

STUDIO IN REGIME DINAMICO DELL'INFLUENZA SULLA RETE DI TRASMISSIONE NAZIONALE DELL'IMPIANTO IGNITOR

B. Coppi Massachusetts Institute of Technology,
D. Baraldi ENEA,
M. Sforna, R. Salvati, R. Zaottini GRTN, Direzione Rete

Riassunto

L'articolo descrive brevemente il progetto Ignitor per la fusione nucleare e illustra gli studi che sono stati svolti sul sistema elettrico per valutare una soluzione ottimale di una sua connessione alla Rete di Trasmissione Nazionale. In particolare, è stata condotta una simulazione in regime dinamico del sistema elettrico italiano ed è stato valutato il grado di disturbo che un carico della potenza e delle caratteristiche di quello del progetto Ignitor potrebbe causare al normale esercizio. I risultati degli studi hanno permesso di individuare i nodi elettrici più appropriati alla connessione e ne hanno dimostrato la corrispondenza ai requisiti stabiliti dalle Regole di Connessione del GRTN.

1 Introduzione

La realizzazione di un esperimento in grado di raggiungere e studiare sperimentalmente le condizioni di accensione controllata di una miscela di deuterio-trizio per reazioni di fusione nucleare costituisce la prova di principio, e la dimostrazione scientifica, della fattibilità di un reattore a fusione. Tuttavia, fino a che i fondamenti teorici della fusione non saranno verificati sperimentalmente i criteri per costruire un reattore utilizzabile per la produzione di energia rimarranno incerti. Pertanto, la ricerca di base dovrebbe essere orientata alla scoperta delle metodologie di accensione del plasma. In aggiunta, gli esperimenti condotti in questo settore dovrebbero permettere di individuare i metodi di riscaldamento e i processi di controllo per un plasma acceso.

La reazione di fusione fra i due isotopi pesanti dell'idrogeno è quella che ha la maggiore sezione d'urto ad energie relativamente modeste ed è pertanto la reazione più facile da utilizzare per la dimostrazione scientifica del reattore a fusione. Il deuterio è un isotopo stabile e non radioattivo dell'idrogeno il cui nucleo è composto da un neutrone ed un protone. E' largamente presente in natura e può essere facilmente ottenuto utilizzando l'acqua come fonte primaria. Al contrario, il trizio è un isotopo radioattivo dell'idrogeno, il cui nucleo è formato da due neutroni ed un protone. Esso può essere ottenuto mediante opportune reazioni nucleari dal litio, elemento facilmente reperibile. La reazione di fusione fra un nucleo di deuterio ed un nucleo di trizio emette un nucleo di elio (particella- α) ed un neutrone ad alto contenuto energetico. La reazione produce energia in forma di energia cinetica dei prodotti di reazione ottenuta con una riduzione di massa di questi rispetto ai nuclei reagenti.

Avendo i nuclei di deuterio e trizio carica positiva, per superare le forze coulombiane di mutua repulsione, ed avere la reazione di fusione, è necessario fornire loro una sufficiente energia. Al momento, una delle strategie più promettenti per ottenere le condizioni di accensione consiste nello scaldare la miscela deuterio-trizio ad una temperatura tale che le velocità termiche dei nuclei siano sufficientemente alte da indurre il necessario tasso di reazione di fusione.

Il ruolo delle particelle- α diventa sempre più importante man mano che la miscela di deuterio e trizio si avvicina all'accensione. Questa è raggiunta quando l'energia depositata dalle particelle compensa tutte le forme di perdite o, in altri termini, il riscaldamento nucleare interno è sufficiente a sostenere da solo la temperatura del plasma. In particolare, la condizione di accensione

corrisponde al superamento di un valore minimo del triplo prodotto di temperatura, tempo di confinamento dell'energia e densità del plasma.

E' stato già detto che il plasma è costituito da particelle cariche e, nel suo insieme, si comporta analogamente ad un conduttore elettrico. E' quindi possibile riscaldarlo mediante una corrente indotta dall'esterno. Un plasma toroidale si comporta come una spira conduttrice cortocircuitata che costituisce il secondario di un trasformatore il cui primario può essere costituito da una serie di bobine alimentate dalla rete elettrica di potenza. La corrente indotta nella spira ha così il duplice scopo di creare la principale componente del campo magnetico su un piano meridiano (*campo poloidale*) necessario per il confinamento del plasma e per riscaldarlo efficacemente fino a temperature elevate. Questo tipo di riscaldamento è detto ohmico o resistivo. Un limite alla sua efficienza è dato dal fatto che la resistività del plasma decresce al crescere della temperatura; d'altra parte il riscaldamento dovuto alla particelle- α cresce con la temperatura. Nel caso del progetto Ignitor, descritto nel seguito, la temperatura corrispondente alle condizioni di accensione, pari a circa 11 keV (circa 130 milioni di °C), può essere ottenuta combinando il solo riscaldamento ohmico con il contributo al riscaldamento del plasma delle particelle- α prodotte dalle reazioni di fusione al crescere della temperatura. Per accelerare ed ottimizzare il raggiungimento dell'accensione nella macchina Ignitor è anche previsto l'utilizzo di tecniche di riscaldamento supplementare che nel caso specifico consistono nell'iniettare nel plasma onde elettromagnetiche mediante antenne effettuando un riscaldamento in radiofrequenza.

Con un plasma a temperature così elevate occorre evitare che entri in contatto con le pareti del reattore. Quindi, il problema del confinamento del plasma assume un ruolo fondamentale nel processo che porta all'ottenimento delle condizioni d'accensione. Mediante opportuni campi magnetici è infatti possibile ottenere un efficace confinamento delle particelle cariche in movimento all'interno di una camera da vuoto e rallentare in modo significativo il flusso di energia termica dal plasma verso l'esterno.

Il tipo di macchine a confinamento magnetico che meglio si presta a produrre plasmi capaci di accendersi per reazioni di fusione è quello a geometria toroidale ed è la presenza simultanea di magneti per produrre campi magnetici toroidali e poloidali che determina le condizioni di equilibrio della colonna di plasma. Tuttavia è evidente la necessità di elevate potenze elettriche per questo tipo di esperimenti, da cui consegue l'importanza di una attenta considerazione delle caratteristiche di alimentazione di questi impianti, argomento che sarà trattato nel seguito.

Dalla precedente breve descrizione della teoria delle reazioni a fusione si sono evidenziati tre argomenti che sono attualmente oggetto di ricerca e di cui il progetto Ignitor è un esempio: la dimostrazione dell'accensione di un plasma confinato magneticamente, la fisica del processo di accensione e il riscaldamento e il controllo del plasma acceso.

2 Il Programma IGNITOR

Ignitor è il primo e tuttora l'unico esperimento proposto e progettato per raggiungere le condizioni di accensione del plasma sfruttando le attuali conoscenze della Fisica e le tecnologie esistenti. Esso può essere considerato il passo necessario per studiare il comportamento del reattore a fusione e per identificare le tecnologie che potranno portare all'eventuale sfruttamento di questa fonte di energia.

Le caratteristiche tecniche della macchina ed i principi fisici che la ispirano, basati sulla tecnologia degli alti campi magnetici con configurazioni geometriche compatte, rendono Ignitor il più avanzato fra tutti gli esperimenti proposti per produrre una vera combustione per fusione. In particolare, Ignitor rappresenta il più recente sviluppo della famiglia di macchine Alcator realizzate

presso il Massachusetts Institute of Technology (MIT) a partire dalla fine degli anni '60 e delle macchine FT (Frascati Torus) costruite successivamente, sulla stessa linea, a Frascati.

Le dimensioni compatte di Ignitor, unite agli alti campi magnetici, permettono l'unico approccio attualmente possibile per lo studio delle condizioni di ignizione di plasmi in deuterio-trizio. Il progetto della macchina si basa su una configurazione di confinamento toroidale con basso rapporto d'aspetto (*raggio maggiore del toroide/raggio minore*). Queste scelte permettono di sfruttare i vantaggi legati agli alti campi magnetici, alle elevate correnti e alle alte densità di plasma (Tabella I). Con le caratteristiche citate si ottengono plasmi con basse concentrazioni di impurità, un buon confinamento delle particelle- α e un ragionevole fattore di sicurezza contro l'eccitazione delle instabilità macroscopiche più deleterie.

Tab 1: Principali Parametri del Plasma al momento dell'accensione nella macchina Ignitor

Parametri	Valori
Corrente nel plasma	11 MA
Induzione del campo magnetico toroidale	13 Tesla
Temperatura centrale elettronica	11.5 keV
Temperatura centrale degli Ioni	10.5 keV
Densità elettronica centrale	$1.0 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$
Pressione centrale del plasma	3.3 MPa
Energia immagazzinata nel plasma	11.9 MJ

I magneti in rame di Ignitor sono la naturale evoluzione di quelli utilizzati nelle macchine Alcator. La loro temperatura iniziale è abbassata a circa 30 K (-243 °C), utilizzando un sistema di raffreddamento ad elio gassoso, in modo tale da portare il rapporto *resistività/calore specifico* del rame ad un valore ottimale e permettere di produrre impulsi di corrente relativamente lunghi nei magneti della macchina. Il sistema di raffreddamento costituisce quindi un elemento essenziale del progetto (Figura 1).

Nel suo insieme la macchina Ignitor è un sistema altamente ottimizzato che prevede una completa integrazione di tutti i suoi principali elementi strutturali, ovvero: i magneti che generano i campi toroidali e poloidali, la camera del plasma e le strutture di rinforzo che contengono i magneti. Il solenoide centrale, che è l'elemento principale del sistema di magneti per i campi poloidali, è suddiviso in più elementi indipendenti sia in senso radiale che verticale in modo tale da garantire una sufficiente flessibilità per produrre le differenti configurazioni d'equilibrio del plasma richieste.

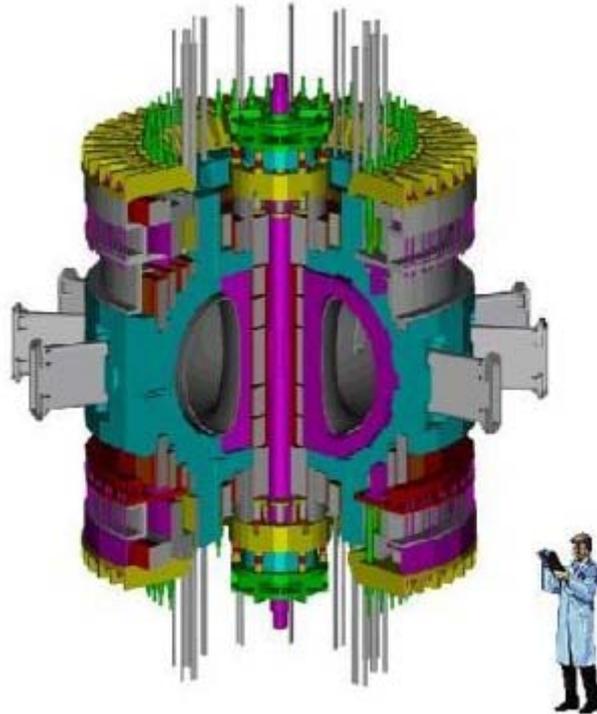


Figura 1: Schema della macchina IGNITOR [1]-[4].

Infine, il progetto della macchina prevede la presenza di un sistema di riscaldamento ausiliario alle frequenze di ciclotrone dei nuclei (a 100-140 MHz). Per ottenere un significativo controllo sull'evoluzione dei profili di temperatura e della densità di corrente all'interno del plasma sono sufficienti circa 5 MW di potenza assorbita, che può essere trasmessa al plasma utilizzando antenne posizionate in alcune degli accessi equatoriali della camera del plasma.

Le grandi energie richieste dalla macchina Ignitor devono essere prelevate da una rete elettrica sufficientemente potente che permetta di soddisfare le esigenze dell'impianto ed evitare che lo stesso costituisca un elemento disturbante per la qualità del servizio reso alle utenze industriali e domestiche. Con tali obiettivi i membri del programma Ignitor (*Ignitor Project*) si sono rivolti al Gestore della Rete di Trasmissione Nazionale (GRTN) perché sia individuato un nodo del sistema elettrico italiano idoneo al soddisfacimento delle necessità di assorbimento di potenza dell'impianto, senza penalizzarne le prestazioni, nel rispetto dei vincoli di connessione.

3 Lo Studio della Connessione dell'Impianto Ignitor alla Rete di Trasmissione Nazionale

Come è noto, le attività del GRTN sono relative alla trasmissione, il dispacciamento dell'energia elettrica e alla gestione unificata della Rete di Trasmissione Nazionale (RTN), garantendo a tutti gli operatori del settore elettrico la libertà di accesso alla stessa, cioè di connessione, a parità di condizioni. Quindi, tra le altre funzioni, il GRTN ha il compito di connettere alla RTN tutti i soggetti che ne facciano richiesta, senza compromettere la continuità del servizio, nel rispetto delle Regole Tecniche di Connessione [5] e delle condizioni tecnico-economiche di accesso e di interconnessione.

3.1 I Criteri di Connessione

Quando un operatore del settore elettrico indirizza al GRTN una richiesta di connessione di un impianto sono eseguiti una serie di studi orientati a valutarne la compatibilità con il corretto funzionamento del sistema elettrico.

Infatti, esiste l'esigenza di regolare la connessione per garantire l'operatività e il funzionamento sicuro del resto della rete elettrica pur facilitando il più possibile l'accesso. Nella maggior parte dei casi, la qualità dei servizi forniti dalla RTN dipende dal corretto funzionamento dell'insieme degli impianti connessi. Pertanto, le caratteristiche di funzionamento della RTN nei siti di connessione sono assicurate dal GRTN quando:

- non sussistano condizioni critiche per la sicurezza del sistema elettrico nazionale o parti di esso;
- tutti gli utenti della RTN rispettino le prescrizioni dettate dalle Regole Tecniche di Connessione.

A questo proposito il GRTN ha individuato delle specifiche e dei criteri tecnici che hanno lo scopo di definire le caratteristiche e le prestazioni della RTN nei siti di connessione di ciascun utente, nonché le regole tecniche, progettuali e funzionali che devono essere soddisfatte da ogni utente connesso o che intenda connettersi alla RTN. Specificatamente, l'oggetto delle Regole Tecniche di Connessione sono:

- le caratteristiche funzionali e le prestazioni della RTN nei siti di connessione;
- i criteri funzionali di progettazione e le caratteristiche di funzionamento degli impianti elettrici di generazione, delle reti elettriche di distribuzione, delle apparecchiature elettriche direttamente connesse, dei circuiti di interconnessione e delle linee dirette.

3.1.1 La Connessione degli Impianti di Generazione e degli Utenti Passivi

Il GRTN è consapevole che l'adeguamento alle Regole Tecniche di Connessione degli impianti di generazione esistenti deve avvenire con gradualità, tenendo conto delle esigenze del servizio, dell'impegno di risorse richiesto dagli interventi e della sostenibilità dei relativi costi. Con questi criteri si determina l'adeguatezza del sito di connessione e dello schema più appropriato in base ai seguenti fattori:

- distanza dalla rete dell'impianto da connettere (linee e stazioni);
- taglia dell'impianto;
- presenza, nell'area di interesse, di altri impianti di produzione, di linee e di stazioni;
- possibilità di ampliamento delle stazioni;
- capacità di trasporto della/e linea/e in relazione alla massima portata in corrente della/e stessa/e;
- margini di stabilità statica e dinamica della RTN;
- sicurezza di esercizio della RTN, cui l'impianto è connesso;
- contributo alle correnti massime di corto circuito trifase e monofase a seguito dell'inserimento dell'impianto.

Inoltre il GRTN definisce le caratteristiche della stazione di connessione e il numero di linee di collegamento, in accordo con l'utente, sulla base dei seguenti fattori:

- esigenze della rete, quali la disponibilità di linee e sbarre per alimentare in modo sicuro utenti passivi nella stessa stazione, la disponibilità di produzione, la selettività delle protezioni in relazione alla disponibilità della linea o della stazione interessata;
- esigenze dell'impianto, quali la disponibilità di sbarre e di collegamenti, legate alla taglia dell'impianto, al numero di circuiti o di gruppi di generazione dell'impianto stesso, al servizio previsto (continuo, di punta o altro) o alla continuità del servizio.

Criteri analoghi ai precedenti sono adottati dal GRTN anche nel caso che la richiesta di connessione avvenga da parte di un utente passivo, cioè non produttore di energia, che è gestita in modo da non dare luogo ad alcun degrado nelle prestazioni o nella affidabilità della rete stessa. Pertanto, la progettazione dell'impianto dell'utente deve essere eseguita tenendo presente che l'impianto stesso non deve influenzare negativamente il funzionamento della rete elettrica né deve danneggiare gli altri utenti ad essa connessi.

Nel caso dell'impianto Ignitor e per i motivi precedentemente indicati dovuti alla rilevanza del suo carico, il GRTN ha ritenuto indispensabile eseguire degli studi in regime dinamico sugli eventuali disturbi indotti. Tali studi potrebbero evidenziare la necessità di installare localmente dei dispositivi di compensazione delle variazioni di potenza reattiva adeguati, noti come Static Var Compensator (SVC), per porre rimedio agli eventuali disturbi prodotti dall'impianto Ignitor. La modalità di presa di carico dell'impianto Ignitor pone la necessità di effettuare delle valutazioni anche sui transitori elettromeccanici dei maggiori impianti di generazione connessi alla RTN.

3.2 Caratteristiche elettriche del carico dell'impianto IGNITOR

Il diagramma di carico di ogni singolo ciclo di funzionamento della macchina Ignitor, fornito dall'ENEA, è caratterizzato da un andamento impulsivo di potenza attiva e reattiva con periodi di assorbimento fino a 1095 MW e 860 MVar e periodi di restituzione fino a 428 MW (Figure 1 e 2).

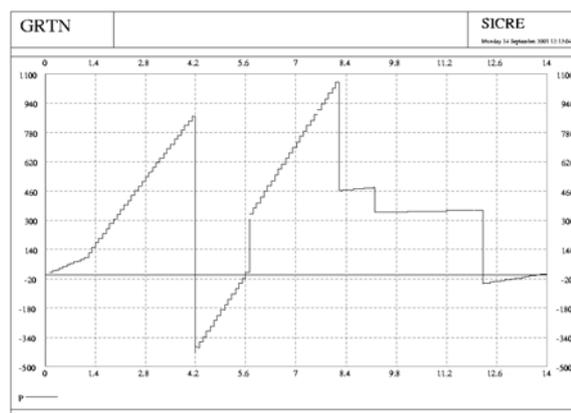


Fig. 2: Diagramma del ciclo di potenza attiva P [MW] del carico relativo all'impianto Ignitor. Da notare l'iniziale andamento crescente della potenza, per una durata di 4 s fino a circa 900 MW, ed il successivo gradino in discesa con la restituzione alla rete di circa 430 MW.

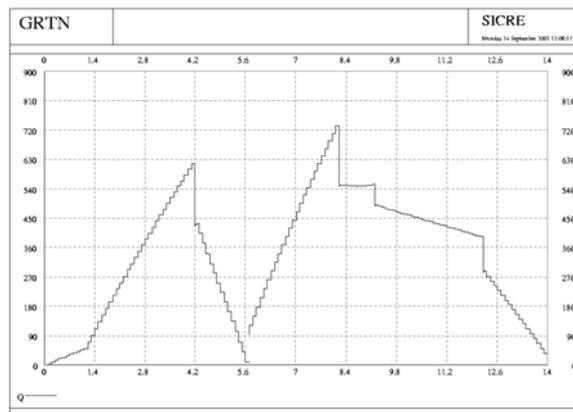


Fig. 3: Diagramma del ciclo di potenza reattiva Q [MVar] del carico relativo all'impianto Ignitor. L'impianto può assorbire una potenza molto elevata, fino ad un valore pari a circa 860 MVar.

Ogni ciclo di funzionamento dura circa 14 secondi. Dai grafici si nota la caratteristica modalità di presa di carico attivo dell'impianto con una rampa iniziale della durata di 4 s fino a circa 900 MW seguita da un immediato rilascio di potenza con un gradino negativo dell'ordine di 1300 MW. Delle similitudini si notano anche sia sulla modalità di presa di carico reattivo che raggiunge un massimo di circa 860 MVar.

Da tali andamenti di potenza attiva e reattiva, si possono ipotizzare disturbi in rete che inducono variazioni istantanee della potenza attiva dei gruppi di generazione, nelle centrali vicine al nodo di connessione dell'impianto Ignitor, tali da poter arrecare danni all'albero dei turboalternatori dei gruppi stessi. Si possono ipotizzare, inoltre, elevate variazioni di tensione nei nodi vicini a quello di connessione dell'impianto Ignitor e, insieme, variazioni di frequenza anche in nodi lontani.

3.3 Ipotesi di collegamento alla Rete di Trasmissione Nazionale

Sono state formulate due ipotesi di collegamento per l'impianto Ignitor alla RTN nei nodi a 400 kV di Rondissone (To) e di Caorso (Pc). La decisione di scegliere questi due nodi è stata condizionata dalla necessità di avere un elevato valore della potenza di cortocircuito trifase e dalla disponibilità logistica dei nodi in esame.

Per le simulazioni è stato preso a riferimento il diagramma di presa di carico dell'Ignitor relativo all'ipotesi di progetto ritenuta quella più gravosa per la RTN, secondo gli accordi intercorsi con i responsabili dell'ENEA. Nello studio, per ogni ipotesi di connessione nelle stazioni a 400 kV di Rondissone e di Caorso, è stata analizzata una situazione di carico nazionale di punta invernale diurno ed una situazione di carico nazionale estivo notturno.

Di seguito per brevità saranno descritti, in particolar modo, gli studi effettuati per la connessione alla stazione di Rondissone che è quella che fin dall'inizio ha mostrato caratteristiche più idonee all'alimentazione del carico Ignitor. Questa stazione è costituita da sezioni a doppio sistema di sbarra con interruttore di parallelo per i livelli di tensione a 400, 220 e 132 kV (Figura 4).

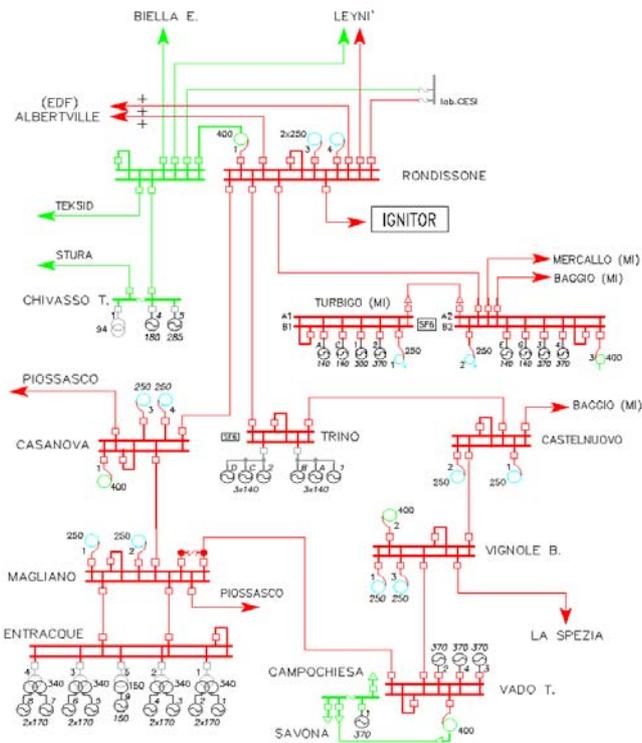


Fig. 4: Schema elettrico di una parte della rete a 400 e 220 kV nei dintorni della stazione di Rondissone (To) in cui si è simulata la connessione dell'impianto Ignitor.

Come si può vedere dalla figura, l'impianto Ignitor è stato collegato alla sezione a 400 kV. Alla stessa è connessa le seguenti linee:

- una linea in doppia terna verso la stazione di Albertville (Francia);
- una linea verso la stazione di Leyni;
- una linea verso la stazione di Casanova;
- una linea verso una sezione di un laboratorio CESI;
- un'altra linea verso la stazione di Trino, a cui sono connessi 2 impianti di produzione a ciclo combinato;
- una linea verso la stazione di Turbigo, a cui sono connessi 4 gruppi Turbogas e 4 gruppi Turbovapore.

La stazione di Rondissone alimenta con due autotrasformatori da 250 MVA la RTN a livello di tensione 132 kV; a questa rete sono connesse le cabine primarie della distribuzione che alimentano carichi domestici e industriali.

3.4 Strumenti di calcolo utilizzati

Lo studio è stato svolto con il simulatore di rete denominato SICRE, in uso da molti anni prima all'ENEL ed ora al GRTN per lo studio dei fenomeni di dinamica del sistema elettrico [6]. Si tratta di un software molto evoluto, completo nelle funzioni e sintonizzato sulle complessità del sistema elettrico italiano e sulle esigenze del GRTN. Il simulatore SICRE consiste in un insieme di funzioni in grado di simulare il comportamento dinamico del sistema elettrico, in condizioni sia di esercizio normale sia di emergenza, utilizzando le più moderne tecnologie informatiche disponibili.

Specificatamente, questo simulatore consente di eseguire studi di fenomeni di short term dynamics (STD) quali oscillazioni elettromeccaniche e regolazioni veloci e locali innescati da perturbazioni, cioè da guasti o manovre. Inoltre, consente di eseguire studi di long term dynamics (LTD) come i transitori di frequenza media e il comportamento dei gruppi di produzione in regolazione secondaria di frequenza e di tensione.

Per lo studio Ignitor la rete elettrica italiana è stata simulata per i livelli di tensione a 400 kV e 220 kV con i seguenti componenti: rete passiva, macchine sincrone e asincrone, regolatori primari e secondari di frequenza e tensione, variatori sotto carico degli auto-trasformatori ed eventuali compensatori statici. La rete estera è simulata in maniera completa per ciò che riguarda la rete passiva a 400-220 kV fino a circa 3 stazioni dal confine italiano e con modelli equivalenti della generazione per il resto della rete europea.

4 Risultati delle Simulazioni

Dall'analisi dell'andamento della frequenza in vari nodi della RTN durante le fasi di funzionamento dell'impianto Ignitor, si evidenzia che i valori ottenuti non superano i limiti di variazione in condizioni di esercizio normale, pari a 49.9÷50.1 Hz. Occorre considerare che il disturbo introdotto dall'impianto Ignitor si propaga per tutta la RTN e quindi sono stati analizzati altri nodi, in particolare quelli ai confini della rete stessa. Si constata che anche nell'area elettrica siciliana, in cui si hanno variazioni più marcate della frequenza, non sono superati suddetti limiti. Ad esempio, nel caso risultato più gravoso nell'ipotesi di connessione dell'impianto Ignitor al nodo a 400 kV di Caorso ed in una situazione estiva notturna, si ottengono variazioni picco-picco di frequenza nel nodo a 400 kV di Sorgente dell'ordine di 0.075 Hz con una variazione massima di 0.04 Hz rispetto al valore nominale di 50 Hz (Figura 5).

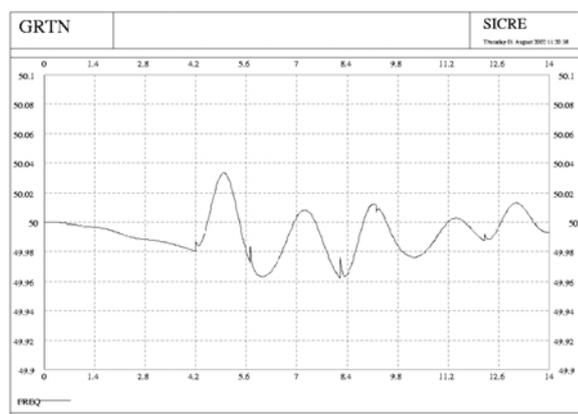


Fig. 5: Andamento della frequenza nel nodo elettrico a 400 kV di Sorgente (Messina) nell'ipotesi di connessione dell'impianto IGNITOR al nodo a 400 kV di Caorso.

Per ciò che riguarda l'andamento della tensione, occorre considerare sia i limiti di variazione della tensione sulla RTN, imposti a $\pm 5\%$ intorno al valore di 400 kV, sia la variazione di tensione percentuale $\Delta V\%$ rispetto al valore massimo di tensione raggiunto. Dagli studi effettuati risulta che, per ciò che concerne la prima prescrizione, i limiti risultano superati, anche se di poco, in tutte e due le ipotesi di connessione dell'impianto Ignitor. Per ciò che concerne il secondo vincolo, si hanno i valori maggiori per la $\Delta V\%$ nel nodo a 400 kV di Caorso nell'ipotesi di connessione al nodo stesso e, in special modo, relativa alla situazione di minimo carico notturno. Occorre, altresì, notare che tale nodo non ha trasformatori di carico a differenza di Rondissone e non alimenta direttamente la

rete di distribuzione. In generale, in presenza di assetti di rete o stati di esercizio che comportano un abbassamento della potenza di cortocircuito nei nodi di connessione le variazioni di tensione causate dall'impianto Ignitor possono essere critiche.

Occorre inoltre far notare che le rapide variazioni di potenza assorbita, dovute alla modalità di presa di carico, sollecitano sensibilmente i gruppi di produzione delle centrali di produzione elettricamente vicine all'impianto Ignitor, cioè Trino Vercellese, Tavazzano, Piacenza, La Casella. Tali sollecitazioni di tipo elettromeccanico sono da tenere sotto controllo e necessitano di ulteriori approfondimenti da effettuarsi mediante test reali.

A titolo di esempio si illustrano gli andamenti della tensione e della frequenza nel nodo a 400 kV di Rondissone scelto per la connessione dell'impianto Ignitor, nel caso di una situazione di carico di punta invernale diurno. I risultati delle simulazioni mostrano che, all'applicazione del carico, si ha una variazione di tensione massima nel nodo dell'ordine del 5% rispetto al valore massimo di tensione. Infatti nel transitorio di presa di carico si ha una variazione di tensione $\Delta V = 19$ kV, passando dal valore massimo $V_{\max} = 398$ kV al valore minimo $V_{\min} = 379$ kV (Figura 6).

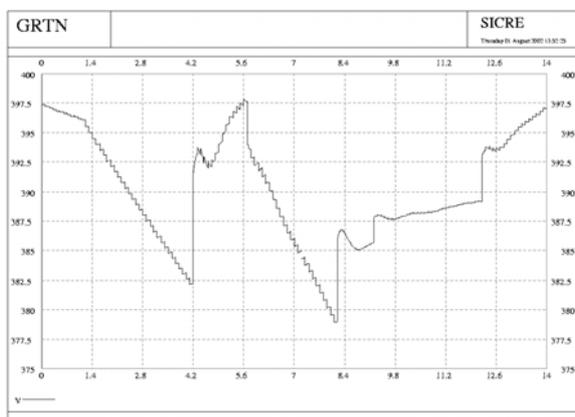


Figura 6: Andamento della tensione nel nodo a 400 kV di Rondissone nell'ipotesi di connessione dell'impianto Ignitor al nodo stesso.

Sempre nella stessa situazione descritta in precedenza, a Rondissone si osserva una variazione di frequenza picco-picco che risulta circa di 0.03 Hz con una variazione massima di 0.02 Hz rispetto al valore nominale di 50 Hz (Figura 7).

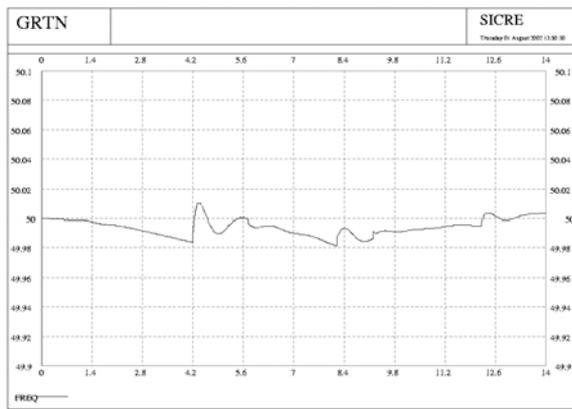


Figura 7: Andamento della frequenza nel nodo a 400 kV di Rondissone nell'ipotesi di connessione dell'impianto Ignitor al nodo stesso.

Per quanto illustrato è opportuno fare le seguenti considerazioni cautelative legate agli eventuali problemi di esercizio che possono emergere durante il funzionamento dell'impianto Ignitor:

- La rete presa in esame è una rete rappresentativa della maggior parte delle situazioni di esercizio normali. Quindi, nelle situazioni temporanee di una rete degradata dal fuori servizio di collegamenti a 400 kV o di gruppi di elevata potenza, si potrebbe avere la necessità di impedire all'impianto Ignitor il suo ciclo di presa di carico;
- I risultati fanno riferimento ad uno specifico diagramma di carico, in potenza attiva e reattiva, e ad uno specifico ciclo di funzionamento, in frequenza e durata, dell'impianto Ignitor. Pertanto, qualsiasi modifica, anche parziale, dell'impianto, o del suo assorbimento, deve essere oggetto di uno studio appropriato.
- In particolari situazioni di rete in cui si evidenziassero problemi di bassa riserva di potenza reattiva e, quindi, valori di tensione sensibilmente diversi dal valore di riferimento di 400 kV, considerato il forte assorbimento di reattivo da parte dell'impianto Ignitor, potrebbe essere necessario richiedere la sospensione del ciclo di presa di carico dell'impianto stesso.

Pertanto, le modalità di funzionamento, gli orari ed i tipi dei diagrammi di presa di carico dell'impianto Ignitor dovranno essere validati da GRTN prima di essere eseguiti.

Alcune ipotesi di soluzioni migliorative possono essere:

- Per porre rimedio alle variazioni della tensione dovute all'andamento impulsivo del carico stesso, sarebbe auspicabile installare localmente dei dispositivi di compensazione di potenza reattiva (SVC).
- Nel caso in cui l'impianto Ignitor iniettasse sulla RTN armoniche di corrente, sarebbe auspicabile installare adeguati sistemi di filtraggio in modo che nel nodo a 400 kV di connessione il fattore di distorsione armonica totale in tensione (THD) risulti contenuto entro il valore di 1.5%.

5 Conclusioni

Sulla base delle simulazioni effettuate, si evidenzia che fra le due ipotesi analizzate di connessione dell'impianto Ignitor alla RTN, quella che comporta i minori disturbi è la connessione nel nodo a 400 kV di Rondissone, tenendo conto delle precauzioni sovraesposte e delle soluzioni migliorative prospettate.

Ulteriori approfondimenti potranno ritenersi necessari per tenere conto sia del livello di tensione 132 kV della rete elettrica italiana, sia del comportamento delle protezioni di macchina dei gruppi di produzione vicini al sito di installazione dell'impianto Ignitor.

Le analisi e gli studi effettuati, al momento, si possono ritenere sufficienti. Successivamente saranno condotti ulteriori studi di dettaglio per individuare i dispositivi adeguati ad esempio l'opportunità di introdurre un dispositivo di compensazione statica di potenza reattiva, di cui dovranno essere individuate le caratteristiche per alleviare gli eventuali disturbi alla RTN che potrebbero essere indotti dall'impianto Ignitor durante il reale esercizio.

6 Bibliografia

- [1] <http://www.frascati.enea.it/Ignitor>.
- [2] B. Coppi, A. Airoidi, et al., "Critical Physics Issues for Ignition Experiments", MIT RLE Report PTP 99/06 (1999).
- [3] L. R. Baylor, T.C. Jernigan, et al., *Physics of Plasmas* 7, 1878 (2000).
- [4] J. A. Snipes, et al., *Plasma Phys. Contr. Fusion* 42, 381 (2000).
- [5] Regole Tecniche di Connessione, pubblicate sul sito del GRTN (<http://www.grtn.it>).

- [6] P. Baratella, P. Scarpellini, R. Marconato, B. Cova, E. Gaglioti, R. Zacheo, "A Power System Simulator Covering Different Time Scale Phenomena: Models, Algorithms, MMI and Test Results", Proc. IEEE Stockholm Power Tech, Stockholm, June 1995, pp. 376-381.