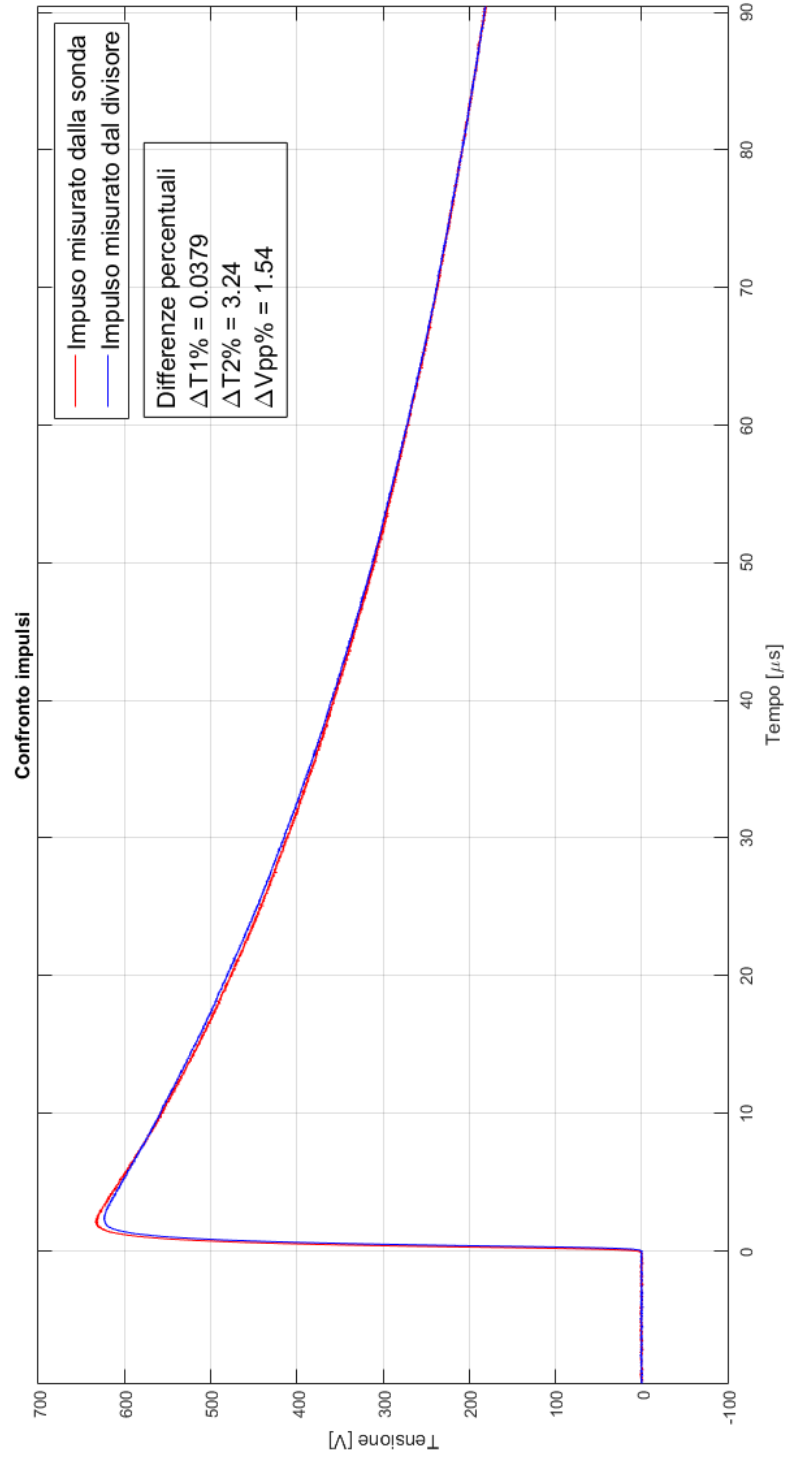


Figura 4.1.3: Misura 000 - $R_f=100\Omega$ - $C_f=4.4nF$ - Confronto impulsi

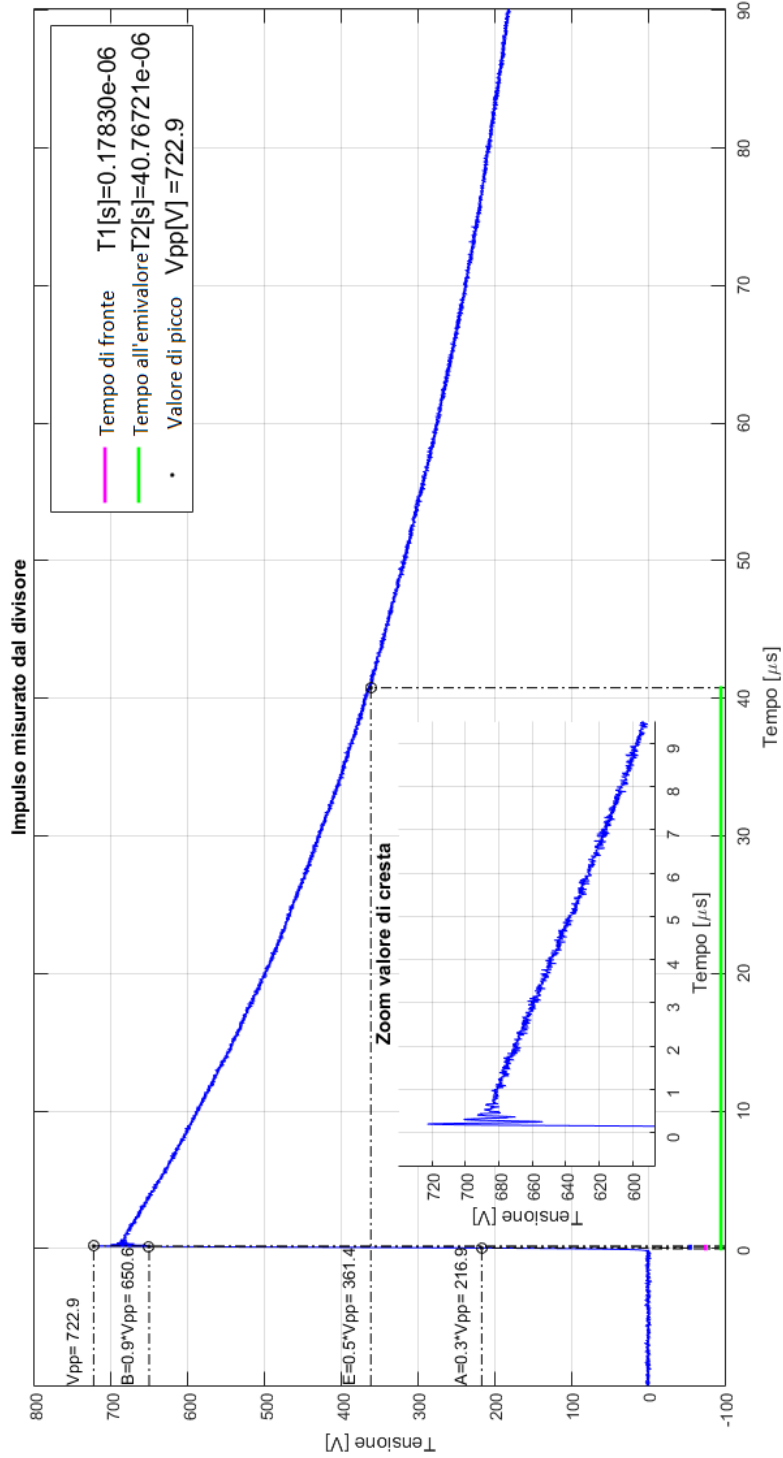


Figura 4.1.4: Misura 003 - $R_f=10\Omega$ $C_f=1nF$ - Impulso del divisore

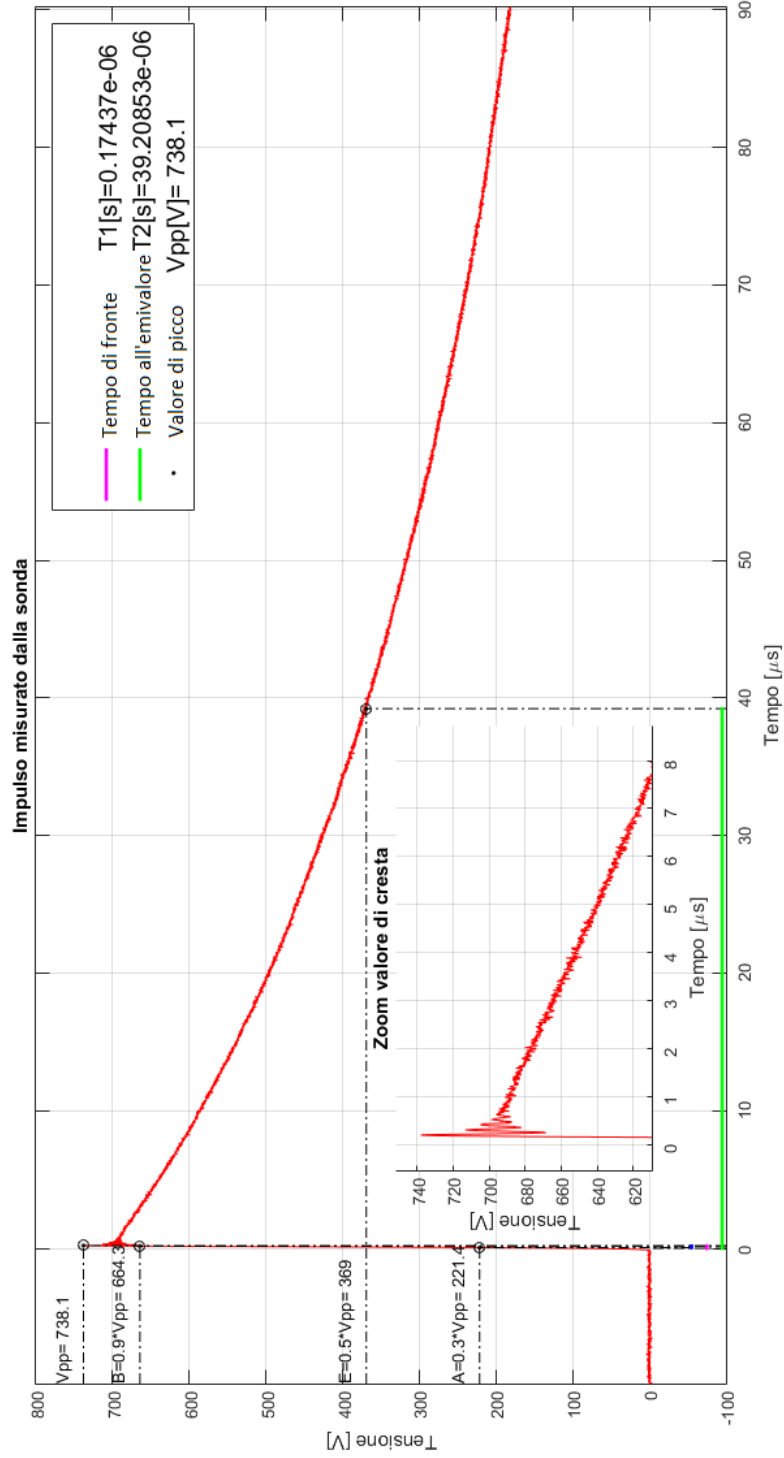


Figura 4.1.5: Misura 003 - $R_f=10\Omega$ $C_f=1nF$ - Impulso della sonda

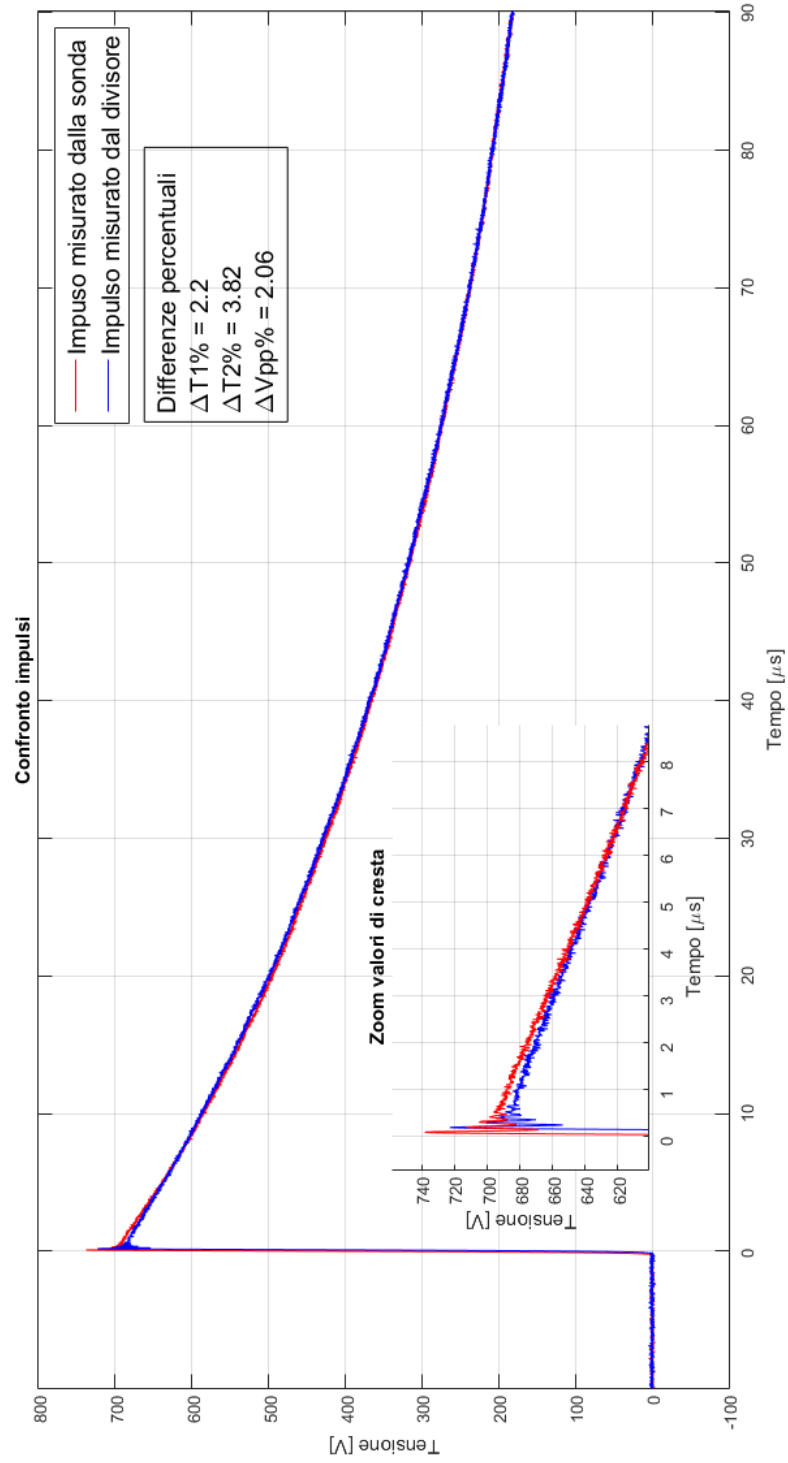


Figura 4.1.6: Misura 003 - Rf=10 Ω Cf=1nF - Confronto impulsi

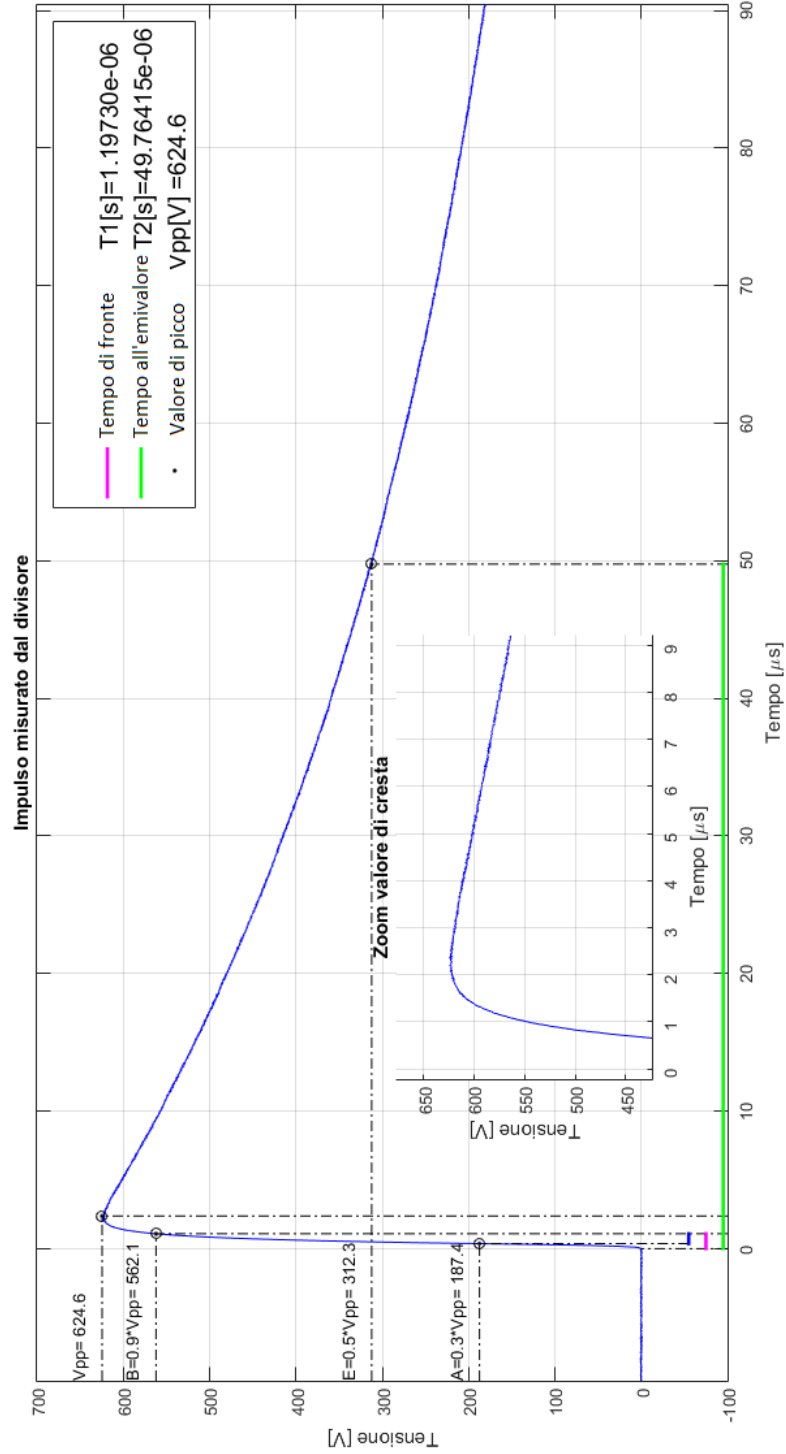


Figura 4.1.7: Misura 006 - $R_f=100\Omega$ $C_f=4.4nF$ - Impulso del divisore con attuttore

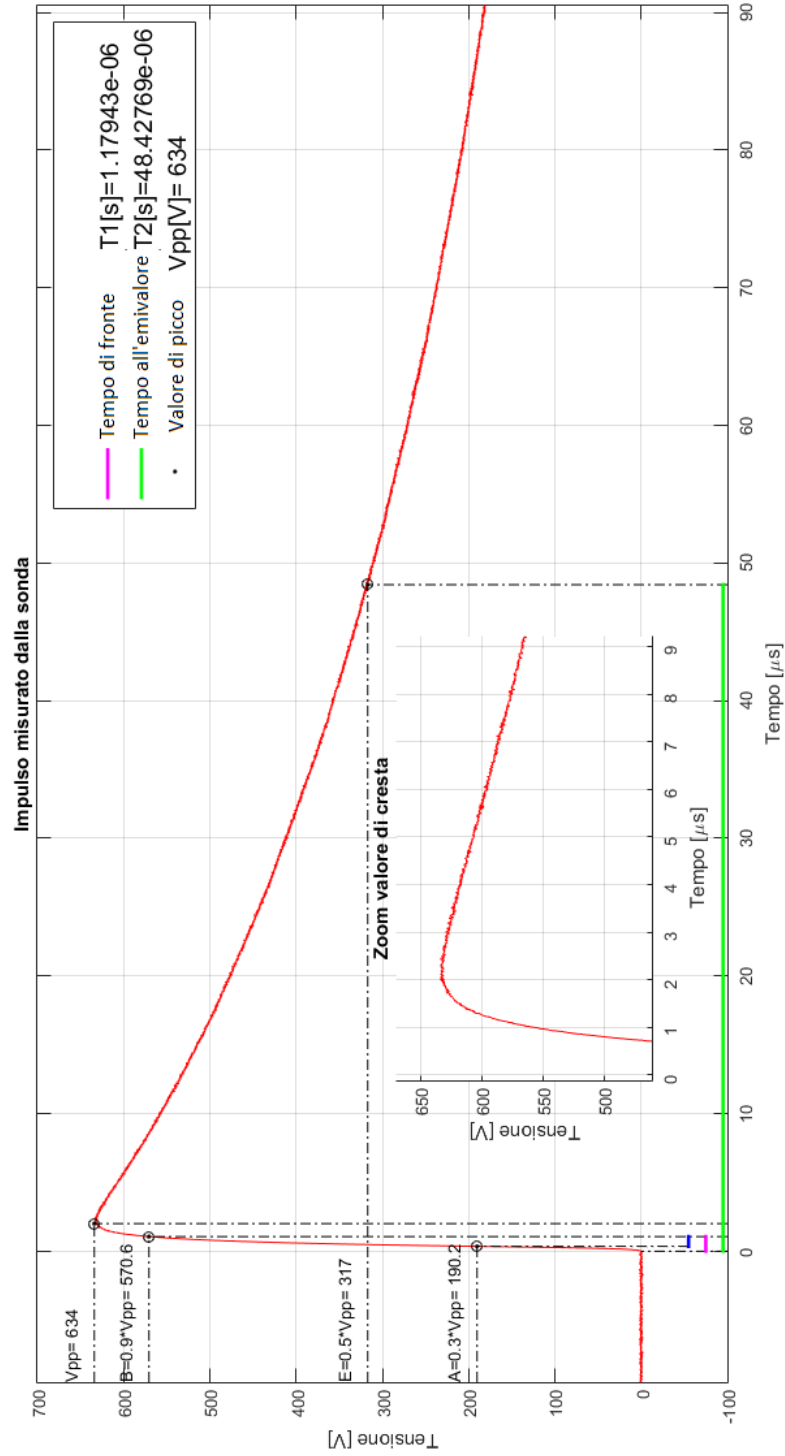


Figura 4.1.8: Misura 006 - $R_f=100\Omega$ $C_f=4.4nF$ - Impulso della sonda

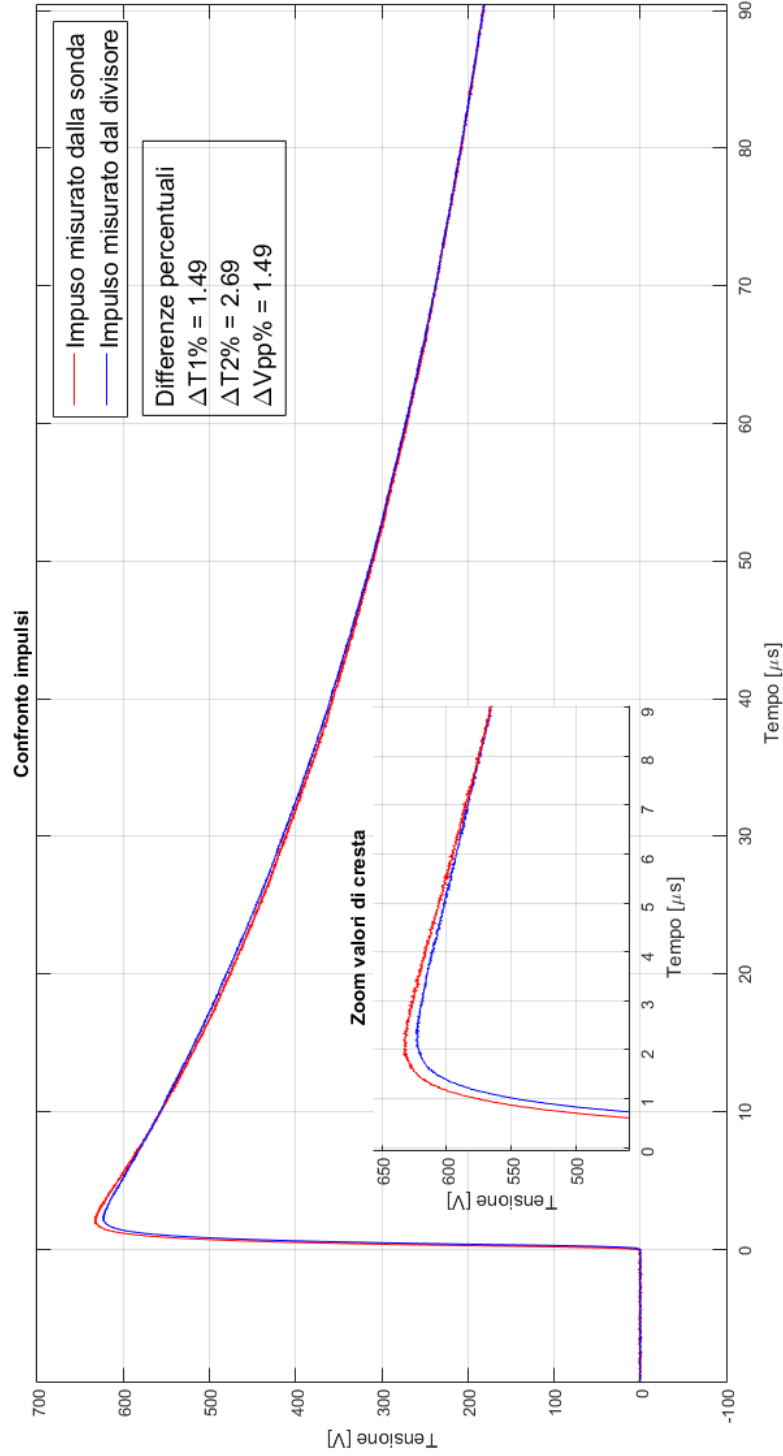


Figura 4.1.9: Misura 006 - Rf=100Ω Cf=4.4nF - Confronto impulsi

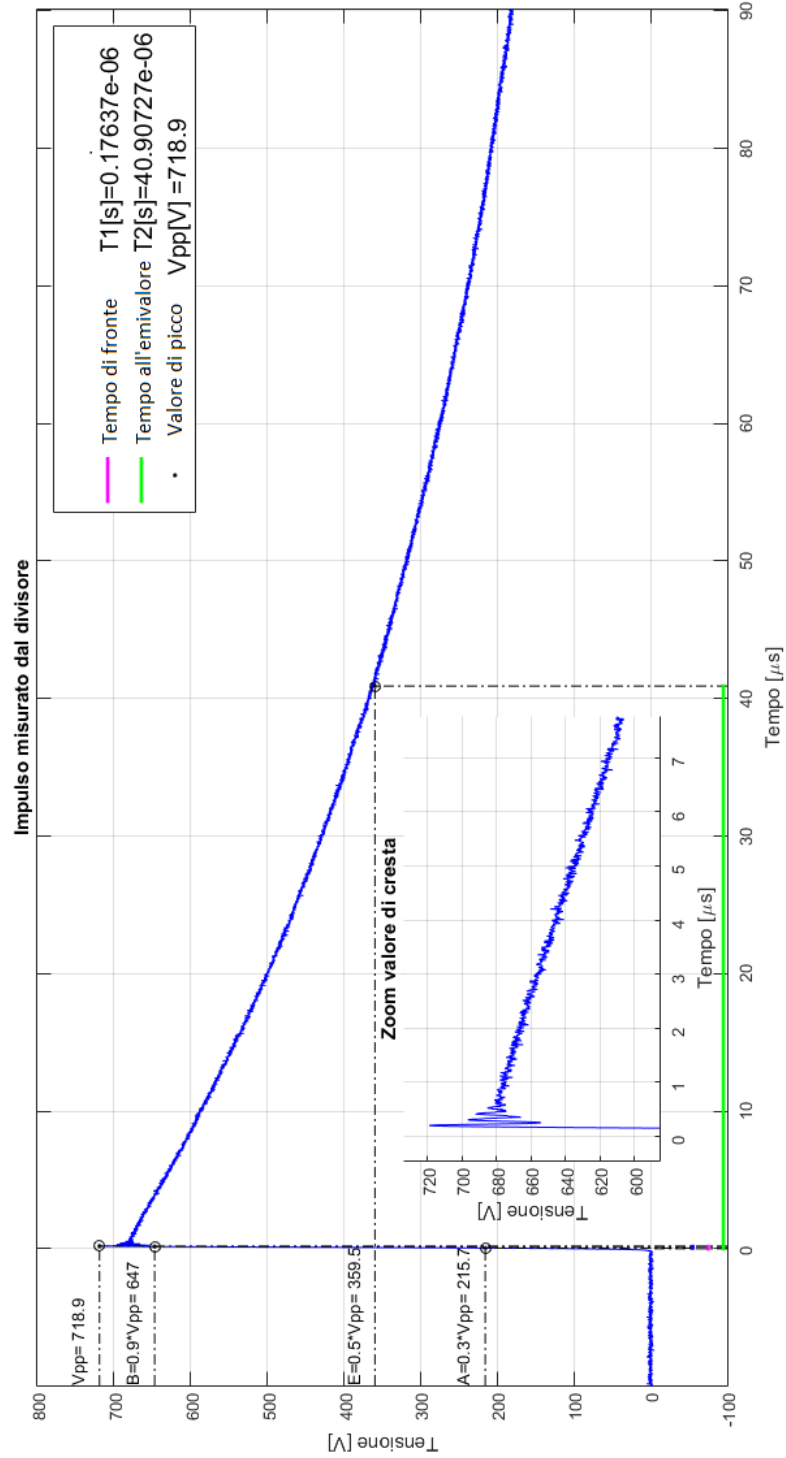


Figura 4.1.10: Misura 007 - $R_f=5\Omega$ $C_f=0.5nF$ - Impulso del divisoire con attuatore

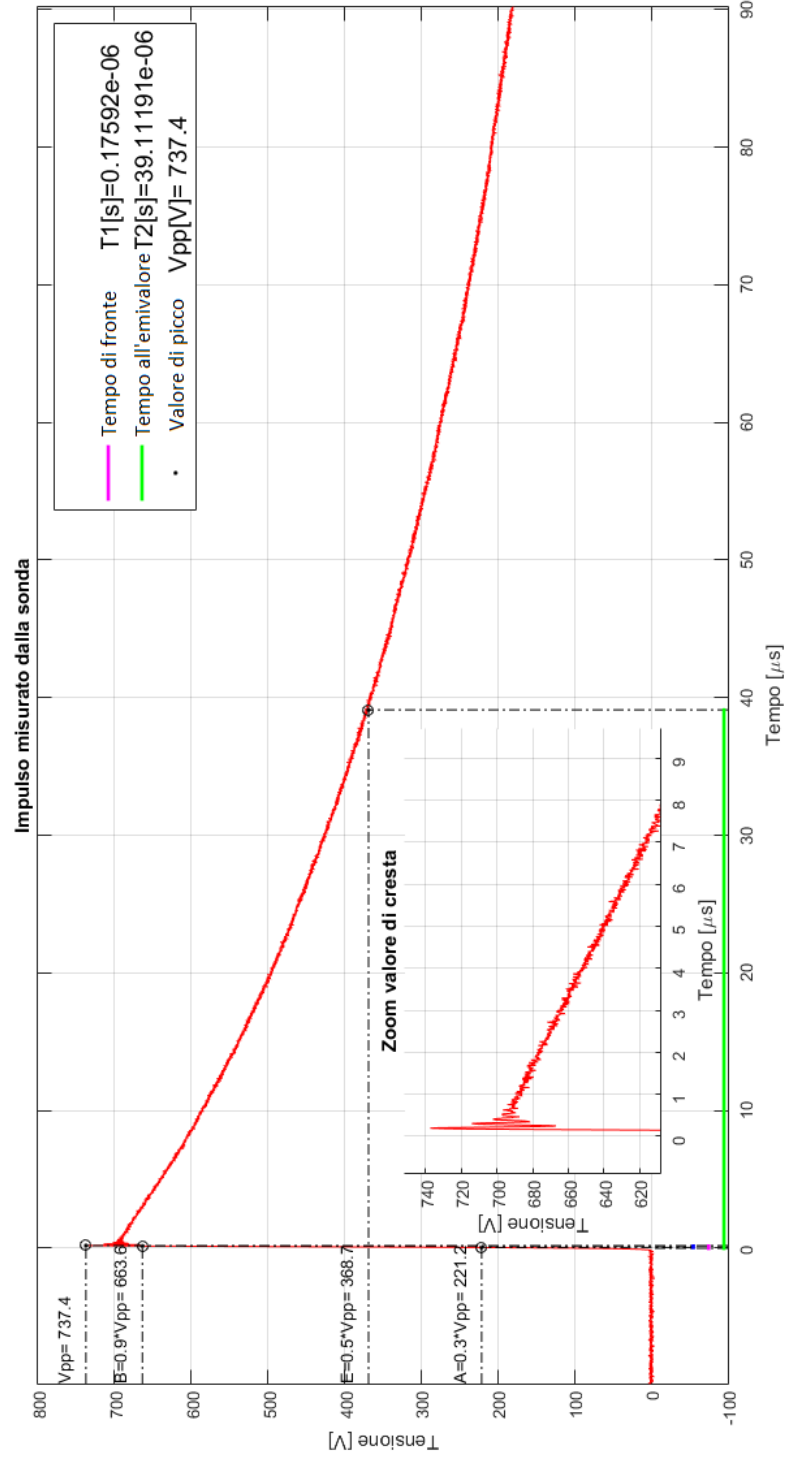


Figura 4.1.11: Misura 007 - $R_f=5\Omega$ $C_f=0.5nF$ - Impulso della sonda

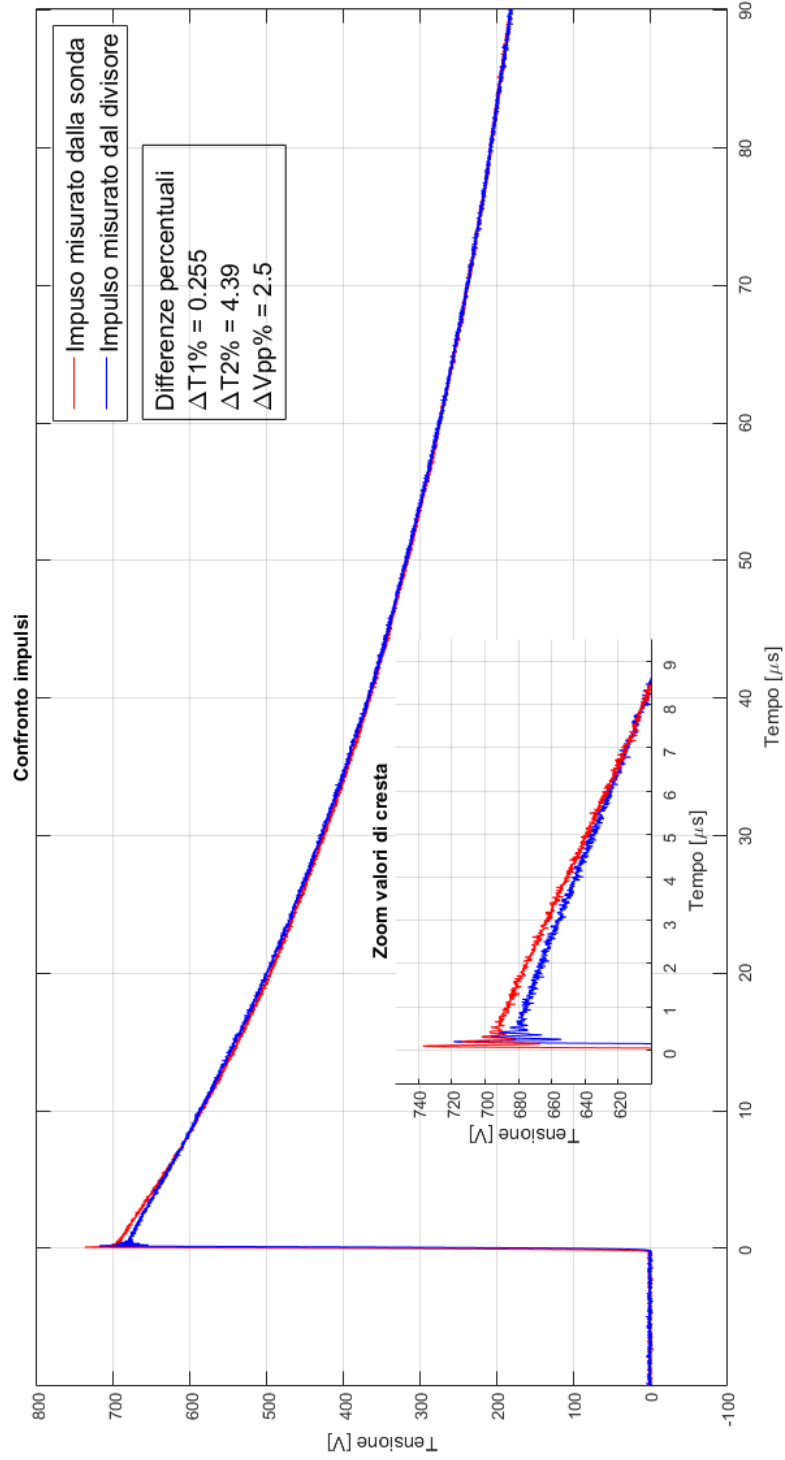


Figura 4.1.12: Misura 007 - $R_f=5\Omega$ $C_f=0.5nF$ - Confronto impulsi

Capitolo 5

Collaudo del sistema di misura con interturn test

In modo simile con quanto visto nel capitolo precedente, viene eseguita la prova interturn su avvolgimento/bobine campione utilizzando lo schema di Figura 5.0.1

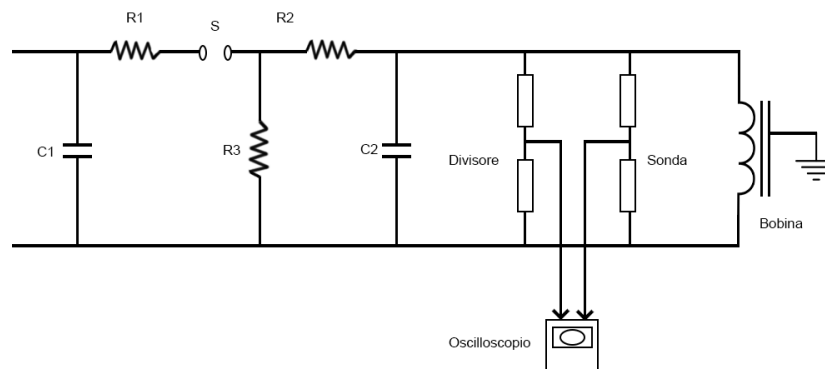


Figura 5.0.1: Schema per interturn test

La principale differenza di configurazione sta nella sostituzione del generatore di impulsi di bassa tensione con vari elementi capacitivi e resistivi in grado di generare una curva impulsiva con tempi di fronte più piccoli e valori di cresta più elevati. Le regolazioni non vengono quindi eseguite agendo su una rotella, ma per ottenere la configurazione di misura desiderata bisogna sostituire e collegare al circuito differenti elementi passivi (resistenze e capacità). In questa

*CAPITOLO 5. COLLAUDO DEL SISTEMA DI MISURA CON
INTERTURN TEST*

configurazione, come detto in precedenza, è presente anche l'avvolgimento da sottoporre al test in quanto quest'ultimo ha lo scopo di simulare quello che avrebbe nel normale funzionamento del motore. Inoltre il simulacro di cavo della bobina viene messo a terra.

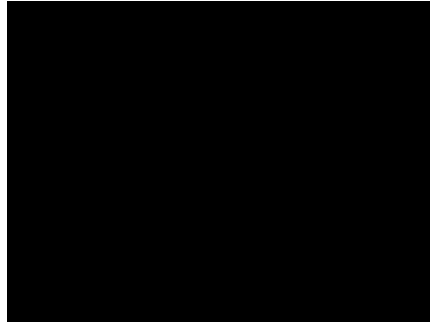


Figura 5.0.2: Circuito fisico interturn test



Figura 5.0.3: Avvolgimento/bobina da testare - Spinterometro a sfera



Figura 5.0.4: Condensatore - Resistenze

5.1 Esposizione risultati interturn test

Come precedentemente svolto per la prova con impulsi di entità più modesta, ora si vogliono mettere a confronto i due sistemi di misura e capire se vi sono discordanze significative nelle curve rilevate.

Nella Tabella 5.1.1, per ogni misura, sono elencati i tre parametri caratteristici della curva impulsiva realizzata

Nella Tabella 5.1.2 vengono esposti gli scostamenti percentuali di tali valori.

Mentre le tre successive figure riportano le curve relative alla misurazione 002.

Figura N°	Misura N°	Strumento	Tempo di salita T1 [μ s]	Tempo all'emivalore T2 [μ s]	Valore di picco Vpp [V]
Figura 5.1.1 Figura 5.1.2	002	Ch2 divisore Ch4 sonda	0.13862 0.13908	7.49588 7.02248	11561 12899
	003	Ch2 divisore Ch4 sonda	0.13852 0.13705	7.52052 7.01289	11581 12885
	004	Ch2 divisore Ch4 sonda	0.13876 0.13885	7.47271 6.99109	11599 12904
	005	Ch2 divisore Ch4 sonda	0.14119 0.13780	7.49968 7.01817	11618 12907
	006	Ch2 divisore Ch4 sonda	0.13736 0.13764	7.52324 7.00579	11574 12900

Tabella 5.1.1: Interturn test su avvolgimenti campione

Figura N°	Misura N°	Differenza tempo di salita $\Delta T1\%$	Differenza tempo all'emivalore $\Delta T2\%$	Differenza valore di picco $\Delta Vpp\%$
Figura 5.1.3	002	0.333	6.32	10.4
	003	1.06	6.75	10.1
	004	0.0671	6.45	10.1
	005	2.4	6.42	9.98
	006	0.202	6.88	10.3

Table 5.1.2: Differenza percentuali dei valori di Tabella 5.1.1

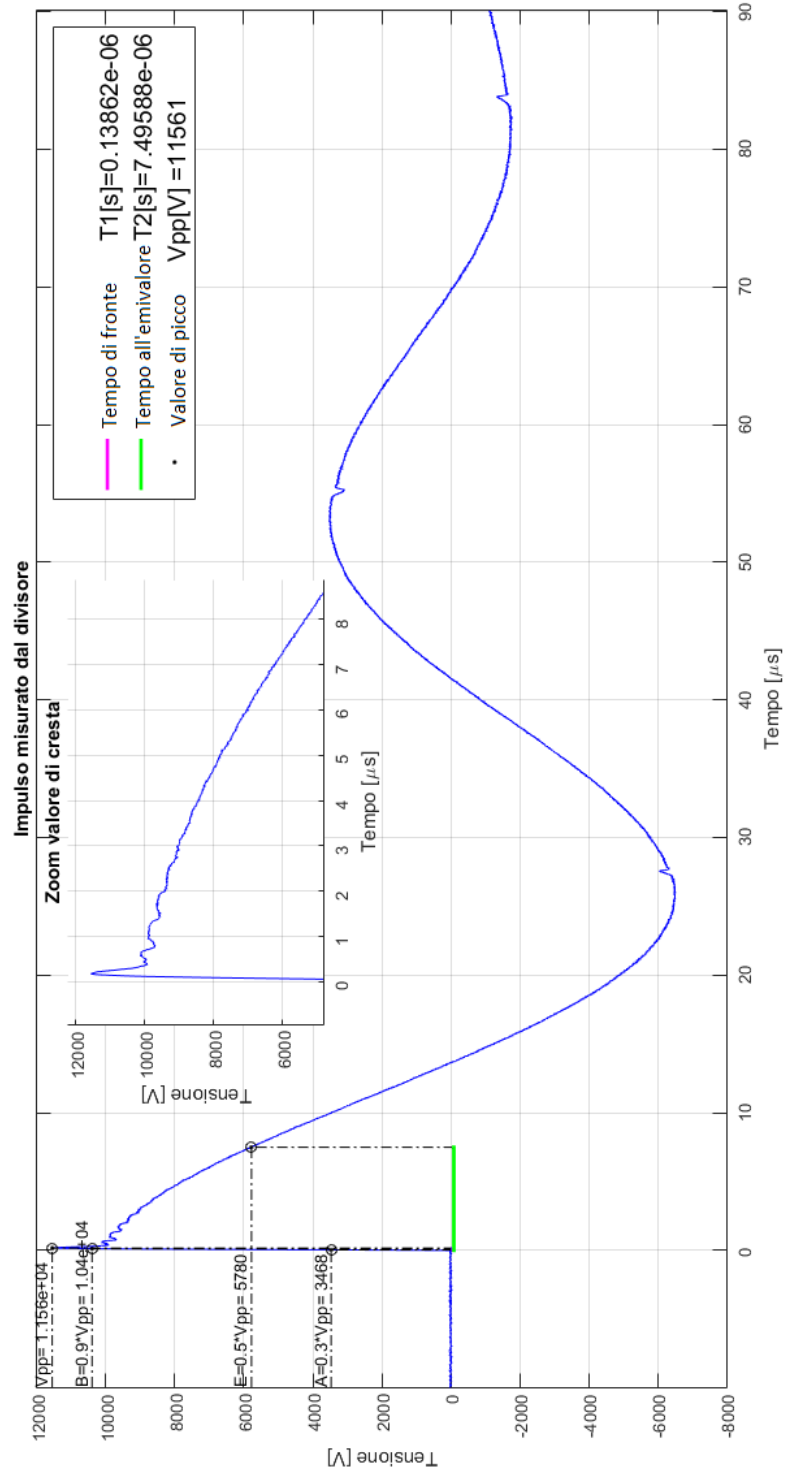


Figura 5.1.1: Misura 002 - Curva impulsiva del divisore

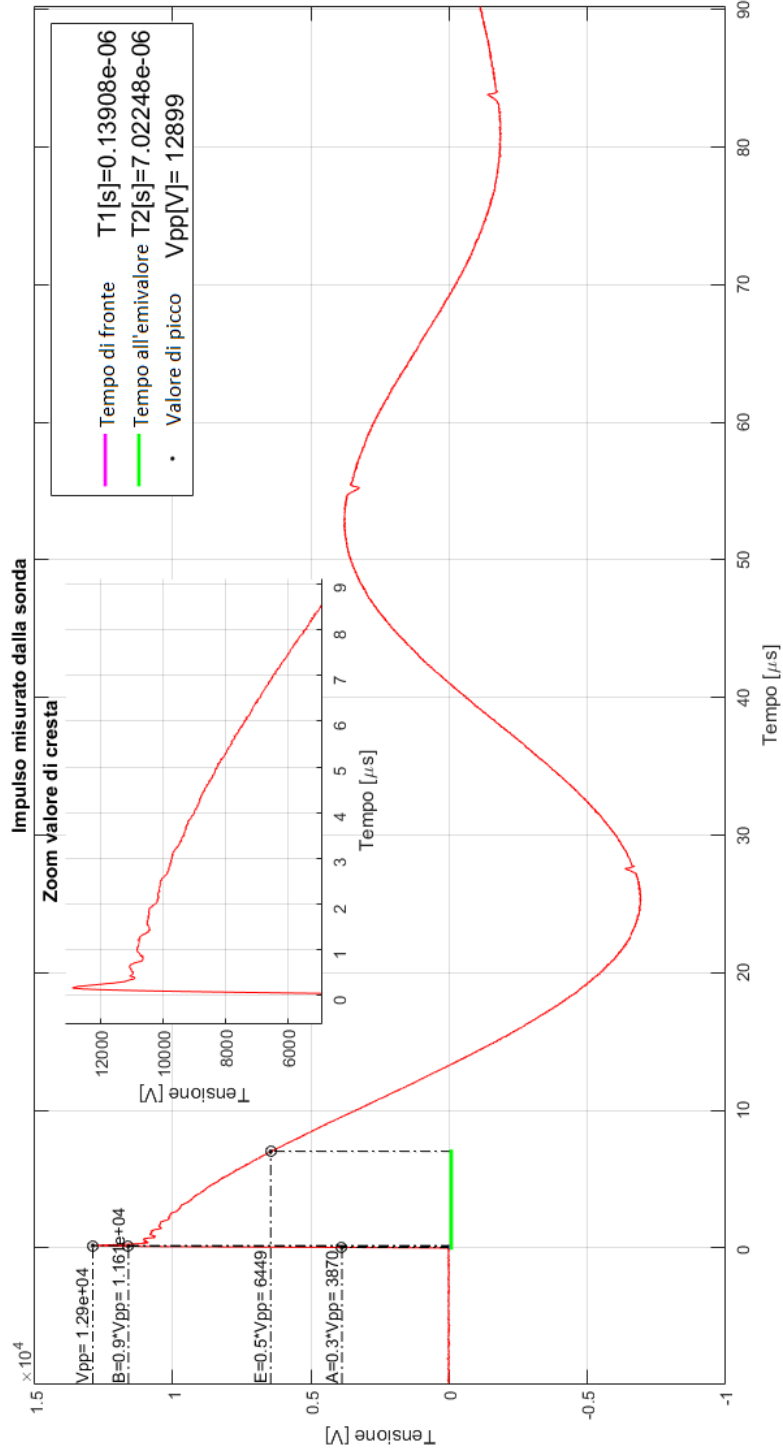


Figura 5.1.2: Misura 002 - Curva impulsiva della sonda

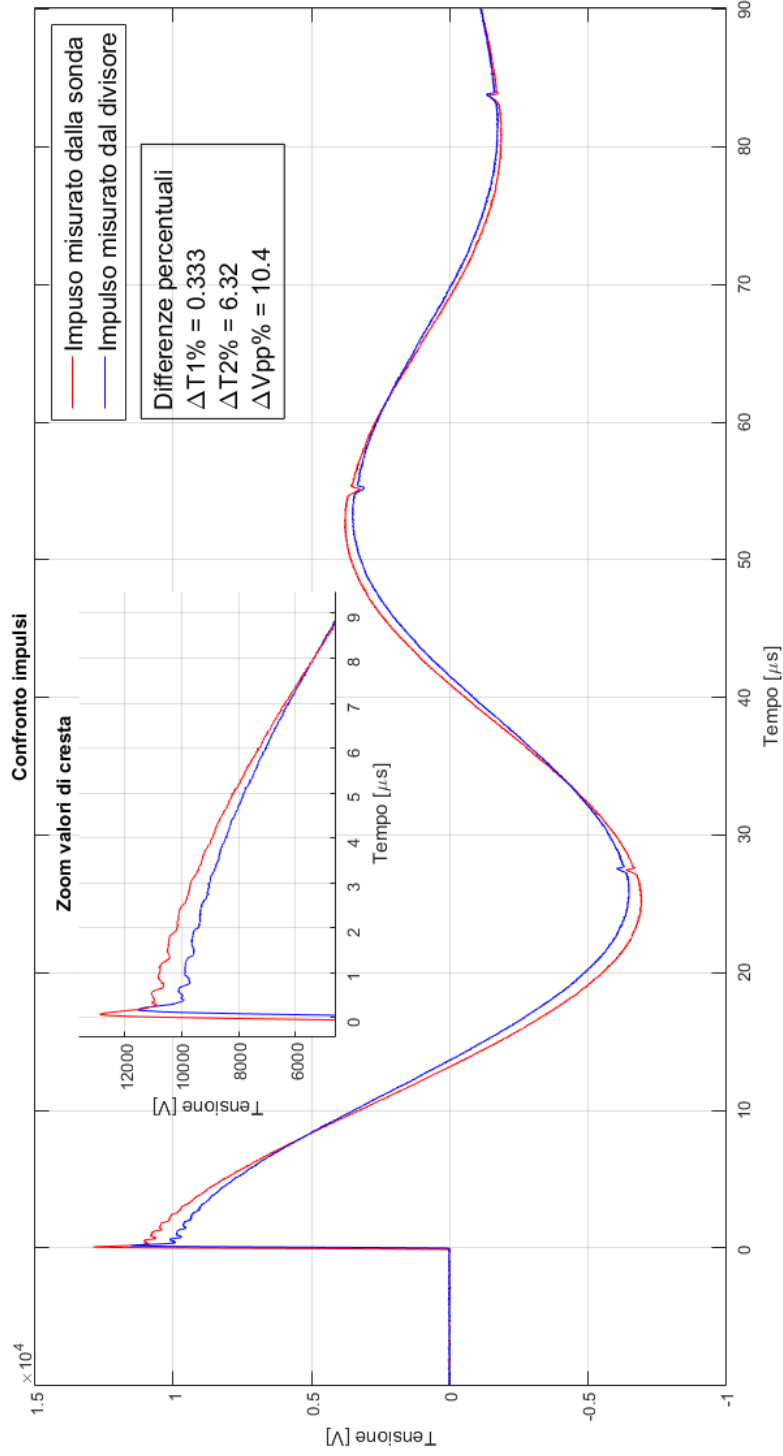


Figura 5.1.3: Misura 002 - Confronto curve

5.2 Analisi risultati interturn test

Con riferimento ai risultati riportati nella sezione precedente, sono possibili alcune considerazioni:

1. La forma d'onda è molto diversa da quelle viste in bassa tensione
2. Lo scostamento percentuale del tempo di fronte è molto basso.
3. La differenza percentuale del tempo all'emivalore si allunga rispetto a quanto visto con l'impulso di prova durante il confronto in bassa tensione.
4. Lo scostamento percentuale dei valori di cresta è molto elevato.

Le curve ottenute risultano essere diverse da quelle viste nella prova in bassa tensione in quanto la sorgente è cambiata. Mentre prima l'oggetto del test era compreso nel circuito di Marx ora l'oggetto del test è la bobina campione. La diversa forma d'onda pertanto è giustificata dalla carica di un condensatore esterno e dalla scarica dello stesso sulla bobina campione.

Il secondo ed il terzo punto, pur analizzando curve impulsive caratterizzate da valori di picco elevati (circa 11-13 kV) e da fronti di salita estremamente ripidi (circa 130 ns), sono comunque giustificati in quanto le misure delle differenze percentuali sia del tempo di fronte, sia del tempo all'emivalore sono buone e tollerate dalle norme (restano inferiori al 10%).

Ricordiamo che la capacità di rilevare correttamente il tempo di fronte è legato alla banda passante della sonda mediante l'equazione (3.2.1), mentre il tempo all'emivalore cresce leggermente rispetto a quanto visto con l'impulso di prova in quanto le caratteristiche del circuito sono tali da mantenere una estinzione della curva naturale. Nei primi 100 μ s sono pertanto presenti delle oscillazioni.

Viceversa c'è discordanza tra i valori di picco misurati con i due diversi strumenti. Strumenti che nel confronto di bassa tensione erano caratterizzati da uno scostamento percentuale non superiore al 2.6%. Ora, nelle attuali condizioni, tale valore è cresciuto fino a superare il 10% e di conseguenza non tollerato dalle norme che richiedono l'errore percentuale inferiore al 3%.

Per quanto riguarda il valore di picco, della curva impulsiva misurata dalla sonda, esso è legato al «plateau» della risposta della sonda. Evidentemente qualcosa è cambiato nella sua configurazione interna.

La situazione verificatasi non permette di proseguire con altre prove in quanto esse presenterebbero valori discordanti e non veritieri. Si tratta quindi prima di rilevare e poi di correggere gli eventuali problemi fin qui emersi.

Capitolo 6

Qualificazione del sistema di misura

Come descritto teoricamente nel Capitolo 3.1 per poter garantire e qualificare un sistema di misura, le misure eseguite devono essere tra loro tutte ripetibili e riproducibili.

Nel caso in esame questo non avviene: il sistema di misura che utilizza la sonda Tektronix P6015A non fornisce sempre risultati coincidenti con il divisore di tensione Uni_PD_01.

Sicuramente tale problema non è riconducibile al divisore di tensione Uni_PD_01 in quanto più volte tale strumento di misura è stato al centro di numerosi confronti nazionali con altri divisori di tensione del CESI e dell' INRiM. Inoltre il divisore in questione risulta schermato e quindi non presenta problemi di compensazione o sensibilità verso i campi elettromagnetici esterni.

Vista l'affidabilità del divisore di tensione resistivo Uni_PD_01 il problema è da ricercare altrove. In particolar modo sono state avanzate due ipotesi di malfunzionamento: la prima legata al sistema di rivelazione (oscilloscopio), la seconda legata alla sensibilità della sonda Tektronix P6015A.

6.1 Prima ipotesi: rilevatore di tensione

Al fine di studiare il problema sopra evidenziato, temporaneamente si è pensato di eseguire una serie di misure utilizzando sempre gli stessi strumenti (divisore di tensione e sonda), ma rilevare le misure con due sistemi differenti. In particolare:

- La sonda Tektronix P6015A collega l'oscilloscopio
- Il divisore di tensione Uni_PD_01 collega un secondo registratore elettronico presente in laboratorio (denominato Dr. Strauss).

Figura N°	Misura N°	Strumento	Valore di picco Vpp [kV]	Differenza valore di picco $\Delta V_{pp}\%$
	000	Divisore Ch4 Sonda	11.50 12.867	10.62
Figura 6.1.1 Figura 6.1.2	001	Divisore Ch4 sonda	11.48 12.857	10.71

Tabella 6.1.1: Interturn con differente strumento di rilevazione

I risultati esposti in Tabella 6.1.1 mostrano come il sistema, pur variando lo strumento di rilevazione, sia caratterizzato dallo stesso problema. I valori percentuali infatti risultano ancora estremamente elevati (superiori al 10%) e confermano quanto messo in evidenza prima.

Sia per «il sistema sonda» che per «il sistema divisore» le misure svolte di volta in volta presentano risultati simili. Entrambi i sistemi presentano caratteristiche di ripetibilità. Tuttavia continuano a discordare tra loro (riproducibilità non garantita). Si può concludere affermando che la causa di tale errore non è da attribuire al sistema di registrazione.

In Figura 6.1.1 si riporta la misura rilevata con il divisore di tensione resistivo Uni_PD_01 ed il PC del laboratorio.

Mentre in Figura 6.1.2 si riporta la curva impulsiva misurata con la sonda Tektronix P6015A e l'oscilloscopio su cui era già stata eseguita la sua calibrazione.

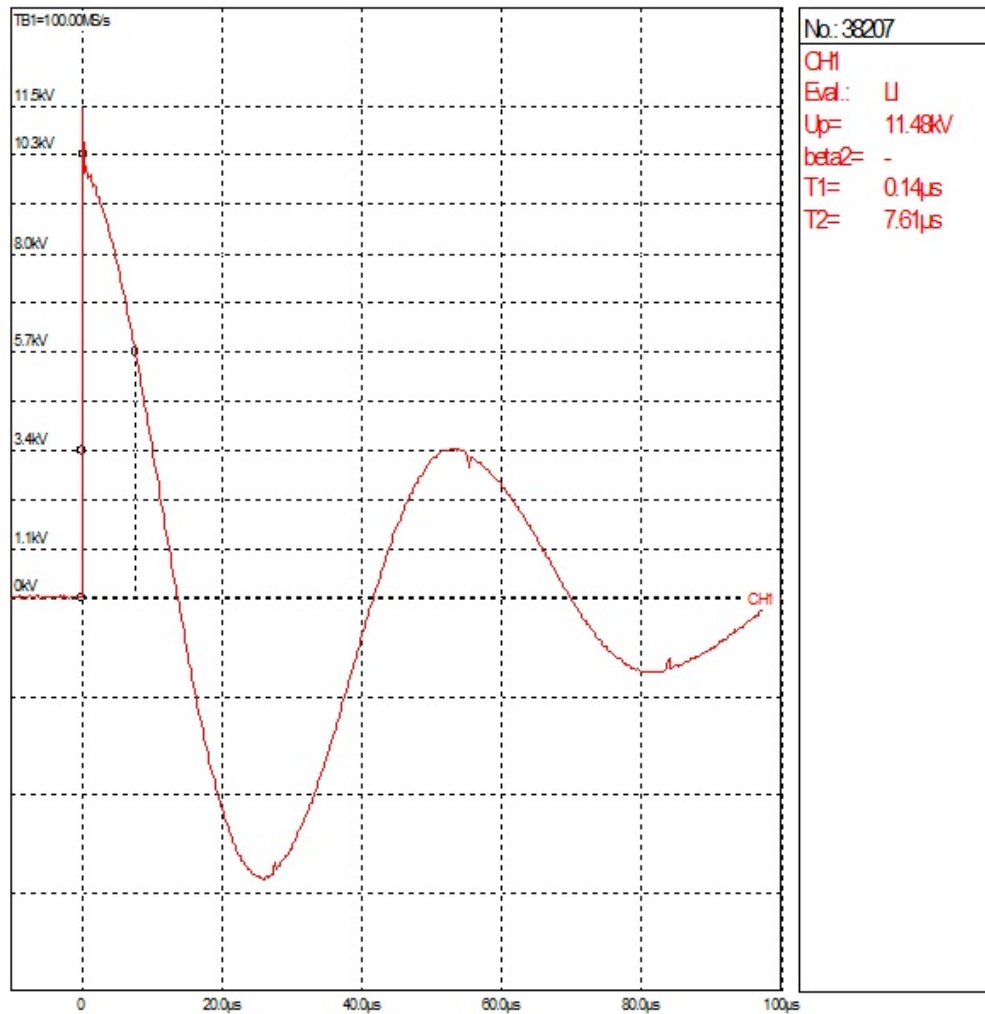


Figura 6.1.1: Rilevamento con PC laboratorio - Curva impulsiva del divisore

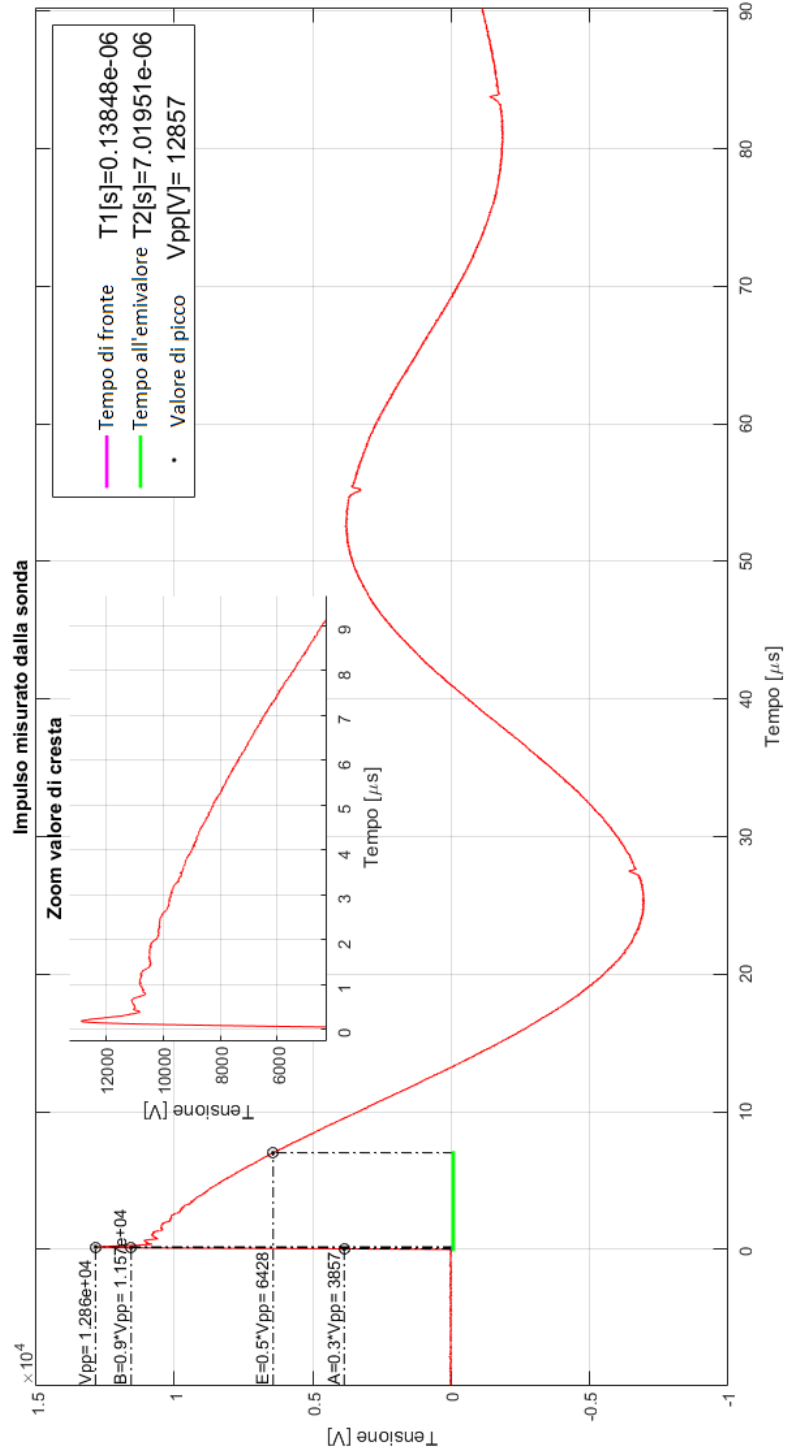


Figura 6.1.2: Rilevamento con oscilloscopio - Curva impulsiva della sonda

6.2 Seconda ipotesi: variazione della capacità di alta della sonda

Le differenze tra le prove in bassa tensione (riportate nel Capitolo 4) e le prove di alta tensione effettuate sulla bobina (descritte nel Capitolo 5) stanno nella diversa tipologia del circuito utilizzato.

È corretto affermare che circuito di Figura 5.0.2 risulta presentare caratteristiche tali da influenzare i divisori di tensione utilizzati, in particolar modo quelli non dotati di schermatura.

In particolare i campi elettromagnetici generati dagli apparecchi elettrici posti nelle vicinanze, introducono una anomalia nelle misure effettuate con la sonda Tektronix P6015A: provocano una variazione dei valori nella capacità di alta tensione situata vicino la punta della sonda.



Figura 6.2.1: Sonda Tektronix P6015A

Come raffigurato in Figura 6.2.1, la sonda Tektronix P6015A presenta nel rivestimento esterno, in vicinanza della punta, una linea tratteggiata con la dicitura «object in proximity up beyond line may degrade performance». La veridicità della dicitura è presto fatta effettuando una misura in bassa tensione con un oggetto nelle sue vicinanze e studiandone i risultati.

I risultati riportati in Tabella 6.2 1, effettuati in condizioni di bassa tensione (come descritto nel Capitolo 4), mostrano come un banalissimo oggetto metallico possa influenzare la rilevazione della sonda. Nel caso specifico tutti i valori percentuali risultano più bassi. Al fine di favorire un confronto più veloce, in tabella sono riportati solo i valori di picco.

Tuttavia la posizione dell'oggetto metallico nei paraggi della testa della sonda non può essere considerato come la soluzione al problema. Ad esempio, non è possibile, affermare che il sistema di misura sia riproducibile da un qualsiasi altro operatore a distanza di giorni. Questo perchè non è possibile riposizionare

l'oggetto metallico sempre nella stessa identica posizione.

Questa analisi ha come unico scopo quello di ribadire ulteriormente come la capacità di alta della sonda sia esposta e fortemente suscettibile dal sistema circostante.

Misura N°	Resistenza di fronte $R_F[\Omega]$	Capacità di fronte $C_F[\text{nF}]$	Strumento	Valore di picco V_{pp} [V] Senza oggetto in prossimità	Differenza valore di picco $\Delta V_{pp}\%$ Senza oggetto in prossimità	Valore di picco V_{pp} [V] Con oggetto in prossimità	Differenza valore di picco $\Delta V_{pp}\%$ Con oggetto in prossimità
000 e 004	100	4.4	Ch2 divisore Ch4 sonda	624.6 634.0	1.49	622.1 614.8	1.18
001 e 005	5	0.5	Ch2 divisore Ch4 sonda	718.9 737.4	2.5 Figura 6.2.2	731.3 7254	0.81 Figura 6.2.3
002 e 006	10	1	Ch2 divisore Ch4 sonda	724.2 741.9	2.39	730.5 723.3	0.982
003 e 007	200	2.2	Ch2 divisore Ch4 sonda	602.1 609.1	1.15	627.7 628.8	0.175

Tabella 6.2.1: Confronto valori di picco con e senza oggetto metallico nelle vicinanze

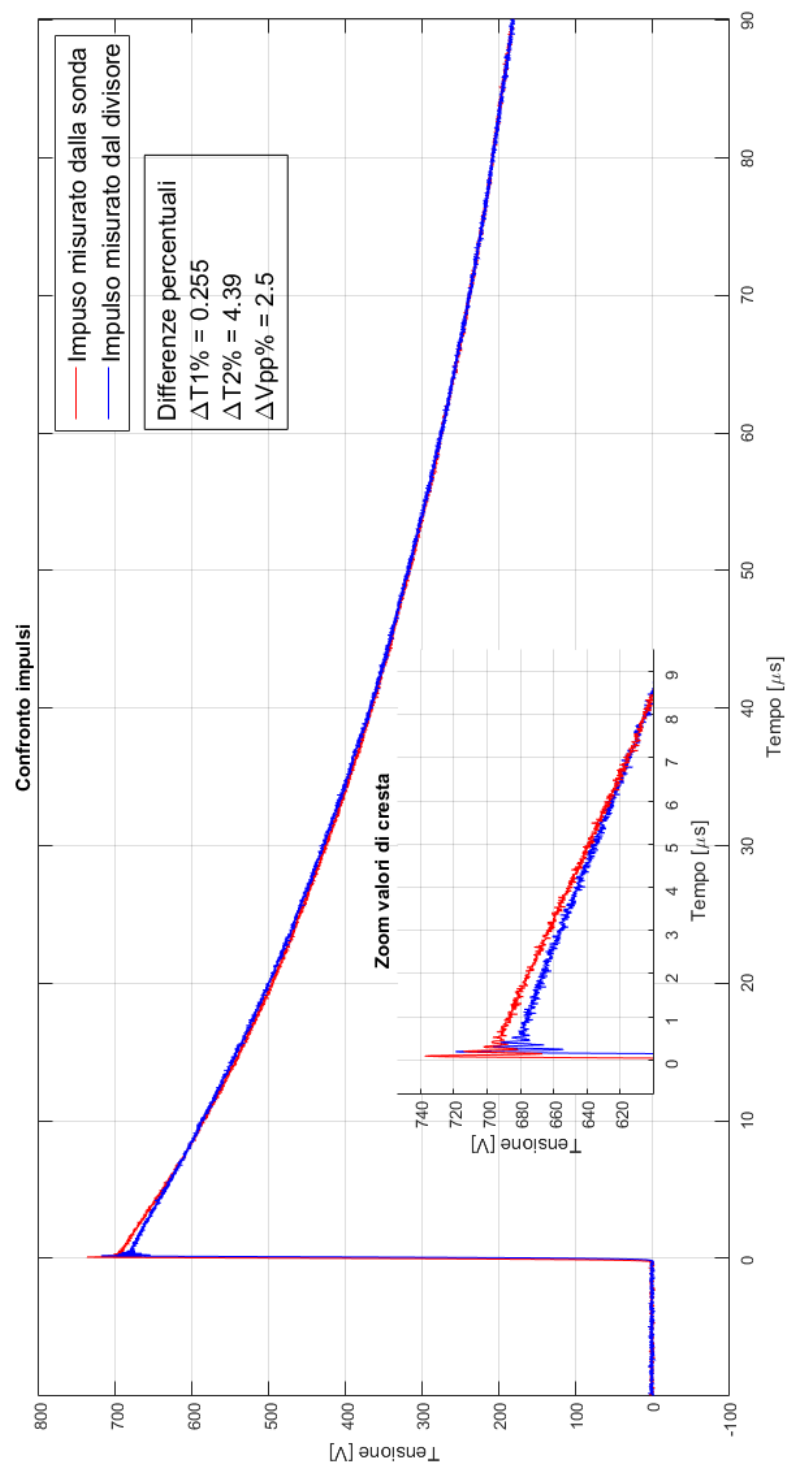


Figura 6.2.2: Misura 001- Confronto curve - Senza oggetto metallico

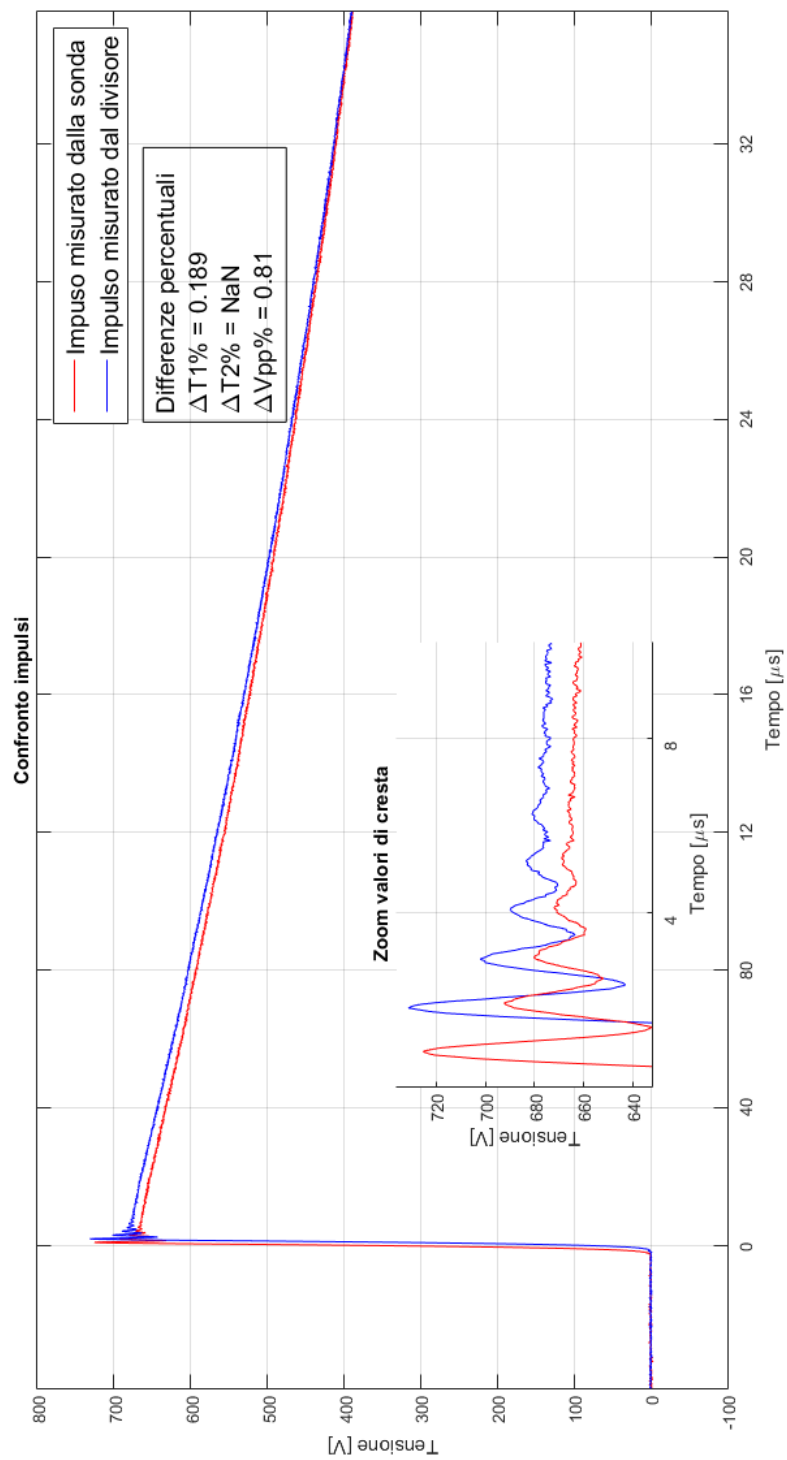


Figura 6.2.3: Misura 005- Confronto curve - Con oggetto metallico

6.3 Soluzione adottata

Al fine di aggiustare la risposta della sonda si è pensato di modificare gli accoppiamenti capacitivi del ramo di alta andando a schermare la parte anteriore del dispositivo.

Per fare questo si è utilizzato un coperchio metallico presente in laboratorio, gli si è praticato un foro al centro, e quindi è stato fermamente collegato alla punta della sonda (Figura 6.3.1).

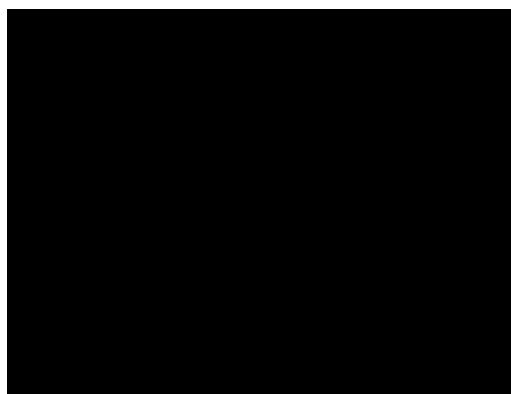


Figura 6.3.1: Sonda Tektronix P6015A con schermo metallico

Adottare una precauzione di questo tipo va a modificare fin da subito quella che è stata la risposta a gradino della sonda. Pertanto è stato necessario procedere con cautela andando ad eseguire una seconda compensazione, ripercorrendo i passi evidenziati nel Capitolo 3. In particolare si è ritenuto di: attenuare la componente DC, compensare la risposta di bassa ed alta frequenza.

Capitolo 7

Interturn test finale

Una volta eseguiti gli accorgimenti e schermato la sonda Tektronix P6015A, si può procedere alla prova interturn. Il circuito usato resta sempre quello di Figura 5.0.2, solo per facilità di lettura a seguito si riporta Figura 5.0.1 come Figura 7.0.1.

Per ogni configurazione realizzata vengono fatte 5 misure. Si è scelto di analizzare il comportamento di un avvolgimento avente tensione nominale $U_n = 3kV$. Quindi, in accordo con la normativa EN 60030-15 (Tabella 2.3) si sceglie una tensione teorica di picco pari a $U'_n = 0.65(4U_n + 5) \approx 11 \div 12kV$.

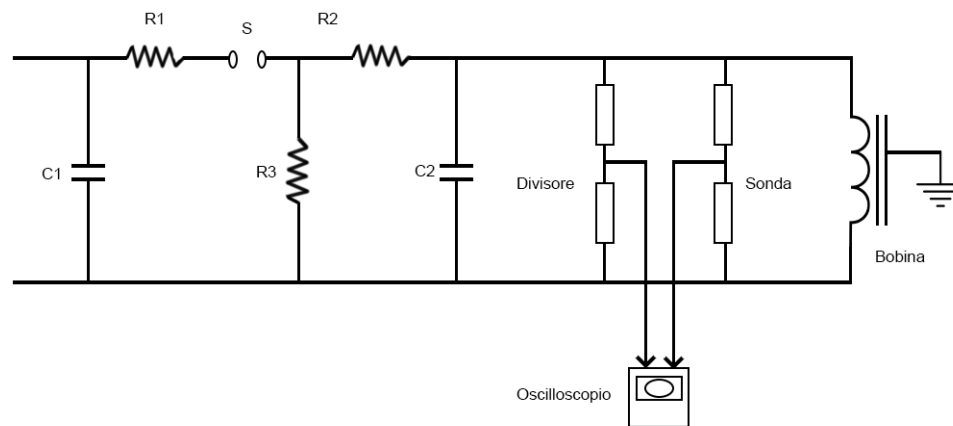


Figura 7.0.1: Schema interturn test

7.1 Prima configurazione - impulso standard 1,2/50 μ s

La prima configurazione prevede l'installazione dei seguenti componenti: C1=200nF, R1=5 Ω , C2=2nF, R2=500 Ω

Misura N°	Strumento	Tempo di salita T1 [μ s]	Tempo all'emivalore T2 [μ s]	Valore di picco Vpp [V]	Differenza valore di picco Δ Vpp%
000	Ch2 divisore	0.90050	49.11446	9584	2.17
	Ch4 sonda	0.88721	48.95837	9796	
001	Ch2 divisore	0.90283	49.17120	9588	2.36
	Ch4 sonda	0.89318	48.79388	9820	
002	Ch2 divisore	0.90263	49.48048	9580	2.25
	Ch4 sonda	0.89633	49.11340	9800	
003	Ch2 divisore	0.90731	49.19630	9587	2.15
	Ch4 sonda	0.89604	49.03304	9798	
004	Ch2 divisore	0.90926	49.23121	9596	2.03
	Ch4 sonda	0.88902	49.12036	9794	

Tabella 7.1.1: Esposizione risultati - prima configurazione

7.2 Seconda configurazione - impulso fronte ripido

La prima configurazione prevede l'installazione dei seguenti componenti: C1=200nF, R1=5 Ω , C2=2nF, R2=150 Ω

Misura N°	Strumento	Tempo di salita T1 [μ s]	Tempo all'emivalore T2 [μ s]	Valore di picco Vpp [V]	Differenza valore di picco Δ Vpp%
000	Ch2 divisore	0.18553	4.83518	11582	2.07
	Ch4 sonda	0.19616	4.80355	11828	
001	Ch2 divisore	0.18510	4.82550	11575	1.88
	Ch4 sonda	0.19400	4.82125	11797	
002	Ch2 divisore	0.18362	4.83281	11541	2.44
	Ch4 sonda	0.19593	4.80667	11829	
003	Ch2 divisore	0.18357	4.84087	11353	2.42
	Ch4 sonda	0.19505	4.9124	11822	
004	Ch2 divisore	0.18090	4.85259	11545	2.3
	Ch4 sonda	0.19492	4.81672	11818	

Figura 7.2.1: Esposizione risultati - seconda configurazione

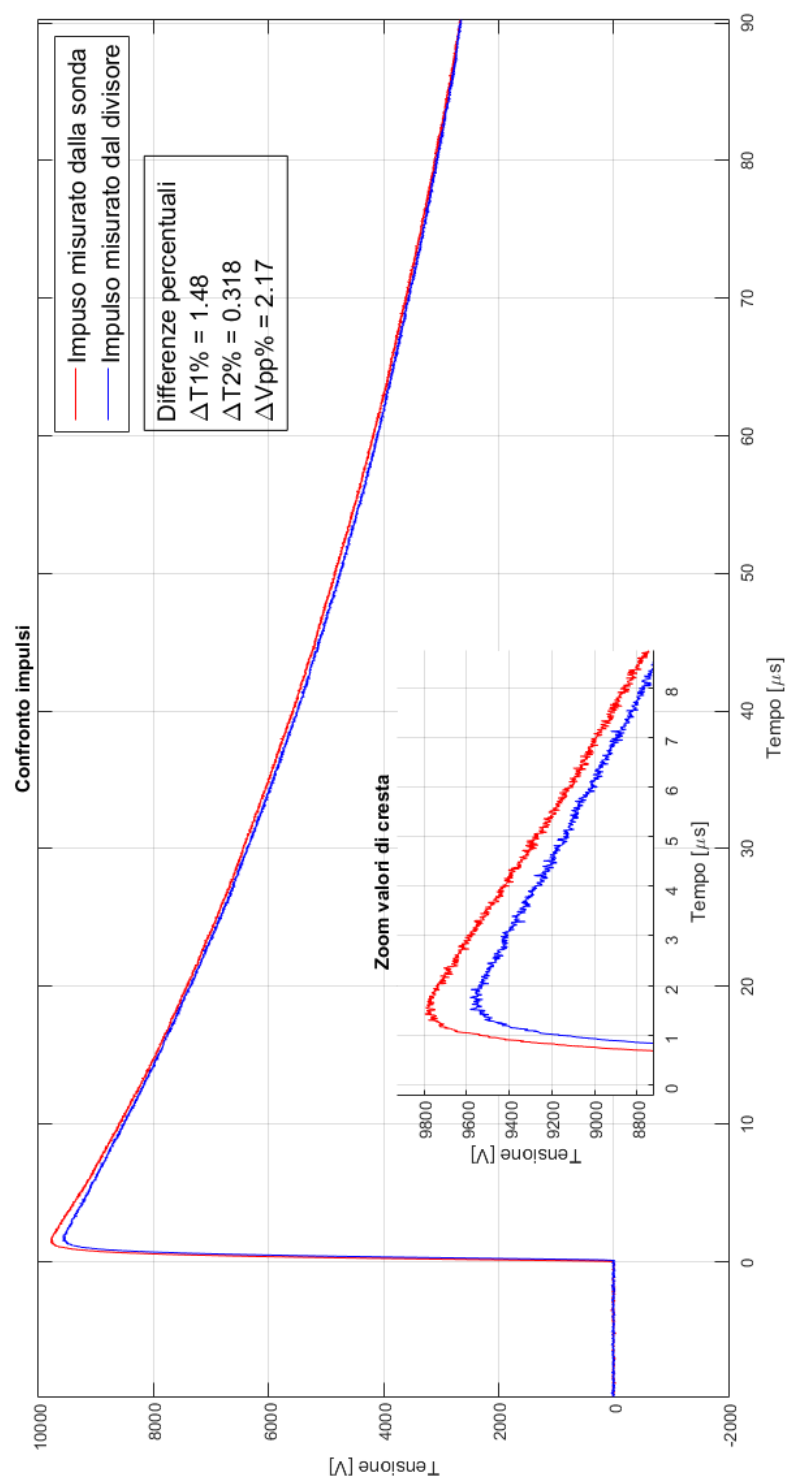


Figura 7.2.2: Prima configurazione - Misura 000

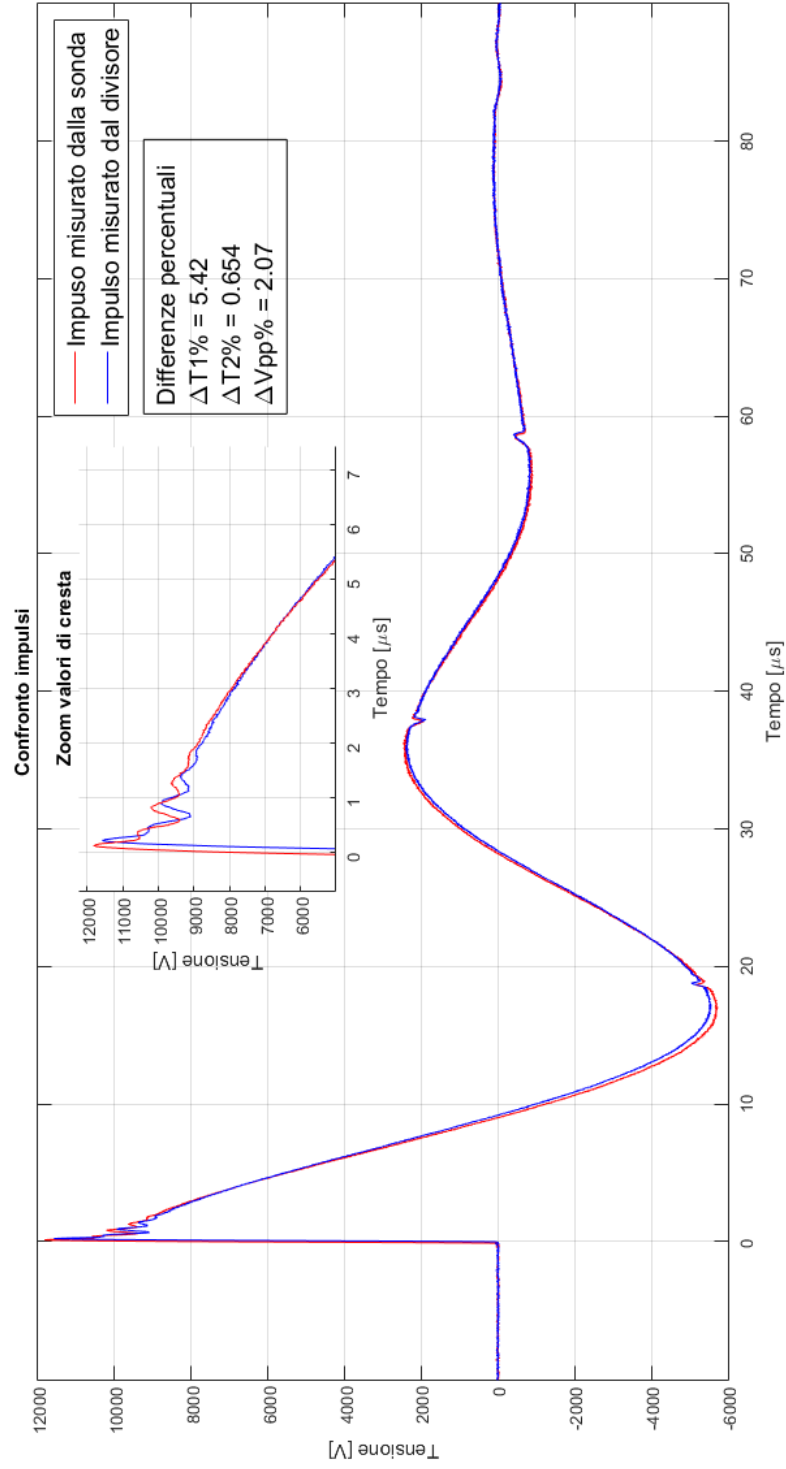


Figura 7.2.3: Seconda configurazione - Misura 000

7.3 Terza configurazione - impulso aggiuntivo

La prima configurazione prevede l'installazione dei seguenti componenti: C1=200nF, R1=5Ω, C2=2nF, R2=200Ω

Misura N°	Strumento	Tempo di salita T1 [μs]	Tempo all'emivalore T2 [μs]	Valore di picco Vpp [V]	Differenza valore di picco ΔVpp%
000	Ch2 divisore	1.52385	50.50866	9304	1.87
	Ch4 sonda	1.50481	50.53719	9482	
001	Ch2 divisore	1.53748	50.78542	9308	1.87
	Ch4 sonda	1.51775	50.92248	9486	
002	Ch2 divisore	1.53858	50.89004	9305	1.98
	Ch4 sonda	1.51918	50.63341	9493	
003	Ch2 divisore	1.53915	50.7357	9304	2.04
	Ch4 sonda	1.51015	50.73024	9497	
004	Ch2 divisore	1.52573	50.75219	9301	2.1
	Ch4 sonda	1.52902	50.64577	9500	

Tabella 7.3.1: Esposizione risultati - terza configurazione

7.4 Quarta configurazione - impulso a fronte più lungo

La prima configurazione prevede l'installazione dei seguenti componenti: C1=200nF, R1=5Ω, C2=2nF, R2=310Ω

Misura N°	Strumento	Tempo di salita T1 [μs]	Tempo all'emivalore T2 [μs]	Valore di picco Vpp [V]	Differenza valore di picco ΔVpp%
000	Ch2 divisore	1.86310	51.02326	9100	1.87
	Ch4 sonda	1.82309	51.00896	9273	
001	Ch2 divisore	1.86193	50.96744	9103	1.77
	Ch4 sonda	1.82122	51.09071	9268	
002	Ch2 divisore	1.84045	51.22236	9104	1.8
	Ch4 sonda	1.81440	51.42593	9271	
003	Ch2 divisore	1.85377	51.06357	9100	1.85
	Ch4 sonda	1.80431	51.30757	9272	
004	Ch2 divisore	1.86455	50.98608	9108	1.8
	Ch4 sonda	1.82540	51.33081	8275	

Tabella 7.4.1: Esposizione risultati - quarta configurazione

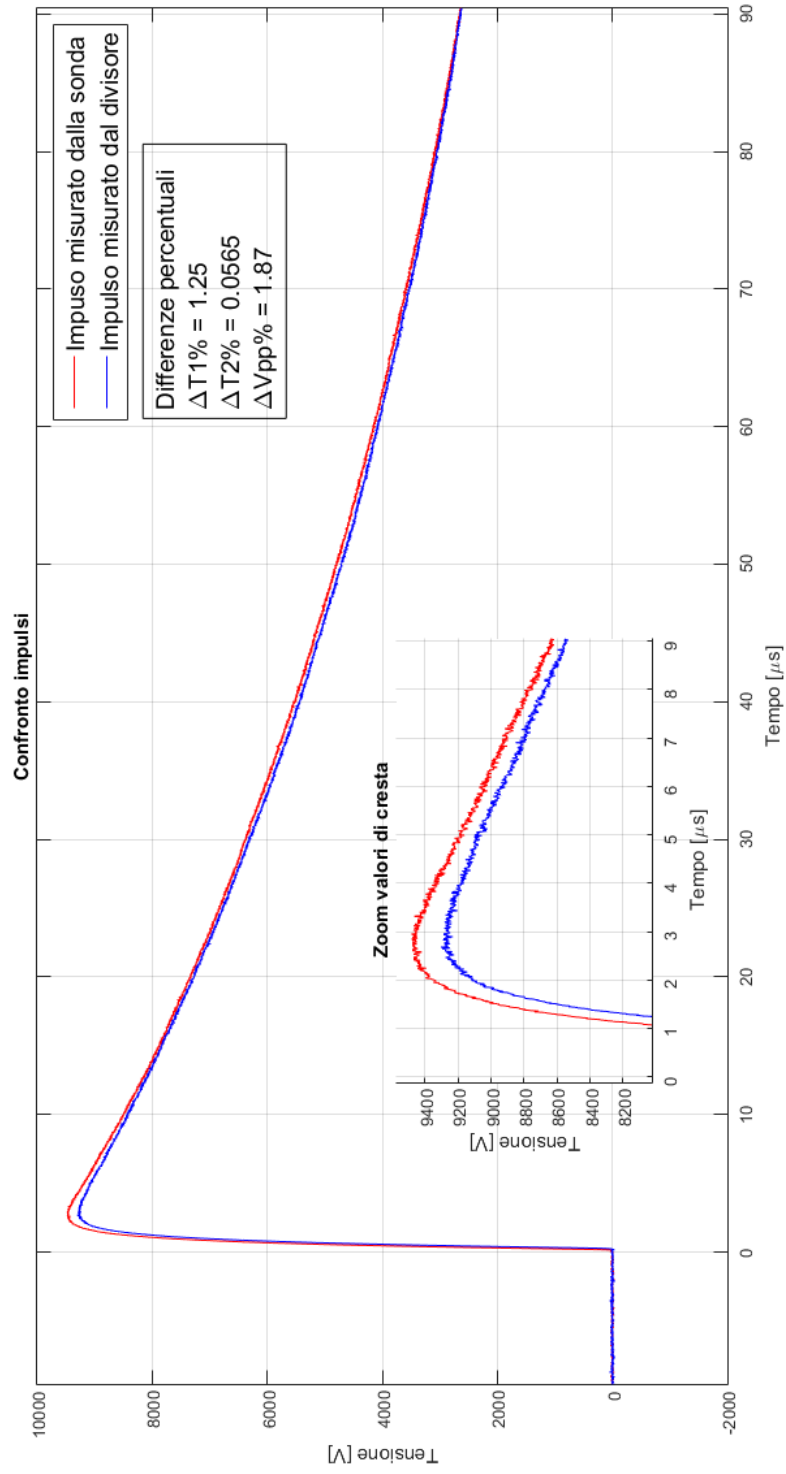


Figura 7.4.1: Terza configurazione - Misura 000

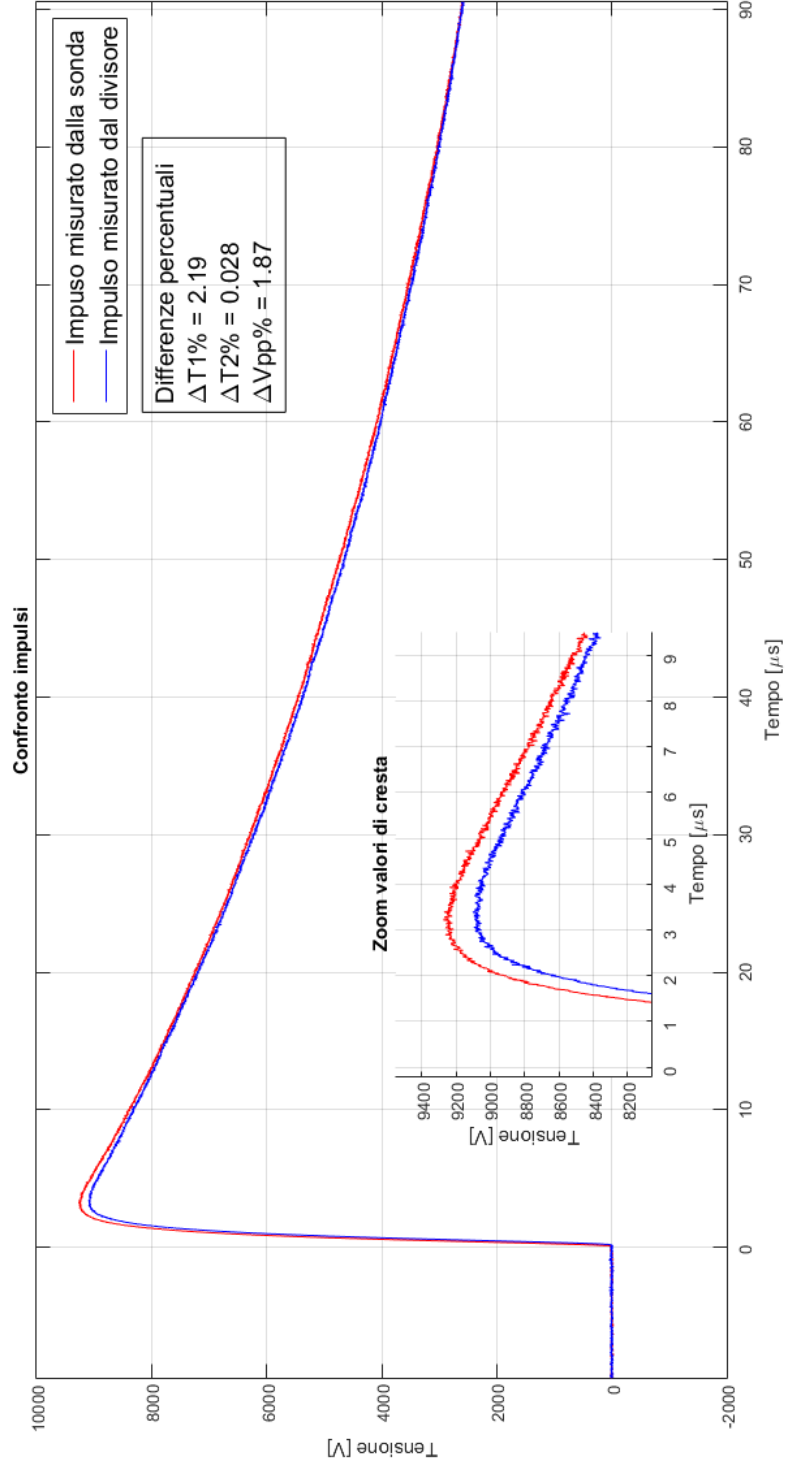


Figura 7.4.2: Quarta configurazione - Misura 000

Tutte le misure effettuate con le quattro configurazioni differenti mostrano come i valori di differenza percentuale de valori di picco ($\Delta V_{pp}\%$) siano inferiori al 3% (voluta dalla normativa). È corretto affermare quindi che la presenza dello schermo metallico a protezione della capacità di alta della sonda da 3pF sia in grado di schermare i campi elettromagnetici circostanti.

7.5 Quinta configurazione - scaricatore di tensione

In questo caso i parametri restano gli stessi della seconda configurazione (quella a fronte molto ripido) ma viene installato uno scaricatore di tensione in parallelo a R2. Come si può notare in Figura 7.5.1 la parte alta della curva viene completamente smorzata. Questo avviene proprio perchè lo scaricatore di tensione interviene tempestivamente a bloccare sovratensioni e oscillazioni di tensione.

In ogni caso, anche con questo accorgimento le due curve campionate risultano avere un simile andamento.

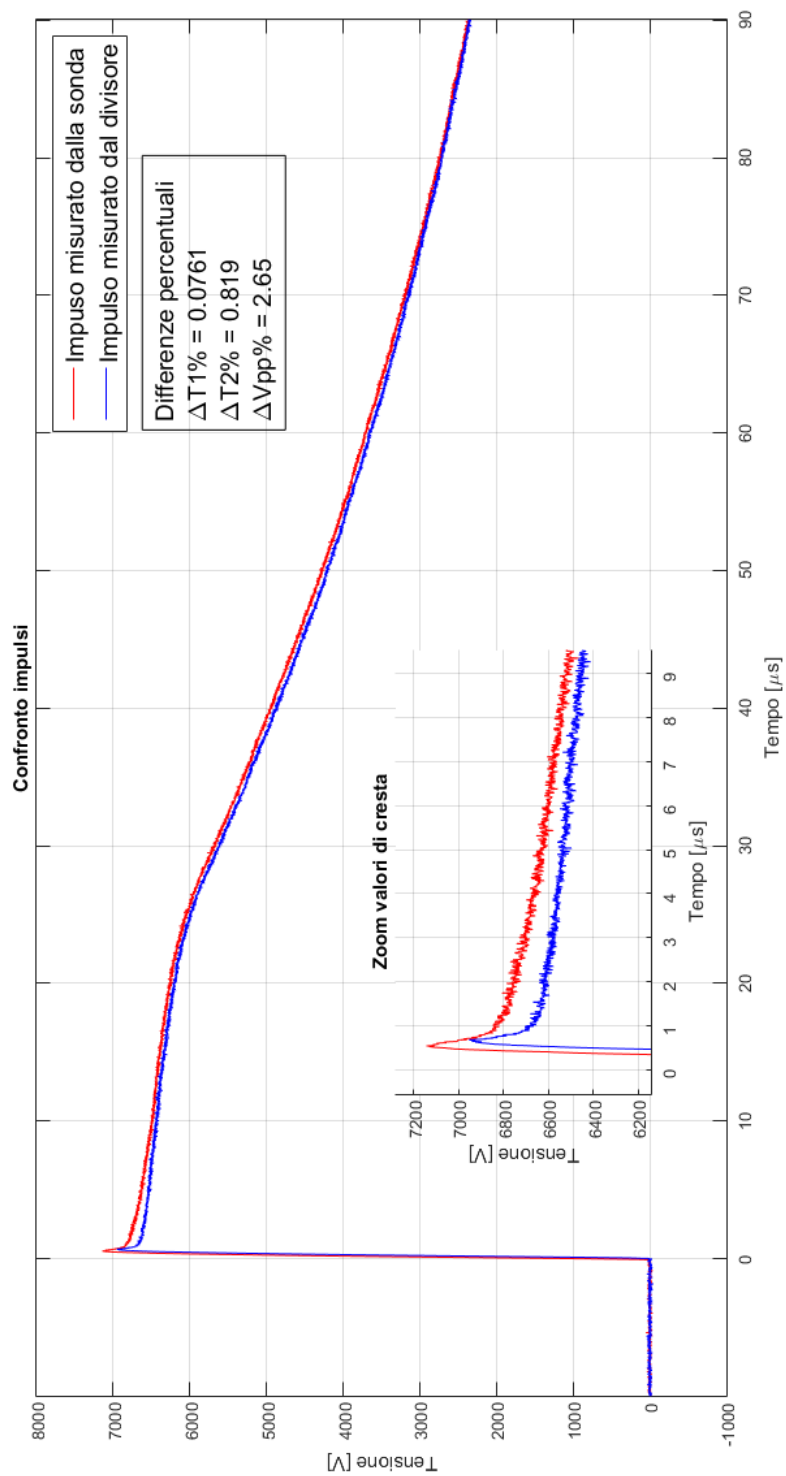


Figura 7.5.1: Quinta configurazione - Misura 000

Conclusioni

In conclusione, seppur con alcuni imprevisti, si è riusciti a qualificare un sistema di misura garantendone l'affidabilità, la ripetibilità e la riproducibilità in accordo con le normative vigenti.

Al termine delle analisi riportate nel Capitolo 7 si può affermare che la sonda Tektronix P6015A risulta essere un buon dispositivo di misurazione dove non sono presenti capacità parziali verso terra..

Ricordiamo che la sonda è di un dispositivo commerciale il cui prezzo di listino è di circa 2700 euro. Chi non dispone di un secondo sistema di misura utilizza questa sonda sia per misurare segnali di tipo continuo fino a 20kV sia per rilevare impulsi di tensione fino a un massimo di 40kV. Essa inoltre presenta una banda passante di 75MHz e un fattore di scala importante pari a 1000. Valori sulla carta sicuramente migliori rispetto al divisore resistivo qualificato Uni_Pd_01 a cui è attribuita una banda passante di 25MHz e un fattore di scala di circa 150.

Avere una banda passante di frequenza superiore comporta la possibilità di rilevare fronti d'onda impulsivi più veloci.

Tuttavia si è visto come la regolazione e compensazione della sonda non sia banale. Oltre non essere semplice agire sulle cinque regolazioni della scatola di compensazione, bisogna prestare attenzione anche al tipo di circuito presente. Questo perchè una compensazione eseguita correttamente in bassa tensione non risulta affidabile qualora la stessa sonda venga introdotta in un circuito di alta tensione dove vi sono presenti possibili capacità parziali e campi elettromagnetici.

Fattori che congiuntamente causano una variazione della risposta della sonda. Si riscontra infatti che la sonda Tektronix P6015A nei primi tre centimetri non è adeguatamente schermata, questo comporta una maggior sensibilità della capacità di alta (presente all'interno del dispositivo). Così facendo non si ha quindi alcun controllo sulla sua risposta e sui valori da essa misurati.

D'altra parte il divisore di tensione resistivo utilizzato è stato costruito proprio con l'idea di misurare tensioni impulsive e pertanto essendo internamente schermato verso possibili capacità parziali risulta molto affidabile per questa tipologia di prove. L'unico svantaggio è rappresentato dal suo ingombro fisico di circa un metro che lo rende difficilmente trasportabile

Conclusioni

Viceversa la sonda Tektronix P6015A oggi è uno dei principali strumenti utilizzati per effettuare test e misurazioni in quanto risulta essere compatta, facilmente trasportabile e semplice da collegare al circuito.

Come visto nelle analisi riportate nel precedente capitolo, attraverso l'utilizzo di un semplice coperchio metallico, anche in presenza di capacità parziali, si sono ottenuti risultati soddisfacenti mantenendo la differenza percentuale del valore di picco al di sotto del 3% (valore imposto dalle normative).

Si suggerisce pertanto al costruttore del dispositivo (Tektronix, Inc) di provvedere alla realizzazione di un coperchio metallico in grado di schermare la capacità di alta tensione dello stesso dispositivo. Quindi di metterlo in commercio e di fornirlo in dotazione a tutte le sonde di questa tipologia che come visto risultano essere facilmente influenzabili.

Bibliografia

- [1] V. Jayasree, Babita Nanda, Dr. B.P. Singhe
"Transient over Voltage Due to Switching Operation of Industrial Motor by Vacuum Circuit Breaker and Suppression of Surge"
International Journal of Science and Research (IJSR), 9 settembre 2014
- [2] Puranik K.K.
"Important aspects of Inter turn Insulation in High Voltage Motors"
International Journal of Science and Research (IJSR), 18 maggio 2013
- [3] C. Vollet, B. de Metz Noblat
"Protecting High-Voltage Motors Against Switching Overvoltages"
Conference Paper of Schneider Electric, 11 marzo 2003
- [4] *BSI Standards Publication*
BS EN 60034-15:2009, "Rotating electrical machines"
Part 15: Impulse voltage withstand levels of form-wound stator coils for rotating a.c. machines
- [5] *BSI Standards Publication*
BS EN 60060-1:2010, "High-voltage test techniques"
Part 1: General definitions and test requirements
- [6] *BSI Standards Publication*
BS EN 60060-2:2011, "High-voltage test techniques"
Part 2: Measuring systems
- [7] *IEEE Power Engineering Society*
IEEE 522-2004 (R2009),
"IEEE Guide for Testing Turn Insulation of Form-Wound Stator Coils for Alternating-Current Electric Machines"

BIBLIOGRAFIA

- [8] *British Standard Publication*
BS 923-1: 1990, "High-voltage testing techniques"
Part 1: General
Sostituita dalla BS EN 60060
- [9] *British Standard Publication*
BS 923-1: 1980, "High-voltage testing techniques"
Part 2: Test procedures
Sostituita dalla BS EN 60060
- [10] *British Standard Publication*
BS 923-1: 1980, "High-voltage testing techniques"
Part 3: Measuring devices
Sostituita dalla BS EN 60060
- [11] *British Standard Publication*
BS 923-1: 1980, "High-voltage testing techniques"
Part 4: Application guide for measuring devices
Sostituita dalla BS EN 60060
- [12] Kiameh, Philip
Electrical Equipment Handbook : Troubleshooting and Maintenance
McGraw-Hill Professional Pub
London (GB), Aprile 2003
- [13] G. Zingales
Misure sulle macchine e sugli impianti elettrici
C.L.E.U.P. Coop.Libraria Editrice Università d Padova
Padova (I), Marzo 1977
- [14] W. Hauschild, E. Lemke
High-Voltage Test and Measuring Techniques
Springer Heidelberg New York Dordrecht London
Dresden (D), Ottobre 2013
- [15] K. Schon
High Impulse Voltage and Current Measurement Techniques
Springer Cham Heidelberg New York Dordrecht London
Braunschweig (D), Marzo 2013
- [16] Tektronix
Instruction Manual P6015A: 1000X High Voltage Probe
Beaverton (USA)
- [17] Prof. C. Mazzetti di Pietralata
Appunti di Tecnica delle Alte Tensioni

Ringraziamenti

In queste poche righe desidero ringraziare chi mi ha aiutato nella scrittura della tesi e tutti coloro che mi sono stati vicini in questi anni universitari.

A partire dal Prof. Renato Gobbo che ringrazio sia per il tempo speso nel seguirmi durante le misure condotte nel Laboratorio di Alte Tensioni, sia per la pazienza e cortesia dedicatami nella stesura di questo elaborato.

Preziosi riconoscimenti vanno spesi verso:

- La mia famiglia per avermi supportato, sostenuto e stimolato nell'affrontare questo nuovo percorso di studi, oggi concluso.
- La mia ragazza Marta per essermi sempre stata accanto anche quando la voglia di studiare veniva meno e per il prezioso aiuto grafico.
- I compagni di corso e gli amici di sempre per aver reso gioiosi e sereni i momenti di studio più difficili.
- Grazie inoltre al Gruppo Scout AGESCI Padova 4, alla Comunità Capi e alla Staff per la lunga strada percorsa assieme.

Matteo Peruzzi