

*Appunti dalle lezioni del corso di*

# **MODELLISTICA ELETTROMAGNETICA DEI MATERIALI**

*(prof G. Lupò)*

## **CAPITOLO X**

### **ESPERIENZE DI LABORATORIO I**

I Laboratori che interessano il corso sono :

- La Sala Alta Tensione (intitolata al prof. Giorgio Savastano nel febbraio 2010) e sottostante sala alternatori;
- il laboratorio Circuiti e Diagnostica

#### **§X.1 Il Laboratorio Alta Tensione “G. Savastano” del Dipartimento di Ingegneria Elettrica (DIEL)**

Il primo laboratorio (Sala AT) è alloggiato in una struttura speciale di grandi dimensioni (base 32m x 16 m altezza 18 m) paragonabile ad un palazzo di quattro piani (vuoto all'interno e senza aperture). Le pareti interne ed il soffitto sono completamente rivestite di schermo elettromagnetico ed acustico. Il pavimento è costituito da una rete a maglie e strisce di rame rivestite di conglomerato conduttivo, in modo da potersi considerare equipotenziale in ogni condizione di funzionamento ed è equipaggiato con dispersori di terra di grade profondità (la resistenza di terra è inferiore al decimo di ohm). La schermatura è necessaria non solo per motivi di sicurezza ma anche per evitare di trasmettere o ricevere disturbi elettromagnetici.

La Sala AT è equipaggiata con due generatori di alta tensione ed uno di corrente di alta intensità:

- a) generatore di tensione sinusoidale costituito da alternatori sincroni a frequenza variabile tra 16 e 150 Hz e da un trasformatore speciale (a due stadi in cascata) in grado di erogare tensioni sinusoidali fino a 1,35 MV (valori efficaci, un morsetto collegato al rete di terra) e intensità di corrente fino a 1 A (valore efficace, per un'ora); tale apparecchiatura, costruita dalla Siemens negli anni '60, è unica in Italia ed in Germania ha un fratello maggiore (a tre stadi, circa 2 MV) all'Università di Monaco di Baviera; per la misura della tensione in uscita viene usato l'apposito divisore capacitivo, con tensione di uscita fino a 100 V;
- b) generatore di tensione aperiodica (“impulsiva”) della PASSONI&VILLA costituito da 12 stadi capacitivi (resistenza di carico 20k $\Omega$ ) caricabili in parallelo fino ad una tensione di 200 kV (stazionari); con cambio improvviso di configurazione (ottenuto tramite l'innesco di opportuni scaricatori) tali stadi si dispongono “in serie”

- consentendo l'erogazione di una tensione fino a 12 volte la tensione di carica del singolo stadio; in realtà la forma d'onda sarà di tipo aperiodico e di valore massimo inferiore del 10-20% rispetto al suddetto valore; il generatore è collegato ad un carico fisso (*condensatore zavorra*, capacità 500-1000-1500 pF), per rendere il funzionamento del generatore indipendente dalla capacità dell'oggetto (in certe condizioni); la misura della tensione si attua attraverso un partitore di tensione resistivo, *compensato* con condensatori per tenere conto dei parametri parassiti, inevitabili date le dimensioni del partitore (circa 6 m di altezza);
- c) banco di scarica di condensatori da 4 nF, 10 kV, in grado di erogare correnti di intensità fino a 300 kA per 5-6 ms; si possono in tal modo ad esempio creare campi magnetici transitori in aria di elevato valore.

La Sala Alta Tensione è dotata di una cabina a gabbia di Faraday in cui sono alloggiati, per la sicurezza degli operatori, i pulpiti di comando dei due generatori maggiori, che non possono essere messi in funzione se non sono verificate le condizioni di sicurezza previste.

Nella Sala Alta Tensione sono collocate anche altre altre apparecchiature per alimentazione e misura in prove a tensioni medio-alte, che saranno richiamate in seguito.

Nel paragrafo seguente si farà un cenno al funzionamento dei due generatori più importanti, volendo questa nota essere solo introduttiva ad esperienze nella sala Alta Tensione.

## §IX.2 Il Laboratorio Circuiti e Diagnostica del DIEL

Il secondo ambiente è un laboratorio multifunzionale, in cui sono presenti computer multifunzionali e computer dedicati a specifiche acquisizione dati da celle di misura (es. misura di resistività, permittività, ... in funzione della frequenza e della temperatura). Sono presenti apparecchiature e strumentazione speciali quali rigidimetro, picoamperometro, misuratore di impedenza, .... per la caratterizzazione i materiali e componenti.

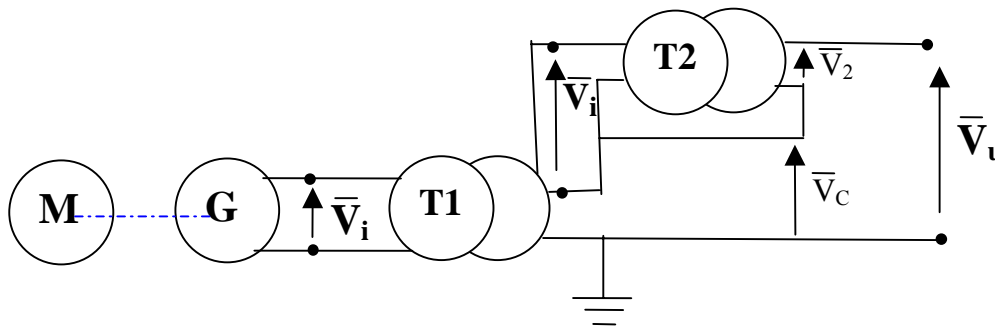
## §IX.3 Il funzionamento del generatore a frequenza industriale

In fig. 1 è riportato lo schema circuitale semplificato del generatore sinusoidale. Un motore a corrente continua M (600 kW), alimentato dalla rete ENEL attraverso un sistema di conversione ac/dc, trascina a velocità controllabile un generatore sincrono monofase calettato sullo stesso asse. Possiamo così variare da 0 a 5 kV la tensione ai morsetti del primario del primo stadio T1 del trasformatore di rapporto  $a_1$ . Un morsetto dell'avvolgimento secondario del trasformatore è collegato a terra, l'altro morsetto viene collegato al primo morsetto del trasformatore T2 gemello di T1; il morsetto del primario di T2 viene collegato al morsetto omologo dell'avvolgimento del secondario di T2.

La tensione ai morsetti di uscita del secondo trasformatore vale quindi

$$\bar{V}_u = \bar{V}_2 + \bar{V}_c = \frac{\bar{V}_i}{a_2} + \left( \frac{\bar{V}_i}{a_1} - \bar{V}_i \right) = \left( \frac{1}{a_2} + \frac{1}{a_1} - 1 \right) \bar{V}_i \cong \frac{2}{a} \bar{V}_i$$

il rapporto di trasformazione, per due stadi *in cascata* uguali, è quindi, con buona approssimazione alla metà del rapporto singolo  $a$ , molto minore di 1 (nel caso del trasformatore Siemens della sala AT,  $a$  è circa 1/130; ad una tensione di 1 kV<sub>eff</sub> in ingresso corrisponde una tensione di uscita di 260 kV, ad una tensione di 5 kV in ingresso una tensione di 1300 kV in uscita).



#### §X.4 Il funzionamento del generatore a impulso

Il generatore ad impulsi (*circuito di Marx*) è costituito da una alimentatore in tensione continua regolabile da da 0 a 200 kV (positiva o negativa, con un morsetto a terra) a sua volta collegato alla rete ENEL monofase in bassa tensione (220 V) attraverso un sistema raddrizzatore moltiplicatore. Per caricare i condensatori di stadio (costituiti a loro volta da due condensatori in serie da 1,5  $\mu$ F, 100 kV) attraverso due resistenze di carica ( $R_c = 20 \text{ k}\Omega - 2$  per ogni stadio) occorre operare come segue:

- si alimentano dal banco i circuiti ausiliari, avendo avuto cura di **verificare l'esattezza e la funzionalità dei collegamenti e dei contatti fissi e mobili, nonché l'osservanza tutte le condizioni di sicurezza generali e specifiche**, in particolare il corretto contatto dei pantografi di terra con il morsetto fuori terra del generatore e con gli altri punti predisposti ed il funzionamento del contatto mobile di sicurezza (**fioretto**) che viene rimosso prima di abbandonare l'area dei generatori per procedere alla prova;
- le persone raggiungono le aree di sicurezza; gli operatori si portano nella cabina e chiudono tutti gli accessi alla zona (un'apertura accidentale degli accessi fa posizionare in sicurezza i pantografi di terra);
- si comanda dal banco il distacco dei pantografi di terra di sicurezza e si verifica a vista (dalla cabina) l'effettivo sgancio;
- si imposta numericamente la tensione voluta di carica dei condensatori;
- si distanziano opportunamente gli spinterometri di innesco stadio (manovra semiautomatica);

- f) si predisporre il circuito di innesco (trigger) degli spinterometri di stadio per la commutazione parallelo/serie in posizione manuale o automatica;
- g) si comanda la chiusura degli interruttori abilitanti la carica dei condensatori (in questo momento la tensione di carica è ancora nulla);
- h) se tutto appare in ordine, si fa partire la carica dei condensatori attivando un circuito a intensità di corrente controllata (SCR), per cui i condensatori si caricheranno progressivamente fino alla tensione di carica preimpostata  $V_0$ ; una segnalazione luminosa (“READ”) indicherà che tale condizione è stata raggiunta; lo stato di carica viene segnalato sul banco di comando; a fine carica tutti i “primi morsetti” dei condensatori saranno a potenziale  $V_0$ , tutti i “secondi morsetti” a potenziale zero (di terra); il “secondo morsetto” fisicamente più in alto è collegato al condensatore zavorra, al circuito di misura ed all’oggetto in prova, che quindi fino a questo punto non è soggetto a tensione elettrica;
- i) se il trigger era posizionato su “automatico”, a questo punto comanderà l’innesco, praticamente simultaneo, degli spinterometri che diventano “interruttori ad arco” per il circuito “serie” dei condensatori e dei cosiddetti “resistori di fronte” da  $50\Omega$  per stadio, in serie agli stessi condensatori ed all’oggetto in prova o, meglio alla capacità zavorra ad esso in parallelo e di capacità predominante; il tempo necessario perché la tensione sull’oggetto passi dal valore nullo al valore massimo è collegato alla costante di tempo del circuito serie appunto costituito dai condensatori in serie degli stadi, dal condensatore zavorra e dai resistori di “fronte”<sup>1</sup> e quindi, ad esempio

$$\tau_{fronte} \approx \left( \frac{C_{stadio}}{N_{stadi}} \oplus C_{zavorra} \right) \cdot (N_{stadi} R_{fronte}) = \left( \frac{1,5 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 12} \oplus 10^{-9} \right) (12 \cdot 50 + 200) \cong 10^{-9} \cdot 800 = 0,8 \mu s.$$

Il “tempo di salita” della tensione al suo valore massimo risulta essere circa il doppio della suddetta costante di tempo e verrà meglio valutato in seguito, anche sperimentalmente, facendo anche riferimento alla normativa internazionale su tale argomento.

- j) Successivamente, la tensione diminuisce per la scarica dei condensatori sui resistori del generatore e del circuito di misura; per regolare il tempo di dimezzamento della tensione a valori significativi [per esempio è significativo un tempo di dimezzamento di  $50 \mu s$  per simulare, secondo gli standard internazionali, la forma d’onda di tensione indotta in circuiti elettrici per eventi di fulmine (onde brevi) o di  $2500-3500 \mu s$  per simulare transitori dovuti a manovre nello stesso circuito o in circuiti prossimi (onde lunghe o switching surges)], si dispongono, lato generatore, in parallelo all’oggetto in prova, dei “resistori di coda”, su cui si scaricano “in parallelo” i condensatori del generatore e il condensatore zavorra. Ad esempio, disponendo 12 resistori di coda da  $400 \Omega$  in serie, avremo una costante di tempo pari a

$$\tau_{coda} \approx \left( \frac{C_{stadio}}{N_{stadi}} // C_{zavorra} \right) \cdot (N_{stadi} R_{coda}) = \left( \frac{1,5 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 12} // 10^{-9} \right) (12 \cdot 400) \cong 63 \cdot 10^{-9} \cdot 4800 \approx 300 \mu s$$

<sup>1</sup> Ai dodici resistori di fronte “interno” occorre aggiungere un resistore di fronte “esterno” da  $200 \Omega$  sulla sommità del generatore, al di là della colonna dei resistori di coda (vedi fig.1 §X.5)

Possono esserci numerose varianti alla configurazione del generatore ed alle procedure di innesco, alla disposizione dei componenti principali ed ausiliari, come dimostra l'abbondante letteratura degli anni '60 e '70. Possono essere anche ottenute forme d'onda pseudoperiodiche, come nelle prove a impulso sui trasformatori.

Una trattazione particolare meriterebbero poi gli strumenti e i metodi di misura di alte tensioni impulsive, sinusoidali e continue.

Nella figura successiva sono indicati:

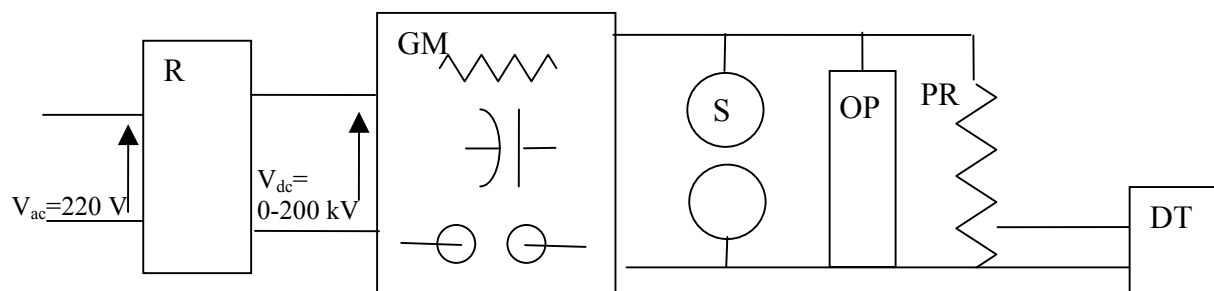
R gruppo convertitore a più stadi; ingresso tensione sinusoidale 220 V, tensione uscita continua 0-200 kV positiva o negativa verso terra

GM generatore di Marx multistadio; tensione max impulsiva 2,4 MV

S Spinterometro a sfera

PR partitore resistivo compensato

DT digitalizzatore Tektronix 2 GSa/s



## §X.5 Esercitazione in Sala Alta Tensione del 23 aprile 2010 - TARATURA DEL GENERATORE AD IMPULSO (Riferimento Norma CEI 42-1)



Temperatura ambiente 17°C – Pressione 1020 mbar – Coeff correttivo 1,005 (approssimato ad 1)

### Polarità negativa

Il circuito utilizzato è rappresentato in fig. 1.

Trattasi di un banco condensatori a  $N=12$  stadi o celle. Ogni cella è costituita da due condensatori in serie  $C$  (0,15 nF 100 kV), caricati attraverso resistenze  $R_q$  (20k $\Omega$ ) da un generatore in continua (la tensione tra i morsetti AB può variare da 0 a  $\pm 200$  kV)<sup>2</sup>.

Dal banco di comando è possibile impostare e controllare la tensione di uscita del generatore in continua che nel seguito sarà indicata con  $V_q$  (tensione di carica dei condensatori). La tensione “nominale” del generatore è data dalla tensione di carica per il numero di stadi:

$$V_N = V_q N$$

Gli  $N$  stadi sono disposti “in cascata” per cui, in qualche millisecondo (essendo  $\tau_q \approx N \cdot \frac{C}{2} (2NR_q) \approx 6(0.15 \cdot 10^{-9}) \cdot 2 \cdot 12 \cdot 10^4 \approx 400 \mu s$ ) i condensatori potrebbero ritenersi carichi e risultare “in parallelo” alla tensione  $V_q$ . In realtà, occorre attendere molto di più, avvenendo la carica non a tensione costante, ma a corrente di intensità controllata dal banco (valore max 50mA).

Ogni stadio è dotato di un “ramo d’innescò” costituito (fig.2) da un resistore (“di fronte”) di resistenza  $R_f=50\Omega$ , molto inferiore alla resistenza di carica  $R_q$ , e da uno spinterometro  $S$  costituito da due semisfere in aria, di cui una (nei primi quattro stadi) dotata di elettrodo

---

<sup>2</sup> consistente in un convertitore della tensione sinusoidale di rete (220V) [ circuito raddrizzatore controllato tramite tiristori (SCR) e circuito duplicatore a diodi al selenio, raffreddati in olio].

ausiliario di innesco (trigger T)<sup>3</sup> comandabile dal banco. La distanza tra le semisfere è da regolare in modo tale che, in corrispondenza della tensione di  $V_q$  non possano avvenire fenomeni di scarica<sup>4</sup>.

Il banco di comando è in grado di controllare la tensione di carica del primo stadio; quando la tensione di carica raggiunge il valore  $V_q$  impostato, dà indicazione luminosa di esser pronto (“READY”) per innescare gli spinterometri S, che ha senz’altro luogo se il banco è predisposto in modo automatico, altrimenti attende per qualche secondo un comando di trigger manuale.

Il trigger ionizza la zona circostante l’elettrodo e favorisce la scarica nello spazio interelettrodico (gap) di S. Supponendo che la scarica avvenga in un intervallo di tempo trascurabile rispetto ai tempi in gioco e contemporaneamente per tutti gli stadi, i lati “di fronte” collegano i morsetti non omologhi di condensatori consecutivi, i quali si ritrovano praticamente in serie<sup>5</sup> con una tensione totale “nominale” pari ad N volte la tensione di carica<sup>6</sup>.

Nell’ultimo stadio, il generatore è collegato al carico attraverso un resistore di fronte. Il carico è costituito dal parallelo di :

- a) spinterometro a sfere  $S_0$  di 1 m di diametro, che ha la funzione doppia di misura diretta dell’alta tensione e di protezione da tensioni eccessive;
- b) l’oggetto in prova, ordinariamente rappresentabile con una capacità di 1-10 pF (nel nostro esperimento, una catena di isolatori in vetro del tipo cappa e perno);
- c) un condensatore “zavorra” (load capacitor) della capacità di 500-1500 pF, per avere un funzionamento del generatore praticamente indipendente dalla capacità del particolare oggetto in prova;
- d) un partitore di tensione ( $R_1=12k\Omega$  ;  $R_2=50\Omega$  ) collegato, attraverso un cavo coassiale ad impedenza caratteristica di  $50 \Omega$  , alla strumentazione di registrazione presente in cabina;
- e) da una serie di  $N=12$  “resistori di coda” ( $R_c=400 \times 12=4800 \Omega$ ) che determinano le caratteristiche della seconda parte dell’onda di tensione (in assenza di scarica).

L’ultimo resistore di fronte può essere in parte “esterno”( $R_{fe}$ ), cioè al di là del resistore di coda.

---

<sup>3</sup> Simile ad una candela d’accensione di una automobile.

<sup>4</sup> La regolazione della distanza può comportare qualche incertezza operativa dovuta a diversi fattori, per cui può avvenire – come si è verificato più volte durante l’esercitazione – una scarica “spontanea” non richiesta tra le semisfere dello spinterometro S. In tal caso bisognerà aumentare manualmente la distanza tra le semisfere e ricominciare dalla fase di carica

<sup>5</sup> si ricorda che la tensione su un condensatore è una grandezza di stato e non può variare bruscamente.

<sup>6</sup> Nel processo di innesco dell’intero generatore occorre considerare le cosiddette “capacità parassite” di stadio, dovute ai singoli elettrodi dei condensatori che hanno assunto, dopo la fase di carica, un determinato valore del potenziale e quindi di tensione rispetto alle pareti del laboratorio (supposte ad esempio a potenziale rigorosamente nullo). Anche queste tensioni non possono variare bruscamente, per cui basterebbe innescare il primo stadio per avere – a maggior ragione – l’innescò degli altri. Per migliorare questa circostanza, nel nostro laboratorio vengono innescati i primi quattro stadi. Ciononostante, i tempi di formazione delle varie scariche non sono trascurabili e la “propagazione” dell’innescò non risulta istantanea, per cui si hanno, nella fase iniziale, numerose incertezze sulla forma d’onda, di cui le Norme tengono conto.

fig.1 – Generatore ad impulsi – Circuito di carica

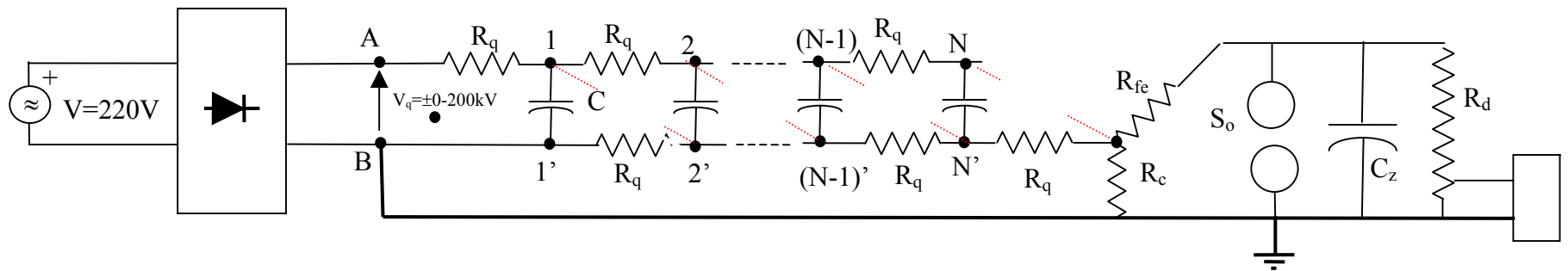
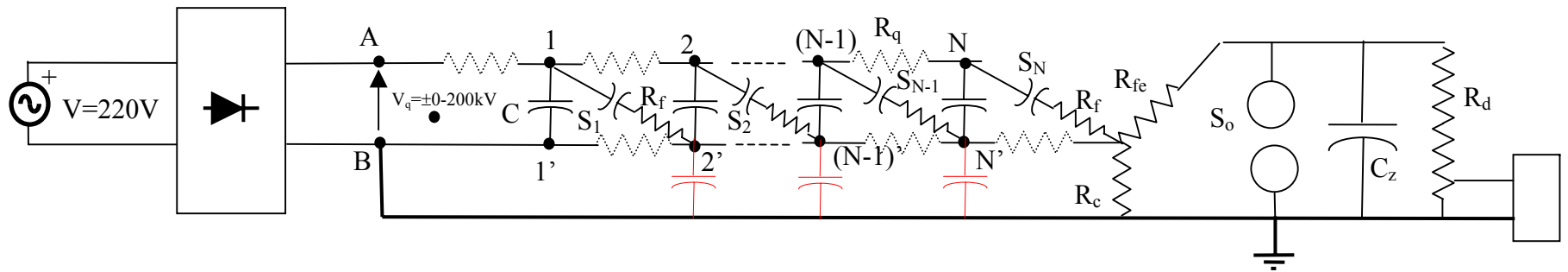


fig.2 – Innesco del generatore e circuito di scarica





**Prima operazione:** azzeramento gap spinterometrico; al contatto tra le sfere- verificato con ohmmetro – il numeratore verticale segna 0515 [mm]

**Seconda operazione :** prova a distanza d=15 cm polarità negativa; tensione di scarica 50% secondo la Norma CEI 42-1 266 kV (trascurando la il fattore di correzione ambientale) (x : scarica; o : tenuta)

V <sub>q</sub> (kV)					
				<b>x</b>	
	<b>x</b>		<b>o</b>		<b>x</b>
		<b>o</b>			

La tensione corrispondente alla scarica 50% può essere ottenuta approssimativamente come

$$V_{q50\%} = \frac{1 \cdot 27 + 2 \cdot 26}{3} = 26,3kV$$

con un rendimento pari a

$$\eta = \frac{V_s}{N_{stadi} V_{q50\%}} = \frac{390}{41,3 \cdot 12} = \frac{390}{495,6} = 0,78$$

**Terza operazione :** prova a distanza d=26 cm polarità negativa; tensione di scarica 50% secondo la Norma CEI 42-1 390 kV (trascurando la il fattore di correzione ambientale) (x : scarica; o : tenuta)

V <sub>q</sub> (kV)					
42				<b>x</b>	
41	<b>x</b>		<b>o</b>		<b>x</b>
40		<b>o</b>			

La tensione corrispondente alla scarica 50% può essere ottenuta approssimativamente come

$$V_{q50\%} = \frac{1 \cdot 42 + 2 \cdot 41}{3} = 41,3kV$$

con un rendimento pari a

$$\eta = \frac{V_s}{N_{stadi} V_{q50\%}} = \frac{390}{41,3 \cdot 12} = \frac{390}{495,6} = 0,78$$

Le condizioni di tenuta e di scarica sono state valutate non solo visivamente, ma anche attraverso l'oscilloscopio

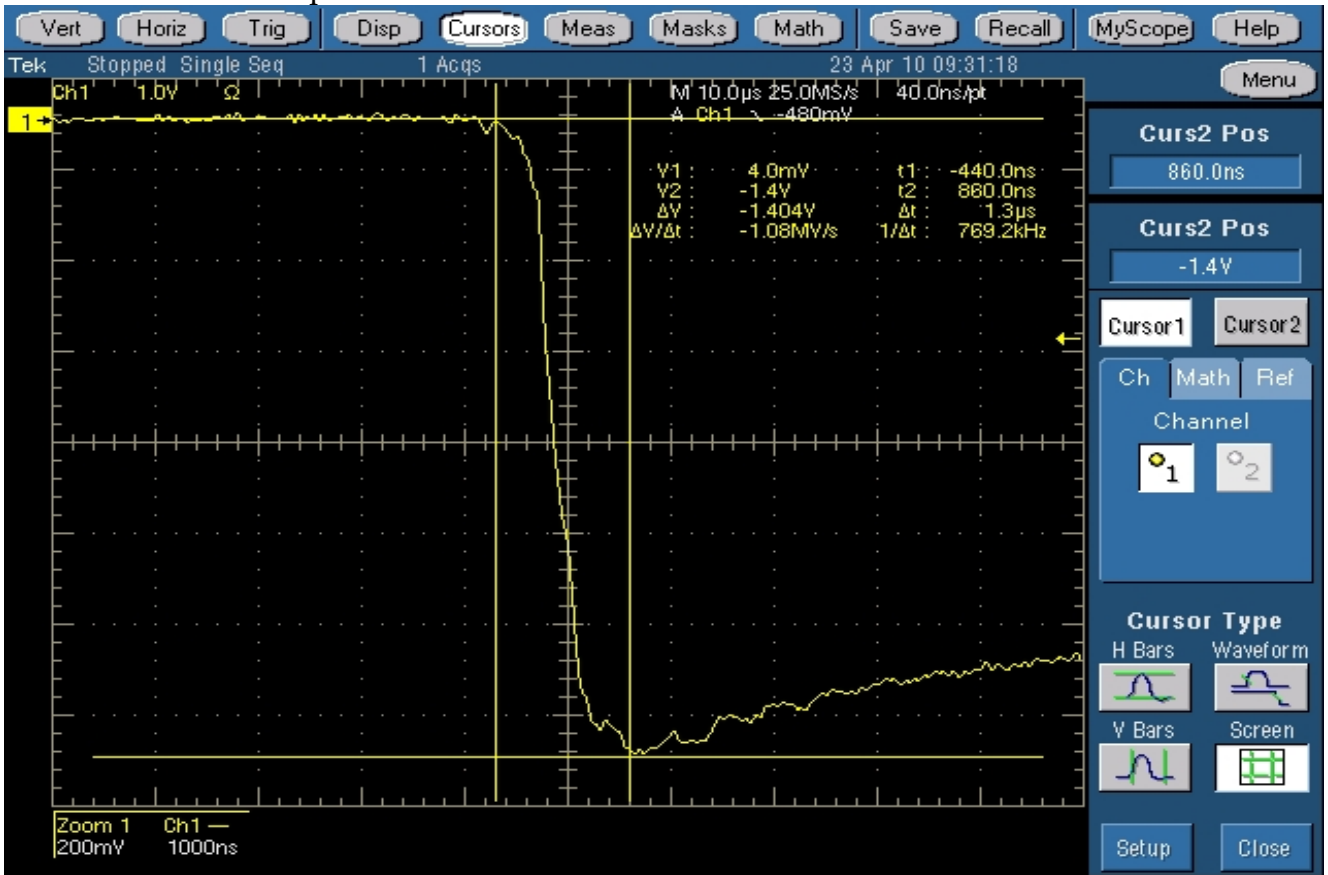


fig.3

Nella fig 3 è illustrato un tipico caso di tenuta: la tensione aperiodica (doppio esponenziale) ottenuta è “piena”; la tensione di carica corrispondente alla fig.3 è di 30 kV: la tensione di -1.404 V corrisponde quindi alla tensione di  $30 \times 12 \times 0,78 = 280$  kV (negativa); il tempo alla cresta vale  $1,3 \mu\text{s}$  (le norme prevedono tuttavia un calcolo convenzionale)

Nella fig.4 si ha un caso di scarica: la tensione ripercorre il previsto andamento aperiodico solo fino all'istante del collasso, laddove la tensione misurata diventa una sinusoide smorzata. L'istante di transizione definisce il “tempo alla scarica” su cui ci soffermeremo più avanti. La sua posizione rispetto alla cresta si rileverà particolarmente significativa.

L'oscillazione smorzata che si rileva all'oscilloscopio rappresenta l'evoluzione della tensione sull'oggetto in prova in un circuito che è profondamente cambiato: la scarica – assimilabile in prima battuta ad un corto-circuito - ha infatti “tagliato fuori” il generatore (circuito RC); le oscillazioni smorzate corrispondono ad un circuito RLC parallelo, in cui la R è corrispondente al canale di scarica, la C è quella zavorra e la L è l'induttanza parassita dei collegamenti; il valore di L può essere dedotto proprio dal periodo di pseudooscillazione.

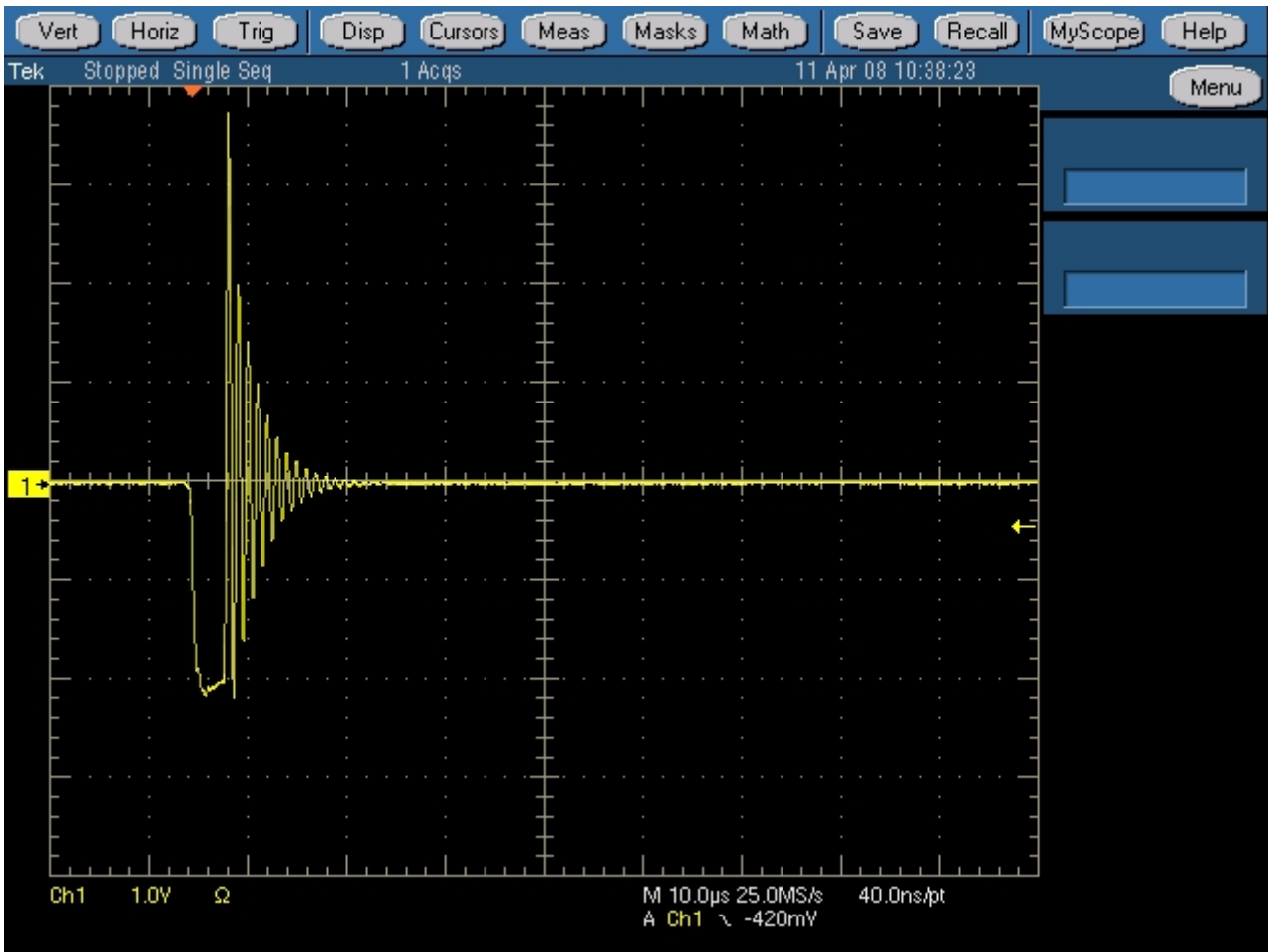


fig.4

Occorre comunque ricordarsi che l'approssimazione quasi stazionaria in esperimenti di questo tipo potrebbe non risultare sufficientemente verificata e quindi per l'interpretazione dei risultati occorre prestare la massima attenzione alle condizioni di prova (minimizzazione dei percorsi, doppie schermature, ecc....)

## TARATURA PER POLARITA' POSITIVA

**Prima operazione** : prova a distanza  $d=15$  cm polarità positiva; tensione di scarica 50% secondo la Norma CEI 42-1 390 kV (trascurando la il fattore di correzione ambientale) (x : scarica; o : tenuta)

$V_q(kV)$					
42				<b>x</b>	
41	<b>x</b>		<b>o</b>		<b>x</b>
40		<b>o</b>			

La tensione corrispondente alla scarica 50% può essere ottenuta approssimativamente come

$$V_{q50\%} = \frac{1 \cdot 42 + 2 \cdot 41}{3} = 41,3kV$$

con un rendimento pari a

$$\eta = \frac{V_s}{N_{stadi} V_{q50\%}} = \frac{390}{41,3 \cdot 12} = \frac{390}{495,6} = 0,78$$

### §X.6 Sperimentazione di campi elettrici uniformi e disuniformi. Figure di campo - figure di scarica ad impulso

Si utilizza il generatore ad impulso; le costanti strumentali sono quelle determinate durante l'esercitazione sulla taratura del generatore ad impulso

Per visualizzare figure di campo si utilizzano lastre isolanti (una di vetro ed una di plexigas), in due possibili differenti configurazioni elettroniche, per polarità positiva e negativa della tensione ed in condizione di tenuta e/o di scarica. Su tali lastre si sparge polvere neutra (talco).

#### Configurazioni elettrodiche (fig. IX.2.1)

- A) punta ortogonale alla lastra di vetro; elettrodo piano sottostante lastra di vetro collegata a terra;
- B) punta radente la lastra su un lato; elettrodo lineare sul lato opposto collegato a terra.

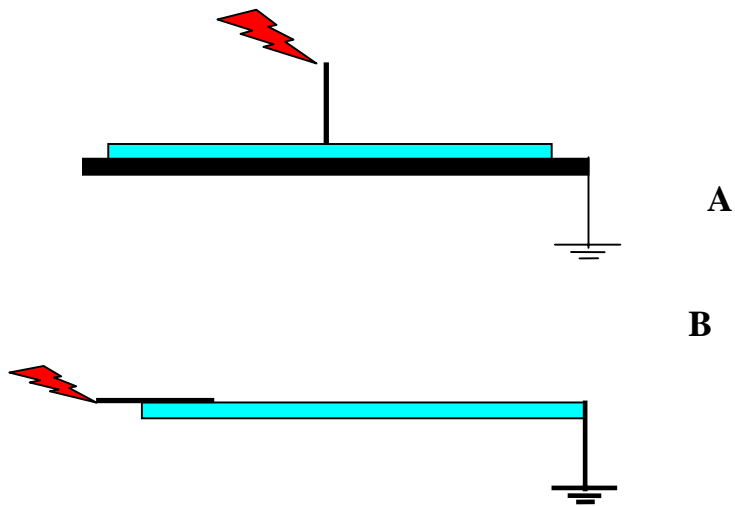
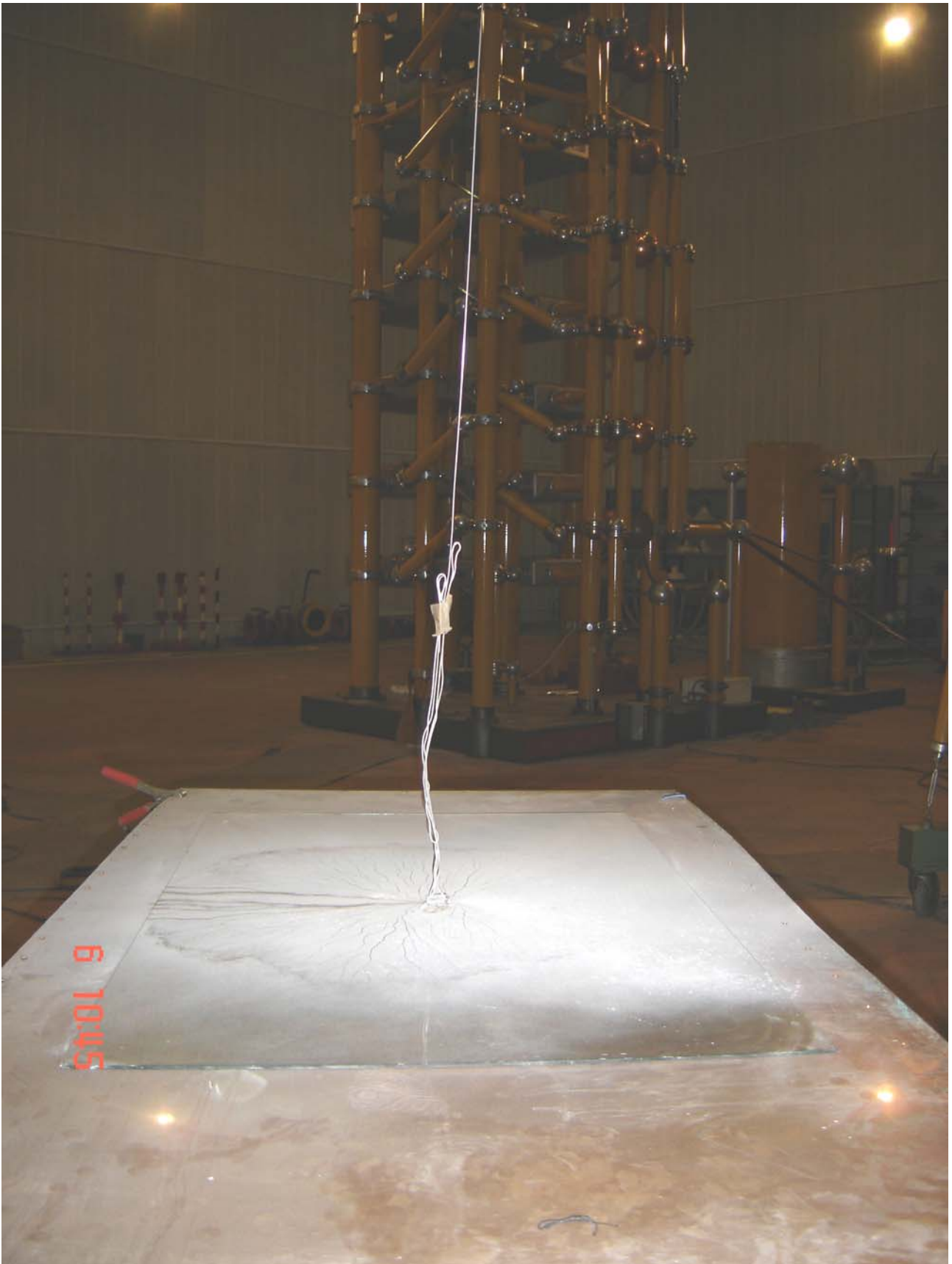


fig. IX.2.1

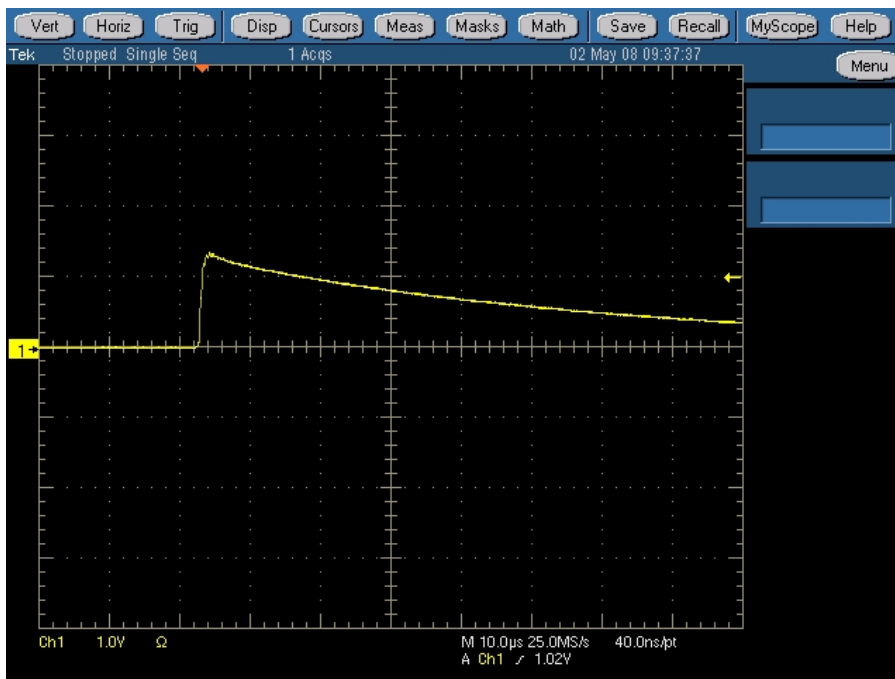
Per ragioni organizzative ci è limitati alla configurazione A, rimandando la B ad altra occasione. Si riportano per la B alcuni risultati ottenuti in precedenza



*Configurazione elettrodica A*

## Test n.1

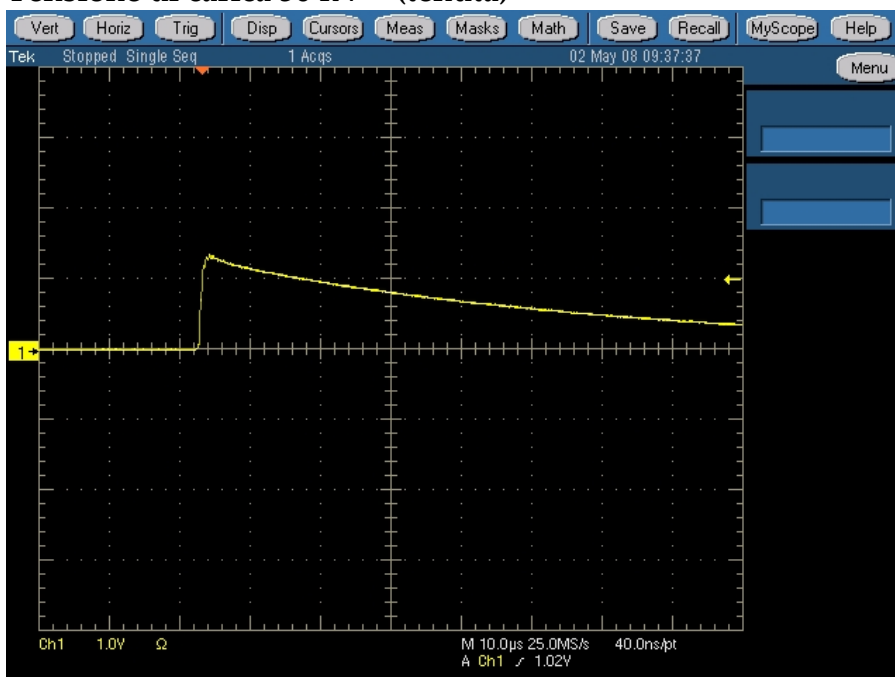
**Configurazione A – Polarità positiva**  
**Tensione di carica 30 kV - Tenuta**



---

Test n.2 (in una precedente occasione)

**Configurazione B – Polarità positiva**  
**Tensione di carica 30 kV – (tenuta)**

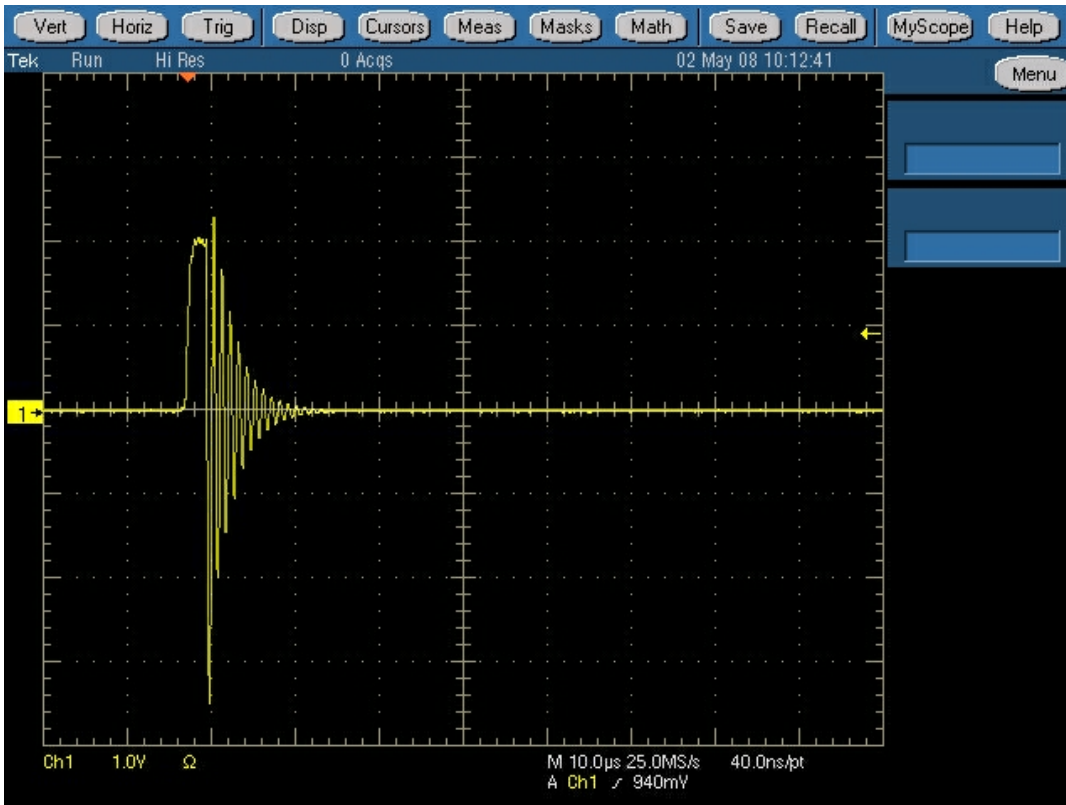




## Test n.3

Configurazione A – Polarità positiva

Tensione di carica 40 kV – (figura di scarica)







**Dettaglio della zona di scarica**

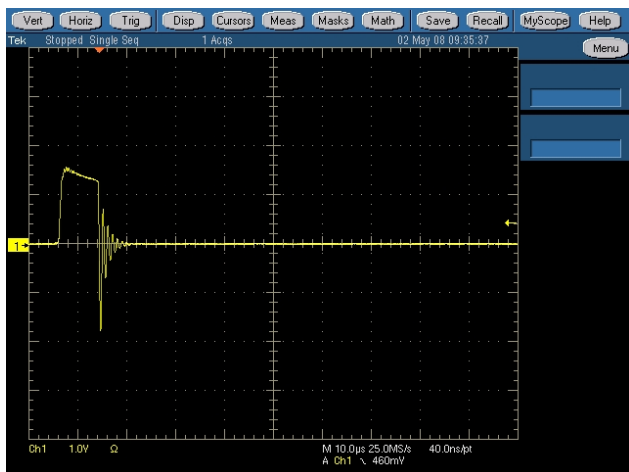


**Dettaglio delle ramificazioni nelle zona di tenuta**

## Test. n.4 (precedente occasione)

Configurazione B – Polarità positiva

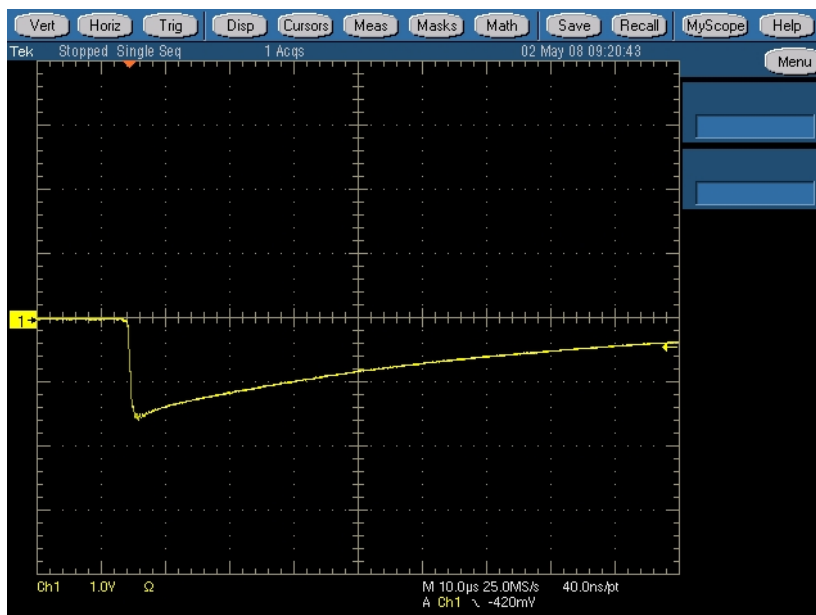
Tensione di carica 35 kV – figura di scarica



## Test. n.5 (precedente occasione)

Configurazione B - Polarità negativa

Tensione applicata al 1° stadio: 35kV, tensione totale  $35 * 12 * 0,75 = 369$  kV – (tenuta)

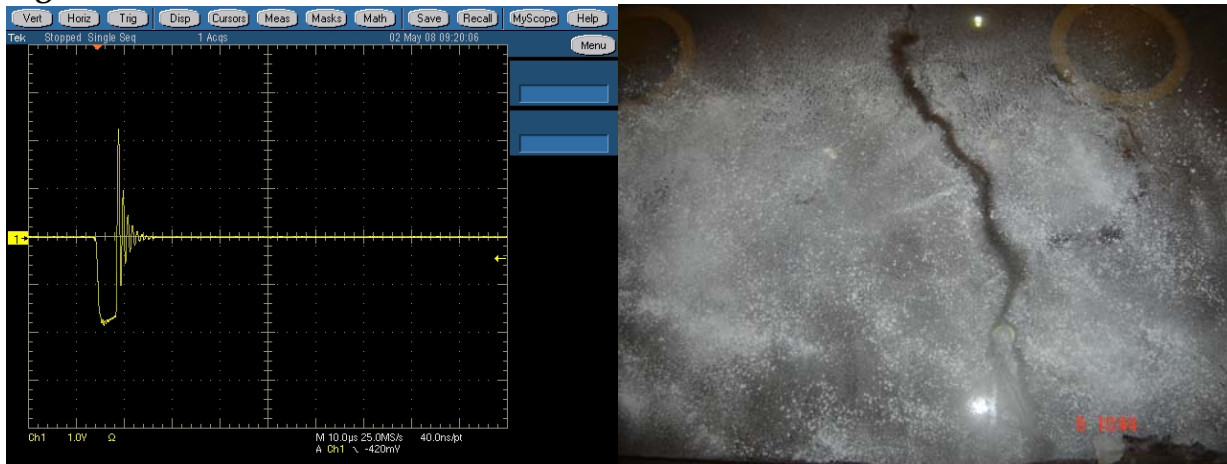


## Test. n.6 (precedente occasione)

### Configurazione B - Polarità negativa

Tensione applicata al 1° stadio: 41kV, tensione totale  $41 * 12 * 0,75 = 369$  kV

### Figura di scarica



Come si nota, la traccia è meno ramificata che nel caso di polarità positiva.

## Test successivi

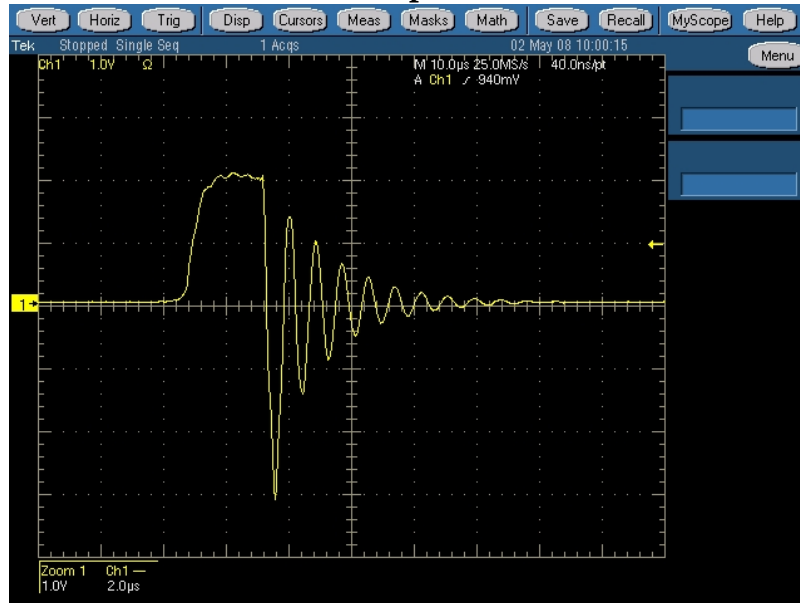
Aumentando il valore della tensione di carica, il collasso avverrà sempre prima: possiamo notare infatti che l'istante di brusco crollo della tensione si sposta a sinistra all'aumentare della tensione, ossia diminuisce il tempo di formazione delle scariche. Sulla curva tensione di scarica – tempo alla scarica si discuterà più avanti.

Si constata inoltre che, se la tensione supera un valore di soglia, la scarica ha luogo anche sullo spinterometro a sfere; se la tensione aumenta ancora, la scarica avverrà solo sullo spinterometro a sfere.

## Test. n.7

Configurazione A – Polarità positiva

Tensione di carica 47 kV – Scarica tra sfere spinterometro e su lastra

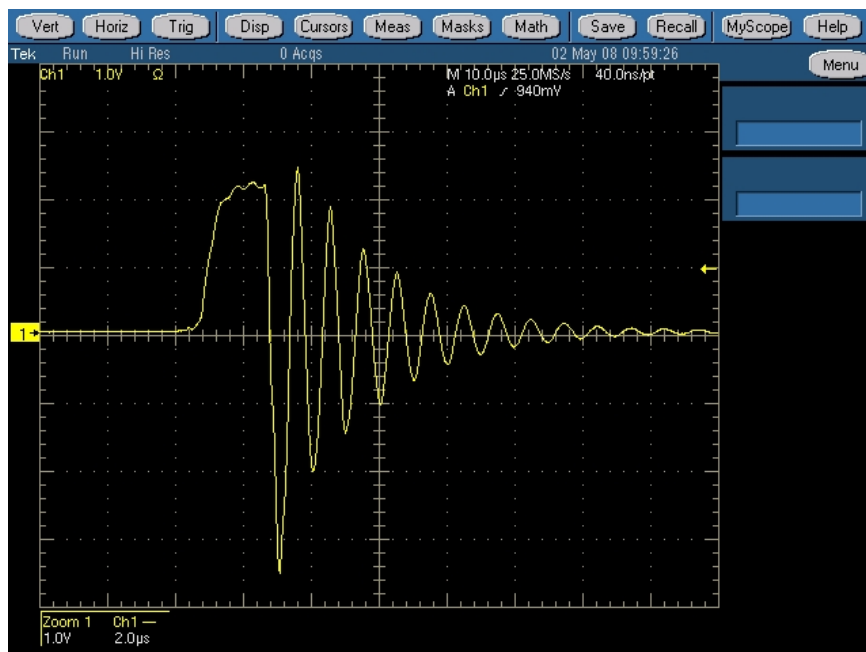


---

## Test n.8

Configurazione A – Polarità positiva

Tensione di carica 50 kV – Scarica solo sullo spinterometro



**§X.7 Esercitazione in Sala Alta Tensione del 30 aprile 2010 - Confronto fra diverse configurazioni ( sfera-sfera, punta-piano, catena)**

**Conferma di TARATURA PER POLARITA' POSITIVA**

**A - Prova** a distanza d=15 cm tra le sfere dello spinterometro, polarità positiva; tensione di scarica 50% secondo la Norma CEI 42-1 390 kV (trascurando la il fattore di correzione ambientale) (x : scarica; o : tenuta)

V <sub>q</sub> (kV)					
42				<b>x</b>	
41	<b>x</b>		<b>o</b>		<b>x</b>
40		<b>o</b>			

La tensione corrispondente alla scarica 50% può essere ottenuta approssimativamente come

$$V_{q50\%} = \frac{1 \cdot 42 + 2 \cdot 41}{3} = 41,3 \text{ kV}$$

con un rendimento pari a

$$\eta = \frac{V_s}{N_{stadi} V_{q50\%}} = \frac{390}{41,3 \cdot 12} = \frac{390}{495,6} = 0,78$$

Valore della tensione letta all'oscilloscopio a 40 kV (tenuta) 1.86 V

Foto osc

-----

**B- Prova** a distanza d=20 cm tra le sfere dello spinterometro, polarità positiva; tensione di scarica 50% secondo la Norma CEI 42-1 510 kV (trascurando la il fattore di correzione ambientale) (x : scarica; o : tenuta)

V <sub>q</sub> (kV)		<b>x</b>			
55					
53			<b>x</b>		<b>x</b>
52	<b>o</b>			<b>o</b>	

La tensione corrispondente alla scarica 50% può essere ottenuta approssimativamente come V<sub>q50%</sub>=52,5 kV

con un rendimento pari a

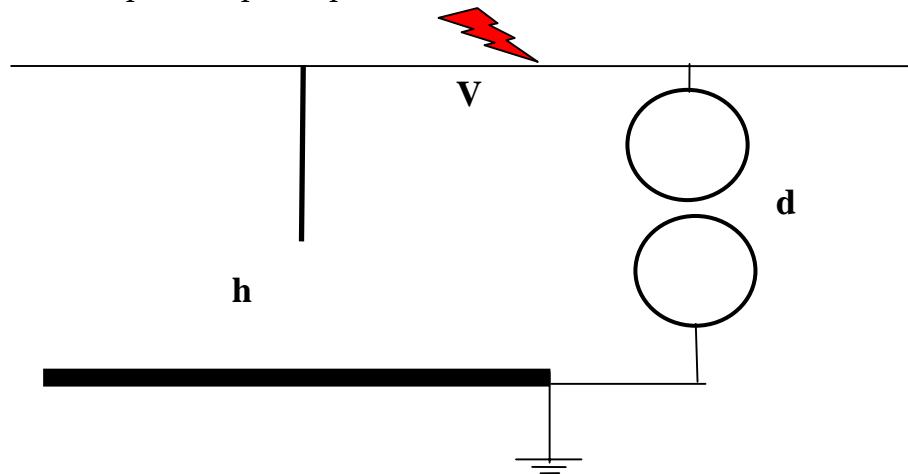
$$\eta = \frac{V_s}{N_{stadi} V_{q50\%}} = \frac{510}{52,5 \cdot 12} = \frac{510}{630} = 0,81$$

-----

**B- Prova** a distanza  $d=30$  cm tra le sfere dello spinterometro, polarità positiva; tensione di scarica 50% secondo la Norma CEI 42-1 745 kV (trascurando la il fattore di correzione ambientale) (x : scarica; o : tenuta)

Applicando una tensione di carica di 76,6 kV (corrispondente a 735 kV circa di cresta) si ha una scarica sulla catena, per cui viene ridotta la distanza tra le sfere a 26 cm

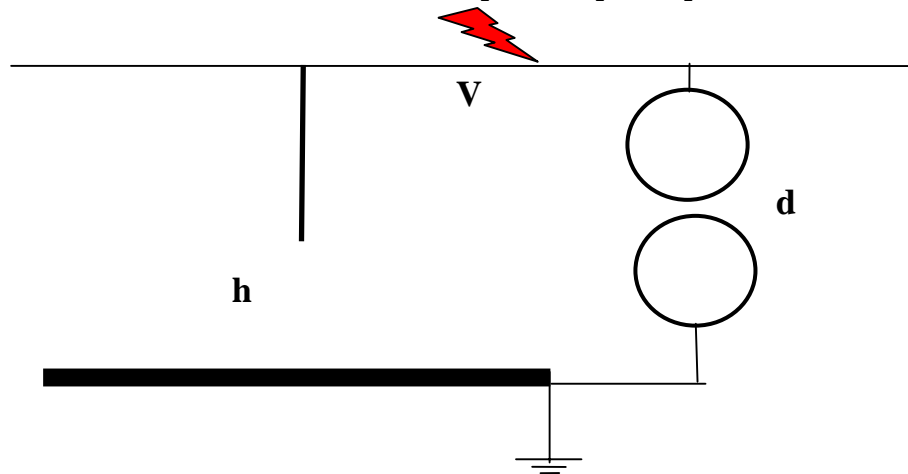
**B- Prova** a distanza  $d=26$  cm tra le sfere dello spinterometro, polarità positiva; tensione di scarica 50% secondo la Norma CEI 42-1 655 kV (trascurando la il fattore di correzione ambientale) – Distanza  $h$  tra punta e piano pari a 90 cm.



d	h	$V_q$	$V_{c\ oscill}$	V	Tempo alla scarica $t_s$ [μs]	Foto	
26	90	+67	3,02	640	4,36		scarica punta
26	90	+62	2,82	595	6,0		scarica punta
26	90	+58	2,6	557	8,0		scarica punta
26	90	+55	2,54	530	15,9		scarica punta
26	90	+53	2,46	512			tenuta
26	90	+54	2,5	525	17,48		scarica punta
26	90	+53	2,46	512			tenuta
							scarica punta

Tensione di scarica 50% configurazione asta(+)/piano  $h=90$  cm è pari a  $V_{50\%}=53,5*12*0.81=520$  kV. La tensione di scarica tra sfere a tale distanza sarebbe oltre 1500 kV.

**C- POLARITA' NEGATIVA -Prova** a distanza  $d=26$  cm tra le sfere dello spinterometro, polarità negativa; tensione di scarica 50% secondo la Norma CEI 42-1 655 kV (trascurando la il fattore di correzione ambientale) – Distanza  $h$  tra punta e piano pari a 45 cm.



<b>d</b>	<b>h</b>	<b>V<sub>q</sub></b>	<b>V<sub>c oscill</sub></b>	<b>V</b>	<b>Tempo alla scarica t<sub>s</sub> [μs]</b>	<b>Foto</b>	
26	90	-53					tenuta
26	90	-60					tenuta
26	90	-65	-2,98		2,72		Scar spinter
26	90	-63					tenuta
26	90	-64					tenuta
26	90	-65					tenuta
26	90	-66					tenuta
26	90	-67	x		x		Scar spinter
26	90	-66					tenuta
26	90	-70				CATENA70NEG	Scarica catena

Tensione di scarica 50% spinterometro pol negativa  $d=26$  cm pari a  $V_{50\%}=-635$  kV, rendimento pari a  $\eta=635/(66*12)=0,80$ .

<b>d</b>	<b>h</b>	<b>V<sub>q</sub></b>	<b>V<sub>c oscill</sub></b>	<b>V</b>	<b>Tempo alla scarica t<sub>s</sub> [μs]</b>	<b>Foto</b>	
26	45	-60	-2,68		4,8		scarica punta
26	45	-55					tenuta
26	45	-58			2,93		scarica punta
26	45	-57	-2,66		4,7		scarica punta
26	45	-56					tenuta

Tensione di scarica 50% configurazione asta(-)/piano h=45 cm è pari a  $V_{50\%} = -56,5 * 12 * 0.79 = 535$  kV.