

**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA**  
**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE**  
**CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA DELL'ENERGIA ELETTRICA**

**Tesi di Laurea Magistrale in**  
**Ingegneria dell'Energia Elettrica**

**ANALISI E CARATTERIZZAZIONE DEL FUNZIONAMENTO**  
**DEGLI INTERRUTTORI IN VUOTO DEL SISTEMA DI**  
**TRASFERIMENTO DELL'ENERGIA DELL'ESPERIMENTO**  
**RFX-MOD**

*Relatore: Prof. Paolo Bettini*

*Correlatore: Ing. Andrea Zamengo*

*Laureando: MATTEO MAZZOCCO*

ANNO ACCADEMICO 2017– 2018



# Riassunto

Attraverso questa tesi ci si pone l'obiettivo di analizzare i parametri elettrici del circuito di power supply dedicato all'avvolgimento poloidale nella macchina RFX-mod. L'analisi verte sulla verifica delle performance in seguito alle modifiche circuitali successive alla revisione di RFX, ponendo il suo focus sull'operatività dell'unità di interruzione di corrente PT. Partendo dalla banca dati .pulsefiles si estrapoleranno i dati ricercati al fine di capire l'evoluzione dei principali parametri di resistenza nel sistema ( $R_{CONTACT}$ ,  $R_{ARC}$ ,  $V_{ARC}$ , n° restrikes, sovratensioni). Dai circa 15000 impulsi per ogni tubo interruttore (8 unità composte da due tubi in serie, per un totale di 16 tubi) verranno filtrati tutti gli impulsi effettivi in modalità RFP per l'analisi ultima. Si verificherà quindi l'effettivo upgrade a livello di prestazione e protezione che le modifiche hanno portato andando a ricavare informazioni sulle unità che durante questi anni di operatività hanno presentato guasti, malfunzionamenti e, in alcuni casi, sostituzioni.



# Indice

<b>INTRODUZIONE</b>	i
<b>CAPITOLO 1 - Principi della Fusione Termonucleare Controllata</b>	1
1.1 LA FUSIONE TERMONUCLEARE	1
1.1.1 La reazione di fusione e i criteri di innesco	2
1.2 CENNI DI FISICA DEL PLASMA	5
1.2.1 Cosa si intende con il termine “plasma”?	5
1.3 IL CONFINAMENTO MAGNETICO DEL PLASMA	6
1.3.1 Metodi di confinamento	6
1.3.2 Confinamento Inerziale	7
1.3.3 Confinamento magnetico	8
1.4 MACCHINE TOROIDALI A CONFINAMENTO MAGNETICO	9
1.4.1 Il tokamak	10
1.4.2 La configurazione RFP	12
1.4.3 L’effetto dinamo	13
1.4.4 Sintesi caratteristiche RFP	15
<b>CAPITOLO 2 – Da RFX a RFX-mod</b>	19
2.1 CENNI STORICI	19
2.2 CARATTERISTICHE DELLA MACCHINA RFX	19
2.3 MODIFICA NELLA MACCHIA RFX-MOD	20
<b>CAPITOLO 3 – Il sistema di power-supply in RFX</b>	23
3.1 INTRODUZIONE	23
3.2 IL CIRCUITO PER IL CAMPO TOROIDALE	25
3.2.1 Funzionalità	25
3.2.3 RFX-mod	26
3.3 IL CIRCUITO PER IL CAMPO POLOIDALE	27
3.3.1 Funzionalità	28
3.3.2 Funzionamento	28
3.3.3 RFX-mod	29
<b>CAPITOLO 4 – Interruzioni di grandi correnti DC</b>	31

4.1 INTRODUZIONE	31
4.2 APPLICAZIONI IN AMBITO FUSIONISTICO DELL'INTERRUZIONE DI GRANDI CORRENTI DC	35
4.3 APPLICAZIONI NEI PRINCIPALI ESPERIMENTI IN AMBITO FUSIONISTICO	39
4.3.1 JET	39
4.3.2 Tore Supra	39
4.3.3 KSTAR	41
4.3.4 ITER	42
4.3.5 RFX	44
4.4 LIMITI NELLA PERFORMANCE DEI VCBs IN RFX	44
4.5 RFX-MOD	45
<b>CAPITOLO 5 - Acquisizione dati</b>	51
5.1 SISTEMA DI ACQUISIZIONE DATI IN RFX	51
5.1.1 RFX-mod	52
5.1.2 Misurazioni diagnostiche	53
5.2 GRANDEZZE CONSIDERATE DAL SISTEMA DI PROTEZIONE	56
5.2.1 Parametri a contatti chiusi ( $t < -10\text{ms}$ )	56
5.2.2 Parametri a contatti aperti ( $-10\text{ms} < t < 0\text{s}$ )	63
5.2.3 Parametri dopo scarica banco PTCB	65
<b>CAPITOLO 6 – Analisi Dati</b>	71
6.1 Divisione in campagne sperimentali	71
6.2 Parametri a contatti chiusi	75
6.2.1 Resistenza di contatto	75
6.2.1.1 Unità con molteplici restrikes	75
6.2.1.2 Unità con funzionamento corretto	77
6.3 Parametri a contatti aperti	79
6.3.1 Evoluzione parametri arco	79
6.3.2 Tensione dell'arco	82
6.3.3 Resistenza dell'arco	86
6.3.4 Ritardo di intervento dei PTSO	91

6.4 PARAMETRI DOPO L'APERTURA	93
6.4.1 Restrikes	93
6.4.2 Sovratensione	95
6.5 NOTE ULTERIORI	98
6.5.1 Misure tensione unità 09	98
6.5.2 Guasto unità 40	99
<b>CAPITOLO 7 – Conclusioni</b>	<b>101</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>103</b>

# Introduzione

## La fusione nucleare

Al fine di ridurre le concentrazioni di gas a effetto serra nell'atmosfera ad un livello ecologicamente sostenibile, l'attuale sistema di approvvigionamento di energia deve cambiare notevolmente.

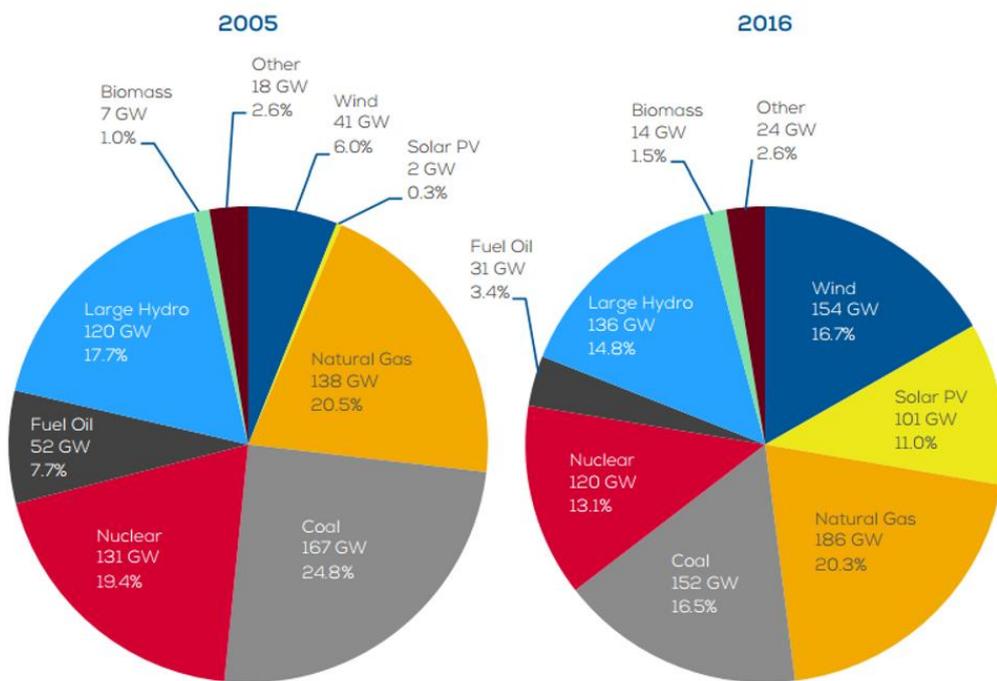
Oggi la maggior parte della domanda mondiale di energia elettrica è soddisfatta da combustibili fossili, principalmente da petrolio, gas naturale e carbone. Se questo modello non cambia, la scorta di petrolio e di gas si esaurirà, ad essere ottimisti, nel giro di un paio di generazioni. Le riserve di carbone sono invece più abbondanti, ma il loro utilizzo a livello locale e globale solleva preoccupazioni ambientali a causa dell'elevata emissione di CO<sub>2</sub>. Inoltre, il petrolio è attualmente il principale carburante per i trasporti, ma, in futuro, per la riduzione della disponibilità di greggio e per il conseguente aumento dei prezzi, è probabile l'utilizzo di veicoli elettrici e l'uso di combustibile a idrogeno. Ciò avrà l'effetto di aumentare maggiormente la domanda di energia elettrica. In questo contesto, nuove fonti di energia sono necessarie. Le tecnologie per le energie rinnovabili, ovvero solare, eolica, delle maree, del moto ondoso, biomassa, energia geotermica e idroelettrica, hanno subito un incremento nel loro sfruttamento notevole (fig 0.1), ma proprio per questo sono già in gran parte sfruttate o in procinto di essere sviluppate al massimo delle possibilità. Per il loro uso futuro è prevista ancora una buona crescita di mercato; tuttavia esse soffrono di disponibilità isolata, sono soggette ad improvvisi cambiamenti climatici locali e richiedono la gestione dello stoccaggio e/o della distribuzione alla rete di energia elettrica. Esse possono dare un grande contributo in paesi con una popolazione distribuita e con la mancanza di energia elettrica di rete, ma possono coprire solo una piccola parte della domanda di energia proveniente dai luoghi in cui sono attualmente le nazioni sviluppate. Per la seconda metà di questo secolo si guarda in maniera promettente anche alla possibilità di ottenere energia tramite la fusione termonucleare controllata.

Innanzitutto, la fusione promette un approvvigionamento quasi illimitato di energia. La fornitura dei combustibili con la quale opera (Deuterio e Trizio) è ampiamente disponibile in tutto il mondo. Il Deuterio è abbondante e può essere facilmente estratto dall'acqua di mare. Il Trizio può essere prodotto dal Litio che è un metallo leggero facilmente reperibile nella crosta terrestre.

Inoltre, la reazione di fusione non produce emissioni di gas serra o altri gas che causano riscaldamento globale, cambiamenti climatici o effetti nocivi per l'ambiente. I rifiuti radioattivi, provenienti solo dalle parti metalliche vicine al plasma di fusione, sono molto limitati e riutilizzabili dopo un centinaio di anni, quando il processo di decadimento si esaurisce. Per finire, la reazione di fusione è

intrinsecamente sicura. Solo circa due grammi di combustibile sono presenti nel vessel, e sono sufficienti per sostenere la reazione solo un paio di secondi. Inoltre, non innescando una reazione a catena, un qualche guasto o malfunzionamento avrebbe come conseguenza lo spegnimento della stessa. Questa è solo una delle differenze con la fissione, dove il principale problema è invece il contenimento e rallentamento della reazione stessa.

Uno scenario mondiale consapevole dei limiti delle risorse energetiche attualmente disponibili e le pressanti problematiche ambientali associate agli attuali processi di produzione dell'energia, spingono quindi in questa direzione. Negli ultimi sessant'anni è stato profuso un notevole sforzo teorico e sperimentale per mettere a punto la fusione nucleare controllata. Al momento il progetto più avanzato per la realizzazione di energia elettrica da fusione è ITER: un reattore a fusione termonucleare (tokamak); ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) è un progetto internazionale cooperativo tra Unione Europea, Russia, Cina, Giappone, Stati Uniti d'America, Corea del Sud e India, che potrebbe nei prossimi decenni confermare la realizzabilità scientifica e tecnologica di un reattore commerciale a fusione con un bilancio positivo di energia. Verrà costruito a Cadarache, nel Sud della Francia, con un costo previsto di 10 miliardi di euro. Con ITER la sperimentazione fornirà le indicazioni sulla fisica del plasma necessaria per avere una reazione di fusione stabile; in esso verranno inoltre testate le soluzioni tecnologiche necessarie per la futura centrale elettrica a fusione (DEMO).



Source: WindEurope

Fig 0.1 Come è cambiata la generazione di energia tra il 2005 e il 2016 nei Paesi dell'Europa



# Capitolo 1

## Principi della Fusione Termonucleare Controllata

### 1.1 La fusione termonucleare

La fusione termonucleare controllata consiste in una reazione nucleare tra due nuclei leggeri che fondono in un nucleo più pesante, dando luogo a prodotti di reazione (neutroni ed energia principalmente). Questo è un fenomeno molto diffuso in natura: le reazioni di fusione nucleare sono il motore che fornisce energia al nostro sole e alle stelle in generale. La reazione di fusione tra due nuclei leggeri può avvenire se questi presentano una quantità di energia tale da vincere le forze di repulsione Coulombiane. Risulta quindi necessario fornire ai reagenti una sufficiente quantità di energia cinetica. Inoltre, al fine di ottenere un numero di reazioni di fusione sufficientemente elevato, è necessario imporre loro una condizione di densità e temperatura abbastanza alte per una durata significativamente lunga. In queste condizioni il fluido raggiunge lo stato di plasma, un insieme quasi elettricamente neutro di ioni ed elettroni.

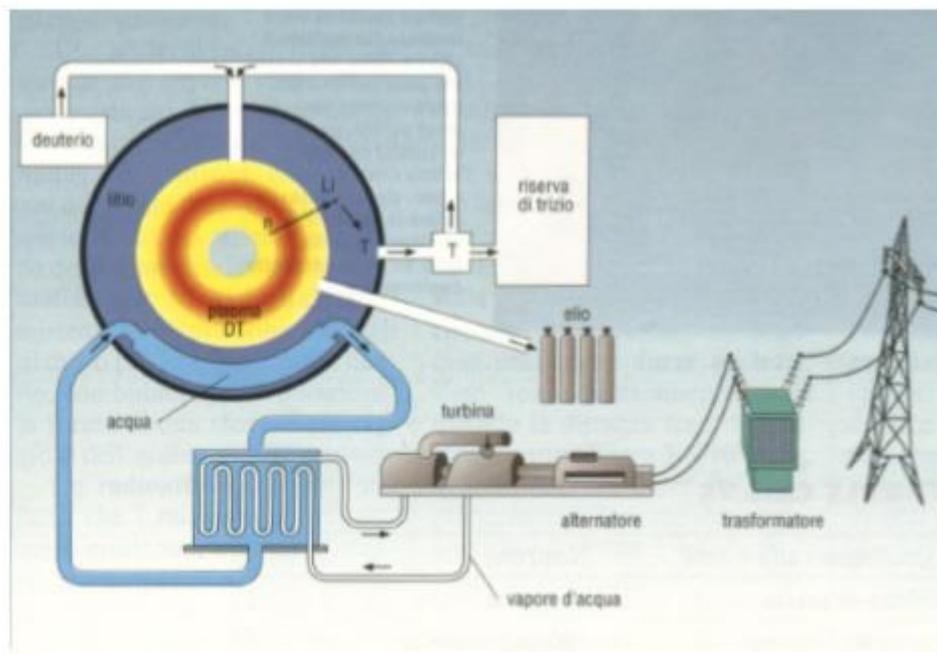


Figura 1.1: Schema di principio di un impianto a fusione

### 1.1.1 La reazione di fusione e il criterio di innesco

Vengono riportati alcuni esempi di reazione di fusione:

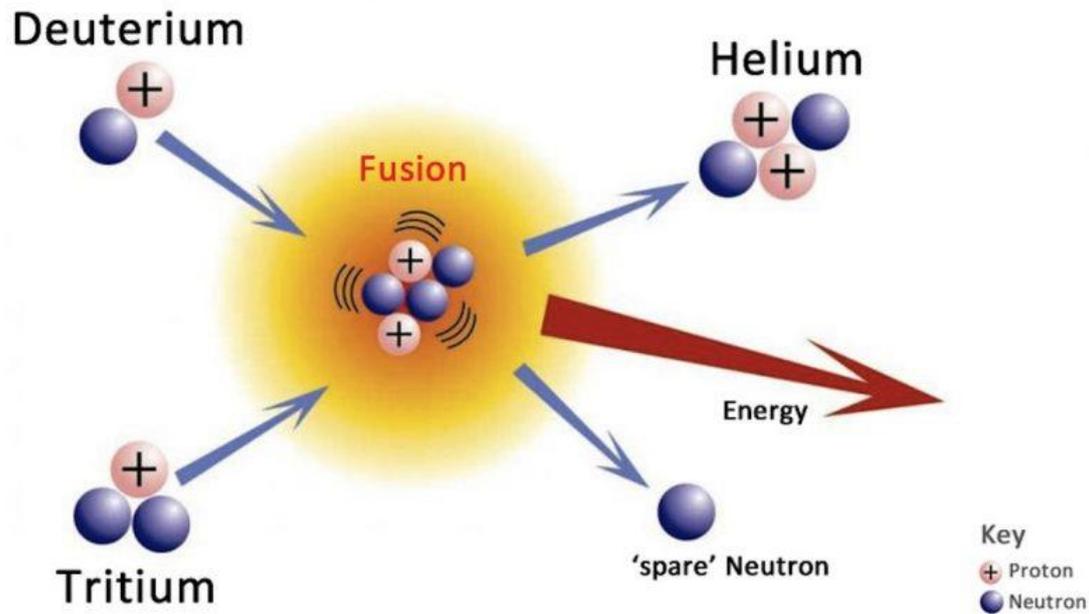
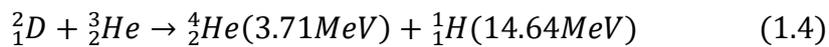
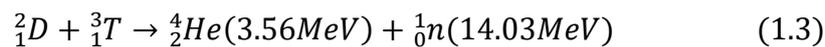
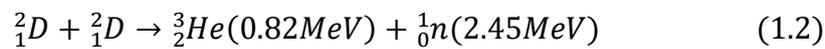
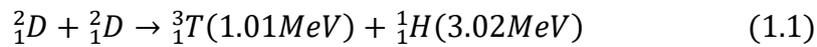
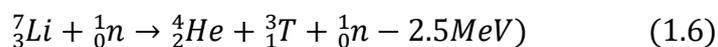


Figura 1.2: Reazione di fusione Deuterio-Trizio



La reazione più favorevole in condizioni realizzabili in laboratorio è quella riportata nell'equazione (1.3). La sezione d'urto della reazione di fusione D – T (fig 1.2) ha un massimo che risulta circa cento volte superiore a quello delle reazioni D – D e D – He (fig 1.3).

Il trizio può essere ottenuto dalle due seguenti reazioni con il litio:



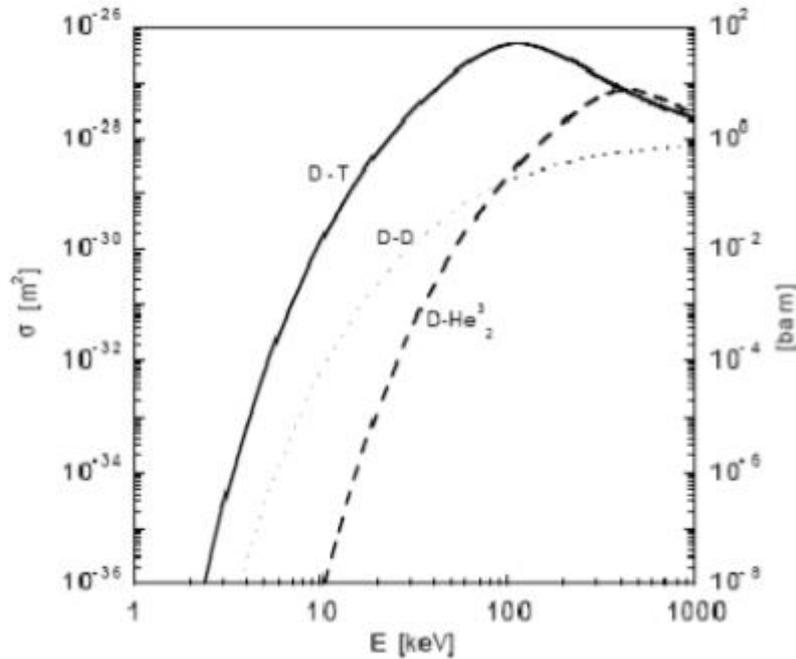


Figura 1.3: Andamento della sezione d'urto in funzione dell'energia cinetica dei reagenti

La presenza di uno strato di litio nella camera da vuoto di un reattore per fusione dovrebbe essere sufficiente a fornire una risorsa di trizio per un periodo limitato di tempo. Un altro vantaggio della reazione D – T è legato alla produzione di neutroni con contenuto energetico elevato (avendo una massa inferiore, a parità di quantità di moto complessiva, i neutroni hanno un'energia cinetica più elevata); i neutroni, poi, non essendo elettricamente carichi, non vengono confinati magneticamente, e si accumulano quindi nel mantello, in cui la loro energia cinetica viene convertita in energia termica e poi in elettricità.

Perché la fusione termonucleare possa essere sfruttata come fonte di energia deve poter essere conseguita in un reattore che realizzi un bilancio energetico positivo, quindi in grado di fornire una quantità di energia maggiore di quella richiesta per riscaldare e mantenere il combustibile alla temperatura di fusione di innesco, deve prevedere un tempo sufficiente perché il combustibile 'bruci' prima che nel reattore i nuclei possano diffondere verso la parete raffreddandosi. Diventa così necessario operare al fine di avere il tempo d'isolamento termico del plasma  $\tau_e$ , detto anche tempo di confinamento, sufficientemente lungo perché un numero elevato di nuclei possa produrre reazioni di fusione. Inoltre, è evidente che il numero di reazioni di fusione risulta proporzionale anche al numero dei nuclei di combustibile per unità di volume  $n_i$ , cioè alla densità del plasma.



## 1.2 Cenni di fisica del plasma

### 1.2.1 Cosa si intende con il termine "plasma"?

In fisica e chimica con il termine plasma si identifica un gas ionizzato costituito da una collezione di elettroni e ioni che globalmente è neutro (cioè la sua carica elettrica totale è nulla) e presenta comportamenti collettivi. In quanto tale, il plasma è considerato come il quarto stato della materia, che si distingue quindi dal solido, il liquido e il gassoso. "Ionizzato" in questo caso significa che una frazione significativamente grande di elettroni è stata strappata dagli atomi; le cariche elettriche libere fanno sì che il plasma sia un buon conduttore di elettricità, e che risponda fortemente ai campi elettromagnetici. Questo quarto stato della materia fu identificato da Sir William Crookes nel 1879 e chiamato "plasma" da Irving Langmuir nel 1928. Vennero dunque realizzati i cosiddetti tubi di Crookes, che erano gli antenati dei tubi catodici e delle lampade al neon. Essendo però costituiti di particelle cariche, i moti complessivi delle particelle del plasma sono in gran parte dovuti alle forze a lungo raggio che si vengono continuamente a creare, e che tendono a mantenere il plasma neutro; questo fatto stabilisce una differenza importante rispetto ai gas ordinari, nei quali i moti delle particelle sono dovuti a forze che si estendono al massimo per qualche primo vicino. Mentre sulla terra la presenza del plasma è relativamente rara (fanno eccezione i fulmini, le aurore boreali e le fiamme), nell'universo costituisce più del 99% della materia conosciuta: di plasma sono fatti il Sole, le stelle e le nebulose; si ha inoltre la formazione di plasma sullo scudo termico dei veicoli spaziali al rientro nell'atmosfera. Il campo elettrico necessario per ionizzare il gas dipende dalla pressione e il tasso di ionizzazione dipende dal rapporto fra campo elettrico applicato e pressione, cioè dal rapporto  $\frac{E}{p}$ . Per esempio, per ionizzare gas Argon in un tubo lungo un metro e mezzo alla pressione di  $10^{-2}$  mbar, occorrono circa 800 V. Il termine plasma si usa dunque per identificare un insieme di particelle cariche che globalmente si mantiene neutro. In esso esiste una scala spaziale nella quale elettroni e ioni si muovono in modo indipendente, questa distanza viene chiamata lunghezza di Debye. Un gas ionizzato è un plasma se la densità è tale da avere un numero significativo di particelle cariche dentro una sfera di raggio pari alla lunghezza di Debye. In sostanza, dentro il plasma è verificato che  $n_e = n_i$ , dove  $n_e$  è la densità di elettroni, ed  $n_i$  è la densità di ioni. Per mantenere questa condizione, dentro il plasma si forma un campo elettrico, detto ambipolare, che tende a frenare gli elettroni, e ad accelerare gli ioni (tendenzialmente, gli elettroni sono più veloci a diffondersi). Dato un gas ionizzato si definisce un'energia potenziale di tipo elettrostatica:

$$U \propto \frac{e^2 n}{\epsilon_0} L^2 \quad (1.9)$$

tanto più grande, quanto maggiore è la densità di carica. Confrontandola con l'energia termica  $\varepsilon = K_B T$  si definisce la lunghezza di Debye:

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 K_B T}{e^2 n}} \quad (1.10)$$

Se la temperatura viene espressa in unità di elettronVolt (quantità di energia acquistata da un elettrone libero quando passa attraverso una differenza di potenziale elettrico di 1 volt nel vuoto) e la densità di particelle per metro cubo, la lunghezza di Debye si esprime come:

$$\lambda_D = 7430 \sqrt{\frac{T(eV)}{n(m^{-3})}} \quad (1.11)$$

## 1.3 Il Confinamento Magnetico Del Plasma

La lunghezza di Debye definisce quindi una minima lunghezza per il moto indipendente di elettroni e ioni: dentro una sfera di raggio  $\lambda_D$  (detta sfera di Debye) dominano i processi di particella singola; al di fuori di essa il comportamento di elettroni e ioni si descrive con il campo elettrico ambipolare, cioè con la parte a lungo raggio del potenziale elettrostatico. In sostanza, elettroni e ioni si muovono gli uni rispetto agli altri come fossero un corpo unico. A differenza dei gas neutri, dove le collisioni sono essenzialmente un fenomeno binario, gli urti fra elettroni e ioni nei plasmi sono dominati dalle forze di Coulomb e danno origine a fenomeni e moto di tipo collettivo. Nei plasmi il libero cammino medio delle collisioni di Coulomb è maggiore della lunghezza di Debye ed essendo interessati a fenomeni che avvengono su scale spaziali più grandi della sfera di Debye e su scale temporali più lente della frequenza di plasma, il plasma può essere trattato come un fluido neutro in cui i campi elettrici su piccole scale sono ignorabili. Questo è l'approccio seguito per esempio dalla magnetoidrodinamica.

### 1.3.1 Metodi Di Confinamento

Si sono sviluppati due metodi differenti allo scopo di creare la condizione (1.7), affinché possa nascere una reazione di fusione: il confinamento inerziale ed il confinamento magnetico.

I reattori per fusione a confinamento inerziale, impongono condizioni di alta temperatura e densità sfruttando dei fasci laser di potenza elevata. Questi riescono a riscaldare e comprimere la materia sino a farle raggiungere le condizioni critiche, e il confinamento è garantito dalle forze inerziali.

I reattori per fusione a confinamento magnetico utilizzano forti campi magnetici per realizzare il confinamento della materia allo stato di plasma. Sapendo che una particella spontaneamente segue un moto a spirale intorno ad una linea di campo, creando delle strutture magnetiche chiuse è possibile garantire il confinamento del plasma per intervalli di tempo sufficientemente lunghi.

### 1.3.2 Confinamento inerziale

Il confinamento inerziale è prodotto mediante microesplosioni ed è caratterizzato da un tempo di confinamento estremamente breve  $\tau_e \leq 10^{-10}[s]$  e da una densità di particelle estremamente elevata ( $n_i \geq 10^{31}[m^{-3}]$ ). Questo meccanismo è attuato da fasci di raggi laser o fasci di particelle accelerate ad alta energia focalizzati su una microsfera di alcuni millimetri di contenente come combustibile una miscela di deuterio o deuterio e trizio. L'energia elettromagnetica (qualche MJ per una durata di 10÷30 [ns]) dei fasci laser di alta potenza o l'energia cinetica delle particelle accelerate, è trasferita uniformemente sullo strato superficiale della sferetta provocando, per ablazione dello stesso, l'implosione del combustibile contenuto nella microsfera. La compressione adiabatca prodotta nel combustibile ne innalza la temperatura e la densità fino a raggiungere le condizioni di ignizione. L'inerzia dei nuclei D e T mantiene unito il combustibile per il tempo necessario allo sviluppo di un numero di reazioni di fusione sufficiente ad avere un bilancio energetico globale positivo. Terminata la spinta di compressione inerziale il numero di reazioni di fusione si riduce drasticamente fino all'annullamento mano a mano che la miscela combustibile D-T si espande e si diluisce.

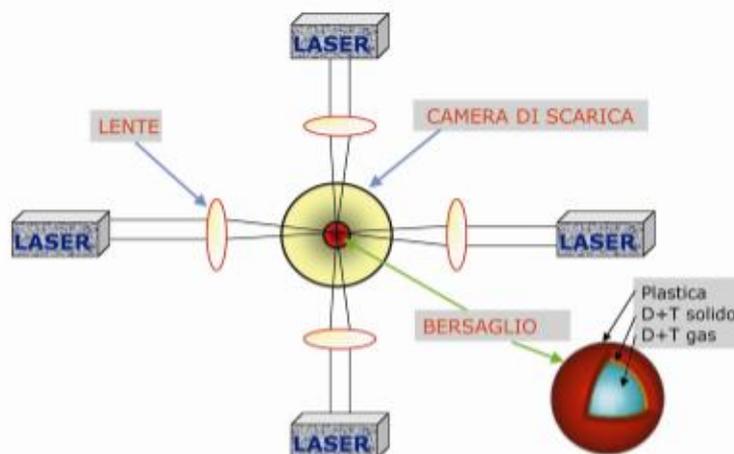


Fig. 1.5 Fusione inerziale: schema di principio, con sezione della capsula-bersaglio contenente Deuterio e Trizio

### 1.3.3 Confinamento magnetico

Il confinamento magnetico è realizzato attraverso campi magnetici che agiscono su particelle cariche in movimento attraverso una forza  $F_L(P,t)$  detta di forza di Lorentz. Infatti, quando ad un gas si fornisce un'energia sufficiente, le molecole si trasformano in atomi (dissociazione) e gli atomi in ioni (ionizzazione). La Legge di Lorentz:

$$F = q \cdot v \cdot B \cdot \sin \alpha \quad (1.12)$$

$q$  = carica dello ione o dell'elettrone

$B$  = campo di induzione magnetica

$\alpha$  = angolo tra le direzioni di  $v$  e  $B$

$v$  = velocità dello ione o dell'elettrone

mostra che una particella carica, cioè nel nostro caso uno ione o un elettrone, in presenza di campo magnetico è sottoposta ad una forza proporzionale alla sua carica, alla sua velocità (che a sua volta è legata alla sua energia termica) e all'intensità di campo magnetico. La forza di Lorentz ha direzione sempre perpendicolare sia alla direzione della velocità della particella che alla direzione del campo magnetico  $B$ ; essa non modifica la velocità iniziale, ma impone alla particella carica un movimento elicoidale attorno alla linea di forza del campo magnetico. L'equilibrio fra forza di Lorentz e forza centrifuga, agenti sulla singola particella, determina una traiettoria elicoidale di raggio  $r$  tale che:

$$F = q \cdot v \cdot B \cdot \sin \alpha = (m \cdot v^2) / r \quad (1.13)$$

$v$  = velocità della particella

$r$  = raggio di rotazione della particella

$m$  = massa della particella

Le particelle perciò si muovono, secondo la risultante della componente della velocità iniziale parallela a  $B$  e della velocità imposta dalla legge di Lorentz, lungo traiettorie elicoidali attorno alle linee di forza del campo magnetico. Per riuscire a modificare la traiettoria fino ad intrappolare le particelle cariche, risulta necessario che esse attraversino o siano immerse in un campo di induzione magnetica. Questo principio è alla base delle cosiddette macchine a confinamento magnetico di plasmi negli esperimenti sulla fusione termonucleare controllata.

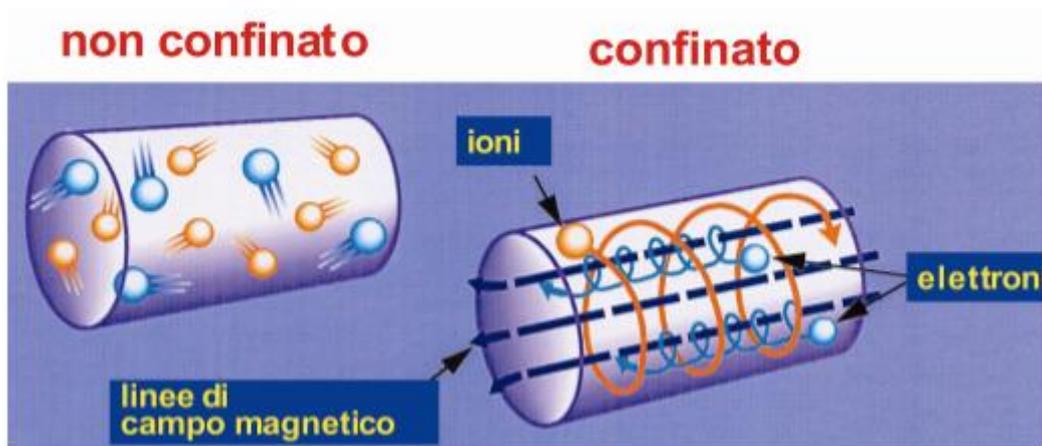


Fig. 1.6 Effetti della assenza e della presenza di un Campo Magnetico in un gas ionizzato

## 1.4 Macchine toroidali a confinamento magnetico

Per attuare la reazione di fusione nucleare vennero adottate dapprima le cosiddette macchine lineari. Le macchine lineari furono le prime ad essere realizzate, e le relative bobine erano tali da indurre campi magnetici assiali uniformi, più intensi alle estremità per limitare le perdite di particelle e creare un effetto di specchio magnetico. Il confinamento che si ottiene non è molto efficace perché una quota parte delle particelle sfugge dalle estremità della macchina non riuscendo ad invertire la componente parallela della velocità.

Un successo decisamente maggiore ha avuto l'idea di costruire contenitori toroidali, e di creare il campo magnetico mediante solenoidi anch'essi toroidali; dentro tali strutture anulari, le particelle dovrebbero potersi muovere senza incontrare mai le pareti.

In base alle diverse possibili configurazioni dei campi magnetici, tali macchine si suddividono in:

- Stellarator
- Reversed Field Pinch (RFP, a campo rovesciato)
- Tokamak

Nelle prime, i campi magnetici sono prodotti da correnti che fluiscono all'esterno del plasma, in bobine situate attorno alla camera di contenimento.

La caratteristica peculiare di una configurazione Tokamak è di avere un intenso campo magnetico con componente principale in direzione toroidale, ottenuto mediante bobine di campo toroidale, poste esternamente alla camera di scarica. La componente poloidale, necessaria per ottenere la forma elicoidale delle linee di campo, indispensabile per confinare le particelle del gas ionizzato, viene invece generata direttamente dalla corrente di plasma. La difficoltà di produrre un campo toroidale di valore molto intenso (il campo poloidale  $B_\theta$  deve essere molto meno intenso di quello toroidale  $B_{tor}$ ) pone un limite sulla massima corrente di plasma. Tale effetto limita il riscaldamento dovuto alla corrente di plasma stessa (riscaldamento ohmico) ed è necessario utilizzare riscaldamenti aggiuntivi per raggiungere la condizione di ignizione.

### 1.4.1 Il Tokamak

Il tokamak (acronimo del nome russo "тороидальная камера с магнитными катушками", cioè "Cella toroidale con bobine magnetiche") è una configurazione caratterizzata da forti campi magnetici toroidali  $B_{tor}$  e da campi poloidali di un ordine di grandezza inferiore ( $B_{tor} \sim 10B_\theta$ ).

L'andamento caratteristico di queste grandezze è mostrato in Figura 1.6.

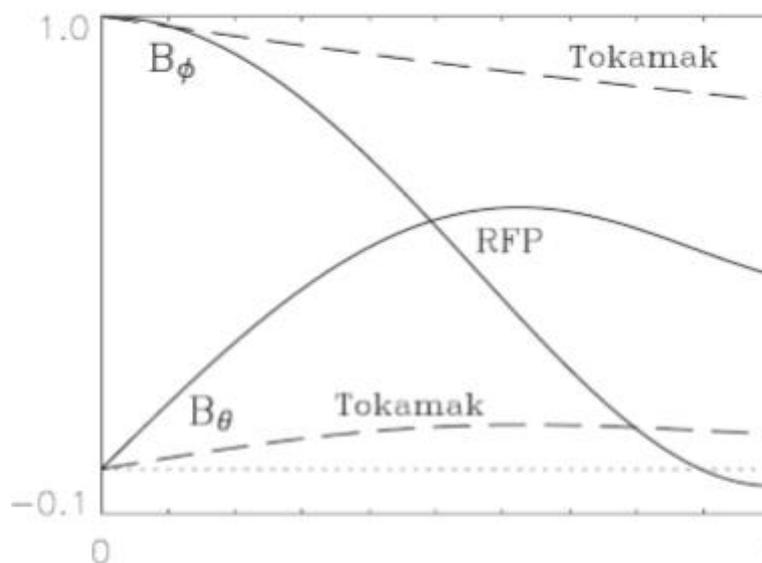


Fig. 1.6 Andamenti della componente di campo magnetico toroidale e poloidale in una macchina RFP e in un tokamak. I valori sono normalizzati rispetto al valore del campo nel centro ( $r/a = 0$ )

Il campo toroidale spesso raggiunge valori molto elevati, per questo motivo spesso i magneti vengono realizzati con materiali superconduttori. Sulla base delle caratteristiche di campo magnetico riportate, si osserva che il fattore di sicurezza è una funzione monotona crescente di  $r$ , che presenta un minimo prossimo all'unità quando  $r = 0$  (Figura 1.7).

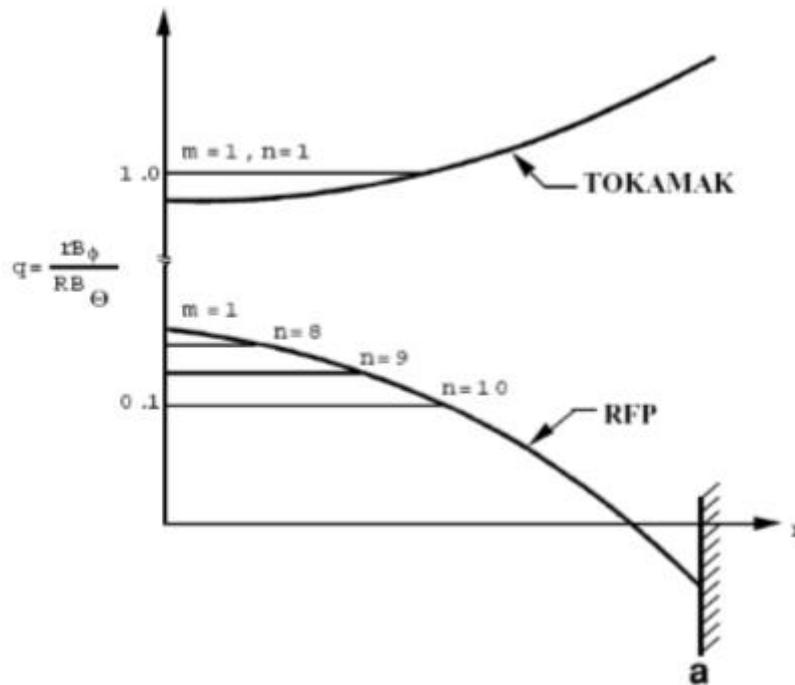


Fig. 1.7: Andamenti del safety factor  $q$  in un tokamak e nella macchina RFX-mod

Tradizionalmente per scaldare il plasma si ricorre al metodo del riscaldamento ohmico; tuttavia questo si scontra con la condizione fondamentale di stabilità  $q > 1$ , che si traduce nella condizione che il campo magnetico toroidale sia molto grande rispetto alla corrente di plasma, ovvero che sia soddisfatta la condizione:

$$\mu_0 I_\phi < B_x \frac{2\pi a^2}{R} \quad (1.14)$$

Questa è una condizione molto stringente sulle possibilità di riscaldamento ohmico ed è quindi necessario utilizzare dei riscaldamenti addizionali quali radiofrequenze prodotte da antenne e neutral beams.

Una soluzione parziale notando che la condizione sulla corrente dipende da  $a/R$ , consiste nel ridurre il più possibile il rapporto di aspetto  $R/a$  utilizzando i cosiddetti tokamak sferici.

### 1.4.2 La configurazione RFP

Il RFP (acronimo di “reversed field pinch”, cioè “Strizione a campo rovesciato”) è un’altra configurazione per il confinamento magnetico toroidale [1]. Analogamente a quanto succede in un tokamak, il campo magnetico risultante è ottenuto dalla sovrapposizione di un campo toroidale, generato da avvolgimenti esterni, e un campo poloidale, prodotto dalla corrente toroidale indotta nel plasma. Il RFP è uno stato di minima energia per il plasma. È possibile dimostrare che un plasma confinato magneticamente, sotto opportune condizioni, si pone spontaneamente verso una configurazione con campo rovesciato al bordo come evidenziato da Taylor nelle equazioni della MHD debolmente resistiva. Questo stato è caratterizzato da una configurazione di campo dove la pressione è nulla,  $p = 0$ ; questo implica che  $\nabla p = 0$  e che pertanto ci troviamo di fronte a una situazione di tipo force-free, nel quale cioè la corrente  $\mathbf{j}$  è ovunque parallela al campo  $\mathbf{B}$  e, quindi, la forza di Lorentz  $\mathbf{j} \times \mathbf{B}$  è nulla. Inoltre, il plasma possiede una resistività non nulla, ed è racchiuso da una scocca perfettamente conduttrice.

La caratteristica peculiare degli RFP è quella di invertire la componente toroidale del campo magnetico nella zona esterna del plasma, questo effetto è conseguenza della condizione di minima energia a cui la configurazione si porta spontaneamente. Il vantaggio tecnologico dell’RFP rispetto al Tokamak è che, a parità di corrente di plasma, i campi magnetici sono relativamente bassi; a differenza dei Tokamak, non serve che  $\mathbf{B}_{tor}$  sia molto maggiore di  $\mathbf{B}_\theta$ ; perciò c’è la possibilità di lavorare ad alte correnti, questo permette di non utilizzare riscaldamenti addizionali, e inoltre il campo alla parete è essenzialmente poloidale e di intensità non necessariamente elevata.

Abbiamo già detto che le macchine con configurazione tipo RFP hanno struttura assai simile a quella dei Tokamak. Però il fatto che nell’RFP i campi toroidale e poloidale siano pressoché uguali in valore assoluto comporta altre conseguenze. I risultati ottenuti dalle macchine RFP, in termini di confinamento, sono inferiori a quelli ottenuti nelle macchine di tipo Tokamak; si deve peraltro tener conto del fatto che nel Tokamak un grande dispendio di energia magnetica va a mantenere un campo toroidale  $\mathbf{B}_{tor}$  molto grande.

### 1.4.3 L'effetto dinamo

Una fondamentale caratteristica del confinamento dei plasmi dell'RFP è il fatto che la configurazione venga mantenuta per tempi molto più lunghi di quelli che ci si aspetterebbe considerando una diffusione classica del campo magnetico all'interno di un conduttore caratterizzato da una resistività elettrica finita.

Il plasma è caratterizzato da una resistività dovuta alle collisioni tra ioni e elettroni; la resistività (Spitzer) è definita più specificatamente dalla formula:

$$\eta = \frac{\sqrt{2m}Ze^2 \ln \Lambda}{12\pi^{3/2}\varepsilon_0^2 T_e^{3/2}} \quad (1.15)$$

Dove  $\ln \Lambda$  è una quantità chiamata logaritmo di Coulomb, pressoché indipendente dai parametri di plasma che vale circa 20. Alle temperature elettroniche normalmente raggiunte in plasmi RFP,  $\eta = 10^{-8}[\Omega m]$ , valore simile a quello della resistività del rame a temperature ambiente.

Si può ora ottenere una legge dell'evoluzione temporale delle linee di campo magnetico di tipo diffusivo:

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \frac{\eta}{\mu_0} \nabla^2 \mathbf{B} = D_{\perp} \nabla^2 \mathbf{B} \quad (1.16)$$

La diffusione della componente poloidale può essere contrastata con metodi induttivi, attraverso l'uso delle bobine magnetizzanti; continuando infatti a far variare il flusso magnetico concatenato al plasma, è possibile sostenere una densità di corrente  $\mathbf{J}_{\phi}$  in direzione toroidale, la quale può rigenerare, tramite l'equazione di Maxwell  $\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J}$ , la parte di fusso poloidale perso per diffusione. Non è però possibile fare lo stesso per quanto riguarda la componente toroidale di  $\mathbf{B}$ .

L'evidenza sperimentale di questo mantenimento della configurazione per tempi superiori a quelli della diffusione resistiva implica la presenza di un meccanismo interno spontaneo di rigenerazione del flusso toroidale perso. Questo meccanismo è chiamato dinamo, in analogia con simili fenomeni di generazione di campo magnetico che si incontrano studiando plasmi astro- e geo-fisici.

Nella configurazione RFP il meccanismo di dinamo è responsabile della generazione di un campo elettrico omonimo  $\mathbf{E}_D$ , che si somma al campo  $\mathbf{E}_i$  indotto dall'esterno nel generare la densità di corrente  $\mathbf{j}$ , che si può scrivere come:

$$\mathbf{E}_D + \mathbf{E}_i = \eta \mathbf{j}$$

Il modello sulle modalità fisiche di funzionamento dei processi di dinamo che sembra aver più riscontro sperimentale è quello MHD, dove la generazione del campo aggiuntivo è da imputarsi alla presenza di fluttuazioni della velocità e del campo magnetico nel plasma.

Introducendo nell'equazione  $\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B} = \eta \mathbf{j}$ , le quantità come somma di un termine medio imperturbato (con pedice 0) e di un termine rappresentante la perturbazione (contrassegnato dalla tilde), otteniamo, mediando nel tempo entrambi i membri dell'equazione e prendendone la componente parallela al campo magnetico di equilibrio,

$$E_{\parallel 0} + \langle \tilde{\mathbf{v}} \times \tilde{\mathbf{B}} \rangle = \eta j_{\parallel 0}$$

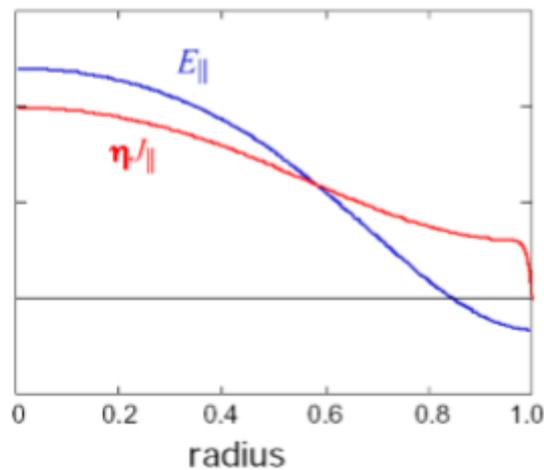


Fig. 1.8: Andamento in funzione del raggio normalizzato

Il termine non lineare  $\langle \tilde{\mathbf{v}} \times \tilde{\mathbf{B}} \rangle$ , unico effetto della perturbazione sopravvissuto in seguito alla media temporale, è il responsabile della generazione del campo di dinamo. Avremo quindi un campo elettrico  $\mathbf{E}_D = \langle \tilde{\mathbf{v}} \times \tilde{\mathbf{B}} \rangle$  come risultato dell'interazione non lineare di grandezze perturbate dall'instabilità (Figura 1.8).

#### 1.4.4. Sintesi caratteristiche del RFP

Gli aspetti principali, che caratterizzano questo tipo di configurazione, sono quindi:

- il campo magnetico poloidale e toroidale sono dello stesso ordine di grandezza (figura 1.6)
- il campo magnetico toroidale si annulla e diventa leggermente negativo nell'estremità della Macchina (fig. 1.9). Questo determina una diminuzione del *safety factor* che, partendo da valori di circa  $q_0 \approx a/2R$  nel centro, si riduce a circa  $q(a) = -q_0/3$  sul bordo-plasma
- l'inversione di campo toroidale è determinata da una cospicua generazione di campo positivo nel nucleo del plasma, dovuto alla nascita di correnti poloidali e da una conseguente debole produzione di campo toroidale da parte degli avvolgimenti esterni per la conservazione del flusso. Affinché queste correnti poloidali possano permanere, devono essere indotte delle forze elettromotrici di tipo mozionale nella direzione poloidale ( $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ ), legate quindi ad un flusso di plasma.

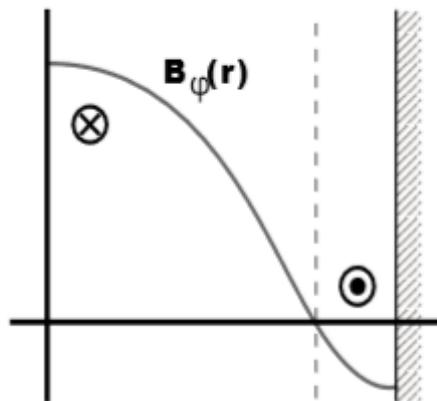


Fig. 1.9: Configurazione di campo magnetico toroidale lungo la direzione radiale di una sezione del toro in una macchina di tipo RFP

Una condizione di confinamento come quella descritta, può risultare molto interessante sotto diversi punti di vista:

- la maggior parte del campo magnetico necessario al confinamento è prodotto dalle correnti all'interno del plasma, mentre gli avvolgimenti esterni devono produrre solamente una porzione limitata di campo, quindi la loro realizzazione non è problematica da un punto di vista tecnologico (si può evitare di ricorrere a sistemi superconduttori)

- teoricamente possono essere raggiunti valori del parametro  $\beta$  molto elevati, riducendo in questo modo il valore del campo magnetico necessario al confinamento
- la corrente nel plasma segue una traiettoria elicoidale, incrementando la dissipazione di potenza per effetto Joule rispetto ad un tokamak. A parità di valore di campo magnetico centrale, si ha una corrente di circa un ordine di grandezza superiore rispetto a quella ottenibile in un tokamak, consentendo da un punto di vista teorico il raggiungimento della temperatura di ignizione senza altri sistemi di riscaldamento;
- la macchina RFP è compatta (elevata densità di potenza producibile)

Le macchine RFP sono quindi semplici, compatte e poco costose.

La configurazione RFP può essere studiata in modo intuitivo considerando una geometria cilindrica, in cui è presente un campo toroidale generato da una corrente esterna poloidale  $I_{ext}$  (Figura 1.10).

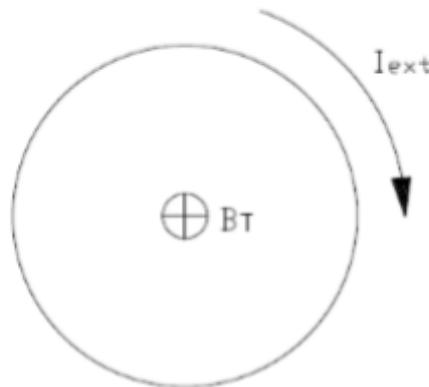


Fig. 1.10: Caratteristiche iniziali di un sistema RFP in coordinate cilindriche in equilibrio instabile

Questa condizione rappresenta un equilibrio instabile, che può essere perturbato dalla nascita di una corrente poloidale  $I_{\theta}$  concorde con  $I_{ext}$ , capace di aumentare il valore del campo nel nucleo del sistema (Figura 1.11). La conservazione del flusso magnetico totale, impone una diminuzione del campo magnetico ai bordi del sistema, dovuta all'aumento del campo nella parte centrale della geometria considerata. La corrente  $I_{\theta}$  viene attratta dalla corrente  $I_{ext}$  (sono concordi), determinando un ulteriore aumento del campo magnetico al centro e parallelamente una diminuzione nei bordi. Sotto opportune condizioni, il campo esterno e la corrente  $I_{ext}$  possono annullarsi e diventare negativi; questo comporta la nascita di una condizione di equilibrio stabile per il sistema (Figura 1.12). L'aumento di  $B_{\phi}$  al centro è possibile solo con un eccesso di corrente  $j_D = j_{\parallel}$  nella regione dove  $B_{\phi}$  si annulla. Questo

eccesso di corrente è possibile solo con la presenza di un campo elettrico addizionale che nasce, come abbiamo visto, dalla combinazione coerente di velocità e campo magnetico.

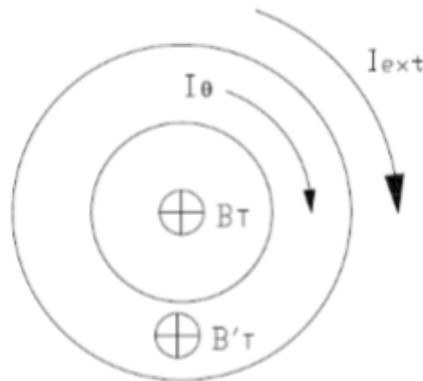


Fig. 1.11: Perturbazione dell'equilibrio del sistema

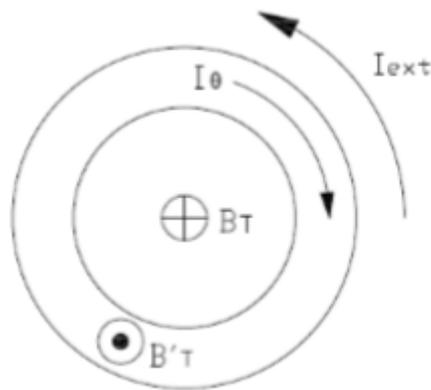


Fig. 1.12: Raggiungimento della condizione di equilibrio stabile nel sistema

Nell'impulso RFP, dunque, quando la corrente di plasma sta raggiungendo la condizione di equilibrio stazionario, sopraggiunge la necessità di agire sull'alimentazione esterna per mantenere la configurazione stabile per tutta la durata dell'impulso. Questo avviene sostenendo l'inversione spontanea del campo magnetico, attraverso l'inversione del verso della corrente nelle bobine, e contrastando, così, la diffusione resistiva.



# CAPITOLO 2

## Da RFX a RFX-mod

### 2.1 Cenni storici

In un gas, il flusso unidirezionale di corrente produce un flusso azimutale di campo magnetico che tende a stringere (pinch) la corrente stessa. W. H. Bennet, per primo ideò la teoria della strizione sulla corrente in un gas nel 1934. Nel 1937 L. Tonks riprese gli studi di Bennet e propose il termine “pinch effect” nel senso in cui lo intendiamo oggi.

Cousins e Ware, in Gran Bretagna, usarono l’effetto pinch nel 1951 per il confinamento del plasma dentro ad un piccolo toro. Osservarono che la colonna di plasma era altamente instabile e che si degradava velocemente per via delle instabilità magnetoidrodinamiche (MHD).

Ad Harwell nella metà degli anni ’60 fu osservato il primo esempio di configurazione RFP operante: l’esperimento Zeta. Nel 1958 infatti si verificò il primo periodo di quiete nel plasma, ma solo successivamente venne osservato che il campo magnetico in prossimità della parete interna era invertito.

Gli studi presso l’università di Padova sul confinamento dei plasmi iniziarono nel 1958-59 presso il dipartimento di Ingegneria Elettrica in collaborazione con il dipartimento di Fisica. Il primo plasma venne creato su una macchina lineare con tubi in quarzo tramite due elettrodi (Z-Pinch) o scariche indotte anulari (Theta-Pinch).

### 2.2 Caratteristiche della macchina RFX

I risultati dell’esperimento Zeta e le teorie formulate negli anni ’70 però alimentarono l’idea di costruire una grande macchina RFP capace di replicare e approfondire i risultati ottenuti.

Il progetto, approvato nel gennaio del 1984, è stato realizzato dal Consorzio RFX, ancora oggi protagonista di un’intensa attività di ricerca sperimentale nell’ambito della fusione nucleare.

La costruzione dell’impianto RFX fu completata nel 1991 e il primo plasma venne prodotto nel 1992. Si tratta di una macchina toroidale con raggio maggiore di 2 m e raggio minore di 0,5 m realizzata a Padova dall’Associazione EURATOM-ENEA-CNR sulla fusione.

Gli obiettivi scientifici legati alla costruzione di questa macchina sono i seguenti:

- Ampliare la ricerca sulla tecnologia, portando l'esperienza a correnti sempre più elevate, in modo da studiare le proprietà di confinamento RFP in condizioni molto vicine a quelle di un reattore effettivo. Questo per confrontare i risultati ottenuti con quelli generati dai tokamak e dai gradi stellarator
- Studiare la temperatura, beta e il tempo di confinamento con un raggio minore e in un range ampio di corrente. Tale studio viene fatto per testare se la configurazione RFP generi un confinamento sufficiente ad alta temperatura, alto beta e alta potenza necessaria per il riscaldamento ohmico con il fine di estrapolare i parametri per la costruzione di un reattore.
- Per studiare ulteriori mezzi volti ad ampliare la vita del plasma e ad un miglior modo per controllarlo nella configurazione RFP
- Per misurare e confrontare con i dati teorici i parametri di temperatura, tempo di confinamento e beta

## 2.3 Modifiche nella macchina RFX-mod

RFX-mod è la versione aggiornata e migliorata di RFX, rimasta attiva fino alla sospensione dell'attività di ricerca nel 1999.

Nel periodo 2001-2004 infatti, RFX è stato modificato (RFX-mod) per introdurre il sistema di controllo attivo (feedback) sui tempi superiori ai 50 ms caratteristici della scocca. Questo sistema, installato finora solo su RFX e sul piccolo RFP svedese EXTRAP T2R, è di rilevanza per i Tokamak, e sarà fondamentale anche per ITER: infatti, ITER avrà bisogno di un sistema di controllo attivo per garantire la stabilità magnetoidrodinamica del plasma sui tempi lunghi (quasi un'ora!) previsti per le scariche di ITER.

Nella fotografia in Figura 2.1 è raffigurata la macchina alimentata da una sottostazione dedicata. I campi magnetici sono prodotti dalle correnti di apposite bobine, alimentate da gruppi di conversione statica a SCR. Sono presenti inoltre numerosi strumenti diagnostici che permettono di studiare le caratteristiche di funzionamento della macchina e del plasma. e numerose e importanti modifiche apportate in RFX-mod nei confronti di RFX riguardano il livello strutturale, il livello di acquisizione e quello di controllo, oltre alla progettazione e messa in opera di un nuovo sistema di alimentazione toroidale.

La struttura meccanica di RFX-mod e la sua vista in sezione sono rappresentate in Figura 2.2.

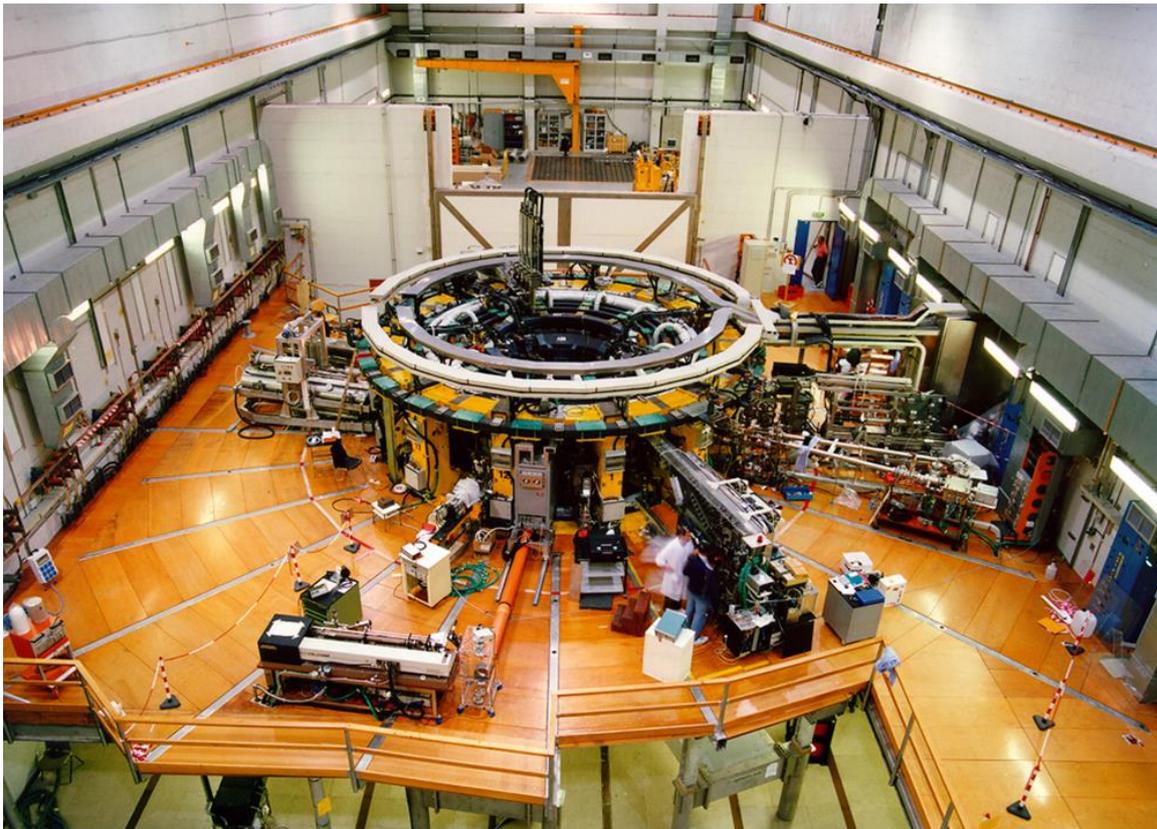


Fig. 2.1: Foto della macchina RFX-mod

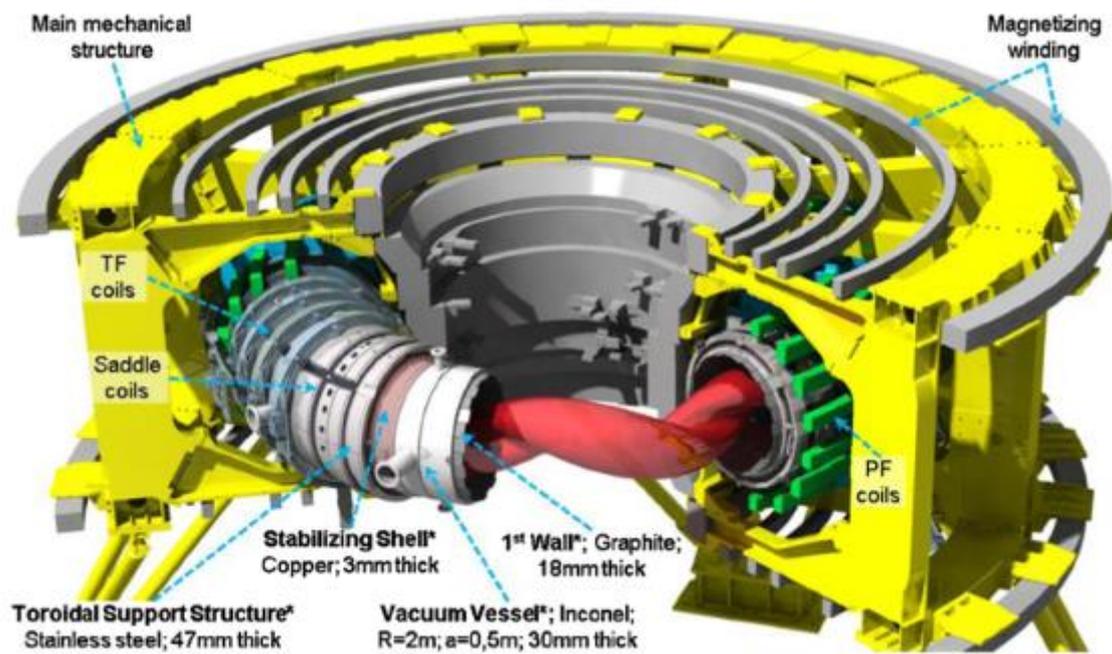


Fig. 2.2: Rappresentazione tridimensionale delle parti attive e passive di RFX-mod



# CAPITOLO 3

## Il sistema di power-supply in RFX

### 3.1 Introduzione

Il RFX sistema di alimentazione consente la formazione di plasmi toroidali in configurazione RFP alimentando gli avvolgimenti della macchina con forme d'onda di tensione e corrente adeguate. Per la costituzione e il supporto della configurazione RFP, i dispositivi di alimentazione e il funzionamento del sistema di power supply hanno una parziale analogia con quelle di un grande tokamak: iniziale accumulo di energia magnetica e successiva scarica per la ionizzazione del gas e la nascita del plasma, l'uso di convertitori statici AC-DC per la premagnetizzazione, il sostegno del plasma e il controllo di posizione. Alcuni aspetti peculiari sono legati alla necessità di una rapida variazione della corrente nel campo toroidale, avvolgimento pilotato da un grande banco di condensatori, e per il controllo accurato della componente poloidale del campo magnetico all'interno del plasma.

La variazione di flusso magnetizzante disponibile in RFX è 15 Vs e con il loop voltage toroidale ci si aspetta una durata della corrente di plasma di 250 ms: la durata di impulso è più corta rispetto alla tipica scarica tokamak principalmente a causa della maggiore loop voltage toroidale della configurazione RFP rispetto al tokamak. Per il sostentamento del plasma e per ridurre le perdite viene richiesto un rapido aumento della corrente di plasma, e un'alta tensione (HV), pertanto, serve un elevato picco di potenza elettrica erogata dagli alimentatori [2].

Il sistema di accumulo magnetico ed elettrostatico e l'alimentazione diretta dalla rete HVAC Italiana sono stati utilizzati per soddisfare i requisiti precedenti.

La complessità di tutto il sistema di power supply, in cui molti dispositivi sono integrati per un funzionamento coordinato, ha anche richiesto un impegno particolare nel design. È stata effettuata un'attenta analisi dei possibili guasti e delle relative azioni di protezione. Le disposizioni sono state fatte per evitare problemi durante il regime operativo degli esperimenti, tenendo anche conto delle interferenze elettromagnetiche, particolarmente elevate durante gli impulsi. Inoltre, è stato raggiunto un elevato livello di flessibilità e modularità nell'impianto adottando una soluzione il più possibile modulare nella progettazione dei componenti principali.

Nelle macchine RFP la formazione della corrente di plasma è essenzialmente simile a quella in tokamak. Dopo che un primo circuito (toroidale) ha creato una polarizzazione del campo toroidale nel gas del vessel, un secondo circuito (poloidale) fornisce una variazione del flusso magnetico concatenato con il vessel variando la corrente dell'avvolgimento di magnetizzazione (o riscaldamento ohmico). Questa variazione di flusso dà luogo alla corrente di plasma, a condizione che il loop voltage toroidale ad esso associato sia sufficientemente elevata per produrre un efficace di ionizzazione del gas. Un ulteriore avvolgimento (*field shaping*), fortemente accoppiato al plasma, svolge diverse funzioni, come fornire una polarizzazione del campo magnetico verticale durante la fase di ionizzazione per controllare la posizione del plasma durante l'impulso. Tutto questo per mezzo di una distribuzione adeguata di corrente tra le diverse bobine.

La differenza principale rispetto a tokamak è il valore più elevato del *loop voltage* necessario per la ionizzazione, a causa del valore inferiore (di circa un ordine di grandezza) di campo toroidale, che caratterizza le macchine RFP. Di conseguenza la tensione di progetto del circuito poloidale è dell'ordine di alcune decine di kilovolt, molto più elevata di quello di un tokamak.

Il confinamento del plasma, invece, è molto diverso da quello di un tokamak, a causa dell'inversione di campo toroidale sulla superficie del plasma, il che significa a sua volta un'inversione della corrente nell'avvolgimento toroidale. Questa inversione è indotta dal plasma stesso e deve essere consentita o, in alcuni casi, favorita dal campo toroidale del circuito esterno. Quindi la presenza nel circuito toroidale di un elemento in grado di eseguire l'inversione della corrente di avvolgimento (come un banco di condensatori) è una caratteristica tipica della alimentazione di potenza di una macchina RFP. La figura Fig. 3.1 mostra le forme d'onda tipiche della corrente di plasma  $I_p$  e di  $B_{TW}$  che sono state considerate come il punto di partenza per il design. L'impulso di plasma può essere suddiviso in due fasi distinte: nella prima (start-up)  $I_p$  è formata e  $B_{TW}$  cambia la sua polarità; nella seconda (flat top)  $I_p$  e  $B_{TW}$  sono controllati così come la posizione del plasma.

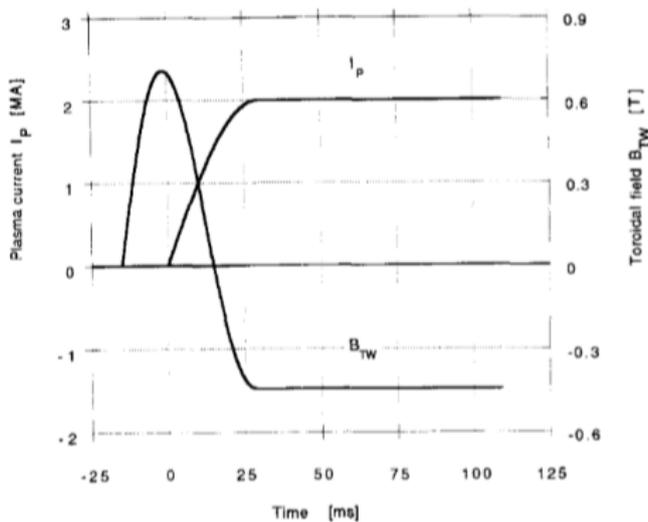


Fig. 3.1: forme d'onda tipiche della corrente di plasma  $I_p$  e di  $B_{TW}$

Per quanto riguarda RFX, serve un valore massimo per il loop voltage di 700 V, con start-up compreso tra 5 e 50 ms e *flat-top phase* superiore a 250 ms. La risultante tensione di progetto per il circuito poloidal è di 35 kV, anche se l'avvolgimento di magnetizzazione è stato suddiviso in quattro parti per ridurre la tensione a massa dei terminali degli avvolgimenti.

Nel circuito toroidale il banco di condensatori deve creare  $B_{T0}$  e rovesciare completamente la corrente di avvolgimento prima della fine della start-up. La tensione di progetto è stata limitata a 7 kV a causa della sollecitazione massima che può essere applicata all'avvolgimento.

## 3.2 Il circuito per il campo toroidale

### 3.2.1 Funzionalità

le seguenti funzioni devono essere fornite dal circuito di potenza del campo toroidale TFC:

- per creare il primo campo toroidale e per aiutare la sua inversione al confine di plasma durante la fase di salita della corrente di plasma;
- Per controllare il valore del campo invertito durante la fase di flat-top.

Come già detto è richiesto un campo di polarizzazione massimo di 0,7 T che fornisce una corrente massima di avvolgimento di circa 18 kA per questo tipo di operazione. Il massimo di energia che viene trasferita nella fase di polarizzazione dai condensatori all'induttore toroidale è dell'ordine di 3 MJ.

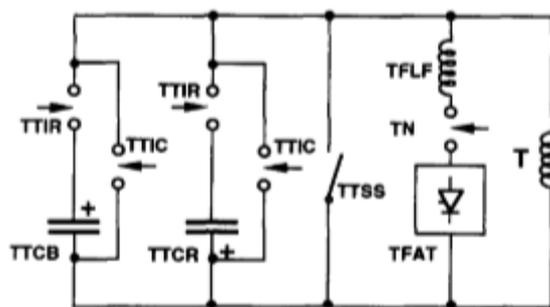


Fig. 3.2: Schema circuitale del circuito toroidale

La configurazione elettrica del circuito è mostrata in Fig. 3.2. Il banco di condensatori TTCB viene scaricato sull'avvolgimento toroidale, producendo un campo toroidale oscillante. Quando il campo è circa al suo valore massimo la corrente del plasma è costretta a salire; allo stesso tempo  $B_{TW}$  diminuisce e diventa negativo, come richiesto per impostare la configurazione RFP. La forma d'onda della corrente nell'avvolgimento segue questo modello, anche come conseguenza della caratteristica

di oscillazione del circuito. In aggiunta, ulteriori banchi di condensatori, caricati a differenti tensioni, possono essere scaricati durante la fase di inversione, questo per modificare la forma d'onda della corrente come richiesto.

Durante la fase di flat-top fase,  $B_{TW}$  è controllato direttamente dal convertitore TFAT, che fornisce la corrente corrispondente al valore desiderato del campo negativo.

### 3.2.2 RFX-mod

I sistemi di potenza sono stati ricostruiti e sono stati sottoposti a una revisione del progetto, volta a migliorare la funzionalità, affidabilità e livello di sicurezza rispetto a possibili anomalie. Questa revisione ha incluso la sostituzione di tutti i moduli di commutazione veloce mediante il rimpiazzo degli *ignitrons* con dispositivi a tiristori [3].

La modifica del circuito toroidale parte da un design completamente nuovo, elaborato con lo scopo di migliorare la sicurezza e di estendere la flessibilità di esercizio rispetto al circuito precedente; questo obiettivo è stato perseguito dalla definizione di una nuova struttura circuitale, basata su un ampio utilizzo di dispositivi allo stato solido, una forte limitazione di banchi di condensatori e la rimozione degli *ignitrons*. La realizzazione di questo nuovo circuito è stata possibile grazie all'uso di semiconduttori di potenza disponibili solo più recentemente nel mercato (IGCT principalmente). Il sistema è composto da due parti uguali; lo schema di una di esse è mostrato in Fig. 3.2

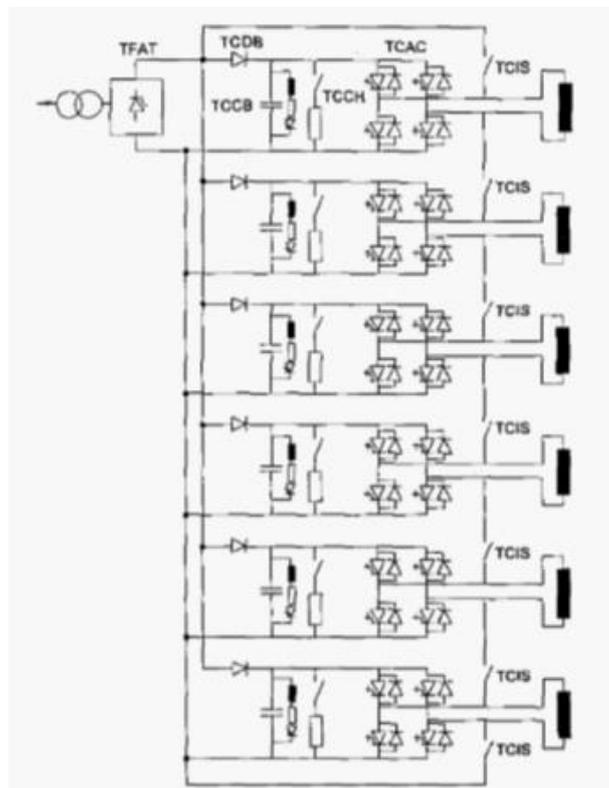


Fig. 3.3: Schema circuitale del circuito toroidale dopo la modifica

I convertitori AC-DC sono composti di 20 unità, dodici di essi progettate per una corrente nominale e una tensione massima di 12,5 kA e 1,35 kV a pieno carico e otto il valore nominale per la stessa tensione e metà corrente. Il contratto di modifica include la ricostruzione della componente di potenza, basata su ponti a tiristori e cabine di controllo, mentre i trasformatori di potenza non sono stati modificati. Il design della sezione di alimentazione non è stato modificato, mentre la sezione di controllo è stata completamente riprogettata sulla base delle tecnologie moderne. Il nuovo sistema di controllo del convertitore ha una struttura digitale con un'interfaccia uomo-macchina migliorata, che consente elevata flessibilità nella modifica dei parametri del sistema e la riduzione del tempo di configurazione del convertitore e di controllo del funzionamento del sistema. Il sistema di trasmissione di segnali analogici è basato su un nuovo collegamento a fibre ottiche con ottime prestazioni in termini di precisione e basso offset.

### 3.3 Il circuito per il campo poloidale

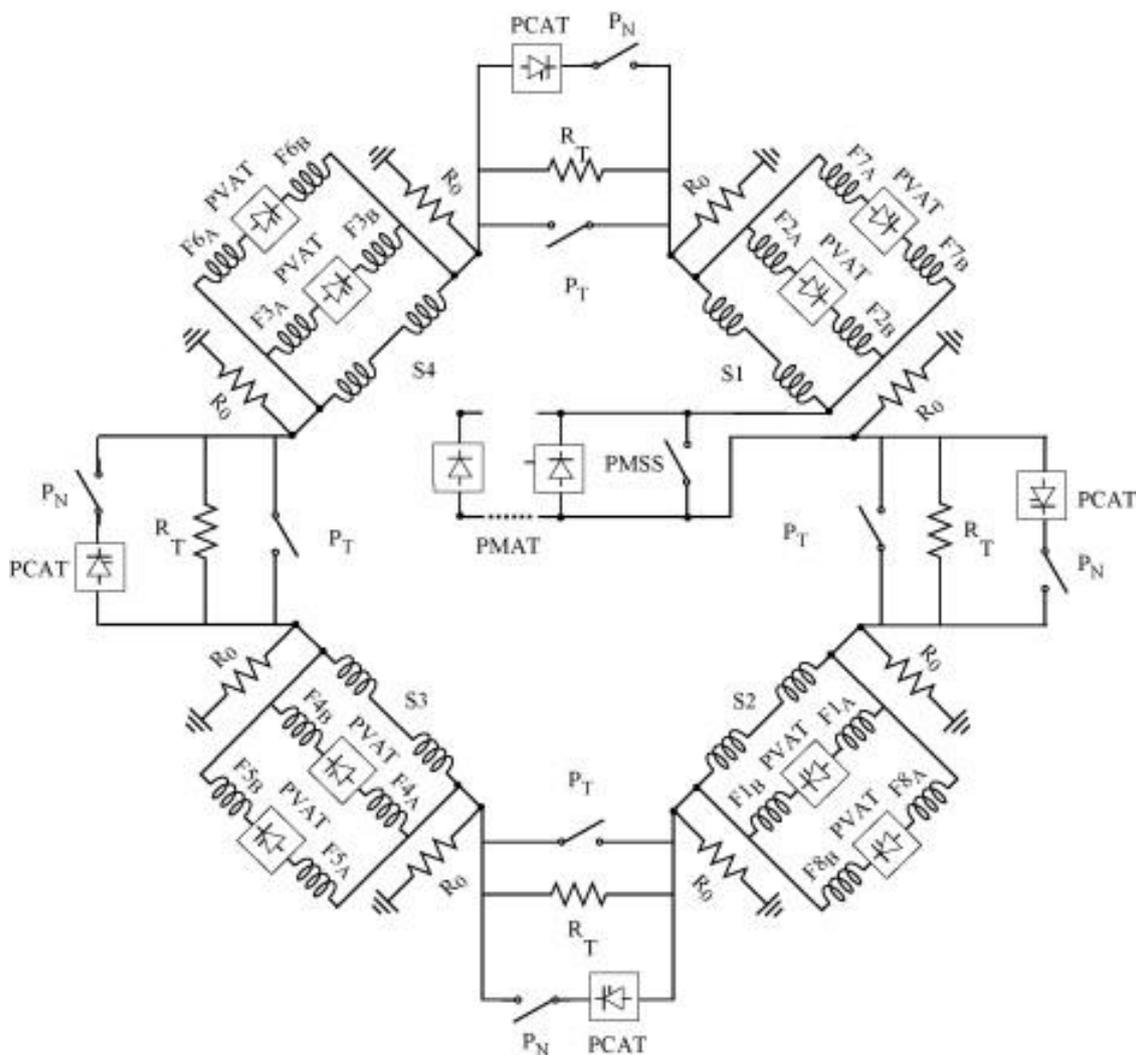


Fig. 3.4: Schema circuitale del circuito poloidale

Il sistema magnetico poloidale di RFX, visibile in figura 3.4 include le bobine (F1-F8) di Field Shaping, le bobine magnetizzanti (M1-M20) e due strutture conduttive principali passive assial-simmetriche attorno al plasma (il vacuum vessel e lo scudo che lo circonda, entrambi circolari e quasi concentrici).

Le bobine attive sono alimentate dal circuito poloidale che è così composto:

- 4 × PMAT, convertitori AC-DC a tiristori che generano il flusso magnetico iniziale negli avvolgimenti magnetizzanti, raggruppati nei quattro settori S1-S4.
- 4 × PCAT, convertitori AC-DC a tiristori che generano il loop voltage per sostenere il plasma nella sua fase di flat-top.
- 8 × PVAT, convertitori AC-DC a tiristori che alimentano le otto bobine F. Queste bobine producono il campo verticale e compensano le amperspire del plasma.
- 4 × unità PT per il trasferimento dell'energia. Esse producono il loop voltage iniziale per lo start-up del plasma e ne innescano la corrente.
- 4 × switch PN per l'inserzione dei convertitori PCAT nel giusto instante.

### 3.3.1 Funzionalità

Come spiegato prima, diverse funzioni devono essere fornite dall'alimentazione del circuito per il campo poloidale PFC:

- produrre il flusso iniziale nell'avvolgimento magnetizzante;
- creare il *loop voltage* che ionizza il gas e la variazione di flusso che dà luogo alla corrente di plasma;
- controllare il valore della corrente di plasma durante la fase di *flat-top*;
- controllare la posizione del plasma ed evitare lo scompenso di campo poloidale tra parte interna ed esterna della struttura di contenimento, particolarmente nei giunti.

Una volta che il massimo per la limitazione della corrente magnetizzante nell'avvolgimento è stato posto a 50 kA, gli altri parametri vengono scelti al fine di garantire un flusso iniziale massimo di 15 Wb. L'energia immagazzinata nell'avvolgimento è di 72 MJ e il trasferimento al plasma di alcuni megajoule avviene durante la fase di set-up.

### 3.3.2 Funzionamento

Inizialmente il convertitore PMAT fornisce la corrente di carica per l'avvolgimento magnetizzante (fino a 50 kA). Quando la corrente ha raggiunto il valore desiderato, PMAT viene spento e l'interruttore PMSS viene chiuso. A seconda della corrente  $I_M$  raggiunta viene caricato il banco di

condensatori PTCB ( $C_{\text{tot}} = 306 \mu\text{F}$  e  $V_{\text{MAX}} = 40 \text{ kV}$ ) e all'istante  $t = 0 \text{ s}$  viene scaricato per generare lo zero in corrente necessario per aprire le unità PT. Quindi le quattro unità di trasferimento energetico PT vengono aperte e la corrente viene deviata dal PTSO ai resistori PTRB per mezzo di una rete di commutazione adeguata (in seguito verrà approfondita l'apertura degli interruttori in vuoto). Il banco di resistori PTRB è formato da resistenze campione ( $R = 0.467\Omega$ ) collegate in serie e in parallelo, modulabili grazie alla loro inserzione o meno tramite switch veloci. La corrente nell'avvolgimento magnetizzante decade quindi con una costante di tempo dipendente dai valori di PTRB così da ottenere il range per i valori di set-up desiderato.

La conseguente variazione di flusso produce la ionizzazione del gas che genera lo start-up della corrente di plasma. Nella seguente fase di *flat-top* la corrente di plasma viene controllata guidando il decadimento della corrente nell'avvolgimento magnetizzante, ottenuto agendo sulla tensione dei convertitori PCAT. Questi convertitori generano una corrente a rampa, in modo tale che la loro capacità di controllo viene meno quando si allontanano dal loro valore di corrente nominale. Nel frattempo, gli otto convertitori PVAT sono utilizzati per il controllo della corrente nelle coppie di bobine atte al *field-shaping*, in modo tale da produrre un campo verticale per modificare la posizione del plasma o per controllare gli errori di uniformità di campo negli interstizi della struttura.

### 3.3.3 RFX-mod

Il circuito per l'alimentazione del campo poloidale, usato per indurre e sostenere la corrente di plasma e per il controllo dell'equilibrio del plasma è stato ripristinato come in passato, senza aggiornamenti nelle specifiche. Infatti, le specifiche del circuito sono state giudicate sufficienti per gli esperimenti successivi. Le principali modifiche sono state introdotte per aumentare il livello di sicurezza: quelle più significative sono correlate al sistema di auto-spegnimento per il banco di condensatori e la sostituzione degli *ignitrons* con tiristori come per quanto riguarda in circuito toroidale. Inoltre, alte prestazioni, in particolare in termini di flessibilità e di monitoraggio del livello, sono state ottenute introducendo tecnologie digitali nelle sezioni di controllo.



# Capitolo 4

## Interruzione grandi correnti DC

### 4.1 Introduzione

In questo capitolo è presentato il principio di interruzione di corrente nei dispositivi di commutazione. L'interruzione è identificata con l'apertura e l'estinzione di un arco di commutazione. In primo luogo, viene fornita una descrizione qualitativa sull'interruzione della corrente in reti con diversi tipi di carichi, e vengono introdotti parametri e concetti per comprendere meglio il fenomeno. Nella seconda parte, è considerato più in dettaglio il fenomeno dell'apertura di HVDC (*High Voltage Direct Current*), facendo riferimento allo stato dell'arte degli esperimenti sulla fusione.

Un dispositivo di commutazione è composto da una o più coppie di contatti per ogni fase. In normali condizioni di servizio, questi sono in posizione di chiusura e la corrente passa attraverso il commutatore. Quando viene inviato il segnale per il comando di apertura al quadro di controllo, un suo meccanismo pilota i contatti in modo che possano iniziare a muoversi allontanandosi l'uno dall'altro. Come spiegato in precedenza, la corrente non viene interrotta al momento della separazione meccanica dei contatti, ma continua a fluire attraverso un arco elettrico che viene a crearsi nel gap tra contatti di apertura. L'arco elettrico è costituito da una miscela di elettroni, particelle neutre e ioni positivi e negativi. La temperatura dell'arco è molto alta a causa dell'energia dissipata dal flusso di corrente, il che lo rende un buon conduttore elettrico. Il compito fondamentale di un interruttore di potenza è il controllo delle perdite di energia durante la formazione di archi elettrici, così come di fornire le opportune misure per rendere l'arco instabile e cercare di interrompere la corrente in prossimità del suo passaggio per lo zero (AC) o quando la corrente diventa nulla artificialmente, di solito grazie ad una scarica di un banco di condensatori opportunamente calibrata (DC).

La caduta di tensione durante è approssimativamente costante e molto inferiore alla tensione nominale della rete di alimentazione. Come la corrente passa per lo zero o viene annullata, la potenza in ingresso all'arco diventa anch'essa zero e i portatori di cariche elettriche nell'arco cessano di circolare. Il principio di funzionamento di un dispositivo di commutazione è essenzialmente quello di sbarazzarsi dei portatori di carica tra i suoi contatti in modo così efficace che il gap diventa praticamente come un isolante appena la corrente raggiunge il suo passaggio per lo zero, quindi di estinguere l'arco e di

interrompere la corrente in questo istante. Nel caso di archi di commutazione in un mezzo gassoso, questo processo è associato con il raffreddamento dell'arco elettrico.

Dopo che l'arco è stato interrotto viene applicata una tensione sui contatti aperti dell'interruttore dipendente dalla tensione di rete. Questa è la cosiddetta sovratensione di ripristino e la sua ampiezza e pendenza determinano il generarsi o meno dell'arco dopo lo zero della corrente, e quindi l'effettivo successo o fallimento dell'interruzione.

Lo schema circuitale semplificato di una fase in cui un corto circuito si è verificato vicino all'interruttore è mostrato in Fig. 4.1. La figura 4.2 mostra la corrente attraverso l'interruttore e la caduta di tensione attraverso i contatti durante il processo di interruzione come descritto sopra.

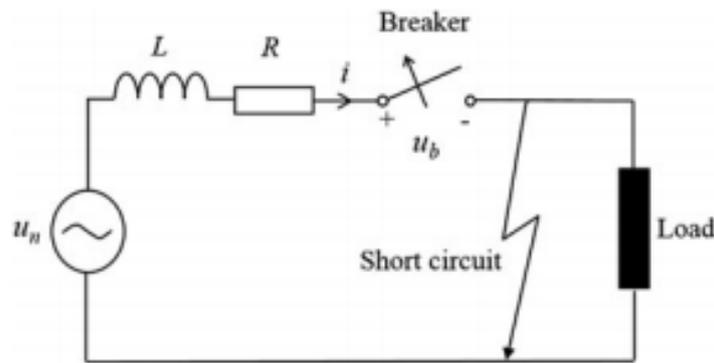


Fig. 4.1: Schema circuitale semplificato di una fase in corto circuito

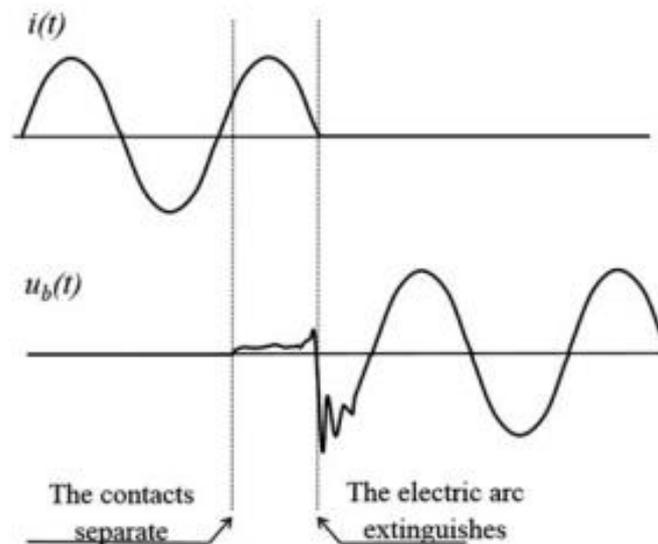


Fig. 4.2: Caratteristica corrente e tensione durante un'interruzione

I seguenti fattori giocano un ruolo importante per il successo o il fallimento di un tentativo di interruzione di corrente:

- la corrente d'arco: maggiore è l'ampiezza della corrente, tanto maggiore diventa la temperatura dell'arco e la densità dei portatori di carica elettrica generata nell'arco. Questo rende molto più difficile per i contatti diventare isolati dopo l'interruzione della corrente a zero. In aggiunta all'ampiezza della corrente, è di cruciale importanza il gradiente della corrente stessa ( $di/dt$ ) immediatamente successivo allo zero-corrente per la buona riuscita del processo di interruzione. Un più elevato  $di/dt$  significa che i contatti hanno meno tempo per cambiare dalla modalità in conduzione allo stato di isolamento prima che il gap sia sollecitato dal transitorio di sovratensione di ripristino.
- La durata dell'arco: poiché non vi è molto controllo sull'apertura e la chiusura meccanica della maggior parte dei dispositivi di commutazione, l'istante in cui i contatti del dispositivo di commutazione vengono separati è una variabile casuale. Se la separazione dei contatti avviene appena prima del passaggio per lo zero corrente, la corrente non verrà immediatamente interrotta ma continuerà a fluire fino al successivo passaggio per lo zero della corrente. La durata di un arco in AC quindi è tipicamente nel range di 0,5-1,5 volte il semi-periodo della forma d'onda della corrente interrotta.

In DC invece, essendo la scarica per il *counterpulse* programmata, l'apertura, o meglio, il trigger per la stessa, viene più facilmente calcolato e applicato.

Archi di durata maggiore comportano maggiore energia dissipata sull'interruttore, e l'interruzione della corrente stessa di solito diventa più difficile.

- Tensione d'Arco: la potenza di ingresso richiesta per alimentare un arco dipende dal mezzo in cui l'arco avviene. In questo modo si definisce la tensione dell'arco. La tensione dell'arco è dipendente dal design e dai materiali (compreso il mezzo in cui avviene l'interruzione) del dispositivo di commutazione stesso.
- Sovratensione di ripristino (TRV, *Transient Recovery Voltage*): dopo il passaggio per lo zero della corrente, in caso di successo di una interruzione, viene generata una tensione dalla rete sui terminali del dispositivo di commutazione come risultato dell'oscillazione di energia tra gli elementi della rete. Questa è la cosiddetta sovratensione di ripristino e di solito ha un transitorio iniziale. Questa tensione può accelerare i restanti portatori di carica elettrica presenti nel gap tra i contatti, aumentando la probabilità di ottenere altri portatori di carica generati dagli impatti ionizzanti e infine di condurre al breakdown il gap dell'interruttore e alla conseguente formazione di un nuovo arco. Così, il TRV è uno dei fattori chiave che

identificano un dispositivo di commutazione in grado di interrompere una corrente. In particolare, la rapidità della salita della sovratensione di ripristino (RRRV, *Rate of Rise of the Recovery Voltage*) è di grande importanza. La TRV e la corrente di corto circuito sono determinate tramite la rete in cui il dispositivo di commutazione è installato, e differiscono per diverse applicazioni di commutazione.

L'arco deve avere una elevata conduttanza elettrica, in modo tale che la corrente possa fluire attraverso di esso dal momento della separazione del contatto a corrente zero senza dissipare una quantità eccessiva di energia nella camera di interruzione. Dopo che la corrente passa per lo zero o viene annullata, la sua conduttanza deve annullarsi rapidamente, in modo tale che la corrente non passi attraverso l'arco determinando l'effettiva interruzione della corrente. La quantità totale di energia dissipata durante la formazione di un arco voltaico in un dispositivo di commutazione  $E_{loss}$  può essere espressa come segue:

$$E_{loss} = \int_{t_{sep}}^{t_{cz}} u_{arc} i_{arc} dt \quad (4.1)$$

dove  $t_{sep}$  è il momento della separazione del contatto e  $t_{cz}$  il passaggio per lo zero corrente.  $u_{arc}$  e  $i_{arc}$  sono la tensione e la corrente d'arco rispettivamente. Di conseguenza, i processi chiave per raggiungere il successo di un'interruzione di corrente sono legati al controllo dell'energia dissipata nella camera di interruzione durante la formazione di archi elettrici nonché spinti alla rapida diminuzione della conduttanza dell'arco da valori molto alti ad altri vicino allo zero, in corrispondenza del passaggio per lo zero-corrente. Si dice riaccensione o *re-strike* se un nuovo arco viene a formarsi dopo un passaggio per lo zero-corrente. Una riaccensione si verifica immediatamente dopo lo zero-corrente, mentre un *re-strike* è definito al verificarsi di almeno un quarto di un ciclo di più tardi (AC).

I *re-strikes* sono divisi in due categorie: termici e dielettrici.

La temperatura del canale in cui si verifica l'arco elettrico è alta quando la corrente passa per lo zero e quindi la conducibilità elettrica rimane diversa da zero. Quando la sovratensione di ripristino viene a generarsi, avviene una certa dissipazione di potenza nel canale d'arco. Se il raffreddamento è efficiente tuttavia la temperatura scende, riduce la conducibilità e la corrente va verso lo zero. Tuttavia, il raffreddamento potrebbe non essere sufficiente e la temperatura e la conduttività potrebbero quindi aumentare e un nuovo arco elettrico verrebbe a formarsi. Questo è causato da una instabilità termica dell'arco elettrico e viene appunto chiamato *re-strike*. La temperatura nel gap tra i contatti è strettamente correlata all'ampiezza della corrente che viene interrotta. I *re-strikes* termici si

verificano immediatamente (fino a pochi microsecondi) dopo lo zero-corrente ed sono fortemente dipendenti dalla sovratensione di ripristino della forma, soprattutto la sua derivata, durante questo breve periodo. Se un *re-strike* termico viene evitato, la tensione tra i contatti aumenta. Anche se non vi è praticamente nessuna conducibilità elettrica residua nel gap tra i contatti, questa area è sollecitata dielectricamente. Una ri-accensione si verificherà se la tensione di ripristino in qualsiasi momento supera la soglia di rigidità dielettrica del gap. Questo è indicato come un *re-strike* dielettrico.

La resistenza dielettrica aumenta con il tempo quando gli organi di contatto si allontanano. Tuttavia, come la rigidità dielettrica di un gas è inversamente proporzionale alla sua temperatura assoluta, la condizione del gas nell'intercapedine gioca un importante ruolo. Il gas può essere ancora caldo a causa dell'arco elettrico che è stato bruciato nell'intercapedine. Spesso si è riscontrato che la maggior parte dei *re-strikes* dielettrici verificano a pochi millisecondi dallo zero di corrente. Così, la possibilità di avere un *re-strike* dielettrico è influenzata dalla forma e dall'ampiezza della sovratensione di ripristino in questo periodo.

L'interruzione di una corrente alternata può quindi essere vista come un equilibrio tra la generazione del calore e il raffreddamento nel gap tra i contatti (rischio di *thermal re-strikes*) e, in un secondo momento, come un bilanciamento tra sovratensione di accumulo e rigidità dielettrica (rischio di *re-strikes* dielettrici).

## **4.2 Applicazioni in ambito fusionistico di unità per l'interruzione di grandi correnti DC**

I dispositivi sperimentali per la fusione richiedono sistemi speciali dedicati alla ionizzazione del gas e alla creazione della corrente di start-up nel plasma. Questi sistemi devono essere in grado di creare una tensione di diversi kilovolt in bobine che, accoppiate al toro, inducono una tensione indotta nel gas e ionizzandolo. L'approccio più comune consiste in una unità di interruzione, in grado di interrompere una corrente continua di diverse decine di kiloampere e deviarla su un resistore, dando così origine all'alta tensione necessaria nelle bobine (che è normalmente integrata per mezzo di convertitori statici AC/DC).

Un principio simile può essere usato per scaricare una bobina super conduttrice quando necessario. Quando avviene una condizione di *quench* in questo tipo di bobine, ovvero il surriscaldamento di una parte dell'avvolgimento magnetico che porta alla perdita della superconduttività: quando questo accade, la corrente circolante viene rapidamente dissipata e il magnete cessa di funzionare, è imperativo estrarre l'energia magnetica immagazzinata negli avvolgimenti magnetizzanti, al fine di evitare un eccessivo surriscaldamento che potrebbe portare a eventi distruttivi per le bobine e per altri

componenti della macchina. Questo può essere ottenuto mediante commutazione della corrente del circuito principale (mediante sistemi di interruzione in DC) in grandi banchi di resistori in cui l'energia viene dissipata.

Sia per l'ignizione del plasma che per la protezione della bobina, gli interruttori automatici (CB, *circuit breaker*) impiegati in questi sistemi possono far uso di tecnologie diverse: meccanica, vuoto, semiconduttore; nella maggior parte dei casi vi è una combinazione di essi. Tuttavia, la più grande sfida per questi sistemi è la necessità di interrompere elevate correnti DC (fino a 68kA nel caso di ITER), insieme alla capacità di resistere alla relativa sovratensione di ripristino molto elevata. Analogamente non è un aspetto trascurabile la dissipazione dell'energia sulle resistenze (che potrebbero raggiungere una temperatura di alcune centinaia di gradi °C).

I sistemi utilizzati per interrompere correnti DC negli esperimenti sulla fusione devono inoltre resistere ad un elevato  $I^2t$  prima dell'interruzione e sottoposti ad un elevato numero di operazioni (lunga durata). Poiché i prodotti industriali non soddisfano tutte queste esigenze allo stesso tempo, elementi speciali sono stati sviluppati, caso per caso; molto spesso anche una combinazione di diverse tecnologie è impiegata. La soluzione con CBs ad air-blast (fig 4.3) fornisce la necessaria tensione d'arco per interrompere la corrente; lo svantaggio è che l'arco ad alta tensione implica anche arco ad alta energia e, di conseguenza, una notevole erosione di contatto, il che non è accettabile per sistemi di commutazione azionati ad ogni impulso. Pertanto, una rete per raggiungere lo zero-corrente artificiale è stata aggiunta, questo per ridurre l'erosione dei contatti. Un'induttanza saturabile viene aggiunta in serie al CB, per estendere il periodo di tempo in cui la corrente è vicino a zero. In altri sistemi di protezione, quando la corrente del TFC è relativamente bassa (1,4 kA), sono usati ancora i CBs con air-blast. In questo caso, una rete per raggiungere lo zero-corrente artificiale non è necessaria.

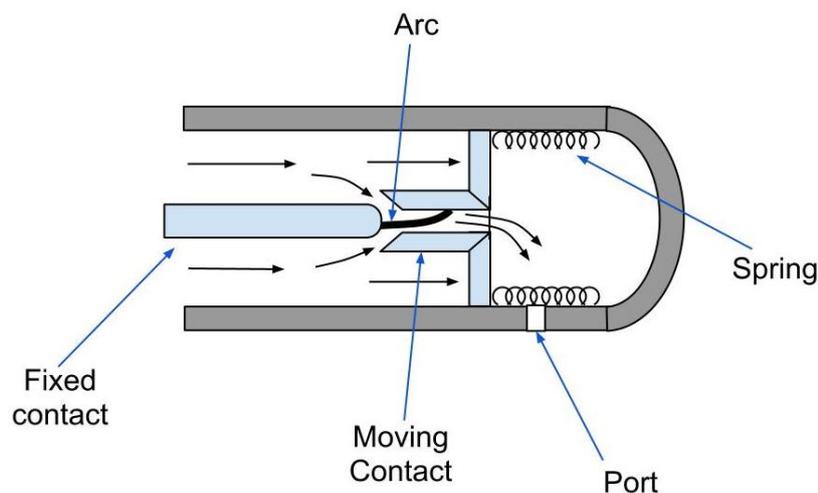


Fig. 4.3: Schema interruttore air-blast

Una soluzione basata su VCBs (Vacuum Circuit Breakers) può essere impiegata se l'esperimento è caratterizzato da un breve impulso di funzionamento e così  $I^2t$  è limitato (come nel caso di RFX ETS). Contrariamente agli air-blast CBs, qui la tensione di arco è piuttosto piccola (da 30 a 40V): questo è un vantaggio dal punto di vista dell'erosione di contatto, ma naturalmente l'interruzione può essere eseguita solo con l'aiuto di una rete per raggiungere lo zero-corrente artificiale. D'altro canto, quando il circuito di alimentazione è caratterizzato da elevata  $I^2t$ , i VCBs (con la loro rete per raggiungere lo zero-corrente) non sono sufficienti e si ha bisogno di un grande interruttore in parallelo (BPS), per trasportare una corrente nominale e commutare sui VCBs appena prima dell'interruzione. Questa soluzione è stata adottata per il progetto ITER. Un altro componente in grado di eseguire l'interruzione è un fusibile, grazie all'alta tensione generata quando viene azionato; tuttavia anche in questo caso un interruttore BPS in parallelo è necessario. La combinazione fusibile/interruttore BPS può essere impiegata anche come switch di back-up per QPSs (*Quench Protection System*), come nel caso della macchina EAST. Un'altra possibilità di implementare un ulteriore switch di back-up è per mezzo di un *pyrobreaker*, come quello sviluppato dalla RF DA per il progetto ITER FDUs; questo componente, essendo raffreddato ad acqua, è in grado di sopportare la corrente nominale e non necessita pertanto di un interruttore in parallelo.



Fig. 4.4: Siemens 3AH3 Vacuum Circuit-Breakers

Negli ultimi anni tuttavia l'uso di componenti allo stato solido è aumentata notevolmente per questo tipo di applicazioni. Quando i tiristori sono impiegati un circuito per il *counterpulse* è necessario per produrre lo zero della corrente nel tiristore. Se sono utilizzati IGBT/IGCTs (come nel KSTAR BRIS), questo circuito non è necessario, ma la relativamente bassa portata di questi dispositivi impone l'utilizzo di un grande numero di elementi, sia in serie che in parallelo. La tecnologia per il collegamento in serie è oggi ben nota grazie alle applicazioni per i sistemi in HVDC (*HighVoltage Direct Current*); al contrario, le strategie legate al collegamento in parallelo hanno ancora bisogno di essere migliorate. Va tuttavia sottolineato che gli studi effettuati negli esperimenti sulla fusione hanno dato una spinta verso la soluzione a questo problema, come dimostrato dalla KSTAR BRIS, il sistema di alimentazione RFX e di protezione di JT-60SA. Attualmente, la maggior parte delle applicazioni che impiegano dispositivi statici devono ancora fare uso di una componente meccanica BPS in parallelo, come nel progetto ITER. Tuttavia, lo stato dell'arte attuale riguardo a tali tecnologie sembra essere in una fase di evoluzione. I sistemi di interruzione stanno andando verso il pieno utilizzo delle componenti allo stato solido: soluzione di lunga durata, manutenzione ridotta e competitività economica ormai accertata; d'altra parte, le elevate perdite limitano il loro impiego in tutte quelle applicazioni operano a corrente nominale per un lungo periodo di tempo [4].

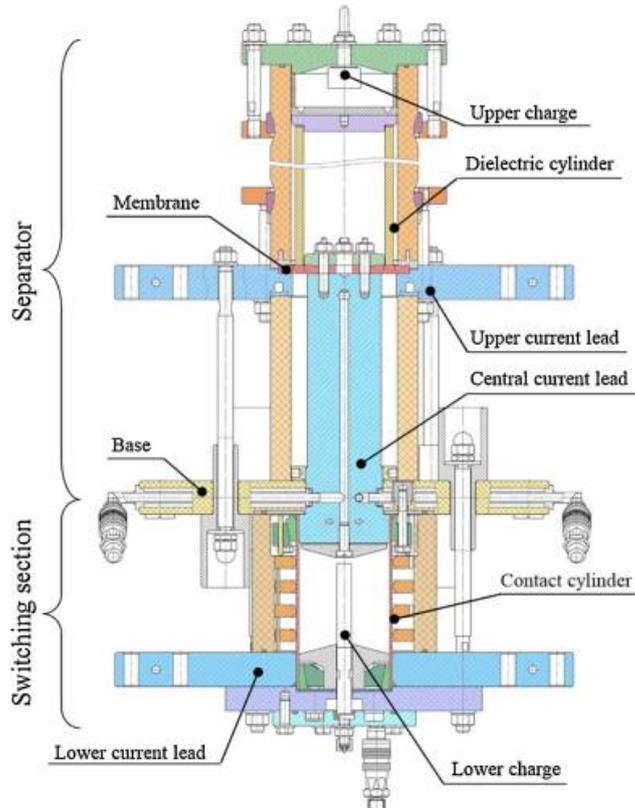


Fig. 4.4: Schema funzionamento pyrobreaker

## 4.3 Applicazioni nei principali esperimenti in ambito fusionistico

### 4.3.1 JET

Il *Joint European Torus* (JET) è uno dei maggiori esperimenti sulla fusione costruito fin ora, operante a Culham in UK dal 1983.

L'energia necessaria per alimentare le bobine del campo poloidale (PF) è accumulata tramite impulsi nel *Poloidal Flywheel Generator* (PFG) e trasferiti alle bobine di PF all'inizio dell'impulso (pre-fase di magnetizzazione). Quindi, le reti di commutazione del circuito per il riscaldamento ohmico (OH) estraggono l'energia immagazzinata nelle bobine PF, fornendo fino a 40 kV per la fase di rapida salita dell'impulso. Ciò è ottenuto grazie agli *air-blast* CBs, che interrompono la corrente (con l'aiuto di una rete per generare lo zero artificiale in corrente) e deviare nei resistori di commutazione. I dettagli le principali valutazioni delle reti di commutazione sono riportati nella Tabella I.

TABLE I. Main ratings of the JET switching networks.

Component	Parameter	Value
Switching networks	Rated current	80 kA
	Rated voltage	40 kV
Air-blast circuit breakers	Breaking current	80 kA
	Breaking time	7 ms
	Rated voltage	15.5 kV AC
	Max. $I^2t$	10 GA <sup>2</sup> s (repetitive) 30 GA <sup>2</sup> s (occasional)
	Air pressure	80 bar
Commutating resistors	Rated energy	320 MJ
	Rated voltage	30 kV

### 4.3.2 Tore Supra

Tore Supra è un tokamak operante a Candarache (FR) dal 1988. È uno dei primi esperimenti su larga scala utilizzando i superconduttori (solo per il circuito per il campo toroidale, TFC).

Per lo start-up del plasma, il circuito per il riscaldamento ohmico (OH) è dotato di una combinazione di un interruttore rapido e un'unità a tiristori, con lo scopo di deviare la corrente nei resistori di commutazione. Dopo un opportuno delay, secondo la configurazione di impulso, i resistori sono cortocircuitate mediante un interruttore rapido, allo scopo di ridurre l'aumento della corrente di plasma. I dettagli delle operazioni sono riportati in Tabella II. È opportuno precisare che, per semplificare lo sviluppo, la manutenzione e la gestione dei ricambi, i commutatori e gli interruttori sono basati su una tecnologia analoga e su componenti simili.

Il circuito TF di Tore Supra include 18 bobine superconduttrici, collegate in serie attraverso i cavi di alimentazione di ingresso DC e gli interruttori di corrente, che consentono di deviare la corrente nei resistori di scarico in caso di una rapida scarica di sicurezza (FSD) [3]. Le 18 unità di interruzione sono effettivamente i singoli interruttori meccanici di 6 CBs trifase.

Dopo un primo progetto con resistori in serie (interlacciato con le bobine), le connessioni sono state riorganizzate e alcune resistenze sono state collegate in parallelo alle bobine. In questo modo è possibile avere una più alta costante di tempo (122 s) in caso di scarica non causata da un *quench*, riducendo così lo stress sui magneti quando non necessario; al contrario, in caso di un effettivo *quench*, a causa del rapido aumento della resistenza elettrica della bobina, la costante di tempo si riduce a 14 s (auto-Modalità di protezione). La tabella III fornisce i parametri principali del sistema di protezione del TFC e del FSD.

**TABLE II. Main ratings of the Tore Supra switching system (note: \* = before maintenance).**

Component	Parameter	Value
Fast opening/ making switch	Max. operation time	5 ms (opening) 3 ms (making)
	Rated current	60 kA DC
	Max. $I^2t$	6.25 GA <sup>2</sup> s
	Contact resistance	2 $\mu\Omega$
	Mechanical endurance (*)	> 7000 oper.
	Rated-current endurance (*)	> 3000 oper.
Commutating resistors	Rated energy	134 MJ

**TABLE III. Main ratings of the Tore Supra TF circuit and FSD protection system.**

Component	Parameter	Value
TF circuit	Rated current	1400 A
	Max. stored magnetic energy	600 MJ
	Time constant (quench)	14 s
	Time constant (non-quench)	122 s
Dump resist.	Rated energy	792 MJ

### 4.3.3 KSTAR

L'esperimento Korea Superconducting Tokamak Advanced Research (KSTAR) è operativo dall'agosto 2008 a Daejeon (Repubblica di Corea). Insieme con l' EAST (Experimental Advanced Superconducting Tokamak, China) e SST-1 (Steady State Superconducting Tokamak, India), KSTAR è uno dei tokamak costruito completamente con i superconduttori ad ora. Per assicurare la rapida variazione di corrente nelle bobine di PF per lo start-up del plasma, 6 dei 7 PFC sono forniti con il cosiddetto Blip Resistor Insertion System (BRIS). Un convertitore di potenza a semiconduttori viene utilizzato come interruttore per il BRIS, basato sulla tecnologia IGCT; questa scelta è stata adottata soprattutto per la ridotta manutenzione e lunga durata di questo tipo di componenti. Un approccio modulare è stato adottato e ogni BRIS consiste in 7 moduli IGCT (14 per il PF1 circuito), ognuno nominale per 4 kA (2 kA per PF1); viene impiegata una corretta disposizione per assicurare la giusta ripartizione di corrente (struttura a scala). Inoltre, ogni modulo IGCT è dotato di snubbers (per limitare il turn-off) di sovratensione e reattanze (per limitare la derivata della corrente di accensione negli IGCTs). Ogni sistema è dotato anche di diodi per la conduzione inversa, per consentire la circolazione di corrente nei circuiti quando vi sono cambiamenti di polarità di corrente. Nella Tabella V, sono mostrati i principali parametri.

Essendo un dispositivo superconduttore, KSTAR è anche dotato di un sistema per la scarica veloce delle bobine (1x TFC e 7x PFC) in caso di quench, chiamato il Quench Protection System (QPS). Per questo scopo, similmente al sistema di commutazione di Tore Supra, è stata adottata una combinazione di interruttori meccanici (CBs con portata la corrente di steady-state) e a tiristori. Questi sono in serie con uno switch di back-up, costituito da un VCB e un piccolo fusibile. La tabella VI riassume le principali valutazioni della QPS.

TABLE V. KSTAR BRIS main ratings.

Component	Parameter	Value
BRIS	Rated current	25 kA (PF1-4) 20 kA (PF5-6)
	Rated voltage	3 kV (PF1-4) 6 kV (PF5-6)
	Max. operation time	100 ms
Blip resistors	Nominal resistance	0.12 $\Omega$

TABLE VI. KSTAR QPS main ratings.

Component	Parameter	Value
TF QPS	Rated current	40 kA
	Stored energy	500 MJ
	Time constant	7 s
PF QPS	Rated current	25 kA (PF1-4) 20 kA (PF5-6)
	Stored energy	19-134 MJ
	Time constant	4 s

#### 4.3.4 ITER

Rispetto agli altri impianti di fusione esistenti a livello mondiale, le Fast Discharge Units di ITER (FDUs) sono di gran lunga il più grande sistema di estrazione di energia da bobine superconduttrici in caso di quench, tale energia può superare il valore di 55 GJ; di conseguenza le FDUs sono un sistema chiave per la protezione della macchina. Il concetto è simile a quella degli SNU: una unità per la commutazione della corrente (CCU), composta da un interruttore, che sopporta la corrente a regime ma con una limitata capacità di interruzione, collegato in parallelo ad un altro CB, adatto per interrompere tale corrente, che verrà quindi deviata in un resistore. Gli interruttori della CCU sono stati sviluppati e testati dalla European Domestic Agency (EU DA) grazie ad un programma R&D iniziato a metà degli anni Novanta. Un diagramma schematico del sistema è riportato in Fig. 4.5. Quando una scarica veloce è necessaria, il principale interruttore meccanico (denominato interruttore di by-pass BPS) è aperto e la corrente è completamente trasferita al vicino VCB; quest'ultimo è, successivamente, aperto e la commutazione della corrente alle resistenze (DR) è ottenuta mediante la scarica di un circuito *Counter-Pulse* (CPC) che crea un'artificiale zero della corrente nella camera dell'arco del VCB. Per aumentare l'affidabilità della CCU, due interruttori a vuoto, ciascuno in grado di rompere la corrente nominale e di sostenere la piena sovratensione, sono collegati in serie. Infine, un *pyrobreaker* (PB, sviluppato da RF DA e attivato per mezzo di una carica esplosiva) è installato in serie alla CCU e funge da switch di back-up ulteriore.

I test approfonditi effettuati all'interno del programma EU hanno valutato le prestazioni degli interruttori e dimostrato la loro affidabilità. La Tabella VIII fornisce le principali valutazioni di ITER FDUs

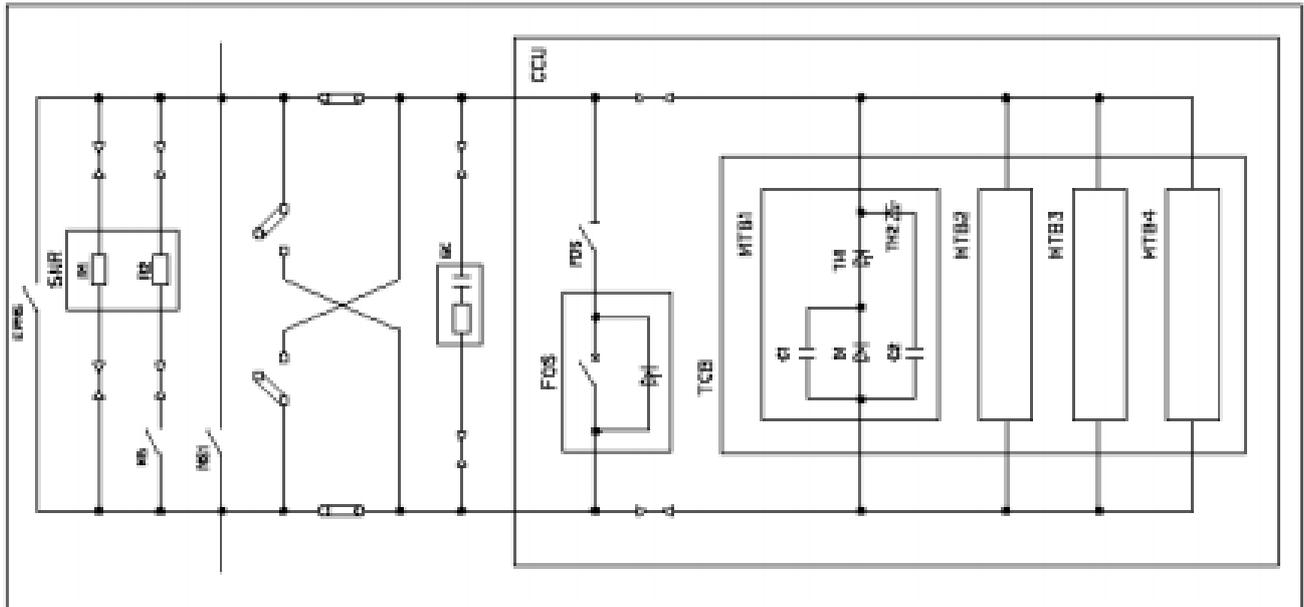


Fig. 4.4. Diagramma schematico dell'ITER Switching Networks (MS, MS1 = Make Switch; EPMS = Explosively actuated Protection MS; SNR = SN Resistor; CCU = Current Commutation Unit; FOS = Fast Open Switch; FDS = Fast Disconnect Switch; TCB = Thyristor Circuit Breaker).

TABLE VII. Main ratings of the ITER SNUs  
(note: \* = before maintenance).

Component	Parameter	Value
SNU	Rated current	45 kA (35 kA PF6)
	Max voltage	8.5 kV (6 kV CS1)
	Insulation level	12 kV AC
	Max. operation time	4 s (15 s CS1) every 30 min
Mechanical Switches	Operation time	12 ms (FOS + FDS) 2 ms (MS, MS1) 1 ms (EPMS)
	Contact resistance	10 $\mu\Omega$ (FOS, FDS) 4 $\mu\Omega$ (MS, MS1) 6 $\mu\Omega$ (EPMS)
	Mechanical Endurance (*)	> 5000 oper.
	Rated-current endurance (*)	> 1500 oper.
TCB	Operation time	1 ms
SNR	Rated energy	8.5 GJ (total)

### 4.3.5 RFX

Come i tokamak, RFX richiede una elevata tensione indotta per l'ignizione del gas e però lo start-up della corrente di plasma; tutto ciò viene generato dall'ETS (il sistema di trasferimento di energia). Esso si basa su quattro identiche unità per l'interruzione di correnti DC; una unità è composta da: un interruttore in vuoto (VCB); una rete per lo zero artificiale in corrente; un resistore di trasferimento; due interruttori a tiristori, collegati a porzioni del resistore per cambiare velocemente il valore della resistenza PTRB e conseguentemente il valore della costante di tempo. Il VCB è in realtà composto due interruttori in vuoto in serie.

TABLE IV. Main parameters of the RFX ETS.

Component	Parameter	Value
Energy Transfer System	Rated current	50 kA
	Recovery voltage	35 kV
Vacuum interrupters	Breaking current	70 kA
	Rated voltage	17.5 kV
	Max. opening time	30 ms
	Max. $I^2t$	2.3 GA <sup>2</sup> s
	Arc voltage	30-40 V
	Arcing time	7 ms
Transfer resistors	Rated voltage	17.5 kV
	Rated energy (4 units)	150 MJ
Thyristor making switches	Making capability	50 kV
	Direct voltage	18 kV
	Max. $I^2t$	125 MA <sup>2</sup> s

### 4.4 Limiti nella performance dei VCBs in RFX

Durante tutte le operazioni nei test sul sistema di *quench protection* di ITER, sui vari VCBs, si sono verificati *restrikes* e anomalie nella sovratensione di ripristino. Le attività di sviluppo vennero iniziate nel 1997 con una prima campagna che mirò a valutare separatamente le prestazioni di un prototipo di VCB fino a 66 kA 24 kV DC e la capacità di sostenere la corrente per il BPS (*By-Pass Switch*). Questa campagna sperimentale venne seguita da una successiva nel 2003 e nei primi mesi del 2004, volta a testare un prototipo completo dell'interruttore raggiungendo le prestazioni necessarie per il progetto ITER (70 kA 24 kV DC); [5]

In due casi non è riuscita l'interruzione a causa del contemporaneo *restrike* di entrambi i tubi in serie, con la necessità dell'intervento della sbarra di protezione. In un tubo si è verificato il *restrike* sia durante l'inversione di tensione diretta sia nella fase di recupero dall'interruzione. Nella Tabella VIII,

"Diverse tensioni di ripristino sui tubi" si evidenziano le differenze nella tensione di ripristino sui due tubi in serie notate dopo l'interruzione della corrente.

Tali comportamenti anomali sono stati messi in correlazione con l'energia specifica dissipata nei tubi prima l'apertura meccanica dei contatti  $I^2t$ . Per dimostrare questa ipotesi, viene calcolata l'energia dissipata fino alla separazione dei contatti. La probabilità di un errato funzionamento quindi sembra essere correlata all'energia dissipata. Infatti, al di sopra di 60 kJ, si presentano *restrikes* e sovratensioni di ripristino anomale. Si osserva infatti che sotto i 50 kJ si presentano pochi *restrikes* e minori anomalie in sovratensione. I risultati presentati in precedenza sembrano indicare che esista un limite di energia dissipata sulla resistenza di contatto, oltre il quale la probabilità di funzionamento anomalo aumenta di molto. Questo limite, nel caso del circuito di RFX è intorno a 60 kJ. Il limite di energia deve essere rapportato alla resistenza di contatto, che viene notato non essere costante per le unità con molteplici anomalie e guasti. Si farà quindi, da qui in poi, solo riferimento all'energia specifica, la cui soglia, per contatti D12 è di 2.3 GA<sup>2</sup>s per contatti D10 di 1.6 GA<sup>2</sup>s.

Table VIII: Diverse tensioni di ripristino sui tubi

ANOMALIES OBSERVED DURING CURRENT INTERRUPTION TESTS

#Shot	Tube	Anomaly
95582,95583,95647	5&6	Different recovery voltage on the tubes
95661,95691		
95692,95700	5	<b>Re-strike</b>
95717,95723	5&6	Different recovery voltage on the tubes
95767	5	<b>Re-strike</b>
95768,95788,95833	5	Different recovery voltage on the tubes
95968	9&10	<b>Interruption failure</b>
96040	7	<b>Re-strike during reverse recovery phase</b>
96184	7	<b>Re-strike</b>
96476	7&8	Different recovery voltage on the tubes
96482	7	<b>Re-strike</b>
96546	7&8	Different recovery voltage on the tubes
95968	11&12	<b>Interruption failure</b>

## 4.5 RFX-mod

L'unità di interruzione in ITER (FDU, Fast Discharge Unit) è stata progettata per aprire una corrente continua di 70 kA, come visto, ed è composta da due tubi a vuoto in serie con un interruttore meccanico di by-pass collegato in parallelo al fine di garantire la conduzione continua della corrente DC.

Durante le prove su sulle FDUs, come precedentemente analizzato, i tubi in vuoto (diametro di contatto 12 cm, denominato D12), hanno mostrato un inaspettato limite nell'energia specifica  $I^2t$  dissipata nei contatti chiusi prima di apertura: quando la soglia di 2,3 GA<sup>2</sup>s viene superata, la probabilità di avere un *re-strikes* o dei guasti di interruzione aumenta notevolmente e in alcuni casi anche la saldatura dei contatti può verificarsi rendendone impossibile l'apertura.

Nel circuito di RFX, l'interruttore di by-pass non è presente, ma gli interruttori a vuoto e il loro funzionamento sono molto simili a quelli nelle FDUs di ITER; in particolare, i tubi sono dello stesso tipo ma con una minore superficie di contatto (diametro 10 cm, denominata D10); supponendo che il suddetto limite sia proporzionale con l'area di contatto, si calcola che  $I^2t$  deve essere inferiore a 1,6 GA<sup>2</sup>s per i tubi D10. Per un tipico impulso RFX con  $I_M = 40$  kA,  $I^2t$  prima di aprire risulta circa 1,5 GA<sup>2</sup>s: questo significa che i tubi D10 sono molto vicini al loro massimo di prestazione e quindi saranno inadeguati quando  $I_M$  sarà aumentata a 50 kA. Anche il D12 tubi non sarà in grado di resistere alle nuove condizioni, dal momento che il nuovo  $I^2t$  raggiungerà un valore compreso nell'intervallo 3.5 - 4 GA<sup>2</sup>s.

Per poter operare con correnti magnetizzanti fino ai 50 kA per ottenere 2 MA nella corrente di plasma è quindi evidente che un upgrade del sistema è necessario per evitare di superare il limite di  $I^2t$ . [6]

Le unità testate per la protezione delle bobine superconduttrici di ITER tuttavia, possono essere considerate il sistema più avanzato per quanto riguarda l'interruzione di corrente DC. Nessun altro elemento disponibile al mondo è in grado di garantire tali prestazioni e quindi la possibilità di sostituire l'interruttore PTSO (vedere Fig. 4.4) con prodotti commerciali è stata immediatamente scartata. Pertanto, il solo modo per ridurre  $I^2t$  sugli interruttori in vuoto è quello di installare, in parallelo al ramo principale, un ramo ausiliario, in modo che possano equipartirsi la corrente durante la fase di caricamento dell'avvolgimento magnetizzante.

Diverse soluzioni sono state considerate per il ramo ausiliario, ma nessuna sembrava adatta per l'impianto RFX. Per esempio, l'ipotesi dell'interruttore di circuito meccanico utilizzato per il test di ITER (meccanica by-pass), che ha dimostrato di essere molto affidabile, è stata respinta a causa delle sue enormi dimensioni (è stato progettato per le condizioni di regime stazionario) e del suo costo notevole.

Alla fine, solo la tecnologia degli interruttori in vuoto poteva essere considerata. Una possibilità era rappresentata dall'utilizzo di sezionatori in vuoto; tuttavia, anche senza considerare le loro dimensioni, questi elementi non possono tollerare correnti molto elevate e la loro vita media diminuisce in modo significativo proporzionalmente all'aumentare della corrente.

Gli interruttori commerciali in media tensione in vuoto non sono tuttavia adatti in quanto progettati solo per applicazioni in corrente alternata. Pertanto, la soluzione consiste di un ramo ausiliario identico a quello principale. Questo sembrava essere il più ragionevole la decisione, anche perché nel corso degli anni un sacco di esperienza è stata maturata dal team RFX su questo tipo di componenti e quindi gli imprevisti sarebbero stati ridotti al minimo.

In parallelo al ramo principale (PTSO) vi è un ramo ausiliario (PTSB). La sequenza di temporizzazione del sistema è rappresentata in Fig. 4.7, insieme con le forme d'onda di corrente previste.

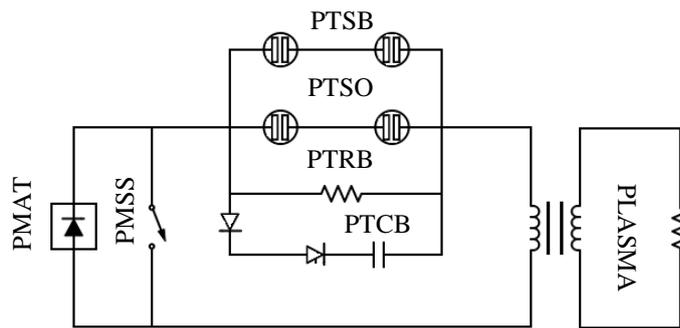


Figure 4.6: Schema circuitale semplificato di RFX-mod con ramo in parallelo

Prima dell'impulso, entrambi gli interruttori sono chiusi e  $I_M$  è condiviso tra il PTSO e il PTSB. I due interruttori non sono aperti contemporaneamente: il primo ramo al quale è comandata l'apertura è quello ausiliario (al tempo  $T_1$ ), mentre quello principale è ancora chiuso; l'apertura del contatto inizia in corrispondenza del tempo  $T_1+T_0$ , dove  $T_0$  (tempo di apertura o *delay*) è un parametro caratteristico dell'interruttore. Quindi la corrente inizia a commutare dal PTSB al PTSO, grazie all'effetto della tensione di arco in tubi PTSB (considerando che nell'altro ramo la tensione è pari a zero); la durata della commutazione è indicato con  $T_c$  nel diagramma temporale (4.7).

Quando tutta la corrente è stata trasferita al PTSO, e cioè dopo il tempo  $T_1+T_0+T_c$ , il comando di apertura può essere inviato al PTSO ( $T_2$ ). Di nuovo, l'apertura del contatto inizia in corrispondenza del tempo  $T_2$  e infine, dopo pochi millisecondi di arco, il banco di condensatori di *counterpulse* PTCB (non mostrato in Fig. 4.7) viene scaricato (al tempo  $t = 0$ ). Il sistema per il *counterpulse* è costituito da un banco di condensatori PTCB alimentato da un apposito circuito per la carica, uno stack di tiristori (in parallelo 2 serie da 6 tiristori più un'induttanza da  $100 \mu\text{H}$  per limitare  $dv/dt$  e permettere la corretta ripartizione di corrente sui due rami di tiristori) tali da permettere la scarica al banco di condensatori, e un diodo di blocco come protezione (fig. 4.6).

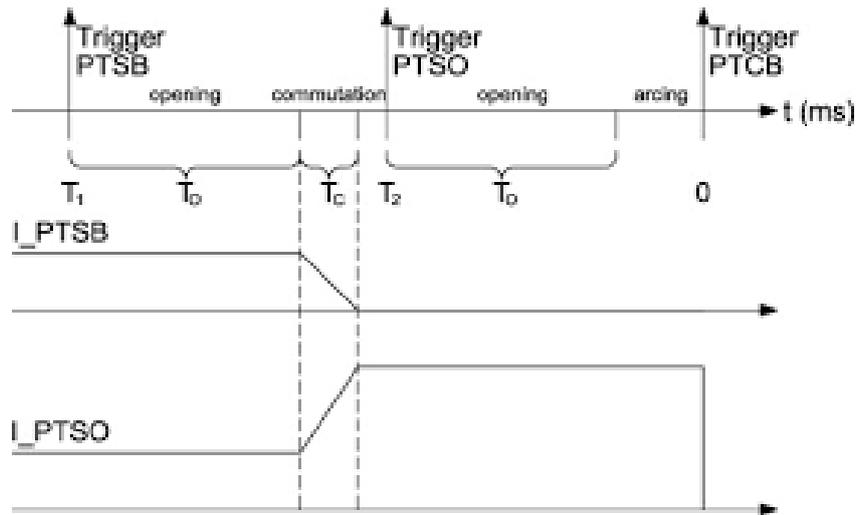


Figure 4.7: Diagramma temporale apertura

È opportuno precisare che, diversamente da quella del PTSO, l'interruzione del PTSB viene effettuata con un corto-circuito in parallelo (il PTSO è ancora chiuso): poiché l'estinzione della corrente avviene spontaneamente (cioè senza una scarica *counterpulse*) ed è più breve di quella del PTSO, il fenomeno di erosione della superficie dei contatti dovuto all'arco è meno evidente nel PTSB ed è probabile che questo risulti in un diverso invecchiamento dei tubi.

Con la disposizione mostrata in Fig. 4.6, se la corrente viene equamente ripartita fra i due rami,  $I^2t$  per ciascun ramo viene ridotta a circa 1/4, rispetto allo schema originale; ciò significa che anche con  $I_M = 50$  kA, questa quantità risulterà approssimativamente intorno a  $1 \text{ GA}^2\text{s}$ , ben al di sotto dei limiti sia per i tubi D10 che D12. Tuttavia, si deve tenere in considerazione il fatto che i tubi D10 non sono più in produzione e quindi solo tubi D12 possono essere presi in considerazione per il ramo ausiliario (PTSB). Alla fine, la scelta fatta è stata quella di impiegare tubi D12 anche per i rami PTSO: in questo modo, vi sono gli stessi elementi in tutte le parti del sistema, garantendo così un'intercambiabilità tra tutti gli interruttori e riducendo la necessità di parti di ricambio.

L'aggiornamento di ETS è stato quindi suddiviso in due fasi:

- Sostituire i "vecchi" tubi D10 con quelli D12 (ramo PTSO);
- Installare i rami ausiliari (PTSB).

Il primo passo è stato effettuato nell'autunno 2007; successivamente si è deciso di effettuare un test pilota su una delle quattro unità, prima di estendere le modifiche a tutta la ETS, al fine di verificare l'affidabilità del sistema e superare ogni possibile inconveniente.

Due nuove protezioni sono state implementate per la versione aggiornata di ETS. D'altro canto, il set di protezioni già esistente (riferendosi alla PTSO) non è stato modificato, poiché tutto quello che avviene prima del comando di apertura del PTSO non ha alcuna influenza sulla PTSO stesso.

Una questione essenziale riguarda la protezione da eccessiva  $I^2t$ : è stato menzionato sopra che con il nuovo regime il massimo di energia specifica sarà ridotto in modo significativo fino a  $1 \text{ GA}^2\text{s}$  per parallelo in caso di perfetta condivisione di corrente (50-50%). Tuttavia, qualora uno dei due interruttori non sia chiuso prima dell'impulso, gli altri dovranno sopportare la corrente totale: questo evento è piuttosto improbabile (perché lo stato degli interruttori è continuamente monitorata da un PLC) ma ciò non toglie che esso debba essere evitato nel caso di operazioni in alta corrente.

Di conseguenza, questa protezione interviene quando, durante la salita di  $I_M$ , la corrente in un interruttore supera un valore di soglia e l'altra è a zero. In questo caso, viene rilasciato una richiesta per una "*soft-protection*" (spegnimento di tutti i convertitori AC/DC e inibizione di tutti i trigger). Va sottolineato che la soglia è calcolata non solo durante la fase di carico, ma anche durante la fase "discendente", quando, dopo l'intervento della protezione, la corrente decade con la costante di tempo dell'avvolgimento magnetizzante.

La seconda protezione implementata è correlata al comando di apertura per il PTSO: questo trigger viene rilasciato solo se, in corrispondenza del tempo  $T_2$ , la corrente sul PTSB è diventata zero (cioè la commutazione di corrente è stata eseguita correttamente), altrimenti viene inviata una richiesta di "*full-protection*" alla sbarra principale del circuito poloidale.

Il test pilota ha avuto successo in tutti i suoi aspetti: una singola unità dell'ETS ha avuto un funzionamento affidabile per diversi mesi: ciò ha consentito la programmazione, per la fine dell'estate 2008, dell'estensione delle modifiche per le altre tre unità.



# CAPITOLO 5

## Acquisizione Dati

### 5.1 Sistema di acquisizione dati in RFX

RFX impiega un approccio centralizzato per le attività di controllo, monitoraggio, l'acquisizione dei dati e la protezione della macchina. Successivamente si descrivono i requisiti, il design, i componenti e il funzionamento di tali sistemi in RFX, prima dell'aggiornamento in RFX-mod, che ne ha solo ampliato alcune componenti, senza modificare lo schema principale [8].

Per garantire un elevato grado di affidabilità, una rigida suddivisione e modularità è stata imposta dall'inizio, tra il controllo, il monitoraggio e il sistema di acquisizione dati denominato SIGMA ("sistema di gestione, monitoraggio ed acquisizione dati") e il SGPR ("sistema generale di protezione rapida"). SIGMA è stato progettato per i seguenti segnali: circa 5000 segnali lenti, prevalentemente digitali, che forniscono informazioni non inerenti agli impulsi generate dall'impianto e comandi per l'impianto, e circa 1000 canali veloci ( $2 \text{ kHz} \div 1 \text{ MHz}$ ), per i dati collegati agli impulsi, che producono fino a 20 Mbyte di dati per ogni impulso. In aggiunta devono essere forniti segnali di temporizzazione con precisione migliore di  $10 \mu\text{s}$ .

SIGMA si avvale di due diverse tecnologie: di tipo controllori programmabili di tipo industriale (PLCs) per gestire i segnali lenti; un cluster di computer centralizzato VAX-VMS invece si occupa della componente veloce del sistema.

Le workstation vengono utilizzate come console operatrici per la parte veloce del sistema; i personal computer sono utilizzati come console per i PLCs. Tutte le componenti del sistema comunicano attraverso una singola fibra ottica Ethernet. Un singolo PLC agisce come supervisore di tutta la sequenza.

Il sistema di protezione SGPR può gestire un massimo di 50 possibili richieste di intervento rapido e invia i corrispondenti segnali di comando con un tempo di reazione totale di 1 ms. SGPR è basata su un hardware dedicato che implementa la logica di decisione per le richieste di intervento in quattro diversi livelli di urgenza. Esso invia i comandi di intervento ai corrispondenti dispositivi di protezione nelle varie unità locali. Tutti i percorsi di segnale e la logica di decisione sono duplicate con continui

controlli automatici per l'integrità. Ogni segnale acquisito dai sensori e diretto ai dispositivi di protezione passa attraverso una doppia linea di fibre ottiche con test autodiagnostico continuativo.

Il funzionamento di RFX è sotto il completo controllo di SIGMA da un'unica sala di controllo centrale. Essa ospita la console supervisore, tutte le console del sottosistema (PC e workstation) nonché alcune attrezzature aggiuntive (display SGPR, stampanti e apparecchiature video, ecc.). L'esecuzione degli impulsi segue una sequenza rigorosa, che è implementata in maniera unica su tutti i sottosistemi (PLC e computer VAX).

La console per la supervisione è l'interfaccia dell'operatore sul sistema nel suo completo svolgimento e ne controlla la sequenza di tiro.

Il tempo di ciclo del PLC è al di sotto di 200 ms; il tempo di aggiornamento dell'immagine sul PC è al di sotto di 3 s. Il sistema veloce acquisisce tutti i canali (circa 15 Mbyte di dati non compressi per impulso) entro circa 10 min. Questo tempo include la visione di diverse centinaia di canali di misurazione su diverse *work-stations* della sala di controllo centrale e l'esecuzione automatica di un numero di programmi di analisi dei dati.

Il sistema di acquisizione dati di RFX può essere suddiviso in quattro macro-blocchi:

- Misurazioni relative al sistema di *power supply*
- Misurazioni sui sistemi magnetici
- Misurazioni elettromagnetiche
- Misurazioni diagnostiche

I primi due sono spesso indicati come sistemi per l'acquisizione dei dati ingegneristici (EDA), mentre gli ultimi due per l'acquisizione dei dati fisico-scientifici (PDA).

### 5.1.1 RFX-mod

Un sistema integrato basato sull'utilizzo di computer è stato sviluppato per gestire il controllo in tempo reale durante la scarica di plasma. Il sistema è distribuito ed è costituito da nodi di elaborazione basate su tecnologia VME64 e collegato tramite LAN. Ogni nodo è costituito da una cassa VME basata su un PowerPC *single board computer* (Motorola MVME5110) con VxWorks come sistema operativo in tempo reale ed è dotato di schede di I/O di interfaccia con l'esperimento. Schede multi-canale commerciali analogiche di I/O (canali per ogni scheda, 12 bit di precisione) sono utilizzati nel sistema, poiché il controllo delle applicazioni implementato gestisce gli input dai sensori e gli attuatori di comando (Pentland VGX e MPV914) [8]. Il software di sistema è stato sviluppato come configurabile, framework di uso generale per il controllo in tempo reale, fornendo funzioni di base, come ad esempio l'ottimizzazione della gestione del flusso di dati. Il sistema è in funzione con sette

nodi di calcolo per lo scambio di dati in tempo reale durante gli impulsi. La comunicazione in tempo reale avviene tramite Ethernet LAN. I test sono stati eseguiti per dimostrare l'idoneità della soluzione, utilizzando un interruttore isolato dal resto della LAN, e i risultati sono verificati compatibili con le richieste in tempo reale dell'applicazione. Le comunicazioni fuori dall'impulso utilizzano una seconda LAN Ethernet con protocollo TCP/IP per gestire la manipolazione dei dati pre- e post-impuls. I nodi di elaborazione operano tipicamente come stazioni terminali front-end in grado di gestire canali di input/output e lo scambio di dati durante la fase di controllo. I nodi di controllo possono anche avere possibilità di lettura in corso di estrazione dei dati, come è il caso del controller assialsimmetrico, o non hanno l'acquisizione dati locale come il caso del controller toroidale. I moduli ADC sono in grado di sostenere le frequenze di campionamento fino a 85 kHz, e la dinamica del segnale richiede una frequenza di campionamento di valori dell'ordine di alcuni kHz per evitare fenomeni di aliasing. Il sistema è modulare e scalabile. Tipicamente, la maggior parte dei canali di uscita sono utilizzati simultaneamente (un sottoinsieme essendo ora semplicemente pre-programmato), mentre sottoinsiemi di canali di ingresso vengono utilizzati per implementare schemi alternativi di controllo. Il sistema è sincronizzato da un clock esterno e i segnali di innesco sono inviati all'ADC attraverso un sistema di distribuzione. Nodi di controllo hosting senza moduli ADC, come il controller toroidale, vengono sincronizzati da messaggi inviati in tempo reale.

L'architettura proposta rappresenta un importante cambiamento nell'organizzazione hardware, in quanto il sistema da distribuito diventa centralizzato, anche se mantiene la divisione logica tra le componenti descritte sopra. Il cuore del sistema è rappresentato da un server multi-core con in esecuzione in tempo reale una versione patchata di Linux. Un nucleo separato è ora assegnato a ogni funzione logica (cioè per ogni funzione precedentemente eseguite da una CPU VME). L'acquisizione dei dati verrà effettuata mediante dispositivi ADC collegati via bus extender. Il bus Extender utilizza un collegamento PCIe per il computer host e i dispositivi PXI sono visti dal server centrale come hosted direttamente sul bus PCI interno, essendo la comunicazione PCIe effettuata in modo trasparente mediante i ponti del bus extender. Ogni acquisizione di dati fatta è associata ad un nucleo che gestisce la comunicazione di dati tra schede di I/O e la memoria principale mentre i core rimanenti possono essere utilizzati per il calcolo. La comunicazione dati tra i componenti (core) sarà effettuata tramite il server centrale della memoria RAM [9].

### *5.1.2 Misurazioni diagnostiche*

L'acquisizione diagnostica dei dati viene eseguita da una varietà di dispositivi differenti. Il numero dei canali di acquisizione dati può variare notevolmente tra gli impulsi perché alcune diagnostiche possono essere accese o spente (senza influenzare la sequenza dell'esperimento). Il sistema

comprende attualmente circa 100 canali a media velocità di acquisizione di dati (velocità di campionamento compresa tra 1 kHz e 100 kHz) e 35 canali di acquisizione dati ad alta velocità (velocità di campionamento al di sopra di 100 kHz), che insieme permette di acquisire circa 3,5 Mbyte di dati per impulso. Si fa riferimento in seguito solamente all'unità diagnostica legata alle unità PT. L'unità YAU 33 (Thales) è progettata per la trasmissione dei soli dati di misurazione relativi all'impianto ETS. Essa serve a trasmettere i valori misurati su un collegamento isolato per mezzo di cavi in fibra ottica (schede molto veloci, con ampiezza di banda di 2 MHz e accuratezza entro l'1%).

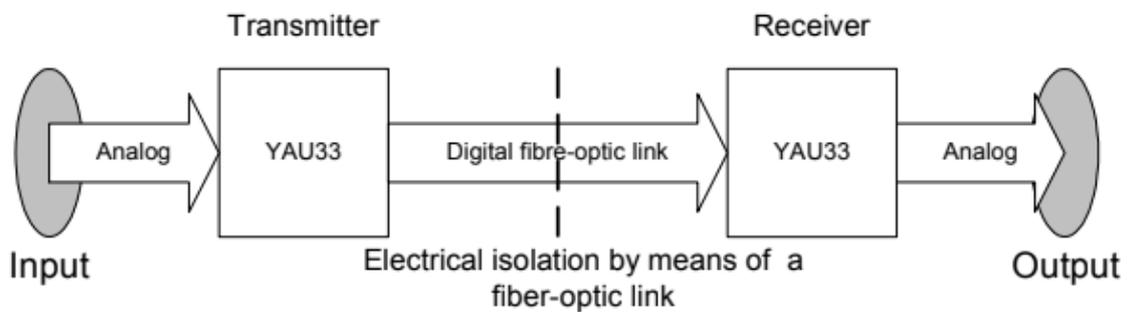


Fig. 5.1: catena del sistema di misurazione Thales

Il trasmettitore dell'unità YAU33 raccoglie i valori dei segnali analogici di misura e gli inoltra al ricevitore mediante un collegamento in fibra ottica. I dati sono qui condizionati e inoltrati all'uscita analogic. Trasmettitore e ricevitore sono uguali tra di loro. Sul trasmettitore è possibile selezionare il fondo scala in ingresso tramite jumper (0.1V, 1V, 2V, 5V, 10V), mentre il fondo scala del segnale di uscita è fisso a 10V. In aggiunta il ricevitore include 4 comparatori con uscita diretta (regolabile da -100% a +100%). La polarità dei segnali in uscita può essere regolata, non appena il valore misurato supera il valore adeguato del comparatore. Trasmettitore e ricevitore sono integrati su una singola scheda a circuito stampato. Tutto il sistema può essere utilizzato in maniera bi-direzionale. La trasmissione e la ricezione di sistema sono quindi del tutto identiche come accennato, a meno della possibilità di selezione del fondo scala.

Per l'analisi dati e la derivazione dei parametri interessati per lo svolgimento di questa tesi vengono usati i dati provenienti da questo impianto di misurazione. Ci si propone quindi di fare un'analisi dati con misure costruite su misurazioni di parametri di soglia, generati per dare o non dare al sistema di protezione il trigger per l'intervento. Tale analisi risulta quindi intrinsecamente imprecisa se considerata come un'analisi di tipo fisico per la comprensione dei fenomeni, tuttavia, lo scopo ultimo dell'analisi è invece la "sola" verifica delle modifiche adottate in RFX-mod legate all'impianto PT.

Tali parametri si dividono in due gruppi a livello temporale, ovvero i parametri prima dell'apertura dell'interruttore ( $t < 0s$  dove lo  $0s$  ricordiamo essere l'istante di scarica del banco di condensatori PTCB e della conseguente apertura dei PTSO) e i dopo l'apertura ( $t > 0s$ ).

Prima dell'istante  $t = 0s$  dividiamo ulteriormente l'analisi in due parti. L'analisi dei parametri a contatti chiusi, ovvero durante la conduzione di PTSO + PTSB e del solo PTSO ( $t < -10ms$ ) e dei parametri a contatti aperti, ovvero appena dopo l'apertura dei contatti del PTSO e prima della scarica di *counterpulse* ( $-10ms < t < 0s$ ). Per parametri a contatti aperti si intende quindi la dinamica dell'arco.

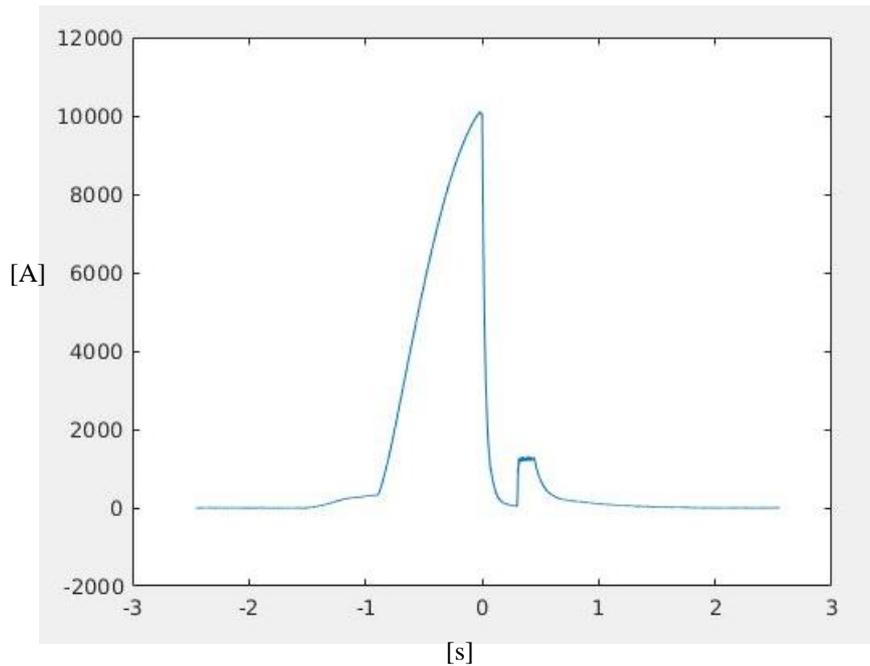


Fig. 5.2: Evoluzione tipo  $I_M$

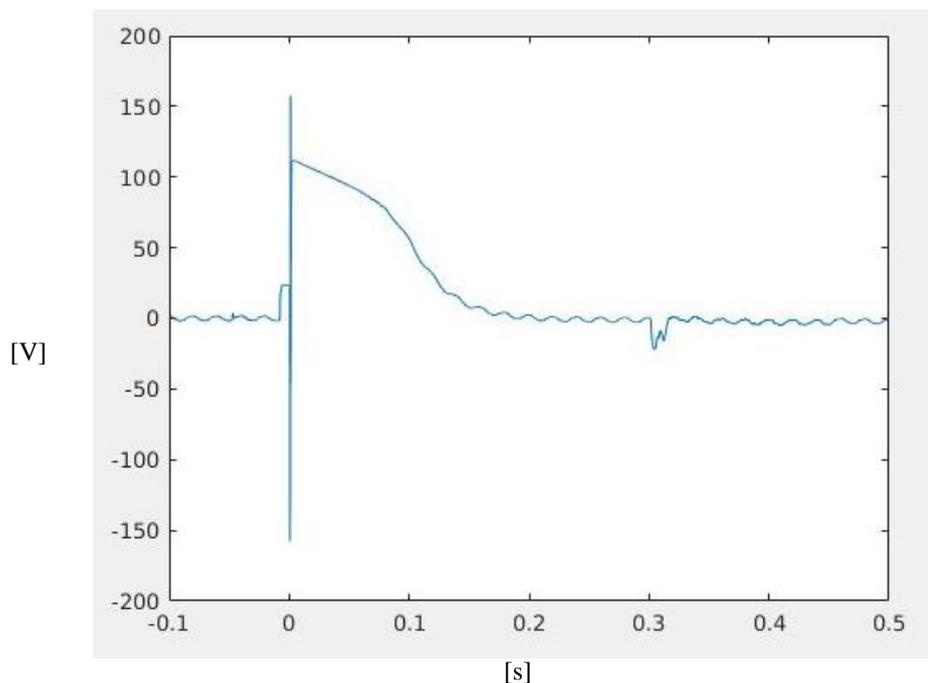


Fig. 5.3: Evoluzione tipo  $V_{PTSO}$

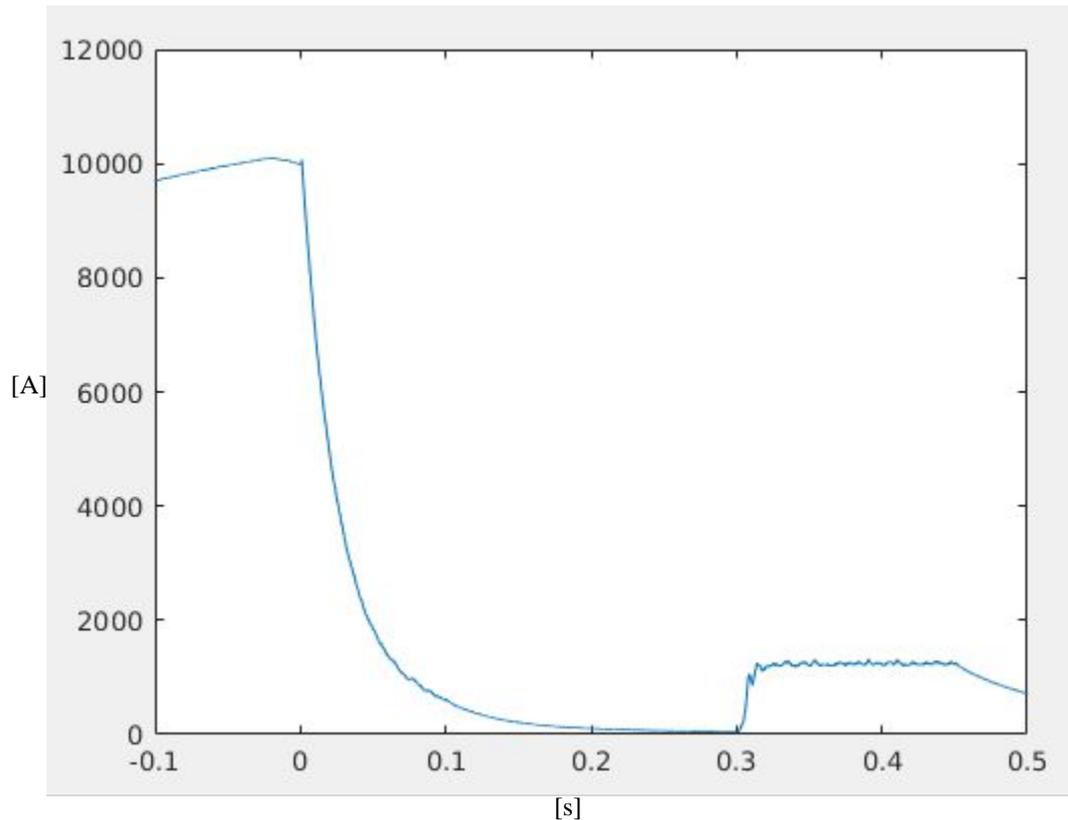


Fig. 5.3: Zoom  $I_M$  (stessa scala temporale fig. 5.2)

## 5.2 GRANDEZZE CONSIDERATE DAL SISTEMA DI PROTEZIONE

### 5.2.1 Parametri a contatti chiusi ( $t < -10ms$ )

Con parametri a contatti chiusi si intende la  $I_{PTSO}$  (corrente magnetizzante), la  $V_{PTSO}$  (tensione su un solo PTSO, dei due collegati in serie) subito prima della scarica del banco di condensatori PTCB ricavate dall'insieme dei dati accumulati come *pulsefile*. Dai dati in corrente e tensione si andrà a ricavare la resistenza di contatto e la sua evoluzione durante la storia di ogni unità PT. Si andrà anche a ricavare anche il delay nell'apertura dell'interruttore, ovvero il tempo dal comando, *trigger*, di apertura, alla sua effettiva apertura.

In fig 5.4 notiamo la forma d'onda della  $V_{PTSO}$  negli istanti prima dell'interruzione. Si nota la salita della corrente magnetizzante fino al valore desiderato. Si può anche vedere chiaramente un disturbo (principalmente dovuto alla componente di rete a 50Hz) sulla curva della tensione.

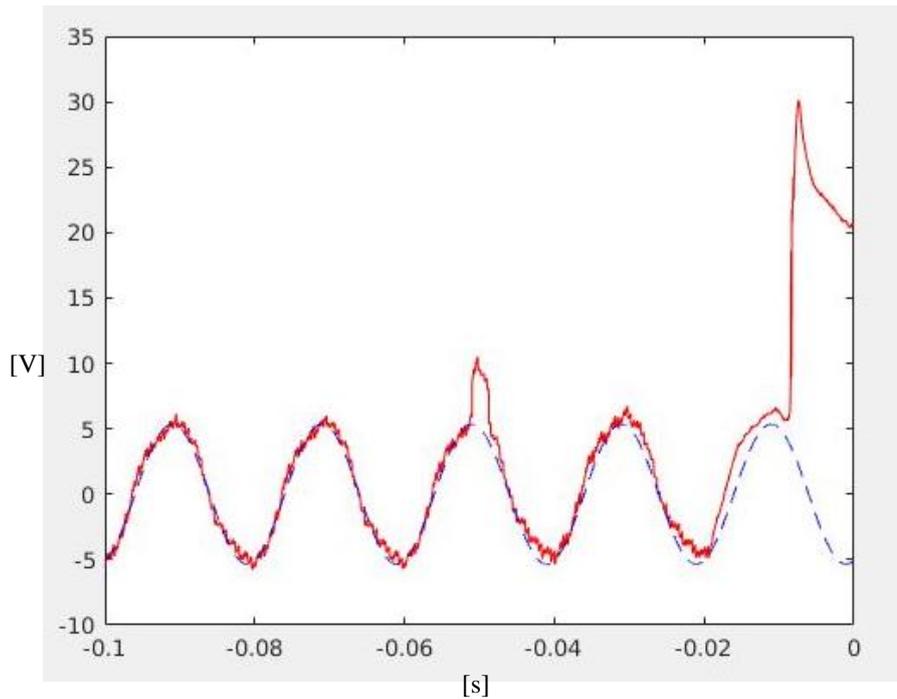


Fig. 5.4: Evoluzione tipo  $V_{PTS0}$  ( $t < 0s$ )

Viene quindi richiesto un filtraggio per riuscire a ricavare i dati voluti. Gli approcci possibili sono molteplici:

- Filtro passa banda calibrato sapendo ampiezza e frequenza. Ricaviamo tali valori e una maggiore conoscenza del segnale in tensione dalla trasformata di Fourier del segnale in tensione fig. 5.5 Si osserva chiaramente come la componente principale del disturbo si collochi lungo i 50Hz)

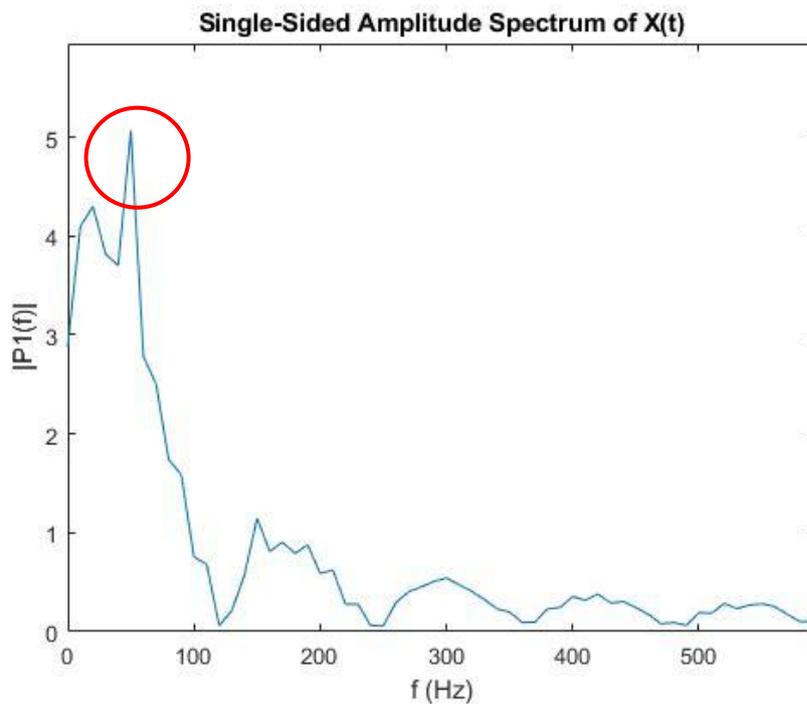


Fig. 5.5: Trasformata di Fourier  $V_{PTS0}$  ( $t < 0s$ )

- Filtro a media mobile. Mediante questa tecnica si sostituisce al valore di ogni campione la media di campioni vicini. È una tecnica matematica utilizzata per smussare le fluttuazioni nel segnale. Si dice "mobile" perché il numero degli elementi considerati è fisso (finestra), ma l'intervallo di tempo avanza.

$$y(i) = \frac{1}{2N + 1} (x(i + N) + x(i + N - 1) + \dots + x(i - n))$$

In cui x è il segnale in ingresso e y è il segnale filtrato e 2N+1 è la dimensione della finestra. La finestra utilizzata sarebbe quella dei 20ms, andando così ad eliminare la componente a 50Hz.

- Fit della componente a 50Hz e relativa sottrazione dal segnale

Si è applicato quest'ultimo metodo, implementato così in linguaggio MatLab e poi successivamente tradotto in Python:

```
SizeA = size(tV);
SizeA_short = ceil(SizeA*2/5);
V_short = V_PTSO(1:SizeA_short,1);
t_short = tV(1:SizeA_short,1);
x = t_short;
y = V_short;

B0 = mean(y); % Vertical shift
B1 = (max(y) - min(y))/2; % Amplitude
B2 = 50; % Frequency (Number of peaks)
B3 = 0; % Phase shift (eyeball the Curve)
myFit = NonLinearModel.fit(x,y, 'y ~ b0 + b1*sin(2*pi*b2*x + b3)', [B0, B1, B2, B3]);

methods(myFit)

b = myFit.Coefficients(:,1);
B = table2array(b);

R50_short = B(1,1) + B(2,1).*sin(2*pi*B(3,1).*t_short + B(4,1));
%% sinusoide del rumore accorciata
R50 = B(1,1) + B(2,1).*sin(2*pi*B(3,1).*tV + B(4,1));
%% sinusoide del rumore completa

V_filtered = V - R50;
```

Dal funzionamento del circuito poloidale è noto che negli istanti prima dell'apertura del PTSO il circuito presenta due fasi principali di conduzione: la conduzione in parallelo di PTSO e PTSB e, successivamente all'apertura del ramo in parallelo (-45ms), del solo PTSO, fig. 5.6

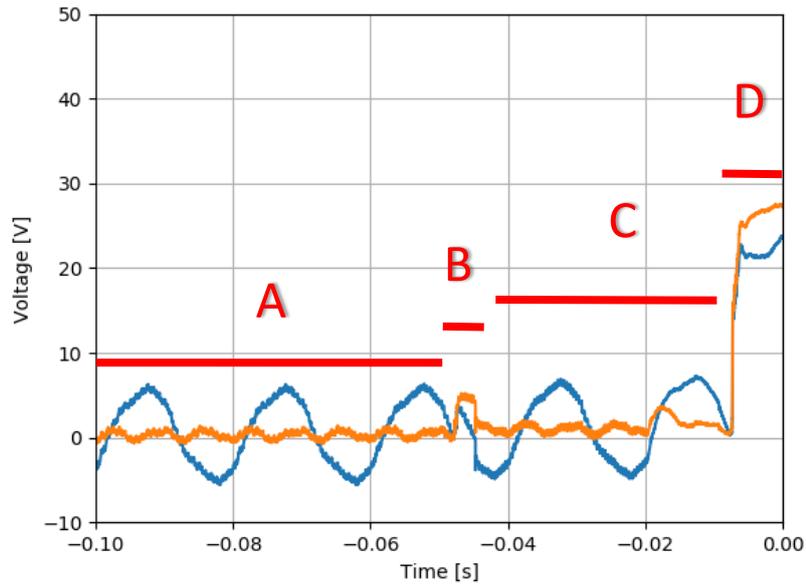


Fig. 5.6: grafico  $V_{PTSO}(t < 0s)$

La curva blu è il segnale grezzo, la curva arancione è il segnale pulito

(eliminata la componente a 50 Hz).

Fasi:

- A. la corrente magnetizzante si divide su due rami: PTISO e PTSB
- B. si apre PTSB, l'aumento di tensione è dovuto all'arco che si crea tra i contatti di PTSB, l'arco si estingue quando la corrente transita totalmente su PTISO (pochi ms)
- C. tutta la corrente magnetizzante transita su PTISO
- D. si aprono i contatti e si crea l'arco su PTISO

Oltre alla componente a 50Hz viene eliminata anche la componente a 150Hz per ridurre al minimo il disturbo nel segnale di tensione.

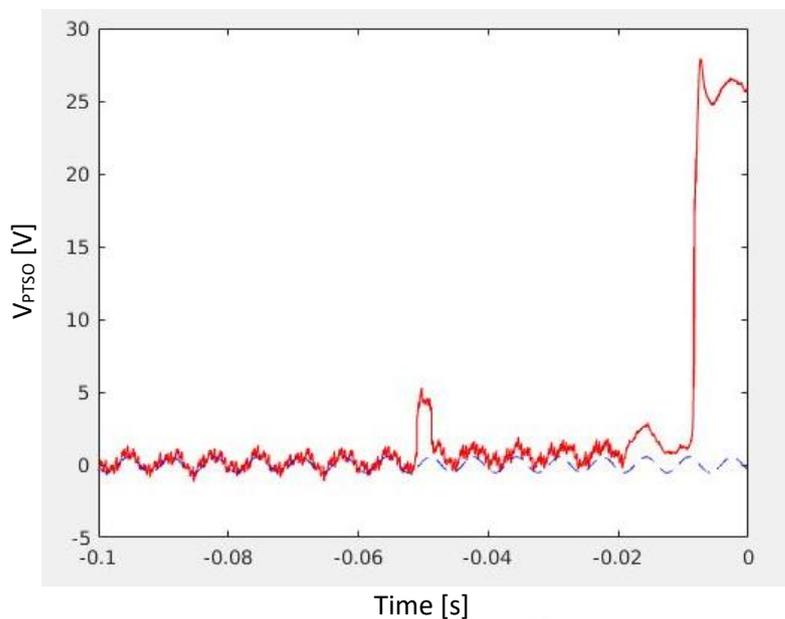


Fig. 5.7: grafico  $V_{PTISO}$  filtrata ( $t < 0s$ )

La curva blu è il fit a 150Hz, la curva rossa è il segnale pulito dai 50 Hz

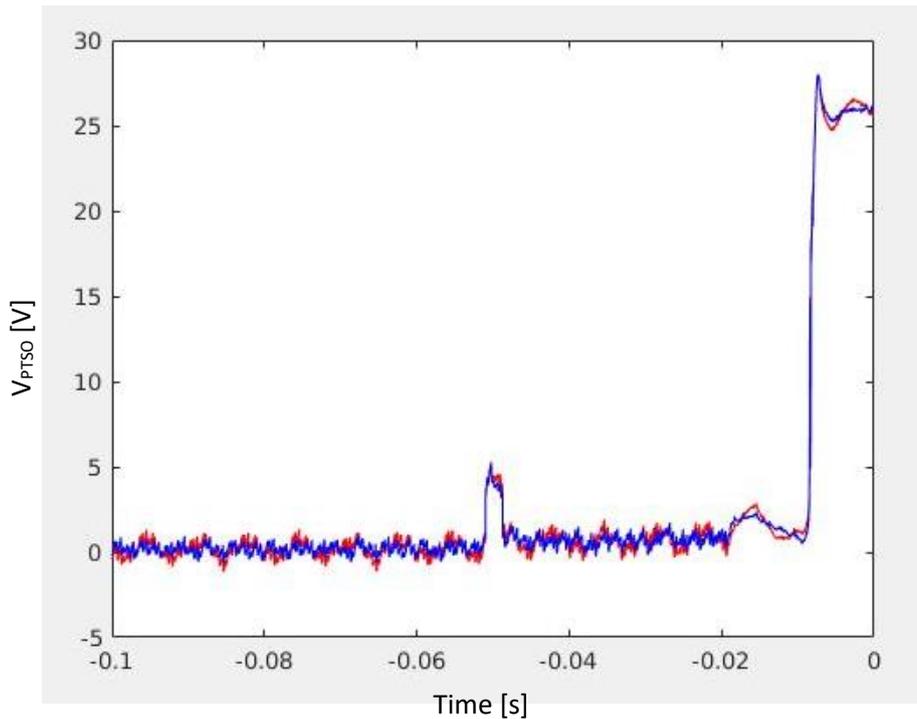


Fig. 5.8: grafico  $V_{PTISO}$  filtrata ( $t < 0s$ )

La curva blu è il segnale filtrato a 50 Hz e a 150Hz,  
la curva rossa è il segnale pulito solo dai 50 Hz

Sul grafico della corrente magnetizzante ci sono due fasi da considerare:

X: fase finale della carica, i convertitori a tiristori portano la corrente al valore di riferimento

Y: i convertitori vengono spenti a -20ms, la corrente scende per le perdite resistive (a -8ms anche l'apertura dei contatti dei PTISO e i relativi archi contribuiscono a far diminuire la corrente)

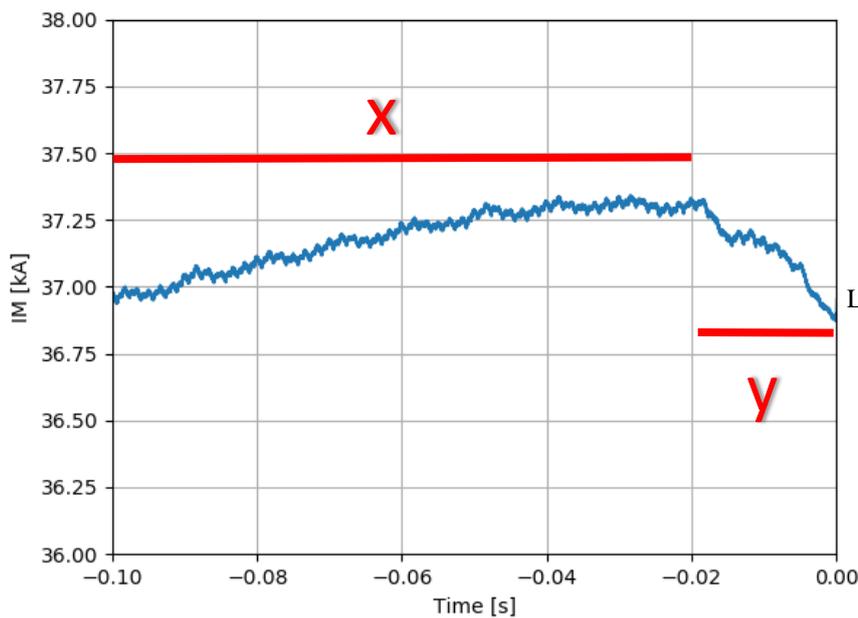


Fig. 5.9: grafico  $I_M$  ( $t < 0s$ )  
La scala dei tempi è concorde a quella dei segnali della  $V_{PTISO}$

Viene quindi scritto uno script per calcolare quattro dati per ogni impulso significativo:

- la corrente media tra -0.08 e -0.06s (zona blu nella figura)
- la corrente media tra -0.04 e -0.02s (zona rossa nella figura)
- la tensione media tra -0.08 e -0.06s
- la tensione media tra -0.04 e -0.02s

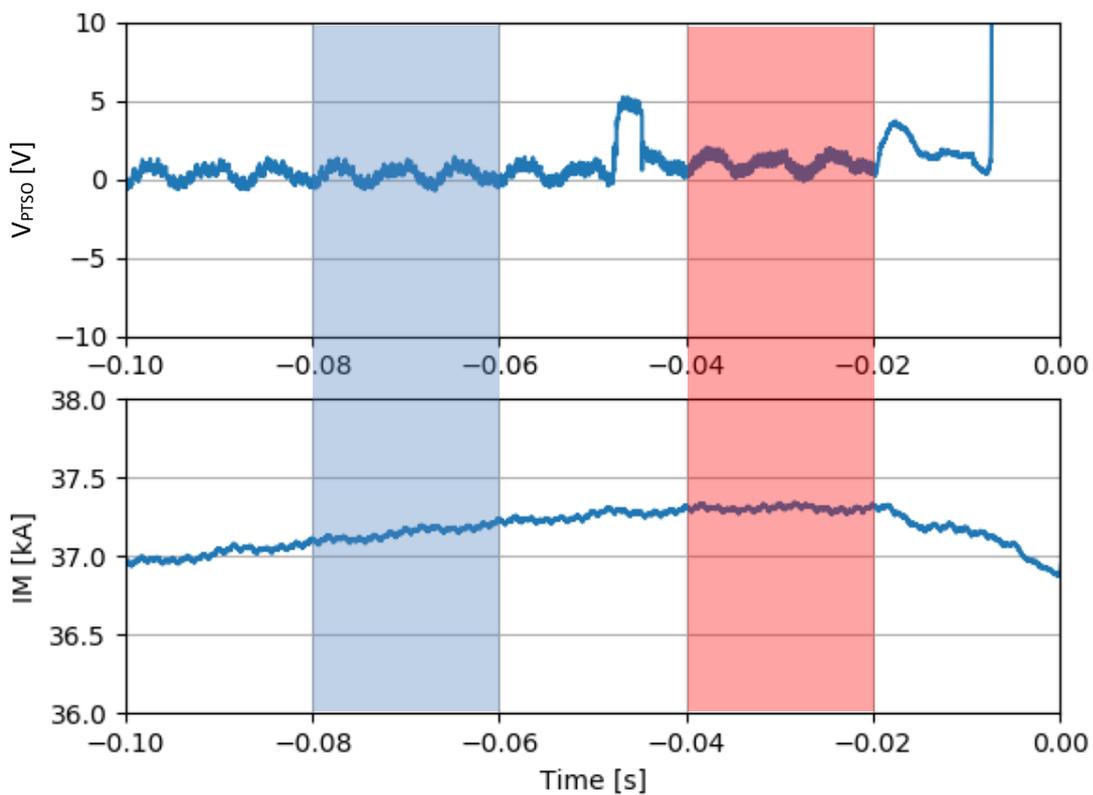


Fig. 5.10: grafico  $V_{PTISO}$  e  $I_M(t < 0s)$

Sono evidenziati i due intervalli presi in considerazione

```
%% CALCOLO TENSIONE MEDIA IN 2 MOMENTI
%% Calcolo quindi la media di V_filter da -0.08 a -0.06 [s]

t1_1 = -0.08; %% istanti in cui voglio fare la media
t2_1 = -0.06;
[TV_t1_1,~] = find(tV > t1_1,1);
[TV_t2_1,~] = find(tV > t2_1,1);
V_filter_1 = V_filter(TV_t1_1:TV_t2_1,1);
V_close_1 = sum(V_filter_1)/(TV_t2_1-TV_t1_1+1);

%% Calcolo quindi la media di V_filter da -0.04 a -0.02 [s]
```

## Capitolo 5 – Acquisizione Dati

```
t1_2 = -0.04; %% istanti in cui voglio fare la media
t2_2 = -0.02;
[TV_t1_2,~] = find(tV > t1_2,1);
[TV_t2_2,~] = find(tV > t2_2,1);
V_filter_1 = V_filter(TV_t1_2:TV_t2_2,1);
V_close_2 = sum(V_filter_1)/(TV_t2_2-TV_t1_2+1);

%% CALCOLO CORRENTE MEDIA IN 2 MOMENTI
%% Calcolo quindi la media di IM da -0.08 a -0.06 [s]

[TI_t1_1,~] = find(tI > t1_1,1);
[TI_t2_1,~] = find(tI > t2_1,1);
IM_1 = IM(TI_t1_1:TI_t2_1,1); %% IM media da t = -0.08 > -0.06
I_close_1 = sum(IM_1)/(TI_t2_1-TI_t1_1+1);

%% Calcolo quindi la media di IM da -0.04 a -0.02 [s]

[TI_t1_2,~] = find(tI > t1_2,1);
[TI_t2_2,~] = find(tI > t2_2,1);
IM_2 = IM(TI_t1_2:TI_t2_2,1); %% IM media da t = -0.04 > -0.02
I_close_2 = sum(IM_2)/(TI_t2_2-TI_t1_2+1);
```

Costruendo il grafico corrente tensione possiamo estrapolare il valore della resistenza di contatto. Il valore della resistenza di contatto sarà infatti il valore del coefficiente angolare della retta che unisce i due punti della caratteristica I-V, il primo fa riferimento alla conduzione in parallelo PTSO-PTSB e il secondo alla sola conduzione del PTSO, fig. 5.11

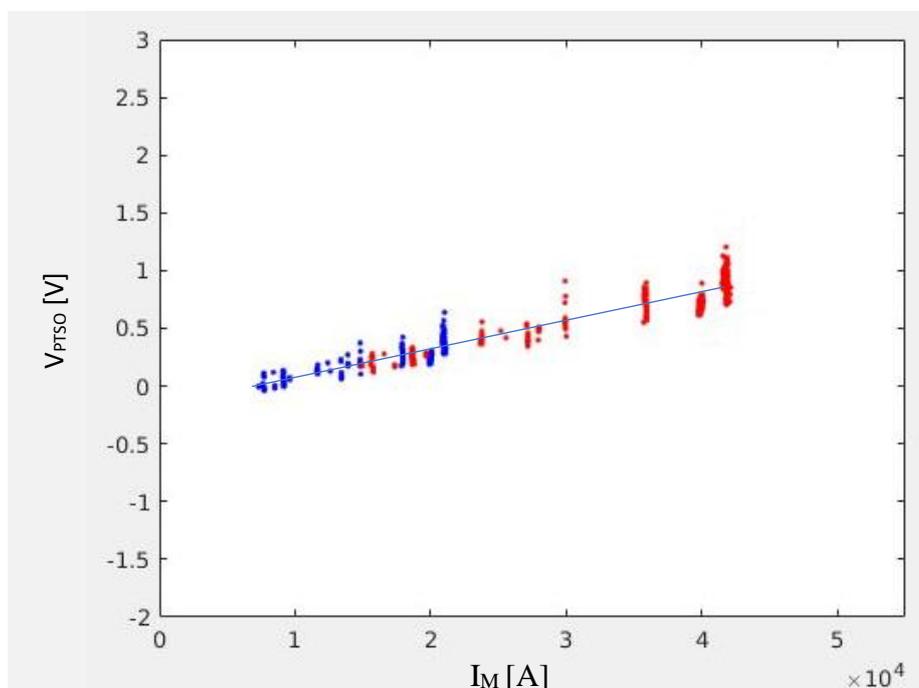


Fig. 5.11: grafico  $I_M$ - $V_{PTSO}$  ( $t < 0s$ )

È evidenziato il fit lineare per la stima di  $R_{cont}$

In blu i parametri tra -0.08 e -0.06, in rosso i parametri tra -0.04 e -0.02

Dal grafico della corrente magnetizzante notiamo inoltre che il valore della corrente si è quasi stabilizzato nella soglia tra -0.1ms e 0ms, quindi considerando la corrente perfettamente equi partita tra PTSO e PTSB  $I_{close_1} = I_M/2$  e  $I_{close_2} = I_M$

Per calcolare la resistenza puntualmente quindi si fa riferimento alla seguente formula:

$$R_{PTSO} = \frac{V_{close_2} - V_{close_1}}{I_{close_2} - I_{close_1}/2} = \frac{V_{close_2} - V_{close_1}}{I_M - I_M/2} \quad (5.1)$$

La parte destra dell'equazione 5.1 può essere scritta grazie all'ipotesi secondo la quale la  $I_{PTSO}$  e la  $I_{PTSB}$ . Tale affermazione non è mai vera, ma si dimostra essere una buona approssimazione della realtà fisica. Infatti, gli interruttori PTSB sono stati scelti uguali ai PTSO proprio per avere una ripartizione pressoché equivalente della  $I_M$  per abbattere il parametro  $I^2t$ .

### 5.2.2 Parametri a contatti aperti (-10ms < t < 0s)

Dalla caratteristica della corrente e della tensione nel range -10ms < t < 0s vengono identificati i parametri dell'arco elettrico causato dall'apertura dei contatti del PTSO, fig. 5.12

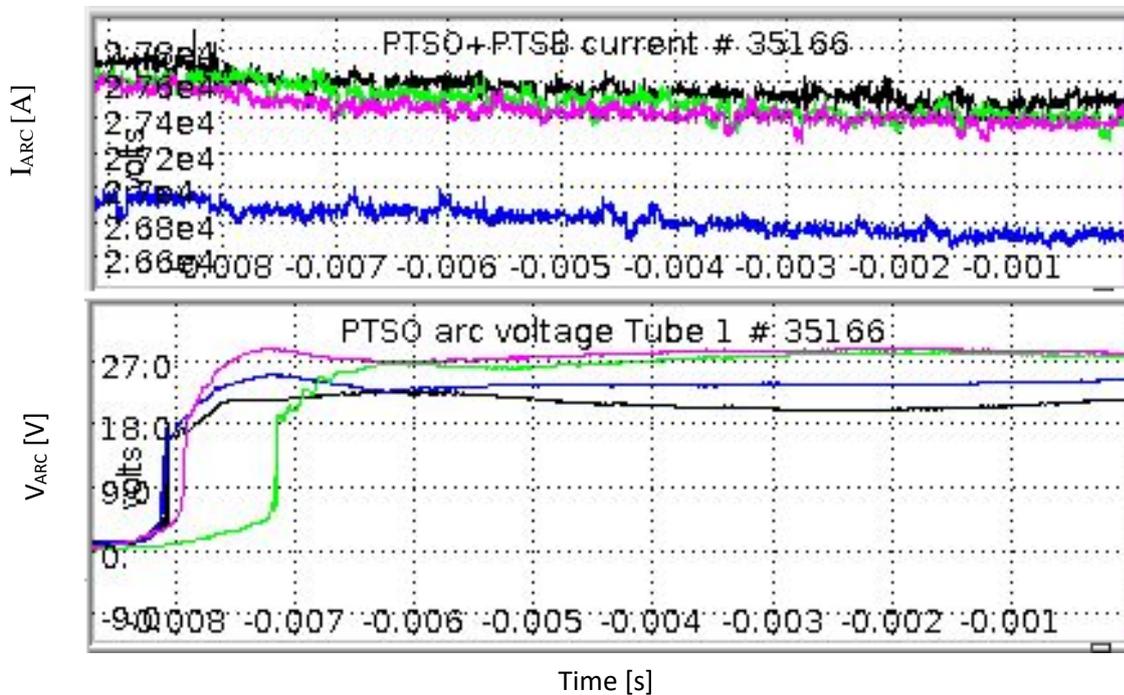


Fig. 5.12: grafico  $I_{arc}$  e  $V_{arc}$  (-0.008 < t < 0s)

Ai fini dell'analisi delle performance dell'interruttore è fondamentale capire l'evolversi della caratteristica dell'arco elettrico all'interno dei contatti dei PTSO. Infatti, un cambiamento della caratteristica corrente-tensione dell'arco può fornire informazioni importanti in merito allo stato dell'interruttore, alla sua effettiva capacità di continuare ad interrompere correnti di questa ampiezza. Ipotizziamo il sistema dell'arco dentro il tubo in vuoto come un circuito formato da un generatore di tensione e una resistenza in serie. In figura 5.13 si nota come effettivamente la caratteristica corrente-tensione in questo range sia assimilabile ad una retta, il cui intercetta sia la tensione a vuoto dell'arco ( $V_0$ ) ed il coefficiente angolare l'effettiva resistenza dell'arco elettrico ( $R_{arc}$ ).

Si andrà quindi ad analizzare l'evoluzione di questi due parametri durante la vita operativa di ogni interruttore. Si nota inoltre che in questo range di tempo la  $I_M$  e la  $V_{PTSO}$  rimangono circa costanti.

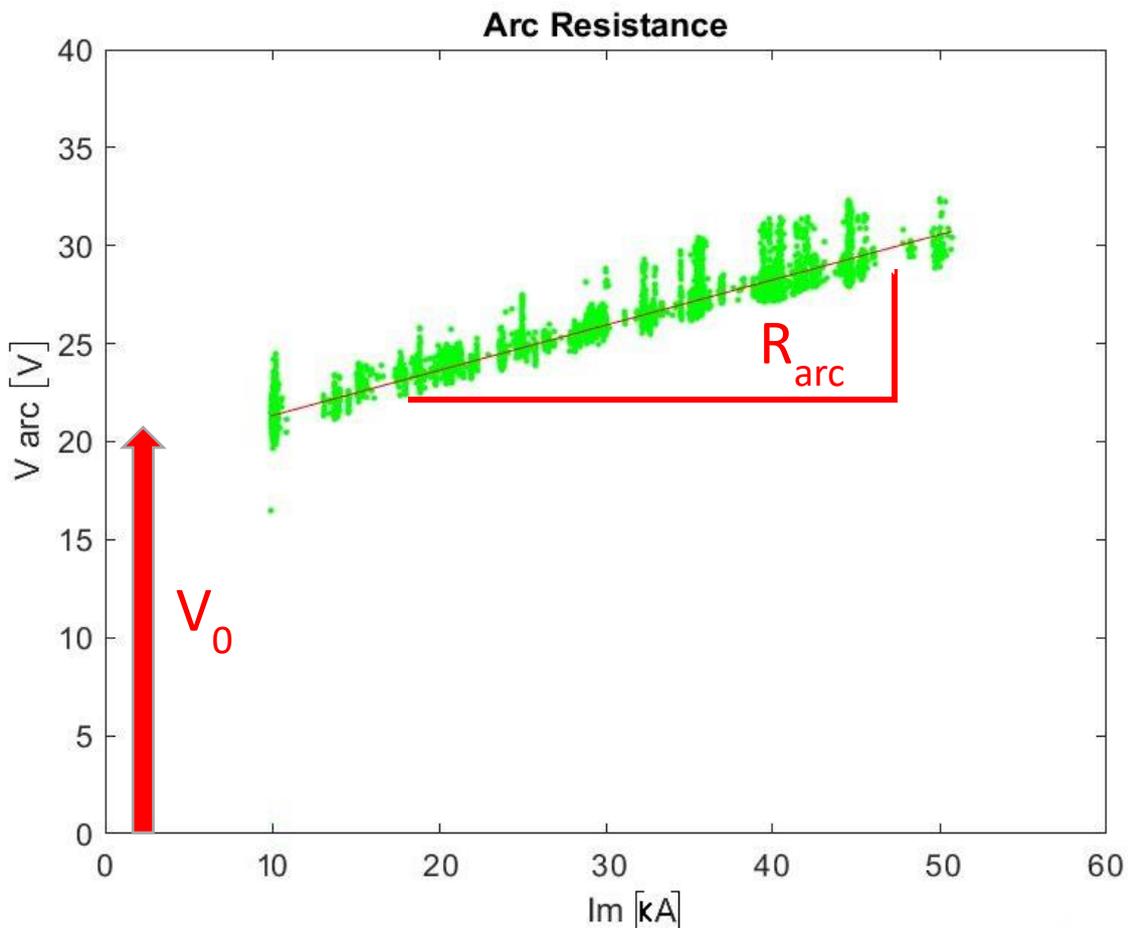


Fig. 5.13: grafico  $I_M$ - $V_{arc}$  ( $-0.008 < t < 0s$ )

È evidenziato il fit lineare per la stima di  $R_{ARC}$  e la stima di  $V_0$

### 5.2.3 Parametri dopo scarica banco PTCB

Dopo la scarica e il raggiungimento dello zero-corrente artificiale sui PTSO la corrente magnetizzante fluisce interamente sulle resistenze PTRB. Questo per generare la variazione di tensione voluta nell'avvolgimento magnetizzante per indurre lo start-up della corrente di plasma, come da fig. 5.15

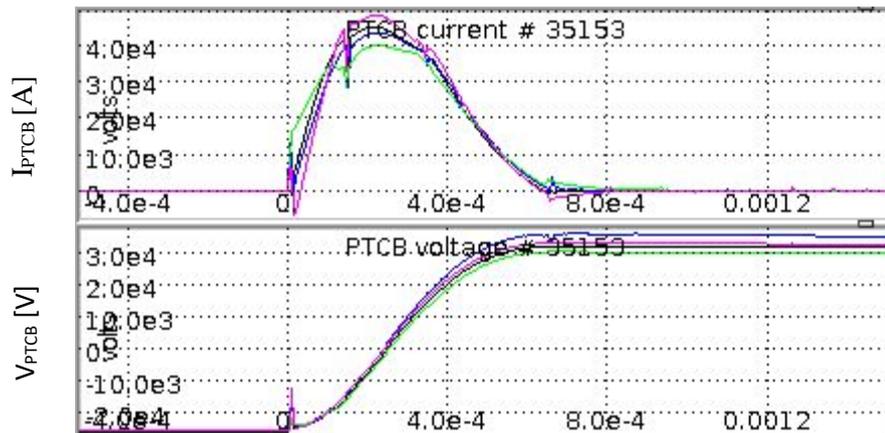


Fig. 5.14: grafico  $I_{PTCB}$  e  $V_{PTCB}$  ( $t > 0$ s)

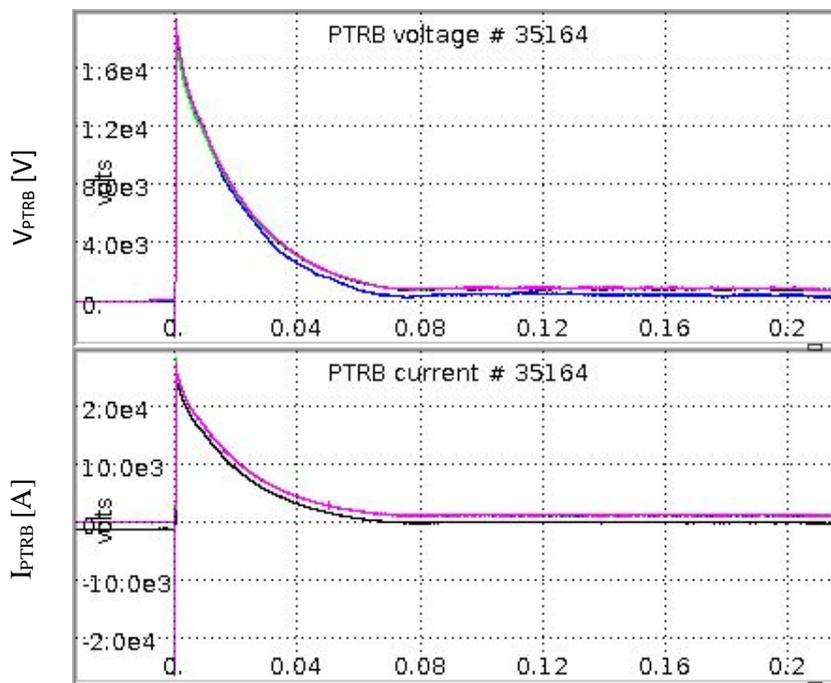


Fig. 5.15: grafico  $I_{PTRB}$  e  $V_{PTRB}$  ( $t > 0$ s)

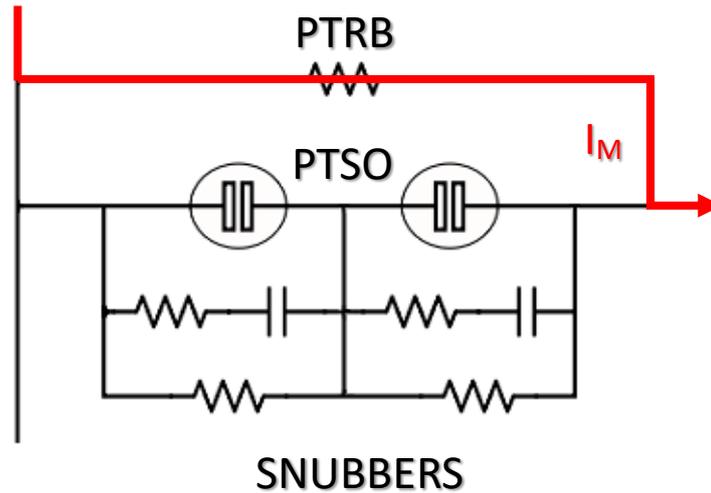


Fig. 5.16: schema circuitale semplificato ( $t > 0s$ )

Vi è tuttavia la possibilità, come già trattato, di un *restrike*, sotto forma di arco elettrico, negli interruttori PTSO.

Durante la storia di quasi ogni unità si sono presentati dei ri-inneschi dell'arco durante l'apertura del VCB, a livello di forma d'onda li possiamo notare dall'abbattimento improvviso della  $V_{PTSO}$  dovuto al cortocircuito (fig. 5.17).

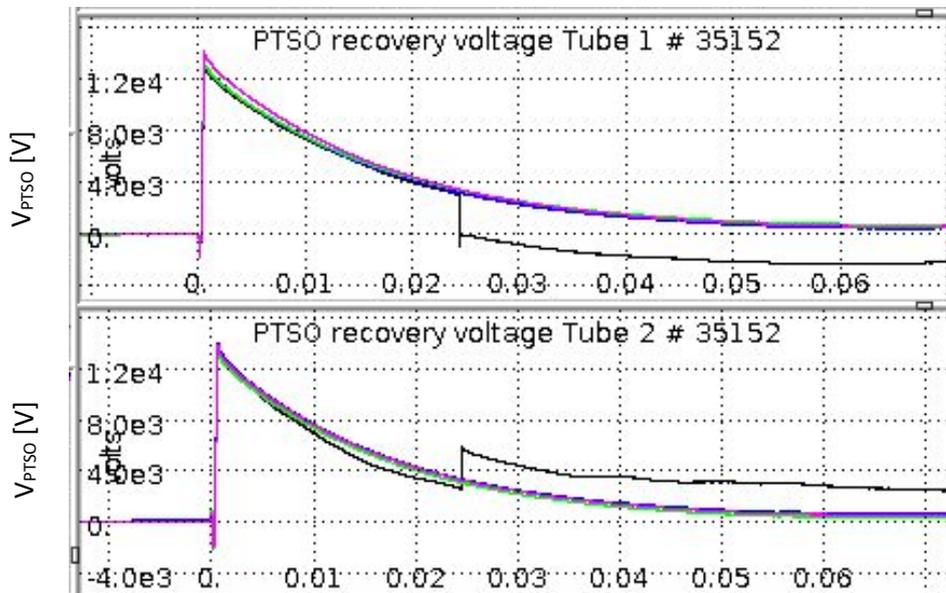


Fig. 5.17: forma d'onda *restrike* PTSO01-01 pulse 35152

Tali ri-inneschi si sono verificati sempre e solo su uno dei due interruttori in serie, e mai su entrambi in contemporanea. Questo avviene grazie alla configurazione in serie di ogni unità (sia PTSO che PTSB) e al fatto che ognuno dei due VCBs che compongono l'unità è progettato per sostenere l'intera

tensione di 35 kV, nonostante operi per la maggior parte del suo utilizzo a metà della tensione applicata sulla serie. Se non ci fosse il secondo tubo in parallelo, nonostante la bassa percentuale di *restrike* sulla totalità degli impulsi, ogni *restrike* corrisponderebbe ad un venir meno dell'interruzione di corrente, con conseguente intervento del sistema di protezione.

Tuttavia, ognuno di questi 'Fault' genera una sollecitazione sull'interruttore in cui l'arco è stato estinto, tale unità infatti deve sostenere una tensione di ripristino nell'istante del *restrike* doppia rispetto a quella applicata normalmente (fig. 5.18).

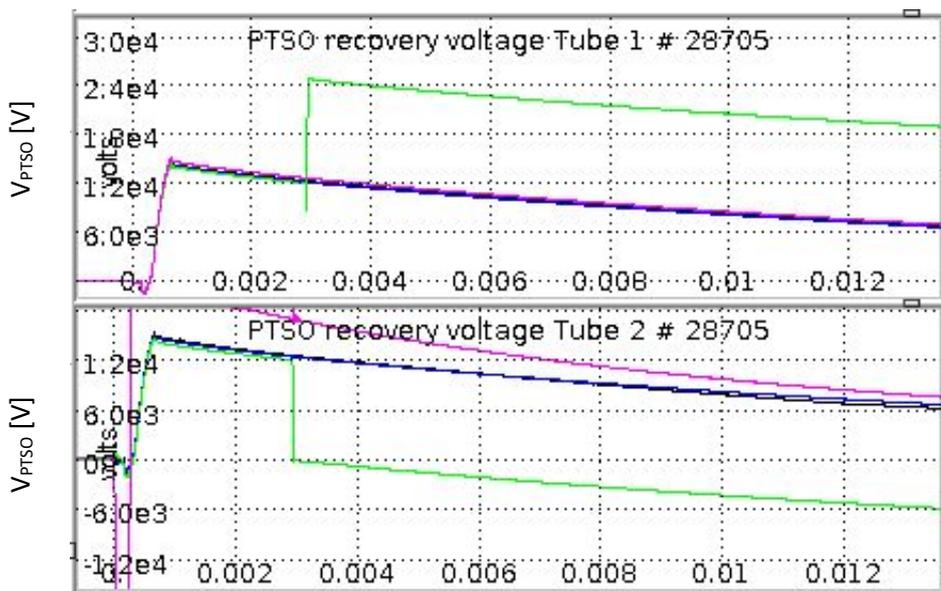


Fig. 5.18: forma d'onda *restrike* PTSO03-02 pulse 28705

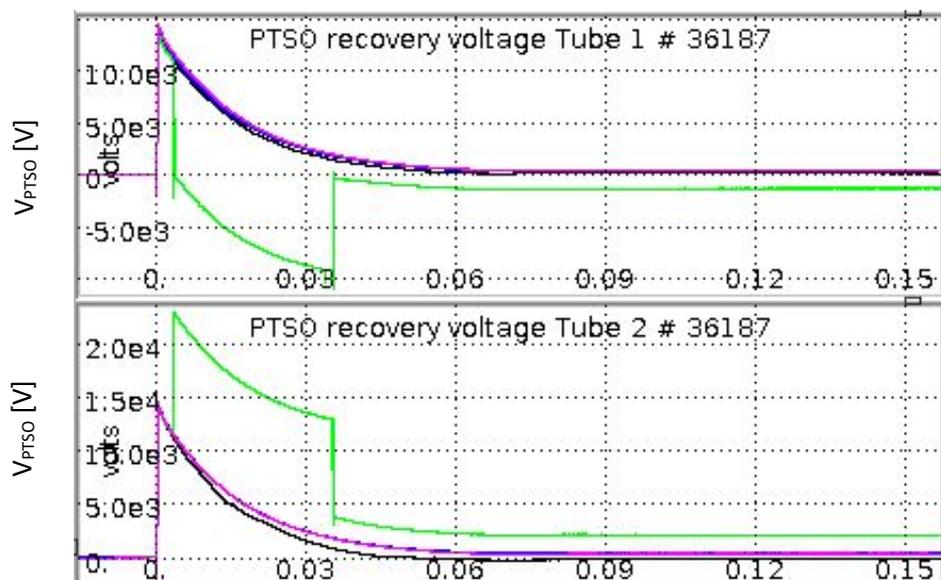


Fig. 5.18: forma d'onda *restrike* PTSO03-01 pulse 36187

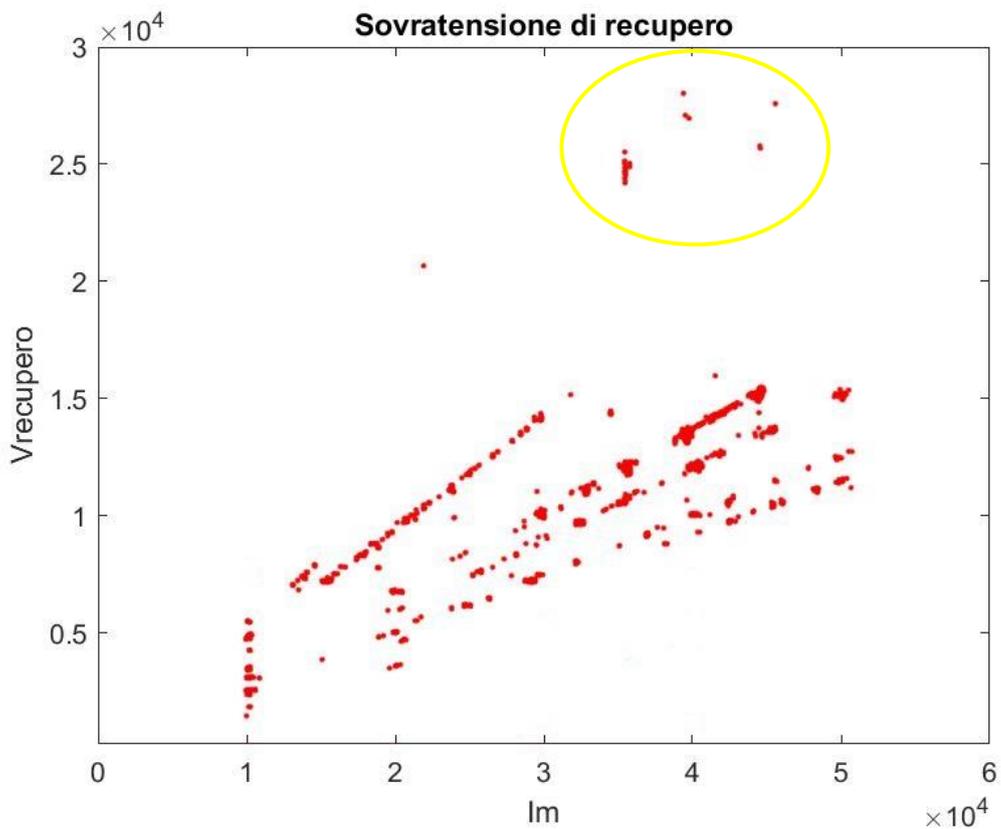


Fig. 5.19: Recovery Voltage Tube 09

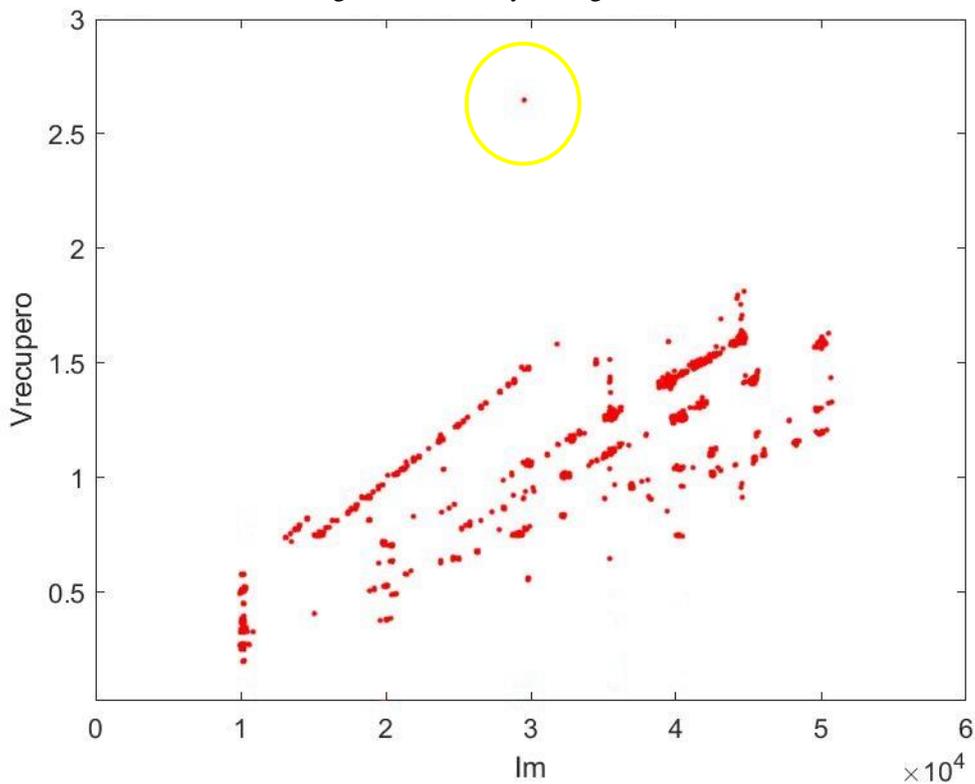


Fig. 5.20: Recovery Voltage Tube 10

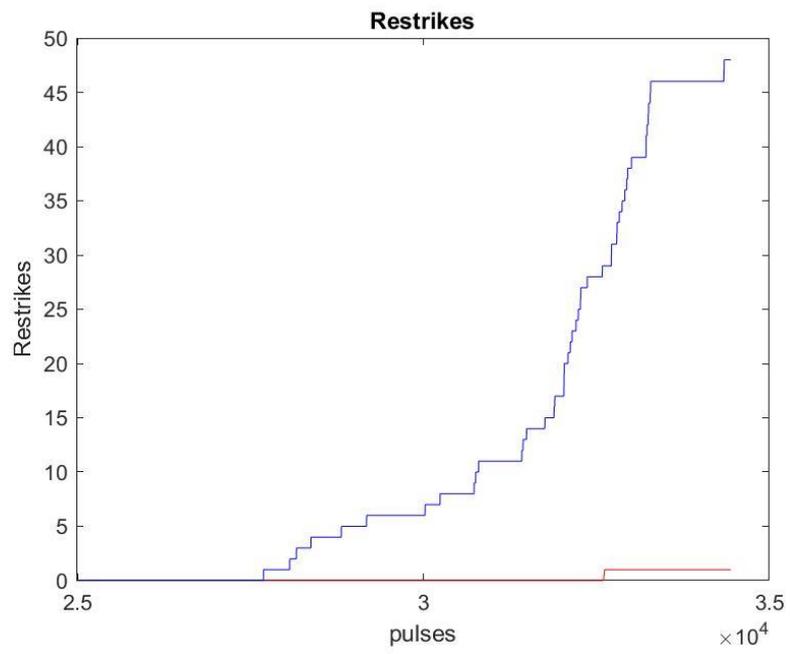


Fig. 5.21: Restrikes Tube 09 (curva rossa) - Tube 10 (curva blu)



# Capitolo 6

## Analisi dati

### 6.1 Divisione in campagne sperimentali

Per l'analisi dati, gli impulsi sono stati divisi secondo la campagna sperimentale a cui appartengono. Durante la fase sperimentale di RFX-mod gli esperimenti sono stati normalmente svolti su campagne annuali intervallate da shut-down estivi, come descritto dalla tabella XIII.

Table XIII: Divisione in campagne sperimentali

Campaign	Date	First Pulse	I <sub>M</sub> Max	I <sub>M</sub> Avg	#Int
C08	05/09/2008	24984	50.7	27.6	1537
C09	24/09/2009	27103	50.7	32.8	1855
C11/1	10/02/2011	29353	44.6	29.4	539
C11/2	06/09/2011	30551	44.6	29.4	1557
C12	26/09/2012	32591	44.7	27.4	1109
C13	24/09/2013	34657	44.0	27.4	1258
C14	09/09/2014	36633	44.7	22.5	891
C15	08/09/2015	39053	41.3	32.7	189

Da tali dati sono stati eliminati tutti gli impulsi in modalità tokamak, nei quali, a differenza della configurazione RFP, non è presente l'apertura del circuito poloidale tramite VCBs per la generazione del flusso poloidale. Questi impulsi sono identificati e sottratti alla pool dei dati analizzati facendo riferimento al fatto che l'impulso di trigger del PTSO non viene generato in questa modalità.

Viene studiata la vita di ogni tubo a seconda della sua collocazione nell'impianto nelle 16 posizioni possibili. La notazione riporterà le iniziali PTSO o PTRB indicando la collocazione del tubo nel circuito principale o in quello in parallelo, il numero 01, 02, 03, 04 per indicare a quale dei quattro avvolgimenti per il campo magnetico poloidale si fa riferimento e la notazione -01 o -02 per indicare se è il primo o il secondo dei due interruttori in serie (p.e. la scrittura PTSO03-01 indica il primo interruttore dei due in serie del ramo 03 principale).

Si farà quindi riferimento agli impulsi effettuati su tale interruttore prendendo come campo di analisi gli impulsi consecutivi alla manutenzione e comprensivi dell'utilizzo del ramo in parallelo sulla totalità del circuito, ovvero gli impulsi successivi al 21/07/2008, numerati dal 24963 al 40000.

Lo scopo dell'analisi sarà infatti quello di verificare l'evoluzione di tali parametri durante tutto il regime operativo di ogni tubo. Il fine ultimo è quello di evidenziare, se presenti, variazioni nei parametri riconducibili ad un invecchiamento del tubo.

Si può notare dalla tabella XIV che l'upgrade del sistema tramite ramo in parallelo è stato testato sul PTSB04 per un'intera campagna sperimentale e poi ampliato a tutto l'esperimento.

Table XIV: Storia per unità PT

	ott-07	nov-07	dic-07	gen-08	feb-08	mar-08	apr-08	mag-08	giu-08	lug-08	ago-08	set-08	ott-08	nov-08	dic-08	ago-13	25/10/13	10/11/14	15/1/15
PTSO#1									09-10							22-25	38-40	26-35	26-35
PTSO#2							11-13	??			23-24					23-24	23-24	23-24	09-10
PTSO#3				18-20							12-16					12-16	12-16	12-16	12-16
PTSO#4			09-10								18-20					32-37	32-37	32-37	32-37
PTSB#1													11-13			11-13	11-13	11-13	11-13
PTSB#2																21-28	21-28	21-28	21-28
PTSB#3																38-40	22-25	22-25	22-25
PTSB#4																07-08	07-08	07-08	07-08
	16/10/07	20/11/07	6/12/07			25/3/08		5/5/08	19/6/08	21/7/08					9/12/08	24/9/13	25/10/13	10/11/14	15/1/15
	2282	23219	23431			23994		24323	24635	24963					25674	34657	34934	37045	37323

Nella tabella riassuntiva per ogni tubo identifica il numero di impulsi effettuati a correnti superiori ai 40kA, il valore della corrente massima registrato, il valore della corrente media sull'interruttore e il numero di *restrikes* della singola unità. Vengono considerate solamente le unità principali (PTSO), le unità secondarie (PTSB) possono essere ignorate in questo studio in quanto meno “stressate” durante il loro utilizzo.

Table XV: Riassunto per tubo

TUBE	Interruptions	Im > 40kA	Im Max	Im Avg	Restrikes	Notes
9	7481	1430	50.7	29.1	1	DisMESSo per usura
10	7481	1430	50.7	29.1	48	DisMESSo per usura
12	8935	1607	50.7	28.7	1	Lavora nei parametri
16	8935	1607	50.7	28.7	2	Lavora nei parametri
18	527	278	50.7	30.2	0	Tenuto come sostitutivo
20	527	278	50.7	30.2	0	Tenuto come sostitutivo
22	250	8	43.6	29.3	0	Usato nel circuito ausiliario
25	250	8	43.6	29.3	0	Usato nel circuito ausiliario
23	8041	1550	50.7	29.0	53	DisMESSo con l'unità 24
24	8041	1550	50.7	29.0	234	disMESSo (eccessivo numero di re-strike)
26	960	50	44.7	24.7	0	Lavora nei parametri
35	960	50	44.7	24.7	2	Lavora nei parametri
32	8405	1324	50.7	28.5	1	Lavora nei parametri
37	8405	1324	50.7	28.5	3	Lavora nei parametri
38	1132	170	44.0	26.3	16	DisMESSo con l'unità 40
40	1132	170	44.0	26.3	5	DisMESSo per corto-circuito

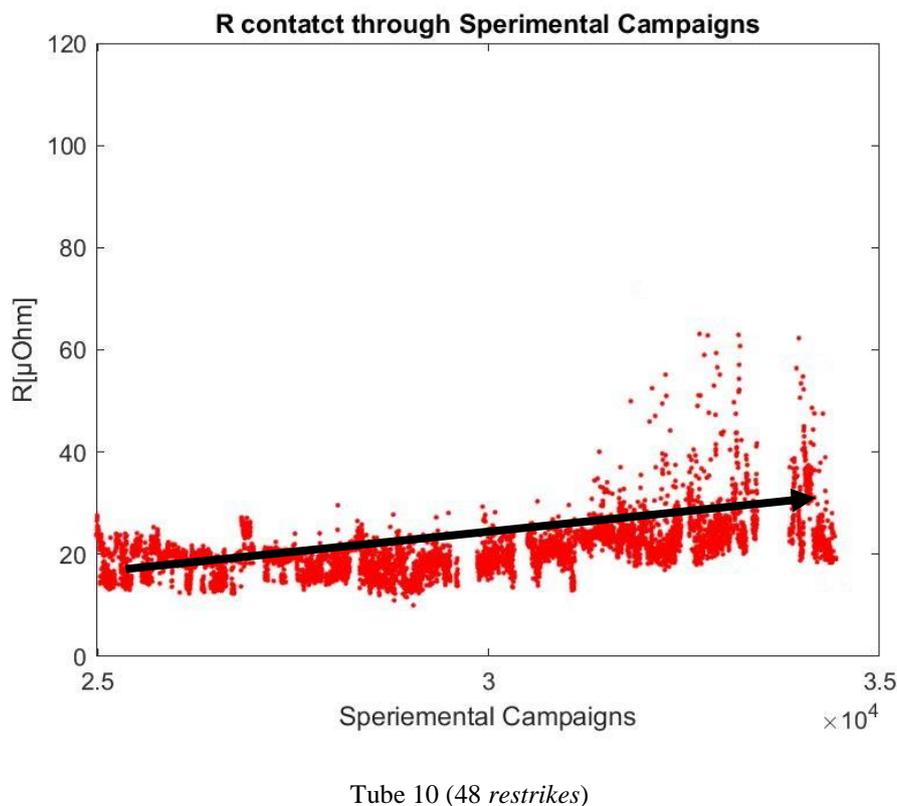
## 6.2 Parametri a contatti chiusi

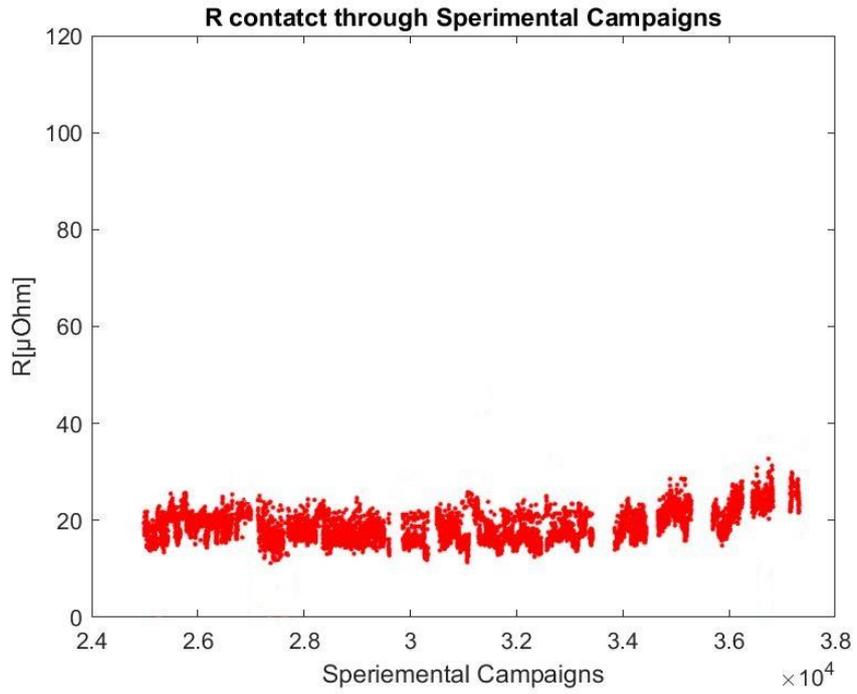
### 6.2.1 Resistenza di contatto

L'analisi sulla resistenza di contatto risulta di cruciale importanza ai fini del controllo degli interruttori in vuoto, infatti anche limitando il parametro di energia specifica  $I^2t$  con gli accorgimenti adottati con la modifica nel circuito poloidale, l'energia complessiva, aumentando il parametro di resistenza, aumenta anch'essa.

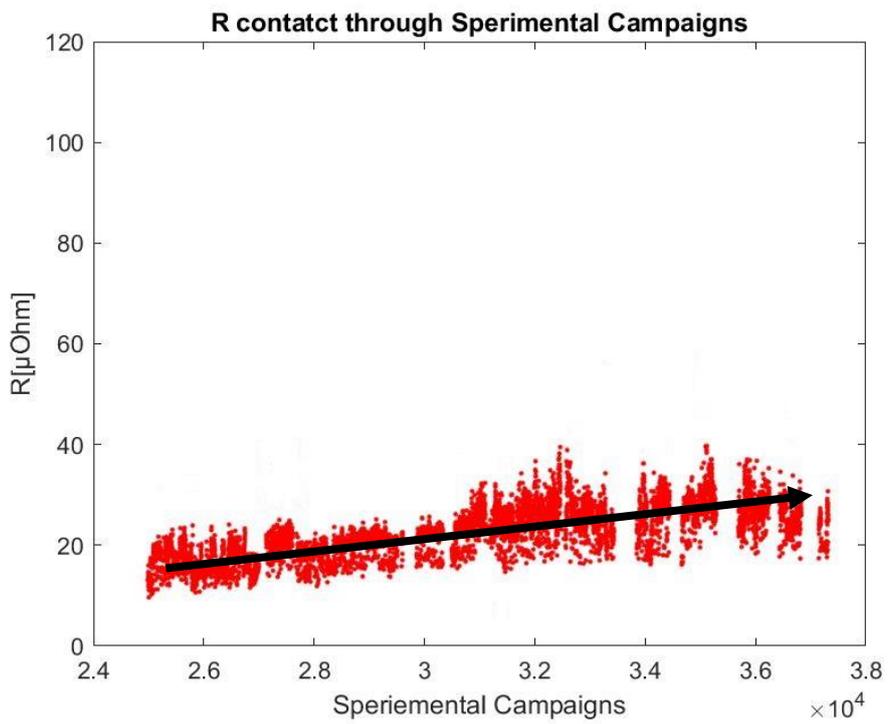
Dallo studio sulla resistenza di contatto sui tubi emerge una differenza tra le unità che hanno subito molteplici *restrikes* e quelle che invece ne hanno subiti pochi ( $< 10$ ). Si può infatti notare come, nelle unità che subiscono *restrikes*, la resistenza di contatto abbia un andamento crescente, rendendo quindi più rischioso il suo utilizzo, creando anche una maggior probabilità di ulteriori *restrikes*. Nelle unità dove il comportamento è normale il parametro della resistenza di contatto invece tende a rimanere pressoché costante.

#### 6.2.1.1 Unità con molteplici *restrikes*



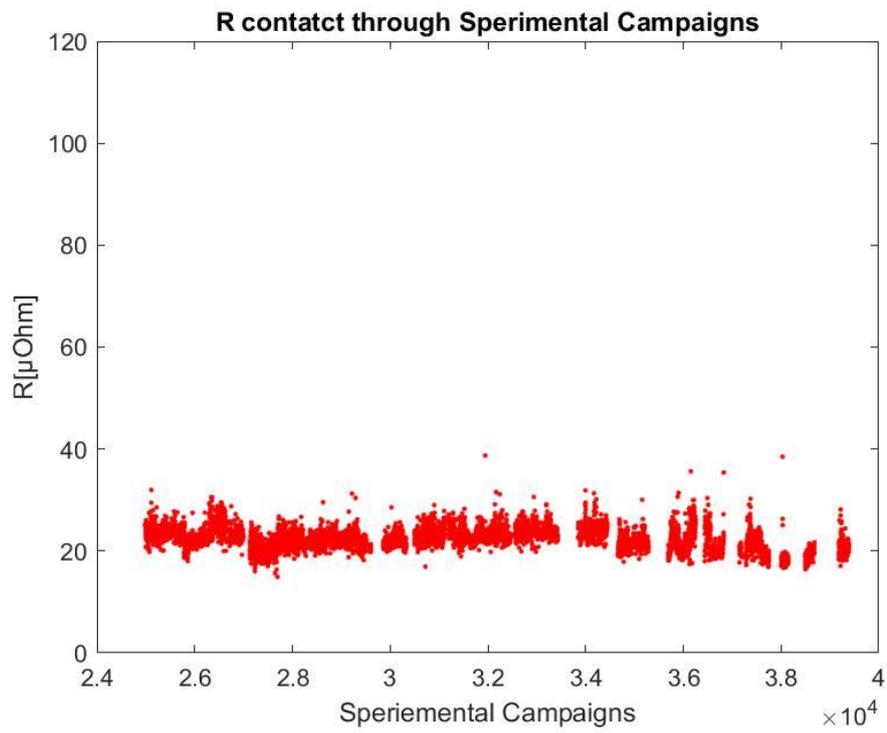


Tube 23 (53 *restrikes*)

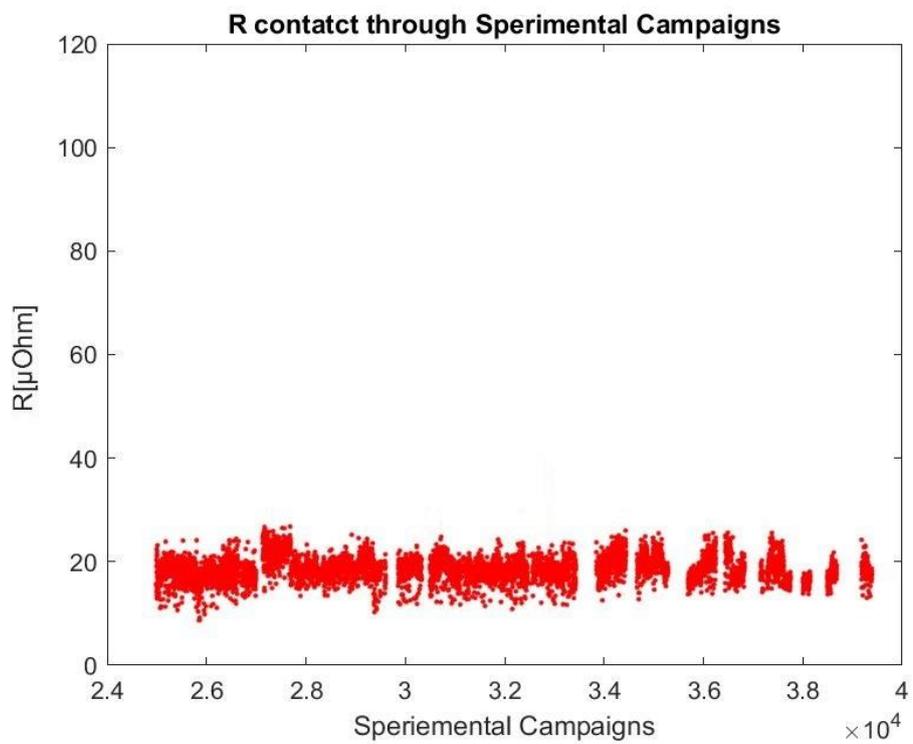


Tube 24 (234 *restrikes*)

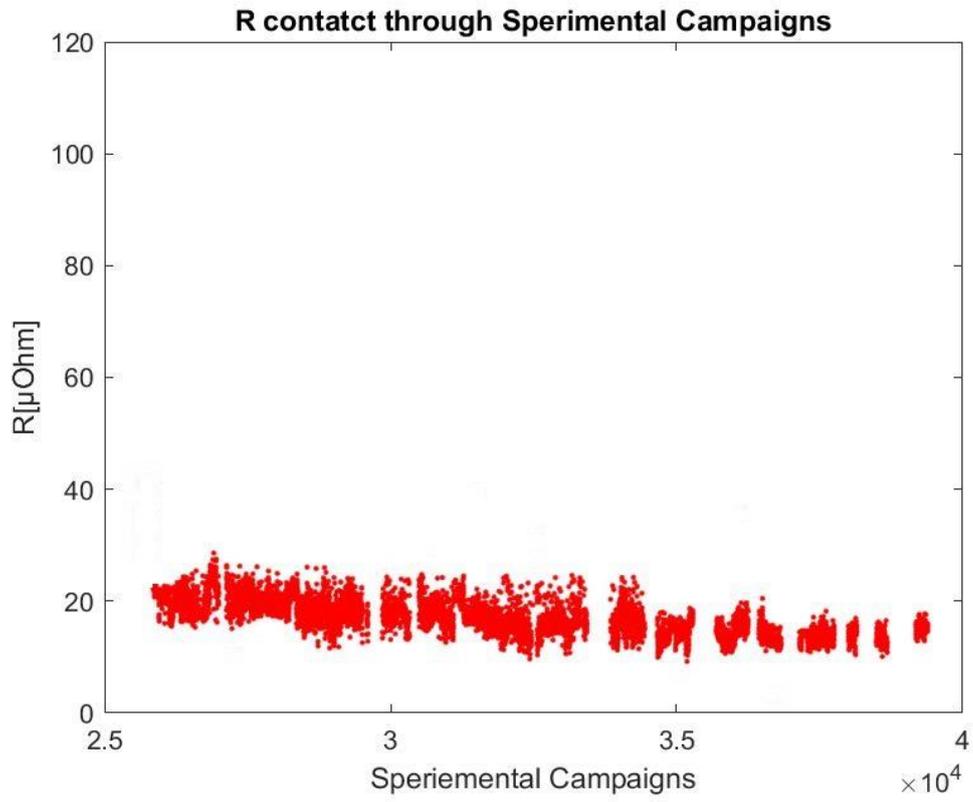
### 6.2.1.2 Unità con funzionamento corretto



Tube 12 (1 *restrike*)



Tube 16 (2 *restrikes*)

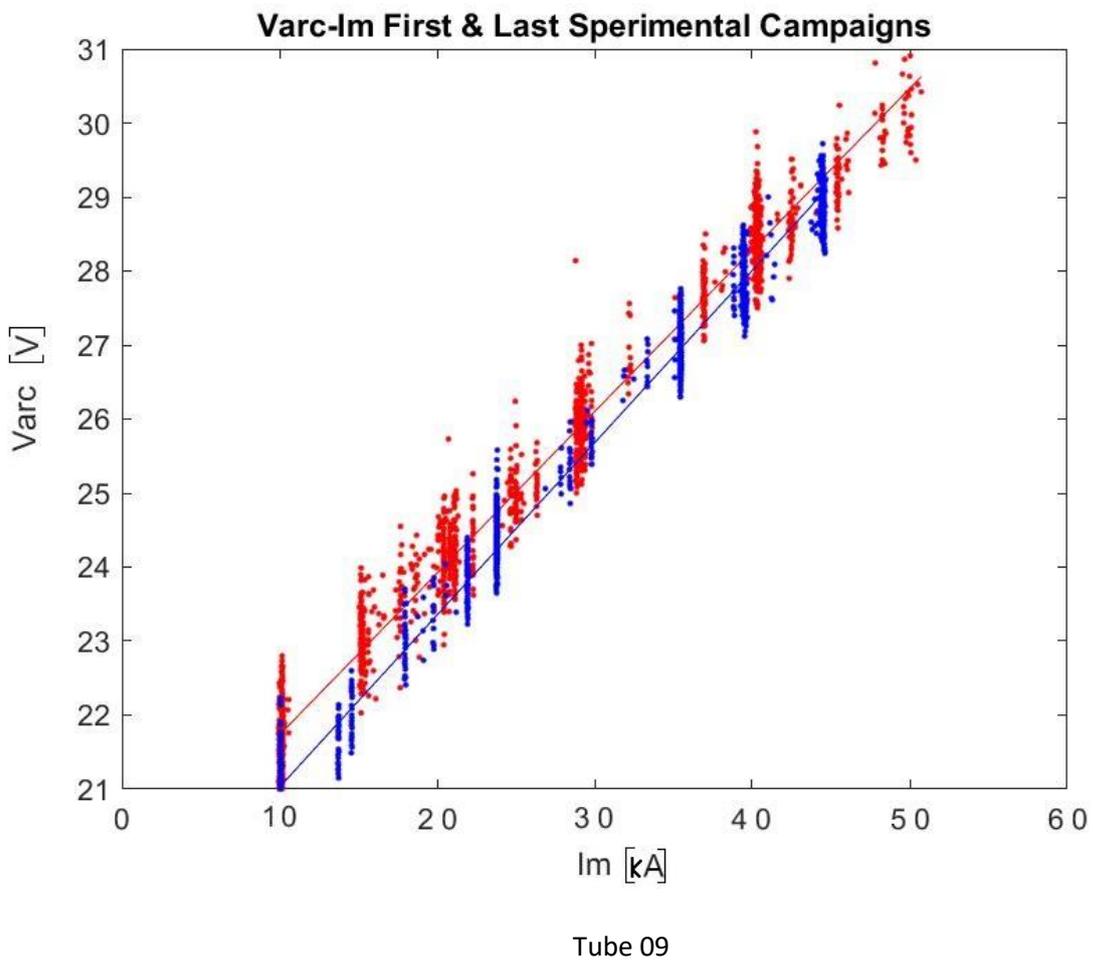


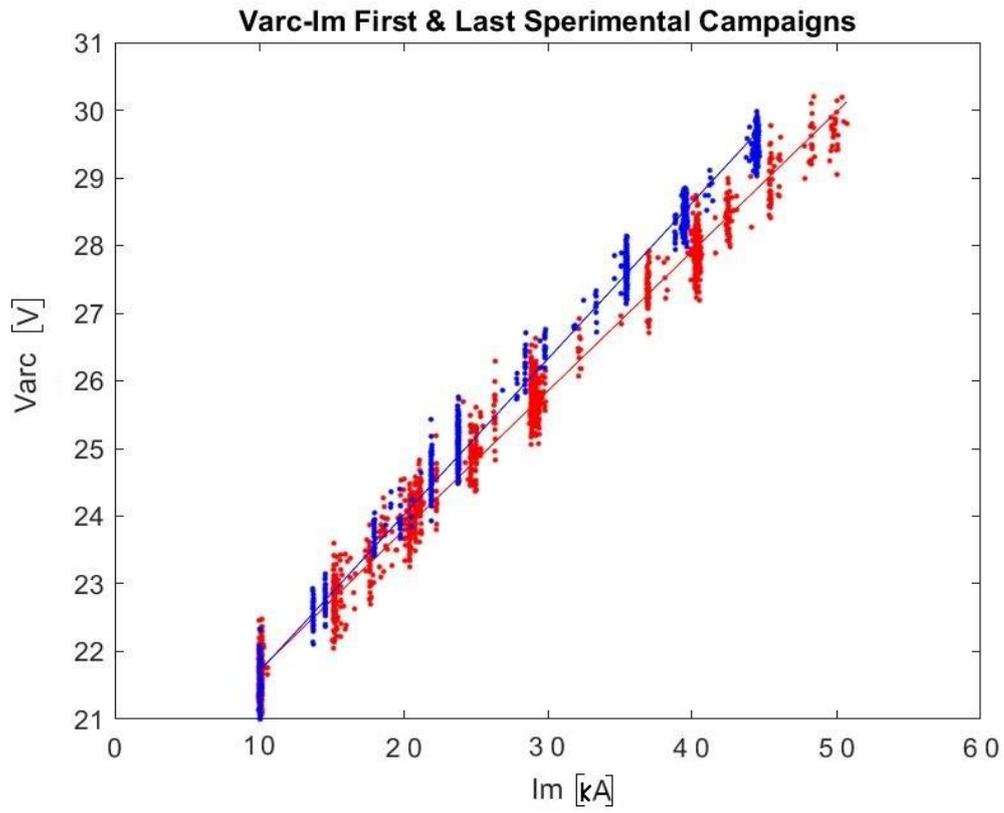
Tube 37 (3 restrikes)

## 6.3 Parametri a contatti aperti

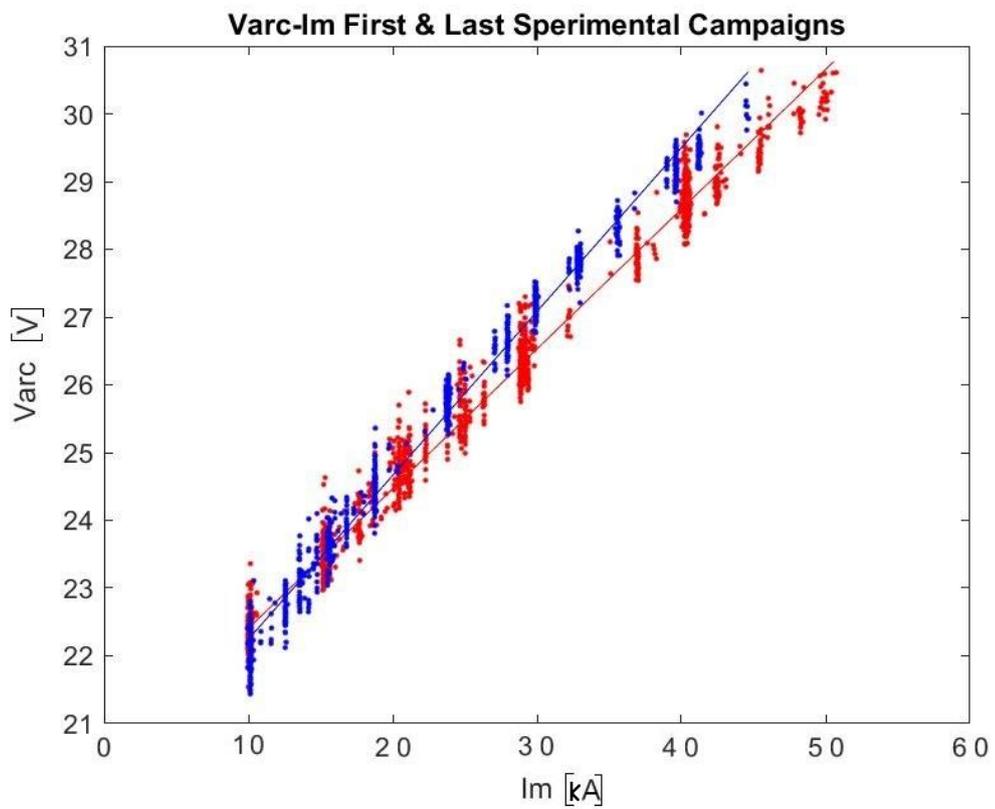
### 6.3.1 Evoluzione parametri arco

Vengono analizzate le caratteristiche I-V a contatti aperti nel primo e nell'ultimo set di impulsi, corrispondenti alla prima e all'ultima campagna sperimentale disponibile per ogni tubo. Nelle figure successive vengono riportati i grafici solo per i tubi aventi una quantità sufficiente di impulsi tale da garantire significato a questo tipo di analisi.

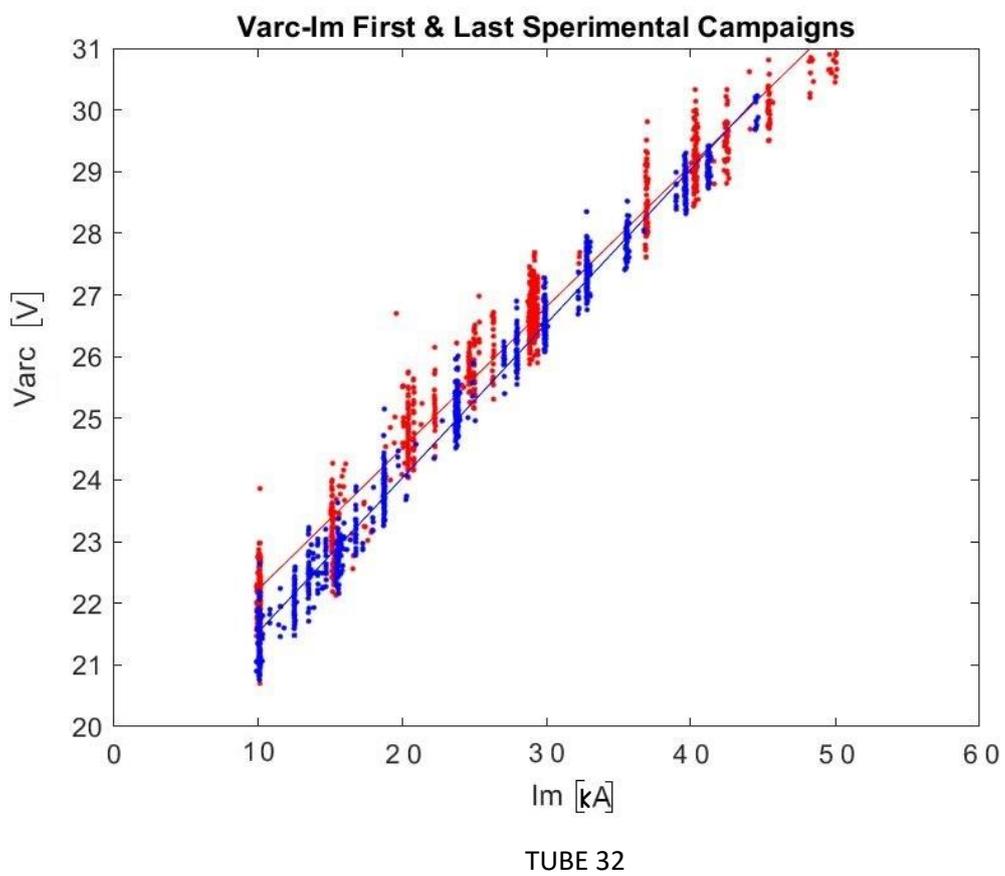
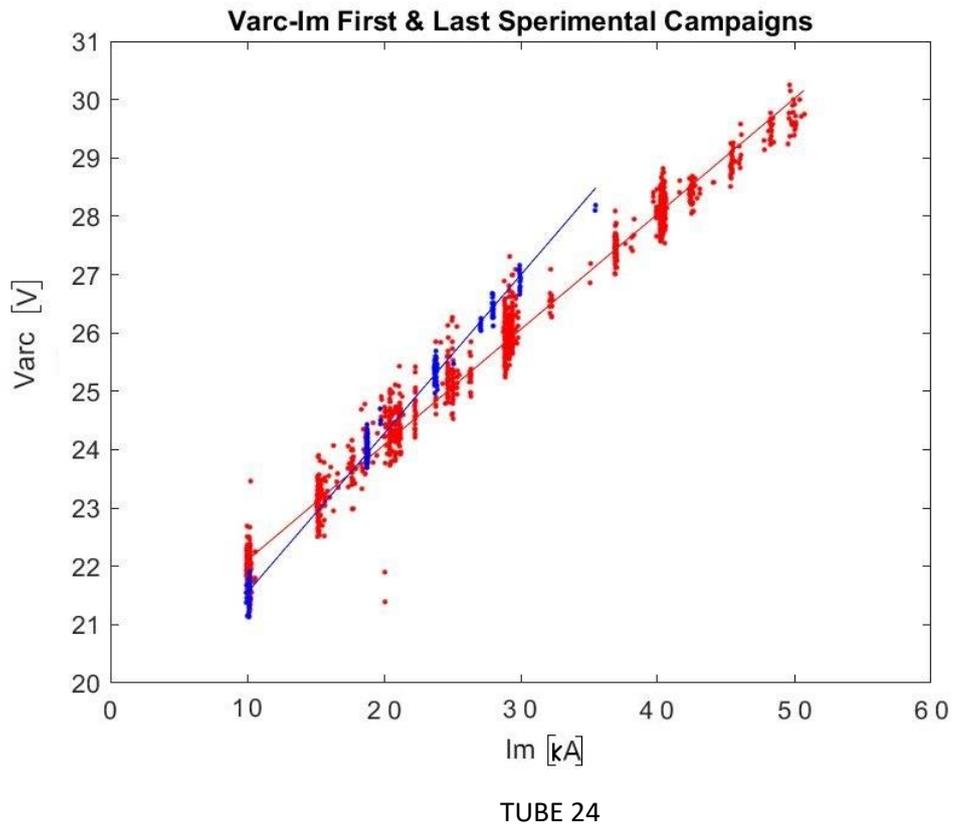




Tube 12



TUBE 16

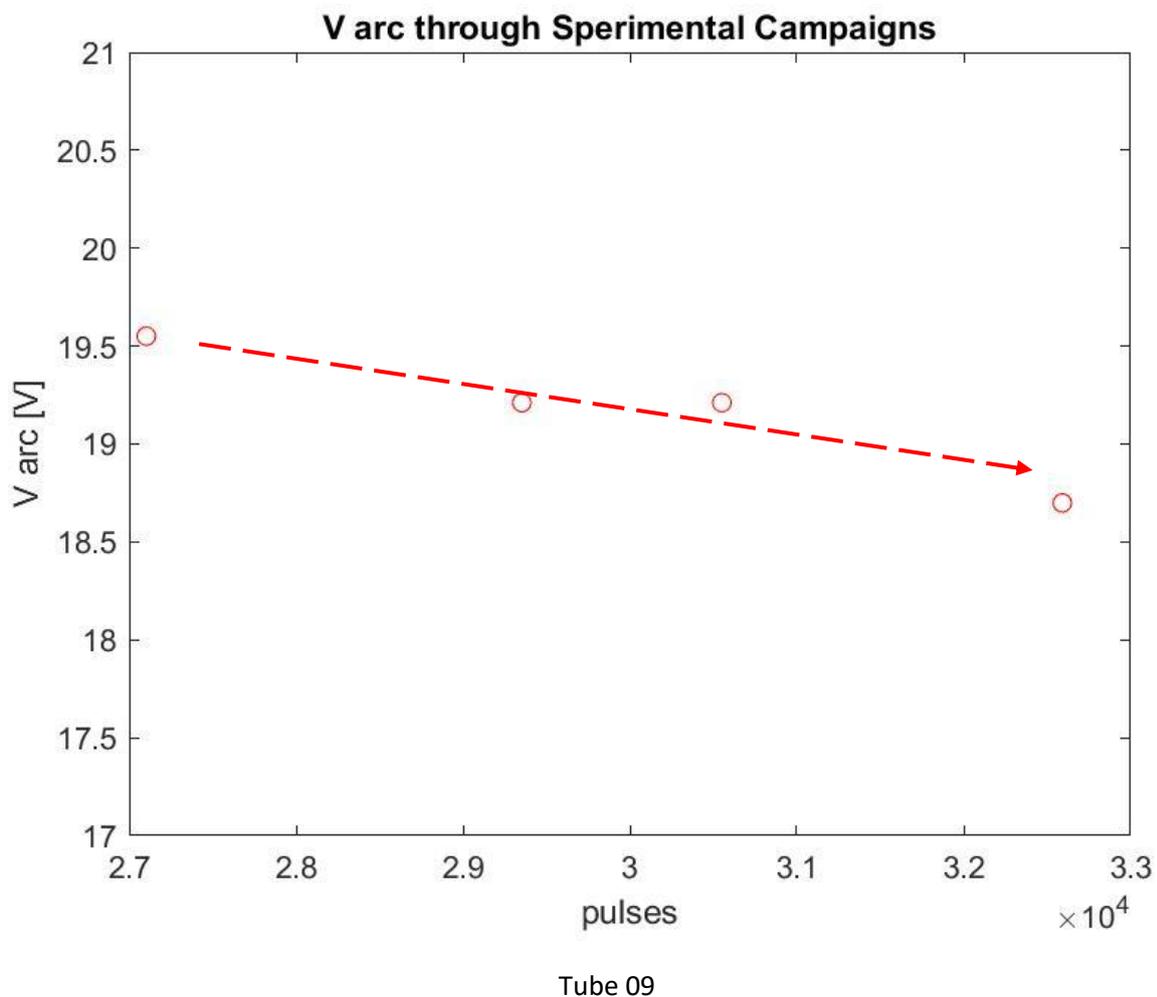


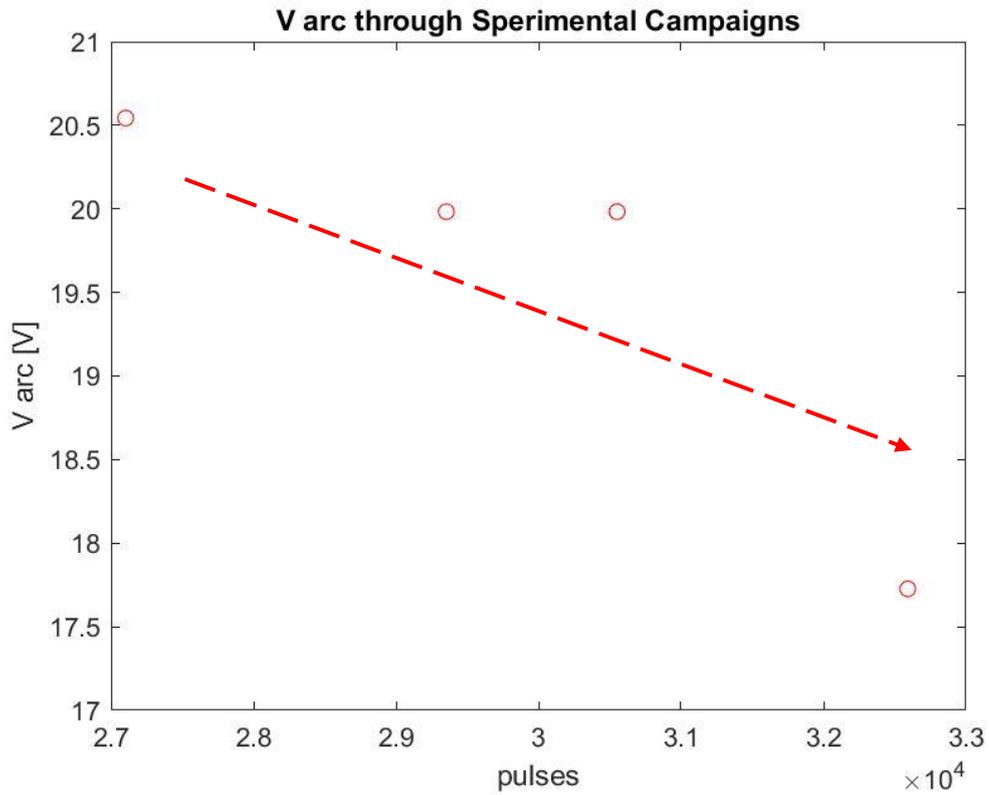
Si può notare una differenza importante presente in quasi tutti i tubi tra il primo set di impulsi e l'ultimo. La curva blu (ultima campagna sperimentale disponibile per il tubo scelto) ed in particolare il suo fit lineare presenta un intercetta più basso rispetto al fit rosso (prima campagna sperimentale disponibile per il tubo scelto), ovvero una tensione d'arco a vuoto minore, e una pendenza maggiore, corrispondente ad un aumento progressivo della resistenza d'arco.

Con l'utilizzo del tubo quindi possiamo affermare il riscontro di una diminuzione della tensione d'arco a vuoto e di un aumento della resistenza d'arco.

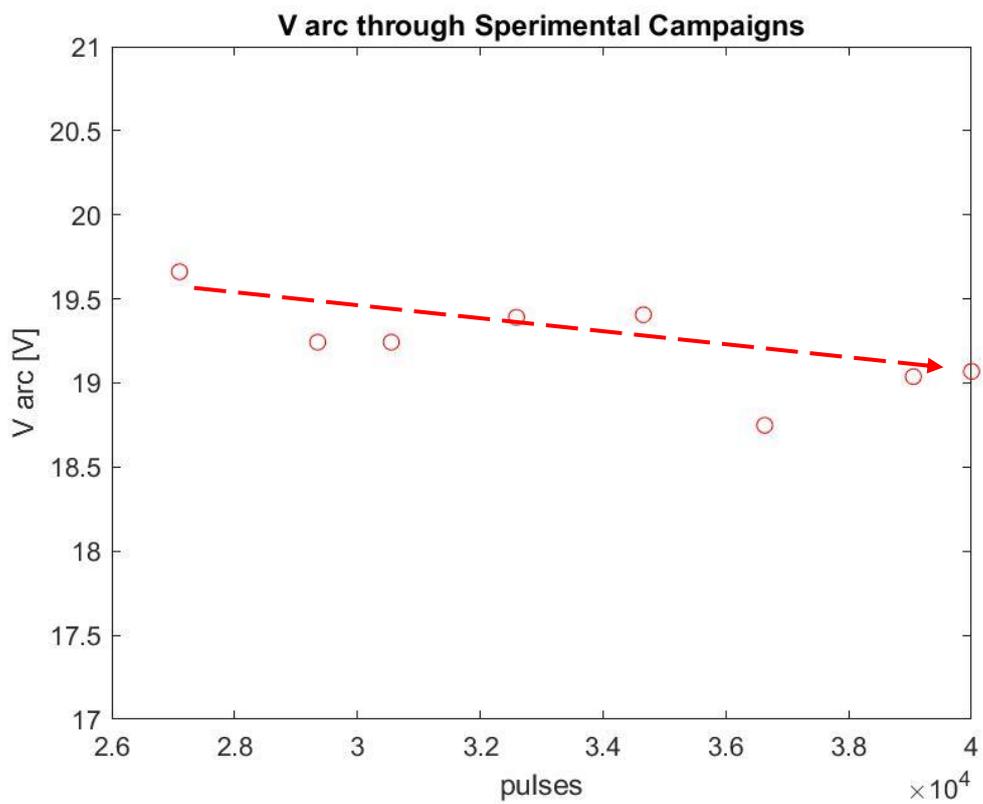
Per avere la riprova definitiva di questi due aspetti proponiamo l'andamento di questi due parametri calcolandoli durante tutte le campagne sperimentali di ogni tubo e facendone un grafico.

### 6.3.2 Tensione dell'arco

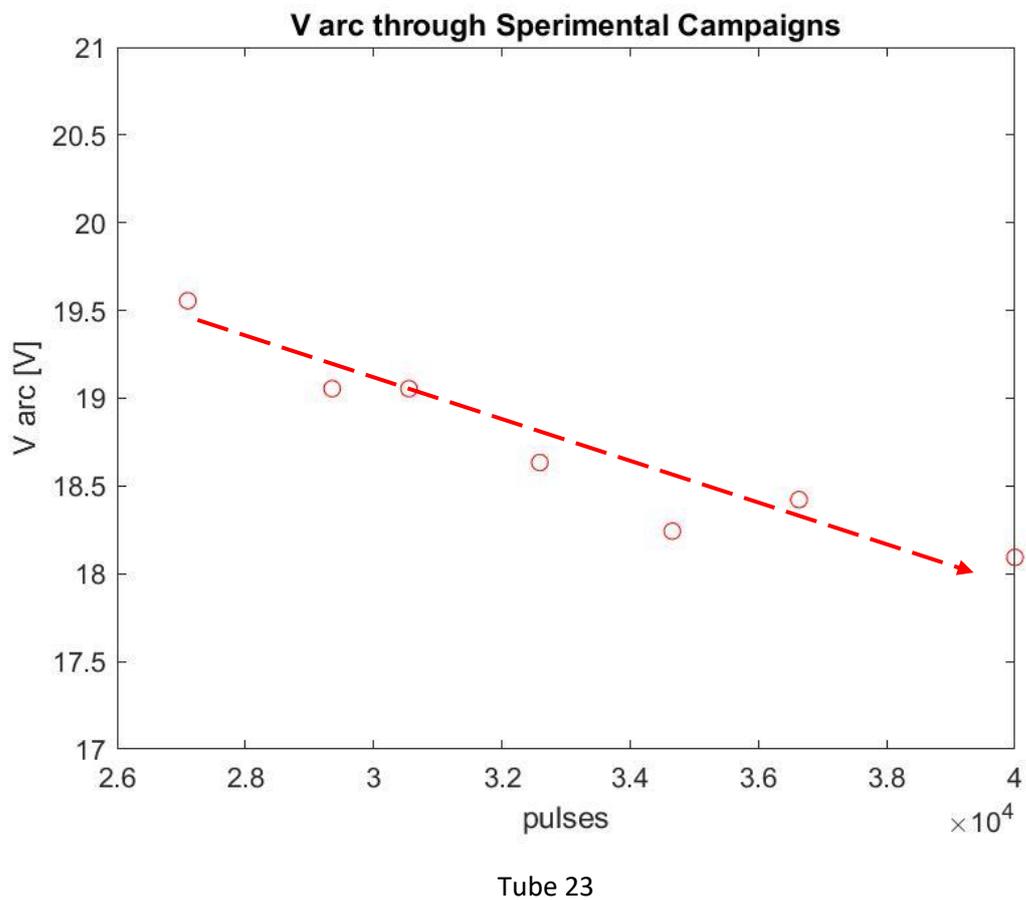
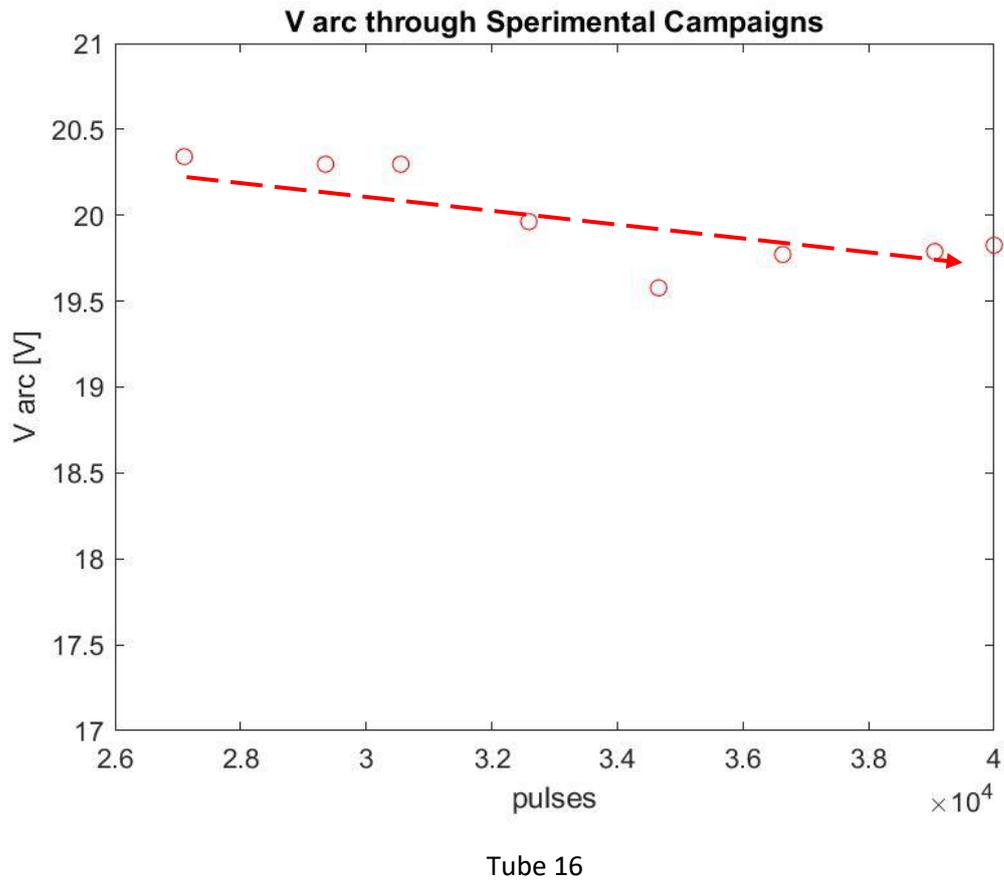


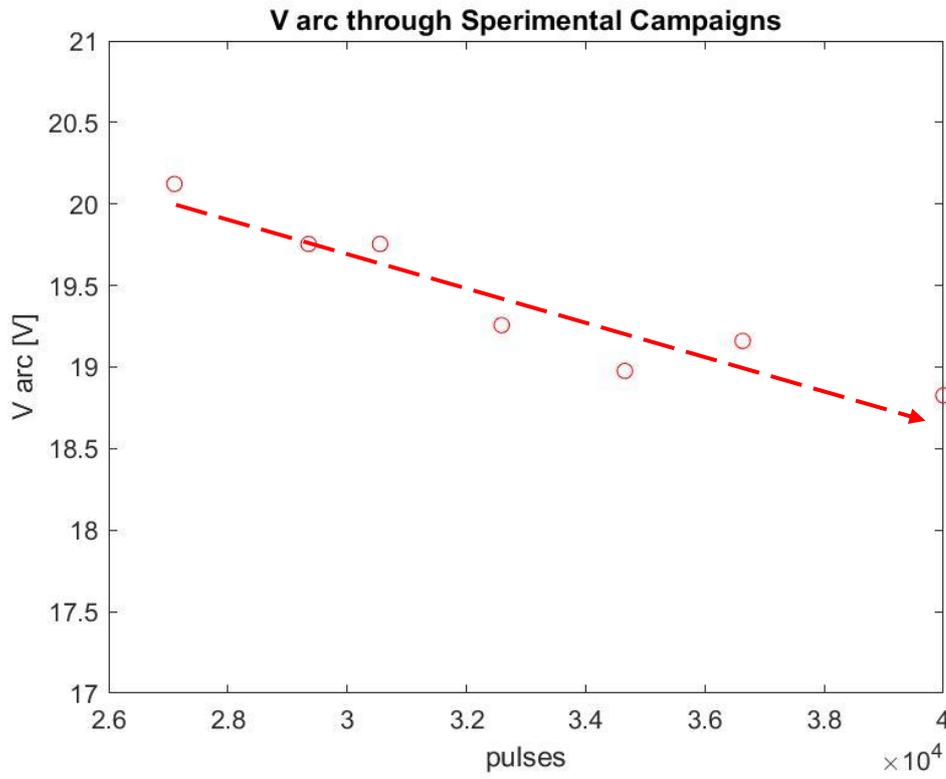


Tube 10

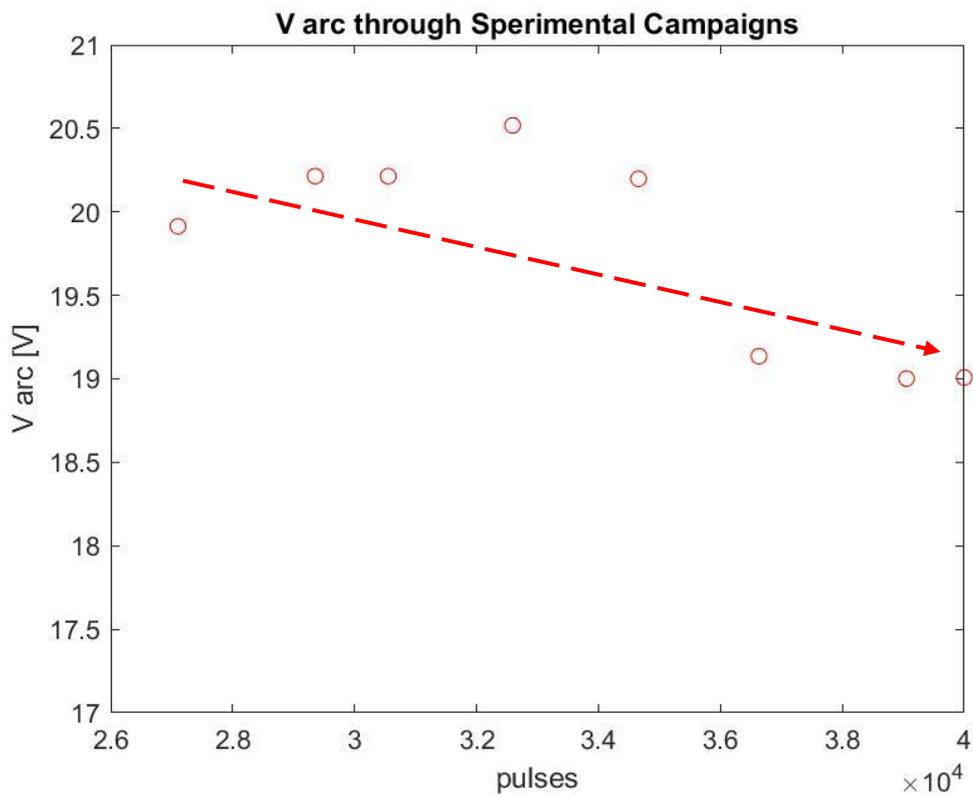


Tube 12

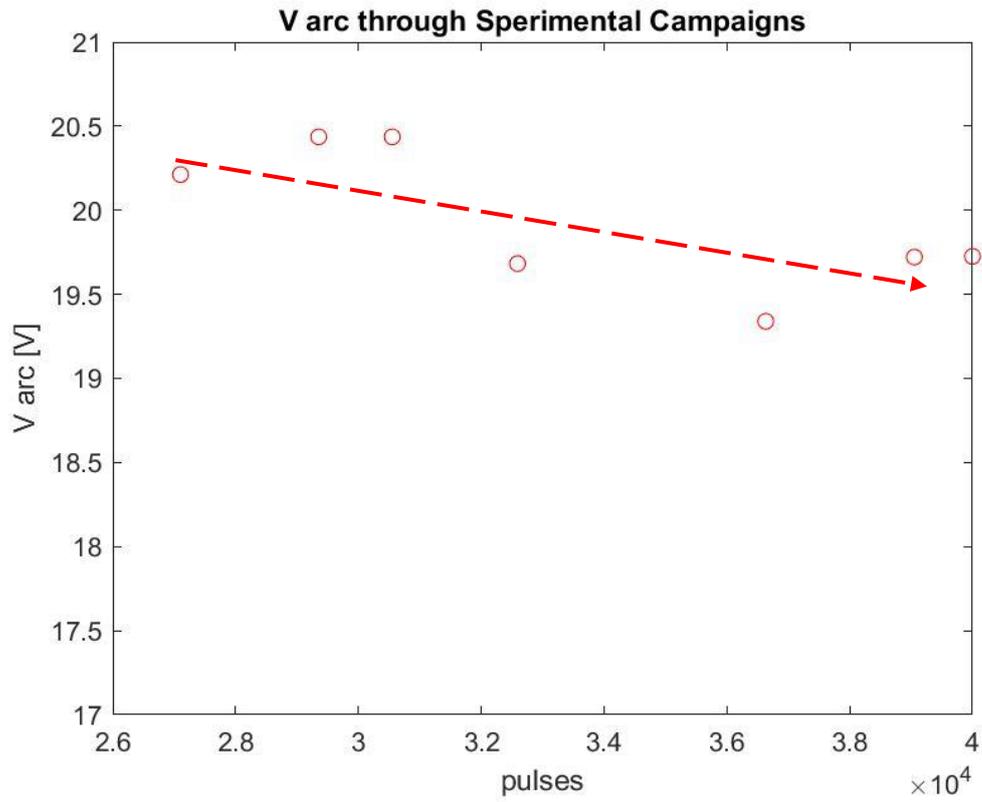




Tube 24

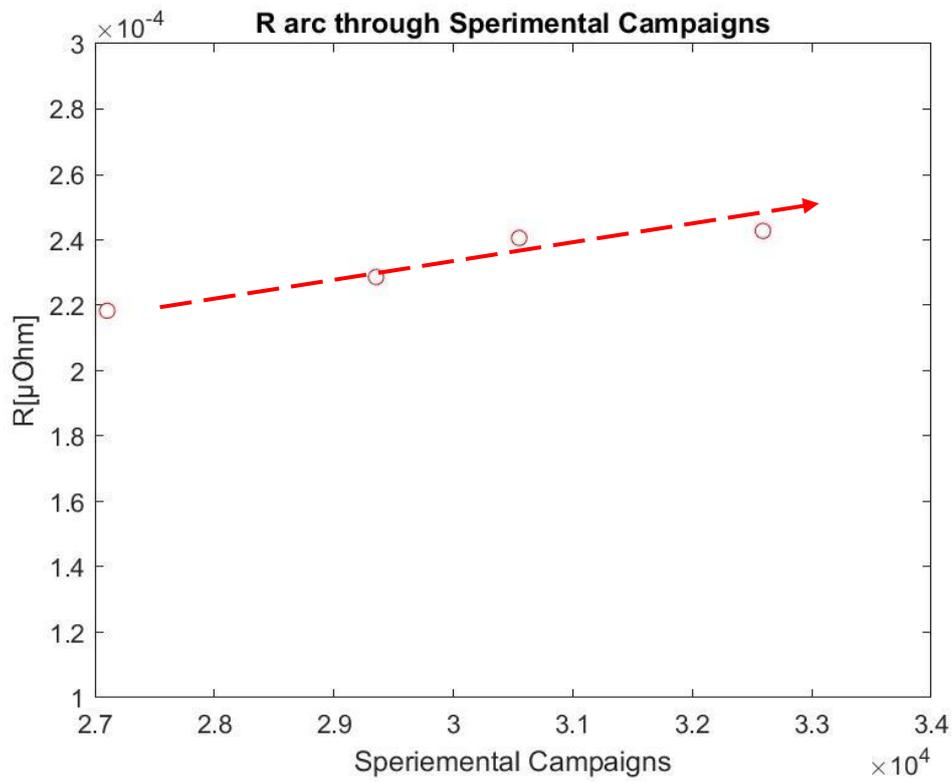


Tube 32

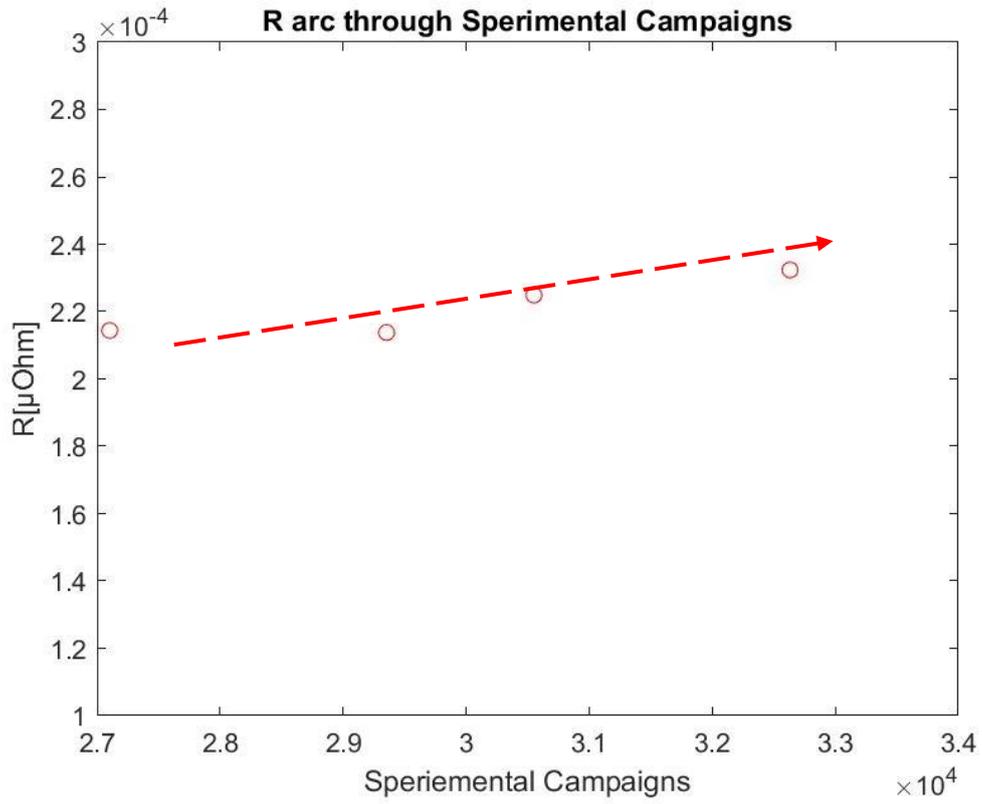


Tube 37

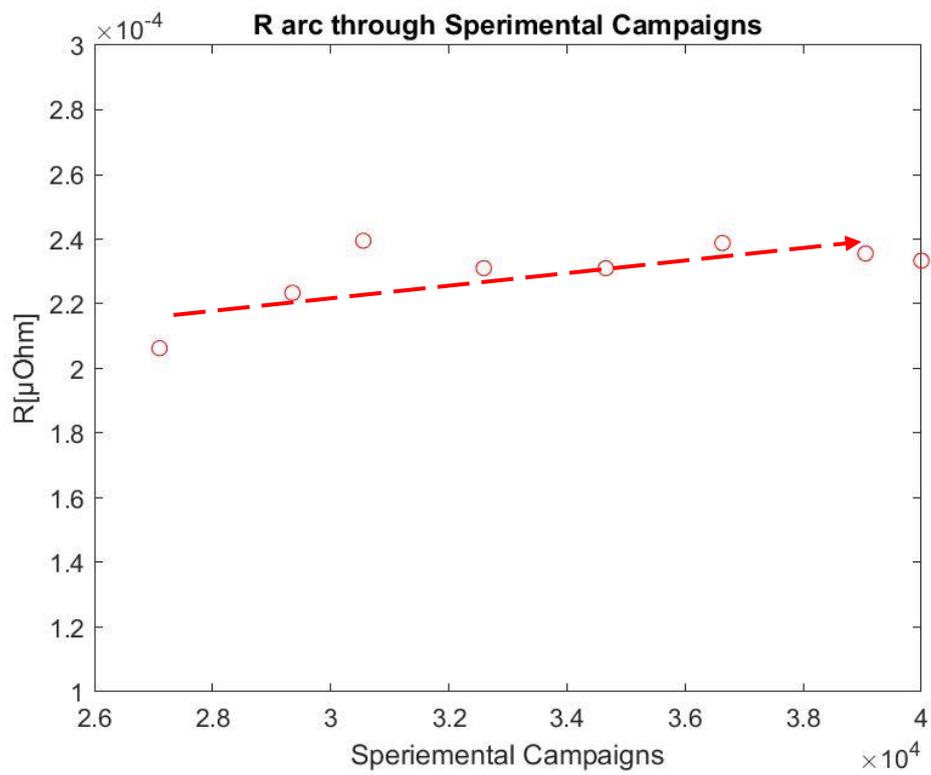
### 6.3.3 Resistenza arco



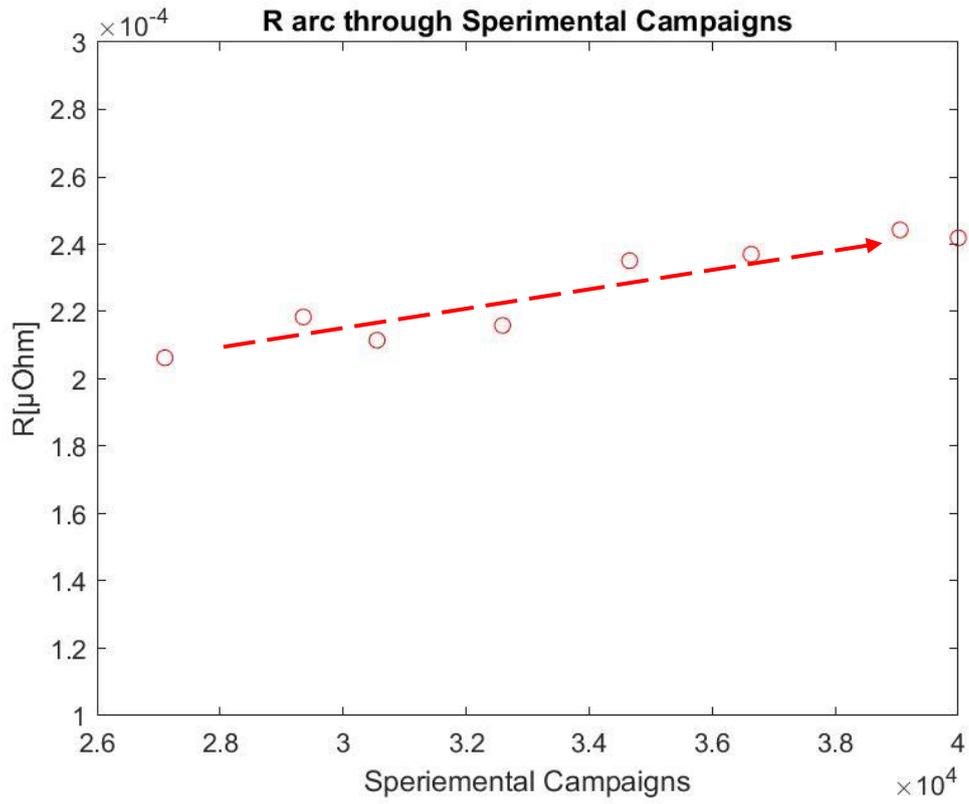
Tube 09



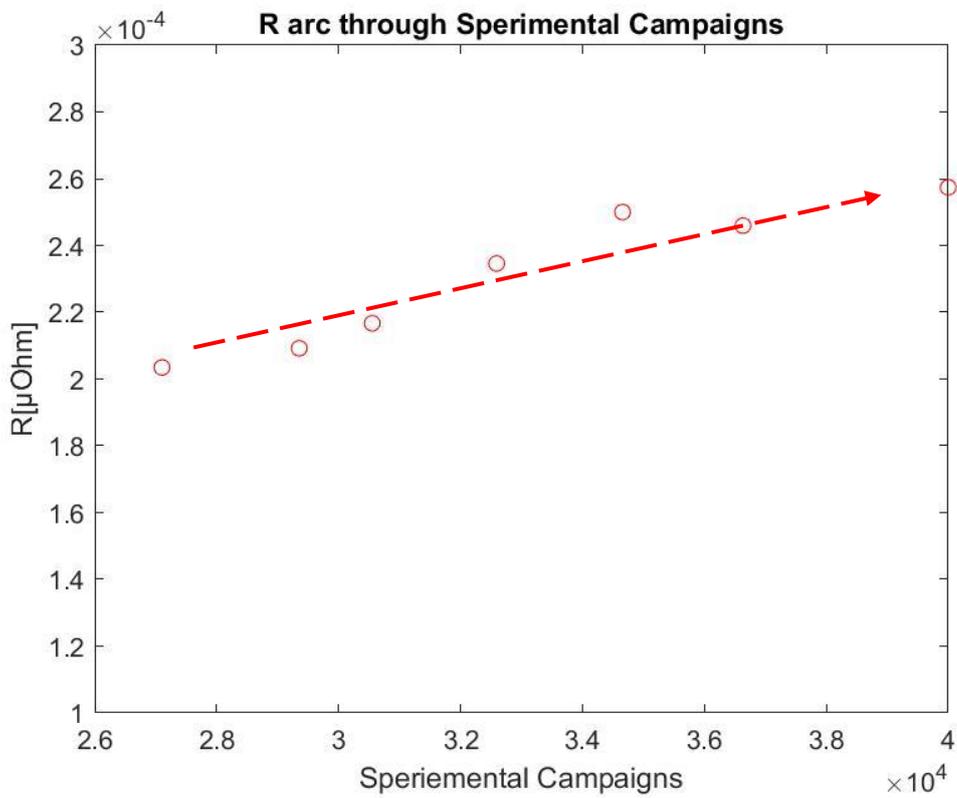
Tube 10



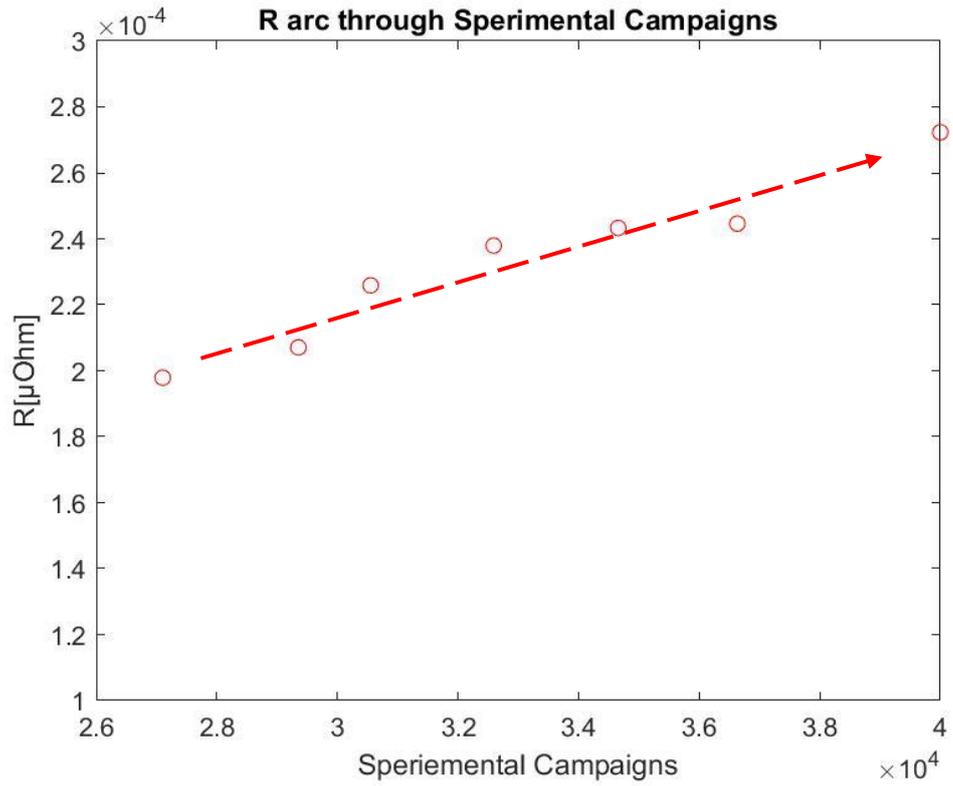
Tube 12



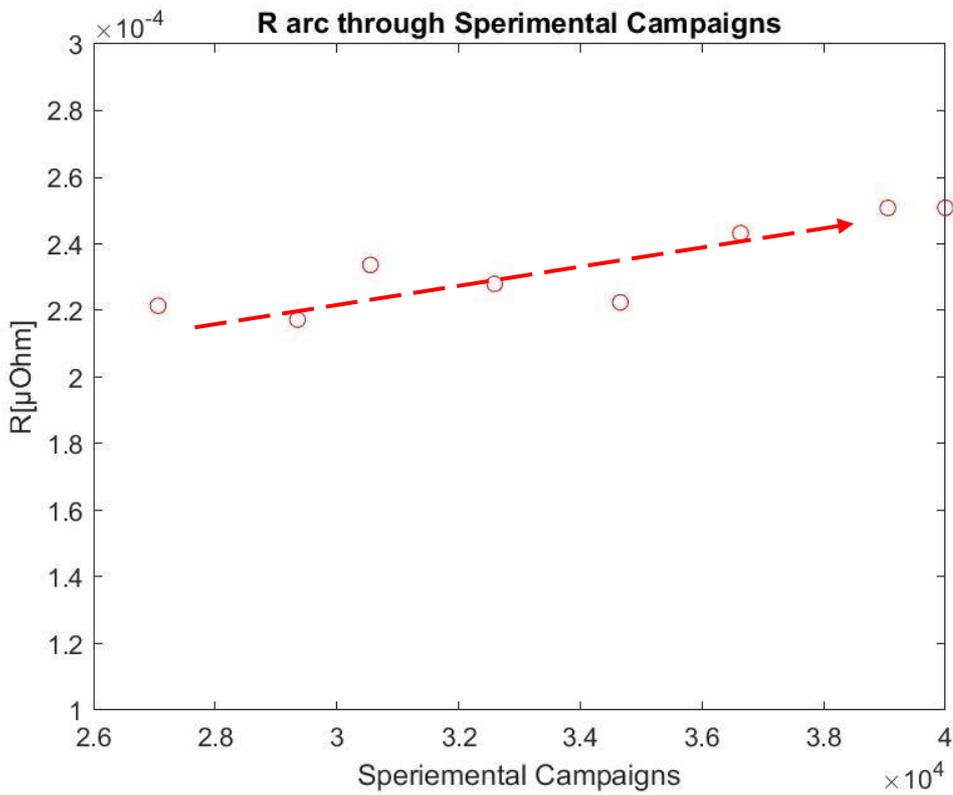
Tube 16



Tube 23



Tube 24



Tube 32

Si nota in quasi tutti i tubi la caratteristica decrescente in tensione e crescente in resistenza su tutta la base dei dati disponibili, che comprende tutte le campagne sperimentali.

Tale effetto potrebbe essere frainteso analizzando solo la caratteristica V-I. Si vede infatti un progressivo calo nella pendenza della curva, facendo pensare ad una diminuzione della resistenza d'arco, che si stima essere la pendenza della curva di fit.

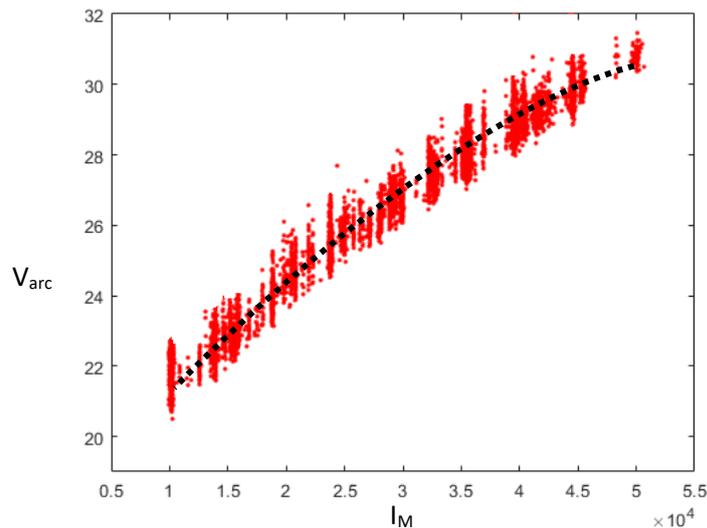


Fig. 6.1: grafico  $I_M - V_{arc}$  ( $-0.008 < t < 0s$ ) tube32

Questo effetto tuttavia è dovuto al calo della tensione a vuoto e all'effettivo aumento della resistenza d'arco come precedentemente visto. Si può pensare infatti al grafico superiore come una spezzata, i cui segmenti sono parte di rette con un progressivo calare dell'intercetta e un aumento del loro coefficiente angolare.

È importante notare ciò perché aumentando la resistenza dell'arco aumenta di conseguenza l'energia dissipata dallo stesso, e tale effetto, alla lunga, potrebbe causare problemi gravi all'interruttore.

Si notano le differenze di localizzazione nel grafico  $R_{ARC} V_{ARC}$  in fig. 6.2. tra la prima e l'ultima campagna sperimentale per ogni tubo (punti blu prima campagna, punti rossi ultima campagna). Questo *scatter-plot* evidenzia il comportamento per cui la  $V_{ARC}$  decresce e la  $R_{ARC}$  aumenta. È infatti visibile lo spostamento del baricentro dalla prima all'ultima campagna.

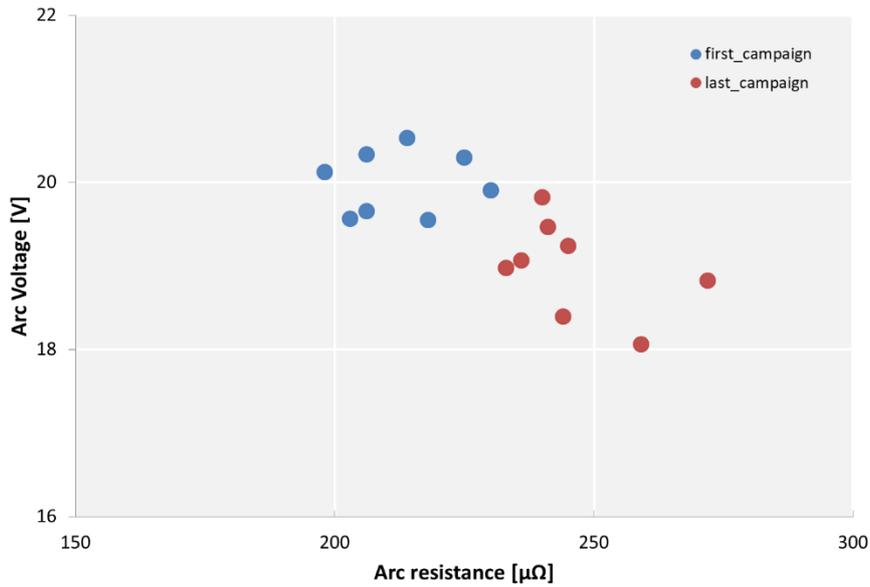
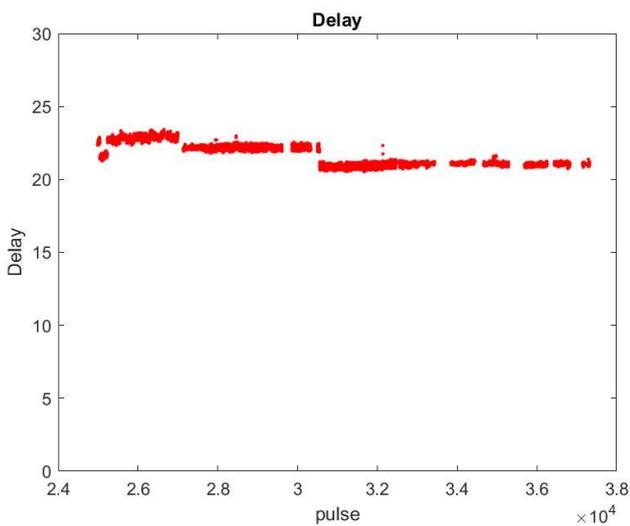


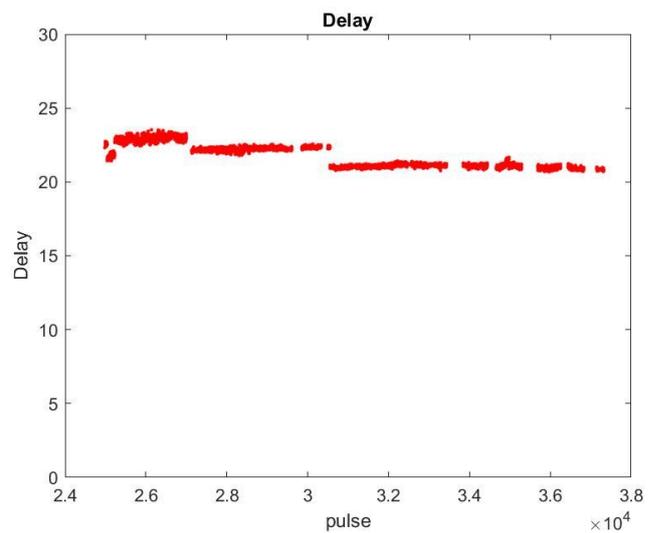
Fig 6.2:  
ARC<sub>RESISTANCE</sub> - ARC<sub>VOLTAGE</sub>

### 6.3.4 Ritardo d'intervento dei PTSO

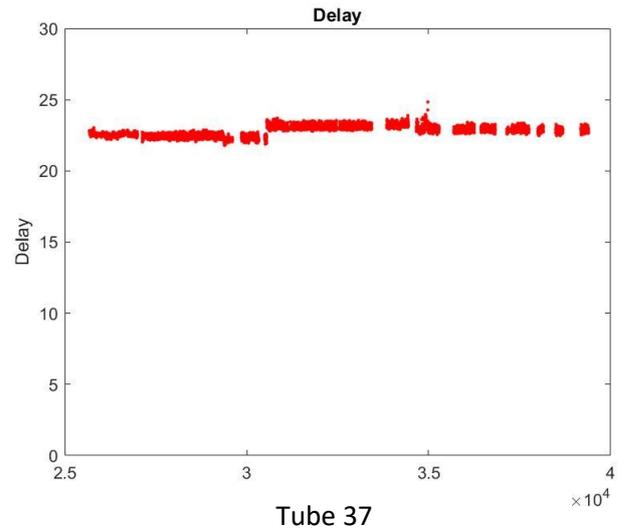
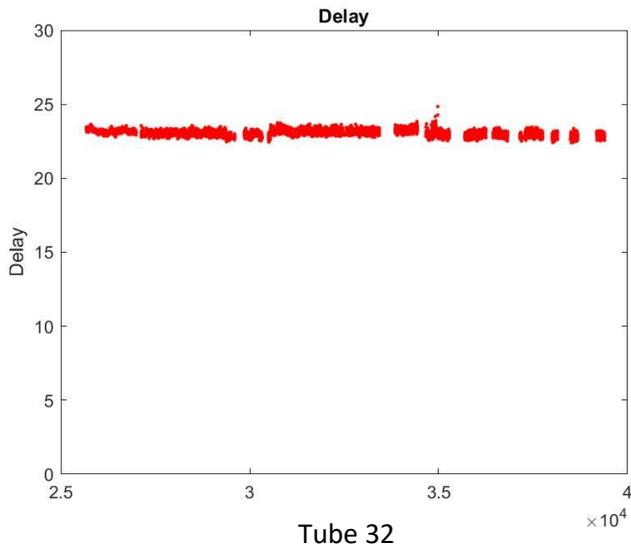
Il ritardo analizza il tempo di intervento degli interruttori tra il trigger e l'effettiva apertura dei contatti. Si potrebbe ipotizzare che tale parametro vari nel tempo, invece le uniche discontinuità sono riconducibili alle attività di manutenzione, nelle quali i leveraggi e le molle vengono registrate dal costruttore (Siemens). Nei grafici tali interventi corrispondono alle variazioni a gradino e sono localizzati a livello temporale in concomitanza degli *shutdown*.



Tube 23



Tube 24



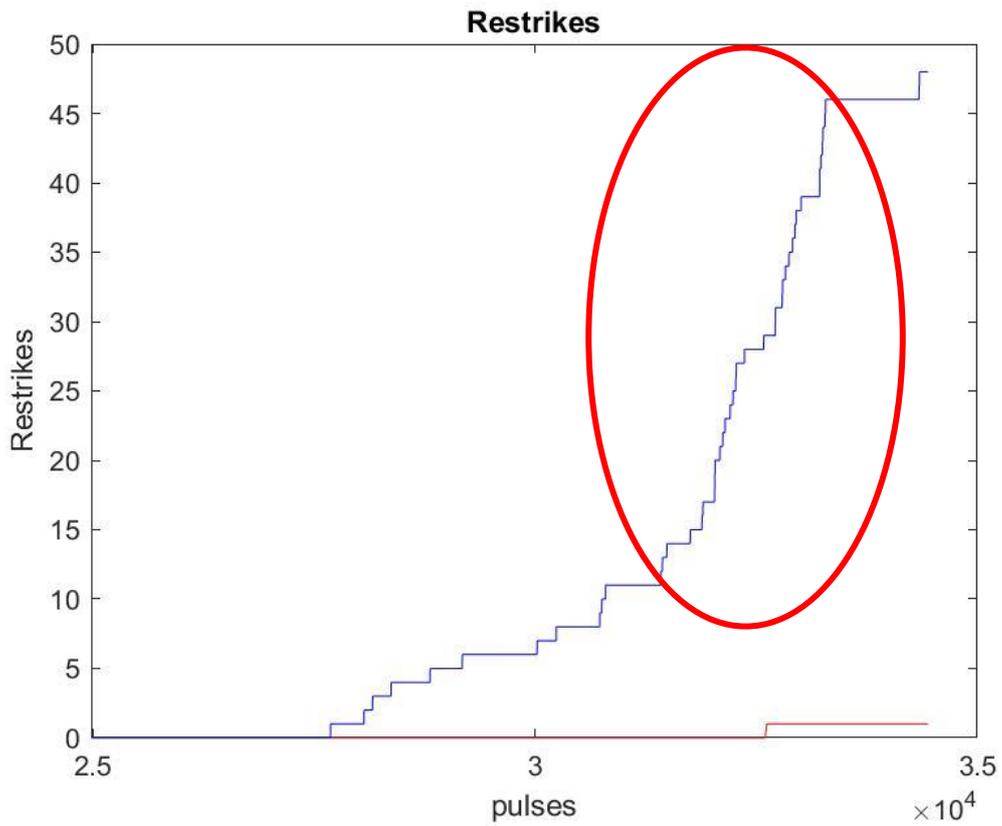
Il ritardo (delay) di intervento dei PTSO non cambia quindi durante le singole campagne sperimentali e non mostra segni di invecchiamento. Le uniche discontinuità si verificano dopo i singoli interventi di manutenzione, questo suggerisce di calibrare il trigger di apertura dei PTSO in modo da mantenere sempre la durata dell'arco fisso (si utilizza un valore standard di 8 ms) qualora fosse necessario.

Se si dovesse andare a sostituire l'interruttore, il trigger andrà ricalibrato nuovamente di conseguenza.

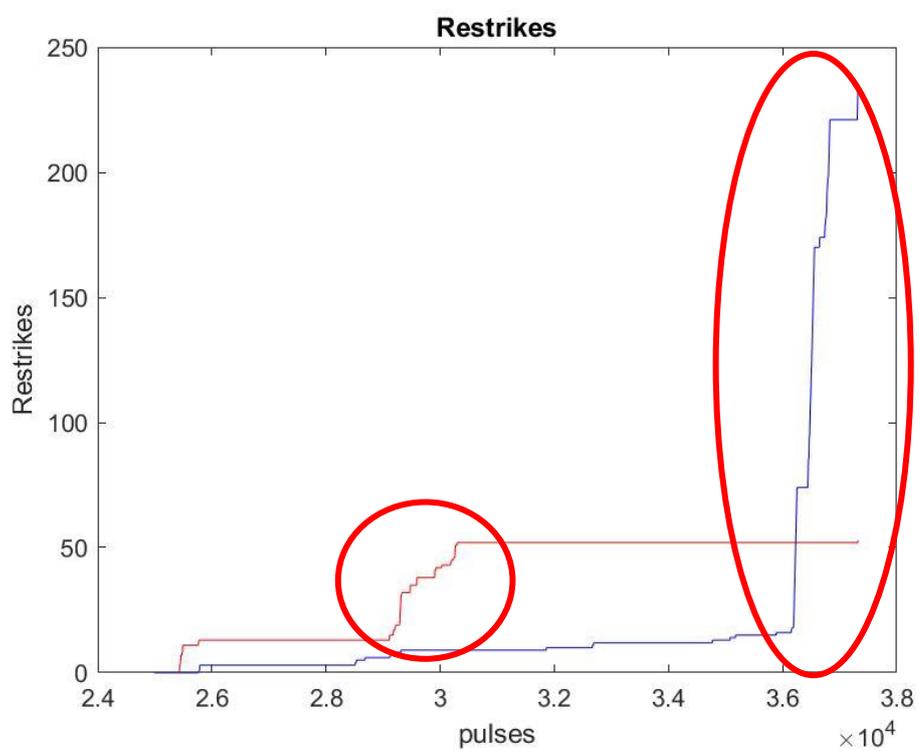
## 6.4 Parametri dopo l'apertura

### 6.4.1 Restrikes

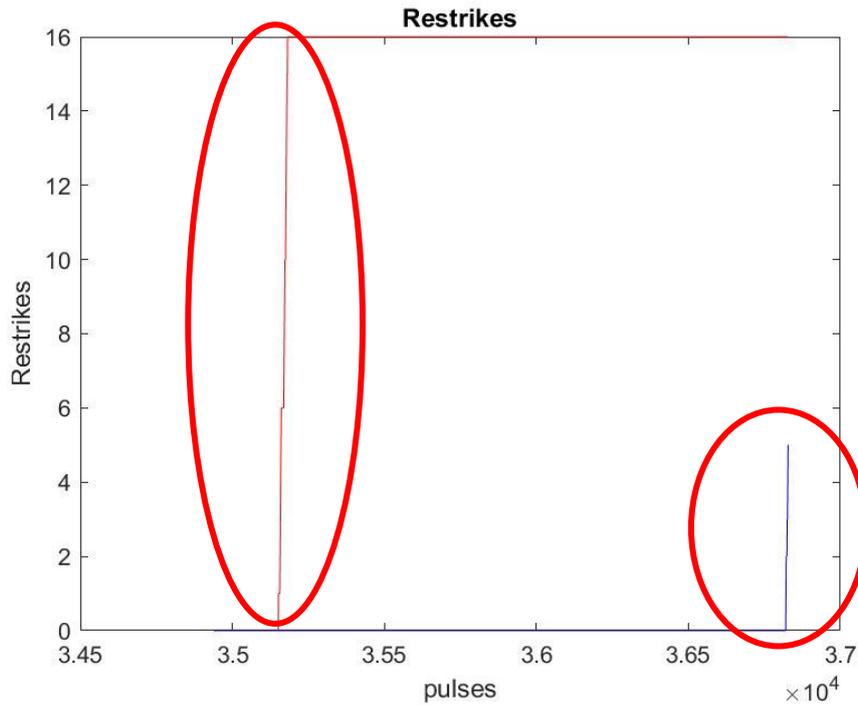
Per ogni coppia di interruttori in serie viene fatta un'analisi sulla localizzazione dei *restrikes* subiti. I grafici in figura mostrano la quantità di *restrikes* con un incremento unitario in corrispondenza dell'impulso in cui avvengono. Si può notare dalle pendenze con fronti ripidi che, nelle unità con maggior numero di faults, essi sono localizzati su impulsi vicini, come se vi fosse una sorta di "effetto memoria" sull'interruttore, che in alcuni casi riesce a ritornare a funzionare correttamente, in altri invece continua a non riuscire a mantenere l'isolamento, e a causa di ciò deve essere sostituito.



Unità 09-10



Unità 23-24



Unità 38-40

Si nota che l'unità 40 rappresentata dalla linea blu nella figura, che negli ultimi impulsi continua a subire *restrikes* fino alla sua dismissione, in questo caso dovuti ad un cortocircuito interno all'interruttore, probabilmente dovuto ad un difetto di fabbrica.

Dato che si nota un accumulo di *restrikes* nei tubi con molti *faults* e un aumento progressivo del parametro di resistenza di contatto negli stessi, si analizza il legame tra i due parametri (fig 6.3)

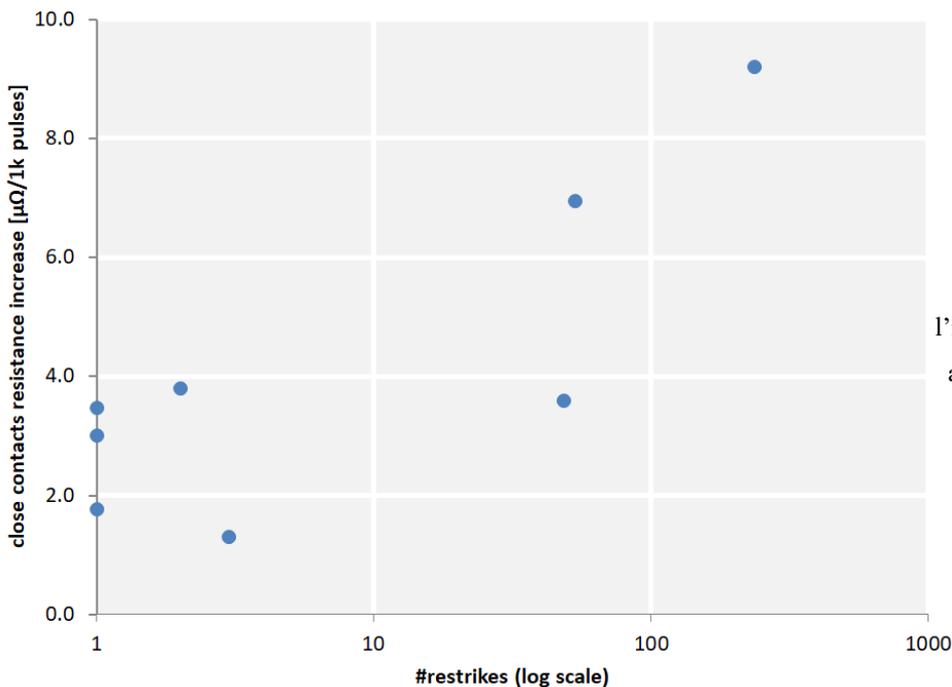


Fig 6.3:  $N^{\circ}_{RESTRIKES} - R_{CONT}$   
 Per ogni coppia di unità si nota l'incremento della resistenza di contatto all'aumentare del numero di *restrikes*

Viene evidenziato come effettivamente, nonostante i pochi esempi (16 tubi, ovvero 8 coppie di unità di VCBs di cui 3 senza alcun *restrikes*), all’aumentare del numero di *restrikes*, evidenziati in scala logaritmica per rendere più compatto il grafico, la resistenza di contatto subisca un aumento, riportato in funzione del numero di impulsi, dato che le campagne sperimentali spaziano serie di dati molto eterogenee tra loro.

### 6.4.2 Sovratensione di recupero

Nella Tabella IV si è visto come ogni interruttore sia progettato per sostenere una tensione di 35kV, ma operi ad una tensione dimezzata per via del collegamento in serie tra i due VCBs che compongono l’unità PTSO. Tuttavia, dai grafici sulle tensioni massime sopportate durante la vita di ogni interruttore notiamo che tale tensione è, e in molti casi ampiamente, superata.

Quando infatti il *restrike* avviene alla fine della rampa crescente della tensione o all’inizio di quella decrescente (generata dai PTRB come visto) la tensione si trova ancora in prossimità del suo massimo e sull’interruttore che non presenta il fault la tensione raddoppia, portando l’interruttore a dover sopportare una sovratensione spesso maggiore dei 17.5kV. Tuttavia, nonostante si siano verificate un totale di 382 sovratensioni sopra la soglia di 17.5kV, nessuna ha comportato un venir meno dell’interruzione su entrambi i VCBs in serie. Vi sono tuttavia casi in cui a seguito di un *restrike* su un tubo e l’estinguersi del suo arco elettrico tramite snubbers, l’interruttore in serie subisca anch’esso un *restrike* successivo, probabilmente dovuto ad un sovraccarico subito dalla sovratensione di recupero.

Table XVI: Dati ricavati dallo script MatLab, pulse 32620 tube 09-10

	<b>pulse</b>	<b>IM[A]</b>	<b>R[μΩ]</b>	<b>V<sub>close2</sub>[V]</b>	<b>Fault</b>	<b>T<sub>FAULT</sub></b>	<b>V<sub>FAULT</sub></b>	<b>V<sub>ARC</sub></b>	<b>T<sub>OPENING</sub></b>	<b>T<sub>TRIGGER</sub></b>	<b>Delay</b>	<b>MaxV</b>
<b>Tube 09</b>	32620	29545	33,66	0,759	1	0,61	11031	25,90	-8,23	-69	20,80	11031
<b>Tube 10</b>	32620	29545	25,02	1,086	0	0	0	23,48	-7,72	-69	21,31	26474

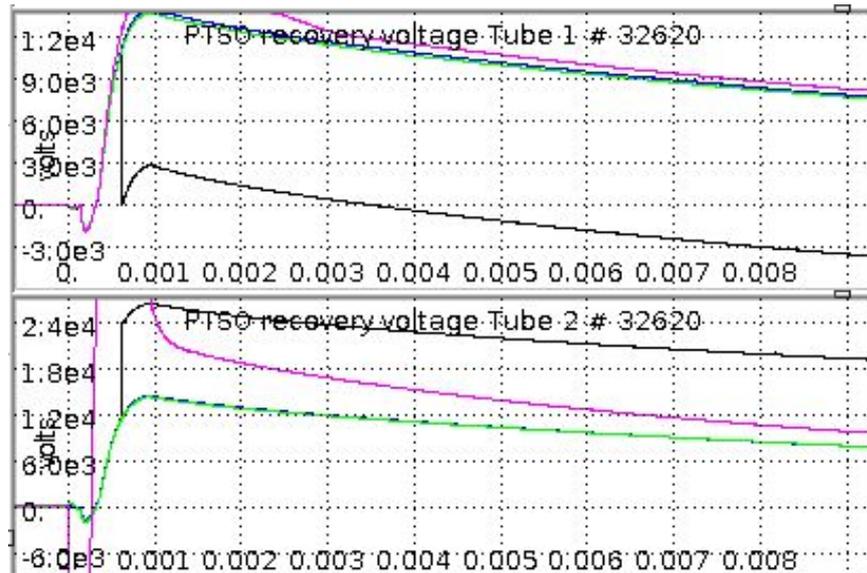


Fig 6.4: VPTSO pulse 32620 in alto tube 09 in basso tube 10,  
 il restrikes in questo caso avviene nella fase di salita della tensione

Dai dati ricavati tramite lo script MatLab il fenomeno si nota molto bene. Nell'esempio, durante l'impulso 32620 il tubo 09 ha un *restrike* (unico durante il suo regime operativo) alla tensione di 11kV, il tubo 10, collegato in serie come conseguenza riveve una sovratensione di 26.5kV, andando di gran lunga sopra il suo limite di operatività per cui viene progettato, tuttavia continua a mantenere l'isolamento (fig 6.2).

Nella figura notiamo anche che il *restrike* avviene nell'ultima parte della fase di salita della tensione, per questo dopo la il passaggio per lo zero del tubo 09 la corrente cresce, andando poi a calare per la dissipazione sul banco di resistenze PTRB.

In alcune unità, poi dismesse a causa anche di questo, vi è il verificarsi di molteplici *restrikes* durante lo stesso impulso, prima su un tubo e poi successivamente sull'altro, questo a dimostrare la sollecitazione che ogni *restrike* comporta per il tubo gemello collegato in serie. In fig 6.4 possiamo notare un doppio *restrike*, prima del tubo 23 (curva blu in alto) e successivamente del tubo 24 (curva blu in basso), per due volte consecutive, prima a tensione positiva, poi a tensione invertita.

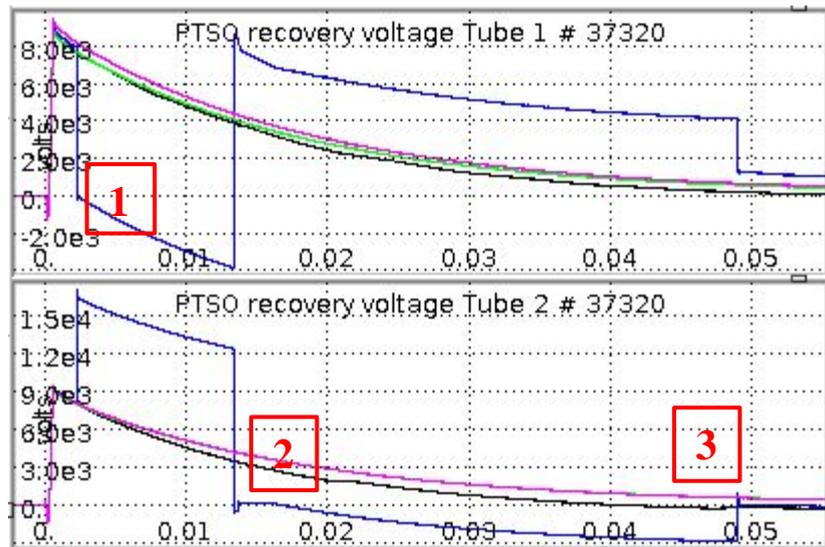


Fig 6.5: VPTSO pulse 37320,  
in alto tube 23 in basso tube 24,

L'accorgimento di mettere quindi due tubi collegati in serie è di vitale importanza per mantenere l'isolamento galvanico nel sistema, infatti se l'unità fosse composta da un solo tubo e questo subisse un *restrike* l'isolamento verrebbe meno, ciò comporterebbe ad un elevato numero di mancate interruzioni, evento poco probabile con la serie di due tubi per unità. Inoltre, mettere in serie due VCBs in grado di sopportare l'intera tensione massima di 35kV, normalmente applicata alla serie, è fondamentale, si è visto infatti come, a causa delle sovratensioni, un limite di 17.5kV sarebbe inadeguato.

## 6.5 Note ulteriori

### 6.5.1 Misure tensione unità 09

Come si nota dalla figura 6.4 la resistenza di contatto durante la vita del tubo 09 sembra presentare due valori distinti di soglia, ipotizzando inizialmente ad una dipendenza dalla corrente magnetizzante, si è più propensi a pensare ad un errore di misura dovuto alla strumentazione. Questo perché dai grafici tensione corrente continua a rimanere la soglia tra due valori distinti, e non al solo cambio della pendenza della curva di fit. Inoltre, questo tipo di comportamento viene notato solo nell'unità 09, non nella sua unità gemella (tube 10) né in nessun'altra.

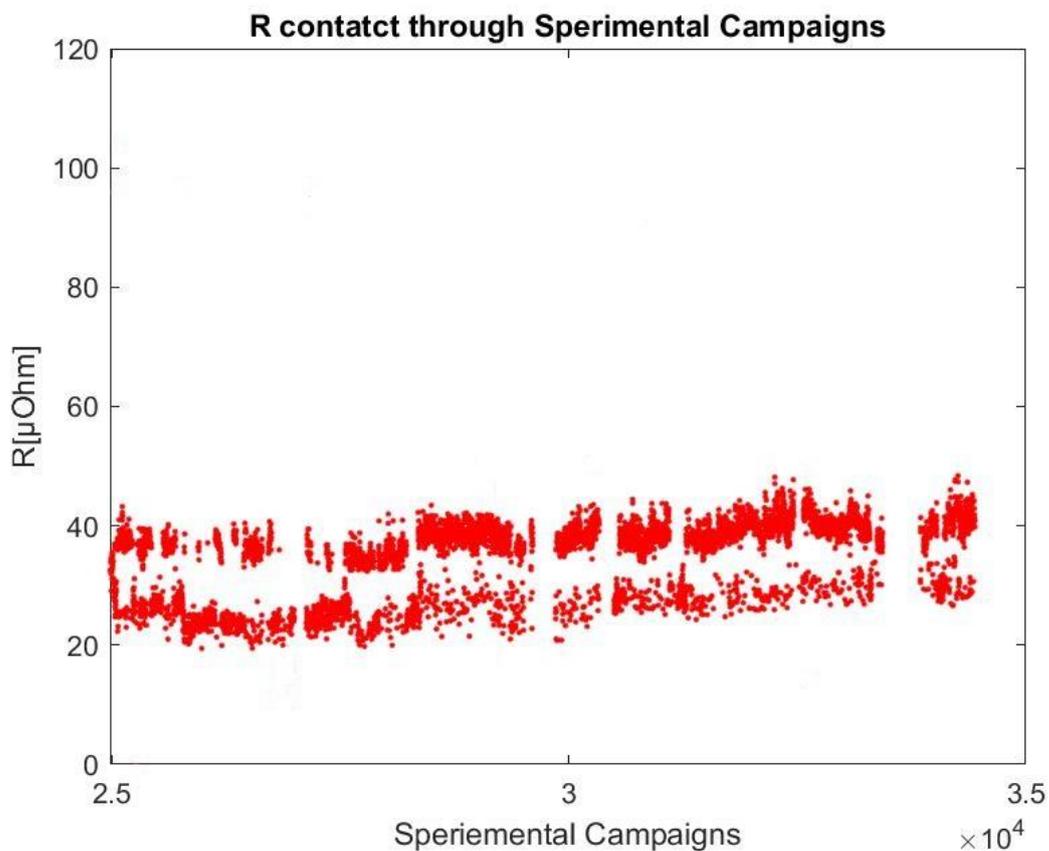


Fig 6.5: evoluzione  $R_{CONTACT}$  in tutto il suo range operativo

### 6.5.2 Guasto sull'unità 40

L'unità 40 viene dismessa a seguito di un cortocircuito costante. Cortocircuito dovuto ad un filamento metallico all'interno della meccanica dell'interruttore che vanifica l'isolamento galvanico dello stesso. Tuttavia, analizzando la caratteristica tensione resistenza d'arco di tutti gli interruttori con un numero sufficiente di impulsi, ricordando che  $R_{ARC}$  e  $V_{ARC}$  sono ottenute da un fit lineare ed in particolare dai parametri di intercetta e coefficiente angolare di tale fit, e quindi per essere considerate accettabili devono far riferimento ad un range non troppo limitato di impulsi, notiamo che il tubo 40 si colloca lontano dal range degli altri tubi, fig 6.6.

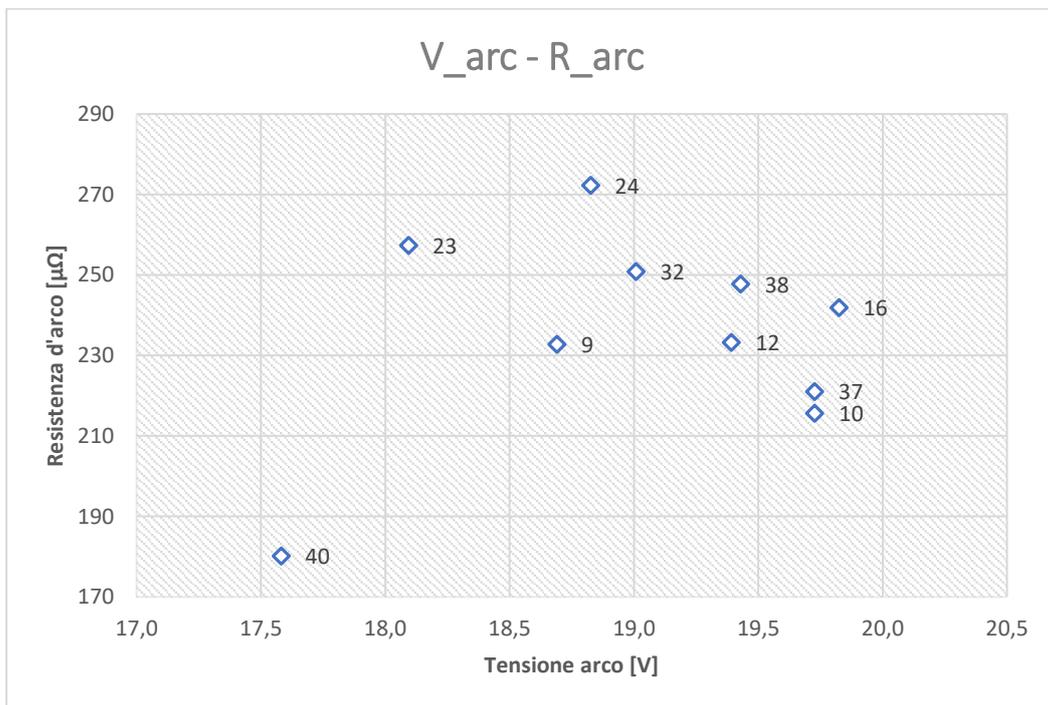


Fig 6.6: Caratteristiche  $V_{ARC}$  -  $R_{ARC}$  dei tubi principali

Tale comportamento anomalo denota una tensione d'arco e una resistenza d'arco più piccole di quelle degli altri tubi. Sapendo che il tubo viene dismesso per un cortocircuito dovuto ad un filamento metallico si ipotizza ad un difetto di fabbricazione poi peggiorato nel corso dell'utilizzo. Avere infatti già un filamento metallico che riduce la distanza di separazione dei contatti durante il funzionamento dell'interruttore ne spiega la minor tensione e resistenza d'arco durante l'utilizzo. Si consiglia quindi di effettuare una serie di cicli all'interruttore per poter identificare la caratteristica in fig 6.6 per localizzare l'interruttore utilizzato. Se infatti venisse a localizzarsi distante dal range degli interruttori con funzionamento normale si avrebbe la conferma di un futuro malfunzionamento del tubo, come accaduto per l'interruttore 40.



# Capitolo 7

## Conclusioni

Durante questo lavoro si è analizzato il funzionamento del sistema di interruzione per alte correnti nel circuito poloidale in RFX-mod. Partendo dall'analisi dei dati di tensione e corrente per gli impulsi dal numero 24963 al 40000, ovvero successivi all'implementazione su tutte le unità delle modifiche successive alla messa in operazione di RFX-mod, sono stati ricavati i parametri utili e ne è stata analizzata la loro evoluzione in tre diversi range temporali:

- Parametri a contatti chiusi ( $t < -10\text{ms}$ )
- Parametri d'arco ( $-10\text{ms} < t < 0\text{s}$ )
- Parametri a contatti aperti dopo la scarica e lo zero-corrente ( $t > 0\text{s}$ )

Nel primo range temporale è stata analizzata la resistenza di contatto, fondamentale per limitare il fattore di energia dissipata legato al limite di energia specifica  $I^2t$ , ora limitato grazie all'upgrade di RFX-mod. Tale parametro viene ottenuto dopo un filtraggio del segnale di tensione subito prima e subito dopo lo switch tra conduzione in parallelo di PTSO e PTSB e in solitaria del solo PTSO. Si è scoperto che nelle unità con funzionamento normale la resistenza di contatto rimane pressoché costante, mentre nelle unità che presentano molteplici *restrikes* tale fattore tende ad aumentare, facendo crescere lo stress a cui l'interruttore è sottoposto.

Nel secondo range tensione e resistenza d'arco sono state analizzate, ricavandole rispettivamente da intercetta e coefficiente angolare di un fit lineare sui dati di corrente e tensione durante l'arco sui PTSO. Si è scoperto che tali parametri subiscono un'evoluzione temporale durante le varie campagne sperimentali. La tensione d'arco tende infatti a diminuire mentre la resistenza dell'arco subisce l'effetto opposto aumentando. Viene inoltre notato che nel tubo 40 entrambi i parametri risultano fuori dal range degli altri tubi, in particolare risultano entrambi più piccoli, e considerando il fatto della dismissione del tubo stesso per un cortocircuito interno si ipotizza un difetto di fabbricazione. Si suggerisce anche di effettuare un test in tal senso per individuare il range di  $V_{\text{ARC}}$  e  $R_{\text{ARC}}$  in modo tale da individuare preventivamente i tubi con difetti simili.

Nell'ultimo range temporale vengono analizzati i fallimenti nell'interruzione dei tubi. Viene in particolare analizzato il numero e la sovratensione derivata sul tubo gemello da tali *restrikes*. Si nota nei tubi con molti *restrikes* un accumulo dei fallimenti nell'interruzione in determinati istanti, come se la probabilità che un *restrike* avvenga sia maggiore se l'impulso precedete, o quelli immediatamente prima, abbiano subito un *restrike*. Vi è quindi il manifestarsi di una sorta di "effetto memoria" dell'unità per quanto riguarda i *restrikes*.

Si è infine verificato come le modifiche apportate all'impianto mettendo in parallelo un'unità PTSB duale all'unità principale PTSO e la modifica dei diametri dei tubi abbiano avuto il regime operativo auspicato. La gestione in parallelo ha infatti abbattuto il fattore  $I^2t$ , e l'utilizzo di due VCBs da 35kV e 50kA in serie per ogni unità ha garantito con successo l'interruzione in tutti gli impulsi dalla sua modifica. Qualche tubo ha subito un fallimento, ma mai entrambi in contemporanea, garantendo in ogni impulso l'isolamento galvanico ricercato.

Si consiglia infine, con lo scopo di trovare prima dell'utilizzo i possibili difetti di un tubo, di testare le unità per un numero sufficiente di impulsi al fine di costruirne la caratteristica  $V_{ARC}$  e  $R_{ARC}$  e fare riferimento al grafico 6.6, in modo tale da individuare preventivamente i tubi con difetti simili a quelli dell'unità 40.

# Bibliografia

- [1] G. Rostagni, "RFX: an expected step in RFP research", *Fusion Engineering and Design*, Vol 25, No 4, January 1995, pp 301-313.
- [2] A. Maschio, R. Piovan, I. Benfatto, P. Collarin, A. De Lorenzi, L. Fellin, E. Gaio, J. W. Gray, M. B. Hood, V. Toigo, "The power supply system of RFX", *Fusion Engineering and Design*, Vol 25, No 4, January 1995, pp 401-324.
- [3] R. Piovan, A. De Lorenzi, E. Gaio, F. Milani, V. Toigo, L. Zanotto, "The restoration of the RFX Power Supply", *Proc. 20th IEEE/NPSS Symp. Fusion Eng.*, pp. 375-378, 2003-Oct.
- [4] Francesco Milani, Ivone Benfatto, Alexander Roshal, Inho Song & Jeff Thomsen (2012) *Fusion Applications of Large DC-Current Interruption Units*, *Fusion Science and Technology*, 61:1T, pp. 83-88
- [5] Roberto Piovan, Loris Zanotto, and Tullio Bonicelli, "Vacuum Breaker for High DC Current: Experimental Performances and Operational Limits", *IEEE Trans. Plasma Sci.*, vol. 37, no. 1, Jan. 2009, pp. 229-235.
- [6] F. Milani, "Upgrade of the RFX energy transfer system for a reliable 35 kV 50 kA DC-current interruption", *Fusion Eng. Design*, vol. 84, Jun. 2009, pp. 1300-1304.
- [7] V. Schmidt, G. Flor, O.N. Hemming, A. Luchetta, G. Manduchi and S. Vitturi, "The RFX centralized control, data acquisition and machine protection systems", *Fusion Eng. Des.* 25 (1995).
- [8] G. Manduchi, A. Barbalace, A. Luchetta, A. Soppelsa, C. Taliercio, E. Zampiva, "Upgrade of the RFX-mod real time control system" Volume 87, Issue 12, December 2012, pp. 1907-1911.

## Bibliografia

- [9] Mario Cavinato, Gabriele Manduchi, Adriano Luchetta, Giuseppe Marchiori, and Cesare Taliercio, “Distributed Real Time Control in RFX-Mod Nuclear Fusion Experiment: Commissioning and First Results”, *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 53, 1015 (2006).
- [11] J.D.Lawson, Some criteria for a power producing thermonuclear reactor, *Proc. Phys. Soc. B*, vol.70 (6), 1957.