

APPENDICE XVII
Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica
ELETTROTECNICA (prof. Lupò)
Attività Didattiche A. A. 2009-2010

5-12 novembre 2009 - Visita
al LABORATORIO ALTE TENSIONI
del Dipartimento di Ingegneria Elettrica

Il **LABORATORIO ALTE TENSIONI** (o Sala Alte Tensioni) è una struttura speciale di grandi dimensioni (base 32 m x 16 m, altezza 18 m) esistente nel plesso di via Claudio. Esso è 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 cementizio conduttivo, in modo da potersi considerare equipotenziale in ogni condizione di funzionamento; tale *piano equipotenziale*, di riferimento per prove e misure, è collegato a dispersori di terra di grande profondità (la resistenza di terra equivalente ⁽¹⁾ 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.

Tale laboratorio dispone principalmente

- a) di un **gruppo autonomo SIEMENS** (generatore sincrono rotante alloggiato in cunicolo sottostante - trasformatore bistadio visibile in fig.1, schema semplificato in fig. 1b) ossia un generatore di tensione sinusoidale costituito da un alternatore (autonomo) sincrono monofase 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 pavimento) e intensità di corrente fino a 1 A (valore efficace, per un'ora) e quindi potenza nominale 1350 kVA; tale apparecchiatura, costruita dalla Siemens negli anni '60 ⁽²⁾, è **unica** in Italia ed in Germania ha un fratello maggiore (a tre stadi, circa 2 MV)

¹ È la resistenza equivalente vista da un bipolo (generatore) di cui un morsetto è collegato al piano equipotenziale ed un altro ad un punto indefinitamente lontano. Il suo valore dev'essere sufficientemente basso in modo che l'eventuale tensione che si ritrova accidentalmente applicata al corpo umano o ad uno strumento di misura – per la massima intensità di corrente possibile - sia inferiore ad un valore di sicurezza (per il corpo umano, si considera una soglia di 50V). Essa dipende dalla configurazione del dispersore e dalla natura del terreno. Essa può essere di massima calcolata con modelli di sorgente concentrata o distribuita; le Norme comunque prevedono che essa vada periodicamente verificata sperimentalmente. Nel caso specifico occorrerebbe parlare di *impedenza di terra*.

² Va ricordato che in tale periodo si prevedevano e furono realizzate – anche a Suvereto (GR) - stazioni sperimentali a tensioni ultra-alte (UHV) con valori nominali fino a 1200 kV_{rms}. A Suvereto (GR) fu sviluppato il *Progetto pilota 1050 kV* dell'ENEL. Tali programmi furono poi sospesi negli anni '80 per motivi economici e politici.

all'Università di Monaco di Baviera ⁽³⁾; per la misura della tensione in uscita viene usato l'apposito divisore capacitivo, con tensione di uscita fino a 100 V, leggibili all'interno della cabina di controllo;

- b) **un generatore di tensione aperiodico ("impulsivo") della PASSONI&VILLA** anch'esso risalente agli anni '60 (fig.2), costituito da 12 stadi capacitivi (resistenza di carico 20k Ω , schema moltiplicatore RC di Marx) 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 aperiodica teoricamente pari a 12 volte la tensione di carica del singolo stadio (quindi fino a ± 2400 kV); in realtà la forma d'onda sarà dipendente dal carico e di valore massimo inferiore del 10-20% rispetto al suddetto valore; per molti casi è possibile fissare la forma d'onda collegando il generatore ad un carico capacitivo noto e di valore relativamente elevato (*condensatore zavorra*, capacità 500-1000-1500 pF, visibile in fig.2); 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); l'energia massima di carica è di 35 kJ: tale generatore è in grado di generare, tra l'altro, "impulsi atmosferici" (*standard lightning pulses*, con tempi di salita di 1,2 μ s e tempi all'emivalore di 50 μ s) e "impulsi di manovra" (*standard switching surges*, 250 μ s -2500 μ s) derivanti da bruschi transitori legati a manovre negli impianti ⁽⁴⁾. Il generatore ad impulso dispone di un alimentatore di tensione stazionaria (c.d. "continua") fino a ± 200 kV, 50 mA.
- 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.

Il Laboratorio è dotato di una cabina a gabbia di Faraday (*cabina di controllo*) in cui sono alloggiati, per la sicurezza degli operatori e degli strumenti di misura e registrazione, i pulpiti di comando dei due generatori maggiori, che non possono essere messi in funzione se non sono verificate le condizioni di sicurezza previste.

Un **digitalizzatore Tektronik** fino a quattro canali a 2 GSa/s permette l'acquisizione digitale e la successiva elaborazione in ambiente Windows o dedicato (in fig.3 è rappresentato lo *standard lightning pulse* in assenza di scarica).

³ Le apparecchiature più importanti per la generazione di elevate tensioni sinusoidali in Italia sono presenti presso il CESI (Centro Elettrotecnico Sperimentale Italiano) a Milano, ma in questo caso i trasformatori sono direttamente collegati ad un "nodo di potenza" della rete ENEL a 380kV- 50 Hz.

⁴ Il livello di tensione da applicare agli oggetti in prova viene fissato da Norme specifiche o, in mancanza, definito dal Committente. Il livello di tensione di prova a impulsi atmosferici è stato determinato caso per caso su base statistica a valle di sperimentazioni sul campo; il livello di tensione di prova a impulsi di manovra è ricavato anche sulla base di simulazione numerica ed è orientativamente pari al triplo della tensione di esercizio: ad esempio, per un componente interfascio della linea dorsale di trasmissione dell'energia elettrica italiana a 380 kV(tensione concatenata), occorre prevedere una sollecitazione impulsiva di manovra con valore di picco di circa 1200 kV.

I generatori sono equipaggiati con *spinterometri a sfere* per la misura diretta del valore di picco della tensione generata e di opportuni *divisori di tensione* per il rilievo delle forme d'onda(fig.1-2).



fig.1 - Trasformatore bistadio SIEMENS e divisore di tensione capacitivo e spinterometro a sfere

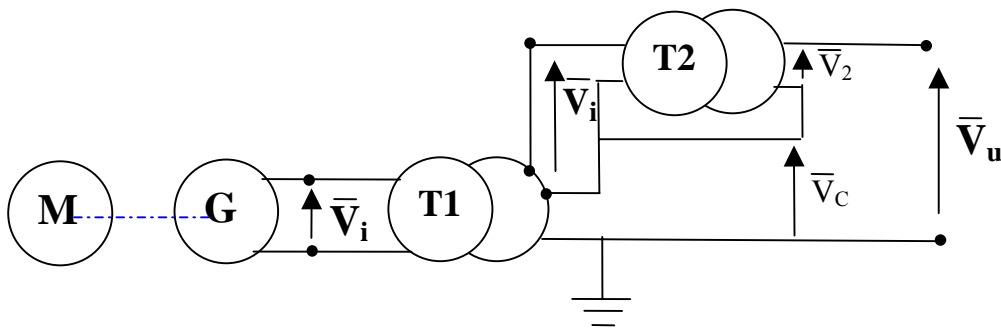


Fig.1b – Schema semplificato del Gruppo Siemens

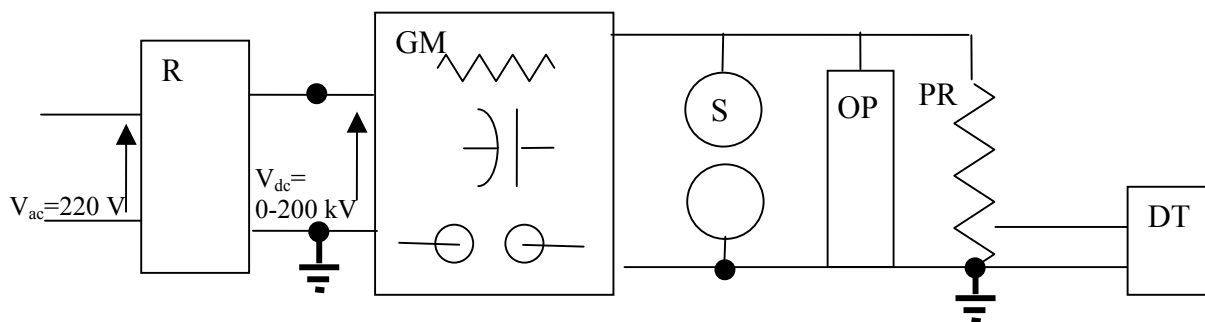


fig.2 – Generatore ad impulso, spinterometro a sfere e divisore di tensione ohmico-capacitivo (sullo sfondo); in alto: schema semplificato (R: raddrizzatore; M: circuito moltiplicatore ad innesco comandato; S: spinterometro a sfere; OP: oggetto in prova; PR: partitore resistivo compensato; DT: digitalizzatore Tektronix)

Nel Laboratorio vengono provati anche dispositivi di notevole dimensione e peso (la fig.4 è stata presa in corso di prova su trasformatore trifase per alta tensione da 55 t). Il laboratorio dispone anche di un *banco di condensatori* PASSONI E VILLA per generare corrente aperiodica di elevatissima intensità (300 kA, 6 ms).

Il laboratorio Alte Tensioni dispone anche di un *trasformatore monofase* da 100kVA per prove a 50 Hz fino a 100 kV (tensione regolabile tramite autotrasformatore compagno collegato alla rete ENEL), nonché di un sistema di misura integrato HAEFELY per il rilievo di *scariche parziali* (diagnostica non distruttiva su materiali e componenti con software di analisi e classificazione difetti) e la misura con *ponte di Schering* del fattore di perdita di componenti per Alta Tensione.

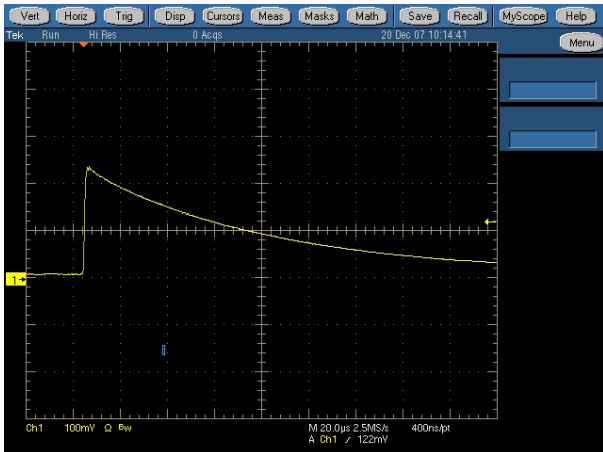


fig.3 Forma d'onda dell'impulso standard



fig. 4 – Prova su trasformatore AT

BREVE DESCRIZIONE DELL'ESPERIMENTO (5 e 12 novembre 2009)

Gli Allievi presenti hanno assistito ad una prova in alta tensione con uso del generatore ad impulso.

In tal caso è stato configurato il circuito di fig.2 in cui l'oggetto in prova è costituito dal "parallelo" di una ordinaria catena di isolatori in vetro del tipo componibile "cappa e perno", equipaggiata alle estremità con un elettrodo ad anello (lato inferiore, in esercizio collegata alla linea di alimentazione) ed un elettrodo a punta rivolta verso il pavimento, con interposta una canalina in plastica completamente isolata contenente acqua in modica quantità.

1°) -Fissata una congrua distanza (circa 15 cm) tra le sfere dello spinterometro, i condensatori sono stati caricati a 30 kV; innescando il collegamento serie dei condensatori è stata quindi applicata una tensione di circa 300 kV sullo spinterometro⁽⁵⁾. Tale tensione è insufficiente per provocare una scarica tra le sfere dello spinterometro oppure tra gli elettrodi della catena. E' quindi rilevabile una forma d'onda "piena" della tensione applicata, ossia una forma a doppio esponenziale con tempi di salita di circa un microsecondo e tempo all'emivalore di circa cinquanta microsecondi (come in fig.3).

⁵ Tale determinazione presuppone una complessa "taratura" del generatore, che, dato il tempo limitato della visita degli Allievi, è stata effettuata precedentemente.

2°)- La tensione di carica dei condensatori è stata poi elevata a circa 42 kV, corrispondente ad una tensione “impulsiva” di circa 420 kV. E’ stata osservata una scarica tra le due sfere dello spinterometro, in linea con la considerazione che la tensione di scarica prevista dagli abachi delle Norme tra le sfere alla distanza di 15 cm è 390 kV ($\pm 3\%$). Si rileva la forma d’onda di fig. 5, “troncata” in corrispondenza dell’istante del collasso; la successiva evoluzione pseudosinusoidale è caratteristica del circuito di “scarica disruptiva”, schematizzabile, in prima approssimazione con un circuito RLC , con basso valore del parametro resistivo associabile al canale di scarica.

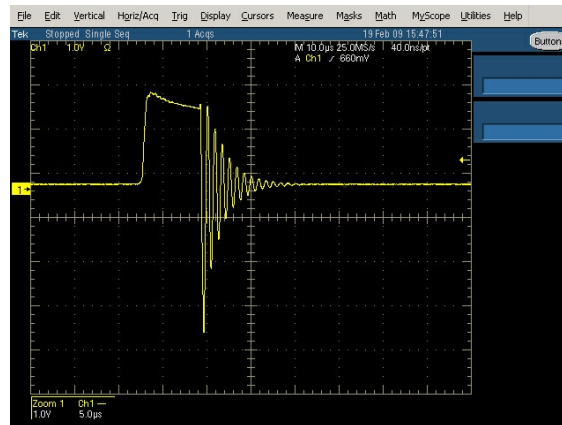


fig.5 – Registrazione di una scarica sullo spinterometro a sfere

3°) – La distanza tra le sfere dello spinterometro è stata portata a oltre 30 cm e la tensione di carica dei condensatori è stata elevata a circa 70 kV; è stata quindi provocata per innesco comandato l’applicazione di una tensione “impulsiva” di circa 700 kV, che ha determinato una scarica in aria tra l’elettrodo a punta ed il pavimento, “guidata” in maniera più o meno vistosa dalla canalina orizzontale (fig.6).

Per ragioni di tempo non è stato possibile far avvenire la scarica sulla catena (rimuovendo l’elettrodo a punta); tuttavia sembra utile riportare delle foto – ottenute in un esperimento effettuata in data precedente – di scarica tra gli elettrodi di una catena di isolatori più corta (fig.7) o, in un successivo esperimento, sulla superficie della catena stessa (fig.8).

Le registrazioni effettuati in tutti questi casi (esempio in fig.9) mostrano una variazione temporale della tensione solo a prima vista ripetitiva; in realtà essa è differente caso per caso e comunque diversa da quella presentata in fig. 5; è cioè possibile associare ad ogni fenomeno di scarica (completamente in aria, in parte superficiale, all’interno del materiale,...) un diverso andamento della tensione misurato, creando quindi anche un “pacchetto ricognitivo” del fenomeno di “breakdown” avvenuto.

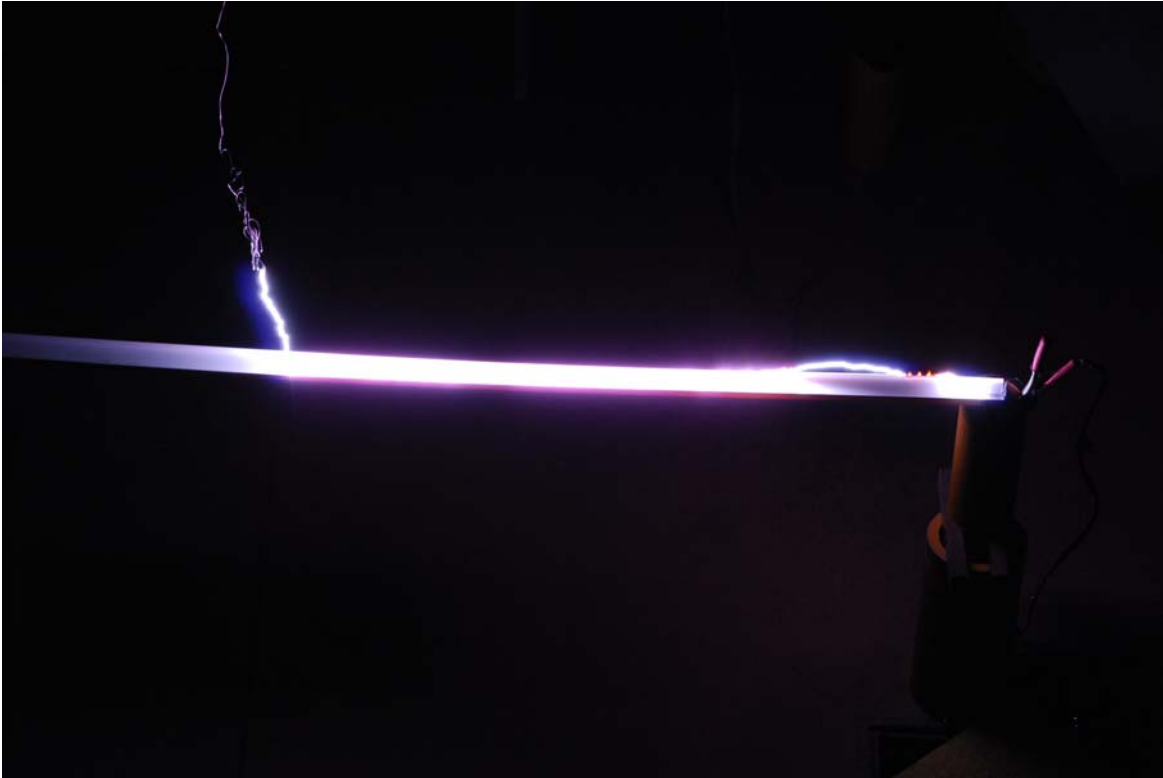


fig.6 – scarica punta-canalina- terra – tensione applicata 680 kV di picco.

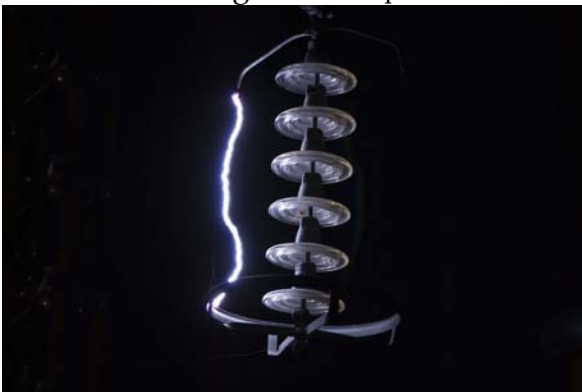


fig.7 – Scarica in aria tra gli elettrodi della catena



fig. 8 – Scarica superficiale (flashover)

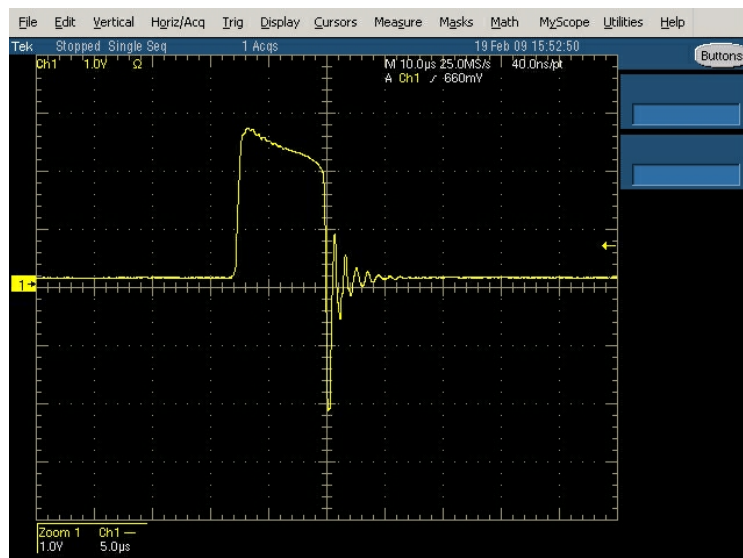


fig. 9 – Tipico andamento temporale della tensione misurata in caso di scarica sulla catena