

Parte II: Impianti fissi di trazione elettrica

- a. Linee primarie:* caratteristiche generali, dimensionamento e protezioni;
- b. Sottostazioni elettriche 3kV:* schema elettrico, alimentazione e smistamento AT, trasformazione ed alimentazione MT, conversione dell'energia, protezione e distribuzione TE;
- c. Linea di Contatto 3kV:* smistamento ed alimentazione TE, schema elettrico, elementi TE (sospensione, mensola, braccetto di poligonazione, punto fisso, regolazione automatica, spazio d'aria), dimensionamento e protezioni;
- d. Sistema di Trazione Elettrica per linee AC/AV (25 kV):* elementi TE, trasformazione ed alimentazione TE, Posti di Cambio Fase, Posti di Passaggio 3 kV/25 kV, dimensionamento e protezioni.



Linee elettrificate a corrente continua

Nel sistema a corrente continua la tensione di linea U_L varia da qualche centinaio di volt a 4000 volt.

Le tensioni nominali normalmente utilizzate sono 750 V – 1500 V – 3000 V.

Sono stati compiuti studi per impiegare tensioni più elevate (6-12-18-24 kV) per le quali è stata dimostrata la fattibilità ma ad oggi non vi sono state applicazioni pratiche nemmeno a livello sperimentale.

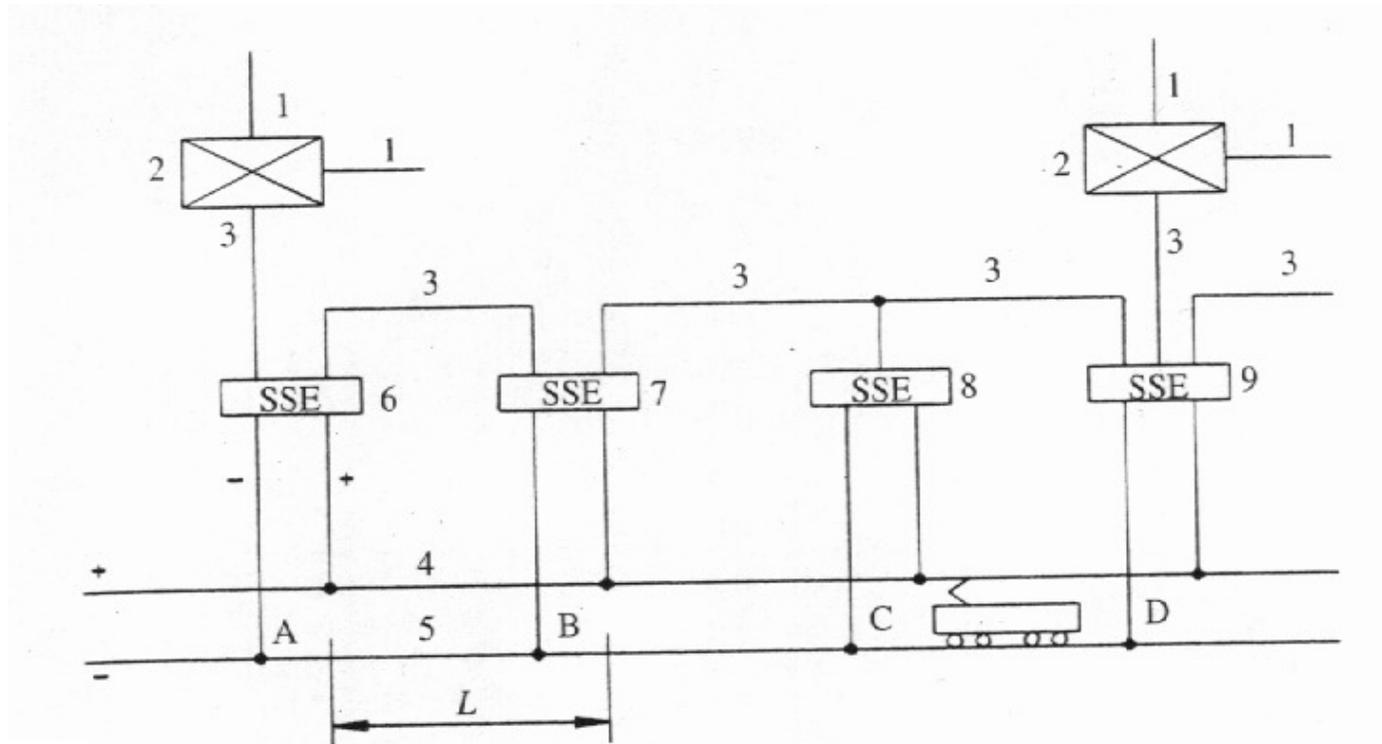
Le variazioni di tensione ammesse dalle norme CEI EN 50163 sono $- 33\%$ e $+ 20\%$ rispetto al valore nominale.

Linee elettrificate a corrente continua

L'energia per l'alimentazione delle linee elettrificate viene normalmente prelevata dalla *rete industriale trifase* a media o ad alta tensione e raddrizzata in corrente continua nelle *sottostazioni di conversione*, situate lungo le linee oppure, nel caso di reti urbane, in corrispondenza di opportuni nodi.



Linee elettrificate a corrente continua



Schema di alimentazione di linee ferroviarie a corrente continua.

1) Linee trifasi ad alta tensione della rete industriale; 2) stazioni della rete trifase industriale AT; 3) linee primarie di trazione ad alta tensione; 4) linea aerea di contatto; 5) binario; SSE) sottostazioni di conversione (da 6 a 9) L) distanza fra sottostazioni successive.

Linee elettrificate a corrente continua

Le sottostazioni si trovano a distanza L le une dalle altre; la loro ubicazione è tale per cui non è sempre possibile realizzare l'allacciamento diretto alla rete industriale trifase, o perché nelle località interessate non esistono linee o stazioni o perché, se queste esistono, non dispongono della potenza sufficiente, tenuto conto delle caratteristiche del carico di trazione (normalmente con assorbimenti nell'ordine dei kA). E' quindi di solito necessario collegare le sottostazioni di conversione tra loro e con la rete mediante apposite *linee trifasi primarie* ad alta tensione.

Gli impianti di alimentazione di una linea elettrificata in corrente continua comprendono, a valle dei punti di derivazione dalla rete industriale:

- *le linee primarie trifasi*
- *le sottostazioni di conversione (SSE)*
- *il circuito di trazione* il cui positivo è costituito da una *linea aerea di contatto*



Linee primarie trifasi

- $\cong 10.000$ km di elettrodotti in AT (a 220 kV-150 kV-132 kV-66 kV)
- Interconnessioni con il GRTN (Gestore della Rete di Trasmissione Nazionale), Enel Distribuzione e gli altri gestori, produttori, distributori e grandi utilizzatori di energia elettrica

66 kV	km 2.975	} Totale 9.163 km
132 kV	km 5.309	
150 kV	km 868	
220 kV	km 11	

Sottostazioni elettriche (SSE)

In campo ferroviario le SSE sono distribuite a distanze dipendenti principalmente dall'intensità di traffico ovvero dagli assorbimenti dei mezzi di trazione.

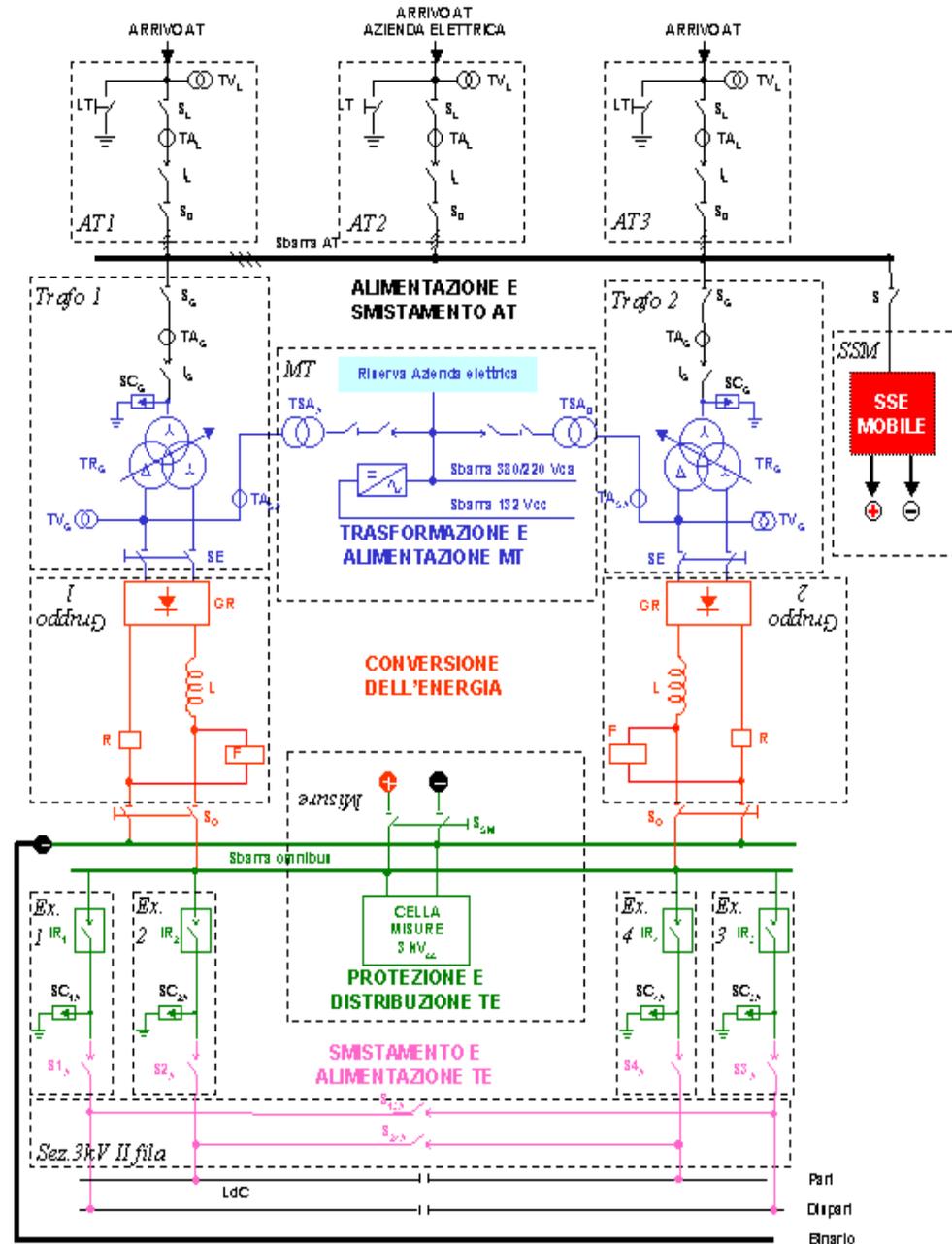
Nel sistema a 3 kV si è passati da una distanza L tra le SSE di 35÷45 km agli attuali 20÷30 km con diversi casi a 15÷20 km.

La funzione delle SSE è quella di abbassare e convertire l'alimentazione elettrica dalla linea primaria trifase AT/MT *alternata* a valori di tensione nell'ordine dei 3 kV in *continua*.

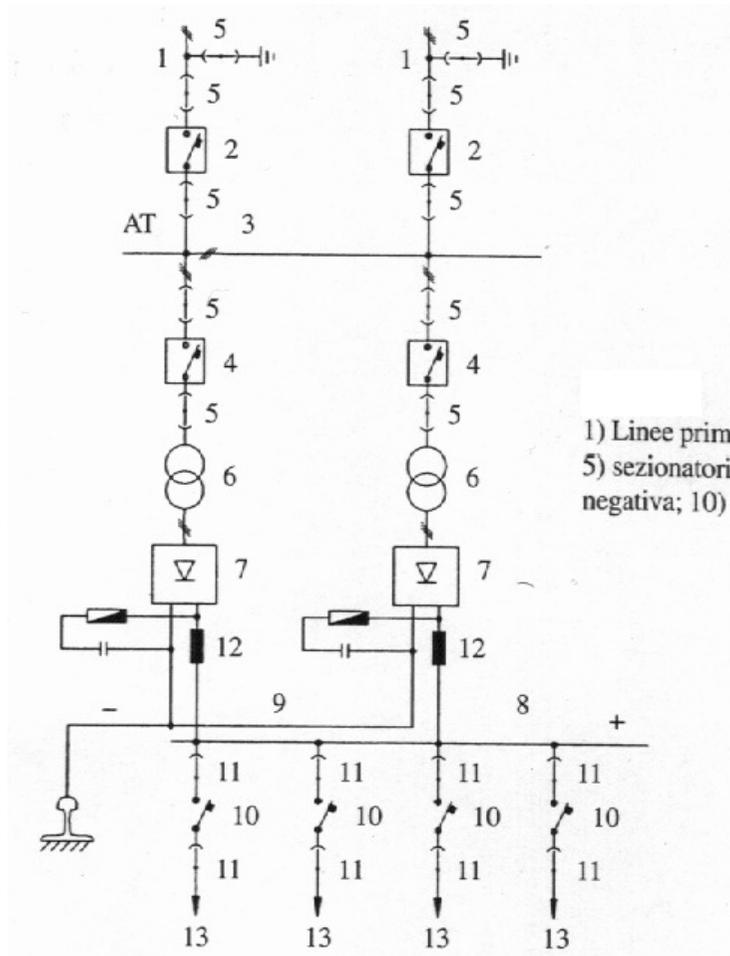
I gruppi di conversione delle sottostazioni hanno subito nel corso dei decenni notevoli progressi per quanto riguarda prestazioni, rendimento, manutenzione ed affidabilità.

Si è passati dai *gruppi statici di conversione con raddrizzatori a vapori di mercurio* agli attuali *raddrizzatori al silicio* (tecnologia, quest'ultima, introdotta negli anni sessanta).

Vedere schema elettrico della SSE



Sottostazioni elettriche (SSE)



Schema di principio di una sottostazione di conversione con raddrizzatori al silicio.

- 1) Linee primarie trifasi AT; 2) interruttori tripolari di linea; 3) sbarre trifasi AT; 4) interruttori tripolari di gruppo; 5) sezionatori tripolari; 6) trasformatori trifasi; 7) raddrizzatori al silicio; 8) sbarra a c.c. positiva; 9) sbarra a c.c. negativa; 10) interruttori extrarapidi; 11) sezionatori c.c.; 12) filtri; 13) alimentazione linea di contatto.

Sottostazioni elettriche (SSE)

La sottostazione comprende:

- le linee *primarie* trifasi AT in arrivo
- le *sbarre trifasi* AT
- i *gruppi di conversione*, protetti singolarmente da *interruttori* tripolari AT di gruppo
- le *sbarre a corrente continua* delle quali quella negativa è collegata alla rotaia
- gli *alimentatori* positivi che collegano la sbarra positiva alla linea di contatto protetti da *interruttori extrarapidi* che intervengono in caso di corto circuiti in linea

I gruppi di conversione sono costituiti a loro volta da:

- un *trasformatore* trifase, che ha il compito di abbassare la tensione in relazione al valore della tensione continua U_d
- un *raddrizzatore* costituito da diodi al silicio collegati a ponte trifase e montati in armadi

Sottostazioni elettriche (SSE)

La sottostazione è formata da una **sezione ad alta tensione** comprendente:

- le linee primarie
- le sbarre trifasi AT
- gli interruttori ed i sezionatori tripolari dei gruppi di conversione
- i trasformatori

e da una **sezione a corrente continua** formata da:

- raddrizzatori
- interruttori extrarapidi
- sezionatori a corrente continua.

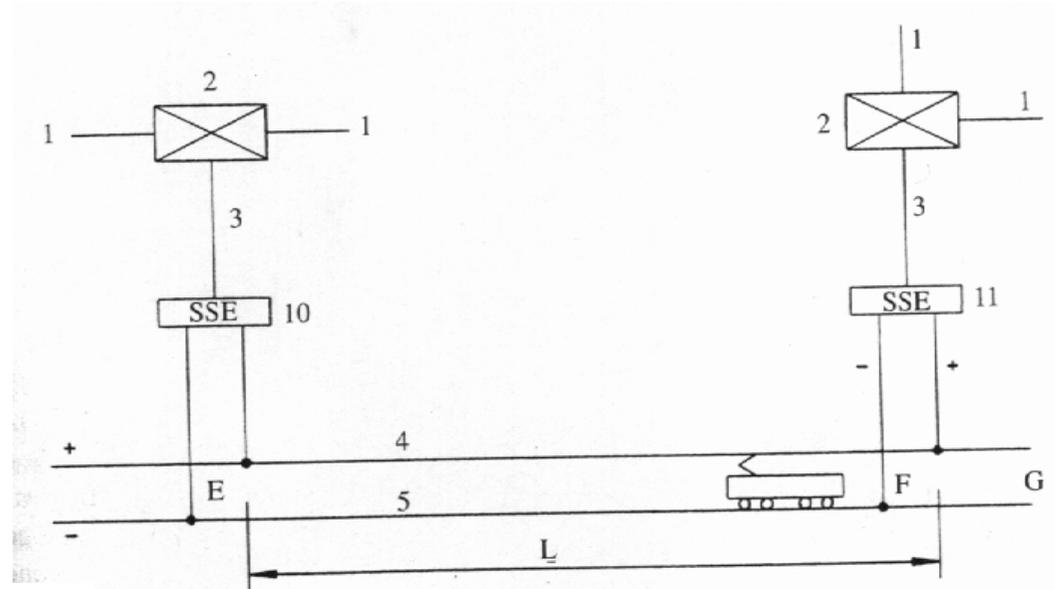
La sezione AT è normalmente installata all'aperto e può essere piuttosto estesa quando la SSE adempie le funzioni di smistamento fra due o più primarie provenienti da varie direzioni o anche di trasformazione, se le primarie sono a tensioni diverse.

La sezione a corrente continua è di solito installata in un edificio, insieme ai quadri di controllo e comando, fatta eccezione per i sezionatori delle linee a c.c. uscenti.



Alimentazione delle sottostazioni

Il collegamento delle SSE alla rete industriale trifase AT viene attuato secondo una molteplicità di schemi dipendenti dalle esigenze del servizio e dalle condizioni locali.

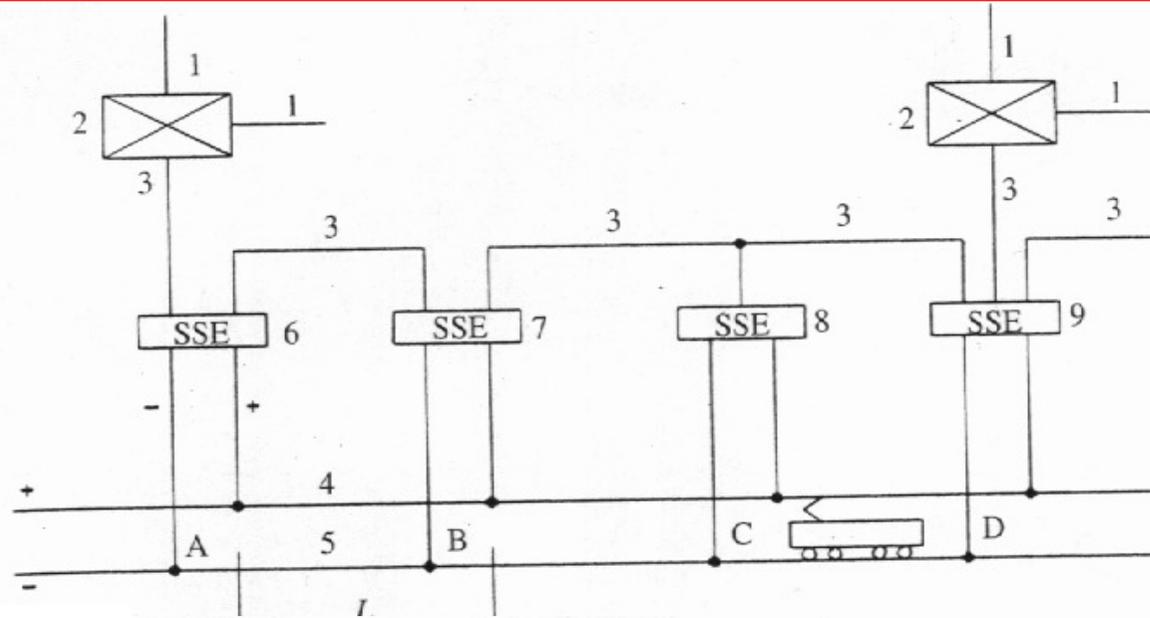


Schema di alimentazione di linee ferroviarie a corrente continua.

1) Linee trifasi ad alta tensione della rete industriale; 2) stazioni della rete trifase industriale AT; 3) linee primarie di trazione ad alta tensione; 4) linea aerea di contatto; 5) binario; SSE) sottostazioni di conversione (da 10 a 11) L) distanza fra sottostazioni successive.

Nella figura sopra rappresentata si ha l'*alimentazione diretta* della SSE dalla rete industriale, situata nelle vicinanze (SSE 10 ed 11).

Alimentazione delle sottostazioni



Schema di alimentazione di linee ferroviarie a corrente continua.

1) Linee trifasi ad alta tensione della rete industriale; 2) stazioni della rete trifase industriale AT; 3) linee primarie di trazione ad alta tensione; 4) linea aerea di contatto; 5) binario; SSE) sottostazioni di conversione (da 6 a 9) L) distanza fra sottostazioni successive.

Nella figura sopra rappresentata si ha l'alimentazione di un gruppo di SSE (SSE 6, 7, 8 e 9) mediante apposite **linee primarie** AT disposte nelle vicinanze del tracciato ferroviario e connesse, in uno o più punti, a stazioni della rete industriale (SSE 6 e 9).

Infine si può avere un'alimentazione mista, da stazioni della rete industriale e da primarie provenienti da altre SSE (da SSE 6 a 9).

Alimentazione delle sottostazioni – in derivazione

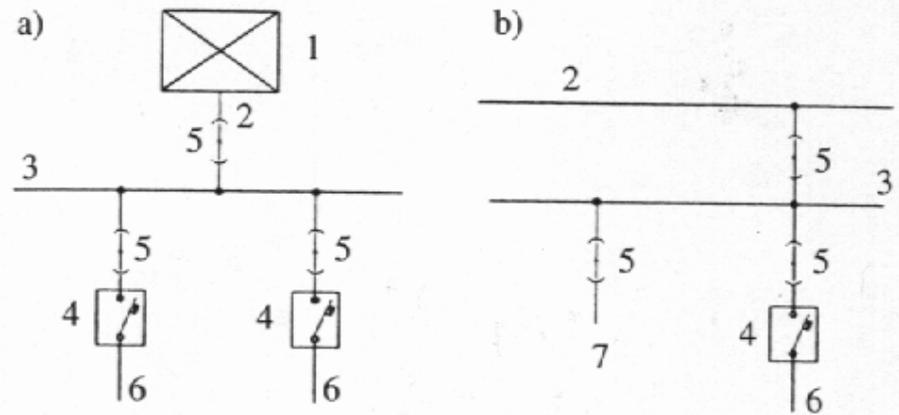


Fig. 10-2 Schemi di collegamento «in derivazione».

a) Dalla rete industriale; b) da una primaria ferroviaria;

1) Stazione della rete industriale; 2) linee primarie trifasi AT; 3) sbarra trifase AT della SSE; 4) interruttori tripolari AT di gruppo; 5) sezionatori tripolari; 6) alimentazione gruppi di conversione; 7) postazione per sottostazione ambulante.

Nell'esempio in fig. 10-2a si ha un esempio di alimentazione in derivazione rispetto alla stazione della rete AT realizzata collegando quest'ultima alla SSE con una breve linea primaria di pertinenza dell'impianto di trazione.

Nell'esempio in fig. 10-2b il collegamento in derivazione fa capo direttamente alla linea primaria passante attraverso l'inserzione di semplici sezionatori tra la linea primaria stessa ed il sistema di sbarre trifasi della SSE.

Alimentazione delle sottostazioni – in serie

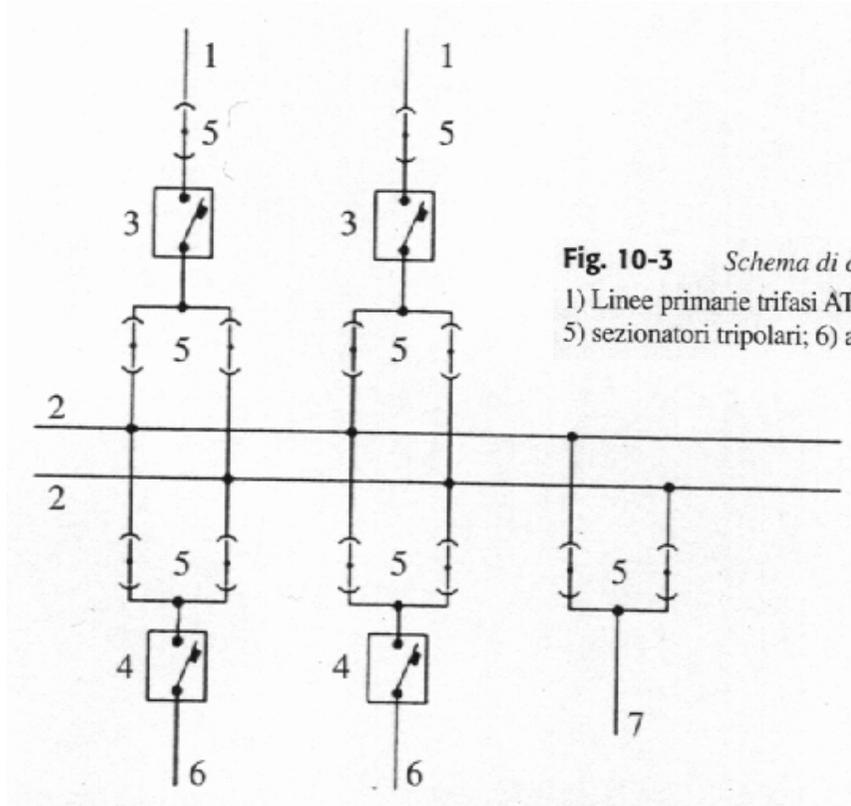


Fig. 10-3 Schema di collegamento «in serie» di una sottostazione, con doppio sistema di sbarre AT.
1) Linee primarie trifasi AT; 2) sbarre trifasi AT; 3) interruttori tripolari di linea; 4) interruttori tripolari di gruppo; 5) sezionatori tripolari; 6) alimentazione gruppi di conversione; 7) postazione per sottostazione ambulante.

Nell'esempio in fig. 10-3 si ha un esempio di una SSE in serie.

In questo caso la primaria è interrotta ed attraverso interruttori tripolari di linea fa capo alle sbarre AT della SSE (la primaria “entra ed esce” rispetto alla SSE).

Tensioni di alimentazione e distribuzione dei gruppi

Valori di tensione primaria

150-132-66-45-28-23 kV c.a.

Tensione secondaria

3 kV c.c.

Consistenza

<i>POTENZA GRUPPI</i> <i>(MW)</i>	<i>NUMERO SSE</i>	<i>NUMERO GRUPPI</i>	<i>POTENZA TOTALE</i> <i>(MW)</i>
<i>2,0</i>	<i>34</i>	<i>67</i>	<i>134</i>
<i>3,6</i>	<i>208</i>	<i>343</i>	<i>1235</i>
<i>5,4</i>	<i>109</i>	<i>208</i>	<i>1123</i>
<i>TOTALI</i>	<i>351</i>	<i>618</i>	<i>2492</i>



Continuità d'esercizio – ridondanze - SSA

Caratteristica fondamentale del sistema di alimentazione elettrica della trazione ferroviaria è la continuità d'esercizio.

Per ridurre al minimo la probabilità che eventuali guasti e malfunzionamenti possano avere ricadute sensibili sulla continuità nell'erogazione dell'alimentazione elettrica a servizio della trazione, dei sistemi di sicurezza e segnalamento e della luce e forma motrice si ricorre alla cosiddetta *ridondanza*.

In pratica si tende a garantire una doppia alimentazione (quando ciò è possibile) per la SSE ad esempio collegando due primarie a stazioni della rete industriale tra loro indipendenti; all'interno della SSE si procede alla installazione di un doppio (o anche triplo) sistema di sbarre AT; lungo le dorsali ferroviarie più importanti, si adotta il sistema della doppia linea primaria costituita da due terne posate sulla stessa palificazione o anche su pali separati (fig. 10-4).

Infine si predispongono all'interno delle SSE postazioni dedicate alle cosiddette Sottostazioni Elettriche Ambulanti ovvero sistemi di apparecchiature elettriche necessarie alla conversione ed al raddrizzamento della corrente montati su supporti semoventi quali i carri ferroviari.

Continuità d'esercizio – ridondanze - SSA

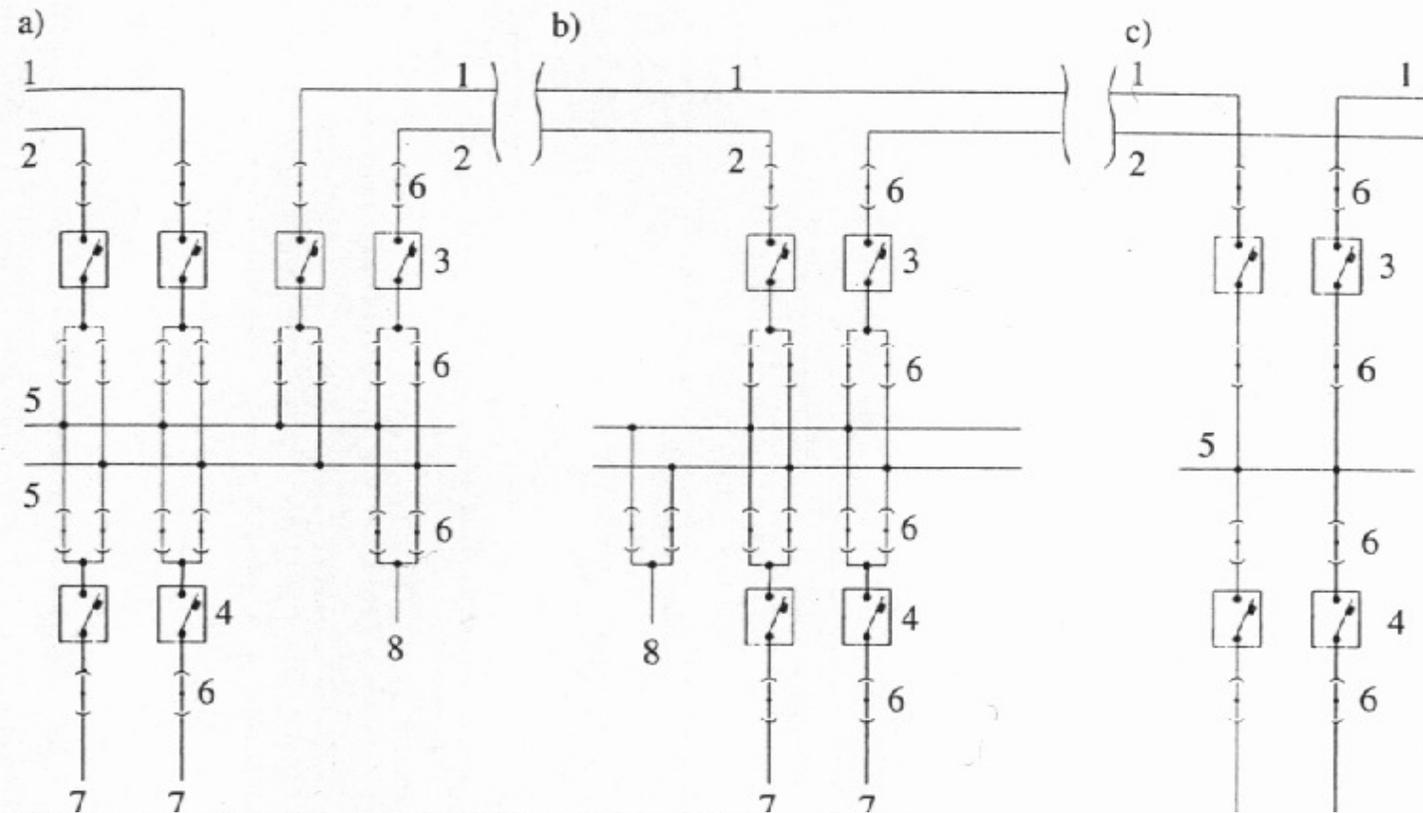


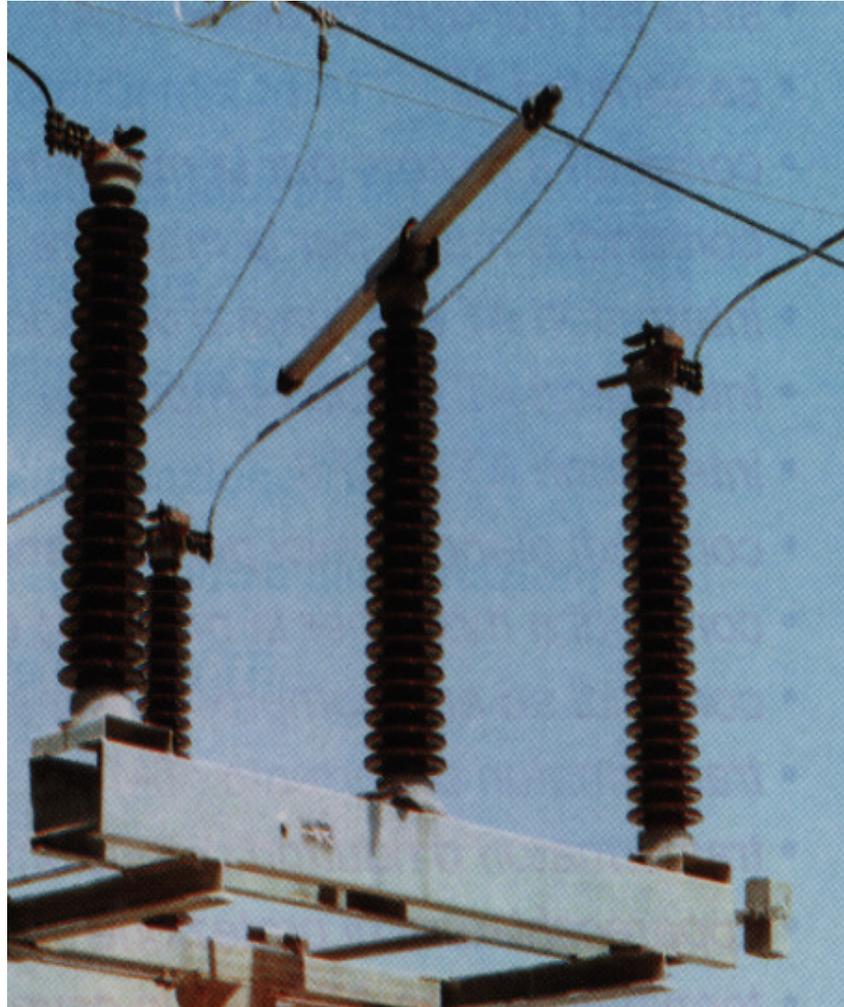
Fig. 10-4 Inserzioni di sottostazioni di conversione su una primaria doppia.

- a) Sottostazione con doppio sistema di sbarre AT, in serie rispetto alle due primarie; b) idem, ma in serie sulla sola primaria pari; c) sottostazione con semplice sistema di sbarre AT, in serie sulla primaria dispari.
 1) Linea primaria dispari; 2) linea primaria pari; 3) interruttori tripolari di linea; 4) interruttori tripolari di gruppo; 5) sbarre AT; 6) sezionatori tripolari; 7) alimentazione gruppi di conversione; 8) postazione per sottostazione ambulante.

Linee primarie AT



Sezionatore Alta Tensione



Interruttore Alta Tensione



Trasformatore di gruppo



Trasformatore di gruppo

Oggi sono in uso gruppi da 2,0 – 3,6 – 5,4 MW nelle sottostazioni di RFI.

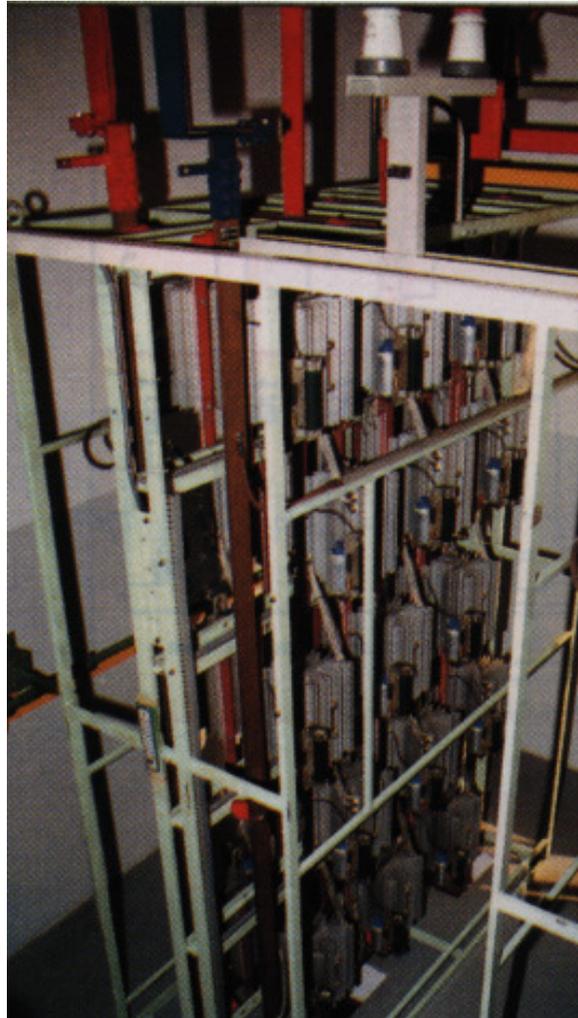
Si tratta di trasformatori con regolazione automatica, sotto carico, della tensione di alimentazione dei raddrizzatori al silicio cosa che consente di avere una tensione costante all'uscita delle sottostazioni malgrado il variare della tensione primaria ed il variare dei carichi assorbiti dalle linee di contatto.

A tale scopo i trasformatori sono dotati di un commutatore capace di variarne il rapporto agendo sul numero di spire primarie. Questo commutatore, che può agire sotto carico, è pilotato automaticamente in funzione della tensione secondaria ed è così capace di garantire una tensione in uscita dal raddrizzatore non maggiore di 3700 V e non inferiore a 3500 V pur variando la erogazione del gruppo tra 75 A e 3000 A e pur variando la tensione primaria:

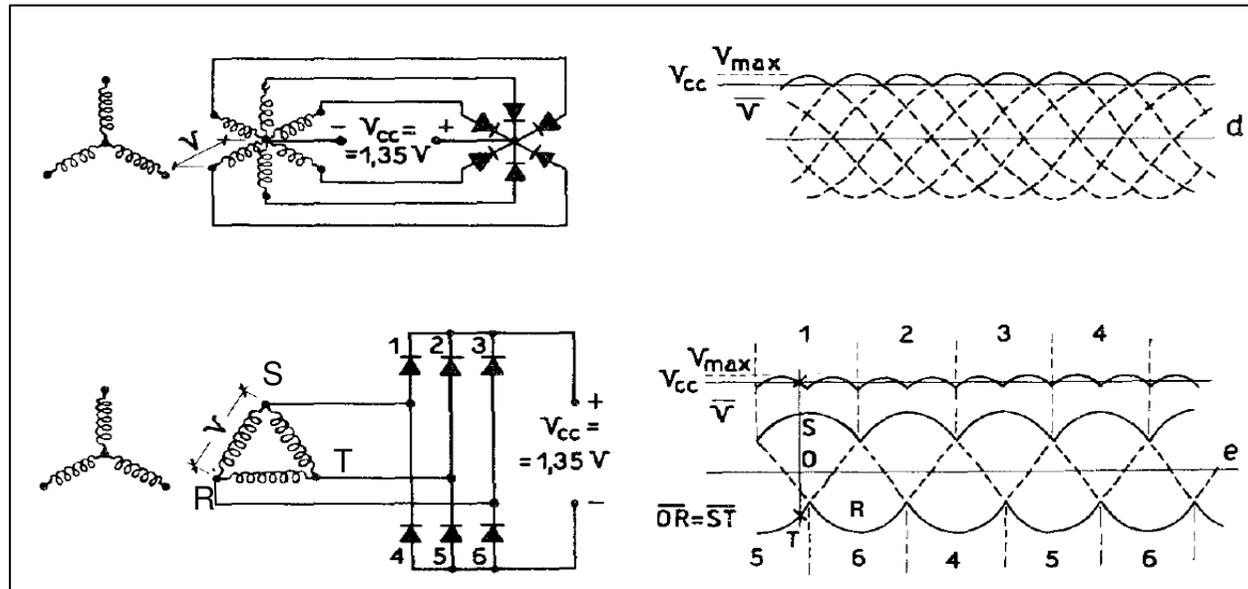
- tra 140 kV e 160 kV se di 150 kV nominali;
- tra 115 kV e 135 kV se di 132 kV nominali;
- tra 57 kV e 69 kV se di 66 kV nominali.



Armadio Raddrizzatore



Armadio Raddrizzatore: principi di funzionamento



Da quanto rappresentato nella figura si può notare che il valore della **tensione raddrizzata** è dato dal valore medio della differenza di potenziale tra l'anodo a più alta tensione positiva ed il catodo a più bassa tensione negativa → al crescere del numero delle fasi raddrizzate, la tensione della corrente continua diventa sempre più elevata.

Detto a il numero delle fasi, il rapporto tra le due tensioni è quello che corrisponde alla formula:

$$V_{cc} = \sqrt{2} V_{eff} \frac{a}{\pi} \sin \frac{\pi}{a} \quad \text{nel nostro caso: } V_{cc} = 1,35 V_{eff}$$

Armadio Raddrizzatore: principi di funzionamento

I raddrizzatori in uso nell'ambito delle SSE di RFI sono costituiti da diodi di potenza in serie ed in parallelo raggruppati e montati in armadi in ferro raffreddati ad aria forzata da motoventole.

Normalmente si tratta di **sei armadi** in quanto il raddrizzatore è costruito secondo lo schema a Ponte di Graetz a sei rami.

Ogni ramo, per condurre la corrente corrispondente alla piena potenza e per avere la necessaria capacità di affrontare corto-circuiti, è costituito da più **filari** lavoranti in parallelo mentre ogni filare, in funzione della tensione di esercizio e delle sovratensioni che deve poter sopportare, è costituito da diodi lavoranti in serie. Ognuno di questi diodi costituisce uno stadio.

In particolare, il numero di diodi da disporre in serie dipende:

- dalla tensione V_r del tipo di diodo impiegato;
 - dalla massima sovratensione a cui si ipotizza possa essere assoggettato in esercizio il raddrizzatore, malgrado le protezioni adottate;
 - dal massimo squilibrio di distribuzione della sovratensione che possa riscontrarsi in esercizio tra i diversi diodi in serie, malgrado i dispositivi di equipartizione adottati;
 - dal massimo numero di diodi guasti che si vuol ammettere prima di porre fuori servizio il raddrizzatore (**continuità dell'esercizio**).
-

Armadio Raddrizzatore: principi di funzionamento

Collegamento dei diodi in serie (per filare)

Normalmente la massima sovratensione ammessa, malgrado le protezioni, è nell'ordine dei 10 kV, il massimo squilibrio nella ripartizione di detta sovratensione è considerato pari a 0,85 ed il numero di diodi, per filare, di cui si vuol tollerare il guasto è pari a 1.

Ne consegue che il numero s di diodi per ogni filare è determinato dalla formula (con V_r tensione nominale del diodo da impiegare):

$$\frac{10.000}{0,85(s-1)} \leq V_r$$

Armadio Raddrizzatore: principi di funzionamento

Collegamento dei diodi in parallelo (filari per ramo)

Nel caso dei diodi, un corto circuito interno, anche persistendo solo per qualche centinaio di millesimi di secondo (tipico tempo di intervento degli interruttori di protezione), può provocare danneggiamenti, dovuti al surriscaldamento, tali da porre fuori uso l'intero raddrizzatore.

Per tale motivo, il dimensionamento agli effetti dei diodi da far lavorare in parallelo viene fatto in funzione:

- della corrente di corto circuito prevedibile (I);
- della corrente massima (i) che il tipo di diodo impiegato può sopportare per il tempo di intervento dell'interruttore di protezione previsto (normalmente è la corrente di picco sopportabile da ciascun diodo per almeno 200 millisecondi, in funzionamento a 50 Hz e partendo da una temperatura di 100°C sul diodo stesso);
- di un fattore k che tenga conto della possibile disuniformità della ripartizione della corrente tra i diversi filari in parallelo.

Il numero p di filari in parallelo viene determinato con la formula:

$$p = \frac{I}{ki}$$

si assume $I = 30$ kA (per gruppi da 5,4 MW) e $k = 1 - 0,9 - 0,8$
da cui, normalmente, $p = 2$ o $p = 4$

Armadio Raddrizzatore: principi di funzionamento

Può essere interessante sottolineare come il progresso nella tecnologia di costruzione dei diodi abbia fatto sì che mentre nel 1963 si costruivano raddrizzatori (gruppo a 3,6 MW e 3 kV) richiedenti 720 diodi, oggi per la stessa potenza e tensione ne sono sufficienti 72: due filari di 6 stadi ciascuno per ciascun ramo.



Filtro di assorbimento delle armoniche



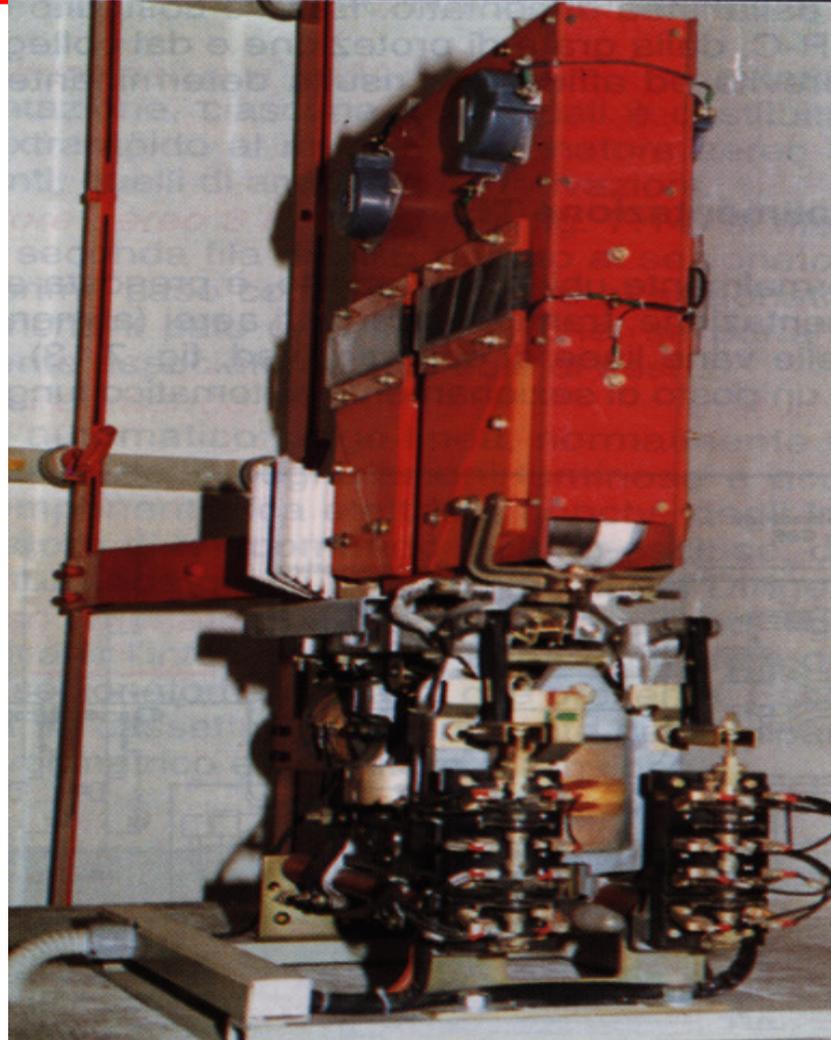
A valle del raddrizzatore circola una corrente che è data dalla somma di una notevole componente continua e di una componente alternata costituita da armoniche della frequenza fondamentale di alimentazione del raddrizzatore.

A valle dei raddrizzatori esafasi le armoniche hanno frequenza pari a 6, 12, 18, 24, ... volte la frequenza fondamentale (50 Hz) quindi valori uguali a 300, 600, 900, 1200, ... Hz.

Se consideriamo le prime quattro armoniche possiamo constatare che esse hanno un valore efficace pari a 4% – 1% – 0,4% - 0,25% della tensione raddrizzata, quando il raddrizzatore funziona a vuoto, ed al 6% - 3% - 2% - 1,5% della tensione stessa nel funzionamento sotto carico.

Per eliminare le corrispondenti correnti nella linea di contatto si dispone, all'uscita delle sottostazioni, un filtro passa-basso costituito da un grosso reattore (induttanza 6-13 mH) montato in serie alla sbarra positiva a valle del raddrizzatore e da una batteria di condensatori in parallelo tra la sbarra positiva e la sbarra negativa a valle del reattore stesso. La capacità della batteria dei condensatori viene suddivisa in tre sezioni ciascuna comprendente 4 condensatori da 30 μF ciascuno.

Interruttore Extrarapido



Interruttore Extrarapido: principi di funzionamento

Lo scopo degli interruttori extrarapidi è quello di proteggere la linea di contatto dalle sovracorrenti prodotte da corto circuiti sulle linee stesse o a bordo dei mezzi di trazione che su di esse circolano.

Le caratteristiche costruttive di tali interruttori devono garantire:

- l'immediato intervento dell'interruttore all'atto del raggiungimento del valore di taratura della corrente;
- la velocità di allontanamento dei contatti mobili dai contatti fissi;
- l'allontanamento ed il frazionamento, fino alla sua interruzione, dell'arco che inevitabilmente si adessa, all'atto dell'apertura, tra i contatti dell'interruttore.

Le tensioni a cui possono essere sottoposti tali interruttori sono al massimo di 6.000 V.

Il controllo della corrente di esercizio, con il conseguente scatto in apertura al raggiungimento della corrente di guasto (valore di taratura), viene ottenuto facendo attraversare dalla corrente stessa una bobina (**di apertura**) il cui flusso va ad opporsi al flusso costante di un'altra bobina (**di ritenuta**) alimentata dai servizi ausiliari della sottostazione.



Interruttore Extrarapido: principi di funzionamento

Questi interruttori affrontano frequenti interventi spesso per semplici sovraccarichi istantanei dovuti a:

- contemporaneo avviamento di più treni sulla stessa tratta;
- corto circuito di breve durata per ché si autoeliminano o vengo eliminati, se a bordo dei mezzi di trazione, per l'intervento del personale di condotta (ad esempio abbassando i pantografi).

In relazione a ciò gli interruttori vengono dotati di un **dispositivo di prova linea** che ne consente l'immediata richiusura se la linea viene riscontrata isolata. Si tratta di dispositivi che, comandati a mano o automaticamente, alimentano la linea attraverso un'adatta resistenza il che consente, direttamente con la lettura degli apparecchi di misura o automaticamente a mezzo di relé voltmetrici, di giudicare se la linea può o meno essere alimentata.

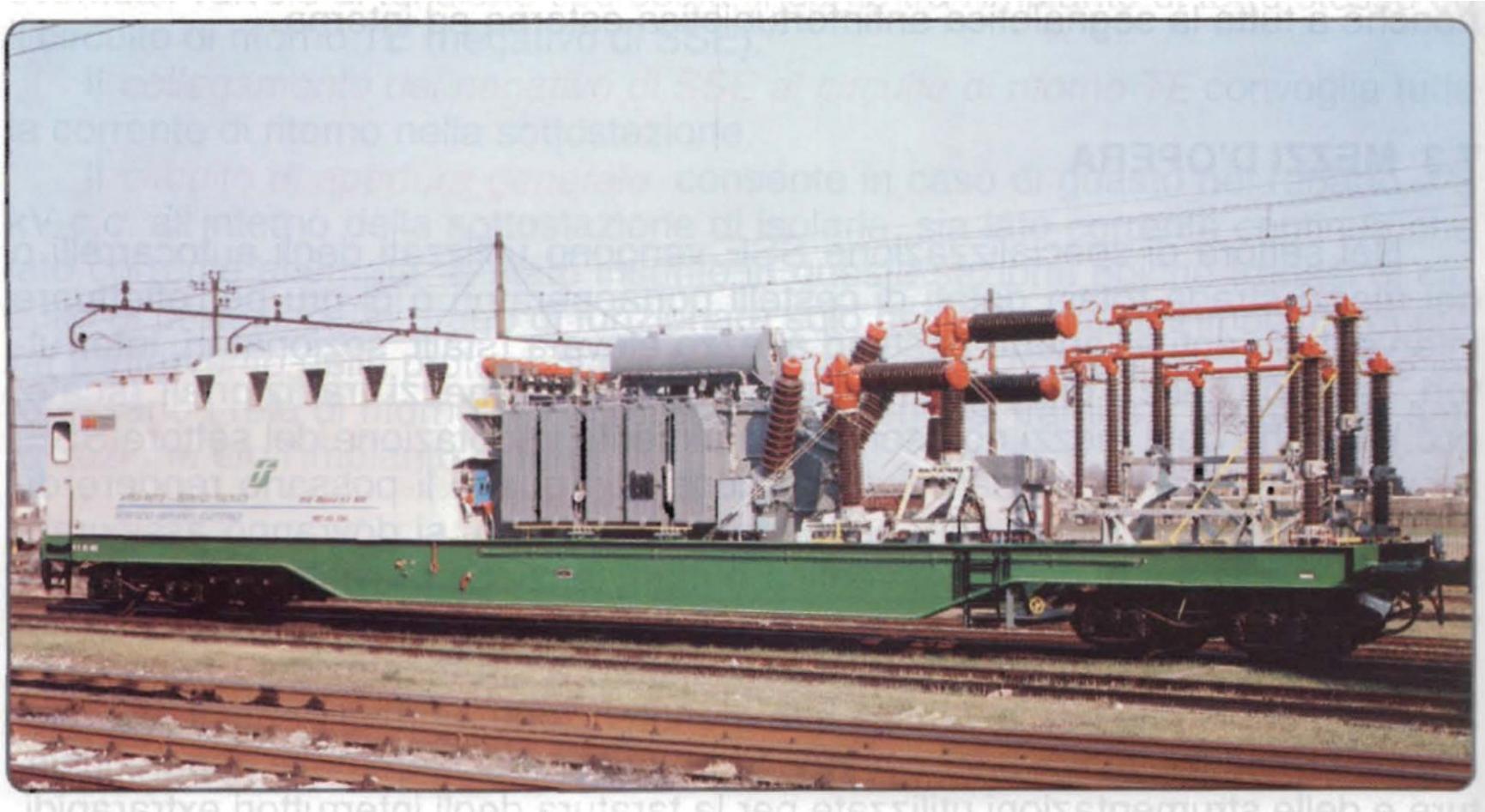
La frequenza relativamente alta degli interventi e l'opportunità di ridurre i tempi di disalimentazione fanno sì che per gli interruttori extra rapidi sia previsto il funzionamento come **autorichidenti** e cioè con richiusura automatica, previa prova automatica dell'isolamento della linea dopo ogni scatto.

Normalmente sono ammesse tre richiusure automatiche dopo di che, all'eventuale successivo scatto, il dispositivo automatico resta bloccato lasciando l'interruttore aperto fino all'intervento manuale da parte dell'operaio.

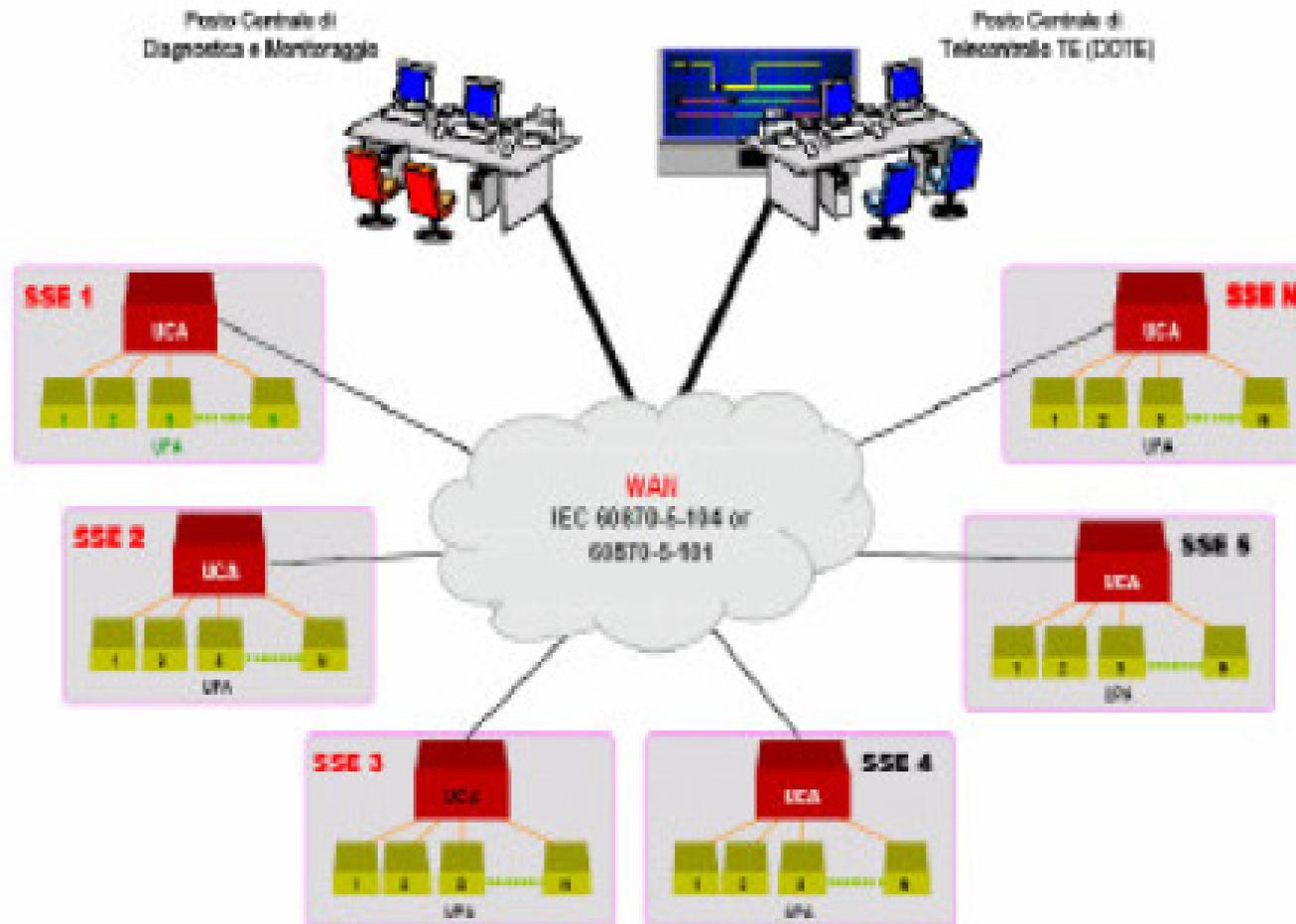
Sezionatori aerei 3 kV c.c.



Sottostazione ambulante (SSA da 5,4 MW)



Telecontrollo e diagnostica SSE - DOTE



Architettura generale del sistema per il telecontrollo (DOTE) e la diagnostica delle SSE