

Contents

1 Tokamak	1
1.1 Struttura	1
1.2 Confinamento	1
1.3 Scarica	2
2 Ruolo delle misure magnetiche	2
3 Sensori Induttivi	2
3.1 Rogowski Coil	2
3.2 Voltage Loop / Flux Loop	3
3.3 Pick-Up Coils	3
3.4 Saddle Coils	3
3.5 Loop Diamagnetico	3
3.6 Sensori di Hall	3
4 Sistemi di riscaldamento aggiuntivi	3
4.1 Diagnostiche su atomi neutri	3
4.2 Electron Cyclotron Resonant Heating	4
5 Thomson Scattering	4
6 Polarimetro	4
6.1 Polarizzatore	5
6.1.1 Assorbimento	5
6.1.2 Polarizzazione tramite doppia rifrazione	5
6.2 Onde elettromagnetiche	5
6.3 Ellisse di Propagazione e Vettori di Stokes	5
6.4 Sistema Polarimetrico	6
7 Interferometro	6
8 MSE	6
9 Neutronica	6
10 Disruzioni	6
10.1 Classificazione diagnostiche disruzione	7
10.2 Requisiti Hardware	7
10.2.1 Carichi termici	7
10.2.2 Carichi Meccanici	7
10.3 Locked mode detection AUG	8
10.4 Imaging for disruptions	8
10.5 Indicatori di Profilo	8
10.6 Problema inverso nella fusione	8

1 Tokamak

1.1 Struttura

Il Tokamak si basa su tre gruppi elettromagnetici:

- campo toroidale: funge da manicotto e confina il plasma;
- magneti centrale che appartengono al trasformatore e incuono corrente nel plasma che fluisce torodialmente;
- magneti del campo verticale: agiscono in modo da stabilizzare il plasma e vincolarlo al centro del toro.

1.2 Confinamento

Per far avvenire la scarica di plasma, il tokamak deve raggiungere la cosiddetta configurazione di confinamento in cui la risultante del campo magnetico toroidale e poloidale è un campo magnetico elicoidale: le particelle di plasma si avviano toroidalmente in superfici isobare di flusso.

1.3 Scarica

Durante l'avviamento di un esperimento nel tokamak si inizia crea il vuoto all'interno del vessel e si inietta una miscela di deuterio e trizio all'interno nella camera da vuoto. A questo punto, si innalza il campo toroidale, si ha un ramp up del flusso nel trasformatore per ottenere un alto campo elettrico per poi essere interrotto. Così facendo si crea una differenza di potenziale che avvia un breakdown del plasma: gli elettroni, accelerati dal campo elettrico, guadagnano energia. Questi quando urtano gli atomi di deuterio e trizio lo possono ionizzare e generare un nuovo elettrone. Questo fenomeno si ripete esponenzialmente (avalanche) così da giungere al breakdown del plasma.

Una volta che è trascorso il breakdown viene avviato il controllo in feedback del plasma.

2 Ruolo delle misure magnetiche

Le misure magnetiche si possono dividere in due macrocategorie:

- **Operazioni real time:**
 1. **Posizione del plasma e controllo di forma;**
 2. **Sistema di protezione;**
 3. **Misurazioni;**
- **Analisi offline:**
 1. Ricostruzioni magnetiche: superfici di flusso e il bordo del plasma. Sono molto importanti per correggere e interpretare le informazioni contenute in una scarica;
 2. Analisi MHD

3 Sensori Induttivi

Il tokamak possiede delle diagnostiche basate su sensori induttivi: sono dei sensori che risentono delle variazioni del campo magnetico in forma integrale o derivativa.

I sensori induttivi si basano sulla legge di Faraday: la forza elettromotiva indotta è proporzionale alla derivata del flusso di campo magnetico.

$$f_{em} = -\frac{d\Phi\langle B \rangle}{dt} \quad (1)$$

Tuttavia in pratica quello che lo strumento ritorna sono valori di tensione che tramite la relazione:

$$V = -NA\langle \dot{B} \rangle \quad (2)$$

Integrando nel tempo si può avere una misura del flusso del campo magnetico:

$$\Phi = NA\langle B \rangle = -\int V dt + const \quad (3)$$

Di seguito si illustreranno i sensori induttivi installati in un tokamak.

3.1 Rogowski Coil

Le bobine Rogowski sono delle bobine solenoidali che si avvolgono lungo la sezione poloidale del toro. Queste forniscono una misura diretta della corrente che fluisce nel suo centro.

L'equazione che la caratterizza è:

$$\Phi = nA \oint B dl \mu_0 n A I_p = -\int V dt + const \quad (4)$$

Bisogna ricordare che:

- Le misure di corrente non dipendono dalla forma del rogowski né dalla distribuzione di corrente nel plasma;
- Il cammino degli avvolgimenti del solenoide devono ritornare sullo stesso asse in cui sono iniziate;
- Le bobine Rogowski possono essere sostituite da un set di bobine tangenti alla camera.

3.2 Voltage Loop / Flux Loop

Il Voltage Loop è un singolo cavo che avvolge la camera toroidalmente ed ha il compito di misurare la tensione indotta dal trasformatore centrale. La tensione ai capi della bobina vengono inviati ad un DAS che ne calcola il valore.

3.3 Pick-Up Coils

Le Pick-up Coils sono bobine poste al bordo del vessel utilizzate per ricostruire l'equilibrio, per controllare il plasma e rilevare le instabilità MHD.

3.4 Saddle Coils

Le bobine Saddle sono bobine estese montate sulla camera da vuoto che permettono di misurare il flusso magnetico perpendicolare a loro stessi. Inoltre, sono utilizzate per la ricostruzione dell'equilibrio e possono fornire in totale misure del flusso poloidale. In quest'ultimo caso, si ottengono misure integrali del flusso poloidale che devono essere derivate con un flusso di riferimento per ottenere una informazione.

3.5 Loop Diamagnetico

Sappiamo che il plasma, dall'equazione dell'equilibrio $j \times B = \nabla p$ le particelle del plasma si dispongono lungo superficie isobare e che l'equilibrio sviluppa delle correnti poloidali che riducono il campo magnetico. Questo specifico comportamento viene detto **diamagnetismo**.

Al fine di misurare l'energia del plasma dal flusso toroidale si utilizza il Loop Diamagnetico. Questa misura risulta non semplice dato che l'effetto diamagnetico è molto piccolo.

Infine, risulta una diagnostica che soffre dell'allineamento.

3.6 Sensori di Hall

Una delle problematiche delle diagnostiche a bobine magnetiche è che le misurazioni del campo magnetico rispondono a cambiamenti della derivata del campo magnetico. Ciò implica che in un campo magnetico stazionario queste bobine risultano inutili finché non vengono mosse all'interno del campo.

Per questi tipi di campi si è deciso di introdurre delle diagnostiche che si basano sull'effetto Hall.

L'effetto Hall è un fenomeno fisico proprio del plasma in cui si considera il plasma come un semiconduttore solido. In particolare, una lastra di semiconduttore è immersa in un campo magnetico. Una corrente attraversa la lastra e viene deflessa dalla forza di Lorentz, deviando perpendicolarmente al prodotto vettoriale tra j e B .

La carica risultante sulle facce della lastra genera un campo elettrico aggiuntivo che cancella la forza magnetica. Quest'ultimo campo elettrico viene misurato dai sensori.

4 Sistemi di riscaldamento aggiuntivi

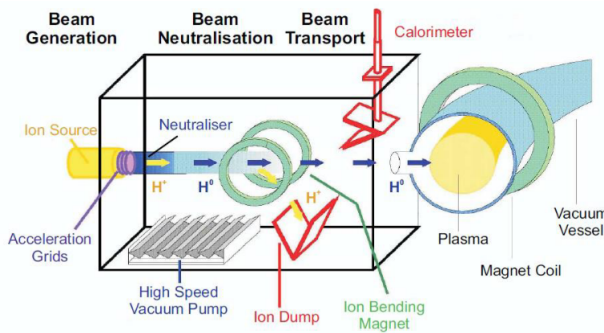
Il principale meccanismo utilizzato nel tokamak per accelerare le particelle è il riscaldamento ohmico. Tuttavia, non è necessario ad accelerare le particelle quanto dovuto dato che questo tipo di riscaldamento risulta inefficace ad alte temperature. Questo difetto è dovuto alla resistività del plasma che diminuisce con l'aumentare della temperatura. Si necessitano di riscaldamenti aggiuntivi per raggiungere le temperature necessarie. Esse sono basate su riscaldamento da particelle α , su onde elettromagnetiche e su iniezione di particelle neutre.

4.1 Diagnostiche su atomi neutri

Le diagnostiche basate su atomi neutri nel plasma sono importanti per plasmi confinati elettromagneticamente poiché essi, essendo neutri, attraversano le linee di campo. Possono essere quindi sfruttati per ottenere delle informazioni sul centro del plasma.

Per creare un fascio neutro si utilizza una miscela da cui si producono gli ioni di deuterio o idrogeno (per maggiore efficienza si sono scelti ioni negativi), a questo punto vengono accelerati da un campo magnetico orizzontale, vengono neutralizzati e poi iniettati all'interno del plasma. Le linee guida per l'iniezione di un fascio neutro sono i seguenti:

- Le particelle neutre viaggiano inalterate attraverso i campi magnetici;
- Il beam trasferisce energia al plasma attraverso le collisioni;
- L'assorbimento del fascio deve avvenire al centro del plasma. Se abbiamo formato un fascio debole allora verrà assorbito nel bordo del plasma; se troppo forte o mal direzionato può bucare la camera da vuoto;
- L'assorbimento del fascio dipende dalla sezione d'urto tra il fascio e il plasma;



Schematicamente:

4.2 Electron Cyclotron Resonant Heating

Le cosiddette ECRH sono riscaldamenti addizionali basati su onde radio per trasferire energia da una sorgente esterna al plasma. Quando una onda elettromagnetica si propaga attraverso il plasma, il campo elettrico dell'onda accelera le particelle cariche e quindi aumenta il numero di collisioni di queste nel plasma.

In particolare, si ha assorbimento dell'onda quando si è in risonanza, tuttavia essendo il plasma non uniforme si possono avere anche fenomeni di riflessioni. Ne risulta quindi che la polarizzazione dell'onda gioca un ruolo molto importante sulla forza dell'onda e sulla regione di assorbimento. Vi sono principalmente due distinzioni di polarizzazioni che sono dipendenti dal campo magnetico nel plasma:

- O-Mode: parallelo al campo magnetico e incontrano solamente una frequenza di risonanza e un di cut-off;
- X-Mode: perpendicolare al campo magnetico

Un altro fenomeno che potrebbe risentire il fascio è quello della rifrazione quando si trattano plasmi di alta densità.

5 Thomson Scattering

Per misurare la temperatura e la densità del plasma si sfrutta il fenomeno del Thomson Scattering. In particolare si inietta nel plasma un fascio laser e se ne misura sia la luce diffusa che la larghezza spettrale.

Le misure di larghezza forniscono delle informazioni sulla temperatura e l'intensità della luce diffusa sulla densità degli elettroni. Le ragioni principali per cui si è introdotta questa diagnostica sono due:

- è un metodo che non perturba l'equilibrio del plasma poiché si richiede solo l'accesso alle radiazioni del plasma;
- permette di avere delle informazioni dettagliate sulla funzione di distribuzione degli elettroni.

Si ha una onda elettromagnetica incidente su una particella che viene accelerata dai campi elettromagnetici dell'onda. Durante l'urto si ha una emissione di una radiazione detta scattered wave. Questa radiazione viene misurata dagli spettrometri a filtri policromatrici. Dato che occorre che il posizionamento delle ottiche sia ottimale, la calibrazione diventa fondamentale per ottenere misurazioni della densità di elettroni. Essa viene effettuata utilizzando altri gas.

6 Polarimetro

Il Polarimetro è una diagnostica che consente di avere misure delle componenti del campo magnetico per capire la causa che hanno portato alla rilevazione di tale misure. Queste misure sono fondamentali per la ricostruzione dell'equilibrio del plasma dato che tramite esse è possibile inserire ulteriori vincoli per la risoluzione del problema inverso.

Il funzionamento del Polarimetro si basa su un fascio laser negli infrarossi che fa ad incidere sul plasma. Da questo urto si hanno informazioni riguardo alla corrente di plasma (campo poloidale) e la densità degli elettroni.

L'urto del fascio laser con il plasma, dato che quest'ultimo è un mezzo birifrangente (indice di rifrazione differente in base all'angolo di incidenza del fascio) dà origine a due effetti:

- Effetto Faraday: il fascio laser ruota, dovuto al campo magnetico poloidale;
- Effetto Cotton-Mouton: il fascio laser si elettrifica, dovuto al campo magnetico toroidale;

La birifrangenza del plasma dipende da:

- densità elettronica;

- campo magnetico; temperatura elettronica

Il Polarimetro per funzionare ha bisogno di una luce polarizzata: una luce in cui i vettori del campo elettrico non si propagano lungo tutte le direzioni, ma lungo una precisa direzione. Tuttavia, la luce di base non è polarizzata e quindi occorre polarizzarla tramite uno strumento detto polarizzatore.

6.1 Polarizzatore

Il polarizzatore è uno strumento che consente di polarizzare la luce non polarizzata. In particolare, data una sorgente di luce non polarizzata, si interpone lungo le direzioni di propagazione della luce un filtro a bande verticali che permette di far passare solo le componenti del campo elettrico parallele alle fenditure del filtro. In generale la polarizzazione può essere effettuata tramite:

- assorbimento;
- riflessione;
- scattering;

6.1.1 Assorbimento

L'assorbimento è il metodo più comune per polarizzare la luce. Si necessita di una sorgente di luce non polarizzata, un polarizzatore, un analizzatore hardware capace di valutare l'efficienza del polarizzatore. L'efficienza viene considerata come l'angolo formato tra il raggio incidente e uscente all'analizzatore.

6.1.2 Polarizzazione tramite doppia rifrazione

I materiali birifrangenti possono essere utilizzati per la polarizzare la luce. La loro particolarità è che essi posseggono due indici di rifrazione: quando un fascio di luce passa nel materiale birifrangente si genera il raggio straordinario (E) e raggio ordinario (O) dovuto alla diversa velocità di attraversamento del mezzo.

Inoltre, il punto in cui coincidono gli indici di rifrazioni è quello che si trova lungo l'asse del mezzo.

6.2 Onde elettromagnetiche

Le onde elettromagnetiche sono composte da componenti perpendicolari fra loro del campo elettrico e magnetico che si propagano lungo una direzione z . Detto ciò possiamo esprimere l'equazione di un'onda elettromagnetica che si propaga lungo una direzione come:

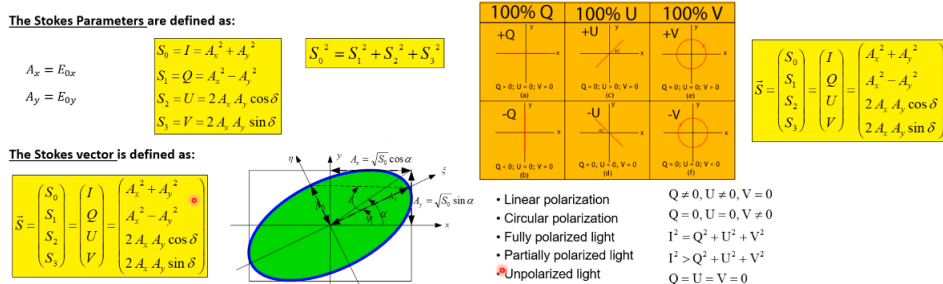
$$\vec{E}_x(z, t) = E_{0x} \cos(\omega t - kz + \delta_x) \vec{x} \quad \vec{E}_y(z, t) = E_{0y} \cos(\omega t - kz + \delta_y) \vec{y} \quad (5)$$

Si dimostra che unendo queste due equazioni si giunge all'equazione dell'ellisse dipendendo dalla differenza di fase fra le componenti del campo elettrico dell'onda. A questo punto, data l'equazione dell'ellisse si può calcolare la deformazione del fascio tramite l'ellisse di polarizzazione nel piano xy : si individuano gli angoli ψ di orientamento dell'ellisse e χ l'ellitticità dal fascio iniziale e quello rifratto.

6.3 Ellisse di Propagazione e Vettori di Stokes

L'ellisse di propagazione da cui si ricava l'ellitticità e l'orientamento può essere ricondotta in una forma più semplice tramite i vettori di Stokes. I parametri di Stokes sono un insieme di valori utili a capire se un'onda è polarizzata linearmente, radialmente etc... per poi modellizzare il percorso ottico del polarimetro.

In particolare è un vettore composto da 4 componenti dipendenti dall'equazione elettromagnetiche delle onde:



Per calcolare l'effetto del Plasma sul fascio laser occorre tenere conto delle componenti ottiche che ha attraversato il fascio laser. Per vedere questo effetto si calcola:

$$\vec{S}_{fin} = M_{pol} \cdot \vec{S}_{in} \quad (6)$$

In cui:

- M: matrice che caratterizza il componente ottico;
- S in o fin: polarizzazione del fascio iniziale e finale espressi in vettore di Stokes;

Ogni elemento ottico viene descritto dalla matrice di Mueller ed è sempre nota.

6.4 Sistema Polarimetrico

Gli effetti che entrano in gioco nel polarimetro sono espressi come:

$$\psi \propto \int n_e \cdot B_z dz \quad \text{Rotazione di Faraday} \quad (7)$$

$$\phi \propto \int n_e \cdot B_T^2 dz \quad \text{Cotton-Mouton} \quad (8)$$

L'evoluzione della polarizzazione viene descritta in base alla variazione del vettore di Stokes sull'asse z:

$$\frac{d\vec{S}}{dz} = \vec{\Omega} \times \vec{S} \quad (9)$$

In cui Ω dipende dalla frequenza, dai due indici di rifrazione del mezzo e il vettore di polarizzazione dell'onda veloce. Non ha risoluzione e può essere risolta tramite una matrice simmetrica simile a quella di Muller sia per i componenti ottici che il plasma.

Quindi, per sapere l'effetto che hanno i componenti ottici (inclusi il plasma) si moltiplicano tutte le matrici di Muller come da formula per poi ottenere:

- Angolo di rotazione:

$$\psi = \frac{1}{2} \arctan \frac{S_2}{S_1} \quad (10)$$

- Cotton-Mouton:

$$\arctan \frac{S_3}{S_2} \quad (11)$$

7 Interferometro

8 MSE

9 Neutronica

10 Disruzioni

Le disruzioni nei Tokamak sono inevitabili. Esse sono una perdita globale di confinamento e controllo del plasma dovuto da impurezze e radiazioni.

Si compongono di due fasi:

- Thermal quence: perdita di tutta l'energia cinetica e termica;
- Current quence: decadimento di corrente

In particolare, si ha una fase lontana dalla disruzione non si ha un indizio della disruzione. Dopo di che, si ha un segnale di precurso nelle bobine magnetiche che indica l'inizio di una anomalia. Passata questa fase, si hanno delle anomalie sul profilo di temperatura e corrente così da innescare il thermal quence e quindi l'inizio di una disruzione, perdendo di conseguenza il controllo.

Il problema principale di questo fenomeno è che avvenuta la disruzione si danneggiano i dispositivi e si introducono impurezze nel vessel che diminuiscono il tempo operativo del Tokamak. I danni principali sono:

- Carichi termici;
- Estinzione della corrente rapida porta a carichi magnetici molto elevati dovuto alle correnti indotte (Eddy current);
- Elettroni di runaway nella fase di current quence: in questa fase il plasma perde la densità, così vengono accelerati notevolmente divenendo un fascio di elettroni incontrollato in assenza di collisioni per limitarne la velocità.

10.1 Classificazione diagnostiche disruzione

L'obiettivo delle diagnostiche per le disruzioni è quello di predizioni, spiegazione e controllo. Si dividono in:

- monitoraggio delle conseguenze;
- misura della disruzione;
- investigazione della fisica della disruzione;
- predizione delle disruzione

Queste diagnostiche fanno parte del sistema di controllo e quindi è necessario che l'hardware siano affidabili, disponibili, forniscano un risoluzione spaziale e temporale per prevenire il fenomeno e devono coprire tutti i punti della camera da vuoto. Inoltre, al livello di processamento deve essere in real-time ed avere capacità predittive. Una scarica distruttiva presenta la seguente nomenclatura:

- Avoidance: la fase lontana di disruzione;
- Prevenzione: azione correttiva per evitare l'instabilità;
- Mitigazione: nel caso in cui la prevenzione non è abbastanza d avviene la disruzione si riducono i carichi abbassando lentamente la corrente e l'energia termica. In questo fase possono avvenire i run-away. Si immettono pellet di gas per ridurre il carico termico o degli shattered pellet.

10.2 Requisiti Hardware

10.2.1 Carichi termici

Il problema principale sono i carichi termici che dipendono dalla potenza deposita, dalla superficie e dal tempo. Le misure che si utilizzano sono:

- Camere termiche;
- Spettrometria;
- Bolometria

La problematica di queste misure è che il carico termico non sono toroidalmente simmetrici.

10.2.2 Carichi Meccanici

Le misure che si utilizza sono:

- bobine in posizioni differenti per eseguire una ricostruzione dell'equilibrio;
- Misure delle correnti toroidali del vessel (Halo currents);
- Accelerometria per misurare gli spostamenti della camera da vuoto

10.3 Locked mode detection AUG

Siamo nella fase di mitigazioni per cui dobbiamo predire con un margine di predizioni basso, ma molto accurato. In questa fase, vi sono delle instabilità MHD macroscopiche con misure magnetiche grande. La crescita delle instabilità vengono misurate con la componente radiale del campo magnetico tramite le Saddle Coils. In un tokamak ve ne sono 4 e tramite la differenza di queste bobine opposte e tramite un indicatore si misura l'effetto di rallentamento delle instabilità. Esse crescono nella fase preliminare della disruzioni, poi rallentano fino a zero e poi disrompe. Viene detto bloccato poiché il campo magnetico da loro generato si blocca con gli errori del Tokamak divenendo stazionari nel sistema di riferimento del laboratorio.

Analizzando lo spettro a bassa frequenza si nota che le instabilità MHD non sono le uniche fautrici delle disruzioni, ma anche dovute dai cosiddetti ELMS.

10.4 Imaging for disruptions

Si utilizzano delle telecamere nel visibile per avere una idea di quello che accade nella camera da vuoto. Risulta quindi molto importante cercare di ricoprire il maggior spazio della camera da vuoto e del vessel. Tramite queste telecamere è possibile rivelare i MARFE.

I MARFE sono instabilità termiche che si manifestano come un anello di radiazioni visibili per effetto delle impurezze. In queste zone la temperatura risulta più bassa rispetto al plasma.

10.5 Indicatori di Profilo

Per la predizione delle disruzione e il controllo in feedback sono necessari gli indicatori di profilo.

GLi indicatori di profilo per la predizione devono essere robusti e calcolabili in real time, ma allo stesso tempo devono fornire un quantitativo sufficiente di informazioni. Uno degli indicatori sul profilo di temperatura è la hollowness cioè quanto il profilo di temperatura è cavo. Questa è una misura particolarmente difficile da quantificare dato che in molti casi si deve effettuare il mirroring dei dati sull'asse magnetico per un problema di coverage e che è resiliente sulle fluttuazioni della temperatura.

Per questa misura si utilizza un fitting basato su due Gaussiane quando il profilo è cavo: differenze tra i due massimi e normalizzata per la deviazione standard delle gaussiane. Con questo approccio, più due massimi sono distanti più il profilo sarà cavo.

10.6 Problema inverso nella fusione

Per quanto riguarda le misure effettuate dall'esterno del plasma, esse vengono utilizzate nella risoluzione di un problema inverso per ottenere delle informazioni dell'interno. Il principale strumento che viene utilizzato è la tomografia.