



Ricerca di Sistema elettrico

Prove sul prototipo finale di Switching Network Unit per l'esperimento internazionale JT-60SA

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

PROVE SUL PROTOTIPO FINALE DI SWITCHING NETWORK UNIT PER L'ESPERIMENTO INTERNAZIONALE
JT-60SA

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

Settembre 2014

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2013

Area: Produzione di Energia Elettrica e Protezione dell'Ambiente

Progetto: Attività di fisica della Fusione complementari a ITER

Obiettivo: Macchina JT-60SA

Responsabile del Progetto: Aldo Pizzuto, ENEA

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI	7
2.1 CARATTERISTICHE PRINCIPALI DEL PROTOTIPO	7
2.2 LAYOUT E CONFIGURAZIONE DEGLI SNU	7
2.3 PROSPETTO DELLE PROVE EFFETTUATE SUL PROTOTIPO.....	14
3 PROVE SUL BY-PASS SWITCH (BPS).....	16
3.1 PROVE DI ISOLAMENTO.....	16
3.2 PROVE DI CONSUMO ELETTRICO	18
3.3 PROVE SUI TEMPI D APERTURA E CHIUSURA MECCANICHE	20
3.4 VERIFICA DELL'I ² T.....	20
3.5 PROVE DI RESISTENZA ELETTRODINAMICA	20
3.6 VERIFICA DEI MECCANISMI DI BPS E SEZIONATORI.....	20
4 PROVE SULLE RESISTENZE DI BREAKDOWN	22
4.1 VALORI NOMINALI ALL'INTERNO DEL PROTOTIPO.....	22
4.2 PROVE DI ISOLAMENTO.....	22
4.3 TEMPERATURE RISE TEST.....	23
5 PROVE FUNZIONALI SUL SISTEMA DI CONTROLLO	27
6 PROVE FUNZIONALI A PIENA CORRENTE NEI LABORATORI ENEA	30
7 RIEPILOGO DEI PRINCIPALI RISULTATI DELLE PROVE.....	35
8 CONCLUSIONI.....	36
9 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	37
10 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	38

Sommario

JT-60SA è un tokamak “satellite” di ITER situato a Naka in Giappone e frutto della collaborazione tra Unione Europea e Giappone nell’ambito dell’accordo internazionale denominato Broader Approach (BA), la cui finalità principale è di fornire indicazioni utili per lo sviluppo e le operazioni dei progetti internazionali ITER e DEMO. L’accordo BA stabilisce che alcune nazioni europee, tra cui l’Italia, contribuiscono alle tecnologie ed agli esperimenti di JT-60SA.

Il presente rapporto descrive le attività svolte all’interno dell’Accordo di Programma aventi come obiettivo la realizzazione degli “switching network unit” (SNU) dei quattro moduli del solenoide centrale (CS) di JT-60SA.

Gli SNU sono sistemi di commutazione veloce di potenza che vengono impiegati in molte applicazioni fusionistiche. Le prestazioni non comuni richieste agli SNU (in termini di corrente, tensione, energia, tempi di intervento) hanno quindi richiesto un progetto specifico basato su configurazioni innovative. Anche se il sistema è stato dimensionato per le caratteristiche di JT-60SA, i principi e le architetture innovativi sviluppati durante il progetto possono trovare impiego in diversi sistemi dedicati alla fusione nucleare ma anche in altri settori industriali dove è necessario interrompere velocemente elevate correnti continue.

Il progetto e l’ingegnerizzazione definitiva (First Design Report) degli SNU sono state approvate ufficialmente dal team di coordinamento internazionale di JT-60SA nel corso del 2013.

Come stabilito dagli accordi internazionali BA, Procurement Arrangement (PA), e Agreement of Collaboration (AoC), il primo passo della fornitura consiste nella realizzazione di un prototipo di SNU completamente funzionante. Questo prototipo sarà a tutti gli effetti il primo SNU del CS di JT-60SA.

Data la specificità ed unicità del sistema, era necessario validare il progetto tramite una serie esaustiva di prove sia sui singoli componenti (interruttori, semiconduttori, resistenze) sia sull’intero SNU, sia nello stabilimento dei fornitori industriali sia in laboratori specializzati (Factory Type Test). Le prove più importanti sono state effettuate nel Centro ENEA di Frascati riproducendo le condizioni operative di lavoro dell’impianto JT-60SA. In particolare, alcune prove sono state effettuate a piena corrente (20 kA) e piena tensione (5 kV).

Questo rapporto presenterà le procedure e i risultati più rilevanti delle prove svolte negli ultimi mesi sul prototipo di SNU.

Le prove sul prototipo di SNU, eseguite fino a settembre 2014 anche alla presenza di rappresentanti dei partner internazionali Fusion for Energy (F4E) e Japan Atomic Energy Agency (JAEA), hanno avuto esito positivo. Di conseguenza, il prototipo andrà a costituire il primo elemento della fornitura e gli altri 3 SNU saranno realizzati in base ad esso. Il completamento degli ulteriori 3 SNU è previsto per settembre 2015. La consegna in Giappone e la messa in servizio dell’intera fornitura sono programmate per il 2016.

1 Introduzione

Il presente rapporto descrive le attività svolte nell'ambito della Ricerca di Sistema Elettrico per il Piano Annuale di Realizzazione (PAR) 2013 dell'Obiettivo A3 dell'Accordo di Programma tra Ministero dello Sviluppo Economico ed ENEA, finalizzato alla realizzazione degli SNU dell'esperimento internazionale per la fusione nucleare denominato JT-60SA.

JT-60SA è un tokamak "satellite" situato a Naka in Giappone e frutto della collaborazione tra Unione Europea e Giappone nell'ambito dell'accordo internazionale denominato BA, la cui finalità principale è di fornire indicazioni utili per lo sviluppo e le operazioni dei progetti internazionali ITER e DEMO.

Il tokamak JT-60SA è un aggiornamento superconduttore ("super, advanced") del preesistente tokamak denominato JT-60.

L'accordo BA stabilisce che alcune nazioni europee, tra cui l'Italia, contribuiscono "volontariamente" (Voluntary Contributor, VC) alle tecnologie ed agli esperimenti di JT-60SA. Ogni contributo è regolato da un AoC tra l'agenzia europea F4E e le agenzie nazionali associate (tra cui l'ENEA) finalizzato all'attuazione congiunta di un PA.

Il lavoro svolto all'interno dell'Accordo di Programma ha come obiettivo la realizzazione degli SNU dei quattro moduli del CS del tokamak JT-60SA. Secondo gli ultimi accordi con i partner i 4 SNU saranno perfettamente identici e per questo interscambiabili nell'installazione finale.

Il progetto e l'ingegnerizzazione definitiva (First Design Report) sono state approvate ufficialmente dal team di coordinamento internazionale di JT-60SA nel corso del 2013. Le prestazioni non comuni richieste agli SNU (in termini di corrente, tensione, energia, tempi di intervento) non potevano essere ottenute mediante dispositivi commerciali esistenti e hanno quindi richiesto un progetto specifico basato su configurazioni innovative.

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 con i partner internazionali del progetto JT-60SA: F4E, JAEA ed altre agenzie ed industrie (si veda ad esempio Figura 1). Lo stato del progetto è descritto nella documentazione prevista dagli accordi internazionali BA, PA e AoC (Plant Integration Document, Procurement Plan, Procurement Schedule, Risk Table, Periodic Report, ecc.).

Come stabilito dagli accordi internazionali BA, PA, e AoC, il primo passo della fornitura consiste nella realizzazione di un prototipo di SNU completamente funzionante. Questo prototipo sarà a tutti gli effetti il primo SNU del CS di JT-60SA.

La realizzazione industriale del prototipo è stata affidata all'impresa OCEM Energy Technology di Bologna.

Le prime sezioni di questo rapporto presenteranno il prototipo nella sua versione definitiva, composto da 6 cubicoli (armadi), durante i test nello stabilimento dei fornitori industriali e nei laboratori specializzati, inclusi quelli dell'ENEA.

Data la specificità ed unicità del sistema, era necessario validare il progetto tramite una serie esaustiva di prove sia sui singoli componenti (interruttori, semiconduttori, resistenze) sia sull'intero SNU. Alcune scelte progettuali sono state verificate in anticipo prima dell'assemblaggio di tutto il prototipo. Le prove più importanti sono state effettuate nel Centro ENEA di Frascati riproducendo le condizioni operative di lavoro dell'impianto JT-60SA. In particolare, alcune prove sono state effettuate a piena corrente (20 kA) e piena tensione (5 kV). Le procedure e i risultati più rilevanti delle prove sul prototipo di SNU saranno presentati in questo rapporto.

Anche se il sistema è stato dimensionato per le caratteristiche dei convertitori AC/DC e degli avvolgimenti della macchina JT-60SA, i principi e le architetture innovativi sviluppati durante il progetto possono trovare impiego in diversi sistemi dedicati alla fusione nucleare ma anche in altri settori industriali.

Dopo l'esito positivo dei test ufficiali sul prototipo (Factory Type Test) eseguiti fino a settembre 2014 alla presenza anche i rappresentanti dei partner internazionali F4E e JAEA, tale prototipo andrà a costituire il primo elemento della fornitura. Gli altri 3 SNU saranno realizzati sul modello del prototipo.

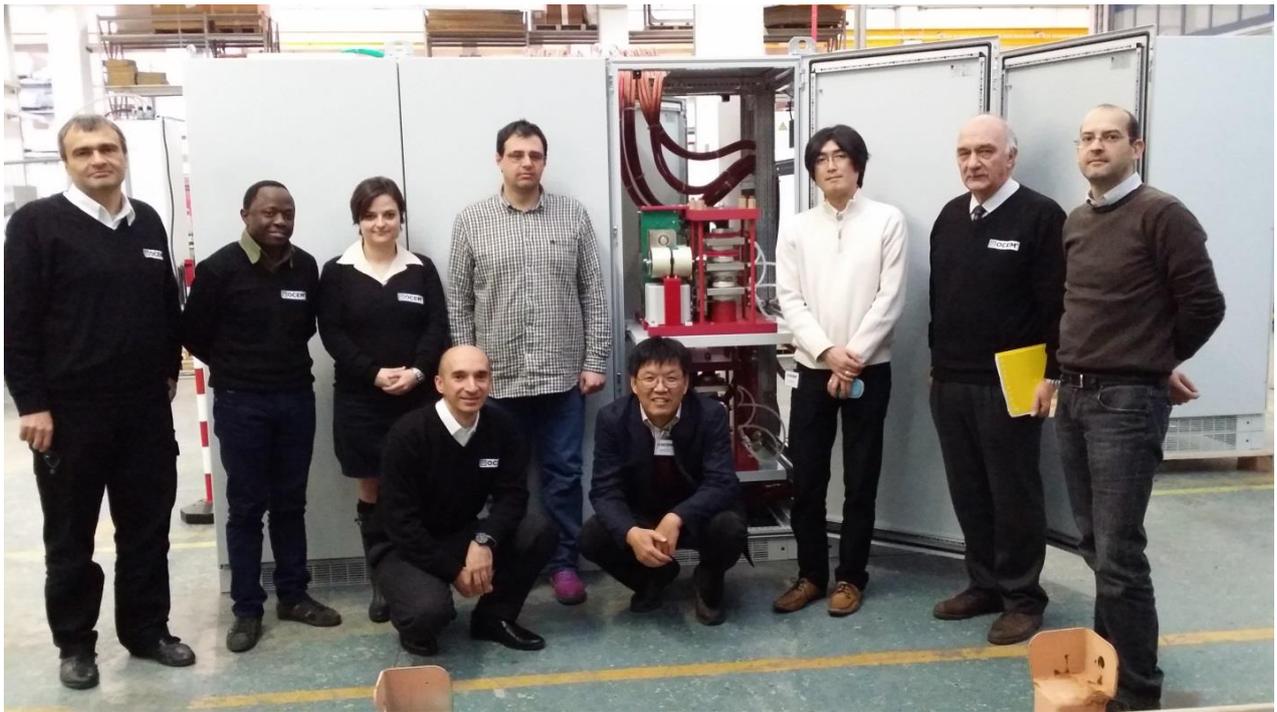


Figura 1. Sopralluogo dei tecnici ENEA, F4E e JAEA negli stabilimenti OCEM nel dicembre 2013.



Figura 2. Alcuni partner del progetto durante le prove in ENEA nel settembre 2014.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

2.1 Caratteristiche principali del prototipo

Lo schema dello stato attuale del circuito di alimentazione di un modulo superconduttore del CS di JT-60SA è riportato in Figura 3. La figura evidenzia la collocazione e lo schema funzionale di uno SNU. La figura si riferisce in particolare al modulo denominato CS1, ma i circuiti di alimentazione degli altri 3 moduli differiscono solo per alcuni parametri. Infatti, nel progetto finale è stato deciso di costruire 4 SNU identici per i 4 moduli del CS.

Figura 4 riporta il layout attualmente concordato con i partner di progetto per la Rectifier Room di JT-60SA con il dettaglio della zona dedicata ai 4 SNU del CS ed alla loro unità di controllo denominata local control cubicle (LCC).

Lo schema elettrico di principio dello SNU sviluppato da ENEA e presentato in questo rapporto è mostrato in Figura 5.

I punti di forza e le caratteristiche specifiche del prototipo sono:

- La commutazione principale basata su una configurazione ibrida elettromeccanica-statica, ottenuta inserendo un sistema elettronico (static circuit breaker, SCB) in parallelo ad un contattore meccanico (by-pass switch, BPS).
- L'introduzione di diversi livelli di ridondanza nel contattore e in altre parti.
- L'uso di otto Integrated Gate Commutated Thyristor (IGCT) in parallelo.
- L'uso di diodi di disaccoppiamento in serie agli IGCT.
- L'aggiunta di un circuito di snubber "progressivo", progettato specificatamente per l'applicazione, in grado di regolare la velocità di salita della tensione allo scopo di ridurre lo stress sui componenti interni ed esterni agli SNU.
- Il dimensionamento dei resistori di breakdown per mantenere le variazioni di tensione e le sovratemperature nell'ambiente entro i limiti richiesti dall'impianto.
- L'implementazione del making Switch (MS) attraverso quattro tiristori potenzialmente indipendenti, con dimensionamento che consente di sostenere anche le correnti di guasto nel caso peggiore.

Alcune caratteristiche e parametri degli SNU sono stati ottimizzati in via definitiva durante la fasi di test. Gli aggiustamenti finali del progetto saranno presentati in questa sezione e nelle sezioni relative ai singoli componenti.

2.2 Layout e configurazione degli SNU

Figura 6 mostra il layout del prototipo di SNU come effettivamente assemblato durante i test in fabbrica e nel Centro Ricerche ENEA di Frascati. Tale configurazione sarà mantenuta nell'installazione nella Rectifier Room di JT-60SA. Lo SNU consiste in 6 cubicoli (armadi), incluso quello dell'LCC. Al fine di ottimizzare il controllo, la sincronizzazione e le protezioni delle SNU, un solo LCC (già sviluppato) gestirà tutte e 4 le SNU del CS. Per cui nell'installazione finale cambierà solo la posizione relativa dell'armadio LCC rispetto allo SNU.

Le foto nelle Figure 7, 8 e 9 sono state scattate durante le prove preliminari e di routine nello stabilimento dell'impresa OCEM Energy Technology di San Giorgio di Piano (BO).

La foto in Figura 10 è stata scattata nella Sala Convertitori del Frascati Tokamak Upgrade (FTU) durante i test funzionali.

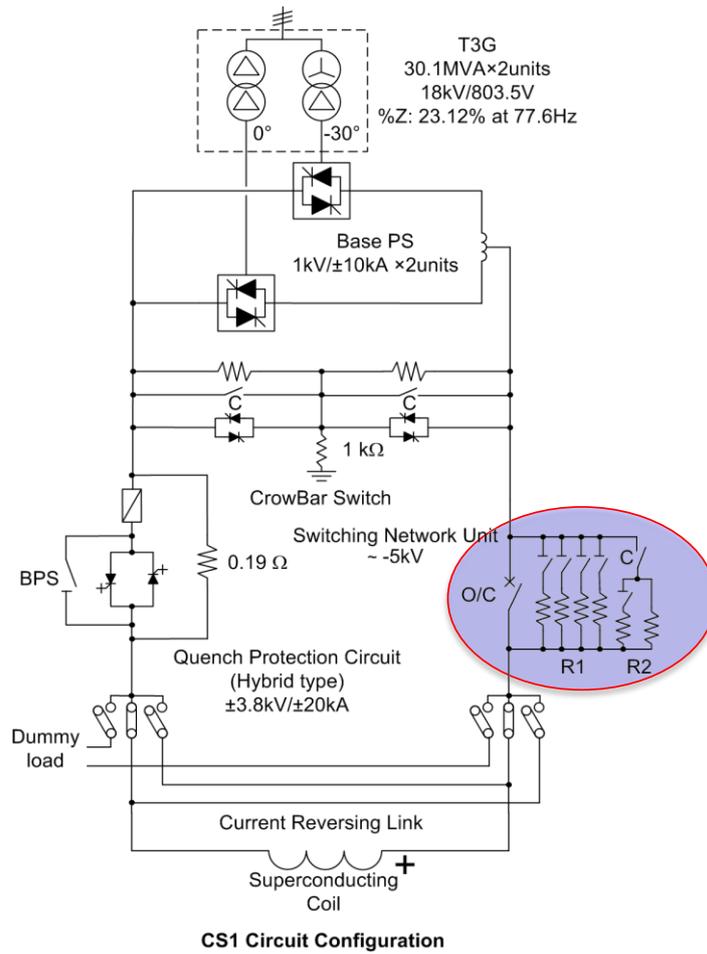


Figura 3. Circuito di alimentazione di un modulo superconduttivo del CS di JT-60SA in cui è stato evidenziato lo schema di principio funzionale di uno SNU.

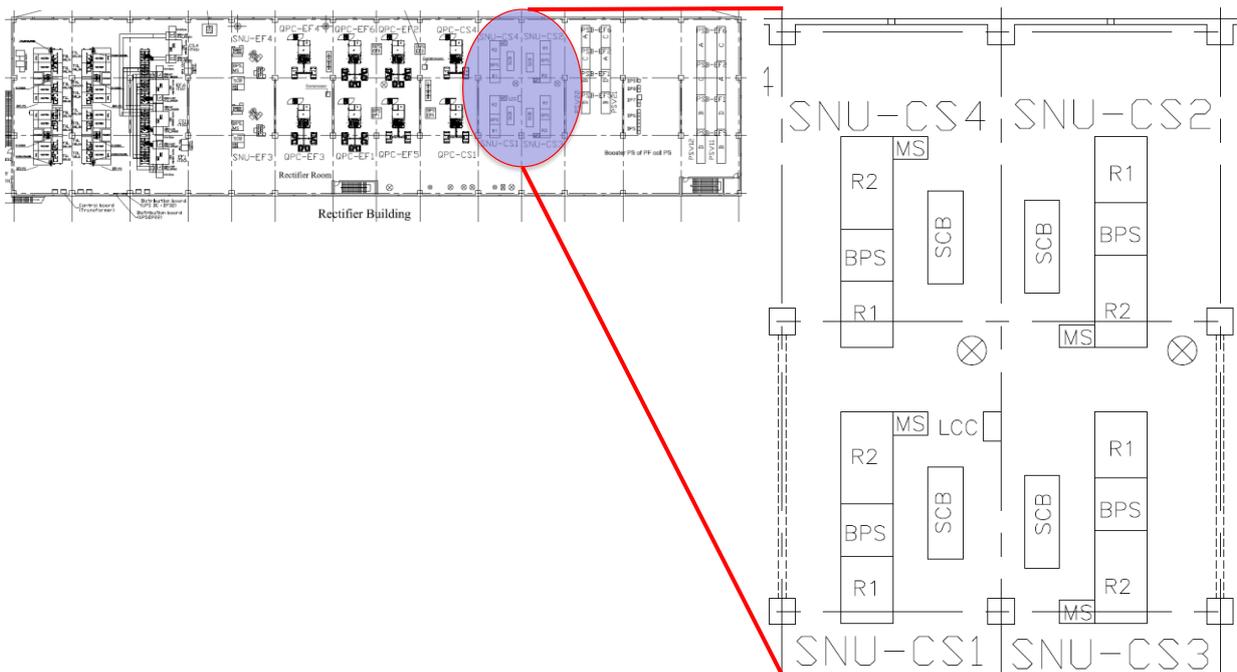


Figura 4. Layout della Rectifier Room di JT-60SA con il dettaglio della zona dedicata ai 4 SNU del CS.

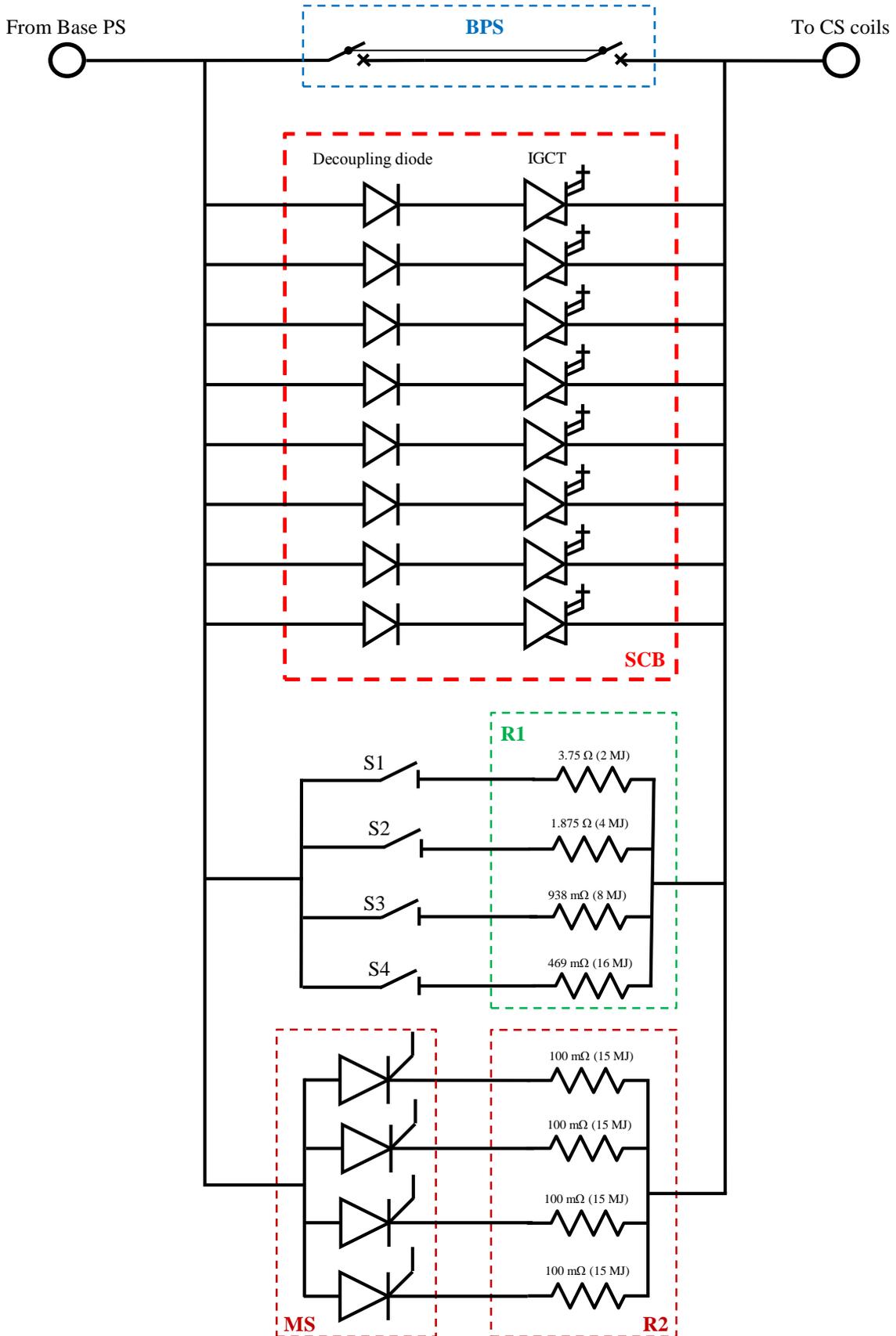


Figura 5. Circuito finale di uno SNU del CS con enfasi sui principali componenti.

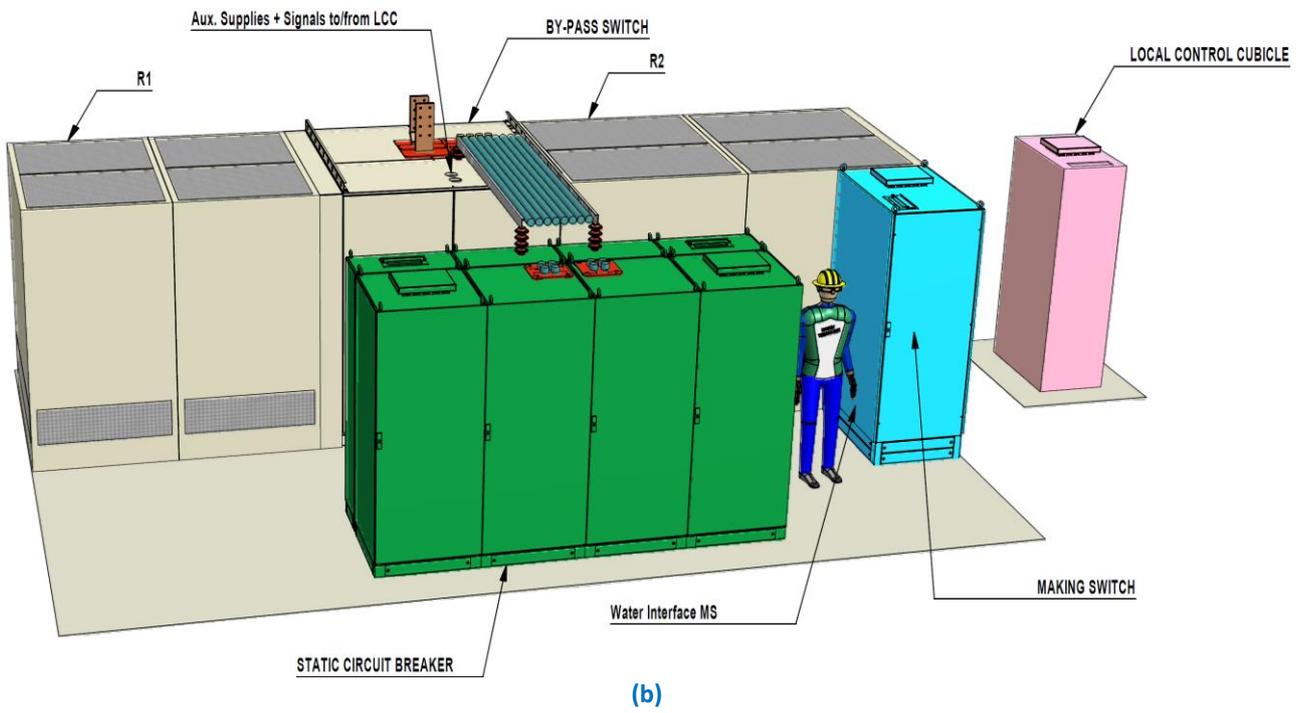
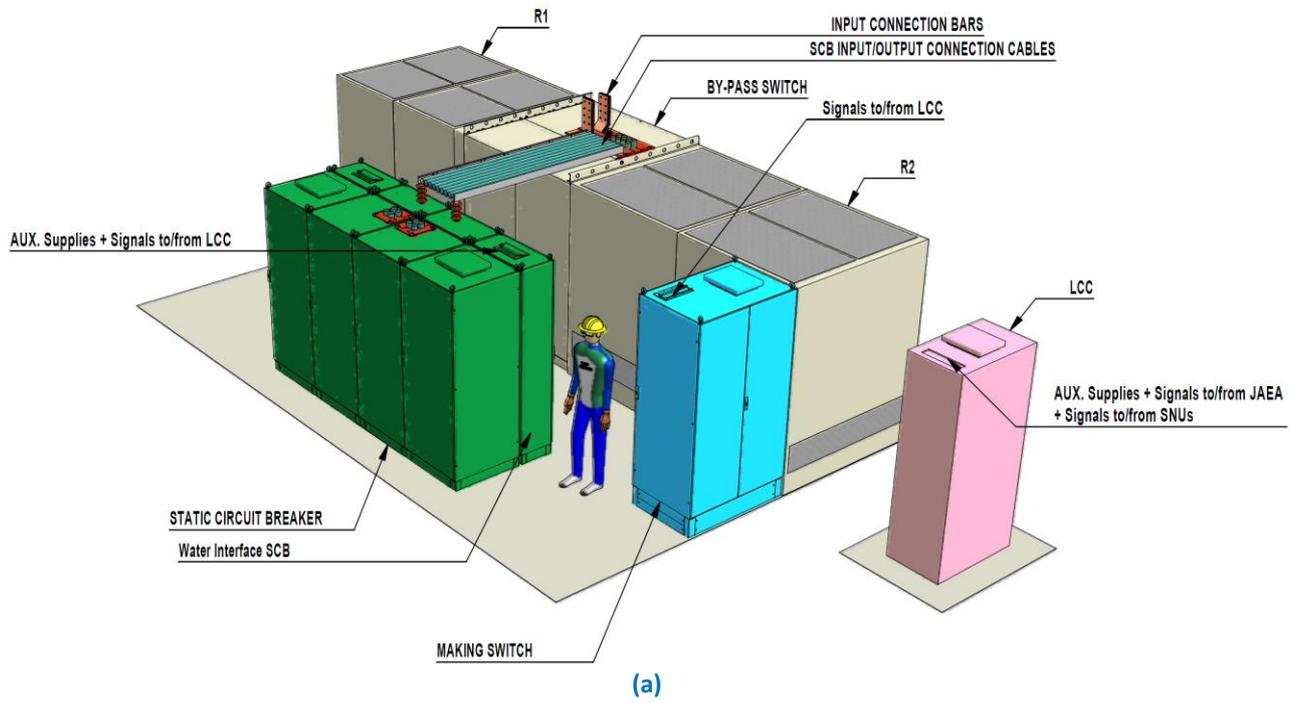


Figura 6. Due diverse angolazioni 3D in scala del prototipo di SNU nella sua configurazione definitiva.



(a)



(b)

Figura 7. Due foto del prototipo durante le prove negli stabilimenti OCEM.



Figura 8. Foto dell'armadio LCC e della parte "interna" di manutenzione del prototipo.



Figura 9. Foto della parte posteriore del prototipo (lato resistenze di breakdown e BPS).



Figura 10. Prototipo rimontato nella Sala Convertitori di FTU nel Centro Ricerche ENEA di Frascati.

2.3 Prospetto delle prove effettuate sul prototipo

Le principali prove ufficiali effettuate durante il periodo coperto dal PAR (ottobre 2013 – settembre 2014) sono riassunte in Tabella 1. I risultati più significativi di queste prove saranno descritti nel seguito del rapporto.

Tabella 1. Riassunto delle principali prove ufficiali effettuate sul prototipo di SNU o su parti di esso.

Specifiche tecniche ENEA	Componente prototipo SNU	Descrizione da specifica	Laboratorio di prova
5.2.1.1	BPS	I^2t capability and current unbalance of the BPS <ul style="list-style-type: none"> • I^2t • Unbalance • Declared temperature 	Microelettrica Scientifica per Nidec ASI
5.2.1.2	BPS	Electro-dynamic resistance of BPS	Siemens SVEPPI Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.
5.2.1.3	BPS	Open/close operation mechanism (1000 repetitions)	Microelettrica Scientifica per Nidec ASI
5.2.1.4	BPS	Test to verify the pressure withstand and the tightness for gas-filled compartments	Non necessario
5.2.2.1	Complete SNU	Operational tests at reduced current and reduced voltage (1 semiconductor branch only)	ENEA
5.2.2.2	Complete SNU	Operational tests at reduced current and nominal voltage (R14 rating)	ENEA
5.2.2.3	Complete SNU	Operational tests at nominal current and nominal voltage	ENEA
Extra	SCB	Unbalance	ENEA
5.2.2.4	Breakdown resistors	Temperature rise test	Microelettrica Scientifica su R13, R14, R212
5.2.2.5	Complete SNU	Functional tests to check the protection system	ENEA
5.3.1.1	BPS main circuit	Voltage to ground withstand tests (20 kV)	Microelettrica Scientifica
Extra	BPS	Open contacts withstand test (12 kV)	Microelettrica Scientifica
5.3.1.2	BPS auxiliary and control circuits	Voltage to ground withstand tests (≤ 2 kV)	Microelettrica Scientifica
5.3.1.3	BPS	Mechanical operating tests (10 repetitions)	Microelettrica Scientifica
5.3.1.4	BPS	Design and visual check	Microelettrica Scientifica
5.3.2.1	SCB & MS	Visual and electrical check	OCEM Energy Technology

5.3.2.2	SCB & MS main circuit	Voltage to ground withstand tests (20 kV)	OCEM Energy Technology
5.3.2.3	SCB & MS auxiliary and control circuits	Voltage to ground withstand tests (<2 kV)	OCEM Energy Technology
5.3.2.4	SCB & MS	Tests on the SCB and MS operational timing	ENEA
5.3.3.1	Breakdown resistors	Measurement of the nominal resistance	Microelettrica Scientifica
Extra	Breakdown resistors	Measurement of inductance	Microelettrica Scientifica
5.3.3.2	Breakdown resistors	Voltage to ground withstand tests (20 kV)	Microelettrica Scientifica
Implicit	Breakdown resistors auxiliary	Voltage to ground withstand tests (≤ 2 kV)	Microelettrica Scientifica
5.3.4.1	GS main circuit	Voltage to ground withstand tests (20 kV)	Microelettrica Scientifica
5.3.4.2	GS auxiliary and control circuits	Voltage to ground withstand tests (≤ 2 kV)	Microelettrica Scientifica
5.3.4.3	GS	Mechanical operating tests (10 repetitions)	Siemens SVEPPI
Extra	GS	Open contacts withstand test (20 kV)	Microelettrica Scientifica
5.3.4.4	GS	Design and visual check	Microelettrica Scientifica
Extra	Selectors Cn	Open contacts withstand test (20 kV)	Microelettrica Scientifica
5.3.5.2	LCC	Functional tests	ENEA
5.3.8	Water cooling	Tested at 850 kPa for 6 hours without any leakage	OCEM Energy Technology

3 Prove sul by-pass switch (BPS)

3.1 Prove di isolamento

Il BPS deriva da un potenziamento di un sistema in uso in applicazioni ferroviarie. Poiché in tale ambito la tensione di lavoro è di 3 kV, il BPS non era stato mai testato alla tensione di isolamento richiesta dal circuito dei CS di JT-60SA: classe 7.2 kV con test a 20 kV 50 Hz per 60 s. Infatti, le prime prove su questo sistema sono state problematiche.

Alla fine è stato necessario reingegnerizzare tutto il BPS ed effettuare il test pezzo per pezzo progressivamente. La Figura 11 mostra un test a 20 kV eseguito su un solo albero del BPS su cui è stata applicata una resina isolante speciale e sono stati inseriti dei setti non previsti nella versione iniziale. Le restanti parti del BPS sono state aggiunte solo dopo essersi assicurati che le parti più critiche avessero superato i test di isolamento.

La Figura 12 mostra il test di isolamento finale superato con successo.



Figura 11. Foto della parte posteriore del prototipo (lato resistenze di breakdown e BPS).



Figura 12. Un momento del test di isolamento sull'armadio finale del BPS. È visibile il generatore di test a 20 kV per 60 s con controllo della corrente di dispersione.



Figura 13. Il nuovo alimentatore ausiliario del BPS installato dopo i test preliminari.

3.2 Prove di consumo elettrico

Durante le prove sul BPS è stato verificato che la richiesta di potenza ausiliaria allo spunto era maggiore di quella calcolata nelle simulazioni e già concordata con i fornitori dell'impianto JT-60SA. La possibilità di azionare il BPS anche in caso di buchi di tensione è importante perché è legata alla sicurezza dell'impianto. Per questi motivi, è stato progettato ed installato un nuovo alimentatore ausiliario da 110 V dc basato su supercondensatori (ultracapacitor), come mostrato in Figura 13.

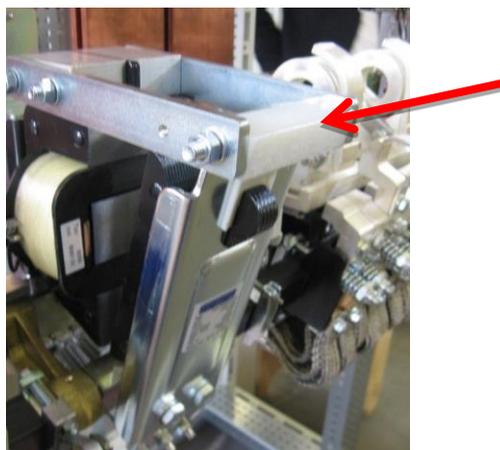
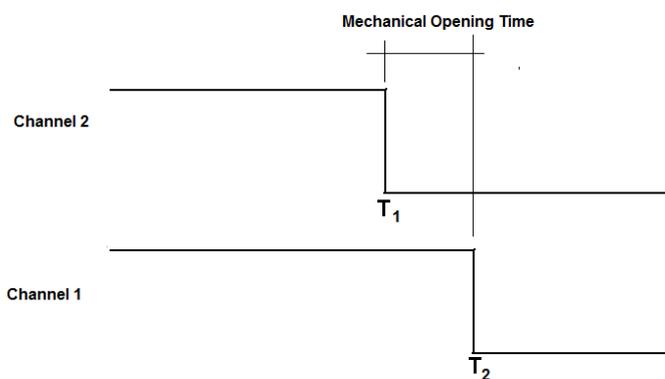
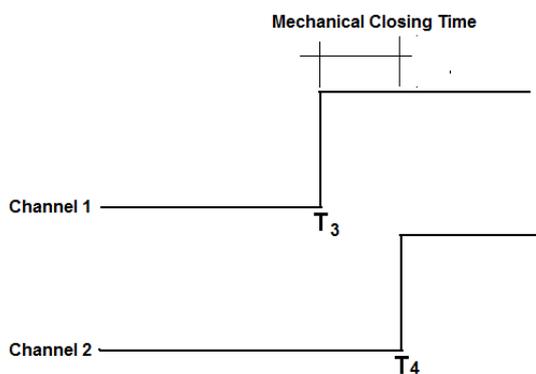


Figura 14. Limite meccanico monitorato per la verifica dello stato sicuramente e totalmente aperto.



(a)



(b)

Figura 15. Segnali per la misura dei tempi di apertura (a) e chiusura (b) del BPS.

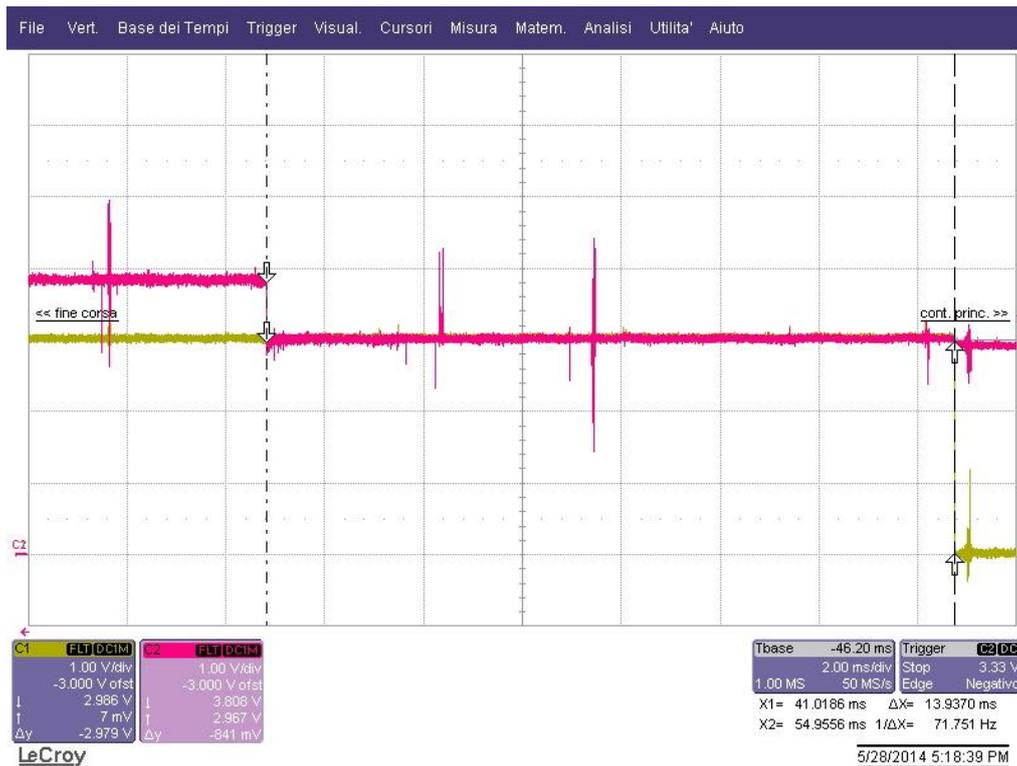


Figura 16. Schermata dell'oscilloscopio per la misura del tempo di apertura meccanica del BPS. In questo caso, il tempo di apertura stimato è intorno al valore medio tra le ripetizioni (circa 14 ms).

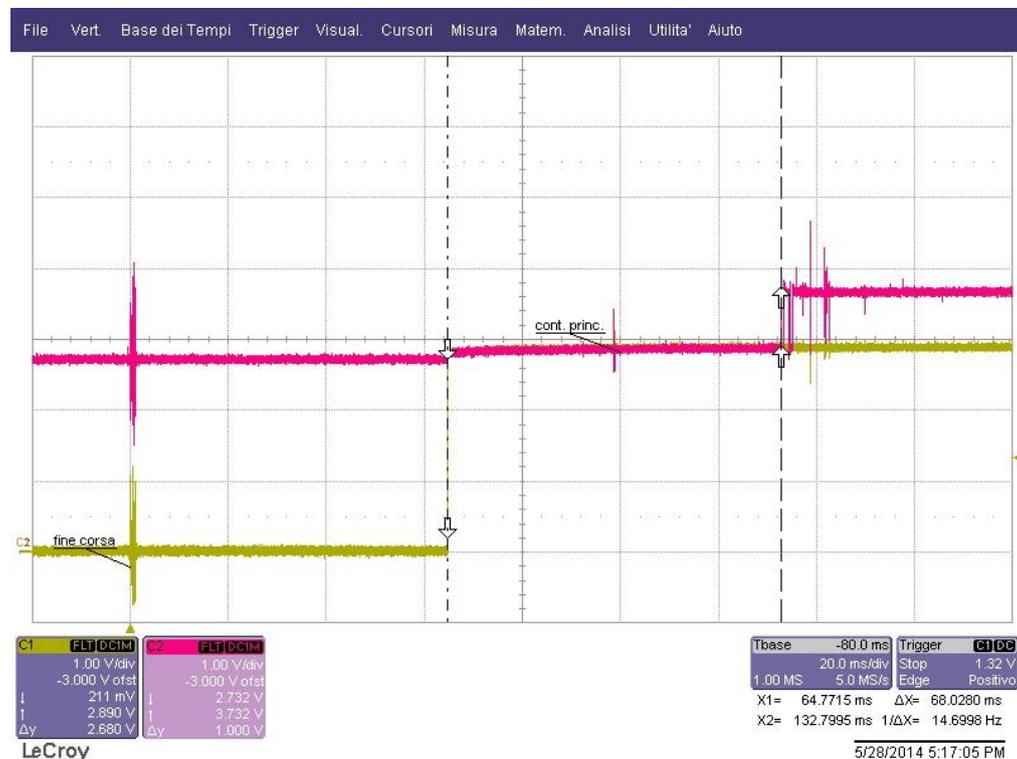


Figura 17. Schermata dell'oscilloscopio per la misura del tempo di chiusura meccanica del BPS. In questo caso, il tempo di chiusura stimato è intorno al valore medio tra le ripetizioni (circa 68 ms).

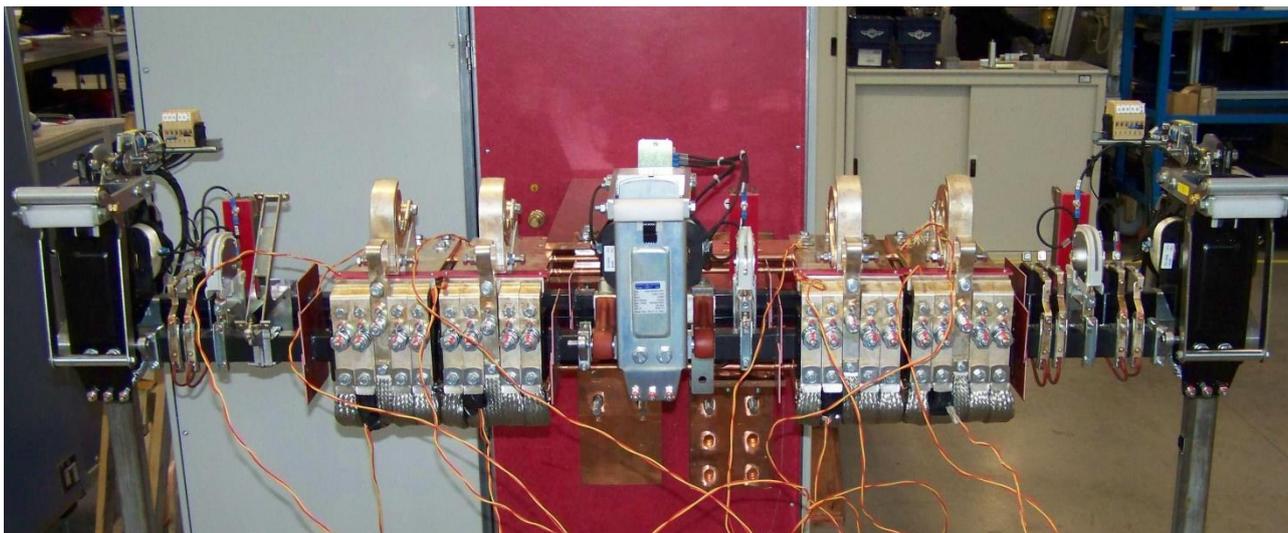


Figura 18. Contatti del BPS durante la prova di I^2t .

3.3 Prove sui tempi d'apertura e chiusura meccaniche

I meccanismi di apertura e chiusura del BPS sono stati caratterizzati attraverso 1000 sequenze complete di apertura-chiusura (in assenza di corrente). L'effettivo stato dei contatti è stato verificato tramite misure di continuità di alcune parti conduttive (vedi Figura 14) applicando una tensione di prova di 20 V. Le misure ottenute in questo modo, riassunte in Figura 15, assicurano che i contatti siano sicuramente e totalmente chiusi/aperti e consentono di fissare un limite massimo alla durata degli archi.

Le schermate di oscilloscopio digitale riportate nelle Figure 16 e 17 esemplificano due misure di tempo di apertura e chiusura.

3.4 Verifica dell' I^2t

Il BPS è stato sollecitato con una corrente di 20 kA dc per 300 s per 20 volte (fine del transitorio termico) con un intervallo tra ripetizioni di 1800 s. Il set-up di prova è mostrato in Figura 18.

3.5 Prove di resistenza elettrodinamica

Il BPS è stato sottoposto a una corrente a 50 Hz superiore a 41 kA di picco (29 kA efficaci) per 100 ms per 5 ripetizioni (più una per la taratura). Le Figure 19 e 20 mostrano alcuni momenti di queste prove effettuate presso i laboratori Siemens SVEPPI.

Il BPS non ha subito danni né aperture anomale durante queste prove.

3.6 Verifica dei meccanismi di BPS e sezionatori

L'apertura e chiusura del BPS e dei sezionatori di terra (GS) e selettori (Cn) contenuti nell'armadio BPS sono state verificate subito dopo l'esecuzione delle prove di resistenza elettrodinamica, secondo quanto previsto dalle Specifiche Tecniche.



Figura 19. Una parte della sottostazione elettrica sfruttata per produrre i 41 kA di corrente necessari ad effettuare le prove di resistenza elettrodinamica del BPS.



Figura 20. Il BPS durante le prove di resistenza elettrodinamica.

4 Prove sulle resistenze di breakdown

4.1 Valori nominali all'interno del prototipo

La Tabella 2 riassume le caratteristiche richieste ai resistori di breakdown dall'esperimento JT-60SA.

I vari elementi resistivi sono stati misurati sui terminali di uscita degli armadi, quindi tenendo conto dei collegamenti e degli elementi parassiti.

I risultati delle misure effettuate con un Ponte di Kelvin e con un micrometro sono riportati nella Tabella 3. Le induttanze sono state misurate ad 1 kHz con un LCR meter.

La resistenza di ciascun elemento si è rivelata all'interno della tolleranza prescritta del 2% con un buon margine.

Secondo le simulazioni, i valori di induttanza erano in linea con le aspettative di avere tempi di apertura inferiori a 1 ms con tensioni transitorie al di sotto dei 5.5 kV.

Tabella 2. Caratteristiche richieste ai resistori di breakdown dall'esperimento JT-60SA.

Item	Resistance	Rated Current	Dump Energy		Max voltage	Voltage (IEC 60071)	
R1	R14	3.75 Ω	1.333 kA	2 MJ		5 kV DC	7.2 kV rms
	R13	1.875 Ω	2.667 kA	4 MJ		5 kV DC	7.2 kV rms
	R12	0.9375 Ω	5.333 kA	8 MJ		5 kV DC	7.2 kV rms
	R11	0.4688 Ω	10.667 kA	16 MJ		5 kV DC	7.2 kV rms
R2	R21	0.05 Ω	10.0 kA	CS1, CS4	CS2, CS3	5 kV DC	7.2 kV rms
				30 MJ	20 MJ		
	R22	0.05 Ω	10.0 kA	CS1, CS4	CS2, CS3	5 kV DC	7.2 kV rms
				30 MJ	20 MJ		

Tabella 3. Riassunto delle principali prove ufficiali effettuate sul prototipo di SNU o su parti di esso.

Resistore	Valore nominale resistenza a 20 °C	Resistenza misurata	Induttanza misurata
R14	3.75 Ω ±2%	3.698 Ω	8.30 μH
R13	1.875 Ω ±2%	1.869 Ω	8.50 μH
R12	937.5 mΩ ±2%	936.4 mΩ	4.00 μH
R11	468.8 mΩ ±2%	467.9 mΩ	1.53 μH
R21-1	100 mΩ ±2%	98.15 mΩ	13.19 μH
R21-2	100 mΩ ±2%	97.94 mΩ	13.04 μH
R22-1	100 mΩ ±2%	98.20 mΩ	12.92 μH
R22-2	100 mΩ ±2%	97.82 mΩ	12.69 μH

4.2 Prove di isolamento

Anche gli armadi delle resistenze R1 e R2 sono stati sottoposti a prove di isolamento. La parte di potenza è stata provata a 20 kV 50 Hz per 60 s. Un momento della prova sull'armadio di R2 è mostrato in Fig. 21.



Figura 21. L'armadio di R2 durante il test di isolamento a 20 kV 50 Hz per 60 s.

4.3 Temperature rise test

La prova più critica per i resistori di breakdown è il “temperature rise test”, che consiste nel dissipare adiabaticamente tutta l'energia nominale del resistore verificando che ciò non produca una variazione di resistenza superiore al 10%. Questo limite di variazione è richiesto per le operazioni di JT-60SA.

Anche se prove preliminari erano state effettuate già sui pacchi di resistori, le prove sono state ripetute sui resistori alloggiati all'interno del prototipo assemblato, per tenere conto anche delle connessioni, degli effetti parassiti e di altri contributi indesiderati.

Come mostrato nelle Figure 22 e 23 i resistori sono stati collegati ad un generatore AC/DC (ponte a diodi) monitorando sia la tensione che la corrente (Figura 24). Da esse sono state ricavate la resistenza istantanea del resistore e la potenza (energia) dissipata, come esemplificato in Figura 25.

Le prove di riscaldamento sono state ripetute almeno 10 volte aspettando un tempo più breve di quello delle operazioni di JT-60SA (1800 s) senza osservare deformazioni meccaniche. Il risultato di 10 temperature rise test su R21-1 è riassunto in Figura 26.

In generale, i resistori di breakdown sono in grado di dissipare molta più energia (fino a 3-4 volte) di quanta richiesta dalle specifiche tecniche, garantendo un buon margine anche in caso di guasto multiplo nel sistema.

Il precedente risultato è stato possibile grazie al tipo e alla quantità del materiale selezionato. Questa scelta consente anche di avere una sovratemperatura relativamente contenuta sia all'interno del materiale stesso sia nell'aria in uscita dall'armadio dei resistori verso l'ambiente circostante. Quest'ultima caratteristica è molto utile dal momento che gli SNU si trovano ad operare nella sala “Rectifier Room” di JT-60SA insieme ad altri sistemi forniti dai partner internazionali, per cui non devono avere un impatto troppo elevato sulla temperatura dell'ambiente. Come mostrato in Figura 27, la temperatura dell'aria in uscita dai resistori è stata misurata con una termocoppia durante i temperature rise test, fornendo valori molto al di sotto dei 100 °C richiesti dalle Specifiche Tecniche.

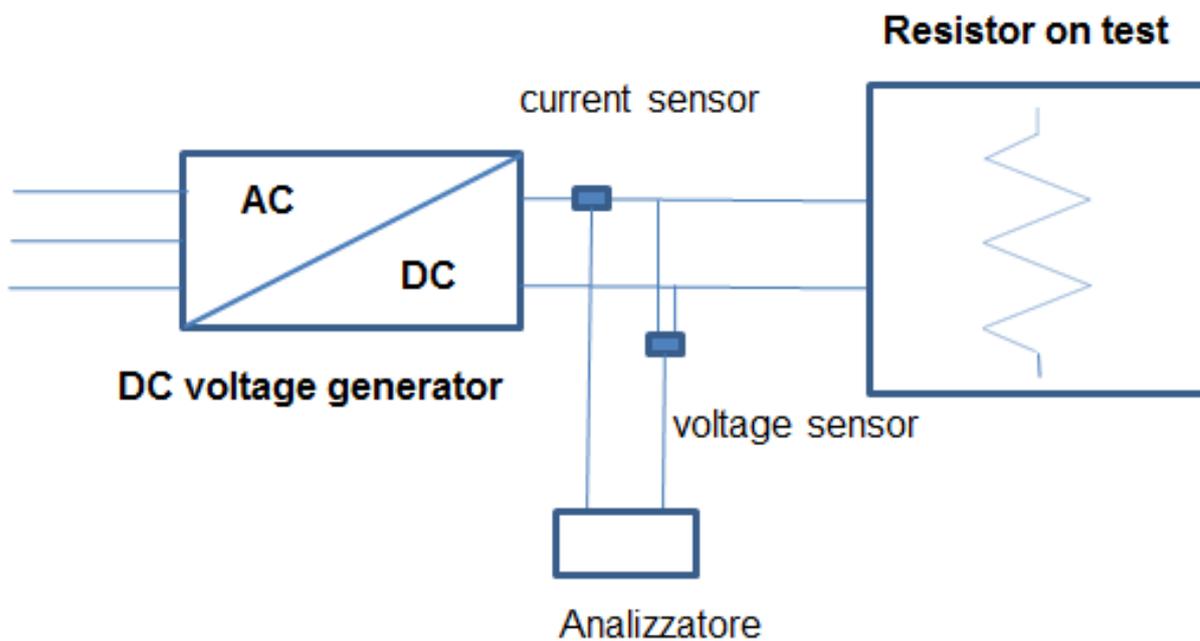


Figura 22. Set-up di prova per un temperature rise test.

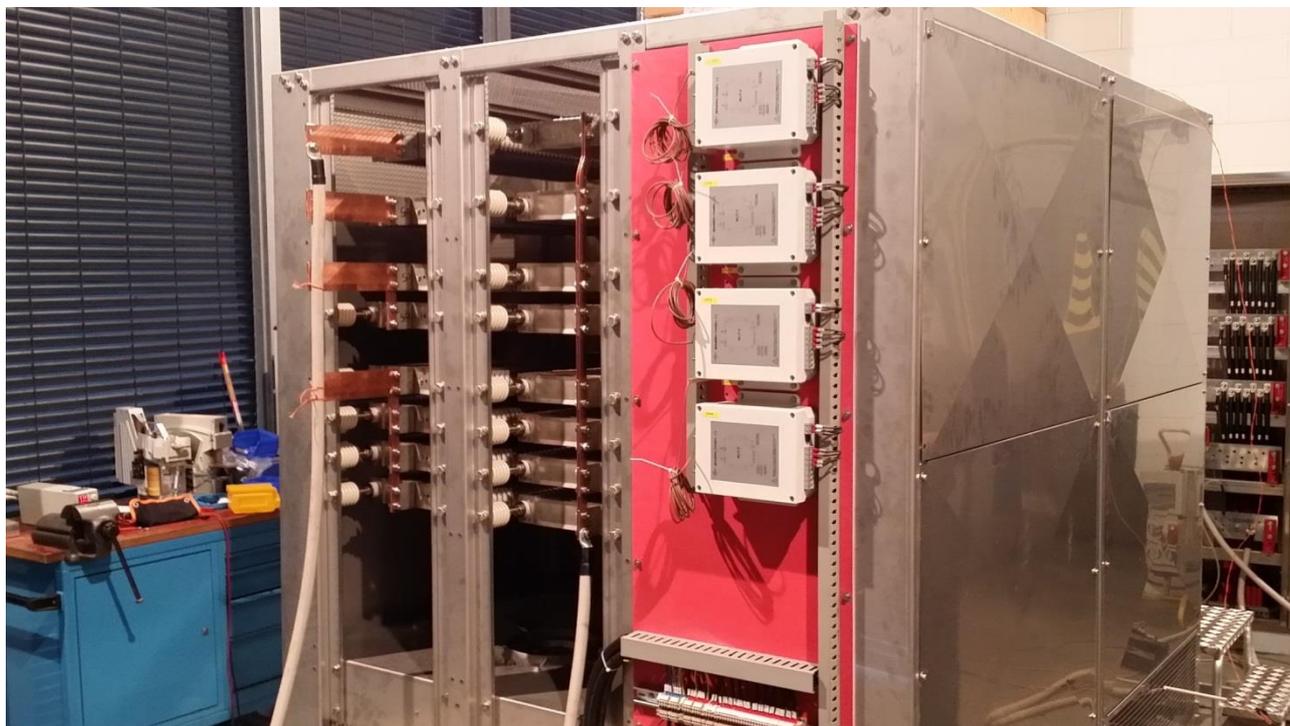


Figura 23. L'armadio del banco R1 durante un temperature rise test. Si notano i cavi provenienti dall'alimentatore AC/DC che sollecitano l'elemento più in alto del banco (R14).

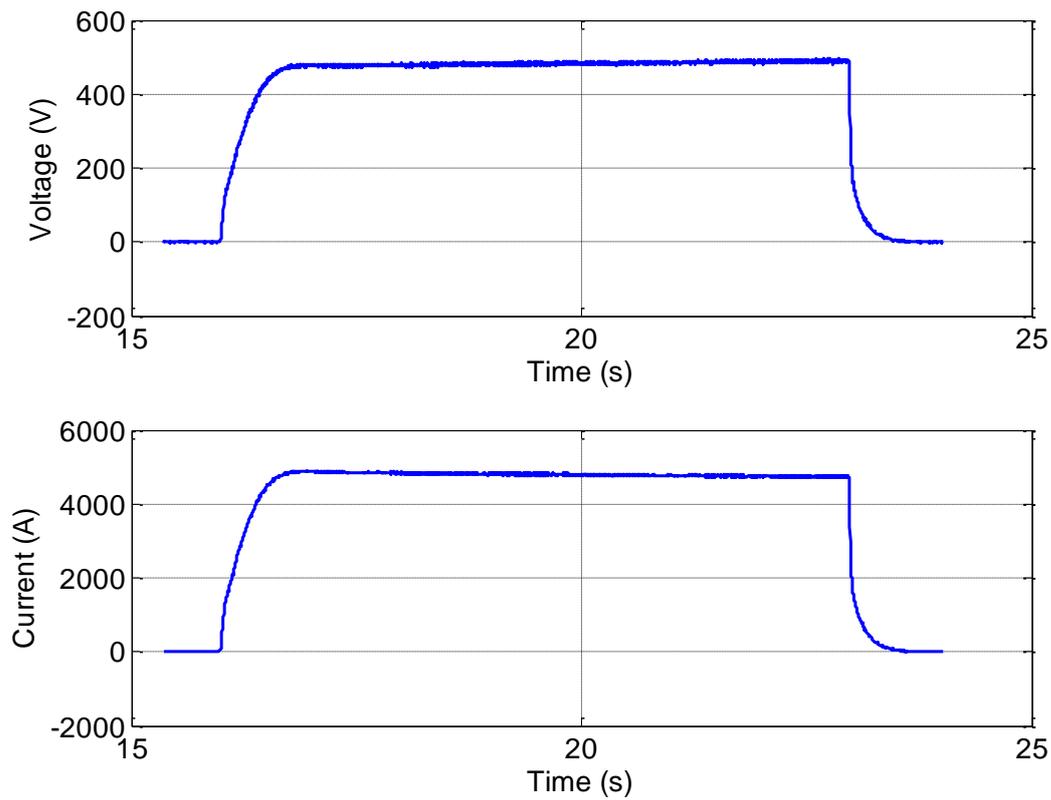


Figura 24. Tensioni e correnti misurate durante un temperature rise test sul resistore R21-1.

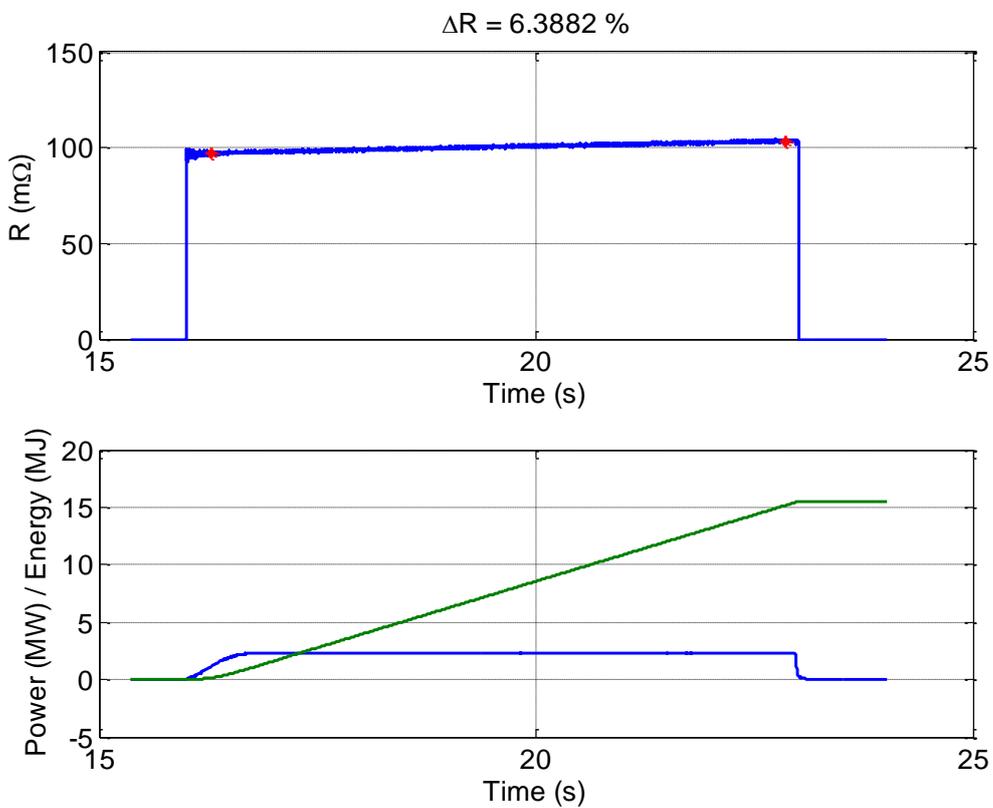


Figura 25. Resistenza istantanea stimata a partire dalle misure della figura precedente. La variazione di resistenza (circa 6.4% in questo caso) è stata valutata quando l'energia ha superato il valore nominale dell'elemento (15 MJ).

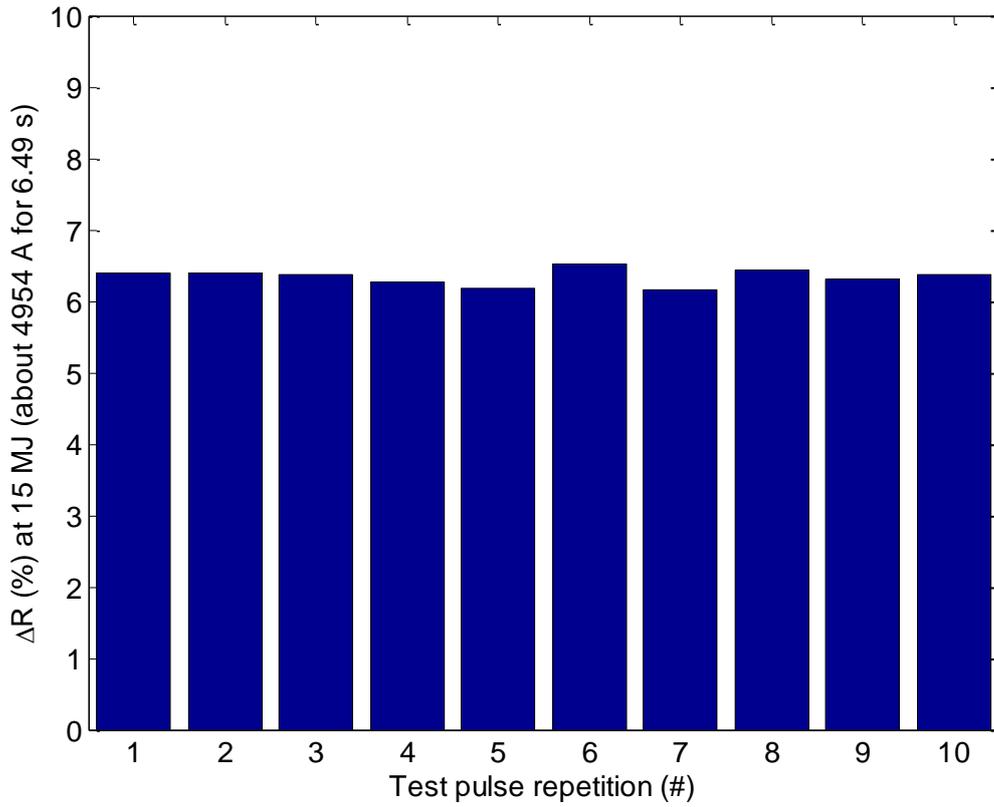


Figura 26. Variazioni di resistenza misurate per il resistore R21-1 nel corso delle 10 ripetizioni ad energia nominale (15 MJ) corrispondenti approssimativamente a 5 kA per 6.5 s (possibili condizioni operative di JT-60SA).

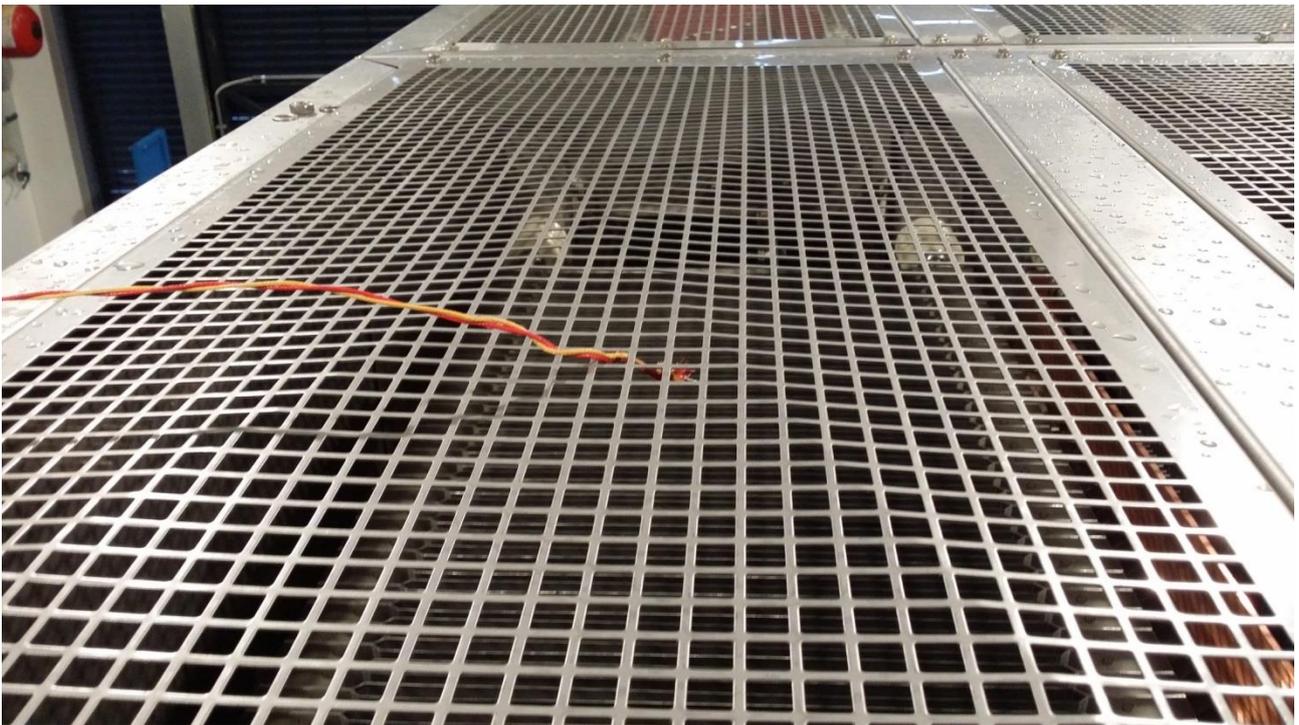


Figura 27. Termocoppia per la misura di temperatura dell'aria in uscita dai resistori durante i temperature rise test.

5 Prove funzionali sul sistema di controllo

Con l'accordo di tutti i partner, lo schema di controllo e sincronizzazione di JT-60SA è stato modificato secondo quanto riassunto in Fig. 28. Anche in virtù di questa metodologia di controllo, per gli SNU era fondamentale verificare la corretta sincronizzazione degli interruttori rispetto agli scenari di corrente.

Durante le prove funzionali della SNU completa in FTU lo schema di controllo e di sincronizzazione di JT-60SA sono stati emulati il più possibile, includendo anche gli allarmi in ingresso e uscita. Il prototipo è stato controllato mediante il prototipo di LCC, connesso via reflective memory (RM) ad un mockup del Supervising Computer (SC) finale di JT-60SA programmato e cortesemente fornito da JAEA (mostrato in Figura 29). Particolari accorgimenti sono stati adottati per sincronizzare queste due unità con gli alimentatori di FTU, il cui controllo è basato su architetture molto differenti.

Grazie a questi accorgimenti, anche i test a piena corrente e tensione sono stati eseguiti attivando le sequenze dello SNU dall'SC di JAEA operando dalla Sala Controllo Alimentatori di FTU in coordinamento con le macchine dell'ENEA (vedi Figura 30).

Le prove hanno incluso anche la simulazione di molte situazioni di guasto e allarme sia dal lato SNU sia da parte del sistema esterno.

Anche con lo schema di controllo prototipale implementato durante le prove che ha dovuto includere anche i sistemi molto diversi usati da FTU, il jitter osservato non è andato oltre il tempo di refresh del SC, cioè 250 μ s. Questo risultato è illustrato in Figura 31.

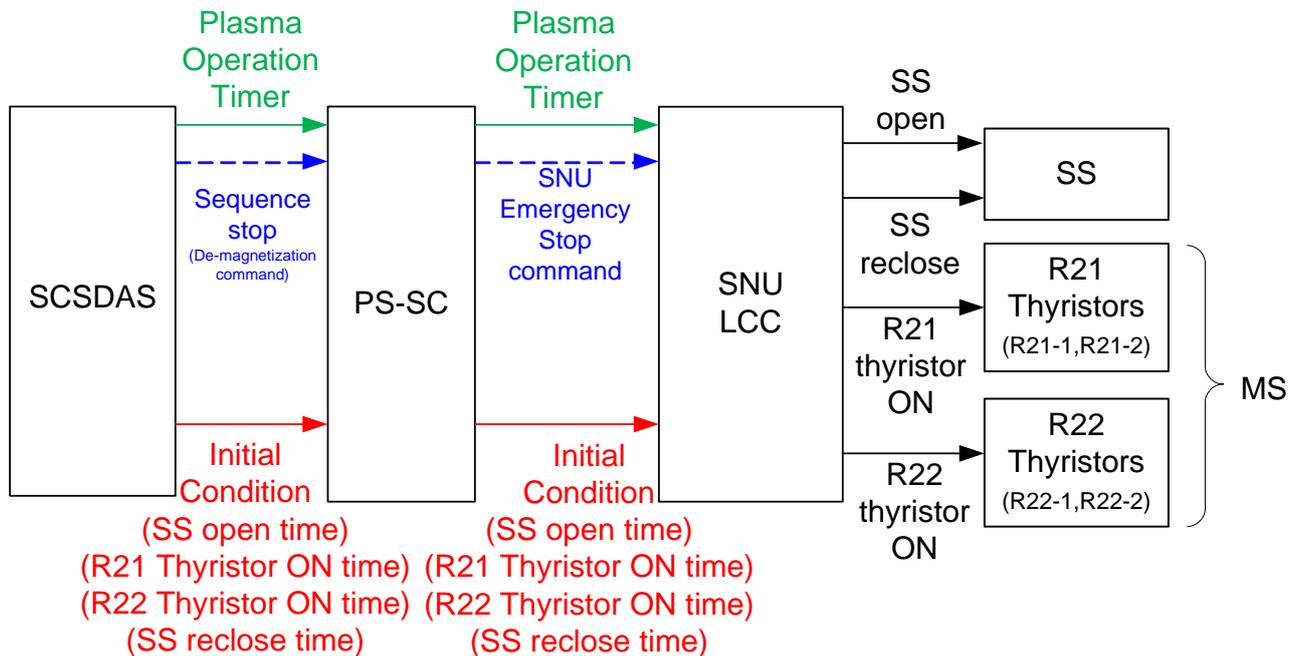


Figura 28. Schema di controllo e sincronizzazione adottato per JT-60SA con particolare riferimento agli SNU.



Figura 29. Mockup dell'SC di JT-60SA programmato e fornito da JA EA.



Figura 30. Sala Controllo Alimentatori di FTU durante le prove. Da questa sala era possibile controllare le macchina di FTU insieme a SC e LCC.

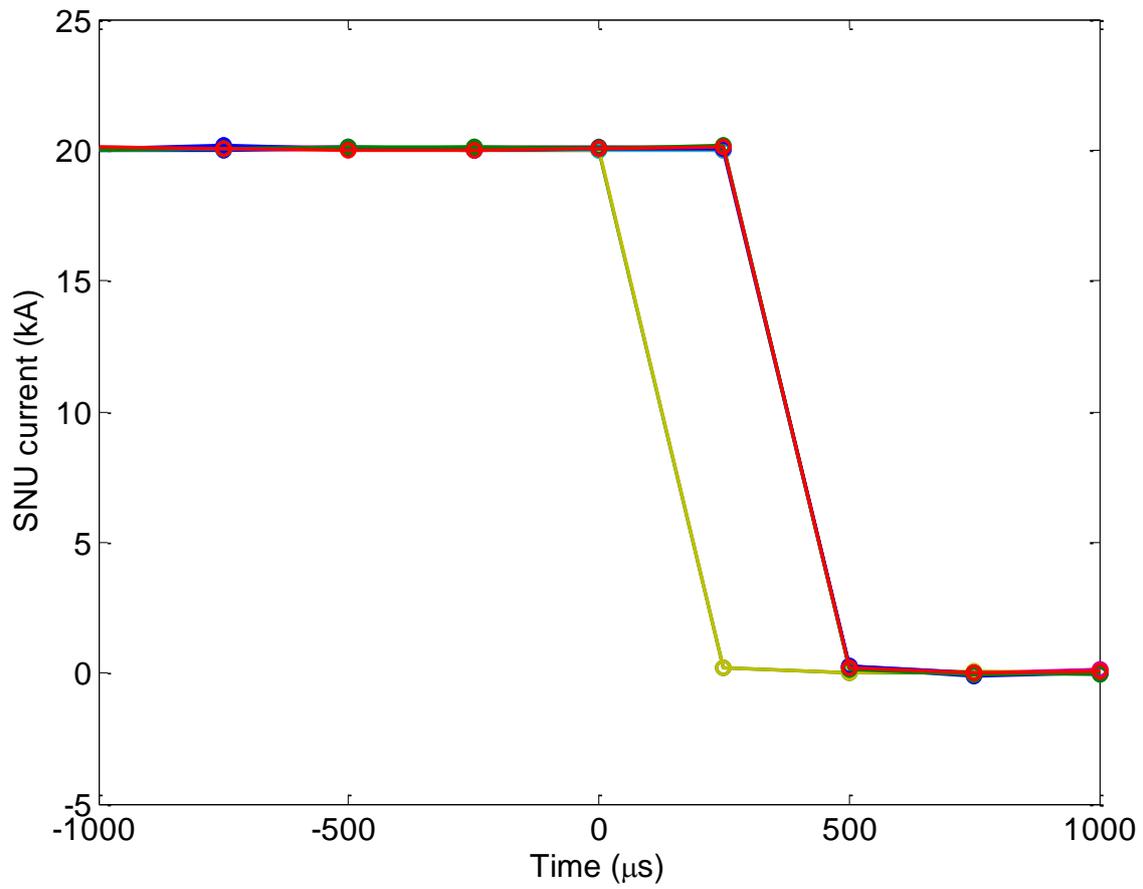


Figura 31. Ripetibilità delle operazioni dimostrata tramite la sovrapposizione delle curve di corrente registrate dall'SC durante le 10 prove successive a piena corrente e piena tensione.

6 Prove funzionali a piena corrente nei laboratori ENEA

Il prototipo di SNU è stato inserito nel circuito di alimentazione (PS) dell'avvolgimento "T" di FTU (in pratica, un CS), in maniera del tutto conforme allo schema di JT-60SA in Figura 3.

Il prototipo è stato interamente rimontato nella Sala Convertitori del Centro Ricerche ENEA di Frascati (vedi Figure 32 e 33). L'uso di un motore/alternatore (flywheel generator) ha consentito di riprodurre la rete elettrica di JT-60SA ma anche di svincolare le prove dalla rete elettrica nazionale. Il convertitore e l'alternatore utilizzati per le prove sono normalmente al servizio degli esperimenti di FTU.

Le sequenze degli interruttori durante gli scenari di prova sono illustrate nelle Tabelle 3 e 4, anche in confronto a quanto immaginato nella pubblicazione [1] per il funzionamento di JT-60SA.

Siccome l'induttanza totale del circuito di FTU (circa 80 mH) risulta inferiore al valore nominale di un modulo CS (290 mH), gli scenari di riferimento di JT-60SA sono stati adattati per effettuare le commutazioni sempre a correnti significative. Comunque, gli scenari provati sono paragonabili, se non più onerosi, di quelli operativi di JT-60SA.

Le prove sono state ripetute almeno 10 volte per ogni livello di corrente e tensione, aspettando meno dei 1800 s previsti da specifica, anche in assenza del sistema di raffreddamento ad acqua demineralizzata disponibile in JT-60SA.

Tabella 3. Sequenza degli interruttori di uno SNU secondo la pubblicazione [1].

Typical time	Operation	BPS	SCB	MS
-60 s	Initial settings, self-tests and diagnostics	Off	Off	Off
-40 s	Start of SCMPS operations (current rump-up)	On	Off	Off
-210 ms	SCB turned on (without current), BPS commanded to open	On	On	Off
-200 ms	BPS contacts begin to open producing the arc voltage necessary to transfer the current from the BPS to the SCB	Arc	On	Off
0	Start of plasma breakdown and operations	Off	Off	Off
100 μ s	High voltage across SNU terminals (current only through R1)	Off	Off	Off
300 ms	If a reduction of the current slope is required to support plasma ramp-up, R2 is inserted. Otherwise, SCB and BPS are reclosed.	Off	Off	On
$\Delta t=10$ s	BPS commanded to reclose (in less of 250 ms without inserting R2)	Off	On	On
$\Delta t+50$ ms	SCB commanded to reclose, R1 (and R2) current transferred to SCB	Off	On	On
$\Delta t+51$ ms	SNU is short-circuited (by SCB)	Off	On	On
$\Delta t+100$ ms	BPS contacts are closed, SCB and MS currents start to decay	On	On	On
$\Delta t+200$ ms	SCB is opened at zero current, MS is spontaneously off	On	Off	Off

Tabella 4. Sequenza degli interruttori del prototipo durante gli scenari di prova (con i tempi di risposta osservati sperimentalmente).

Time	Operation	BPS	SCB	MS
-120 s	Initial settings, self-tests and diagnostics	Off	Off	Off
-10 s	Start of SCMPS operations (current rump-up)	On	Off	Off
-9 s	Accurate synchronization between FTU and LCC	On	Off	Off
-200 ms	SCB turned on (without current), BPS commanded to open	On	On	Off
-160 ms	BPS contacts begin to open producing the arc voltage necessary to transfer the current from the BPS to the SCB	Arc	On	Off
-150 ms	BPS is completely opened	Off	On	Off
0	FTU zero	Off	Off	Off
<100 μ s	High voltage across SNU terminals (current only through R1)	Off	Off	Off
50 ms	R2 is inserted by MS	Off	Off	On
550 ms	BPS commanded to reclose	Off	Off	On
590 ms	SCB commanded to reclose, R1 and R2 current transferred to SCB	Off	On	On
591 ms	SNU is short-circuited by SCB	Off	On	On
690 ms	BPS contacts are closed, SCB and MS currents start to decay	On	On	On
750 ms	SCB is opened at zero current, MS is spontaneously off	On	Off	Off



Figura 32. Arrivo degli armadi del prototipo nella Sala Convertitori del Centro Ricerche ENEA di Frascati.



Figura 33. Preparazione delle prove nella Sala Convertitori del Centro Ricerche ENEA di Frascati. Le barre sulla destra, costruite appositamente per le prove sul prototipo riproducendo le barre di JT-60SA, provengono dal circuito di alimentazione di FTU.

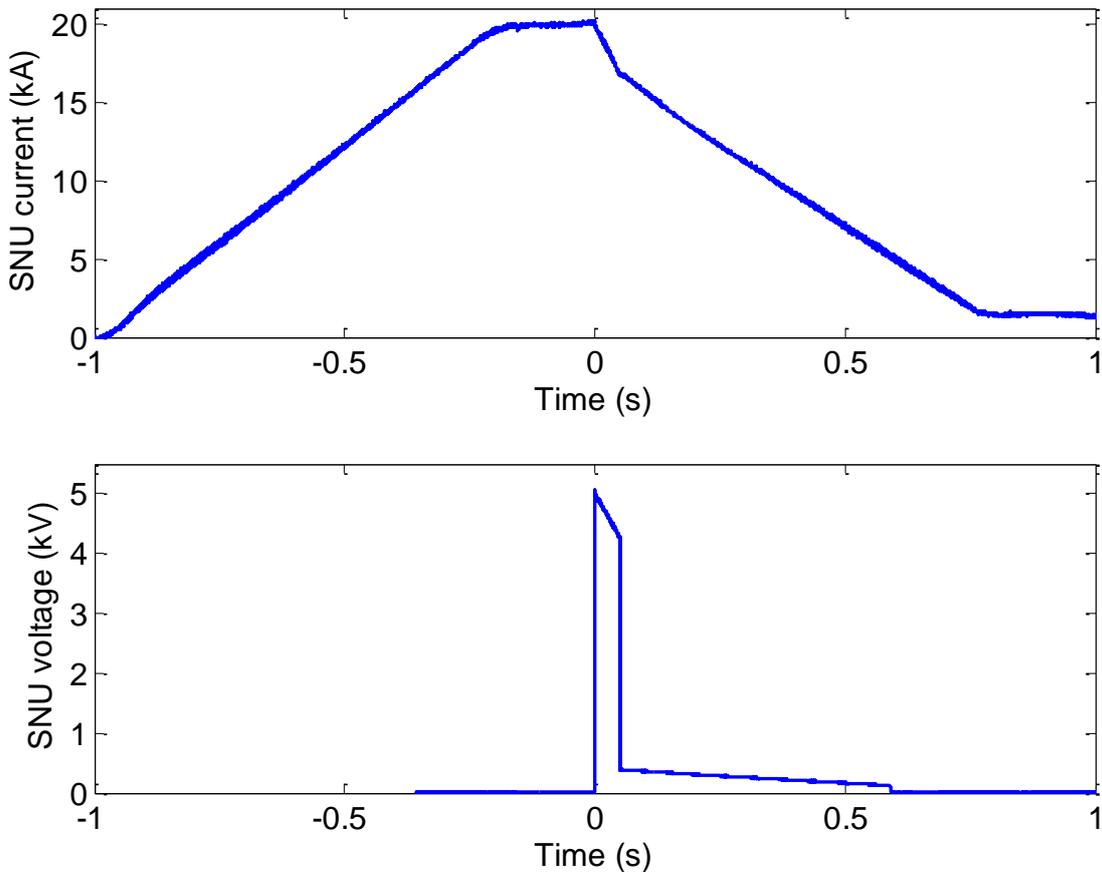


Figura 34. Correnti e tensioni misurate durante una prova a piena corrente e piena tensione effettuata in ENEA inserendo il prototipo di SNU in un circuito di alimentazione di FTU.

Figura 34 mostra la corrente nel circuito di alimentazione del “T” e la tensione ai capi del prototipo di SNU misurate durante il decimo di 10 scenari di prova effettuati in condizioni nominali. Come si vede il prototipo è in grado di produrre i risultati attesi per gli esperimenti di JT-60SA. In particolare, il tempo di apertura a 20 kA e 5 kV è risultato inferiore a 100 μ s, mentre la specifica permetteva di arrivare fino a 1.5 ms. Inoltre, la tensione transitoria (dannosa per i componenti) non ha superato i 5.2 kV.

Ulteriori dettagli sulle prove a piena corrente e piena tensione illustrate in Figura 34 sono visibili nelle Figure da 35 a 37.

Per verificare la disponibilità di un ampio margine di sicurezza, la prova è stata ripetuta aprendo con un singolo ramo di SCB una corrente maggiore del 25% del valore nominale. La tensione prodotta non era lontana da quella nominale, ma il valore era limitato a circa 4 kV in quanto la resistenza disponibile più vicina a dare 5 kV era $R13//R14=1.25 \Omega$. Figura 38 mostra una prova di sequenza completa effettuata in ENEA utilizzando la SNU completa ma controllando la corrente con un solo ramo di SCB e due rami di MS. In questo caso, il singolo ramo di SCB ha aperto senza problemi un ottavo di 25 kA, pari a 3125 A, mentre in condizioni nominali dovrebbe aprire 2500 A.

Questi e altri risultati delle prove sul prototipo saranno riassunti nella prossima sezione.

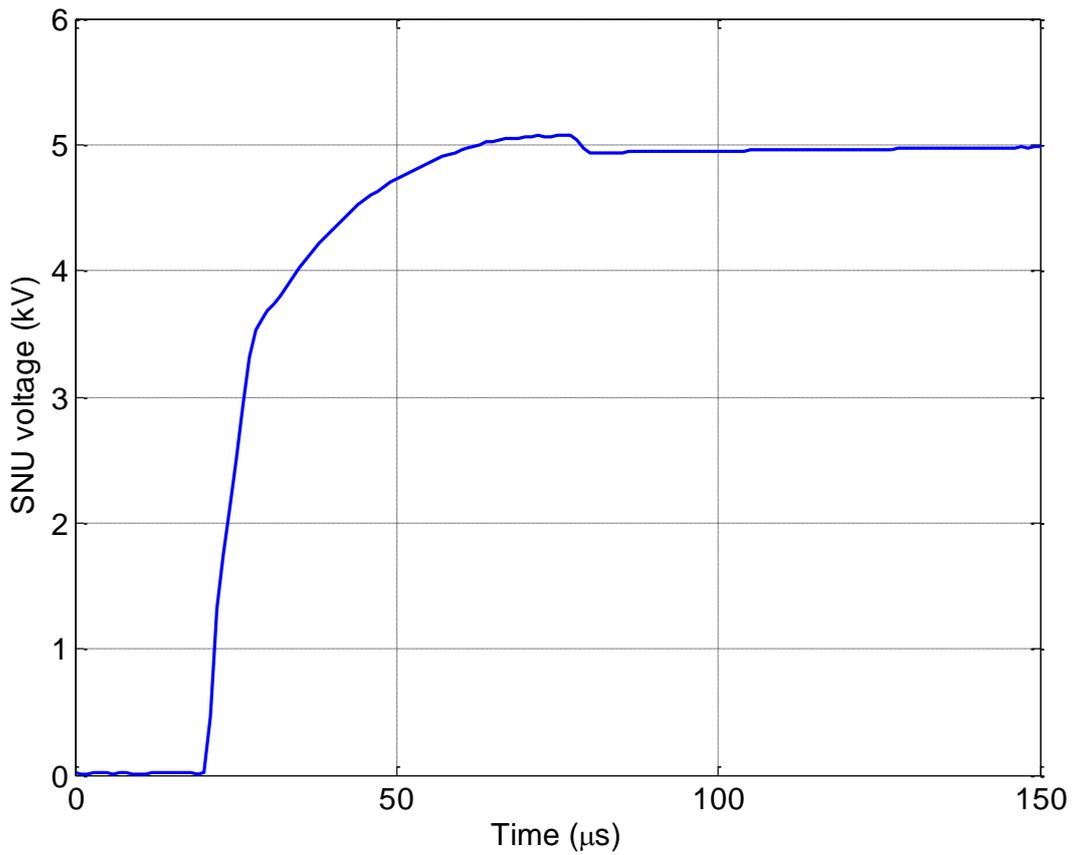


Figura 35. Zoom della tensione in Figura 34 durante l'operazione più critica della prova: l'apertura dello SNU.

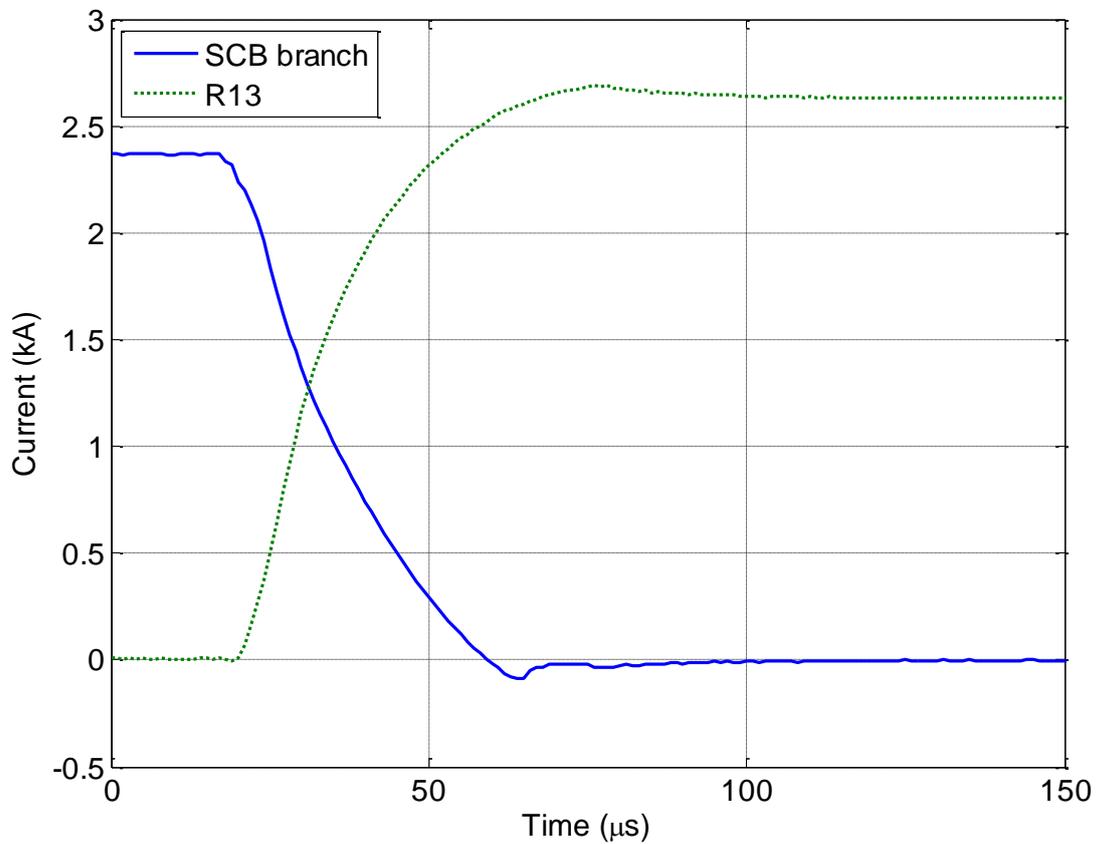


Figura 36. Correnti misurate in un singolo ramo di SCB e di R1 al momento dell'apertura dello SNU durante una prova a piena corrente e piena tensione effettuata in ENEA.

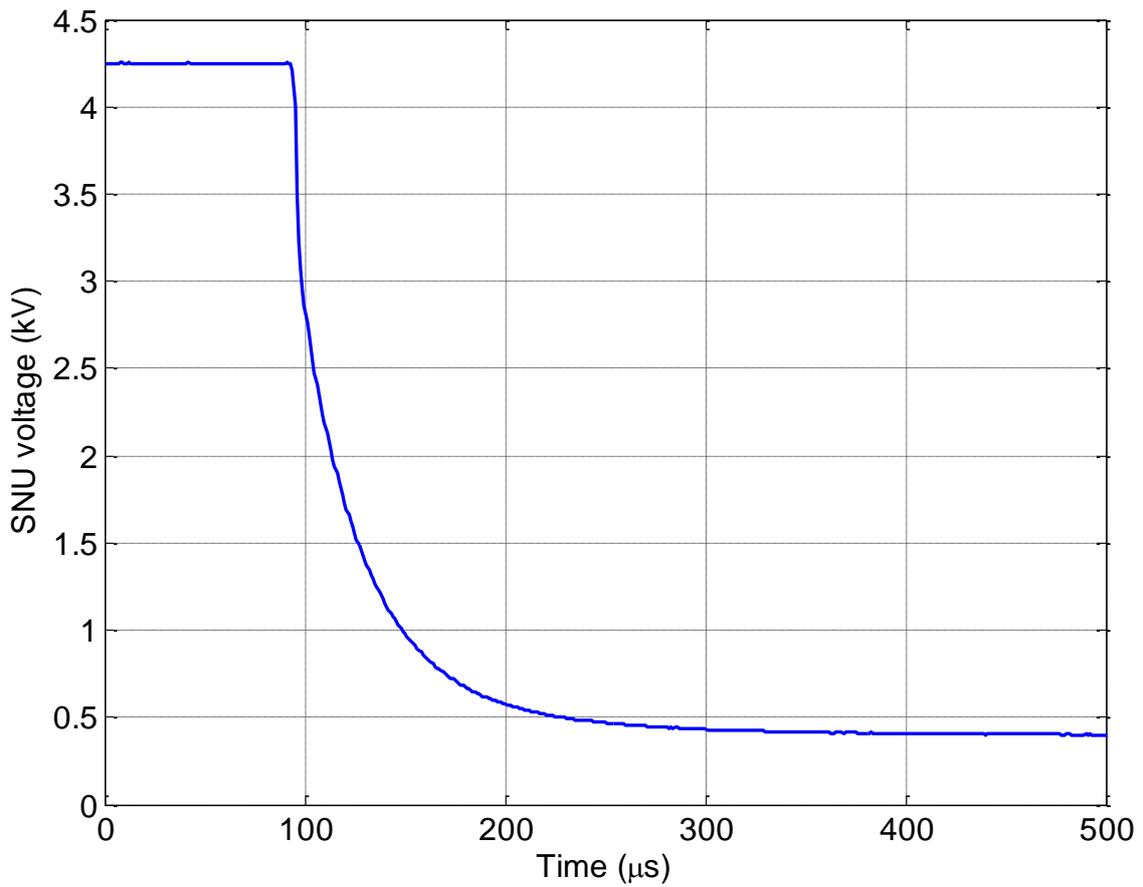


Figura 37. Zoom della tensione in Figura 34 durante la chiusura del MS.

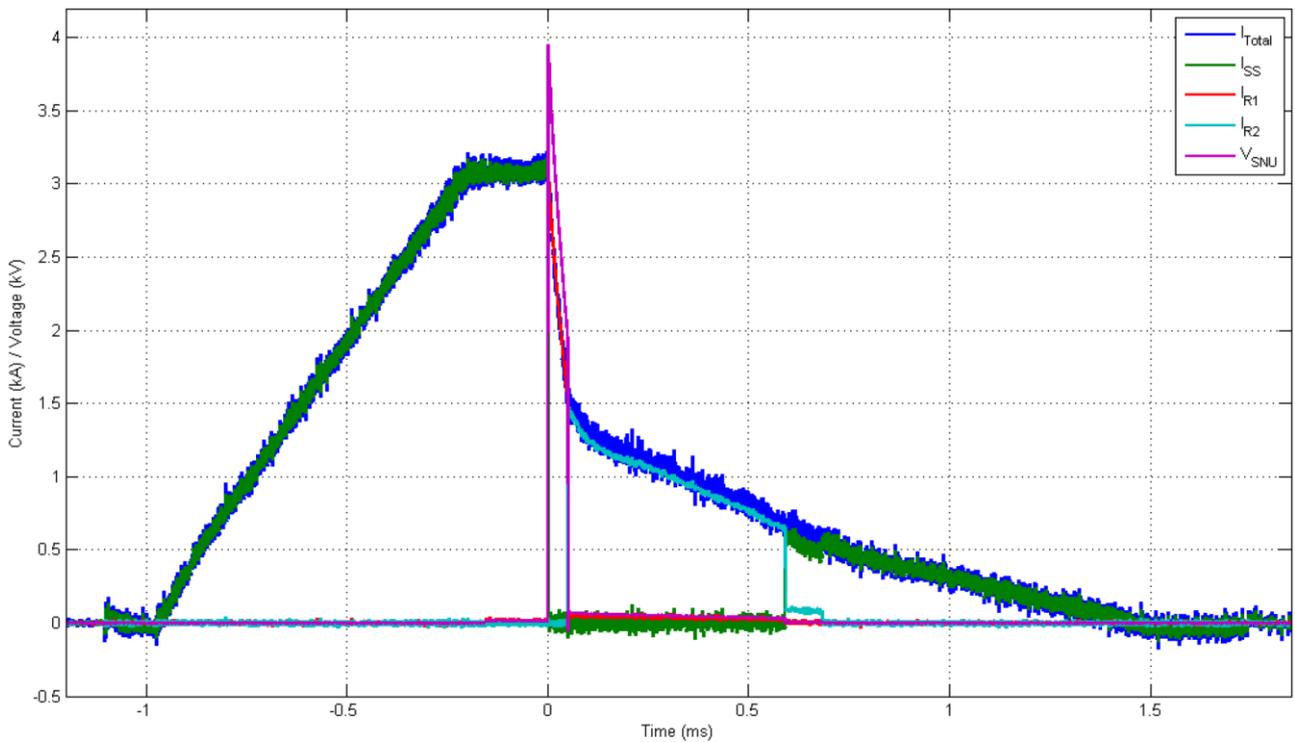


Figura 38. Correnti e tensioni misurate durante una prova in cui un singolo ramo di SCB è stato in grado di aprire una corrente maggiore del 25% rispetto al valore nominale.

7 Riepilogo dei principali risultati delle prove

I principali risultati delle prove effettuate sul prototipo nel periodo di riferimento sono riassunti in Tabella 5. È possibile apprezzare che molte prestazioni raggiunte superano le richieste di specifica.

Tabella 5. Confronto tra le prestazioni degli SNU richieste dall'esperimento JT-60SA e quelle verificate sperimentalmente durante le prove sul prototipo.

Caratteristica	Specifiche JT-60SA	Sperimentale
Corrente nominale	±20 kA	±20 kA
Corrente di interruzione SCB	25 kA	25 kA (3125 A per ramo)
Tensione nominale (a terminali degli SNU)	5 kV	5 kV
Massima tensione (inclusi overshoot e transitori)	7 kV	5.2 kV
Tempo massimo di apertura SNU (inclusa accuratezza)	1.5 ms	80 μs
Tempo di chiusura del MS	2 ms	140 μs
Tempo massimo di chiusura SNU (inclusa accuratezza)	1.5 ms	1.25 ms
Caso peggiore apertura SNU in condizioni non nominali	Non considerato	700 μs
Tempo di chiusura MS nel caso peggiore	Non considerato	40 μs
Tempo di chiusura SNU nel caso peggiore per l'apertura	Non considerato	1 ms
Tempo massimo di apertura BPS (solo per riferimento)	15 ms	15 ms
Limite termico	<70 GA ² s	>130 GA ² s
Lunghezza massima dell'impulso	250 s	>250 s
Intervallo di ripetizione	1800 s	<1800 s
Caduta di tensione in stato di chiusura	Consentita >10 V	<10 mV
Tolleranza di ciascun resistore di breakdown (a 20°C)	±2%	Migliore di ±1.5%
Massima variazione della resistenza con la temperatura	10%	8%
Energia dissipabile nei banchi R1 e R2	70/90 MJ	>>90 MJ
Temperatura massima dell'aria in uscita dai resistori	100 °C	<60 °C
Massimo sbilanciamento di corrente tra rami in parallelo	20%	11%
Cicli di apertura/chiusura in assenza di aria compressa	2	Illimitati
Tempo di "autoprotezione" in caso di guasti o allarmi	Non specificato	Entro 150 ms

8 Conclusioni

Il presente rapporto ha descritto le attività svolte nell'ambito della Ricerca di Sistema Elettrico per il PAR 2013 dell'Obiettivo A3 dell'Accordo di Programma tra Ministero dello Sviluppo Economico ed ENEA, finalizzato alla realizzazione degli SNU dell'esperimento internazionale per la fusione nucleare denominato JT-60SA.

Il PAR dell'Accordo di Programma per l'anno appena concluso prevedeva tra l'altro lo svolgimento di prove e collaudi su sistema di commutazione veloce di potenza per applicazioni fusionistiche, denominato SNU, nell'ambito del progetto internazionale JT-60SA.

La progettazione tecnica e la gestione della fornitura sono state affidate all'ENEA che ha operato in stretta collaborazione con i partner internazionali, specialmente con F4E e JAEA. Le prestazioni richieste al prototipo di SNU non erano raggiungibili da nessun dispositivo attualmente disponibile in commercio. A causa della natura sperimentale ed innovativa del sistema, alcune sue caratteristiche, anche non secondarie, sono state costantemente oggetto di discussione ed aggiornamento con i partner internazionali (F4E, JAEA ed altre agenzie ed industrie), anche in relazione agli sviluppi dell'esperimento JT-60SA e delle altre forniture.

Nel corso del 2013, la documentazione di progetto (First Design Report) presentata dall'ENEA è stata approvata ufficialmente del team di coordinamento internazionale di JT-60SA.

A seguito di una procedura negoziata gestita dall'ENEA, la realizzazione industriale degli SNU è stata affidata all'impresa OCEM Energy Technology di San Giorgio di Piano (BO) che ha completato l'assemblaggio di tutti gli elementi del prototipo nel settembre 2013.

Nel corso del 2014 il prototipo è stato esaustivamente collaudato, a partire da prove su singole parti critiche (BPS, SCB resistori dei breakdown).

Le operazioni del prototipo nell'insieme sono testate a piena corrente (20 kA) e piena tensione (5 kV) fino a settembre 2014 nel Centro Ricerche ENEA di Frascati. Il prototipo di SNU è stato inserito nel circuito di alimentazione del trasformatore (solenoide) centrale del tokamak FTU dell'ENEA riproducendo quasi totalmente le condizioni operative di JT-60SA.

Le prove hanno dimostrato che il prototipo di SNU è in grado di rispondere, in molti casi superandole, alle esigenze dell'esperimento JT-60SA. Il rapporto ha messo in evidenza numerose caratteristiche importanti che sono state verificate sperimentalmente. In particolare, lo SNU è in grado di:

- Sincronizzare un interruttore elettronico (SCB) in parallelo con uno elettromeccanico (BPS) per sfruttare i punti di forza di entrambi.
- Aprire in 80 μ s una corrente di kA dc.
- Limitare l'arco nel BPS per allungarne notevolmente la vita utile.
- Deviare la corrente verso apposite resistenze fino a raggiungere una tensione nominale di 5 kV.
- Limitare l'overshoot transitorio a circa 200 V allo scopo di preservare i componenti elettronici e i superconduttori.
- Adattare allo scenario desiderato la resistenza di breakdown da 0.25 Ω a 3.75 Ω mediante 4 selettori.
- Inserire in meno di 150 μ s attraverso un interruttore totalmente elettronico ulteriori resistenze allo scopo di ridurre la resistenza dello SNU fino a 22 m Ω e di abbassare di conseguenza la tensione e la derivata di corrente. Questo consente di agevolare la crescita della corrente di plasma.
- Dissipare oltre 90 MJ di energia durante un ciclo di funzionamento.
- Raggiungere uno stato di "autoprotezione" entro 150 ms.
- Sincronizzare le sue operazioni con quelle degli altri sistemi dell'impianto JT-60SA.
- Ripetere questo tipo di operazioni, di per sé eccezionali, a distanze di 30 minuti anche decine di volte al giorno per diversi anni senza richiedere manutenzioni particolari.

Dopo l'esito favorevole delle prove, il fornitore industriale ha iniziato a realizzare gli ulteriori tre SNU. Il loro completamento è previsto per settembre 2015. La consegna in Giappone e la messa in servizio dell'intera fornitura sono programmate per il 2016.

9 Riferimenti bibliografici

1. A. Lampasi, et al., Final design of the Switching Network Units for the JT-60SA Central Solenoid, *Fusion Eng. Des.* 89 (2014) 342-348.
2. A. Lampasi, et al., First Switching Network Unit for the JT-60SA superconducting Central Solenoid, 28th Symposium on Fusion Technology (SOFT), 2014.
3. L. Novello, et al., Present Status of the new Power Supply Systems of JT-60SA procured by EU, 28th Symposium on Fusion Technology (SOFT), 2014.
4. P. Zito, D. A. Lampasi, G. Maffia, G. Candela, "A Novel Digital Controller for 12-Pulse Back-to-Back AC/DC Converters in Nuclear Fusion Experiments," International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM 2014), 18-20 Jun. 2014.
5. A. Lampasi, M. Santinelli, Procurement Technical Specifications for the Agreement Of Collaboration F4E-ENEA for the Joint Implementation of the Procurement Arrangement for the Supply of the Switching Network Units for Central Solenoids for the Satellite Tokamak Programme (TS).
6. A. Lampasi, Management and Quality Specifications for the ENEA Industrial Supplier (MQS).
7. JT-60SA Plant Integration Document (PID), Version 3.6, Jul 2014.
8. F. Burini, Y. Kuate Fone, G. Taddia, S. Tenconi, Switching Network Units for the coils CS1, CS2, CS3 and CS4 of the Tokamak JT-60SA First Design Report".
9. 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.
10. A. Coletti et al., JT-60SA power supply system, *Fusion Engineering and Design* 86 (2011) 1373–1376.
11. A. Coletti et al., The IGNITOR Electrical Pulsed Power Supply System, Twenty-First IEEE/NPS Symposium on Fusion Engineering (SOFE'05), 26-29 Sep. 2005.
12. K. Yamauchi et al., Electric circuit analysis for plasma breakdown in JT-60SA, *J. Plasma Fusion Res. SERIES*, Vol. 9 (2010), pp. 220-225.
13. M. Matsukawa et al., Optimization of Plasma Initiation Scenarios in JT-60SA, *J. Plasma Fusion Res. SERIES*, Vol. 9 (2010), pp. 264-269.
14. K. Yamauchi et al., Detailed analysis of the transient voltage in a JT-60SA PF coil circuit, *Plasma Science and Technology*, Volume 15, Issue 2, pp. 148-151, Feb. 2013.
15. E. Di Pietro, P. Barabaschi, Y. Kamada, S. Ishida, the JT-60SA Team, Overview of engineering design, manufacturing and assembly of JT-60SA machine, *Fusion Eng. Des.* 89 (2014) 2128-2135.
16. JT-60SA Power Supply, Summary of Signals to be exchanged among each components and magnet PS supervising controller.
17. JT-60SA Address map of RM for PS control system.
18. JT-60SA Power Supply System Protection Sequence in Case of Fault.
19. A. Lampasi, P. Costa, G. Maffia, F. Starace, P. Zito, "Prototipo di sistema di commutazione veloce da 20 kA DC per applicazioni di fusione nucleare", Report Ricerca di Sistema Elettrico RdS/2013/187, Sep. 2013.
20. A. Lampasi, G. Maffia, F. Starace, "Fornitura di 4 sistemi di commutazione Switching Network Unit per la macchina sperimentale tokamak JT-60SA", Report Ricerca di Sistema Elettrico RdS/2012/257, Sep. 2012.
21. A. Lampasi, "Specifiche tecniche per la realizzazione degli switching network unit dei solenoidi centrali del tokamak JT-60SA", Report Ricerca di Sistema Elettrico RdS/2011/378, Nov. 2011.

10 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
BPS	By-Pass Switch	Electromechanical device that conducts the coil current before and after the breakdown phase in the reference scheme
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
CT	Current Transducer	Transducers for current measurements in the SNU
DDP	Detailed Design Phase	In this phase, the IS shall detail the technical solutions selected to comply with the requirements
DEMO	DEMO	DEMOstration Power Plant intended to build upon the success of ITER
DMS	Document Management System	BA Document Management System (also known as IDM)
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
FTU	Frascati Tokamak Upgrade	ENEA tokamak
GS	Grounding Switch	Switches for SNU safety grounding
IAs	Implementing Agencies	F4E and JAEA
IGCT	Integrated Gate Commutated Thyristor	Power semiconductor electronic device used to switch electric current
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	–
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
SCB	Static Circuit Breaker	Switch system based on static devices that supports the BPS to satisfy the time specifications
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
XFMR	Transformer	–