



Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia
e lo sviluppo economico sostenibile



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Attività finalizzate alla fornitura di 8 alimentatori AC/DC per gli avvolgimenti poloidali e di controllo della macchina sperimentale tokamak JT-60SA

P. Costa, A. Lampasi, G. Maffia, F. Starace



ATTIVITÀ FINALIZZATE ALLA FORNITURA DI 8 ALIMENTATORI AC/DC PER GLI AVVOLGIMENTI POLOIDALI E DI CONTROLLO DELLA MACCHINA SPERIMENTALE TOKAMAK JT-60SA

P. Costa, A. Lampasi, G. Maffia, F. Starace (ENEA)

Settembre 2012

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Area: Governo, gestione e sviluppo del sistema elettrico nazionale

Progetto: Fusione nucleare: Attività di fisica e tecnologia della fusione complementari ad ITER

Responsabile del Progetto: Aldo Pizzuto, ENEA

Indice

Sommario	4
<i>Introduzione</i>	<i>5</i>
Descrizione delle attività svolte e risultati	6
<i>Program to check the capability of the JT-60SA Poloidal Field PSs with respect to the Experimental Scenarios</i>	<i>6</i>
<i>Operational requirement for PFC PS units</i>	<i>7</i>
<i>Scope of the Procurement</i>	<i>7</i>
<i>Reference schemes</i>	<i>12</i>
<i>Performances</i>	<i>12</i>
Conclusioni	12
Riferimenti bibliografici	13
Abbreviazioni ed acronimi	13

Sommario

Il presente rapporto descrive le attività svolte nell'ambito della Ricerca di Sistema Elettrico per il Piano Annuale di Realizzazione (PAR) 2011 dell'Obiettivo A.4 dell'Accordo di Programma tra Ministero dello Sviluppo Economico ed ENEA (Area: Governo, gestione e sviluppo del sistema elettrico nazionale. Progetto: Fusione nucleare: Attività di fisica e tecnologia della fusione complementari ad ITER).

La fusione nucleare è attualmente considerata una opzione molto concreta come fonte di energia sicura, compatibile con l'ambiente e praticamente inesauribile. Europa, Cina, Corea del Sud, India, Giappone, Federazione Russa e Stati Uniti hanno riunito i loro sforzi in un progetto di grande prestigio, ITER, che rappresenta una tappa fondamentale per arrivare alla realizzazione del primo reattore dimostrativo a fusione (DEMO).

Per supportare ITER, Europa e Giappone hanno ratificato un accordo di collaborazione denominato "Broader Approach" (BA). Per finanziare l'accordo, Francia, Italia, Spagna, Germania e Belgio hanno offerto dei contributi "volontari" (Voluntary Contributor, VC) finanziari per forniture "in kind". Ogni contributo al sistema è regolato da un Agreement of Collaboration (AoC) tra l'agenzia europea Fusion for Energy (F4E) e le agenzie nazionali associate (tra cui l'ENEA) finalizzato all'attuazione congiunta di un Procurement Arrangement (PA).

In relazione alle attività descritte nel presente rapporto, l'Italia, attraverso l'ENEA si è impegnata a fornire una parte delle alimentazioni elettriche di un esperimento tipo tokamak, "satellite" di ITER, denominato JT-60SA, situato a Naka in Giappone e gestito dall'agenzia Japan Atomic Energy Agency (JAEA). Un'altra parte rilevante delle alimentazioni sarà fornita dal Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA) con cui è stato necessario concordare le specifiche tecniche e gestionali.

Gli alimentatori oggetto della fornitura sono difficilmente reperibili sul mercato e richiedono un progetto tecnico specializzato e una gestione di insieme molto attenta:

- per l'elevatissima potenza in corrente continua con basso duty cycle;
- per le configurazioni proposte (back-to-back con corrente di circolazione)
- per la necessità di interagire con i sistemi di diversi partner internazionali (F4E, JAEA e CEA), sviluppati in parallelo;
- per la scelta (anche dettata dal desiderio di limitare i costi per i contribuenti) di riutilizzare, ove possibile, elementi della macchina JT-60 preesistente, di cui JT-60SA è un aggiornamento superconduttore ("super, advanced").

Per questi motivi, anche durante il periodo coperto da questo rapporto (ottobre 2011 – settembre 2012) l'ENEA ha dovuto svolgere diverse attività di aggiornamento delle specifiche tecniche (TS) [1] e degli altri documenti necessari per la realizzazione, integrazione dei sistemi e gestione dell'impianto. A questo scopo, l'ENEA ha partecipato a diversi meeting e scambi di informazione con i partner nazionali ed internazionali, (in particolare F4E, CEA e JAEA). Poiché la realizzazione finale degli alimentatori sarà affidata da ENEA ad un fornitore industriale (Industrial Supplier, IS), in questo periodo sono stati selezionati gli interlocutori potenziali a cui rivolgere la Call for Tender finale che sarà lanciata nei prossimi mesi.

Le suddette attività e i conseguenti avanzamenti nel progetto saranno presentati nel seguito di questo rapporto.

Introduzione

Il lavoro svolto nell'ambito dell'Accordo di Programma ha come obiettivo la realizzazione di 8 alimentatori AC/DC per gli avvolgimenti poloidali e di controllo della macchina sperimentale tokamak JT-60SA con i relativi sistemi di supporto, controllo e protezione.

Gli alimentatori da fornire sono divisi in:

- 4 Solenoidi centrali (Central Solenoid, CS), classificati come CS1, CS2, CS3 e CS4;
- 4 Equilibrium Field (EF) coils, classificati come EF1 e EF6;
- 2 Fast Plasma Position Control (FPPC) coils, classificati come lower FPPC e upper FPPC.

I dettagli costruttivi ed operativi della macchina sperimentale JT-60SA sono raccolti nel Plant Integration Document (PID) [2], periodicamente aggiornato con la collaborazione di tutti i partner internazionali. Al momento della redazione di questo rapporto (settembre 2012) è in revisione la versione 3.1 del PID. È importante sottolineare che, a causa della natura sperimentale ed innovativa del sistema, alcune sue caratteristiche, anche non secondarie, sono costantemente oggetto di discussione ed aggiornamento.

Nel periodo di riferimento di questo PAR (ottobre 2011 – settembre 2012) sono state svolte le seguenti attività:

1. Analisi e simulazione di alcuni aspetti del sistema ancora da definire o da aggiornare con le nuove informazioni disponibili, anche grazie agli avanzamenti nelle altre parti del sistema.
2. Un passo fondamentale per il progetto degli alimentatori è stato il loro dimensionamento termico che ha richiesto un confronto con gli scenari di corrente previsti dai fisici giapponesi. A questo scopo, in collaborazione con F4E è stato sviluppato un tool informatico per il calcolo delle grandezze elettriche e termiche degli alimentatori (in particolare, per la stima delle temperature di giunzione dei tiristori nei diversi casi e configurazioni). Questo tool è stato impiegato anche per il progetto degli alimentatori forniti dal CEA e sarà utile anche durante le operazioni di JT-60SA per valutare preventivamente la realizzabilità di uno scenario. Con opportune modifiche il tool potrà essere adattato per lo studio ed il progetto di altri esperimenti di fusione.
3. Durante la stesura delle TS sono stati eseguiti calcoli finalizzati alla stima della temperatura di giunzione dei tiristori degli alimentatori oggetto della fornitura.
4. Definizione, insieme ai partner internazionali, delle interfacce e delle condizioni esterne degli alimentatori all'interno dell'impianto JAEA a Naka.
5. Redazione delle TS aggiornate per la Call for Tender. Tali TS sono state integrate con quelle del CEA e sono state discusse ed ufficialmente approvate da F4E e JAEA.
6. Partecipazione alle attività di revisione delle TS per la nuova Call for Tender del CEA. Questa revisione era necessaria a causa della impossibilità da parte del CEA di individuare un IS in grado di soddisfare i requisiti tecnici, legali ed economici del progetto. In particolare, sono stati riorganizzati i test di collaudo degli alimentatori.
7. Redazione ed aggiornamento della documentazione richiesta dagli accordi BA, PA e AoC (documenti di qualità, Procurement Plans, Procurement Schedules, Risk Tables, Periodic Reports, ecc.) in collaborazione con F4E e JAEA.
8. Partecipazione agli incontri tecnici e gestionali con i partner internazionali (F4E, JAEA ed altre agenzie ed industrie) per lo scambio di informazioni e l'aggiornamento del progetto. In particolare, nel periodo di riferimento si sono tenuti i seguenti incontri formali di JT-60SA: 8°, 9° e 10° Design Review Meeting on Magnet Power Supply e 13°, 14° e 15° Technical Coordination Meeting.
9. Preparazione dei documenti legali ed amministrativi necessari per lo svolgimento della Call for Tender secondo le leggi italiane e le direttive europee.

La maggior parte dei testi presentati nel seguito sono estratti dai deliverable del progetto redatti in lingua inglese in esecuzione dell'AoC e del PA sugli alimentatori. Per questo, saranno riportati nella versione originale.

Descrizione delle attività svolte e risultati

Program to check the capability of the JT-60SA Poloidal Field PSs with respect to the Experimental Scenarios

The scope of this program is to verify if the selected scenario matches the capability of the JT-60SA poloidal field power supply (PS) system. The program covers the power supplies configurations in the PID [2].

The program is written in Matlab language and the input data can be provided through the Excel worksheet "JT60SA_PS_inputdata.xls".

The developed software checks the following items:

1. The power supply's output voltage is adequate for the selected scenario.
2. The voltage generated by the Switching Network Units (SNU) is adequate for the selected scenario;
3. The available values of the resistor units included in the SNU together with their rated current and energy, are adequate.
4. The PS thyristors (as type and number of parallels per power supply branch) are adequate. This is checked by verifying that the thyristor's junction temperature of each power supply unit is lower than 120 °C.

The calculation results are obtained by the following steps:

1. Calculation of the voltage requested across the poloidal field coils. The calculation is performed moving from the current scenario and the inductances/resistances matrix (M/R) representing the poloidal field system, including the passives element of the machine. Two possible models are available: a full 202x202 elements matrix (proposed by JAEA) or an equivalent reduced 24X24 elements matrix (defined by F4E). The selection can be done before starting the simulation.
2. Calculation of the actual max/min values available across the each power supply unit. The maximum and minimum firing angles can be set for each converter.
3. Calculation of the voltage drop generated by the SNU insertion.
4. Check of available voltage.
5. Calculation of the currents actually flowing in each power supply. Each power supply is constituted of a 4 quadrants AC/DC thyristor converter. Both forward and backward converters are fed by the same secondary of the converter transformer. The program automatically generates the current flowing in both forward and backward converters, including circulation current.
6. Calculation of voltage drop across each thyristor valve.
7. Calculation of the total thermal impedance of each thyristor.
8. Calculation of the power losses in each thyristor.
9. Calculation of the increasing of junction temperature in each thyristor.

All the employed calculation methods are summarized in [3] and [4].

For example, Figura 1 show the thyristors' junction over-temperature calculated by the software tool.

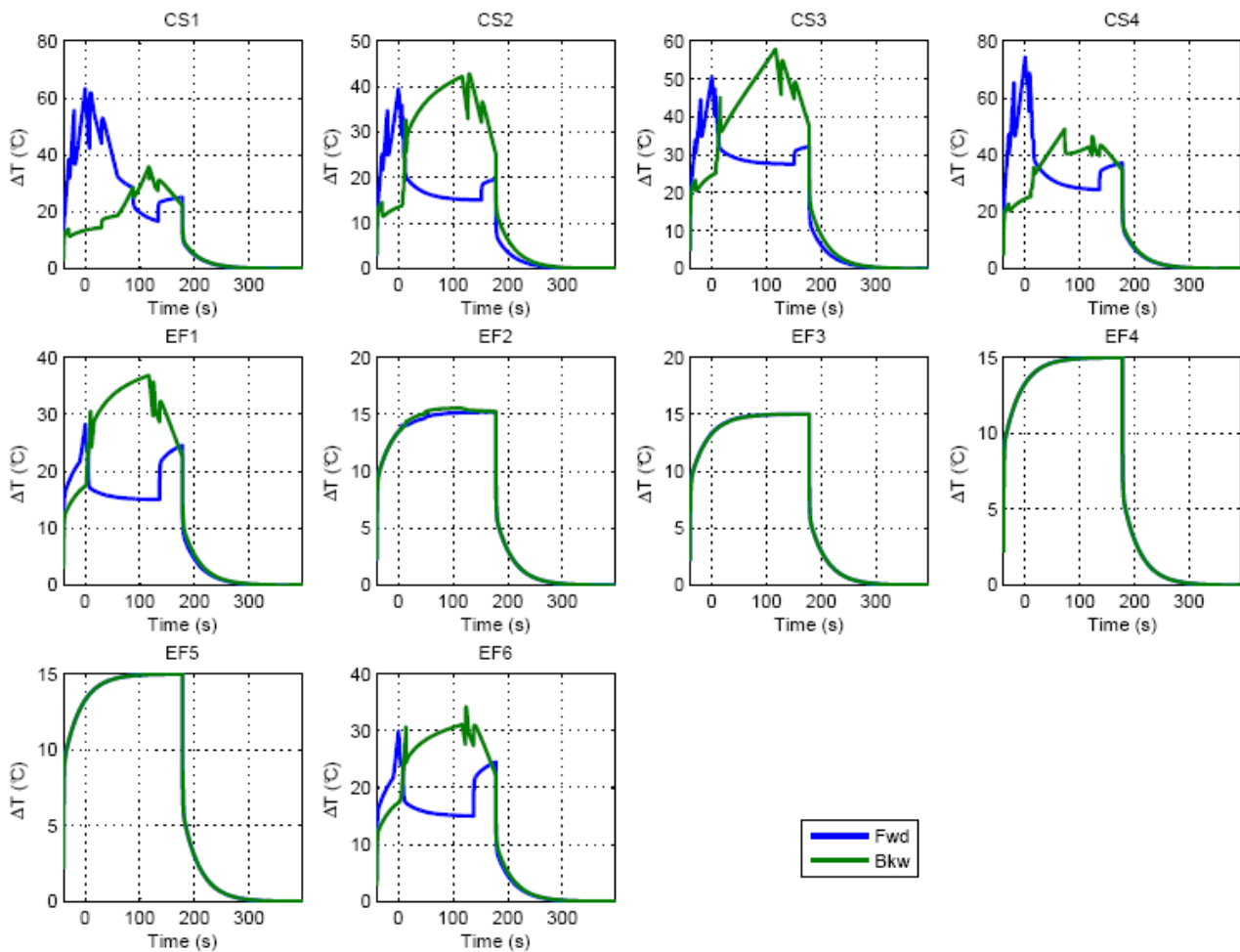


Figura 1. Esempio di calcolo della temperatura di giunzione dei tiristori degli alimentatori poloidali per un dato scenario sperimentale di JT-60SA.

Operational requirement for PFC PS units

This program was used for the estimation of the junction temperature of the PS thyristors. The main results of this estimate are shown in [4]. This analysis led to the definition of reference scenarios for the PS design inserted in the PID [2] and shown in Tabella 1.

The thermal design of the PSs shall be performed considering the load current waveforms indicated in Tabella 1.

Each PFC PS shall be designed to be regulated following voltage or current reference signals (selection of operation mode will be done outside the plasma shot) distributed by SCSDAS through the Power Supply Supervising Computer (PS SC) and to properly operate with an AC voltage frequency variation from its initial value of 77.6 Hz down to 54.2 Hz.

Scope of the Procurement

The Procurement is composed of 8 PSs and 4 transformers. Main components to be delivered by the IS are reported in Tabella 2.

The scope of the Procurement is:

- Draft and Detailed Design;
- Manufacturing;
- Factory testing;
- Packaging and transportation to Port of Entry (PoE) in Japan.

Tabella 1. Correnti di riferimento inserite nel PID per il dimensionamento termico degli alimentatori poloidali di JT-60SA.

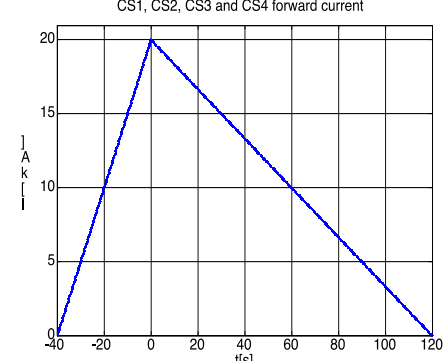
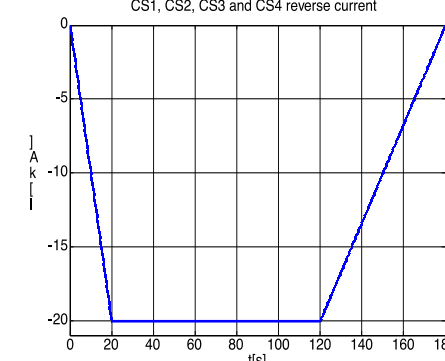
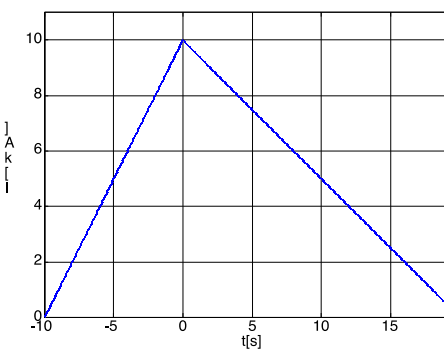
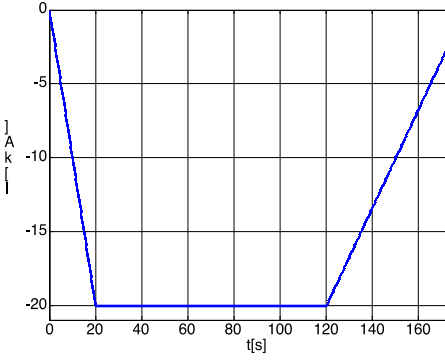
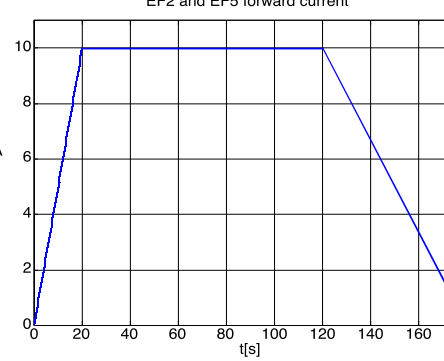
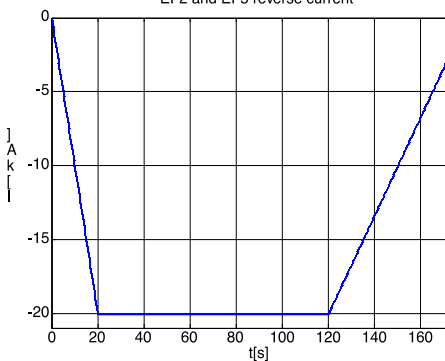
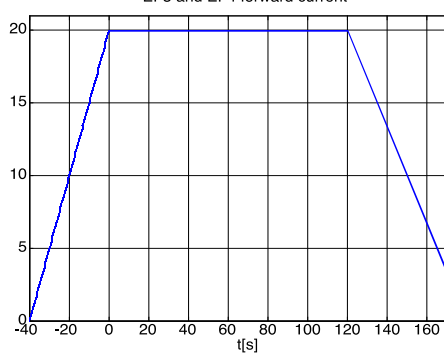
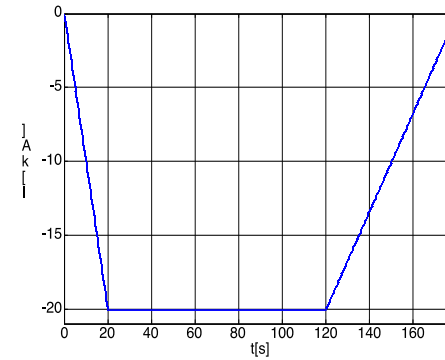
Converter	Forward current	Reverse Current
CS1 CS2 CS3 CS4	 <p>CS1, CS2, CS3 and CS4 forward current</p>	 <p>CS1, CS2, CS3 and CS4 reverse current</p>
EF1 EF6	 <p>EF1 and EF6 forward current</p>	 <p>EF1 and EF6 reverse current</p>
EF2 EF5	 <p>EF2 and EF5 forward current</p>	 <p>EF2 and EF5 reverse current</p>
EF3 EF4	 <p>EF3 and EF4 forward current</p>	 <p>EF3 and EF4 reverse current</p>

Tabella 2. Componenti principali della fornitura.

PS	Transformers	AC grounding switches	TS referring section
CS1		✓	4.4
CS2	✓	✓	4.4
CS3	✓	✓	4.4
CS4		✓	4.4
EF1		✓	4.4
EF6		✓	4.4
FPPC upper	✓(12 pulses)		4.5
FPPC lower	✓(12 pulses)		4.5

JAEA shall be responsible of clearance of import formalities and transportation from PoE to Naka Site. JAEA shall ensure availability of all indoor/outdoor necessary areas, including temporary storage, at Site and shall also be in charge of handling components in the dedicated storage areas. JAEA shall provide needed utilities during start-up and commissioning.

The Procurement shall include:

- The thyristors cubicles/fences.
- The control and protection systems.
- Cooling system distribution inside the PS units.
- Compressed air distribution (if needed) inside the PS cubicle.
- The inter-phase inductances.
- The bidirectional crowbars (solid state and mechanical making switches, BOD, parallel and non-linear resistors, control and protection systems).
- The DC disconnectors.
- Documentation of the components object of the Supply.
- Manufacturing of the components.
- A basic set of spare parts.
- Factory Tests.
- Cleaning and packaging of the Supply.
- Delivery components to the PoE in Japan.
- Any set of special handling tools and appliances that may be necessary to handle the equipment safely and conveniently during its receipt and assembly at Site.
- Any special tool and special equipment necessary for the operation and maintenance of the equipments included in the Supply. Any set of testing tools and instruments needed to commission and test the system. These will remain property of the IS.
- Training of the operating staff.

The AC grounding switch is manually operated while the DC disconnectors can be remotely operated, too.

The FPPC PSs are fed by two transformers to allow a 12 pulses operation also during the circulating current phase.

The activities at Naka Site, as installation and assembly on site, commissioning and Site Acceptance Tests, are not included in the present Procurement. Nevertheless, they are described in this document and in the references to help the IS in developing the design and the documentation. The IS shall provide a self-consistent documentation containing any information necessary to complete the installation in good conditions and respecting the time schedule.

All components shall have a warranty for defects in the manufacture for a period of two years from the acceptance of the components. The warranty is limited to the direct costs of repair or remanufacturing of the components. Any other warranty is excluded. Some extensions could be required for spare parts.

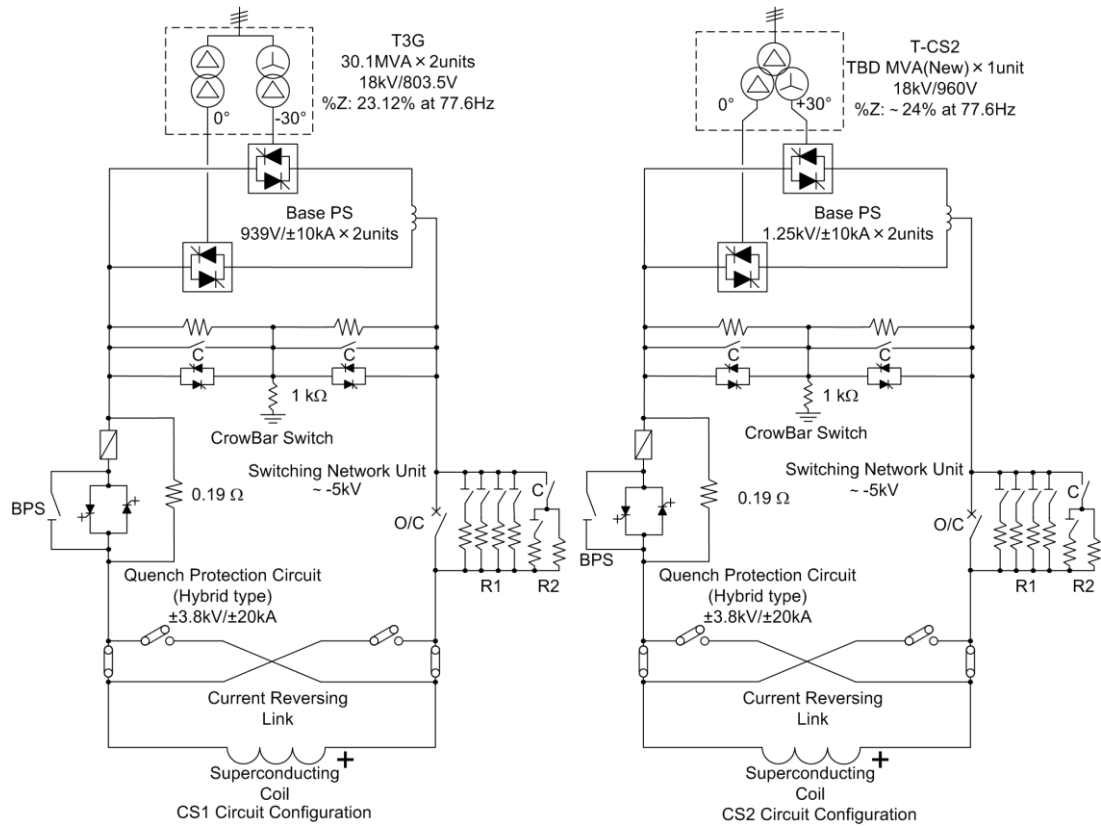


Figura 2. Schema delle PS CS1 e CS2.

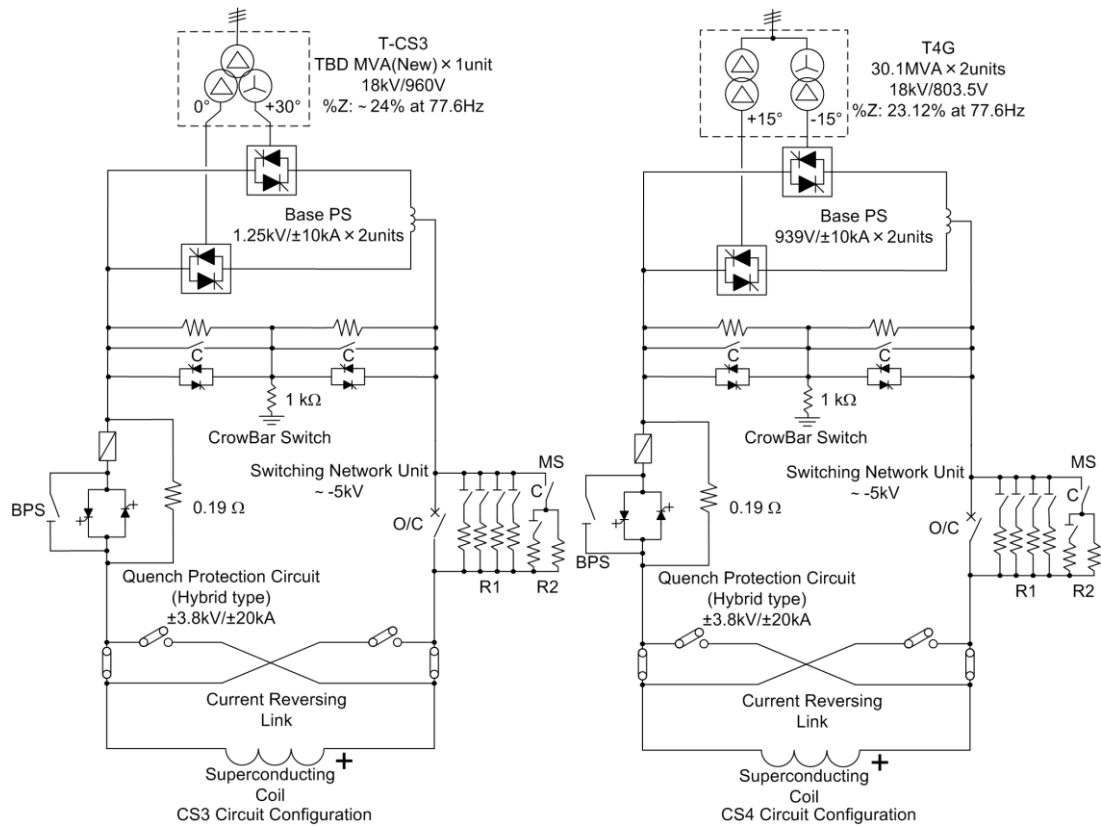


Figura 3. Schema delle PS CS3 e CS4.

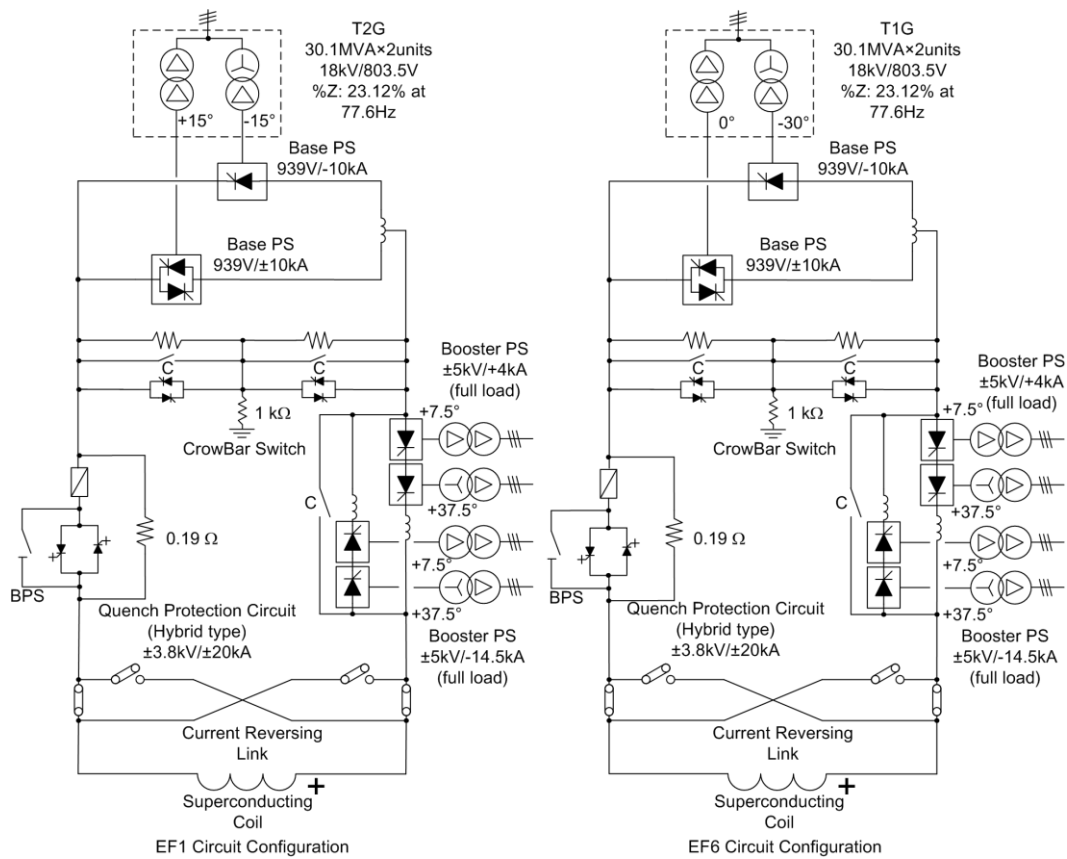
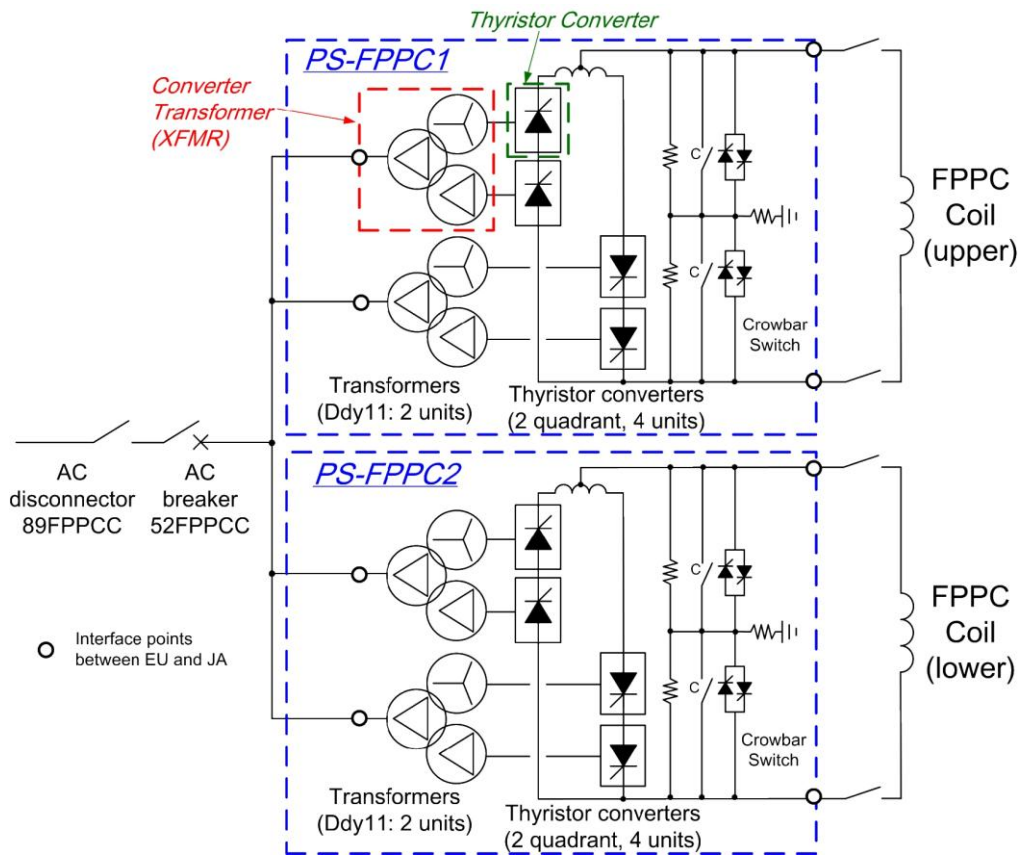


Figura 4. Schema delle PS EF1 e EF6.



Reference schemes

The PS circuits are shown in Figura 2-5.

Each PS circuit consists of:

1. Superconducting coil;
2. Thyristor converter power supply (AC/DC converter);
3. Converter transformers;
4. Quench Protection Circuits;
5. SNU's to produce the voltage necessary for plasma breakdown in CS1, CS2, CS3, CS4 coils;
6. Booster PS's to produce the voltage necessary for plasma breakdown in EF1 and EF6 coils.

Performances

The main reference design parameters for the power supplies of the relevant PF magnets are summarized in Tabella 3. It has to be noted that an electrostatic screen shall be located between primary and secondary windings of the transformer. This has the double scope to reduce stray capacitance and to prevent any contact between the windings in case of insulation failure. For this reason the screen has to be grounded.

The duty cycle is 220/1800 s/s.

Tabella 3. Principali parametri delle PS.

PS	V ₂₀ (*1) (kV)	Winding group	Z(%) at 77,6 Hz	Frequency range (Hz)	V _{DC0} (*2) (kV)	I _{DC,nominal} (*3) (kA)	V _{GND} (*4) (kVrms)
CS1	0.8	DWG 17	23	77.6 – 54.2	1.0	± 2 * 10	6.5/12 (*5)
CS2	0.96	DWG 17	TBD by IS	77.6 – 54.2	1.3	± 2 * 10	6.5/12 (*5)
CS3	0.96	DWG 17	TBD by IS	77.6 – 54.2	1.3	± 2 * 10	6.5/12 (*5)
CS4	0.8	DWG 17	23	77.6 – 54.2	1.0	± 2 * 10	6.5/12 (*5)
EF1	0.8	DWG 17	23	77.6 – 54.2	1.0	+10 / -2*10	8/16 (*5)
EF6	0.8	DWG 17	23	77.6 – 54.2	1.0	+10 / -2*10	8/16 (*5)

(*1) no load secondary transformer voltage.

(*2) No load DC voltage defined as 1.35 x V₂₀.

(*3) Accuracy ±1% of the nominal value and when the converter is operating within its voltage/current regulation limits.

(*4) Insulating Voltage to Ground/Testing voltage to ground on factory (ref. IEC 146-1-1 sections 4.2.1.3 and 4.2.1.4).

(*5) The IS can homogenize the insulation level at 8/16kV if it is useful to reduce the overall costs.

Conclusioni

Durante il periodo di riferimento del PAR sono stati prodotti nuovi strumenti di analisi e di progetto per i sistemi di alimentazione di una macchina per la fusione nucleare. Tali strumenti hanno consentito di definire meglio il progetto degli 8 alimentatori che l'Italia, attraverso l'ENEA, si è impegnata a fornire per il tokamak internazionale JT-60SA. Inoltre, tali strumenti possono essere di supporto per il progetto di altri sistemi, come quelli facenti parte del contributo francese o giapponese a JT-60SA.

Le TS sono state aggiornate tenendo conto dei nuovi risultati e delle altre informazioni derivanti dagli avanzamenti nel progetto e dagli incontri con i partner internazionali (in particolare F4E, CEA e JAEA).

Tutti i contributi attesi dai diversi partner internazionali relativi alle alimentazioni elettriche di JT-60SA sono in ritardo rispetto ai tempi previsti. Tali ritardi sono perfettamente comprensibili data la complessità del progetto e sono comunque sotto il controllo del gruppo di coordinamento internazionale. Il progetto degli 8 alimentatori forniti da ENEA è comunque stato ben definito ed è possibile prevedere che la relativa Call for Tender sarà lanciata nei prossimi mesi.

Riferimenti bibliografici

1. "Procurement Technical Specifications for the Agreement Of Collaboration F4E-ENEA for the Joint Implementation of the Procurement Arrangement for the Poloidal Fields and Fast Plasma Position Control Coils Power Supplies for the Satellite Tokamak Programme" (TS).
2. "Plant Integration Document" (PID).
3. A. Coletti, A. Lampasi, L. Novello, "User's Manual for the Program to Check the Capability of the JT60SA Poloidal Field Coils Power Supply System with respect to the Experimental Scenarios".
4. A. Coletti, "Estimation of junction temperature of CS1-4 and EF1,6 PSs' thyristors".
5. "Definition of SNU PoE in Japan".
6. "Withstand-to-ground voltage testing".
7. "JT-60SA Power Supply, Summary of Signals to be exchanged among each component and magnet PS supervising controller".
8. "Address map of RM for PS control system".
8. "Power Supplies Installation Works at JT-60SA Site – General Conditions for EU-Suppliers".
10. "Services at Naka Site for Installation".
11. "Regulations at Naka Site for Installation".
12. "JT-60SA Power Supply System Recovery Sequence in Case of Fault".
13. "JT-60SA Integrated Project Team Common Quality Management System".
14. "JT-60SA EU Home Team Quality Management System".

Abbreviazioni ed acronimi

Acronimo	Termine	Definizione
AoC	Agreement of Collaboration	Framework between F4E and VC-DI to reinsure its commitments towards JAEA under the Procurement Arrangements
BA	Broader Approach	Agreement between the Government of Japan and the European Atomic Energy Community for the joint implementation of the activities in the field of fusion energy research
CEA	CEA	Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives
CBU	Crow-bar Unit	Electrical circuit used to prevent an overvoltage of a power supply
CRL	Current Reversing Link	Links inserted in the PSs to reverse the polarity of the magnetic field
CS	Central Solenoid	Nb ₃ Sn conductor consisting of 4 independent modules
DDP	Detailed Design Phase	In this phase, the IS shall detail the technical solutions selected to comply with the requirements
DEMO	DEMO	DEMONstration Power Plant intended to build upon the success of ITER
EF	Equilibrium Field	Equilibrium Field (coil)
ENEA	ENEA	Italian National Agency for New Technologies, Energy and Sustainable Economic Development

EU	EU	Europe
F4E	Fusion for Energy	European joint undertaking for ITER and the Development of Fusion Energy: integral part of the JT-60SA Project EU Home Team ensuring the coordination of implementation of the PA and its interfaces with other PAs in BA activities
FPPC	Fast Plasma Position Control	Coils used to control the plasma position
GPS	Global Protection System	System for handling the protection signals received from the equipment and distributing the protection commands
GS	Grounding Switch	Switches for SNU safety grounding
IAs	Implementing Agencies	F4E and JAEA
IPS	Internal Protection System	System to coordinate protective actions among all JT-60SA PS components and among them and the remaining parts of the JT-60SA system
IS	Industrial Supplier	The company selected by ENEA to provide the supplies, services or works described in these Technical Specifications, according to a Procurement Contract
ITER	ITER	International research and engineering project which is currently building the world's largest and most advanced experimental tokamak nuclear fusion reactor
JAEA	JAEA	Japan Atomic Energy Agency
JT-60SA	JT-60SA	JT-60 Super Advanced tokamak, the construction and exploitation of which shall be conducted under the Satellite Tokamak Programme and the Japanese national programme
LCC	Local Control Cubicle	SNU Local Control Cubicle
MS	Making Switch	Switch able to insert the second resistance R2 to support the plasma breakdown phase
PF	Poloidal Field (coil)	In a tokamak, the poloidal field travels in circles orthogonal to the toroidal field
PID	Plant Integration Document	Document defining the technical basis of the JT-60SA Project
PoE	Port of Entry	Port of Entry in Japan
PA	Procurement Arrangement	Framework between F4E and JAEA for the main governing, financial and collaborative requirements for the supply of a procurement package
PS	Power Supply	–
PS SC	Power Supply Supervising Computer	Computer provided by JAEA that communicates with SCSDAS, GPS and SIS and includes an IPS
QPC	Quench Protection Circuit	System to protect superconducting coils
RM	Reflective Memory	Real-time Local Area Network in which each computer always has an up-to-date local copy of the shared memory set
RWM	Resistive Wall Mode	Issue related to plasma stabilization

SCSDAS	Supervisory Control System and Data Acquisition System	JT-60SA system
SIS	Safety Interlock System	JT-60SA system
SNU	Switching Network Unit	The main object of this Procurement
SS	Fast SNU Switch	Functional component of a SNU, that can be implemented by several physical devices, able to divert the coil current to a specific set of resistors
STP	Satellite Tokamak Programme	One of the three projects in the BA activities with the purpose to develop JT-60SA
TF	Toroidal Field (coil)	In a tokamak, the toroidal field travels around the torus in circles
TS	Technical Specifications	The Procurement Technical Specifications for the Supply of the Switching Network Units for Central Solenoids for the Satellite Tokamak Programme
VC-DI	Voluntary Contributor Designated Institution	Institution appointed by the Government of the countries (Voluntary Contributors) that give voluntary contributions to Euratom for the implementation of the BA activities