

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

FACOLTÀ DI INGEGNERIA



DIE | Dipartimento di Ingegneria Elettrica

CORSO DI LAUREA IN
INGEGNERIA Elettrotecnica

Interruzione delle correnti di sbarra con sezionatori di manovra

Bus – transfer type test

RELATORE: *Prof. Renato Gobbo*

TUTORE AZIENDALE: *Ing. Marco Nosilati*

LAUREANDO: *Daniele Toffolo*

ANNO ACCADEMICO 2010-2011

***Alla mia famiglia,
mamma Marica, papà Armando e Francesca***

A tutti gli amici che mi sono stati vicini

Sommario

Le sottostazioni di alta tensione presentano delle tipiche configurazioni circuitali per poter gestire in modo efficace le diverse linee in entrata ed uscita. Esse sono sostanzialmente riconducibili a sistemi multi-sbarra, dove i carichi devono poter essere trasferiti da una sbarra all'altra con un'operazione di commutazione garantendo la continuità del servizio. A questo fine sono utilizzati dei sezionatori in grado di gestire archi nella commutazione di correnti, in apertura tanto quanto in chiusura, dovuti principalmente alle forze elettromotrici indotte dalle variazioni dei flussi concatenati dal circuito interessato. Una soluzione semplice ed economica per garantire questo è quella di dotare tali dispositivi (su richiesta del cliente) di contatti ausiliari-sacrificali atti ad assorbire il fenomeno erosivo dell'arco elettrico, assicurando pertanto l'integrità dei contatti principali. È semplice capire quindi che le caratteristiche dei materiali di contatto e il dimensionamento del contatto stesso giocano un ruolo importante nella resistenza al fenomeno erosivo in questione. È pertanto indispensabile una loro considerazione per giungere ad una giusta soluzione funzionale-economica ed assicurare il funzionamento del dispositivo secondo relativa norma.

Tuttavia, recenti ricerche in questo ambito portano alla scoperta di nuovi materiali utilizzabili per la realizzazione dei contatti principali, caratterizzati da una notevole resistenza all'erosione d'arco e da un mantenimento pressoché invariato delle loro proprietà. Questi promettono, infatti, buone aspettative per realizzare sezionatori di manovra che non necessitano dei contatti ausiliari. Nasce quindi una strada alternativa verso la soluzione a tale problema.

Nel seguente elaborato si esaminerà la problematica della commutazione di sbarra e saranno successivamente esposte due prove di tipo bus-transfer, analizzando come l'utilizzo di differenti materiali e diversi dimensionamenti dei contatti possano incidere nel superamento della prova. Verrà inoltre dato anche uno sguardo di tipo impiantistico al circuito realizzato per sostenere tale prova. Infine saranno riportate le conclusioni dei più recenti esperimenti di ricerca riguardanti i nuovi tipi di materiali di contatto sopra accennati.

INDICE

1	Introduzione.....	1
2	Azienda ospitante.....	3
3	Il sezionatore.....	7
3.1	Definizione	7
3.2	Tipologie di sezionatori	7
3.2.1	Classificazioni	7
3.2.2	Sezionatore di terra.....	8
3.2.3	Grandezze nominali.....	8
3.3	Sezionatori in aria unipolari per reti AT-AAT	9
3.3.1	Sezionatore ad interruzione verticale	9
3.3.2	Sezionatore ad interruzione centrale	10
3.3.3	Sezionatore a doppia interruzione	11
3.3.4	Sezionatore a pantografo o a semi pantografo	11
3.4	Tipologie di correnti che interessano il sezionatore.....	12
4	Tipologie di configurazione di sbarra nelle sottostazione	13
4.1	Sistema a sbarra singola.....	13
4.2	Sistema a sbarra principale più sbarra di trasferimento	13
4.3	Sistema a doppia sbarra con un unico interruttore.....	14
4.4	Sistema a doppia sbarra con doppio interruttore	15
4.5	Sistema di sbarre ad anello	16
4.6	Configurazione ad un interruttore e mezzo	16
4.7	Confronto delle diverse configurazioni	17
5	Uno sguardo progettuale/impiantistico ai dimensionamenti tipici delle sottostazioni	21
6	Teoria dell'interruzione delle correnti di sbarra.....	25
7	Storia del bus-tranfert.....	27
7.1	Le prime valutazioni	27
7.2	Il primo studio sperimentale	27
7.3	Archi elettrici in aria	30
7.4	Conclusioni	36
8	Fisica dei contatti	39
8.1	Resistenze nel connettore.....	39

8.1.1	Resistenza di massa.....	39
8.1.2	Resistenza di contatto	39
8.1.3	Resistenza totale del contatto.....	42
8.2	Temperatura del connettore.....	43
8.3	Forza di inserzione.....	43
9	Normativa	46
9.1	Caratteristiche nominali di prova	47
9.2	Configurazione del circuito di prova.....	47
9.3	Svolgimento della prova.....	49
9.4	Condizione del sezionatore dopo la prova	49
9.5	Rapporto di prova	49
10	Prova S2DA.....	50
10.1	Il sezionatore	50
10.2	Caratteristiche principali	51
10.3	Obiettivi di prova.....	53
10.4	Pre-Prove per determinazione dei materiali di contatto.....	53
10.4.1	Prima prova: contatto fisso in grafite / contatto mobile in grafite.....	54
10.4.2	Seconda prova: contatto fisso in rame / contatto mobile in grafite.....	57
10.4.3	Terza prova: contatto fisso in rame-tungsteno (W/Cu 75/25) / contatto mobile in grafite ...	60
10.4.4	Quarta prova: contatto fisso in acciaio inox (AISI 304) / contatto mobile in grafite	60
10.4.5	Quinta prova: contatto fisso in acciaio inox (AISI 304) / contatto mobile in rame.....	66
10.4.6	Sesta prova: contatto fisso in acciaio rame-tungsteno / rame-tungsteno (W/Cu 75/25)	70
10.4.7	Conclusioni	74
10.5	Dimensionamento del contatto mobile	75
10.6	Dimensionamento del contatto fisso	76
10.7	Pre-Prova di tipo bus-transfer	76
10.8	Prova di tipo bus-transfer.....	77
10.8.1	Conclusioni	83
10.9	Valutazione del consumo del contatto fisso.....	84
11	Prova SX 420.....	87
11.1	Il sezionatore	87
11.2	Caratteristiche principali	88
11.3	Obiettivi di prova.....	91
11.4	Prova di tipo bus-transfer.....	91
11.5	Conclusioni	96

11.6	Osservazioni	98
12	Sintesi del circuito di prova del sezionatore SX	99
12.1	Requisiti del circuito	99
12.2	Dimensionamento dei parametri del circuito di prova.....	100
12.3	Tensione di prova	101
12.4	Corrente di prova	102
12.4.1	Reattanze lato AT	102
12.4.2	Reattanze lato MT	104
12.4.3	Valutazioni delle entità delle correnti di guasto lato MT.....	104
12.4.4	Reattanze lato BT	104
12.4.5	Valutazione dell'entità della reale corrente di prova in BT, MT e AT	106
12.4.6	Verifica dei parametri della TRV	106
12.4.7	Fattore di potenza	108
12.4.8	Protezioni	108
13	Soluzioni alternative.....	111
13.1	Esperimento	111
13.1.1	Materiali di contatto.....	111
13.1.2	Prova	112
13.1.3	Conclusioni	116
14	Bibliografia	117

INDICE FIGURE

Fig.1:	sedi di Areva R&D nel mondo	3
Fig.2:	stabilimento Areva di Noventa di Piave	4
Fig.3:	esempio di sezionatore ad interruzione verticale.....	10
Fig.4:	esempio di sezionatore ad interruzione centrale	10
Fig.5:	esempio di sezionatore a doppia interruzione	11
Fig.6:	esempio di sezionatore a doppia interruzione	12
Fig.7:	sistema a sbarra singola.....	13
Fig.8:	sistema a sbarra principale più sbarra di trasferimento	14

Fig.9:	sistema a doppia sbarra con un solo interruttore.....	15
Fig.10:	sistema a doppia sbarra con doppio interruttore.....	15
Fig.11:	sistema ad anello	16
Fig.12:	sistema ad un interruttore e mezzo.....	17
Fig.13:	esempio di progetto di sottostazione	22
Fig.14:	modello del circuito in commutazione	26
Fig.15:	scostamento d'arco	28
Fig.16:	profilo di tensioni e regioni d'arco.....	31
Fig.17:	tipologie di R fra due contatti	40
Fig.18:	circuito di prova A per le prove di stabilimento e di interruzione di correnti di commutazione di sbarra.....	48
Fig.19:	circuito di prova B per le prove di stabilimento e di interruzione di correnti di commutazione di sbarra.....	48
Fig.20:	S2DA	50
Fig.21:	contatti principali dell'S2DA (a sx contatto maschio, a dx contatto femmina)	51
Fig.22:	contatti secondari dell'S2DA (a sx contatto fisso, a dx contatto mobile).....	52
Fig.23:	contatti secondari dell'S2DA in grafite prima della prova	54
Fig.24:	contatti secondari dell'S2DA in grafite dopo la prova	55
Fig.25:	contatto fisso dell'S2DA in rame prima (sx) e dopo la prova (dx).....	57
Fig.26:	contatto secondario fisso dell'S2DA in lega W/Cu 75/25 (sx) e in acciaio (dx)	60
Fig.27:	stato dei contatti secondari dell'S2DA in W/Cu 75/25 dopo la prova.....	70
Fig.28:	stato dei contatti secondari dell'S2DA AISI 304/Cu dopo la prova.....	77
Fig.29:	circuito di prova S2DA Bus-Transfer type test	78
Fig.30:	contatto fisso S2DA prima (sx) e dopo la prova (dx).....	79
Fig.31:	contatto mobile S2DA prima (sx) e dopo la prova (dx)	80
Fig.32:	contatti principali S2DA dopo la prova	83
Fig.33:	SX	87
Fig.34:	esempio di contatto mobile dell'SX	88
Fig.35:	assieme dei contatti dell'SX	88
Fig.36:	Fascetta di laminati SX	89
Fig.37:	assieme di prova SX	89
Fig.38:	dispositivo di aggancio alla sbarra dei contatti mobili secondari.....	89
Fig.39:	circuito di prova S2DA Bus-Transfer type test	92
Fig.40:	contatto secondario fisso SX dopo le 100 C/O.....	96
Fig.41:	contatto secondario fisso SX dopo le 150 C/O.....	96
Fig.42:	contatto mobile SX dopo le 100 C/O.....	96
Fig.43:	contatto mobile SX dopo le 150 C/O.....	96

Fig.44:	contatto principale fisso dopo la sequenza di prova (SX)	97
Fig.45:	contatto principale mobile dopo la sequenza di prova (SX).....	97
Fig.46:	circuito di prova A per le prove di stabilimento e di interruzione di correnti di commutazione di sbarra.....	99
Fig.47:	circuito di prova B per le prove di stabilimento e di interruzione di correnti di commutazione di sbarra.....	99
Fig.48:	esempio di TRV richiesta.....	99
Fig.49:	Trafo 1 (AT/MT)	100
Fig.50:	Trafo 2 (MT/BT)	101
Fig.51:	Circuito di prova del sezionatore SX	101
Fig.52:	stallo di arrivo linea del Laboratorio SVEPPI	102
Fig.53:	reattanze di contenimento (25 Ω per fase).....	102
Fig.54:	Reattanze di regolazione lato AT	103
Fig.55:	reattanza di regolazione in BT	105
Fig.56:	condensatori utilizzati (100 nF ciascuno).....	107
Fig.57:	Interruttore di prova utilizzato in BT.....	108
Fig.58:	circuito di prova del sezionatore SX dettagliato	109
Fig.59:	simulatore di prova.....	113
Fig.60:	stato dei contatti in Ag/CdO dopo la sequenza di test	115
Fig.61:	microsezione del contatto in Ag/SnO ₂ dopo le 100 operazioni di manovra	115

INDICE TABELLE

Tab.1:	campi di applicazione dei sezionatori prodotti	5
Tab.2:	sintesi delle caratteristiche delle varie configurazioni di sbarra	17
Tab.3:	dimensionamento sbarre e collegamenti.....	21
Tab.4:	distanze di progetto (principali)	23
Tab.5:	equazioni d'arco	33
Tab.6:	tensioni nominale per le prove di tipo bus-transfer.....	47
Tab.7:	valori nominali S2DA	50
Tab.8:	caratteristiche dell'oggetto in prova	52
Tab.9:	caratteristiche del meccanismo di manovra	52
Tab.10:	valori nominali di prova.....	53

Tab.11:	combinazioni di materiali testate come contatti secondari nell'S2DA.....	53
Tab.12:	grandezze caratteristiche di dimensionamento Cu	76
Tab.13:	valori nominali di prova secondo normativa	78
Tab.14:	valori di prova (S2DA).....	79
Tab.15:	tempi di prova (S2DA)	79
Tab.16:	misurazioni di R dei contatti principali (S2DA)	79
Tab.17:	100 V, 1600 A, AISI 304 Ø 22 mm.....	84
Tab.18:	100 V, 1600 A, AISI 304 Ø 25 mm.....	84
Tab.19:	300 V, 1600 A, AISI 304 Ø 30 mm.....	85
Tab.20:	stima del dimensionamento del contatto fisso in AISI 304 per i livelli di tensione di prova superiori	86
Tab.21:	valori nominali S2DA	88
Tab.22:	caratteristiche dell'oggetto in prova	91
Tab.23:	caratteristiche del meccanismo di manovra	91
Tab.24:	valori nominali di prova secondo normativa.....	92
Tab.25:	valori calcolati di prova (S2DA).....	92
Tab.26:	tempi di prova (SX).....	92
Tab.27:	misurazioni di R dei contatti principali (S2DA)	95
Tab.28:	valori di prova secondo Norma	99
Tab.29:	dati Trafo 1 (AT/MT).....	100
Tab.30:	dati Trafo 2 (MT/BT).....	100
Tab.31:	dati di targa della reattanza di regolazione in BT	105
Tab.32:	dati di targa di un singolo condensatore	107
Tab.33:	dati di targa dell'interruttore utilizzato	108
Tab.34:	dettagli sulle condizioni del simulatore di prova	112

INDICE GRAFICI

Graf.1:	valori di corrente permessi in funzione dell'impedenza dell'anello per sistemi a 138 kV stabiliti da McNulty.....	29
Graf.2:	confronto fra i risultati sulle commutazioni d'anello ottenuti da Andrews et al e IREQ	30
Graf.3:	corrente e tensione d'arco (Gross).....	34
Graf.4:	resistenza e Potenza d'arco (Gross)	34

Graf.5:	caratteristica U-I dell'arco (Gross).....	35
Graf.6:	tensione e corrente d'arco secondario.....	35
Graf.7:	potenza d'arco secondario	36
Graf.8:	caratteristica U-I dell'arco secondario.....	36
Graf.9:	andamento delle relazioni riportate nella Tab.1 per un intervallo 0÷400 A.....	37
Graf.10:	andamento delle relazioni riportate nella Tab.1 per un intervallo 0÷100 A.....	37
Graf.11:	resistenza elettrica del contatto in funzione della forza applicata.....	42
Graf.12:	andamento dello spessore di consumo (contatto fisso AISI304 Ø 22-25 mm).....	84
Graf.13:	andamento dello spessore di consumo (contatto fisso AISI304 Ø 30 mm).....	85
Graf.14:	confronto fra re-inneschi e erosione d'arco dopo 100 manovre.....	114
Graf.15:	valori medi di resistenza misurati durante la sequenza di prova Ag/CdO	114
Graf.16:	valori medi di resistenza misurati durante la sequenza di prova Ag/SnO ₂	114
Graf.17:	tempi d'arco registrati durante la prova (Ag/SnO ₂).....	115

INDICE OSCILLOGRAMMI

Oscil.1:	registrazione prima manovra C C/C (S2DA).....	55
Oscil.2:	registrazione prima manovra O C/C (S2DA)	56
Oscil.3:	registrazione ultima manovra C C/C (S2DA)	56
Oscil.4:	registrazione ultima manovra O C/C (S2DA)	57
Oscil.5:	registrazione prima manovra C Cu/C (S2DA).....	58
Oscil.6:	registrazione prima manovra O Cu/C (S2DA)	58
Oscil.7:	registrazione ultima manovra C Cu/C (S2DA).....	59
Oscil.8:	registrazione ultima manovra O Cu/C (S2DA)	59
Oscil.9:	registrazione prima manovra C W/Cu/C (S2DA).....	61
Oscil.10:	registrazione prima manovra O W/Cu/C (S2DA)	61
Oscil.11:	registrazione ultima manovra C W/Cu/C (S2DA).....	62
Oscil.12:	registrazione ultima manovra O W/Cu/C (S2DA)	62
Oscil.13:	registrazione prima manovra C AISI/C (S2DA).....	63
Oscil.14:	registrazione prima manovra O AISI/C (S2DA)	63
Oscil.15:	registrazione ultima manovra C AISI/C (S2DA).....	64
Oscil.16:	registrazione ultima manovra O AISI/C (S2DA).....	64

Oscil.17:	registrazione della tensione d'arco C (C/C) (S2DA)	65
Oscil.18:	registrazione della tensione d'arco O (C/C) (S2DA)	66
Oscil.19:	registrazione prima manovra C AISI/Cu (S2DA)	67
Oscil.20:	registrazione prima manovra O AISI/Cu (S2DA)	67
Oscil.21:	registrazione ultima manovra C AISI/Cu (S2DA)	68
Oscil.22:	registrazione ultima manovra O AISI/Cu (S2DA)	68
Oscil.23:	registrazione della tensione d'arco C (AISI/Cu) (S2DA)	69
Oscil.24:	registrazione della tensione d'arco O (AISI/Cu) (S2DA)	69
Oscil.25:	registrazione 10 ^a manovra C W/Cu 75/25 (S2DA)	71
Oscil.26:	registrazione 10 ^a manovra O W/Cu 75/25 (S2DA)	71
Oscil.27:	registrazione 30 ^a manovra C W/Cu 75/25 (S2DA)	72
Oscil.28:	registrazione 30 ^a manovra O W/Cu 75/25 (S2DA)	72
Oscil.29:	registrazione 60 ^a manovra C W/Cu 75/25 (S2DA)	73
Oscil.30:	registrazione 60 ^a manovra O W/Cu 75/25 (S2DA)	73
Oscil.31:	registrazione 1 ^a manovra della sequenza di prova di tipo C (S2DA)	80
Oscil.32:	registrazione 1 ^a manovra della sequenza di prova di tipo O (S2DA)	81
Oscil.33:	registrazione 50 ^a manovra della sequenza di prova di tipo C (S2DA)	81
Oscil.34:	registrazione 50 ^a manovra della sequenza di prova di tipo O (S2DA)	82
Oscil.35:	registrazione 100 ^a manovra della sequenza di prova di tipo C (S2DA)	82
Oscil.36:	registrazione 100 ^a manovra della sequenza di prova di tipo O (S2DA)	83
Oscil.37:	registrazione 1 ^a manovra della sequenza di prova di tipo C (SX)	93
Oscil.38:	registrazione 1 ^a manovra della sequenza di prova di tipo O (SX)	93
Oscil.39:	registrazione 50 ^a manovra della sequenza di prova di tipo C (SX)	93
Oscil.40:	registrazione 50 ^a manovra della sequenza di prova di tipo O (SX)	94
Oscil.41:	registrazione 100 ^a manovra della sequenza di prova di tipo C (SX)	94
Oscil.42:	registrazione 100 ^a manovra della sequenza di prova di tipo O (SX)	94
Oscil.43:	registrazione 150 ^a manovra della sequenza di prova di tipo C (SX)	95
Oscil.44:	registrazione 150 ^a manovra della sequenza di prova di tipo O (SX)	95

1 INTRODUZIONE

Al giorno d'oggi viene soddisfatta una grande richiesta di energia elettrica e, secondo le previsioni, la sua domanda tenderà sempre ad aumentare. È fondamentale quindi che la gestione di tale energia sia più *semplice, economica e funzionale* possibile.

Tematica importante legata alla gestione è la questione della *commutazione di sbarra* in esercizio, operazione questa che permette nella sottostazione una grossa flessibilità nel controllo delle utenze.

Per soddisfare le caratteristiche sopra richieste, si è scelto di attribuire la soluzione di questa problematica a particolari sezionatori, dotati di adeguati dispositivi che li rendono capaci di commutare le sole correnti nominali dei carichi.

Il motivo di attribuire a tali dispositivi questa scelta è dettato principalmente da ragioni economiche, essendo i sezionatori uno dei componenti più semplici e meno costosi di un impianto (l'utilizzo di altri dispositivi, quali ad esempio gli interruttori, porterebbe ad un costo di realizzazione e gestione enormemente superiore, dato il grande numero di cui si necessita).

A causa delle configurazioni circuitali che si vengono a creare durante la commutazione di uno stallo, nello svolgersi della commutazione, i contatti del sezionatore di manovra sono sede di forze elettromotrici indotte dovute alle variazioni dei flussi concatenati dal circuito stesso. Questo crea, insieme alla corrente di entità nominale, le condizioni favorevoli alla formazione di un arco elettrico caratterizzato da una energia non trascurabile.

Nonostante la commutazione di sbarra sia di per sé un'operazione semplice, quest'ultimo fenomeno corrode e danneggia i contatti del dispositivo fino a non poter più garantire un loro corretto funzionamento; potrebbero infatti presentare un notevole aumento della loro resistenza di contatto, causando, da un punto di vista energetico, perdite eccessive di potenza; cosa ancor peggiore, da un punto di vista fisico, ciò porterebbe ad un notevole aumento di temperatura fino, in alcuni casi, ad una loro possibile parziale saldatura: se questo dovesse succedere, il sezionatore perderebbe il suo funzionamento e non si potrebbe quindi aprire l'impianto.

Per ovviare a tutto questo, si dota il dispositivo di una coppia ausiliaria di contatti, atti a assorbire il fenomeno dell'arco elettrico, mantenendo così integri i contatti principali.

La normativa a riguardo prevede una prova, classificata come prova di tipo, legata al progetto del componente e che ne caratterizza quindi l'intera famiglia.

Il seguente elaborato riporta lo svolgimento e le problematiche di due prove di tipo *bus-transfer* svolte su richiesta della sede R&D di Noventa di Piave di Areva Group, azienda specializzata nello sviluppo di sezionatori AT-AAT, a cui ho avuto la possibilità di assistere durante lo svolgimento del mio tirocinio.

Per fornire una adeguata panoramica sull'argomento, in seguito verranno trattati i seguenti punti:

- Il sezionatore: funzioni e tipologie del dispositivo
- Entità e tipologie delle correnti che il sezionatore è chiamato a commutare
- Configurazioni circuitali tipiche delle commutazione di sbarra
- Teoria della commutazione
- Fisica dell'arco
- Normativa a riguardo (procedura prove)
- Svolgimento prove
- Ultimi ritrovati nel settore

2 AZIENDA OSPITANTE

Areva (ex Cogema) è una multinazionale francese che opera nel campo dell'energia. Essa è divisa in diverse linee di produzione Areva T&D (Transmission & Devices); una fra queste è la linea di produzione di sezionatori per alte tensioni in aria, dislocata in 9 sedi come mostrato in Fig.1.

La sede principale è localizzata a Noventa di Piave, nella quale si distingue il reparto R&D (Research & Development) che funge da gruppo di ricerca per tutte le nove sedi.

Fig.1: sedi di Areva R&D nel mondo



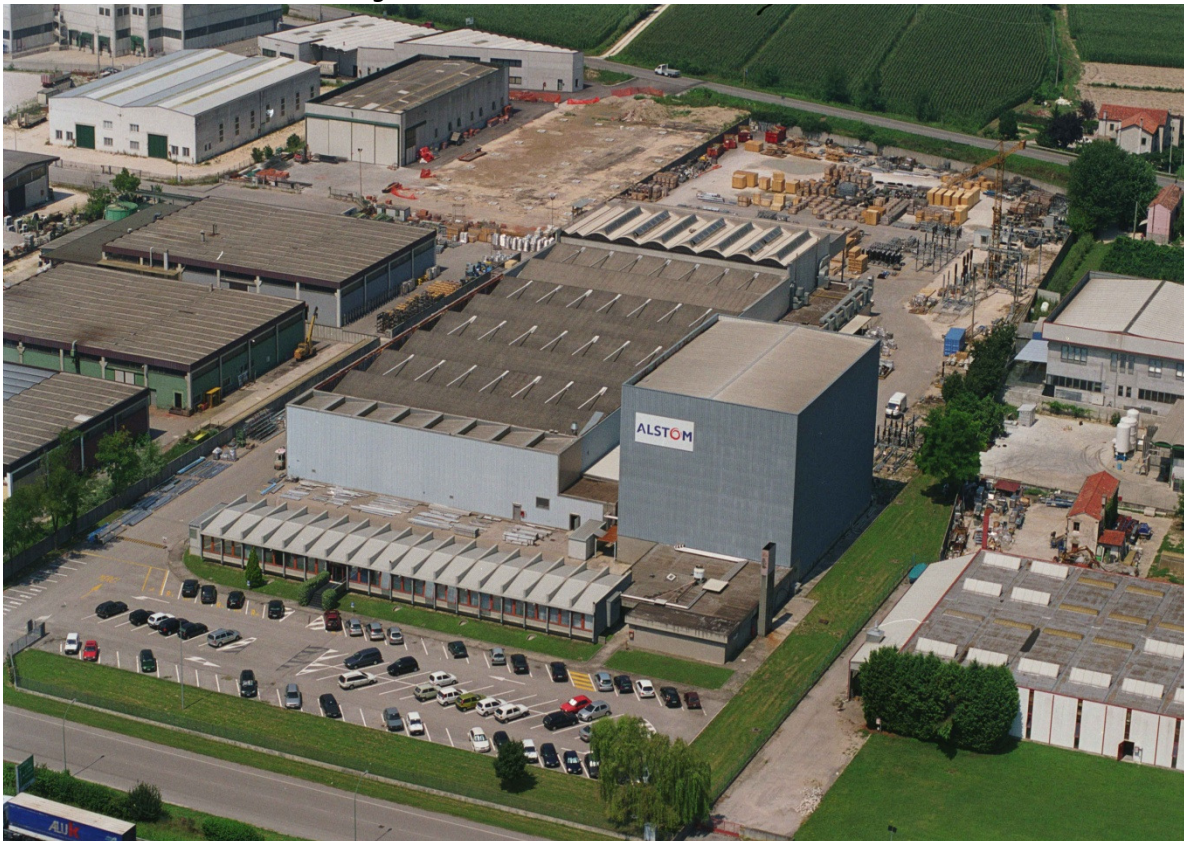
- | | |
|-----------------------|------------------------|
| 1. Noventa di Piave | 6. Padappai, India |
| 2. La Prairie, Canada | 7. Guangzhou, Cina |
| 3. Tizayuka, Messico | 8. Wuxi e Shuzou, Cina |
| 4. Itajubá, Brasile | 9. Beijing, Cina |
| 5. Madrid, Spagna | |

- Centro di competenza
- Assemblaggio
- ▲ Supporto, assemblaggio e produzione di componenti

Durante il periodo di tirocinio, ho avuto l'opportunità di essere ospitato dal gruppo R&D, nella sede di Noventa mostrata in Fig.2. Essa è stata costruita nel 1963 dal gruppo CEME e si è evoluta fino a far parte del gruppo Areva. Tuttavia, al termine del periodo di stage, la sede è stata assorbita dalla compagnia Alstom Grid.

- 1963 Fondazione del gruppo CEME e della sede
- 1984 Contratto di licenza accordato con *Sprecher + Schuh* (Azienda di componentistica elettrica, nata in svizzera, oggi diffusa in tutto il mondo), con più di 650 interruttori fabbricati e venduti in Italia fino al 1998
- 1988 Prima collaborazione con *GEC Alsthom* (General Electric Company): stipulazione del contratto di licenza per sezionatori 72/245 realizzati per EDF
- 1991 GEC Alsthom acquista CEME
- 1994 Certificazione ISO 9001
- 2003 Certificazione ISO 14001
- 2004 Il 9 gennaio il gruppo T&D viene acquistato da Areva. Lo stabilimento di 29000 m², di cui 7500 coperti, impiega 145 persone.
- 2005 Certificazione OHSAS 18000.
- 2010 Assorbimento da parte di Alsthom Grid

Fig.2: stabilimento Areva di Noventa di Piave



Grazie a questa sede, Areva produce oggi una linea di sezionatori che copre ogni esigenza del mercato, come è possibile vedere dal *Tab.1*. Si distinguono maggiormente, per funzionalità ed affidabilità e campo di applicazione, i sezionatori ad apertura centrale S2DA, a pantografo SX e a doppia interruzione S3C.

Tab.1: campi di applicazione dei sezionatori prodotti

Tipo di sezionatore	Tensioni nominali [kV]											
	72,5	100	126	145	170	245	300	360	420	550	800	1000
<i>Apertura centrale (S2DA)</i>	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		
<i>Apertura centrale a V (V CB)</i>	•	•	•	•	•							
<i>Doppia interruzione (S3C - S3C D)</i>	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•		
<i>Semi p. verticale (SPV - SPV L)</i>	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
<i>Semi p. orizzontale (SPO - SPO L)</i>						•	•	•	•	•	•	•
<i>Pantografo (SX)</i>	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
<i>VB (C GV B - S3C V)</i>	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	
<i>E.S. (STB - STA)</i>	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	

Il reparto R&D si occupa dello sviluppo di nuove soluzioni per i dispositivi in aggiunta ai sezionatori, al fine di aumentarne le prestazioni. Uno fra questi, il dispositivo di bus-transfer, che serve a garantire la capacità di interruzione delle correnti di sbarra del sezionatore secondo i parametri stabiliti dagli standards.

La sede, inoltre, si occupa della realizzazione di alcune prove di tipo (meccanica e di temperatura) e di monitorare quelle svolte da un ente esterno; questo risulta infatti necessario in quanto la sede non offre un allacciamento di potenza richiesto da alcune tipologie di prove.

3 IL SEZIONATORE

3.1 Definizione

Il **sezionatore** è un organo elettromeccanico di manovra inserito in un circuito elettrico al fine di *sezionare*, con corrente trascurabile, in modo fisico e visibilmente evidente.

Sezionare significa separare due punti elettricamente connessi, in modo che non ci sia più continuità metallica tra essi. Lo scopo del sezionatore è quello di garantire la sicurezza dell'impianto e soprattutto degli operatori, poiché interrompe fisicamente e visivamente il tronco di linee su cui si lavora assicurandosi contro le richiuse involontarie, ed il suo stato è visibile dagli operatori stessi.

Quanto detto non avviene negli interruttori, i cui elettrodi sono generalmente isolati dall'ambiente esterno mediante un contenitore (per assicurare la rapida estinzione dell'arco elettrico) e quindi non visibili dall'esterno.

L'apertura di un sezionatore assicura che il circuito, la linea o la macchina elettrica che si trovano a valle dello stesso siano elettricamente isolati dal circuito a monte.

Questa condizione è necessaria qualora si debba intervenire su un componente della rete, per esempio in caso di manutenzione. Infatti, qualora dovesse ad esempio verificarsi a monte una sovratensione di origine atmosferica o di qualsiasi altro tipo, il dispositivo deve garantire la tenuta al picco di tensione; altra situazione in cui il sezionatore gioca un ruolo non meno importante si ha quando precede interruttori a doppia camera, per i quali si utilizzano dei partitori di tensione capacitivi al fine di avere una distribuzione di tensione corretta; in questo caso i condensatori lasciano fluire, per quanto piccola, una corrente capacitiva; avendo il sezionatore una capacità elettrodica considerevolmente maggiore, si ovvia con esso al problema.

La caratteristica principale dei sezionatori è che, a differenza degli interruttori, essi non hanno un potere di interruzione, ma solo una capacità massima di resistenza (in stato chiuso) al passaggio della corrente di cortocircuito. Non sono dunque progettati per l'interruzione della corrente nominale del circuito, né sono a maggior ragione concepiti per aprire un circuito in condizioni di guasto (sovraccarichi o corto-circuiti), ma solamente per l'apertura del circuito e quindi la messa in sicurezza del circuito stesso.

Esistono però alcune varianti del sezionatore, aventi le stesse caratteristiche e impieghi, ma capaci anche di estinguere archi elettrici, quindi di interrompere correnti nominali in determinate condizioni impiantistiche, quale la commutazione di sbarra.

3.2 Tipologie di sezionatori

Le caratteristiche sopra riportate sono generali e comuni a ogni tipologia di sezionatore. In seguito si vuole dare uno sguardo alle diverse tipologie di dispositivi evidenziando le peculiarità più richieste in funzione del livello di tensione a cui operano.

3.2.1 Classificazioni

Questo dispositivo è classificabile secondo due criteri, rispettivamente:

1. in funzione del numero di poli che vengono manovrati simultaneamente
 - Unipolari
 - Bipolari
 - Tripolari
 - Tetrapolari

2. in funzione del livello di tensione a cui opera

- Bassissima tensione (6-12-24-48 V)
- Bassa tensione (125-230-400 V)
- Media tensione (8400-10000-15000-20000 V)

Nelle applicazioni in media tensione il sezionatore:

- è spesso accoppiato a un fusibile che lo protegge da eventuali danneggiamenti;
- funziona in coordinamento con protezioni automatiche, che ne impediscono l'apertura in caso di passaggio di corrente.
- spesso non costituisce un apparecchio elettrico a sé stante, ma è integrato con un interruttore e un sezionatore di terra in un unico apparato.

- Alta tensione (35-125-220-380-420-550-800 kV)

Sono impiegati in circuiti con tensione nominale superiore a 35 kV. La norma di riferimento in questo caso è la IEC 62271-102. Il sezionatore in alta tensione:

- deve indicare *senza alcuna ambiguità* il suo stato, aperto o chiuso;
- nello stato *aperto*, deve avere gli elettrodi ad una distanza tale che, in caso di sovratensione sul circuito, non si inneschi un arco elettrico.

Questi valori di tensione sono solo i più comuni e sono puramente indicativi.

Solitamente il rapporto fra un livello di tensione ed il successivo è di $\sqrt{3}$ volte; questo facilita le trasformazioni fra i diversi livelli.

3.2.2 Sezionatore di terra

In molte situazioni, anche l'apertura di un sezionatore non assicura che le apparecchiature elettriche poste a valle siano in condizioni di sicurezza. Potrebbe, infatti, essere presente una tensione *residua* tra gli apparecchi e la terra che costituirebbe un pericolo per le persone. In questi casi è utile la presenza di un sezionatore di terra che, una volta chiuso, crea un collegamento *franco* (con impedenza nulla o comunque trascurabile) tra la terra e l'apparecchiatura (messa a terra), fissandone il potenziale e annullando quindi la tensione residua. Solitamente, nel normale funzionamento, i sezionatori di terra sono interbloccati meccanicamente con i sezionatori *di linea* o *di sbarra* (cioè i sezionatori sopra descritti), con la precisa condizione che quando uno è aperto l'altro è chiuso, e viceversa.

3.2.3 Grandezze nominali

Le grandezze nominali per i sezionatori di seguito elencate sono definite nella Norma CEI 17-11.

- *tensione nominale d'impiego, U_e (V)*
- *tensione nominale d'isolamento, U_i (V)*
- *corrente nominale d'impiego, I_u (A)*
è la corrente definita dal costruttore tenendo conto della tensione nominale, della frequenza nominale, del servizio nominale, della categoria di utilizzazione e del tipo di custodia di protezione che il sezionatore è in grado di portare, senza danneggiarsi, nella posizione di chiuso per una durata infinita (teoricamente)
- *corrente nominale termica convenzionale, I_{th} (A)*
- *corrente nominale termica in involucro, I_{the} (A)*
- *frequenza nominale, f (Hz)*
- *servizio normale* (8 ore oppure ininterrotto)
- *potere nominale di chiusura o potere di stabilimento*
- *potere nominale di interruzione*
vengono espressi quali multipli della corrente nominale d'impiego in funzione della gravosità del servizio (categoria d'impiego);
- *corrente nominale di breve durata ammissibile I_{cw}*
è la corrente che il sezionatore è in grado di portare, senza danneggiarsi, nella posizione di chiuso per una durata specificata nelle condizioni prescritte di utilizzazione e di comportamento
- *potere nominale di chiusura su corto circuito, I_{cm} (kA)*

questo dato si riferisce ai sezionatori di manovra per un'operazione di chiusura su specificati valori di cresta di correnti di corto circuito. Non è definibile un potere d'interruzione durante un corto circuito perché non è richiesto per queste apparecchiature. Quando questo dato non è indicato dal costruttore si deve intendere almeno pari alla corrente di picco corrispondente I_{cw}

- *corrente nominale di corto circuito condizionata da fusibile o interruttore automatico I_{cd}*
è la corrente presunta che l'apparecchio associato con un fusibile può sopportare, senza danneggiarsi, per la durata dell'operazione di quest'ultimo, nelle condizioni di prova specificate
- *categorie di utilizzazione AC*
definiscono la gravosità delle condizioni d'utilizzazione e vengono rappresentate con due lettere indicative del tipo di circuito in cui l'apparecchio può essere installato e con un numero di due cifre indicativo del tipo di utilizzazione e delle modalità di manovra previste
- *durata meccanica e durata elettrica*
la durata meccanica esprime il numero di cicli (un singolo ciclo è costituito dall'insieme di un'operazione di chiusura e di una di apertura) a vuoto che l'apparecchio è in grado di effettuare senza revisioni o sostituzioni di parti meccaniche (è ammessa la manutenzione ordinaria). Anche la durata elettrica viene espressa in cicli ed esprime la resistenza dei contatti all'usura elettrica con operazioni sotto carico alle condizioni specificate dalle norme.

Possiamo quindi concludere che il sezionatore è un dispositivo di sicurezza obbligatorio in ogni sottostazione, fondamentale per la protezione delle persone e delle apparecchiature. Quando è aperto, costituisce la più alta capacità di isolamento. La sua versatilità e le sue prestazioni lo rendono necessario per la gestione ottimizzata di una sottostazione.

Per quanto riguarda l'argomento di questa tesi, ossia la commutazione delle correnti di sbarra, è sottointeso che ci si riferisce a sezionatori di manovra in aria unipolari per reti AT-AAT. Riguardo a quest'ultimi, si dà in seguito uno sguardo alle diverse tipologie esistenti.

3.3 Sezionatori in aria unipolari per reti AT-AAT

Per reti AT-AAT esistono differenti tipologie di sezionatori in aria unipolari. Le più in uso, sono le seguenti:

- sezionatore ad interruzione verticale
- sezionatore ad interruzione centrale
- sezionatore a doppia interruzione
- sezionatore a pantografo-semipantografo

3.3.1 Sezionatore ad interruzione verticale

La parte attiva del dispositivo, come è possibile vedere nella figura correlata *Fig.3*, è costituita da un'asta (*lama*) incernierata su un supporto isolato, al quale si connette il circuito esterno, libera di ruotare su di un piano verticale; tramite questa sua rotazione, la lama può agganciarsi su una morsa posta in un secondo supporto isolato tramite un coerente meccanismo (*contatto a L*); la chiusura con questo secondo supporto, determina quindi la chiusura dell'impianto.

Le operazioni di chiusura e apertura possono essere realizzate tramite un meccanismo motorizzato o manualmente.

In posizione di chiusura, la lama si allinea al telaio del dispositivo; in posizione di apertura, deve garantire la massima distanza elettrodica ad essa permessa ovvero porsi in posizione perpendicolare al telaio.

Questa tipologia di dispositivi è largamente utilizzata nella funzione di messa a terra della parte di impianto non in esercizio in quanto il movimento veloce della lama, facile da realizzare con l'aiuto di apposite molle precaricate, permette un facile strappamento d'arco.

Fig.3: esempio di sezionatore ad interruzione verticale



3.3.2 *Sezionatore ad interruzione centrale*

La parte attiva del dispositivo, come è possibile vedere nella figura correlata *Fig.4*, è costituita da due bracci incernierati su distinti supporti isolati ai quali si connette il circuito esterno. Ad essi è permessa una rotazione sul piano orizzontale con “chiusura a cancello”.

Le operazioni di chiusura e apertura possono essere realizzate tramite un meccanismo motorizzato o manualmente.

In posizione di chiusura, i due bracci si allineano al telaio del dispositivo; al contrario, in posizione di apertura essi devono garantire la massima distanza elettrodica loro permessa, sono posti pertanto in posizione relativa parallela, perpendicolare al telaio del dispositivo.

Fig.4: esempio di sezionatore ad interruzione centrale



3.3.3 Sezionatore a doppia interruzione

La parte attiva del dispositivo, come è possibile vedere nella figura correlata *Fig.5*, è costituita da un'asta, posta su di un perno centrale isolato, e da due morse, poste a loro volta su due supporti isolati esterni.

L'asta compie una rotazione sul piano orizzontale; in posizione di chiusura, le sue estremità si chiudono simultaneamente sulle morse. In alcuni casi il dispositivo è provvisto di un meccanismo di aggancio asta-morsa che fornisce una maggiore sopportazione delle correnti di guasto.

Le operazioni di chiusura e apertura possono essere realizzate tramite un meccanismo motorizzato o manualmente.

In posizione di apertura l'asta deve garantire la sua distanza massima dai supporti esterni e pertanto è posta in posizione perpendicolare al telaio del dispositivo; in posizione di chiusura, l'asta si allinea al telaio del dispositivo.

Fig.5: esempio di sezionatore a doppia interruzione



3.3.4 Sezionatore a pantografo o a semi pantografo

La parte attiva del dispositivo, come è possibile vedere nella figura correlata *Fig.6*, è costituita da un pantografo estendibile e da una struttura tubolare di aggancio ancorata al sistema di sbarre. In posizione di chiusura, il pantografo è esteso e raggiunge la parte fissa; al contrario, in posizione di apertura, il sezionatore si ripiega, garantendo la distanza elettrodica massima.

Le operazioni di chiusura e apertura possono essere realizzate tramite un meccanismo motorizzato o manualmente.

Fig.6: esempio di sezionatore a doppia interruzione



3.4 Tipologie di correnti che interessano il sezionatore

Come accennato precedentemente, solitamente il sezionatore non è un dispositivo in grado di interrompere flussi di corrente; tuttavia, può essergli richiesta la capacità di aprire certe tipologie di correnti, quali:

- **Correnti di magnetizzazione dei TR**
In AT il loro valore tipico è di qualche Ampere, valore legato alle basse perdite del TR. Questa tipologia di correnti presenta un andamento non sinusoidale; al contrario ha una forte componente di 3^a armonica. La tensione di ristabilimento che appare fra i contatti dopo l'interruzione di corrente è pertanto la differenza fra la tensione di linea a frequenza industriale e la tensione dal lato TR, che oscilla inizialmente con frequenze attorno ai 300 Hz.
- **Correnti capacitive**
Nelle sbarre dove sono connessi strumenti di trasformazione, i valori delle correnti capacitive sono inferiori ad 1 Ampere con eccezione di alcuni casi particolari in cui possono portarsi ad 1÷2 Ampere (caso dei *banchi di condensatori*). Nel caso di linea con dimensioni ridotte, l'entità di queste correnti può superare i 20 Ampere. La tensione di ristabilimento che appare tra i contatti dopo l'interruzione di corrente è la differenza fra la tensione di linea a frequenza industriale e il valore di tensione continua dato dalla carica residua dei condensatori della linea aperta.
- **Correnti d'anello**
L'entità delle correnti d'anello dipendono dalla configurazione del circuito considerato. Il fine della commutazione è quello di trasferire la corrente da una sbarra ad un'altra parallela. Nel caso dei sezionatori, questa naturale operazione è caratterizzata dalla presenza dell'arco elettrico. Man mano che quest'ultimo cresce, la corrente scende gradualmente a zero fino a trasferirsi completamente alla sbarra cui si vuole commutare. La tensione che appare ai capi del dispositivo durante la manovra dipende dall'entità dei flussi concatenati dall'anello che si viene a creare; nel caso di reti AT, la normativa prevede che il suo valore sia compreso fra 100÷300 Volt a seconda del livello di tensione di esercizio della rete.

4 TIPOLOGIE DI CONFIGURAZIONE DI SBARRA NELLE SOTTOSTAZIONE

Lo schema circuitale scelto determina la disposizione elettrica e fisica delle apparecchiature di commutazione. Sistemi di sbarra differenti possono essere scelti su base di fattori di sicurezza, affidabilità, economicità e semplicità, dettati dalla funzione e dall'importanza della sottostazione che si va a progettare.

Le configurazioni di sbarra più comuni sono:

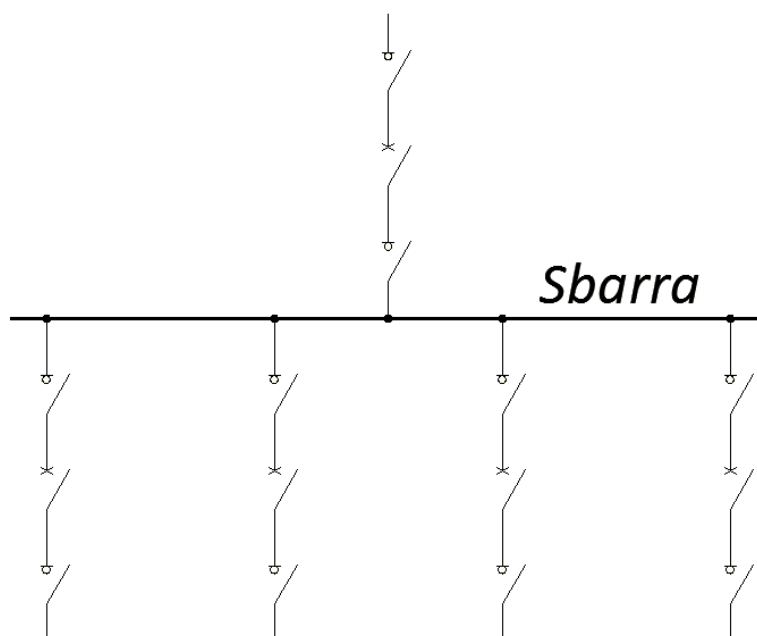
- sistema a sbarra singola
- sistema a sbarra principale più sbarra di trasferimento
- sistema doppia sbarra con singolo interruttore
- sistema doppia sbarra con doppio interruttore
- sistema di sbarre ad anello
- sistema ad un interruttore e mezzo

Alcuni di questi schemi possono essere modificati con l'aggiunta di interruttori congiuntori, dispositivi di sezionamento di sbarra, impianti di bypass automatici e sbarre di trasferimento extra.

4.1 Sistema a sbarra singola

Solitamente questa configurazione (*Fig.7*) non viene utilizzata per le sottostazioni primarie in quanto la dipendenza da una singola sbarra può causare un'interruzione grave in caso di mancata apertura dell'interruttore. Inoltre, in caso di qualsiasi operazione di manutenzione o di ingrandimento del sito, la sottostazione deve essere isolata dalla rete. Pertanto, anche se il sistema di protezione previsto è relativamente semplice, questa configurazione è considerata poco flessibile e soggetta ad interruzioni di durata prolungata.

Fig.7: sistema a sbarra singola

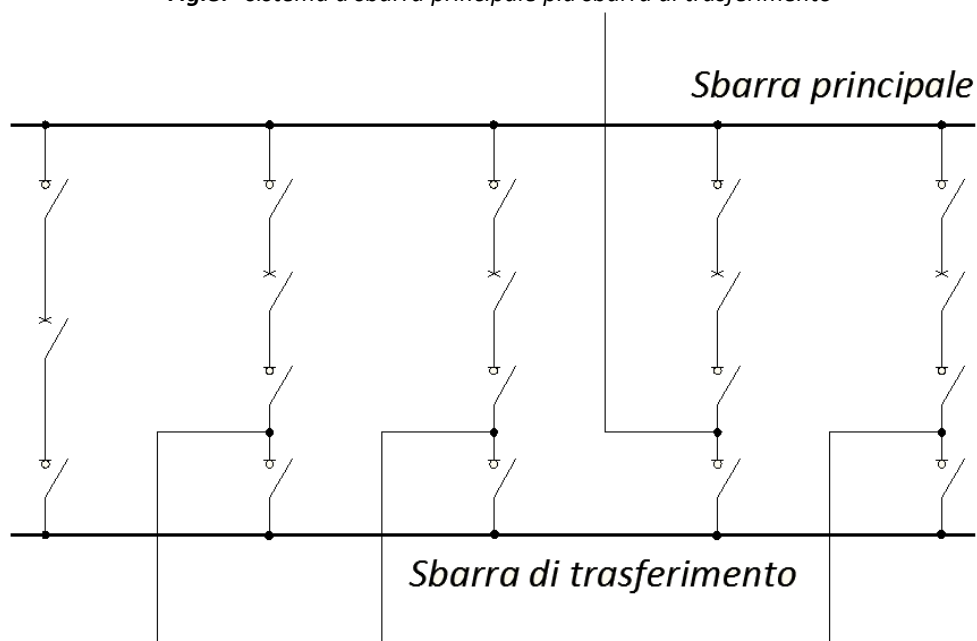


4.2 Sistema a sbarra principale più sbarra di trasferimento

Questo tipo di configurazione, riportata in *Fig.8*, aggiunge una sbarra di trasferimento alla configurazione a sbarra singola. Necessita di un interruttore supplementare (congiuntore) posto sulla linea di allacciamento

fra le due sbarre. Quando un interruttore deve essere messo fuori servizio per manutenzione, l'interruttore congiunture permette di mantenere in ogni caso la linea energizzata. Questo deve essere in grado di proteggere le linee di trasmissione o le eventuali fonti di generazione, anche se non viene ritenuto una soluzione soddisfacente a causa della scarsa selettività delle sue protezioni. Una valida alternativa consiste nel collegare le protezioni di linea e di sbarra al trasformatore di corrente posto direttamente sulle linee piuttosto che sugli interruttori. Per questo motivo, i relè di protezione di una linea con interruttore fuori servizio non devono essere rimossi se questa viene alimentata tramite l'interruttore di connessione. Da notare che se il sistema di sbarre principale viene messo in manutenzione, non rimane alcun interruttore a protezione delle linee. Il fallimento di un qualsiasi interruttore o un guasto nel sistema principale può causare la perdita completa di servizio della sottostazione. Inoltre, a causa della sua relativa complessità, un errore dell'operatore durante le operazioni di manovra nel commutare da un sistema di sbarre all'altro può portare ad una possibile interruzione. Nonostante il basso costo e il diffuso utilizzo di questa configurazione, essa potrebbe non fornire un alto grado di affidabilità e di flessibilità come richiesto.

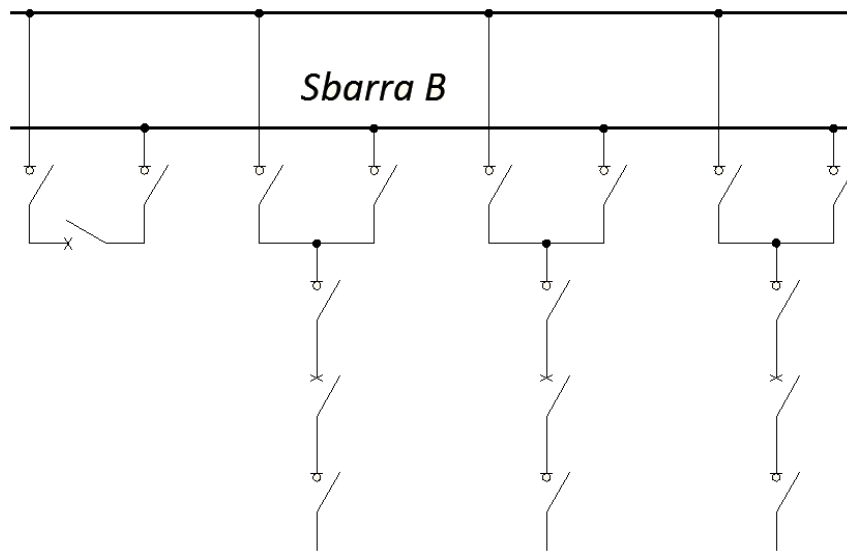
Fig.8: sistema a sbarra principale più sbarra di trasferimento



4.3 Sistema a doppia sbarra con un unico interruttore

Questa configurazione utilizza due sistemi di sbarre principali e prevede quindi due sezionatori di manovra per ogni linea, ma con un unico interruttore su ognuna, nell'allacciamento con il sistema principale (Fig.X9). Quando l'interruttore congiunture che collega i due sistemi è chiuso, permette il trasferimento di una linea da un sistema di sbarre all'altro mantenendola in esercizio tramite i relativi sezionatori di manovra. In questa configurazione, le linee possono essere collegate tutte ad un'unica sbarra o, ad esempio, divise sui due sistemi; Nel primo scenario, un eventuale guasto comporterebbe il disservizio di tutta la sottostazione, mentre nel secondo, solo della metà. In molti casi le linee vengono alimentate da entrambi i sistemi di sbarra e pertanto, l'interruttore di collegamento risulta in posizione di chiusura. Per questa situazione sono richieste delle protezioni estremamente selettive per prevenire la completa perdita della sottostazione a causa di un guasto su di uno dei due sistemi. Le operazioni di manovra diventano abbastanza complesse, aumentando possibilità di errore da parte di un operatore, che comporterebbe un possibile disservizio. La configurazione a doppia sbarra con singolo interruttore è pertanto relativamente scarsa in termini di affidabilità e non viene perciò utilizzata per sottostazioni di elevata importanza.

Fig.9: sistema a doppia sbarra con un solo interruttore
Sbarra A

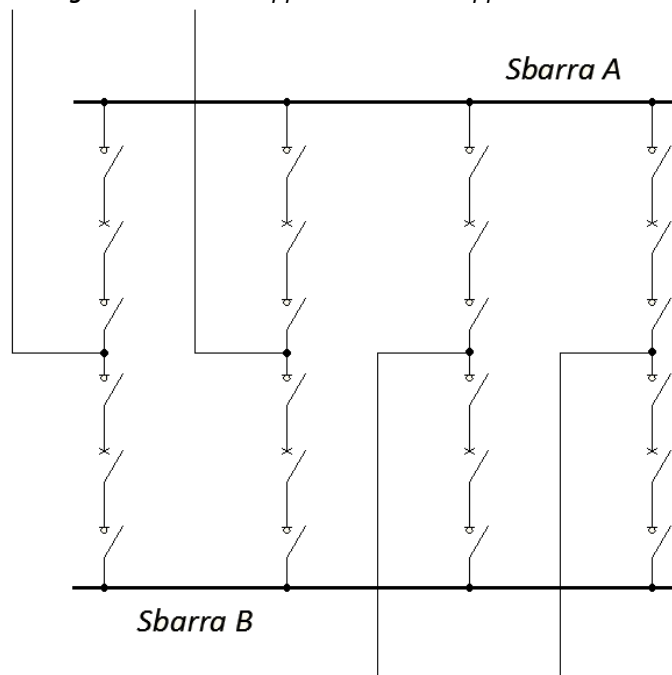


4.4 Sistema a doppia sbarra con doppio interruttore

In questa configurazione, ogni linea è dotata di due interruttori, rispettivamente posti fra questa ed i due sistemi di sbarre come mostrato in Fig.10. Nel normale funzionamento, ogni linea è connessa ad entrambi i sistemi; in alcuni casi, come per la configurazione precedente, le linee potrebbero essere invece divise fra i sistemi. In questo scenario, un qualsiasi tipo di guasto che porterebbe ad un possibile disservizio di un intero sistema, può essere corretto grazie ad un rapido intervento.

La posizione fisica dei due sistemi di sbarre deve essere scelta in modo tale da minimizzare possibili accoppiamenti. L'uso di due interruttori per linea aumenta i costi di installazione e manutenzione, tuttavia, non comporta un notevole aumento di affidabilità.

Fig.10: sistema a doppia sbarra con doppio interruttore

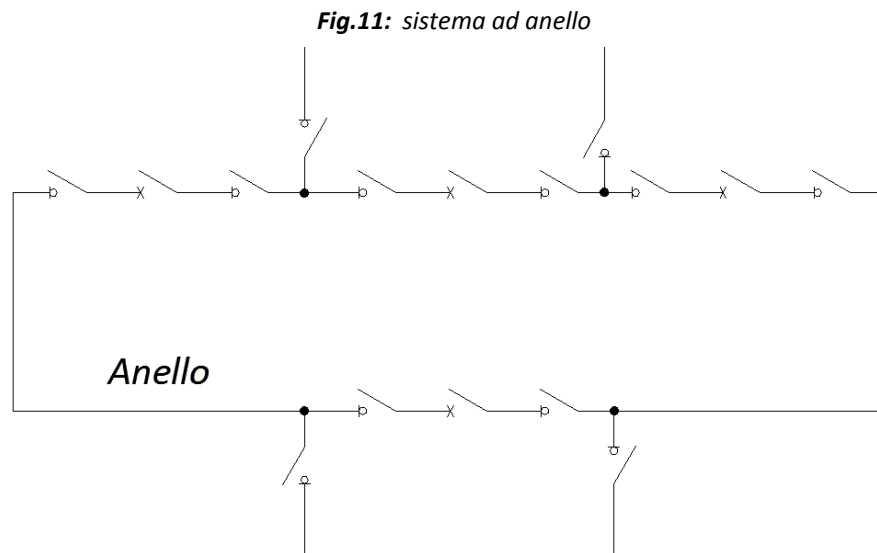


4.5 Sistema di sbarre ad anello

In questa configurazione, gli interruttori sono collegati in serie a formare un anello e le linee sono poste fra questi, come mostrato in Fig.11. Risultano quindi tanti interruttori quante sono le linee. Durante il normale funzionamento, tutti gli interruttori sono in posizione di chiusura. In presenza di un guasto su una linea, si ha l'intervento dei due interruttori ad essa più vicini; in caso uno o entrambi falliscano, si avrebbe l'intervento dell'interruttore successivo. Con questa configurazione si riesce quindi

Durante la manutenzione di un qualsiasi componente su di una linea, le altre rimangono comunque in servizio nonostante la rottura dell'anello. Le linee devono essere alternate fra alimentazione e trasmissione. Per un'interruzione di linea prolungata, in sezionatore di manovra relativo viene aperto permettendo così la chiusura dell'anello. Non sono necessarie modifiche delle protezioni nel passaggio ad una qualsiasi delle possibili configurazioni.

La soluzione ad anello risulta quindi relativamente economica, affidabile e flessibile, ed è per questo che è considerata una buona soluzione fino ad un limite massimo di cinque linee. L'intervento delle protezioni e la richiusura automatica richiedono comunque un grado di complessità maggiore rispetto alle configurazioni precedenti. È pratica comune costruire sottostazioni primarie di questa tipologia, anche con più di cinque uscite, trasformandolo poi nella configurazione a seguire.

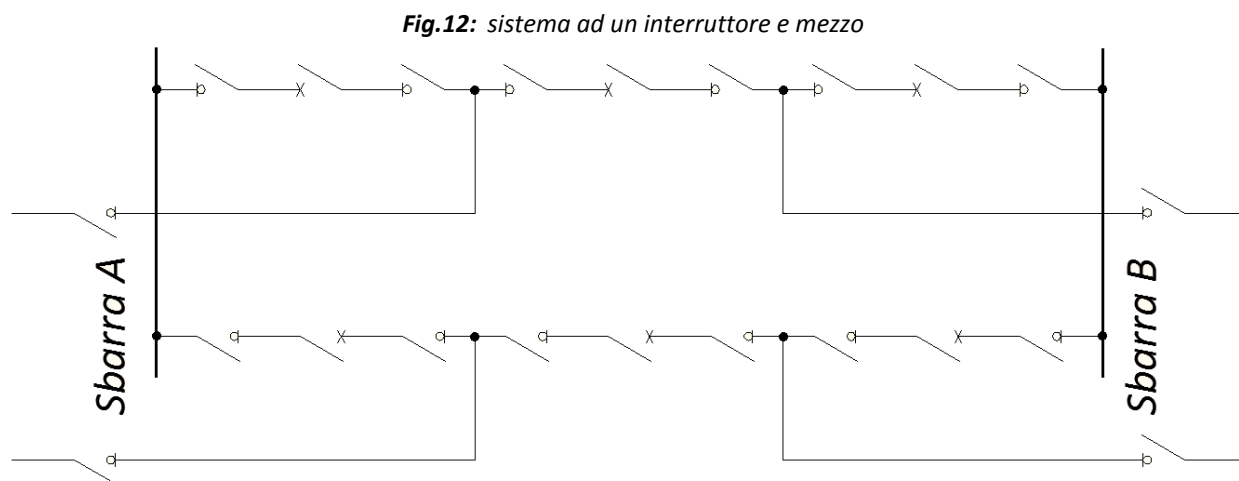


4.6 Configurazione ad un interruttore e mezzo

Questa configurazione, a volte detta anche a tre interruttori, prevede la disposizione di appunto tre interruttori in serie fra i due sistemi di sbarre principali, come mostrato in Fig.12. Fra questi sono collegate alternativamente due linee ottenendo così in valore di un interruttore e mezzo per linea da cui il nome. Per aggiungere altri allacciamenti, basta quindi ripetere questa disposizione fra i due sistemi di sbarre.

In condizioni operative normali, tutti gli interruttori sono in posizione di chiusura ed entrambe le sbarre sono quindi alimentate. In presenza di un guasto su una linea, si ha l'apertura dei due interruttori associati; se uno di questi dovesse fallire, si avrebbe l'apertura dell'interruttore successivo: se questo risulta essere l'interruttore di collegamento diretto al sistema di sbarre, il suo intervento non comporta alcun disservizio ulteriore. Entrambi i sistemi di sbarra possono essere messi fuori servizio in qualsiasi momento, senza precludere la perdita di servizio. Con le linee di alimentazione collegati in maniera opposta ai carichi, si può inoltre operare con entrambi i sistemi di sbarra fuori servizio. Questa configurazione permette anche di effettuare manutenzione su di un interruttore, mantenendo le linee energizzate e senza apportare modifiche alle protezioni, ma semplicemente intervenendo con una semplice manovra di sezionamento.

Questa tipologia di sistema presenta tuttavia un costo maggiore delle precedenti, ad eccezione del sistema a doppia sbarra con doppio interruttore e le protezioni ed i sistemi di richiusura automatica risultano ancora più complessi. Tuttavia, questa configurazione è superiore in termini di flessibilità, affidabilità e sicurezza.



4.7 Confronto delle diverse configurazioni

Dopo aver discusso le diverse tipologie di configurazioni, evidenziandone i pro e i contro, la base di confronto ora da utilizzare resta la giustificazione economica di un particolare grado di affidabilità. La determinazione di quest'ultimo comporta una valutazione delle condizioni d'impiego previste e la continuità del servizio richiesto dalle utenze da servire. Nella Tab.2 a seguire è riportata una sintesi delle caratteristiche dei vari arrangiamenti.

Tab.2: sintesi delle caratteristiche delle varie configurazioni di sbarra

Tipo di configurazione	Vantaggi	Svantaggi
Sistema a singola sbarra	1. Basso costo	<ol style="list-style-type: none"> 1. Un fallimento di un qualsiasi interruttore comporta il disservizio di tutta la sottostazione 2. Difficoltà di praticare manutenzione 3. In caso di estensione del sito è necessario in completo isolamento dell'impianto 4. Si può utilizzare solo con linee che possono essere interrotte o alimentate in altro modo
Sistema a sbarra principale più sbarra di trasferimento	<ol style="list-style-type: none"> 1. Basso costo iniziale e finale 2. Ogni interruttore può essere messo in manutenzione 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Richiede un interruttore per congiungere i due sistemi di sbarre

		<ol style="list-style-type: none"> 2. L'interruzione può risultare complicata qualora un interruttore di linea sia in manutenzione 3. Un fallimento di un qualsiasi interruttore comporta il disservizio di tutta la sottostazione
Sistema a doppia sbarra con singolo interruttore	<ol style="list-style-type: none"> 1. Entrambe le sbarre possono essere isolate per manutenzione 2. Con entrambe le sbarre in esercizio, permette una buona flessibilità 3. È possibile trasferire velocemente una linea da una sbarra all'altra servendosi dell'interruttore di collegamento sbarre e degli appositi sezionatori di manovra 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Richiede un interruttore per congiungere i due sistemi di sbarre 2. Richiede quattro sezionatori di manovra per ogni linea 3. Alta possibilità di guasto di sbarra 4. Se le linee sono collegate ad un'unica sbarra, l'intervento di una protezione potrebbe causare il completo disservizio 5. Il fallimento di un interruttore provocherebbe il disservizio del relativo sistema 6. Il fallimento dell'interruttore di collegamento dei sistemi comporterebbe il completo disservizio
Sistema a doppia sbarra con doppio interruttore	<ol style="list-style-type: none"> 1. Alta affidabilità 2. Ogni linea dispone di due interruttori 3. Ha flessibilità tale da permettere alle linee di alimentazione di rimanere connesse ad entrambi i sistemi di sbarre 4. Ogni interruttore può essere messo in manutenzione 	<ol style="list-style-type: none"> 1. È il più costoso 2. In caso di guasto, se le linee non sono collegate ad entrambi i sistemi, metà delle linee potrebbero essere messe in disservizio
Sistema ad anello	<ol style="list-style-type: none"> 1. Basso costo iniziale e finale 2. Flessibilità nelle operazioni di manutenzione 3. Ogni interruttore può essere messo in manutenzione 4. Richiede solo un interruttore per linea 5. Non necessita di una sistema di sbarre principale 6. Ogni linea è alimentata da due interruttori 7. Tutte le commutazioni sono effettuate con interruttori 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Se si verifica un guasto durante il periodo di manutenzione di un interruttore, l'anello viene sezionato in due parti 2. La richiusura automatica e le protezioni di linea sono piuttosto complesse 3. Se viene utilizzata una singola serie di relè, una linea può essere messa fuori servizio mantenendone attive le protezioni (aspetto comune a tutte le

		<p>configurazioni)</p> <p>4. Richiede misurazioni di potenziale su tutti i circuiti poiché non vi è alcun punto di potenziale di riferimento preciso</p> <p>5. Il fallimento di un interruttore durante un guasto su una linea, causa la messa in disservizio della linea adiacente</p>
<p>Configurazione ad un interruttore e mezzo</p>	<p>1. È la configurazione più flessibile</p> <p>2. Ha un'alta affidabilità</p> <p>3. Il fallimento di un interruttore adiacente ad uno dei due sistemi di sbarre comporta il disservizio di un'unica linea</p> <p>4. Tutte le commutazioni sono effettuate con interruttori</p> <p>5. Semplicità di commutazione</p> <p>6. Le sbarre possono essere messe in manutenzione per un tempo prolungato senza causare disservizi</p> <p>7. Un guasto sulle sbarre non causa disservizi</p>	<p>1. Richiede un interruttore e mezzo per ogni linea</p> <p>2. Protezioni e richiusura automatica sono in qualche modo collegate in quanto l'interruttore centrale deve rispondere ad una delle sue due linee associate</p>

5 **UNO SGUARDO PROGETTUALE/IMPIANTISTICO AI DIMENSIONAMENTI TIPICI DELLE SOTTOSTAZIONI**

Le sottostazioni primarie (AT-AAT) sono solitamente dotate di configurazioni multi sbarra al fine di garantire una facile gestione dei carichi in caso di necessità. Questi possono allacciarsi alle diverse sbarre grazie a dei sezionatori di manovra i quali devono avere delle capacità di interruzione che verranno in seguito discusse.

Il sistema di sbarre ed i collegamenti al di sotto di esso sono di norma realizzati con profilo tubolare in lega di alluminio, mentre i collegamenti tra le apparecchiature sono realizzati in corda. Le giunzioni lungo il sistema di sbarre devono consentire le normali espansioni e contrazioni dei tubi previste dovute alla variazione termica e inoltre non dovranno trasmettere, durante le loro oscillazioni, alcun momento sugli isolatori portanti del sistema.

Nella *Tab.3* a seguire sono elencati i diametri normalmente utilizzati per le sbarre ed i collegamenti delle stazioni elettriche AT.

Tab.3: dimensionamento sbarre e collegamenti

	diametro interno [mm]	diametro esterno [mm]
	SBARRE	
132-150 kV	86	100
220 kV	140	150
380 kV	207	220
	COLLEGAMENTI SOTTO LE SBARRE	
132-150 kV	86	100
220 kV	86	100
380 kV	86 – 80 per stallo parallelo	100
	COLLEGAMENTI DI STALLO TRA LE APPARECCHIATURE	
132-150 kV	1 corda di alluminio da 36mm per lo stallo linea, 2 corde di alluminio da 36 mm per lo stallo parallelo e trasformatore	
220 kV	1 corda di alluminio da 36mm per lo stallo linea e lo stallo trasformatore, 2 corde di alluminio da 36 mm per lo stallo parallelo.	
380 kV	2 corde di alluminio da 36mm per lo stallo linea e lo stallo trasformatore, 3 corde di alluminio da 36 mm per lo stallo parallelo.	

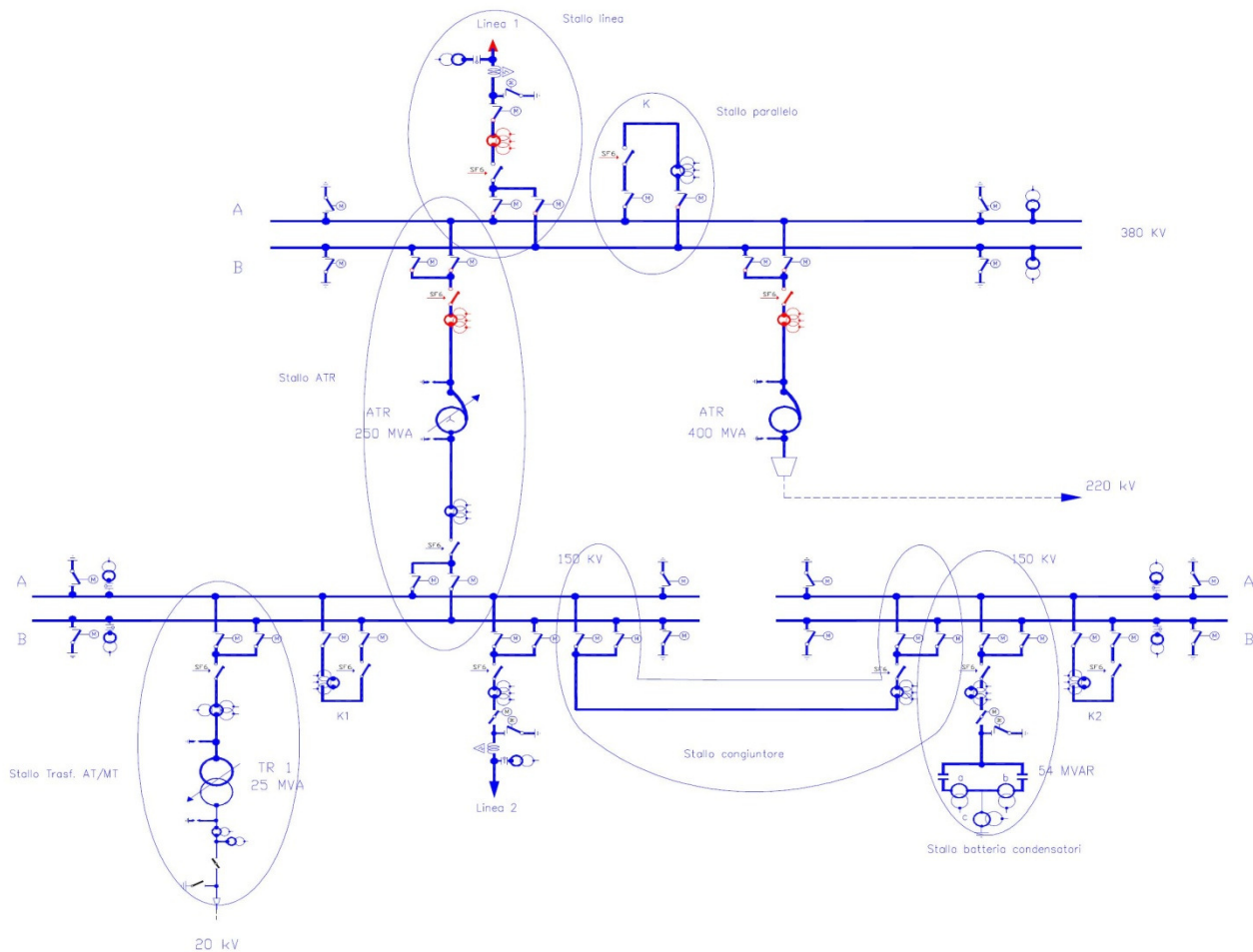
Solitamente, ove i vincoli di terreno lo consentano, si devono evitare i sovrappassi sulle sbarre dei conduttori attivi AT al fine di limitare gli accoppiamenti magnetici. Questo preclude il fatto che gli interruttori e le altre apparecchiature AT (sezionatori, trasformatori di misura, ecc.) sono sempre disposti dallo stesso lato del rispettivo arrivo linea e/o di installazione degli autotrasformatori.

Gli stalli possono essere suddivisi secondo tipologia, ovvero:

- stallo tipo “linea” (arrivo linea AT-AAT);
- stallo tipo “ATR” (autotrasformatore: congiunge 2 sistemi di sbarre AT a tensioni differenti);
- stallo tipo “parallelo sbarre” (mette in parallelo due sistemi di sbarre);
- stallo tipo “congiuntore sbarre” (congiunge due sistemi di sbarre);
- stallo tipo “trasformatore AT/MT” (alimenta un trasformatore AT/MT);
- stallo tipo “condensatore di rifasamento” (connette un gruppo di condensatori di rifasamento al sistema di sbarre).

Nell'esempio di progetto a seguire (Fig.13) sono evidenziate le diverse tipologie sopra elencate.

Fig.13: esempio di progetto di sottostazione



Genericamente, la loro disposizione dipende dal loro utilizzo. Ad esempio, per connessioni di utenza, la soluzione impiantistica prevede lo stallo utente da un lato e gli stalli linea RTN dal lato opposto; allo stesso modo, per stazioni di trasformazione, lo stallo autotrasformatore è posizionato normalmente da un lato, mentre gli altri stalli linea sono posizionati dall'altro.

La disposizione più adottata per il parallelo di più sbarre, per gli stessi motivi, è quella ad "U" (senza sovrappasso); da notare infatti che tale soluzione consente la collocazione generica dei conduttori solamente su due livelli: non è infatti ammessa la soluzione impiantistica a stalli contrapposti.

Per motivi inerenti la sicurezza (durante le operazioni di manutenzione sui sezionatori di sbarra), la chiara visibilità dell'impianto nonché il risparmio di spazi in senso longitudinale, la tipologia dei sezionatori di sbarra più utilizzata è quella verticale. Ogni terna di sbarre deve essere dotata di due terne di sezionatori di terra, disposte sulle estremità terminali delle sbarre stesse.

Le distanze fra due differenti sistemi di sbarre sono in genere determinate dalla possibilità di operare manutenzione alle apparecchiature afferenti ad uno, con l'altro in esercizio. La Tab.4 seguente illustra le distanze di progetto consigliate dei vari componenti dell'impianto.

Tab.4: distanze di progetto (principali)

	Sez.380 kV (m)	Sez.220 kV (m)	Sez.132/150 kV (m)
PRINCIPALI DISTANZE DI PROGETTO			
<i>Distanza tra le fasi per le sbarre, le apparecchiature e i conduttori in sorpasso (se del caso)</i>	5,50	3,20	2,20
<i>Distanza tra le fasi per l'amarro linee</i>	6,25	3,50	3,00
<i>Larghezza degli stalli</i>	22,00	14,00	11,00
<i>Larghezza dello stallo dell'interruttore di parallelo (del tipo ad U senza sorpasso sbarre)</i>	44,00	28,00	22,00
<i>Distanza tra le fasi adiacenti di due sistemi di sbarre</i>	11,00	7,60	6,00
<i>Altezza dei conduttori di stallo (asse morsetti sezionatori di sbarra)</i>	6,50	5,30	4,50
<i>Quota asse sbarre</i>	11,80	9,30	7,50
<i>Quota amarro linee (ad interruttori "sfalsati")</i>	14,00	12,00	9,00
<i>Sbalzo sbarre per i TV di sbarra (***)</i>	5,50	4,00	3,30
<i>Sbalzo senza TV di sbarra</i>	4,00	3,00	2,00
<i>Distanza tra l'asse del TV di sbarra ed il cordolo della strada</i>	4,70	3,00	2,00

Tab.3 - Distanze di progetto (stallo)

	Sez.380 kV (m)	Sez.220 kV (m)	Sez.132/150 kV (m)
DISTANZE LONGITUDINALI TRA LE PRINCIPALI APPARECCHIATURE AT DI STALLO			
<i>Distanza tra le sbarre e l'interruttore</i>	10,00	7,00	6,50
<i>Distanza tra l'interruttore ed il TA (*)</i>	10,00	8,00	7,50
<i>Distanza tra il TA ed il sezionatore di linea (*)</i>	5,10	5,00	3,50
<i>Distanze tra il sezionatore di linea ed il TV (*)</i>	3,80	5,00	3,00
<i>Distanza tra il TV ed il traliccio/portale di amarro (**)</i>	-	-	4,50

(*): le distanze sono da intendersi tra le mezzerie delle apparecchiature.

(**): il TV ed il traliccio possono anche essere allineati.

(***): distanza da intendersi tra l'asse dell'ultimo sostegno e l'asse del TV di sbarra.

6 TEORIA DELL'INTERRUZIONE DELLE CORRENTI DI SBARRA

Come visto in precedenza, in una sottostazione AT si richiede che ogni linea possa allacciarsi sui diversi sistemi di sbarre che l'impianto può presentare. I motivi per cui questa operazione viene eseguita sono solitamente di due tipi, quali la manutenzione del sistema stesso o la distribuzione di carichi in modo tale da non superare i valori nominali dell'impianto.

Pertanto, si necessita di una commutazione, ovvero trasferire il flussi di corrente da un percorso che si vuole sezionare ad uno posto in parallelo.

Nelle sottostazioni questo tipo di commutazione è detta, oltre che "commutazione delle correnti di sbarra" ("bus-transfer"), "commutazione delle correnti d'anello" in quanto la configurazione che l'impianto assume in questa operazione è proprio quella di un anello (vedi fig.2). Il campo di valori di corrente a cui ci si riferisce va da un massimo di 1600 A, che è possibile trovare appunto tra le sbarre di una sottostazione, ad un minimo di qualche centinaio di Ampère, fra le linee di trasmissione.

Come già discusso, la pratica industriale è quella di assegnare tale compito al sezionatore di manovra; nel caso in cui, invece, l'anello interessi linee in cavo o trasformatori, si affida il tutto ad un interruttore.

Esaminiamo ora le operazioni che si susseguono durante la commutazione di una singola fase da un sistema di sbarre A ad uno B (analogo per gli altri poli).

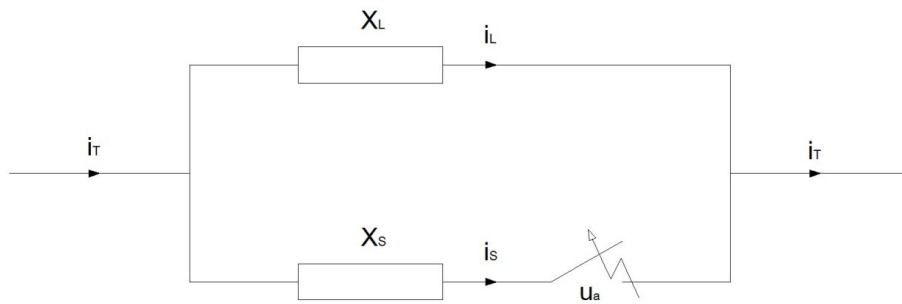
1. Come prima cosa è necessario porre in parallelo i due sistemi di sbarre, operazione che viene eseguita tramite uno stallo apposito ("stallo parallelo" – vedere Fig.13); questo porta quindi le due sbarre allo stesso potenziale. Lo stallo parallelo è dotato di una protezione normalmente fuori servizio ma disponibile nelle situazioni di emergenza in sostituzione di protezioni principali indisponibili per un qualsiasi motivo. Esempio tipico, la protezione distanziometrica che può essere utilizzata come protezione di linea o di trasformatore tramite opportuni assetti di stazione.
2. Successivamente si chiude il sezionatore di manovra che collega la linea interessata alla sbarra B, sulla quale vogliamo trasferirla.
3. Fatto questo, si procede aprendo il sezionatore di manovra che collega la linea alla sbarra di partenza A.
4. È ora possibile disinserire il parallelo delle due sbarre.

L'anello creato nella commutazione concatena i flussi in gioco nell'impianto stesso, producendo una differenza di potenziale (massima di 300V) sui contatti dei sezionatori, rispettivamente prima in chiusura (sul sezionatore B) e poi in apertura (sul sezionatore A). Considerando questo e l'entità delle correnti in gioco (1600A) durante la commutazione singola dei dispositivi, la potenza che fluisce provoca la formazione di un arco che danneggia i contatti stessi. Pertanto la soluzione che il settore adotta è quella di fornire il dispositivo, su richiesta del cliente, di una coppia di contatti ausiliari-sacrificali atti ad assorbire il fenomeno erosivo dell'arco, garantendo l'integrità dei contatti principali che risultano così sottoposti alla sola usura meccanica.

Per analizzare da un punto di vista teorico la commutazione di sbarra, ci si può riferire al circuito equivalente riportato in Fig.14. Sulla base di quest'ultimo, i parametri da considerare sono:

- la corrente iniziale I_s sul trasformatore
- la tensione d'arco u_a
- la serie ed il parallelo delle impedenze X_s e X_L ; (X_s+X_L) = impedenza dell'anello
- la tensione di ristabilimento attraverso il sezionatore X_{L_T}

Fig.14: modello del circuito in commutazione



L'equazione caratteristica ricavabile è:

$$L_L \frac{di_L}{dt} = L_S \frac{di_S}{dt} + u_a \quad \dots \text{dove} \dots \quad L_L = \frac{X_L}{\omega} \text{ e } L_S = \frac{X_S}{\omega} .$$

Potendo esprimere la corrente i_T come $i_T = \hat{I}_T \sin \omega t = i_S + i_L$, l'equazione diventa...

$$L_L \frac{d(i_T - i_S)}{dt} = L_S \frac{di_S}{dt} + u_a \quad \longrightarrow \quad L_L \left[\frac{d(i_T)}{dt} - \frac{d(i_S)}{dt} \right] = L_S \frac{di_S}{dt} + u_a$$

$$\omega L_L \hat{I}_T \cos \omega t = (L_S + L_L) \frac{di_S}{dt} + u_a$$

...da cui possiamo concludere che la tensione d'arco u_a è funzione della corrente i_S . $\longrightarrow u_a = f(i_S)$

Studi in tal proposito sono stati svolti al *British Columbia*, in Canada nel corso dell'anno accademico 1999-2000, con prove su sezionatori da 230[kV] e 25[kV] al *Powertech Laboratory Inc*, per un totale di 250 campionamenti. Qui, a differenza dei metodi precedenti, nei quali si ipotizzava una relazione solo fra i_S e l'impedenza totale dell'anello ($X_L + X_S$), si è considerato più opportuno valutare una possibile relazione fra questi e il tempo di interruzione t_a , ossia il tempo che l'arco impiega (per un dato valore di i_S) ad aumentare la sua caduta a valori prossimi a $i_S(X_L + X_S)$, tempo che dipende perciò dai valori di X_L ed X_S ; l'approccio precedentemente adottato sfida infatti il prudente concetto che la corrente deve essere interrotta mentre il contatto mobile è ancora in movimento: il successo dell'interruzione di corrente viene di fatto definito in questo modo. Tornando all'analisi del circuito, possiamo quindi dire che la corrente iniziale i_S si annulla quando la tensione d'arco si avvicina al valore $i_S(X_L + X_S)$ e la tensione di apertura risulta pari a $X_L(i_S + i_L)$.

È importante che il tempo di permanenza d'arco t_a sia il più breve possibile in quanto ciò non solo assicura l'interruzione di corrente mentre il dispositivo è in movimento, ma fornisce anche un grado di controllo d'arco tale da assicurare che esso sia estinto prima che abbia l'opportunità di propagarsi, limitando ogni possibile interazione con operatori (nel caso, ad esempio, di un'apertura manuale) o tra le fasi; importante quest'ultima dal momento che la prova viene eseguita su un singolo polo. Inoltre, un tempo t_a breve serve ad evitare ogni influenza negativa data dalle condizioni atmosferiche.

7 STORIA DEL BUS-TRASFERT

7.1 Le prime valutazioni

Le prime informazioni relative all'interruzione di corrente utilizzando sezionatori in aria provengono quasi esclusivamente dal Nord America. Questo è dovuto probabilmente alla scelta, in tale paese rispetto agli altri, di adibire da sempre a questi dispositivi tale scopo.

Tuttavia, dati rilevanti sono anche quelli relativi al comportamento dell'arco, provenienti in questo caso non solo dal Nord America, ma anche da Europa e Giappone.

L'interruzione di corrente con sezionatore in aria è riferita a precise tipologie di corrente, quali:

- le correnti di magnetizzazione dei TR
- le correnti capacitive
- le correnti d'anello

In tutte le tipologie, l'interruzione è caratterizzata dal fenomeno dell'arco elettrico.

In primis, diamo uno sguardo alle valutazioni sull'utilizzo del sezionatore in aria per l'interruzione di corrente fatte nel Nord America da alcuni enti, quali la AIEE (*American Institute of Electrical Engineers*, in seguito rinominato IEEE) nel 1949, la IEEE nel 1962 e l'IREQ (*Istituto de recherche d'Hydro-Quebec*) nel 1979.

Nella prima è stata definita una situazione di funzionamento ottimale sulla base delle opinioni di una cinquantina di ricercatori, che si sono così espressi: tredici hanno posto come obiettivo di successo il raggiungimento dell'estinzione d'arco senza l'intervento di protezioni, mentre la rimanente maggioranza ha stabilito il raggiungimento dell'estinzione d'arco prima che il sezionatore abbia completato la sua corsa di apertura.

Ulteriori osservazioni spingevano poi ad una più ampia distanza interpolare, all'utilizzo di sezionatori ad apertura verticale e di meccanismi operativi che consentissero alle lame di aprire rapidamente.

Le successive ricerche svolte dall'IEEE 1962 risultano essere più complete; comprendono infatti valutazioni sull'interruzione delle correnti ad anello e riconoscono l'uso di dispositivi ausiliari di estinzione d'arco sviluppati a partire dal 1950. Questi ultimi dispositivi spaziavano da interruttori in vuoto e dispositivi a rapida interruzione (a frusta) ad un dispositivo a getto sull'arco che rilasciavano nell'aria N_2 o gas SF_6 . Qui è stato chiesto a settantuno ricercatori se nelle prove eseguite avessero seguito qualche procedura standard; la maggior parte riferì che non esisteva nessuna guida a riguardo, mentre solo pochi si basarono sull'esperienza e sull'elaborato di Andrews et al (interessante questo in quanto spesso citato come guida base del settore).

L'ultima valutazione, ovvero quella condotta dall'IREQ (*Istituto de recherche d'Hydro-Quebec*), è stata in parte voluta dalla CEA (*Canadian Electrical Association*); si rivolge agli enti di distribuzione canadesi per un totale di sole dodici responsi. Questa ha confermato l'uso di sezionatori da parte di tutti i soggetti al fine delle interruzioni ed ha mostrato inoltre un aumento nell'uso dei dispositivi ausiliari di interruzione.

7.2 Il primo studio sperimentale

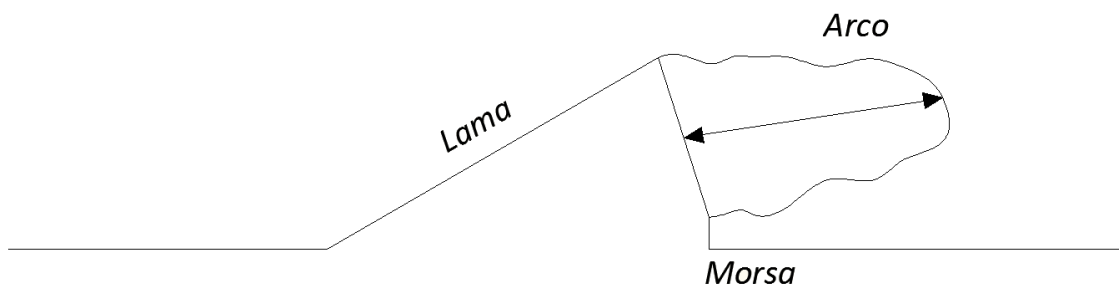
Il primo studio sperimentale sulle interruzioni di corrente realizzate con sezionatori è stato effettuato da Andrews, Janes e Anderson della Public Service Company del Nord Illinois nel 1940.

L'elaborato lascia ampio spazio alle interruzioni nelle commutazioni delle correnti d'anello, problematica tipica delle sottostazioni AT. Ricordiamo che per commutazione si intende il trasferimento di una corrente da un circuito da sezionare ad un altro ad esso parallelo. La velocità con cui questo avviene dipende dalle impedenze dell'anello e dalla velocità con cui la tensione d'arco si accumula. L'arco viene allungato dal movimento della lama del sezionatore e dagli effetti termici ed elettromagnetici, il tutto mentre la corrente cala a causa del passaggio al percorso parallelo.

L'intervallo di correnti valutate da Andrew et al va da 56A a 312 A con tensioni sui sezionatori (in posizione di apertura) da 1kV a 7,6 kV. Sono stati registrati archi con lunghezze fino a 12m, archi liberi di propagarsi fino all'autoestinzione.

Andrews et al vede l'arco in evoluzione come l'elemento di controllo d'interruzione di corrente utilizzato dai sezionatori. Il suo elaborato porta ad una relazione tra corrente, tensione, lunghezza d'arco e scostamento d'arco, dove quest'ultimo è definito come la distanza tra il punto medio fra le estremità dell'arco e il suo punto più remoto al momento della sua "lunghezza massima" come illustrato nella Fig.14.

Fig.15: scostamento d'arco



Il tutto si basa su due ipotesi:

1. La lunghezza d'arco è proporzionale alla tensione
2. Un arco non confinato dovrebbe sempre estinguersi se le condizioni consentono la necessaria crescita ad una lunghezza critica e lo spazio elettrodico risulta ampio abbastanza da impedirne la riaccensione.

Queste ipotesi sono giustificate dal lavoro svolto da Ackermann riguardante gli archi sulle linee di trasmissione di potenza. Ackermann spiega infatti la procedura di estinzione dell'arco come segue: l'aumento in lunghezza corrisponde ad un aumento di resistenza e pertanto ad una diminuzione di densità di corrente fino a che l'arco non raggiunge una lunghezza critica alla quale si auto estingue.

Le grandezze considerate sono:

- la corrente all'inizio del periodo di formazione dell'arco I
- la tensione fra i contatti subito dopo l'estinzione dell'arco U_{oc}
- la lunghezza dell'arco, nel suo valore massimo

L'approccio usato da Andrew et al non prevede un'analisi statistica, ma la determinazione di una fascia limite che comprende la *massima probabile lunghezza di propagazione d'arco* (*Limit of Probable Reach*). Per correnti superiori a 100A, questo limite è dato dalla seguente relazione.

$$LPR = 5.03 \cdot U_{oc} \cdot I_s = [\text{mm}] \quad \longrightarrow \quad LPR = 5.03 \cdot Z I_s^2 \cdot 10^{-3} = [\text{mm}]$$

...ricordando che la tensione che si presenta fra i contatti del dispositivo subito dopo l'estinzione d'arco è...

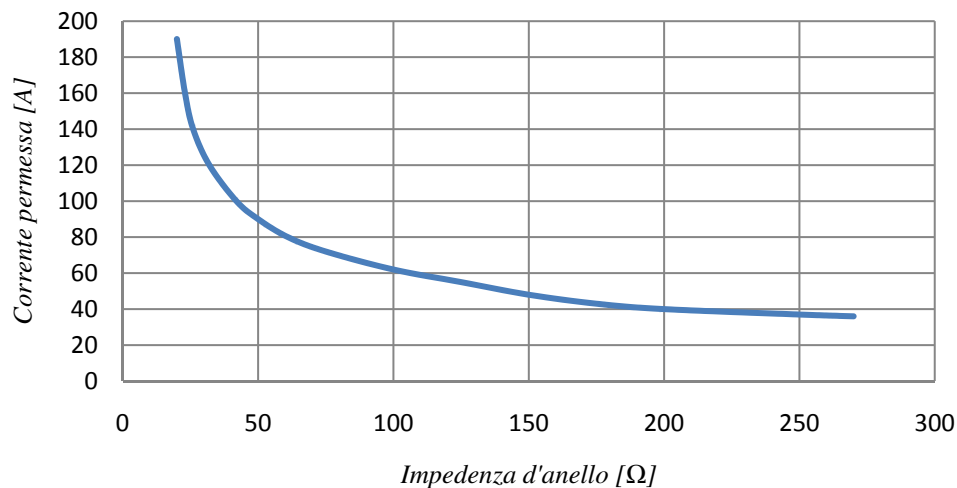
$$U_{oc} = Z I_s \cdot 10^{-3} = [\text{kV}]$$

...dove Z è l'impedenza totale dell'anello ed I_s la corrente iniziale che fluisce nel sezionatore. Per correnti inferiori a 100A, si utilizza invece la seguente relazione:

$$LPR = 5.03 \cdot Z I_s = [\text{mm}]$$

McNulty usò tali equazioni per scrivere una guida sulle commutazioni ad anello. I calcoli da esso eseguiti portarono all'assunzione di una distanza minima di 1m nei sistemi con tensioni da 23 kV fino a 69 kV e di 1.83 m per sistemi a 138 kV. Non viene invece data nessuna indicazione sull'estensione dell'arco. Il *Graf.1* riporta i valori di correnti permessi nelle commutazioni in sistemi a 138 kV basandosi sulle conclusioni tratte da McNulty.

Graf.1: valori di corrente permessi in funzione dell'impedenza dell'anello per sistemi a 138 kV stabiliti da McNulty
 $I = f(Z)$



Shah e Ward descrivono invece un caso di fallimento nel tentativo di commutazione in un sistema a 34.5 kV fra linee di distribuzione; gli autori offrono un'analisi matematica del caso che ha però poco o nessun merito, come indicato da Harner: l'anello in questione comprendeva infatti due trasformatori.

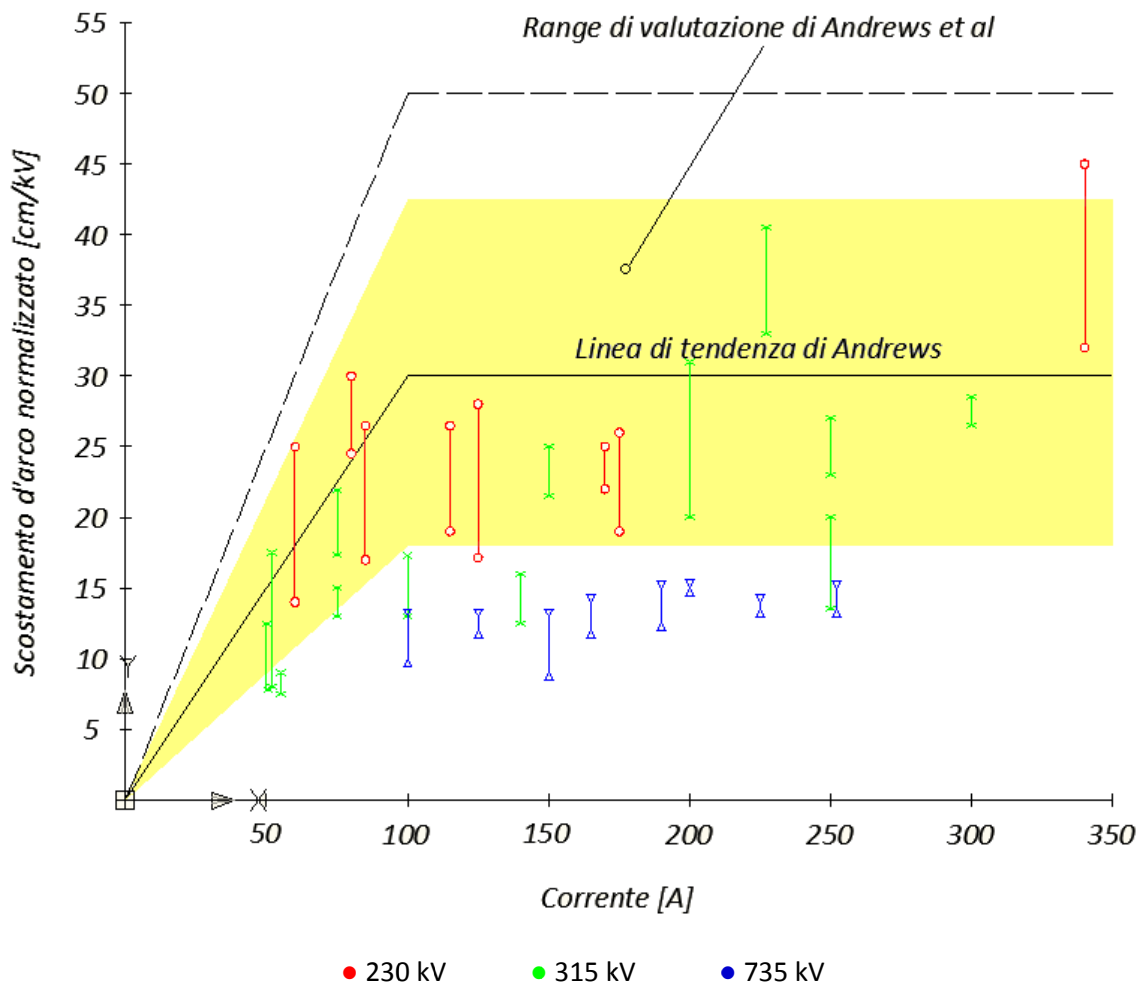
Studi effettuati dalla CEA (*Canadian Electrical Association*) stabiliscono che per i sistemi standard, l'estensione d'arco è ben al di sotto dell'LPR (*Limit of Probable Reach*) ricavato da Andrew et al, come mostrato nel *Graf.2*. In questo caso però, sembra che i test siano stati effettuati simulando un circuito ad anello reale, senza tenere quindi correttamente conto della tensione di ristabilimento del circuito.

Nei dispositivi in prova utilizzati, si sono riscontrati danni dovuti a bruciature sui contatti (che implica perdita di materiale), raggiungendo la fusione di quest'ultimi per correnti di prova superiori a 200 A. In conclusione, tali studi suggeriscono che la commutazione d'anello si basa sui risultati ottenuti da Andrew et al ma limitatamente ad un massimo di corrente di 100 A e propongono inoltre che il valore della probabile propagazione d'arco deve essere valutato all'80% quando si considera la distanza interpolare. Questo da un valore di corrente permesso (I_p) nelle commutazioni ad anello per una distanza C [mm] come segue.

$$LPR = 5.03 \cdot Z I_p^2 \cdot 10^{-3} = 0.8 \cdot C = [\text{mm}]$$

...da cui...
$$I_p = 12.6 \cdot \sqrt{\frac{C}{Z}} = [\text{A}]$$

Graf.2: confronto fra i risultati sulle commutazioni d'anello ottenuti da Andrews et al e IREQ



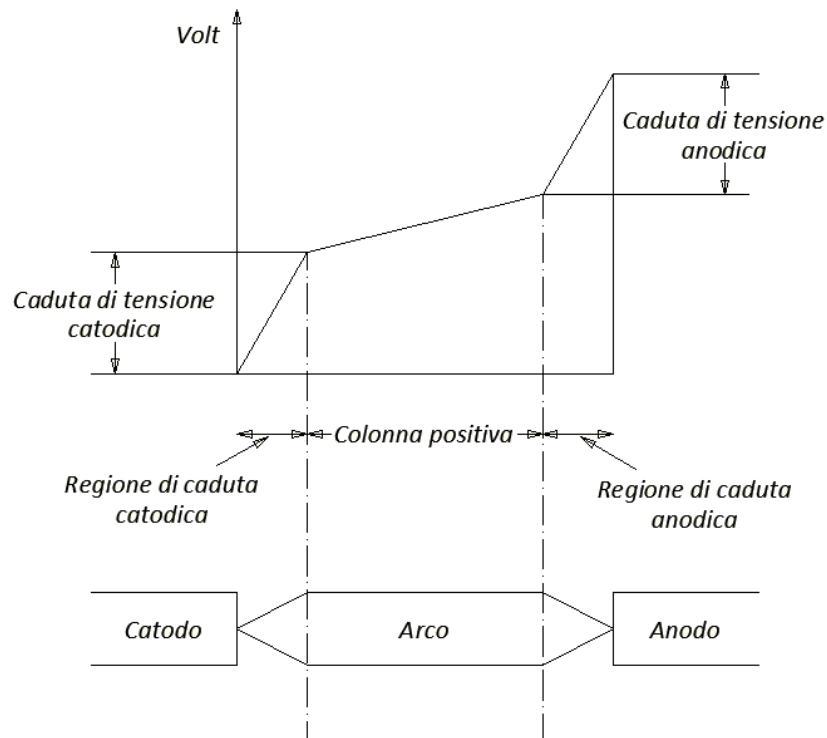
Un'esperienza di commutazione d'anello in un sistema a 765 kV è stata svolta da Keane, Andrei e Halley. L'obiettivo era quello di interrompere una corrente di 600 A ad una tensione di ristabilimento di almeno 200 V, obiettivo questo che rientra perfettamente nelle esigenze volute dalla IEC in questo sistema (1600 A, 300 V). Le prove sono state concluse utilizzando un sezionatore a pantografo e uno ad apertura verticale con un circuito di sintesi che producesse la tensione desiderata. Entrambi i sezionatori sono stati testati con correnti di 600 A e tensioni di 220 V, per un totale di 10 volte ciascuno. Il massimo tempo di durata d'arco registrato è stato di 0.83 s; in entrambi i casi si sono riscontrati danneggiamenti sui contatti provocati dalla corrosione d'arco, in particolare nei test in cui la corrente iniziale si aggirava attorno ai 200 A per i quali si è anche verificata una perdita di materiale. Pertanto si consigliava la sostituzione dei contatti dopo un certo numero di manovre.

La cosiddetta guida alle commutazioni ad anello dichiara in parte che l'operatore deve richiudere il sezionatore se l'interruzione di corrente non si verifica con successo entro uno spazio elettrodo massimo di 0.3 m; inoltre, egli deve essere consapevole delle piccole particelle di metallo fuso che possono cadere dal sezionatore come risultato della bruciatura dei contatti durante il periodo d'arco.

7.3 Archi elettrici in aria

I fondamenti dell'arco elettrico sono stati descritti da Edels. L'arco può essere dovuto a diverse circostanze fra le quali, in relazione a questo studio, la separazione di contatti attraversati da una corrente di carico. Il gas conduttore fra questi si porta decisamente ad elevate temperature (superiori a 4000°K) ed è caratterizzato da un'alta luminosità.

Fig.16: profilo di tensioni e regioni d'arco



L'arco presenta tre distinte regioni, come mostrato in Fig.16, ognuna con una propria caratteristica di tensione. Si noti che l'andamento del potenziale mostrato non è in scala ed i relativi valori di caduta catodica e anodica rispetto la tensione positiva della colonna d'arco (anche conosciuta come *caduta di tensione elettrodica*) dipendono dalla lunghezza dello stesso.

Per archi molto corti (e sono proprio questi ad interessare la maggior parte degli studi in materia), le due cadute pocanzi accennate sono dominanti rispetto la tensione positiva della colonna d'arco. Edels dichiara che la caduta di tensione elettrodica è nell'ordine dei 10 V, ma Browne dà un intervallo di valori differente, che spazia da 20 a 40 V .

Per archi lunghi, prende invece un ruolo dominante la caduta di tensione nella colonna d'arco e questa volta i valori per unità dati dalle due fonti tendono a coincidere, ovvero:

- 12 V/cm per correnti superiori a 50 A; 13 V/cm per correnti piccole;
- 10 V/cm per correnti superiori a 100 A; 13.4 V/cm per correnti maggiori di 68 A.
-

Edels continua: "La colonna di conduzione d'arco agisce come un normale conduttore elettrico in presenza di un campo magnetico, anche se gli effetti elettromagnetici anomali sono stati osservati al catodo. A causa della sua natura gassosa, l'arco è facilmente influenzabile dal flusso di gas. Tuttavia la stabilità spaziale dell'arco è fortemente dipendente dalla natura del materiale catodico. Infatti, con catodi tipicamente refrattari (come ad esempio carbonio, molibdeno e tungsteno) si raggiungono alte temperature e l'arco è relativamente stabile, mentre, con catodi a basso punto di fusione (come ad esempio rame e mercurio), la terminazione del catodo è altamente mobile e concentrata di asperità le quali si muovono costantemente sopra la superficie del catodo in modo irregolare, determinando un analogo comportamento d'arco. Queste differenze visive sono il risultato di diverse soluzioni catodiche che hanno portato ad una classificazione dell'arco in due tipologie: *archi refrattari* o *archi non refrattari* (o *archi a catodo freddo*). Entrambe hanno essenzialmente le stesse proprietà di colonna d'arco."

La qualità del materiale del catodo ha importanza rilevante nelle commutazioni dove ci si aspetta un arco corto, cioè una bassa impedenza d'anello. Osservazioni in campo reale tendono a sostenere quanto detto

poiché, per correnti di alcune centinaia di Ampère e un'impedenze d'anello di 0,5 Ohm, le prestazioni delle corna d'arco in tungsteno sono migliori di quelle in alluminio. Più precisamente, si crede che ciò sia dovuto al calo di tensione elettrodica.

I primi studi su archi elettrici statici risalgono al diciannovesimo secolo grazie al contributo di Ayrton, Steinmetz e altri. Entrambi stabilirono delle equazioni d'arco anche se Ayrton era molto lontano da quelle meglio conosciute:

$$V = A + BL + \frac{C + DL}{I} = [V]$$

Dove:

- V è la tensione d'arco
- I è la corrente che interessa l'arco
- L è la lunghezza d'arco
- A, B, C e D sono costanti

Il termine A è dato dalla somma delle cadute anodiche e catodiche, BL rappresenta invece la caduta di tensione nella colonna d'arco e (C+DL)/I la caratteristica inversa dell'arco.

In seguito Nottingham dimostrò che tale equazione era approssimativamente limitata ad archi con lunghezze costantemente superiori a 15 mm, e la riscrisse nel seguente modo:

$$V = A + \frac{B}{I^n} = [V] \quad (*)$$

Dove A e B sono costanti dipendenti dalla lunghezza d'arco e dai materiali dei contatti ed n dipende solo da questi ultimi (è stato dimostrato che n è direttamente proporzionale alla temperatura assoluta di ebollizione del materiale di cui è composto l'anodo). Tuttavia, per archi di lunghezza considerevole, Nottingham applica una variazione all'equazione:

$$V = A + BL + \frac{C+DL}{I^n} = [V] \quad (**)$$

Come proposto da Browne, se L è sufficientemente grande, DL >> C ed A è trascurabile rispetto a BL, allora l'equazione può essere riscritta come:

$$V = L \cdot \left(B + \frac{D}{I^n} \right) = [V] \quad (***)$$

Per alti valori di corrente, il termine D/Iⁿ diventa piccolo e ci porta quindi a scrivere:

$$V = LB = [V] \quad (***)$$

Quest'ultima relazione dimostra che la tensione d'arco per unità di lunghezza è costante per alti valori di corrente. Come già visto, le prove sperimentali evidenziano questa conclusione.

Per correnti sufficientemente piccole, può essere invece trascurato il termine B:

$$\frac{VI^n}{L} = D$$

La tabella *Tab.5* seguente riassume le relazioni viste.

Tab.5: equazioni d'arco

Fonte	Anno	Equazione d'arco	Commenti
Steinmetz	1906	$\frac{VI^{0.5}}{L} = 51$	
Nottingham	1923	$\frac{VI^{0.67}}{L} = K$	<i>K dipende dal materiale dei contatti</i>
Ackermann	1928	$\frac{VI^{0.33}}{L} = 98$	
Eaton et al Tretjak et al	1931	$\frac{VI^{0.33}}{L} = 56$	<i>Test effettuato da Eaton et al e analizzato da Tretjak et al</i>
Warrington	1931	$\frac{VI^{0.4}}{L} = 286$	<i>L è la distanza elettrodica, che viene anche assunta come il percorso dell'arco</i>
Monseth and Robinson	1935	$\frac{VI^{0.5}}{L} = 104$	<i>Citata da Andrew et al</i>
Abetti	1948	$\frac{VI^{0.4}}{L} = 43$	<i>È il caso delle commutazioni ad anello dove V è la tensione di apertura ed I la corrente iniziale</i>
Gerngross	1949	$\frac{VI^{0.36}}{L} = 35$	<i>È il caso delle commutazioni ad anello dove V è la tensione di apertura ed I la corrente iniziale</i>
Browne	1955	$\frac{VI}{L} = \text{costante}$	<i>Browne cita Nottingham, ma sembra preferire l'equazione di Ayrton per archi lunghi</i>
Maikopar	1960	$\frac{VI_p^{0.4}}{L} = 75$	<i>I_p è la corrente di picco</i>
Sconosciuto	-	$\frac{V}{L} = 12 + \frac{60}{I_p}$	<i>Fornita dal Dr. K. Suzuki di Toshiba</i>
Rieder	1967	$\frac{VI^{0.55}}{L} = 45.5$	

Molti ricercatori hanno studiato l'arco in aria principalmente in relazione agli archi causati dalle correnti di guasto o archi secondari. Ackermann studiò le correnti di guasto per valori a partire da 120 A fino a 11 kA, derivando l'equazione sopra riportata attraverso un bilancio di potenze, ovvero tra la potenza fornita all'arco e la potenza da esso persa. La teoria di Ackermann afferma che fino a quando l'equazione è soddisfatta, l'arco è stabile. Tuttavia, se la caduta di tensione d'arco scende al di sotto del valore che soddisfa l'equazione, come nel caso del raggiungimento della lunghezza critica, l'arco comincia a diventare instabile e rapidamente decade. Questa teoria non è però adatta all'evoluzione dell'arco poiché contraddice il fatto che all'aumentare della sua tensione corrisponde una diminuzione della corrente. L'arco si evolve grazie alla crescente potenza in ingresso e crolla poi quando viene a mancare. Inoltre Ackermann osserva che l'evoluzione è limitata da collassi parziali lungo l'intera lunghezza.

Eaton, Peck e Dunham studiarono la potenza d'arco per un intervallo di corrente di picco da 8 a 800 A ed i risultati ottenuti per valori inferiori a 400 A sono risultati interessanti riguardo le commutazioni ad anello. Il loro elaborato comprende misurazioni di tensione d'arco e della sua lunghezza e nei loro rapporti si trovano valutazioni sulla tensione in funzione delle correnti, ricavando la relazione sopra citata.

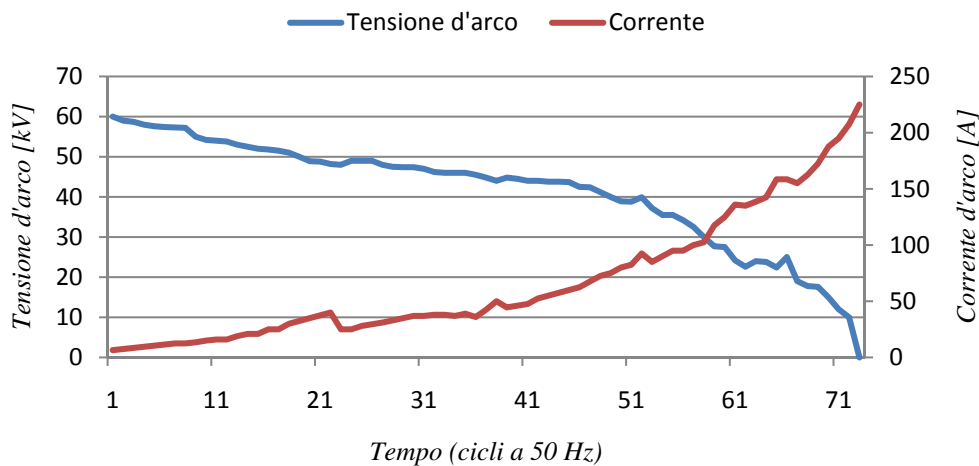
Tretjak et al investigò sul comportamento d'arco in regime alternato nel campo dell'alta tensione, combinando poi i suoi risultati con quelli ottenuti da Eaton et al per trarre l'equazione media indicata nella tabella. L'equazione che ne deriva per rappresentare le condizioni di lunghezza d'arco critica (L_c) è:

$$\frac{VI^{0.33}}{L_c} = 84$$

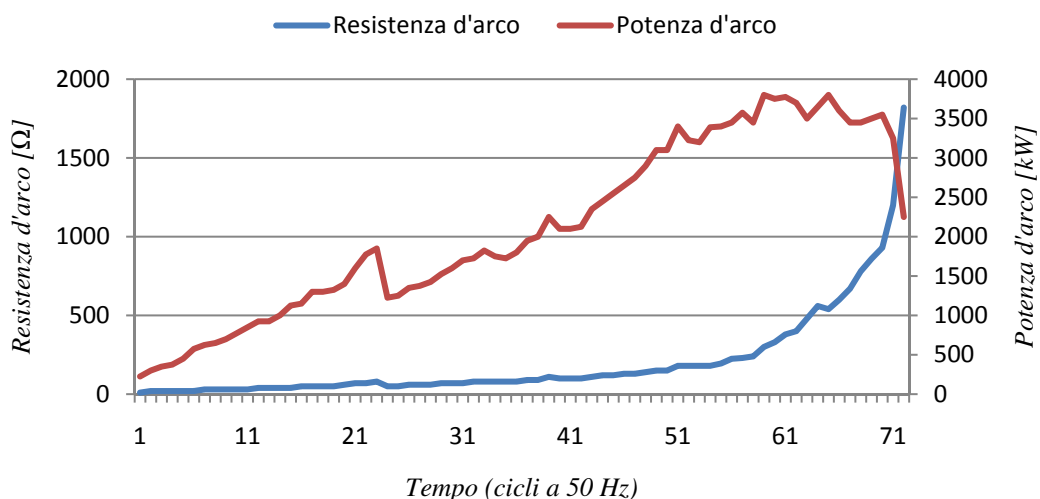
Warrington condusse prove senza successo nello campo di valori di corrente di Eaton et al. L'obiettivo dei suoi test era quello di esaminare l'influenza della resistenza d'arco sulle protezioni distanziometriche, obiettivo questo condiviso da Ackermann. La costante dell'equazione di Warrington è cinque volte maggiore della costante di Tretjak et al. Entrambi (Warrington erroneamente) trattano la lunghezza critica nello stesso modo di Ackermann, ovvero, quando la tensione scende al di sotto del valore dato dall'equazione, l'arco si avvia all'estinzione.

Gross studiò invece il comportamento dell'arco libero di evolversi in aria per un campo di valori di corrente che spazia da 200 A fino a 400 A. Egli non determinò la lunghezza d'arco ma misurò la corrente e la tensione d'arco; nel Graf.2 sono mostrati i dati relativi a queste due quantità registrati durante un'operazione di chiusura, per un tempo d'arco di 73 cicli a 50 Hz. Questi mostrano come, nell'allungamento dell'arco, un graduale decremento della corrente corrisponde ad un aumento della tensione. Dopo circa 50 cicli è possibile notare come la pendenza diventa più accentuata per entrambi i tracciati, fino all'estinzione dell'arco; risultano inoltre evidenti parziali collassi d'arco a 22, 40, 52 e 65 cicli.

Graf.3: corrente e tensione d'arco (Gross)

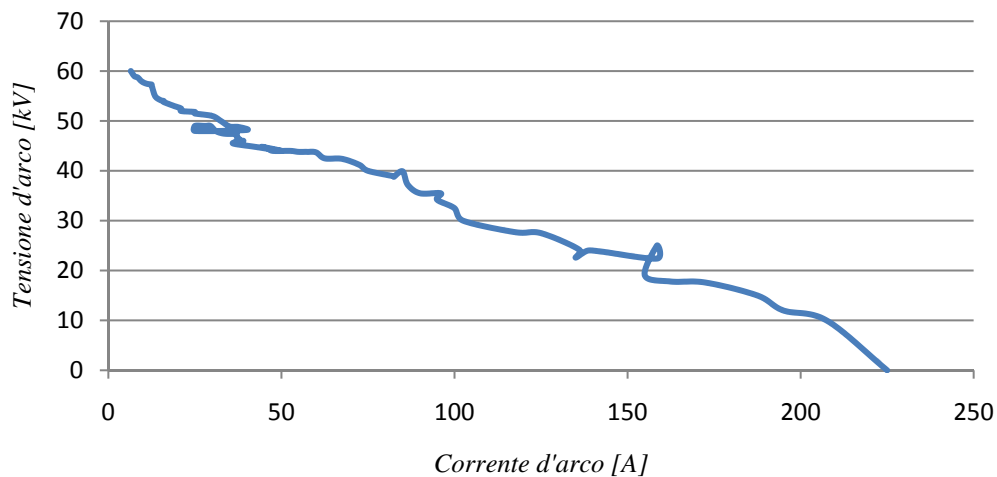


Graf.4: resistenza e Potenza d'arco (Gross)



Gli andamenti della resistenza d'arco e della potenza dissipata sono invece mostrati nel Graf.3; quest'ultima presenta un costante aumento coerente con quello di resistenza fino al punto in cui si verifica un rapido degrado dovuto ad un crollo improvviso della potenza fornita all'arco.

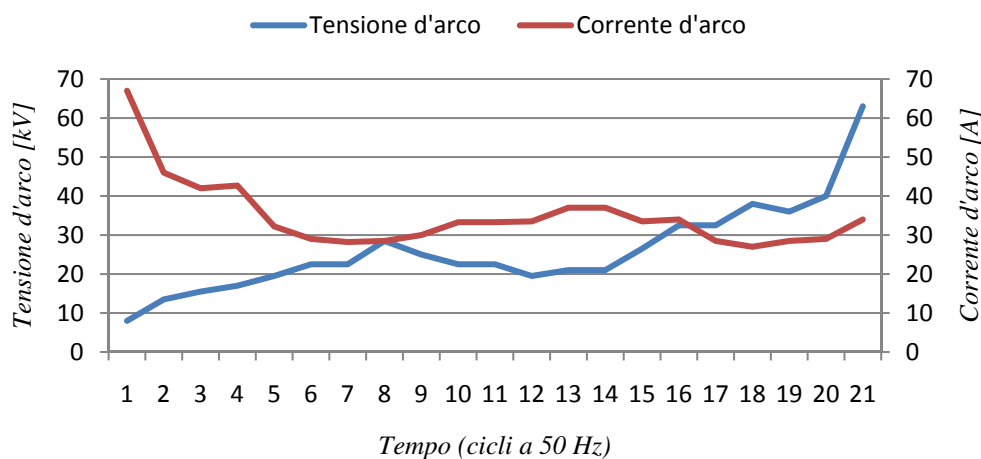
Graf.5: caratteristica U-I dell'arco (Gross)



Strom studiò gli archi in un campo di valori di corrente molto ampio, da 68 A fino a 21.75 kA, registrando lunghezze d'arco da circa 3 mm fino a 1.2 m. In breve sintesi, lo studio ha rilevato mediamente un gradiente di tensione d'arco di 12.2 V/cm per correnti inferiori a 5000 A e di 14.9 V/cm per correnti superiori.

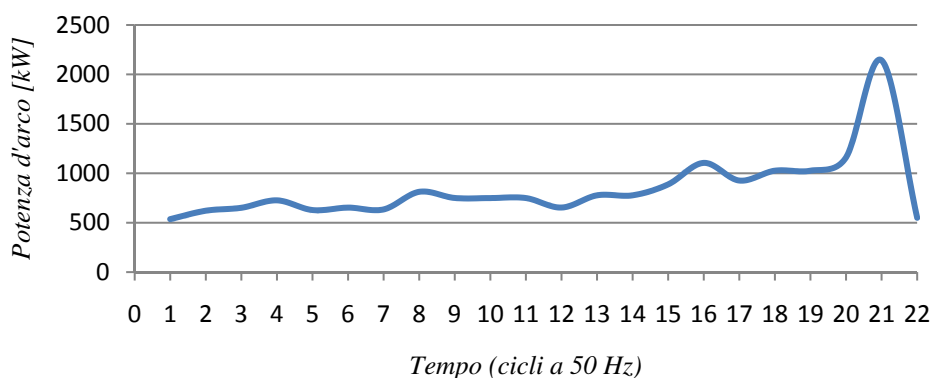
Gli archi secondari (ovvero quelli che seguono all'intervento sulle correnti di guasto d'arco nella singola fase e ai sistemi di richiusura) sono particolarmente interessanti per quanto riguarda il loro metodo di estinzione. La tensione di alimentazione che guida la corrente d'arco secondario è data da induzioni elettromagnetiche ed elettrostatiche provenienti dal rumore di fase e dalle linee parallele nel caso di sovrappassi. Questa tensione non può essere considerata una fonte fissa in quanto tende a produrre una corrente costante, anche durante lo sviluppo in lunghezza dell'arco. Numerosi test hanno dimostrato che le correnti caratteristiche di questi archi sono di bassi valori, generalmente minori a 100 A, e posso presentare un comportamento simmetrico o meno. Il loro tempo di estinzione è solitamente inferiore ad un secondo, ma sufficientemente bassa da permettere la richiusura dopo un tempo di 0.33 s. Questo viene dimostrato da Anjo che studiò appunto gli archi secondari che seguono correnti di guasto primarie di 8 kA. Un tracciato della tensione e della corrente caratteristiche dell'arco secondario è riportato nel Graf.5.

Graf.6: tensione e corrente d'arco secondario

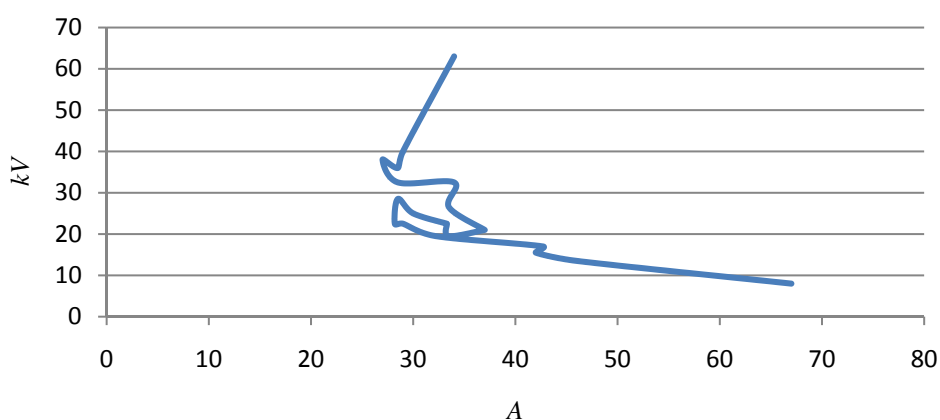


Una volta scomparsa l'influenza della corrente di guasto primaria, la corrente che segue è di circa 30 A e si porta al punto di estinzione in un periodo di circa un ciclo. L'estinzione si verifica quando la tensione d'arco raggiunge un valore tale per cui l'alimentazione non è più in grado di sostenere l'incremento di energia necessario per sostenere l'arco. L'andamento della potenza associata ai valori esposti nel Graf.5 è riportato in seguito nel Graf.6. Da quest'ultimo è possibile notare un aumento a ritmo costante fino ad uno stallo improvviso poco prima dell'estinzione.

Graf.7: potenza d'arco secondario



Graf.8: caratteristica U-I dell'arco secondario



La Caratteristica U-I associata è mostrata nel *Graf.7*; è facile notare come questa si differenzia dalla medesima ottenuta da Gross (*Graf.4*). Anjo misurò lunghezze d'arco superiori a 9.3 m ed un gradiente di tensione che sale fino a 6.8 kV/m poco prima dell'estinzione.

Abetti e Gerngross studiarono i filmati d'arco considerati da Andrews et al e determinarono l'equazione riportata nella Tab.1. (stranamente nessun riferimento a queste conclusioni viene citato da quest'ultimo)

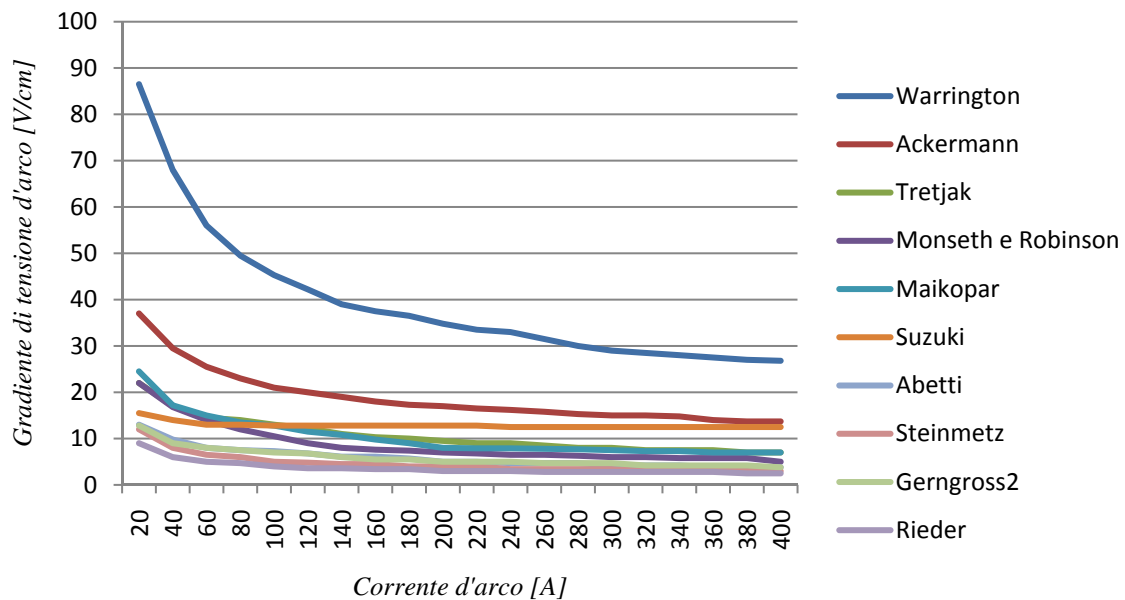
7.4 Conclusioni

In generale, lo studio della capacità di interruzione di corrente dei sezionatori non ha mai suscitato un interesse di ricerca appropriato per mancanza di conoscenze disponibili in materia. Se non consideriamo il lavoro di Neumann riguardante le interruzioni in aria e le tensioni di ristabilimento attinenti alle correnti capacitive e al caso bus-transfer, nessuna ricerca prima esposta risulta principalmente finalizzata all'argomento che questa tesi espone. Esse forniscono infatti solo una visione limitata della problematica dell'interruzione di corrente in aria.

L'elaborato più importante è stato chiaramente quello di Andrew et al svolto nel 1940 e coloro che in seguito hanno trattato l'argomento sembra si siano riferiti all'approccio dello scostamento d'arco del lavoro precedente, di volta in volta aggiornato. Nessuna considerazione è quindi attenta alle condizioni che devono essere soddisfatte al fine di garantire una sicura interruzione di corrente, che è invece l'argomento qui trattato; studi precedenti su archi liberi di propagarsi in aria possono risultare invece attinenti: questi fanno attenzione alla condizione fondamentale che l'arco si propaghi finché la potenza da esso assorbita continua ad aumentare. Per le commutazioni ad anello questo significa che la tensione d'arco deve

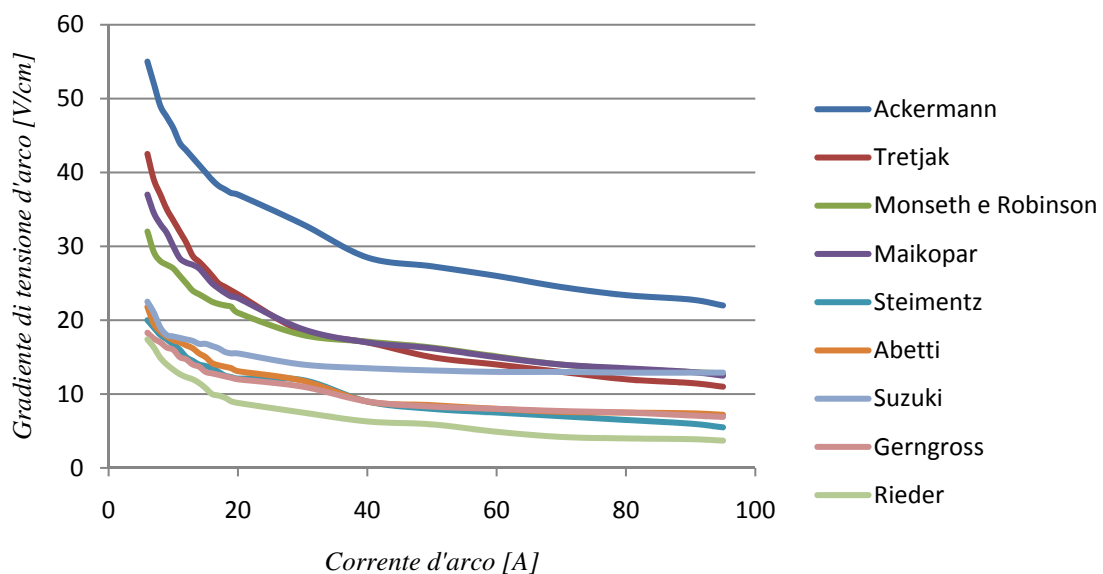
aumentare velocemente rispetto al decremento di corrente grazie alla trasferimento del flusso di corrente al percorso parallelo. Tuttavia viene inevitabilmente raggiunto un punto in cui la derivata della potenza assorbita dall'arco tende a zero causando l'estinzione d'arco. Dalle equazioni riportate nella *Tab.5* è possibile concludere che la tensione d'arco è funzione della corrente e della lunghezza. Gli andamenti descritti da queste equazioni sono tracciati nel *Graf.8* e mostrano tutti una notevole coerenza tranne quello ricavato da Warrington.

Graf.9: andamento delle relazioni riportate nella *Tab.1* per un intervallo 0÷400 A



I grafici mostrano un gradiente di tensione quasi costante per correnti superiori a 100 A. L'intervallo di valori è quasi ovunque compreso tra 3 V/cm e 15 V/cm ed è forse una coincidenza che nello studio dei sistemi di alimentazione spesso i progettisti citino un gradiente di tensione di guasto d'arco di 10 V/cm come regola empirica. Per correnti inferiori a 100 A, il gradiente aumenta con il diminuire della corrente come riportato nel Graf.9, escluso l'andamento relativo all'equazione di Warrington.

Graf.10: andamento delle relazioni riportate nella *Tab.1* per un intervallo 0÷100 A



Si può quindi concludere che valori di corrente inferiori a 100 A favoriscono la commutazione ad anello in quanto la corrente in questione garantisce un'alta tensione d'arco e quindi la sua estinzione, garantendo una buona commutazione.

Tuttavia, lo studio trattato in seguito prevede valori di corrente molto superiori, la cui commutazione necessita di dispositivi appositi.

8 **FISICA DEI CONTATTI**

Per capire meglio i materiali da utilizzare e massimizzare le loro prestazioni è necessario conoscere prima i principi fondamentali della fisica dei contatti elettrici.

Un buon contatto deve presentare le seguenti proprietà:

- *stabilità elettrica;*
- *stabilità meccanica;*
- *separabilità;*
- *durabilità.*

Queste sono soddisfatte studiando attentamente le correlazioni tra configurazione geometrica, proprietà dei materiali e parametri operativi.

I parametri principali per lo studio di contatti sono:

- *forza di contatto* o *forza normale*, è la forza che permette l'aderenza tra due superfici; deve garantire la stabilità meccanica ed è il parametro più importante perché influisce profondamente anche sulla resistenza di contatto e sulla forza di inserzione;
- *resistenza di contatto*, è la resistenza elettrica associabile all'interfaccia tra due corpi separabili, deve essere la più bassa possibile al fine di garantire la stabilità elettrica, limitando le perdite da essa provocate;
- *forza di inserzione*, è la forza, generalmente parallela al contatto, che si oppone all'inserimento e al disinserimento, deve garantire la separabilità e la durabilità.

8.1 **Resistenze nel connettore**

Ci sono due tipi di resistenza che il segnale incontra nel suo percorso: la *resistenza di massa* che è la resistenza del materiale lungo il percorso e la *resistenza di contatto* che si presenta all'interfaccia con i terminali.

8.1.1 **Resistenza di massa**

La resistenza di massa è data dalla classica formula dell'elettrotecnica...

$$R_m = \rho \frac{l}{S}$$

..in cui rispettivamente ρ è la resistività elettrica del materiale, l la lunghezza del terminale ed S la sua sezione. L'ottimizzazione della resistenza di massa passa attraverso la scelta di materiali con minore resistività e una forma geometrica adatta (percorsi elettrici più corti e con diametri maggiori, a parità di portata di corrente, favoriscono lo scorrimento degli elettroni) che deve però tenere conto anche di parametri meccanici ed economici.

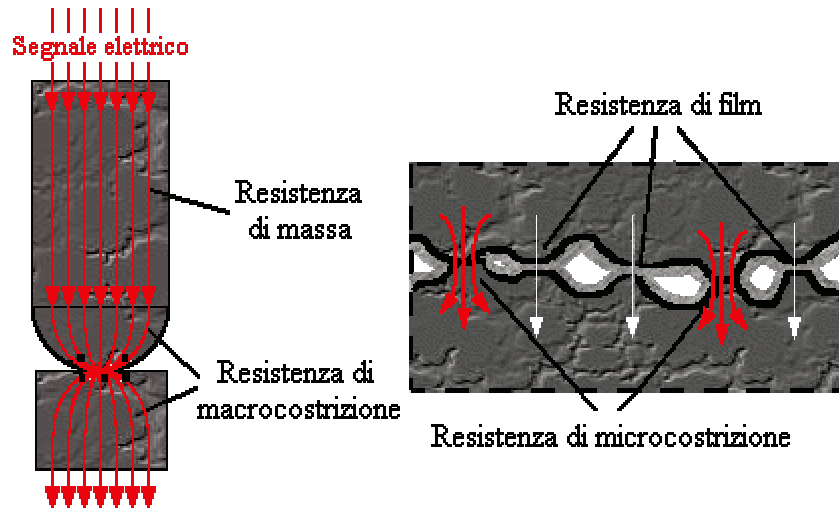
8.1.2 **Resistenza di contatto**

Per quanto riguarda invece la resistenza di contatto la valutazione è più complessa. Questo parametro si può dividere in due componenti principali dovute a fenomeni fisici diversi: la resistenza di costrizione e la resistenza di film.

- *Resistenza di costrizione*

Tutte le superfici, anche quelle apparentemente più lisce, ad uno sguardo più attento rivelano una certa rugosità. L'accoppiamento di due superfici avrà contatti solo attraverso le asperità che si toccano. Questo significa che il contatto si stabilisce solo su un grande numero di microaree superficiali leggermente prominenti chiamate "a spots". La somma totale di queste aree è molto più piccola dell'area apparente di contatto.

Fig.17: tipologie di R fra due contatti



Il flusso di corrente elettrica è costretto a passare attraverso gli "a spots"; questo provoca la deformazione delle linee di flusso che devono addensarsi attraverso queste aree di contatto. L'insieme delle resistenze degli "a spots" si comportano come fossero in parallelo. Questa è l'origine della resistenza di circuito aggiuntiva chiamata resistenza di costrizione.

La resistenza di costrizione per un singolo "a spot" circolare...

$$R_{ctr1} = \frac{\rho}{d}$$

...dove d è il diametro dell'asperità di contatto e ρ la media aritmetica delle resistività dei materiali a contatto, ovvero...

$$\rho = \frac{(\rho_1 + \rho_2)}{2}$$

All'aumentare della forza normale, le superfici si avvicinano creando maggiori aree di contatto tra asperità. Inoltre, gli sforzi così detti di *Hertz* aumentano, ovvero quegli sforzi dovuti al contatto tra i due corpi che si localizzano nel volume immediatamente adiacente all'area di contatto, permettendo alle microaree in cui si supera il limite di snervamento di deformarsi ed espandersi per equilibrare la forza di contatto. Da notare che, data l'entità della forza normale e l'area apparente di contatto, può essere che gli sforzi rimangano totalmente nel campo elastico ma solitamente, a causa della concentrazione degli sforzi, le asperità sono soggette a deformazioni plastiche. Si formano pertanto con più probabilità contatti fra esse, creando degli "a grappoli" poiché nelle vicinanze di un "a spot" la distanza tra le due superfici si riduce. La resistenza di costrizione contiene infatti un altro termine che tiene conto della distribuzione degli "a spots" in un *cluster* (resistenza di macrocostrizione), termine che si presenta in serie; infatti la corrente costretta a deviare prima per fluire nell'area del cluster, poi per fluire nelle microaree degli "a spots". In formula...

$$R_{ctr} = \frac{\rho}{nd} + \frac{\rho}{D}$$

...dove ρ è la resistività media prima definita, d è il diametro medio degli "a spots", n è il numero di "a spots" e D è il diametro del cluster.

Aumentando ulteriormente la forza di contatto prevale la costrizione da cluster e gran parte della deformazione delle asperità avviene in maniera plastica; in tal caso, l'equazione di equilibrio è...

$$F_n = b\sigma_y A_r = p_y A_r$$

...dove F_n è la forza normale, b è una costante maggiore di uno che tiene conto dell'impedimento alla propagazione della plasticità esercitato dal materiale circostante, σ_y la resistenza a snervamento, A_r l'area reale di contatto e p_y la pressione di snervamento.

Rielaborando le formule precedentemente esposte si arriva alla reazione...

$$R_{ctr} = k\rho \left(\frac{F_n}{H}\right)^2$$

...la quale ci permette di dire che la *resistenza di costrizione* dipende direttamente dalla geometria dell'interfaccia del contatto (K), dalla durezza (H) e dalla resistività (ρ) dei materiali e inversamente dalla forza di contatto (F_n).

- **Resistenza di film (o dello strato contaminato)**

Con eccezione per le superfici create in un vuoto perfetto, tutte le superfici sono contaminate da film superficiali. Questi film possono essere strati di ossido o solfuri, contaminanti ambientali (lubrificanti, acqua), gas adsorbiti (particolarmente ossigeno), polimeri organici, come per esempio polveri di color marrone nei rivestimenti di palladio, o prodotti di corrosione. Sebbene questi film hanno maggiore resistività e rallentano notevolmente il passaggio del segnale, se sufficientemente sottili (< 100 Armstrong = 10 nm) possono condurre elettricità grazie all'*effetto tunneling quanto-meccanico*¹. La resistività dovuta al meccanismo del tunneling quantico è indipendente dalla composizione del film. In aggiunta al tunneling, la conduzione elettrica attraverso film superficiali può anche essere aumentata da un processo chiamato *fritting*².

Con l'aumentare della forza normale diminuisce anche lo spessore del film superficiale e in alcuni casi si ha la parziale distruzione dello strato contaminato, quindi maggiore è la forza di contatto minore è l'impedimento al flusso elettrico dato dallo strato contaminato, al contrario minore è la forza più la resistenza da film diventa la componente dominante.

Il valore della resistenza di film è espressa in modo semplificato dalla seguente relazione...

$$R_f = \rho_f \frac{s}{\Sigma A}$$

...dove ρ_f è la resistività dello strato contaminato, s è lo spessore dello strato e ΣA è la sommatoria delle aree occupate dallo strato effettivamente in contatto.

Se supponiamo che un sottile strato veli tutta la superficie l'equazione diventa...

$$R_f = \rho_f \frac{H}{F_n}$$

1. Effetto tunneling quanto-meccanico

effetto che permette una transizione ad uno stato impedita dalla meccanica classica che tramite la legge di conservazione dell'energia impone che una particella non possa superare un ostacolo se non ha l'energia necessaria per farlo; la meccanica quantistica invece prevede che una particella abbia una probabilità, piccola ma finita, di attraversare una barriera arbitrariamente alta e quindi violare temporaneamente la meccanica classica.

2. Fritting

rottura elettrica che avviene sotto speciali condizioni (di potenziale e di corrente) quando film superficiali sottili si frappongono tra superfici conduttrici. Il processo genera e/o allarga un percorso conduttivo nel film isolante. All'inizio gli elettroni sono iniettati nel film intatto cosicché la corrente di elettroni altera le condizioni del film producendo un canale conduttivo (A-fritting). Successivamente la corrente si allarga e il canale aumenta la sua conduttività (B-fritting).

...ovvero si assume che ΣA sia uguale ad A_r (in questo caso H tiene conto anche della durezza dello strato che in genere per gli ossidi e i solfuri è alta quindi si ha un aumento di resistenza anche per questo fatto).

Pertanto la *resistenza di contatto* R_C è data dalla somma delle *resistenze di costrizione* R_{ctr} e della *resistenza dello strato contaminato* R_f .

$$R_C = \left(\sum R_{ctr} \right) + R_f$$

8.1.3 Resistenza totale del contatto

Da qui, per la resistenza totale del connettore nel caso più generico, bisogna inoltre sommare la *resistenza di massa* R_m e la *resistenza delle connessioni permanenti* R_{cp} .

$$R_T = R_C + R_m + R_{cp} = \left(\sum R_{ctr} \right) + R_f + R_m + R_{cp}$$

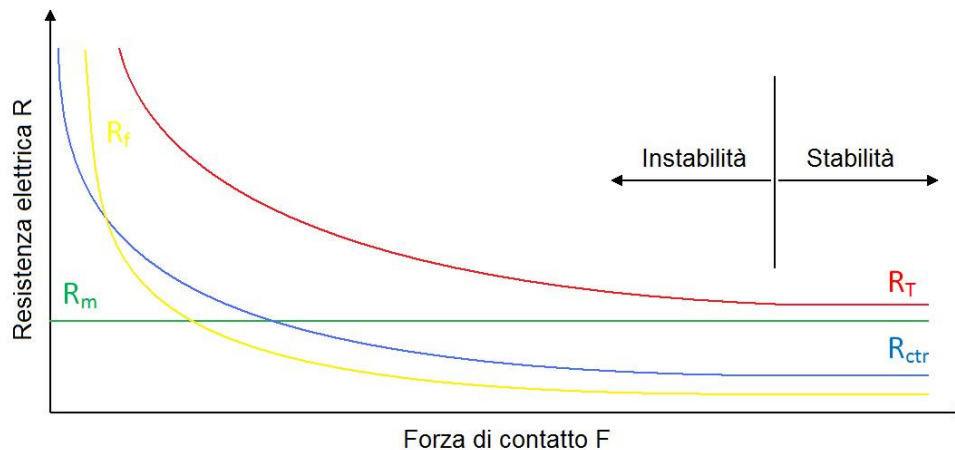
Valori tipici di *resistenza di connessioni permanenti* rientrano nell'ordine dei microohm ($\mu\Omega$), di *resistenza di massa* nell'ordine di milliohm ($m\Omega$), mentre la resistenza di contatto è circa un milliohm ($1m\Omega$) per molti connettori.

Il valore della *resistenza totale* R_T dipende quindi da:

- geometria del connettore;
- tipo di connessioni permanenti;
- microtopografia della superficie;
- forza applicata ai contatti;
- proprietà dei materiali di contatto;
- spessore e proprietà dei film superficiali.

La resistenza elettrica di un connettore può essere minimizzata dalla scelta di materiali più conduttivi che sopportino anche alte forze normali senza sovrassollecitarsi. Questo può essere fatto selezionando materiali con alto modulo elastico, alta conduttività, alta tensione a snervamento e buona resistenza al rilassamento degli sforzi.

Graf.11: resistenza elettrica del contatto in funzione della forza applicata



Considerazioni più approfondite sono necessarie se il segnale viaggia ad alte frequenze nel qual caso l'analisi richiede anche considerazioni induttive, capacitive e magnetiche sia della geometria che dei materiali, ma questo non riguarda l'argomento di questa tesi.

8.2 Temperatura del connettore

È importante dare uno sguardo anche all'aspetto termico del contatto in quanto legato alla portata nominale del dispositivo.

La temperatura di un connettore dipende dalla temperatura ambientale in cui il contatto opera e dall'effetto Joule che è direttamente legato alla resistenza locale. Le correnti termiche seguono lo stesso percorso delle correnti elettriche. C'è una relazione tra la temperatura nella costrizione T_c e la caduta di potenziale attraverso la costrizione, V_{ctr} , derivata dalla *legge di Wiedemann-Franz*¹ e rappresentata dalla seguente relazione..

$$V_c^2 = 4L(T_c^2 - T_{amb}^2)$$

...dove T_{amb} è la temperatura ambiente, e L è una costante, $2,4 \times 10^{-8}$ V²K⁻² per diversi metalli.

Aumentando il potenziale applicato attraverso la costrizione, la temperatura T_c cresce a causa del riscaldamento per effetto Joule; se la temperatura è alta abbastanza per rammorbidire il metallo; le asperità rilassano e gli "a spot" aumentano di grandezza. Potenziali di rammollimento sono tipicamente tra 50 e 250mV.

8.3 Forza di inserzione

È determinata dalla forza di attrito tra i contatti e risponde alla legge...

$$F_t = \mu F_n$$

Quindi maggiore è la forza normale più grande è la forza d'inserzione. Forze d'inserzione sufficientemente alte su substrati duri hanno un effetto autopulente, forze d'inserzione eccessivamente alte invece comportano usura meccanica con danneggiamento del contatto.

Riassumendo il parametro operativo principale è la forza di contatto che non deve essere troppo alta perché altrimenti pregiudica la separabilità e la durabilità e non deve essere troppo bassa poiché deve garantire sufficiente stabilità elettrica e meccanica.

1. Legge di Wiedemann-Franz

conduzione elettrica e conduzione termica sono correlate poiché in entrambi i casi l'energia viene trasportata dai portatori relativamente liberi nel solido che sono gli elettroni. La formula ricavabile da tale teoria è...

$$\frac{K}{\sigma} = LT$$

...dove rispettivamente K è la conduttività termica, σ la conduttività elettrica e L è la costante di Lorentz (2.45×10^{-8} W Ω /K²).

Prove di Tipo Bus-Transfer

Ho svolto il tirocinio affiancando l'Ing. Nosilati, responsabile delle prove esterne dell'azienda AREVA T&D Italy, R&D Division, sede di Noventa di Piave. Durante questo periodo, l'ingegnere si è occupato di due prove di tipo bus-transfer.

Le prove in questione sono definite come *prove di tipo* (facoltative) e pertanto non è necessario ripeterle per tutti i sezionatori della medesima tipologia, né per quelli che riscontrano cambiamenti nei dettagli costruttivi se il costruttore riesce a dimostrare che questi non ne influenzano i risultati. Questo significa che i dispositivi per le manovre di corrente di sbarra di un dato progetto possono anche essere utilizzati con altri sezionatori, senza ripetere la prova di tipo se il costruttore può provare che viene manovrato da questi ultimi nello stesso modo.

Come sopra citato, la prova di tipo in esame è una prova facoltativa, ma nel corso di questi ultimi anni risulta sempre più richiesta. Per questo motivo AREVA sta provvedendo alla progettazione di dispositivi in grado di sopportare il fenomeno dell'arco elettrico in modo da garantire il superamento della prova.

Le prove in questione si riferiscono a due differenti modelli di sezionatori, quali l'S2DA e l'SX.

9 **NORMATIVA**

In accordo al tema trattato, si deve fare riferimento alla norma tecnica CEI EN 62271, preparata dal SC 17A, High-voltage switchgear and controlgear, del TC 17 IEC, Switchgear and controlgear, in seguito sottoposta al voto parallelo IEC-CENELEC per essere poi approvata da quest'ultimo come norma europea in data 05/03/2002. Essa deve essere utilizzata congiuntamente alla norma EN 60694 ed ha validità fino al 2013.

La norma è composta da diverse parti di cui una di nostro interesse, quale la CEI EN 62271-102 (*Alternating current disconnectors and earthing switches*) appendice B: "manovra su corrente di commutazione di sbarra con sezionatori" (*bus-transfer current switching by disconnectors*). Questa si applica ai sezionatori in corrente alternata con tensioni nominali di 52 kV e superiori in grado di manovrare su correnti di commutazione di sbarra (non sono generalmente richieste caratteristiche nominali e prove di tipo per la manovra su correnti di commutazione di sbarra con sezionatori a tensioni nominali inferiori; tuttavia, possono essere condotte prove in accordo tra utilizzatore e costruttore).

L'appendice B ha lo scopo di definire le prescrizioni per la manovra e di specificare i metodi di prova per i sezionatori utilizzati per commutare correnti di carico da un sistema di sbarre a un altro. Per tale servizio di manovra è richiesto un sezionatore con potere d'interruzione e di stabilimento, a seconda della dimensione del carico commutato, delle dimensioni dell'anello tra i punti di commutazione delle sbarre e del sezionatore da manovrare.

È importante ricordare che la prova in questione è definita come *prova di tipo* (facoltativa) e pertanto non è necessario ripeterla per tutti i sezionatori della medesima tipologia né per quelli che riscontrano cambiamenti nei dettagli costruttivi se il costruttore riesce a dimostrare che questi non ne influenzano i risultati. Questo significa che i dispositivi per le manovre di corrente di sbarra di un dato progetto possono anche essere utilizzati con altri sezionatori senza ripetere la prova di tipo, se il costruttore può provare che è manovrato da questi ultimi nello stesso modo.

Il potere di commutazione di corrente di sbarra dipende esclusivamente dai valori caratteristici del circuito di prova e dalla velocità di manovra e non dalle caratteristiche di isolamento e dalle caratteristiche nominali di corrente del sezionatore.

In tal proposito, prima dello svolgimento dell'effettiva prova è necessario eseguire delle manovre a vuoto per verificare i dettagli delle caratteristiche di funzionamento del sezionatore, quali la velocità di corsa, il tempo di chiusura e di apertura. Bisogna inoltre tenere conto del fatto che la configurazione fisica del circuito può differire rispetto ai due lati del sezionatore e pertanto il lato di alimentazione deve essere quello che rappresenta la condizione di prova più severa (in caso di dubbi, si esegue il 50% della prova rispettivamente prima da un lato e poi dall'altro).

La norma prevede solo prove monofase su un polo di un sezionatore tripolare, a condizione che il polo non si trovi in circostanze più favorevoli rispetto al sezionatore tripolare completo per quanto riguarda le velocità di apertura e di chiusura, ma soprattutto l'influenza delle fasi adiacenti (in caso contrario si esegue la prova sul sezionatore completo).

La prova deve essere svolta su un massimo di quattro campioni, per offrire una maggiore sicurezza che il dispositivo provato è rappresentativo di quelli forniti (nel caso limite questo potrebbe voler significare eseguire le prove su un singolo campione); ogni campione deve essere conforme ai disegni che il costruttore fornisce al laboratorio di prova, i quali devono essere sufficienti per identificare in maniera univoca in base al tipo i dettagli e le parti essenziali dell'apparecchiatura.

In linea di principio, tutte le prove devono essere eseguite su apparecchiature complete, nelle condizioni specificate per il servizio; tutti i dispositivi devono essere riportati in condizioni "a nuovo" all'inizio di ciascuna prova.

9.1 Caratteristiche nominali di prova

Le caratteristiche nominali di prova nel caso in esame dovrebbero essere scelte tra le seguenti:

- La corrente nominale di commutazione di sbarra per i sezionatori isolati in aria deve essere l'80% della corrente termica nominale; solitamente non supera mai i 1600 A, indipendentemente dalla corrente termica nominale del sezionatore (valore scelto tipicamente come massima corrente che può essere commutata).
- Le tensioni nominali di commutazione di sbarra per sezionatori isolati in aria sono indicate nella seguente *Tab.6*.

Tab.6: tensioni nominale per le prove di tipo bus-transfer

<i>Tensione nominale U, kV</i>	<i>V efficaci r.m.s.</i>
52	100
72,5	
100	
123	
145	
170	
245	200
300	
362	
420	300
550	
800	

- La frequenza di prova deve essere preferibilmente quella nominale (anche se prove a 50 Hz o a 60 Hz sono considerate equivalenti).

La tensione di prova deve essere scelta in modo da fornire la tensione nominale di commutazione di sbarra tra i terminali del sezionatore in stato di apertura con una tolleranza massima del $-0 \div +10\%$, e deve essere misurata immediatamente dopo l'interruzione della corrente.

La tensione di ritorno a frequenza di esercizio deve essere mantenuta per almeno 0,3 s dopo l'interruzione. Anche per la corrente di prova si richiede una tolleranza massima rispetto alla corrente nominale del $-0 \div +10\%$ e deve essere misurata prima della manovra del sezionatore. È fondamentale che essa sia simmetrica. I contatti del sezionatore non devono separarsi fino a quando le correnti transitorie dovute alla chiusura del circuito siano state cessate.

9.2 Configurazione del circuito di prova

La prova può essere eseguita in campo o in laboratorio; in quest'ultimo caso, i circuiti di riferimento sono riportati nelle Fig.B1 e Fig.B2; questi devono avere un fattore di potenza non superiore a 0,15. I valori caratteristici del circuito U_{BT} e Z_{BT} sono scelti per fornire la corrente di prova e la tensione di ritorno a frequenza di esercizio richieste. Le TTR (Tensioni Transitorie di Ritorno) presunte dovrebbero avere una forma d'onda triangolare come conseguenza dell'impedenza d'onda del sistema sbarre collegato; tuttavia, per comodità di prova, possono essere utilizzate TTR con una forma $(1-\cos)$, con una frequenza non inferiore a 10 kHz, e un fattore di ampiezza presunto non inferiore a 1,5. In realtà i parametri delle TTR

(pendenza e valore di picco) non sono richiesti in quanto non significativi. Questo perché la tensione d'arco che si verifica è tipicamente elevata rispetto alla tensione di prova e ciò comporta uno smorzamento significativo della TTR e uno spostamento di fase della corrente, portandola praticamente in fase con la tensione di prova.

La struttura del sezionatore deve essere collegata a terra; anche il circuito di prova deve essere collegato a terra come indicato nelle Fig.18,19.

Fig.18: circuito di prova A per le prove di stabilimento e di interruzione di correnti di commutazione di sbarra

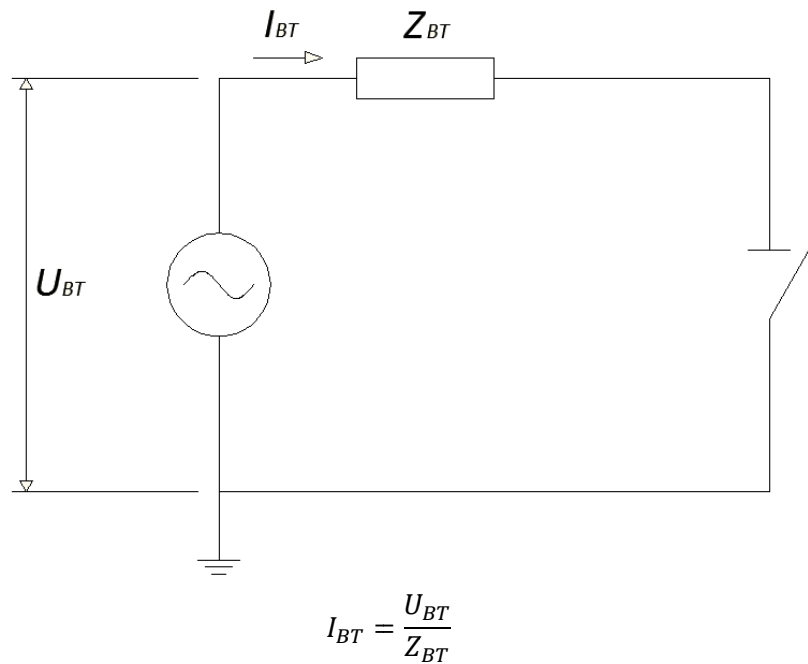
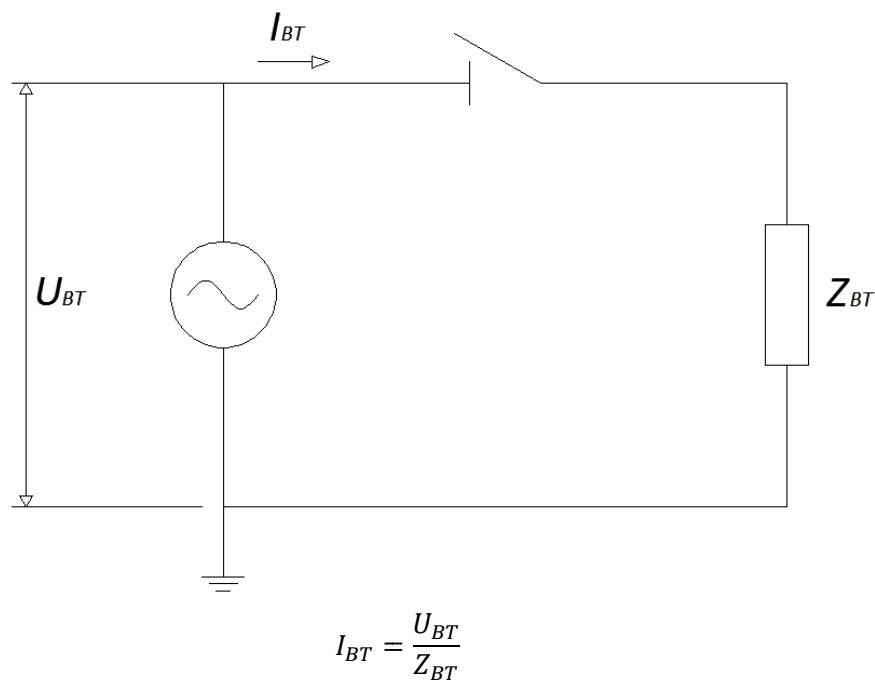


Fig.19: circuito di prova B per le prove di stabilimento e di interruzione di correnti di commutazione di sbarra



9.3 Svolgimento della prova

Il test prevede una sequenza di cento cicli di manovra di chiusura-apertura, operazioni che devono essere intervallate da un ritardo temporale tale da permettere la cessazione di qualsiasi fenomeno transitorio. Questi numerosi cicli di manovra non servono a dimostrare la vita elettrica del dispositivo, bensì a fornire un'indicazione dell'erosione dei contatti; a questo fine, la normativa vieta ricondizionamenti durante il programma di prove. È possibile perciò che si verifichino emissioni di fiamme o particelle metalliche durante il funzionamento; ciò tuttavia è permesso se non compromette il livello di isolamento del sezionatore. Il meccanismo di manovra deve essere alimentato alla sua tensione minima, che corrisponde alla sua tensione nominale -15%.

9.4 Condizione del sezionatore dopo la prova

Per poter considerare la prova superata, il sezionatore deve essere in grado di condurre la sua corrente termica nominale senza che la sovratemperatura superi i valori specificati. Sono ritenuti accettabili fenomeni di usura meccanica e di erosione dovuti all'arco, coerentemente con la prevista durata in servizio del sezionatore. La qualità del materiale utilizzato per l'estinzione d'arco può risultare compromessa e la sua quantità può essere ridotta al di sotto dei livelli normali; inoltre, possono esservi depositi provocati dalla sua decomposizione sugli isolatori.

Le proprietà di isolamento del sezionatore in posizione di apertura non devono essere ridotte dal deterioramento di parti isolanti, al di sotto del livello corrispondente all'usura e all'invecchiamento normale.

Dopo il test, il sezionatore deve essere sottoposto a delle operazioni di manovra senza carico, ed i contatti devono aprire al primo tentativo.

Un esame a vista ed una manovra a vuoto dopo le prove sono in genere sufficienti a verificare le prescrizioni precedenti. In caso di dubbi, può essere necessario effettuare prove appropriate di conferma, quale una misura di resistenza dei contatti principali. Se il valore ottenuto presenta un aumento superiore del 20% rispetto a quello misurato prima del test, si ritiene opportuno procedere con una prova di sovratemperatura.

9.5 Rapporto di prova

I risultati devono essere registrati in un rapporto di prova (*test report*) con dati sufficienti a dimostrare la conformità con la norma. Inoltre, deve anche includere informazioni sufficienti ad identificare le parti essenziali del sezionatore provato.

Deve contenere:

- a) Registrazioni oscillografiche (almeno un oscillogramma ogni 10 manovre)
- b) Circuito di prova
- c) Correnti di prova
- d) Tensioni di prova
- e) Tensioni di ritorno e frequenza di esercizio
- f) Tensioni transitorie di ritorno presunte
- g) Tempi d'arco
- h) Numero di manovre di stabilimento e di interruzione
- i) Registrazioni delle condizioni dei contatti dopo la prova

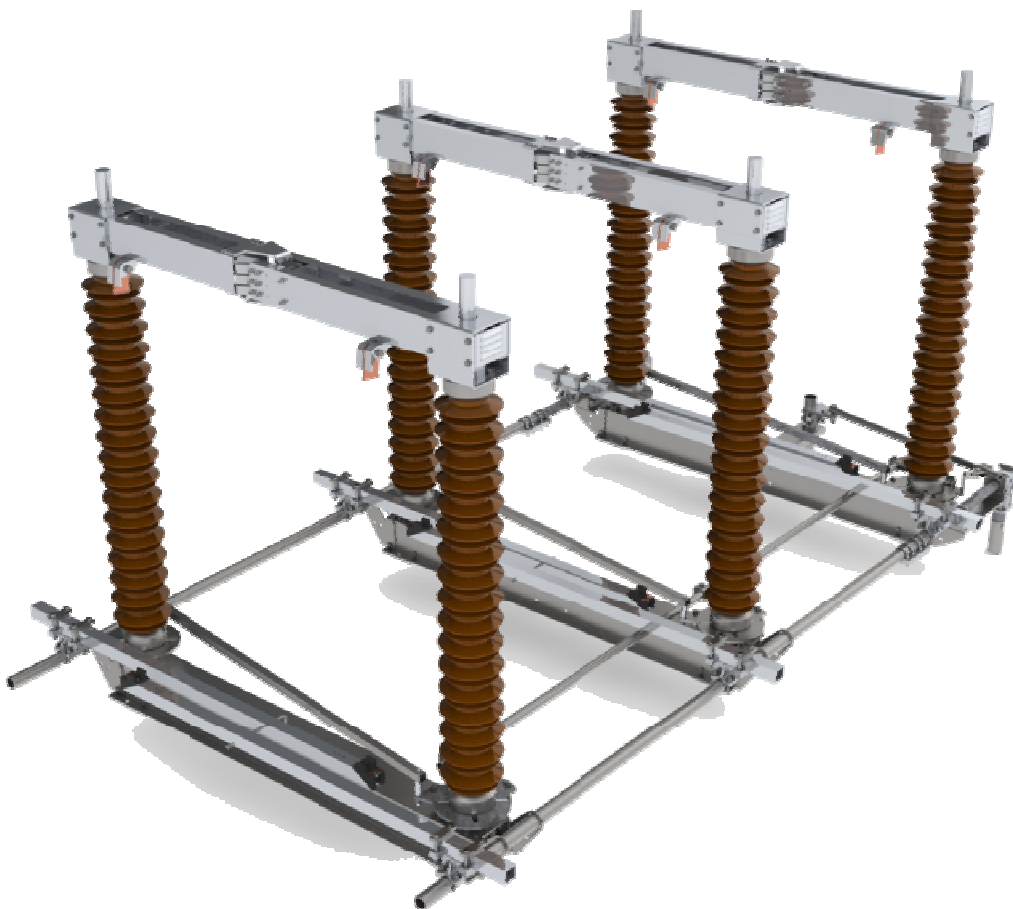
Dovrebbero essere poi comprese informazioni generali sul tipo di sezionatore e le sue modalità di funzionamento.

10 PROVA S2DA

10.1 Il sezionatore

L'S2DA è un sezionatore ad apertura centrale, come è possibile vedere in *Fig.20*. Risulta uno dei più comuni tipi di sezionatore utilizzati al mondo grazie alla sua semplicità di progettazione e alla sua efficienza. L'S2DA fornisce un'alta affidabilità anche nelle più avverse condizioni di funzionamento, come ad esempio in presenza di forti raffiche di vento o di grossi accumuli di ghiaccio; inoltre, presenta una buona stabilità in stato di chiusura nelle condizioni di guasto. AREVA offre questo dispositivo sul mercato internazionale per diversi livelli di tensione, riportati nella *Tab.7* a seguire.

Fig.20: S2DA



Tab.7: valori nominali S2DA

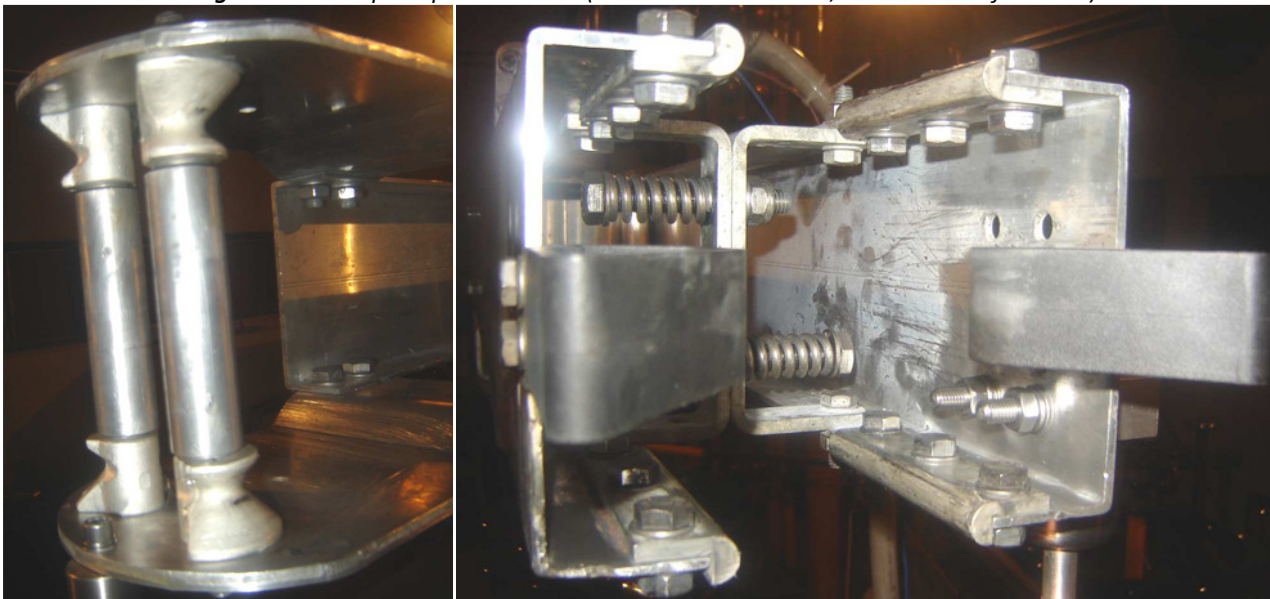
<i>Tensione nominale $U_n = [kV]$</i>	<i>Corrente nominale $I_n = [kA]$</i>	<i>Corrente di cortocircuito $I_{cc} = [kA]$</i>
72,5	4000	63
100	4000	63
126	4000	63
145	4000	63
245	4000	63
362	4000	63
550	4000	63

10.2 Caratteristiche principali

Il suo funzionamento avviene tramite la rotazione dei due isolatori ai quali è ancorata la parte attiva, attraverso cuscinetti privi di lubrificanti posti in una camera sigillata, che non richiedono pertanto alcuna manutenzione. Il dispositivo è collocato su un supporto in acciaio inox galvanizzato che conferisce la giusta robustezza a tutta la struttura. I contatti di cerniera non sono né striscianti, né rotanti: si utilizza infatti una fascia flessibile di laminati in alluminio saldata e imbullonata sulla lama e sul rispettivo contatto di alta tensione; questa, rispetto alle altre soluzioni prima accennate, offre vari aspetti positivi, quali: una bassa manutenzione, una facile ispezione, una lunga durata, un passaggio più continuo della corrente con una sua conseguente distribuzione più uniforme, una minore sensibilità delle oscillazioni esterne ed una minore corrosione che si identifica solitamente nell'accostamento di differenti materiali (in questo caso il contatto e le parti attive sono tutte realizzate in alluminio).

L'S2DA è dotato di 8 contatti principali e 2 secondari sacrificali. I primi sono rispettivamente divisi in 2 gruppi da 4, ognuno disposto su una lama del sezionatore, come visibile in Fig.21. Questi sono realizzati in rame placcato in argento. Con questa soluzione si evita la formazione di ossidi che degraderebbero il contatto e si incrementa inoltre il salto termico ammissibile secondo normativa (IEC 62271-1) da 35K a 65K, permettendo un dimensionamento più economico. Lo spessore della placcatura è tale da garantirne la resistenza all'usura meccanica (M0: 1000 manovre).

Fig.21: contatti principali dell'S2DA (a sx contatto maschio, a dx contatto femmina)



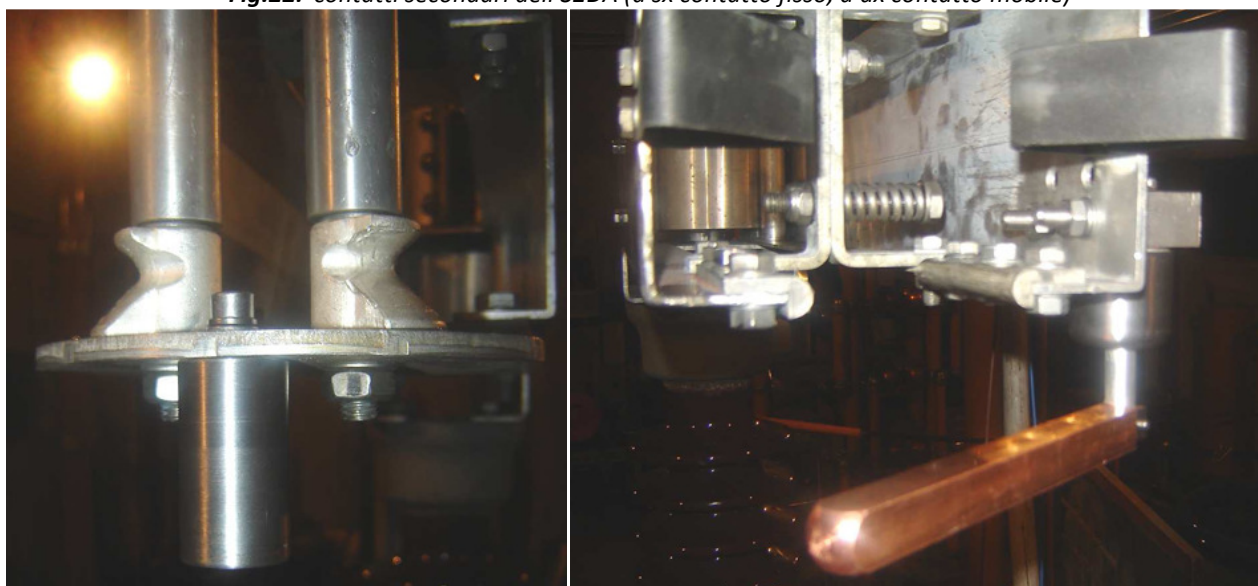
La pressione di contatto è garantita da due molle in acciaio inox, isolate da un lato in modo da impedire una loro possibile ricottura causata dal passaggio di corrente. Inoltre, grazie al disegno del contatto stesso, le forze dovute al passaggio della corrente favoriscono l'aumento della forza di contatto.

I contatti secondari sono posti in condizione tale che il fenomeno dell'arco elettrico non interferisca con il contatto principale, al fine di non compromettere la durata di vita del sezionatore. Sono costituiti da un tondo fisso e da una barra mobile ancorata tramite un dispositivo a molla, che garantiscono una linea di contatto dopo l'apertura dei contatti principali e prima che questi si richiudano. Un esempio di contatti secondari è riportato in Fig.22.

Il sezionatore è manovrato attraverso un motore DC ad una tensione nominale di $U_n = 300 \text{ V}$.

Nelle Tab.8,9 a seguire sono riportate tutte le caratteristiche nominali del sezionatore in prova e del suo meccanismo di manovra.

Fig.22: contatti secondari dell'S2DA (a sx contatto fisso, a dx contatto mobile)



Tab.8: caratteristiche dell'oggetto in prova

<i>Produttore</i>	AREVA T&D (GUANGDONG) SWITCHGEAR CO., LTD. CONGHUA CITYGUANGDONG - P.R. CHINA
<i>Tipo</i>	S2DA 126kV 2000°
<i>Anno di produzione</i>	2010
<i>Tensione nominale</i>	126 kV
<i>Frequenza nominale</i>	50 Hz
<i>BIL</i>	550 kV
<i>Corrente nominale</i>	2000 A
<i>Corrente nominale di breve durata</i>	50 kA
<i>Durata nominale del cortocircuito</i>	3 s
<i>Azionamento</i>	Motorizzato

Tab.9: caratteristiche del meccanismo di manovra

<i>Produttore</i>	AREVA T&D (GUANGDONG) SWITCHGEAR CO., LTD. CONGHUA CITYGUANGDONG - P.R. CHINA
<i>Tipo</i>	CMM/400
<i>Anno di produzione</i>	2009
<i>Tensione nominale del motore</i>	220 Vdc
<i>Nomenclatura</i>	DMR10410
<i>Tensione nominale del circuito ausiliario</i>	220 Vdc

10.3 Obiettivi di prova

La prova richiesta da AREVA si preponeva come obiettivo non solo la conferma delle capacità di interruzione delle correnti di sbarra del dispositivo secondo normativa, ma anche la determinazione dei più adatti materiali di contatto secondari ed il loro adeguato dimensionamento.

Al fine di raggiungere questi obiettivi, si è ricorsi ad un approccio sperimentale, affidandosi all'esperienza del gruppo AREVA R&D. Per la realizzazione delle prove, AREVA si è rivolta ad un ente di prova esterno, quale il Laboratorio alte tensioni del Dipartimento di Ingegneria Elettrica dell'Università di Padova.

10.4 Pre-Prove per determinazione dei materiali di contatto

Sulla base dell'esperienza di AREVA, si è scelto di testare diverse tipologie di materiali per i contatti sacrificali al fine di raggiungere una soluzione funzionale quanto economica.

Le prove *non sono state effettuate in concordanza con i valori nominali dati dalla normativa* in quanto avevano l'unico scopo di dare un'indicazione sul comportamento dei materiali testati. Senza discostarsi di molto dalle condizioni di prova espresse dalla norma, sono stati scelti, per facilità di realizzazione circuitale, i valori nominali di prova riportati in *Tab.10*. Nella *Tab.11* a seguire sono invece riportate le varie combinazioni di materiali testate.

Tab.10: valori nominali di prova

<i>Per le combinazioni 1, 2,3,4 e 5</i>	<i>Tensione nominale</i>	105 V
	<i>Corrente nominale</i>	1044 A
	<i>Fattore di potenza</i>	0,077
<i>Per la combinazione 6</i>	<i>Tensione nominale</i>	105 V
	<i>Corrente nominale</i>	1612 A
	<i>Fattore di potenza</i>	0,057

Tab.11: combinazioni di materiali testate come contatti secondari nell'S2DA

<i>Combinazione</i>	<i>Contatto mobile</i>		<i>Contatto fisso</i>	
1	Grafite	C	Grafite	C
2	Grafite	C	Rame	Cu
3	Grafite	C	Rame-Tungsteno	W/Cu 75/25
4	Grafite	C	Acciaio	AISI 304
5	Rame	Cu	Acciaio	AISI 304
6	Rame-Tungsteno	W/Cu 75/25	Rame-Tungsteno	W/Cu 75/25

È possibile osservare come fra gli accoppiamenti sopra citati ce ne siano alcuni con materiale medesimo per entrambi i contatti. Questo sfida il prudente concetto di utilizzare materiali differenti al fine di garantire due punti differenti di fusione, evitando in tal modo possibili saldature. Tuttavia, essendo le prove in seguito descritte delle test sperimentali non mirati al superamento della prova, si è scelto di testarli ugualmente.

Le prove sono state realizzate utilizzando un circuito equivalente a quello richiesto dalla norma 62271-102 ANNEX B, riportato in *Fig.18*. Il meccanismo di manovra è stato alimentato con la sua tensione minima che corrisponde alla sua tensione nominale -15% ($220 - 15\% = 187$).

Le registrazioni sono state effettuate con un oscilloscopio digitale a 4 canali e 500 MHz di banda passante (Tektronix TDS5054). La misura di corrente è stata realizzata con un trasformatore di corrente (TA 3000 A / 5 A) in aggiunta ad una sonda di corrente ottenendo un rapporto 100 mV / 1 A (costante complessiva

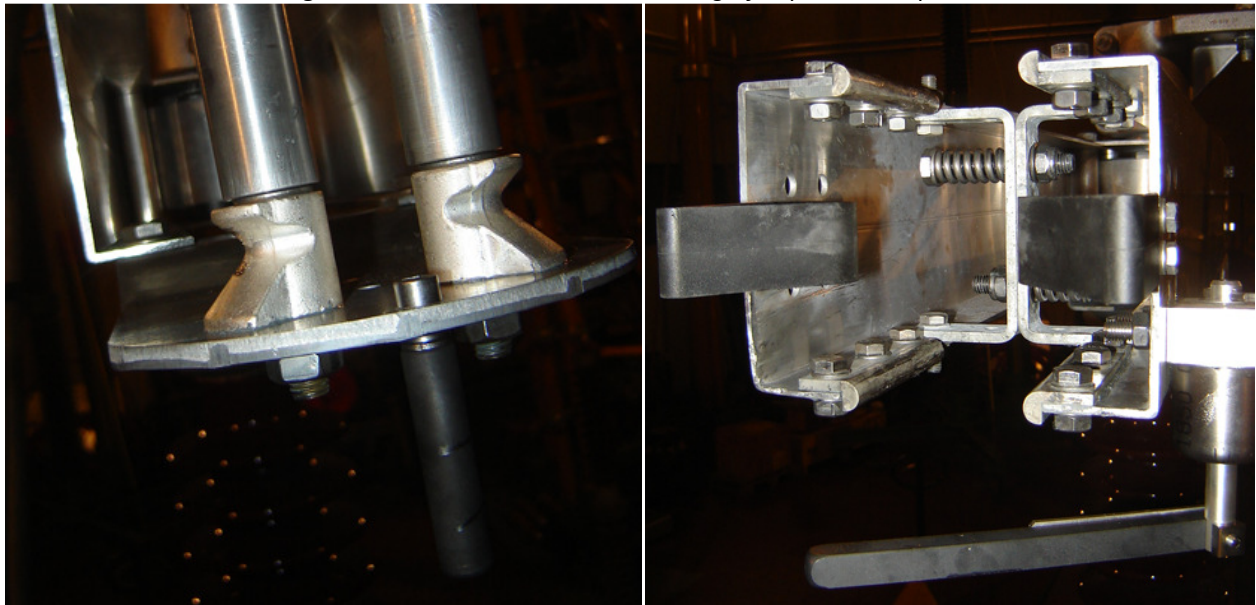
6000). La misura di tensione è stata invece fatta tramite un trasduttore sonda differenziale x 200 (costante impastata nello strumento). Infine, i parametri elettrici sono stati controllati con un wattmetro (Elettrotest).

10.4.1 Prima prova: contatto fisso in grafite / contatto mobile in grafite

Si è scelto di utilizzare questo materiale basandosi sul suo noto buon comportamento in presenza del fenomeno dell'arco elettrico. In precedenza si è detto che è bene utilizzare materiali differenti nei contatti per evitare possibili saldature (causate da una temperatura di fusione comune); in questo caso specifico in problema non sussiste in quanto la grafite è un materiale refrattario, con la più alta temperatura di fusione (3500°C) che non può essere raggiunta con l'entità degli archi considerati.

La prova consiste nello svolgimento di una sequenza di 10 operazioni di manovra. La cadenza fra un'operazione e la successiva scelta è di 2 minuti. In seguito sono riportate le registrazioni C/O della prima e dell'ultima manovra (*Oscil.1÷4*).

Fig.23: contatti secondare dell'S2DA in grafite prima della prova



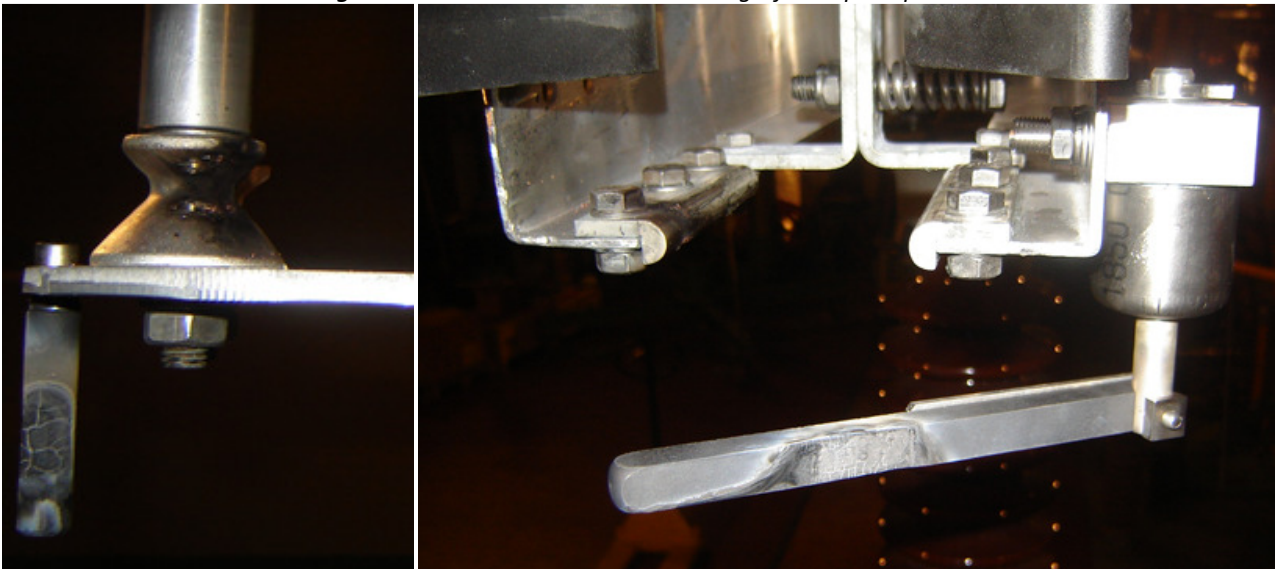
Al termine della prova si è potuto concludere che date le forze di contatto necessarie (≈ 10 Kg), il contatto fisso presentava un consumo considerevole (*Fig.24*), dovuto principalmente alla sua fragilità (la grafite non si erode, ma si carbonizza); inoltre, l'alta resistività della grafite rispetto ai metalli favorisce l'aumento della temperatura causato dall'effetto Joule; se poi si considera che la resistenza è essa stessa funzione della temperatura e che aumenta con essa, diventa inevitabile raggiungere alte temperature con conseguenti disagi che è proprio uno degli effetti non voluti. Si sono infatti registrati archi di colore bianco-azzurro che corrispondono a temperature attorno a $1100^{\circ}\text{C} \div 1400^{\circ}\text{C}$. Certo è che anche il dimensionamento dei contatti gioca un ruolo fondamentale e valutando il costo relativo ad un contatto di dimensioni maggiori che garantirebbe una migliore dispersione del calore ed una maggiore robustezza, possiamo già scartare tale soluzione da un punto di vista economico.

Come è possibile vedere dalle registrazioni, è stato possibile determinare il tempo intercorso fra l'apertura del circuito principale e quello secondario ($\approx 0,5$ s): l'alta resistività di quest'ultimo provoca infatti una caduta di tensione considerevole con forma d'onda pressoché sinusoidale molto distinguibile. Si può notare tuttavia come, essendo la grafite un lubrificante solido, non ci siano saltellamenti rilevanti fra i due contatti. Ultima ma non meno importante considerazione, durante le operazioni di manovra si sono verificate delle scariche sui contatti principali; questo è riconducibile al fatto che la corrente tende come noto a percorrere

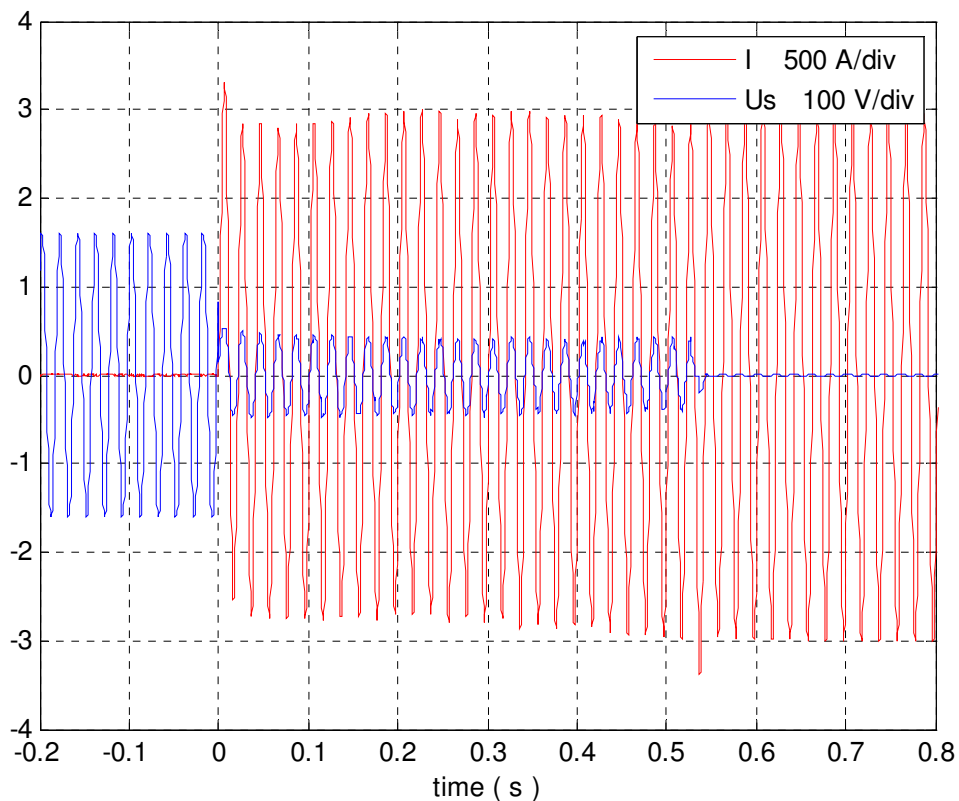
il percorso con minore impedenza che nel momento subito dopo la separazione dei contatti principali è ancora riconducibile su questi a causa dell'alta resistenza data dalla grafite. I tempi d'arco registrati (< 100 ms) risultano invece accettabili.

Successivamente, per ovviare ai problemi sopra descritti, si è provato a sostituire il contatto fisso con uno di diametro maggiore svolgendo una serie di 4 operazioni di manovra, sempre intervallate da un tempo di riposo di 2 minuti. Questa soluzione che presenta una maggiore superficie di scambio termico, una minore resistenza ed una maggiore resistenza del contatto non ha dato però alcun risultato significativo.

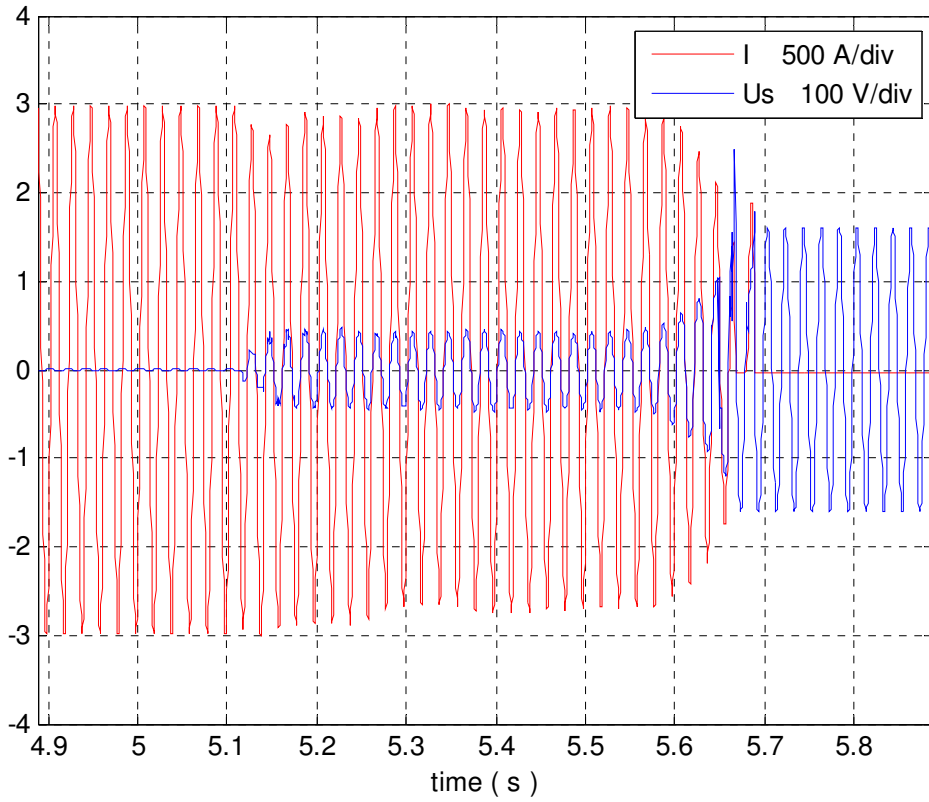
Fig.24: contatti secondari dell'S2DA in grafite dopo la prova



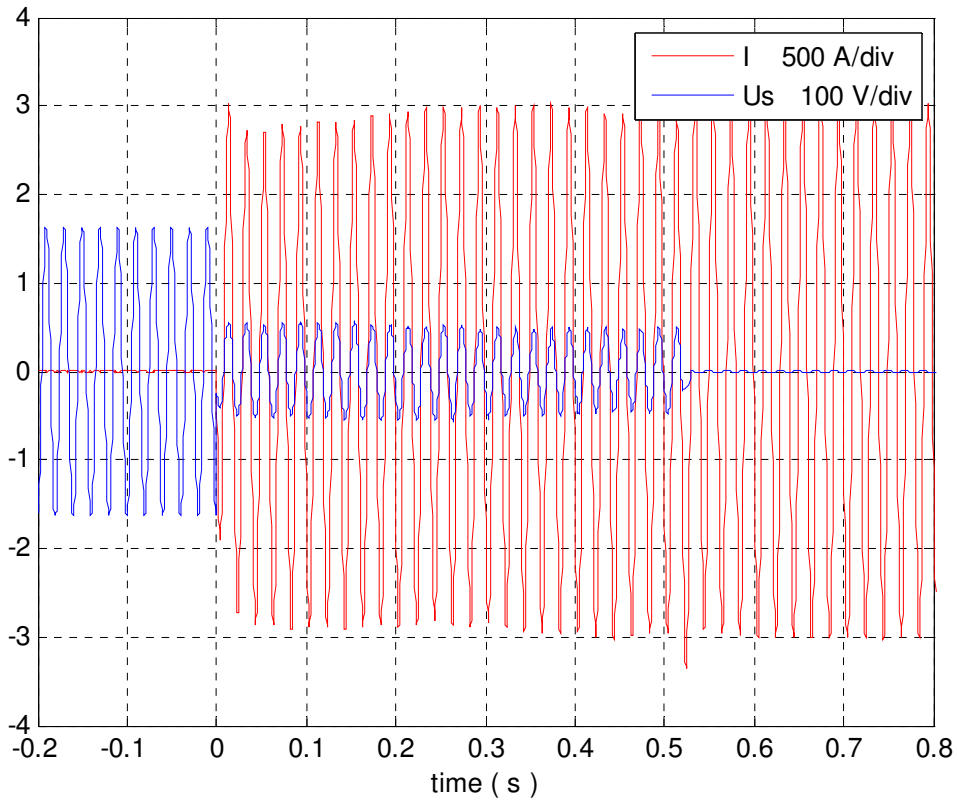
Oscil.1: registrazione prima manovra C/C (S2DA)



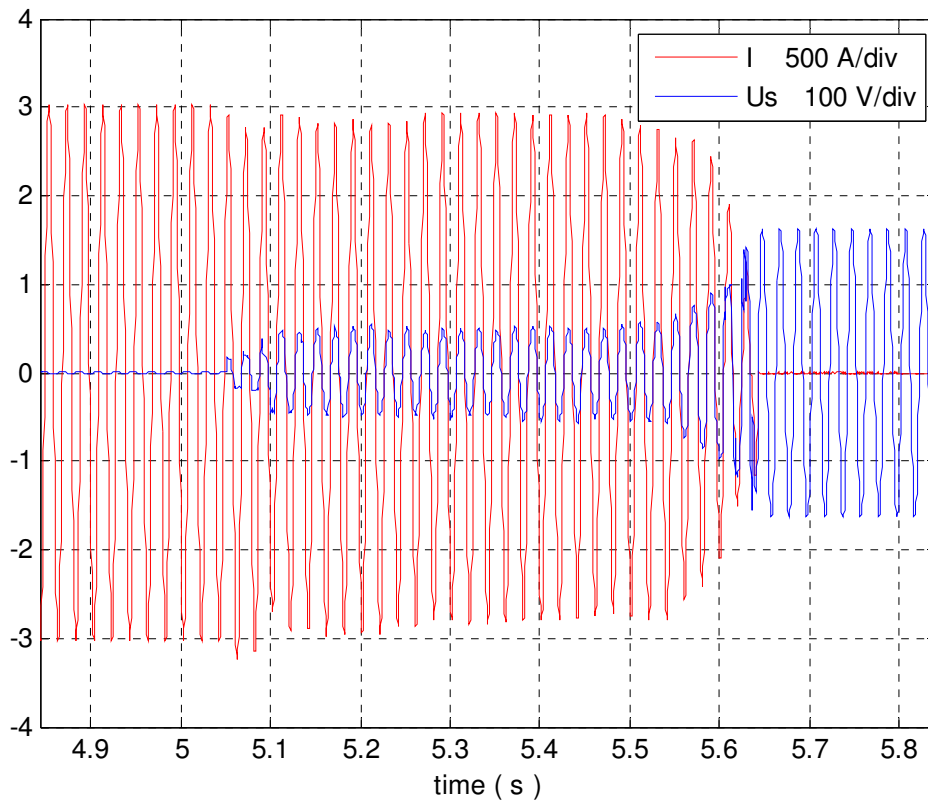
Oscil.2: registrazione prima manovra O C/C (S2DA)



Oscil.3: registrazione ultima manovra C C/C (S2DA)



Oscil.4: registrazione ultima manovra O C/C (S2DA)

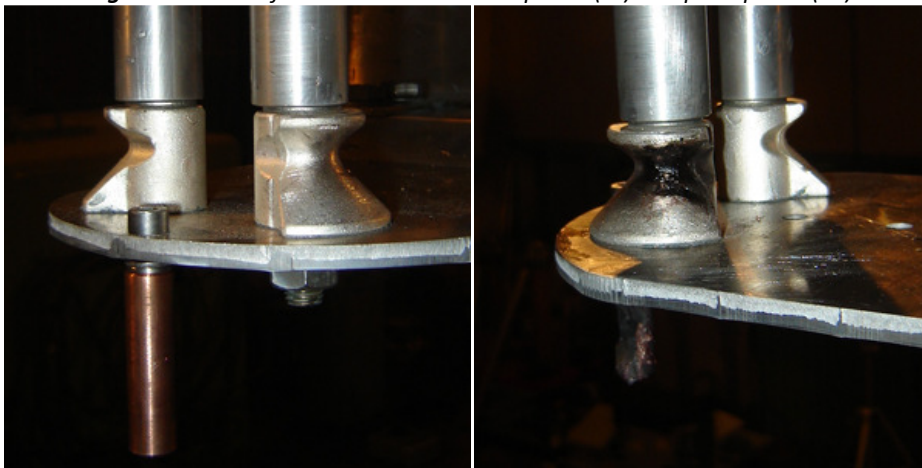


10.4.2 Seconda prova: contatto fisso in rame / contatto mobile in grafite

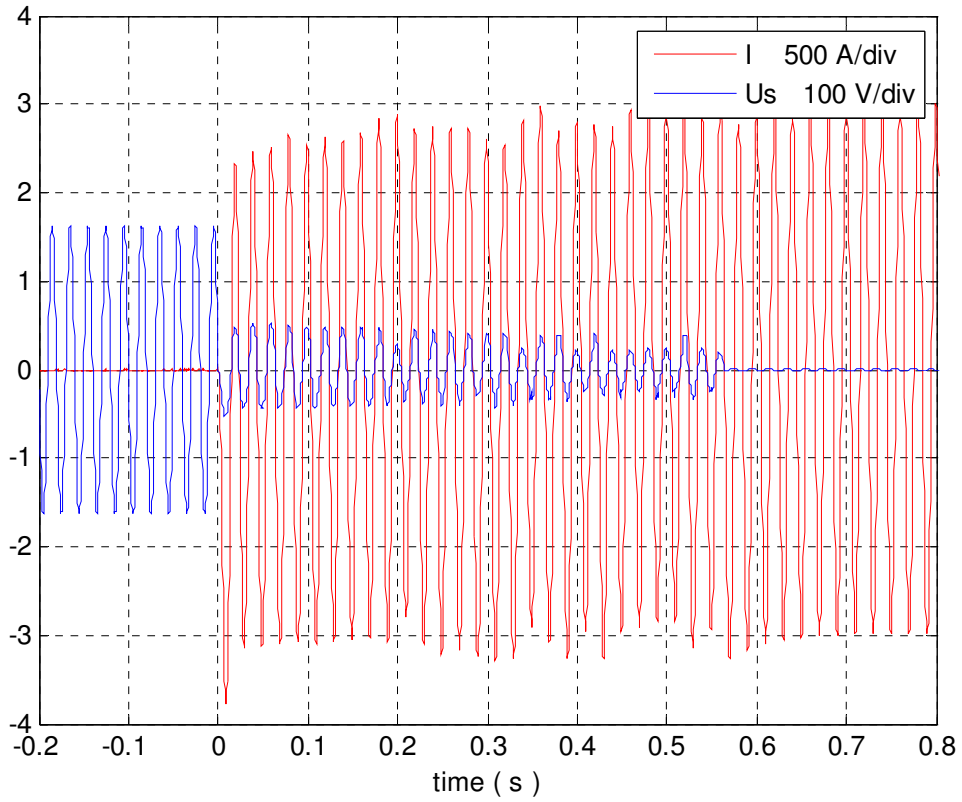
La seconda prova prevede la sostituzione del contatto fisso con un tondino in rame, mantenendo inalterato il contatto mobile. Anche in questo caso si è svolta una sequenza di 10 operazioni di manovra, mantenendo un tempo di riposo di 2 minuti come scelto in precedenza.

Al termine della prova si è potuta riscontrare un'eccessiva erosione del contatto fisso, come mostrato in Fig.25. Questo è riconducibile a due fattori: l'alta resistenza della grafite che innalza la temperatura facilitando la perdita di particelle metalliche, il dimensionamento inadeguato del tondino a disposizione nel momento di prova. In seguito sono riportate le registrazioni della prima e dell'ultima operazione di manovra (Oscil.5÷9)

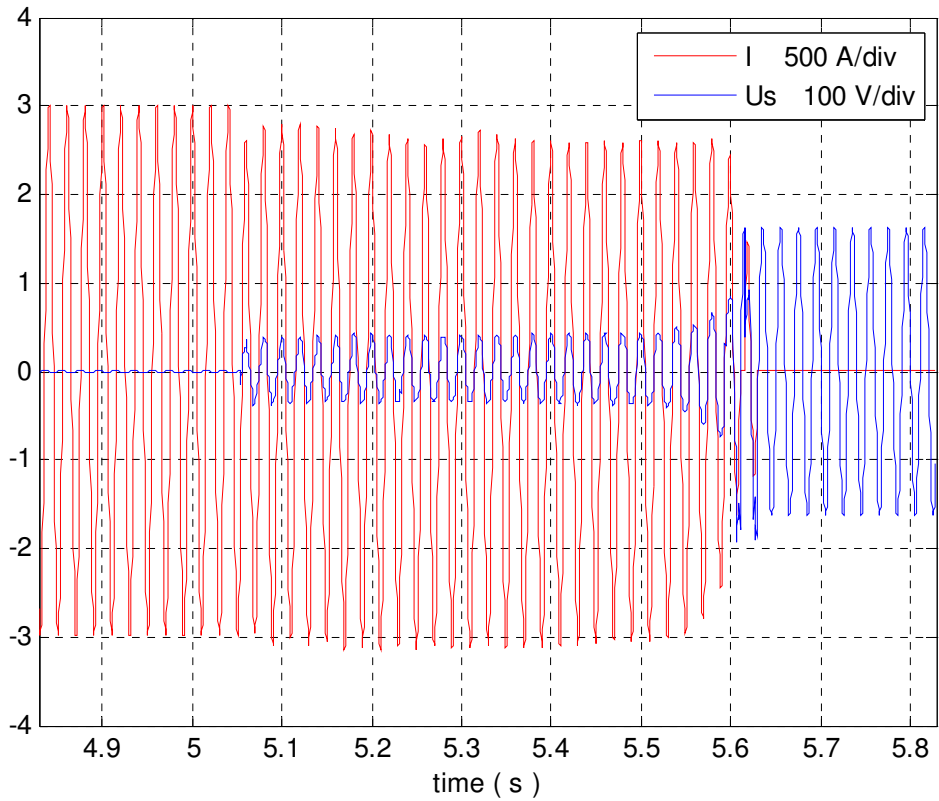
Fig.25: contatto fisso dell'S2DA in rame prima (sx) e dopo la prova (dx)



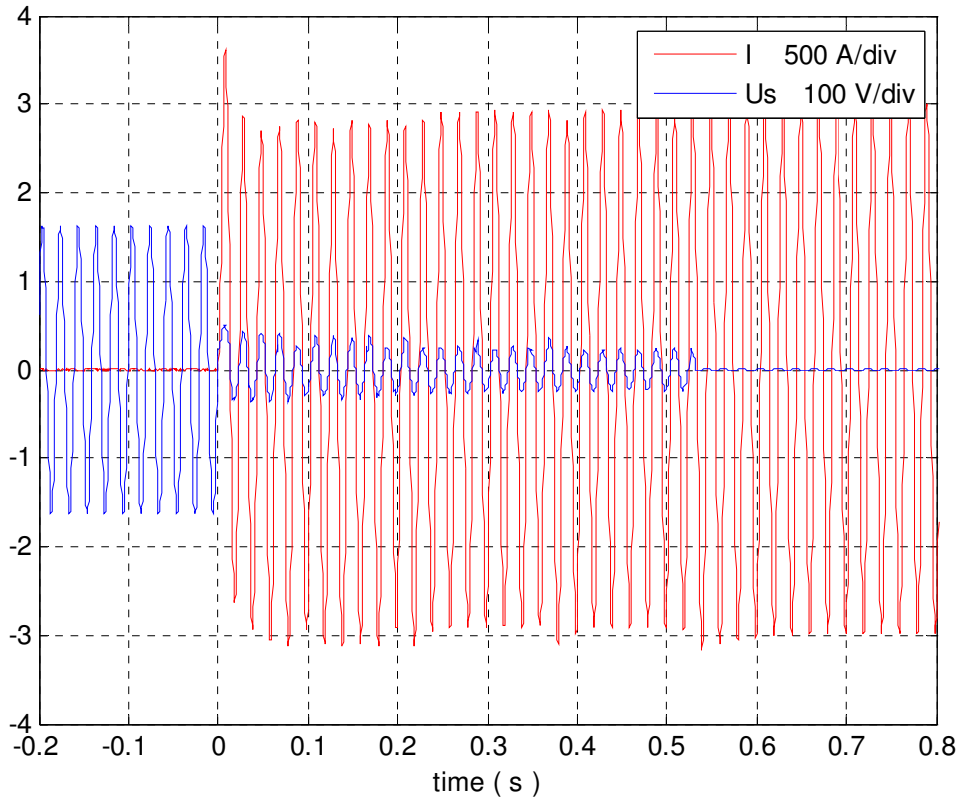
Oscil.5: registrazione prima manovra C Cu/C (S2DA)



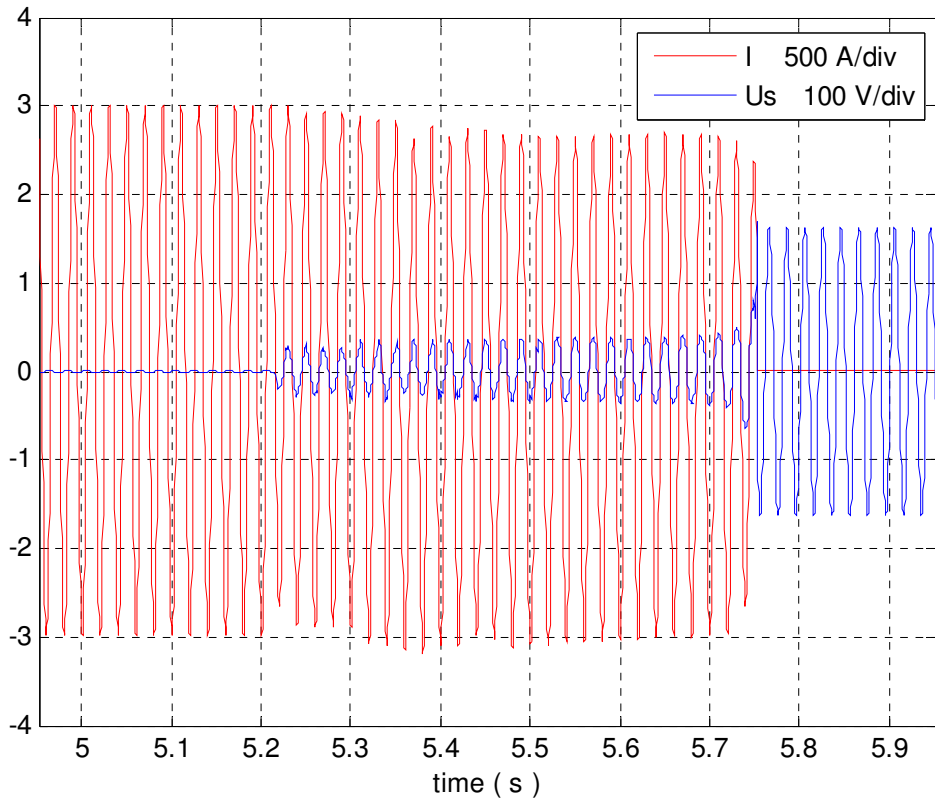
Oscil.6: registrazione prima manovra O Cu/C (S2DA)



Oscil.7: registrazione ultima manovra C Cu/C (S2DA)



Oscil.8: registrazione ultima manovra O Cu/C (S2DA)



Anche in questo caso è possibile notare come l'influenza dell'alta resistività della grafite provochi una caduta di tensione evidente che identifica il tempo intercorso fra la separazione del circuito principale e quello secondario. I tempi di durata d'arco non riscontrano alcun cambiamento.

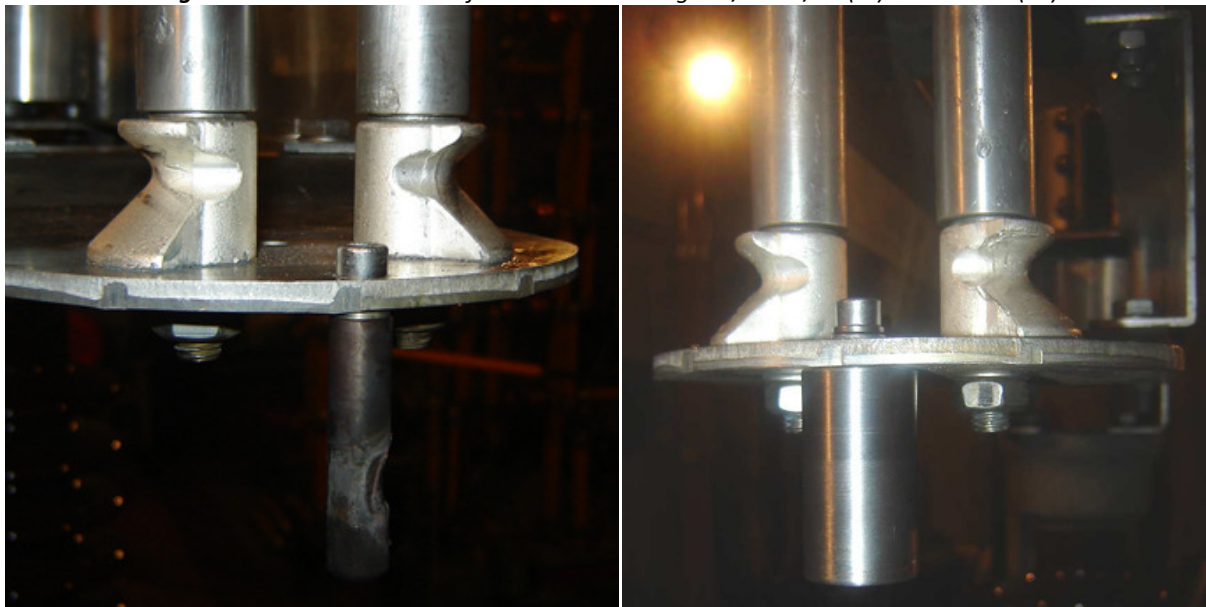
10.4.3 Terza prova: contatto fisso in rame-tungsteno (W/Cu 75/25) / contatto mobile in grafite

La terza prova prevede la sostituzione del contatto fisso con un tondino in rame-tungsteno (W/Cu 75/25), mantenendo inalterato ancora una volta il contatto mobile. La scelta di questo materiale è dovuta alla sua maggiore resistenza alla corrosione rispetto al rame puro, alla sua buona conducibilità ed al suo alto punto di fusione (è il metallo con il più alto punto di fusione: 3422°C). Questa particolare lega è di fatto già utilizzata con lo stesso scopo su altri dispositivi con buoni risultati.

Analogamente ai casi precedenti, la prova consisteva in una sequenza di 10 operazioni di manovra, mantenendo un tempo di riposo di 2 minuti come scelto in precedenza.

Al termine della prova si è potuta riscontrare un'erosione del contatto fisso simile alla prima prova, come mostrato in Fig.26. In seguito sono riportate le registrazioni C/O della prima e dell'ultima manovra (Oscil.9 ÷ 12).

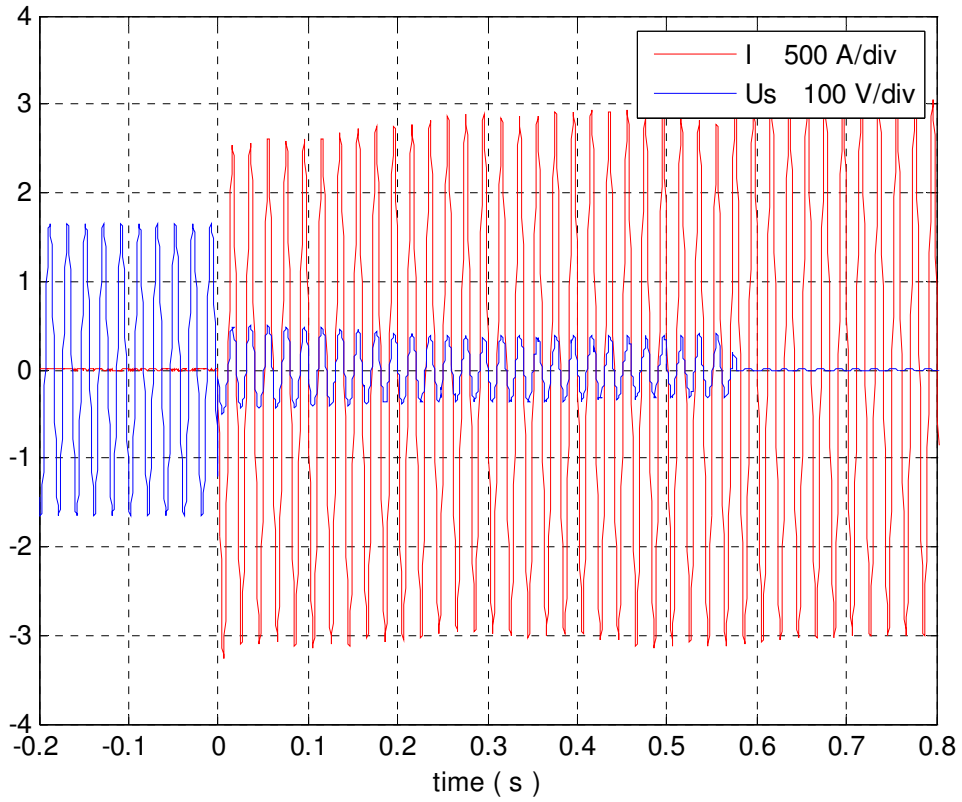
Fig.26: contatto secondario fisso dell'S2DA in lega W/Cu 75/25 (sx) e in acciaio (dx)



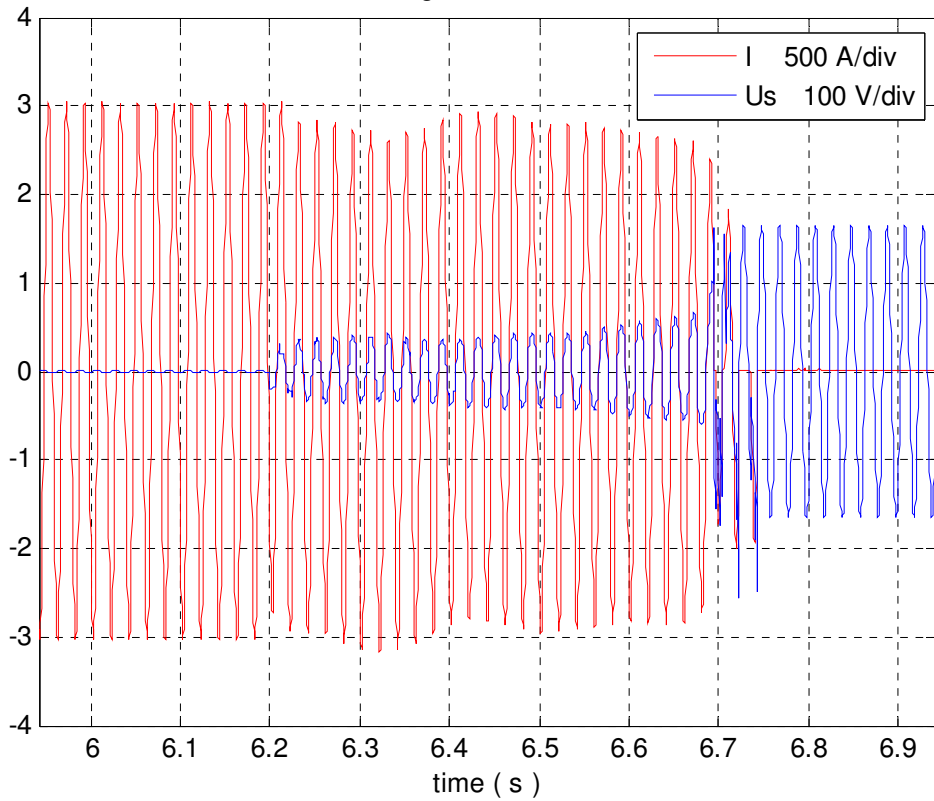
10.4.4 Quarta prova: contatto fisso in acciaio inox (AISI 304) / contatto mobile in grafite

La quarta prova prevede la sostituzione del contatto fisso con un tondino in acciaio inox (AISI 304), mantenendo inalterato ancora una volta il contatto mobile. La scelta di questo materiale è giustificata dal suo costo contenuto e dalla sua alta resistenza alla corrosione. Analogamente ai casi precedenti, la prova consisteva in una sequenza di 10 operazioni di manovra, mantenendo inalterato anche il tempo di riposo (2 minuti). A prova ultimata si è visto come il comportamento di questa coppia di materiali è simile al caso della seconda prova, grafite/rame (da considerare però il maggior costo di quest'ultimo). Come da prassi, sono riportate in seguito le registrazioni C/O della prima e dell'ultima manovra (Oscil.13 ÷ 16).

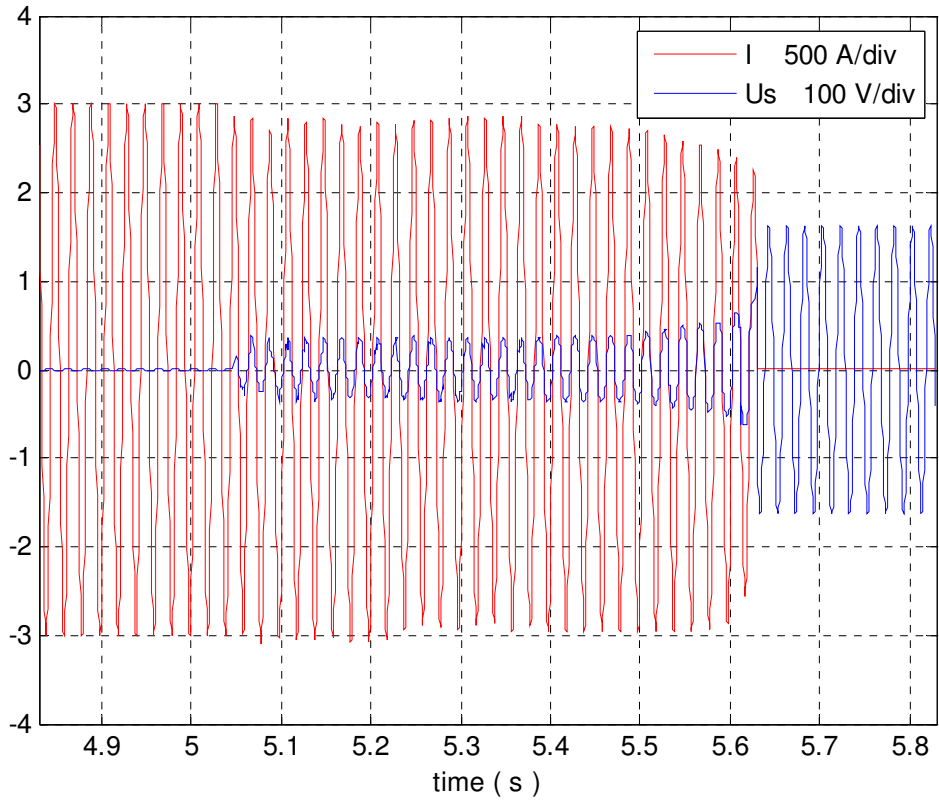
Oscil.9: registrazione prima manovra C W/Cu/C (S2DA)



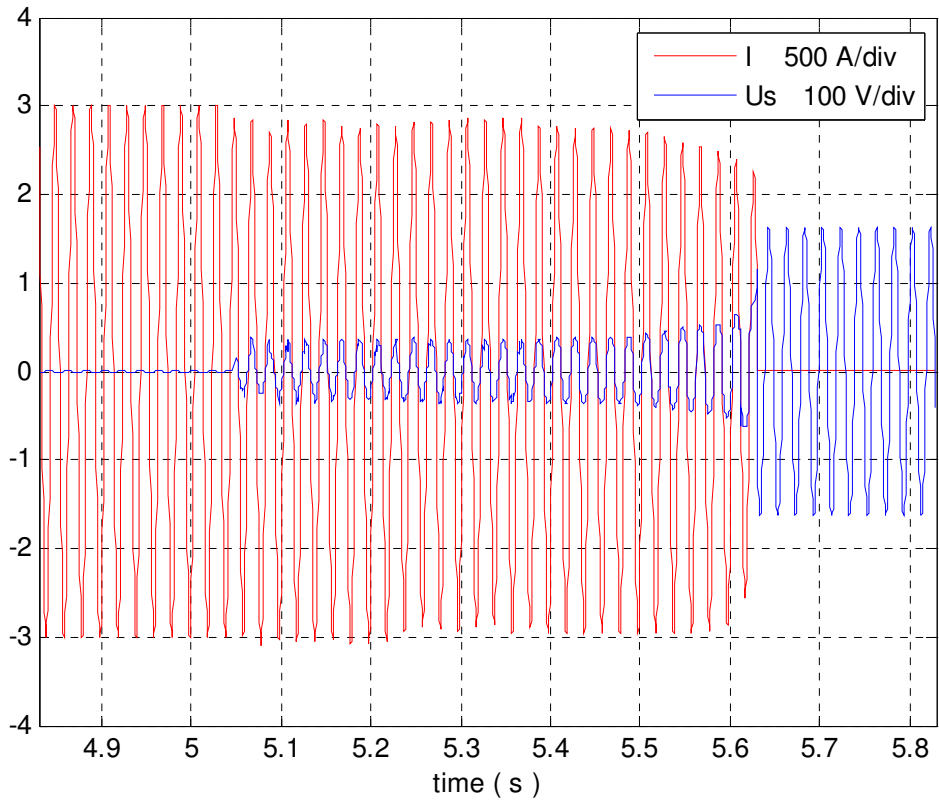
Oscil.10: registrazione prima manovra O W/Cu/C (S2DA)



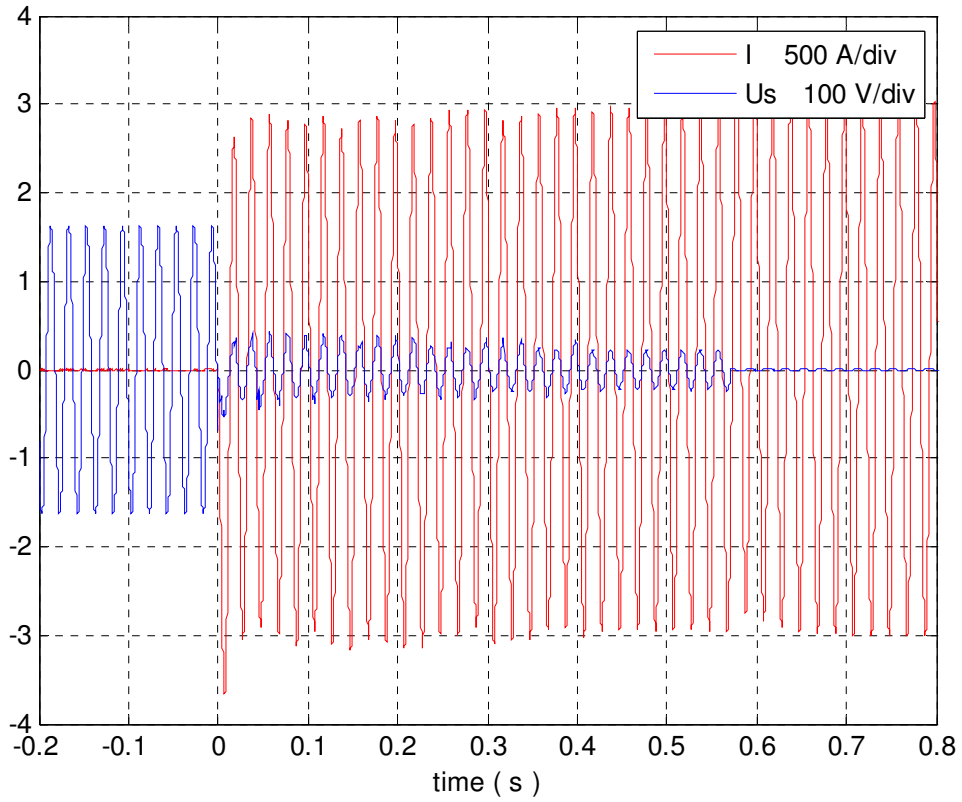
Oscil.11: registrazione ultima manovra C W/Cu/C (S2DA)



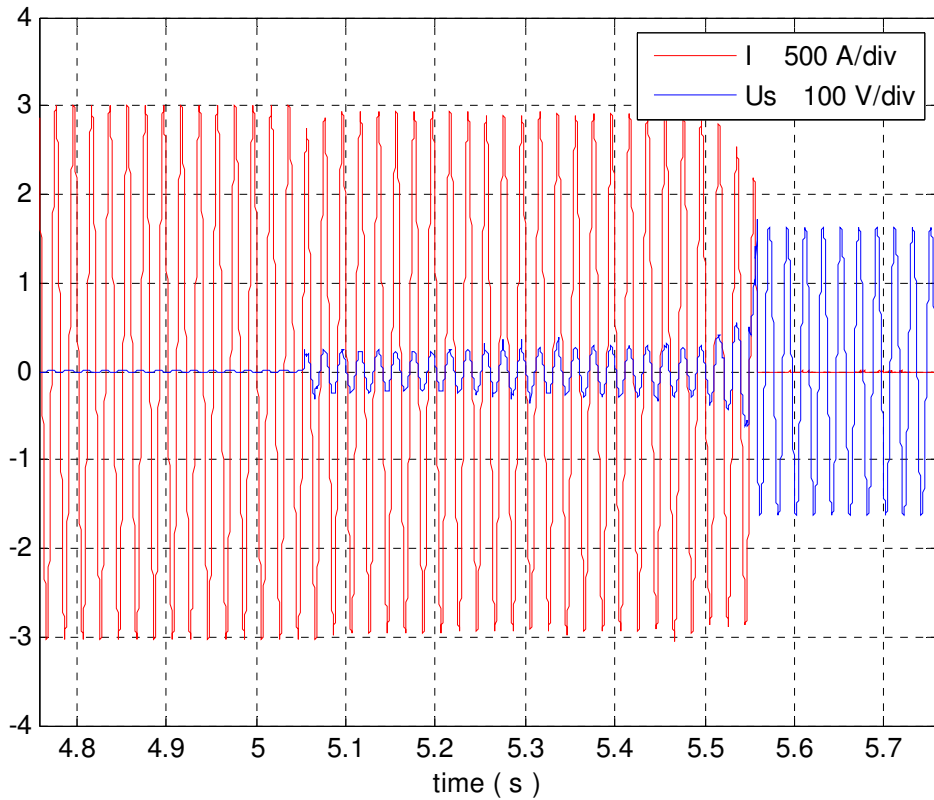
Oscil.12: registrazione ultima manovra O W/Cu/C (S2DA)



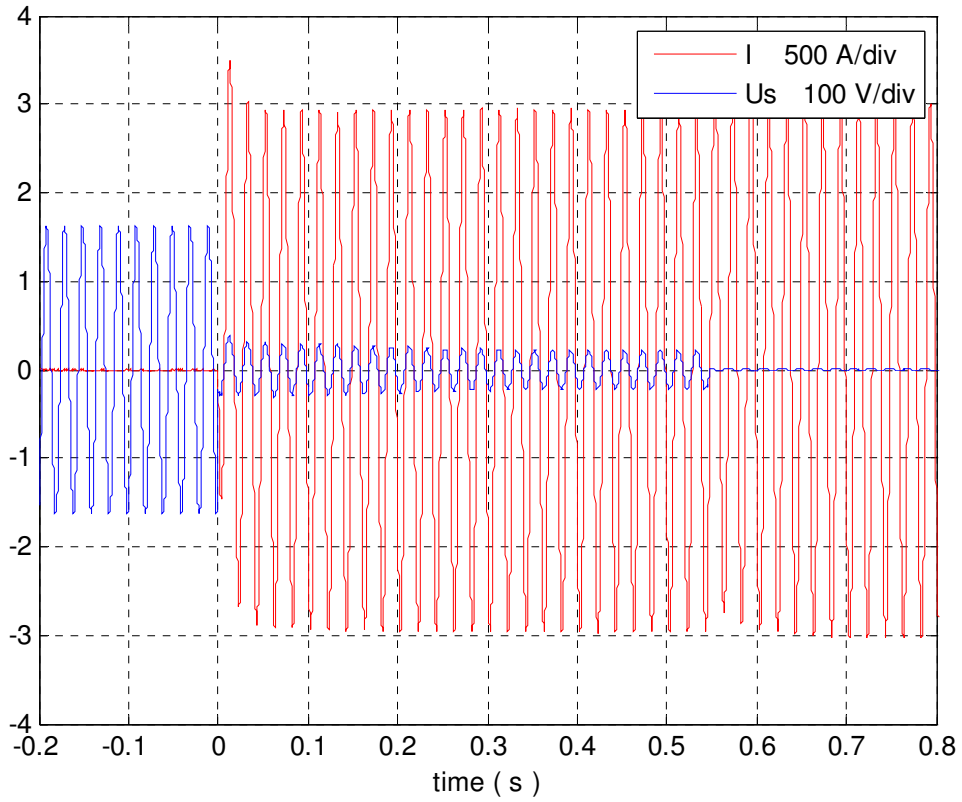
Oscil.13: registrazione prima manovra C AISI/C (S2DA)



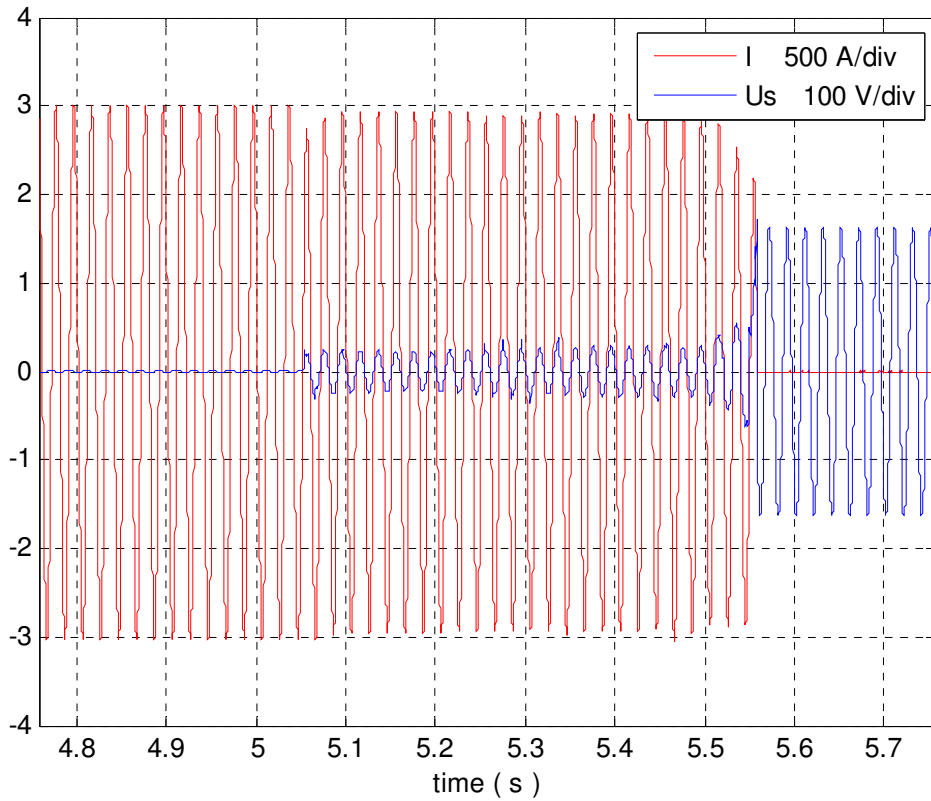
Oscil.14: registrazione prima manovra O AISI/C (S2DA)



Oscil.15: registrazione ultima manovra C AISI/C (S2DA)



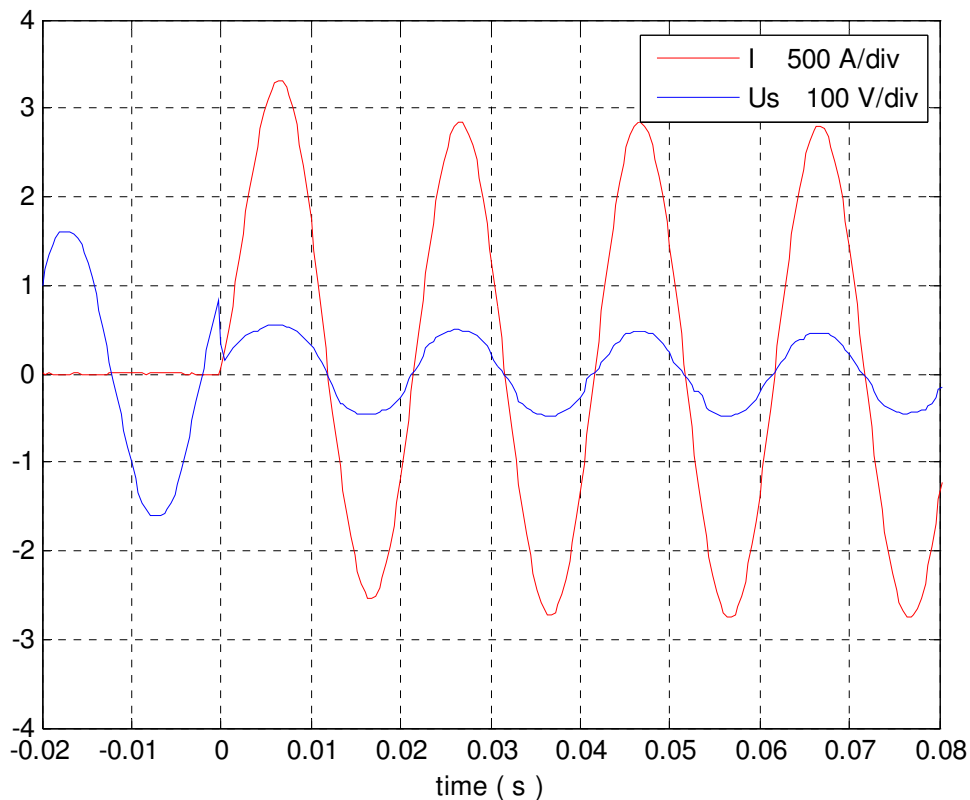
Oscil.16: registrazione ultima manovra O AISI/C (S2DA)



Osservazioni

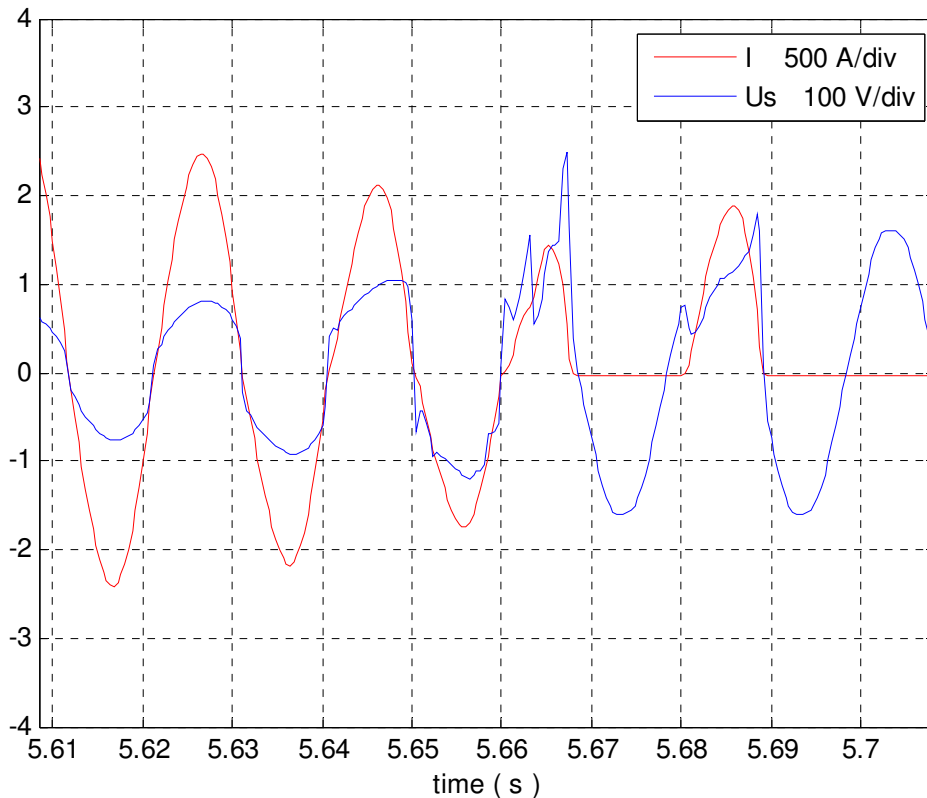
Valutando tutte le prove finora svolte, è possibile osservare che l'utilizzo della grafite comporta caduta di tensione considerevole sul circuito secondario (massima con C/C, inferiore come ovvio per gli altri accoppiamenti); come verificatosi per il primo caso, questo può provocare una scarica fra i contatti principali, compromettendo la prova. Inoltre, la caduta generata da questo materiale, influenza le forme d'onda d'arco, che non corrispondono a quella tipica. A giustificazione di quanto detto sono di seguito riportate due registrazioni di scarica d'arco (C/O) fatte durante la prima prova (C/C) (*Oscil.17,18*).

Oscil.17: registrazione della tensione d'arco C (C/C) (S2DA)



Dalla prima registrazione (*Oscil.17, chiusura dei contatti secondari*), è possibile notare come la chiusura non presenti evidenti segni d'arco. La caduta di tensione nel circuito secondario, come prima citato, presenta una forma d'onda sinusoidale, leggermente alterata a causa dell'assestamento in corso dei contatti. Dalla seconda registrazione (*Oscil.18, apertura dei contatti secondari*), si misura un tempo d'arco maggiore (≈ 20 ms = 1 ciclo). Nel caso specifico, si può notare come l'arco non si sia estinto in un'unica volta, ma si sia re-innescato dopo mezzo ciclo di tensione, portando così il suo tempo di permanenza totale a circa 2 cicli e mezzo (≈ 100 ms).

Oscil.18: registrazione della tensione d'arco O (C/C) (S2DA)

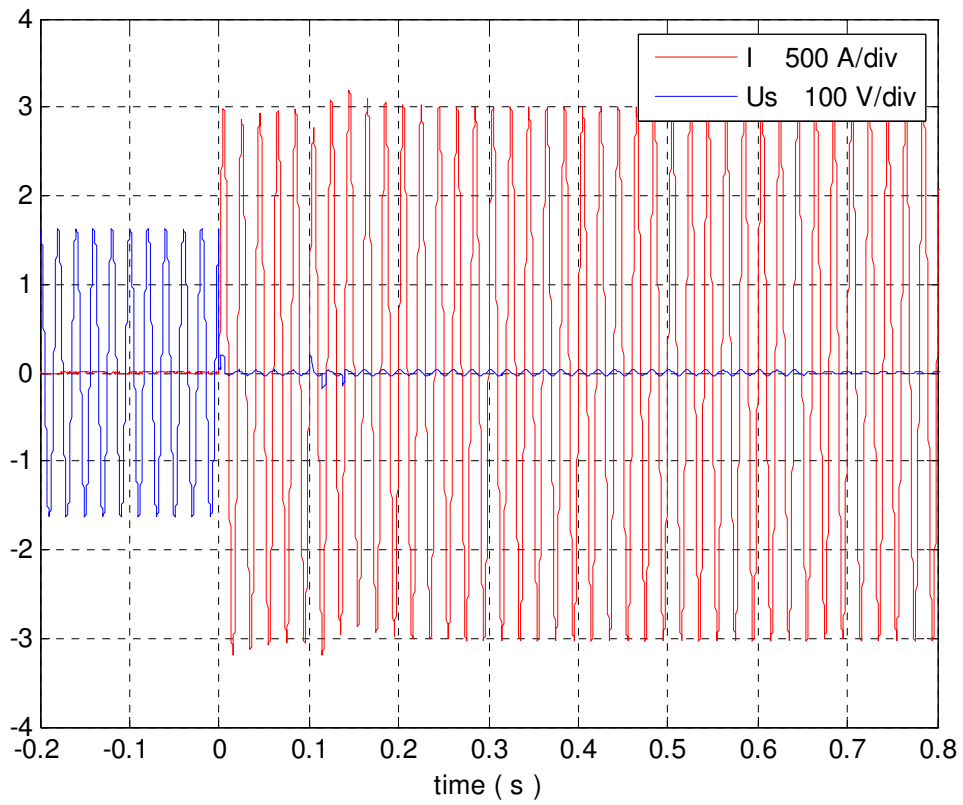


Gran parte dei materiali utilizzati sono costosi e come precedentemente accennato per il primo caso, un dimensionamento maggiore per migliorare le condizioni della resistenza del contatto e della sua capacità di dispersione termica porterebbe ad un costo eccessivo del dispositivo stesso. Pertanto nella continuazione delle prove si è scelto di non utilizzare la grafite ma di passare ad accoppiamenti di materiali più economici, in grado di fornire resistenze decisamente inferiori a quelle degli accoppiamenti finora trattati.

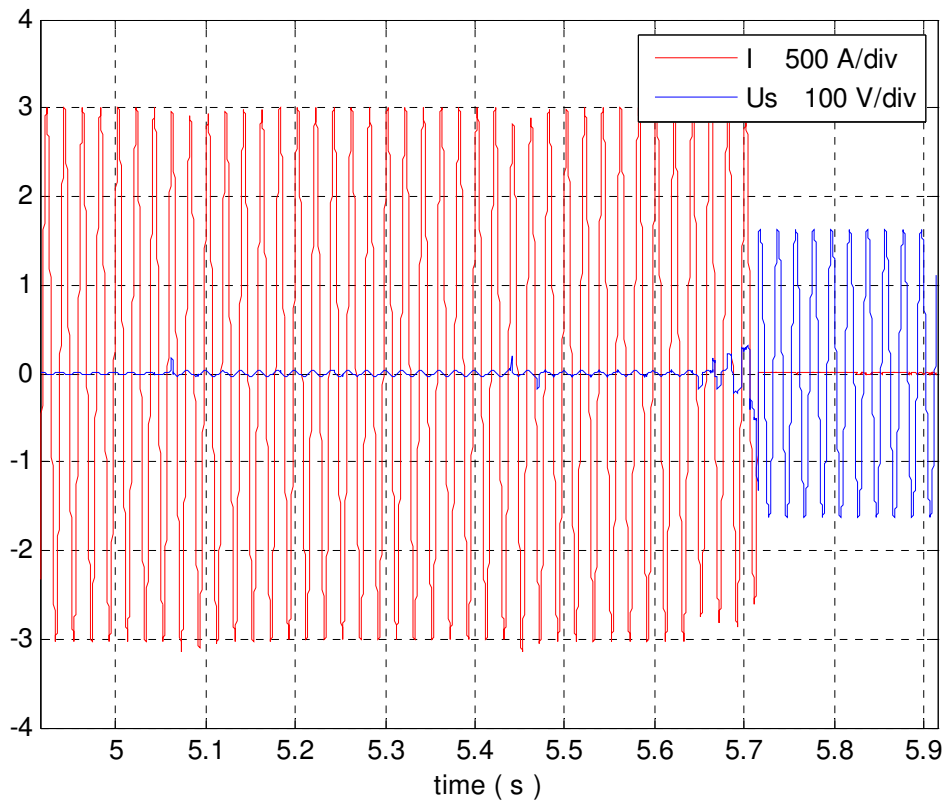
10.4.5 Quinta prova: contatto fisso in acciaio inox (AISI 304) / contatto mobile in rame

La prima scelta concorde alla decisione sopracitata è ricaduta sull'accoppiamento rame e acciaio inox (AISI 304). Diversamente dai casi precedenti, la prova consisteva in una sequenza di 20 operazioni di manovra, mantenendo un tempo invariato di riposo di 2 minuti. In seguito sono esposte le registrazioni C/O della prima e dell'ultima manovra (*Oscil.19 ÷ 22*).

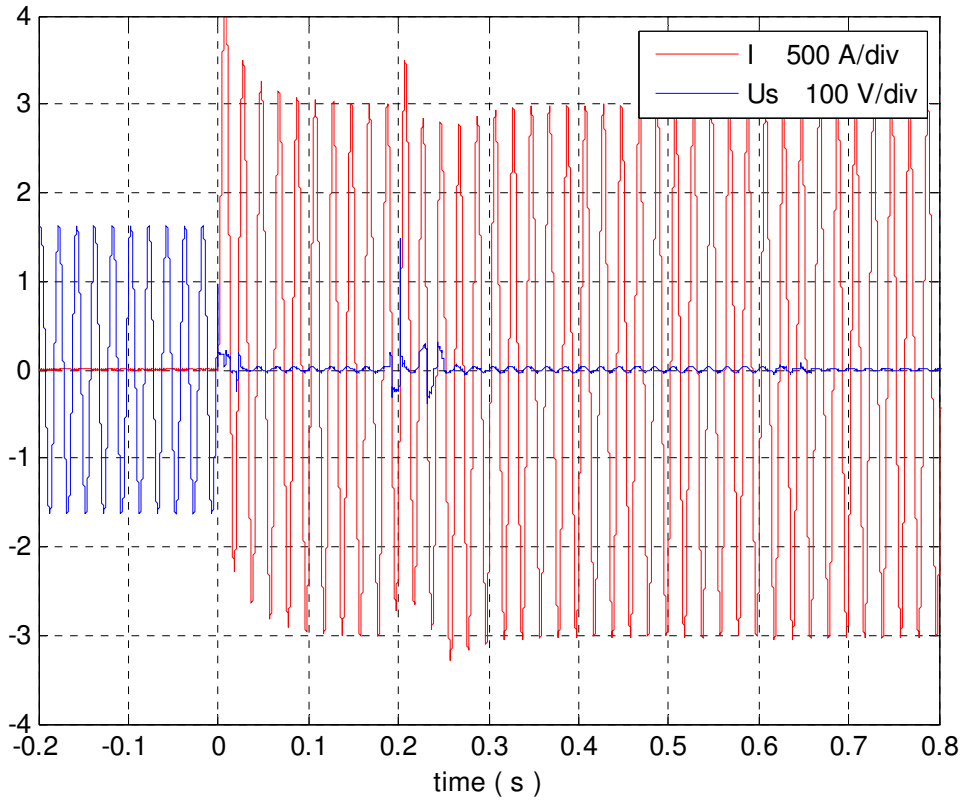
Oscil.19: registrazione prima manovra C AISI/Cu (S2DA)



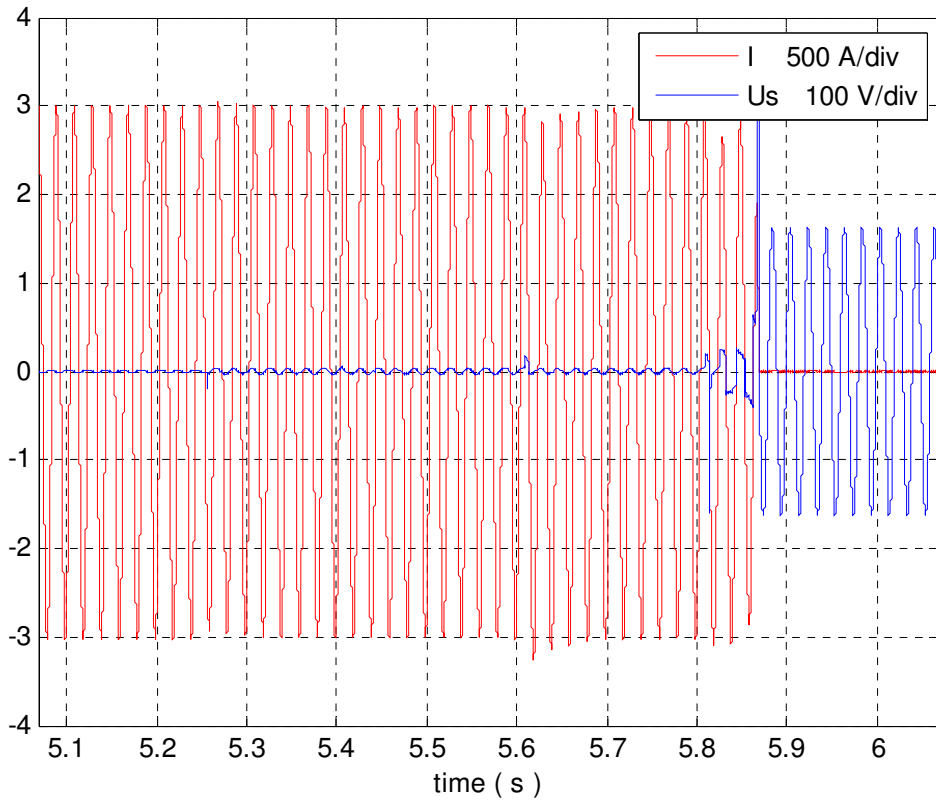
Oscil.20: registrazione prima manovra O AISI/Cu (S2DA)



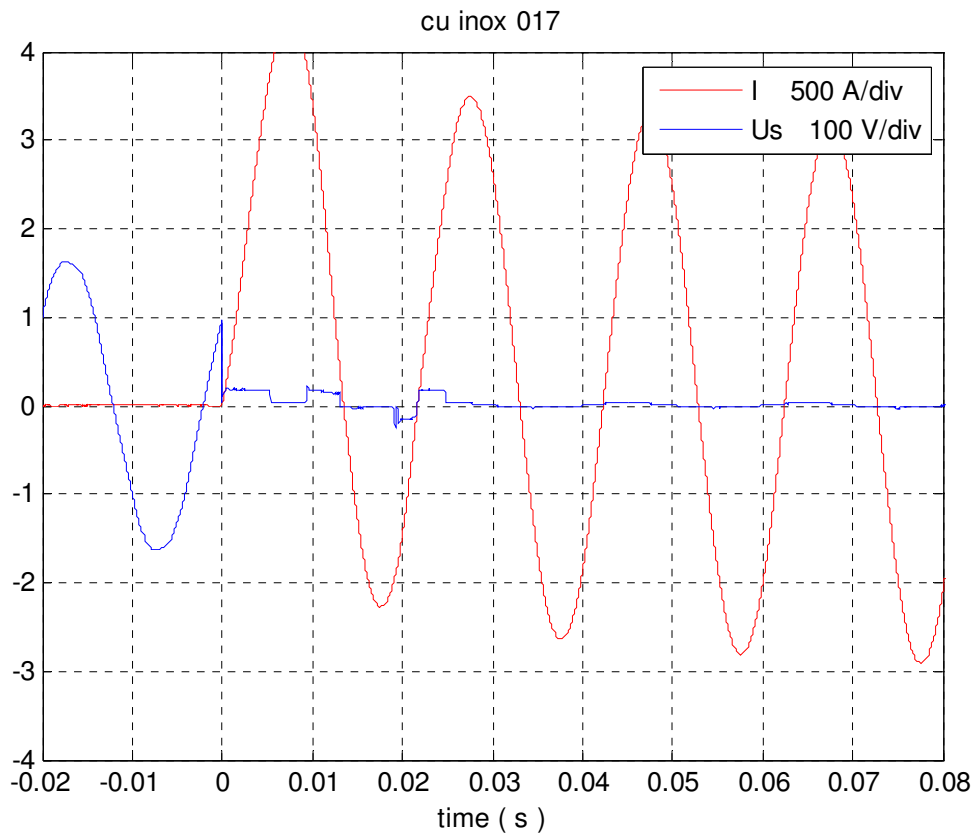
Oscil.21: registrazione ultima manovra C AISI/Cu (S2DA)



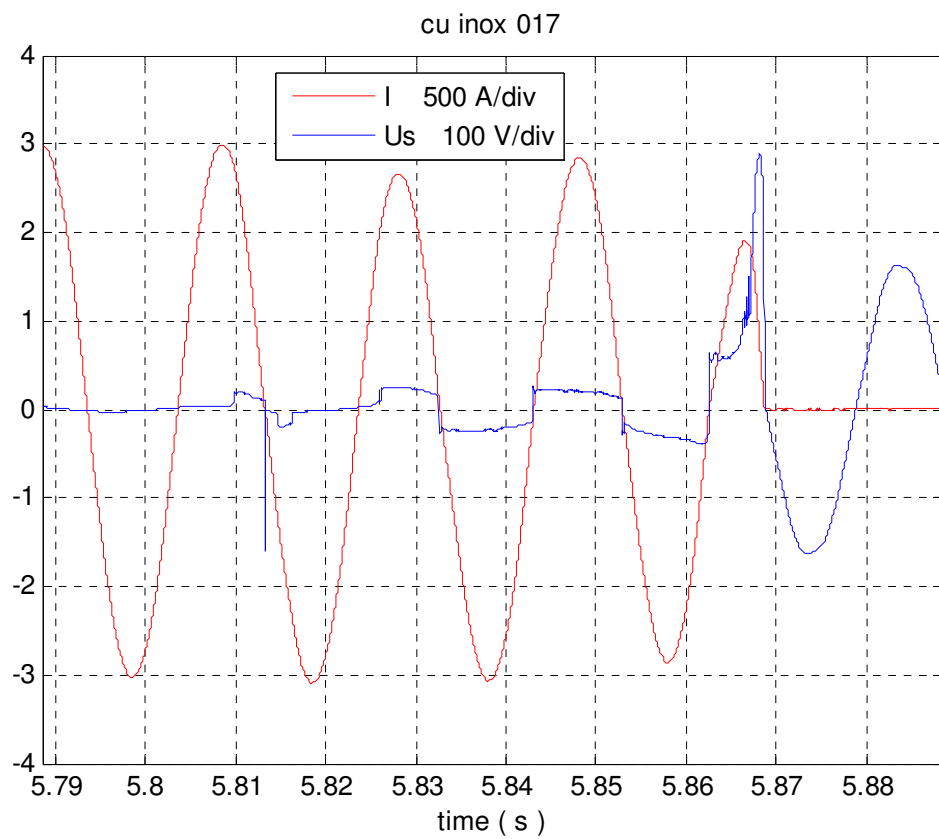
Oscil.22: registrazione ultima manovra O AISI/Cu (S2DA)



Oscil.23: registrazione della tensione d'arco C (AISI/Cu) (S2DA)



Oscil.24: registrazione della tensione d'arco O (AISI/Cu) (S2DA)



Dalle registrazioni sopra esposte è facile notare un netto miglioramento: la resistenza di contatto del circuito secondario è decisamente trascurabile; questo comporta un minore surriscaldamento dei componenti permettendo un loro dimensionamento più modesto e risolve il problema prima riscontrato di scarica fra i contatti del circuito principale. Tuttavia, le deformazioni subite dai contatti a causa dell'erosione superficiale d'arco, portano al verificarsi di qualche saltellamento fra questi, con possibili brevi re-inneschi.

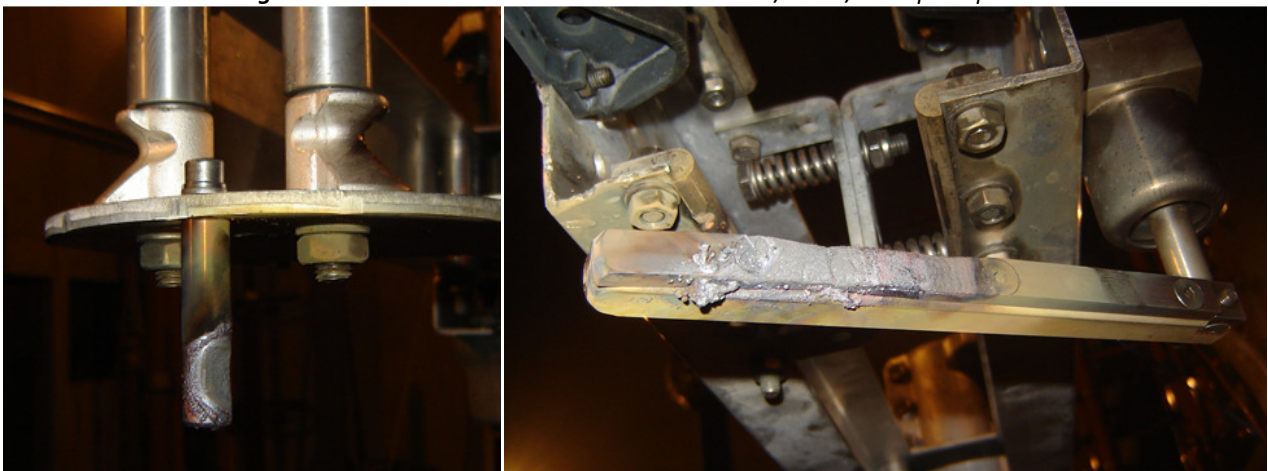
La tensione d'arco, visibile negli *Oscil.23,24* si riferisce presenta questa volta una forma d'onda concorde con quella classica e, nonostante la bassa velocità relativa fra i contatti, è possibile vedere un suo aumento in ampiezza, dovuto all'aumentare dello spazio elettrodo. Nel casi specifici esaminati, non si sono verificati re-inneschi e si registra un tempo di permanenza d'arco pari a $3 \div 4$ cicli (≈ 100 ms).

10.4.6 Sesta prova: contatto fisso in acciaio rame-tungsteno / rame-tungsteno (W/Cu 75/25)

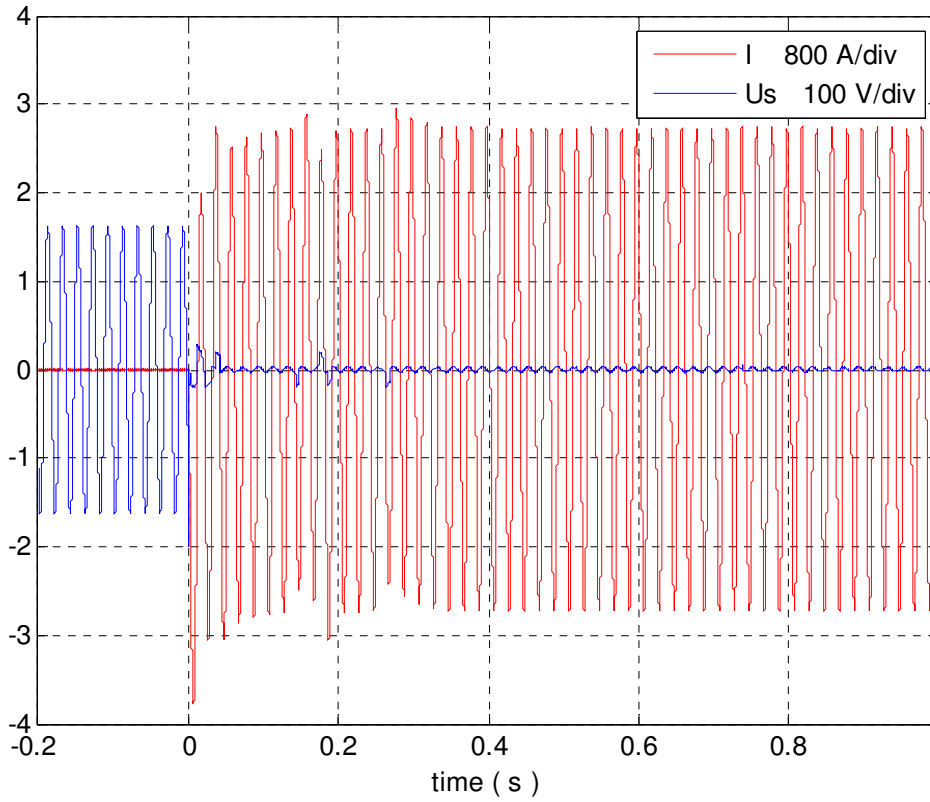
Altra alternativa all'utilizzo della grafite è l'utilizzo della lega rame-tungsteno (W/Cu 75/25) sia per il contatto fisso che per il contatto mobile. Come per il primo test, è possibile utilizzare lo stesso materiale in quanto presenta un punto di fusione relativamente alto rispetto alle temperature raggiunte con i tempi d'arco ottenuti nell'ultima prova ($> 0,1$ s). Dato il costo del materiale utilizzato e la bassa disponibilità di questo al momento della prova, si è scelto di realizzare il contatto mobile con uno spessore limitato, ma coerente con la prova, ancorato ad un supporto in alluminio tramite bullonatura stando attenti nel creare un buon contatto fra questi.

Diversamente da tutti i casi precedenti, i valori nominali di prova sono concordi con i valori richiesti dalla normativa ovvero, secondo l'oggetto in esame (S2DA 126 kV 2000 A), una tensione nominale $U_n = 100$ V ed una corrente nominale $I_n = 1600$ A. La sequenza di prova prevedeva 60 operazioni di manovra, a differenza delle 100 richieste secondo norma, mantenendo un tempo invariato di riposo di 2 minuti. Questo perché il test è a fine investigativo sul comportamento dei materiali di contatto in esame, con particolare attenzione alla loro possibile durata. Nelle Fig.27 è possibile vedere lo stato dei contatti al termine della prova. Sono esposte in seguito le registrazioni C/O rispettivamente dopo 10, 30 e 60 manovre (*Oscil.25 ÷ 30*).

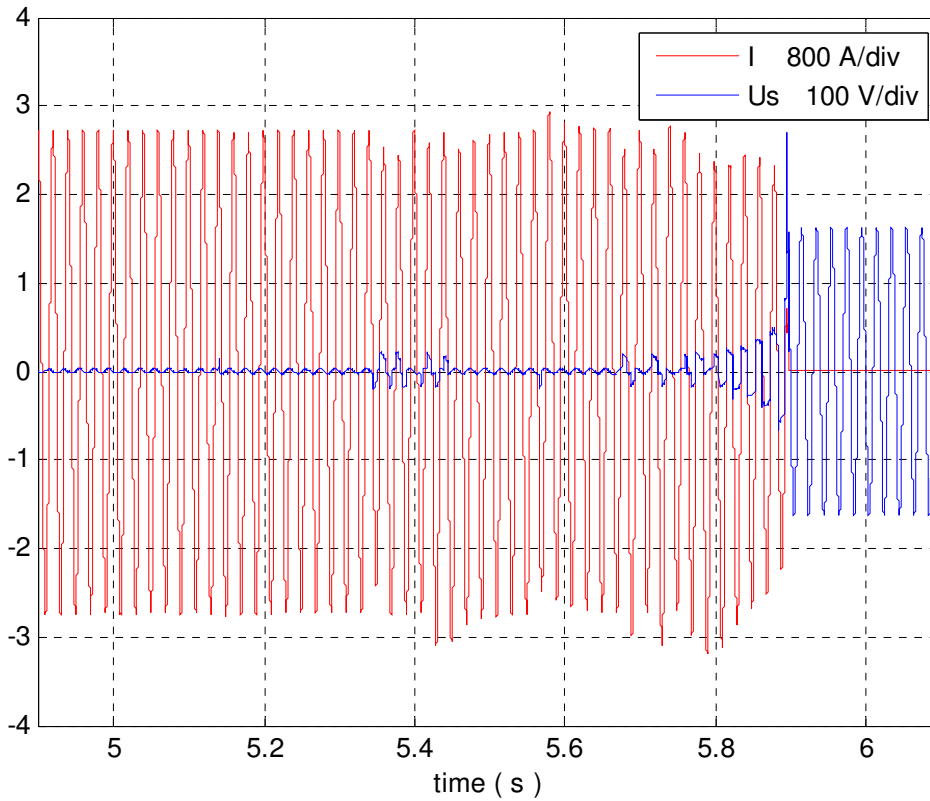
Fig.27: stato dei contatti secondari dell'S2DA in W/Cu 75/25 dopo la prova



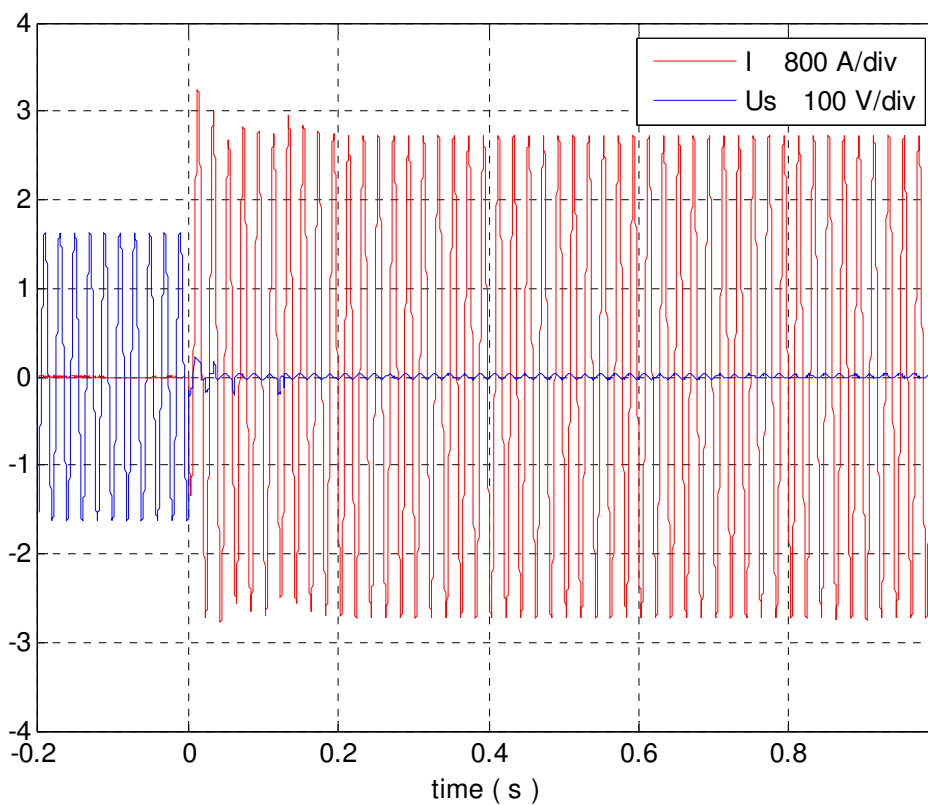
Oscil.25: registrazione 10^a manovra C W/Cu 75/25 (S2DA)



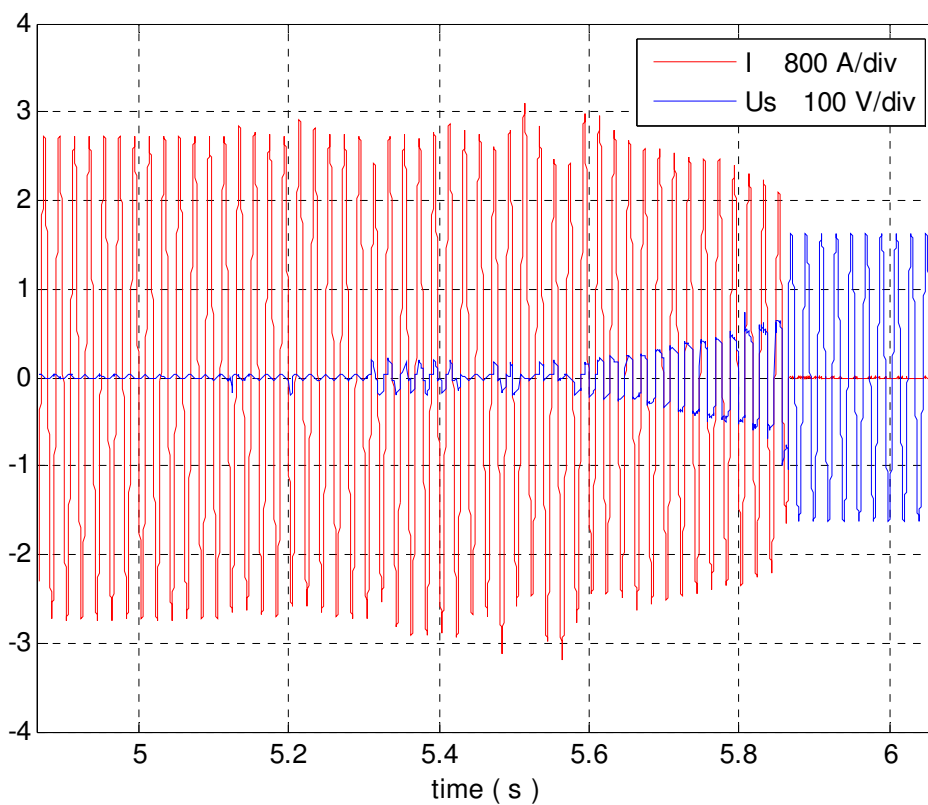
Oscil.26: registrazione 10^a manovra O W/Cu 75/25 (S2DA)



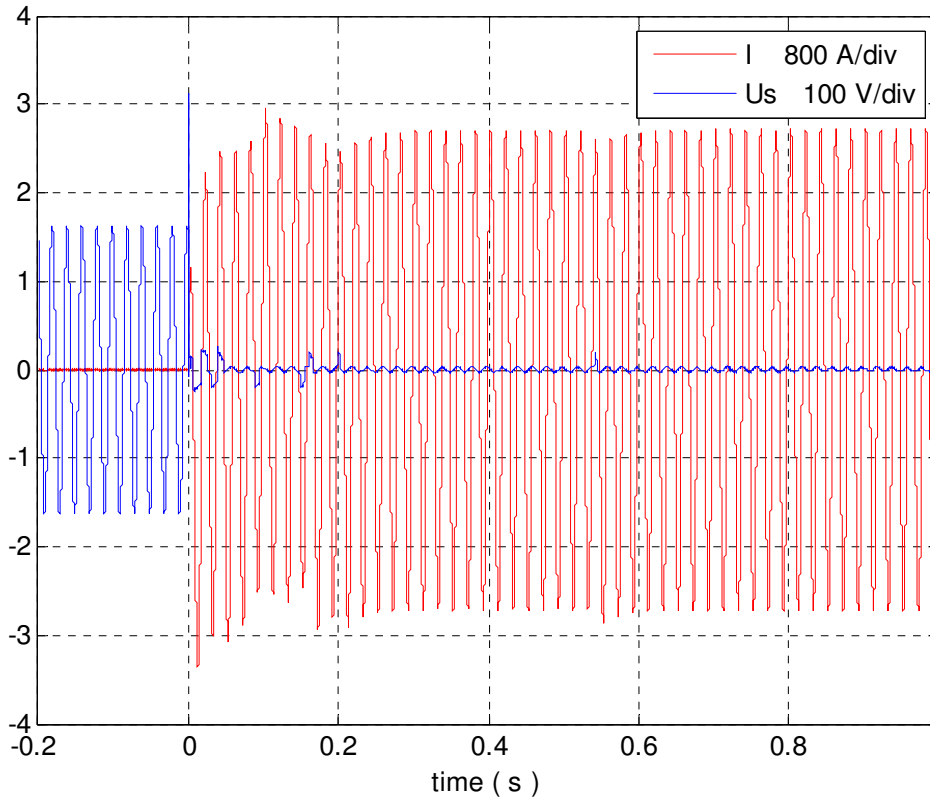
Oscil.27: registrazione 30^a manovra C W/Cu 75/25 (S2DA)



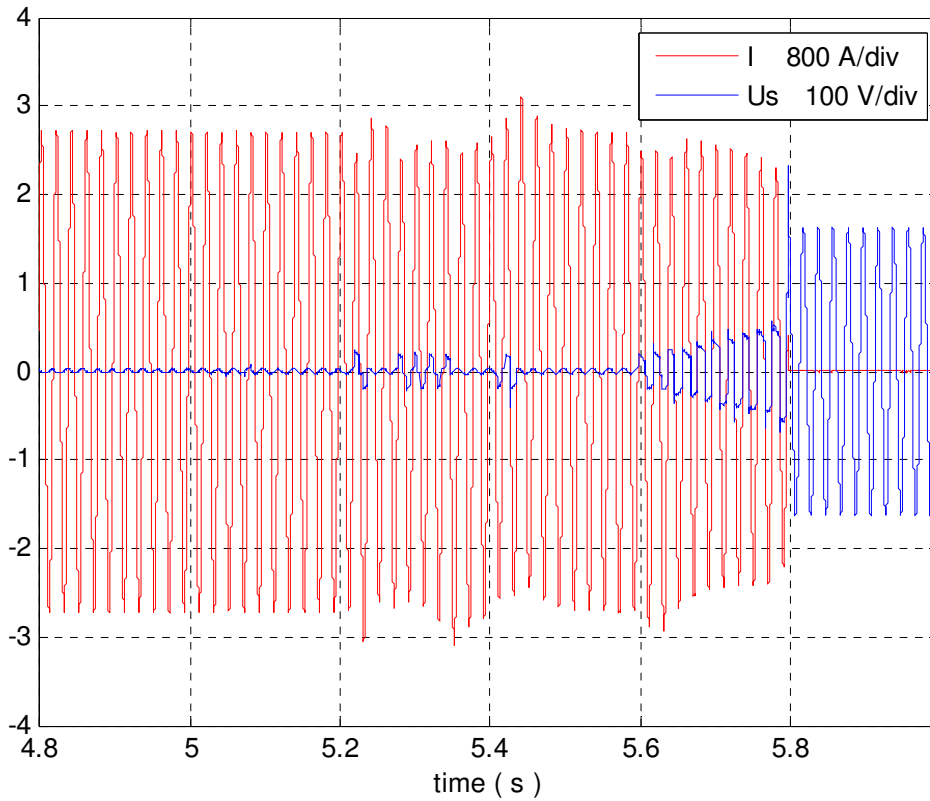
Oscil.28: registrazione 30^a manovra O W/Cu 75/25 (S2DA)



Oscil.29: registrazione 60^a manovra C W/Cu 75/25 (S2DA)



Oscil.30: registrazione 60^a manovra O W/Cu 75/25 (S2DA)



Anche da queste ultime registrazioni è possibile osservare un comportamento decisamente migliore degli accoppiamenti con grafite: il circuito secondario ha una bassa resistenza di contatto. La tensione d'arco presenta anche in questo caso la sua tipica forma d'onda, con tempi di permanenza accettabili (200 ms per nell'ultima registrazione), anche se superiori al caso precedente.

Questa differenza è riconducibile sia al più alto numero di manovre eseguite, sia, probabilmente, alla più bassa capacità di smaltimento di calore del W/Cu che favorisce le condizioni necessarie per una permanenza d'arco più lunga.

È possibile notare inoltre qualche saltellamento durante la corsa dei contatti causato dall'erosione superficiale d'arco. I contatti principali non hanno riportato alcun danneggiamento.

10.4.7 Conclusioni

Per gli obiettivi di prova preposti, i risultati ottenuti con contatti secondari metallici sono decisamente migliori rispetto a quelli con l'utilizzo di grafite. Questi implicano però maggiori saltellamenti e possibili saldature; è quindi di fondamentale importanza un loro dimensionamento adeguato, al fine di garantire la giusta dissipazione.

Data la somiglianza dei risultati ottenuti tra la quinta (Cu - AISI 304) e la sesta prova (contatti in W/Cu 75/25), si è scelto di utilizzare l'accoppiamento rame – acciaio inox basandosi su un riscontro economico (accoppiamento con costo inferiore). Il prossimo passo sarà quindi quello di ricavare il più adatto dimensionamento dei contatti per il superamento della prova di tipo bus-transfer.

10.5 Dimensionamento del contatto mobile

Per il dimensionamento del contatto mobile si utilizza un approccio adiabatico riferito ad un conduttore cilindrico pieno sulla base del valore di corrente nominale di prova (1600 A). Per questo è possibile infatti scrivere il seguente bilancio di energie...

Energia
spesa per riscaldare + Energia scambiata con = Energia
il componente l'esterno sviluppata all'interno
per effetto Joule

$$mcdT + kS(T - T_{amb})dt = RI^2dt$$

...dove:

- m è la massa del conduttore [kg]
- c è il calore specifico [J/kg]
- dT è l'incremento di temperatura [K]
- k è il coefficiente di scambio termico globale [W/(m²·K)]
- S è la superficie di scambio termico [m²]
- $(T - T_{amb})$ è il salto termico rispetto alla T_{amb} [K]
- R è la resistenza del conduttore [Ω]
- I è la corrente che scorre nel conduttore [A]

In condizione adiabatiche si ha l'annullamento del secondo termine in quanto si assume che l'energia scambiata con l'esterno sia nulla e pertanto che il lavoro prodotto in parte attiva vada tutto in riscaldamento del componente. L'equazione si riduce pertanto a...

$$mcdT = RI^2dt \quad \Rightarrow \quad \dots \text{e sapendo che } m = \text{densità} \cdot \text{volume} \dots \Rightarrow \quad \gamma l A c dT = \rho \frac{l}{A} I^2 dt$$

$$\int_{T_i}^{T_f} \frac{\gamma}{\rho} c dT = \frac{1}{A^2} \int_0^t I^2(t) dt \quad \leftarrow \quad \frac{\gamma}{\rho} c dT = \frac{I^2}{A^2} dt \quad \leftarrow \quad \dots \text{semplificando rimane} \dots$$

Si può notare che il termine a sinistra è composto ora da grandezze caratteristiche del materiale che dipendono tutte dalla temperatura. Per i salti termici da noi voluti (presi come riferimento i valori dati dalla normativa), la densità ed il calore specifico possono essere considerate due grandezze costanti. Pertanto si ottiene...

$$\gamma c \int_{T_i}^{T_f} \frac{1}{\rho_0(1+\alpha_0 T)} dT = G^2 t \quad \Rightarrow \quad G = \sqrt{\frac{\gamma c}{\rho_0 \alpha_0} \ln \left(\frac{\vartheta_0 + T_f}{\vartheta_0 + T_i} \right)}$$

$$\frac{\gamma c}{\rho_0 \alpha_0} \ln \left(\frac{\vartheta_0 + T_f}{\vartheta_0 + T_i} \right) = G^2 t \quad \leftarrow \quad \frac{\gamma c}{\rho_0 \alpha_0} \ln (1 + \alpha_0 T) \Big|_{T_i}^{T_f} = G^2 t$$

$$G = \sqrt{\frac{\gamma c \ln \left(\frac{\vartheta_0 + T_f}{\vartheta_0 + T_i} \right)}{\rho_0 \alpha_0 t}} \quad \Rightarrow \quad S = \frac{G}{I}$$

Tab.12: grandezze caratteristiche di dimensionamento Cu

Densità Cu	$\gamma = [\text{kg/m}^3]$	8930
Calore specifico Cu	$c = [\text{J/kg}]$	389
Resistività a 0°C Cu	$\rho_0 = [\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}]$	0,0176
Coefficiente termico Cu	$\alpha_0 = [^\circ\text{C}^{-1}]$	0,0039
Temperatura limite Cu	$T_f = [^\circ\text{C}]$	220
Temperatura ambiente	$T_{\text{amb}} = [^\circ\text{C}]$	40
Corrente nominale di prova	$I_n = [\text{A}]$	1600
Tempo	$t = [\text{s}]$	1 o 3

Considerando i valori riportati in *Tab.12*, e le formule sopra citate, si giunge a dei valori di sezione minima, per un tempo di 1 e 3 s, pari a...

$$S_{1s} = 10,3 [\text{mm}^2]$$

$$S_{3s} = 17,9 [\text{mm}^2]$$

Il contatto mobile di rame in prova è realizzato con un quadro 16x16 che corrisponde ad una sezione di 256 mm², dimensione che risulta ampiamente superiore alla sezione minima necessaria. Se poi si considera la superficie di contatto, data inizialmente da una linea teorica di 16 mm, si può ritenere il dimensionamento adeguato in quanto l'erosione d'arco comporta il suo aumento. La sua lunghezza deve garantire la giusta corsa fra i contatti ed è determinata quindi da un limite di meccanico.

Si è deciso perciò di non alterare le dimensioni del componente in quanto questo deve anche garantire una buona forza di contatto (10 kg).

10.6 Dimensionamento del contatto fisso

Al contrario del contatto mobile, per il dimensionamento del contatto fisso si è scelto un approccio sperimentale basandosi sull'esperienza di AREVA. La scelta è ricaduta su un tondino in acciaio inox di 22mm di diametro, considerato adeguato per la resistenza alle 100 operazioni di manovra.

10.7 Pre-Prova di tipo bus-transfer

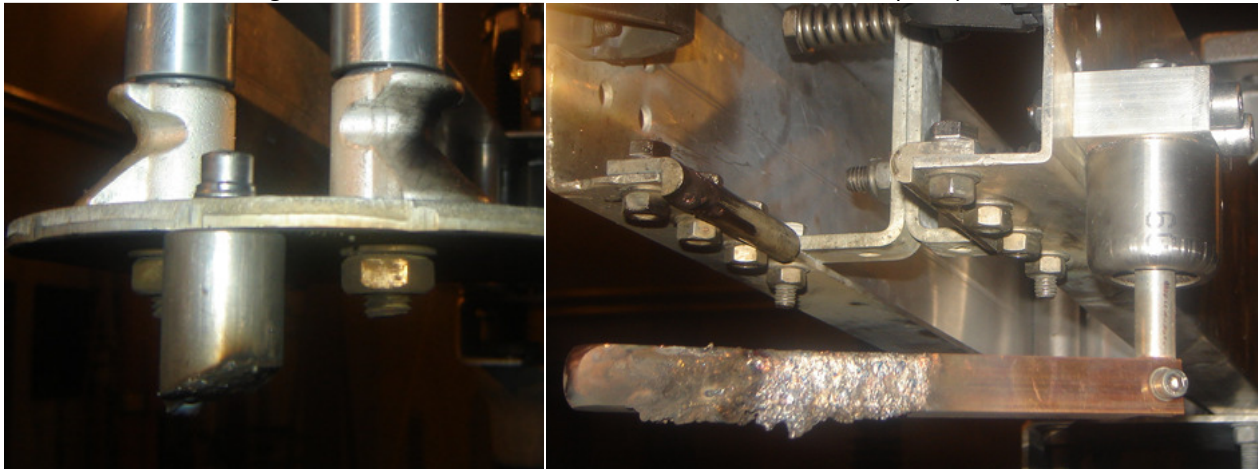
A dimensionamento effettuato, si è proceduto con lo svolgimento di una pre-test in vista dell'effettiva prova di tipo bus-transfer. Come richiesto dalla norma 62271-102 ANNEX B, il circuito di prova realizzato è equivalente a quello riportato in *Fig.18*. La pre-prova serve a verificare sì l'effettivo corretto dimensionamento, ma anche il mantenimento delle caratteristiche dei contatti principali. Va detto che tale test si effettua come garanzia per il superamento della prova, poiché nella prova ufficiale si richiede la presenza di un ente di certificazione esterno che dichiara la validità della prova.

La prova consiste nello svolgimento di una sequenza di 100 operazioni di manovra. È stata mantenuta una cadenza fra un'operazione e la successiva di 2 minuti, come scelta per le prove precedenti.

Durante lo svolgimento della sequenza di prova, si è verificata un'eccessiva erosione del contatto fisso, con conseguente non raggiungimento dell'obiettivo di sequenza preposto. Infatti, alla 98^a operazione di manovra si è raggiunto il totale consumo del contatto. Tuttavia le registrazioni fatte evidenziano un

comportamento dei contatti positivo, simile alla quinta prova precedentemente trattata. In Fig.28 è possibile vedere lo stato dei contatti a prova ultimata.

Fig.28: stato dei contatti secondari dell'S2DA AISI 304/Cu dopo la prova



L'eccessivo consumo è da attribuire ad un sottodimensionamento del contatto fisso, precedentemente scelto per soddisfare le precise 100 operazioni di manovra; è però importante osservare la diversa erosione dei materiali: nel contatto mobile, durante la manovra, il punto di contatto si sposta nella lunghezza del componente, facendo presumere uno sfregamento distribuito ed una minore temperatura, con conseguente minore erosione. Il contatto fisso, invece, incontra quello mobile sempre nello stesso punto, sottoponendolo ad uno stress maggiore.

Per superare le difficoltà riscontrate, si è scelto di aumentare la sezione del contatto fisso, postandola ad un diametro di 25 mm. Così facendo si garantisce una minore resistenza e una maggiore capacità di smaltimento termico.

10.8 Prova di tipo bus-transfer

La prova è stata realizzata dal Laboratorio Alte Tensioni del dipartimento di Ingegneria Elettrica dell'Università di Padova su commissione di AREVA R&D per le sedi Cinesi di Wuxy e Guangzhou, attenendosi alle seguenti normative:

- Norma internazionale
IEC N. 62271-102 (2001-12)
"High-voltage switchgear and controlgear – Part 102: Highvoltage alternating current disconnectors and earthing switches"
- Norma per l'Industria Elettrica della Repubblica Popolare Cinese
DL/T 593—2006
"Common Specifications for High-voltage Switchgear and Controlgear Standards" (derivata dalla norma internazionale IEC 60694: 2002, MOD)
- Norma per l'Industria Elettrica della Repubblica Popolare Cinese
DL/T 486 – 2000 eqv. to IEC 60129: 1984
"Specifications for HV AC disconnectors and earthing switches"

La prova è stata visionata dal committente attraverso il responsabile delle prove esterne Ing. Nosilati e da un organismo di certificazione indipendente, quale l'ACAE, rappresentato dall'Ing. Besana.

I valori nominali di prova utilizzati, in accordo con le norme sopra citate, sono riportati in Tab.13.

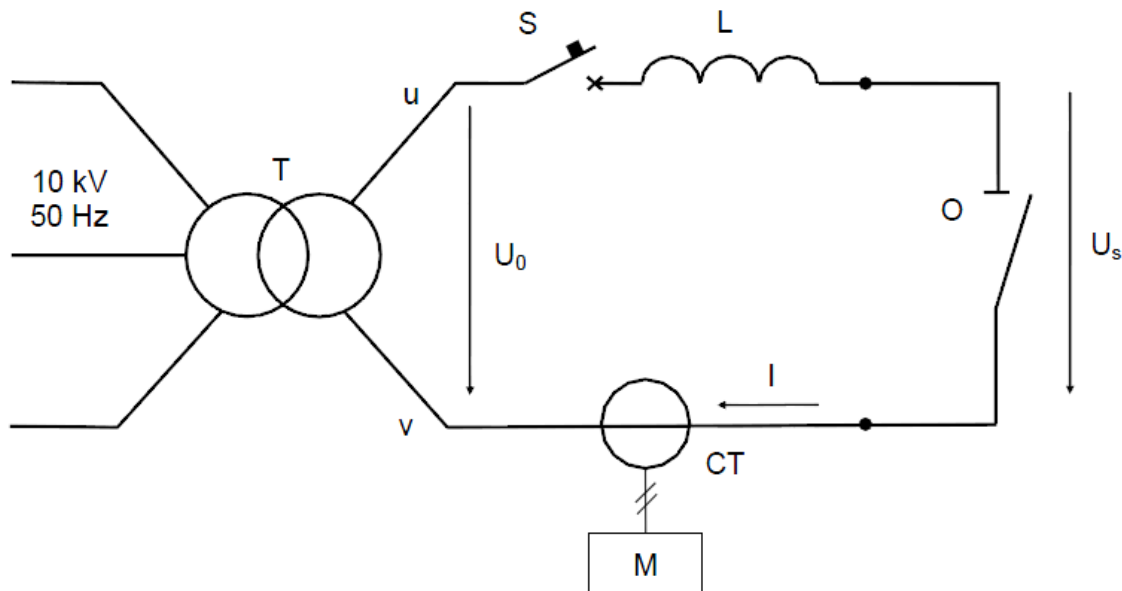
Tab.13: valori nominali di prova secondo normativa

Tensione nominale U_n	100 V
Corrente nominale I_n	1600 A
Frequenza	50 ÷ 60 Hz
Fattore di potenza	< 0,15

La prova è stata effettuata su un singolo polo del sezionatore su di un supporto equivalente a quello usato in servizio e manovrato da un dispositivo motorizzato, i cui circuiti ausiliari e di controllo sono stati alimentati alla loro tensione minima di 187 Vdc (220 Vdc - 15%).

Il circuito di prova utilizzato è equivalente al circuito imposto dagli standards (Fig.18) visibile in Fig.29. Le registrazioni sono state effettuate con strumenti inseriti come riportato nel circuito, le cui caratteristiche sono elencate a seguire.

Fig.29: circuito di prova S2DA Bus-Transfer type test



- T** : Trasformatore di Potenza trifase 20000-2.5% / 400 V - 1000 kVA
- CT** : Trasformatore di corrente
- S** : Interruttore di protezione
- L** : Induttanza
- O** : Oggetto in prova
- M** : Power analyzer Yokogawa Mod. WT 130
Digital Oscilloscope Tektronix TDS 5054B

Tracciabilità degli strumenti

Trasformatore di corrente standard SIEMENS type AGT 0.5 N. S.N. 63/15186

Certificato di calibrazione N. 06002838 - CESI (SIT centro di calibrazione N. 57) in data 29.04.2004.

Certificato di calibrazione N. 10000867 - ERSE (SIT centro di calibrazione N. 57) in data 04.03.2010.

Multifunction Calibrator FLUKE 5500A – S.N. 8875004

Certificato di calibrazione N. 332447 – ARO (SIT centro di calibrazione N. 046) in data 25.06.2009.

I valori delle grandezze di prova registrati rientrano in quelli permessi dalla norma come riportato in *Tab.14*.

Tab.14: valori di prova (S2DA)

Tensione di prova U	110 V	100 +10%
Corrente di prova I	1600 A	/
Frequenza	50 ÷ 60 Hz	/
Fattore di potenza	0,12	< 0,15

I tempi di manovra sono stati misurati prima e dopo la prova, senza riportare significative differenze; il loro valore è riportato in *Tab.15*.

Tab.15: tempi di prova (S2DA)

Tempo per una completa operazione di manovra C/O	≈ 14 s
Tempo di conduzione di corrente durante un'operazione di manovra C/O	≈ 6,5 s

La sequenza di prova prevede come da normativa 100 operazioni di manovra C/O, intervallate da un tempo di riposo di 2 minuti. Per ognuna sono state monitorate e registrate le effettive grandezze caratteristiche, di cui in seguito esposte la prima, la 50^a e l'ultima negli *Oscil.31÷36* (si ricorda tuttavia che la normativa richiede che nel test report sia riportato almeno un oscillogramma ogni 10 operazioni di manovra).

L'arco si è manifestato sia durante la chiusura che l'apertura dei contatti, nel momento in cui la corrente comincia a fluire solo attraverso questi; in entrambe le situazioni i tempi d'arco riportati risultano solitamente minori a 100 ms. Durante le operazioni di manovra, si sono inoltre verificate emissioni di fiamme e particelle metalliche, che non appaiono però dannose per gli operatori nelle vicinanze.

Per verificare con certezza il superamento della prova, sono state inoltre effettuate misurazioni di resistenza dei contatti principali prima e dopo la prova, ottenendo valori esposti in *Tab.16*. Nelle *Fig.30* è possibile vedere lo stato dei contatti a prova ultimata.

Tab.16: misurazioni di R dei contatti principali (S2DA)

$T_{amb} = 19,4 [^{\circ}C]$	Corrente [A]	Tensione [mV]	Resistenza [$\mu\Omega$]
Prima della prova	50,1	3,15	62,9
Dopo la prova	50,2	3,23	69,3

Fig.30: contatto fisso S2DA prima (sx) e dopo la prova (dx)

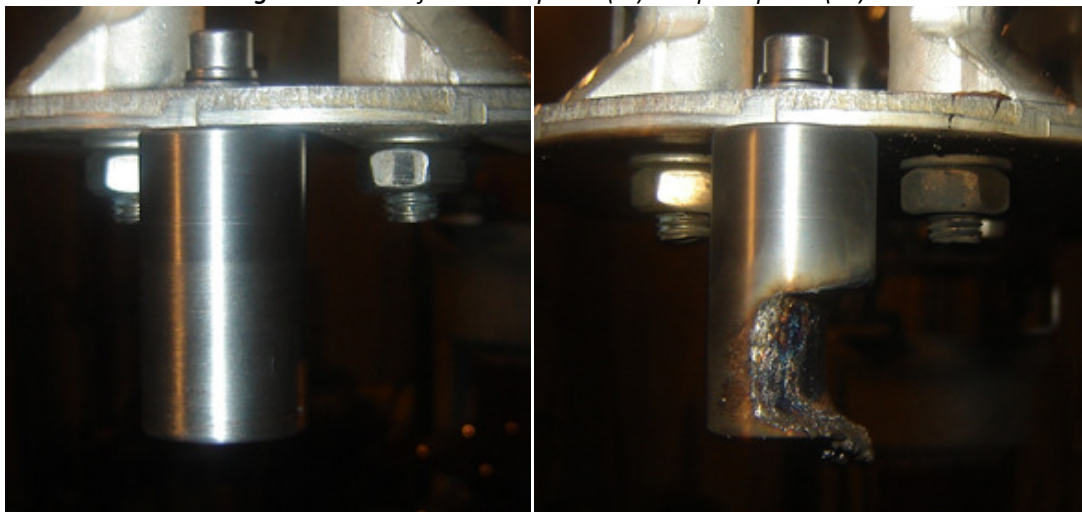
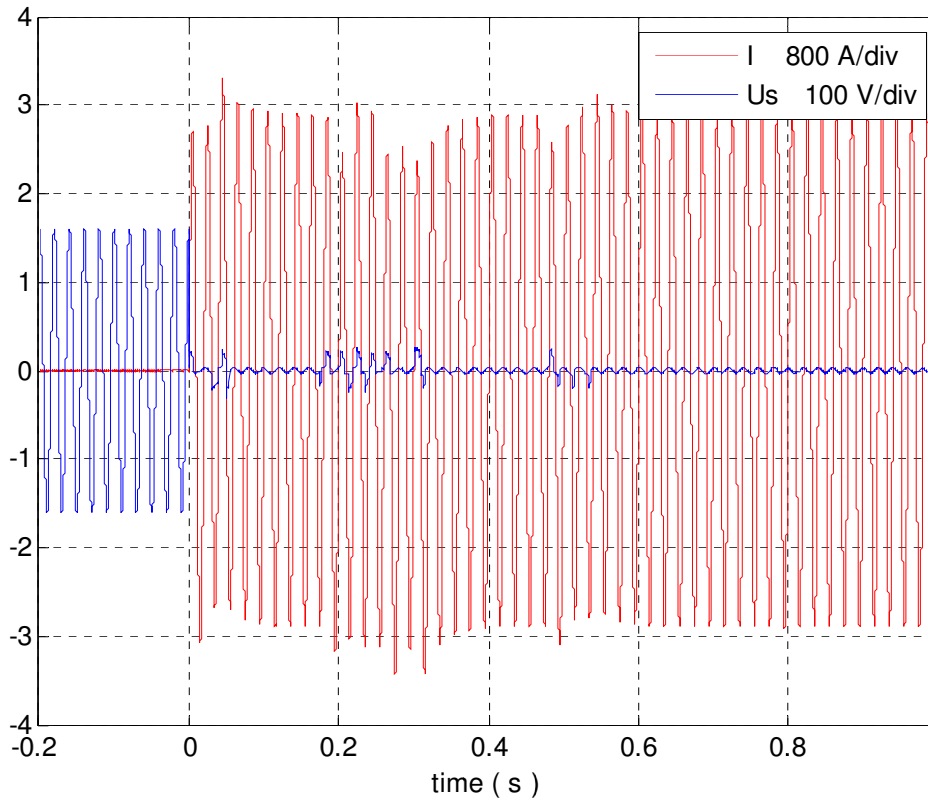


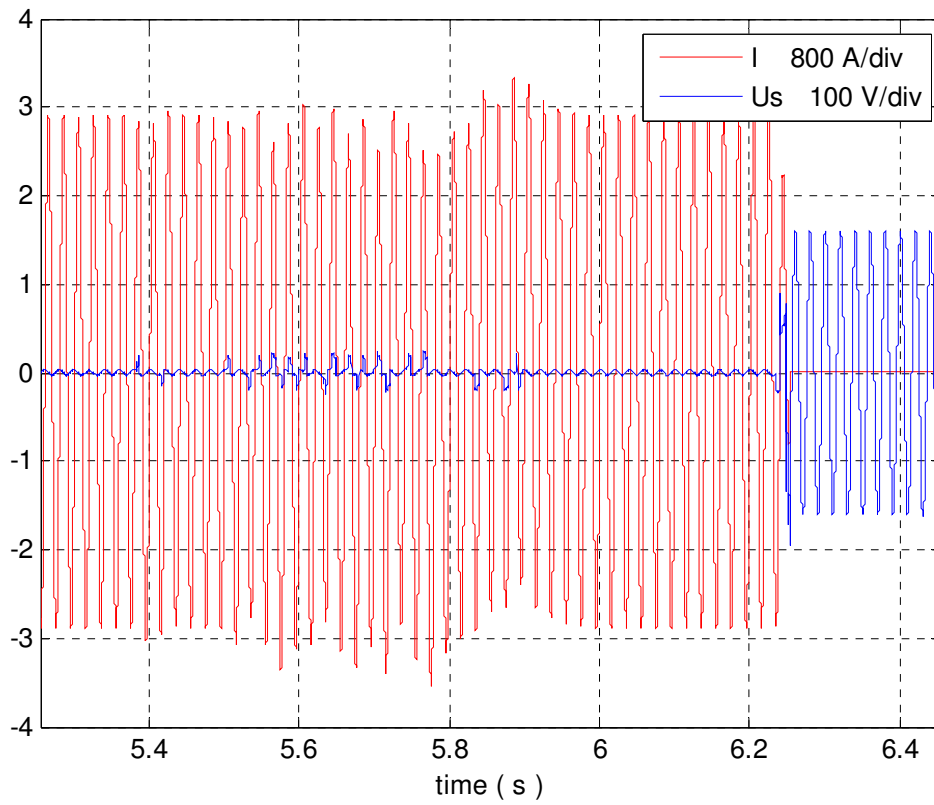
Fig.31: contatto mobile S2DA prima (sx) e dopo la prova (dx)



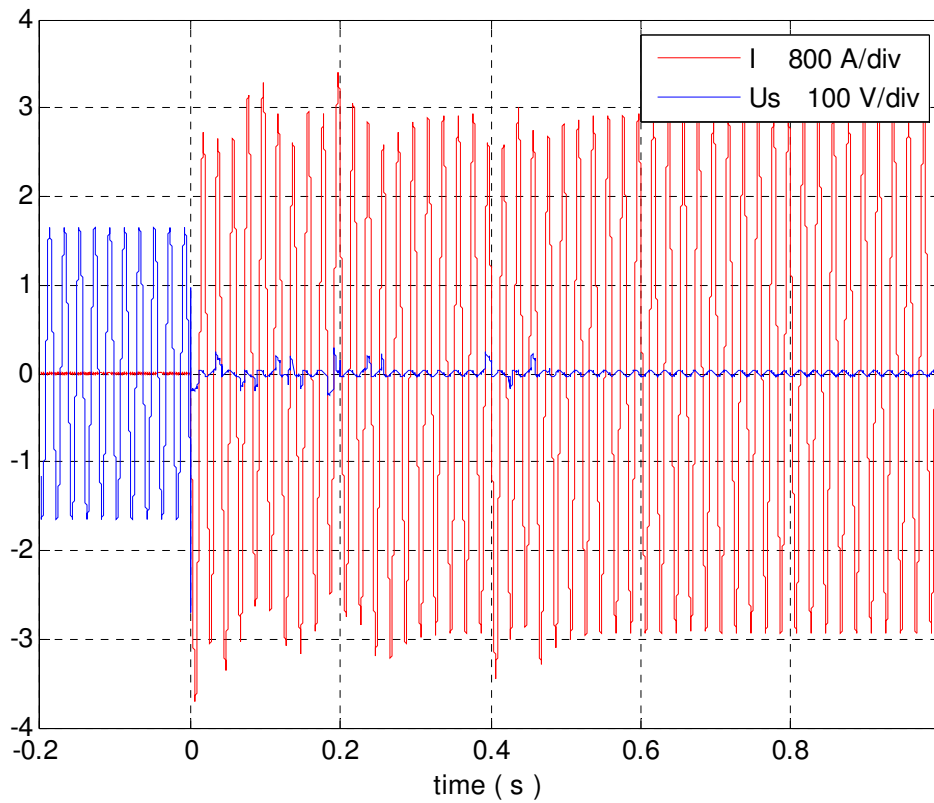
Oscil.31: registrazione 1^a manovra della sequenza di prova di tipo C (S2DA)



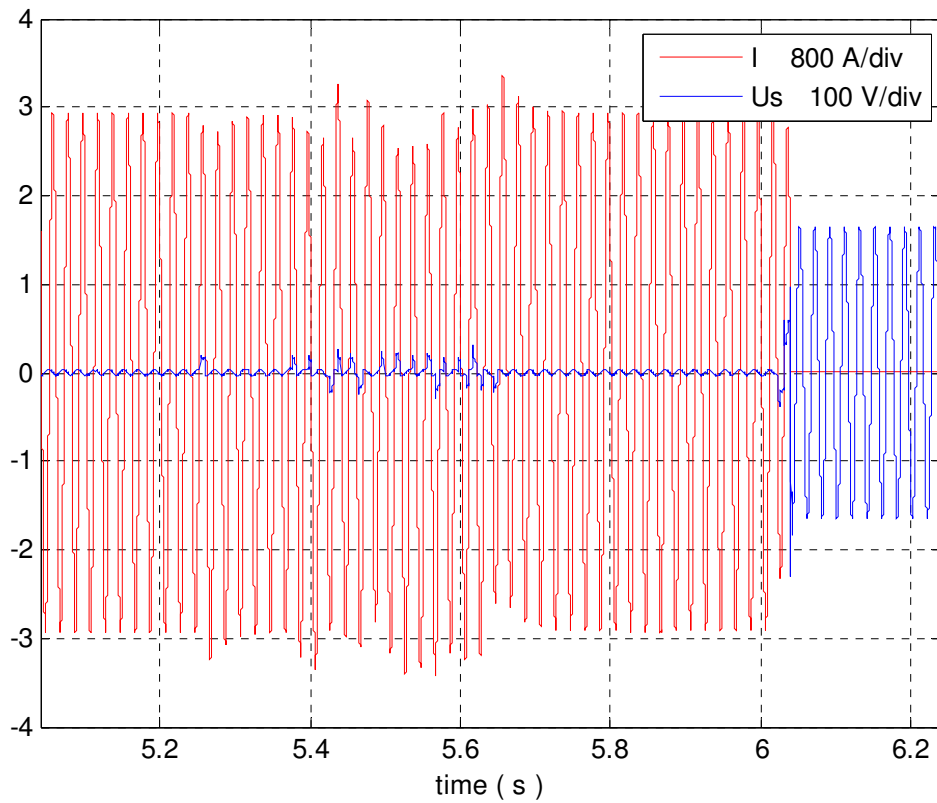
Oscil.32: registrazione 1^o manovra della sequenza di prova di tipo O (S2DA)



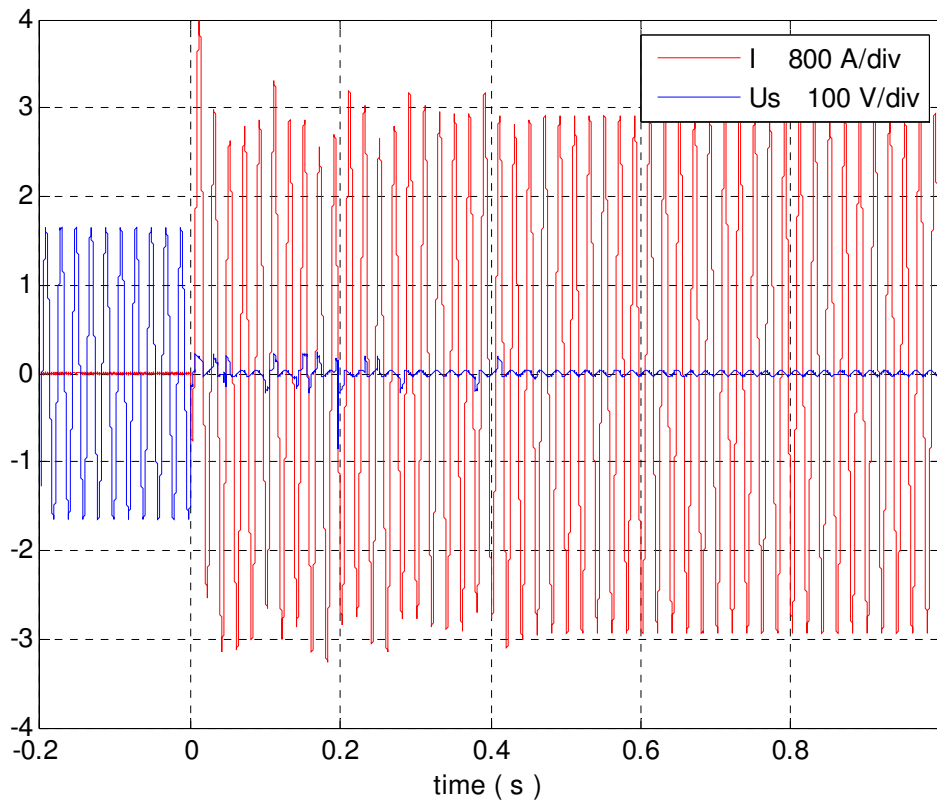
Oscil.33: registrazione 50^o manovra della sequenza di prova di tipo C (S2DA)



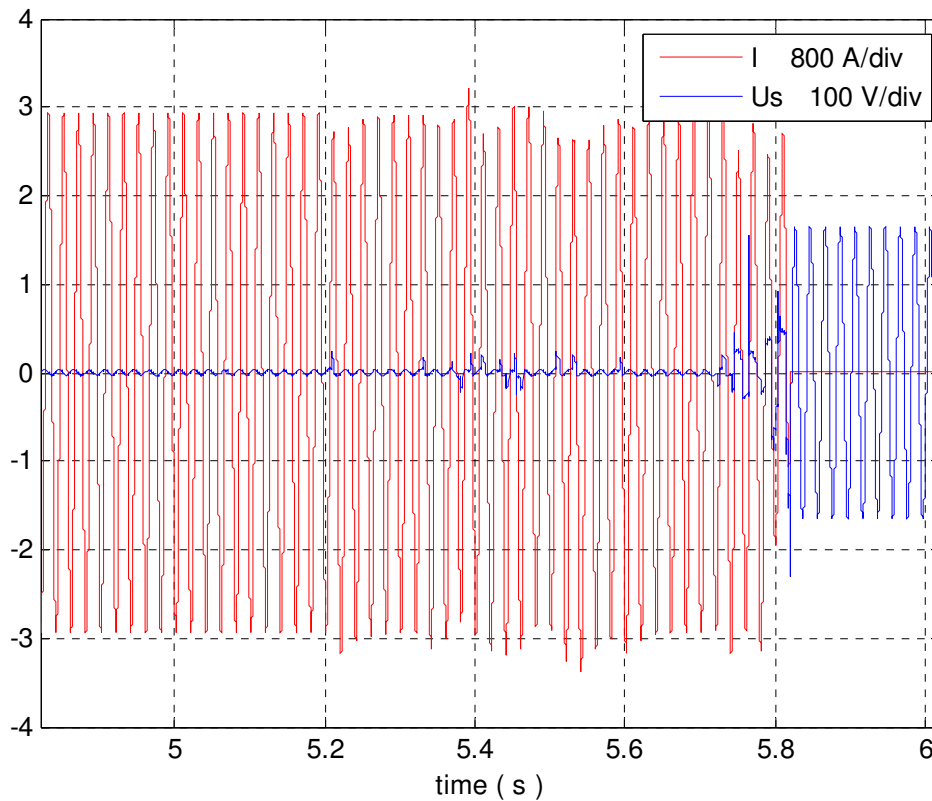
Oscil.34: registrazione 50^a manovra della sequenza di prova di tipo O (S2DA)



Oscil.35: registrazione 100^a manovra della sequenza di prova di tipo C (S2DA)



Oscil.36: registrazione 100^a manovra della sequenza di prova di tipo O (S2DA)



10.8.1 Conclusioni

Il sezionatore equipaggiato con il dispositivo d'arco in prova è risultato idoneo a superare con successo la prova di tipo richiesta ai valori nominali preposti in accordo con le normative a riguardo. Durante la sequenza di test il dispositivo ha operato con successo senza presentare eccessivi consumi o presenza di saldature. Sono stati tuttavia riscontrati lievi danneggiamenti ai contatti principali (come mostrato in Fig.32) localizzati in posizioni tali da non compromettere il passaggio di corrente quando il sezionatore è in stato di chiusura. A prova di quanto detto, le misure di resistenza su essi effettuate garantiscono il mantenimento delle loro proprietà.

La prova di tipo bus-transfer risulta superata.

Fig.32: contatti principali S2DA dopo la prova



10.9 Valutazione del consumo del contatto fisso

Dalle due diverse prove effettuate nel tentativo di raggiungere le specifiche richieste dalle normative, utilizzando come accoppiamento Cu / AISI 304 rispettivamente per il contatto mobile e quello fisso, è stato possibile valutare attraverso misurazioni l'andamento del consumo di quest'ultimo. I dati registrati sono riportati nelle *Tab.17,18*, e il loro andamento è mostrato nel *Graf.12*. Come sappiamo, con l'utilizzo del tondino da $\varnothing 22$ mm si è riscontrata la completa erosione del contatto; nel caso invece del tondino da $\varnothing 25$ mm il consumo a prova ultimata è pari al 40%.

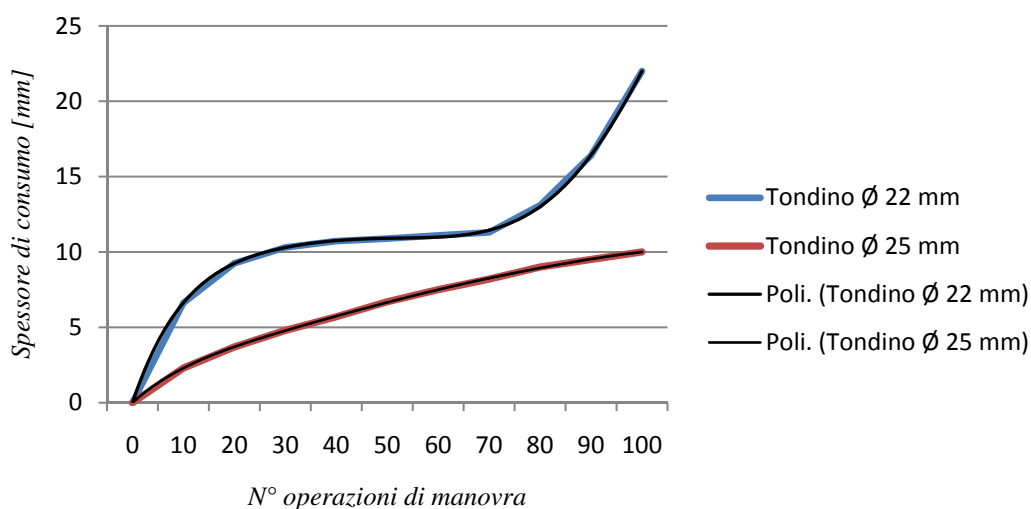
Tab.17: 100 V, 1600 A, AISI 304 $\varnothing 22$ mm

N° C/O	Spessore di consumo [mm]
0	0
10	6,6
20	9,3
30	10,3
40	10,7
50	10,9
60	11,1
70	11,3
80	13,1
90	16,4
100	22,0

Tab.18: 100 V, 1600 A, AISI 304 $\varnothing 25$ mm

N° C/O	Spessore di consumo [mm]
0	0
10	2,3
20	3,7
30	4,8
40	5,7
50	6,7
60	7,5
70	8,2
80	9,0
90	9,5
100	10,0
110	10,666
120	10,874
130	10,962

Graf.12: andamento dello spessore di consumo (contatto fisso AISI304 $\varnothing 22-25$ mm)

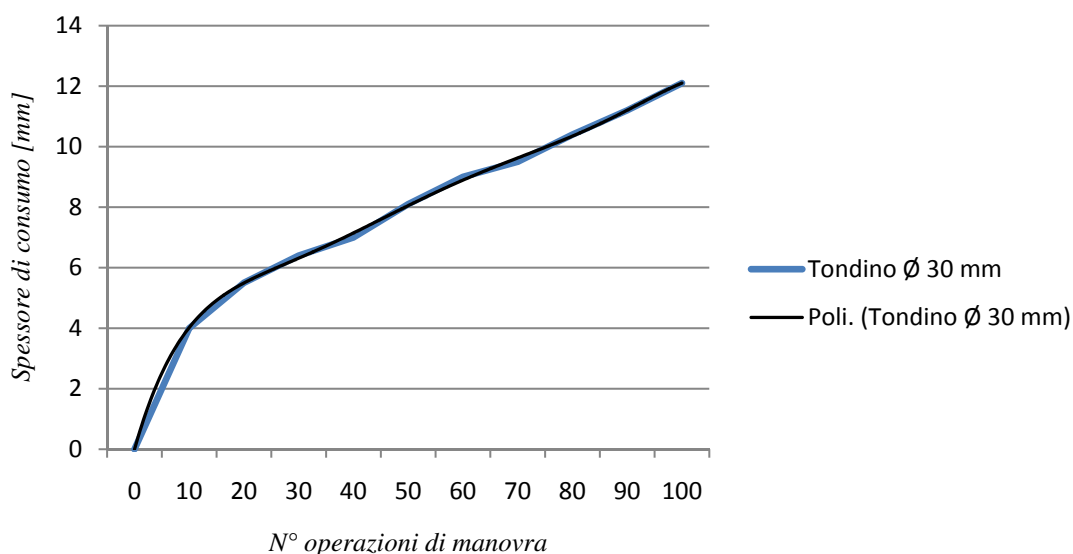


È interessante confrontare i dati sopra esposti con quelli registrati in test precedentemente svolti sullo stesso modello di sezionatore (S2DA), ma con tensione nominale di prova di 300 V, mostrati in *Tab.19*.

Tab.19: 300 V, 1600 A, AISI 304 \varnothing 30 mm

N° C/O	Spessore di consumo [mm]
0	0
10	4,0
20	5,5
30	6,4
40	7,0
50	8,1
60	9,0
70	9,5
80	10,4
90	11,2
100	12,1

Graf.13: andamento dello spessore di consumo (contatto fisso AISI304 \varnothing 30 mm)



Analogamente al tondino da \varnothing 25 mm, anche il tondino da \varnothing 30 mm ha riportato un consumo del 40%. Si può giungere pertanto alla seguente considerazione: l'uguaglianza di consumo (40% in entrambi i casi) ed un rapporto in termini di sezione di 1,44 fa presupporre che passando da una tensione di prova di 100 V a 300 V il consumo del contatto aumenta del 44%. Pertanto, ipotizzando un comportamento lineare e sapendo che un tondino da \varnothing 22 mm è dimensionato esattamente per resistere a 100 manovre, è stato possibile determinare una stima del diametro minimo necessario per i livelli di tensione di prova superiori. Da questi, sulla base del fatto che aumentando il diametro da 22mm a 25 mm (e quindi del 13,63 %) nella prova a 100 V si è abbassato drasticamente il consumo del 60%, si è potuto indicare una sezione adeguata che garantisca un buon margine di sicurezza per i valori di tensione di prova superiori. Il tutto è mostrato in Tab.20.

Tab.20: stima del dimensionamento del contatto fisso in AISI 304 per i livelli di tensione di prova superiori

Tensione nominale di Prova [V]	Diametro minimo [mm]	Diametro con consumo ridotto del 60% [mm]	Diametro consigliato [mm]
100	22	25	25
200	24,300	27,613	28
300	26,840	30,500	30
400	29,646	33,688	34

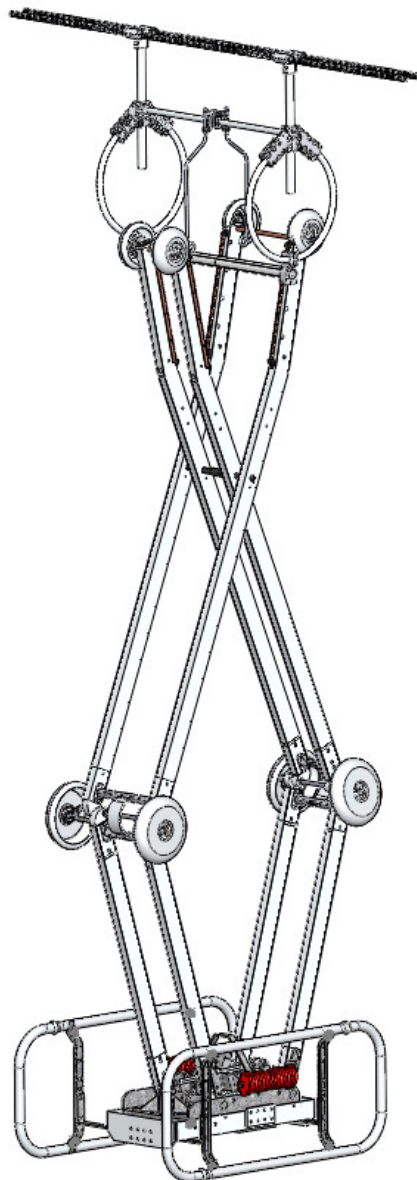
11 **PROVA SX 420**

11.1 **Il sezionatore**

L'SX è un sezionatore a doppio pantografo ad apertura verticale realizzato in alluminio come visibile in Fig.33. Utilizzando un'apertura verticale piuttosto che orizzontale, questo sezionatore offre un significativo vantaggio in termini di spazio, ridotto circa del 30% rispetto a sezionatori ad apertura orizzontale: il crescente aumento dei costi e la difficoltà di ottenere siti idonei per l'installazione di sottostazioni hanno infatti sottolineato la necessità di apparecchiature compatte.

L'SX garantisce ottime performances anche nelle più avverse condizioni di manovra grazie alla sua struttura a doppio pantografo, che gli conferisce la giusta robustezza; in presenza di forti raffiche di vento e grossi accumuli di ghiaccio, assicura infatti una buona stabilità in posizione di chiusura durante il manifestarsi di un cortocircuito. AREVA offre questo dispositivo sul mercato internazionale per diversi livelli di tensione, riportati nella Tab.21 a seguire.

Fig.33: SX



Tab.21: valori nominali S2DA

Tensione nominale U_n = [kV]	Corrente nominale I_n = [kA]	Corrente di cortocircuito I_{cc} = [kA]
72,5	> 4000	63
100	> 4000	63
126	> 4000	63
145	> 4000	63
245	> 4000	63
362	> 4000	63
420	> 4000	63
550	> 4000	63

11.2 Caratteristiche principali

La forma ed il funzionamento di questo tipo di sezionatore sono tali da fornire quattro punti di contatto principali; l'SX è infatti equipaggiato con due coppie di contatti principali mobili per braccio, uno per lama, lama realizzata in alluminio tubolare per garantire la giusta solidità. Essi sono ancorati alla parte attiva tramite bullonatura e risultano pertanto sostituibili (Fig.34). Il contatto principale mobile è invece costituito da un unico tondino collegato al sistema di sbarre attraverso delle corde in alluminio. Tutti i contatti principali sono fatti di rame placcato d'argento, soluzione che evita la formazione di ossidi che degraderebbero il contatto e che incrementa inoltre il salto termico ammissibile secondo normativa (IEC 62271-1) da 35K a 65K, permettendo un dimensionamento più economico. Lo spessore della placcatura è dimensionato in maniera tale da garantirne la resistenza all'usura meccanica (M0: 1000 manovre).

I contatti secondari sono posti in condizione tale che il fenomeno dell'arco elettrico non interferisca con il contatto principale, al fine di non compromettere la durata di vita del sezionatore. Sono costituiti rispettivamente da due barre in acciaio inox AISI 304 ancorate ad una barra di supporto tramite un sistema a molla mostrato in Fig.38, che costituiscono perciò la parte mobile del contatto secondario, e da due barre quadre in rame poste trasversalmente alle lame del sezionatore a comporre la parte fissa del contatto. È possibile quindi notare come, a differenza del sezionatore S2DA prima discusso, l'SX presenta due coppie di contatti secondari. Nella Fig.35 è possibile vedere un'assieme dei contatti del sezionatore, principali e secondari.

Fig.34: esempio di contatto mobile dell'SX**Fig.35: assieme dei contatti dell'SX**

Anche per questo sezionatore i contatti di cerniera non sono né striscianti, né rotanti: si utilizza una fascia flessibile di laminati (fascetta) in alluminio, saldata sulle lame come è possibile vedere in Fig.36; questa, rispetto alle altre soluzioni prima accennate, offre vari aspetti positivi, quali: una bassa manutenzione, una facile ispezione, una lunga durata, un passaggio più continuo della corrente con una sua conseguente distribuzione più uniforme, una minore sensibilità delle oscillazioni esterne ed una minore corrosione che si identifica solitamente nell'accostamento di differenti materiali (in questo caso il contatto e le parti attive sono tutte realizzate in alluminio).

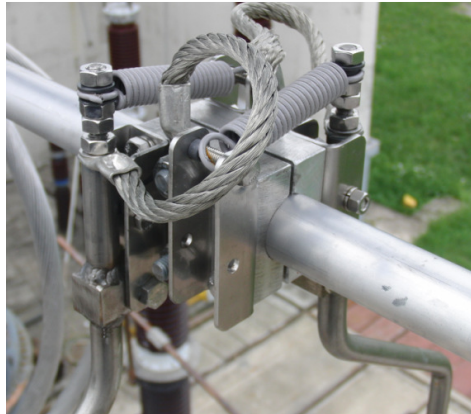
Fig.36: Fascetta di laminati SX



Fig.37: assieme di prova SX



Fig.38: dispositivo di aggancio alla sbarra dei contatti mobili secondari



Il dispositivo è collocato su un supporto in acciaio inox galvanizzato che conferisce la giusta robustezza a tutta la struttura. Tutti i cuscinetti e le molle di contro bilanciamento sono isolate dal percorso principale della corrente per evitare una loro possibile ricottura e conseguente alteramento delle loro proprietà meccaniche. Le lame sono progettate in maniera tale da controbilanciare le forze d'attrito durante le operazioni di manovra. La forma sottile ed aerodinamica dell'SX ha anche il vantaggio di ridurre l'effetto

corona. In posizione di apertura, il pantografo si ripiega in uno spazio di poco superiore alla metà della distanza di isolamento.

Il sezionatore è manovrato attraverso un motore DC ad una tensione nominale di $U_n = 300V$.

Nelle Tab.22,23 a seguire sono riportate tutte le caratteristiche nominali del sezionatore in prova e del suo meccanismo di manovra.

Tab.22: caratteristiche dell'oggetto in prova

<i>Produttore</i>	AREVA T&D (GUANGDONG) SWITCHGEAR CO., LTD. CONGHUA CITYGUANGDONG - P.R. CHINA
<i>Tipo</i>	SX 420 4000
<i>Anno di produzione</i>	2010
<i>Tensione nominale</i>	420 kV
<i>Frequenza nominale</i>	50 Hz
<i>BIL</i>	1425 kV
<i>Corrente nominale</i>	4000 A
<i>Corrente nominale di breve durata</i>	50 kA
<i>Durata nominale del cortocircuito</i>	3 s
<i>Azionamento</i>	Motorizzato

Tab.23: caratteristiche del meccanismo di manovra

<i>Produttore</i>	AREVA T&D (GUANGDONG) SWITCHGEAR CO., LTD. CONGHUA CITYGUANGDONG - P.R. CHINA
<i>Tipo</i>	CMM/400
<i>Anno di produzione</i>	2009
<i>Tensione nominale del motore</i>	415
<i>Nomenclatura</i>	DMR10410
<i>Tensione nominale del circuito ausiliario</i>	220 Vdc

11.3 Obiettivi di prova

La prova richiesta da AREVA si pone come obiettivo la conferma delle capacità di interruzione delle correnti di sbarra del dispositivo secondo normativa. Inoltre, su richiesta del cliente, si è prolungata la sequenza di prova per altre cinquanta operazioni di manovra, al fine di valutare in comportamento d'oggetto oltre gli standards richiesti.

Per la realizzazione delle prove, AREVA si è rivolta ad un ente di prova esterno, quale il Laboratorio SVEPPI Power test section, con sede a Salzano (VE).

11.4 Prova di tipo bus-transfer

La prova è stata realizzata dal Laboratorio SVEPPI di Siemens con sede a Salzano (VE), su commissione di AREVA R&D. Questo laboratorio, costruito all'inizio degli anni '50, è situato vicino alla sottostazione Terna di Scorzè ed è ad essa connesso con uno stallo dedicato a 220 kV. Esso ha la competenza tecnica per operare in conformità ai requisiti prescritti dalla Norma UNI CEI EN ISO/IEC 17025 ed è abilitato a rilasciare il marchio SINAL (Sistema Nazionale per l'Accreditamento dei Laboratori) ed il marchio ILAC MRA (International Laboratory Accreditation Cooperation, Mutual Recognition Arrangements), acquisendo pertanto validità internazionale.

La prova di tipo bus-transfer è stata svolta attenendosi alla Norma internazionale IEC N. 62271-102 (2001-12), "High-voltage switchgear and controlgear – Part 102: Highvoltage alternating current disconnectors and earthing switches".

Il test è stato visionato dal committente attraverso il responsabile delle prove esterne Ing. Nosilati e da un organismo di certificazione indipendente, quale l'ACAE, rappresentato dall'Ing. Samartirano.

I valori nominali di prova utilizzati, in accordo con gli standards sopra citati, sono riportati in Tab.24.

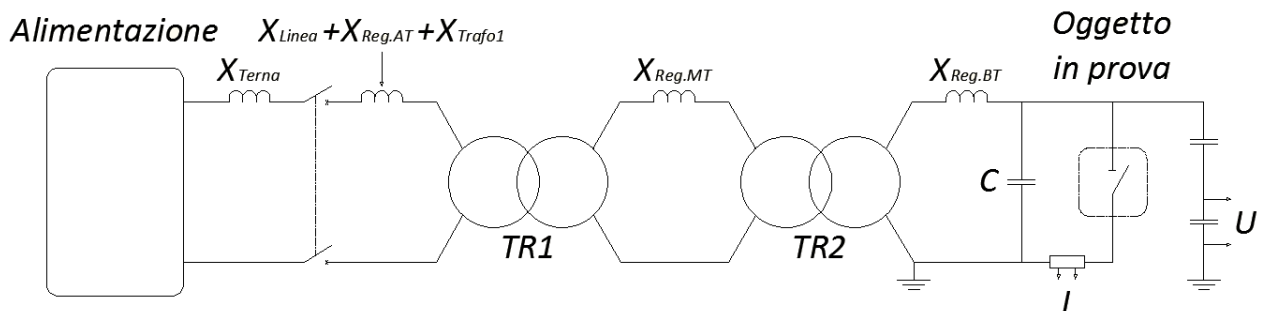
Tab.24: valori nominali di prova secondo normativa

Tensione nominale U_n	300 V
Corrente nominale I_n	1600 A
Frequenza	50 ÷ 60 Hz
Fattore di potenza	< 0,15

La prova è stata effettuata su un singolo polo del sezionatore su di un supporto equivalente a quello usato in servizio e manovrato da un dispositivo motorizzato, i cui circuiti ausiliari e di controllo sono stati alimentati alla loro tensione minima di 353 Vdc (415 Vdc - 15%).

Il circuito di prova utilizzato è equivalente al circuito di prova A stabilito dalla Norma (Fig.18) ed è visibile in Fig.39. Le registrazioni sono state effettuate con strumenti inseriti come riportato nel circuito. Tutte le caratteristiche del circuito di prova saranno in seguito discusse nel capitolo ad esso dedicato a seguire.

Fig.39: circuito di prova S2DA Bus-Transfer type test



Tab.25: valori calcolati di prova (S2DA)

Tensione di prova U	325 V	300 +10%
Corrente di prova I	1615 A	1600 + 10%
Frequenza	50 ÷ 60 Hz	/
Fattore di potenza	0,12	< 0,15

I tempi di manovra sono stati misurati prima e dopo la prova, senza riportare significative differenze; il loro valore è riportato in Tab.26.

Tab.26: tempi di prova (SX)

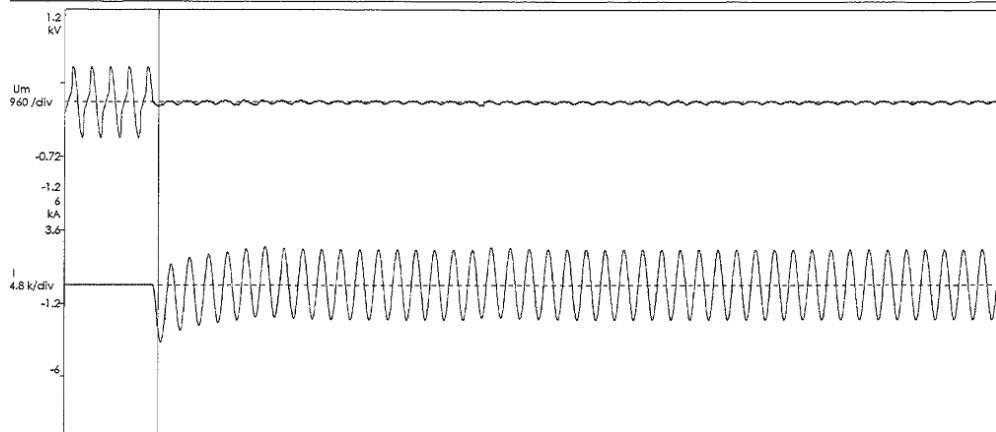
Tempo per una completa operazione di manovra C	≈ 3,6 s
Tempo per una completa operazione di manovra O	≈ 3,6 s

La sequenza di prova prevede come da normativa 100 operazioni di manovra C/O. Le singole manovre sono intervallate da un tempo di riposo di 1 minuto, ritenuto adeguato per il raffreddamento dei componenti. Per ognuna sono state monitorate e registrate le effettive grandezze caratteristiche, di cui in seguito esposte la prima, la 50^a, la 100^a e l'ultima, la 150^a (Oscil.37÷44), ricordando però che la Norma prevede l'esposizione di almeno una operazione di manovra ogni dieci (paragrafo B.6.106.10 della Norma).

Oscil.37: registrazione 1^a manovra della sequenza di prova di tipo C (SX)

LABORATORIO
SVEPPI

Laboratorio
SVEPPI



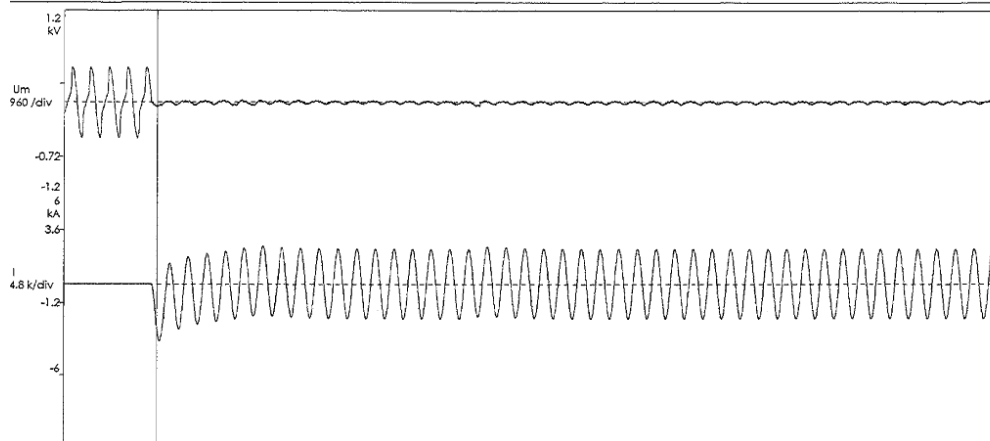
Result table

Operating sequence C	
Opening	
breaking current	--
Uncertainty	--
recovery voltage	--
Uncertainty	--
operating time	--
arcing time	--
mean speed (1)	--
Closing	
making current (*)	1632.2 A
Uncertainty	- A
applied voltage (*)	327.6 V
Uncertainty	- V
operating time	3599 ms

Oscil.38: registrazione 1^a manovra della sequenza di prova di tipo O (SX)

LABORATORIO
SVEPPI

Laboratorio
SVEPPI



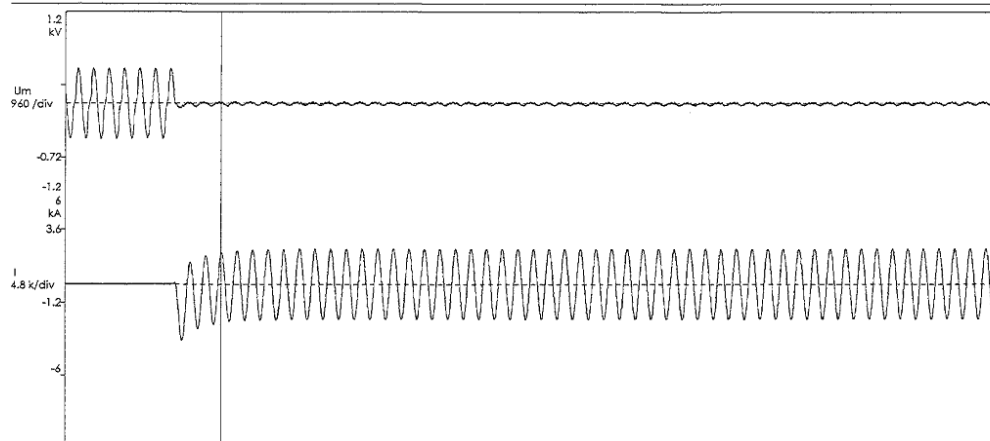
Result table

Operating sequence C	
Opening	
breaking current	--
Uncertainty	--
recovery voltage	--
Uncertainty	--
operating time	--
arcing time	--
mean speed (1)	--
Closing	
making current (*)	1632.2 A
Uncertainty	- A
applied voltage (*)	327.6 V
Uncertainty	- V
operating time	3599 ms

Oscil.39: registrazione 50^a manovra della sequenza di prova di tipo C (SX)

LABORATORIO
SVEPPI

Laboratorio
SVEPPI



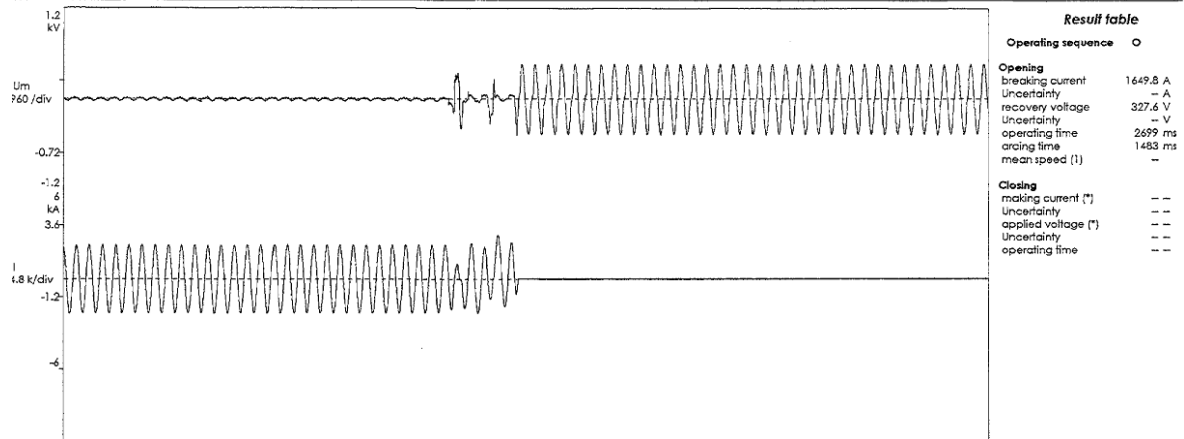
Result table

Operating sequence C	
Opening	
breaking current	--
Uncertainty	--
recovery voltage	--
Uncertainty	--
operating time	--
arcing time	--
mean speed (1)	--
Closing	
making current (*)	1643.5 A
Uncertainty	- A
applied voltage (*)	327.6 V
Uncertainty	- V
operating time	3599 ms

Oscil.40: registrazione 50^a manovra della sequenza di prova di tipo O (SX)

LABORATORIO
SVEPPI

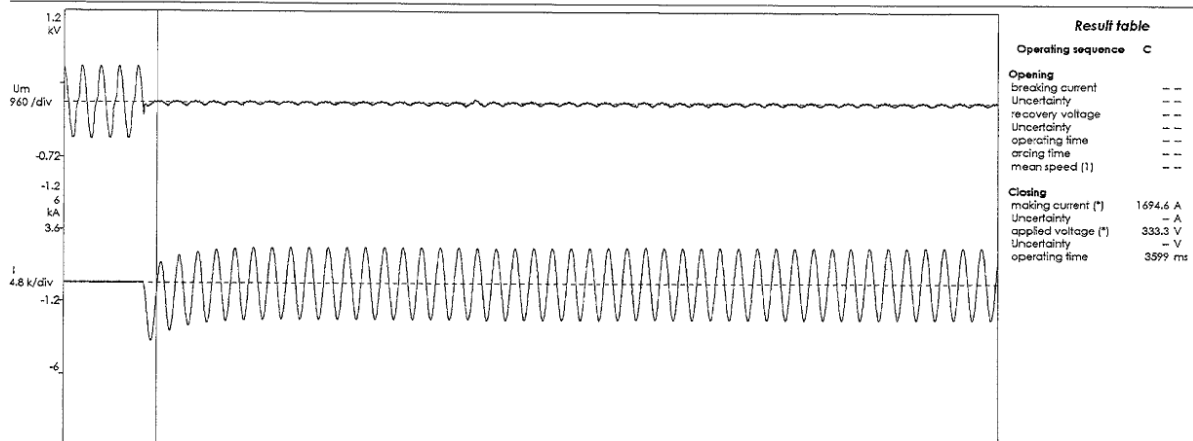
Laboratorio
SVEPPI



Oscil.41: registrazione 100^a manovra della sequenza di prova di tipo C (SX)

LABORATORIO
SVEPPI

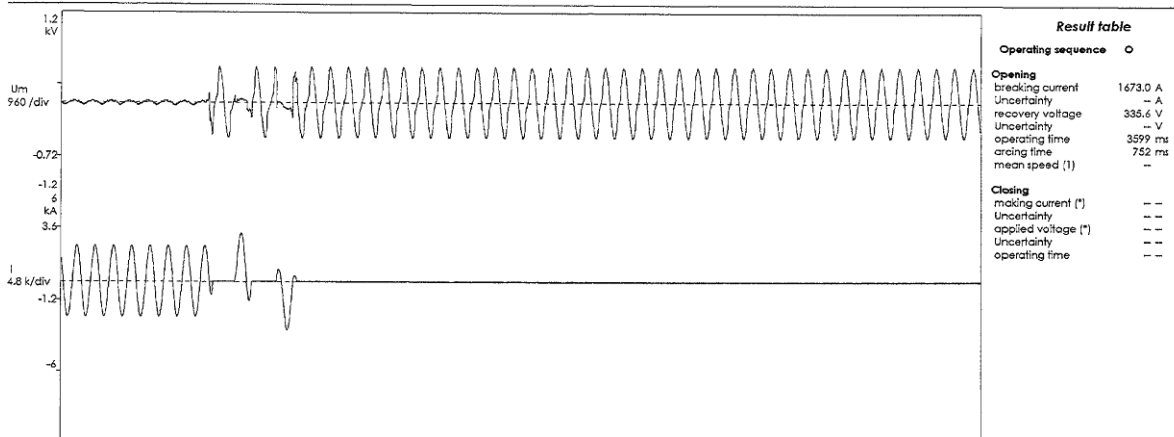
Laboratorio
SVEPPI



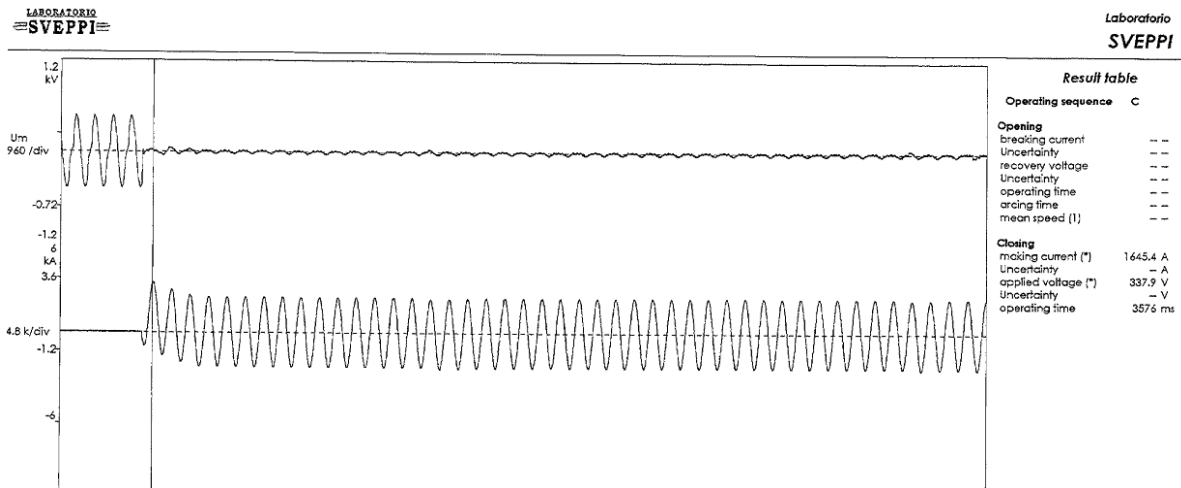
Oscil.42: registrazione 100^a manovra della sequenza di prova di tipo O (SX)

LABORATORIO
SVEPPI

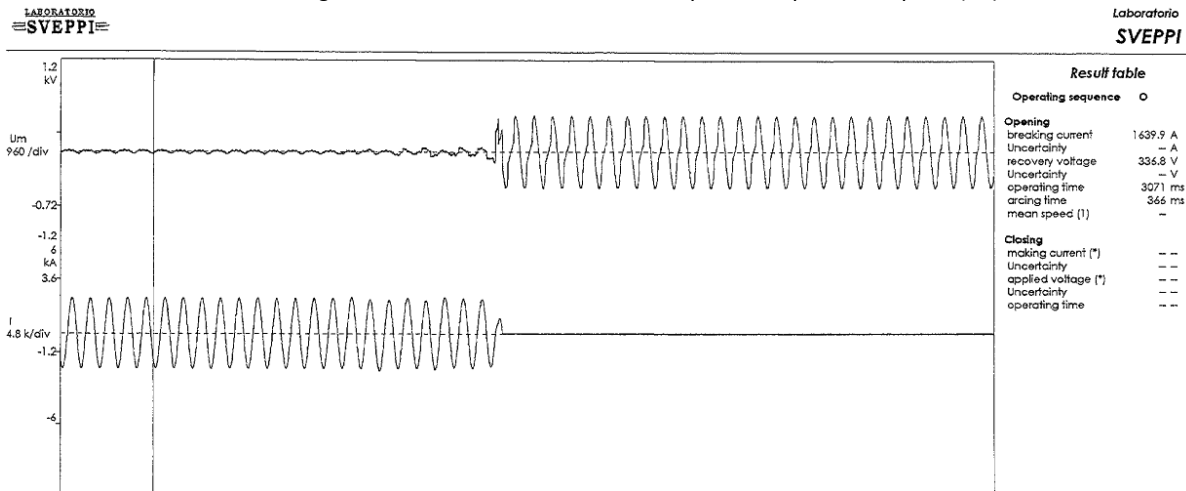
Laboratorio
SVEPPI



Oscil.43: registrazione 150^a manovra della sequenza di prova di tipo C (SX)



Oscil.44: registrazione 150^a manovra della sequenza di prova di tipo O (SX)



Durante la sequenza di prova si sono verificate emissioni di fiamme e particelle metalliche, che non sono però apparse dannose per gli operatori nelle vicinanze.

Per verificare con certezza il superamento della prova, sono state effettuate misurazioni di resistenza dei contatti principali con metodo voltamperometrico a corrente continua di 100 A, prima e dopo la prova e dopo le 50 operazioni di manovra aggiuntive, ottenendo valori esposti in Tab.27. Nelle Fig.40÷43 è possibile vedere lo stato dei contatti con più significativo deterioramento, rispettivamente dopo le 100 e le 150 C/O.

Tab.27: misurazioni di R dei contatti principali (S2DA)

$T_{amb} = 19,4 [^{\circ}C]$	Corrente [A]	Tensione [mV]	Resistenza [$\mu\Omega$]	T_{amb} [$^{\circ}C$]
Prima della prova	100	5,85	58,5	29
Dopo la prova 100 C/O	100	6,03	58,5	30
Dopo la prova 150 C/O	100	6,54	57,5	32

Fig.40: contatto secondario fisso SX dopo le 100 C/O



Fig.41: contatto secondario fisso SX dopo le 150 C/O



Fig.42: contatto mobile SX dopo le 100 C/O



Fig.43: contatto mobile SX dopo le 150 C/O



Dalle registrazioni è possibile ricavare un aumento di tempo di persistenza d'arco nelle prime 50 operazioni di manovra, da un valore minimo di 344 ms nelle prime manovre, ad un valore massimo di 1483 ms raggiunto appunto durante la 50ª chiusura. Tuttavia, nelle operazioni a seguire della 50ª, il tempo scende lievemente, assestandosi intorno a un valore medio di 800 ms.

11.5 Conclusioni

Il sezionatore equipaggiato con il dispositivo d'arco in prova è risultato idoneo a superare con successo la sequenza di 100 C/O richiesta ai valori nominali preposti in accordo con le normative a riguardo. L'erosione dei contatti secondari non è stata uniforme su entrambe le coppie di contatti, questo a causa delle oscillazioni del sezionatore durante la manovra e dei giochi permessi dallo stesso durante la scarica. A prova ultimata sono stati tuttavia riscontrati lievi danneggiamenti ai contatti principali (come mostrato nelle Fig.38÷41), dovuti all'esplosione di particelle metalliche che li hanno raggiunti durante il periodo d'arco; questi danneggiamenti risultano però localizzati in posizioni tali da non compromettere il passaggio di corrente quando il sezionatore è in stato di chiusura. A prova di quanto detto, le misurazioni di resistenza

su essi effettuate garantiscono il mantenimento delle loro proprietà entro le tolleranze fissate dagli standards (R + 20%).

La prova di tipo bus-transfer risulta superata.

Fig.44: contatto principale fisso dopo la sequenza di prova (SX)



Fig.45: contatto principale mobile dopo la sequenza di prova (SX)



Le ulteriori 50 operazioni di manovra effettuate hanno inoltre dimostrato l'efficienza del sezionatore; i contatti secondari presentano ovviamente un'erosione più pronunciata che durante il test ha causato maggiori saltellamenti e saldature istantanee fra i contatti: ciò comporta maggiore stress del meccanismo di manovra. Tuttavia, considerando che quest'ultimo viene alimentato alla sua tensione minima, si può comunque ritenere quanto ottenuto un buon risultato.

La condizione dei contatti principali è però degenerata: nonostante la misurazione di resistenza certifichi le loro buone condizioni, si consiglia comunque di non sottoporre il sezionatore a tali condizioni.

Interessante comunque il dato ottenuto, che mostra come dopo le 150 operazioni di manovra la resistenza del circuito principale in posizione di chiusura sia diminuita; questo è dovuto all'assestamento dei contatti e all'usura meccanica che ha livellato la superficie di contatto, aumentandone così la conduttività.

11.6 Osservazioni

Confrontando le due prove di tipo svolte, è possibile notare le seguenti differenze:

1. Erosione dei contatti minore nell'SX
2. Tempi d'arco minori nell'S2DA
3. Maggiori esplosioni di particelle metalliche nel test sull'SX
4. Dimensionamento maggiore dei contatti dell'S2DA

Il tutto trova una spiegazione nel fatto che il disegno dell'SX è tale da fornire uno sfregamento tra i contatti maggiore, ovvero, se per l'S2DA si aveva un'erosione eccessiva del contatto fisso in quanto il punto di contatto non variava (a differenza del contatto mobile), nel caso dell'SX il punto di contatto si sposta su entrambi i contatti, permettendo in tal modo una minore sollecitazione del punto stesso ed una dissipazione termica migliore. Bisogna inoltre considerare che l'SX presenta due coppie di contatti secondari e di conseguenza la corrente si divide su questi, spiegando quindi in minore dimensionamento. Tempi d'arco maggiori sono dovuti ad una minore velocità relativa di separazione dei contatti che porta ad un allungamento del tempo in cui i questi non hanno fra loro una forza necessaria (≈ 10 kg) a permettere un buon passaggio di corrente, favorendo così il fenomeno dell'arco elettrico, con una sua maggiore permanenza.

12 SINTESI DEL CIRCUITO DI PROVA DEL SEZIONATORE SX

12.1 Requisiti del circuito

Come visto precedentemente, il circuito di prova deve soddisfare delle precise caratteristiche stabilite dalla Norma CEI EN 62271-102 ANNEX B, quali:

1. Essere equivalente ad uno dei circuiti di prova (A o B) dati della Norma, riportati nuovamente a seguire nelle Fig.46,47.
2. Avere una Tensione Transitoria di Ritorno (TTR o TRV – Transient Recovery Voltage) con una forma del tipo $(1 - \cos)$, con una frequenza di oscillazione non inferiore a 10 kHz e un fattore di ampiezza presunto non inferiore a 1,5 (Fig.48).
3. Avere valori di prova coerenti con quelli riportati in Tab.28.

Tab.28: valori di prova secondo Norma

Tensione di prova	300 $\begin{pmatrix} +10\% \\ -0 \end{pmatrix}$
Corrente di prova	1600 $\begin{pmatrix} +10\% \\ -0 \end{pmatrix}$
Frequenza di prova	50 Hz ÷ 60 Hz
cosφ	< 0,15

Fig.46: circuito di prova A per le prove di stabilimento e di interruzione di correnti di commutazione di sbarra

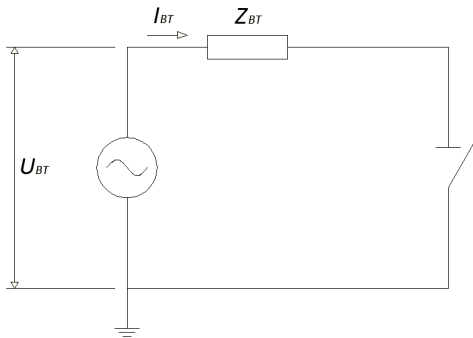


Fig.47: circuito di prova B per le prove di stabilimento e di interruzione di correnti di commutazione di sbarra

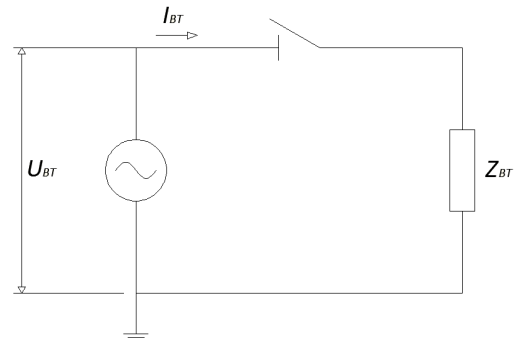
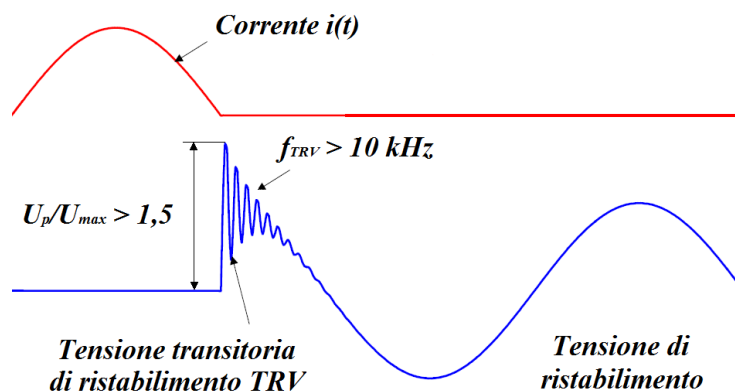


Fig.48: esempio di TRV richiesta



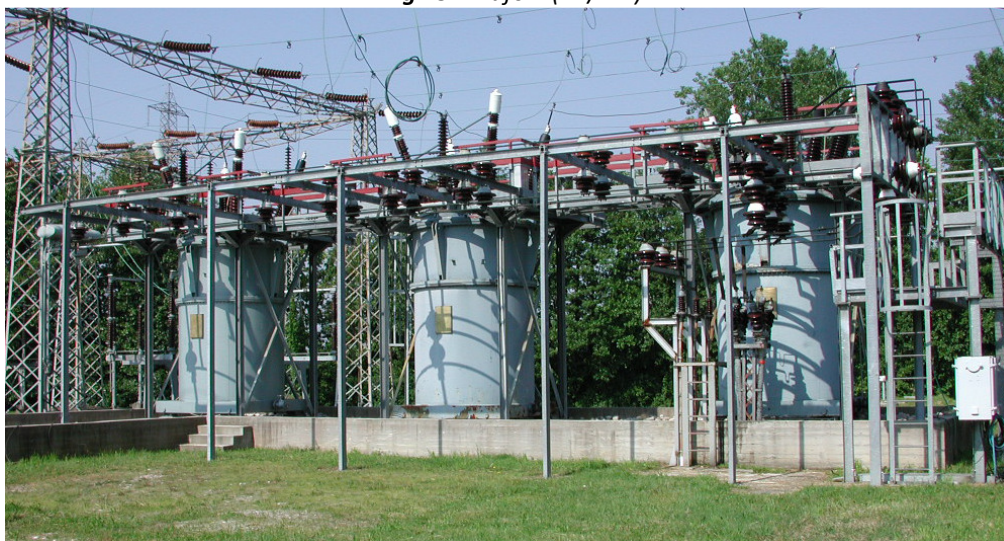
12.2 Dimensionamento dei parametri del circuito di prova

Il laboratorio SVEPPI ha a disposizione tre trasformatori monofase AT/MT (*Trafo 1 Fig.49*) ed un trasformatore monofase MT/BT (*Trafo 2 Fig.50*). I rispettivi dati di targa sono riportati nelle *Tab.29,30* a seguire.

Tab.29: dati Trafo 1 (AT/MT)

Produttore	<i>indelve</i>
Tipo	<i>Trafo monofase a tre avvolgimenti</i>
Potenza nominale	<i>500 MVA</i>
Tensione nominale primaria	<i>132 kV</i>
Tensione nominale secondaria	<i>11 kV</i>
Rapporto nominale di trasformazione	<i>12</i>
Frequenza nominale	<i>50 Hz</i>
Reattanza misurata al primario	<i>5,5 Ω</i>
Isolamento	<i>Olio</i>
Tipo di utilizzo	<i>Impulsivo</i>

Fig.49: Trafo 1 (AT/MT)



Tab.30: dati Trafo 2 (MT/BT)

Produttore	<i>S.e.A.</i>
Tipo	<i>Trafo monofase - ONAN</i>
Potenza nominale	<i>80 kVA</i>
Tensione nominale primaria	<i>6,2 kV ± 2×5%</i>
Tensione nominale secondaria	<i>0,3 kV – 0,15 kV</i>
Rapporto nominale di trasformazione	<i>20,6</i>
Corrente nominale primaria	<i>12,9 kA</i>
Corrente nominale secondaria	<i>266,6 A - 133,3 A</i>
Frequenza nominale	<i>50 Hz</i>
Perdite a vuoto	<i>1000 W</i>
Tensione di cortocircuito	<i>6,28%</i>

Fig.50: Trafo 2 (MT/BT)



12.3 Tensione di prova

Per realizzare la tensione di prova richiesta di 300 V (-0,+10%), si è scelto di collegare gli avvolgimenti primari dei tre trasformatori AT/MT (Trafi 1) in serie ed in parallelo quelli secondari, alimentandoli poi con la tensione concatenata di alimentazione di 220 kV. Così facendo, si varia il rapporto di trasformazione che diventa:

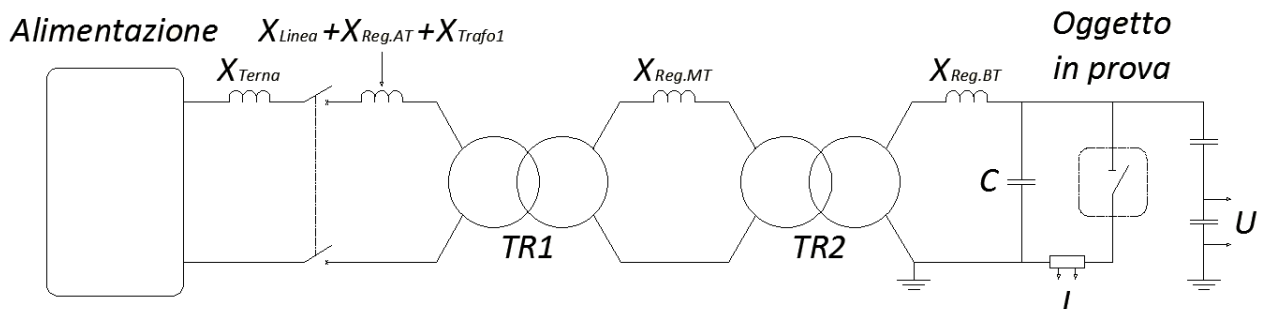
$$k_{TR1} = \frac{(132 + 132 + 132)}{11} = 36$$

Di conseguenza, la tensione che ne risulta ora al secondario è pari a $6, \bar{1}$ kV. Collegando ora in serie il Trafo 2, regolandolo in modo da ottenere un valore aggiunto del 10%, si ottiene una tensione in uscita al secondario di...

$$U_{Prova} = \frac{(U_{1,TR2} + 10\%)}{K_{TR2}} = \frac{(6, \bar{1} \cdot 1,1)}{20, \bar{6}} \cdot 1000 = 325,279 [V]$$

...coerente con gli standards (300V+8,423%). Il circuito di prova effettivo è quindi quello riportato in Fig.51.

Fig.51: Circuito di prova del sezionatore SX



12.4 Corrente di prova

Per realizzare il valore di corrente di prova preposto di 1600 A (-0,+10%) si utilizza una reattanza di regolazione X_{BT} . Il suo dimensionamento deve però tenere conto delle varie reattanze dell'impianto, riportate al secondario del *Trafo 2*. Inoltre, dal suo valore dipende il fattore di ampiezza della TRV che deve essere maggiore di 1,5.

Il prossimo passo sarà quindi quello di calcolare il valore delle reattanze viste dal lato BT.

12.4.1 Reattanze lato AT

Il laboratorio SVEPPI è allacciato ad una sottostazione TERNA a tensione nominale U_n di 220 kV. Per contratto, si ha un limite di corrente massima I_{AT} di 3,6 kA. Dal punto di consegna, la suddetta società deve comunicare un valore di reattanza di linea; questo valore non è un dato certo in quanto può variare in base alla magliatura della rete. Tuttavia, sulla base di calcoli statistici, TERNA dichiara un'impedenza di linea pari a 5,5 Ω per fase.

$$X_{Terna} = 2 \cdot 5,5 = 11 [\Omega]$$

Il laboratorio è provvisto di uno stallo di arrivo linea trifase mostrato in *Fig.52*. Esso è dotato, oltre ad interruttori, sezionatori, scaricatori e strumenti di misura (TA e TV), di tre reattanze di linea aggiuntive da 25 Ω per fase (*Fig.53*) per contenere la corrente in caso di guasto in AT sulla propria linea; queste sono poste subito dopo il punto di consegna.

$$X_{Reg,AT} = 2 \cdot 25 = 50 [\Omega]$$

Fig.52: stallo di arrivo linea del Laboratorio SVEPPI



Fig.53: reattanze di contenimento (25 Ω per fase)



Per la regolazione della corrente di corto circuito dei trasformatori AT/MT, sono state poste a monte delle reattanze in serie $X_{Reg,AT}$ (*Fig.54*), che fungono anche da regolazione grossolana della corrente. Il laboratorio ha a disposizione un massimo di 6 reattanze per fase, ognuna di un valore pari a 5,2 Ω . Nel caso specifico, sono state inserite tutte e sei su ogni fase, ottenendo quindi una reattanza di regolazione pari a...

$$X_{Reg,AT} = 2 \cdot (6 \cdot 5,2) = 62,4[\Omega]$$

Fig.54: Reattanze di regolazione lato AT



Pertanto, tenendo conto delle reattanze dei Trafi 1 misurate al primario (riportate in Tab.29) e ritenendo la reattanza di dispersione in AT trascurabile, possiamo dire che la somma delle reattanze al lato AT è pari a.

$$X_{AT} = X_{Terna} + X_{Linea} + X_{Reg.AT} + X_{TR1} = (2 \cdot 5,5) + (2 \cdot 25) + [2 \cdot (6 \cdot 5,2)] + (3 \cdot 5,5) = 139,900 [\Omega]$$

a) Valutazioni delle entità delle correnti di guasto lato AT

In caso di guasto prima del Trafo 1 e delle $X_{Reg.AT}$, si ha una corrente di entità pari a...

$$I_{cc} = \frac{U_n}{(X_{Terna} + X_{linea})} = \frac{220}{[(2 \cdot 5,5) + (2 \cdot 25)]} = 3,606 [kA]$$

Se invece il guasto accade sui morsetti secondari del Trafo 1 si ha una corrente di entità pari a...

$$I_{cc,TR1,MT} = \frac{V_{2,TR1}}{\left(\frac{X_{AT}}{k_{TR1}^2}\right)} = \frac{V_{2,TR1}}{\left(\frac{X_{Terna} + X_{Linea} + X_{Reg.AT} + X_{TR1}}{k_{TR1}^2}\right)}$$

$$= \frac{6,1}{\frac{(2 \cdot 5,5) + (2 \cdot 25) + [2 \cdot (6 \cdot 5,2)] + (3 \cdot 5,5)}{36^2}} = 56,612 [kA]$$

...che riportata al lato AT corrisponde a...

$$I_{cc,TR1,AT} = \frac{I_{cc,TR1,MT}}{K_{TR1}} = \frac{56,612}{36} = 1,573 [kA]$$

Nei Trafi 1 si è scelto di lavorare con un fattore di sicurezza massimo (f_s) dell'80% e risulta quindi che la corrente al secondario massima ammissibile deve essere...

$$I_{2,TR1,max} = \frac{S_{TR1}}{U_{2n}} \cdot f_s = \frac{500 \cdot 10^6}{11 \cdot 10^3} \cdot 10^{-3} \cdot 0,8 = \frac{500}{11} \cdot 0,8 = 36,364 [kA]$$

Essendo gli avvolgimenti al secondario collegati in parallelo, in caso di guasto ai morsetti secondari del Trafo 1, la corrente effettiva risulta quindi...

$$I_{cc, \sqrt{TR1, MT}} = \frac{I_{cc, TR1, MT}}{3} = \frac{56,612}{3} = 18,870 [kA]$$

..., valore molto inferiore al limite preposto ($f_s \approx 0,4$).

12.4.2 Reattanze lato MT

Come in AT, anche in MT sono state inserite in serie, a monte dei morsetti primari del *Trafo 2*, delle reattanze per la regolazione della corrente di guasto sul quest'ultimo trasformatore; in questo caso, il laboratorio ha a disposizione 3 reattanze regolabile tra un minimo di 0,022 Ω e un massimo di 7,3 Ω . La scelta è ricaduta sull'utilizzo di due di queste, regolate entrambe su un valore di 6,5 Ω .

$$X_{Reg.MT} = 2 \cdot 6,5 = 13 [\Omega]$$

Per quanto riguarda invece il *Trafo 2*, trascurando la componente resistiva dell'impedenza di corto circuito e ritenendola quindi tutta induttiva, si ha una reattanza misurata a primario di...

$$X_{TR2} = \frac{U_{1n}}{I_{1n}} \cdot \frac{v_{cc\%}}{100} = \frac{U_{1n}^2}{S_n} \cdot \frac{v_{cc\%}}{100} = \frac{(6,2 \cdot 10^3)^2}{80 \cdot 10^3} \cdot \frac{6,28}{100} = 30,175 [\Omega]$$

Tenendo conto della reattanza X_{AT} riportata al lato MT e di una reattanza parassita di spira MT ($X_{Spira, MT}$) pari a 0,015 Ω , si ottiene quindi una reattanza vista dal lato MT pari a...

$$X_{MT} = X_{Reg.MT} + X_{TR2} + \left(\frac{X_{AT}}{k_{TR1}^2} \right) + X_{Spira, MT} = 13 + 30,175 + \left(\frac{139,900}{36^2} \right) + 0,015 = 43,297 [\Omega]$$

12.4.3 Valutazioni delle entità delle correnti di guasto lato MT

In caso di guasto sui morsetti secondari del *Trafo 2*, si ha una corrente di entità pari a...

$$I_{cc, TR2, BT} = \frac{V_{2, TR2}}{\left(\frac{X_{MT}}{k_{TR2}^2} \right)} = \frac{V_{2, TR1}}{\left[\frac{X_{Reg.MT} + X_{TR2} + \left(\frac{X_{AT}}{k_{TR1}^2} \right) + X_{Spira, MT}}{k_{TR2}^2} \right]} = \frac{325,279}{\frac{13 + 30,175 + \left(\frac{139,900}{36^2} \right) + 0,015}{20,6^2}} = 3,209 [kA]$$

...che riportata al lato MT e AT corrisponde a...

$$I_{cc, TR2, MT} = \frac{I_{cc, TR2, BT}}{K_{TR2}} = \frac{3,209}{20,6} = 0,155 [kA]$$

$$I_{cc, TR2, AT} = \frac{I_{cc, TR2, MT}}{K_{TR1}} = \frac{0,155}{36} = 4,313 [A]$$

12.4.4 Reattanze lato BT

Riportando la reattanza X_{MT} al lato BT è ora possibile dimensionare la giusta reattanza di regolazione $X_{Reg.BT}$ per ottenere il valore di corrente di prova voluto; tenendo conto della reattanza di dispersione della spira BT ($X_{Spira, BT}$), valutata pari a 0,01 Ω , è possibile ora ricavare il valore ideale della $X_{Reg.BT}$ come segue.

$$X_{BT,ideale} = \frac{U_{2,prova}}{1600} = \frac{325,279}{1600} \cdot 1000 = 203,299 \text{ [m}\Omega\text{]}$$

$$X_{Reg.BT,ideale} = X_{BT,ideale} - \left(X_{Spira,BT} + \frac{X_{MT}}{k_{TR2}^2} \right) = 203,299 - \left(10 + \frac{43297}{20,6^2} \right) = 94,268 \text{ [m}\Omega\text{]}$$

La $X_{Reg.BT}$ è realizzata tramite una bobina di sbarramento, mostrata in Fig.55. Questa permette diversi valori di regolazione a seconda del tipo di collegamento, come mostrato in Tab.31. Il valore di reattanza scelto ricade sul valore più prossimo a quello calcolato, ovvero su un valore di 0,09 Ω . Nei dati di targa è riportata una sequenza di utilizzo relativa alla corrente indicata rispettivamente per ogni collegamento; questa viene indicata perché, come sopra detto, l'oggetto nasce come bobina di sbarramento. Tuttavia, essendo la corrente di prova di molto inferiore a queste, non è necessario attenersi al ciclo.

$$X_{BT} = X_{Reg.BT} + X_{Spira,BT} + \frac{X_{MT}}{k_{TR2}^2} = 0,09 + 0,01 + \frac{43,297}{20,6^2} = 0,201 \text{ [\Omega]}$$

Tab.31: dati di targa della reattanza di regolazione in BT

Produttore	Haefely trench Austria GMBH	
Tipo	TRR 75/50000/0,64	
Tensione nominale	12 kV r.m.s	
BIL	73 kV	
Tensione di prova	28 kV r.m.s	
Frequenza nominale	50 z	
Frequenza di risonanza	> 300 kHz	
Impedenza totale	0,2 Ω	
Servizio	Esterno	
Ciclo di utilizzo	01 s on - 0,3 s off - 0,1 s on - 0,60 s off - 0,1 s on - 540 s off	
Sequenza di cicli	un massimo 10 consecutivi	
Classe di temperatura	F	
Tipo di raffreddamento	AN	
Collegamenti possibili	O - E	0,2 Ω - 31,5 kA
	O - D	0,19 Ω - 31,5 kA
	O - C	0,13 Ω - 31,5 kA
	A - E	0,9 Ω - 40 kA
	B - E	0,7 Ω - 50 kA

Fig.55: reattanza di regolazione in BT



12.4.5 Valutazione dell'entità della reale corrente di prova in BT, MT e AT

Avendo ora scelto tutti i valori delle reattanze di regolazione è possibile calcolare l'effettiva corrente di prova e verificare che rientri nelle esigenze dei componenti del circuito.

$$I_{Prova,BT} = \frac{U_{2,prova}}{X_{BT}} = \frac{U_{2,prova}}{\left(X_{Reg,BT} + X_{Spira,BT} + \frac{X_{MT}}{k_{TR2}^2} \right)} = \frac{325,279}{\left(0,09 + 0,01 + \frac{42,297}{20,6^2} \right)} = 1634 [A]$$

...che riportata al lato MT e AT corrisponde a...

$$I_{Prova,MT} = \frac{I_{Prova,BT}}{K_{TR2}} = \frac{1634}{20,6} = 79,064 [A]$$

$$I_{Prova,AT} = \frac{I_{Prova,MT}}{K_{TR1}} = \frac{79,064}{36} = 2,196 [A]$$

Gli interruttori AT utilizzati sono del tipo a doppia camera, isolata in SF₆, con funzionamento ad aria compressa. Questi sono caratterizzati da un intervallo di valori per il quale strappano la corrente, compreso tra 50 A ÷ 150 A. È quindi indispensabile lavorare al di fuori di questo per non provocare sovratensioni. Dai risultati sopra ottenuti avere quindi la certezza che tale condizione sia soddisfatta.

12.4.6 Verifica dei parametri della TRV

La TRV deve avere una frequenza di oscillazione superiore a 10 kHz. Per raggiungere questo requisito è necessario inserire una capacità in parallelo all'oggetto in prova, con adeguato dimensionamento. Partendo quindi dal valore preposto, si ottiene...

$$L = \frac{\left(X_{Reg,BT} + X_{Spira,BT} + \frac{X_{TR2}}{k_{TR2}^2} \right)}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{\left(0,09 + 0,01 + \frac{30,175}{20,6^2} \right)}{314 \cdot 1000} = 0,543 [mH]$$

$$f = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} \cdot \frac{1}{2\pi} > 10000 [Hz]$$

$$C < \frac{10^9}{10000^2 \cdot L \cdot 4 \cdot \pi^2} = \frac{10^9}{10^8 \cdot 0,543 \cdot 10^{-3} \cdot 4 \cdot 3,14^2} = 466 [nF]$$

Per realizzare tale capacità elettrica necessaria si utilizza il parallelo di più condensatori, tutti aventi una capacità di 100 nF, mostrati in Fig.56. Dovendo quindi realizzare un valore minore a quello sopra calcolato, si è scelto di utilizzare 4 condensatori ottenendo pertanto una frequenza teorica di oscillazione di TRV pari a...

$$f = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi} = \frac{1}{\sqrt{0,543 \cdot 10^{-3} \cdot 400 \cdot 10^{-9}}} \cdot \frac{1}{2 \cdot 3,14} = 10799 Hz$$

Tab.32: dati di targa di un singolo condensatore

Produttore	DUCATI
Tensione nominale	36 kV r.m.s
Tensione di prova	72 kV r.m.s
Capacità nominale	0,100 μ F
Capacità misurata	0,102 μ F
Tolleranza	$\pm 10\%$
Temperatura di funzionamento	-25 °C / +40 °C

Fig.56: condensatori utilizzati (100 nF ciascuno)



Va detto però che in quest'ultimo calcolo non si considera l'influenza delle capacità parassite del *Trafo 2*: queste infatti creano insieme all'induttanza dell'avvolgimento secondario una cella di risonanza i cui effetti di oscillazione vanno a sovrapporsi a quelli della frequenza teorica calcolata. Inoltre, la frequenza di risonanza della macchina varia da modello a modello e non è pertanto ben definibile. Tuttavia, per comodità di prova, la Norma permette l'utilizzo di TRV con un andamento della forma d'onda del tipo (1-cos), andamento che si riferisce ad un'unica cella di oscillazione, quale quella in esame.

Per quanto riguarda invece il fattore di ampiezza, ovvero il rapporto fra il valore di picco della TRV e quello della tensione di prova, deve essere verificato che sia maggiore del valore 1,5. In tal proposito, il Laboratorio SVEPPI ha effettuato in precedenza prove atte ad analizzare i parametri dei vari circuiti di prova da esso utilizzati, riportando un fattore di ampiezza pari a 1,8, ampiamente al di sopra dello standard richiesto. Tramite questo valore è quindi possibile calcolare il valore di picco della TRV presunto come segue.

$$\begin{aligned} U_{picco,TRV} &= K_{picco,TRV} \cdot \sqrt{2} \cdot I_{Prova,BT} \cdot \left(X_{Reg,BT} + X_{Spira,BT} + \frac{X_{TR2}}{k_{TR2}^2} \right) \\ &= 1,8 \cdot \sqrt{2} \cdot 1634 \cdot \left(0,09 + 0,01 + \frac{30,175}{20,6^2} \right) = 709,812 [V] \end{aligned}$$

12.4.7 Fattore di potenza

Si ipotizza che la componente resistiva delle macchine utilizzate sia all'incirca 1/20 di quella induttiva, ovvero che le si abbia un angolo di sfasamento φ di 87°. Sapendo inoltre che i collegamenti in BT sono realizzati con tubi in alluminio da \varnothing 50 mm, per una lunghezza complessiva di circa 30 m, e trascurando le impedenze degli strumenti di misura, si avrà pertanto che:

$$R_{Al} = \rho_{Al} \cdot \frac{l}{S} = 2,75 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{30 \cdot 10^6}{\left(\frac{50}{2}\right)^2 \cdot \pi} = 0,431 \text{ [m}\Omega\text{]}$$

Tale valore di resistenza è influente rispetto la componente resistiva ipotizzata delle macchine; tuttavia, a seguire è riportato comunque un calcolo di verifica.

$$\varphi = \tan^{-1} \left[\frac{X_{BT}}{R_{Al} + (X_{BT} \cdot 0,05)} \right] = \tan^{-1} \left[\frac{0,201}{0,431 \cdot 10^{-3} + (0,201 \cdot 0,05)} \right] = 87,015^\circ$$

$$\cos \varphi = 0,052 < 0,15$$

12.4.8 Protezioni

Come protezione del circuito, in particolar modo del *Trafo 2*, è stato inserito in serie, a monte dell'oggetto in prova, un interruttore per MT avente le caratteristiche riportate in *Tab.33* e mostrato in *Fig.57*.

Tab.33: dati di targa dell'interruttore utilizzato

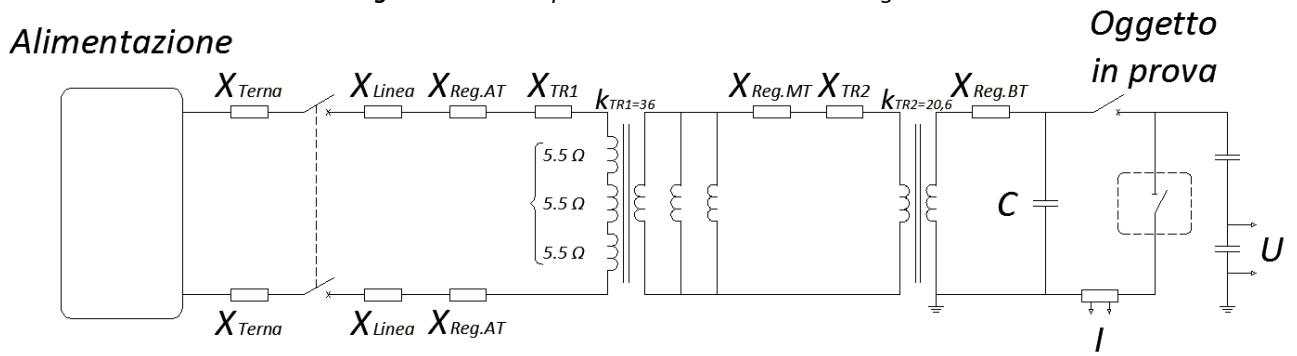
Produttore	<i>Schneider Electric</i>
Tipologia	<i>Interruttore isolato in SF₆</i>
Tensione nominale	<i>24 kV r.m.s</i>
BIL	<i>125 kV</i>
Frequenza nominale	<i>50 Hz</i>
Corrente nominale	<i>630 A</i>
Corrente di cortocircuito	<i>16 kA</i>
Tempo di tenuta al cortocircuito	<i>3s</i>
Sequenza di operazioni	<i>O – 0,3 s – C/O – 3 min – C/O</i>

Fig.57: Interruttore di prova utilizzato in BT



A seguire è riportato lo schema circuitale utilizzato in prova, completo delle grandezze prima discusse.

Fig.58: circuito di prova del sezionatore SX dettagliato



13 SOLUZIONI ALTERNATIVE

Come noto, la problematica delle commutazioni delle correnti di sbarra ha portato all'introduzione di sistemi di contatti ausiliari al quale viene dato l'oneroso compito di assorbire il fenomeno dell'arco elettrico. Tuttavia, facendo un passo indietro rispetto a quanto già visto, possiamo dire che per aumentare la capacità di commutazione dei sezionatori, possono essere utilizzati due principi di progettazione differenti, quali:

- contatti ausiliari a bassa erosione, sui quali avviene l'effettiva apertura e chiusura del circuito per preservare i contatti principali dai transitori di commutazione;
- contatti in materiale resistente all'arco; con questa soluzione si ha il vantaggio di non avere parti addizionali e, in questo modo, il contatto principale può farsi carico del transitorio in apertura e in chiusura. Questa soluzione è solitamente utilizzata lì dove è richiesta solo una limitata capacità di interruzione (ben al di sotto dei requisiti richiesti dalla normativa).

Consideriamo ora la seconda soluzione. Nelle reali applicazioni in cui si andrebbe ad operare, questa tipologia di contatto unico non riesce a garantire una commutazione sicura adeguatamente alla normativa, che prevede, come in precedenza visto, l'interruzione e il ristabilimento di correnti fino a 1600 A ad una tensione massima di 300.

Solitamente, questa tipologia di contatto è realizzata con una placcatura in Ag/CdO. Questo materiale porta però a dei risvolti ambientali-legali: il Cadmio è un metallo pesante, riconosciuto tossico da molti anni, che causa infatti rammollimento delle ossa, inibizione della crescita, mal funzionamento dei reni e infertilità; si accumula nel corpo umano con un periodo di vita media tra i 10 e i 30 anni, è cancerogeno ed è molto volatile.

Per ridurre l'inquinamento e i rischi di salute per l'uomo, l'UE ha ristretto l'uso del Cadmio dal 1967; più specificatamente, con la direttiva "End of Live Vehicles" (ELV) [5,6] valida dal 2003, l'UE ha ristretto l'uso dei contatti in Ag/CdO per la prima volta. Con la direttiva RoHS l'UE protegge invece il consumatore da dispositivi elettrici ed elettronici, proibendo l'uso di mercurio (Hg), piombo (Pb), cromo esavalente (Cr VI) e di cadmio (Cd). Questa direttiva è entrata in vigore da luglio 2006, spingendo quindi verso la sostituzione dell'Ag/CdO.

A questo proposito, una ditta tedesca quale la AMI DODUCO, ha svolto degli studi sperimentali ponendosi come obiettivo quello di trovare un materiale sostitutivo all'Ag/CdO, ottenendo da questo ottimi risultati, sorprendentemente maggiori del suo precedente.

Analizziamo quindi l'esperimento da essi condotto.

13.1 Esperimento

13.1.1 Materiali di contatto

L'esperimento prevede il confronto di un nuovo materiale di contatto, e cioè l'Ag/SnO₂, con l'Ag/CdO. Entrambi sono realizzati per sinterizzazione.

L'ossido di argento-stagno (Ag/SnO₂) è composto in peso dall'88% da argento. Polvere di argento molibdato (Ag₂MoO₄) è stata aggiunta alla componente ossido di stagno (SnO₂) al fine di migliorare la bagnabilità delle particelle di quest'ultimo; questo fa sì che possano rimanere in sospensione sull'argento fuso prodotto dall'azione dell'arco elettrico. Nella prima fase, polvere di SnO₂ viene miscelata con polvere di Ag₂MoO₄, seguita poi da un processo di ricottura ad una temperatura più bassa del punto di fusione dell'Ag₂MoO₄. A questo punto le particelle di SnO₂ vengono rivestite con un piccolo strato di additivo (che serve sia da

collante, sia da lubrificante). La polvere di SnO₂ viene poi mescolata con la polvere d'Ag₂MoO₄ e il tutto viene compresso isostaticamente fino alla sinterizzazione. Successivamente il sinterizzato viene co-estruso (2 blocchi estrusi assieme, si incollano a pressione). Infine, l'estruso viene arrotolato e saldo brasato con supporti di rame.

13.1.2 Prova

Il confronto tra i due materiali di contatto testati è stato fatto con un modello di simulazione di commutazione di sbarra. In seguito Ag/SnO₂ è stato testato in condizioni di esercizio su di un sezionatore a pantografo per verificare la sua reazione alle reali condizioni di funzionamento.

13.1.2.1 Prima prova (simulatore)

Il comportamento in commutazione dei materiali di contatto sotto specifiche condizioni di carico per il trasferimento di sbarra è stato valutato con un modello di simulazione, mostrato in Fig.59. Il contatto mobile è guidato da un cilindro pneumatico che garantisce una velocità di manovra massima di 0.75 m/s, una forza di contatto fino a 2000 N e una frequenza di commutazione fino a 600 operazioni per ora. La massima tensione ottenibile con questo simulatore è di 230 V_{AC} e una corrente con valore massimo di 1500 A (induttiva o resistiva) per un massimo tempo di conduzione pari a 5 s.

I test sono stati effettuati secondo la normativa IEC 62271-102. I dettagli sulle condizioni del simulatore di prova sono mostrati nella seguente Tab.34.

Tab.34: dettagli sulle condizioni del simulatore di prova

Carico in apertura/chiusura	$U_{AC} = 115 [V]; I = 1460 [A]; \cos\varphi = 0.155$
Numero di commutazioni	100
Frequenza di commutazione	30 operazioni per ora
Comportamento di rimbalzo in chiusura	Nessun rimbalzo
Forza di contatto	1250 [N]
Tempo di commutazione	4 [s]
Velocità di apertura	0.5 [m/s]
Distanza massima fra i contatti	70 [mm]

Durante le prove, sono stati misurati per mezzo di un oscilloscopio digitale ed un PC la durata d'arco e il numero di re-inneschi. La resistenza di contatto è stata misurata dopo n=0, n=25, n=75 ed n=100 manovre. Le condizioni di prova usate sono: fase di chiusura senza corrente, fase di chiusura con corrente di prova di 100 A DC, tempo di conduzione pari a 5 s ed una forza di contatto di 1600 N. Sono stati eseguiti rispettivamente tre cicli di prove per l'Ag/CdO e quattro per l'Ag/SnO₂.

Come è possibile vedere in Fig.59, la struttura meccanica del simulatore impone che il punto di contatto non vari durante le 100 manovre. In questo modo, le sollecitazioni ottenute sul materiale in prova risultano essere più severe rispetto a quelle di un comune sezionatore, nel quale l'influenza ambientale (temperatura e vento) porta a differenti punti di commutazione per ogni operazione di manovra.

Fig.59: simulatore di prova



13.1.2.2 Seconda prova (sezionatore a pantografo)

In aggiunta alle prove effettuate con il simulatore di commutazione, sono state svolte delle prove di tipo con una corrente di 1600 A su di un singolo polo di un sezionatore a pantografo, avente una tensione nominale di 245 kV. Questa prova è stata eseguita su di un dispositivo dotato di comando motorizzato, alimentato alla sua tensione minima di funzionamento al fine di garantire le più severe condizioni di prova relative alla velocità di manovra. Sia in chiusura che in apertura, essa può variare tra i 0.2 m/s ed i 0.23 m/s. Inoltre, al fine di ottenere un esito valido anche per le più alte tensioni nominali dell'oggetto in prova, è stata applicata una tensione di commutazione di sbarra pari a 300 V che, secondo normativa, risulta essere il valore più elevato. Il fattore di potenza durante le prove è pari a 0,10.

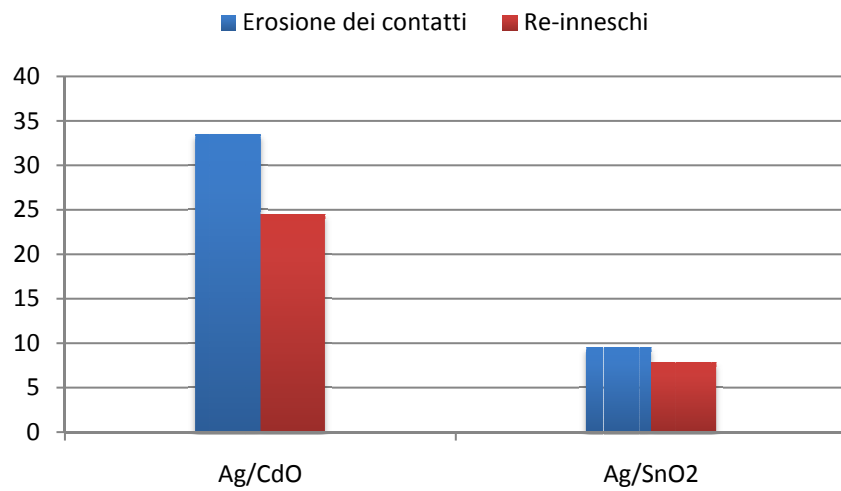
Non è stato però possibile porre un confronto con l'ossido di argento-cadmio (Ag/CdO) in quanto, come già noto da esperimenti precedenti, quest'ultimo non è in grado di interrompere valori di correnti come quella in prova alla relativa tensione di alimentazione imposta.

13.1.2.3 Risultati prima prova (simulatore)

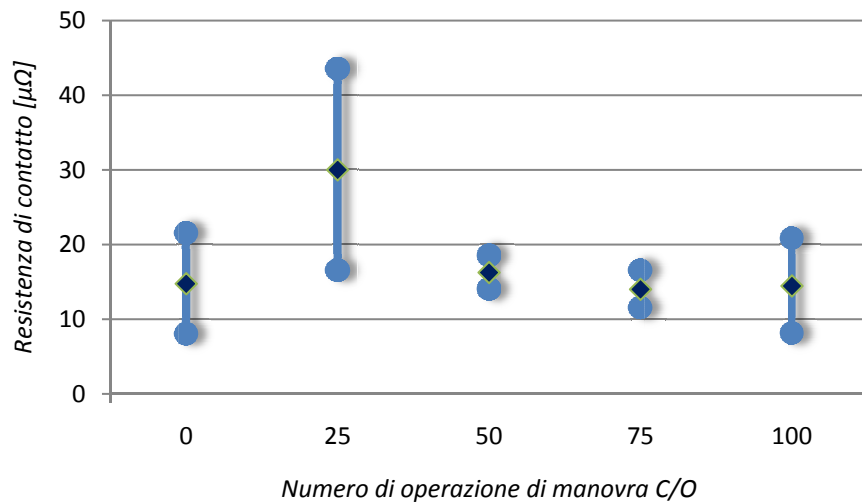
I risultati ottenuti dai test effettuati con il simulatore di commutazione di sbarra sono mostrati nei Graf.14÷16 e nelle Fig.60 e Fig.61. Il Graf.14 mostra i valori medi della quantità di re-inneschi e dell'erosione del contatto a prova ultimata. L'Ag/SnO₂ presenta una significativa diminuzione di re-inneschi e una altrettanto significativa minore erosione dei contatti rispetto all'Ag/CdO. I Graf.15,16 permettono invece un confronto dei valori di resistenza di contatto dopo n=0, n=25, n=50 ed n=100 manovre.

La Fig.60 mostra lo stato di una coppia di contatti in Ag/CdO dopo le 100 manovre, effettuate nel simulatore di commutazione di sbarra (simili ai contatti in Ag/SnO₂).

Graf.14: confronto fra re-inneschi e erosione d'arco dopo 100 manovre



Graf.15: valori medi di resistenza misurati durante la sequenza di prova Ag/CdO



Graf.16: valori medi di resistenza misurati durante la sequenza di prova Ag/SnO₂

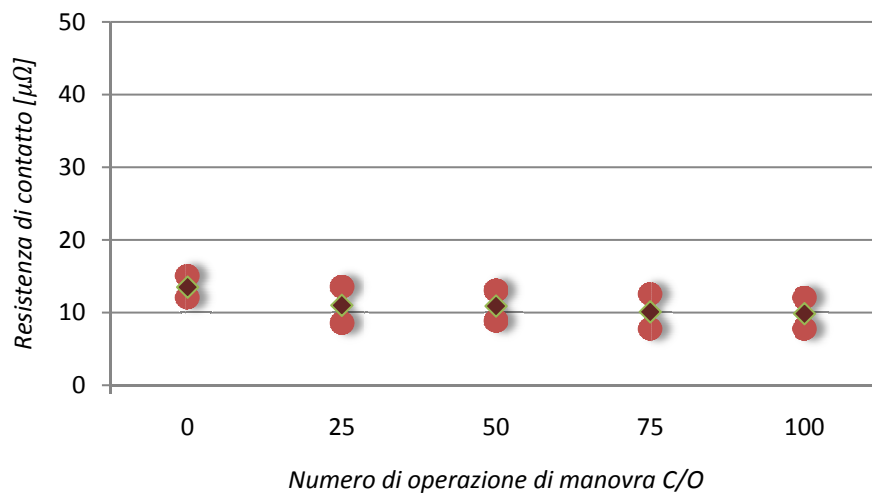


Fig.60: stato dei contatti in Ag/CdO dopo la sequenza di test



13.1.2.4 Risultati seconda prova (Sezionatore a pantografo)

Il sezionatore supera la prova; la sua capacità di trasporto di corrente è la medesima prima e dopo il test e l'isolamento non è diminuito nel corso delle manovre. Inoltre, durante la sequenza di prova, il suo comportamento meccanico non ha presentato variazioni.

La Graf.17 mostra i tempi di persistenza d'arco durante le fasi rispettivamente di chiusura e apertura svolte sul sezionatore a pantografo con tensione nominale di 245 kV.

Nella micro sezione del contatto riportata nella Fig.61 è possibile notare una distribuzione omogenea di particelle di SnO₂ nelle zone interessate dall'arco. A prova ultimata, residui del materiale di contatto sono stati trovati anche in zone non interessate.

Graf.17: tempi d'arco registrati durante la prova (Ag/SnO₂)

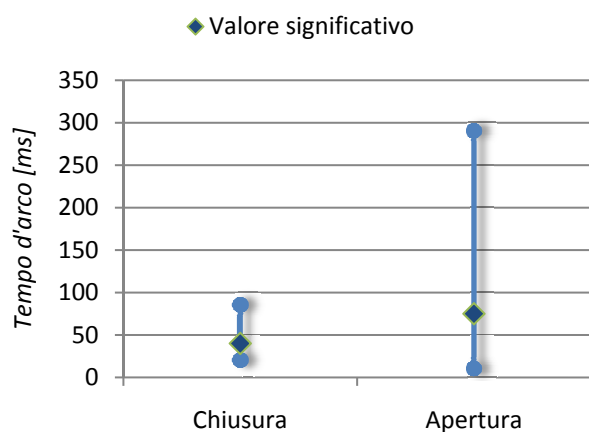
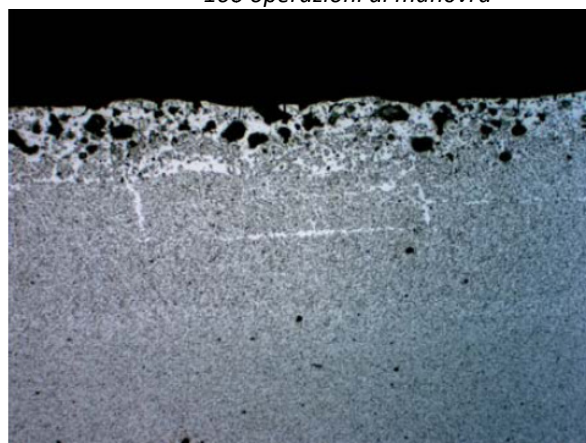


Fig.61: micro sezione del contatto in Ag/SnO₂ dopo le 100 operazioni di manovra



13.1.2.5 Discussione

I risultati della prova di commutazione effettuata utilizzando il simulatore mostrano che utilizzando contatti in Ag/SnO₂ l'erosione d'arco e il numero di re-inneschi sono tre volte inferiori rispetto a quelle che si avrebbero utilizzando contatti in Ag/CdO. Inoltre un confronto in spessore residuo del materiale di contatto a test ultimato mostra un significativo aumento nell'utilizzo di contatti in Ag/SnO₂.

Le prove effettuate con il sezionatore a pantografo mostrano una buona condizione globale dei contatti striscianti. Il tempi di persistenza d'arco, sia in fase di chiusura che in fase di apertura, sono approssimativamente gli stessi che presentano sezionatori muniti di contatti ausiliari. Grazie alla minore erosione d'arco presentata dall'Ag/SnO₂, lo spessore del contatto può essere diminuito.

13.1.3 Conclusioni

L'obiettivo di questa ricerca era quello di trovare un'adeguata sostituzione al cadmio usato come materiale di contatto nei sezionatori, solitamente con capacità di interruzione limitata (valori massimi: 1000 A / 90 V). Le prove effettuate dimostrano che l'Ag/SnO₂ è in grado di sostituire l'Ag/CdO in queste applicazioni e non solo, anche in applicazioni a capacità di commutazione più elevate dove sarebbe necessario l'uso di contatti ausiliari. È mostrato nelle prove di tipo che il contatto strisciante rivestito da uno strato di Ag/SnO₂ è capace di aprire e chiudere un circuito interessato da 1600 A 300 V per 100 manovre, che corrispondono ai valori massimi imposti dalla normativa. L'eccellente comportamento di questa lega emerge anche nelle prove di cortocircuito e di sovratemperatura. Si può quindi concludere che l'Ag/CdO può essere rimpiazzato nei sezionatori con l'Ag/SnO₂ ed inoltre non risultano necessari contatti ausiliari.

Nonostante le ottime qualità, bisogna sempre poi rivedere il tutto da un punto di vista economico: abbiamo visto come il processo di produzione di questa lega prevede che il prodotto finale sia una lamina estrusa. Ne risulta quindi una necessaria modellizzazione su misura per ogni tipologia di sezionatore, facendo lievitare fortemente i costi di quest'ultimi. Inoltre, il volume di materiale che si andrebbe ad utilizzare per rivestire i contatti principali sarebbe superiore a quello dei materiali utilizzati per i contatti secondari, fattore questo che comporta un ulteriore costo.

Pertanto, finché le modalità di produzione di Ag/SnO₂ resteranno tali, risulta più conveniente l'approccio finora adottato.

14 BIBLIOGRAFIA

- [1] IEC N. 62271-102 (2001-12)
"High-voltage switchgear and controlgear – Part 102: Highvoltage alternating current disconnectors and earthing switches"

- [2] IEC N. 60694 (1996-2005):
"Common Specifications For High-Voltage Switchgear and Controlgear Standards"

- [3] Norma per l'Industria Elettrica della Repubblica Popolare Cinese
DL/T 593—2006
"Common Specifications for High-voltage Switchgear and Controlgear Standards" (derivata dalla norma internazionale IEC 60694: 2002, MOD)

- [4] Norma per l'Industria Elettrica della Repubblica Popolare Cinese
DL/T 486 – 2000 eqv. to IEC 60129: 1984
"Specifications for HV AC disconnectors and earthing switches"

- [5] F.E. Andrews, L.R. Janes and M.A. Anderson
"Interrupting Ability of Horn-Gap Switches"
AIEE Transactions, Vol. 69, 1950

- [6] D.F. Peelo, *"Current Interrupting Capability of Air Break Disconnect Switches"*
IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. PWRD-1, No. 1, January 1986 and Correction
IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. PWRD-2, No. 4, October 1987

- [7] Digital Engineering Library @ McGraw-Hill (www.digitalengineeringlibrary.com)
Copyright © 2006 The McGraw-Hill Companies.

- [8] Specifica tecnica TERNA
"Requisiti e caratteristiche di riferimento delle stazioni elettriche della RTN"
Rev. 01 del 30.10.2006

- [9] Thomas E. Browne, Jr.
"Circuit Interruption, Theory and Techniques"
Electrical Engineering and Electronics/21