

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria dell'Energia

Relazione per la prova finale

Analisi e test dei transitori di scarica ad alta frequenza sul trasformatore di isolamento di SPIDER

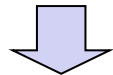
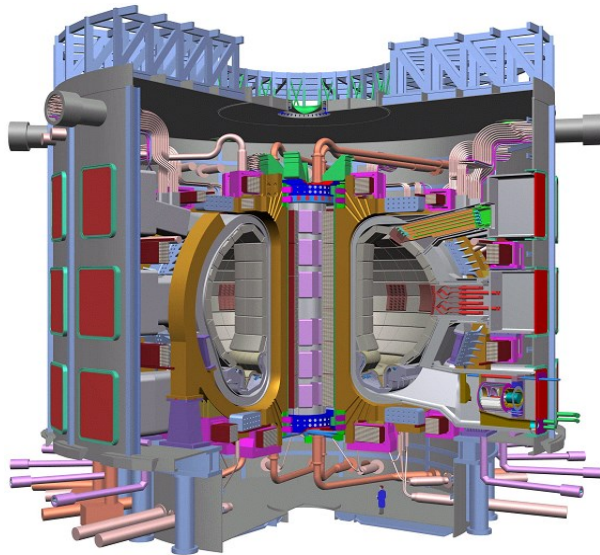
Tutor universitario: Prof. Paolo Bettini

Laureando: *Daniele Fasolo*

Matricola 1193796

Padova, 24/11/2023

PROGETTO ITER



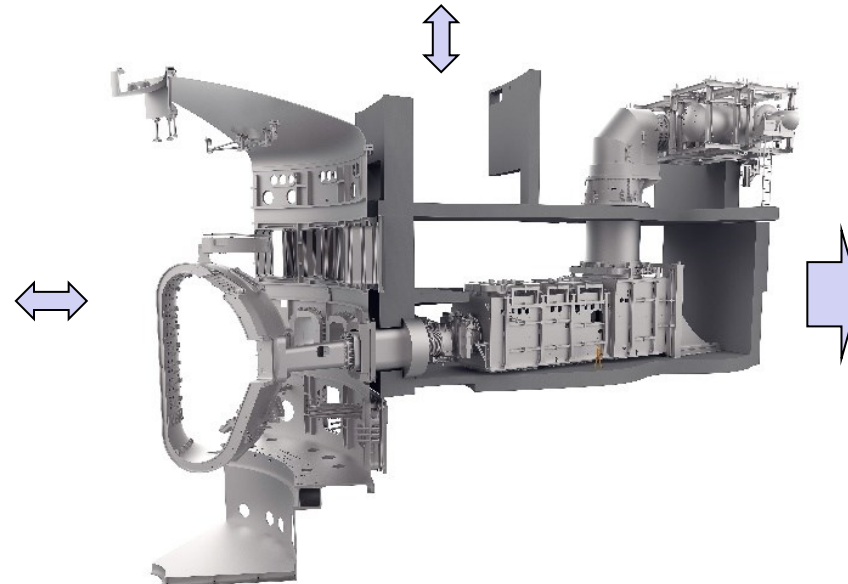
TEMPERATURA DEL PLASMA:
150 milioni di gradi Celsius

Sistemi di surriscaldamento del plasma (50MW):

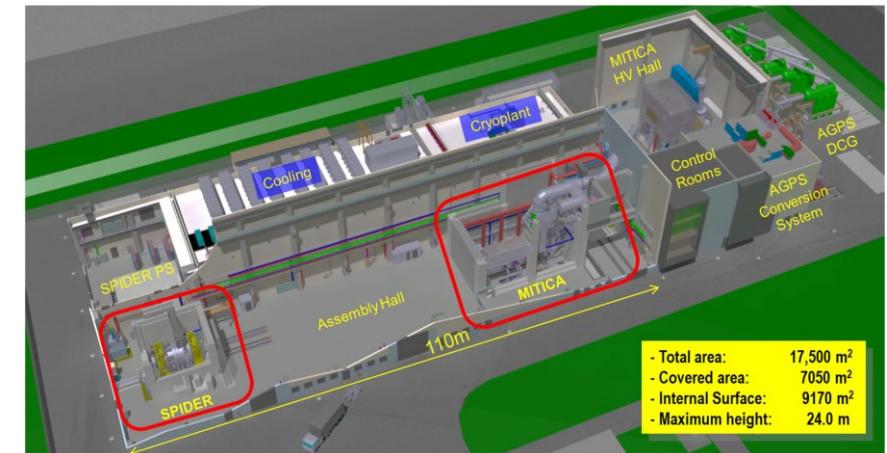
- Almeno 2 Neutral Beam Injector da 16,5MW
- **Ion Cyclotron Heating**
- **Electron Cyclotron Heating**

ITER NBI

	H ⁻	D ⁻	Unità
Energia del fascio	870	1000	keV
Corrente di accelerazione	46	40	A
Massima pressione di funzionamento della sorgente	0.3	0.3	Pa
Massima non uniformità del fascio	±10	±10	%
Divergenza del fascio	≤7	≤7	mrad
Durata impulso	3600	3600	s
Frazione di elettroni coestratti (e ⁻ /H ⁻) e (e ⁻ /D ⁻)	<0.5	<1	



ITER NBTF



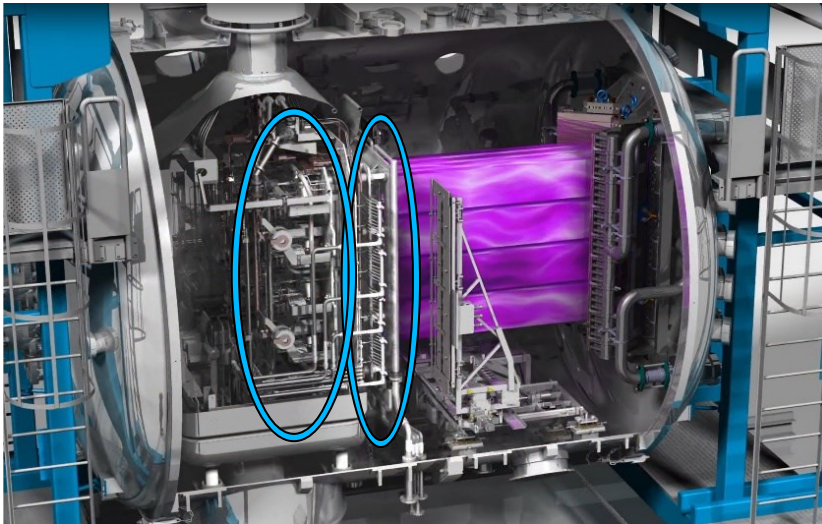
- Total area: 17,500 m²
- Covered area: 7050 m²
- Internal Surface: 9170 m²
- Maximum height: 24.0 m

Principali esperimenti:

- MITICA, prototipo in scala reale di ITER NBI;
- SPIDER, esperimento di test per la sorgente di ITER NBI.

Questa attività tratta i problemi sul sistema di alimentazioni di SPIDER, mi concentrerò sui problemi derivanti dai transistori di scarica ad alta frequenza che portano ad eventi di sovratensione.

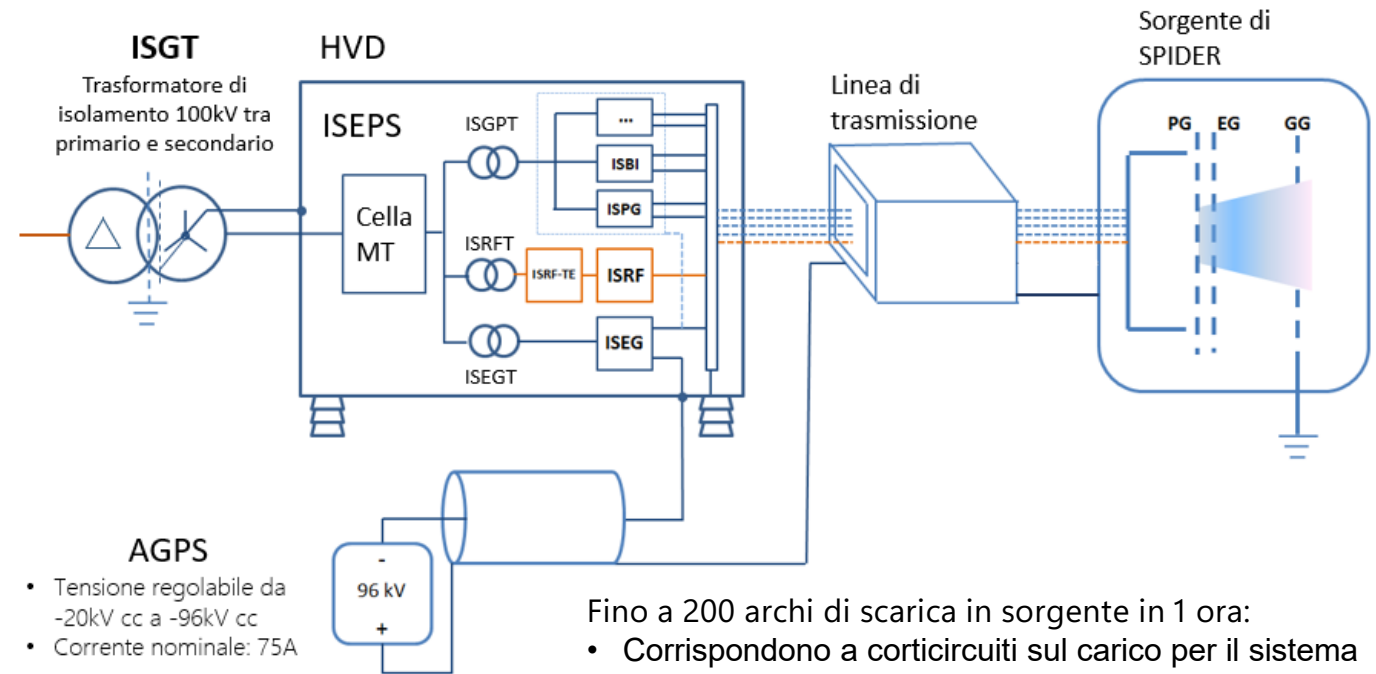
SPIDER la sorgente di ioni
negativi più grande del mondo



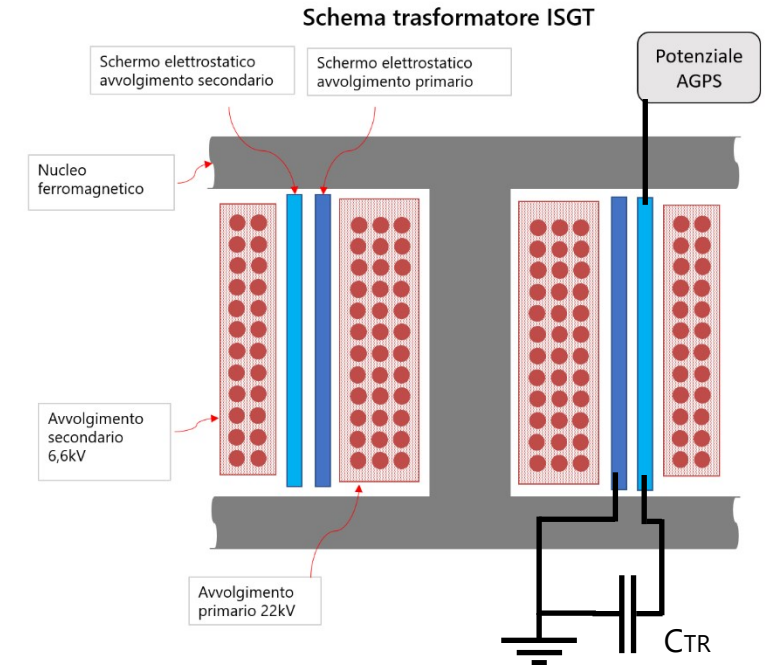
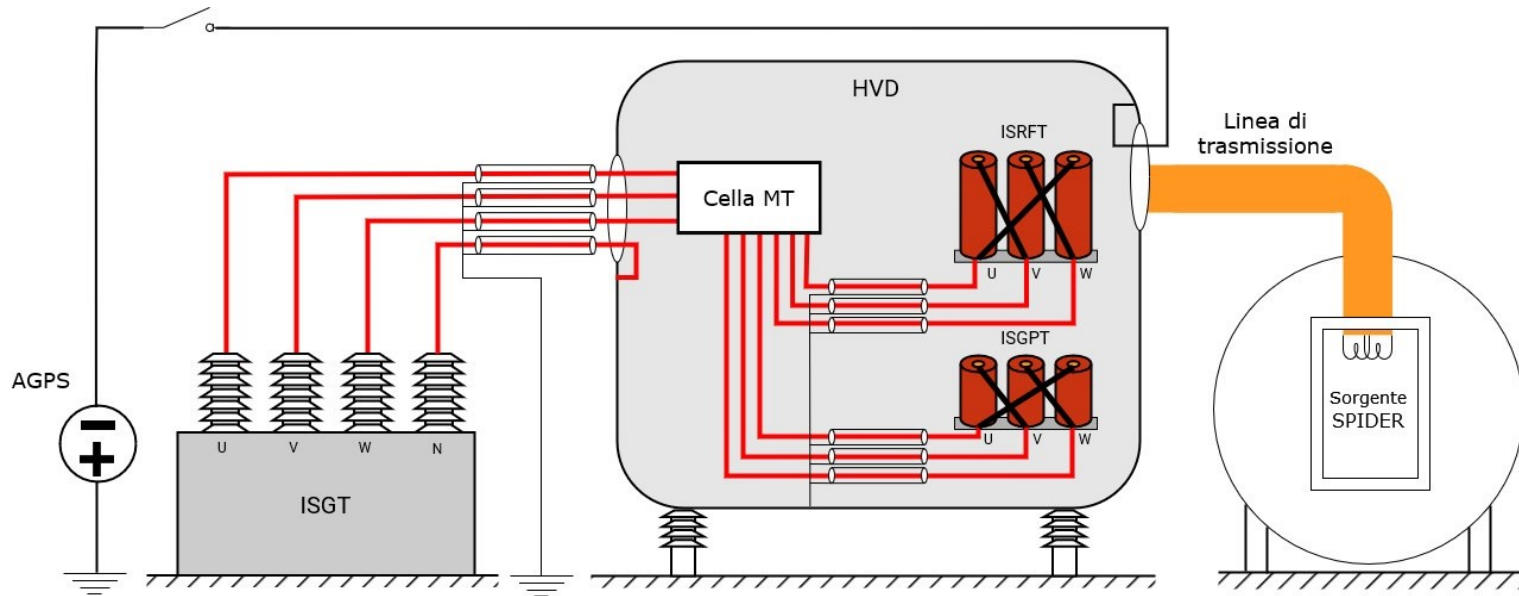
SPIDER	H ⁻	D ⁻	Unità
Energia del fascio	100	100	keV
Massima pressione di funzionamento della sorgente	0.3	0.3	Pa
Massima non uniformità del fascio	±10	±10	%
Densità del fascio di ioni estratti dal plasma	>355	>285	A m ⁻²
Durata dell'impulso	3600	3600	s
Frazione di elettroni coestratti (e ⁻ /H ⁻) e (e ⁻ /D ⁻)	<0.5	<1	

ISEPS - Ion **S**ource and **E**xtraction **P**ower **S**upply è il sistema di alimentazione della sorgente di SPIDER, installato all'interno di una grande gabbia di Faraday (**HVD**) polarizzata alla tensione di accelerazione, come i suoi carichi in sorgente, imposta da **AGPS** - **A**cceleration **G**rid **P**ower **S**upply.

ISEPS è alimentato da un trasformatore di isolamento **ISGT** ed è composto da molteplici sottosistemi di alimentazione dei circuiti della sorgente RF di SPIDER.



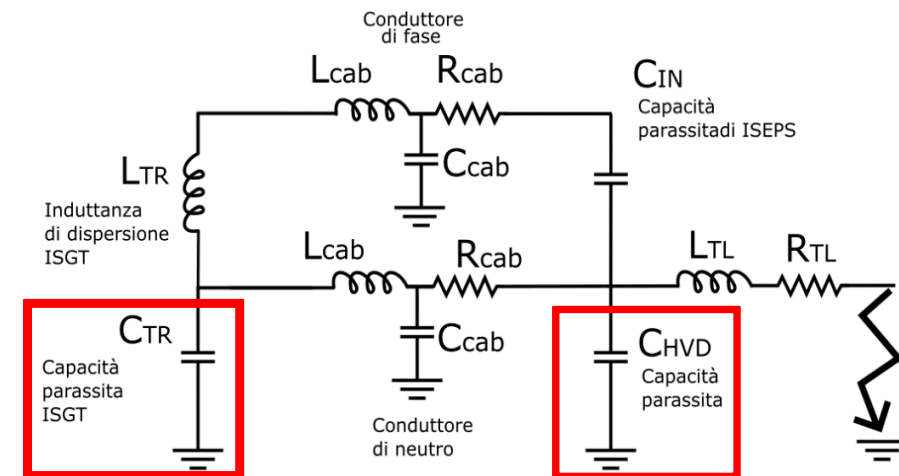
- Fino a 200 archi di scarica in sorgente in 1 ora:
- Corrispondono a cortocircuiti sul carico per il sistema AGPS
 - Transitori elettrici ad alta frequenza si generano sul sistema elettrico carico ad alta tensione



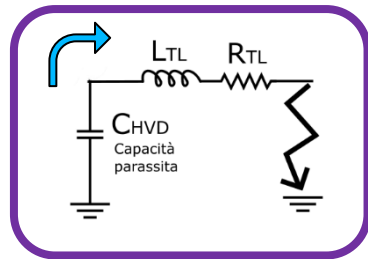
Ho valutato:

- Topologia del sistema di alimentazione;
- Parametri principali dei componenti soggetti a transitori ad alta frequenza;
- Contributi principali di energia elettrostatica immagazzinata nei componenti di impianto.

Ho sviluppato un modello monofase semplificato ad alta frequenza.

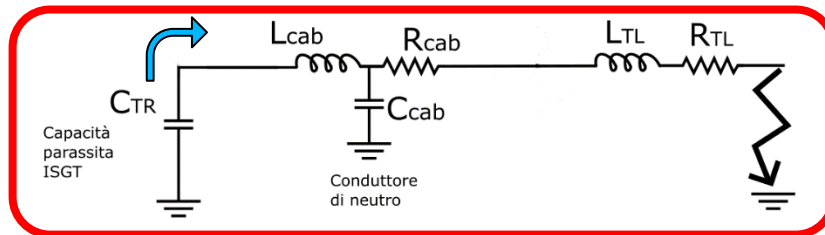


Capacità cariche alla tensione di AGPS



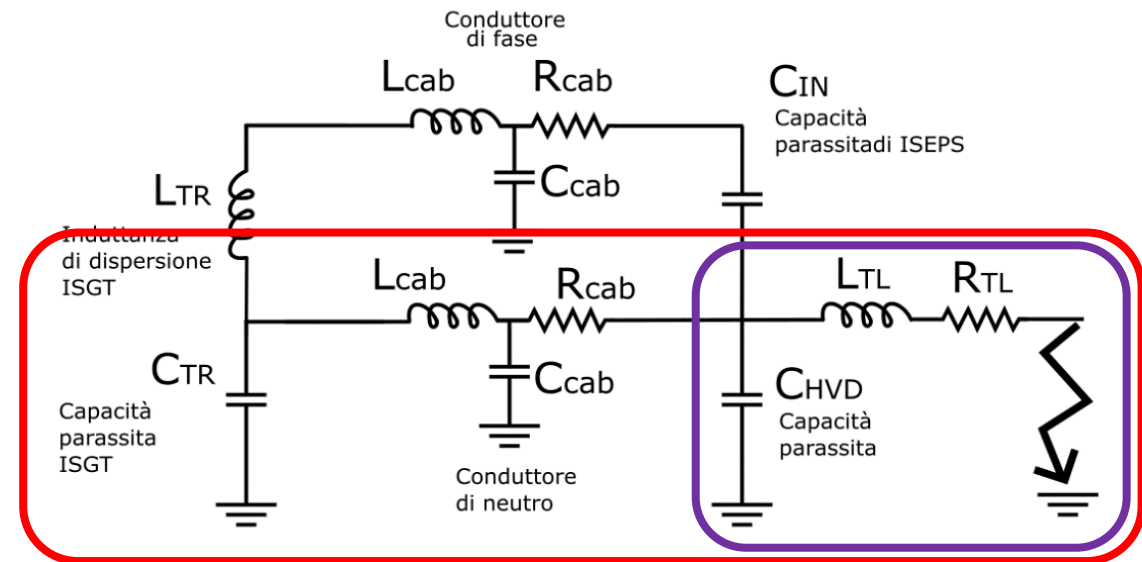
In prima approssimazione CHVD si scarica attraverso LTL ed RTL con una propria frequenza di risonanza

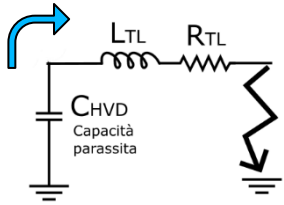
LTL ed RTL rappresentano i parametri della linea di trasmissione.



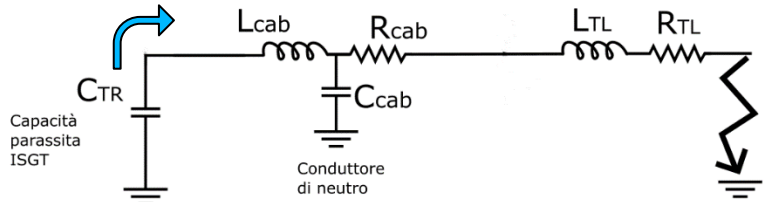
CTR in prima approssimazione si scarica attraverso il circuito con una frequenza di risonanza diversa.

Lcab, Rcab e Ccab rappresentano i parametri parassiti della linea in cavo

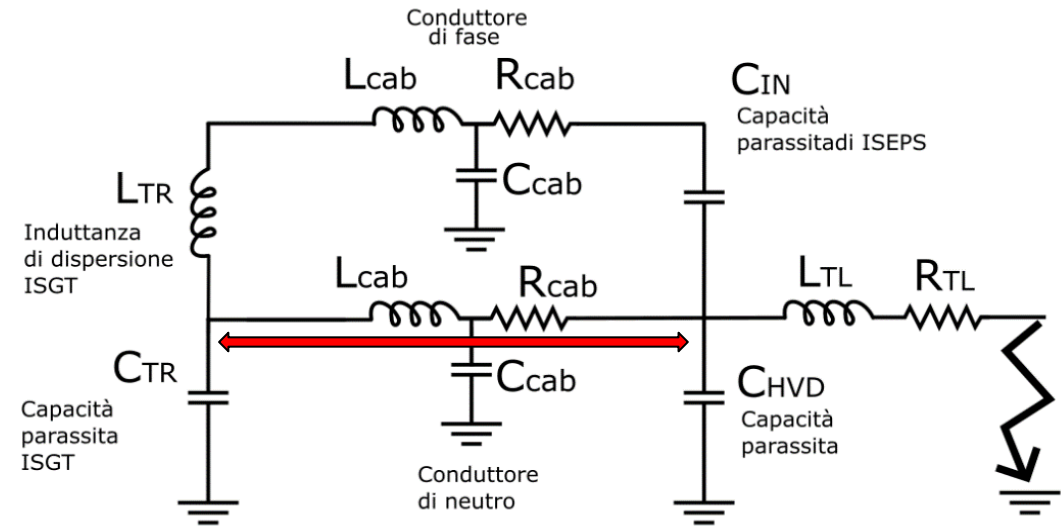
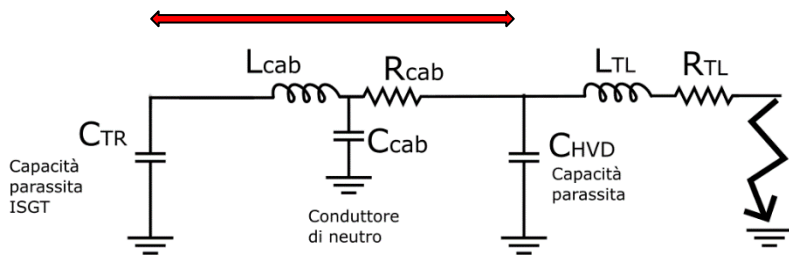




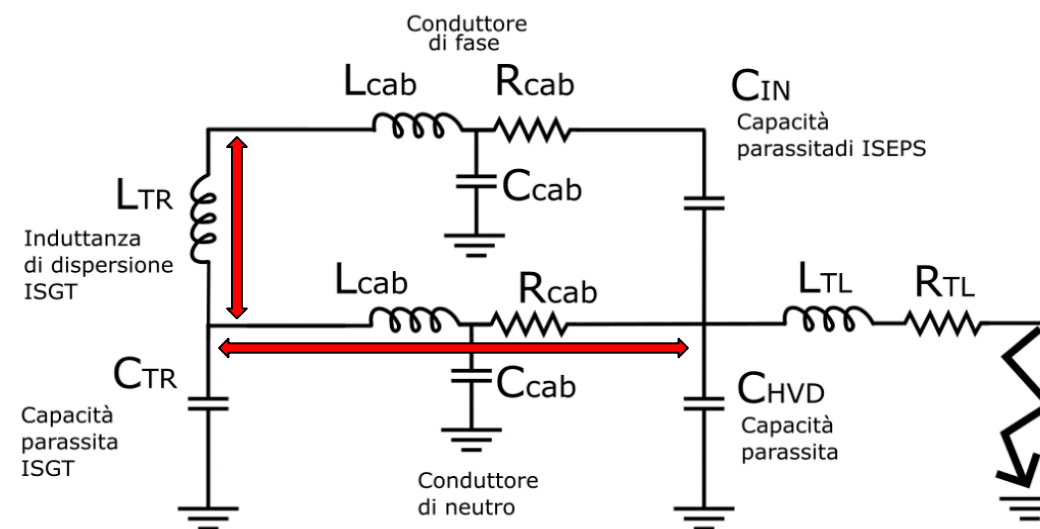
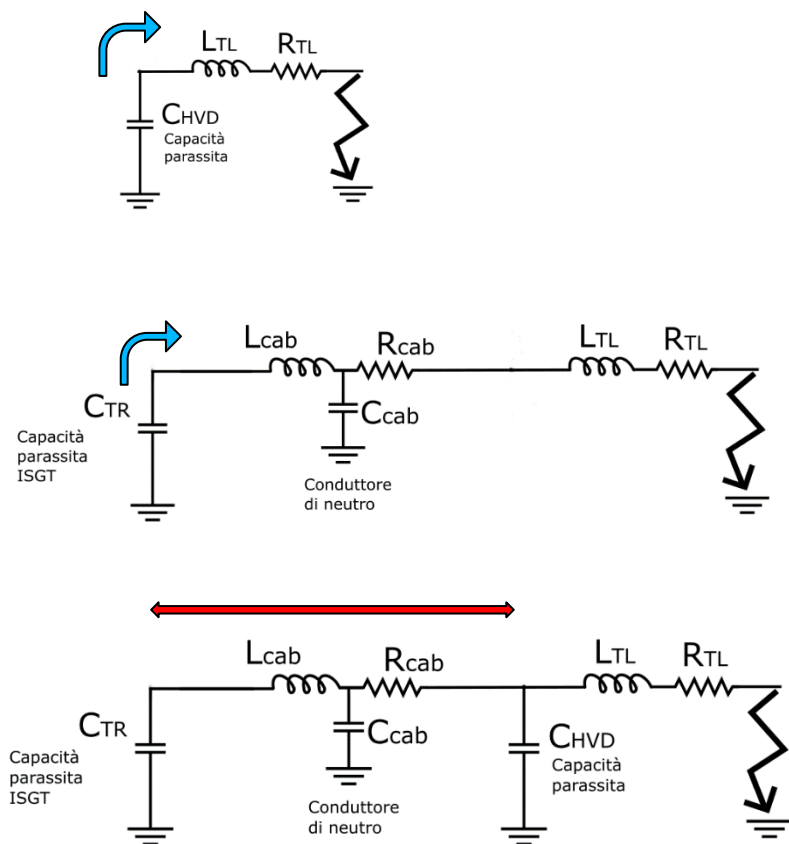
In prima approssimazione CHVD si scarica attraverso LTL ed RTL con una propria frequenza di risonanza



CTR in prima approssimazione si scarica attraverso il circuito con una frequenza di risonanza diversa.

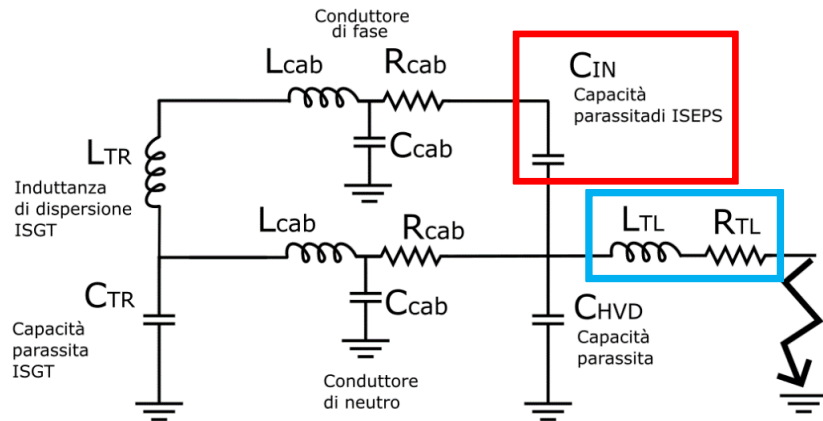


Sovratensione tra CTR e CHVD teorica può raggiungere valori fino al doppio della tensione di alimentazione imposta da AGPS.



Distribuzione della sovratensione tra CTR e CHVD:

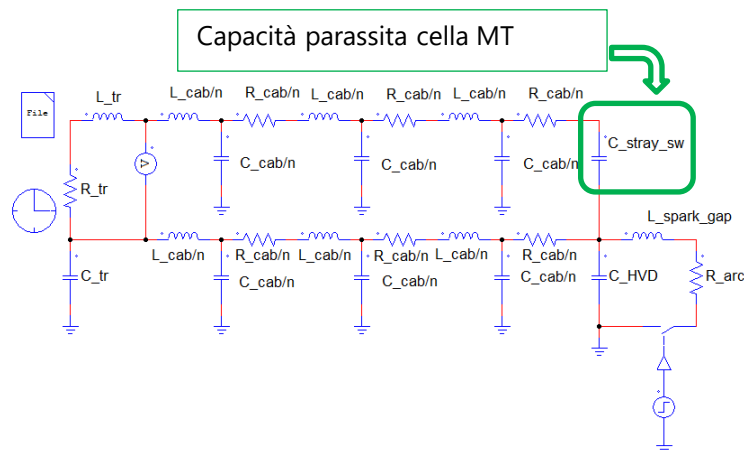
- Ai capi del conduttore di neutro.
- Attraverso conduttore di fase la sovratensione si ripartisce in misura proporzionale all'impedenza (L_{TR} è l'impedenza maggiore).



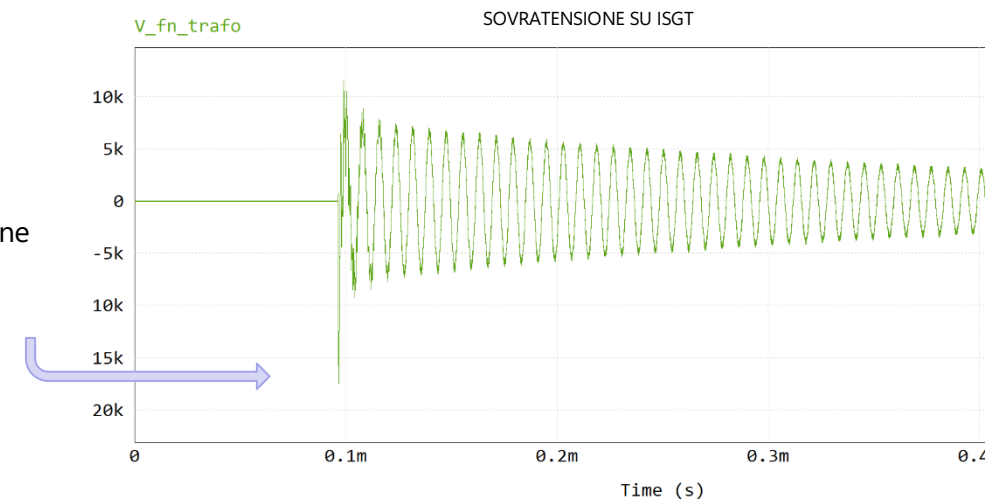
- ➔ C_{IN} rappresenta la capacità parassita tra fase e neutro presente all'interno della struttura HVD. Costituita da capacità parassita di ogni trasformatore e della propria linea in cavo. Può variare in base alla configurazione determinata dal quadro di distribuzione in MT.
 - C_{IN} minimo quando nessuno dei sistemi ISEPS connesso, è la capacità parassita della cella aperta. Ai capi del trasformatore di isolamento ISGT la sovratensione è massima.
 - C_{IN} massimo quando ISEPS risulta connesso, tra ISEPS ed HVD la sovratensione è la minima possibile.
 - Mi aspetto all'aumentare di C_{IN} una diminuzione delle sovratensioni su ISGT per effetto capacitivo alle alte frequenze.
- ➔ Considerato anche il caso di guasto in cui la scarica avviene tra HVD e terra, L_{TL} ed R_{TL} risultano minimi, le sovratensioni sono le maggiori.

- Ho eseguito diverse simulazioni con PSIM professional considerando due scenari differenti del sistema in alta tensione, simulando il caso peggiore per le sovratensioni generate: scarica tra HVD e terra (condizione di guasto).

- Caso massima sovratensione su ISGT

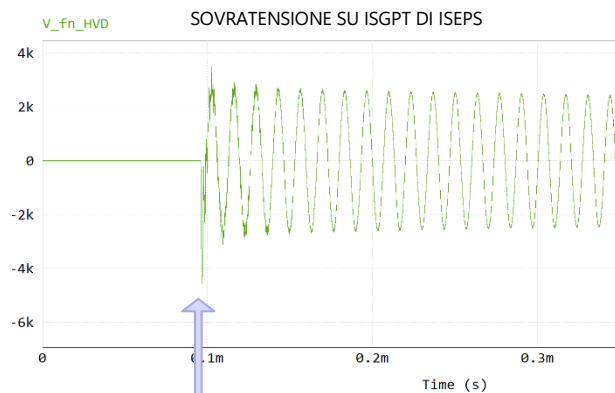
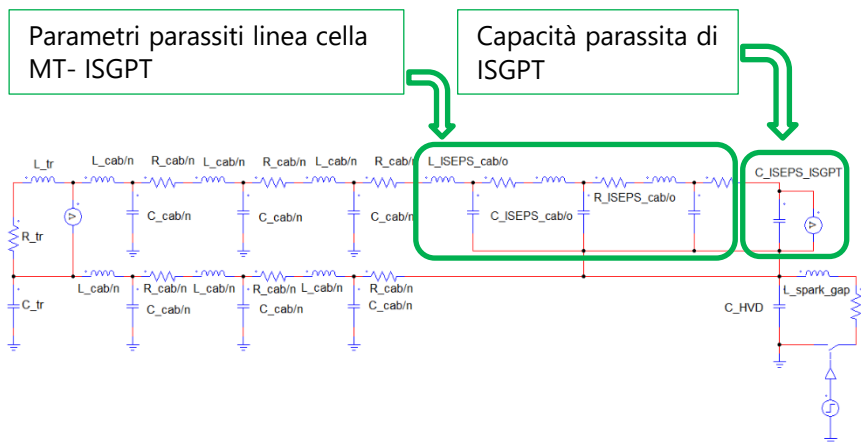


Massima sovratensione su ISGT **17,3kV**

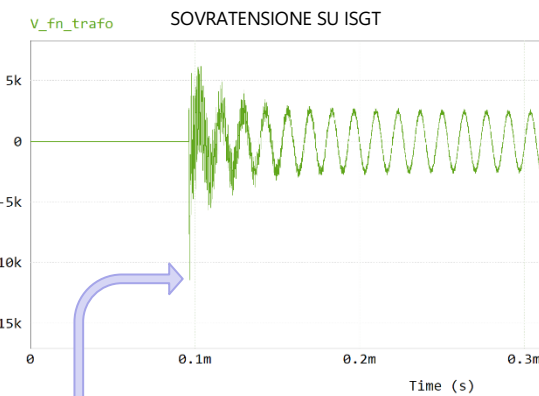


-10kV di tensione di polarizzazione

- Caso massima sovratensione su ISEPS



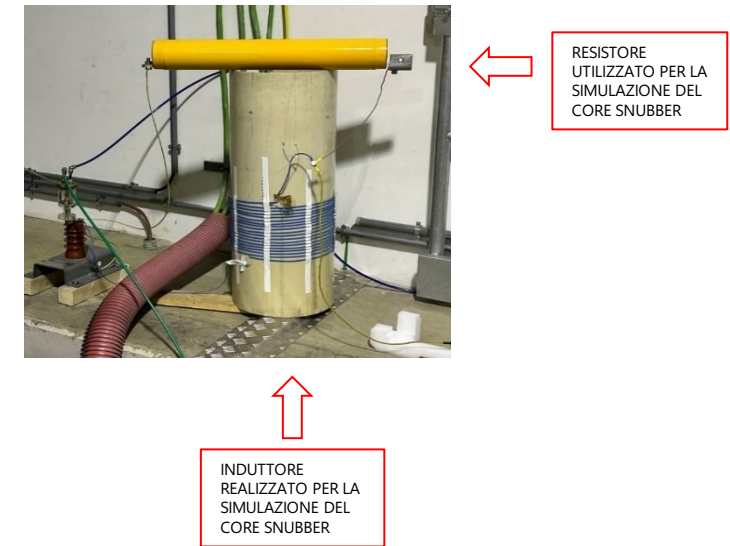
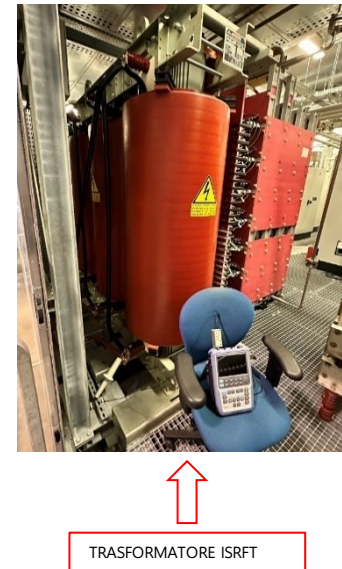
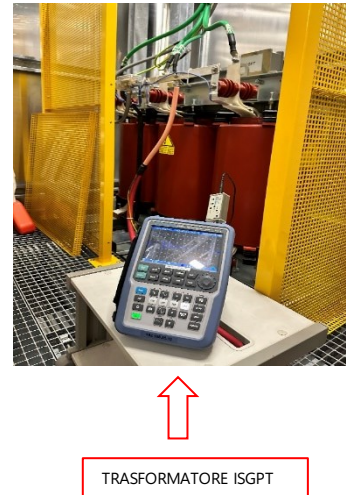
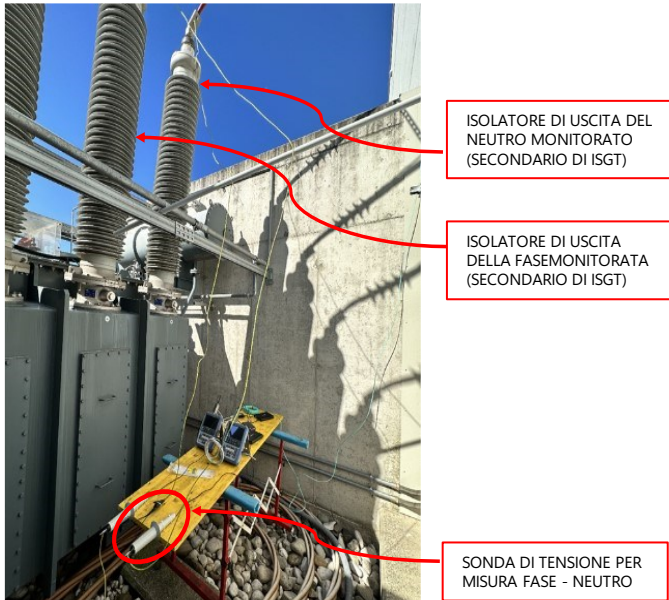
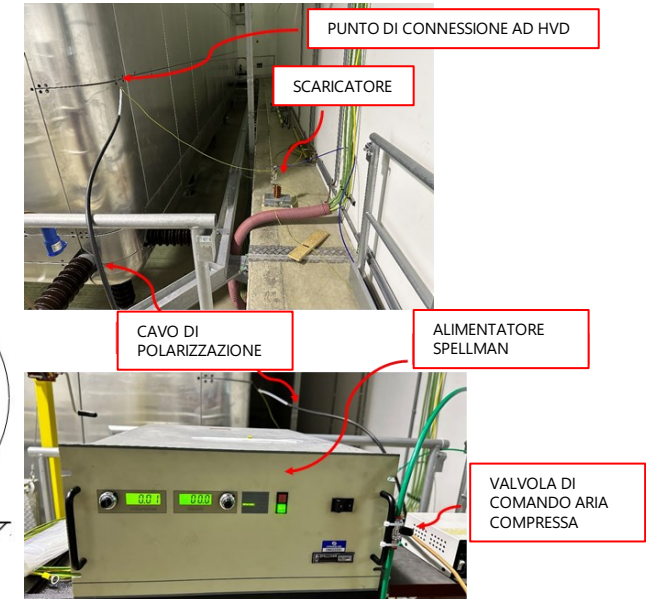
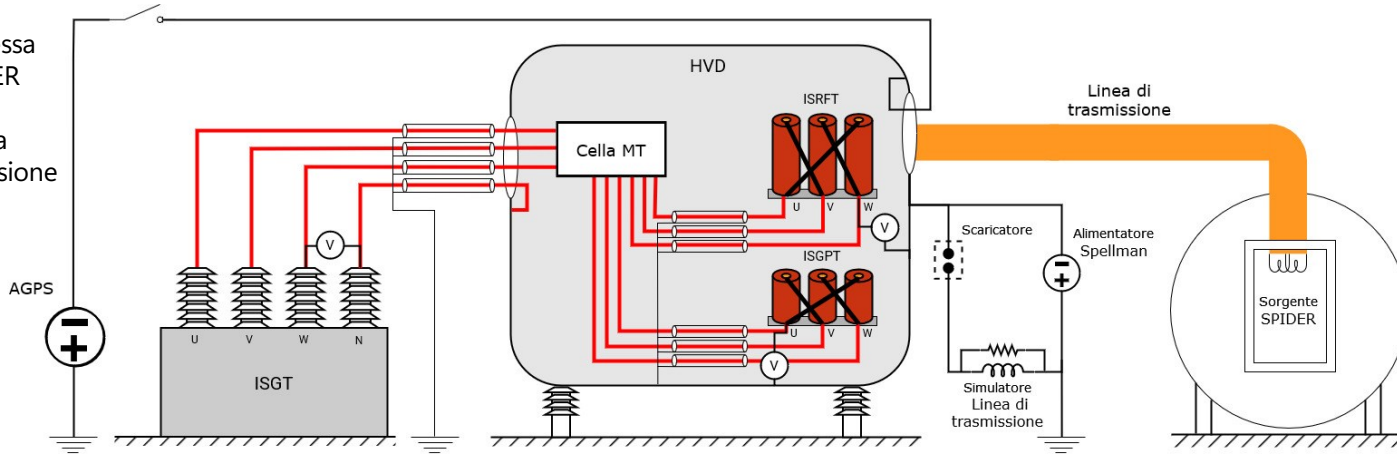
Massima sovratensione su ISGPT di ISEPS di **4,5kV**



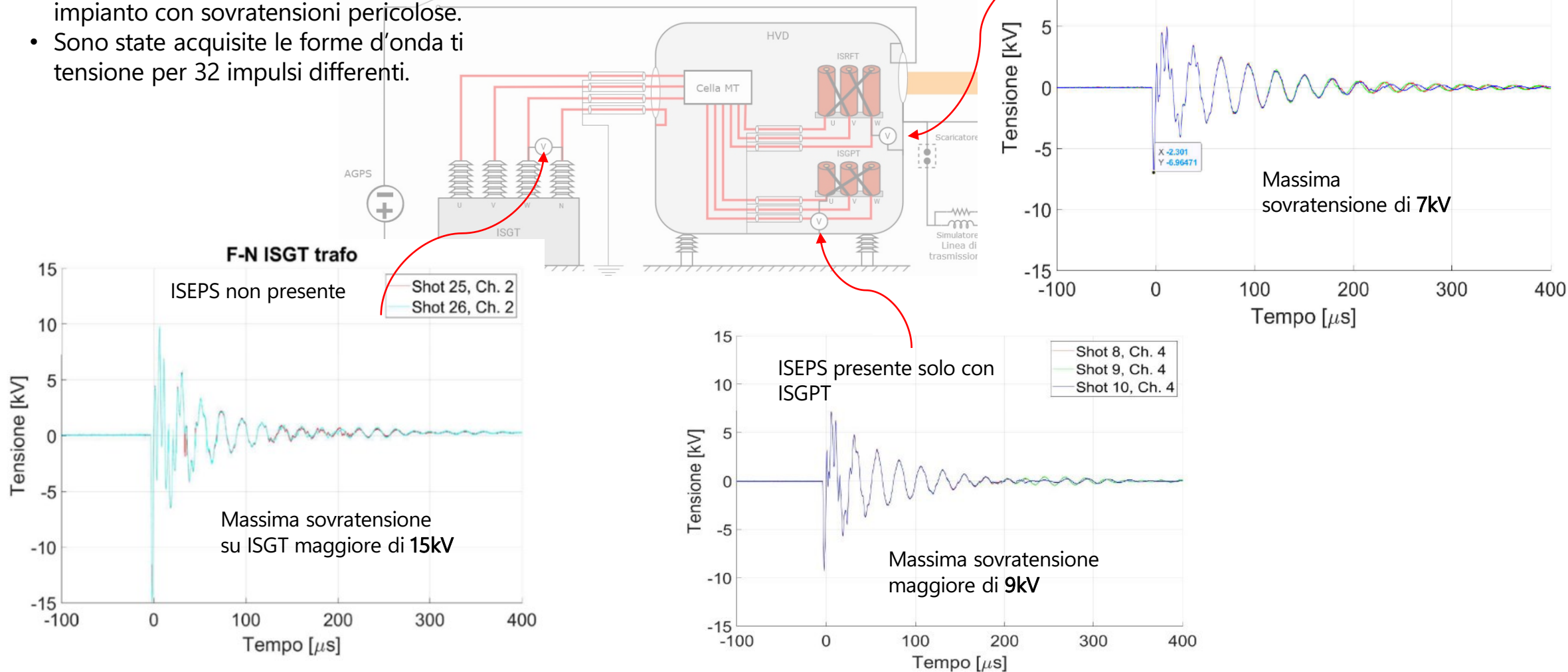
Valore di sovratensione su ISGT con ISEPS connesso **11,4kV**

E' stata condotta una campagna sperimentale a -10kV per rilevare le sovratensioni presenti alla quale ho partecipato attivamente e realizzato un induttore ad hoc.

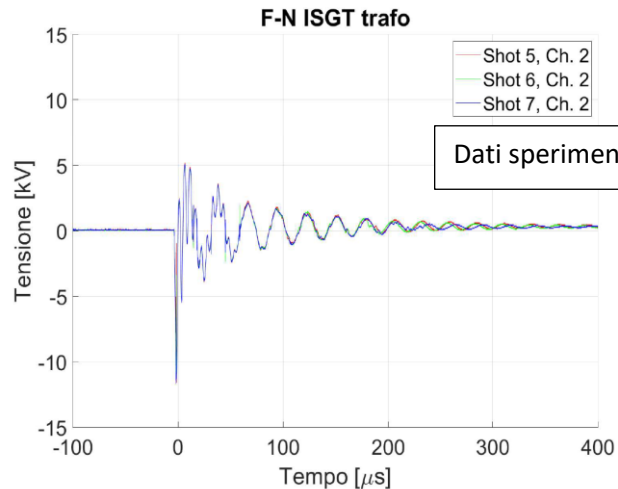
- AGPS disconnessa
- Sorgente SPIDER non presente, contributo della linea di trasmissione simulato



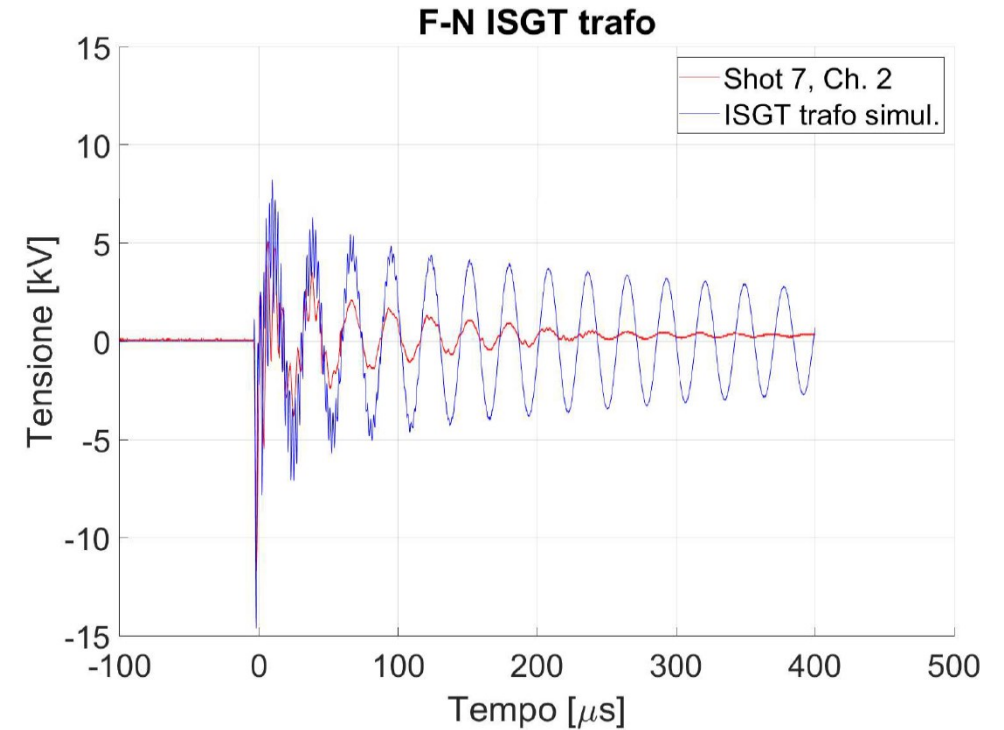
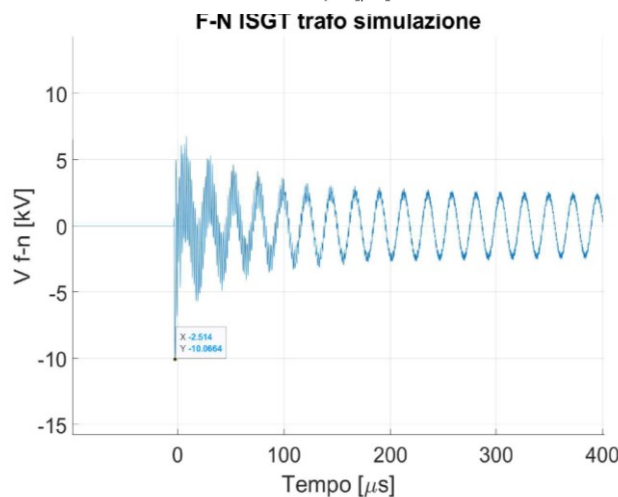
- Sono stati condotti esperimenti con tensione di polarizzazione fino a **-10kV** per non sollecitare i componenti di impianto con sovratensioni pericolose.
- Sono state acquisite le forme d'onda di tensione per 32 impulsi differenti.



- Ho considerato alcuni impulsi come riferimento per validare il modello di analisi, le maggiori differenze erano presenti su contenuto armonico e smorzamento.
- Il modello era inizialmente basato su approssimazioni che stimavano i parametri parassiti dei componenti alle alte frequenze del transitorio di scarica. Questi parametri non erano disponibili né dai datasheet, né erano disponibili dati geometrici di costruzione per una stima accurata.



Sulla base delle misure ottenute si sono modificati i parametri stimati, valutando la veridicità delle assunzioni.



Si è riusciti a riprodurre il contenuto armonico della forma d'onda, con una buona approssimazione del picco iniziale, valore chiave per le analisi sul transitorio.

Rimane la differenza nello smorzamento, dovuto da parametri in gioco non facilmente identificabili alle alte frequenze.

Ho riscalato alla tensione nominale di AGPS (-96kV) i risultati dei test

	Fase-neutro ISGT [kV]	Fase-HVD ISRFT [kV]	Fase-HVD ISGPT [kV]
Caso senza TL Solo ISRFT connesso	110	67	/
Caso senza TL Solo ISGPT connesso	130	/	86
Caso senza TL Tutto ISEPS connesso	86	/	48
Caso senza TL ISEPS disconnesso	144	/	/
Caso con TL Solo ISGPT connesso	96	/	108
Caso con TL Tutto ISEPS connesso	58	/	48
Caso con TL ISEPS disconnesso	112	/	/

Dati di targa da produttore

Trasformatore di
isolamento ISGT

Test report
fulminazione lato
secondario a 60 kV

Trasformatori di
ISEPS
(ISGPT ISRFT ISEG)

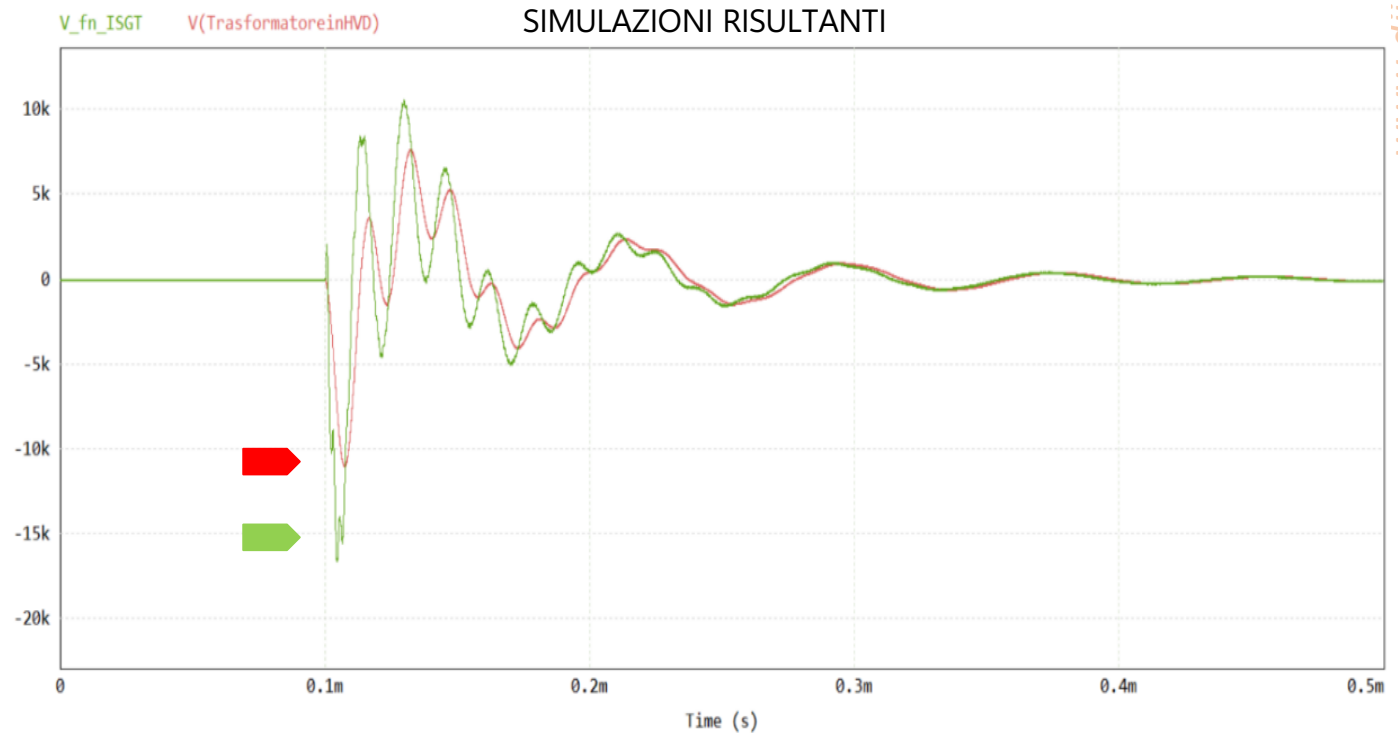
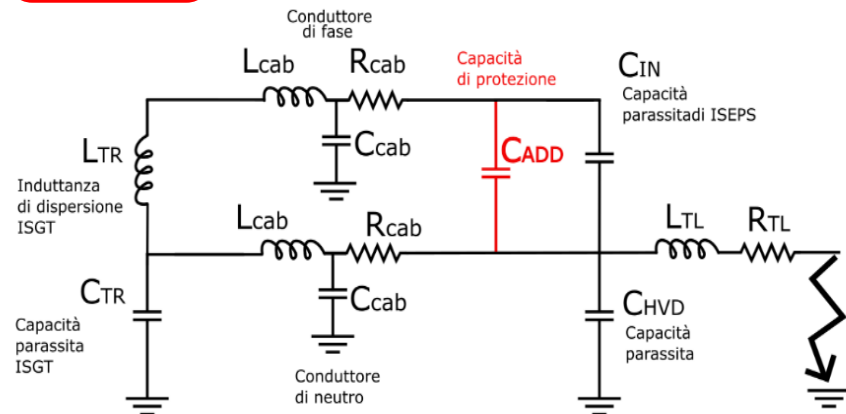
Nessun report
disponibile, test a
20 kV dc primario-
terra da normativa

Osservando i risultati si nota:

- ❑ La presenza di sovratensioni dannose anche nei casi di normali operazioni con scariche in sorgente;
- ❑ L'aumento della capacità parassita presente all'interno di HVD porta ad una diminuzione delle sovratensioni su ISGT e su ISEPS.

- Ho eseguito delle simulazioni del transitorio di scarica in sorgente implementando una protezione formata da condensatori dalla capacità di **100nF** tra ciascuna fase ed il neutro al secondario del trasformatore di isolamento ISGT

-96kV di
tensione di
polarizzazione



Benefici derivanti dall'implementazione delle protezioni:

- Ai trasformatori di ISEPS risulta una sovratensione in modulo di poco superiore ai 10kV (caso migliore senza protezioni 48kV);
- Al trasformatore di isolamento ISGT risulta, tra fase e neutro, una sovratensione in modulo di poco superiore ai 15kV (caso migliore senza protezioni 58kV);

Ho studiato le criticità legate al transitorio di scarica sul trasformatore di isolamento da 100kV, ISGT, che fornisce potenza al sistema di alimentazione della sorgente di SPIDER:

- ❑ Sviluppando un modello semplificato per i transitori ad alta frequenza confermando le ipotesi di sovratensioni su ISGT ed ISEPS;
- ❑ Partecipando attivamente alla campagna sperimentale di test a -10kV;
- ❑ Validando il modello semplificato mediante confronto tra simulazioni e dati sperimentali;
- ❑ Verificando l'esistenza di un rischio concreto di rottura dei componenti analizzando i dati di targa;
- ❑ Proponendo una possibile soluzione, attualmente in corso di valutazione per l'implementazione.