



Ricerca di Sistema elettrico

Realizzazione e collaudo di tre unità di commutazione veloce per JT-60SA

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

REALIZZAZIONE E COLLAUDO DI TRE UNITÀ DI COMMUTAZIONE VELOCE PER JT-60SA

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

Settembre 2015

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2014

Area: Produzione di Energia Elettrica e Protezione dell'Ambiente

Progetto: B.3.2 Attività di fisica della Fusione complementari a ITER

Obiettivo: A3

Responsabile del Progetto: Ing. Aldo Pizzuto, ENEA

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 STRUTTURA ED INTERFACCE FINALI DELLE SNU	6
3 PROVE DI ACCETTAZIONE SULLE RESISTENZE DI BREAKDOWN	11
4 PROVE DI ACCETTAZIONE SULL'INTERRUTTORE ELETTROMECCANICO BPS.....	14
4.1 PROVE DI TENUTA IN TENSIONE	14
4.2 STIMA DELLO SBILANCIAMENTO TRA I RAMI DEL BPS	14
4.3 VERIFICA DEI TEMPI DI APERTURA E CHIUSURA.....	18
5 SISTEMA DI RAFFREDDAMENTO AD ACQUA DEMINERALIZZATA	19
6 ASSEMBLAGGIO DEL SISTEMA COMPLETO	19
7 CONCLUSIONI.....	23
8 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	24
9 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	25

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) che stabilisce il contributo di alcune nazioni europee, tra cui l’Italia, alle tecnologie per la fusione nucleare.

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

La principale criticità delle SNU consiste nel dover aprire in meno di 1 ms correnti continue fino a 20 kA producendo ai loro capi tensioni fino a 5 kV. La corretta operazione di tali sistemi è indispensabile per la formazione del plasma di fusione.

Non essendo disponibili sul mercato soluzioni adatte allo scopo, è stato sviluppato un progetto dedicato, gestito dall’ENEA in costante coordinamento con i partner internazionali Fusion for Energy (F4E) e Japan Atomic Energy Agency (JAEA). Il progetto e l’ingegnerizzazione definitiva (First Design Report) delle SNU sono stati approvati ufficialmente dal team di coordinamento internazionale nel corso del 2013.

Data la specificità della fornitura, si è stabilito di eseguire una serie esaustiva di prove su un prototipo a piena scala. L’impresa OCEM Energy Technology di Bologna ha completato l’assemblaggio dei sei cubicle (armadi) del prototipo nel settembre 2013.

Nel corso del 2014 sono state effettuate numerose prove (Factory Type Test) sul prototipo e sui suoi componenti più critici (interruttori, semiconduttori, resistori di breakdown). Le prove più importanti sono state eseguite alla presenza dei rappresentanti di F4E e JAEA sul prototipo completo a piena corrente (20 kA) e piena tensione (5 kV) nei laboratori del Centro Ricerche ENEA di Frascati, in condizioni anche più onerose di quelle previste durante gli esperimenti di JT-60SA.

Dopo l’esito positivo di tali prove, il prototipo sarà parte integrante della fornitura e andrà poi a costituire a tutti gli effetti la prima SNU del CS di JT-60SA. Inoltre, il fornitore industriale OCEM Energy Technology è stato autorizzato a realizzare, conformemente al prototipo, le ulteriori tre SNU “di serie”. Nella estate del 2015 sono stati completati tutti gli altri elementi di queste ulteriori tre SNU.

Anche le tre nuove SNU hanno subito una serie di prove di accettazione che saranno descritte nel presente rapporto. Secondo gli accordi internazionali e il contratto con il fornitore industriale, le prove sulle tre ulteriori unità sono state più contenute di quelle sul prototipo (prove di routine).

La fornitura finale sarà costituita dal prototipo, dalle successive tre SNU e dal sistema di controllo locale (Local Control Cubicle, LCC). Anche se una prima versione dell’LCC era stata realizzata per le prove sul prototipo, la disponibilità di tutte le quattro unità ha permesso di svilupparne la versione finale e di definire completamente i meccanismi di comunicazioni con il resto degli impianti.

Infine, il rapporto mostra anche il sistema complessivo finale (quattro SNU comandate dall’LCC), assemblato in maniera analoga alla configurazione definitiva nel sito JAEA di Naka.

1 Introduzione

Il presente rapporto descrive le attività svolte nell'ambito della Ricerca di Sistema Elettrico per il Piano Annuale di Realizzazione (PAR) 2014 dell'Obiettivo A3 dell'Accordo di Programma tra Ministero dello Sviluppo Economico ed ENEA, finalizzato alla realizzazione delle switching network unit (SNU) dell'esperimento internazionale per la fusione nucleare denominato JT-60SA.

JT-60SA è un progetto in corso di realizzazione a Naka in Giappone, frutto della collaborazione tra Unione Europea e Giappone il cui obiettivo principale è lo sfruttamento della fusione nucleare per la produzione di energia. Si tratta di un aggiornamento superconduttore ("super, advanced") del preesistente tokamak denominato JT-60. Nel quadro di questa collaborazione internazionale, l'ENEA ha il compito di fornire le quattro SNU per gli alimentatori del CS di JT-60SA.

L'ENEA ha gestito la progettazione tecnica e seguito l'industrializzazione della fornitura in costante coordinamento con i partner internazionali, specialmente con Fusion for Energy (F4E) e Japan Atomic Energy Agency (JAEA).

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

Data la specificità dei sistemi da fornire, si è stabilito di sviluppare prima un prototipo a piena scala che andrà poi a costituire la prima SNU della fornitura. L'impresa OCEM ha completato l'assemblaggio di tutti gli elementi del prototipo nel settembre 2013. Nella versione definitiva il prototipo è costituito da sei cubicle (armadi) nella configurazione che sarà presentata nella prossima sezione del rapporto.

Nel corso del 2014 sono state effettuate numerose prove su questo prototipo e sui suoi componenti più critici (Factory Type Test). La prova più importante è stata eseguita sul prototipo completo a piena corrente (20 kA) e piena tensione (5 kV) nei laboratori del Centro Ricerche ENEA di Frascati. Il prototipo di SNU è stato inserito nel circuito di alimentazione del trasformatore (solenoid) centrale del tokamak FTU dell'ENEA, in condizioni anche più onerose di quelle previste durante gli esperimenti di JT-60SA (per esempio, in assenza di acqua di raffreddamento).

Dopo l'esito positivo di tali prove, il fornitore industriale OCEM Energy Technology è stato autorizzato a realizzare, conformemente al prototipo, le ulteriori tre SNU "di serie". Nella estate del 2015 sono stati completati tutti gli altri elementi di queste ulteriori tre SNU.

Anche le tre nuove SNU hanno subito una serie di prove di accettazione che saranno descritte nel presente rapporto. Secondo gli accordi internazionali e il contratto con il fornitore industriale, poiché il prototipo è stato esaustivamente caratterizzato, le prove sulle tre ulteriori unità sono state più contenute.

La fornitura finale sarà costituita dal prototipo, dalle successive tre SNU e dal Local Control Cubicle (LCC), un sistema che coordina le operazioni delle quattro SNU ed è in contatto con il sistema di supervisione e controllo globale di JT-60SA. Anche se una prima versione dell'LCC era stata realizzata per le prove sul prototipo, la disponibilità di tutte le quattro unità ha permesso di svilupparne la versione finale e di definire completamente i meccanismi di comunicazioni con il resto degli impianti.

Il presente rapporto presenta:

1. Le tre nuove SNU realizzate in conformità al prototipo.
2. Le interfacce delle SNU definite nel periodo coperto dal PAR 2014.
3. Le principali prove ufficiali di accettazione effettuate nel periodo considerato.
4. Il sistema finale assemblato negli stabilimenti di OCEM Energy Technology che riproduce quanto più possibile la configurazione finale nel sito JAEA di Naka. Tale sistema è costituito dalle quattro SNU comandate dall'LCC.

La consegna in Giappone e la messa in servizio dell'intera fornitura sono programmate per il 2016.

Anche se i sistemi sono stati dimensionati per le caratteristiche dei convertitori AC/DC e degli avvolgimenti della macchina JT-60SA, le soluzioni studiate ed adottate possono trovare impiego in altre macchine da fusione e in tantissimi altri settori industriali dove è richiesto di interrompere velocemente alte correnti continue.

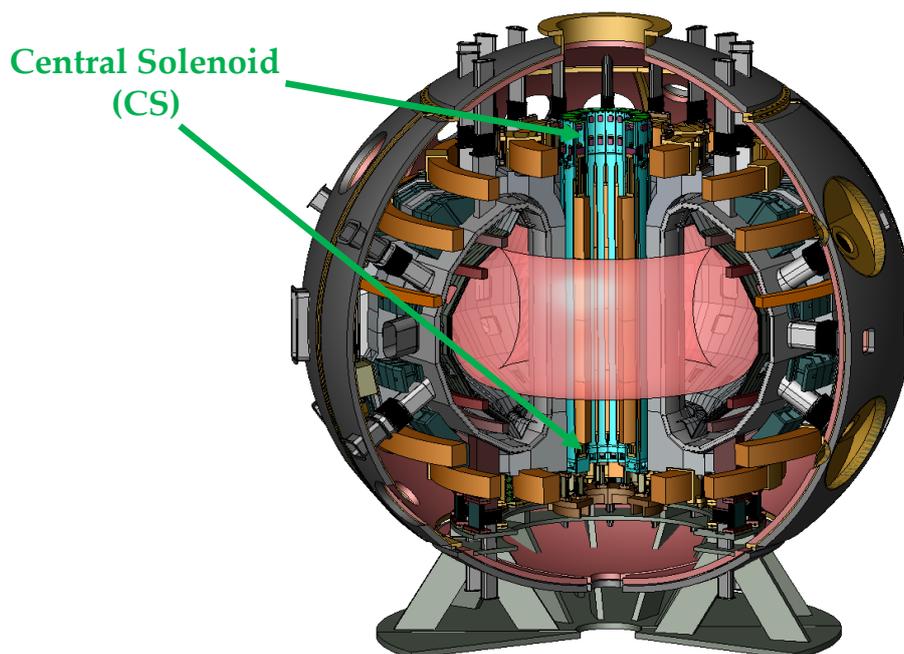


Figura 1. Struttura del tokamak JT-60SA con indicazione della posizione del CS.

2 Struttura ed interfacce finali delle SNU

Il solenoide centrale (CS), indicato in Figura 1, è un componente fondamentale del tokamak JT-60SA. Come evidenziato in Figura 2, il CS è diviso in quattro moduli, denominati CS1, CS2, CS3 e CS4, ognuno dei quali collegato ad un circuito di alimentazione e a una SNU indipendente. La Figura 2 evidenzia in particolare il modulo denominato CS4, ma, anche se il resto dei circuiti di alimentazione possono differire per alcuni parametri, nel progetto finale è stato deciso di costruire quattro SNU identiche ed intercambiabili per i quattro moduli del CS.

Le Figure 3 e 4 schematizzano la struttura finale delle SNU realizzate durante il progetto.

Lo scopo principale di una SNU consiste nell'inserire velocemente al momento opportuno un resistore di breakdown del banco R1. L'effettiva implementazione del banco di resistori R1 è illustrata in Figura 3. Tale struttura ha consentito di limitare le prove di riscaldamento ai soli elementi base: R13 e R14. Invece, le verifiche sui valori di resistenza e di induttanza sono state effettuate su tutti i resistori.

La commutazione principale della SNU è basata su una configurazione ibrida elettromeccanica-statica, ottenuta inserendo un sistema elettronico (SCB) in parallelo ad un contattore meccanico (by-pass switch, BPS).

L'SCB è costituito da otto rami nominalmente identici. Ogni ramo contiene uno stack con un integrated gate commutated thyristor (IGCT) e un diodo di disaccoppiamento in serie all'IGCT. Ogni ramo è supportato da 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 alle SNU. Gli stack degli SCB, come i tiristori del making switch (MS), sono raffreddati da acqua demineralizzata che verrà fornita dall'impianto JT-60SA.

Figura 5 e Figura 6 riportano il layout attualmente concordato con i partner di progetto. In particolare, Figura 5 fornisce il dettaglio della zona della Rectifier Room di JT-60SA dedicata alle quattro SNU del CS ed alla loro unità di controllo LCC. La figura indica la posizione di ogni singola SNU, ma gli accordi prevedono che le SNU siano intercambiabili tra di loro.

Nel periodo coperto da questo PAR sono state definite le caratteristiche e le responsabilità delle interfacce del sistema SNU con il resto dell'impianto JT-60SA. Figura 7 riassume le interfacce di una SNU con il sistema di raffreddamento ad acqua demineralizzata di JT-60SA. Figura 8 riassume le interfacce di una SNU e dell'LCC con il sistema di controllo e con le alimentazioni ausiliarie di JT-60SA.

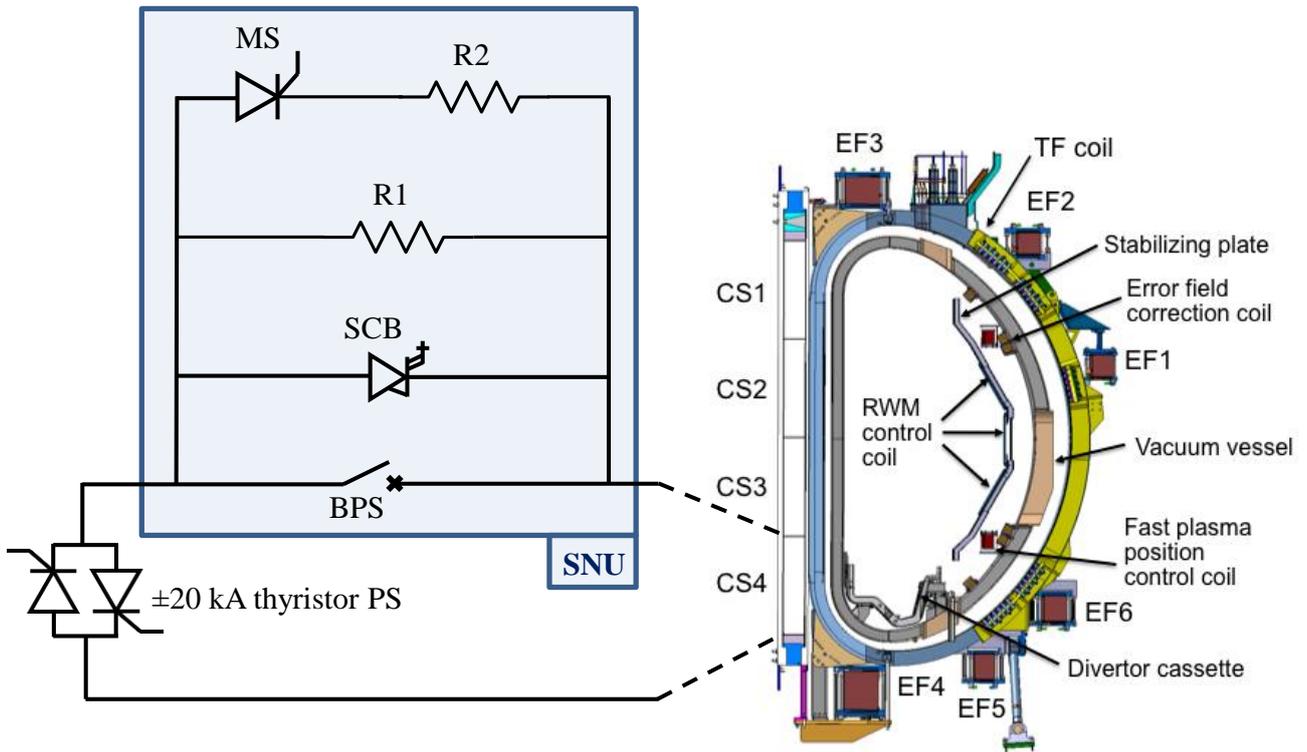


Figura 2. Schema finale semplificato del circuito di alimentazione di un modulo del CS di JT-60SA.

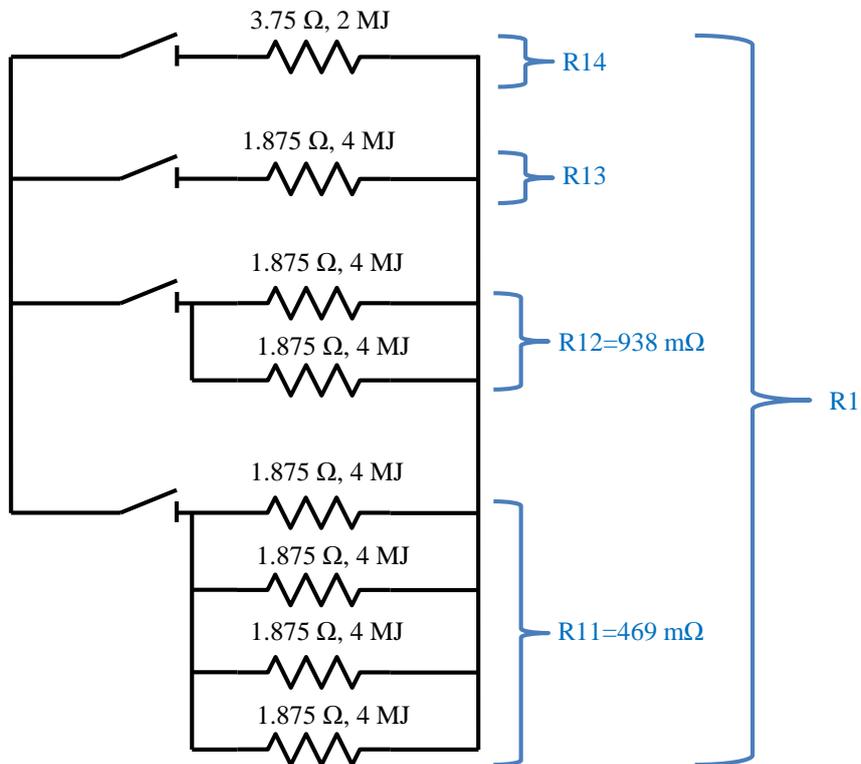


Figura 3. Struttura effettiva dei resistori di breakdown del banco R1.

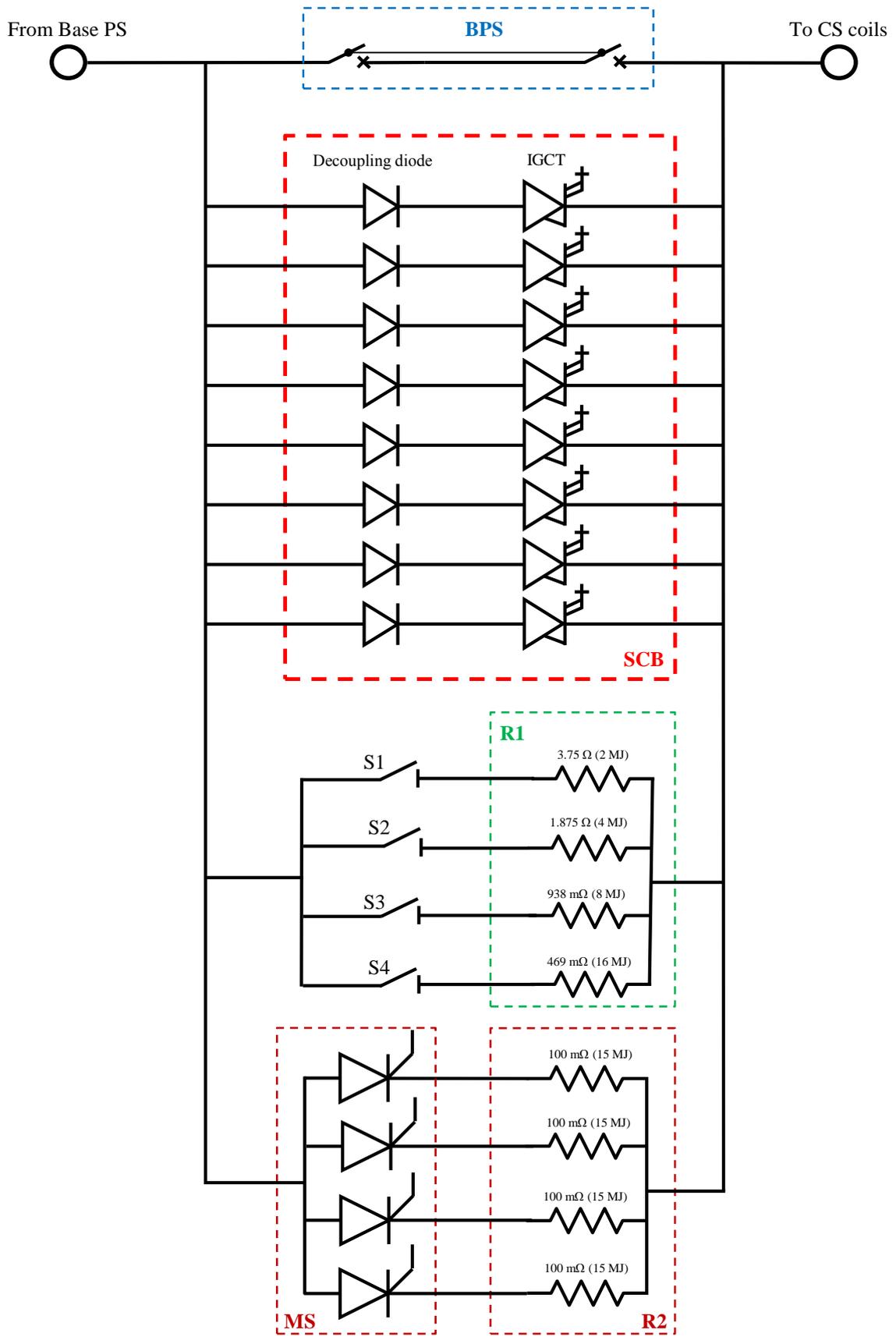


Figura 4. Circuito finale di una SNU del CS con enfasi sui principali componenti.

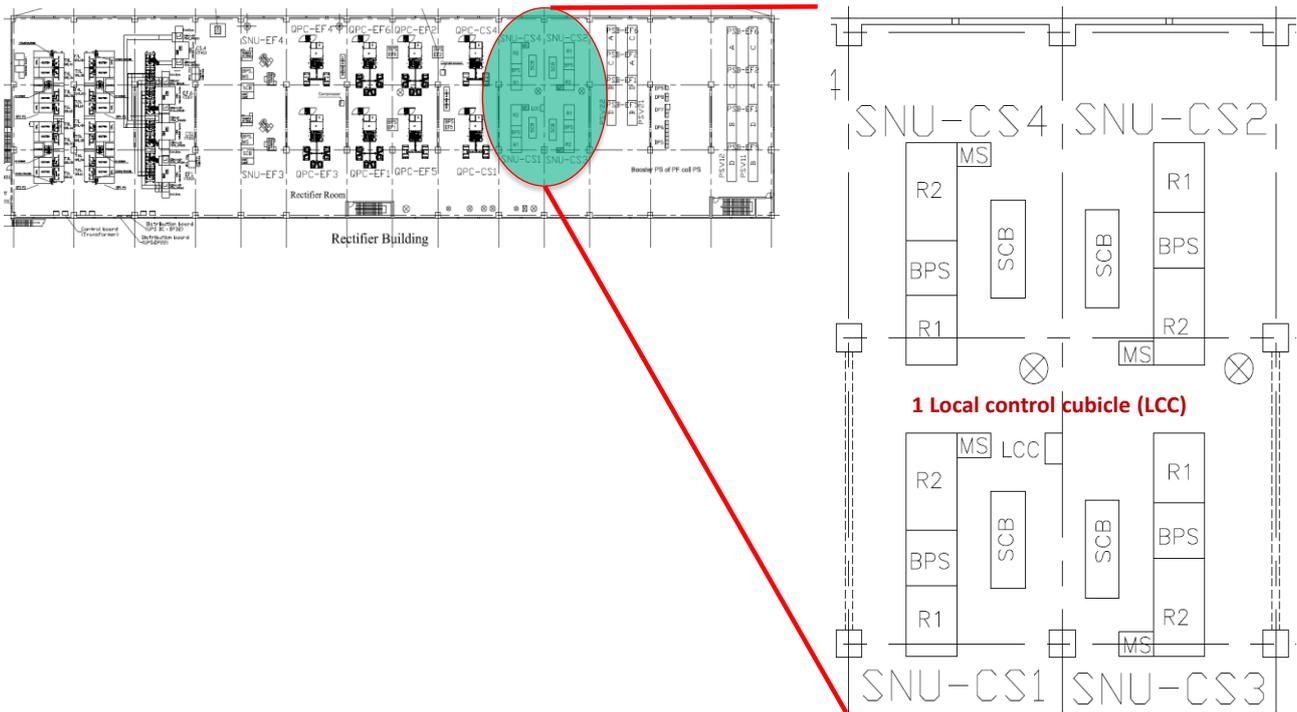


Figura 5. Layout della Rectifier Room di JT-60SA con il dettaglio della zona dedicata alle quattro SNU del CS.

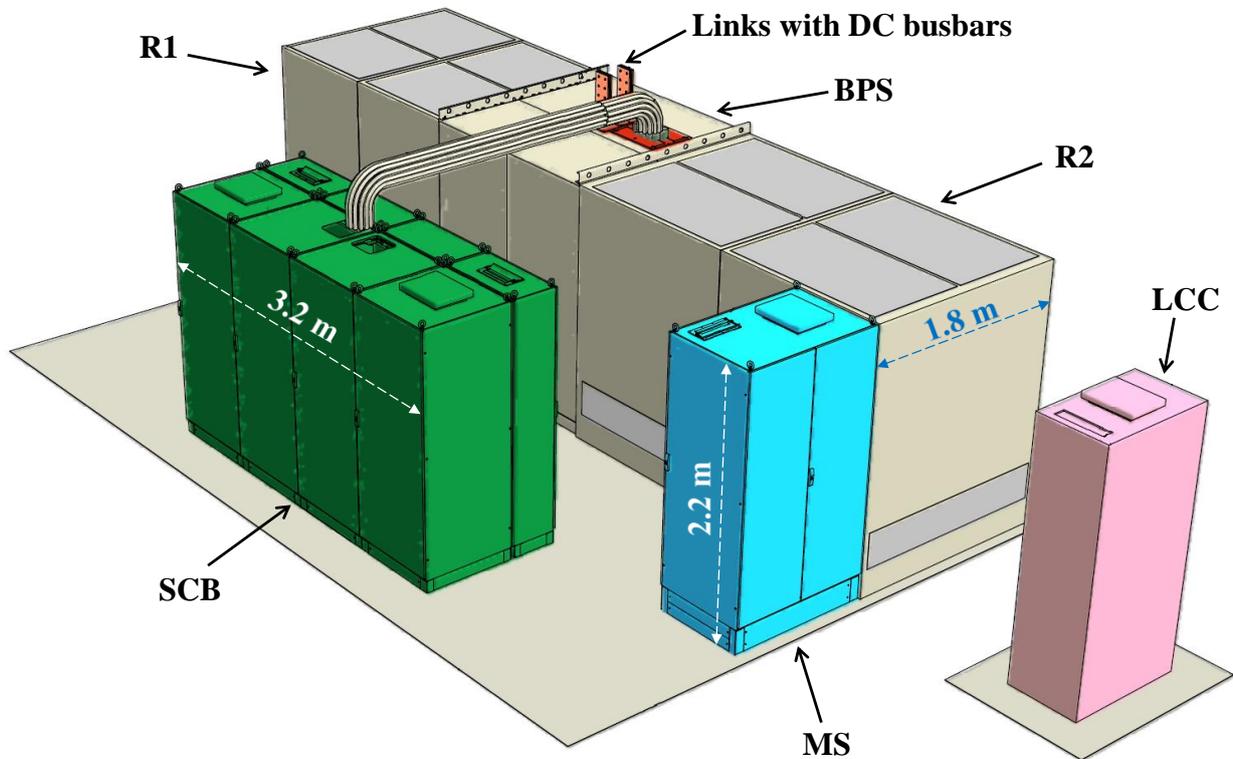


Figura 6. Layout 3D definitivo di una SNU e del controllore LCC.

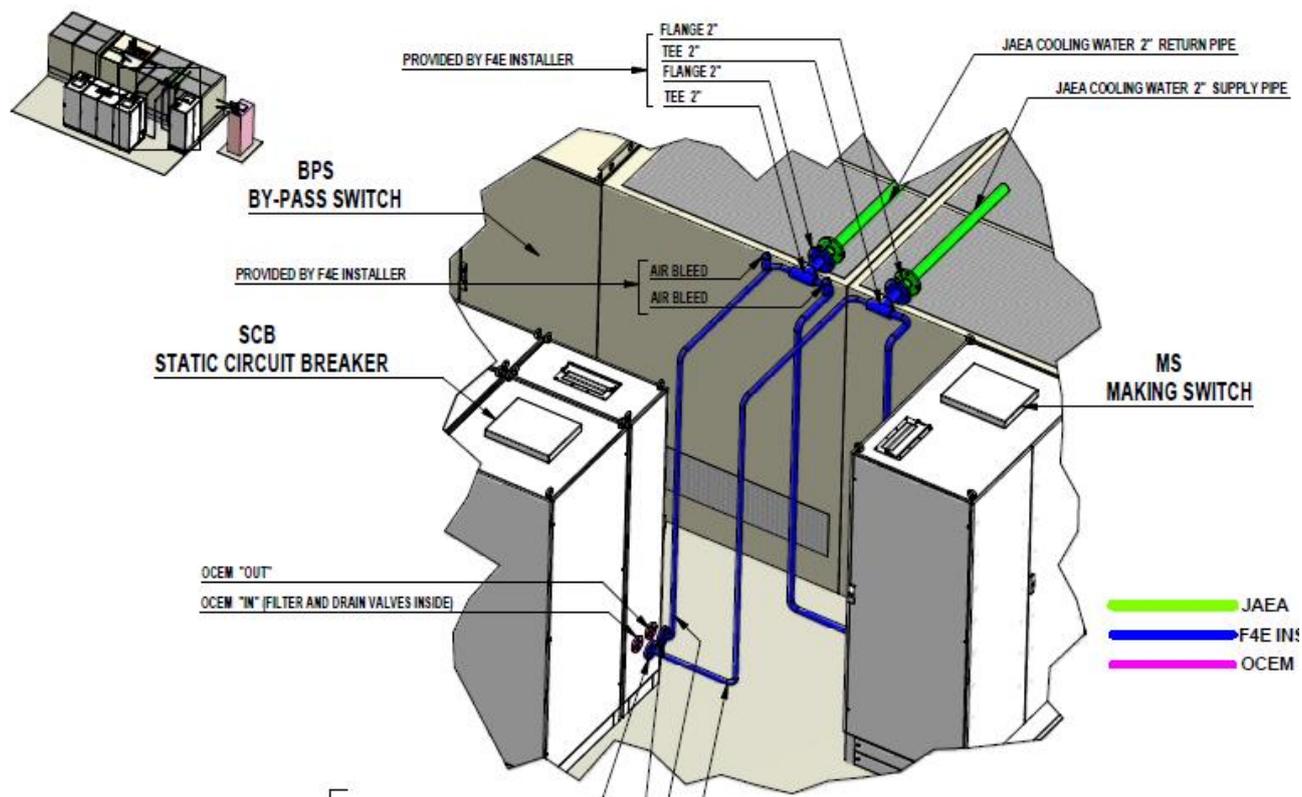


Figura 7. Interfacce di una SNU con il sistema di raffreddamento ad acqua demineralizzata di JT-60SA.

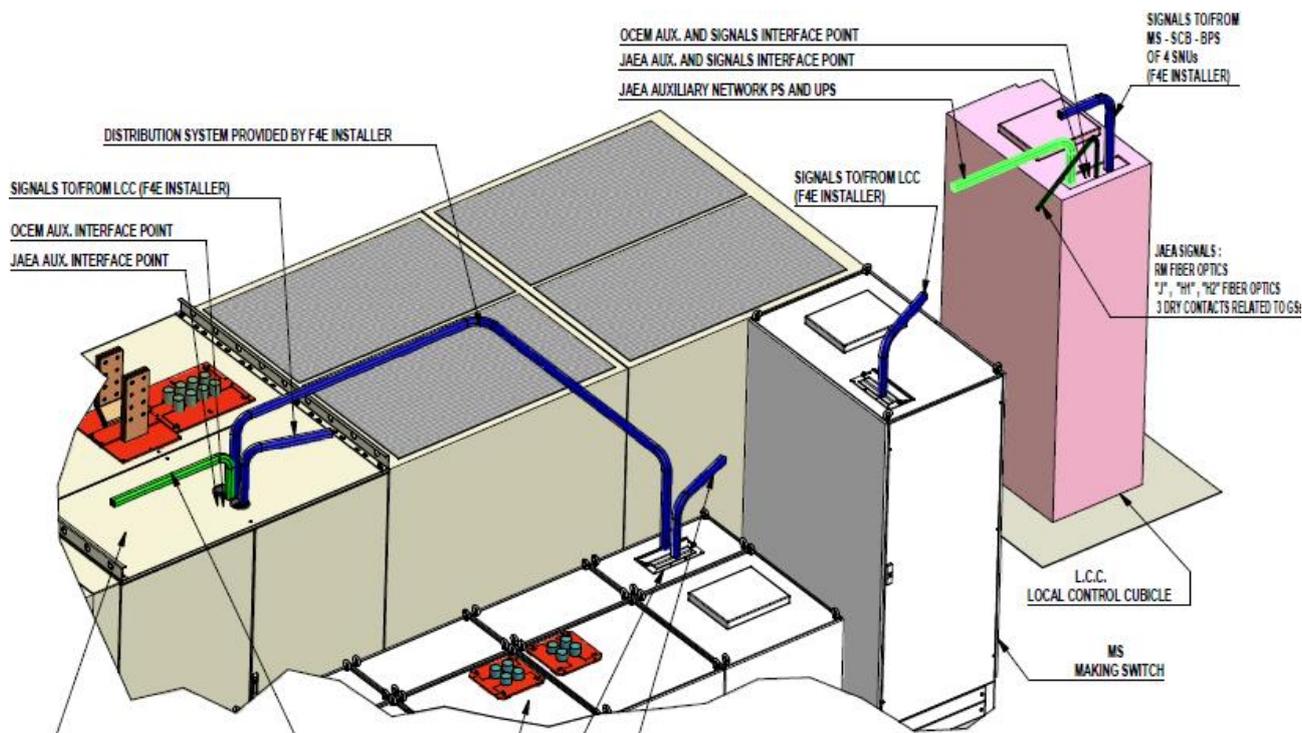


Figura 8. Interfacce di una SNU e dell’LCC con il sistema di controllo e con le alimentazioni ausiliarie di JT-60SA.

3 Prove di accettazione sulle resistenze di breakdown

La Tabella 1 riassume le caratteristiche richieste dall'esperimento JT-60SA ai resistori di breakdown, modificate secondo la configurazione progettuale effettiva e la scelta di costruire tutti i resistori per la massima energia.

Alcuni cubicle di resistenze realizzati durante questa fase del PAR sono mostrati in Figura 9 e in Figura 10.

Gli armadi delle resistenze R1 e R2 sono stati sottoposti a prove di isolamento. In particolare, le parti di potenza sono state provate a 20 kV rms 50 Hz per 60 s e le parti di misura e controllo sono state provate alle tensioni prescritte dalla norma IEC (CEI) 60146-1-1. Le resistenze di isolamento, misurate prima e dopo l'applicazione delle tensioni alternate di prova sono risultate tutte superiori al fondo scala dello strumento utilizzato (200 M Ω) e quindi superiori ai 100 M Ω di specifica.

Come concordato, i parametri dei vari elementi resistivi sono stati misurati sui terminali di uscita degli armadi, quindi tenendo conto dei collegamenti e degli elementi parassiti. I risultati di tali misure sono riassunti nella Tabella 2 e nelle Figure 11 e 12.

La resistenza di ciascun elemento si è rivelata all'interno della tolleranza prescritta del $\pm 2\%$ con un buon margine. I valori di induttanza sono in linea con le simulazioni effettuate per ottenere tempi di apertura inferiori a 1 ms con tensioni transitorie al di sotto dei 5.5 kV.

Tabella 1. Caratteristiche richieste ai resistori di breakdown.

Item		Nominal Resistance	Tolerance at 20° C	Rated Current	Dump Energy	Max voltage	Test voltage		
R1	R14 (upper)	3.75 Ω	$\pm 2\%$	1.333 kA	2 MJ	5 kV	20 kV rms		
	R13	1.875 Ω		2.667 kA	4 MJ				
	R12	0.9375 Ω		5.333 kA	8 MJ				
	R11 (lower)	0.4688 Ω		10.667 kA	16 MJ				
R2	R21-1 (upper)	100 m Ω		5 kA	15 MJ			5 kV	20 kV rms
	R21-2								
	R22-1								
	R22-2 (lower)								

Tabella 2. Valori di resistenza e induttanza misurati su tutti i resistori di breakdown delle quattro SNU. I valori di resistenza sono riportati a 20° C.

Item	Acceptance limits (unit)		Measured							
			SNU-A		SNU-B		SNU-C		SNU-D	
	R	L	R	L	R	L	R	L	R	L
R14	3.675 \div 3.825 Ω	≤ 10 μ H	3.694	8.30	3.736	8.50	3.697	8.34	3.715	8.30
R13	1.837 \div 1.913 Ω	≤ 10 μ H	1.867	8.50	1.871	8.50	1.876	8.55	1.867	8.40
R12	918.75 \div 956.25 m Ω	≤ 5 μ H	936.4	4.00	935.7	4.22	939.5	4.02	937.6	3.94
R11	459.42 \div 478.18 m Ω	≤ 2.5 μ H	467.9	1.53	468.3	1.6	467.8	1.27	467.8	1.32
R21-1	98 \div 102 m Ω	10 \div 16 μ H	98.792	13.19	100.407	10.89	99.485	11.75	100.277	11.39
R21-2			98.581	13.04	100.407	10.98	99.782	11.88	100.277	10.98
R22-1			98.842	12.92	100.208	11.32	99.387	12.07	99.881	11.86
R22-2			98.460	12.69	101.002	11.61	99.683	12.05	100.277	11.70



Figura 9. Cubicle dei resistori di breakdown pronti per i test di isolamento.



Figura 10. Cubicle di R2 durante il test di isolamento.

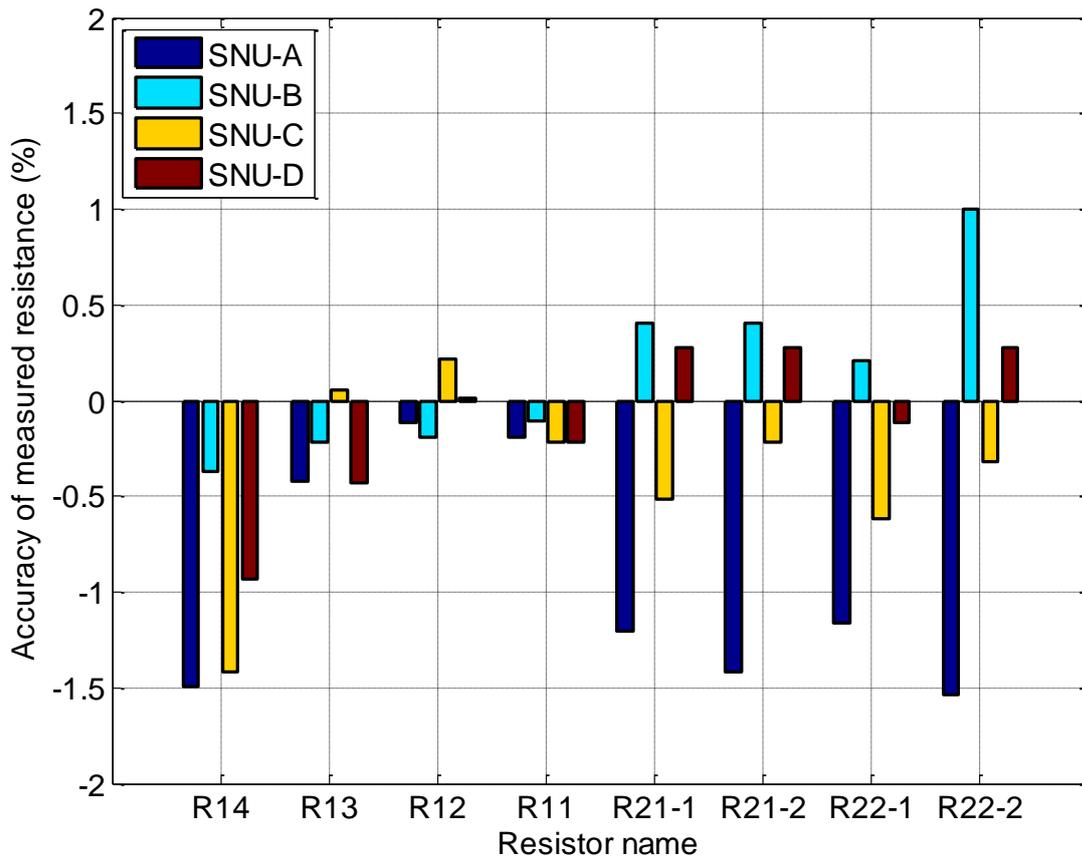


Figura 11. Riepilogo accuratezza resistori (richiesta $\pm 2\%$).

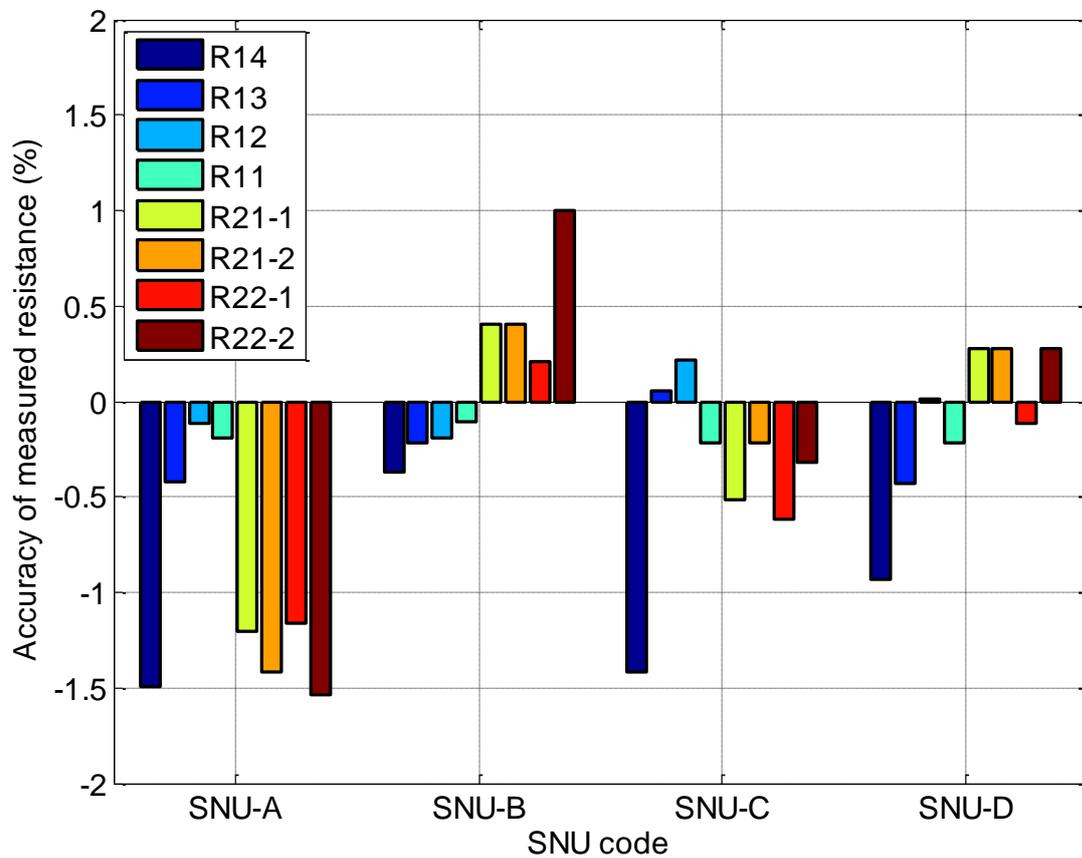


Figura 12. Riepilogo accuratezza resistori divisi per SNU (richiesta $\pm 2\%$).

4 Prove di accettazione sull'interruttore elettromeccanico BPS

4.1 Prove di tenuta in tensione

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: 20 kV rms per 60 s. Per questo motivo, è stato necessario reingegnerizzare il componente ed effettuare alcuni test intermedi sulle parti critiche.

Inoltre, sono state richieste prove di routine (su tutti gli elementi) per la tensione a contatti aperti: a 12 kV per il BPS (ma, vista la distanza, la tenuta è sicuramente maggiore), 20 kV per il GS e per i selettori Cn dei resistori R1.

I circuiti di misura e controllo sono stati provati alle tensioni prescritte dalla norma IEC (CEI) 60146-1-1 (come riportato in Tabella 3).

La Figura 13 mostra i tre cubicle dei BPS delle tre SNU di serie durante i test di isolamento. La Figura 14 mostra la strumentazione utilizzata e la modalità di collegamento.

La Tabella 3 riassume i valori di prova e le massime correnti (capacitive) registrate durante la prova. Tali correnti erano comunque inferiori alla soglia di allarme prefissata prima della prova (massimo 25 mA nel caso della prova a 20 kV sul cubicle con BPS chiuso e GS aperto). Le resistenze di isolamento, misurate prima e dopo l'applicazione delle tensioni alternate di prova sono risultate tutte superiori al fondo scala dello strumento utilizzato (200 MΩ) e quindi superiori ai 100 MΩ di specifica.

4.2 Stima dello sbilanciamento tra i rami del BPS

Il BPS è costituito da quattro rami in parallelo. Su questi è stata misurata la resistenza nella configurazione finale all'interno del cubicle.

La misura è stata effettuata con un micro-ohmetro, interponendo tra gli altri tre contatti in parallelo un doppio foglio di Mylar ed evitando contatti impropri tra le trecce dei contatti mobili (Figura 15).

Lo sbilanciamento in termini di resistenza misurata R_i è dato dalla formula

$$U_i = 100 \left| \frac{R_i - R_{average}}{R_{average}} \right|$$

in cui

$$R_{average} = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 R_i.$$

Nelle specifiche tecniche delle SNU lo sbilanciamento è riferito alla corrente secondo la formula:

$$\Delta I_i = 100 \left| \frac{I_i - I_{average}}{I_{average}} \right|$$

in cui I_i rappresenta la corrente nel ramo considerate e

$$I_{average} = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 I_i = \frac{I_{total}}{4}.$$

I risultati sperimentali sono riepilogati in Tabella 4. La resistenza media sperimentale è stata pari a 46.65 μΩ. La corrente di ramo equivalente è ottenuta riferendola alla corrente nominale di 20 kA.

Tabella 3. Riassunto delle prove di tenuta in tensione effettuate sul cubicle del BPS.

Item	AC voltage applied for 60 s	Maximum measured current	Resistance measured after applied voltage
Closed BPS with open GS	20 kV rms	16.3 mA	>200 M Ω
Open BPS	12 kV rms	2.9 mA	Not applicable
Open contactors Cn	20 kV rms	0.7 mA	>200 M Ω
400 V auxiliaries	2 kV rms	<1.5 mA	>200 M Ω
230 V auxiliaries	1 kV rms	<1.5 mA	>200 M Ω
24 V auxiliaries	500 V rms	<1 mA	>200 M Ω

Tabella 4. Sbilanciamento tra i rami del BPS stimato secondo la resistenza e secondo la corrente.

Branch #	Measured R_i	Unbalance U_i	Equivalent I_i	Unbalance Δ_i	Acceptance limit
1	43.4 $\mu\Omega$	6.97%	5.36 kA	7.17%	<20 %
2	46.4 $\mu\Omega$	0.54%	5.01 kA	0.24%	<20 %
3	46.2 $\mu\Omega$	0.96%	5.03 kA	0.67%	<20 %
4	50.6 $\mu\Omega$	8.47%	4.60 kA	8.08%	<20 %

Tabella 5. Riepilogo tempi di apertura e chiusura dei BPS. Le colonne file riportano i nomi dei file contenenti le schermate dell'oscilloscopio utilizzate per la stima del valore corrispondente.

BPS SNU-B				BPS SNU-C				BPS SNU-D			
Opening		Closing		Opening		Closing		Opening		Closing	
File #	Time (ms)	File #	Time (ms)	File #	Time (ms)	File #	Time (ms)	File #	Time (ms)	File #	Time (ms)
0030	14.2	0020	50.8	0001	11.7	0011	60.0	0041	13.5	0051	77.0
0032	14.2	0021	51.6	0002	11.5	0012	56.8	0042	13.6	0052	78.4
0033	14.1	0022	53.6	0003	11.9	0013	56.8	0043	13.5	0053	79.6
0034	14.3	0023	53.6	0004	11.6	0014	60.4	0044	13.9	0054	73.2
0035	14.2	0024	55.2	0005	11.9	0015	62.4	0045	13.6	0055	81.6
0036	14.1	0025	56.0	0006	11.6	0016	64.4	0046	13.7	0056	76.0
0037	14.1	0026	56.8	0007	11.7	0017	60.0	0047	13.7	0057	82.0
0038	13.8	0027	58.6	0008	11.7	0018	62.8	0048	13.6	0058	78.0
0039	14.3	0028	58.8	0009	12.0	0019	62.0	0049	13.7	0059	76.0
0040	14.2	0029	58,4	0010	11.5	0020	62.0	0050	13,6	0060	82,4
Average values t_{av}											
14.15		55.34		11.73		60.76		13.64		78.42	
Limits											
10 \pm 5		$t_{av} \leq 90$ $ t - t_{av} \leq 10$		10 \pm 5		$t_{av} \leq 90$ $ t - t_{av} \leq 10$		10 \pm 5		$t_{av} \leq 90$ $ t - t_{av} \leq 10$	



Figura 13. Cubicle dei BPS delle tre SNU di serie durante le prove di tenuta in tensione.



Figura 14. Collegamento del trasformatore a 20 kV durante le prove di isolamento.

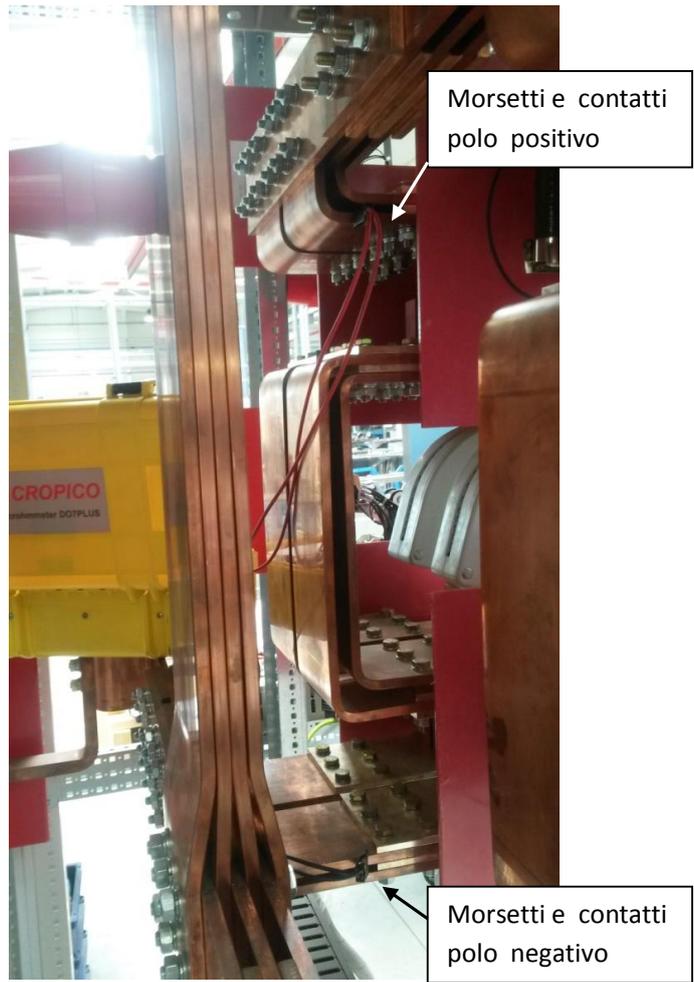
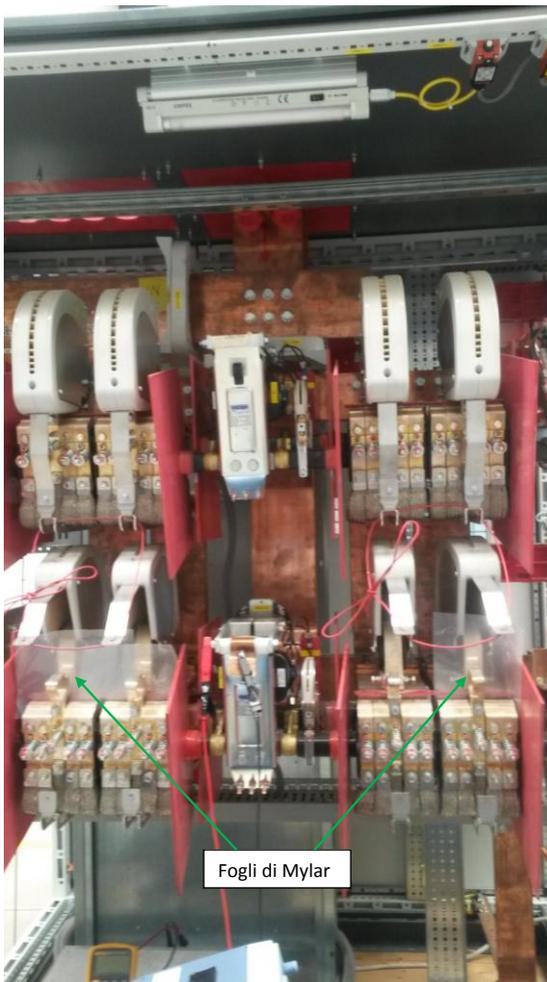
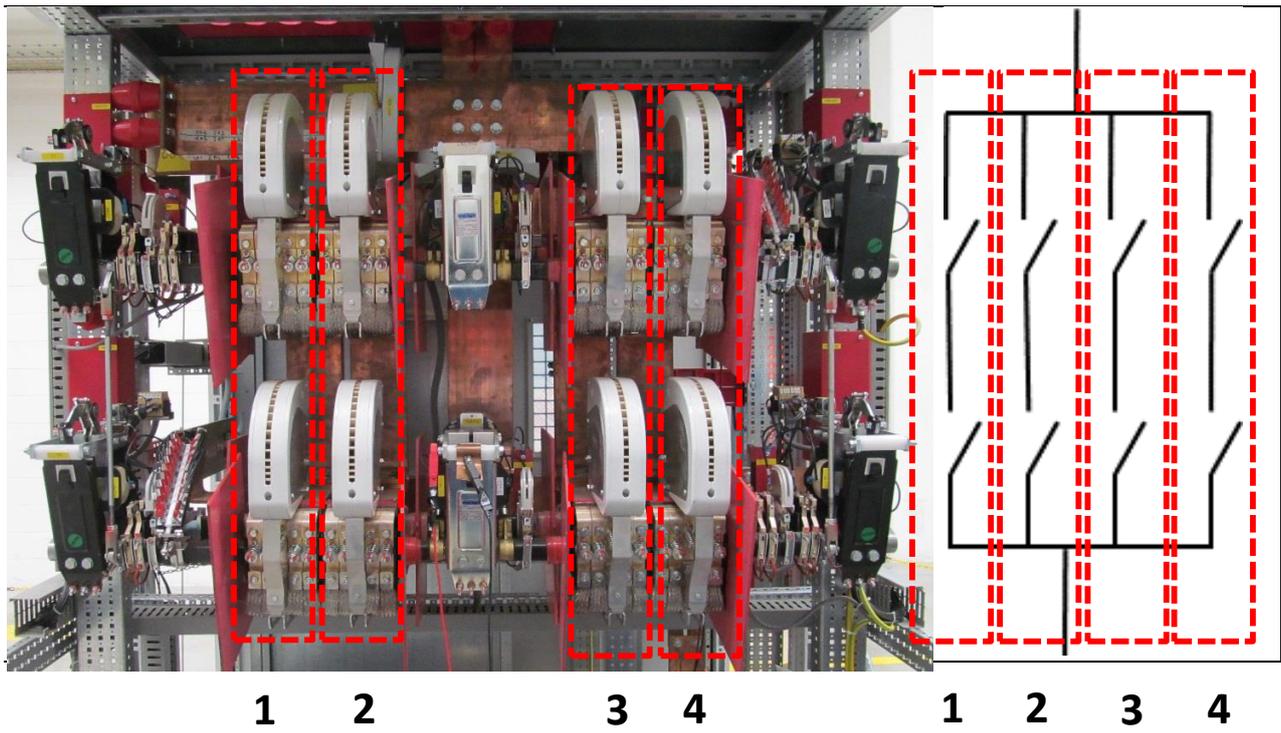


Figura 15. Set-up per la misura della resistenza del singolo ramo di contatti del BPS (in particolare del ramo 3).

4.3 Verifica dei tempi di apertura e chiusura

Dopo l'esito positivo delle prove di tenuta in tensione, sono stati verificati i tempi di apertura e chiusura meccaniche di ogni BPS tramite almeno 10 operazioni di apertura e 10 di chiusura.

Le Figure 16 e 17 mostrano due esempi delle schermate dell'oscilloscopio registrate durante queste prove. Figura 16 riporta il tempo di apertura (in questo caso 11.9 ms), Figura 17 quello di chiusura (in questo caso 60 ms) del BPS della SNU-C.

I risultati di questi test e le specifiche che erano richieste sono riepilogati in Tabella 5.

È interessante sottolineare che nel caso del BPS della SNU-A (prototipo) sono state effettuate 1000 misurazioni consecutive di apertura e chiusura.

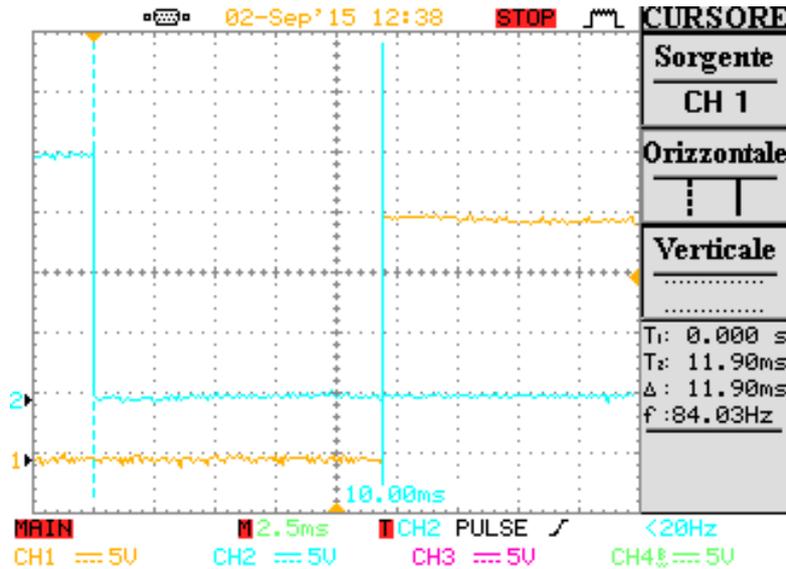


Figura 16. Esempio di misura del tempo di apertura del BPS-C tramite oscilloscopio (il valore stimato è 11.9 ms). La misura è stata ripetuta almeno 10 volte per ogni BPS.

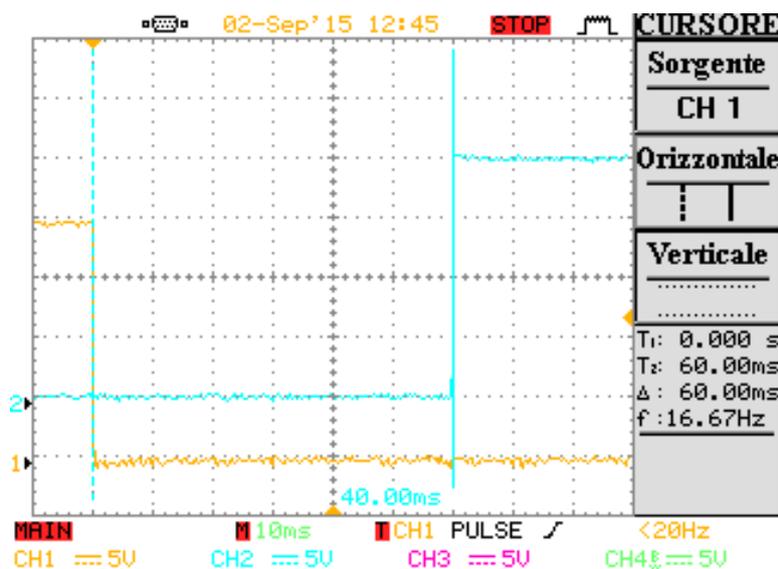


Figura 17. Esempio di misura del tempo di chiusura del BPS-C tramite oscilloscopio (il valore stimato è 11.9 ms). La misura è stata ripetuta almeno 10 volte per ogni BPS.

5 Sistema di raffreddamento ad acqua demineralizzata

I componenti più stressati dal punto di vista termico saranno raffreddati mediante l'acqua demineralizzata (per alluminio) fornita dall'impianto JT-60SA. Le caratteristiche di tale acqua saranno: temperatura di ingresso 20-35 °C, pressione 450±100 kPa, resistività elettrica superiore a 1 MΩ·cm. I sistemi di connessione e distribuzione dell'acqua demineralizzata sono schematizzati in Figura 7.

Come richiesto dalle specifiche, i sistemi di raffreddamento ad acqua demineralizzata dell'SCB e del MS di tutte le SNU sono stati provati mantenendo al loro interno senza alcuna perdita acqua con una pressione di 850 kPa per almeno sei ore.

6 Assemblaggio del sistema completo

Le Figure 18 e 19 mostrano il sistema finale (costituito dalle quattro SNU comandate dall'LCC) assemblato e collegato negli stabilimenti di OCEM Energy Technology allo scopo di riprodurre il più possibile la configurazione finale che il sistema avrà nella Rectifier Room del sito JT-60SA di Naka.

In Figura 19 sono visibili (più o meno al centro) anche il generatore di prova da oltre 1300 A e il carico induttivo (dummy load) utilizzati per le prove di routine per la verifica della temporizzazione delle operazioni delle SNU.



Figura 18. Vista dei cubicle del sistema assemblato nella configurazione finale (quattro SNU comandate dall'LCC) all'interno dello stabilimento OCEM.



Figura 19. Sistema assemblato nella configurazione finale (con spazi più ristretti). Sono visibili le quattro SNU con l'LCC al centro (come in JT-60SA) e il generatore e il carico utilizzati per le prove di routine sulle SNU.

Tabella 6. Riepilogo delle principali prove ufficiali effettuate sulle SNU o su parti di esse con indicazione del laboratorio o della modalità di prova.

Specifiche tecniche ENEA		Componente testato	Laboratorio di prova
Section	Descrizione test		
5.2.1.1	I ² t capability of the BPS	Prototipo BPS	MES (Nidec)
5.2.1.1	Current unbalance of the BPS	Prototipo BPS	MES
5.2.1.2	Electro-dynamic resistance of BPS	Prototipo BPS	Siemens SVEPPI Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.
5.2.1.3	Open/close operation mechanism (1000 repetitions)	Prototipo BPS	MES
5.2.1.4	Test to verify the pressure withstand and the tightness for gas-filled compartments	Prototipo BPS	Non necessario
5.2.2.1	Operational tests at reduced current and reduced voltage (1 semiconductor branch only)	Prototipo SNU completo	ENEA
5.2.2.2	Operational tests at reduced current and nominal voltage (R14 rating)	Prototipo SNU completo	ENEA
5.2.2.3	Operational tests at nominal current and nominal voltage	Prototipo SNU completo	ENEA
Extra (4.9.2)	SCB unbalance	Prototipo SCB	ENEA
5.2.2.4	Temperature rise test	Resistori breakdown prototipo	MES su R13, R14, R21-2
5.2.2.5	Functional tests to check the protection system	Prototipo SNU completo	ENEA
5.3.1.1 5.3.4.1	Voltage to ground withstand tests (20 kV)	Tutti i quattro cubicle contenuti i quattro BPS e i quattro GS	MES
Extra	Open contacts withstand test (12 kV)	Tutti i quattro BPS	MES
5.3.1.2 5.3.4.2	Voltage to ground withstand tests (≤ 2 kV)	Auxiliary and control circuits (tutti i quattro cubicle contenenti i	MES

		BPS e i GS)	
5.3.1.3	Mechanical operating tests (10 repetitions)	Tutti i quattro BPS	MES
5.3.1.4 5.3.4.4 5.3.2.1	Design (electrical) and visual check	Tutti i cubicle	MES OCEM
5.3.2.2	Voltage to ground withstand tests (20 kV)	Tutti i quattro SCB e tutti i quattro MS	OCEM
5.3.2.3 5.3.5.1	Voltage to ground withstand tests (<2 kV)	Auxiliary and control circuits di tutti i quattro cubicle SCB, di tutti i quattro cubicle MS e del cubicle LCC	OCEM
5.3.2.4	Tests on the SCB and MS operational timing	Tutti gli SCB e i MS	ENEA OCEM
5.3.3.1	Measurement of the nominal resistance	Tutti i resistori di breakdown R1 e R2 delle quattro SNU	MES
Extra	Measurement of inductance	Tutti i resistori di breakdown R1 e R2 delle quattro SNU	MES
5.3.3.2	Voltage to ground withstand tests (20 kV)	Tutti gli 8 cubicle dei resistori di breakdown delle quattro SNU	MES
Implicit	Voltage to ground withstand tests (≤ 2 kV)	Auxiliary di tutti gli 8 cubicle dei resistori di breakdown delle quattro SNU	MES
5.3.4.3	Mechanical operating tests (10 repetitions)	Tutti i quattro GS	Siemens SVEPPI MES
Extra	Open contacts withstand test (20 kV)	Tutti i quattro GS	MES
Extra	Open contacts withstand test (20 kV)	Selectors Cn	MES
5.3.5.2	Functional tests	LCC (con il prototipo e con tutte le quattro SNU)	ENEA OCEM
5.3.6 5.3.7 5.3.9	Tests on transducers, electrical and optical fiber cables, EMC	Tutti i cubicle	OCEM Certificazione
5.3.8	Tests on water cooling and compressed air systems	Water cooling di tutti i cubicle di BPS e MS	OCEM

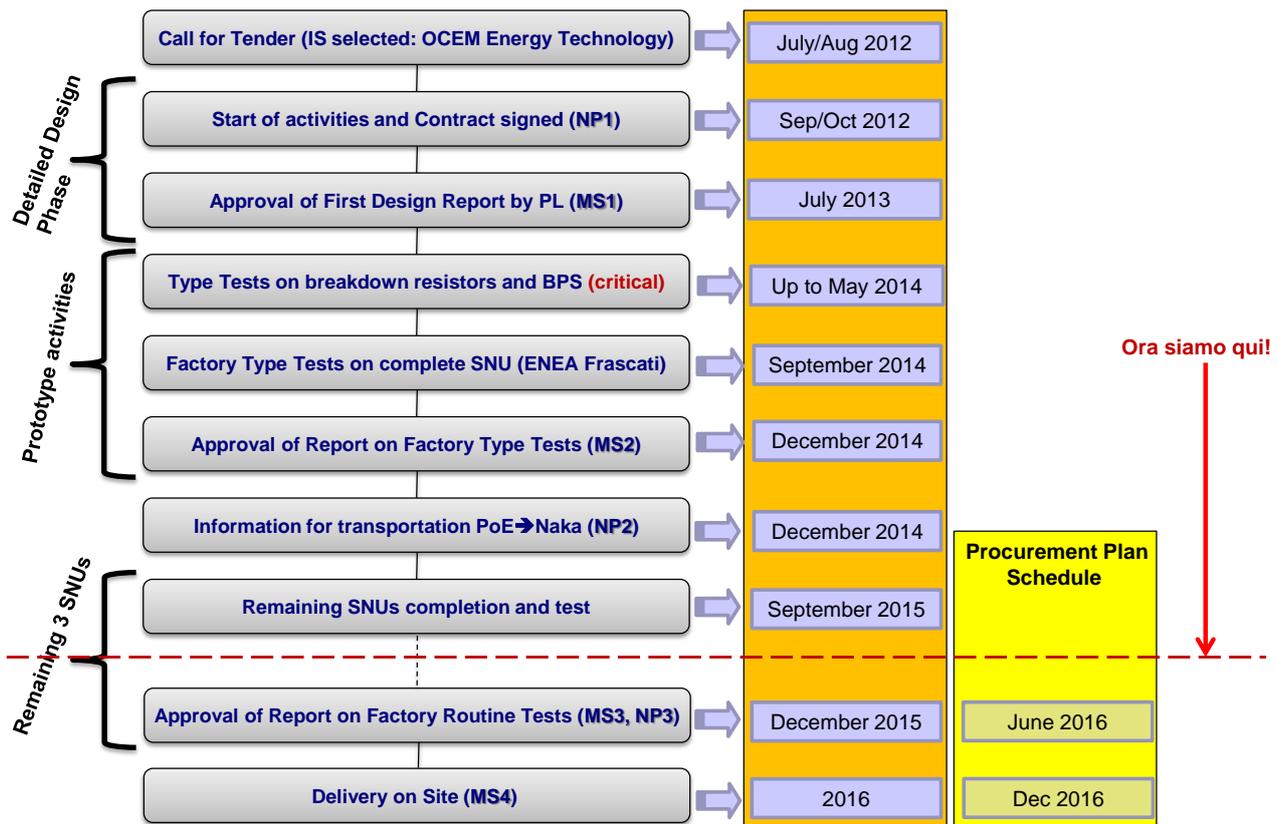


Figura 20. Riepilogo delle principali fasi della fornitura delle quattro SNU del CS di JT-60SA.

7 Conclusioni

Il presente rapporto ha descritto le attività svolte nell’ambito della Ricerca di Sistema Elettrico per il PAR 2014 e finalizzate alla fornitura delle SNU dell’esperienza internazionale JT-60SA. Dopo le prove sul prototipo di SNU effettuate con successo nell’anno precedente, per l’anno appena concluso il PAR prevedeva la realizzazione delle ulteriori tre SNU “di serie” e lo svolgimento delle relative prove di accettazione.

Questi tre sistemi sono stati realizzati conformemente al prototipo che ha superato una serie di prove onerose nei mesi precedenti. Secondo gli accordi internazionali e il contratto con il fornitore industriale, poiché il prototipo è stato esaurientemente caratterizzato, le prove sulle tre ulteriori unità sono state più contenute.

Lo stato attuale della fornitura è presentato in Figura 20. La fornitura è stata gestita dall’ENEA che ha operato in stretta collaborazione con i partner internazionali F4E e JAEA.

Le principali prove ufficiali effettuate durante il periodo coperto dal PAR 2014 sono riassunte in Tabella 6. Le prove hanno dimostrato che anche gli ultimi sistemi sviluppati possono soddisfare le esigenze dell’esperienza internazionale JT-60SA per lo studio della fusione nucleare.

L’avvenuto completamento di tutti gli elementi della fornitura ha consentito di assemblare tutto il sistema presso gli stabilimenti OCEM per verificarne il comportamento globale. Tale verifica consente di avviare le procedure per l’imballaggio e il trasporto dei cubicle verso il Giappone per l’installazione e la messa in servizio integrata con gli altri componenti dell’impianto.

La consegna in Giappone e la messa in servizio dell’intera fornitura sono programmate per il 2016.

8 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, Elsevier *Fusion Engineering and Design*, 2015.
3. L. Novello, et al., Present Status of the new Power Supply Systems of JT-60SA procured by EU, Elsevier *Fusion Engineering and Design*, 2015.
4. G. Maffia, A. Lampasi, P. Zito, A New Generation of Pulsed Power Supplies for Experimental Physics Based on Supercapacitors, 15 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC 2015), Rome, Jun 2015.
5. L. Novello, O. Baulaigue, A. Coletti, N. Dumas, A. Ferro, E. Gaio, A. Lampasi, A. Maistrello, M. Matsukawa, K. Shimada, K. Yamauchi, P. Zito, "Advancement on the Procurement of Power Supply Systems for JT-60SA", IEEE 25th Symposium On Fusion Engineering (SOFE), Austin, Texas, USA, May 31-June 4, 2015.
6. F. Burini, Y. Kuate-Fone, G. Taddia, S. M. Tenconi, A. Lampasi, P. Zito, M. Matsukawa, K. Shimada, A. Coletti, L. Novello, "Design and implementation of four 20 kA, 5 kV hybrid switching networks for plasma ignition in the international tokamak JT-60SA", 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society IECON 2014, pp. 5035-5040, Oct. 29 2014-Nov. 1 2014.
7. 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.
8. 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).
9. A. Lampasi, Management and Quality Specifications for the ENEA Industrial Supplier (MQS).
10. JT-60SA Plant Integration Document (PID), Version 3.6, Jul 2014.
11. 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".
12. 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.
13. K. Yamauchi et al., Electric circuit analysis for plasma breakdown in JT-60SA, *J. Plasma Fusion Res. SERIES*, Vol. 9 (2010), pp. 220-225.
14. M. Matsukawa et al., Optimization of Plasma Initiation Scenarios in JT-60SA, *J. Plasma Fusion Res. SERIES*, Vol. 9 (2010), pp. 264-269.
15. 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.
16. 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.
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, G. Maffia, F. Starace, P. Zito, "Prove sul prototipo finale di Switching Network Unit per l'esperimento internazionale JT-60SA", Report Ricerca di Sistema Elettrico RdS/PAR2013/203, Sep. 2014.
20. 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.
21. 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.
22. 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.

9 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	DEMONstration 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	–