

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA



FACOLTÀ DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA TRIENNALE IN INGEGNERIA ELETTRONICA

TESINA

CARATTERIZZAZIONE DI UN CIRCUITO DI INNESCO
PER GENERATORI AD IMPULSO

*Relatore: Prof. Ing. Giancarlo Pesavento
Dipartimento di Ingegneria elettrica*

LAUREANDO
CRIVELLARO DAVIDE

ANNO ACCADEMICO 2010/2011

"The future belongs to those who believe in the beauty of their dreams."

Anna Eleanor Roosevelt

Sommario

1 GENERAZIONE DI ALTE TENSIONI	7
1.1 INTRODUZIONE	7
1.2 TENSIONI IMPULSIVE.....	8
1.3 GENERATORI DI ALTE TENSIONI AD IMPULSO	9
1.4 DETERMINAZIONE DI T_1 E DI T_2	9
2 GENERAZIONE DI TENSIONI IMPULSIVE.....	13
2.1 CIRCUITI A SINGOLO STADIO CHE GENERANO TENSIONI IMPULSIVE.....	13
2.2 PARAMETRI CARATTERISTICI DI UN GENERATORE DI IMPULSI.....	14
2.3 ANALISI DEL CIRCUITO A SINGOLO STADIO	15
2.4 CIRCUITO DI MARX.....	17
2.5 PROBLEMI RELATIVI ALLA TENUTA DIELETTRICA IN PRESENZA DI TENSIONI IMPULSIVE.....	19
3 INNESCO DI UN GENERATORE AD IMPULSI	23
3.1 INTRODUZIONE	23
3.2 TRIGATRON.....	23
3.3 CURVE CARATTERISTICHE DEL TRIGATRON	24
3.4 CIRCUITO DI INNESCO.....	26
4 MECCANISMI FISICI DI SCARICA.....	27
4.1 APPARATO SPERIMENTALE	27
4.2 STREAMER.....	27
5 LEGGE DI PASCHEN.....	30
5.1 LEGGE DI PASCHEN.....	30
6 TEST E RISULTATI.....	33
6.1 GENERATORE DI MARX DEL LABORATORIO	33
6.2 VERIFICA DELLA LINEARITÀ DEL DISPOSITIVO DI CONTROLLO DELLA CARICA E TRIGGER.....	35
6.3 INNESCO DEL GENERATORE	36
6.4 MODALITÀ DI ESECUZIONE DELLE PROVE	37
6.5 CONCLUSIONI.....	40
APPENDICE A – PROVE DI INNESCO.....	41
APPENDICE B – NORME CEI DI RIFERIMENTO.....	48
BIBLIOGRAFIA	49

Introduzione

Questa tesina descrive le prove, effettuate presso il laboratorio di Alte Tensioni del DIE dell'Università di Padova, atte a caratterizzare un nuovo dispositivo di controllo della carica e dell'innesco per generatori di impulsi. L'obiettivo era di verificare la linearità e le caratteristiche di controllo del dispositivo stesso nel comandare il generatore di Marx presente in laboratorio, al variare delle condizioni operative (polarità e valori delle tensioni) del generatore e del circuito di controllo stesso. Il funzionamento di un generatore di Marx e la descrizione di quello presente nei laboratori sarà ampiamente affrontato nel presente lavoro, altresì saranno descritte le modalità ed i risultati ottenuti dalle prove effettuate.

Capitolo 1

Generazione di alte tensioni

1.1 Introduzione

I generatori per alte tensioni¹ sono utilizzati nei laboratori per effettuare prove elettriche di routine o di tipo su apparecchiature quali ad esempio trasformatori, isolatori, cavi, condensatori, interruttori di manovra ecc.. Nei test occorre sollecitare i materiali e le apparecchiature con tensioni che riproducano, in valore e forma, le tensioni di esercizio, sia in funzionamento normale che durante i transitori. Le tensioni impiegate in queste prove possono essere:

- Tensioni continue
- Tensioni alternate a frequenze industriali
- Tensioni alternate ad alta/bassa frequenza
- Tensioni transitorie (tensioni impulsive che riproducono le sovratensioni di origine atmosferica e quelle di manovra)

Le alte tensioni usate nei test di laboratorio sono prodotte da opportuni generatori caratterizzati dai seguenti parametri:

- potenza reale o apparente, richiesta dall'oggetto in prova, che determina il dimensionamento del generatore dal punto di vista termico;
- impedenza interna, per i suoi effetti sui transitori e sulla limitazione della corrente di corto circuito;
- mantenimento della forma della tensione d'uscita e della forma della corrente assorbita;
- regolazione della sua tensione d'uscita con finezza e gradualità.

A seconda del tipo di prova richiesta sull'oggetto, si possono avere generatori di alte tensioni continue, alternate od impulsive. Nel seguito si prenderà in considerazione solo il generatore di alte tensioni impulsive.

¹ In seguito con "alta tensione" (H.V.) si indicheranno tensioni con valori superiori al kV. Per la suddivisione in categorie si veda l'Appendice B.

1.2 Tensioni impulsive

I disturbi nei sistemi di trasmissione e di distribuzione dell'energia elettrica sono generalmente causati da due tipi di *sovratensioni transitorie di breve durata*, la cui ampiezza può superare di molto il valore della normale tensione di esercizio. Il primo tipo sono le sovratensioni atmosferiche, originate dai fulmini, con ampiezze dell'ordine dei 1000 kV o più. Il secondo tipo di sovratensioni è provocato da manovre o guasti all'interno del sistema stesso, la cui ampiezza è legata alla tensione operativa e la cui forma dipende dalle impedenze dei sistemi e dalle condizioni di manovra.

Sebbene la reale forma di questi due tipi di sovratensione vari fortemente, è necessario simulare queste tensioni transitorie con modalità che consentano la riproducibilità per cui esiste al riguardo una adeguata normativa accettata a livello internazionale che disciplina la materia.

Si definisce dunque la **tensione impulsiva** come una tensione unidirezionale che sale più o meno rapidamente ad un valore di picco e decade in modo relativamente lento a zero. Nel caso di sovratensioni di origine atmosferica si raggiunge il valore massimo in tempi che variano da qualche microsecondo a qualche decina di microsecondi, mentre nel caso di sovratensioni di manovra da qualche centinaia a qualche migliaia di microsecondi.

Riassumendo, si hanno:

- ❑ **Sovratensioni di origine esterna** (sostanzialmente di origine atmosferica); hanno livelli energetici e di tensione non correlati alle caratteristiche nominali del sistema elettrico su cui incidono. La durata dei fenomeni è dell'ordine delle decine di μs .
- ❑ **Sovratensioni di origine interna o di manovra;**
sono dovute alla morfologia del sistema o di alcuni suoi componenti.
Sono fenomeni transitori prodotti ad esempio da:
 - Distacchi o variazioni del carico
 - Messa in tensione di linee o trasformatori
 - Guasti a terra
 - Interruzione di carichi induttivi o capacitivi

1.3 Generatori di alte tensioni ad impulso

I generatori di tensione ad impulso (norme CEI 42-4 e 42-5) sono utilizzati per prove atte a valutare l'effetto delle **sovratensioni transitorie di valore molto elevato**. Come visto nel paragrafo precedente, si possono avere sovratensioni di origine atmosferica (LI - *Lightning impulse voltage*) o sovratensioni di manovra o interne (SI - *Switching impulse voltage*) dovute per esempio ad un guasto. Per simulare queste sovratensioni, in laboratorio vengono generate tensioni ad impulso, ovvero tensioni transitorie unidirezionali, con un andamento simile a quello rappresentato nelle figure 1 e 2.

I parametri caratteristici dell'impulso sono:

- V_c (valore di cresta, *peak value*)
- T_1 (durata del fronte, *front time*)
- T_2 (tempo dell'emivalore, *time to half-value*)

1.4 Determinazione di T_1 e di T_2

Per la definizione di un'onda piena si utilizzano tre punti scelti rispettivamente sul fronte al 30% (punto A) e al 90% del valore di cresta V_c (punto B) e al 50% sempre del valore di cresta, sulla coda (punto C). In fig. 1 si ha l'esempio di un onda che presenta un andamento regolare, ovvero senza oscillazioni ad alta frequenza. Individuati i punti A e B, si suppone che la tensione cresca in modo lineare, passando per i punti stessi.

Sia T l'intervallo di tempo tra A e B, ovvero $T = t_{0.9} - t_{0.3}$, allora la durata convenzionale del fronte T_1 è:

$$T_1 = 1,67 T$$

e l'origine convenzionale (*virtual origin*) O_1 dell'onda precede il punto A di un intervallo pari a $0,3 T_1 = 0,5 T$. Si osservi che l'origine convenzionale è definita nel punto d'intersezione della linea AB con l'asse delle ascisse. La durata invece della coda T_2 (tempo dell'emivalore) è l'intervallo di tempo tra l'origine convenzionale O_1 e l'istante in cui la tensione, sulla coda, è pari a $0,5V_c$.

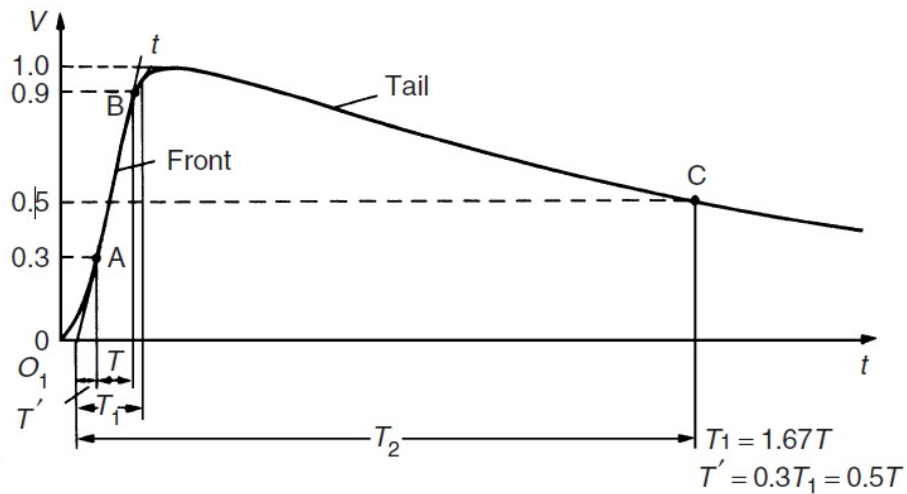


Figura 1- Definizione dei parametri dell'impulso di fulminazione

La fig. 2 invece mostra la curva relativa ad un impulso di tensione di manovra. Mentre T_2 è definito come sopra, il tempo di cresta o di picco T_p è l'intervallo di tempo tra l'origine effettiva O e l'istante in cui la tensione raggiunge il suo massimo valore e viene derivato in analogia a quanto visto per gli impulsi di fulminazione dalle letture al 30 e 90% usando le relazioni che seguono:

$$T_p = KT_{AB}$$

dove K è una costante adimensionale data da

$$K = 2.42 - 3.08 \times 10^{-3}T_{AB} + 1.51 \times 10^{-4}T_2$$

e dove T_{AB} e T_2 sono in microsecondi e $T_{AB} = t_{90} - t_{30}$.

Un altro parametro è il tempo T_d , corrispondente al 90% di T_p .

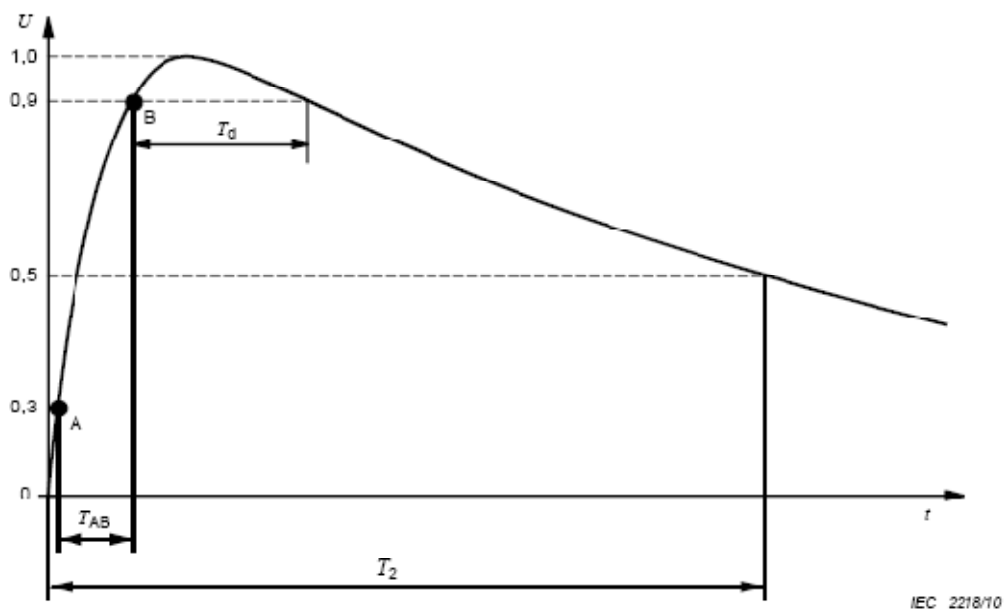


Figura 2 – Definizione dei parametri dell'impulso di manovra

I tempi T_1 e T_2 sono espressi in μs e l'onda è designata "onda T_1/T_2 ". La normalizzazione internazionale prevede per i due tipi di sovratensione i valori dati dalla seguente tabella:

Tipo di impulso	T_1 o T_p [μs]	T_2 [μs]
Atmosferico	1,2	50
Manovra	250	2500

Tabella 1 – Caratteristiche degli impulsi ideali

Le norme inoltre prevedono i valori di tolleranza sui parametri caratteristici dell'impulso contenuti nella seguente tabella:

Tipo di impulso	V_c	T_1 o T_p	T_2
Atmosferico	$\pm 3\%$	$\pm 30\%$	$\pm 20\%$
Manovra	$\pm 3\%$	$\pm 20\%$	$\pm 60\%$

Tabella 2 – Tolleranze riguardanti V_c , T_1 , T_p e T_2

Il valore di cresta V_c è dato dalle norme e dipende dalla tensione nominale dell'oggetto che si deve testare. Può andare da qualche decina di kV ad alcuni MV con una forma d'onda ad alto contenuto in frequenza e quindi particolare importanza assumono le capacità e le induttanze parassite.

Capitolo 2

Generazione di tensioni impulsive

2.1 Circuiti a singolo stadio che generano tensioni impulsive

In fig. 3 sono illustrati i due circuiti a singolo stadio per la generazione di un'onda ad impulso come quelle definite nel paragrafo precedente. Inizialmente il condensatore C_1 viene caricato alla tensione V_0 da un generatore d.c. fino alla chiusura dell'interruttore G , normalmente uno **spinterometro** (*spark gap*) a sfere. Questo spinterometro agisce come un chiuditore, con un tempo di intervento molto breve se confrontato con T_1 . V_0 può arrivare a valori di circa 200-250 kV, altrimenti valori maggiori richiederebbero sfere di diametro molto grande per evitare distribuzioni di campo eccessivamente non omogenee. La capacità C_1 carica, attraverso la resistenza R_1 , la capacità C_2 , determinando il fronte dell'onda T_1 . Le due capacità C_1 e C_2 scaricandosi attraverso la resistenza R_2 , determinano la coda dell'onda. La capacità C_2 rappresenta il carico complessivo, ovvero l'oggetto sotto test e tutti gli altri elementi capacitivi che sono in parallelo (dispositivi di misura o eventuali condensatori addizionali).

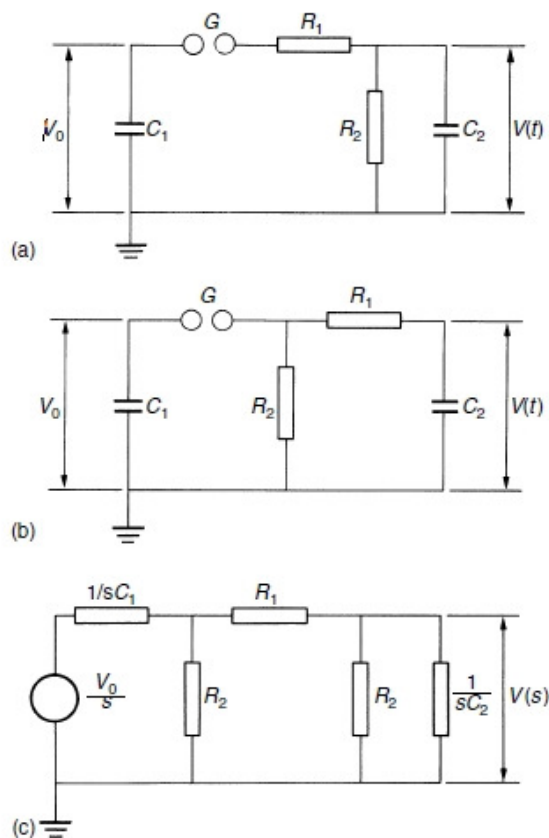


Figura 3 – Circuiti ad uno stadio per la generazione di un'onda ad impulso (a) e (b). (c) Trasformata di Laplace

2.2 Parametri caratteristici di un generatore di impulsi

Il più rilevante parametro di un generatore di impulsi è la massima energia che esso può immagazzinare:

$$W = \frac{1}{2} C_1 V_{0max}^2 \quad (2.2.1)$$

Poiché la capacità C_1 è sempre molto maggiore di C_2 , C_1 determina principalmente il costo del generatore.

In pratica, poiché R_2 è molto maggiore di R_1 è possibile analizzare i circuiti della figura successiva, relativi, rispettivamente, alla durata del fronte e della coda.

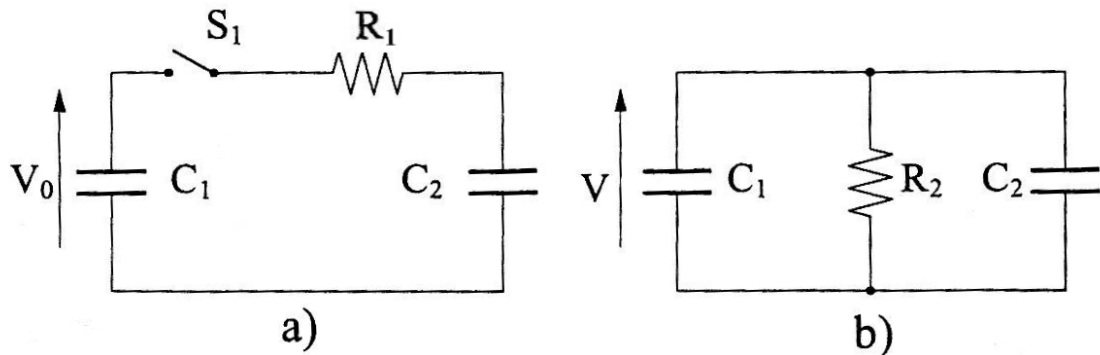


Figura 4 – Schemi per lo studio dei circuiti di fig. 3

Nel circuito di fig. 4(a) il condensatore C_2 si carica alla tensione

$$V = \frac{V_0 C_1}{C_1 + C_2}$$

con una costante di tempo

$$\tau_1 = R_1 \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \quad (2.2.2)$$

Nel circuito di figura 4(b) invece le due capacità C_1 e C_2 cariche alla tensione V si scaricano sulla resistenza R_2 con una costante di tempo

$$\tau_2 = R_2 (C_1 + C_2) \quad (2.2.3)$$

R_1 è definita come **resistenza di fronte**, mentre R_2 **resistenza di coda**.

2.3 Analisi del circuito a singolo stadio

Per l'analisi del circuito possiamo applicare il metodo della trasformata di Laplace, come in figura 3 (c), il quale simula le seguenti condizioni al contorno: per $t \leq 0$, C_1 è carico a V_0 e per $t > 0$ questo condensatore è collegato direttamente alla rete. Per il circuito di figura 3(a) si ha dunque per la tensione di output la seguente espressione:

$$V(s) = \frac{V_0}{s} \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (2.3.1)$$

dove

$$Z_1 = \frac{1}{C_1 s} + R_1$$
$$Z_2 = \frac{R_2 / C_2}{R_2 + 1 / C_2 s}$$

Per sostituzione troviamo:

$$V(s) = \frac{V_0}{k} \frac{1}{s^2 + as + b} \quad (2.3.2)$$

dove

$$a = \frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_1 C_2} + \frac{1}{R_2 C_1}$$
$$b = \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}$$
$$k = R_1 C_2.$$

Delle espressioni simili valgono anche per il circuito di fig. 3(b).

Per entrambi i circuiti, antitrasformando, otteniamo la stessa espressione di $V(t)$ nel dominio del tempo:

$$V(t) = \frac{V_0}{k} \frac{1}{(\alpha_2 - \alpha_1)} [\exp(-\alpha_1 t) - \exp(-\alpha_2 t)] \quad (2.3.3)$$

Dove α_1 e α_2 sono le radici dell'equazione:

$$s^2 + as + b = 0$$

La tensione di uscita è quindi la sovrapposizione di due funzioni esponenziali di segno opposto. Un grafico dell'equazione (1.6) è mostrato in figura 5.

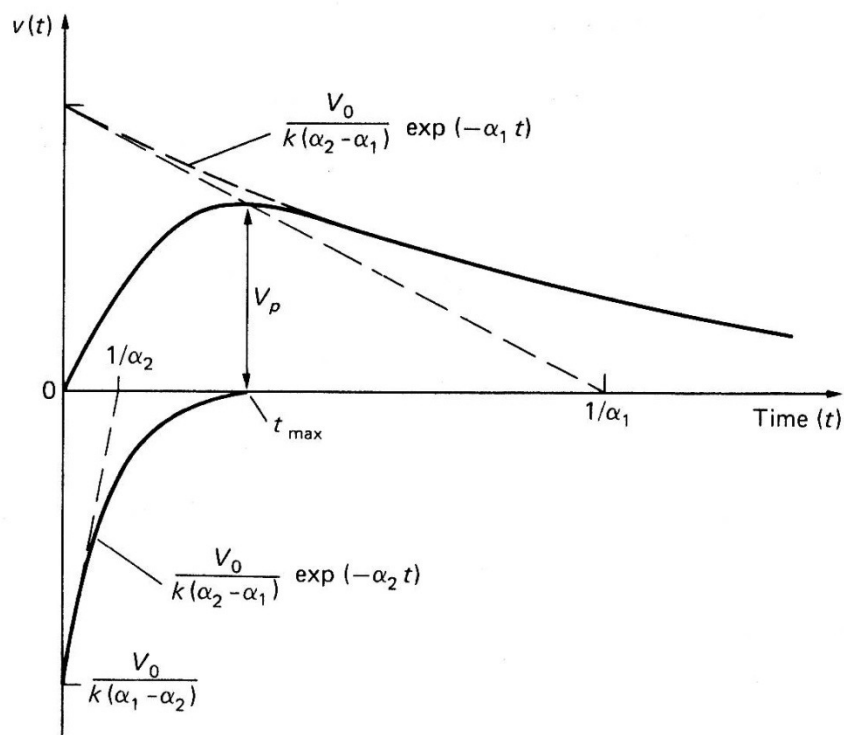


Figura 5 – Tensione impulsiva e le sue componenti in accordo con il circuito di fig. 3

2.4 Circuito di Marx

Al fine di raggiungere tensioni dell'ordine del MV con valori ragionevoli di alimentazione E e di C_1 , occorre adottare lo schema di Marx (vedi Fig. 6), circuito costituito da più stadi in cascata con i condensatori che vengono caricati in parallelo e scaricati in serie.

Il funzionamento di tale circuito è divisibile in due fasi:

1. Il generatore DC eroga una tensione E , detta **tensione di carica**, che carica tutti i condensatori C in parallelo, tramite le resistenze R_c . Pertanto tutti i punti del ramo di sinistra si portano a potenziale E mentre a regime tutti i punti del ramo di destra si portano a potenziale di terra.

2. Se si fanno innescare gli spinterometri S_i contemporaneamente, ottenendo un transitorio assai veloce, i condensatori passano dal parallelo alla serie, consentendo di raggiungere una tensione nE (tensione nominale del generatore), con n pari al numero di stadi del generatore. Si possono così ottenere tensioni impulsive di qualche migliaio di kV , utilizzando tensioni continue generalmente comprese tra 100 e 300 kV ed un numero adeguato di stadi.

Il circuito di figura 6(a), una volta innescati gli spinterometri S_i , è equivalente al circuito di fig. 4(a) alla chiusura dell'interruttore S con resistenza di fronte nR_1 e resistenza di coda pari a R_2 , essendo necessariamente R_c molto maggiore di R_2 .

Nelle realizzazioni industriali sono possibili varianti sullo schema (fig. 6b) per ottimizzare il numero di componenti del circuito.

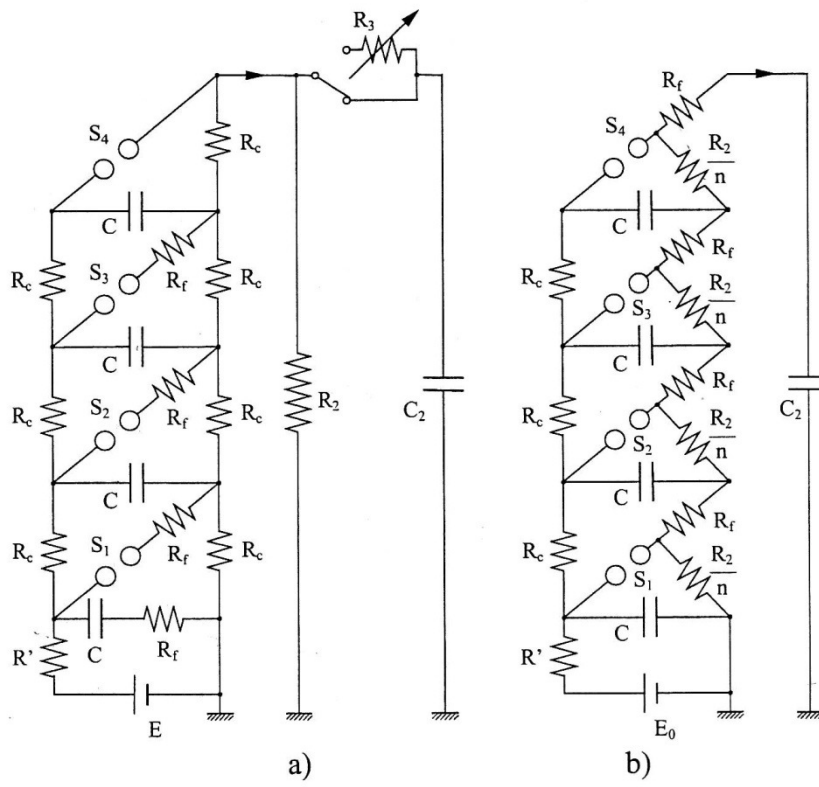


Figura 6 – Schema del Generatore di Marx a 4 stadi



Figura 7 – Generatore di Marx con tensione nominale di 3.2 MV

2.5 Problemi relativi alla tenuta dielettrica in presenza di tensioni impulsive

La figura 8 rappresenta le curve della tensione di scarica U_d in una geometria in aria costituita da una punta opposta ad un piano: questa tipo di configurazione viene utilizzata molto spesso come riferimento per le configurazioni reali, dal momento che costituisce anche la situazione di massima disuniformità del campo elettrico. Il caso più critico si ha per la polarità positiva e come si può osservare dal grafico, la U_d è influenzata dalla durata del fronte T_s della sovratensione impulsiva.

Le curve mostrano che il valore del tempo T_s per cui si ottiene il minimo di U_d , aumenta al crescere della distanza tra gli elettrodi. Il minimo di U_d può essere approssimato da una linea retta con una pendenza di 2.08 kV/ μ s.

In accordo con la seguente formula:

$$T_{s \text{ crit}} = \frac{U - 600}{2.08} \quad (2.5.1)$$

si ottiene un valore critico per la durata del fronte T_s in microsecondi, per ogni valore della tensione impulsiva U espressa in kV. Per esempio, con una tensione di test di 2

MV si ottiene un T_s crit di 675 μs , mentre per distanze fino a 3 m circa la minima tensione di breakdown si ha a 110 μs .

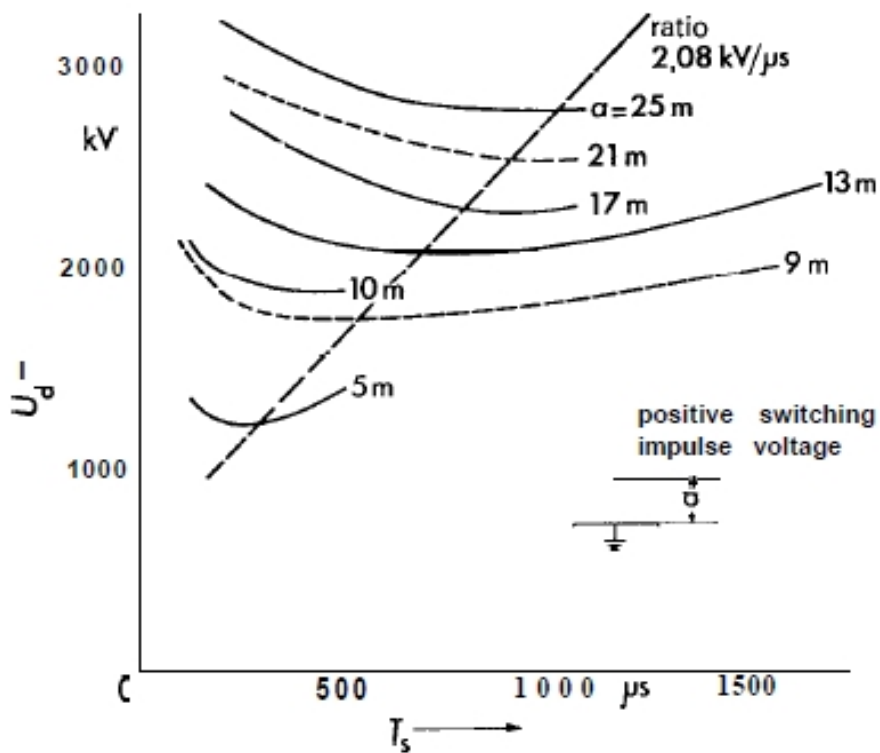
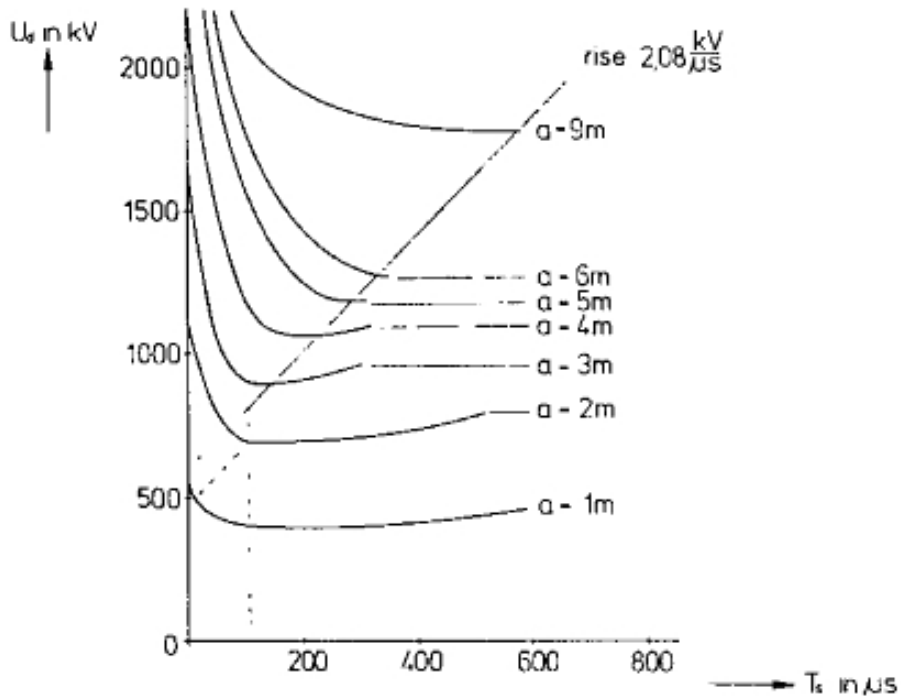


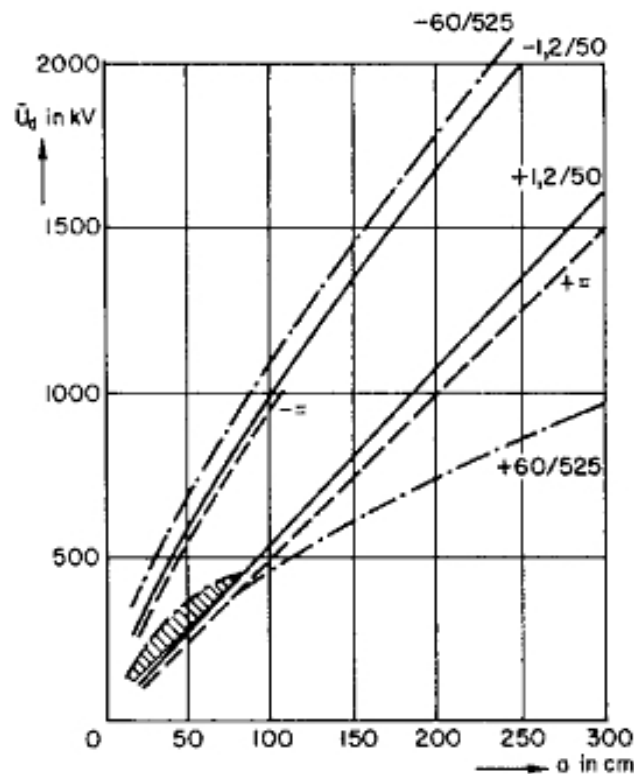
Figura 8 – Dipendenza dalla durata del fronte sulla tensione di scarica

I grafici delle figure seguenti confrontano invece le curve corrispondenti al 50% della U_d in funzione della distanza a tra gli elettrodi. Come si vede chiaramente dai grafici, la polarità **positiva** della sovratensione unipolare sull'elettrodo conduce a più bassi valori della tensione di scarica. Con la polarità positiva inoltre, alla tensione impulsiva 1.2/50 μ s corrisponde una dipendenza lineare con una pendenza di circa 5 kV/cm (500 kV/m). Per la polarità **negativa** la tensione di scarica mostra una dipendenza quasi lineare fino a 3.5 MV.

Con un gap di circa 7 m, con una tensione impulsiva positiva 250/2500 μ s di 1500 kV si ha la più bassa tensione di scarica. Con una tensione di 3 MV e un fronte di 1.2 μ s si ha una scarica a soli 6 m circa, mentre con una durata del fronte di 250 μ s la scarica si riuscirebbe a far scaricare un intervallo d'aria di circa 22 m.

Dalle curve inoltre si può osservare che con polarità positiva la tensione di scarica mostra un andamento lineare crescente all'aumentare della distanza di gap, per impulsi 1.2/50, mentre con impulsi 60/525 e 250/2500 (almeno per $a > 40$ cm), U_d cresce con una dipendenza che approssima la radice quadrata della distanza.

Si può concludere dunque che in un mezzo isolante come l'aria, in presenza di campo disuniforme come nelle normali applicazioni pratiche, la tenuta dielettrica viene a dipendere da molteplici fattori ed il comportamento non può essere descritto semplicemente dando un unico valore per il campo elettrico limite.



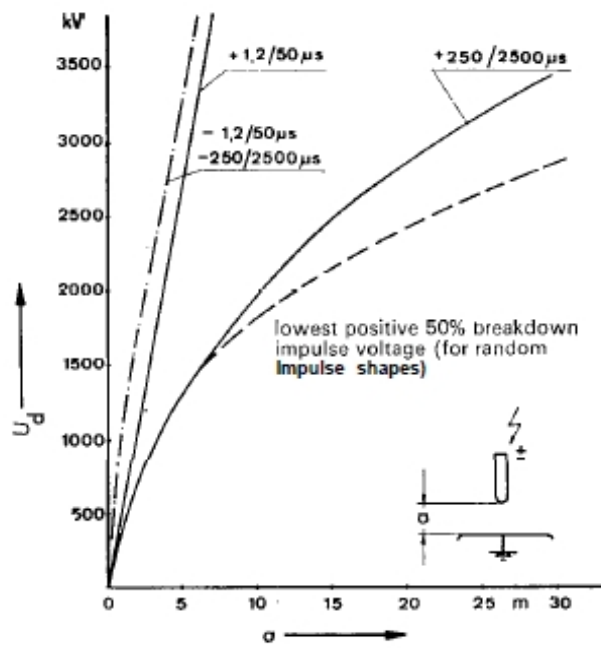


Figura 9 – 50% U_d in funzione della distanza a degli elettrodi e della forma d'onda

Capitolo 3

Innesco di un generatore di impulsi

3.1 Introduzione

I condensatori C del generatore di Marx, mediante l'alimentazione E , vengono caricati attraverso le resistenze R_c ; affinché la carica avvenga completamente bisogna attendere un tempo pari ad $4 \div 5$ costanti di tempo L innesco del generatore stesso avviene con la messa in serie dei condensatori C con l'innesco degli n spinterometri. L'innesco dello spinterometro S_1 può essere libero o comandato. Quando la tensione di carica raggiunge il valore della tensione di scarica spontanea dello spinterometro esso innesca e provoca dunque l'innesco del generatore.

3.2 Trigatron

Per innescare la scarica si può utilizzare il sistema **trigatron**. Il trigatron fu inventato all'inizio degli anni 40 per essere usato come interruttore nei modulatori di potenza dei radar. Il dispositivo venne descritto per primo da Craggs, Haine, Meek e Wilkinson. Uno spinterometro comandato è formato da un gap con tre elettrodi. I due elettrodi principali consistono generalmente di due sfere o semisfere di diametro D . Un dei due elettrodi viene collegato al potenziale di alta tensione e l'altro viene collegato a terra. Il sistema è così equivalente ad un interruttore che funziona solo in chiusura. Per variare la tensione di scarica spontanea si varia semplicemente la distanza tra i due elettrodi principali.

Una o entrambe le sfere contiene un terzo elettrodo (elettrodo di comando o di trigger – *trigger rod*). L'elettrodo di trigger si trova in pratica allo stesso potenziale dell'elettrodo forato poiché è connesso ad esso attraverso una resistenza di elevato valore, in modo che l'impulso di controllo può essere applicato tra questi due elettrodi.

Quando si applica un impulso di comando all'elettrodo di trigger, attorno all'elettrodo stesso si provocano delle **scariche corona**² e queste provocano a loro volta la **fotoionizzazione**³ nel gap pilota. A causa di questa fotoionizzazione un numero

² Scarica che può avvenire alla pressione atmosferica nelle vicinanze di un oggetto con un piccolo raggio di curvatura, dove il campo elettrico locale attorno alla punta aumenta significativamente rispetto al suo valore medio e può superare così quello di innesco.

³ La fotoionizzazione è un processo secondario del processo di ionizzazione: gli elettroni che hanno un'energia cinetica maggiore dell'energia di ionizzazione, mediante collisioni, possono eccitare gli atomi del gas a stati energetici più alti. La reazione simbolicamente è $A + e + K \text{ energia} \rightarrow A^* + e$; A rappresenta un atomo o una molecola neutra del gas, A^* rappresenta un atomo nello stato eccitato. Quando l'atomo ritorna dallo stato di eccitazione, emette un quanto di energia di fotoni $h\nu$ ($A^* \rightarrow A + h\nu$) che a sua volta

sufficiente di elettroni primari sono resi disponibili vicino al bordo cavo della sfera e ha luogo così la scarica completa dello spinterometro, cioè la chiusura dell'interruttore, anche con una tensione decisamente inferiore alla tensione di scarica spontanea corrispondente alla distanza a cui si trovano le due sfere.

Il trigatron richiede tipicamente un impulso di diversi kilovolt ($\geq 10\text{kV}$) e l'impulso di comando dovrebbe avere un fronte sufficientemente rapido ($\geq 0.5\text{ kV/ns}$), tale da rendere il tempo di scarica il minore possibile.

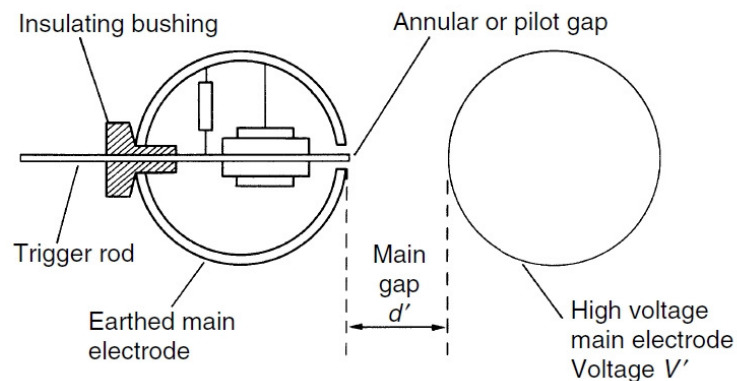


Figura 10 – Spinterometro con Trigatron

3.3 Curve caratteristiche del trigatron

La caratteristica di lavoro di un trigatron rappresenta il campo dei valori di tensione applicata per i quali si ha la scarica per effetto dell'impulso di comando, al di sotto del livello di tensione di scarica spontanea.

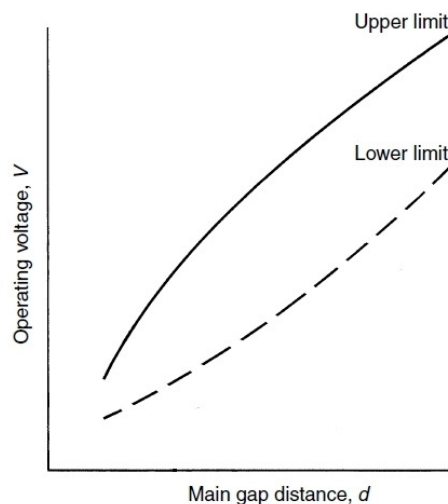


Figura 11 – Curve di lavoro di un Trigatron

può ionizzare un altro atomo avente un'energia di ionizzazione minore od uguale dell'energia del fotone, cioè $A + h\nu \rightarrow A^+ + e$.

Un esempio è riportato in Fig. 11: la linea superiore corrisponde alla tensione spontanea di scarica, ovvero la tensione alla quale avviene la scarica in assenza dell'impulso di trigger mentre la linea inferiore è la tensione alla quale la scarica è ottenuta con un determinato impulso, facendo riferimento, ad esempio, ad un ritardo nell'intervento ≤ 100 ns. Queste curve dipendono non solo dalle caratteristiche costruttive del trigatron, ma anche dalla polarità della tensione V che di quella dell'impulso di comando. L'esperienza mostra che l'impulso dovrebbe avere sempre la polarità opposta rispetto alla tensione V per ottenere tensioni di scarica inferiori (campi di intervento più estesi). La figura seguente rende evidente la dipendenza dalla polarità, con sfere del diametro di 20 cm, in normali condizioni atmosferiche.

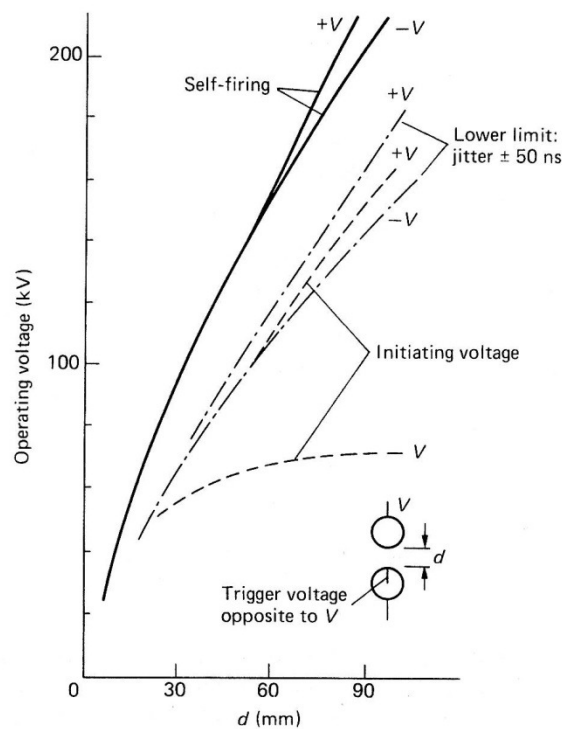


Figura 12 – Curve caratteristiche di un Trigatron in aria (Haefely & Co.)

3.4 Circuito di innesco

La figura seguente mostra un circuito di innesco molto semplice utilizzato per comandare l'innesco di un generatore di Marx.. Il generatore d.c. carica il condensatore C_1 attraverso una resistenza di elevato valore R_1 . Alla chiusura dell'interruttore controllato in remoto S , un impulso di tensione è applicato al circuito CRO (Cathode Ray Oscilloscope) attraverso C_2 . Allo stesso tempo anche il condensatore C_3 è caricato e un impulso di tensione (*triggering pulse*) risulta applicato all'elettrodo di trigger. Il valore della tensione d'impulso può essere variata modificando i valori di R_3 e di C_3 . Inoltre il prodotto R_3C_3 consente altresì di cambiare il tempo di ritardo del trigatron. Infine la resistenza R_2 consente di scaricare il circuito della eventuale carica residua di C_3 .

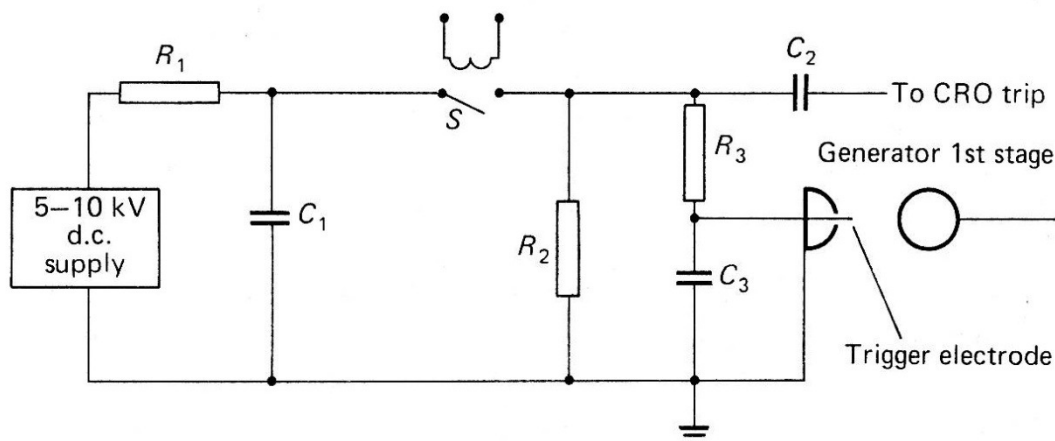


Figura 14 – Circuito di innesco per generatori di impulsi con Trigatron

Capitolo 4

Meccanismi fisici di scarica

4.1 Apparato sperimentale

Nonostante il trigatron sia utilizzato da molti anni, non c'è ancora accordo sulle modalità fisiche su cui si basa il suo intervento. Nel 1989 P.F. Williams e F.E. Peterkin del Dipartimento di Ingegneria Elettrica dell'Università del Nebraska, pubblicarono i risultati di un ampio programma di esperimenti atti a spiegare i meccanismi di base responsabili del breakdown nel trigatron. La figura seguente mostra l'apparato sperimentale che è stato usato.

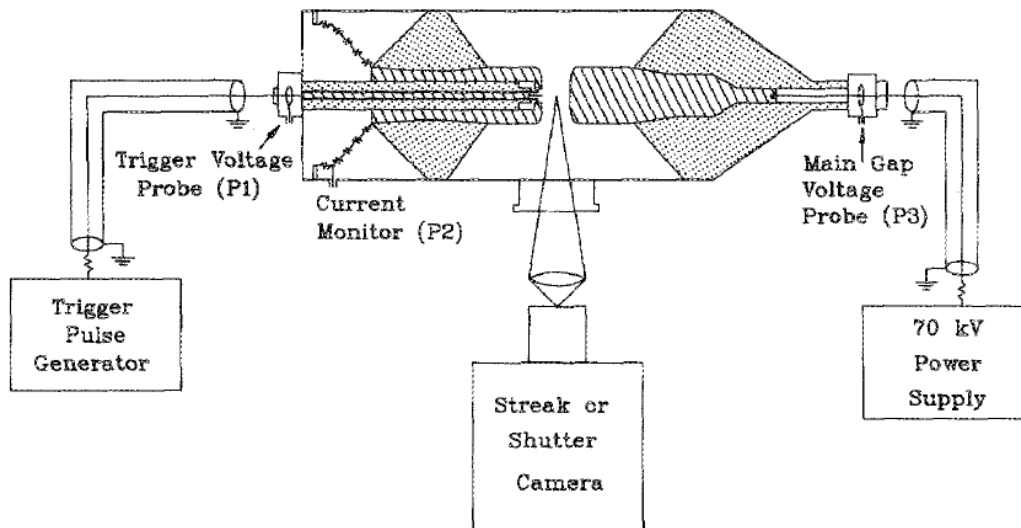


Figura 15 – Schema dell'apparato sperimentale usato da Williams e Peterkin

Il gap del trigatron era contenuto in una cella riempita alla pressione di 2 atm assolute e progettata per operare fino ad una tensione di 70 kV. Alla distanza del gap di 2.5 cm corrispondeva una tensione spontanea di breakdown V_{SB} di circa 63 kV. L'impulso di trigger prodotto aveva un tempo di salita di 4 - 5 ns. Inoltre furono usate delle fotocamere con un otturatore ad alta velocità (f/4 e f/6) per ottenere le informazioni relative ai primi stadi di formazione della scarica.

4.2 Streamer

Le prove sperimentali hanno evidenziato la sequenza di eventi responsabili della scarica nel trigatron con tensione di carica vicina alla tensione spontanea di scarica, tensione di trigger 20% - 50% della tensione di carica e pressione all'incirca atmosferica.

All'arrivo dell'impulso di trigger, si ha la formazione e propagazione, dopo un breve ritardo, di **streamer** (letteralmente *filamenti*) attraverso il gap, tra gli elettrodi principali. Si hanno così uno o più canali di streamer che collegano l'elettrodo di trigger e l'elettrodo opposto del trigatron, attraverso una resistenza equivalente dell'ordine di 10 k Ω , con l'interruttore che di fatto è ancora aperto. Il campo applicato provoca la ionizzazione in questi canali di streamer, diminuendone la resistenza. In quasi tutti i casi, la densità di uno di questi canali aumenta più velocemente degli altri e alla fine si forma un arco. Contemporaneamente, anche il gap tra l'elettrodo di comando e l'elettrodo principale adiacente subisce un processo di scarica per la formazione di streamer.

Riassumendo dunque il processo di breakdown nel gap principale può essere suddiviso in tre fasi:

- Formazione di uno o più streamer dall'elettrodo di trigger;
- Propagazione degli streamer stessi attraverso il gap;
- Conseguente ionizzazione che con il campo applicato, aumenta sino alla formazione del canale di arco e chiusura dell'interruttore.

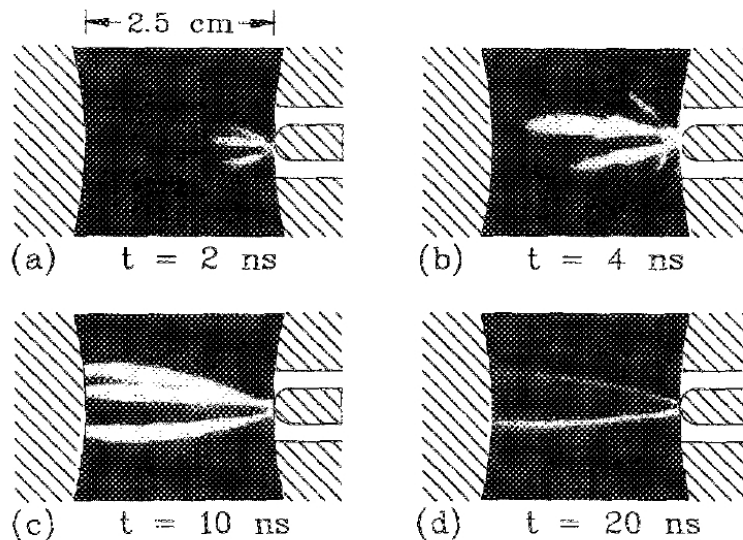


Figura 16 – Sequenza di foto che mostrano lo sviluppo degli streamer nel gap principale

In figura 16 si può osservare ad istanti diversi la propagazione degli streamer nel gap principale del trigatron: diversi streamer si formano nelle vicinanze dell'elettrodo di trigger. Questi streamer hanno diametri di circa di 1-2 mm e seguono approssimativamente le linee del campo.

Per la formazione degli streamer si deve creare una piccola regione di plasma di circa 10^8 elettroni liberi e ioni positivi. Elettroni liberi collidono con altri atomi neutri liberando altri elettroni in un processo a valanga nell'intenso campo elettrico vicino all'elettrodo di trigger. Il risultato più importante della ricerca di Williams e Peterkin è

aver identificato il meccanismo degli streamer come responsabili dell'azione di innesco nel trigatron. Questi streamer hanno inizio nella regione di campo elettrico elevato attorno all'elettrodo di trigger ma **non** sono il risultato di un arco che si forma tra l'elettrodo di trigger stesso e l'elettrodo principale adiacente. Inoltre gli autori hanno scoperto che la formazione degli streamer e il tempo di transito richiede solo un 10% - 20% del tempo totale di scarica. Questo implica che per ridurre il tempo di chiusura dell'interruttore trigatron si dovrebbe cercare di accelerare il tempo di formazione dell'arco.

Capitolo 5

Legge di Paschen

5.1 Legge di Paschen

Nel 1889 Friedrich Paschen⁴ stabilì sperimentalmente la relazione tra la tensione di breakdown V_b in un gas, in un campo **uniforme** E , in un gap come funzione della pressione del gas p e della distanza tra gli elettrodi d :

$$e^{f\left(\frac{V_b}{pd}\right)pd} = K' = e^k \quad (5.1.1)$$

oppure

$$V_b = f(pd) \quad (5.1.2)$$

dove ovviamente $V_b = Ed$. La V_b è dunque funzione del prodotto della pressione e della lunghezza del gap per un particolare gas e materiale di cui sono costituiti gli elettrodi. La relazione tra V_b ed il prodotto pd è mostrata nella fig. 17. Da notare che la legge è valida solo per regioni in cui il campo E è uniforme. Inoltre come si può osservare dal grafico, la curva presenta un minimo $V_{b \text{ min}}$ in corrispondenza di un particolare valore del prodotto $(pd)_{\text{min}}$. Non vi è quindi nessuna scarica con valori di tensione al di sotto di $V_{b \text{ min}}$. A valori di tensione maggiore esistono due valori di V_b ad una pressione costante, uno in corrispondenza di un valore d_1 (punto N) e un altro con valore d_2 maggiore (punto W).

L'esistenza del valore di minimo si può spiegare in modo qualitativo se consideriamo l'efficienza della ionizzazione degli elettroni che attraversano il gap con diverse energie.

Gli elettroni hanno collisioni più frequenti con le molecole del gas in corrispondenza di $(pd) > (pd)_{\text{min}}$, ma l'energia guadagnata nelle collisioni è più bassa che a $(pd)_{\text{min}}$, invece per $(pd) < (pd)_{\text{min}}$ gli elettroni attraversano il gap avendo poche collisioni. Si ha quindi che nel punto $(pd)_{\text{min}}$ corrisponde la più alta efficienza di ionizzazione.

⁴ Friedrich Paschen (1889). *Ueber die zum Funkenübergang in Luft, Wasserstoff und Kohlensäure bei verschiedenen Drucken erforderliche Potentialdifferenz*. *Annalen der Physik* **273** (5): 69–75.

DOI:10.1002/andp.18892730505 (<http://dx.doi.org/10.1002/andp.18892730505>).

La forma della curva di Paschen indica anche che, a distanze fra gli elettrodi molto piccole, la tensione tende ad aumentare più che linearmente, e quindi l'intensità del campo elettrico necessario per provocare una scarica aumenta al diminuire della distanza.

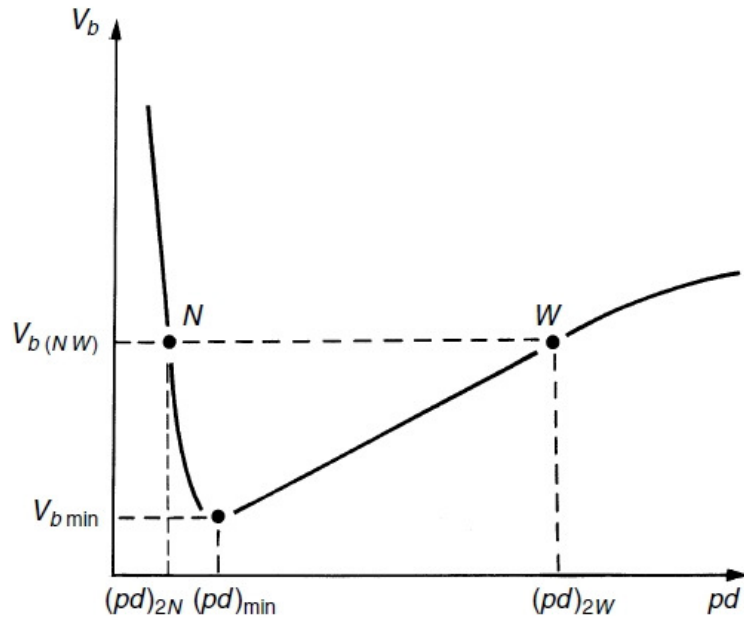
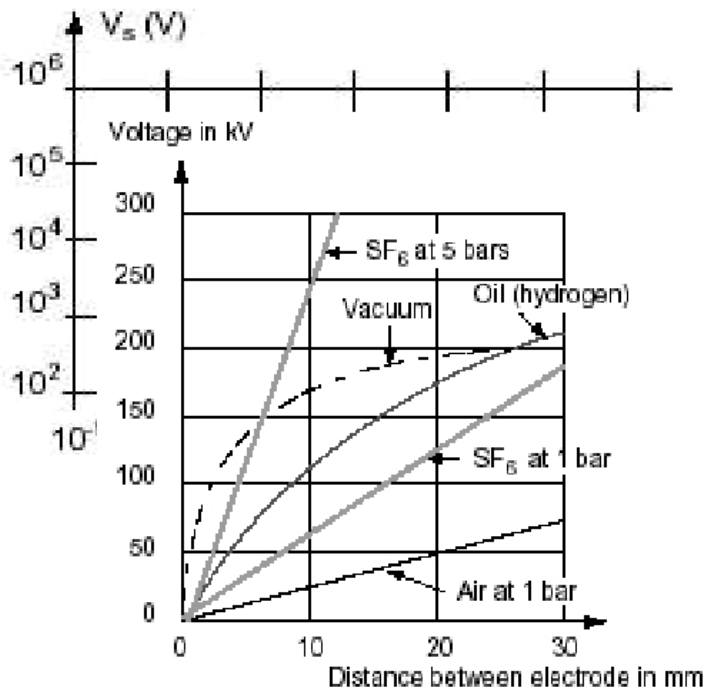


Figura 17 - Curva di Paschen



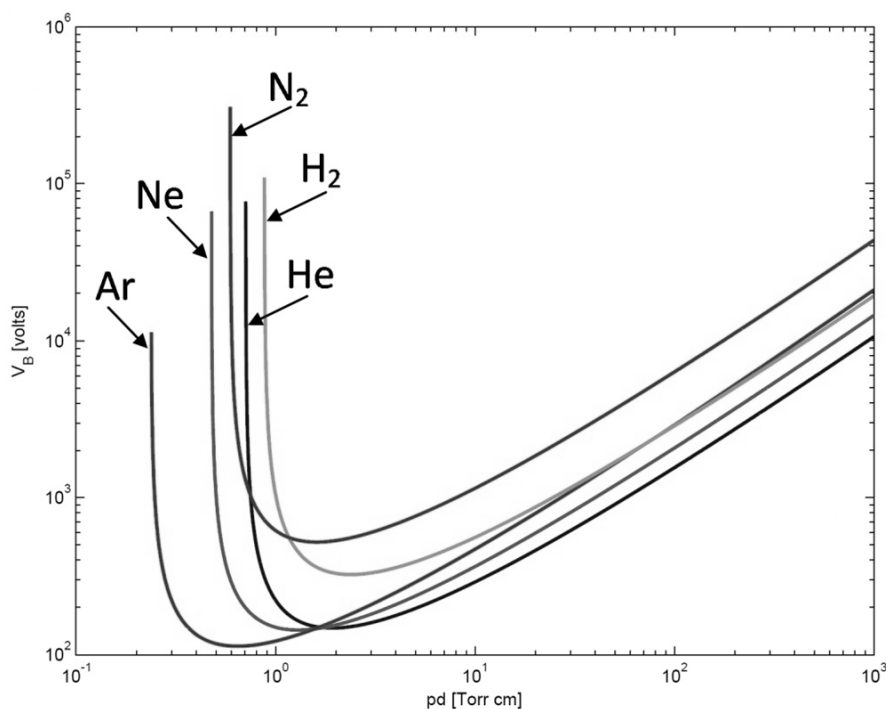


Figura 18 – Curve di Paschen per alcuni gas diversi

Si noti che la tensione di scarica dei gas nobili sia minore di quella dei gas biatomici, come idrogeno H_2 e azoto N_2 : questo nonostante il potenziale di prima ionizzazione dei gas nobili sia maggiore dell'idrogeno e dell'azoto. Per la ionizzazione conta, infatti, anche l'energia necessaria per spezzare le molecole biatomiche in atomi singoli.

I valori di $V_{b \min}$ e di $(pd)_{\min}$ per alcuni gas sono mostrati nella tabella sottostante:

Gas	$(pd)_{\min}$ [$\text{torr}^5 \text{ cm}$]	$V_{b \min}$ [V]
Aria	0.55	352
Azoto	0.65	240
Idrogeno	1.05	230
Ossigeno	0.70	450
SF_6	0.26	507
Neon	4.0	245
Elio	4.0	155

Tabella 3 - $V_{b \min}$ e $(pd)_{\min}$ per alcuni gas

⁵ 1 Torr = 1 mmHg = 133,3223684 Pa

Capitolo 6

Test e risultati

6.1 Generatore di Marx del laboratorio

Nel presente capitolo saranno esposti i test eseguiti sul dispositivo di controllo della carica e d'innesco da caratterizzare. Nella figura che segue, è rappresentato il generatore di Marx presente nel Laboratorio di Alte Tensioni del DIE.

Si osservi che tutte le prove eseguite si sono limitate all'innesco solo del primo stadio del generatore stesso.

Con riferimento ai valori dello schema di Marx di fig. 17 con:

$n = 4$, $C_1 \gg C_2$, $R_2 \gg R_1$ ed $R_c \gg R_2$ ovvero $R_{fronte} = nR_1$ e $R_{coda} = nR_2$ si ha:

$$C_1 = \frac{0,42}{2} \quad (2 \text{ condensatori in serie per ogni stadio})$$

$$C_{1_eq} = \frac{C_1}{4} = 52,5 \text{ nF}$$

$$R_{fronte} = 4 R_1 = 4 * 25 = 100 \Omega$$

$$R_{coda} = 4 R_2 = 4 * 350 = 1400 \Omega$$

$$\tau_2 = R_{coda} (C_{1_eq} + C_2) \cong R_{coda} C_{1_eq} \cong 70 \mu\text{s}$$

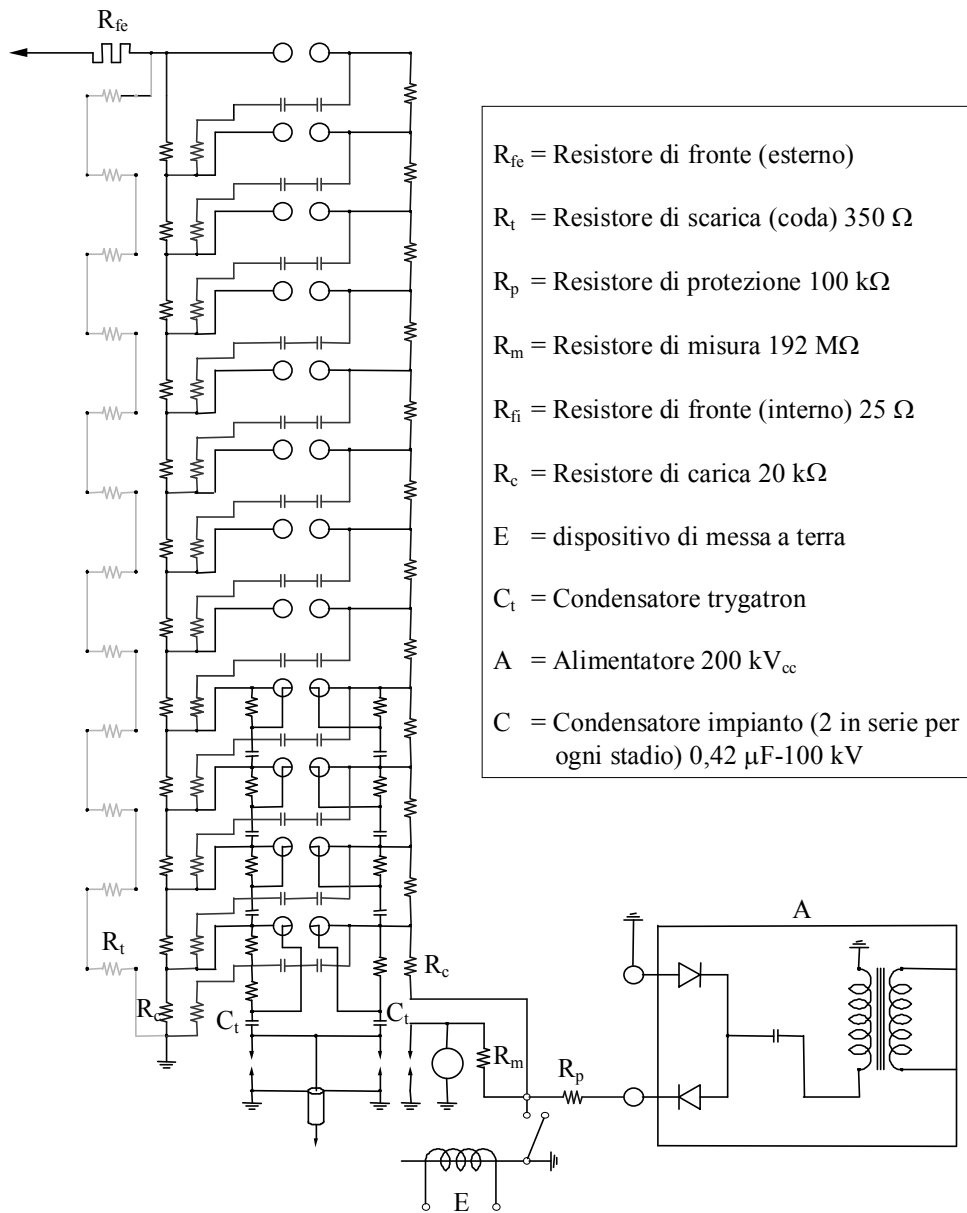


Figura 19 – Schema del generatore di Marx con 12 Stadi (50 kJ – 2400 kV)

6.2 Verifica della linearità del dispositivo di controllo della carica e trigger

Come già anticipato nell'introduzione di questo lavoro, lo scopo delle prove era di caratterizzare il dispositivo di controllo della carica e dell'innesco del generatore di Marx presente in laboratorio di Alte Tensioni. A tal fine si è per primo provveduto alla verifica della linearità del circuito di controllo della carica.

Sono state eseguite delle misure di confronto tra il valore di tensione fornito dal sistema e quello derivato dalla lettura della corrente attraverso un resistore noto del valore di 100 M Ω , collegato direttamente all'uscita di alta tensione.

La tabella seguente contiene i valori di tensione impostati e il corrispondente valore di corrente misurato.

<i>V [kV]</i>	20	30	40	50	60	70	80	90	100
<i>I [μA]</i>	207	307	407	507	607	707	807	907	1007

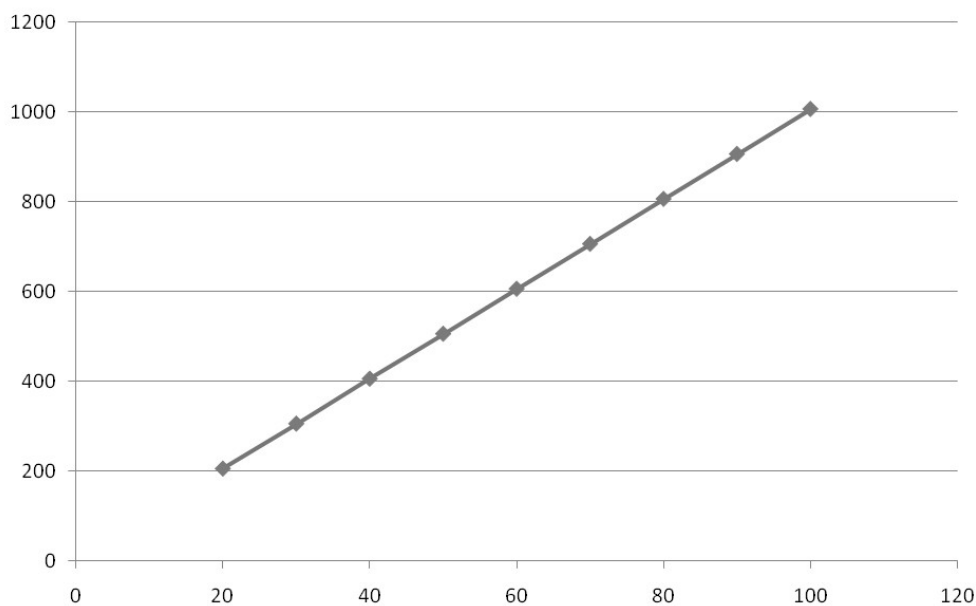


Figura 20 – Curva V-I del dispositivo di carica

Dalle misure e dal grafico si evince che pur essendovi presente un errore sistematico, il circuito di controllo della carica presenta un andamento lineare nella regolazione della tensione.

6.3 Innesco del generatore

Data l'importanza che riveste l'innesco dei generatori di impulsi di tensione, le prove successivamente effettuate hanno avuto lo scopo di determinare la **minima soglia di innesco comandato** V_s (minima tensione di carica, per ogni valore della **tensione di innesco spontaneo** V_i , alla quale avviene l'innesco del generatore, mediante l'impulso di comando).

In via preliminare sono state fatte delle prove dirette ad una valutazione del valore della forma d'onda dell'impulso di comando; successivamente si sono analizzati i limiti di intervento del trigatron per diversi valori della tensione d'innesco del generatore di Marx per tutte le diverse combinazioni della polarità della tensione dell'alimentatore A (si veda la figura 19) con la polarità dell'impulso di comando.

Riassumendo, si è voluto caratterizzare il dispositivo di controllo della carica mediante l'innesco del primo stadio del generatore di Marx, in funzione della:

- Polarità della tensione di carica;
- Polarità dell'impulso di comando inviato sull'elettrodo di trigger;
- Posizione dell'elettrodo di trigger, collegato al dispositivo di innesco mediante una capacità di accoppiamento C_t .

Nelle due figure sottostanti si possono osservare la forma d'onda generata dalla scheda finale dell'impulso di trigger, per entrambe le polarità.

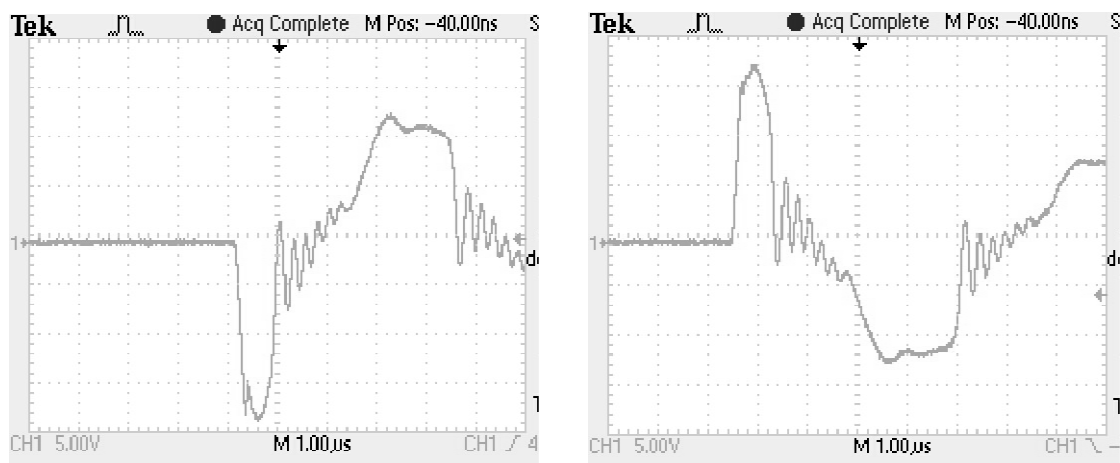


Figura 21 – Forme d'onda dell'impulso di innesco

Per le misure con l'oscilloscopio (Tektronix) si è usata una sonda 1000x, 3.0 pF e 100 M Ω , con scala 5.00 V/div verticale e 1.00 μ s/div orizzontale, dunque il valore di picco dell'impulso è di circa 17 kV, con entrambe le polarità. Mentre in figura 22 si può

analizzare la forma nel caso di formazione di una scarica del trigatron. Come appare evidente l'impulso con polarità negativa presenta un'ampiezza, quasi doppia rispetto a quello di polarità di segno opposto.

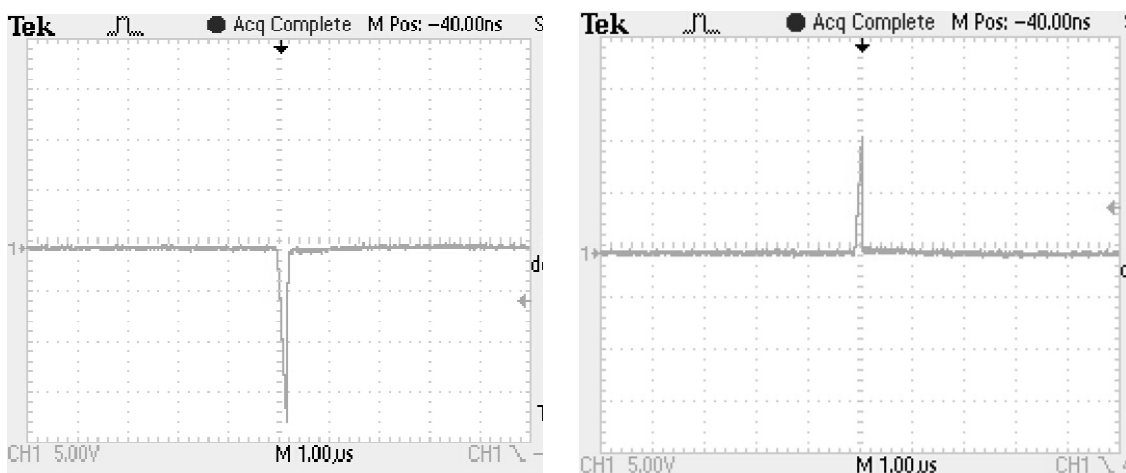


Figura 22 – Forma d'onda degli impulsi sugli elettrodi dello spinterometro

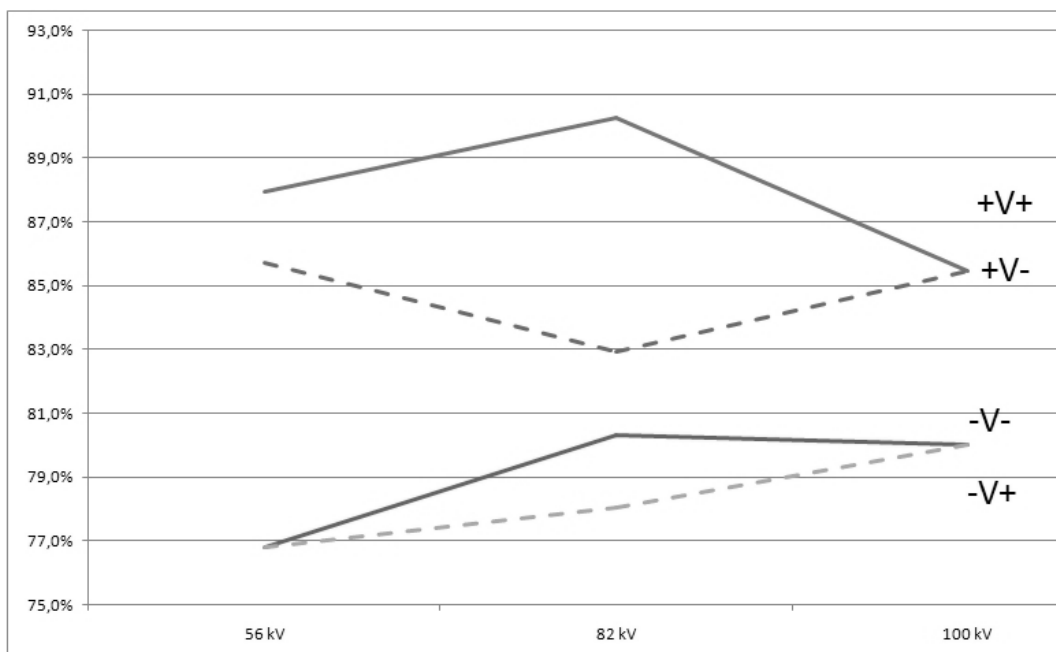
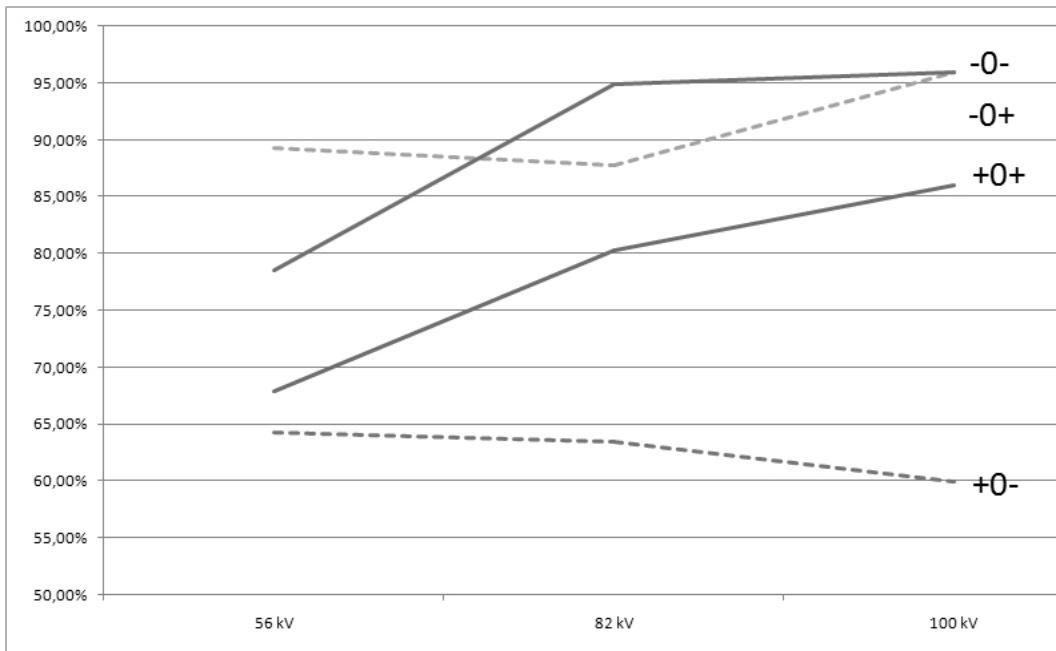
6.4 Modalità di esecuzione delle prove

Le misure in laboratorio si sono svolte collegando il dispositivo di innesco mediante delle capacità di accoppiamento ad una, all'altra o ad entrambe le sfere del trigatron. Generando un'onda impulsiva 1/50, con un singolo stadio del generatore di Marx, di volta in volta si è determinata la V_i il più possibile vicino ai 56, 82 o 100 kV, variando solamente la distanza tra le due sfere del trigatron; si sono quindi eseguite prove ripetute di innesco comandato con tensione di carica positiva o negativa, con impulso di comando di polarità positiva o negativa inviato o all'elettrodo della sfera a terra o all'elettrodo della sfera in tensione (lato alimentazione A).

Si sono adottate le seguenti convenzioni sui simboli di seguito usati:

- Il primo indica la polarità della tensione di carica del generatore (\pm);
- Il secondo la posizione dello spinterometro comandato. Con lo 0 si intende che l'elettrodo ausiliario è collegato mediante il condensatore di accoppiamento all'elettrodo che si trova a potenziale di terra, V indica che il comando avviene sull'elettrodo in tensione ed infine con 0V che il comando avviene su entrambi, usando quindi due condensatori di accoppiamento;
- L'ultimo la polarità dell'impulso di comando (\pm);

Nelle figure seguenti sono rappresentati i grafici dei risultati sperimentali ottenuti durante le prove. In appendice sono invece raccolte le tabelle con le prove di innesco. In ordinata è indicato l'andamento dei valori percentuali delle soglie di innesco comandato V_s , riferiti a quelli delle tensioni di innesco spontaneo V_i , ovvero $(V_s / V_i) \%$, ed in ascissa i valori della tensione di innesco spontaneo V_i (56, 82 e 100 kV). Le curve continue indicano che nella misura vi è la stessa polarità tra l'impulso di comando inviato sull'elettrodo ausiliario e la polarità della tensione di carica, le curve tratteggiate che la polarità tra le stesse è discorde.



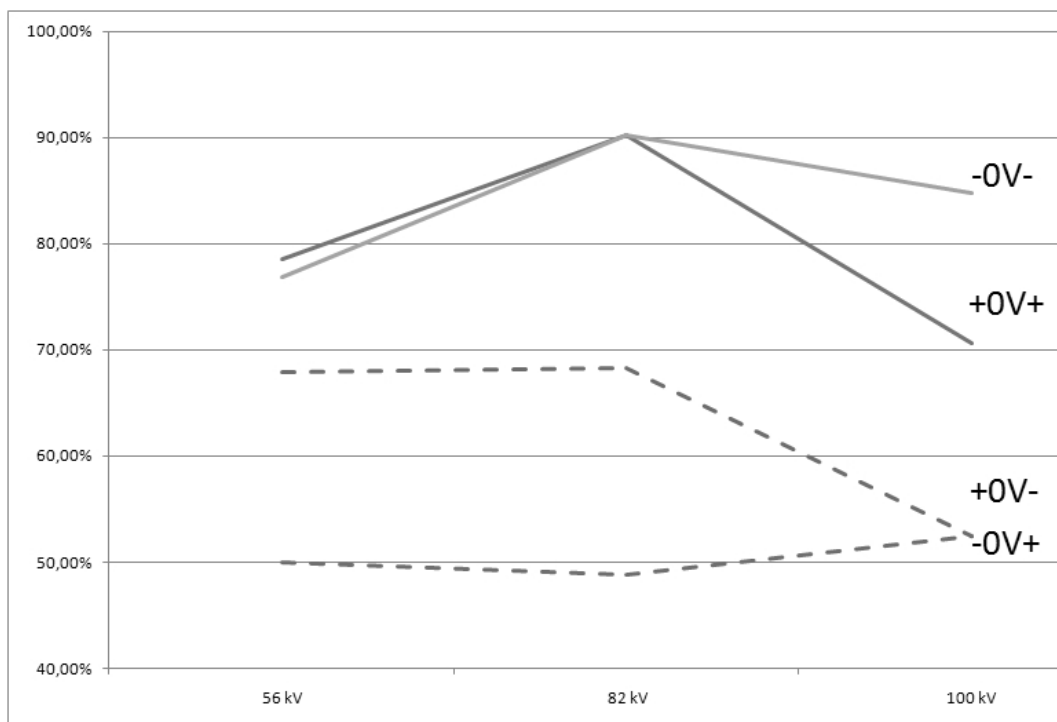


Figura 23 – Soglie di innesco comandato percentuali in funzione della tensione di innesco spontaneo

La tabella sottostante invece contiene i relativi valori numerici. Le celle evidenziate in grassetto contengono i valori che si riferiscono a delle misure ripetute una seconda volta per verificarne il corretto valore.

Soglie di innesco			
Configurazione	56 kV	82 kV	100 kV
+V+	87,9%	90,24%	85,44%
-V-	76,79%	80,29%	80,00%
+0-	64,29%	63,41%	60,00%
-V+	76,79%	78,05%	80,00%
+0+	67,86%	80,29%	78,71%
-0+	89,29%	87,80%	96,00%
+V-	85,71%	82,93%	85,44%
-0-	78,57%	94,89%	96,00%
+0V+	78,57%	90,24%	70,64%
+0V-	67,86%	68,29%	52,47%
-0V-	76,79%	90,24%	84,76%
-0V+	50,00%	48,78%	52,47%

Tabella 4 – Riepilogo delle soglie di innesco percentuali riferite a tutte le prove

6.5 Conclusioni

Dall'analisi dei grafici e della tabella 4 si osserva che le minime soglie di innesco si hanno, considerando separatamente le tre configurazioni 0, V, e 0V per:

+0- ovvero tensione di carica del generatore positiva, impulso di comando negativo ed elettrodo ausiliario collegato a terra;

-V+ ovvero tensione di carica del generatore negativa, impulso di comando positivo ed elettrodo ausiliario collegato al generatore;

-0V+ ovvero tensione di carica del generatore negativa, impulso di comando positivo ed entrambe gli spinterometri collegati;

I dati confermano quindi che con le **polarità discordi** +0-, -V+ e -0V+ si ottengono soglie di innesco migliori, mentre le curve corrispondenti alle **polarità concordi** -0-, +V+ e -0V- mostrano le soglie con valori maggiori. Escluso il caso con entrambe gli spinterometri collegati, la configurazione migliore è la +0- con una soglia media di innesco del 63% circa. Con la configurazione invece -V+ la tensione di soglia cresce al crescere della V_i ma rimane comunque sempre superiore al 76% circa. Con entrambe gli spinterometri nella configurazione -0V+ si ottiene che la soglia di innesco risulta minore della precedenti configurazioni a singolo elettrodo ausiliario, pari a circa al 50%, valore che sembra non dipendere dalla tensione V_i .

Appendice A

Prove di innesco

Si sono adottate le seguenti convenzioni sui simboli di seguito usati:

0 → Scarica non avvenuta

X → Scarica avvenuta

V_i (kV) **56**
U% **53,5**
P (mbar) **1020**
T (°C) **20,9**

V_i (kV) **82**
U% **29,9**
P (mbar) **1030**
T (°C) **20,6**

V_i (kV) **100**
U% **36,6**
P (mbar) **1024**
T (°C) **21,2**

Tabella A1 – Condizioni ambientali in cui si sono svolte le prove

Tensione di innesco spontaneo V_i = 56 kV

	+V+										% Innesco
V _s (kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
51	X	X	X	0	0	X	X	X	X	X	87,9%
49	X	0	X	X	X	0	0	X	X	X	
47	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	+V-										
V _s (kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
48	X	X	X	X	X	0	0	X	0	X	85,7%
46	X	X	X	X	0	0	0	0	0	0	
43	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

-V-											
Vs (kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
43	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	76,8%
42	X	X	0	X	X	0	0	0	0	0	
-V+											
Vs (kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
53	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
49	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
46	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
43	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	76,8%
40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
+0+											
Vs (kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
46	0	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
43	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
40	0	0	X	X	X	X	0	X	X	X	
38	X	0	X	0	X	0	0	X	X	X	67,9%
35	X	0	0	0	0	0	0	X	0	0	
+0-											
Vs (kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
46	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
42	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
40	X	X	X	0	0	X	X	X	X	X	
36	X	X	X	X	X	0	X	0	X	0	64,3%
32	0	0	0	0	0	X	0	0	0	0	
-0-											
Vs (kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
44	0	X	X	X	X	X	X	X	X	X	78,6%
42	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
-0+											
Vs (kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
54	X	X	X	X	0	0	X	X	X	X	
52	0	X	X	X	0	X	X	X	X	X	
50	X	0	X	X	X	X	X	X	X	X	89,3%
46	X	0	0	0	0	0	0	0	0	X	

+0V+											
Vs (kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
50	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
46	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
44	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	78,6%
40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
+0V-											
Vs (kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
38	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	67,9%
36	0	X	X	X	X	X	X	X	0	0	
35	0	X	0	0	0	0	0	0	0	0	
-0V-											
Vs (kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
43	X	X	X	X	X	X	X	X	0	X	76,8%
42	X	X	X	0	0	0	0	0	0	0	
40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
-0V+											
Vs (kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
40	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
32	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
28	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	50,0%
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Tensione di innesco spontaneo $V_i = 82$ kV

+V+											% Innesco
Vs (kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
78	X	X	0	0	X	X	X	X	X	X	
76	X	X	X	0	X	X	X	0	X	0	
74	0	0	X	X	X	X	X	X	X	X	90,2%
72	0	0	0	0	0	0	0	X	X	X	
+V-											
Vs (kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
74	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
70	X	0	0	0	0	X	X	X	X	X	
68	X	X	X	X	X	X	X	0	X	X	82,9%
66	0	0	0	X	0	0	X	X	X	X	
64	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

-V-											
Vs (kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
70	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
66	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	80,3%
64	X	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
-V+											
Vs (kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
70	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
66	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
64	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	78,0%
62	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
+0+											
Vs (kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
66	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	80,3%
64	0	X	0	X	X	0	X	0	0	X	
62	0	X	X	0	0	0	0	0	0	0	
+0-											
Vs (kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
62	0	X	X	X	0	X	X	X	0	0	
58	0	X	X	0	0	X	X	X	X	X	
54	X	X	X	X	0	X	0	X	X	X	
52	X	0	X	X	X	X	X	X	X	X	63,4%
50	0	0	0	X	0	0	0	0	0	0	
-0-											
Vs (kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
78	X	X	0	0	0	0	0	X	X	X	94,9%
76	0	0	X	0	X	0	0	X	X	0	
74	0	0	0	0	X	X	X	0	0	X	
-0+											
Vs (kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
78	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
74	X	X	X	0	X	0	X	0	X	X	
72	X	0	X	0	X	0	X	X	X	0	87,8%
68	0	X	0	0	0	X	0	X	0	X	

+0V+											
Vs (kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
78	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
74	X	X	X	X	0	X	X	X	0	X	90,2%
72	0	0	X	0	0	0	0	X	X	X	
+0V-											
Vs (kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
64	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
58	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
56	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	68,3%
54	0	X	0	X	0	X	X	0	0	X	
-0V-											
Vs (kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
78	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
74	X	X	X	0	X	X	X	X	X	X	90,2%
72	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
-0V+											
Vs (kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
50	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
46	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
42	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
40	X	0	X	0	0	X	X	X	X	0	48,8%
38	0	0	0	X	0	X	0	0	X	0	

Tensione di innesco spontaneo $V_i = 100$ kV

											% Innesco
+V+											
Vs (kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
90	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	87,4%
88	X	X	X	0	0	X	X	X	X	0	
86	X	X	0	0	0	0	0	0	0	0	
+V-											
Vs (kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
88	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	85,4%
86	0	0	X	0	0	0	0	0	0	0	

-V-											
Vs (kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
88	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
84	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
82	X	X	X	0	X	X	X	X	X	X	82,0%
80	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
-V+											
Vs (kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
88	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
84	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
80	X	X	0	X	X	X	0	0	X	X	80,0%
78	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
+0+											
Vs (kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
82	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
78	X	X	0	0	X	X	0	0	X	X	78,7%
74	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
+0-											
Vs (kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
74	X	X	0	X	X	0	X	X	X	X	
70	X	X	X	X	0	X	0	X	X	0	
64	X	X	X	X	X	X	X	0	X	X	
60	X	X	X	X	X	X	X	0	X	0	60,0%
56	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
-0-											
Vs (kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
96	X	X	X	X	X	0	X	X	0	0	96,0%
94	X	0	0	0	X	0	X	0	0	X	
92	X	0	0	0	0	0	0	X	0	X	
-0+											
Vs (kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
98	0	X	X	X	X	0	0	X	X	X	
96	X	X	0	0	X	0	X	X	X	X	96,0%
94	0	0	0	0	X	0	0	0	0	0	

+0V+											
V _s (kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
86	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
82	X	X	X	X	0	X	X	X	0	X	82,7%
78	X	0	0	0	X	0	0	0	0	X	
+0V-											
V _s (kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
82	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
78	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
70	X	X	X	X	0	0	0	0	X	X	70,6%
68	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
-0V-											
V _s (kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
86	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
84	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	84,8%
80	0	X	X	X	X	0	0	0	0	0	
78	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
-0V+											
V _s (kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
60	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
56	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
52	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	52,5%
48	X	0	X	0	0	X	X	X	0	0	
46	0	0	X	X	0	X	0	0	0	X	

Tabella A2 – Prove di innesco più significative

Le celle evidenziate nella prima colonna di sinistra della tabella A2 contengono la minima soglia di innesco comandato V_s ottenuta con quella particolare configurazione mentre le celle dell'ultima colonna di destra il corrispondente valore percentuale di V_s/V_i .

Appendice B

Norme CEI di riferimento

CEI EN 61010 Categorie di sovratensione

La suddivisione di un sistema di distribuzione dell'energia elettrica in categorie si basa sul presupposto che un transitorio pericoloso sarà attenuato man mano che percorre l'impedenza del sistema: un numero di CAT più elevato indica un ambiente elettrico con maggiore potenza disponibile e transitori a elevata energia.

CEI 64/8 Classificazione degli impianti secondo la tensione di esercizio

Le Norme CEI 64/8 suddividono i sistemi in categorie come dato dalla tabella seguente:

	Categoria	Limiti di tensione nominale
BASSA	0	Minore o uguale a 50 V se a c.a. e a 120 V se in c.c. (non ondulata)
	I	Da oltre 50 fino a 1000 V se a c.a. e da 120 V fino a 1500 V se in c.c.
MEDIA	II	Da oltre 1000 V se a c.a. e oltre 1500 V se a c.c., fino a 30 kV compresi
ALTA	III	Oltre i 30 kV

Bibliografia

1. E. Kuffel, W. S. Zaengl: *High-Voltage Engineering*, Pergamon Press, 1984
2. E. Kuffel, W. S. Zaengl, J. Kuffel: *High-Voltage Engineering*,
Second edition, Butterworth-Heinemann, 2000
3. G. Baldo: *Tecnica delle alte tensioni*, Ed. CLEUP
4. B. Macchiaroli: *Innesco di un generatore di impulsi di tensione con dispositivo trigatron*, L'Elettrotecnica, Vol. LIII – N. 3 bis – Marzo 1966, pp. 232, 233
5. P.F. Williams, F.E. Peterkin: *Triggering in trigatron spark gaps: A fundamental study*,
Department of Electrical Engineering, University of Nebraska, 1989
6. K. Feser: *Problems related to switching impulse generation at high voltages in the test plant*, Haefely Publication, E1-29, 1974, pp 3, 4, 5
7. K. Feser: *Mechanism to explain the switching impulse phenomena*,
Haefely Publication, E1-13, 1971, pp 2, 3