



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA ELETTRONICA

*ELABORATO FINALE*

**ALIMENTAZIONE IN CORRENTE ALTERNATA MONOFASE A  
FREQUENZA  $16 \frac{2}{3}$  Hz PER LA TRAZIONE ELETTRICA**

*RELATORE: Prof. ROBERTO TURRI*

*LAUREANDO: CARLO SIMONETTO*

*ANNO ACCADEMICO  
2010 / 2011*

## **SOMMARIO**

*In questo elaborato si analizza nel dettaglio il sistema di alimentazione in corrente alternata monofase a frequenza  $16 \frac{2}{3}$  Hz per la trazione elettrica, valutandone gli aspetti storici, la situazione attuale e i possibili sviluppi futuri, anche comparandolo ai sistemi di alimentazione concorrenti.*

*Si da inoltre ampio spazio al caso particolare rappresentato dal principale operatore del sistema suddetto, cioè le ferrovie tedesche (DB AG).*

## INDICE DEGLI ARGOMENTI

### CAPITOLO 1 :

#### STORIA DELLA TRAZIONE ELETTRICA IN CORRENTE ALTERNATA MONOFASE

**1.1** *Il periodo antecedente alla prima guerra mondiale - 4*

**1.2** *Il periodo tra le due guerre mondiali - 7*

**1.3** *Dal secondo dopoguerra ai giorni nostri - 8*

**1.4** *L'avvento dell'elettronica di potenza (e del motore asincrono trifase) in mezzi circolanti su reti a frequenza ferroviaria - 9*

**1.5** *L'ascesa di mezzi e sistemi per l'alta velocità - 11*

**1.6** *La situazione attuale - 13*

### CAPITOLO 2:

#### TECNICHE E TECNOLOGIE DELLA TRAZIONE ELETTRICA

**2.1** *Funzioni basilari della trazione elettrica - 14*

**2.2** *Tipologie di sistemi di alimentazioni per la trazione elettrica - 15*

**2.3** *Il perché (storico) della scelta della frequenza ridotta rispetto a quella industriale nei sistemi a corrente alternata monofase - 17*

**2.4** *Confronto attuale tra i due sistemi in corrente alternata monofase - 18*

**2.5** *Struttura di una rete di alimentazione per la trazione elettrica*

**2.5.1** *La generazione della potenza - 22*

**2.5.2** *La distribuzione della potenza - 24*

### CAPITOLO 3:

#### NELLO SPECIFICO DEL SISTEMA IN CORRENTE ALTERNATA MONOFASE A 16 2/3 HZ PER LA TRAZIONE ELETTRICA

**3.1** *La generazione di potenza - 26*

**3.2** *Tipologie di reti di alimentazione di sistemi per la trazione - 27*

### *3.3 Tipologie di convertitori*

#### *3.3.1 I convertitori rotanti - 30*

#### *3.3.2 I convertitori statici - 33*

### *3.4 I diversi tipi di linee aeree di contatto - 37*

## **CAPITOLO 4:**

### **STRUTTURA DELLA RETE DI ALIMENTAZIONE A FREQUENZA 16 2/3 Hz PER LA TRAZIONE FERROVIARIA DELLE FERROVIE FEDERALI TEDESCHE**

#### *4.1 La generazione di potenza - 43*

#### *4.2 Trasmissione dell'energia e alimentazione delle linee di contatto - 44*

#### *4.3 La tipica sottostazione*

##### *4.3.1 Funzioni e tipologie standardizzate - 46*

##### *4.3.2 Gli apparati AT all'aperto - 48*

##### *4.3.3 Gli apparati MT in interno - 51*

##### *4.3.4 L'alimentazione dei servizi ausiliari di sottostazione - 54*

##### *4.3.5 La protezione - 56*

##### *4.3.6 Lo SCADA - 59*

##### *4.3.7 Edifici principali e strutture di supporto - 62*

#### *4.4 Le linee di contatto e i relativi circuiti - 63*

#### *4.5 Sistemi di protezione delle linee di contatto*

##### *4.5.1 Generalità - 70*

##### *4.5.2 Le varie tipologie*

###### *4.5.2.1 La protezione dalle alte correnti - 72*

###### *4.5.2.2 La protezione distanziometrica a due stadi - 73*

###### *4.5.2.3 La distinzione tra le correnti di esercizio e le correnti di corto circuito - 75*

###### *4.5.2.4 La protezione da sovraccarico termico - 76*

**4.5.2.5** *La protezione di sostegno - 78*

**4.5.3** *La localizzazione del guasto - 79*

**4.6** *Conduttori di ritorno e sistemi di messa a terra*

**4.6.1** *Connessioni tra binari e tra rotaie - 80*

**4.6.2** *Circuiti di occupazione del binario, cammino di ritorno della corrente e messa a terra di trazione - 83*

**4.6.3** *Connessioni di terra delle strutture in cemento - 87*

**4.7** *Il controllo delle reti di potenza*

**4.7.1** *Generalità - 88*

**4.7.2** *Unità locali di controllo e linee per il controllo remoto - 90*

**4.7.3** *Tecnologia di controllo remoto dello SCADA - 91*

**4.7.4** *Nodi della rete di controllo remoto e centri ausiliari di controllo -92*

**4.7.5** *Centri principali di controllo - 93*

**4.7.6** *Centri di controllo delle reti di trasmissione e centro di controllo dell'intera rete di potenza -94*

**CAPITOLO 5:**

**L'USO DELLA FREQUENZA FERROVIARIA NELLE LINEE AD ALTA VELOCITÀ - 95**

**APPENDICE - 101**

**GLOSSARIO DEI TERMINI TECNICI E/O FERROVIARI - 139**

**BIBLIOGRAFIA - 144**

**RINGRAZIAMENTI - 145**

# 1 STORIA DELLA TRAZIONE ELETTRICA IN CORRENTE ALTERNATA MONOFASE

## 1.1 Il periodo antecedente alla prima guerra mondiale

Non appena i costruttori di equipaggiamenti per la trazione elettrica riuscirono nella produzione di sistemi affidabili e sufficientemente validi tali da poter rimpiazzare la trazione a vapore, la questione di una generale elettrificazione delle linee ferroviarie divenne imperante.

Si capì fin da subito che il sistema in corrente continua a bassa tensione, usato nell'alimentazione delle corte linee tranviarie cittadine, non era ugualmente indicato per l'alimentazione di lunghe linee ferroviarie extraurbane e con carichi pesanti.

Qualora l'alimentazione in corrente continua a bassa tensione fosse stata scelta si ponevano essenzialmente due tipi di problemi, dapprima la necessità di un gran numero di sottostazioni a bassa potenza unitaria e non ultimo il problema di elevate cadute di tensione ed elevate correnti circolanti al fine di fornire al sistema l'elevata potenza richiesta per far muovere un treno.

L'uso della corrente alternata, sia per la distribuzione che per la trazione, recava invece innegabili vantaggi, seppur non esente da problemi.

Infatti inizialmente problematiche tecniche ne impedirono o limitarono fortemente l'applicazione. Si giunse perciò ad un sistema misto, con l'uso della corrente alternata per la generazione distribuzione e della corrente continua per la trazione.

Le innovazioni che resero possibili il suddetto sistema misto furono i convertitori rotanti che resero possibile la conversione in sottostazioni distribuite da sistemi polifase ad alta tensione in corrente alternata, tipici della generazione e della distribuzione, a sistemi a bassa tensione in corrente continua, ideali per la trazione e l'uso della terza rotaia quale luogo di captazione della corrente (elevata) da parte del mezzo ferroviario, captazione che risultava meno problematica con la terza rotaia appunto.

Nonostante l'uso del sistema misto AC/DC fosse tecnicamente fattibile, non si dimostrò economicamente vantaggioso.

Con il sistema trifase delle industrie Ganz e Brown-Boveri poco indicato all'uso generale per la limitazione della tensione a valori di 3000/4000 V e quello dell'alimentazione in corrente continua ad alta tensione la da venire, lo sviluppo dell'alimentazione a corrente alternata monofase per l'elettrificazione di ferrovie su lunghe distanze ricevette una spinta decisiva.

Segnaliamo il motore asincrono monofase di B.J. Arnold e il motore a collettore in corrente alternata di Lamme.

Agli inizi del '900 l'alimentazione in corrente alternata monofase di motori a collettore divenne uno standard.

Negli USA si era soliti trovare un'alimentazione in corrente a 11 kV e 25 Hz con linea aerea.

Talora erano presenti sistemi a 6.6 kV AC e 650 V CC in terza rotaia (quest'ultimo specie nella penetrazione delle ferrovie nei grandi agglomerati urbani), ma il passaggio da un sistema elettrico ad un altro risultava comunque economicamente più vantaggioso che uno da trazione vapore a trazione elettrica.

In Europa il lancio del "nuovo" sistema di alimentazione avvenne a 15 kV e 16 2/3 Hz nel 1908 sulla costruenda linea del Loetschberg delle ferrovie federali svizzere nel tratto Spiez - Frutigen.

La linea del Loetschberg rappresenta una pietra miliare della trazione elettrica, in quanto prima linea espressamente costruita per essere esercita in trazione elettrica e durante la sua costruzione fu un importante terreno di test riguardanti la trazione elettrica.

La stessa inoltre affermò la trazione elettrica in corrente alternata monofase in Europa e i suoi parametri di alimentazione divennero poi lo standard (e lo sono tuttora con soli piccoli aggiustamenti) in Svizzera e in paesi come Austria, Germania, Svezia e Norvegia.

Al suo completamento avvenuto nel 1913 con l'apertura della galleria del Loetschberg vide il

transito di talune delle locomotive più potenti dell'epoca, come la CC delle industrie Oerlikon e la successiva Be 5/7 sempre di Oerlikon.

La CC, sviluppata a partire da test comparativi del 1910 tra due progetti per una macchina da 2000 CV, l'uno tedesco e l'altro svizzero (sempre di Oerlikon), montava nella cassa due grossi motori a collettore in corrente alternata collegati tramite bielle a due gruppi di 6 ruote.

La Be 5/7 (rodiggio 1E1) presentava 2 motori alloggiati nella cassa da 933 kW ciascuno ed era in grado di trainare dal peso di 330 tonnellate su un gradiente di 1/37 a 50 km orari.

Sempre le industrie Oerlikon, grazie ai contributi fondamentali dei suoi dipendenti Hans Behn-Eschenburg e Emil Huber-Stockar, furono le protagoniste nel biennio 1904-1905, quindi in data antecedente alla costruzione della linea del Loetschberg, di importanti esperimenti, autofinanziati, volti a dimostrare la superiorità della trazione in corrente alternata monofase su quella a vapore, sulla linea da Seebach a Wettingen in Svizzera.

Furono testate due locomotive, profondamente diverse nella tecnica.

La prima era alimentata a 15 kV 50 Hz (prima nel mondo a frequenza industriale) e attraverso due trasformatori di bordo 15000/700 V per un totale di 500 kVA veniva alimentato un motore asincrono accoppiato ad un generatore in corrente continua da 400 kW a 600 V.

Tale generatore a sua volta alimentava (con possibilità di variazione della tensione di alimentazione) due motori di trazione da 150 kW ciascuno montati uno per ciascun carrello a 4 ruote.

La trasmissione del moto avveniva tramite bielle.

Nonostante un buon funzionamento del motore, il peso della locomotiva ritenuto eccessivo a fronte della modesta potenza fornita, le perdite nella conversione (soprattutto a locomotiva ferma) affossarono tale progetto.

La seconda locomotiva presentava invece motori a collettore in corrente alternata sviluppati da Huber-Stockar e Behn-Eschenburg nel loro lavoro alla Oerlikon.

La tensione di alimentazione era 15 kV 15 Hz (la frequenza progenitrice dei 16 2/3), poi ridotta a bordo a 700 V.

I due motori, montati uno per carrello (rodiggio BB) con trasmissione del moto alle ruote tramite bielle, venivano alimentati a tensione variabile con gradini di 35 V, avevano una velocità nominale di rotazione di 650 giri/min (massima 1000 giri/min corrispondente a locomotiva marciante a 60 km/h) e sviluppavano nel complesso una potenza di 360 kW a fronte del peso della locomotiva di 42 tonnellate.

Una terza locomotiva sviluppata da Siemens, con rodiggio A1A-A1A, trasmissione del moto a ingranaggi, fu consegnata nel 1907.

Ciascun motore a collettore a corrente alternata a 15 Hz forniva 165 kW.

Tale locomotiva poteva essere allestita anche con un rodiggio C-C per una potenza totale di circa 1000 kW, facendo intravedere per un futuro vicino il traguardo dei 2000 kW.

Se la Svizzera, con le ferrovie federali, ebbe un ruolo predominante per l'affermazione in Europa della trazione in corrente alternata monofase a frequenza ridotta (rispetto a quella industriale) nel periodo pre-bellico, vari furono gli esperimenti e le prove anche in altri paesi e/o altre amministrazioni ferroviarie, sia che la scelsero come standard anche attuale (Germania e Austria) sia dove fu un'esperienza temporanea (Francia e Gran Bretagna).

In Germania furono eseguiti test comparativi per definire gli standard di tensione e frequenza con il risultato di orientarsi su un valore il più ridotto possibile (rispetto a quello industriale) di frequenza in quanto si adattava meglio al funzionamento con motori a collettore.

Definita tale scelta, il motore a collettore assunse una posizione dominante rispetto al motore a repulsione.

La frequenza ridotta al filo di contatto poté essere ottenuta in sottostazioni dotate di gruppi conversione rotanti e alimentate da centrali a frequenza superiore.

Lo standard a 25 Hz favorito da AEG che inizialmente era adottato nella maggior parte delle linee

elettrificate della Germania del tempo diventò sempre più marginale rispetto a quello a 15 Hz con l'elettrificazione di nuove linee nel periodo pre-bellico.

Segnaliamo in particolare l'elettrificazione nel 1909 dei 25 km della linea Dessau - Bitterfeld, linea che divenne un importante luogo di test.

Su tale linea furono testate ben 15 tipi di locomotive, per il servizio viaggiatori e per il servizio merci, tra le quali figura la locomotiva classe B52 numero 10502 dotata di motori a repulsione.

I test sulla Dessau - Bitterfeld contribuirono ulteriormente a imporre lo standard a 15 kV in corrente alternata monofase e l'uso di motori a collettore, sempre in alternata.

La linea montana della Slesia sempre in Germania, così come quelle delle ferrovie retiche in Svizzera ebbero il ruolo di dimostrare la bontà del sistema su terreni "difficili" dopo la prima esperienza del Loetschberg.

In Gran Bretagna l'affermazione del sistema fu frenata da motivi essenzialmente economici.

La London, Brighton & South Coast Railway che aveva puntato sullo schema a 6.6 kV 25 hz di fabbricazione AEG per l'elettrificazione delle proprie linee si trovò nelle condizioni di essere assorbita nella Southern Railway che invece aveva nell'alimentazione in corrente continua a bassa tensione il proprio cavallo di battaglia.

Le linee in alternata vennero convertite in continua e solo negli anni '50 si ritornò a parlare di corrente alternata per la trazione ferroviaria in Gran Bretagna.

In Francia le ferrovie del sud condussero una serie di esperimenti con alimentazione in corrente alternata monofase a 16 2/3 Hz e tensione di 12 kV con locomotive di diverse tipologie.

In questo caso tutto fu bloccato dagli eventi bellici al cui termine l'alimentazione in corrente continua a 1.5 kV prese il sopravvento.

## 1.2 Il periodo tra le due guerre mondiali

Per alimentare le prime linee di trazione elettrica che ricordiamo essere isolate tra di loro, le varie compagnie di trasporto ferroviario procedettero alla costruzione e al mantenimento di taluni impianti di produzione di energia elettrica.

Citiamo la centrale idroelettrica di Kochel (Walchensee dal 1924) in Germania per l'alimentazione delle linee della Baviera, l'impianto termoelettrico di Muldenstein, sempre in Germania, per l'alimentazione delle linee della Prussia Centrale e l'impianto idroelettrico di Porjus in Svezia per l'alimentazione della Kiruna Railway.

Si consideri il fatto che le prime ferrovie a trazione elettrica potevano considerarsi economicamente vantaggiose solo se alimentate da centrali idroelettriche.

Talune furono costruite dallo stato come scelta strategica per promuovere l'economia dell'area.

Su altre, come la linea del Loetschberg e del Sempione, la trazione elettrica non aveva alternativa, ma lì l'energia da idroelettrico era ampiamente disponibile.

Nonostante la trazione elettrica rappresentasse un successo ingegneristicamente parlando, si era ben distanti dall'affermare la stessa anche dal punto di vista economico anche in luoghi dove l'energia elettrica veniva prodotta usando il carbone.

Con la ripresa generalizzata dell'elettrificazione delle varie linee negli anni '20 del 20° secolo si pensò ad un cambio di strategia, da singoli impianti di produzione per alimentare singole linee a reti alimentanti diverse linee e alimentate da vari impianti di produzione, in analogia a quanto avveniva già per la rete civile nazionale a frequenza industriale.

E' del periodo la costruzione della linea 2x55 kV di trasmissione e distribuzione nella Germania meridionale.

Mentre nel 1942 avvenne a Saalfeld in Turingia la giunzione tra la rete della Baviera e quella della Germania centrale .

Per quanto riguarda invece la costruzione o la conversione di linee ferroviarie allo standard 15 kV 16 2/3 hz segnaliamo il caso della linea del Sempione tra Svizzera e Italia, linea di valico di 23 km attraverso il tunnel del Sempione terminata ed elettrificata in corrente alternata trifase a 3 kV 16 Hz e poi convertita in monofase, uniformandosi al resto dello rete svizzera, nel 1930.

### 1.3 Dal secondo dopoguerra ai giorni nostri (con particolare riferimento al caso tedesco)

Al termine della seconda guerra mondiale le ferrovie statali tedesche (DB) velocemente ripristinarono l'operatività elettrica in Baviera e nel Baden-Württemberg, così come ripresero l'elettrificazione di nuove linee.

Nei primi anni '50 furono investite da una scelta cruciale per il proseguo della trazione a 16 2/3 Hz. Parliamo dell'infuocato dibattito che sorse intorno all'elettrificazione del sistema di trasporto rapido dell'area della Ruhr per cui poteva prospettarsi un'alimentazione a frequenza industriale di cui i test sulla linea dell'Höllental avevano provato la fattibilità.

Sia per ragioni di continuità che di opportunità di un più facile controllo dei parametri delle proprie linee, le DB scelsero di mantenere il sistema di alimentazione a frequenza ferroviaria e anzi espansero ulteriormente le linee di trasmissione e interconnessione a 110 kV.

Molti anni dopo anche le nuove linee ad alta velocità avrebbero seguito tale schema.

Più complessa fu la situazione nella parte orientale della Germania, divenuta zona di occupazione sovietica nell'immediato dopoguerra e poi Repubblica Democratica Tedesca.

Conseguentemente al completo smantellamento degli apparati di trazione elettrica nel 1946, le locomotive e i vari componenti delle centrali elettriche e delle sottostazioni furono riaffidati alle DR, successori della ferrovie del Reich nella GDR solo nel 1956.

Nel tempo trascorso, l'amministrazione sovietica delle ferrovie aveva condotto dei test sulla linea del Workuta in Siberia.

Tuttavia gli esperimenti non condussero ad una espansione del sistema "tedesco" in Unione Sovietica (fu scelta l'alimentazione a 50 Hz).

Nella Germania centro-meridionale (Weimar – Leipzig – Dresda - Chemnitz) la vecchia dorsale centrale fu ristrutturata.

Mentre per l'elettrificazione negli anni '70 delle linee settentrionali per Berlino e da lì sul Baltico Le DR scelsero la conversione ripartita con convertitori rotanti sincro-sincro a frequenza fissa su una base strettamente economica, dato il loro basso costo iniziale.

Bisogna dire che non era una novità assoluta nel panorama della conversione, infatti già Norvegia e Svezia l'avevano scelta negli anni '30 per l'alimentazione di linee ferroviarie passanti in aree scarsamente popolate.

Seppur dal basso costo iniziale, tale tecnologia si rivelò non economicamente valida nel lungo periodo in quanto, per evitare correnti di circolazione, le sezioni di alimentazione dei treni non potevano essere longitudinalmente accoppiate, il che comportava, per rendere il più possibile affidabile il sistema, una grande quantità di convertitori posti a riserva e quindi un alto di convertitori nel suo complesso.

Conseguentemente alla riunificazione della Germania nel 1990 fu deciso l'abbandono della conversione ripartita, sebbene per gradi.

Inizialmente si procedette all'allacciamento dell'area berlinese alla dorsale centrale presso Wolfsburg e Dessau, poi fu il turno delle altre linee isolate a Bebra e Saalfeld.

La linea Prenzlau - Anklam passò allo schema con autotrasformatori nel 2000 cosicché da rimpiazzare in maniera costi-effettiva i vecchi convertitori ripartiti.

Sottolineiamo che per quanto riguarda il panorama mondiale, nel 1997 la trazione in corrente alternata monofase a 16 2/3 Hz era presente su circa 33000 km di linee ferroviarie, pari al 18% dell'intera estensione delle ferrovie nel mondo di 182000 km.

Un buon numero anche se minoritario rispetto a quello della trazione in corrente continua e in secondo luogo rispetto a quello della trazione in corrente alternata monofase a frequenza industriale.

## **1.4 L'avvento dell'elettronica di potenza (e del motore asincrono trifase) in mezzi circolanti su reti a frequenza ferroviaria**

Negli anni '60 il progresso dell'elettronica allo stato solido rese possibile combinare il controllo mediante inverter di motori trifasi con la rettificazione della corrente di linea alternata monofase, il tutto montato a bordo della locomotiva.

Successivamente ad una fase pionieristica portata avanti in particolare dalle industrie Brush in Inghilterra, la palla passò Brown-Boveri, nel cuore della regione (quella centro-nord europea) feudo dell'alimentazione in corrente alternata monofase a frequenza ferroviaria.

Lo sviluppo di un sistema per il controllo della velocità dei motori asincroni trifasi iniziò nel 1965 presso lo stabilimento Brown-Boveri di Mannheim in Germania.

Cinque anni di lavoro ebbero come risultato un sistema sufficientemente valido per test su locomotiva.

L'apparato fu montato sulla locomotiva diesel elettrica 202 002-2 recentemente costruita dalla Thyssen-Henschel.

La locomotiva, con tecnologia a tiristori, presentava un motore diesel alimentante un alternatore trifase la cui uscita veniva poi rettificata e successivamente riconvertita in alternata trifase per alimentare i motori.

Questa prima locomotiva fu usata in una prima intensiva serie di test.

Test ampiamente supportati (anche economicamente) non solo dall'amministrazione ferroviaria tedesca ma anche dalle imprese private del settore e dal mondo accademico, fattore di merito data la lunghezza dei test e del programma di sviluppo che non si prospettava certo breve.

La scelta di una locomotiva diesel-elettrica come primo prototipo non fu casuale.

All'epoca il possibile fenomeno di interferenza tra il convertitore di bordo e la linea di contatto, oltre agli apparati di segnalamento, era difficilmente controllabile.

Problema divenuto di minore entità nel 1974 (anche se non completamente risolto) quando modificando il primo prototipo si pervenne alla seconda versione della locomotiva.

Rimossi il motore diesel e l'alternatore e sostituiti con zavorra, la locomotiva veniva alimentata direttamente dalla linea aerea a 15 kV 16 2/3 Hz.

Dato l'elevato ingombro dell'insieme sistema di controllo dei motori - unità di soppressione delle interferenze, il primo (controllore a quattro quadranti) venne alloggiato in una carrozza appoggio assieme al trasformatore.

Anche il pantografo per la captazione della corrente dalla linea aerea era montato sulla carrozza appoggio.

La locomotiva di rodiggio Co-Co, dal peso di 80 tonnellate e potenza di 1550 kW venne testata con successo al traino di pesanti treni merci dando buoni risultati in particolare per quanto riguarda il controllore a quattro quadranti e i motori asincroni trifasi ben funzionanti in un ampio campo di velocità.

La stessa dimostrò anche la fattibilità della frenatura elettrica a recupero.

Il sistema Brown-Boveri si dimostrò anche efficace per quanto riguarda la soppressione delle interferenze con gli impianti fissi.

Unici nei del sistema la necessità di una manutenzione costante e le dimensioni, il peso e la complessità dello stesso visto nel suo insieme.

Dato il successo dei prototipi, si pensò all'applicazione delle nuove tecnologie a locomotive prodotte in serie.

Il risultato fu la nuova locomotiva E120 che iniziò i suoi servizi nel 1979.

Dal peso di 84 tonnellate, rodiggio Bo-Bo e potenza di 5600 kW, fu concepita per il traino di qualunque treno tra quelli effettuati dalle DB, in una parola come locomotiva universale.

Poteva quindi trainare ad esempio un treno merci di 2200 tonnellate a 80 km/h con una pendenza del 5% o un treno passeggeri di 550 tonnellate a 200 km/h con una pendenza del 2.5%, il tutto

sembra cambiare il rapporto di trasmissione.

Durante un test raggiunse i 230 km/h, nuovo record di velocità per una locomotiva con motori trifase.

Iniziali problemi di interferenza con gli impianti fissi furono risolti mediante tuning dei circuiti dell'apparato di controllo.

Sospinti dalla concorrenza di altre imprese costruttrici ferroviarie come la AEG, l'ABB-Henschel sviluppò anche l'evoluzione della E120, l'E121.

L'E121 era basata su due particolari locomotive della classe 120, la 120-004 (a tiristori) e la 120-005 (a GTO).

La 121 presentava circuiti con GTO e controllo a microprocessore e sviluppava 6400-7000 kW di potenza e una velocità di 230 km/h.

Riguardo l'uso di GTO anziché tiristori è importante sottolineare quanto essi abbiano contribuito alla riduzione dei componenti di un inverter per trazione e quindi ad aumentare l'affidabilità dello stesso.

Se nel 1970 l'inverter contava 96 tiristori e 48 diodi, lo stesso nel 1987 contava 6 GTO e diodi, una riduzione di componenti del 92%.

Comparando l'unità 004 a tiristori e la 005 a GTO, la seconda aveva il 17% dei semiconduttori, il 66% del peso dei sistemi elettronici, il 50% del volume degli stessi, l'apparato di controllo poteva trattare il 55% in più di potenza presentando il 40% in meno di perdite.

Se le locomotive della classe 120 potevano essere dichiarate un successo ingegneristicamente parlando, era il concetto di universalità che non convinceva del tutto le DB.

Ad un bando delle stesse per il rinnovo del parco motore negli anni '90, le varie case costruttrici risposero col concetto di modularità.

Cioè partendo da una base comune si giungeva ad una famiglia di locomotive semplicemente variando gli allestimenti che in ogni caso erano perfettamente intercambiabili.

Primo esempio di locomotiva costruita secondo il sistema modulare fu la 12X di AEG, di rodiggio Bo-Bo, peso 84 tonnellate, potenza continuativa di 6400 kW (massima di 7200 kW nel breve periodo) e velocità massima di 250 km/h.

Susseguenti alla AEG, anche SLM lanciò la sua Lok 2000, Krauss-Maffei / Siemens la locomotiva classe 127 "Europrinter" (da 6400 kW di potenza in configurazione Germania ma interoperabile, seppur a potenza lievemente ridotta), ABB la Eco 2000.

Le DB procedettero all'ordine di tutti i modelli tranne la Lok 2000 che invece fu scelta oltre dalle ferrovie federali svizzere anche da quelle norvegesi per i servizi di rango.

Facciamo notare che la modularità ha inoltre portato alla costruzione di locomotive per così dire "ibride", con componentistica anche della casa costruttrice concorrente e ciò è spesso sfociato in una effettiva collaborazione tra le stesse.

Se parliamo di utilizzo di sistemi elettrici equivalenti delle maggiori imprese di produzione di componentistica elettrica in combinazione con i componenti meccanici delle principali imprese di produzione del settore meccanico, possiamo citare i componenti ABB presenti anche nelle produzioni SLM, Krauss-Maffei, ecc.

Un'ulteriore conseguenza della costruzione modulare fu inoltre la sempre maggior presenza di mezzi interoperabili tra varie amministrazioni ferroviarie e vari sistemi di alimentazione.

## 1.5 L'ascesa di mezzi e sistemi per l'alta velocità

Verso gli anni '60 nel mondo si cominciò a parlare con insistenza di trasporto ferroviario ad alta velocità e le applicazioni non tardarono a giungere, seppur in forme diverse da paese a paese. In Francia e Giappone si puntò da subito su linee speciali isolate dalle linee tradizionali e percorse da elettrotreni rapidi.

Tale caratteristica divenne lo standard in tutti i maggiori network mondiali per il trasporto ad alta velocità, ma solo negli anni futuri.

Altre amministrazioni avevano puntato inizialmente su veicoli alquanto tradizionali (locomotiva trainante un numero variabile di carrozze) che percorrevano linee tradizionali ad una velocità più elevata grazie a particolari accorgimenti.

Rientrano in questa casistica le ferrovie federali di quella che allora era la Germania Ovest.

Sono del 1965 i primi quattro prototipi della locomotiva classe E03 (poi E103).

La locomotiva, sorta dalla collaborazione tra l'ufficio centrale di progettazione delle ferrovie federali, Siemens e Rheinstahl-Henschel, presentava rodiggio Co-Co e alimentazione a 15 kV 16 2/3 Hz.

Dotata di sei motori monofase a collettore, sospesi e trasmettenti il moto con giunti cardanici, forniva una potenza continuativa di 5950 kW, per un'ora di 6420 kW e per dieci minuti di 9000 kW.

Tale potenza consentiva alla locomotiva di raggiungere i 200 km/h, velocità toccata con regolarità durante i test sulla linea Monaco di Baviera - Ausburg, e di accelerare un treno di 8 carrozze da fermo alla velocità massima in soli 3 minuti.

Un'unità prototipo dotata di diverso rapporto di trasmissione poteva raggiungere i 250 km/h.

La locomotiva presentava inoltre la frenatura elettrica di tipo reostatico.

Se la progettazione era stata corale, lo era anche realizzazione.

Infatti le parti meccaniche provenivano da Henschel, Krauss-Maffei e Krupp, quelle elettriche da Siemens, AEG-Telefunken e Brown-Boveri.

Dal 1970 si passò alla costruzione delle unità di serie, unità che presentavano potenze ancora maggiori delle unità prototipo.

Rispettivamente 7440 kW per la potenza continuativa, 7780 kW per un'ora e 10400 kW per dieci minuti.

Valori molto elevati ma compatibili con l'alimentazione presente.

Se da un lato la locomotiva si dimostrava adeguata per l'esercizio a velocità sostenuta, problemi sorsero riguardo all'interazione tra la stessa e gli impianti fissi.

I problemi furono essenzialmente di due tipi.

Il primo era che un mezzo circolante a velocità elevata non si adattava più alla condotta tradizionale con segnalamento luminoso se non assistita.

Si procedette appunto alla realizzazione di un apparato di ripetizione a bordo delle indicazioni fornite dal sistema di segnalamento.

Lungo i binari veniva posto un cavo induttivo che trasmetteva le indicazioni date dal segnale alla locomotiva su cui era installato un computer che elaborava le stesse e calcolava la velocità ottimale che il treno avrebbe dovuto tenere per fermarsi in sicurezza al prossimo segnale impostato a via impedita.

La velocità così calcolata veniva trasmessa su un display in cabina di guida mentre il computer svolgeva anche la seconda funzione di controllore cioè, se la velocità effettiva del mezzo superava quella stabilita, attivava in maniera automatica la frenatura del treno.

Il secondo problema era il l'usura elevata del binario data dall'esercizio ferroviario a velocità sostenuta per mezzo di rotabili tradizionali (complesso locomotiva + carrozze).

Un problema che costrinse alla marcia a velocità sotto le effettive potenzialità dei mezzi per circa 10 anni, durante i quali un'attenta analisi dell'interazione locomotiva-binario, del complesso

carrello-ruota e dei sistemi di ammortizzazione e sospensione portò ad ottenere un'aggressività del treno nei confronti del binario notevolmente ridotta permettendo, anche con aggiornamenti del binario, la ripresa dei servizi a 200 km/h.

Come già accennato in precedenza la filosofia franco-nipponica riguardo ai trasporti ad alta velocità che prevedeva la costruzione e l'utilizzo di linee dedicate fu ben presto abbracciata anche da altre amministrazioni ferroviarie.

Negli anni '70 fu il turno delle ferrovie federali tedesche.

Esse concepirono un piano per l'ammodernamento del proprio network che si basava essenzialmente sull'aggiornamento delle linee esistenti e sulla costruzione di nuove linee dedicate, linee che avrebbero dovuto ospitare in futuro il treno ad alta velocità tedesco.

Il piano delle DB sfociò nei primi anni '80 nel piano federale per le infrastrutture di trasporto il quale autorizzava formalmente i lavori per l'innalzamento della velocità sulle linee storiche e la costruzione delle nuove linee dedicate, linee però concepite secondo il criterio dell'alta capacità piuttosto che pura alta velocità.

Alta capacità significava essere destinate sia al traffico veloce passeggeri col nuovo elettrotreno rapido tedesco ICE sia al traffico veloce merci, che però avrebbe viaggiato nelle ore notturne.

Le nuove linee vennero costruite con pendenza massima del 1.25%, raggio di curvatura medio di 7 km (minimo 5.1), furono dotate sia di apparati per la ripetizione a bordo dei segnali che del controllo radio della marcia dei treni e delle boe elettroniche di segnalamento.

L'alimentazione aerea a 15 kV 16 2/3 Hz secondo gli standard della nazione vide il debutto della corda Re250 appositamente sviluppata per i servizi ad alta velocità.

Il controllo radio fu pensato in congiunzione con la gestione centralizzata del traffico ferroviario che tramite le boe era in grado di seguire la marcia del treno in tempo reale.

Il programma tedesco, concepito come dal lungo calendario di ricerca, era strutturato per indagare le sei maggiori aree dell'ingegneria ferroviaria.

Le sei aree erano 1) interazione treno/binario;

2) tecnologia di bordo (freni, controlli, aerodinamica, ecc.);

3) progetto e costruzione degli impianti fissi;

4) sistemi di controllo e unificazione degli apparati di controllo e comunicazione;

5) alimentazione dei treni, compresa interazione pantografo/catenaria;

6) istanze ambientali come rumore, vibrazioni, inquinamento dell'aria ed

elettromagnetico nonché risposta umana al progetto ICE.

Il progetto prevedeva inoltre il ricorso a modelli matematici per l'analisi delle problematiche.

La validità dei modelli matematici venne poi testata su prototipi, dapprima in condizioni controllate, poi in aree di prova.

Fu così che nel 1982 si arrivò a parametri ben definiti per il nuovo treno ICE che doveva mostrare al mondo la competitività dell'industria ferroviaria tedesca oltre al più basilare compito di supportare adeguatamente la mobilità veloce in patria.

Il primo treno completo (unità di trazione e unità rimorchiate) venne consegnato nel settembre del 1986 e già nel novembre dello stesso anno stabilì il nuovo record di velocità su rotaia in Germania, 317 km/h.

L'unità di trazione dal peso di 78 tonnellate (di cui 7.5 non sospese) e lunghezza di 20.8 m, rodiggio Bo-Bo era concepita per una velocità massima di 350 km/h e una potenza continuativa di 3640 kW (massima 4200 kW).

Lo sviluppo del treno ICE era tuttavia solo all'inizio cosa che col tempo lo rese un temibile concorrente del TGV francese e dello Shinkansen giapponese.

## 1.6 La situazione attuale

Al 2002 DB Energie (sussidiaria di DB Netze di DB AG, l'equivalente della RFI italiana) gestiva 7650 km di linee di trasmissione a 110 kV connesse a stazioni di conversione e centrali di produzione di proprietà.

Le linee di trasmissione sono messe a terra in maniera risonante attraverso bobine Petersen nelle 15 sottostazioni distribuite lungo la rete.

Nel 2003 ha preso servizio nell'impianto di Borken/Hessia il primo convertitore per spostamento del punto neutro e per il controllo delle correnti di terra (dovute al detuning dei circuiti risonanti ad opera delle capacità del circuito, della bobina Petersen per la prima e delle armoniche di corrente prodotte da veicoli a controllo elettronico per le seconde).

Le linee di trasmissione tedesche a 16 2/3 Hz sono pure connesse ai network isofrequenziali dei paesi confinanti, a Zirl e Salisburgo per quanto riguarda l'Austria e a Etzwilen con la rete svizzera tramite trasformatore a prese multiple per il controllo dei flussi di potenza (sottolineiamo che la suddetta rete è a tensione diversa, 132 kV e francamente a terra).

All'anno 2000 il livello energetico delle reti pubbliche interconnesse a 50 Hz della Germania era di 575 TWh/a, ben 50 volte quello delle reti per trazione.

Però la totale potenza installata di tutti i veicoli di trazione era sette volte la totale potenza installata di generazione.

Gli ultimi generatori a frequenza ferroviaria dalla potenza di 110 MW per la copertura dei carichi di base nei nuovi stati entrati a far parte della federazione tedesca (cioè quelli appartenenti alla vecchia DDR) sono stati costruiti a Kirchmöser vicino a Berlino e Schkopau in Sassonia.

Già dagli anni '50 in poi, infatti, erano stati installati diversi convertitori rotanti alimentati dalla rete pubblica per il controllo dei picchi di potenza richiesta anche se gli stessi lavoravano a costi simili a quelli delle centrali specifiche per l'alimentazione ferroviaria.

Dal 1995 quindi si usano convertitori statici, più costo-effettivi.

Per quanto riguarda le linee aeree a 15 kV, esse coprono una distanza di 19100 km e l'85% del traffico ferroviario.

Esse sono alimentate dalle linee di trasmissione a 110 kV attraverso 178 sottostazioni dalla potenza nominale compresa tra 20 e 40 MW ciascuna distanti l'una dall'altra dai 20 ai 100 km.

Durante l'esercizio regolare le sezioni sono longitudinalmente e lateralmente accoppiate, cosa che innalza enormemente la qualità della tensione e permette un uso agevole dell'energia da frenatura a recupero dei veicoli.

Brevi tratti di proprietà delle ferrovie federali sono esercitati in corrente continua, ci si riferisce alle metropolitane di Amburgo e Berlino.

Inoltre una stazione di compensazione centralizzata delle correnti reattive del treno metropolitano classe 420 a controllo di fase è stata installata presso la stazione Pasing di Monaco di Baviera.

La compensazione è tuttora usata anche in altri stati, come ad esempio la Norvegia che usa la compensazione serie per migliorare la qualità della tensione nelle lunghe linee in aree scarsamente popolate.

## 2 TECNICHE E TECNOLOGIE DELLA TRAZIONE ELETTRICA

### 2.1 Funzioni basilari della trazione elettrica

La trazione elettrica si pone come primo principio il trasporto in maniera sicura di persone e cose con l'ausilio di linee elettriche per la trazione stessa.

Obiettivo dell'alimentazione elettrica per la trazione ferroviaria è quello di assicurare l'operatività dei veicoli elettrici ferroviari in maniera continua, affidabile e sicura.

L'alimentazione elettrica per la trazione comprende il totale degli impianti fissi necessari per l'esercizio ferroviario a corrente elettrica e si suddivide in più aree, quali la generazione, la trasmissione, l'alimentazione delle linee di contatto e l'esercizio delle stesse, il modo attraverso il quale i veicoli elettrici assorbono l'energia elettrica.

Tra le amministrazioni che usano la frequenza di 16 2/3 Hz per la trazione ferroviaria citiamo la Germania dove la trasmissione avviene tramite linee a 110 kV AC e la distribuzione per mezzo di sottostazioni alimentate dalle suddette linee di trasmissione e alimentati le linee aeree di contatto. L'alimentazione attraverso linee di contatto dei veicoli, che si configurano come utilizzatori mobili, rappresenta la sostanziale differenza tra i sistemi per la trazione elettrica e la pubblica fornitura di energia elettrica.

Le linee aeree di contatto, la terza rotaia e altri sistemi a sbarra conduttrice sospesa sono tutti esempi particolari di linea di contatto.

Per venire incontro a specifici requisiti che rendono la trazione per l'esercizio ferroviario affidabile, in particolare alle linee di contatto vengono applicati tre criteri:

- al pantografo del veicolo elettrico si richiede una fornitura di energia elettrica senza soluzione di continuità;
- sempre al pantografo deve essere presente una tensione rispettante specifici e riconosciuti parametri di qualità;
- la rete energetica ferroviaria deve essere in grado di assorbire con continuità un'eventuale presenza di energia immessa in rete da veicoli elettrici a seguito di frenatura elettrica (cioè veicoli dotati e utilizzanti frenatura elettrica a recupero).

Va anche tenuto in conto che il tipico carico elettrico ferroviario differisce di molto da quello della pubblica rete non solo perché fortemente tempo-dipendente ma anche variabile con continuità per quando riguarda il suo posizionamento.

## 2.2 Tipologie di sistemi di alimentazioni per la trazione elettrica

I sistemi di alimentazione delle linee di contatto per la trazione elettrica si dividono essenzialmente in due famiglie, una che comprende i vari sistemi in corrente continua, l'altra quelli in corrente alternata monofase.

I principali sistemi per l'esercizio ferroviario a media e lunga percorrenza presenti nel mondo sono perciò:

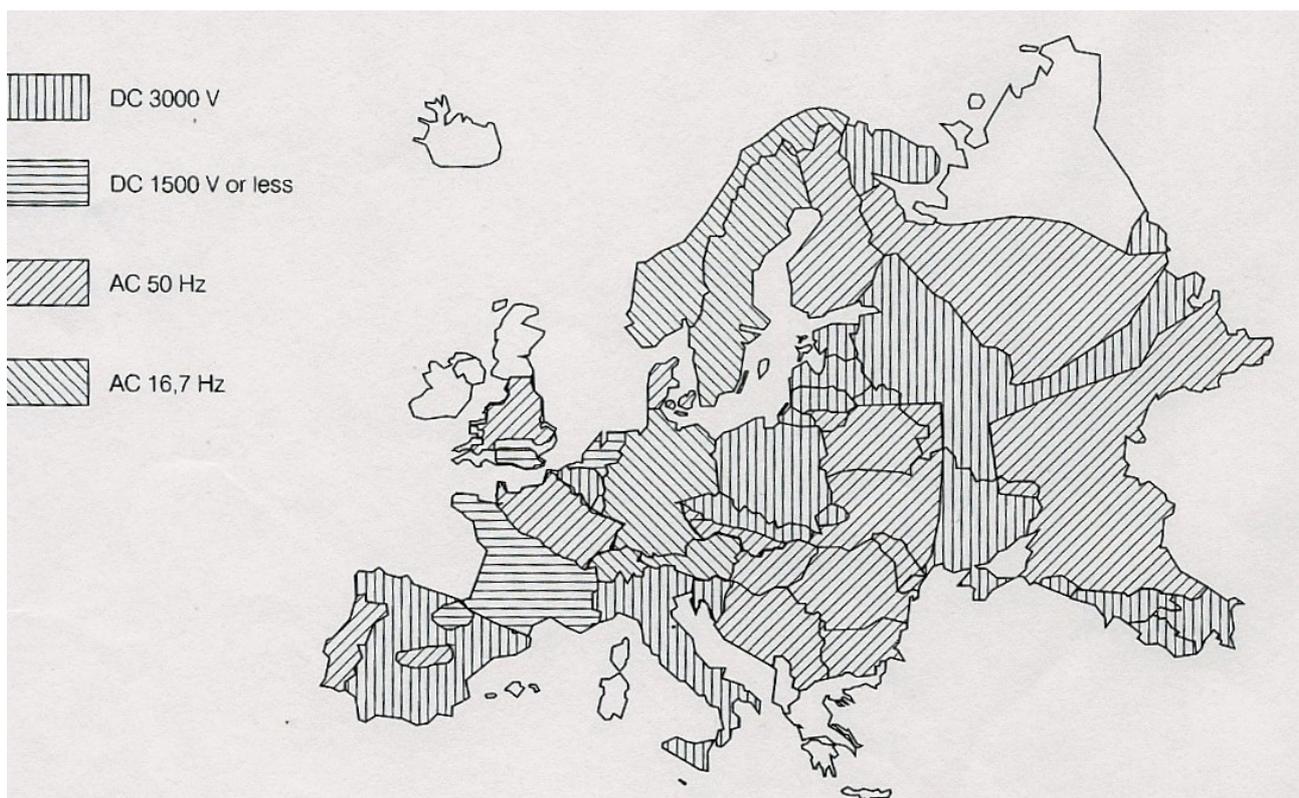
- in corrente continua a tensione di 1.5 kV;
- in corrente continua a tensione di 3 kV;
- in corrente alternata monofase a tensione di 15 kV e frequenza 16 2/3 Hz;
- in corrente alternata monofase a tensione di 25 kV e frequenza 50 Hz.

Sono presenti linee alimentate in corrente alternata monofase a 12.5 kV 25 Hz e 25 kV 60 Hz (USA) nonché in corrente continua a 600/750 V .

Le ultime sono lo standard per quanto riguarda l'esercizio di linee di trasporto di massa urbane e suburbane.

Alla fine del 1997 nel mondo erano presenti 182000 km di linee ferroviarie elettrificate per la lunga e media percorrenza, di cui:

- circa 20000 km, 11% del totale, di linee DC 1.5 kV;
- circa 70000 km, 38% del totale, di linee DC 3 kV;
- circa 33000 km, 18% del totale, di linee AC 15 kV 16 2/3 Hz;
- circa 60000 km, 33% del totale, di linee AC 25 kV 50 Hz.



**Diffusione dei vari sistemi di alimentazione delle linee ferroviarie in Europa**

**Sistemi di alimentazione delle linee ferroviarie presenti in Europa in conformità alla direttiva EN 50 163**

<b>Tensione di alimentazione</b>	<b>Un [V]</b>	<b>Umin2 [V]</b>	<b>Umin1 [V]</b>	<b>Umax1 [V]</b>	<b>Umax2 [V]</b>	<b>Umax3 [V]</b>
<b>DC 600 V</b>	600		400	720	770	1015
<b>DC 750 V</b>	750		500	900	950	1269
<b>DC 1.5 KV</b>	1500		1000	1800	1950	2538
<b>DC 3 KV</b>	3000		2000	3600	3900	5075
<b>AC 15 KV 16 2/3 Hz</b>	15000	11000	12000	17250	18000	24311
<b>AC 25 KV 50 Hz</b>	25000	17500	19000	27250	29000	38746

**Un** : tensione nominale di alimentazione

**Umin2** : minima tensione non permanente, ammessa per 10 minuti

**Umin1** : minima tensione permanente ammessa

**Umax1** : massima tensione permanente ammessa

**Umax2** : massima tensione non permanente, ammessa per 5 minuti

**Umax3** : massima tensione non permanente, ammessa per 20 millisecondi

### **2.3 Il perché (storico) della scelta della frequenza ridotta rispetto a quella industriale nei sistemi a corrente alternata monofase**

Riconosciuta per la trazione ferroviaria l'adeguatezza del motore a collettore con eccitazione serie che presentava un curva coppia/velocità di tipo iperbolico e perciò estremamente favorevole, il secondo passo fu la combinazione di tale tipo di motore con l'alimentazione dello stesso a corrente alternata che permetteva una facile variazione della tensione della stessa mediante trasformatore. L'uso di un motore a collettore alimentato a corrente alternata monofase a frequenza industriale poneva però altri tipi di problematiche, non risolvibili con le tecnologie dell'epoca. Ricordiamoci che siamo nella prima parte del '900.

Le problematiche erano essenzialmente tre.

Innanzitutto l'usura del collettore.

Il collettore di un motore, qualora alimentato con una corrente a 50 Hz, presentava una forte usura a causa della tensione indotta che sappiamo essere frequenza dipendente.

Poi le interferenze.

Cablaggi che correvano paralleli al sistema di alimentazione per la trazione subivano un'interferenza di tipo induttivo di valore elevato e proporzionale alla frequenza delle corrente nel sistema di trazione.

Da ultimo l'elevata asimmetria delle tensioni nella rete trifase a 50 Hz che alimentava direttamente quella monofase per la trazione presentandosi come un carico squilibrato.

Solo molto più avanti, con i grossi progressi nel campo dell'elettronica di potenza, l'alimentazione a frequenza industriale ha preso il sopravvento tanto da essere il sistema preferito da quei paesi che solo recentemente hanno scelto di elettrificare le loro linee ferroviarie.

Ciò nonostante il sistema a 15 kV 16 2/3 Hz ha dato prova, e lo fa tuttora, di essere in grado di coprire grosse richieste di potenza rivelandosi particolarmente adatto per le linee ad alta velocità e alta capacità.

## 2.4 Confronto attuale tra i due sistemi in corrente alternata monofase

Usando la frequenza industriale anziché quella ferroviaria ridotta, gli ingenti costi di una generazione e conversione separata, nonché trasmissione separata potrebbero essere eliminati. Si presentano però altre problematiche.

A frequenza tripla risulta opportuno elevare la tensione di un fattore  $\sqrt{3}$ , da 15 a 25 kV, avendo correnti circolanti ridotte dello stesso fattore, comparabili cadute di tensione, a parità di catenaria e distanziamento delle sottostazioni.

L'induttanza per unità di lunghezza si mantiene sui 1.2 - 1.5 mH/km nel caso di linea a semplice binario, sui 0.75 - 0.91 mH/km nel caso di linea a doppio binario.

Usando però una catenaria alla medesima altezza sul piano del ferro, la maggior tensione alla linea di contatto richiede una maggior spazio per l'isolamento in aria, il che si traduce in un abbassamento del livello del tetto dei veicoli di circa 25 cm, tradotto si richiede l'utilizzo di veicoli dalla sagoma ridotta, con tutti i problemi che la cosa produce.

Il problema principale, tuttavia, è quello del prelievo monofase da rete trifase a media tensione che per ragioni di costo sarebbe la scelta preferibile.

Si presenta perciò un'asimmetria nelle correnti circolanti nella rete trifase che, facendo ricorso alla teoria delle componenti simmetriche, può essere vista come un terna diretta di correnti associata ad una inversa della medesima ampiezza.

Tale sequenza inversa di correnti induce una sequenza di tensioni nelle impedenze interne della linea trifase pure inversa che si traduce in un campo contro-rotante nelle altre macchine a campo magnetico rotante connesse alla rete trifase.

Tali macchine tendono perciò a sviluppare tutta una serie di inconvenienti, come coppie frenanti, oscillazioni elevate di coppia a frequenza doppia della rete e perdite resistive ingenti.

Questi inconvenienti risultano particolarmente accentuati in quanto nei motori asincroni trifase presentano scorrimento  $2 - s$  ( $s \ll 1$ ) per quanto riguarda per la sequenza inversa e il campo contro - rotante, con la sola reattanza di dispersione a limitare la corrente.

Perciò si richiede che nel punto di accoppiamento tra la rete monofase per la trazione elettrica e la rete trifase pubblica l'ampiezza  $U_i$  della tensioni in sequenza inversa non ecceda l'1% nel lungo periodo o il 3% nel breve della tensione nominale.

$U_i$  è legata alla tensione nominale  $U_n$ , alla potenza apparente nominale monofase  $S_{nm}$  e alla potenza apparente trifase di corto-circuito  $Stcc$  dalla relazione  $U_i = S_{nm} * U_n / Stcc$

$Stcc$  è a sua volta esprimibile come  $U_n^2 / X_t$ , dove  $X_t$  rappresenta la reattanza associata alla rete trifase.

Basti pensare che nel 50% dei punti di connessione con la rete nazionale a 110 kV di un paese fortemente industrializzato come la Germania, con situazioni peggiori in altri paesi, il valore di  $Stcc$  è inferiore ai 5 GVA, per capire che quello dell'asimmetria non è un problema da poco.

Si cerca perciò di allacciare la rete di trazione a punti a potenza di corto-circuito la più alta possibile, ad esempio reti pubbliche a 220/380 kV, oltre all'allacciamento di sottostazioni adiacenti a coppie di fasi diverse realizzando una compensazione a livello di insieme, dell'asimmetria nelle reti pubbliche.

Allacciamento a coppie di fasi differenti in sottostazioni adiacenti significa sfasamento della tensione e della corrente in una sezione di linea di contatto alimentata da una sottostazione rispetto a quella alimentata dalla sottostazione adiacenti.

Ciò richiede il non collegamento elettrico tra sezioni adiacenti con tratto neutro che deve essere percorso dal veicolo senza assorbire potenza (a pantografo abbassato o più spesso ad interruttore generale di bordo aperto) con complicazione evidente dell'esercizio ferroviario e dei mezzi.

Non collegamento elettrico tra le sezioni significa pure uso forzato dell'alimentazione a sbalzo rinunciando a quella bilaterale in uso invece nelle linee alimentate a frequenza ferroviaria, oltre a quelle in corrente continua, la quale ha innegabili vantaggi per quanto riguarda la qualità della

tensione e l'affidabilità del sistema.

In effetti al fine di garantire il servizio in maniera continua, un numero di trasformatori superiore di più del 60% (fino al 300% in linee isolate ad alta velocità) rispetto alle linee a frequenza ferroviaria deve essere in servizio o pronto ad entrare in servizio qualora le circostanze lo richiedessero.

La cosa si traduce in una compensazione del basso costo dell'energia (circa 0.03 €/kWh) con il considerevole costo della potenza installata.

L'esborso di capitale per la realizzazione e la gestione dei due sistemi è circa uguale ma quello a frequenza industriale presenterebbe costi annuali superiori del 5% , almeno nelle condizioni della Germania.

Inoltre in molti casi viene inibito l'utilizzo dell'energia prodotta da frenatura a recupero, vanificando uno dei principali vantaggi dati dal montaggio di motori asincroni trifase, con la conseguenza di dover installare a bordo reostati di frenatura e chopper.

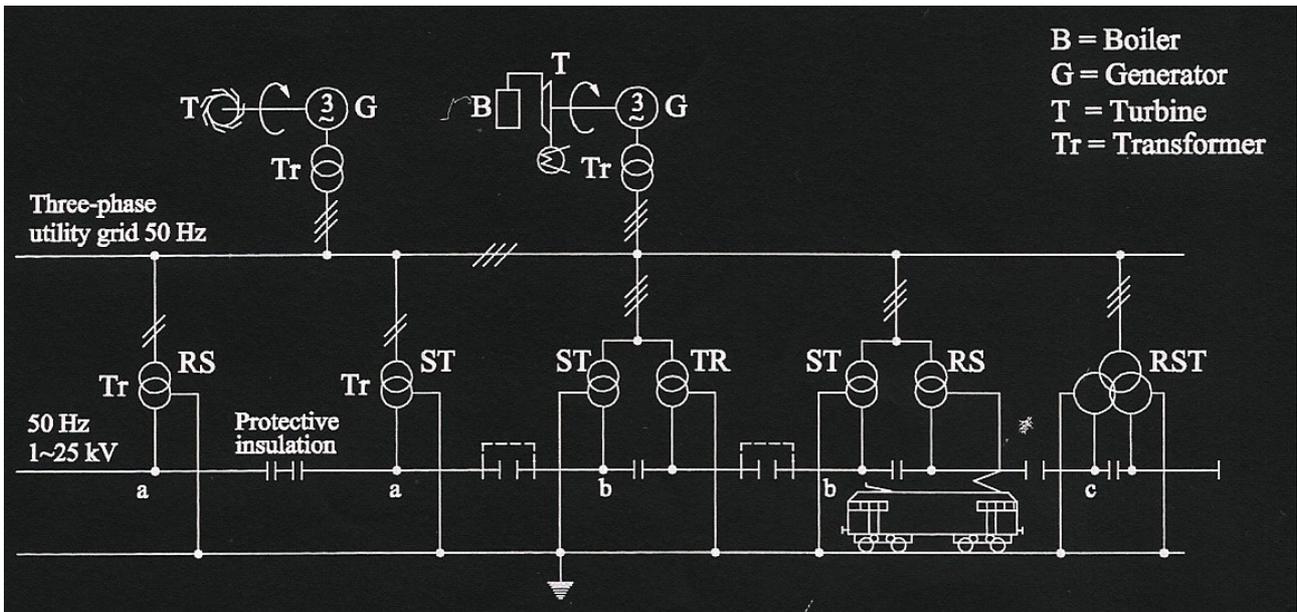
Nelle linee a forte domanda di potenza può essere usata pure una sorta di compensazione attiva in impianti appositi.

L'asimmetria perciò, attraverso i numerosi espedienti messi in atto per ridurre la stessa e gli effetti che ne derivano, riduce i margini di risparmio ottenuti dall'assenza di generazione, conversione e trasmissione dedicati tipici dell'alimentazione a frequenza ferroviaria.

### Comparazione dei sistemi a 16 2/3 Hz e 50 Hz

<b>Sistemi a 16 2/3 Hz</b>	<b>Sistemi a 50 Hz</b>
Tensione nominale 15 kV	Tensione nominale 25 kV, richiesti veicoli più bassi
Trasformatore principale e reattori di regolarizzazione della forma d'onda pesanti	Equipaggiamento di bordo più leggero
Generazione di potenza richiedente complessi macchinari speciali	Terna inversa di tensioni sul lato trifase da limitare all'1% della tensione nominale, richiesto punto di accoppiamento ad alta potenza di corto-circuito e/o compensazione dell'asimmetria
Catenaria longitudinalmente e trasversalmente accoppiata	Separazione di fase (tranne che a 380 kV)
Costo dell'energia sopra i 0.03 €/kWh; Miglior controllo dei picchi di potenza e dei guasti	Notevole costo della potenza installata, fornitore unico dell'energia elettrica
Numero di sottostazioni 100%	Numero di sottostazioni 160%
Potenza trasformata 100%	Potenza trasformata 160%, 400% per linee isolate ad alte prestazioni
Piena capacità di utilizzo dell'energia da frenatura a recupero (con veicoli con convertitori a quattro quadranti)	Limitata capacità di utilizzo dell'energia da frenatura a recupero
Esborso di capitale 100%	Esborso di capitale 100%
Costo annuale 100%	Costo annuale 105%





Tipico schema di alimentazione a 50 Hz

## **2.5 Struttura di una rete di alimentazione per la trazione elettrica**

### **2.5.1 La generazione della potenza**

I sistemi in corrente continua e quelli in corrente alternata monofase a 50 Hz sono accomunate dal fatto di essere alimentate direttamente dalla rete elettrica pubblica.

Le prime tramite linee trifase in alta e media tensione entranti in sottostazioni di trasformazione e rettificazione.

Le seconde con linee bifase preferibilmente in altissima tensione (380/220 kV) entranti in sottostazioni elettricamente più semplici di tipo trasformatorico.

Più complesso invece si presenta il panorama per quanto riguarda il sistema a 16 2/3 Hz.

I sistemi usanti la conversione distribuita sono alimentati con reti trifase dalle reti pubbliche a 110 kV.

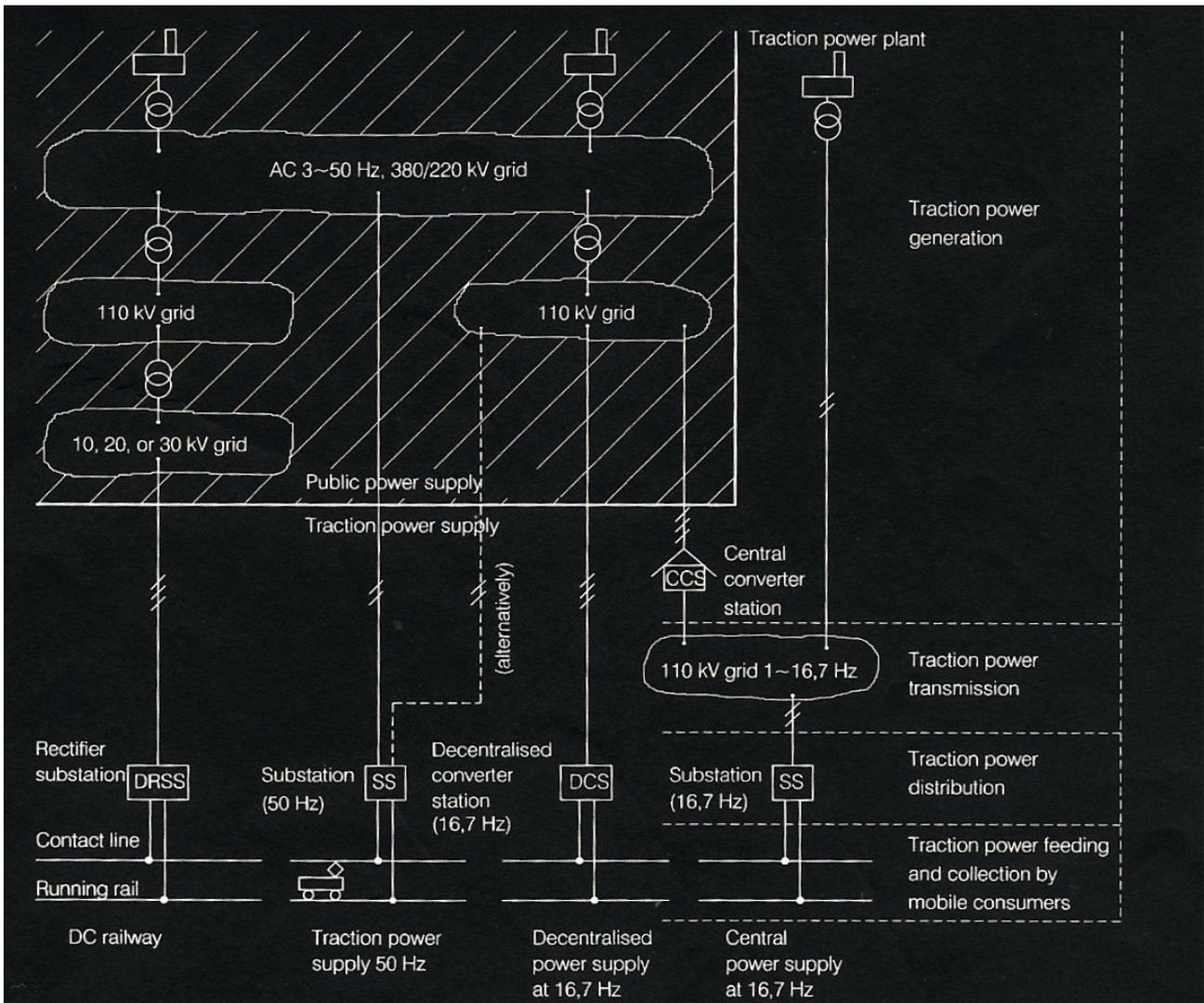
La non-interconnessione delle stesse a tale livello di tensione, adottata per la limitazione delle correnti di corto circuito e conseguente più semplice protezione del network, ha come effetto anche la sincronizzazione delle varie reti, che è una condizione essenziale per l'alimentazione bilaterale delle linee di contatto con conversione distribuita.

I sistemi usanti la conversione centralizzata presentano sottostazioni per l'alimentazione delle linee di contatto collegate con linee bifase bifilare una rete di trasmissione monofase a frequenza ferroviaria e tensione di 110 kV.

La rete di trasmissione monofase viene alimentata o dalla rete pubblica a 110 kV con linee trifasi entranti in stazioni centrali di conversione o da centrali di produzione appositamente realizzate per la trazione ferroviaria e collegate alla rete di trasmissione stessa.

Riassumendo, possiamo dire che solo in un caso tra i quattro presentati è presente una qualche forma di generazione autonoma.

Per gli altri tre la problematica della generazione di potenza è rimandata alla rete pubblica di fornitura dell'energia elettrica.



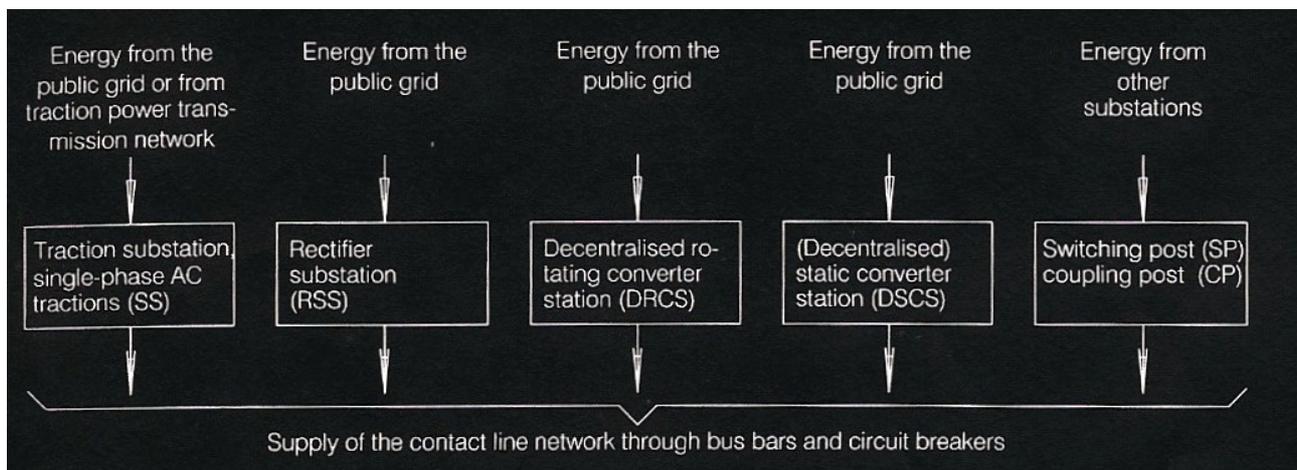
**Struttura dei vari sistemi di alimentazione per la trazione ferroviaria**

## 2.5.2 La distribuzione della potenza

Funzione della rete di distribuzione è quella di convertire l'energia elettrica fornita alle sottostazioni a tensione e/o frequenza generalmente non adatte alla trazione sempre in energia elettrica questa volta a tensione e frequenza i cui valori sono compatibili coi valori nominali usati nella trazione stessa e fornire tale energia agli utilizzatori ferroviari.

Le sottostazioni alimentano direttamente le linee di contatto e sono di 6 tipi:

- stazioni di trasformazione;
- stazione di rettificazione o DRSS;
- stazioni della conversione distribuita a convertitori rotanti o DRCS;
- stazioni della conversione distribuita a convertitori statici o DSCS;
- posti di interruzione o SP;
- posti di accoppiamento o CP.



### Tipologie di sottostazione usate nella trazione elettrica ferroviaria

Le stazioni di trasformazione, come dice il nome stesso, prelevano energia elettrica dalle linee di trasmissione, già a frequenza nominale della trazione ma a tensione elevata, e la rendono disponibile per le linee di contatto abbassando la tensione stessa al valore nominale di trazione.

Le DRSS convertono l'energia elettrica trifase della pubblica rete in continua a tensione nominale della trazione.

Le DRCS convertono, tramite convertitori rotanti l'energia elettrica trifase della pubblica rete in monofase a frequenza ferroviaria e ne abbassano la tensione al valore nominale della trazione.

Le DSCS svolgono le medesime funzioni delle DRCS utilizzando convertitori statici al posto di quelli rotanti.

Le SP e le CP ricevono energia dalle sottostazioni, alimentano le linee di contatto o connettono tra loro sezioni diverse di linea con la possibilità di includerle o escluderle in maniera selettiva dall'alimentazione elettrica.

Per quanto riguarda le sezioni di linea, assumono tre denominazioni a seconda della loro funzione. Si definisce sezione alimentata da una sottostazione o semplicemente sezione di alimentazione il complesso delle linee di contatto rifornito appunto da una medesima sottostazione durante l'esercizio regolare.

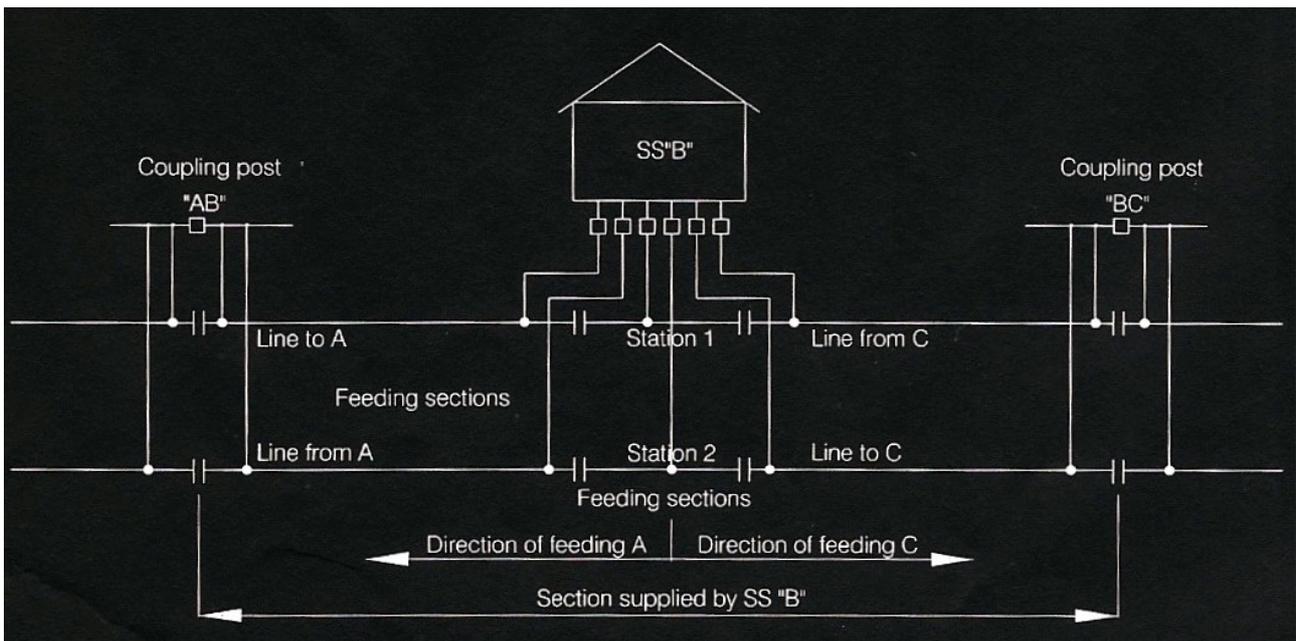
Si definisce sezione neutra quella della linea di contatto che separa due sezioni di alimentazioni adiacenti in maniera tale che le stesse non possano essere congiunte elettricamente dal pantografo di un veicolo in transito.

Alcune amministrazioni ferroviarie creano sezioni neutre tramite l'uso di posti di accoppiamento o CP che contengono al loro interno interruttori posti nella posizione di chiuso durante il servizio regolare.

Si facilita così sia l'accoppiamento longitudinale e trasversale delle linee di contatto al fine di ridurre le cadute di tensione e le perdite nelle linee di contatto stesse che il ritorno in maniera ottimale dell'energia da frenatura a recupero nelle linee concepite per lo sfruttamento della stessa.

Le sezioni di interruzione all'interno di una sezione di alimentazione possono invece essere elettricamente disgiunte tramite spazio in aria o isolatori, anche se nell'esercizio regolare sono connesse tra loro per mezzo di sezionatori in posizione di chiusura.

Le stesse inoltre non pongono problemi ad una possibile connessione per mezzo del pantografo di un veicolo in transito.



**Sezioni di linea di contatto alimentate da una sottostazione**

### 3 NELLO SPECIFICO DEL SISTEMA IN CORRENTE ALTERNATA MONOFASE A 16 2/3 HZ PER LA TRAZIONE ELETTRICA

#### 3.1 La generazione di potenza

Come abbiamo visto in precedenza, energia elettrica monofase a frequenza ferroviaria da utilizzarsi per la trazione può essere ottenuta sia per conversione di energia trifase della pubblica rete di alimentazione che per generazione in appositi impianti di produzione con installati generatori monofase.

In un generatore la frequenza  $f$  [Hz] è legata al numero di coppie polari  $p$  e alla velocità di rotazione del rotore  $n$  [giri/min] dalla relazione  $f = p * n / 60$ .

Con minimo numero di coppie polari pari a 1, la massima velocità di rotazione risulta 1000 giri/min al fine di produrre energia elettrica a 16 2/3 Hz.

Ciò significa che a parità di coppie polari un generatore a 50 Hz dovrebbe girare a velocità 3 volte superiori.

Essendo la potenza prodotta da un generatore  $P$  [W] legata alla coppia  $C$  [Nm] e alla velocità angolare di rotazione del rotore  $\Omega$  [rad/s] dalla relazione  $P = C * \Omega$ , il generatore deve sviluppare una coppia frenante tre volte superiore a quanto avverrebbe con un generatore a 50 Hz, a parità di potenza.

Una coppia frenante tre volte superiore significa una macchina tre volte più grande.

Inoltre per il fatto di essere un generatore monofase e quindi mancante di due dei tre avvolgimenti statorici di un generatore trifase, la macchina produce una potenza monofase  $P_m$  che equivale a  $P_t / \sqrt{3}$ , con  $P_t$  potenza trifase prodotta da un generatore trifase appunto delle stesse dimensioni.

Accorpare i due fattori di svantaggio, l'uno legato alla frequenza ridotta, l'altro alla scelta di un sistema monofase anziché trifase, notiamo che un generatore monofase a 16 2/3 Hz dovrebbe essere circa 5.2 (nella pratica il valore si attesta a circa 4.5) volte più grande di uno trifase a 50 Hz, tipico delle reti di pubblica fornitura, a parità di potenza prodotta.

Il più grosso generatore monofase a frequenza ferroviaria dalla potenza nominale di 187,5 MVA risulta essere delle stesse dimensioni di un generatore trifase per la rete pubblica dalla potenza nominale di 850 MVA.

Un generatore di tensione monofase a frequenza ferroviaria oltre alla già citata collocazione in impianti di produzione dedicati può averne un'altra presso gli impianti di conversione, dove accorpato (cioè portato e mantenuto in movimento) ad un motore trifase questa volta alimentato dalla rete pubblica costituisce un gruppo di conversione rotante.

Fatta salva la possibilità di avere sia una conversione in frequenza a rapporto fisso che variabile (leggermente), esistono due tipi di gruppi di conversione rotanti.

Il primo tipo accorpa un motore sincrono e un generatore sincrono, è presente ad esempio nella parte di rete di trazione delle ferrovie federali tedesche ancora esercita con conversione distribuita dove fornisce una potenza nominale di 10 MVA.

Il secondo tipo invece usa un motore asincrono abbinato ad un generatore sincrono, dove un rapporto non fisso tra frequenza di ingresso ed uscita permette una variazione della velocità di rotazione del gruppo.

Si rende possibile perciò anche l'esercizio in parallelo con la generazione in centrale di produzione. Sempre facendo riferimento al caso tedesco, un tale sistema è usato parte di rete coperta da conversione centralizzata per soddisfare i picchi di carico.

I gruppi di conversione asincrono - sincrono presentano potenze nominali che vanno dai 10.7 ai 50 MVA.

### 3.2 Tipologie di reti di alimentazione di sistemi per la trazione

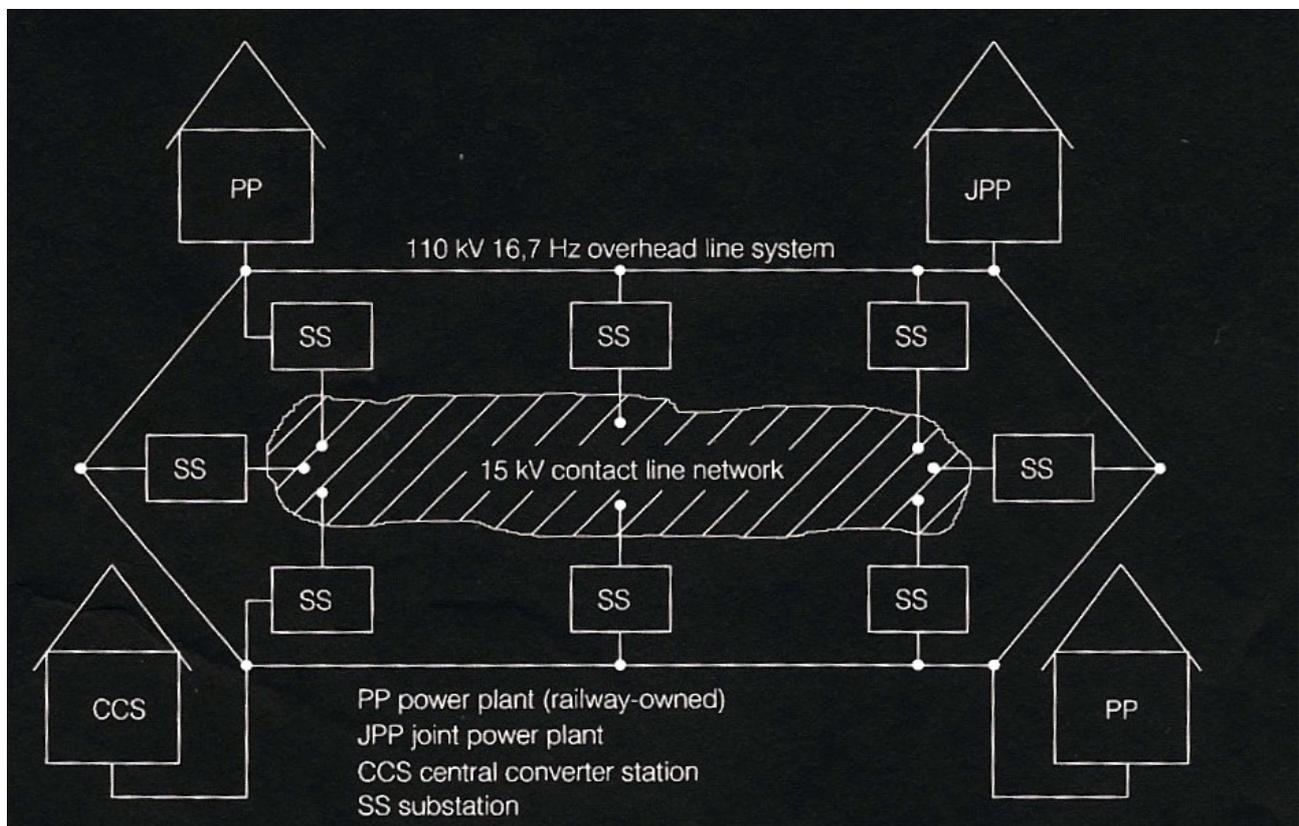
Due tipologie di reti di alimentazione a 16 2/3 Hz si sono evolute in Europa, quella a conversione centralizzata e quella a conversione distribuita.

La prima è stata abbracciata sin dagli albori nei paesi del centro Europa quali Germania, Svizzera e Austria, seguiti più tardi dalla Norvegia nella penisola scandinava.

Presenta generazione di potenza di tipo primario per mezzo di generatori monofase a frequenza ferroviaria installati in impianti idroelettrici e termoelettrici, sia convenzionali che nucleari.

La trasmissione dalle centrali di produzione alle sottostazioni avviene tramite una rete monofase a 110 o 132 kV e frequenza ferroviaria costituita da linee aeree recanti ciascuna due corde (conduttore di alimentazione e di ritorno della corrente), talora 2 o più fasci di 2 corde ciascuno nel caso di alimentazione di linee ferroviarie dal servizio particolarmente gravoso, come quelle ad alta velocità, o alimentate da fonti ad elevata potenza installata.

La distribuzione si svolge a partire da sottostazioni dove si abbassa il livello di tensione dai 110/132 kV delle linee di trasmissione ai 15 kV delle linee di contatto.

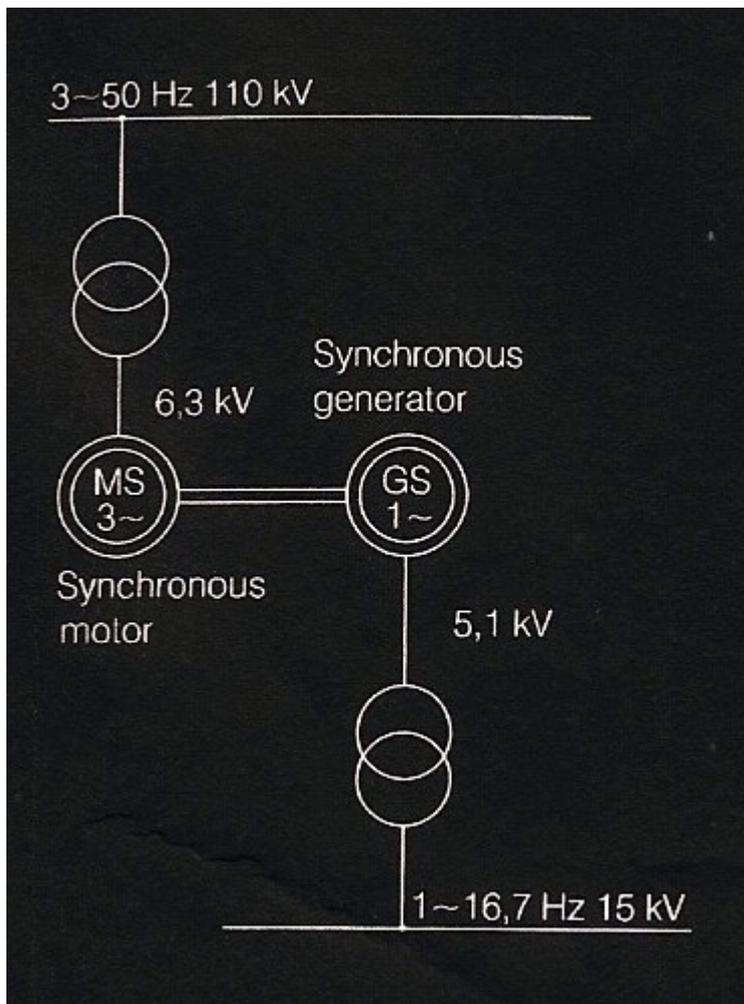


#### Struttura basilare di un sistema di alimentazione a conversione centralizzata

Il sistema a conversione distribuita è presente dagli anni '20 in Svezia e dagli anni '60 nella Repubblica Democratica Tedesca, le cui linee sono poi confluite nelle moderne ferrovie federali tedesche a seguito della riunificazione delle due Germanie.

È caratterizzato dalla presenza delle stazioni di conversione distribuita a convertitori rotanti o DRCS, le quali provvedono alla generazione per conversione dell'energia della rete pubblica, trifase a 50 Hz, in monofase a frequenza ferroviaria e all'alimentazione tramite interruttori di sezione delle singole sezioni della linea di contatto.

Entrambi i sistemi sono in grado di alimentare i veicoli ferroviari in maniera sicura, affidabile e rispettando determinati parametri di qualità e hanno dimostrato ciò durante un servizio quasi centenario sulle 2000 km di linee a conversione centralizzata e 13000 a conversione distribuita. Bisogna dire però che per quanto riguarda la Germania, si va verso la scomparsa della conversione distribuita, essenzialmente per motivi economici. Infatti a causa dei picchi elevati di carico di breve durata, le ferrovie federali ad oggi pagano a caro prezzo, seguendo la tariffazione di alta domanda, l'energia prelevata dalla rete pubblica attraverso le DRCS rendendo il sistema a conversione centralizzata e generazione in proprio più costo-effettivo.



**Schema di un tipico convertitore rotante sincro - sincro di un sistema a conversione distribuita**

## Comparazione di sistemi a conversione centralizzata e distribuita

	<b>A conversione centralizzata</b>	<b>A conversione distribuita</b>
<b>Connessione delle linee aeree di contatto</b>	Alimentazione bilaterale da sottostazioni adiacenti	Alimentazione bilaterale da sottostazioni adiacenti
<b>Stabilità della tensione alle sbarre omnibus di sottostazione</b>	Con carico doppio di quello nominale, caduta di tensione del 20% rispetto al valore nominale	Tensione costante alla sbarra omnibus con qualsiasi carico
<b>Distanziamento delle sottostazioni</b>	Minore rispetto alla conversione distribuita a causa della caduta di tensione alla sbarra omnibus	Maggiore rispetto alla conversione centralizzata per la costanza del valore di tensione alla sbarra omnibus
<b>Ridondanza</b>	Compensazione dei picchi di carico attraverso il network a 110 kV, possibile l'esercizio a singolo trasformatore	Prezzo dell'energia incrementato dai grossi picchi di carico, esercizio a singolo convertitore solo con cambiamento delle caratteristiche dello stesso
<b>Potenza installata</b>	Nessuna differenza con la conversione distribuita	Nessuna differenza con la conversione centralizzata
<b>Unità di riserva</b>	Centralizzata	Distribuita nelle stazioni di conversione
<b>Rendimento</b>	91%	91%
<b>Corrente di corto-circuito nella linea di contatto</b>	Fino a 45 kA	Fino a 25 kA
<b>Disponibilità in servizio</b>	Nessuna differenza con la conversione distribuita	Nessuna differenza con la conversione centralizzata
<b>Potenza reattiva circolante nel network di trazione</b>	Più alta	Più bassa per la quasi totale assenza delle linee aeree a 110 kV
<b>Lunghezza del network di trazione a 110 kV</b>	Circa 1.3 volte il totale dei distanziamenti tra sottostazioni	Circa 0.05 volte il totale dei distanziamenti tra sottostazioni
<b>Perdite nel network di trazione a 110 kV</b>	Il doppio di una linea trifase, a parità di potenza trasmessa	Tendente a zero per la quasi totale assenza delle linee a 110 kV
<b>Generazione</b>	In grosse unità ad alto rendimento	In piccole unità a rendimento più basso rispetto alla conversione centralizzata

### 3.3 Tipologie di convertitori

#### 3.3.1 I convertitori rotanti

I convertitori rotanti hanno fatto la loro comparsa nel panorama ferroviario nel 1912 sotto forma di macchina da 1 MW di potenza durante il servizio sperimentale a trazione elettrica nelle linee delle valli del Wiese e del Wehra gestite dalle ferrovie statali del Baden.

All'interno delle dorsali di alimentazione si richiede ai convertitori di operare in maniera flessibile, potendo variare il rapporto fra frequenza di entrata ed uscita in maniera tale da permettere il controllo della frequenza stessa e della potenza fluenti nella rete di trazione, il tutto in maniera indipendente dalle reti di pubblica fornitura, in quanto queste ultime presentano curve di carico differenti dalle reti di trazione.

A tale scopo generalmente si usa un generatore sincrono monofase a quattro poli di potenza fino a 80 MVA portato e mantenuto in rotazione da un motore asincrono trifase ad anelli e dodici poli. Il campo contro-rotante del carico monofase è contenuto nella maniera più elevata possibile con l'uso di un vigoroso avvolgimento smorzatore.

Ciò nonostante, lo statore deve essere sospeso attraverso supporti rotanti a molla in quanto sono presenti oscillazioni di coppia a frequenza  $33 \frac{1}{3}$  Hz, le quali sono fonte di vibrazioni e rumore. Come abbiamo già accennato in precedenza, un generatore monofase a frequenza ferroviaria risulta essere alcune volte più grande di un corrispondente trifase a frequenza industriale, a parità di potenza erogata.

Una variazione  $+2\%$  /  $-3\%$  della velocità di rotazione del complesso motore-generatore viene ottenuta variando la frequenza di alimentazione del rotore del motore per mezzo di cicloconvertitori a tiristori dalla potenza di circa il 3% della potenza dell'intero gruppo.

In tempi recenti inverter a GTO hanno incominciato a sostituire i cicloconvertitori a tiristori.

La più grossa stazione mondiale di conversione a convertitori rotanti si trova a Neckarwestheim in Germania presso lo stabilimento della EnBW ed è dotata di due gruppi.

Il motore asincrono trifase dalla tensione nominale di 12.5 kV è collegato attraverso un trasformatore da 85 MVA direttamente alla rete magliata pubblica ad altissima tensione a 400 kV. Sempre alla sbarra a 12.5 kV con trasformatore frapposto fanno riferimento il rettificatore per la produzione di corrente continua per l'eccitazione del generatore e il cicloconvertitore di avviamento e controllo della velocità del motore, mentre senza la frapposizione di un trasformatore la linea per i servizi di stazione.

Parliamo un attimo dell'avviamento del gruppo.

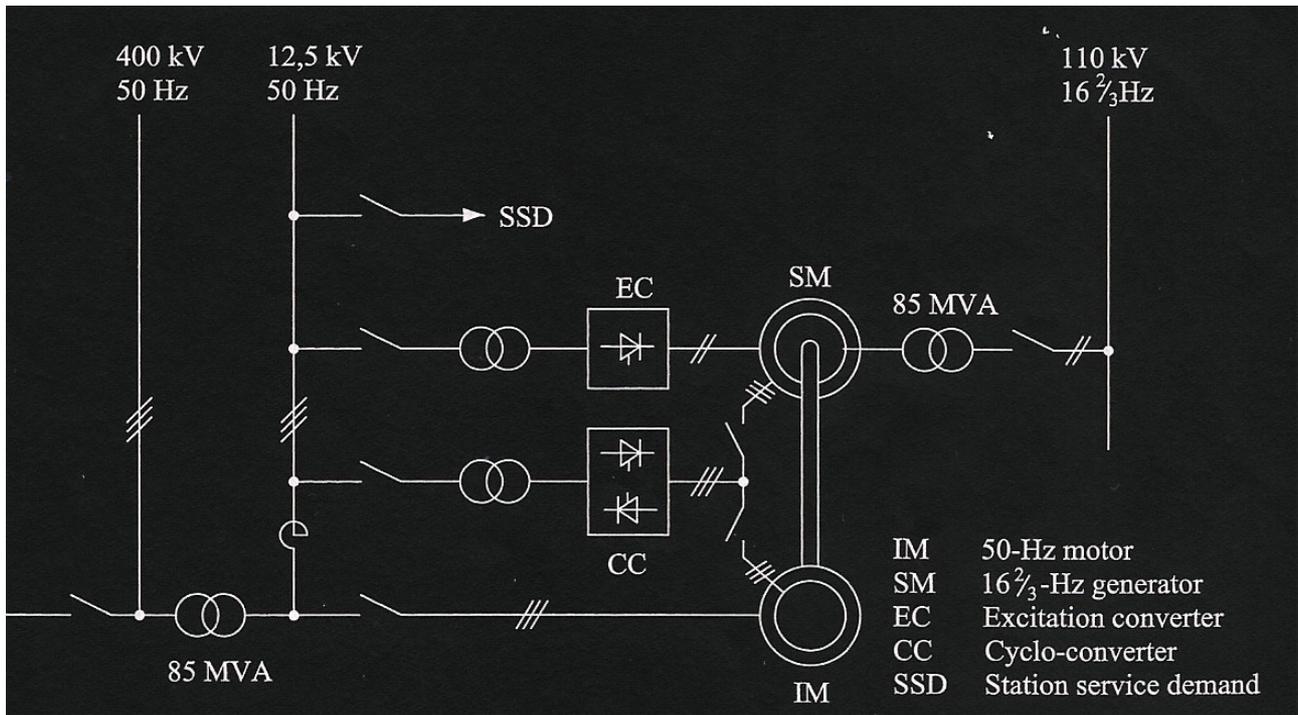
Il motore asincrono viene accelerato, ad avvolgimenti di statore corto-circuitati, fino a 180 giri/min (circa 18 Hz) usando un convertitore diretto.

Successivamente il cicloconvertitore viene collegato attraverso una linea bifase allo statore del generatore che viene accelerato oltre la frequenza sincrona a campo ridotto.

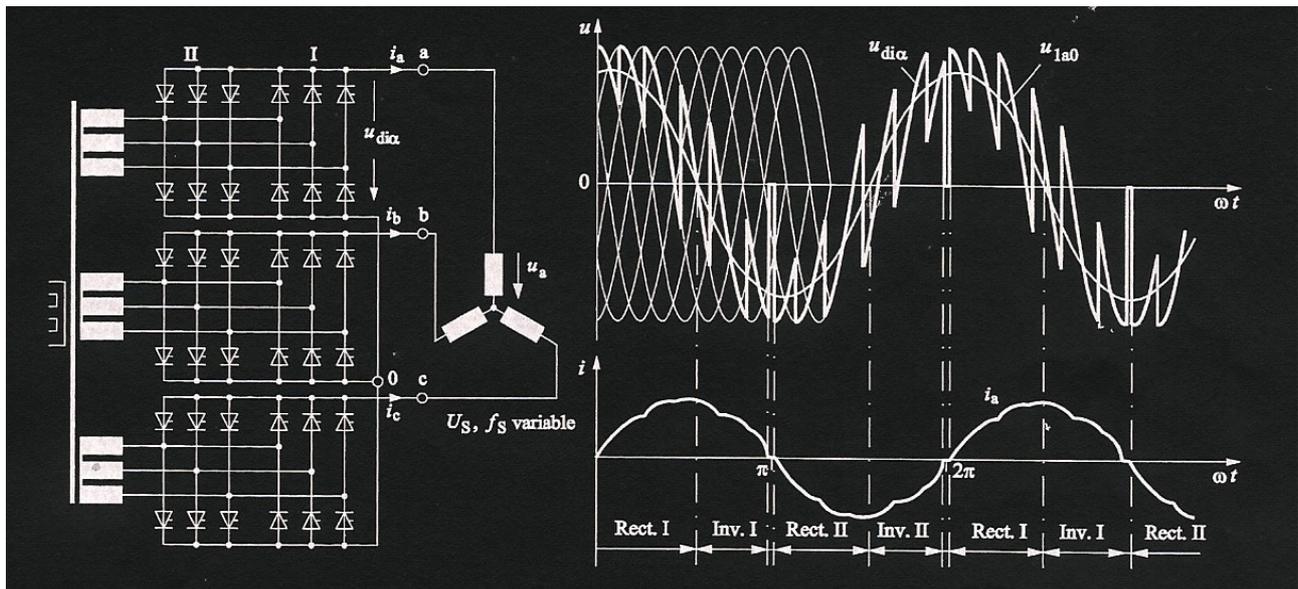
Da ultimo l'avvolgimento rotorico del motore viene connesso al cicloconvertitore, quello statorico alla linea trifase e il generatore sincronizzato con il network di trazione a 110 kV che è connessa al generatore con un trasformatore sempre da 85 MVA.

Notiamo che in un impianto di uguale o simile costruzione, durante l'esercizio perfettamente sincrono, il convertitore diretto è attraversato da corrente continua che percorre sempre la medesima fase con surriscaldamento dello stesso e notevoli perdite.

Per evitare questi fenomeni a partire dall'ottobre del 1997 nelle reti delle ferrovie tedesche, svizzere e austriache la frequenza di esercizio della trazione è stata leggermente spostata verso l'alto portandola da  $16 \frac{2}{3}$  a 16.7 Hz con il risultato che le correnti di carico del convertitore cambiano fase, seppur a ritmo lento, durante l'esercizio regolare.



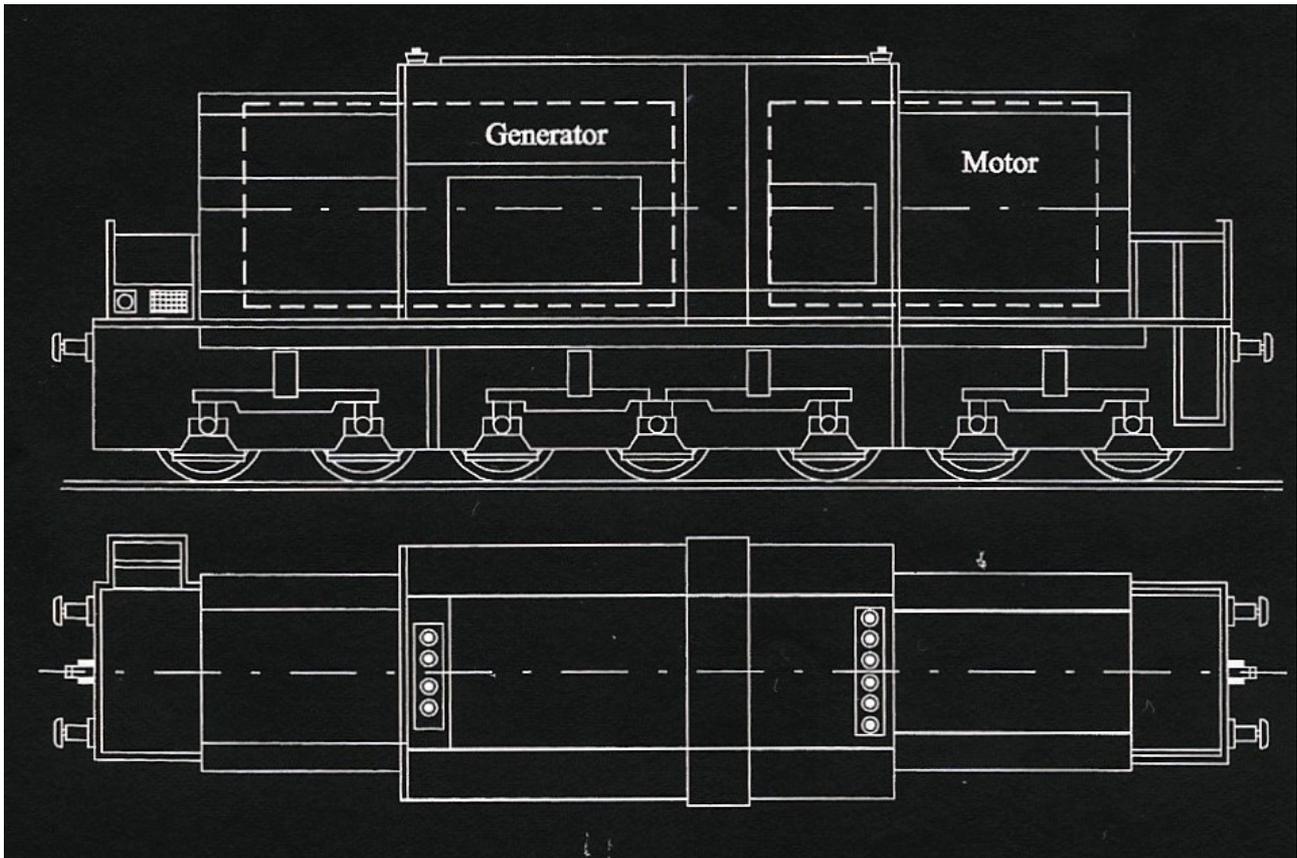
**Schema del gruppo di conversione rotante da 80 MW installato presso l'impianto di Neckarwestheim facente parte del sistema a conversione centralizzata**



**Schema circuitale di un cicloconvertitore (sx) e diagramma della tensione in uscita dallo stesso (dx)**

Per quanto riguarda la conversione rotante a rapporto fisso tra frequenza d'ingresso/uscita, quindi con motore e generatore entrambi sincroni, portiamo ad esempio il gruppo montato su carro ferroviario ancora in uso sulla parte di rete a conversione distribuita delle ferrovie tedesche. Il peso dell'insieme è di 143.5 tonnellate, il gruppo fornisce una potenza di 10 MVA. Nonostante si tratti di un carro ferroviario, risulta stazionario all'interno dell'impianto e viene

mosso solo per portare a revisione generale presso le officine centrali di manutenzione il gruppo di conversione che è montato su di esso.



**Gruppo mobile di conversione rotante da 10 MW delle ex - DR**

### 3.3.2 I convertitori statici

Motivi economici spingono il passaggio dai convertitori rotanti ai convertitori statici.

Infatti i primi presentano un alto costo iniziale e richiesta di manutenzione continua.

Un primo esempio di convertitore statico lo si vide già nel 1936 quando nella sottostazione di Basilea fu installato un cicloconvertitore, prodotto dalla AEG, da 4 MW di potenza, che usava valvole a vapori di mercurio per la conversione in frequenza a rapporto variabile.

Notiamo poi i numerosi cicloconvertitori a tiristori, a frequenza fissa costruiti in Svezia dalla ASEA negli anni '70.

Il principale problema dei cicloconvertitori lo si trovava nel lato trifase, dove cresceva la potenza reattiva circolante, assieme ad armoniche di ordine inferiore alla fondamentale.

Dal 1990 in poi, componenti a GTO vengono usati nella conversione per la trazione ferroviaria, anche se inizialmente sostituiti sul lato trifase da circuiti a ponte a dodici impulsi con tiristori per motivi di costo.

Il lato monofase del convertitore è collegato direttamente alle linee di trasmissione.

La prima stazione di conversione usante GTO è quella di Giubiasco, nel Ticino in Svizzera, costruita nel 1992 da ABB per una potenza di 20 MVA.

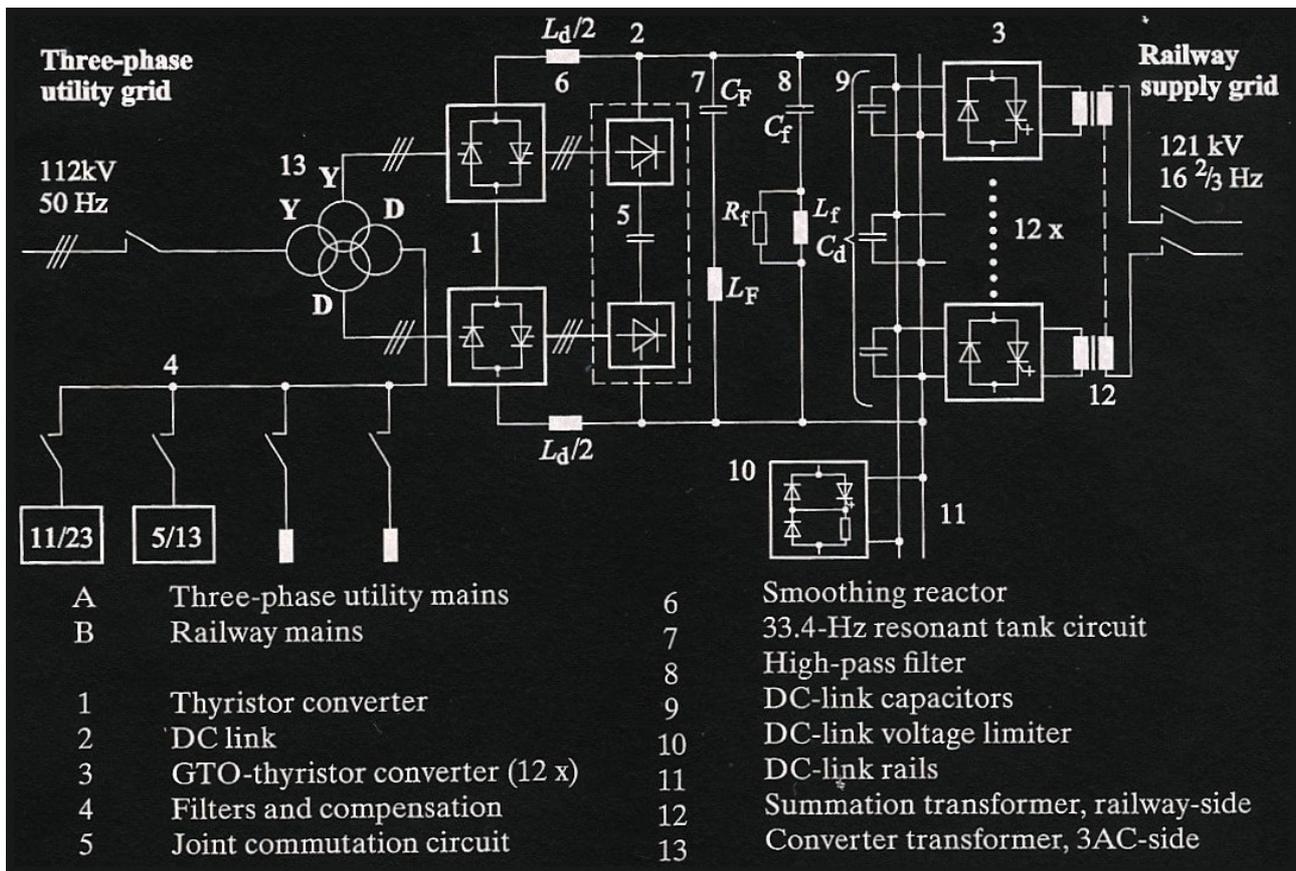
Il gruppo di conversione presenta lato DC a 2650 V dodici convertitori a quattro quadranti con GTO, convertitori operanti a modulazione di fase in onda quadra.

Esso alimenta le linee di trasmissione delle ferrovie federali svizzere a 66/132 kV tramite sei trasformatori a doppia uscita.

AEG e Siemens forniscono analoghi componenti alle ferrovie tedesche.

A Brema, in Germania, già dal 1996, la stazione di conversione usa 6 GTO in serie (schema a n+1) per funzione da svolgere.

Questo si tratta del primo esempio di utilizzo di tecnologia computerizzata, sviluppata da ABB per la connessione direttamente in serie di sistemi a GTO, tecnologia che ha portato ben presto ai componenti a IGCT.



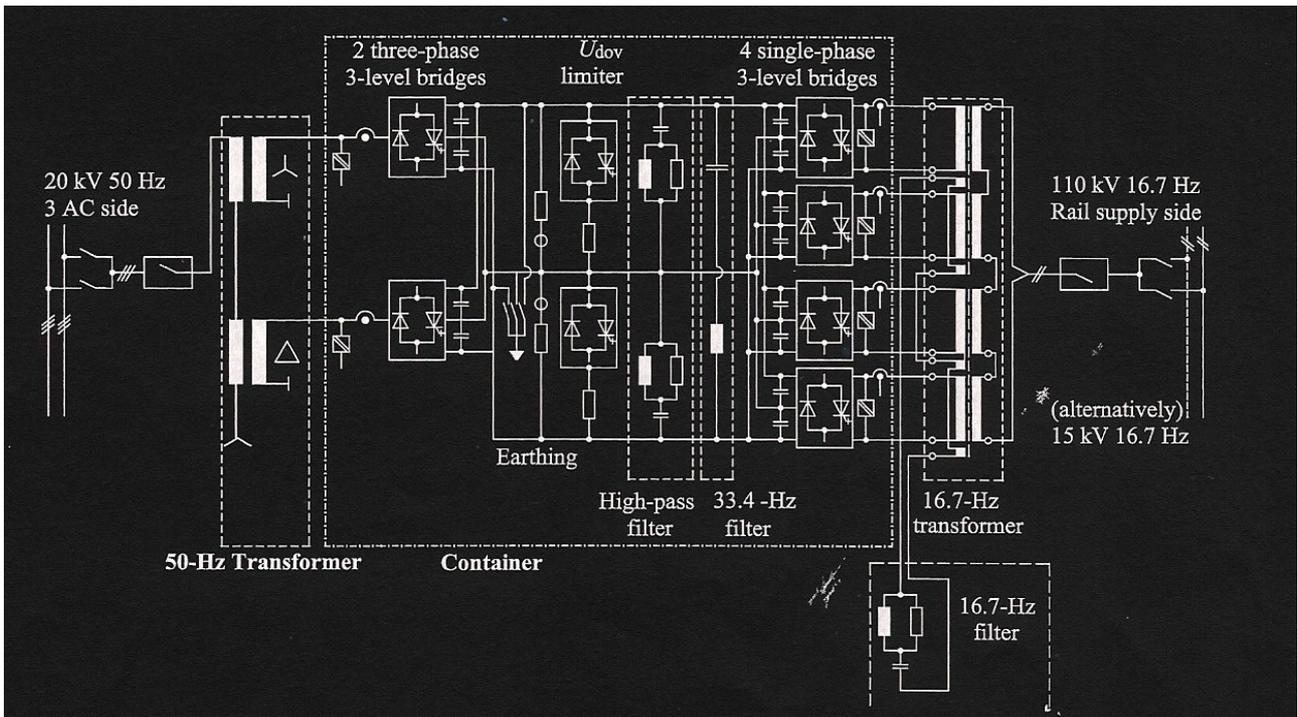
**Schema circuitale del gruppo di conversione statica da 100 MW, prodotto da ABB e installato a Brema**

Infatti il secondo di un totale di due gruppi di conversione da 50 MW installati presso la stazione di Monaco di Baviera - Karlsfeld è attrezzato con componentistica IGCT.

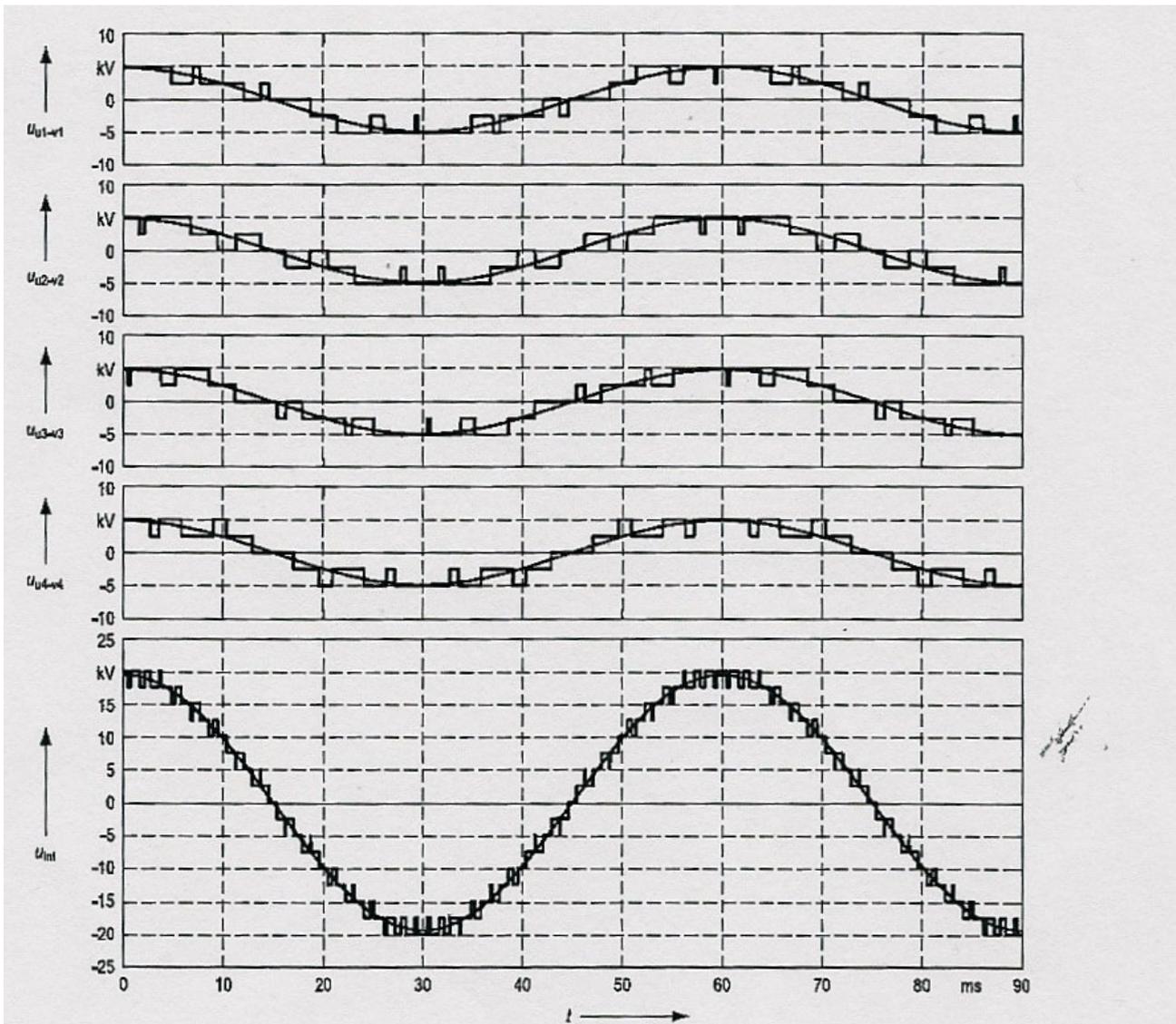
Conseguentemente alla costruzione “su misura” dei grandi impianti di conversione, le ferrovie tedesche hanno iniziato lo sviluppo di gruppi da 15 MW di tipo standardizzato.

Essi si presentano con schema a tre livelli ed usano sia GTO che IGCT, al giorno d’oggi anche sul lato trifase.

Presso la stazione di conversione di Limburg, in Germania, otto di questi gruppi standardizzati forniscono potenza alle reti a 110 kV destinate a sua volta ad erogarla alla nuova linea ad alta velocità Colonia - Francoforte.



**Schema circuitale di un gruppo di conversione statica a IGCT standardizzato da 15 MW, prodotto da ABB**



Forme d'onda della tensione agli avvolgimenti del trasformatore dei quattro ponti ad H a tre livelli nella parte superiore dei ponti stessi

### 3.4 I diversi tipi di linee aeree di contatto

Vediamo nel dettaglio le tipologie di linee aeree di contatto usate dalle ferrovie federali tedesche, quelle austriache, norvegesi e del gruppo BLS, operante in Svizzera.

Le ferrovie federali tedesche usano tre tipologie diverse, legate ad altrettante velocità massime di esercizio.

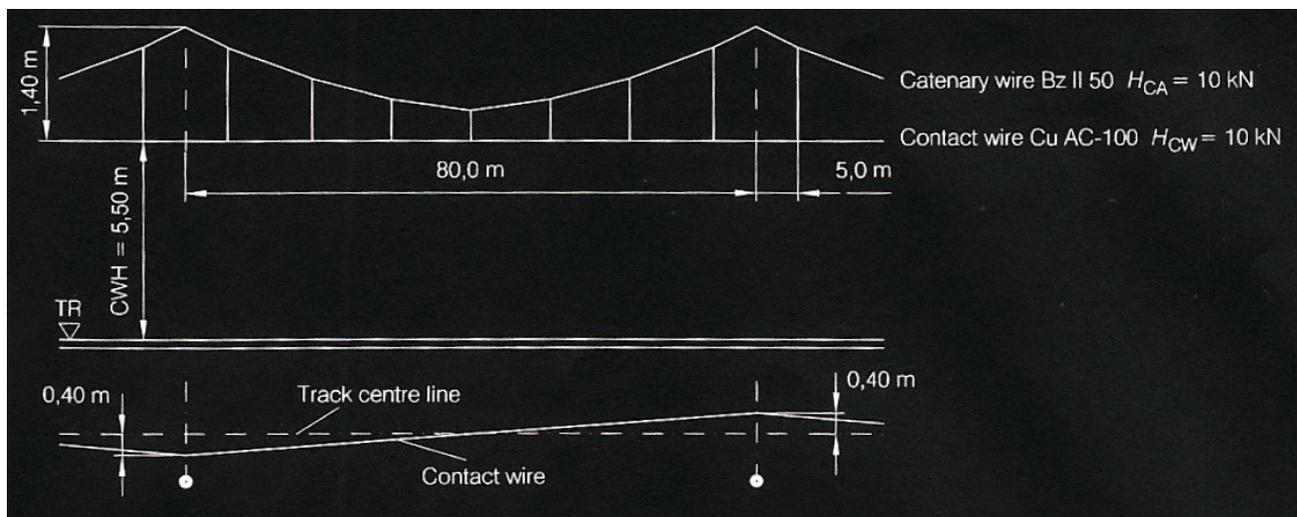
Parliamo degli schemi Re 100, Re 200 e Re 330.

Lo schema Re 100 è usato su linee la cui velocità massima di esercizio è impostata a 100 km/h.

Esso è composto da una corda di sostegno a catenaria in bronzo di sezione  $50 \text{ mm}^2$  e una corda di contatto in rame/acciaio da  $100 \text{ mm}^2$ , entrambe poste e mantenute in tensione da una forza di 10 kN.

La geometria magliata non è richiesta per tale velocità di esercizio.

L'insieme corda di sostegno - corda di contatto occupa verticalmente uno spazio di 1,4 m in corrispondenza dei supporti singoli, 1,8 m in corrispondenza dei supporti flessibili a ponte (corde trasversali).



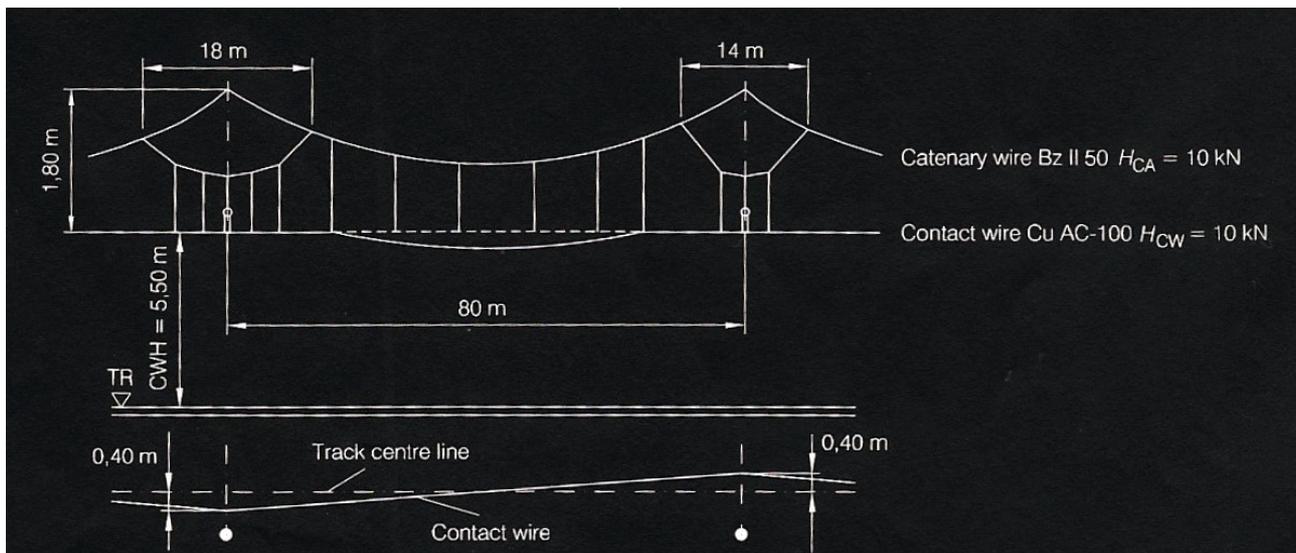
#### Linea di contatto tipo Re 100 delle DB

Lo schema Re 200 permette una velocità massima di 200 km/h con geometria magliata in tensione (meccanica) in corrispondenza dei supporti.

Presenta una corda di sostegno a catenaria Bz 50 (dove le lettere rappresentano il materiale costituente e le cifre la sezione in  $\text{mm}^2$ ), una corda di contatto Cu-Ac 100, corde della maglia Bz 25 e pendini Bz 10.

Una magliatura estesa longitudinalmente per 18 m in corrispondenza dei supporti introflessi permette di ottenere la stessa elasticità che si ha in corrispondenza dei supporti estroflessi dove la magliatura è di 14 m.

Il grado di disuniformità dell'elasticità della linea di ferma perciò al 16%.



### Linea di contatto tipo Re 200 delle DB

Lo schema Re 330 è usata per l'esercizio ferroviario sino a 350 km/h.

Con tale schema la linea aerea risulta composta di una corda di sostegno a catenaria Bz 120, tensionata a 21 kN, di una corda di contatto Cu-Mg Ac 120 (rame e acciaio al magnesio), tensionata a 27 kN, corde della maglia Bz 35, tensionate a 3.5 kN.

Tali caratteristiche, comprese le magliature di 18 m in corrispondenza dei supporti, permettono una bassa variazione dell'elasticità scorrendo la linea e il grado di disuniformità della stessa si ferma all'8%.

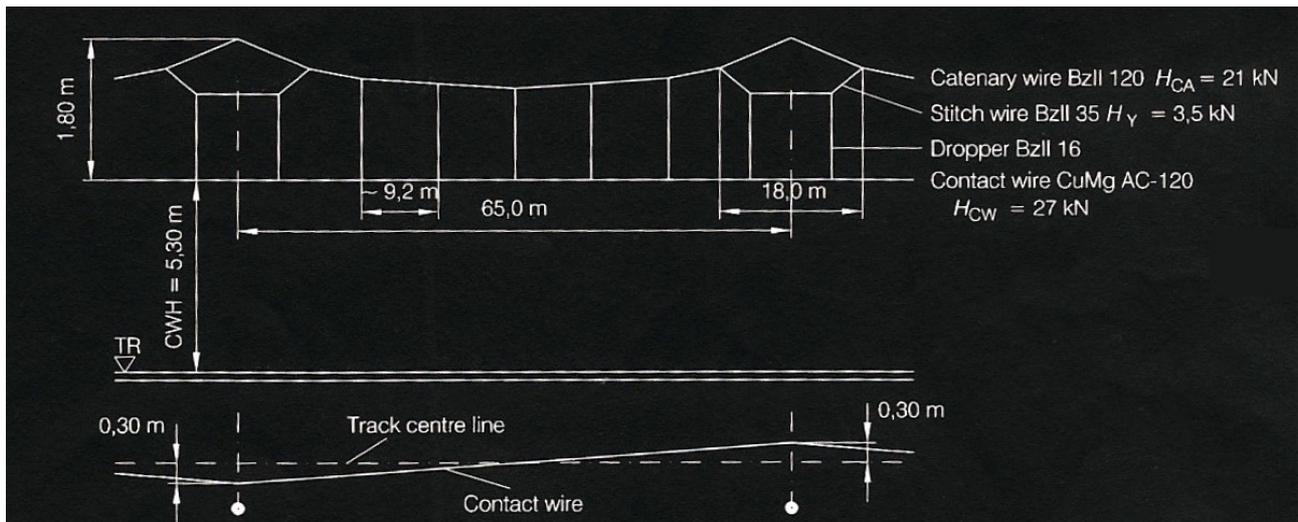
Sono presenti inoltre dispositivi separati di tensionamento per compensare le variazioni in lunghezza sia della corda di contatto che di quella di sostegno.

Per l'elevazione e il sostegno della linea aerea sono usate mensole in alluminio a bassa manutenzione incernierate a pali di sostegno, preferibilmente in calcestruzzo nel caso di linee di contatto singolarmente supportate per binario.

L'uso dei portali è invece necessario per il cablaggio sovrastante gli scambi lunghi e gli incroci a largo raggio di curvatura (che permettono di essere impegnati sino a 200 km/h).

Essi permettono la separazione meccanica delle varie linee di contatto e l'adozione delle mensole anche nell'area di incrocio dei binari.

Simulazioni e test con lo schema Re 330, usato per la prima volta sulla nuova linea ad alta velocità Berlino - Hannover, hanno dimostrato le superiori proprietà dinamiche dello schema in questione.



### Linea di contatto tipo Re 330 delle DB

Usano una schema standard per le loro linee di contatto invece, le ferrovie statali austriache.

La linea di contatto è composta da una corda di sostegno a catenaria Cu 70 e una corda di contatto Cu-Ac 120, è divisa in sezioni lunghe al massimo 750 m, delle quali un estremo è ancorato in maniera fissa al palo di sostegno e l'altro a zavorra per il tensionamento.

Il palo di sostegno nella sua parte superiore supporta pure la linea di feeder (ACSR 260/23) disposta parallelamente alla linea di contatto.

Nelle stazioni le linee di contatto vengono supportate tramite corde trasversali a tre livelli.

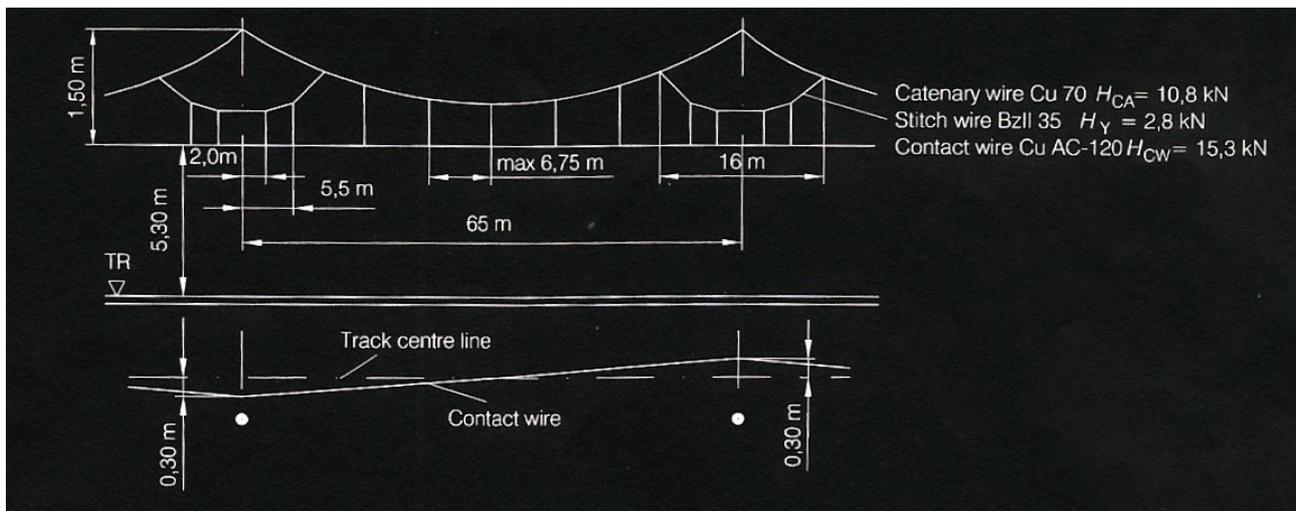
I primi due livelli sono costituiti da corde rettilinee, il terzo assume una forma a campata.

Quella al livello più basso sostiene direttamente la corda di contatto .

La corda di contatto si allaccia anche con i classici pendini alla corda longitudinale di sostegno, la quale a sua volta viene sostenuta dalla corda di secondo e terzo livello.

Le corde trasversali sono poi attaccate lateralmente per mezzo di molle a piloni di calcestruzzo a sezione rettangolare.

Nelle linee rinnovate come il tratto Ötztal - Haiming della Innsbruck - Bludenz si ritrovano ancora palificazione in calcestruzzo a sezione rettangolare e mensole in alluminio, insieme considerato a bassa manutenzione.



### Linea di contatto per le nuove linee, standardizzata, delle ÖBB

Le ferrovie norvegesi usano due tipologie di linee di contatto, lo schema S 20 per velocità fino a 200 km/h e quello S 25 per velocità fino a 250 km/h, come sulla linea ad alta velocità Oslo - Gardermoen.

Lo schema S 25 adotta la magliatura in corrispondenza dei supporti.

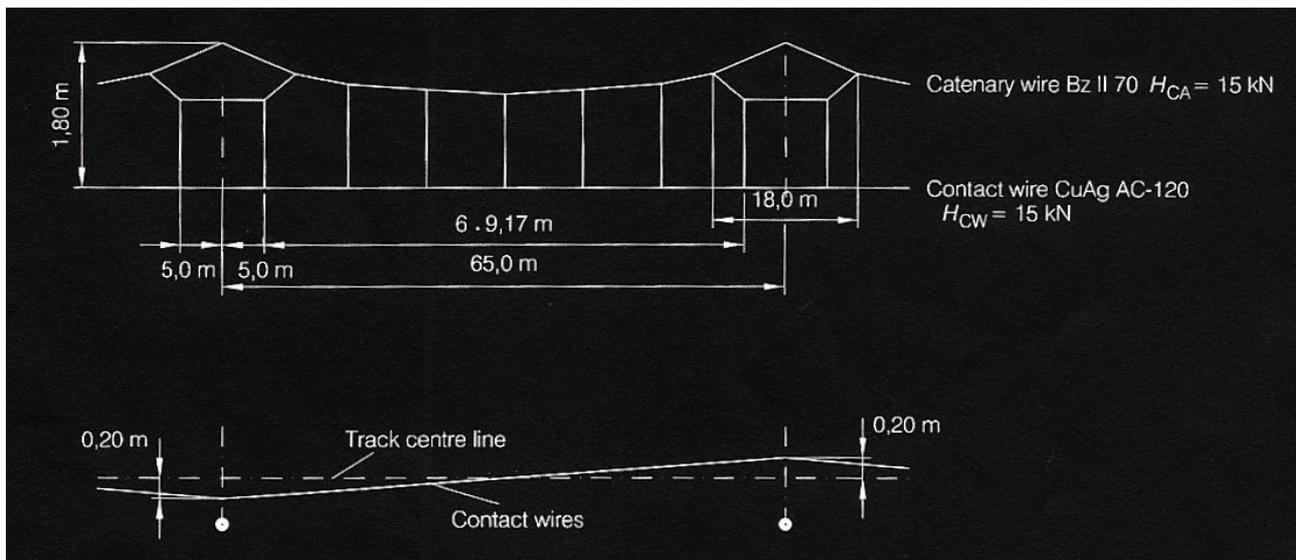
Mensole a bassa manutenzione permettono di cambiare in senso trasversale la posizione della linea di contatto per compensare analoghi cambiamenti di posizione del binario.

Ciò viene realizzato usando morsetti di presa della corda di sostegno scorrevoli sull'asta superiore della mensola.

Ruote dentate con rapporto 1:3 sono usate per mantenere in tensione indipendente la fune di contatto e quella di sostegno.

Sezionamenti sono presenti ogni cinque campate longitudinali.

Palificazioni sostenenti ciascuna una sola linea di contatto sono comuni nei tratti di transito al di fuori delle stazioni, mentre portali con pali di sostegno compatti e che permettono lo spostamento trasversale delle mensole sono presenti nelle aree di stazione.



**Linea di contatto tipo S25 delle JBV (Amministrazione Nazionale Norvegese delle ferrovie)**

Citiamo infine lo schema BN 160 adottato dal gruppo BLS.

Esse hanno ammodernato le infrastrutture e le linee di alimentazione della tratta Berna - Neuenburg sulla direttrice del Loetschberg.

I lavori hanno riguardato anche l'attrezzaggio della linee aeree di contatto secondo lo schema BN 160.

La linea di contatto risulta essere così composta:

- una corda di sostegno a catenaria in acciaio rivestito in rame di 50 mm<sup>2</sup> di sezione e tensionata a 6.75 kN;
- una corda di contatto Cu-Ac 107 tensionata a 13.5 kN.

Le mensole sono composte da aste in acciaio inossidabile o galvanizzato o in lega di alluminio e le parti accessorie in lega di alluminio.

Il morsetto di sostegno e i braccetti fissi sono montati sull'asta orizzontale cosicché da semplificare l'opera di regolazione.

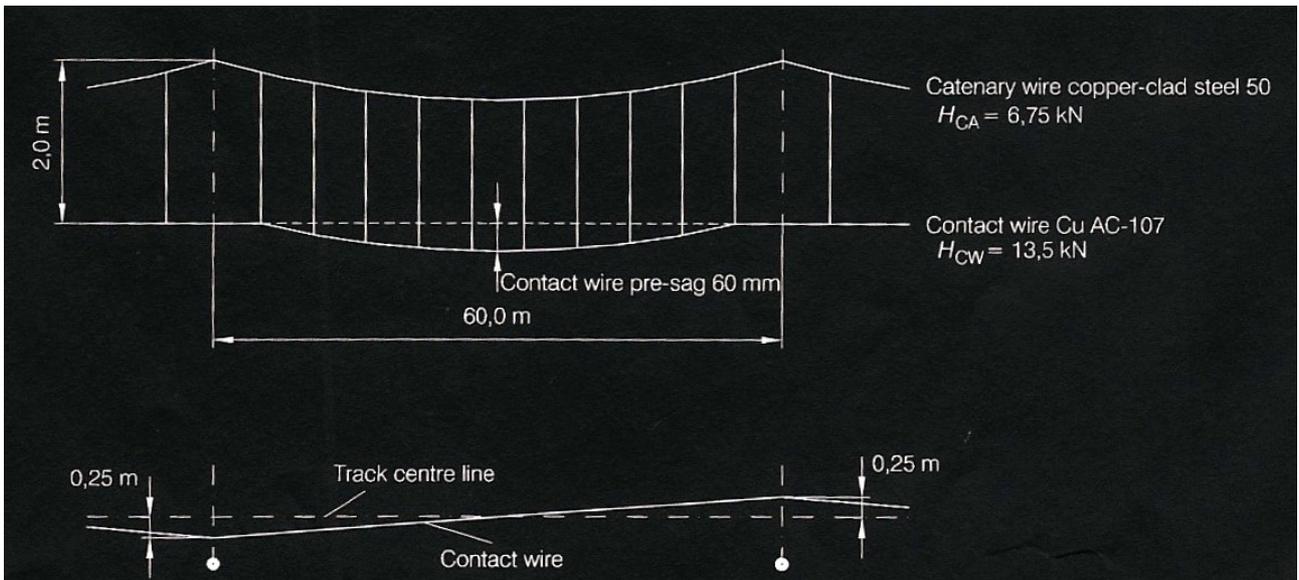
L'asta di registrazione è tenuta in posizione da un montante della mensola.

Nelle aree di stazione le mensole sono assicurate alla palificazione tramite fasce chiuse sul palo stesso o si presentano pendenti dai portali nelle aree a molti binari.

L'isolamento delle linee di contatto è fatto in maniera tale che lavori di manutenzione sulla palificazione, sulle linee parallele a quelle di contatto e sull'illuminazione del fascio binari possono essere svolti senza la necessità di mettere fuori servizio le linee di contatto.

Nelle aree di transito al di fuori delle stazioni comuni sono le palificazioni sostenenti ciascuna una sola linea di contatto separando meccanicamente ed elettricamente una linea dall'altra.

Infine anche nelle sovrapposizioni di linea ciascuna presenta la propria palificazione, il che permette di evitare grossi momenti torcenti applicati alla palificazione stessa.



**Linea di contatto tipo BN 160 delle BLS**

## 4 STRUTTURA DELLA RETE DI ALIMENTAZIONE A FREQUENZA 16 2/3 Hz PER LA TRAZIONE FERROVIARIA DELLE FERROVIE FEDERALI TEDESCHE

### 4.1 La generazione di potenza

L'energia elettrica monofase a frequenza ferroviaria utilizzata per la trazione nelle linee DB proviene per la maggior parte da 12 centrali di produzione dedicate, sia idroelettriche che termoelettriche, e da 10 impianti di conversione centralizzata.

Dei 2588 MW di potenza installata nel 2000 per alimentare la dorsale centrale di trazione, il 57% è situata in centrali termoelettriche, il 29% in impianti di conversione centralizzata, l'8% da centrali idroelettriche, il 6% da impianti di pompaggio.

Il più grosso generatore monofase a frequenza ferroviaria da 187.5 MVA e fattore di potenza 0.83 è installato presso la centrale nucleare di Neckarwestheim, la quale contiene anche altri gruppi per l'alimentazione delle reti civili.

Caso decisamente particolare è anche quello dell'impianto di pompaggio di Lanzenprozelten, dove sono installati due gruppi da 75 MW ciascuno per la copertura i picchi di carico.

Ai 2588 MW della dorsale vanno aggiunti i 608 MW prelevati dalla rete pubblica in stazioni di conversione distribuita con convertitori rotanti da 10 MVA ciascuno a motore trifase e generatore monofase entrambi sincroni.

#### Statistiche di produzione di energia elettrica per la trazione ferroviaria al 31/12/2007

Tipologia di impianti	Potenza Installata [MW - %]	Fonte di energia	Energia [GWh - %]
Di produzione, termoelettrica	1475 - 46	Carbone Nucleare Metano e petrolio	3861 - 34 2350 - 20 1581 - 14
Di produzione, idroelettrica	209 - 7		1223 - 11
Di pompaggio	150 - 5		
Di conversione, centralizzata, a convertitori rotanti	612 - 19		1219 - 11
Di conversione, centralizzata, a convertitori statici	608 - 19		840 - 7
Di conversione, Distribuita, A convertitori rotanti	142 - 4		312 - 3
Insieme degli impianti	3196 - 100		11386 - 100
Consumo DB AG			11300 - 99

## 4.2 Trasmissione dell'energia e alimentazione delle linee di contatto

L'energia elettrica prodotta viene trasmessa attraverso un network composto principalmente di linee aeree a 110 kV di proprietà dell'amministrazione ferroviaria.

Alla fine del 2000 la lunghezza totale delle linee del network ammontava a 7409 km e serviva per alimentare 161 sottostazioni.

A Haltingen e Singen sono tre trasformatori di accoppiamento per la connessione del network delle DB con quello delle SBB, che come abbiamo già visto è a 132 kV.

Mentre a Steindorf e a Zirl la rete DB è collegata direttamente a quella ÖBB che è alla medesima tensione.

Essendo la rete messa a terra in maniera risonante, sono presenti 12 bobine di spegnimento degli archi elettrici compensanti le capacità di linea.

Parte delle linee di trasmissione corrono parallele alle linee ferroviarie nel loro percorso verso le sottostazioni.

Queste ultime possono presentare la configurazione in entra ed esci o quella più semplice solo entrante.

Il network tedesco così costituito permette l'assorbimento in maniera ottimale dell'energia dagli impianti di generazione, di conversione e dalle reti estere e contribuisce alla notevole affidabilità dei sistemi di alimentazione elettrica per trazione ferroviaria.



- Legend:
- == 110-kV interconnected grid
  - ☐ Nuclear power station
  - Thermal power station
  - ⊙ Hydro-power station
  - ⊕ Pump-storage plant
  - ⊖ Rotary converter, central
  - ⊗ Static converter,
  - ⊘ Rotary converter, decentral
  - Substation
  - ⊙ 110-kV station
  - ▲ 15-kV hydro-power plant

Linee di trasmissione a 110 kV di DB Energie GmbH all'1/1/2007

## 4.1 La tipica sottostazione

### 4.3.1 Funzioni e tipologie standardizzate

Si definisce come sottostazione elettrica l'impianto dotato di organi di interruzione, di controllo, di misura e segnalazione.

Con tali apparati è possibile porre in o fuori tensione in maniera rapida selettiva i vari circuiti di sottostazione e anche le linee da essa alimentata oltre alla stessa intera sottostazione.

Tali manovre possono essere programmate o a seguito di un guasto che pregiudica il buon funzionamento (fino all'inservibilità) del complesso o di una parte di esso.

Le sottostazioni, i posti di interruzione e di accoppiamento sono progettate seguendo la direttiva DB 995

Le sottostazioni di tipo standard non richiedono l'intervento umano sul posto per l'esecuzione delle varie manovre, sono costituite da componenti standardizzati a interfaccia standardizzata a sua volta che possono essere composti seguendo teorie modulari.

Sono ora di seconda generazione, a manutenzione, ingombro delle apparecchiature ridotti e installazione semplificata oltre ad elevata presenza di componenti elettronici.

Quelle di prima generazione coinvolgevano appunto un gran numero di componenti elettromeccanici.

Decisivi per la transizione da prima a seconda generazione sono stati l'interruttore MT a vuoto e l'elettronica applicata sia ai sistemi di protezione che a quelli di processo delle informazioni.

La standardizzazione coinvolge:

- le sottostazioni o SS, le quali contengono sia l'area AT che MT;
- le sottostazioni di interruzione, con la sola area AT;
- i posti di interruzione o SP, con varie installazioni MT per l'alimentazione delle linee di contatto;
- i posti di accoppiamento o CP, con il solo interruttore MT.

Le sottostazioni per mezzo di trasformatori abbassano la tensione dell'energia elettrica entrante già a frequenza ferroviaria da 110 kV a 15 kV, che è il valore nominale delle linee di contatto e la trasferiscono ai singoli apparati di alimentazione.

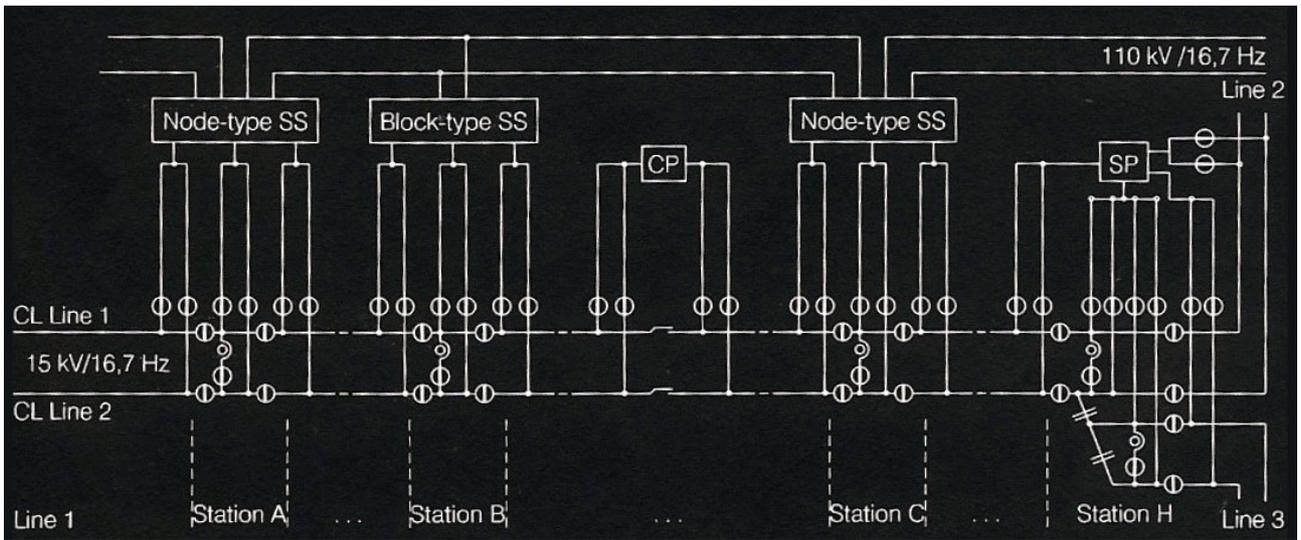
Le sottostazioni di interruzione senza trasformatori si limitano a connettere o disconnettere le varie parti della rete di trasmissione.

Gli SP connettono i feeder alle linee aeree di contatto e forniscono potenza alle sezioni normalmente alimentate a sbalzo.

I CP connettono due sezioni di linea di contatto e si ritrovano con più frequenza ove le sottostazioni sono molto distanziate tra di loro o in caso di lunghi tratti alimentati a sbalzo, garantendo l'adeguato funzionamento delle protezioni.

Le norme attinenti la pianificazione e la costruzione delle sottostazioni sono tutte contenute in un unico capitolato tecnico.

Esso, fra i numerosi documenti di progetto e diagrammi circuitali che sono la base per la pianificazione e costruzione delle sottostazioni definite standard, contempla pure le interfacce standardizzate permettendo l'uso e lo sviluppo di componentistica di produttori diversi ma perfettamente identici per quanto riguarda la funzioni che svolgono.



**Schema basilare di alimentazione delle linee di contatto delle DB**

### 4.3.2 Gli apparati AT all'aperto

Tali apparati sono costruiti sempre rispettando i dettami della direttiva DB 955.

Si riscontrano tre tipologie degli stessi:

- apparati AT con due sbarre omnibus, due circuiti di isolamento longitudinale e uno di accoppiamento;
- apparati AT con una singola sbarra omnibus e due circuiti di isolamento longitudinale;
- apparati AT per la configurazione solo entrante.

Gli apparati AT in esterno sono scelti in base alla tipologia di sottostazione che si vuole costruire. Notiamo che gli interruttori lato AT sono presenti in qualunque tipologia, mentre mancano sul lato MT (di alimentazione delle linee di contatto) nel caso di sottostazioni a configurazione solo entrante.

Sottostazioni con configurazione solo entrante sono usate come sottostazioni intermedie tra due sottostazioni in configurazione entra ed esci a dotazione completa.

L'interruttore lato MT della sottostazione a configurazione entrante si dimostra superfluo perché quelli MT delle sottostazioni complete adiacenti proteggono in maniera efficace tutto il tratto di linea compreso tra esse, compreso dunque quello nelle vicinanze della sottostazione intermedia.

Gli interruttori e i sezionatori, così come i trasformatori di misura e le bobine di messa a terra sono standardizzati nella parte elettrica, in quella meccanica e nella geometria, cosa che permette l'intercambiabilità fra componenti di case costruttrici diverse ma dalla medesima funzione.

Nelle sottostazioni, siano esse con o senza trasformatori, le singole linee entranti sono connesse alle sbarre omnibus del tipo AI-St 300/50 o AI-St 1045/45 tramite un collegamento bifase a conduttori singoli o a fascio del tipo ACSR 300/50.

L'insieme di questi conduttori costituisce il settore "linee aeree di trasmissione" della parte AT della sottostazione.

Le corde delle linee aeree di trasmissione sono ancorate ai supporti di sezione o ai supporti di fine linea aerea con sospensioni verticali.

Passato l'ultimo pilone delle linee di trasmissione, il cablaggio di ogni singola linea trova un sezionatore di linea del tipo rotante a due poli con giunzione di terra, con circuito di innesco a 60 V così come avviene in tutte le sottostazioni standard di seconda generazione.

L'interruttore è invece del tipo bipolare a camera riempita in SF<sub>6</sub>, innescato da molle o da un circuito pneumatico.

Nelle vicinanze dell'interruttore troviamo i trasformatori di misura voltmetrici e amperometri, in olio e a polo singolo.

Il trasformatore di potenza, uno per linea entrante, monofase da 15 kVA, del tipo in olio, ONAN è specificatamente concepito per l'uso mobile in esterno.

È dotato di trasformatore di corrente e di un sistema di limitazione della stessa, il quale è efficace nell'evitare la perdita degli avvolgimenti a causa dei circa 150 corti circuiti che avvengono mediamente in un anno.

Normalmente isolato dalla terra vi è connesso se necessario tramite un trasformatore di protezione da perdite del cassone.

Nelle sottostazioni a doppia sbarra omnibus sono presenti inoltre sezionatori di sbarra.

I sezionatori longitudinali di sbarra recano uno o due contatti di terra.

Funzione dei sezionatori di sbarra è quella di permettere l'alimentazione di un trasformatore di potenza tramite la linea normalmente dedicata al gemello, se la propria non risulta in servizio.

La disposizione dei poli di un sezionatore di sbarra dipende dallo schema degli apparati che lo seguono lungo il percorso della corrente.

L'apertura dei contatti polari può essere di un polo da parte opposta rispetto all'altro o dalla stessa parte, il che comporta un diverso distanziamento dei poli stessi.

Dato che le reti di trasmissione a 110 kV di proprietà ferroviaria sono messe a terra in maniera

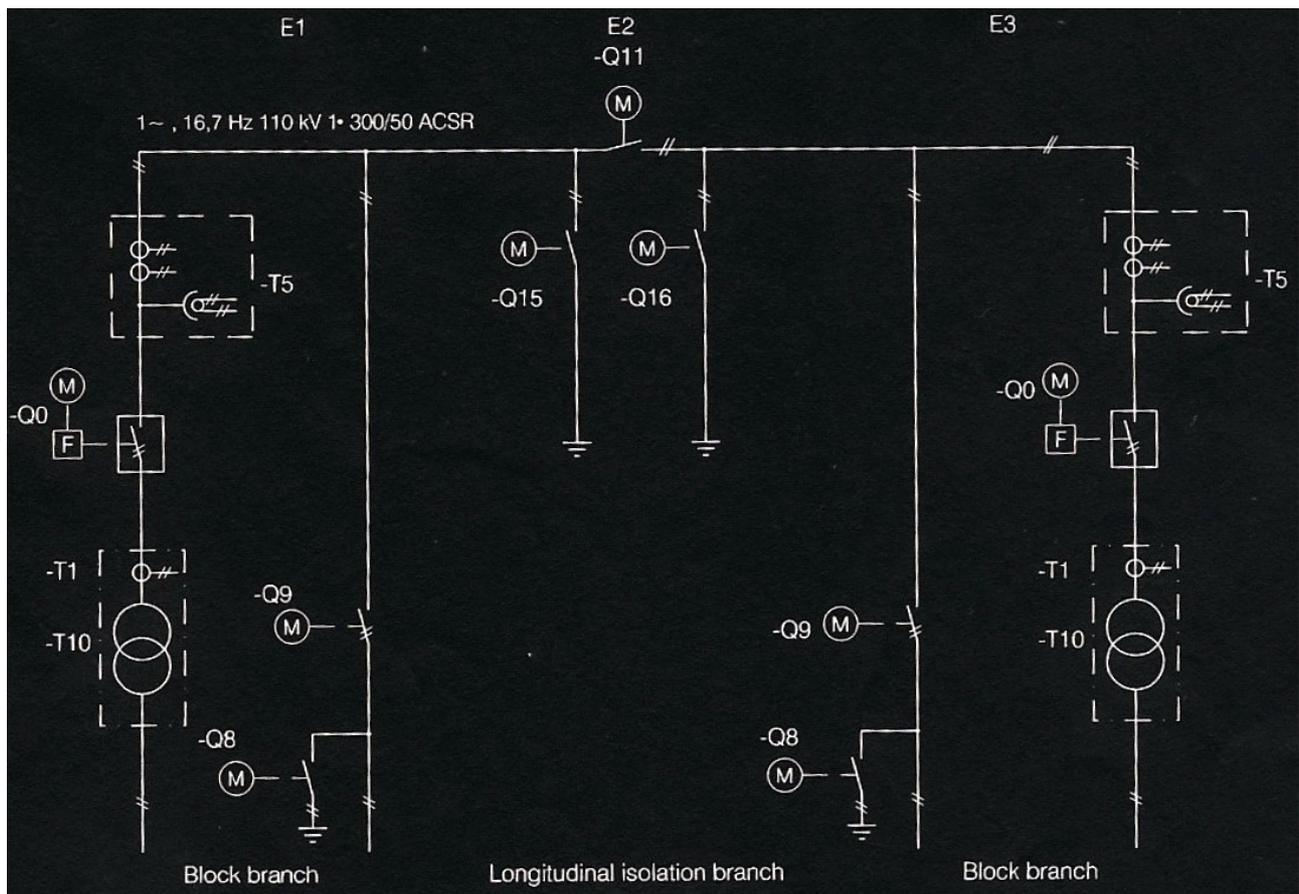
risonante, in talune sottostazioni sono installate bobine di spegnimento d'arco con zona a potenziale zero.

Le bobine di spegnimento d'arco sono progettate con avvolgimento su nucleo compatto e regolazione a gradini o avvolgimento plunger e corrente induttiva da 10 a 100 A nel caso servano come controllori di frequenza.

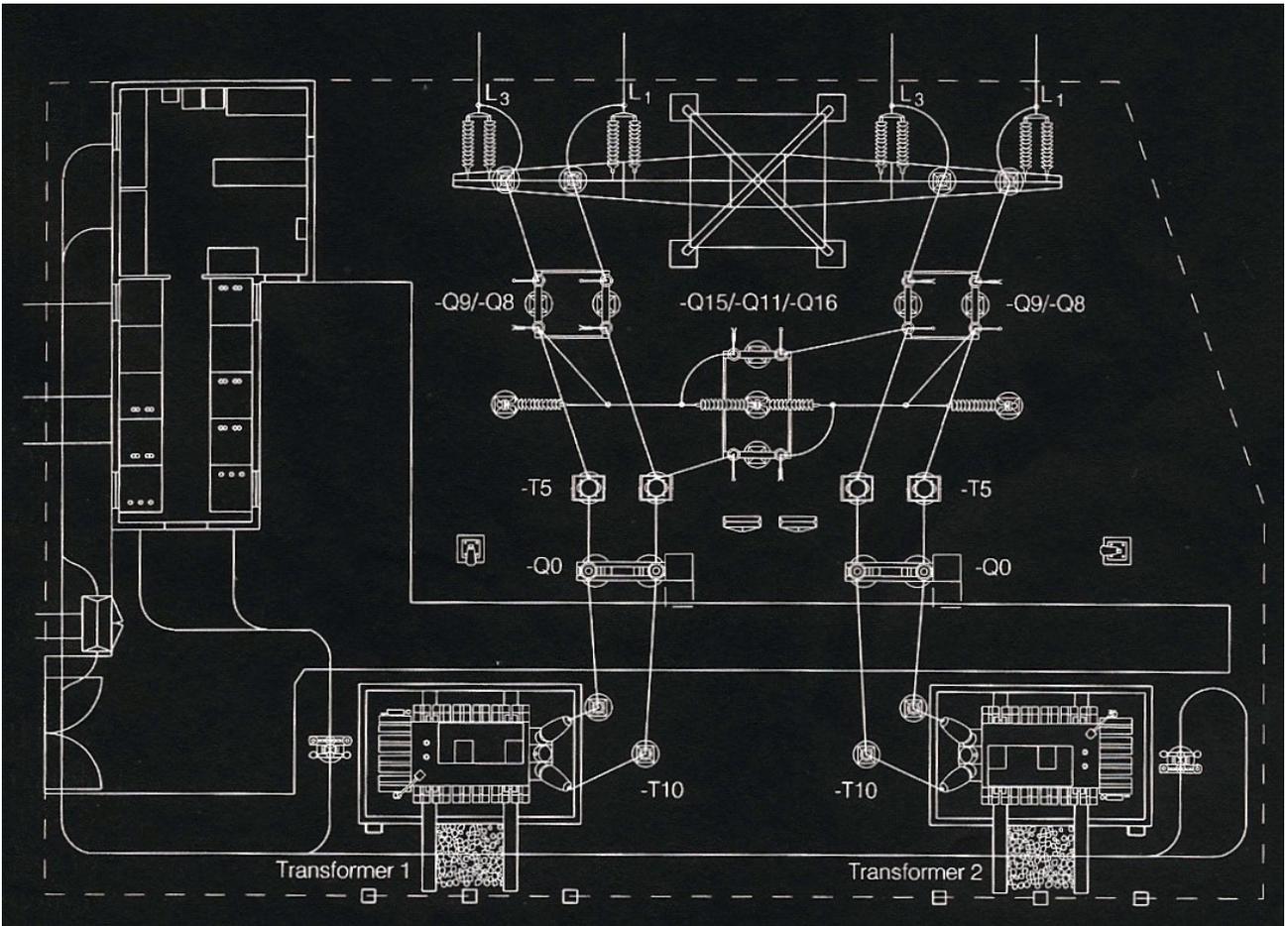
La maglia di terra risulta composta di conduttori in rame stagnato di sezione 95 mm<sup>2</sup>, è connessa da un lato anche a tutte le strutture in acciaio e dall'altro a dispersori sferici.

La protezione dalla fulminazione atmosferica viene conseguita tramite ombrelli parafulmini e funi di guardia connesse a terra poste al di sopra delle linee di potenza e delle sbarre omnibus.

Segnaliamo inoltre che in talune sottostazioni, qualora le linee a 110 kV vengano usate anche per le telecomunicazioni, sono installate apparecchiature per la trasmissione a frequenza portante con bobine di blocco selettivo di determinate frequenze e condensatori di accoppiamento.



**Schema circuitale generale del reparto AT di una sottostazione in configurazione solo entrante**



**Visione dall'alto del reparto AT di una sottostazione in configurazione solo entrante**

### 4.3.3 Gli apparati MT in interno

A livello di media tensione, i tipici apparati in interno sono principalmente di tre tipologie:

- installazioni a 15 kV con una sbarra omnibus in esercizio e una di testaggio e due sistemi di connessione/isolamento longitudinale;
- installazioni a 15 kV con una sbarra omnibus in esercizio e una di testaggio ma senza sistemi di connessione/isolamento longitudinale;
- installazione a 15 kV con la sola sbarra omnibus in esercizio.

La prima tipologia è la più diffusa nelle sottostazioni e nelle SP.

Data l'alimentazione bilaterale di ciascuna sezione di linea di contatto (definita dal tratto tra due sottostazioni adiacenti) per mezzo dell'accoppiamento longitudinale delle sub-sezioni (definite dalla zona di influenza di ciascuna direzione di alimentazione di sottostazione), oltre che trasversale se la linea ferroviaria è a due binari, la sub-sezione è alimentata da un solo reparto MT di alimentazione.

La tipica sottostazione contiene perciò tre reparti MT di alimentazione indipendenti, due in esercizio (uno per direzione) e uno di riserva, facenti capo però ai soliti due trasformatori AT/MT in esterno.

La sbarra omnibus in esercizio o OBB è costituita di uno o due strisce in rame di spessore 10 mm e larghezza 80 mm.

Nell'esercizio regolare connette tutti e tre i reparti MT.

Mentre la sbarra omnibus di testaggio o TBB serve, come dice il suo nome, per i test di tensione sulle linee di contatto e i circuiti di ritorno della corrente.

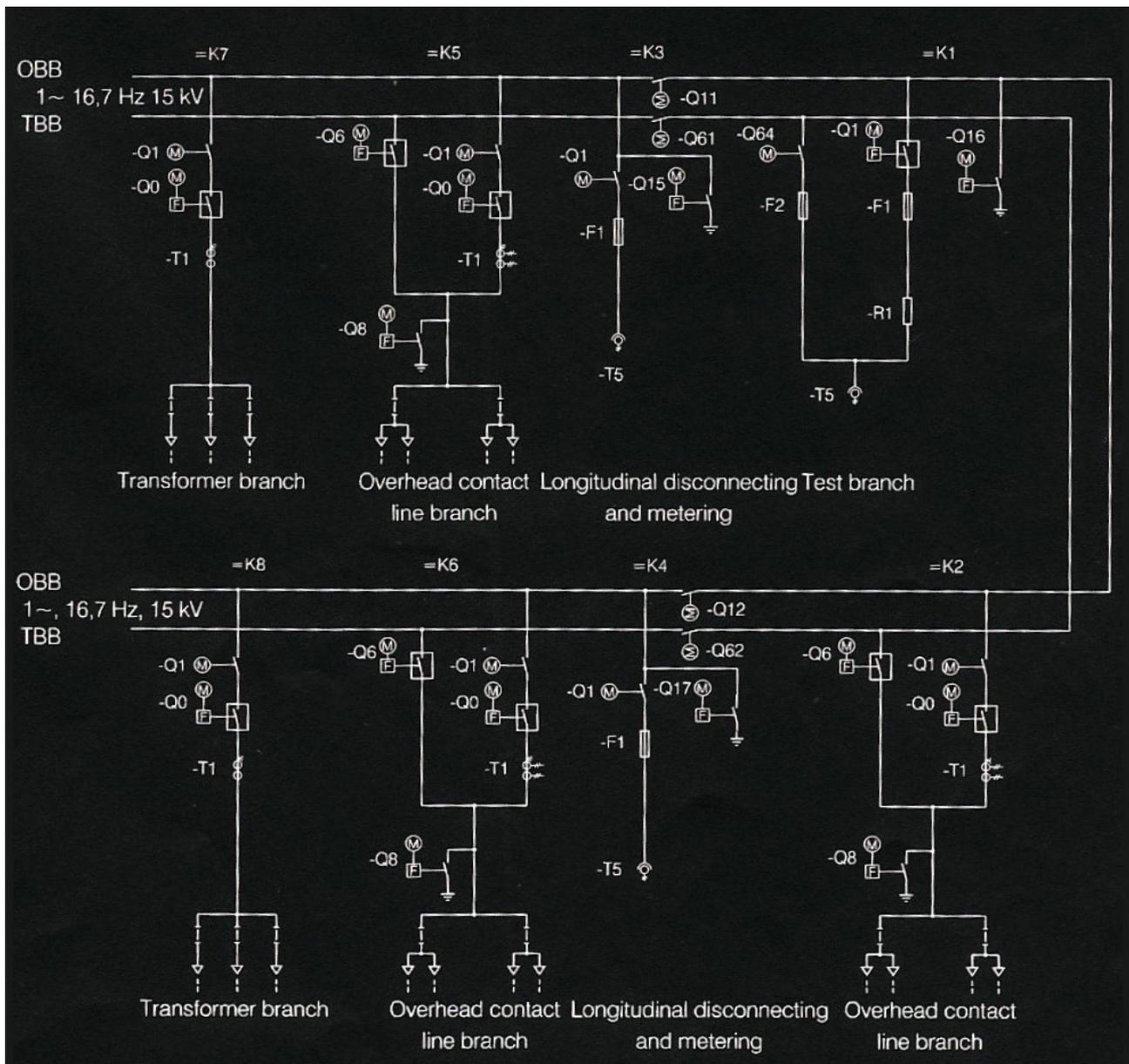
È costituita da strisce in rame di spessore 5 mm e larghezza 50 mm.

Le due sbarre corrono parallele e lungo un percorso a U, se visto dall'alto.

Il percorso a U può essere visto come unione di tre sezioni, una per reparto MT

Le tre sezioni, normalmente collegate, possono essere disconnesse per l'esecuzione di lavori di manutenzione per mezzo dell'apertura (indipendente) dei quattro sezionatori longitudinali, in totale due per sbarra posizionati in gruppi di due fra un reparto MT e il successivo.

Ciascuno dei due punti di disconnessione longitudinale presenta un proprio circuito di misura dei parametri di linea.

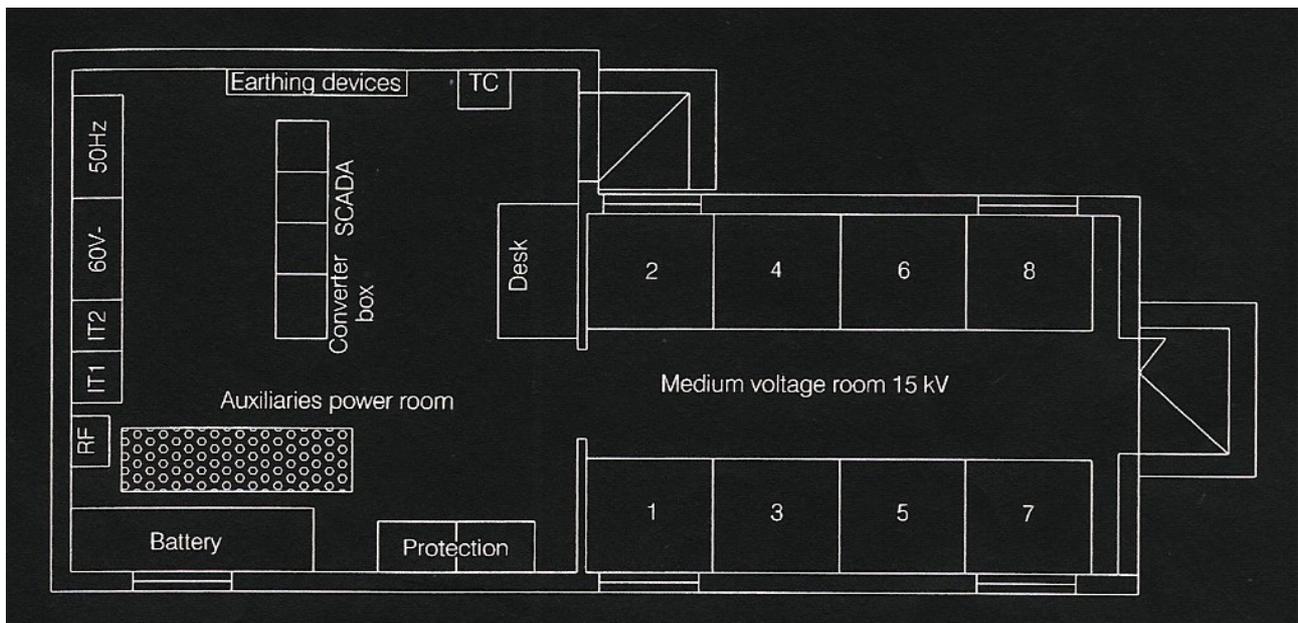


### Schema circuitale generale del reparto MT di una sottostazione

Le sbarre sono in aria, ma poste all'interno di gabbie sovrapposte in acciaio, una per sbarra. Lo spazio interno alla U costituisce un passaggio centrale di ispezione con soffitto anti-arco e ingressi a porte in acciaio compatto.

Il telaio principale di sostegno e le gabbie in acciaio sono isolate dal resto dell'edificio e collegate a terra tramite un trasformatore di corrente con rapporto di trasformazione 1000 a 1.

A ciascuna suddivisione dell'area MT, sia esso in esercizio (alimentato o alimentante), di riserva, per test o misure, è assegnato un cubicolo numerato.



### Disposizione del reparto MT e degli apparati secondari in una sottostazione o SP di tipo K8

Gli apparati contenuti in ciascun cubicolo sono connessi ai rispettivi usi per mezzo di interruttori a vuoto con un meccanismo di apertura e uno o due tubi all'interno di spegnimento dell'arco dei quali è stato fatto il vuoto.

La scelta della configurazione a uno piuttosto che due tubi dipende dalle correnti nominali da tenere in stato di chiusura (1600 - 2000 A) e da quelle di corto-circuito sul quale aprire (20 - 50 kA) previste nel punto di installazione dell'interruttore.

La connessione interruttore - sbarra è del tipo a strisce di rame.

Un interruttore a molle di apertura comandate da un circuito in corrente continua a 60 V a prova di guasto è in grado di aprire in circa 17 ms.

Per quanto riguarda i sezionatori, sono del tipo scorrevole nell'accoppiamento longitudinale di sbarra, del tipo a selezione per il circuito di testaggio.

Il sezionatore di sbarra di esercizio tollera in chiusura 1600 A di corrente nominale, quello di messa a terra persino la corrente di corto circuito.

Nel reparto attinenti alle linee aeree di contatto e alle linee di feeder, ma anche in quello di trasformazione di potenza sono usati dei trasformatori di misura amperometrica ad avvolgimenti immersi in resina con tensione nominale di 24 kV.

Per misurare la totale corrente di impianto, quella dei trasformatori di potenza e della maglia di terra si usano trasformatori a secondario in bassa tensione ad avvolgimenti immersi in resina pressata, collocati nel cubicolo della sbarra di neutro.

Nelle SP e CP con sbarra di esercizio distinta da quella di testaggio sono usati trasformatori di tensione da 50 VA per le misurazioni dei parametri di linea e per il testaggio.

I trasformatori di misura del reparto misurazioni sono protetti da fusibili posizionati a monte del trasformatore stesso.

Il reparto test presenta a sua volta unità di protezione a fusibili, nel numero di due come i morsetti (di OBB e di TBB rispettivamente) a cui è connesso.

Essi sono posizionati a monte della resistenza di limitazione della corrente del circuito stesso.

#### 4.3.4 L'alimentazione dei servizi ausiliari di sottostazione

L'alimentazione dei servizi ausiliari di sottostazione segue uno schema gerarchico individuato dall'ordine di importanza di ciascuno degli apparati individuato come ausiliario nel mantenere funzionanti i dispositivi di alimentazione e protezione e con essi l'esercizio ferroviario in trazione elettrica.

Sono individuati perciò due gruppi di ausiliari, di cui il primo è il meno importante.

Appartengono al primo quegli apparati che possono andare fuori servizio per breve periodo o anche essere alimentati direttamente dalla rete pubblica, frapponendo solo un trasformatore a secondario in bassa tensione Dyn a potenza da 10 a 40 kVA che comunque funge anche da filtro per la sottostazione dalle perturbazioni della rete pubblica.

Pensiamo ad esempio all'illuminazione, al riscaldamento/condizionamento o all'alimentazione delle prese elettriche.

Al secondo gruppo fanno riferimento gli apparati che richiedono di essere alimentati con continuità. Citiamo le installazioni di protezione e attuativi e lo SCADA.

Essi sono alimentati da una rete DC a 60 V presente in loco supportata principalmente da convertitori ridondanti AC/DC alimentati dalla rete AC di stazione in bassa tensione.

L'uscita DC alimenta la rete DC di stazione e mantiene in carica le batterie ridondanti, le quali possono fare le veci del convertitore nell'alimentazione della rete DC.

Il controllo del sistema convertitore - batterie avviene in una stanza apposita.

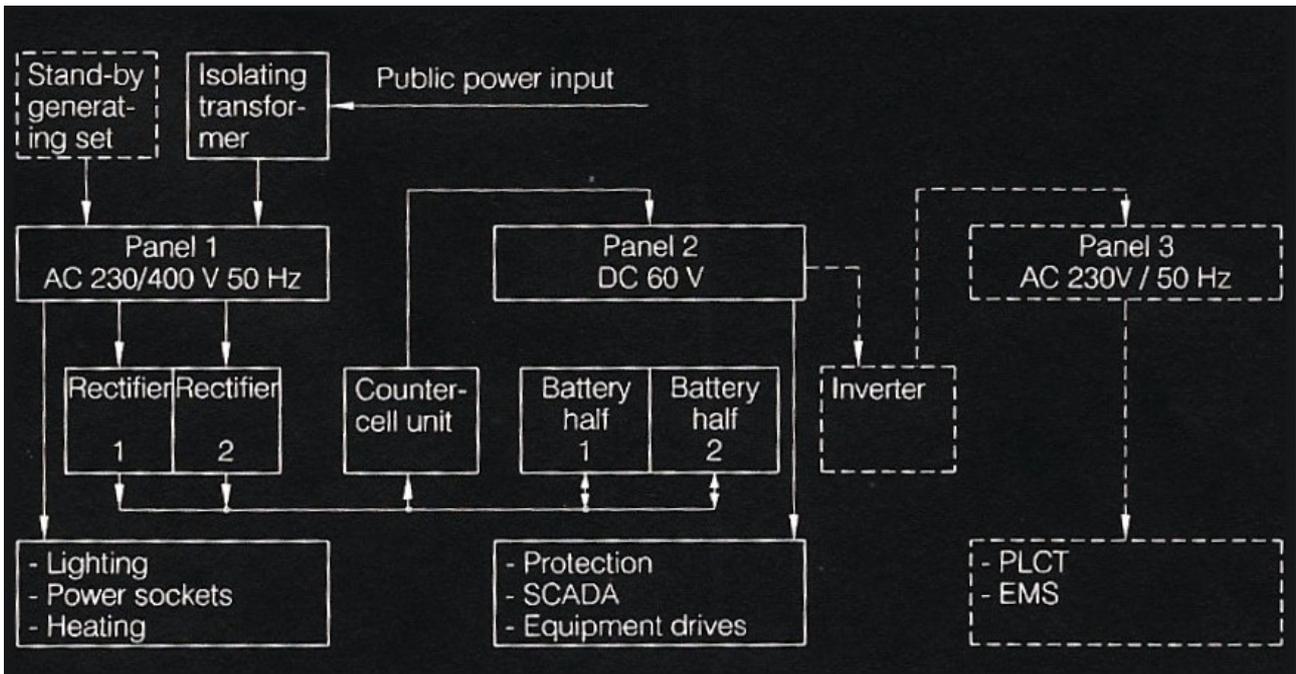
Notiamo che la rete AC di stazione a bassa tensione, oltre alla connessione principale tramite trasformatore alla rete pubblica, presenta una seconda possibilità di alimentazione da gruppo elettrogeno il quale deve necessariamente entrare in servizio se l'alimentazione da rete pubblica risulta assente per un tempo superiore alle cinque ore.

Sempre per quanto riguarda gli apparati ad alimentazione non interrompibile troviamo quelli in corrente alternata a bassa tensione, come il modulatore PLCT per trasmissione a frequenza portante o quello per il governo della sezione neutra di emergenza.

Tale corrente alternata a bassa tensione circola in una seconda rete di stazione alimentata tramite inverter dalla rete DC di stazione.

Caso particolare è quello delle CP dove l'energia richiesta per l'alimentazione dei servizi ausiliari è prelevata dalle linee a 15 kV, opportunamente abbassata in tensione e fornita agli ausiliari stessi.

Inoltre il circuito di carica delle batterie è collegato a convertitori AC/DC propri.



**Schema basilare del sistema di alimentazione degli ausiliari di stazione di una sottostazione o SP delle DB (linea continua: in ogni impianto; linea tratteggiata: installati se richiesti)**

### 4.3.5 La protezione

Nelle CP è presente solo il sistema di protezione delle linee di contatto.

Nelle SP questa è accompagnata dalla protezione generale.

Nelle sottostazioni a configurazione solo entrante si ritrova anche il circuito di protezione del trasformatore di potenza.

Le sottostazioni senza trasformazione sono dotate delle sole protezioni delle reti di trasmissione.

Le sottostazioni in configurazione entra ed esci risultano essere le più complete per la dotazione di tipologie di protezione.

Presentano protezione generale, delle linee di trasmissione, dei trasformatori di potenza e delle linee di contatto.

Parlando di protezione generale ci riferiamo a quella a tre funzioni quali:

- protezione delle sbarre omnibus la quale scatta immediatamente sulla corrente di corto circuito nella dorsale a 15 kV (rilevata superiore ai 0.5 kA al secondario del trasformatore di corrente) aprendo grazie al circuito di attuazione normale o di riserva tutti gli interruttori locali del lato MT, e anche AT ove presente;
- monitoraggio degli interruttori, attivato dal comando di apertura degli interruttori stessi che provoca l'apertura degli interruttori non ancora scattati al tempo prestabilito;
- monitoraggio della totale corrente, il quale apre tutti gli interruttori lato MT quando la corrente rilevata dal trasformatore di corrente totale supera un valore che è possibile regolare per un periodo specifico.

La protezione generale offre un'importante opera di sostegno.

La protezione delle linee aeree di trasmissione consiste in un'unità statica nelle sottostazioni di seconda generazione, di tipo digitale dopo il 1993.

L'unità opera secondo gradini temporali e selettivi della direzione di alimentazione, con aree poligonali di intervento, uso di relè di terra, individuazione direzionale del guasto ad alta sensibilità, localizzazione del guasto, apertura rapida su correnti di corto-circuito e chiusura automatica.

Lo scambio di informazioni con il centro di controllo delle reti di alimentazione avviene per mezzo di contatti seriali a fibra ottica.

La localizzazione del guasto è possibile tramite misura dell'impedenza di linea.

Rilevata un'impedenza di linea tale da far supporre di essere in regime di guasto, si procede alla misura della fase della stessa al fine di individuare quale delle linee di contatto afferente alla stazione è posta in corto-circuito.

A seconda del modulo e della fase dell'impedenza di guasto misurata, considerando anche se la rilevazione coinvolge sia i conduttori che i circuiti di terra, l'ordine di apertura degli interruttori viene dato in maniera temporizzata.

Un analogo relè di guasto a terra transitorio viene usato per rilevare e misurare la corrente di terra di corto circuito.

Esso fa comparire un segnale di guasto a terra transitorio (direzionale) o permanente alle uscite binarie dei relè di protezione.

Se il guasto è a terra, le linee e le sottostazioni da esse alimentate possono restare in servizio per un tempo limitato di massimo 2 ore.

L'unità di protezione del trasformatore di potenza, di tipo statico (e digitale dal 1995) la si ritrova nelle sottostazioni di seconda generazione.

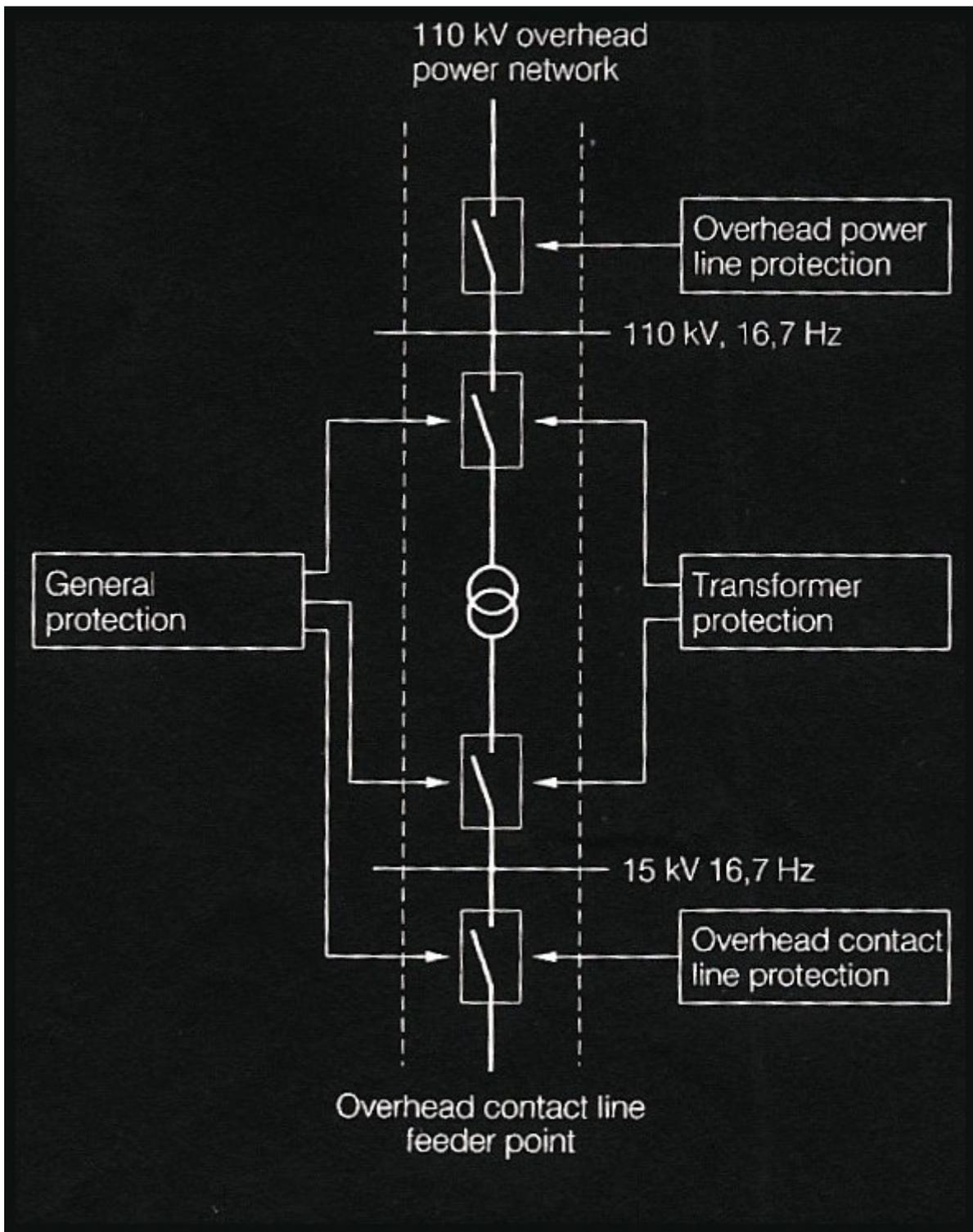
È composta da una protezione sul lato AT e MT dalle elevate correnti permanenti, da una protezione del cassone, la quale misura la corrente di guasto nel trasformatore di protezione del cassone, così come da apparati di riporto dell'attività del sistema Buchholz e dell'interruttore passo-passo.

Dato che le sottostazioni in configurazione solo entrante non sono dotate di protezioni delle linee di trasmissione, nei loro relè di protezione dei trasformatori di potenza sono aumentate le impedenze di protezione.

La protezione del trasformatore di potenza di tipo digitale contiene inoltre un sistema di protezione differenziale, uno di protezione da sovratemperatura e altri sistemi di archiviazione dei dati riguardanti le attivazioni delle protezioni stesse.

Nelle sottostazioni in configurazione entra ed esci invece un'unità centralizzata di stazione si occupa dell'archiviazione ed eventuale trasmissione fuori stazione dei dati riguardanti l'attivazione delle protezioni.

Ci occuperemo in un paragrafo dedicato delle protezioni delle linee di contatto.



**Schema basilare dei sistemi di protezione di una sottostazione delle DB**

### 4.3.6 Lo SCADA

Si definisce come sistema di supervisione per il controllo e l'acquisizione dei dati o SCADA il sistema centrale di controllo, automazione, trattamento e trasferimento delle informazioni conforme con i requisiti trazione-specifici degli apparati standardizzati di interruzione lato MT.

Inizialmente usato dalla metà degli anni '70 solo come registratore di eventi, si è sviluppato nel corso degli anni fino a diventare un vero e proprio centro di controllo multifunzionale di stazione. La connessione agli apparati di potenza AT e MT, agli ausiliari di stazione e alle protezioni avviene per mezzo di cablaggi dedicati schermati (e schermo messo a terra a entrambe le estremità) nel pieno rispetto dei dettami della compatibilità elettromagnetica.

La connessione dello SCADA con tutti gli apparati di interruzione e i trasformatori di corrente rende superfluo l'uso di apparati di controllo localizzati.

Lo SCADA si compone di sette branche funzionali, quali:

- controllo locale;
- componentistica di automazione;
- trattamento dei segnali e dei valori rilevati;
- monitoraggio ed elaborazione digitale dei rilevati dalla strumentazione;
- sistema di controllo in remoto;
- sistemi di interblocco;
- implementazione.

Il controllo locale sotto forma di pulsanti installati nel pannello frontale e segnalazione a LED è stato usato sino al 1993.

Esso richiedeva l'uso di due mani.

Ora la segnalazione è a monitor, ove gli apparati controllati e il relativo stato possono essere visionati operando a mano singola.

Una tastiera permette poi di agire sugli apparati.

Sono presenti poi numerose funzioni integrative, a esempio possibilità di impostare parametri e funzioni stesse, assunzione di responsabilità, consultazione della lista degli eventi di guasto e delle manovre programmate, il che permette un dialogo completo tra il sistema SCADA e l'operatore.

I componenti di automazione permettono la presenza nel network di sottostazioni a ridotto o assente personale operativo.

Sono di cinque tipi, quali:

- testaggio automatico delle linee di contatto o ACLT;
- testaggio automatico della polarità inversa delle linee di contatto o ACLRT;
- richiusura automatica degli apparati proposti all'alimentazione delle linee di contatto o ACLR;
- automazione della gestione della sezione neutra di emergenza o AENS;
- apparati automatici di sincronizzazione del lato AT e MT.

L'ACLT verifica l'assenza di correnti di corto circuito nel reparto MT prima della chiusura degli interruttori e comunque dopo l'attivazione di un qualsiasi apparato di protezione delle linee di contatto.

Fatto ciò, si provvede alla connessione delle linee di contatto con la sbarra omnibus di testaggio e al circuito di test vero e proprio chiudendo i sezionatori attinenti alla sbarra di testaggio stessa.

Si fa riferimento alla tensione rilevata per mezzo del trasformatore di tensione presente nel circuito di test.

Se il suo valore è superiore ai 7 kV, il test è considerato superato e istantaneamente avviene la richiusura automatica degli interruttori tranne che nel caso di attivazione del circuito di protezione di riserva o di protezione da sovratemperatura fin tanto che linee di contatto non si sono raffreddate. Un test non superato non permette la richiusura e viene segnalato al centro di controllo principale o CC.

Una procedura condotta automaticamente in tale maniera evita la ricomparsa di correnti di corto

circuito sequenziali e degli effetti delle stesse, riducendo quindi l'usura dei componenti. Siccome inoltre grazie ad essa il tempo trascorso tra l'apertura e la richiusura degli interruttori può ridursi ad un tempo inferiore ai 10 s, la circolazione ferroviaria non subisce disagi. Se poi diverse linee di contatto vengono messe fuori tensione in maniera simultanea, le varie procedure del test vengono eseguite in una sequenza che è modificabile al fine di riportare in servizio prima le linee più importanti.

L'ACLRT controlla la presenza di una tensione inversa alla linea di contatto quando si ordina la chiusura del sezionatore di terra. Definiamo tensione inversa alla linea di contatto quella può comparire alla stessa dopo l'apertura dell'interruttore.

Dopo un auto test del circuito di misura, il circuito di test viene disconnesso dalla sbarra di esercizio e questa dalla linea di contatto passando alla connessione del circuito di test e linea di contatto per mezzo della sbarra di test.

Se la tensione inversa misurata attraverso il trasformatore di tensione del circuito di test si attesta sotto un valore prestabilito, anche tenendo conto della tensione indotta dalle altre linee di contatto e feeder, il test può dirsi superato e il sezionatore di terra viene chiuso automaticamente.

L'ACLR è installato in sottostazioni senza circuito di test e provvede alla richiusura automatica degli interruttori dopo che le protezioni sono intervenute. La tensione di esercizio è già ricomparsa in un tempo prestabilito dopo i test condotti dalla sottostazione adiacente "completa".

L'AENS è tipica di quella parte di network esercito a conversione distribuita. Esso controlla l'attività dei sezionatori e la segnalazione della stessa presso le sezioni neutre. Si procede alla messa in tensione della sezione neutra di emergenza solo se è completato l'accoppiamento di stazioni adiacenti di conversione distribuita tramite connessione delle sbarre omnibus afferenti ad una e all'altra.

L'ASD verifica la sincronizzazione in fase e modulo delle reti e parti di esse prima di permettere la chiusura dell'interruttore. Si tiene comunque di ammesse differenze di tensione causate da carichi diversi fra le linee o eventuali circuiti di bypass se un lato è fuori tensione.

Il sistema di elaborazione dei segnali e dei valori rilevati provvede all'acquisizione e alla preparazione dei segnali standardizzati di servizio.

Tra le tipologie di segnali recepiti ed elaborati figurano quelli riguardanti lo stato degli interruttori, le perturbazioni di rete, le anomalie di tensione, corrente, potenza attiva e reattiva ed essi sono fondamentali per l'esercizio regolare e in regime di guasto delle sottostazioni senza personale. I valori dei parametri di linea sono rilevati grazie ai trasformatori di misura ed elaborati in ampie strutture le quali recepiscono misure periodiche e su richiesta calcolandone il valore limite, di soglia e medio tenendo conto delle oscillazione delle misure stesse e grazie ad uno speciale algoritmo anche delle correnti di interferenza nelle linee di contatto e nei circuiti di misura..

Nella parte occidentale delle ferrovie tedesche, tutti gli apparati dediti all'alimentazione delle linee ferroviarie sono dotati di sistemi di esportazione dei valori misurati dei parametri assieme allo stato dei sezionatori e interruttori AT.

L'esportazione avviene, per mezzo di connessioni dedicate di controllo remoto, verso il centro di controllo delle reti situato a Francoforte sul Meno.

Dal 1994 le nuove installazioni presentano nel proprio apparato di processo delle informazioni un'integrazione di misura, monitoraggio e pre-elaborazione. I valori di potenza attiva e reattiva ottenuti dagli strumenti di misura, pre-elaborati secondo un algoritmo che tiene conto anche dell'istante della misurazione, vengono inviati ogni pochi minuti al centro di controllo generale.

L'interblocco, a controllo computerizzato, individua il guasto e ne segue l'andamento a partire dalle indicazione di stato dei vari interruttori e sezionatori, limitati però a uno per sezione al fine di

ridurre gli errori di interblocco stesso.

I sezionatori e gli interruttori lato AT con contatti di terra non sono indipendenti ma legati agli altri nel funzionamento con interblocchi fisici.

I vecchi sistemi SCADA era attrezzati con implementazione a relè dei segnali e comandi in loco o da remoto ma i componenti di automazione, la zona di arrivo dei segnali e di partenza di comando si trovavano nel medesimo luogo.

Decisivo per lo sdoppiamento dei luoghi adibiti alle varie funzioni fu l'introduzione del controllo a display.

Ora, al fine di avere un sistema a prova di guasto, le informazioni sono processate da più computer. Il sistema inoltre dà molto spazio alle strutture del tipo user-friendly per la regolazione dei parametri, all'analisi degli eventi di guasto e alle tecniche di rapida sostituzione degli elementi difettosi.

### 4.3.7 Edifici principali e strutture di supporto

Gli edifici standardizzati principali atti ad ospitare al loro interno gli apparati MT e quelli secondari risultano del tipo prefabbricato con isolamento termico costruiti su banchine di fondazione e lastre in cemento.

L'armatura metallica rinforzo delle parti in cemento, incluso il tetto prefabbricato, è connessa con sbarre di terra ai dispersori delle fondazioni, individuando nell'insieme una gabbia di Faraday.

Sudette sbarre di terra possono sopportare correnti di corto-circuito da 40 kA per un secondo.

Nelle SP il circuito di terra delle fondazioni è connesso tramite la sbarra principale di compensazione del potenziale e cavi di messa a terra ai binari.

Nelle sottostazioni invece per mezzo del cubicolo di sbarra neutra e cavo conduttore di ritorno della corrente.

Sia le SP che le sottostazioni usano edifici tipo K a due stanze o tipo GW con stanze allargate per l'alloggiamento degli apparati ausiliari e piccola officina.

Generalmente il tipo GW è destinato alle sottostazioni con configurazione in entra ed esci.

Ritroviamo K da 4 a 16 o GW da 10 a 20.

La cifra che segue la lettera sta ad indicare in numero di cubicoli larghi ciascuno 1.4 m dedicati al reparto MT.

La stanza contenente il reparto MT è separata dal resto tramite muri e porte resistenti alla fiamma e tagliafuoco.

Il suo interno è pressurizzato positivamente a 0.16 bar rispetto alla pressione esterna.

Presenta botole di ventilazione per la compensazione della pressione dell'aria e sistemi di ventilazione funzionanti in modalità temperatura - dipendenti per i resistori dei dispositivi di testaggio delle linee contatto.

L'entrata dei cablaggi nel reparto avviene tramite aperture tubolari.

La pavimentazione è a strati il che permette la stesura di cavi.

La stanza dedicata agli apparati secondari o ausiliari di stazione presenta ventilazione forzata a batteria.

Ventilazione forzata è presente pure nell'eventuale officina.

Le stazioni di smistamento a 110 kV non presentano né trasformatori di potenza all'esterno né reparto MT in interno.

Le CP, a differenza delle SP, usano una struttura compatta mobile in quanto non richiedono molto spazio per l'installazione delle proprie apparecchiature.

Per quanto riguarda invece i sistemi di messa a terra e di ventilazione sono del tutto simili alle SP.

Considerato un qualsiasi impianto senza personale operante, la minima temperatura ammessa nel locale di alloggiamento degli ausiliari di stazione (se presenti) è +5 °C, nel reparto MT - 5 °C.

Per quanto riguarda i dispositivi di interruzione in esterno delle linee a 110 kV, essi sono installati su supporti zincati a caldo posti su fondazioni circolari o a blocco di cemento colato in loco o prefabbricate a seconda del tipo di suolo.

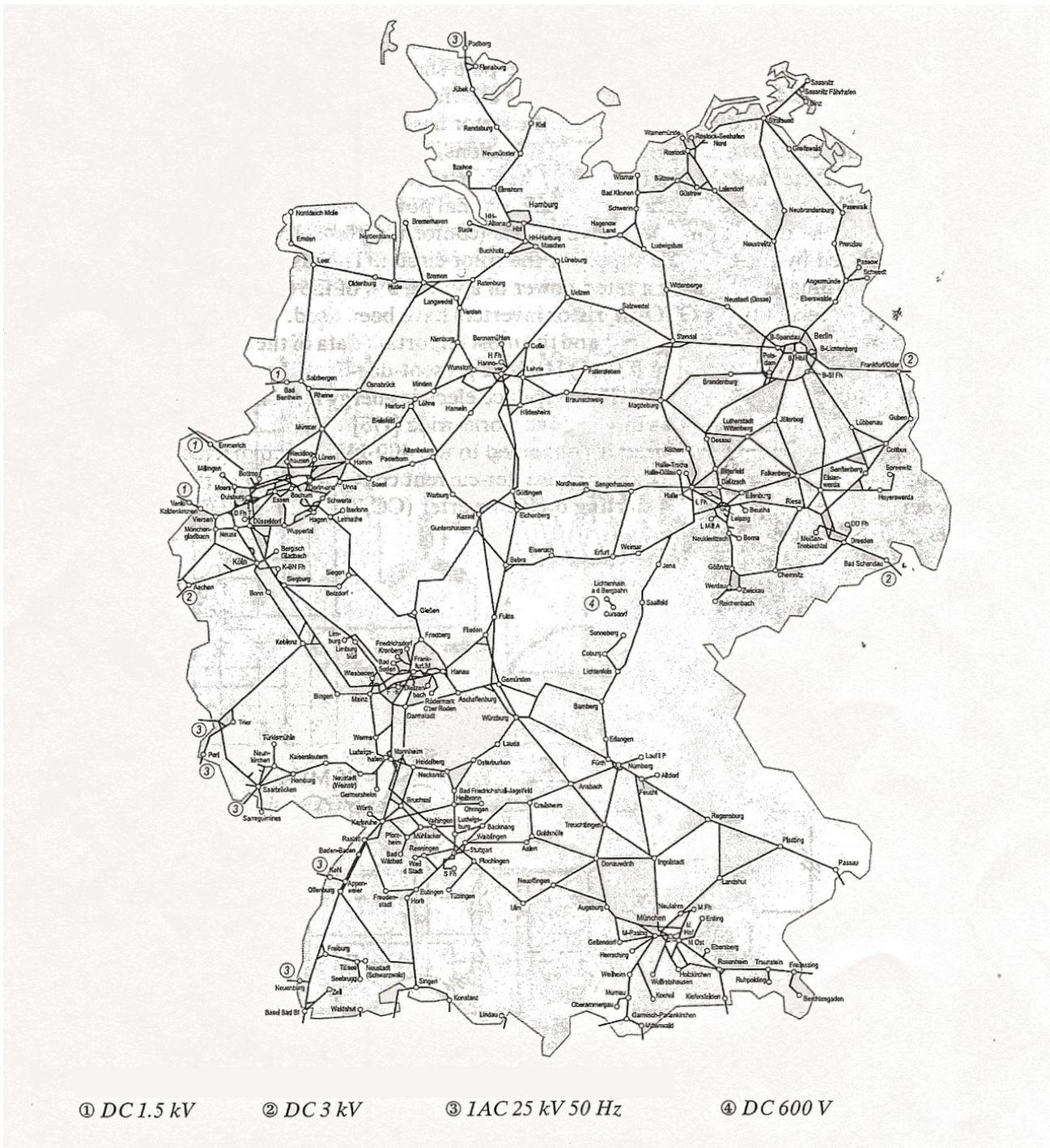
La disposizione e il dimensionamento del complesso di linee a 110 kv di stazione è standardizzato e fa riferimento alle normative DIN VDE 0101 e EN 50 110.

Per quanto riguarda i trasformatori di potenza, le fondazioni e i basamenti devono essere in grado di sopportare le 50 tonnellate del loro peso e presentano pure una vasca di raccolta dell'olio il cui livello è costantemente monitorato.

I basamenti del trasformatore sono collocati su rotaie per lo spostamento del trasformatore stesso.

Qualsiasi componente metallico e il dispersore sferico sono connessi tramite collegamento magliato alla stanza di sbarra neutra all'interno della sottostazione.

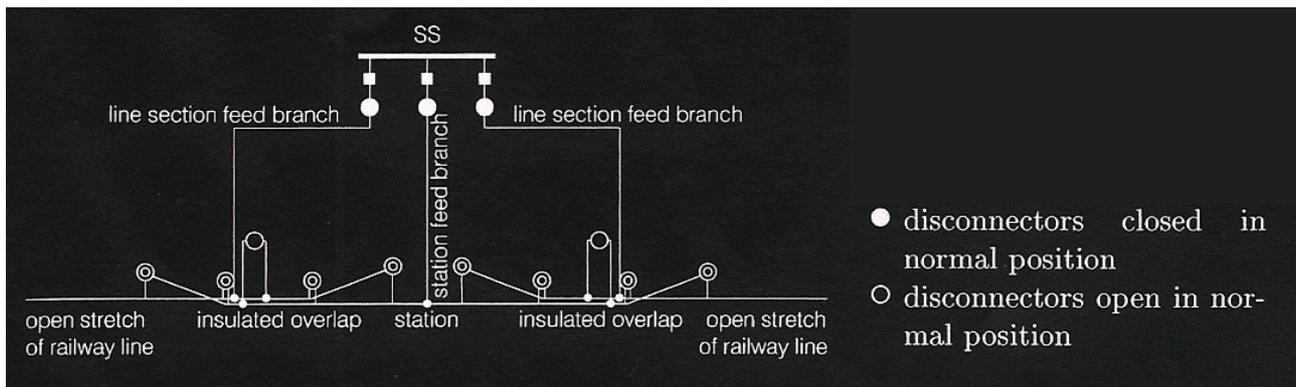
#### 4.4 Le linee di contatto e i relativi circuiti



**Linee ferroviarie elettrificate di DB AG, all'1/1/2007**

Si definisce come sezione alimentata da una sottostazione l'insieme delle linee di contatto, feeder e feeder di collegamento connessi per mezzo di interruttori, in numero minore o uguale a due. L'alimentazione della linea di contatto può essere fornita da un complesso di tipo sottostazione (non di sola interruzione) o di tipo posto (di interruzione o SP). Una SP è un complesso ad unico livello di tensione (15 kV) dotato di più di un interruttore.

La linea di contatto a sua volta può alimentare altre linee, apparati di stazione o sostituire il feeder.



### Sezioni di alimentazione di sottostazione

Il confine di una sezione alimentata da una sottostazione è rappresentato da un posto di sezionamento e accoppiamento.

La sezione può essere a sua volta divisa longitudinalmente in sub-sezioni, singolarmente isolabili.

Si fa distinzione tra sub-sezione in campo aperto e sub-sezione in corrispondenza di stazioni.

Il confine di una sub-sezione generalmente coincide con il tratto neutro coperto da segnale.

La copertura del segnale fa arrestare, se è il caso, il treno in transito prima del tratto neutro, evitando che ciò avvenga a pantografo alzato all'interno del tratto neutro stesso.

La distanza tra il segnale e il tratto neutro è codificata.

Le sub-sezioni di stazione sono ulteriormente divise in tratti a messa fuori tensione indipendente o gruppi di interruzione, configurati per le linee principali e quelle secondarie.

Nelle stazioni di lunghezza elevata i gruppi di interruzione delle linee principali sono divise a sua volta.

Ogni gruppo di interruzione è collegato a quello adiacente per mezzo di isolatori di sezione o tratto neutro, con il secondo generalmente usato se la velocità di transito dei mezzi è superiore ai 130 km/h.

Importante componente delle reti è il sezionatore il quale connette appunto sezioni e sub-sezioni tra loro.

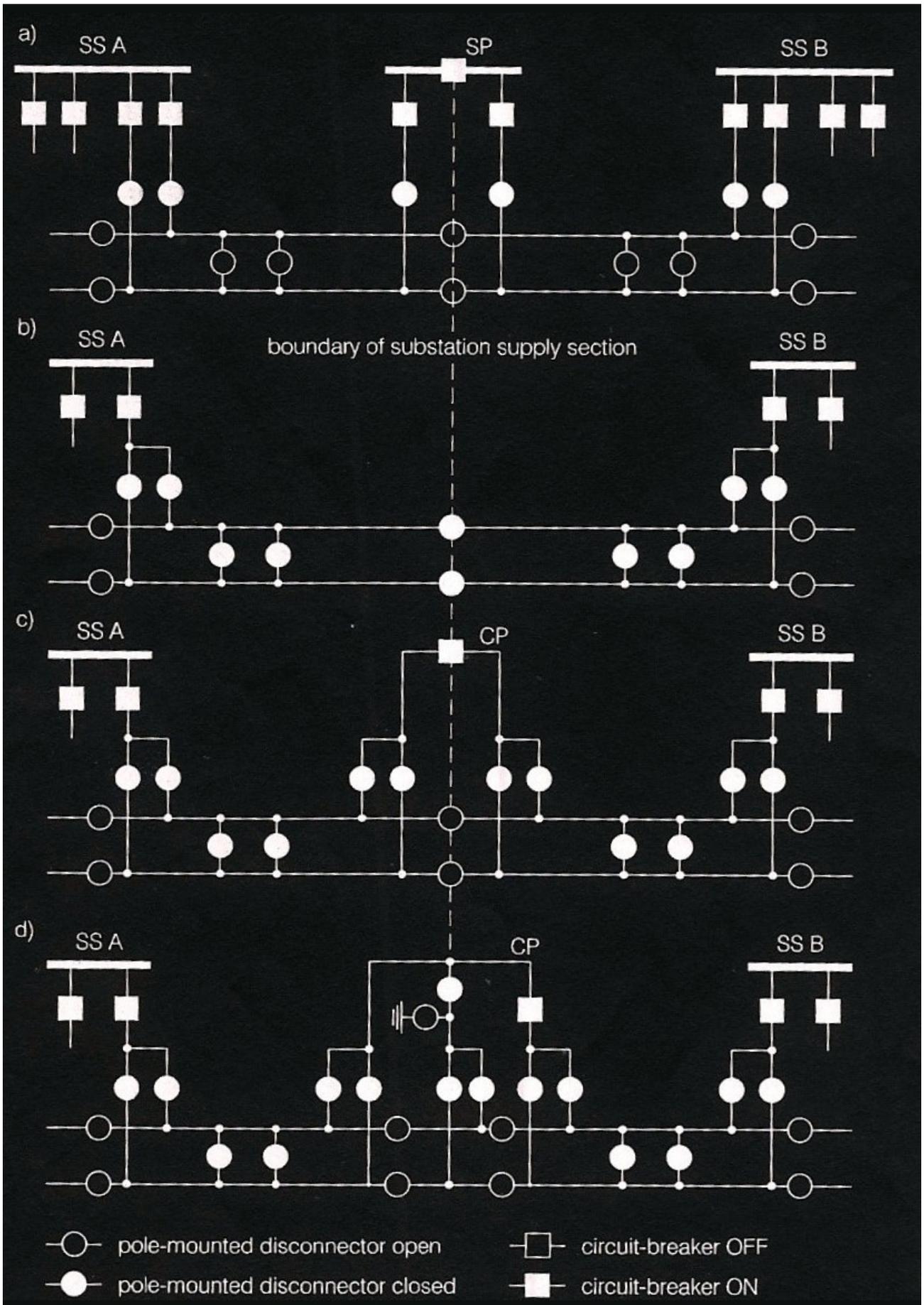
Essendo il sezionatore in grado di aprire solo su correnti modeste e per un numero limitato di volte, la manovra dello stesso avviene a carico ridotto o tendente a zero.

Sezionatori e apparati di interruzione delle linee di contatto assolvono alle seguenti funzioni:

- i sezionatori di sezione connettono le sub-sezioni;
- i sezionatori connettori collegano apparati ausiliari alle linee di contatto;
- i sezionatori di sezione base connettono sezioni base;
- i sezionatori dei binari di raccordo li disconnettono dall'alimentazione e li pongono a terra;
- i sezionatori longitudinali comprendono tutti i sezionatori usati per connettere le sezioni longitudinali;
- i sezionatori trasversali connettono le linee di contatto dei vari binari alimentate dalla stessa sezione di sottostazione;
- i sezionatori di tratto neutro di protezione connettono le linee di contatto adiacenti all'interno di una stessa sezione di alimentazione di sottostazione;
- i sezionatori di feeder collegano le linee di contatto ai feeder;
- i sezionatori di feeder di bypass collegano le linee di contatto ai feeder di bypass;
- i sezionatori di connettore di sezione di alimentazione collegano le linee di contatto di sezioni di alimentazione adiacenti.

#### **Schemi circuitali delle linee di contatto usati dalle DB**

- a) alimentazione direzionale, accoppiamento longitudinale con SP**
- b) connessione trasversale con sezionatori da palo**
- c) connessione trasversale con CP**
- d) connessione trasversale con CP e sezione neutra**



Le ferrovie tedesche usano codici numerici per identificare le varie tipologie di sezionatori, in conformità ai regolamenti di esercizio Gbr 997.0102 [10.33].

Codici numerici a una cifra:

- 1: sezionatore di sezione, lato sud e ovest, solo binario entrante nelle linee a doppio binario;
- 2: sezionatore di sezione, solo per linee a doppio binario, lato sud e ovest, binario uscenti;
- 3: sezionatore di sezione, lato nord e est; binario uscente nelle linee a doppio binario;
- 4: sezionatore di sezione, solo per linee a doppio binario, lato nord e est, binario entrante;
- 5: sezionatore trasversale,
- 6: sezionatore di binario di raccordo;
- 7: sezionatore di sezione base, del binario con sezionatori 1 e 3;
- 8: sezionatore di sezione base, del binario con sezionatori 2 e 4;
- 0: sezionatore di connettore di sezione di alimentazione.

Codici numerici a due cifre (in combinazione a codici monocifra):

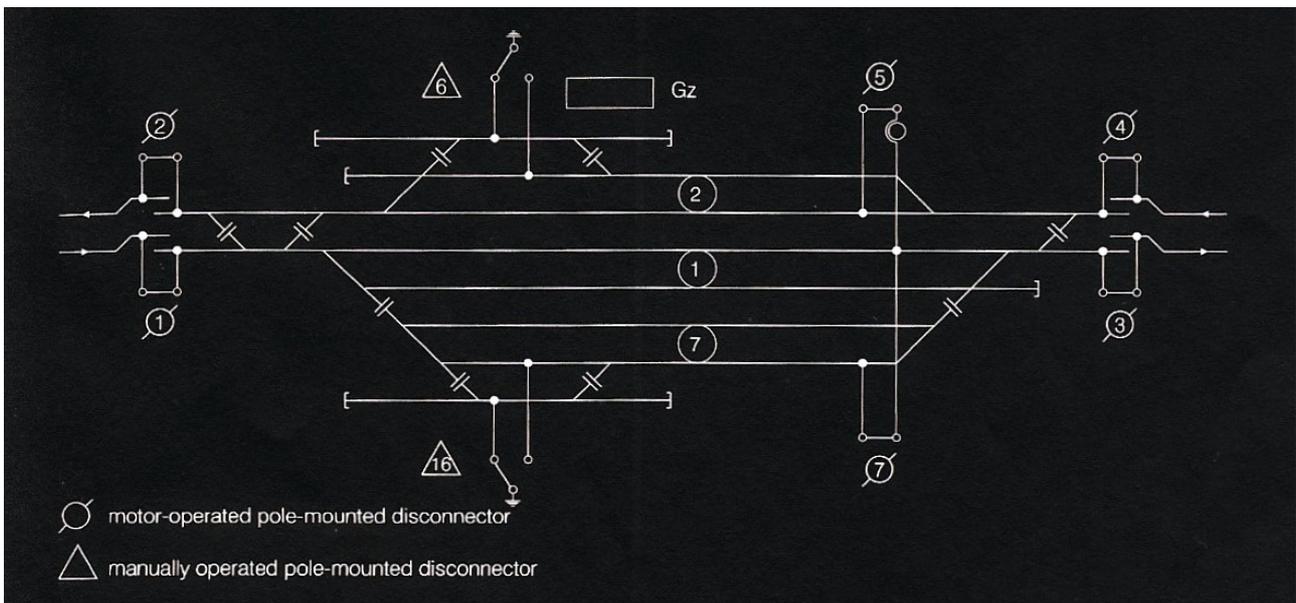
- da 1x a 9x: sezionatore di sezione a numerazione a prima cifra pari con seconda cifra pari o prima cifra dispari e seconda dispari per i binari di corsa intersecanti.

Codici numerici a tre cifre a prima cifra:

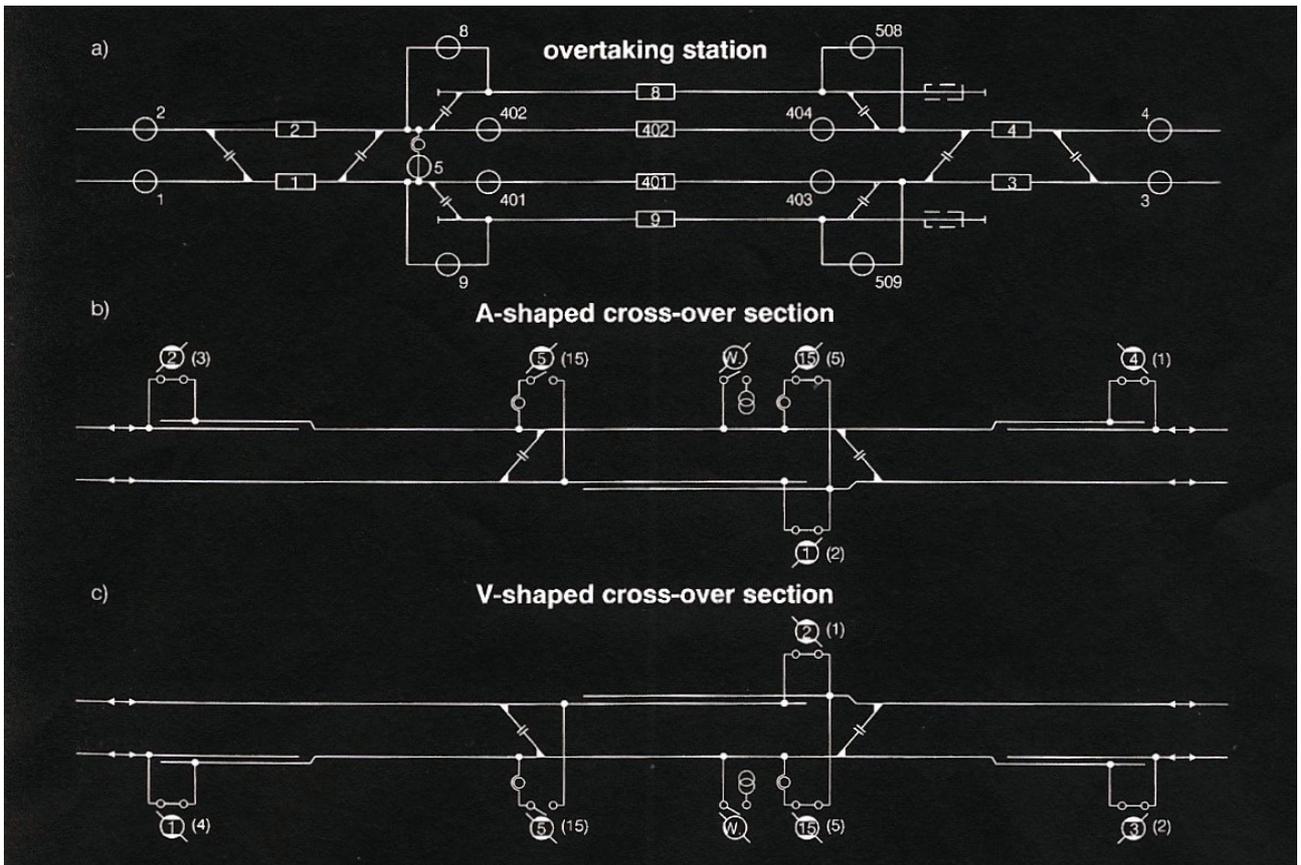
- 1: sezionatore di sezione base, quando il codice a due cifre non è sufficiente;
- 2: sezionatore degli apparati di esercizio in linee in campo aperto;
- 3: casi speciali come in binari di raccordo privati, in luoghi di riparazione e manutenzione veicoli, in connessioni secondarie all'alimentazione, per sezionamento longitudinale dei servizi ausiliari;
- 4: sezionatore longitudinale in stazione;
- 5: sezionatore di sezione base, per connessione secondaria in stazione;
- da 6 a 9: come a prima cifra 3.

È in uso anche un codice alfabetico per sezionatori ed interruttori a lettera:

- A: sezionatore di sezione neutra di protezione, lato sud e ovest, per linee a doppio binario su binario con sezionatore di sezione 1 e 3;
- B: sezionatore di sezione neutra di protezione, solo per linee a doppio binario, lato sud e ovest, binario con sezionatore 2 e 4;
- C: sezionatore di sezione neutra di protezione, lato nord e est, per linee a doppio binario su binario con sezionatore di sezione 1 e 3;
- D: sezionatore di sezione neutra di protezione, solo per linee in campo aperto, lato nord e est, se presente il sezionatore di sezione;
- E: sezionatore di terra;
- F: sezionatore di connessione sezione base - feeder di bypass;
- G: sezionatore di connessione linea di corsa - feeder di bypass;
- L: sezionatore connettore per gli apparati di carico;
- Q: sezionatore connettore di apparati di terzi;
- R: sezionatore di feeder del reparto suppletivo di alimentazione con sbarra supplementare di alimentazione in esterno;
- S: sezionatore di feeder dei reparti di alimentazione di stazione e di protezione;
- T: sezionatori per suddivisione longitudinale dei feeder, dei feeder di bypass e delle linee di connessione;
- U: sezionatore di feeder del reparto di alimentazione della sezione di linea;
- V: sezionatore di feeder che connette le linee di contatto alle linee di connessione;
- W: sezionatore connettore dell'apparato di riscaldamento scambi;
- Z: sezionatore connettore dell'apparato del pre-riscaldamento treni.



**Diagramma semplificato dei circuiti di sezione base in stazione**



**Diagramma semplificato dei circuiti di sezione base dei posti di scambio e di precedenza**

## 4.5 Sistemi di protezione delle linee di contatto

### 4.5.1 Generalità

Per molti anni, sin dagli albori della trazione elettrica, la protezione delle linee di contatto nelle sottostazioni e nei posti di interruzione e accoppiamento fu affidata a dispositivi elettromeccanici quali i relè.

Dal 1975 è iniziato il rimpinzamento dei relè con dispositivi elettronici analogici, ad esempio quelli del tipo SDB15, EFS1 e EFS2.

Gli apparati di protezione delle singole sezioni di linea di contatto devono possedere le caratteristiche di seguito elencate per essere all'altezza dei requisiti della trazione elettrica, la quale presenta picchi elevati di corrente in esercizio regolare e ancora più elevate correnti di corto circuito (fino a 45 kA):

- apertura veloce su correnti elevate;
- protezione in tempo su sovracorrenti;
- protezione distanziometrica a due stadi, chiamata anche protezione a impedenza, con due griglie di parametri ed innesco su sovracorrenti;
- capacità di riconoscere le alte correnti di esercizio da quelle di corto circuito;
- protezione da sovraccarico termico;
- protezione di emergenza in tempo su sovracorrenti nel caso di fallimento della protezione distanziometrica;
- protezioni di ripristino.

Trasformatori di misura con nucleo adeguatamente protetto rilevano il valore della corrente della tensione, valori i quali, opportunamente analizzati, possono rivelarsi tali da indurre l'intervento delle protezioni.

La protezione dalla corrente di corto circuito è una protezione di tipo primario e deve essere in grado di rilevare un corto circuito franco e un corto circuito di impedenza non nulla (non superiore comunque all'impedenza di linea) all'estremità più lontana della linea da proteggere.

Il tempo di risposta al comando di apertura delle moderne protezioni è intorno ai 2 ms.

Si definisce come tempo totale di interruzione la somma del tempo di risposta al comando, di quello di apertura completa dei contatti dall'inizio della manovra e di quello di estinzione dell'arco dalla sua formazione.

L'intervento di un apparato di protezione comporta tutta una serie di procedure per la verifica della scomparsa delle cause che hanno portato all'attivazione della protezione stessa, ad esempio della corrente di corto circuito.

Per valutare l'assenza di correnti di guasto si provvede a connettere la sezione di alimentazione individuata come in regime di guasto alla sbarra di testaggio la quale alimenta la sezione a corrente ridotta (fino a 5 A) per mezzo di resistori.

Tale manovra è detta test della sezione e può essere eseguita in modalità manuale o automatica.

In caso di esecuzione automatica si procede ad apertura e richiusura dell'interruttore principale (con in più le associate manovre dell'isolatore di sezione) e a valutazione dei risultati del test.

Se il test è superato, cioè il regime di guasto è terminato, si provvede alla riconnessione della sezione alla propria sbarra di esercizio.

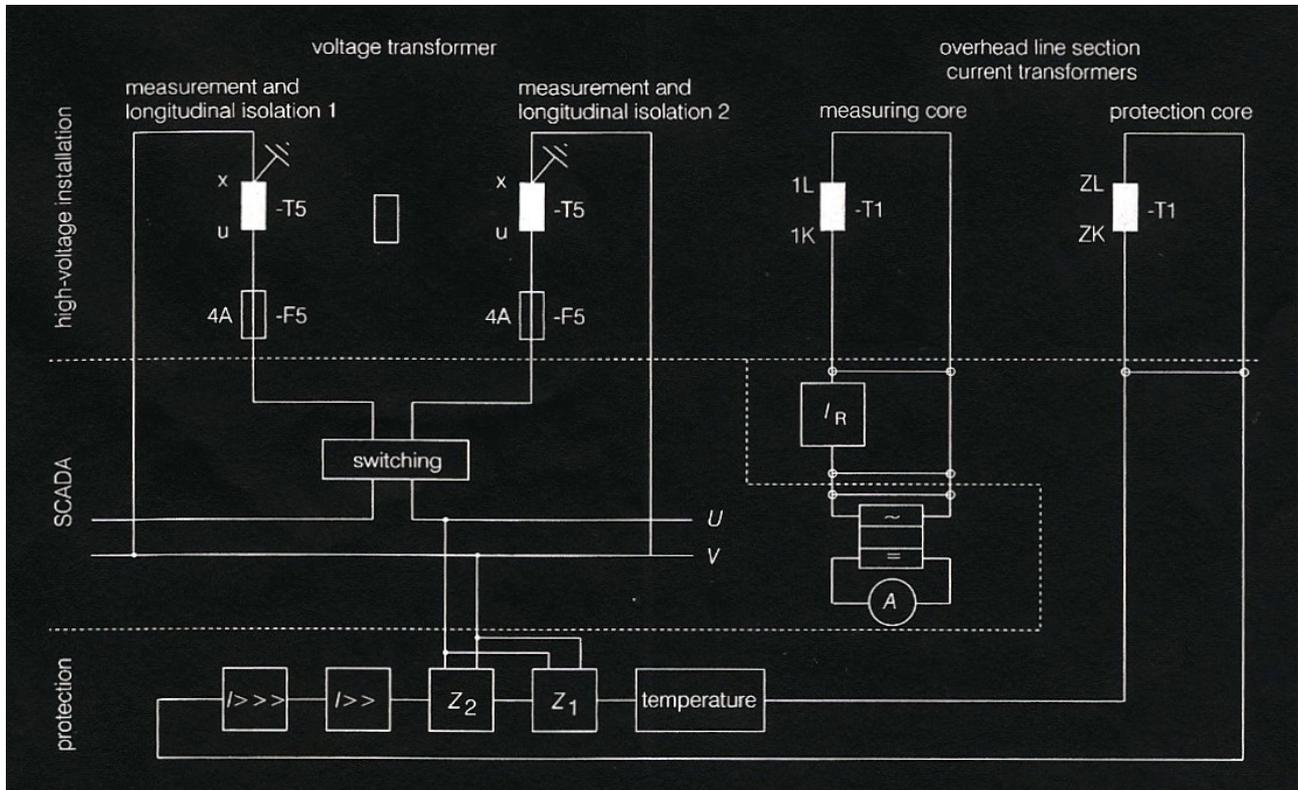
In caso contrario, configurandosi un regime permanente di guasto, lo stesso deve essere localizzato con precisione e risolto.

La verifica della presenza di correnti di guasto, post attivazione di una protezione, avviene sempre, qualsivoglia sia la ragione dell'innesco.

Tuttavia ricordiamo che nelle reti DB, il 93% degli inneschi avviene per guasti temporanei o sovraccarichi delle linee da correnti di esercizio.

I più importanti criteri di protezione sono i seguenti:

- protezione dalle alte correnti  $I \gg \gg$  ;
- protezione distanziometrica a due stadi;
- distinzione tra correnti elevate di esercizio e correnti di corto circuito;
- protezione da sovraccarico termico;
- protezione di sostegno.



**Connessione delle linee di contatto ai trasformatori di misura e relative protezioni**

## **4.5.2 Le varie tipologie**

### **4.5.2.1 La protezione dalle alte correnti**

Le correnti di corto circuito vicino (ad esempio nei pressi della sottostazione) sono maggiori di quelle di corto circuito lontano (ad esempio nel punto mediano o all'estremità opposta della sezione) in quanto nel primo caso l'impedenza tra punto di alimentazione e di guasto è minore. Scopo della protezione da alte correnti è mandare un segnale di apertura agli interruttori corrispondenti non appena il valore della corrente circolante supera un valore prestabilito. Il principio di selettività nell'intervento delle protezioni non è sempre rispettato col criterio delle alte correnti in quanto si deve assolutamente evitare la fusione delle linee di contatto ad opera di correnti di corto circuito di valore estremamente elevato.

#### 4.5.2.2 La protezione distanziometrica a due stadi

Una protezione distanziometrica è necessaria se si vuole estinguere selettivamente i vari corto circuiti sia nelle reti di trasmissione che nelle reti di contatto.

Questa tipologia di protezione, anche detta protezione ad impedenza, vuole estinguere i corto circuiti più lontani tenendo fede al principio di selettività.

Quello che innesca la protezione è un valore di impedenza, detto di sotto impedenza.

Cioè se il valore dell'impedenza di corto circuito scende sotto un valore predefinito, avviene lo scatto della protezione.

Le ferrovie tedesche distinguono tra distanza (o impedenza) di primo livello e distanza (o impedenza) di secondo livello.

Ai due livelli di distanza (o impedenza) corrispondono due stadi di intervento.

La protezione di primo stadio è usata come primaria di quel tratto di linea compreso tra un apparato di protezione e il successivo, ad esempio tra una sottostazione e il successivo posto di accoppiamento.

L'ordine di apertura del corrispondente interruttore viene dato con un ritardo di 30 ms sull'individuazione del guasto.

La protezione di secondo stadio è usata come protezione di sostegno delle sezioni di alimentazione adiacenti e scatta dopo circa 400 ms dall'individuazione del guasto se nel frattempo la protezione principale della sezione stessa non si è attivata.

Una protezione principale non attivata può portare ad altri spiacevoli effetti, come ad esempio l'apertura dell'interruttore a protezione del trasformatore di potenza sul lato AT a seguito di rilevazione di sovracorrenti durante nel tempo, sempre se il trasformatore e le relative protezioni sono presenti.

Consideriamo due sottostazioni distanziate 60 km l'una d'altra e un posto di accoppiamento mediano, cioè a 30 km da ciascuna sottostazione.

Considerando inoltre la simmetria del circuito, l'assenza di linee di alimentazione parallele alle linee di contatto e l'impedenza chilometrica di linea pari a  $0.251 \Omega/\text{km}$ , ritroviamo che i valori di riferimento risultano  $7.53 \Omega$  e  $15.06 \Omega$  rispettivamente per l'impedenza di primo e secondo livello.

La corrente che innesca direttamente la protezione da alte correnti è assunta pari a 1.8 kA.

Gli interruttori proposti all'estinzione delle correnti di guasto sono principalmente quelli posti ai capi della sezione di alimentazione dove si verifica il guasto stesso.

Il fatto che la corrente di guasto fluisca alle sbarre di due o più installazioni diverse e quindi presentandosi di valore inferiore a ciascuna sbarra, può rendere inefficaci una o più tipologia di protezioni.

Se la corrente di guasto rilevata da un'installazione è superiore ai suddetti 1.8 kA, avviene lo scatto immediato dell'interruttore per alte correnti, in caso contrario la protezione è assunta solo dagli organi distanziometrici.

Rilevata da un'impedenza di linea inferiore ai  $7.53 \Omega$  è la protezione distanziometrica di primo livello a essere innescata con apertura dilazionata di 30 ms.

Rilevata da un'installazione generalmente della sezione di alimentazione adiacente un'impedenza di linea inferiore ai  $15.06 \Omega$ , è attivata anche la protezione di secondo livello della stessa con apertura dilazionata di 400 ms.

In genere però lo scatto di interruttori per alte correnti o distanziometrici di primo livello porta al resettaggio di quelli distanziometrici di secondo livello.

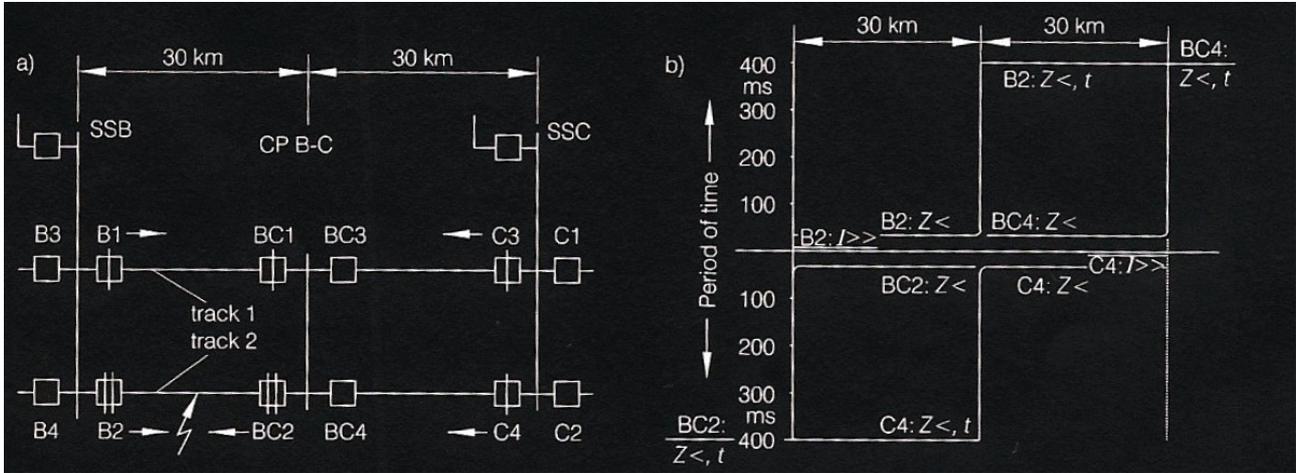
Non è da escludere anche lo scatto degli interruttori del binario adiacente, in modalità alte correnti o distanziometrica di primo livello.

Anche in tal caso ragioni di sicurezza delle reti portano all'accantonamento del principio di selettività.

Nonostante le protezioni distanziometriche multi livello siano state espressamente concepite per la

selettività, possono essere esse stesse causa di intervento non selettivo.

Ad esempio se per un qualche motivo, a fronte di un guasto in una sezione di alimentazione, interviene pure la protezione distanziometrica di secondo livello nella sezione adiacente ma dal lato opposto rispetto alla sottostazione, si corre il rischio di porre fuori tensione non una ma ben due sezioni di alimentazione.



### Principi di esercizio delle protezioni delle linee di contatto

a) compiti e scopo delle protezioni, compresa quella di sostegno LSBC2

b) attività istantanea e differita dei vari relè di protezione

#### **4.5.2.3 La distinzione tra le correnti di esercizio e le correnti di corto circuito**

Nelle linee dove sono previsti circolanti veicoli di trazione ad elevata corrente di spunto, un sistema di analisi della variazione del valore della corrente nel tempo  $\Delta i / \Delta t$  viene usato per distinguere le correnti di spunto da quelle di cortocircuito.

Quando la curva della corrente in funzione del tempo assume una pendenza troppo elevata, il che indica di essere in presenza di un guasto di corto circuito, viene attivata la protezione distanziometrica di secondo livello.

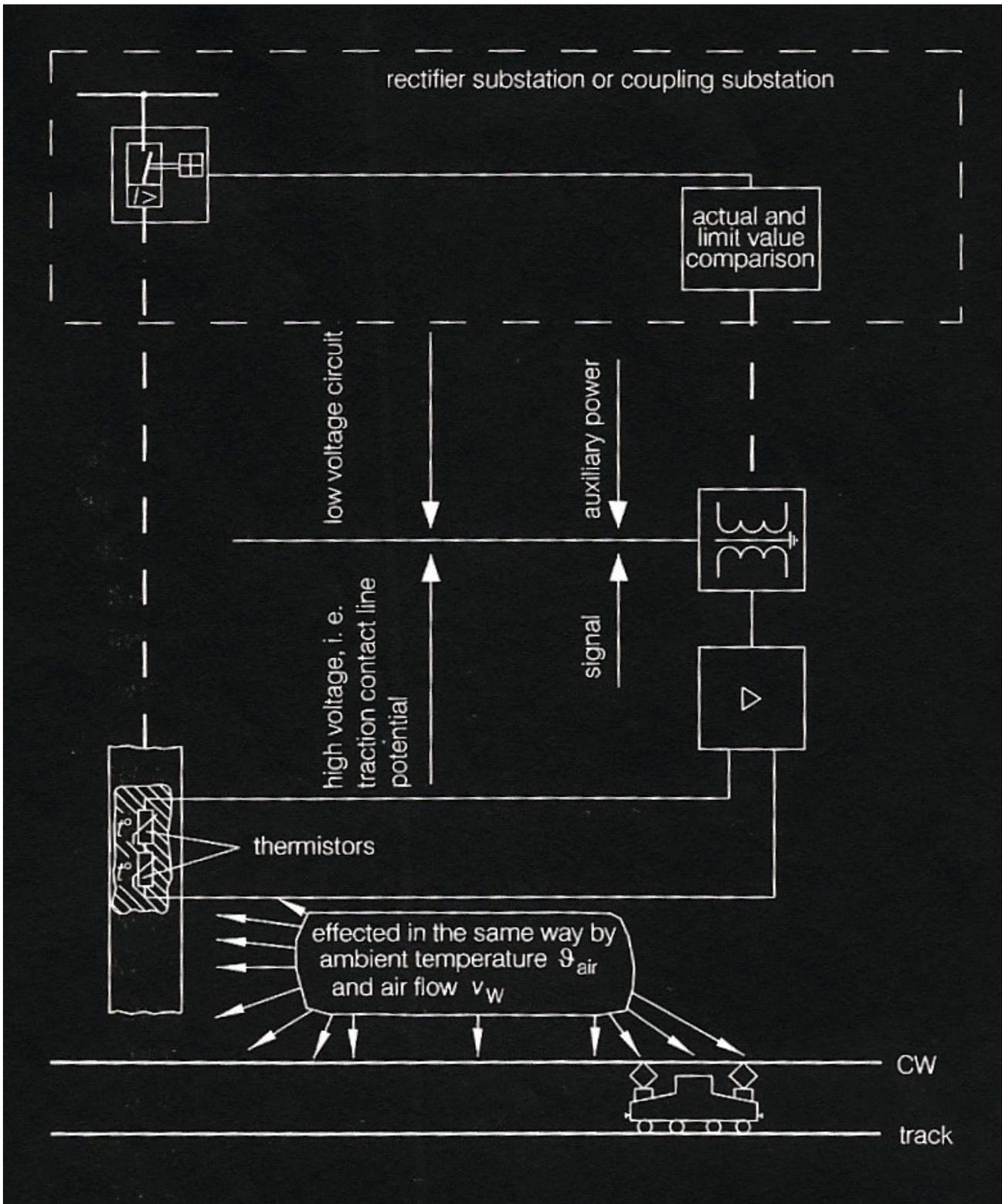
#### **4.5.2.4 La protezione da sovraccarico termico**

La protezione da sovraccarico termico serve a mantenere la temperatura delle linee di contatto entro un valore prestabilito  $\theta_{lim}$ , contribuendo all'utilizzo in maniera ottimale delle linee stesse.

Il dispositivo associato alla protezione stima il riscaldamento della linea di contatto a partire dalla corrente circolante in essa.

La stima viene fatta per mezzo di un algoritmo che tiene conto anche delle condizioni meteorologiche e quindi della temperatura esterna in cui la linea sottoposta a riscaldamento da passaggio di corrente si trova a operare.

La temperatura esterna di riferimento è quella misurata sul muro esterno rivolto a nord dell'edificio che contiene gli apparati di protezione. La temperatura misurata dal sensore di temperatura è passata all'elaboratore per mezzo di segnali a tensione (da 0 a 10 V) proporzionale alla temperatura stessa. Come immaginabile, le protezioni da sovraccarico termico che usano un valore di temperatura delle corde ricavato da misurazione diretta sono ancora migliori nello svolgimento del proprio compito.



Protezione da sovraccarico termico con misura diretta della temperatura della linea di contatto

#### 4.5.2.5 La protezione di sostegno

Una protezione addizionale da sovracorrenti permanenti può costituire una sorta di protezione di sostegno.

L'alimentazione dei circuiti di protezione è autonoma rispetto all'alimentazione degli stessi di una tipica protezione principale.

Essa è connessa ad un trasformatore di misura.

La corrente che innesca la protezione provoca anche l'apertura dell'interruttore percorrendo una seconda bobina di sgancio presente nello stesso.

Si ottiene perciò un alto grado di ridondanza.

Sottolineiamo che un tale tipologia di protezione non è poi così diffusa, essendo confinata ad applicazioni particolari dal momento che i moderni relè digitali sono altamente affidabili.

Le linee aeree di contatto sono attrezzate con strutture controllate in remoto le quali fissano dei valori di soglia dell'impedenza di linea e della temperatura dei conduttori.

E' necessario riconfigurare il sistema in seguito all'esercizio di un solo binario sui due normalmente attivi per attività di costruzione o manutenzione.

Ammesso quindi un valore di impedenza di linea più elevato, il conseguente valore della corrente circolante compatibile col carico termico ammesso deve essere inferiore.

Dal 1990 i relè digitali di protezione vengono usati con sempre maggior frequenza.

Essi, oltre alla loro funzione basilare, permettono un facile settaggio alle diverse condizioni di esercizio, con l'opzione di registrazione ed analisi dei dati di attività e ricerca di apparati alternativi di interruzione da utilizzare qualora vi fossero dei problemi con l'interruttore normalmente preposto a tale funzione.

Tra gli apparati alternativi figura appunto la protezione di sostegno.

Nell'ipotesi di fallimento anche dell'apparato di sostegno, viene inviato un segnale all'apparato di protezione immediatamente successivo nella scala di intervento la quale provoca l'apertura di tutti gli altri interruttori di sottostazione.

Un monitoraggio continuo dei valori di tensione, corrente, impedenza di linea e una registrazione delle manovre di apertura uniti all'elaborazione grafica dei dati da esercizio in regime di guasto, permettono una facile analisi dei guasti e dell'attività degli apparati.

A corto circuito in atto, misurazioni dell'impedenza permettono la localizzazione del corto circuito stesso.

La comunicazione dei dati all'esterno degli apparati di protezione avviene tramite porta seriale e con l'ausilio di computer o altri dispositivi elettronici portatili.

Con la telemetria i dati possono essere acquisiti e visionati anche in strutture remote, cosa particolarmente utile se la sottostazione è senza personale operante.

Per ragioni di sicurezza, si tende sempre rendere indipendenti l'uno dall'altro i circuiti di controllo da quelli di protezione, sia dal punto di vista funzionale che degli apparati stessi.

### 4.5.3 La localizzazione del guasto

Il punto di guasto può essere trovato ed isolato nella maniera la più veloce possibile con l'ausilio dei sezionatori di linea di contatto.

Essi permettono:

- l'esercizio ferroviario nelle altre sezioni;
- l'eliminazione delle cause del guasto;
- la riparazione degli apparati coinvolti nel guasto.

Un'accurata e affidabile localizzazione del guasto è cosa importante

Il gestore della rete tedesca usa un sistema di tracciamento dei guasti basato su trasformatori di corrente.

Per una tipica linea a due binari si usano trasformatori di corrente con rapporto di trasformazione 600/1 o 1200/1 installati generalmente in corrispondenza dei sezionatori di accoppiamento trasversale.

Nell'evenienza di un corto circuito, una corrente molto più elevata di quella in esercizio regolare attraversa i trasformatori di corrente collocati da un lato della sezione in guasto se la linea è alimentata a sbalzo, ad entrambi i lati se alimentata bilateralmente.

I relè di rilevazione del corto circuito sono connessi ai secondari dei rispettivi trasformatori e se il valore di corrente rilevato è tale da far supporre un corto circuito in atto, inviano una segnalazione al centro di controllo generale che ha in carico la sezione attraverso il centro locale di controllo e l'apparato di telemetria.

In questo centro di controllo, le segnalazioni dei relè da trasformatori di corrente unite a quelle da interruttori aperti permettono una localizzazione approssimativa del guasto, limitata a quale sezione è in guasto.

Essa è quella compresa tra i trasformatori alle estremità recanti corrente tipica di guasto (per alimentazione bilaterale e binario unico/doppio).

In caso di binario unico e alimentazione a sbalzo, il guasto sarà di sicuro oltre l'ultimo trasformatore ad aver percepito il guasto.

## 4.6 Conduttori di ritorno e sistemi di messa a terra

### 4.6.1 Connessioni tra binari e tra rotaie

Le connessioni tra binari diversi e tra le due rotaie di uno stesso binario servono per ripartire in maniera uniforme le correnti di ritorno e portare al medesimo potenziale gli stessi.

Le rotaie di una linea ferroviaria o di un parco ferroviario elettrificati sono connesse ove possibile sia longitudinalmente che trasversalmente tra loro.

Generalmente i giunti che congiungono longitudinalmente le rotaie sono sufficienti per la connessione (elettrica) longitudinale appunto.

Se sono presenti circuiti di binario e quindi i giunti meccanici sono isolanti, la funzione di connessione elettrica è assunta da connessioni longitudinali.

Connessioni trasversali congiungono elettricamente le due rotaie di un binario e binari adiacenti.

La connessione trasversale di due rotaie di un medesimo binario, in una linea senza circuiti di binario, si ripetono con continuità al massimo ogni 150 m per le linee ad esercizio misto, al massimo ogni 75 m per le linee metropolitane o ad esercizio pesante.

Invece la connessione trasversale tra binari adiacenti, assenti i circuiti di binario, avviene al massimo ogni 300 m nelle linee ad uso generale, al massimo ogni 150 m per le linee metropolitane e a traffico sostenuto.

Costituiscono una sorta di connessione trasversale anche le bobine (trasversali e di messa a terra) dei circuiti di binario a correnti a frequenza di 100 Hz.

Se sono presenti i circuiti di binario, a seconda delle tre tipologie degli stessi, le connessioni trasversali assumono configurazioni differenti.

Le tre tipologie di circuiti di binario sono:

- a singola rotaia isolata;
- ad entrambe le rotaie isolate;
- a frequenza audio.

In presenza di circuiti di binario a singola rotaia isolata si fa distinzione tra binari di stazione e binari in campo aperto.

La rotaia non isolata di un binario di stazione è connessa in almeno due punti al sistema di ritorno della corrente.

La rotaia non isolata di un binario in campo aperto è connessa a quella non isolata di un binario adiacente, se presente, al massimo ogni 300 m per l'esercizio generale o al massimo ogni 150 m per l'esercizio metropolitano o pesante.

Nel caso di rotaie entrambe isolate non è possibile installare sistemi tradizionali di equipotenzialità. Si procede quindi alla connessione tra rotaie di uno stesso binario tramite bobine reattive.

La connessione tra binari adiacenti avviene per mezzo di connessioni tra i rispettivi centri di bobina.

Nell'uso di circuiti di binario a frequenza audio si sceglie come rotaia di terra generalmente quella più vicina alla palificazione.

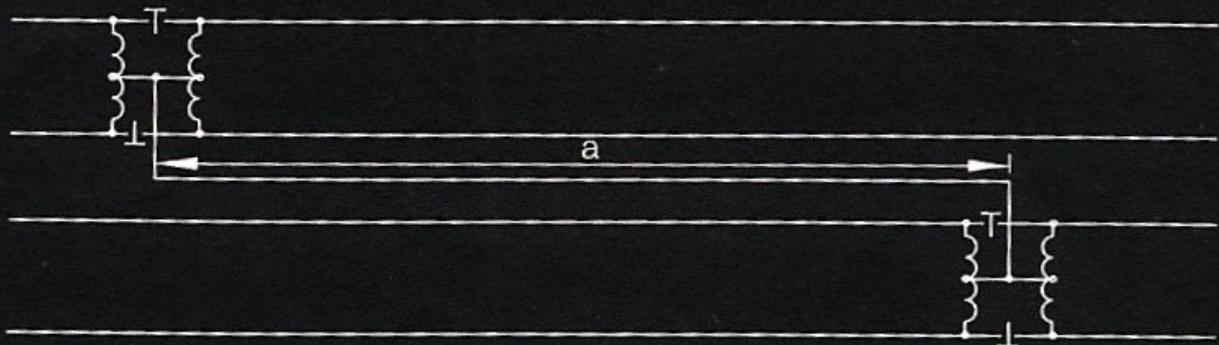
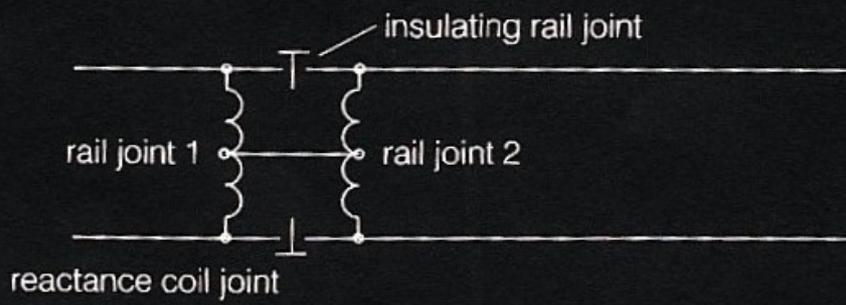
Le varie rotaie di terra sono connesse tra loro ad una distanza minima corrispondente al valore della frequenza audio usata.

Generalmente le connessioni equipotenziali sono realizzate con cavi di rame di sezione 50 mm<sup>2</sup> isolati in guaina di plastica, tipo NYY-O.

Se tali cablaggi sono usati anche come messa a terra e transito di correnti di corto circuito, si preferisce usare cavi di sezione 70 mm<sup>2</sup>, in quanto possono presentarsi correnti di corto circuito subtransitorie  $I_k''$  maggiori di 25 kA.

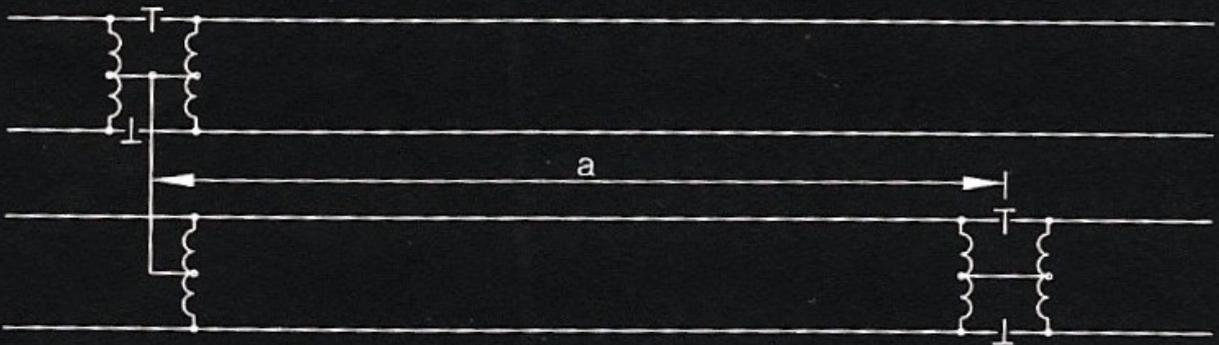
Se i cablaggi sono annegati nel cemento, la sezione minima passa a 70 mm<sup>2</sup> per uso generale, a 95 mm<sup>2</sup> per uso con correnti di corto circuito.

I cavi a connessione fissa con le rotaie, generalmente saldati alle stesse.



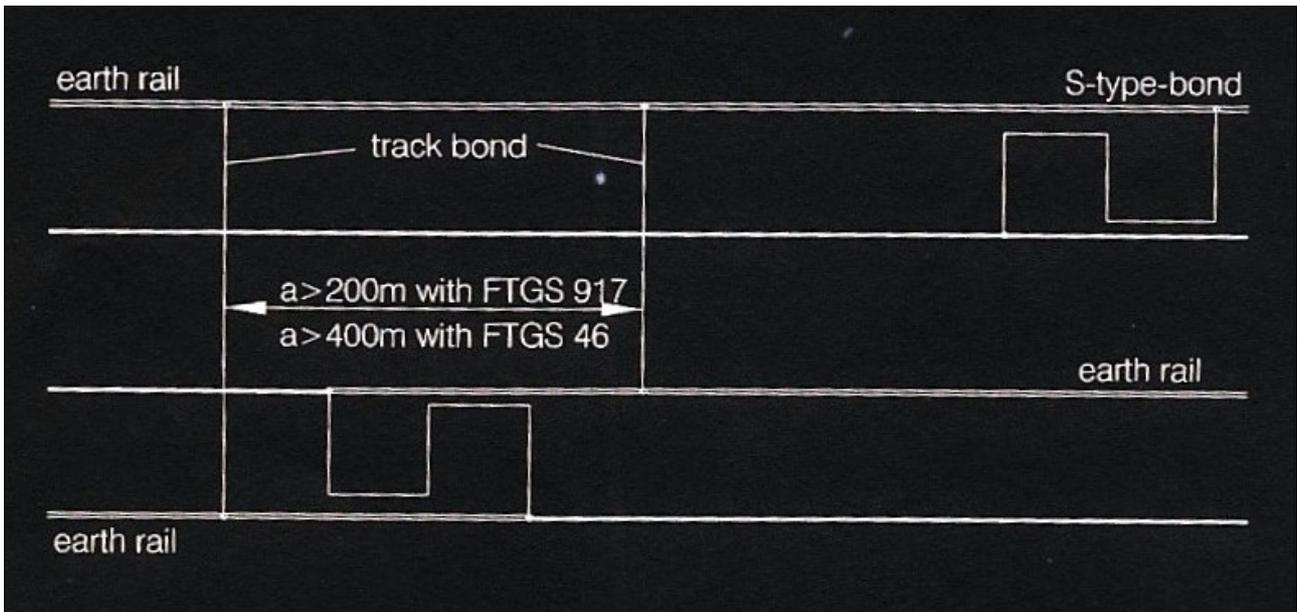
track equipotential bonds between reactance coil joints

- $a < 60\text{m}$ :  $1 \times 50\text{mm}^2$  Cu, NYY-O
- $a = 60 \dots 100\text{m}$  :  $2 \times 50\text{mm}^2$  Cu, NYY-O
- $a = 100 \dots 300\text{m}$ :  $2 \times 70\text{mm}^2$  Cu, NYY-O



track equipotential bonds between reactance coil joints  
for  $a > 300\text{ m}$ ; track bonds  $1 \times 50\text{mm}^2$  Cu, NYY-O

**Connessioni equipotenziali di rotaie e binari tramite bobine reattive**



**Distanziamento minimo tra connessioni di binario con circuiti di binario a frequenza audio**

#### 4.6.2 Circuiti di occupazione del binario, cammino di ritorno della corrente e messa a terra di trazione

Il caso delle ferrovie tedesche riguardo al cammino di ritorno della corrente e alla messa a terra di trazione può essere preso ad esempio per la costruzione e la gestione delle linee di contatto, anche di altre amministrazioni.

Nelle ferrovie tedesche la direttiva che si occupa del cammino di ritorno della corrente e della messa a terra di trazione è la numero 997, la quale è simile per contenuti e specifiche alle corrispettive di altre amministrazioni ferroviarie che eserciscono la trazione in corrente alternata monofase.

In un binario, una o entrambe le rotaie servono anche per il ritorno di almeno una parte della corrente nel suo cammino verso la sottostazione di alimentazione.

Sempre le rotaie sono parte integrante dei circuiti del sistema di controllo e gestione della circolazione ferroviaria.

Tali circuiti sono detti circuiti di binario.

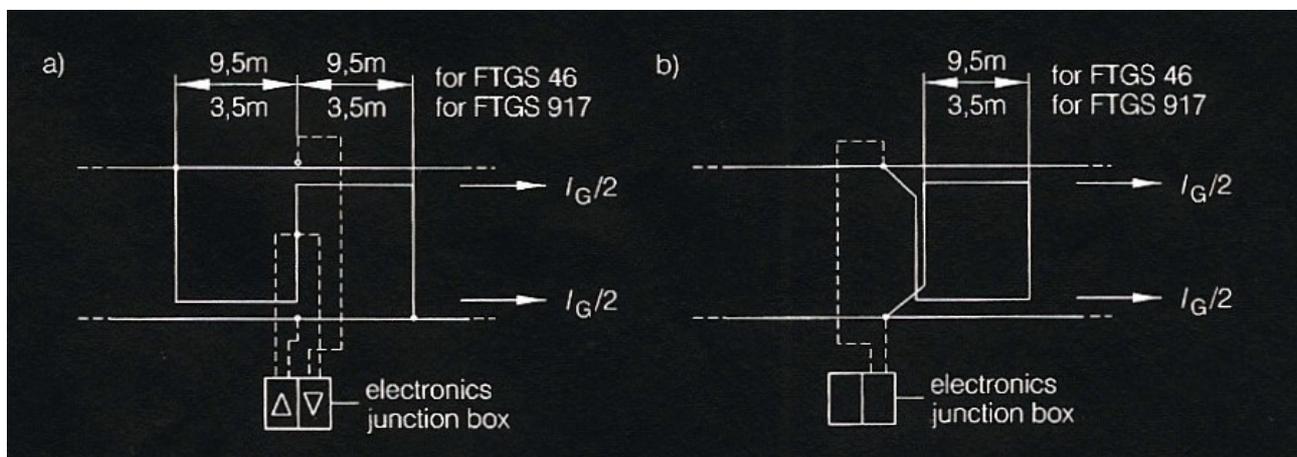
Bisogna distinguere tra i circuiti di binario operanti a bassa frequenza, 42 o 100 Hz, e quelli operanti ad alta frequenza o frequenza audio, da 4 a 6 kHz o da 9 a 17 kHz.

Come per le altre tipologie di circuiti di binario, quelli a frequenza audio si basano sul principio della connessione elettrica tra rotaie operata dagli assi di un treno in transito in parallelo a quella propria del sistema.

L'alimentazione remota dei circuiti di binario o FTGS presenta due intervalli di frequenza, da 4 a 6 kHz per i binari in campo aperto (sistema FTGS 46) o da 9 a 17 kHz per i binari in stazione (sistema FTGS 917).

Le connessioni tra rotaie proprie dei circuiti di binario sono di terminale o a esse, comuni ad entrambi i sistemi in frequenza audio.

Il tipico connettore a esse ha una sezione che va dai 50 ai 60 mm<sup>2</sup>.



#### Connessioni di rotaia dei circuiti di occupazione del binario a frequenza audio

a) ad esse

b) di terminale

Al fine di permettere una buona conduzione della corrente di ritorno, una messa a terra di trazione appropriata e un affidabile esercizio dei circuiti di binario, l'uso del mezzo condiviso, cioè le rotaie deve essere regolamentato e coordinato dai dipartimenti tecnici responsabili.

Per quanto riguarda il cammino di ritorno della corrente e la messa a terra di trazione, si incontrano diversi schemi di binario, quali:

- senza circuiti di binario e rotaie entrambe non isolate;
- con circuiti di binario a singola rotaia isolata;
- con circuiti di binario a entrambe le rotaie isolate;
- con circuiti di binario a frequenza audio.

Di base, entrambe le rotaie di tutti i binari sarebbero usate come cammino di ritorno della corrente e messa a terra di trazione.

Ciò avviene in assenza di circuiti di binario o con un particolare sistema di rilevazione dell'occupazione detto conta assi.

Nei sistemi a singola rotaia isolata, l'altra è considerata rotaia di terra.

Solo la rotaia di terra è collegata ai connettori terra, mentre la rotaia isolata presenta una connessione normalmente aperta alla sbarra o rotaia di terra per mezzo di un limitatore di tensione.

Se entrambe le rotaie sono isolate, entrambe conducono la corrente di ritorno.

Una sezione di binario è isolata da quelle adiacenti per mezzo di giunti isolanti.

La connessione elettrica è garantita da trasformatori di giunzione a bobina reattiva, detti anche connessioni reattive.

La presenza dei giunti isolanti fa sì che la corrente di ritorno sia forzata a percorrere la bobina reattiva o un'altra rotaia di terra, se presente.

Si presentano due bobine reattive adiacenti longitudinalmente, i cui rispettivi centri sono collegati.

I versi di percorrenza delle due bobine da parte della corrente sono tali da produrre auto compensazione degli effetti induttivi.

La connessione dei centri bobina è usata anche per scopi di messa a terra di trazione.

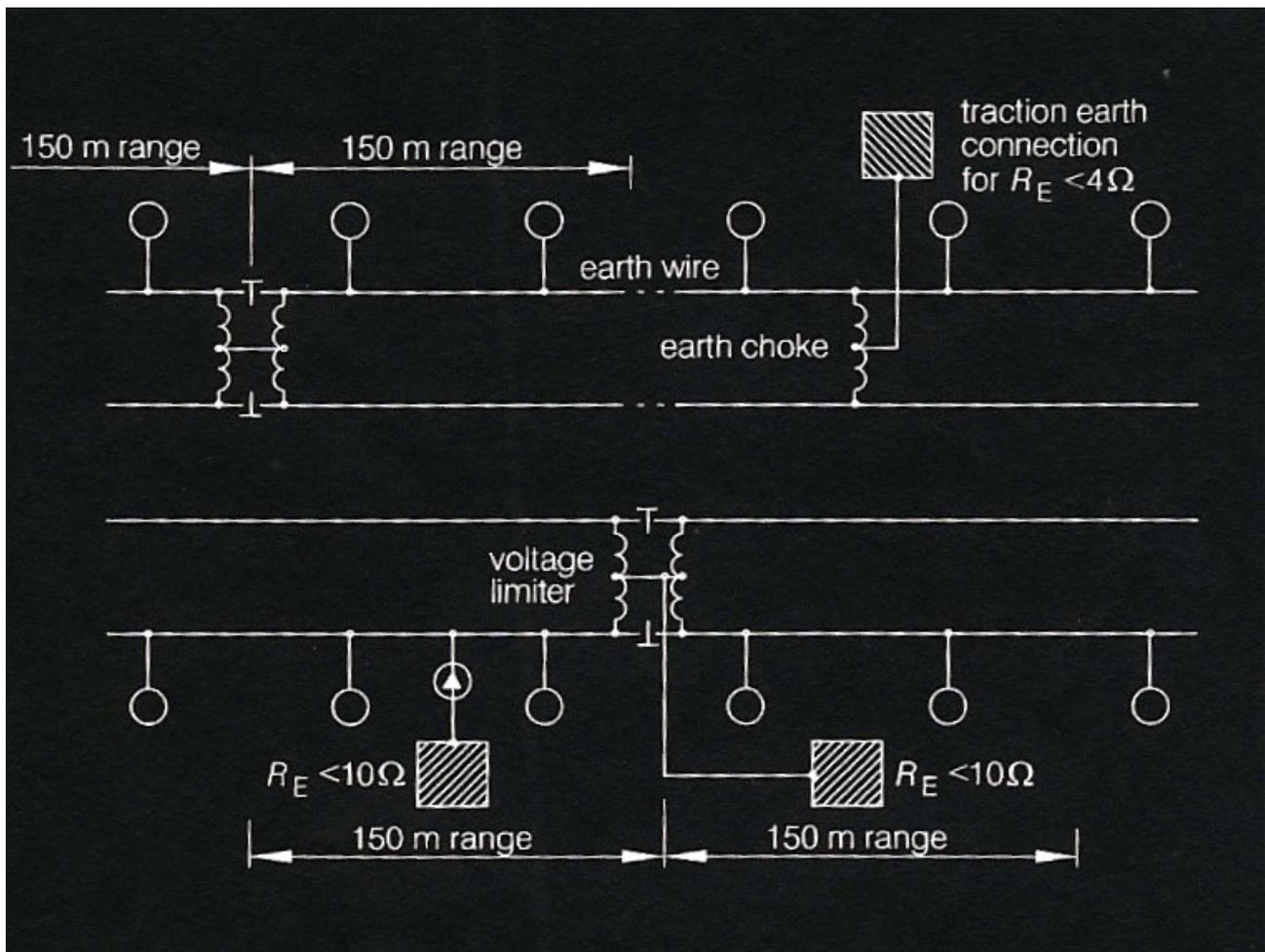
Anche a rotaie entrambe isolate, una delle due viene definita rotaia di terra.

Ogni componente con resistenza verso terra maggiore od uguale a  $10 \Omega$  deve essere connesso alla rotaia di terra, senza restrizioni.

Ogni componente a resistenza verso terra compresa tra i  $4$  e  $10 \Omega$  può essere connesso alla rotaia di terra solo ad una distanza di  $150$  m dal componente stesso e comunque  $150$  m indietro rispetto ad un gruppo di due bobine reattive.

Entro i  $150$  m di distanza dal gruppo di bobine in entrambi i lati, tali componenti devono essere direttamente connessi alla connessione dei centri bobina, attraverso smorzatori di terra o limitatori di tensione.

Ogni componente a resistenza di terra inferiore ai  $4 \Omega$  può essere connesso alla rotaia di terra solo tramite smorzatore di terra o limitatore di tensione, sempre  $150$  m oltre il componente stesso.

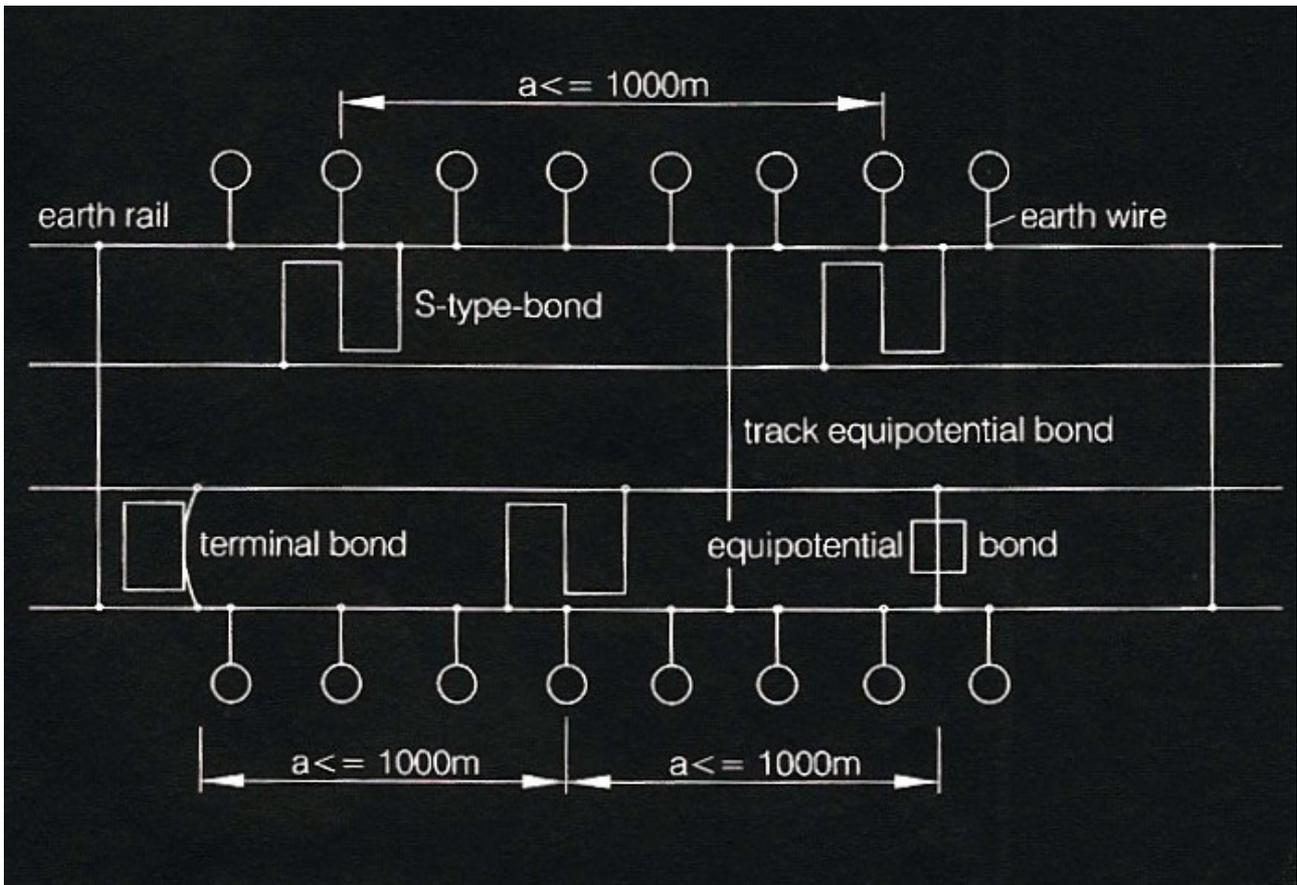


**Connessione alla messa a terra di trazione delle palificazioni e degli altri componenti a bassa impedenza verso terra, in binari rotaie entrambe isolate**

Con circuiti di binario a frequenza audio entrambe le rotaie conducono la corrente, ma viene definita come di terra quella più vicina alla palificazione.

Generalmente, in campo aperto, le due rotaie di uno stesso binario sono connesse tra loro per mezzo di connettori ad esse, di terminale, di corto circuito o equipotenziali ad un intervallo di meno di 1000 m.

Connettori ad esse, terminali e di corto circuito rappresentano le parti terminali del circuito di controllo e gestione del traffico e sono chiamati in gergo giunti isolanti elettrici.



**Connessioni di binario e di rotaia con circuiti di occupazione del binario a frequenza audio**

### 4.6.3 Connessioni di terra delle strutture in cemento

Le direttive delle ferrovie tedesche richiedono che anche le armature di rinforzo delle strutture in cemento nei pressi dei binari siano connesse alla messa a terra di trazione.

Ciò per garantire un'effettiva equipotenzialità delle stesse verso terra e un valore definito di corrente di corto circuito sulle quali gli interruttori saranno chiamati ad aprire in caso di rottura della linea di contatto o a contatto con parti ad elevata tensione a causa di danneggiamento del pantografo.

Le aste di rinforzo in acciaio e tutte le rispettive parti conduttive longitudinali sono connesse elettricamente tra loro e con la rotaia di terra o conduttori di ritorno corrente al massimo ogni 100 m.

Comunque non è possibile interconnettere armature a stato di sforzo pre-posto.

Le giunzioni tra parti in metallo dell'armatura annegata nel cemento sono saldate.

La fasciatura a rete delle sbarre è permessa per strutture speciali in cemento con rinforzo non pre-posto in stato di sforzo.

Laddove palificazioni, rotaie e barriere anti-rumore sono montate su ponti, le connessioni di terra sono effettuate con i contatti di terra degli stessi.

In strutture più lunghe di 100 m, strisce aggiuntive continue in acciaio con sezione di almeno 120 mm<sup>2</sup> o sbarre aggiuntive di rinforzo continue di almeno 16 mm di diametro sono montate al livello di rinforzo giacente sotto ciascun binario più vicino allo stesso.

Vista la non possibilità di collegamento diretto dei connettori di terra con le rotaie in caso esse siano entrambe isolate in corrispondenza dei ponti, data l'usuale bassa resistenza verso terra di quest'ultimi, vengono montate delle barre di terra e tutti i componenti per i quali è prevista la messa a terra vanno collegati a quelle sbarre.

Queste sbarre a loro volta sono connesse ai connettori di centri bobina reattiva.

La direttiva 997 delle ferrovie tedesche descrive in toto il sistema di messa a terra di trazione e le caratteristiche che esso deve avere.

## 4.7 Il controllo delle reti potenza

### 4.7.1 Generalità

Il sistema di controllo delle reti di potenza comprende la totalità degli apparati dediti alla gestione dell'esercizio di reti di trasmissione, linee di contatto, sottostazioni, impianti di conversione e di produzione.

La struttura ed l'attività del sistema sono in relazione in modo particolare con l'ultimo anello della catena di alimentazione per la trazione, cioè le linee di contatto.

In passato si prefiggeva il solo controllo degli apparati MT, anche AT ma solo di sottostazione. Si parlava di controllo locale per mezzo di strutture a presenza umana sul posto.

La sua area di influenza è cresciuta al passo delle esigenze di esercizio sicuro ed economico, favorita anche dall'introduzione delle sottostazioni senza personale in loco.

Il termine controllo remoto è stato introdotto proprio per sottolineare la distanza tra luogo di controllo e luogo controllato.

Controllo remoto significa sempre di più controllo centralizzato.

Il sistema di controllo remoto comprende pure una propria rete telefonica per comunicazioni voce e dati, perché in caso di operatori (di controllo e di manovra/manutenzione) posti a distanza, la comunicazione è sempre necessaria.

Si parla di apparati di comunicazione inter-impianto e tra impianto operativo e centri di controllo.

L'esercizio senza personale degli impianti operativi richiede la raccolta di informazioni dettagliate sullo stato degli apparati di protezione, di interruzione e ausiliari.

Ciò è particolarmente utile quando, in caso di guasto, le azioni per la sua individuazione e risoluzione debbano essere precedute da un'analisi della situazione da parte del personale di controllo.

Una raccolta dettagliata dei parametri, ma allo stesso tempo immediatamente comprensibile, è indispensabile per la l'azione veloce degli operatori, la quale si ripercuote sulla circolazione ferroviaria con perturbazioni altrettanto brevi.

Informazioni dettagliate significa grande quantità di dati, in particolare ai più alti livelli del sistema di controllo delle reti.

Per contenere l'afflusso di dati grezzi, che poi andranno elaborati, agli alti livelli del sistema di controllo, i suddetti dati sono pre-elaborati ai livelli più bassi e molte procedure operative sono automatizzate.

La diagnosi in remoto rende possibile una rapida analisi del guasto da parte di personale altamente specializzato, situato nelle strutture centrali di controllo.

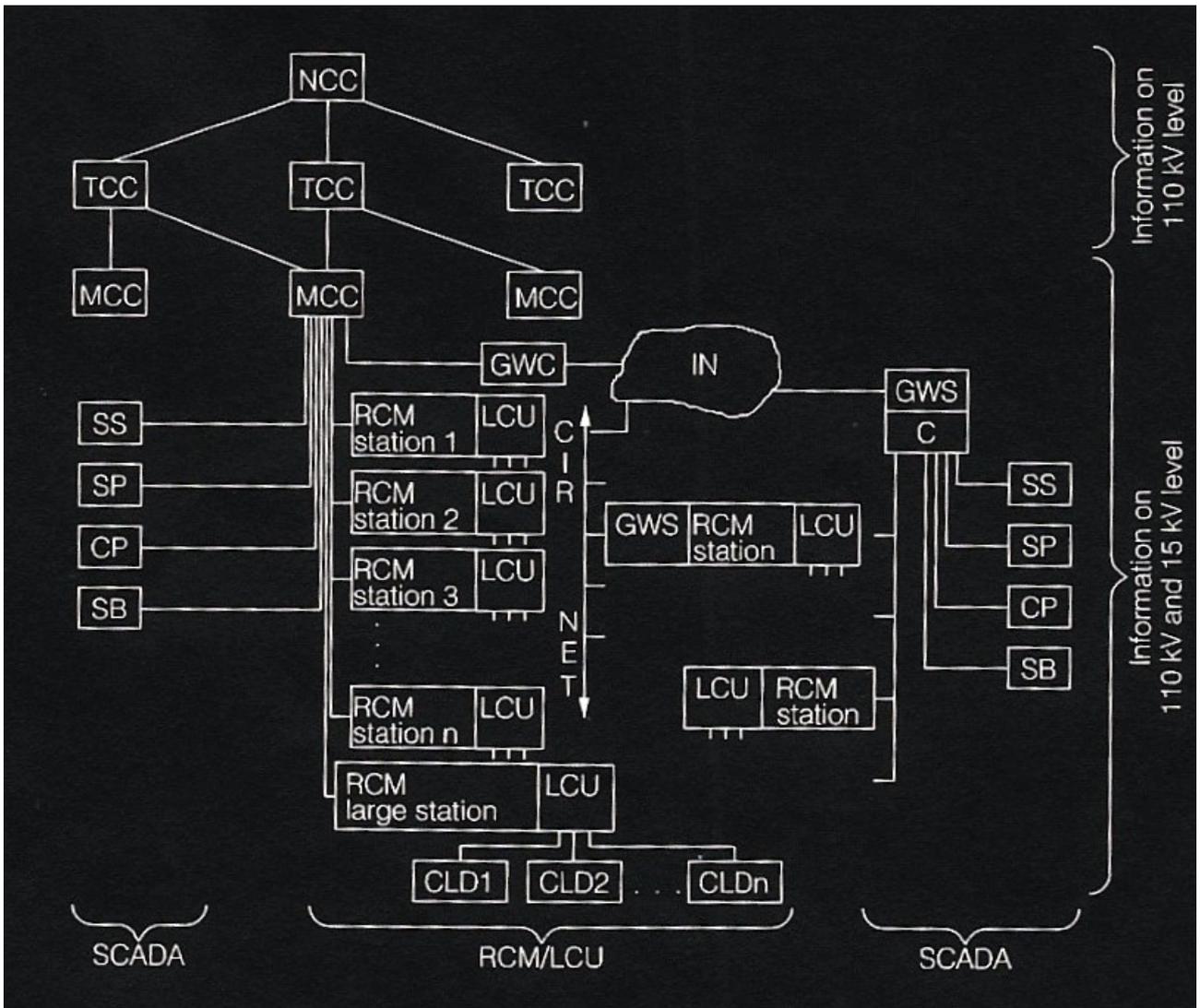
La trasmissione dei dati e dei comandi deve avvenire con rapidità.

A tale scopo le reti di dati di proprietà delle ferrovie tedesche, cioè IN (integrated network) e CIR-NET (computer integrated railroading net), vedono un crescente uso della fibra ottica.

Per quanto riguarda le strutture di controllo agli alti livelli, troviamo, in ordine gerarchico discendente:

- il centro di gestione delle reti o NCC;
- i centri di controllo della rete di trasmissione o TCC;
- i centri principali di controllo o MCC.

L'MCC tratta i dati relativi alla sezioni AT e (principalmente) MT, la TCC e l'NCC solo della sezione AT.



Schema del sistema di controllo delle reti di potenza delle ferrovie tedesche

## **.7.2 Unità locali di controllo e linee per il controllo remoto**

Al fine di raggiungere un'alta disponibilità in servizio dei vari apparati preposti all'alimentazione delle linee di contatto, gli stessi sono suddivisi in numerosi gruppi circuitali principali ed ausiliari. Ciascuna sezione di linea di contatto è alimentata da sezionatori a controllo elettrico e controllata da un trasformatore a segnalazione di corto circuito posto in serie ai sezionatori in parallelo, indicati come di tipo cinque negli impianti delle DB.

Essi connettono i gruppi circuitali principali.

Le unità locali di controllo o LCU, installate in ciascun impianto nell'edificio "interblocchi", gestiscono l'attività dei sezionatori.

I sezionatori sono connessi al motore attuativo, il quale non presenta un circuito separato di comando a retroazione.

Perciò speciali apparati sono usati per processare il segnale attuativo bifase e i segnali di comando a retroazioni, i quali fluiscono attraverso le tre fasi del motore.

Essi convertono il segnale di comando a 60 V inviato dal modulo di controllo remoto o RCM in segnali di comando a retroazione a 230 V dipendenti dal flusso di corrente nel motore.

Sono equipaggiati con interruttori automatici per la messa in sicurezza dei circuiti e l'isolamento della parte elettronica dalle tensioni indotte nei cavi di collegamento.

Sono inoltre montati particolari moduli di misura i quali forniscono informazioni sui transitori di corto circuito.

Negli impianti più vecchi, sempre nell'edificio "interblocchi", sono disponibili postazioni per la gestione sul posto della LCU nel caso non fosse temporaneamente disponibile il controllo remoto. La funzione di controllo è generalmente centralizzata.

I rimanenti RCM, al fine della centralizzazione sono connessi perciò da un sotto-centro di controllo remoto.

Gli RCM convertono i segnali in telegrammi digitali a modulazione di frequenza, i quali vengono inviati ad intervalli regolari al sistema generale di controllo grazie al telegrafo.

Il sistema di trasmissione e ricezione di un centro principale di controllo o MCC può dialogare con fino a 30 sottostazioni connesse da una linea di controllo remoto.

Gli RCM delle sottostazioni più grandi operano secondo il principio di end-to-end.

I moderni impianti sono connessi con sottostazioni di ingresso o GWS.

Le trasmissioni tramite GWS avvengono quando necessario sotto forma di telegrammi recanti l'ora d'invio e la posizione del guasto.

### 4.7.3 Tecnologia di controllo remoto dello SCADA

I moduli di controllo remoto di uno SCADA sono componenti permanentemente integrati nel sistema stesso.

L'esercizio elettrico di una linea ferroviaria risulta generalmente molto meno regolare di quello di una linea di alimentazione pubblica, anche nel breve periodo.

Ciò potrebbe tradursi in scatti intempestivi delle protezioni con ripercussioni sulla circolazione dei treni.

Oltre allo scatto intempestivo vero e proprio si deve anche evitare che nel sistema di controllo remoto circolino continui messaggi di anomalia rilevata ma anche molteplici messaggi legati allo stesso evento al fine di permettere una rapida e precisa comprensione delle informazioni.

L'analisi del regime di guasto risulta molto semplificata se tutte le informazioni collegate ad uno stesso evento viaggiano in un unico telegramma con intestazione ridotta.

Dovendo includere il messaggio l'ora di invio, si usano orologi radio controllati, i quali possono essere così facilmente sincronizzati.

La trasmissione delle informazioni avviene secondo una scala di priorità, ad esempio la segnalazione di protezione attivata ha la precedenza sulla trasmissione dei valori misurati dei parametri.

Tutte le informazioni aggiuntive fornite da una protezione di tipo digitale viaggiano alla più bassa velocità di trasferimento dati.

I messaggi contenenti informazioni inutili sono soppressi e sostituiti da una semplice segnalazione.

E' previsto pure un sistema di filtraggio dell'eco per non considerare più volte lo stesso evento.

La connessione tra l'apparato di elaborazione dati di sottostazione e il centro principale di controllo è bidirezionale, effettuata dal sistema di interrogazione secondo il principio dell'end-to-end.

Gli impianti più moderni si connettono autonomamente all'IN o al CIR-NET attraverso un convertitore esterno od integrato e una GWU.

#### 4.7.4 Nodi di controllo remoto e centri ausiliari di controllo

Sempre in nome della centralizzazione del sistema di controllo delle reti di potenza, si doveva procedere alla conversione dei messaggi sotto forma di telegrammi tipici degli RCM in un database a linguaggio uniforme.

Questa funzione di pre-elaborazione veniva svolta dai nodi di controllo remoto o RCN.

Situati negli MCC, ma prima dell'unità centrale di elaborazione o PCS, essi costituivano il ponte tra le unità locali e il centro principale di controllo.

Le linee di controllo remoto e fino a due unità di elaborazione di sottostazione sono connesse alle cinque unità di trasferimento dati di ciascun RCN.

La connessione avviene secondo il principio della disponibilità d'area attraverso l'unità telegrafica o ACT o attraverso i centri di ingresso o GWC.

Pre-elaborate le informazioni giunte al RCN, quest'ultimo le trasmette al TCC.

Oltre a convertire 15 tipologie di messaggio telegrafico, gli RCN compensano la differente qualità e precisione delle varie unità sussidiarie di controllo remoto.

Essi aggiungono l'ora di ricezione ai pacchetti di informazioni, sanno distinguere vecchie e nuove segnalazioni, evitano la ri-trasmissione simultanea eccessiva mediante memorizzazione, mantengono un prospetto del processo, il tutto consentendo un afflusso ottimale di dati all'elaborazione.

Con l'avvento delle reti integrate, si è dovuto estendere parte di queste funzionalità anche a livello delle unità di controllo remoto e dello SCADA, al fine di inviare alle GWU le informazioni uniformate secondo un protocollo compatibile con l'IN.

Si occupano di ciò, a tale livello, i convertitori, specie in presenza di comunicazione telegrafica.

Le informazioni in uscita dai convertitori viaggiano ad alta velocità sulle IN fino al centro generale di controllo delle reti di potenza.

I centri ausiliari di controllo o SCC svolgono una funzione di gestione ridotta fintantoché non viene assunta in toto dagli MCC.

Con lo SCADA inoltre è possibile aggregare ulteriori unità sussidiarie di controllo remoto.

Nel futuro, grazie a prevedibili sviluppi tecnologici, si ritiene che sia possibile uno sviluppo della rete integrata e delle funzionalità dei vari apparati.

#### 4.7.5 Centri principali di controllo

I centri principali di controllo o MCC gestiscono l'intera sezione MT delle reti di potenza, prendendosi cura degli apparati di protezione e ausiliari.

Originariamente la funzione degli MCC veniva svolta da sottostazioni madre, le quali controllavano le sottostazioni figlie per mezzo di pannelli a mosaico.

Il primo MCC ad ausilio computerizzato è entrato in servizio nel 1984 a Karlsruhe.

Esso ospitava pure il classico pannello a mosaico come riserva.

Dal 1987 gli MCC di Borken, Lehrte, Norimberga, Monaco, Colonia sono passati al controllo computerizzato.

Bisogna aspettare il 1993 affinché il controllo computerizzato di MCC diventi integrale e a funzionalità completa.

Il primo esempio nell'MCC di Monaco di Baviera.

A ciascun MCC è assegnata la gestione di un'area di territorio con le rispettive linee ferroviarie elettrificate.

Gli MCC si trovano a Monaco di Baviera, Berlino, Borken, Lipsia, Düsseldorf, Karlsruhe, Colonia, Lehrte e Norimberga.

Un tipico MCC ospita gli RCN, il sistema computerizzato di elaborazione dati, tre postazioni operative con sei monitor ciascuna, una postazione di servizio per simulazioni.

Oltre al controllo operativo degli apparati, un MCC è dotato di molteplici funzionalità aggiuntive, ad esempio compilazione di statistiche sui parametri misurati, tecniche di simulazione, localizzazione automatica del guasto e creazione di database dei guasti stessi.

Un MCC è dotato di un apparato di comunicazione con i livelli superiori per la trasmissione dei dati di interesse condiviso.

#### **4.7.6 Centri di controllo delle reti di trasmissione e centro di controllo dell'intera rete di potenza**

Al pari della sezione MT delle reti di potenza che risulta divisa in aree di influenza di un MCC, lo è anche la sezione AT.

Il territorio risulta diviso in tante aree quanti sono i TCC.

Ogni TCC controlla tutte le linee di trasmissione all'interno della propria area di influenza.

I TCC sono situati a Lehrte, Monaco di Baviera, Colonia e Dresda.

Le informazioni riguardanti le linee di trasmissione arrivano ai TCC attraverso le sottostazioni a 110 kV come parte di quelle trasmesse agli MCC o direttamente, opportunamente elaborate, dai secondari dei trasformatori di misura dei bassi livelli di controllo.

Il centro di controllo dell'intera rete di potenza o NCC occupa il posto più elevato nella gerarchia del sistema di controllo.

E' situato a Francoforte sul Meno.

Esso controlla il flusso di energia immesso in rete dalle centrali di produzione dedicate, di proprietà e non, dagli impianti di conversione e non ultimi dalle linee transfrontaliere per la trazione che connettono Germania e Svizzera/Austria e la distribuzione della stessa per mezzo delle sottostazioni.

Al fine di svolgere in maniera ottimale il proprio compito, i dati relativi alle misurazioni dei parametri e agli interventi degli interruttori vengono trasmessi all'NCC con continuità, ogni minuto dalle centrali di produzione e ogni cinque dalle sottostazioni.

Si prevede che in futuro l'NCC assorbirà i compiti dei vari TCC, convertendo gli stessi in strutture di solo supporto e archiviazione dei dati.

## 5 L'USO DELLA FREQUENZA FERROVIARIA NELLE LINEE AD ALTA VELOCITÀ

Definiamo come linea ad alta velocità quella che, in base a determinate caratteristiche costruttive, permette la circolazione regolare dei mezzi ad oltre 200 km/h, inferiore solo in tratti circostanziati della stessa.

Le caratteristiche costruttive richieste possono essere implementate sin dall'avvio dell'attività della linea, e in tal caso si parla di nuova linea, o ottenute per aggiornamento di una linea esistente.

Caratteristiche costruttive che interessano tre aspetti della linea:

- il tracciato, il quale ad esempio deve essere il più rettilineo possibile (con curve, se presenti, ad elevato raggio) e presentare pendenze ridotte;
- la sede ferroviaria, la quale comprende sia le opere a sostegno dei binari che i binari stessi e dev'essere in grado di sopportare le elevate sollecitazioni meccaniche prodotte dal transito di un treno ad alta velocità con particolare attenzione all'armamento del binario;
- le strutture di alimentazione elettrica dei convogli, comprendenti le linee di contatto, i circuiti di ritorno della corrente e gli impianti di immissione in linea della potenza elettrica (leggi sottostazioni) che devono sottostare a particolari dettami meccanici ed elettrici.

Occupiamoci delle strutture di alimentazione.

Devono sottostare ai rigorosi dettami meccanici in particolare la linea di contatto e le strutture a suo supporto, palificazioni, mensole e sospensioni.

Il tutto per tenere nella posizione voluta la linea di contatto anche a fronte delle elevate sollecitazioni operate dal treno in movimento ad elevata velocità, direttamente sulla linea di contatto ad opera dello strisciante del pantografo o indirettamente dagli effetti aerodinamici dovuti al passaggio del treno.

Si cerca inoltre di mantenere sempre ottimale l'accoppiamento strisciante-linea di contatto.

La posizione prestabilita della linea di contatto tiene conto della sagoma dei treni, della luce di gallerie e ponti, della vicinanza di parti non in tensione e gli eventuali scostamenti verticali e orizzontali dalla posizione prestabilita (a riposo) devono essere considerati, anche se controllati.

La geometria delle linee di contatto e delle strutture di supporto delle stesse è concepita proprio per l'adeguato posizionamento e l'accoppiamento ottimale.

Può essere dedicata così come può essere dedicata la catenaria scelta per le linee ad alta velocità.

Abbiamo già visto, per quanto riguarda le linee a frequenza ferroviaria, alcune catenarie dedicate, come ad esempio la Re330 delle DB o la S25 della JBV.

Per dettami elettrici, significa essenzialmente fornire ai mezzi circolanti la potenza che essi richiedono nell'esercizio previsto, rispettando parametri di qualità della tensione e della corrente nel punto di contatto tra linea e organi di captazione o pantografi.

Per quanto riguarda la qualità della tensione al punto di contatto, la quale deve discostarsi di poco dal valore nominale a fronte di cadute prodotte da correnti generalmente elevate, anche le catenarie dedicate fanno la loro parte.

Esse, oltre ad essere particolari nella geometria, lo sono pure nella scelta della sezione delle funi che le compongono.

Generalmente presentano funi di sezione più elevata di quelle usate nell'esercizio ferroviario generale.

Le correnti che abbiamo definito come elevate compaiono in quanto i mezzi ferroviari nel raggiungimento e nel mantenimento di velocità elevate sono fortemente energivori.

<b>TRENO</b>	<b>AMMINISTRAZIONE</b>	<b>POTENZA ORARIA [MW]</b>
ETR 500	TRENITALIA	8,8
ICE 1	DB BAHN	9,6
ICE 3	DB BAHN	8
S/100	RENFE	8,8
S/102	RENFE	8
S/103	RENFE	8,8
SHINKANSEN SERIE 300	JR CENTRAL, JR WEST	12
SHINKANSEN SERIE 500	JR CENTRAL, JR WEST	18,24
SHINKANSEN SERIE 700	JR CENTRAL, JR WEST	13,2
SHINKANSEN SERIE N700	JR CENTRAL, JR WEST	17,08
SHINKANSEN SERIE E1	JR EAST	9,84
SHINKANSEN SERIE E2	JR EAST	7,2/9,6
SHINKANSEN SERIE E5	JR EAST	9,96
700T	THSR	10,26
TGV PSE	SNCF	6,4
TGV LA POSTE	SNCF	6,4
TGV ATLANTIQUE	SNCF	8,8
TGV RESEAU	SNCF	8,8
TGV DUPLEX	SNCF	8,8
TGV POS	SNCF	9,28
TGV TMST	EUROSTAR	12,2
TGV PBA	THALYS	8,8
TGV PBKA	THALYS	8,8
KTX-I	KORAIL	13,56
KTX-II	KORAIL	8,8
ACELA EXPRESS	AMTRAK	8,94

### **Principali elettrotreni rapidi circolanti sulle linee mondiali ad alta velocità**

Un treno fortemente energivoro richiede per il suo utilizzo a piena potenza che la linea di contatto sia in grado di fornirgliela, e quindi la/e sottostazioni preposta/e all'alimentazione della linea di contatto facciano lo stesso.

Indipendentemente dal fatto che l'elevata potenza assorbita sia utilizzata per un servizio veloce e leggero (come è tipico di un elettreno AV) o per uno pesante e più lento (come può essere un lungo treno merci o passeggeri a carrozze e locomotore), essi sono visti come fortemente energivori dalla sottostazione, così come lo sono più servizi leggeri brevemente tempo/distanza-spaziati (tipici delle linee regionali o metropolitane).

Anni di esercizio su linee tradizionali, con tutti i tipi di servizio a media/bassa velocità, hanno dimostrato l'efficacia dell'alimentazione a corrente alternata monofase a frequenza ferroviaria per carichi elettrici importanti.

Osservando la quasi equivalenza energetica di servizi dove velocità e massa rimorchiata sono

correlati, si nota come l'efficacia per servizi a bassa velocità si possa riscontrare anche in servizi ad alta velocità.

Nei sistemi ad tensione più elevata è possibile fornire una potenza anch'essa elevata facendo circolare correnti relativamente modeste.

E' il caso degli attuali sistemi in corrente alternata monofase per la trazione o dei classici sistemi trifasi della rete pubblica.

I sistemi a tensione più contenuta, come sono quelli in corrente continua, devono far fronte ad elevate correnti.

Il trattamento delle alte correnti risulta spesso problematico.

Si usano diversi artifici a tale scopo.

Uno di questi può essere l'uso di una catenaria pesante, a molte corde, col altrettanto pesante impatto dinamico del treno in transito sulla stessa e sulle strutture che la sostengono.

Non potendo dunque eccedere nel dimensionamento della catenaria, unitamente alle problematiche relative all'esercizio con più pantografi in presa per singolo treno (richiesto dalla limitata corrente, non sufficiente per coprire una potenza AV, assorbibile da un solo pantografo), il sistema risulta fortemente limitato nelle potenzialità, il che si traduce in una velocità massima di esercizio ridotta, sempre elevata (circa 250 km/h) ma parecchio inferiore a quella in presenza di sistemi in corrente alternata monofase a media tensione.

Si preferisce quindi mantenere il sistema a bassa tensione per le linee storiche e esercire quelle ad alta velocità in media tensione in corrente alternata monofase.

Un sistema misto di siffatta maniera limita fortemente però le possibilità di esercizio congiunto linee storiche - linee AV, anche laddove gli aspetti demografici del territorio attraversato suggerirebbero il contrario.

Esercizio congiunto linee storiche-linee AV significa interconnessioni frequenti e facilitate (in termini di separazione degli apparati) tra le due reti permettendo di passare da una linea all'altra in primo luogo ai treni AV ma anche ai treni di servizio generale, se opportuno e/o necessario.

Un sistema in corrente alternata monofase a media tensione come quello a frequenza ferroviaria favorisce l'esercizio congiunto in maniera ottimale.

Una scelta dell'esercizio congiunto scaturisce spesso in un'evoluzione del sistema AV, il sistema AV/AC, dove AC sta per alta capacità.

Un sistema AV/AC incorpora le caratteristiche di una linea AV che permettono l'esercizio a velocità sostenuta e le sfrutta appieno anche traducendo la velocità in massa rimorchiabile e il controllo della circolazione simultanea di mezzi veloci in controllo della circolazione simultanea di molti più mezzi lenti.

Germania (con alimentazione generalizzata a corrente alternata monofase a frequenza ferroviaria e media tensione) e Italia (con alimentazione mista) sono paesi con caratteristiche demografiche simili.

Entrambi gli stati hanno scelto un sistema AV/AC per la totalità (o quasi totalità) delle linee veloci in esercizio o in costruzione nei loro territori.

La differenza sta nel fatto che per il primo stato la scelta è effettiva, nel secondo quasi solo formale. In Germania otto delle nove linee veloci che sono o saranno in servizio in futuro sono a servizio congiunto.

L'unica linea specificatamente solo AV è la Colonia - Francoforte, la quale è restrittiva anche per i vari mezzi AV, infatti solo l'ICE serie 3 vi è ammesso.

Le altre linee vedono la circolazione di, oltre ai veri mezzi AV, anche di treni merci e/o passeggeri di uso generale, seppur adeguatamente regolamentata.

In Italia allo stato attuale, anche per motivi su cui non ci soffermiamo in questa sede, solo 331 km di linee veloci (o comunque con velocità massima superiore ai 200 km/h) sono effettivamente di esercizio congiunto.

331 km ripartiti tra:

- 254 km della “Direttissima” Firenze - Roma;
- 29 km della “A monte Vesuvio” Napoli - Salerno;
- 25 km del raddoppio della linea Padova - Venezia Mestre;
- 23 km del raddoppio della linea Milano - Treviglio.

Questi tratti sono eserciti in velocità massima medio - alta ( $200 \text{ km/h} < v_{\text{max}} \leq 250 \text{ km/h}$ ) e alimentati col sistema delle linee storiche, a 3000 V e in corrente continua.

Considerata l’adattabilità dei sistemi in corrente alternata monofase a entrambi le tipologie di servizio, generale e AV, che ha favorito il servizio congiunto, la correlazione velocità massima - massa rimorchiabile nei mezzi ha favorito la nascita e lo sviluppo di mezzi di servizio per quanto possibile congiunto.

Se gli elettrotreni rapidi o ETR risultano ancora insostituibili per il servizio ad alta velocità, locomotori in grado di trainare un treno ordinario a bassa e medio-alta velocità operano e hanno operato in un passato recente.

Molti di essi sono prodotti da aziende basate in nazioni che usano sistemi a frequenza ferroviaria per l’alimentazione dei convogli ed esercitano la loro funzione principalmente in tali nazioni.

Citiamo:

- la DB E103, la più potente locomotiva mai costruita, che ha introdotto i servizi regolari a 200 km/h in Germania;
- la DB E101, che ha preso il posto della E103 come ammiraglia della flotta;
- la ES 64 U2 (ÖBB 1016/1116) e la ES 64 U4 (ÖBB 1216), detentrici del record di velocità per locomotori;
- la SBB Re 460, operante in Svizzera.

<b>Locomotiva</b>	<b>Azienda produttrice</b>	<b>Anno di entrata in servizio</b>	<b>Potenza continuativa [kW]</b>	<b>Potenza oraria [kW]</b>	<b>Velocità massima di esercizio [km/h]</b>	<b>Velocità record [km/h]</b>
DB E103	AEG	1970	7440	7780	200	283
DB E101	ADtranz	1996	6400		220	
ES 64 U2	Siemens	2000	6400	7000	230	
ES 64 U4	Siemens	2005	6000	6400	230	357
SBB Re 460	SLM/ABB	1992	6100		230	

Abbiamo visto come un generico sistema in corrente alternata monofase a media tensione sia generalmente più indicato di un sistema a bassa tensione per l'esercizio ferroviario a velocità elevate.

Se è vero che un sistema a frequenza ferroviaria (o comunque diversa da quella industriale, anche a valore 0 o in continua) presenta il problema della generazione o della conversione, è vero anche che questa separazione dalla rete pubblica ha i suoi vantaggi.

Abbiamo già visto come un sistema a frequenza ferroviaria si distingua rispetto ad uno a frequenza industriale nell'esercizio generale.

Nell'esercizio ad alta velocità le considerazioni viste sono ancora più attuali, data l'entità delle potenze e delle correnti in gioco, alle quali sono associati altri parametri come le cadute di tensione. Riepiloghiamo.

Un sistema a bassa frequenza presenta innanzitutto una minor caduta di tensione dovute alle impedenze di tipo induttivo.

Un sistema a conversione in frequenza generalmente adotta l'alimentazione bilaterale della sezione di linea di contatto e l'accoppiamento longitudinale delle varie sezioni.

Generalmente perché nella conversione distribuita l'alimentazione bilaterale è possibile se le reti pubbliche che alimentano i gruppi di conversione sono sincronizzate.

In Germania questo è vero e quindi l'alimentazione adottata è bilaterale.

Se è vero che nei sistemi a frequenza industriale una sorta di alimentazione bilaterale può essere fatta (anche se generalmente è a sbalzo), comunque non è realizzabile l'accoppiamento longitudinale continuo delle sezioni.

L'alimentazione bilaterale della sezione unita all'accoppiamento longitudinale di più sezione ha enormi benefici, quali:

- ripartizione fra sottostazioni delle potenze fornite ai carichi;
- minore caduta di tensione nel punto più sfavorito;
- possibilità di uso ottimale dell'energia immessa in linea dai veicoli e prodotta durante la frenatura elettrica che, universalmente presente (e prescritta) sui mezzi circolanti a velocità sostenuta, è del tipo a recupero e non viene sprecata come nei sistemi di frenatura elettrica reostatica.

La rete di trasmissione a frequenza ferroviaria (presente nei sistemi a conversione centralizzata) riduce ulteriormente gli squilibri e tende a contenere al suo interno le perturbazioni coadiuvata in questo dall'accoppiamento tramite gruppi di conversione alla rete pubblica.

La rete pubblica è maggiormente indipendente dalle perturbazioni della rete di trazione e viceversa.

Non meno importante è il fatto che un sistema a conversione in frequenza presenta i carichi ferroviari monofasi come carichi equilibrati trifase alla rete pubblica.

Ciò non avviene nei sistemi ferroviari a frequenza industriale, dove il carico monofase ferroviario si presenta come tale alla rete trifase pubblica con tutti i problemi elettrici e quindi logistici che questo crea.

Come problemi logistici intendiamo ad esempio la necessità di avere una rete pubblica ad elevata potenza di corto circuito (e elevatissima tensione) nei pressi della sottostazione trasformatorica ferroviaria, pregressa o costruita ex-novo, il che condiziona il posizionamento della sottostazione stessa (e dell'intera linea generalmente) o il capitale investito per la costruzione della linea il quale deve tenere conto anche di queste opere addizionali.

## APPENDICE

### A.A) GERMANIA

#### A.A.1) Sottostazioni

Impianto/ Località	Land federale	Coordinate
Aalen	Baden-Württemberg	48°49'20"N 10°2'31"E
Adelsheim	Baden-Württemberg	49°24'57"N 9°24'17"E
Almstedt	Bassa Sassonia	52°1'53"N 9°56'26"E
Amstetten	Baden-Württemberg	48°34'8"N 9°52'37"E
Aschaffenburg	Baviera	49°59'8"N 9°5'33"E
Aubing	Baviera	48°9'8"N 11°26'40"E
Augsburg	Baviera	48°23'54"N 10°52'0"E
Baden-Baden	Baden-Württemberg	48°44'3"N 8°8'49"E
Barnstorf	Bassa Sassonia	52°42'26"N 8°30'40"E
Bebra	Assia	50°58'32"N 9°47'23"E
Bengel	Renania-Palatinato	50°0'34"N 7°3'23"E
Biblis	Assia	49°41'3"N 8°26'39"E
Bingen	Renania-Palatinato	49°57'16"N 7°56'54"E
Böhla	Sassonia	51°14'8"N 13°32'44"E
Boizenburg	Meclemburgo-Pomerania Anteriore	53°23'29"N 10°43'58"E

Borne	Brandeburgo	52°6'40"N 12°32'28"E
Braunschweig	Bassa Sassonia	52°16'9"N 10°38'24"E
Buchholz	Bassa Sassonia	53°19'20"N 9°51'44"E
Burgweinting	Baviera	48°58'53"N 12°9'13"E
Datteln	Renania Settentrionale-Vestfalia	51°37'43"N 7°20'3"E
Denkendorf	Baviera	48°56'19"N 11°27'19"E
Donauwörth	Baviera	48°42'58"N 10°45'43"E
Dortmund	Renania Settentrionale-Vestfalia	51°30'38"N 7°24'3"E
Duisburg	Renania Settentrionale-Vestfalia	51°24'45"N 6°47'33"E
Düsseldorf	Renania Settentrionale-Vestfalia	51°13'18"N 6°50'11"E
Ebensfeld	Baviera	50°5'0"N 10°57'41"E
Eichenberg	Assia	51°22'34"N 9°55'31"E
Eilenburg	Sassonia	51°26'48"N 12°37'8"E
Eisenach	Turingia	50°57'51"N 10°22'19"E
Elmshorn	Schleswig-Holstein	53°45'45"N 9°39'17"E
Elsfleth	Bassa Sassonia	53°16'52"N 8°28'26"E
Emden	Bassa Sassonia	53°21'30"N 7°13'11"E
Emskirchen	Baviera	49°33'30"N 10°41'43"E
Essen	Renania Settentrionale-Vestfalia	51°27'24"N 7°1'39"E
Eutingen	Baden-Württemberg	48°28'47"N 8°46'44"E
Eystrup	Bassa Sassonia	52°47'32"N 9°13'45"E

Fallersleben	Bassa Sassonia	52°25'16"N 10°40'30"E
Finnentrop	Renania Settentrionale-Vestfalia	51°10'3"N 7°58'1"E
Flieden	Assia	50°25'8"N 9°34'18"E
Flörsheim	Assia	50°0'17"N 8°24'54"E
Fulda	Assia	50°32'40"N 9°41'28"E
Freiburg	Baden-Württemberg	47°58'52"N 7°49'41"E
Friedberg	Assia	50°19'28"N 8°46'25"E
Fronhausen	Assia	50°41'55"N 8°41'53"E
Gabelbach	Baviera	48°22'45"N 10°33'35"E
Garssen	Bassa Sassonia	52°40'30"N 10°7'44"E
Gemünden	Baviera	50°3'35"N 9°40'38"E
Geltendorf	Baviera	48°6'21"N 11°1'48"E
Geisenbrunn	Baviera	48°6'29"N 11°19'51"E
Genshagener Heide	Brandeburgo	52°20'5"N 13°16'38"E
Gleidingen	Bassa Sassonia	52°16'1"N 9°50'6"E
Golm	Brandeburgo	52°24'10"N 12°58'8"E
Gössnitz (old)	Turingia	50°52'36"N 12°25'10"E
Gössnitz (neu)	Turingia	50°54'07"N 12°25'59"E
Grönhart	Baviera	48°59'29"N 10°55'48"E
Grossheringen	Turingia	51°6'22"N 11°39'19"E
Grosskorbetha	Sassonia-Anhalt	51°15'12"N 12°1'14"E

Güsen	Sassonia-Anhalt	52°20'7"N 11°58'42"E
Hagen	Renania Settentrionale-Vestfalia	51°24'32"N 7°27'43"E
Halbe ( feed from 15 kV-line from Neuhof)	Brandeburgo	52°07'00"N 13°41'31"E
Hameln	Bassa Sassonia	52°8'26"N 9°26'43"E
Haren	Bassa Sassonia	52°47'2"N 7°18'4"E
Heeren	Sassonia-Anhalt	52°34'28"N 11°52'5"E
Herchen	Renania Settentrionale-Vestfalia	50°46'11"N 7°31'19"E
Hessental	Baden-Württemberg	49°5'58"N 9°46'36"E
Holdingen	Baden-Württemberg	47°36'19"N 7°36'40"E
Holzkirchen	Baviera	47°53'0"N 11°41'56"E
Höchst	Assia	50°6'12"N 8°33'28"E
Ihringshausen	Assia	51°21'7"N 9°32'14"E
Ingolstadt	Baviera	48°46'48"N 11°25'34"E
Kaiserslautern	Renania-Palatinato	49°26'16"N 7°42'19"E
Karow	Berlino	52°36'29"N 13°27'30"E
Karthaus	Renania-Palatinato	49°42'28"N 6°35'28"E
Kirchheim	Assia	50°52'40"N 9°35'13"E
Kirchmöser	Brandeburgo	52°22'55"N 12°24'36"E
Klebitz	Sassonia-Anhalt	51°56'32"N 12°50'12"E
Koblenz	Renania-Palatinato	50°23'12"N 7°33'52"E
Köln-Mülheim	Renania Settentrionale-Vestfalia	50°58'21"N 7°1'7"E

Körle	Assia	51°10'51"N 9°31'48"E
Kreiansen	Bassa Sasssonia	51°50'54"N 9°58'11"E
Kyhna	Sassonia	51°30'42"N 12°16'50"E
Landshut	Baviera	48°32'48"N 12°6'31"E
Leer	Bassa Sasssonia	53°12'48"N 7°27'53"E
Leipzig-Wahren	Sassonia	51°22'55"N 12°18'47"E
Leonberg	Baden-Württemberg	48°47'35"N 8°58'28"E
Limburg	Assia	50°22'45"N 8°5'59"E
Löhne	Renania Settentrionale-Vestfalia	52°11'42"N 8°42'35"E
Lüneburg	Bassa Sasssonia	53°16'1"N 10°24'42"E
Magdeburg	Sassonia-Anhalt	52°9'12"N 11°39'35"E
Mainbernheim	Baviera	49°42'0"N 10°12'39"E
Markt Bibart	Baviera	49°38'48"N 10°25'24"E
Mannheim	Baden-Württemberg	49°26'27"N 8°33'43"E
Markt Schwaben	Baviera	48°11'6"N 11°50'59"E
Montabaur	Renania-Palatinato	50°26'43"N 7°49'13"E
Mörlach	Baviera	49°11'57"N 11°14'24"E
Mottgers	Assia	50°16'43"N 9°39'21"E
Mühlacker	Baden-Württemberg	48°57'6"N 8°50'15"E
Muldenstein	Sassonia-Anhalt	51°39'31"N 12°21'1"E
Mühlanger	Sassonia-Anhalt	51°51'2"N 12°45'54"E

München-Freimann	Baviera	48°11'56"N 11°36'30"E
München-Ost	Baviera	48°8'13"N 11°39'2"E
Münster	Renania Settentrionale-Vestfalia	51°55'25"N 7°38'5"E
Murnau	Baviera	47°41'19"N 11°11'33"E
Nannhofen	Baviera	48°12'58"N 11°11'20"E
Neckarelz	Baden-Württemberg	49°20'21"N 9°7'0"E
Neuhof	Brandeburgo	52°08'03"N 13°28'49"E
Neumarkt (Oberpfalz)	Baviera	49°16'6"N 11°27'45"E
Neudittendorf	Turingia	50°54'29"N 10°53'38"E
Neumünster	Schleswig-Holstein	54°6'33"N 9°56'49"E
Niemberg	Sassonia-Anhalt	51°33'33"N 12°6'10"E
Nörten-Hardenberg	Bassa Sassonia	51°38'21"N 9°56'12"E
Oberacker	Baden-Württemberg	49°5'23"N 8°43'55"E
Oberdachstetten	Baviera	49°25'3"N 10°25'31"E
Offenbach am Main	Assia	50°6'13"N 8°47'17"E
Offenburg	Baden-Württemberg	48°27'30"N 7°55'10"E
Orscheid	Renania Settentrionale-Vestfalia	50°39'18"N 7°19'24"E
Osnabrück	Bassa Sassonia	52°15'56"N 8°7'4"E
Plattling	Baviera	48°46'49"N 12°51'8"E
Plochingen	Baden-Württemberg	48°43'8"N 9°23'31"E
Pretzier	Sassonia-Anhalt	52°49'48"N 11°16'49"E

Pulling	Baviera	48°22'12"N 11°42'50"E
Rathenow	Brandeburgo	52°35'26"N 12°16'39"E
Remagen	Renania-Palatinato	50°34'6"N 7°14'35"E
Rethen	Bassa Sassonia	52°17'29"N 9°48'47"E
Riesa	Sassonia	51°18'41"N 13°16'0"E
Ritterhude	Bassa Sassonia	53°11'37"N 8°45'47"E
Rödelheim	Assia	50°8'29"N 8°35'49"E
Rohrbach	Baviera	49°58'59"N 9°42'12"E
Röhrmoos	Baviera	48°19'24"N 11°26'49"E
Rosenheim	Baviera	47°50'44"N 12°7'58"E
Rotenburg	Bassa Sassonia	53°6'26"N 9°21'17"E
Rottweil	Baden-Württemberg	48°7'56"N 8°39'18"E
Rudersdorf	Renania Settentrionale-Vestfalia	50°50'4"N 8°8'58"E
Saalfeld	Turingia	50°38'42"N 11°22'35"E
Salzbergen	Bassa Sassonia	52°19'42"N 7°20'39"E
Sindorf	Renania Settentrionale-Vestfalia	50°53'34"N 6°39'14"E
Singen	Baden-Württemberg	47°45'29"N 8°52'54"E
Solpke	Sassonia-Anhalt	52°30'2"N 11°17'43"E
Sommerau	Baden-Württemberg	48°7'39"N 8°18'41"E
Steinbach am Wald	Baviera	50°26'10"N 11°22'51"E
Stetzsch	Sassonia	51°4'35"N 13°39'36"E

Stolberg	Renania Settentrionale-Vestfalia	50°47'29"N 6°12'6"E
Stuttgart-Rohr	Baden-Württemberg	48°42'50"N 9°6'35"E
Stuttgart-Zazenhausen	Baden-Württemberg	48°50'40"N 9°11'3"E
Traunstein	Baviera	47°52'6"N 12°37'42"E
Uelzen	Bassa Sassonia	52°57'50"N 10°32'37"E
Vaihingen an der Enz	Baden-Württemberg	48°56'35"N 8°57'58"E
Wächtersbach	Assia	50°14'44"N 9°17'18"E
Waiblingen	Baden-Württemberg	48°49'31"N 9°17'51"E
Waigolshausen	Baviera	49°58'1"N 10°6'59"E
Warburg	Renania Settentrionale-Vestfalia	51°29'50"N 9°8'58"E
Weiterstadt	Assia	49°54'38"N 8°34'29"E
Werdau	Sassonia	50°43'11"N 12°22'11"E
Wickrath	Renania Settentrionale-Vestfalia	51°7'15"N 6°23'44"E
Wiesental	Baden-Württemberg	49°13'19"N 8°29'48"E
Wolfratshausen	Baviera	47°54'30"N 11°25'32"E
Wörsdorf	Assia	50°14'9"N 8°14'51"E
Wunstorf	Bassa Sassonia	52°24'56"N 9°28'58"E
Würzburg	Baviera	49°48'6"N 9°53'52"E
Wurzen	Sassonia	51°21'47"N 12°44'45"E
Wustermark	Brandeburgo	52°32'26"N 12°58'25"E
Zapfendorf (shut down)	Baviera	50°1'33"N 10°56'29"E

## A.A.2) Stazioni di commutazione

<b>Impianto/ Località</b>	<b>Land federale</b>	<b>Coordinate</b>
Neckarwestheim	Baden-Württemberg	49°2'34"N 9°12'6"E
Nenndorf	Bassa Sassonia	53°22'35"N 9°54'13"E
Nitzahn	Brandeburgo	52°27'35"N 12°20'45"E

### A.A.3) Impianti di conversione centralizzata

Impianto/ Località	Land federale	Anno di entrata in servizio	Potenza installata	Tipologia di conversione	Coordinate
Borken	Assia	1963	50 MW	rotante	51°3'7"N 9°17'1"E
Bremen	Brema		100 MW	statica: GTO	53°7'49"N 8°40'49"E
Chemnitz	Sassonia	1965		rotante	50°51'42"N 12°56'18"E
Dresden	Sassonia	1977		rotante	50°59'40"N 13°50'6"E
Düsseldorf	Renania Settentrionale- Vestfalia		15 MW	statica: GTO	51°13'18"N 6°50'11"E
Hamburg- Harburg	Amburgo			rotante	53°26'55"N 10°0'6"E
Jübek	Sassonia-Anhalt		14 MW	statica: GTO	54°33'25"N 9°24'34"E
Karlsfeld	Baviera		100 MW	statica: GTO	48°12'57"N 11°26'06"E
Karlsruhe	Baden- Württemberg	1957	53 MW	rotante	48°58'49"N 8°22'34"E
Köln	Renania Settentrionale- Vestfalia	1957	75 MW	rotante	50°54'14"N 7°2'55"E
Lehrte	Bassa Sassonia	1963 (rotante), 2010 (statica)	37 MW (rotante), 64 MW (statica)	rotante, statico	52°22'54"N 9°57'15"E
Limburg	Assia		120 MW	statica: IGCT	50°24'20"N 8°3'58"E
Marl	Renania Settentrionale- Vestfalia	1963	25 MW	rotante	51°39'40"N 7°10'47"E
Neckarwestheim	Baden- Württemberg	1989	140 MW	rotante	49°2'22"N 9°10'40"E
Neckarwestheim II	Baden- Württemberg	2011	140 MW	statica: GTO	48°2'16"N 9°10'40"E
Neu-Ulm	Baviera			rotante	48°23'51"N 10°1'16"E

Nürnberg	Baviera			rotante	49°25'48"N 11°0'18"E
Saarbrücken	Saarland			rotante	49°14'37"N 6°58'35"E
Singen (shut-down in 2002)	Baden- Württemberg			rotante	47°45'29"N 8°52'54"E
Thyrow	Brandeburgo	2004/2005	8*15 = 120 MW	statica: GTO	52°14'0"N 13°18'10"E
Weimar	Turingia	1973		rotante	50°59'27"N 11°20'34"E

#### A.A.4) Impianti di conversione distribuita

Impianto/ Località	Land federale	Anno di entrata in servizio	Tipologia di conversione	Coordinate
Adamsdorf	Meclemburgo-Pomerania Anteriore	1984	rotante	53°24'31"N 13°2'43"E
Anklam	Meclemburgo-Pomerania Anteriore		rotante	53°50'46"N 13°43'0"E
Berlin-Rummelsburg	Berlino	1984	rotante	52°29'12"N 13°30'33"E
Bützow (demolito)	Meclemburgo-Pomerania Anteriore		rotante	53°49'30"N 11°59'3"E
Cottbus	Brandeburgo	1989	rotante	51°45'0"N 14°17'12"E
Doberlug-Kirchhain	Brandeburgo	1981 (Umformer), 2008 (Inverter)	statica	51°38'49"N 13°34'51"E
Eberswalde	Brandeburgo	1987	rotante	52°50'40"N 13°48'1"E
Falkenberg	Brandeburgo	1987	rotante	51°34'50"N 13°15'26"E
Frankfurt (Oder)	Brandeburgo		rotante	52°21'17"N 14°28'42"E
Lalendorf	Meclemburgo-Pomerania Anteriore		rotante	53°45'15"N 12°23'54"E
Löwenberger Land	Brandeburgo		rotante	52°54'5"N 13°11'18"E
Ludwigfelde	Brandeburgo	1981	rotante	52°18'17"N 13°16'31"E
Lübeck-Genin	Schleswig-Holstein	2008	statica	
Magdeburg (fermo)	Sassonia-Anhalt	1974	rotante	52°9'14"N 11°39'40"E
Neustadt (Dosse)	Brandeburgo		rotante	52°50'51"N 12°27'24"E
Oberröblingen	Sassonia-Anhalt		rotante	51°26'42"N 11°17'44"E
Prenzlau	Brandeburgo		rotante	53°19'59"N 13°52'21"E

Rosslau	Sassonia-Anhalt		rotante	51°53'51"N 12°14'29"E
Rostock	Meclemburgo- Pomerania Anteriore	1985	rotante	54°3'54"N 12°8'39"E
Schwerin	Meclemburgo- Pomerania Anteriore	1987	rotante	53°35'39"N 11°23'11"E
Senftenberg	Brandeburgo	1988	rotante	51°31'58"N 14°1'14"E
Stendal	Sassonia-Anhalt		rotante	52°35'0"N 11°52'7"E
Stralsund	Meclemburgo- Pomerania Anteriore		rotante	54°17'9"N 13°5'23"E
Wittenberg	Sassonia-Anhalt	1978	rotante	51°52'30"N 12°41'20"E
Wittenberge	Brandeburgo	1987	rotante	52°59'46"N 11°46'8"E
Wolkramshausen	Turingia		statica	51°26'19"N 10°44'8"E
Wünsdorf	Brandeburgo	1982	rotante	52°10'24"N 13°27'42"E
Wustermark	Brandeburgo		rotante	52°32'33"N 12°58'25"E

### A.A.5) Centrali di produzione

Impianto	Anno di entrata in servizio	Potenza installata	tipologia	Località, Land federale	Coordinate
Bad Abbach	2000	3.5 MW	idroelettrica	Bad Abbach, Baviera	48°56'47"N 12°00'47"E
Aschaffenburg (ferma)	1961-1996	150 MW	termoelettrica: a carbone	Aschaffenburg, Baviera	49°58'6.1"N 9°5'42.8"E
Aufkirchen			idroelettrica	Oberding, Baviera	48°18'18.9"N 11°51'27.77"E
Bad Reichenhall	1912	7.2 MW	idroelettrica	Bad Reichenhall, Baviera	47°43'5.36"N 12°51'47.3"E
Bergheim	1970	23.7 MW	idroelettrica	Bergheim, Baviera	48°45'2.7"N 11°16'22.73"E
Bertoldsheim	1967	18.9 MW	idroelettrica	Rennertshofen, Baviera	48°44'8.6"N 11°1'15"E
Bittenbrunn	1969	20.2 MW	idroelettrica	Bittenbrunn, Baviera	48°44'4"N 11°8'37.14"E
Datteln			termoelettrica: a carbone	Datteln, Renania Settentrionale-Vestfalia	51°37'48.16"N 7°19'52.73"E
Eitting			idroelettrica	Eitting, Baviera	48°21'32.25"N 11°52'58.07"E
Frankfurt (Bahnkraftwerk)	1966	12 MW	termoelettrica	Frankfurt am Main, Assia	50°05'48.88"N 8°39'5.26"E
Ingolstadt	1971	19.8 MW	idroelettrica	Ingolstadt, Baviera	48°45'1.32"N 11°24'43.03"E
Kammerl	1905		idroelettrica	Saulgrub, Baviera	47°39'42.49"N 10°59'12.62"E
Kirchmöser		160 MW	turbina a gas	Brandenburg an der Havel, Brandenburgo	52°23'40.55"N 12°25'4.97"E
Langenprozelten	1976	160 MW	idroelettrica	Gemünden am Main, Baviera	50°3'11.27"N 9°34'52.87"E
Lausward			termoelettrica: a carbone	Düsseldorf, Renania Settentrionale-Vestfalia	51°13'15.03"N 6°43'53.66"E

Lünen	1984	110 MW	termoelettrica: a carbone	Lünen, Renania Settentrionale- Vestfalia	51°37'48.16"N 7°19'52.73"E
Mannheim	1955	190 MW	termoelettrica: a carbone	Mannheim, Baden- Württemberg	49°26'36.73"N 8°30'9.76"E
Muldenstein (non in servizio)	1912	11.3 MW	termoelettrica: a carbone	Muldenstein, Sassonia-Anhalt	51°39'25.57"N 12°20'59.33"E
Mittelsbüren		110 MW	termoelettrica: a carbone	Bremen, Brema	53°7'44.33"N 8°41'0.22"E
Neckarwestheim I	1976	190 MW	termoelettrica: nucleare	Neckarwestheim, Baden- Württemberg	49°2'24.41"N 9°10'19.59"E
Pfrombach			idroelettrica	Pfrombach, Baviera	48°26'28.94"N 11°59'34.43"E
Schkopau	1996	110 MW	termoelettrica: a carbone	Schkopau, Sassonia	51°23'54.44"N 11°57'1.17"E
Stuttgart-Münster (produzione per la trazione cessata)	1933-1976		termoelettrica: a carbone	Stuttgart, Baden- Württemberg	48°48'55.4"N 9°13'15.85"E
Vohburg			idroelettrica	Vohburg, Baviera	48°46'40.5"N 11°36'4.04"E
Walchensee	1924		idroelettrica	Kochel am See, Baviera	47°37'47.35"N 11°20'14.8"E

**A.A.6) Linee ex-transfrontaliere Germania Ovest – Germania Est di trasmissione di energia elettrica per la trazione ferroviaria**

Linea [BRD - DDR]	Coordinate del punto di passaggio della frontiera
Lehrte - Heeren	52°24'48"N 10°59'34"E
Bebra - Weimar	51°00'29"N 10°12'13"E
Steinfeld am Wald - Saalfeld	50°27'52"N 11°25'07"E

**A.A.7) Punti di interconnessione tra linee di trasmissione senza connessione elettrica**

<b>Linea</b>	<b>Coordinate</b>
Flieden - Bebra / Fulda - Mottgers	50°28'55"N 9°40'52"E
Bebra - Borken / Kirchheim - Körle	51°01'59"N 9°34'31"E
Karlsruhe - Mühlacker /Vaihingen - Graben/Neudorf	48°56'40"N 8°48'18"E

## A.B) SVIZZERA

### A.B.1) Sottostazioni

Impianto/ Località	Cantone Federale	Coordinate
Biel	Berna	47°7'48"N 7°15'26"E
Brugg	Argovia	47°28'28"N 8°12'16"E
Bussigny	Vaud	46°32'38"N 6°33'36"E
Chur	Grigioni	46°52'24"N 9°31'57"E
Courtemaîche	Giura	47°27'21"N 7°3'20"E
Delémont	Giura	47°21'49"N 7°21'30"E
Eglisau	Zurigo	47°34'22"N 8°30'50"E
Emmenbrücke	Lucerna	47°4'4"N 8°17'9"E
Etzwilen	Turgovia	47°39'42"N 8°49'7"E
Farsch	Grigioni	46°48'52"N 9°20'54"E
Filisur (RhB)	Grigioni	46°40'19"N 9°41'36"E
Flüelen	Uri	46°53'43"N 8°37'29"E
Fribourg	Friburgo	46°48'50"N 7°9'15"E
Frutigen	Berna	46°34'48"N 7°38'56"E
Gampel	Vallese	46°18'28"N 7°45'24"E
Genf-Tuleries	Ginevra	46°14'59"N 6°8'48"E
Giornico	Ticino	46°24'5"N 8°52'23"E
Gland	Vaud	46°24'52"N 6°15'48"E

Henschiken	Argovia	47°23'29"N 8°12'16"E
Kandersteg	Berna	46°30'10"N 7°40'28"E
Küblis ( RhB)	Grigioni	46°54'56"N 9°45'33"E
Melide	Ticino	45°57'59"N 8°56'54"E
Muttenz	Basilea Campagna	47°32'5"N 7°38'38"E
Neuchâtel	Neuchâtel	46°59'25"N 6°54'56"E
Killwangen	Argovia	47°26'13"N 8°20'38"E
Olten	Soletta	47°21'40"N 7°55'20"E
Puidoux	Vaud	46°29'21"N 6°45'41"E
Rapperswil SG	San Gallo	47°13'29"N 8°49'55"E
Rivera	Ticino	46°7'32"N 8°55'27"E
Roche	Vaud	46°21'52"N 6°55'28"E
Romont FR	Friburgo	46°41'4"N 6°54'23"E
Rotkreuz	Zugo	47°8'42"N 8°26'27"E
Saglianias (RhB)	Grigioni	46°45'48"N 10°5'46"E
Saint Léonard	Vallese	46°15'8"N 7°25'21"E
Sankt Margrethen	San Gallo	47°27'12"N 9°38'22"E
Sargans	San Gallo	47°2'26"N 9°27'8"E
Seebach	Zurigo	47°25'20"N 8°33'17"E
Selfranga	Grigioni	46°51'23"N 9°52'56"E

Sihlbrugg	Zurigo	47°14'34"N 8°34'37"E
Sils (RhB)	Grigioni	46°42'8"N 9°28'8"E
Stein AG	Argovia	47°32'29"N 7°57'59"E
Steinen	Svitto	47°2'53"N 8°36'17"E
Tavanasa (RhB)	Grigioni	46°45'17"N 9°4'15"E
Thun	Berna	46°46'20"N 7°35'53"E
Wetzikon ZH	Zurigo	47°18'35"N 8°47'56"E
Winterthur-Grüze	Zurigo	47°30'0"N 8°45'4"E
Yverdon	Vaud	46°46'48"N 6°38'52"E
Ziegelbrücke	San Gallo	47°7'59"N 9°3'55"E
Zürich	Zurigo	47°22'52"N 8°31'19"E

### A.B.2) impianti di conversione centralizzata

Impianto/ Località	Cantone Federale	Tipologia di conversione	Coordinate
Bever (RhB)	Grigioni	rotante	46°32'52"N 9°53'17"E
Landquart (RhB)	Grigioni	rotante	46°58'28"N 9°33'6"E
Giubiasco	Ticino	rotante	46°10'32"N 9°0'9"E
Kerzers	Friburgo	rotante	46°58'27"N 7°11'25"E
Massaboden	Vallese	rotante	46°19'55"N 8°0'42"E
Rupperswil	Argovia	rotante	47°24'21"N 8°6'19"E
Seebach	Zurigo	rotante	47°25'20"N 8°33'17"E
Wimmis	Berna	rotante	46°40'51"N 7°39'23"E

### A.B.3) Stazioni di commutazione

Impianto/ Località	Cantone Federale	Coordinate
Zollikofen	Berna	47°0'45"N 7°27'53"E

**AB.4) Centrali di produzione**

<b>Impianto/ Località</b>	<b>Cantone Federale</b>	<b>Anno di entrata in servizio</b>	<b>Potenza installata</b>	<b>Tipologia</b>	<b>Coordinate</b>
Amsteg	Uri	1922	55 MW	idroelettrica	46°46'2.18"N 8°40'13.6"E
Le Châtelard VS	Vallese			idroelettrica	46°3'40.94"N 6°57'29.39"E
Etzelwerk	Svitto			idroelettrica	47°11'39.68"N 8°48'40.04"E
Göschenen	Uri			idroelettrica	46°40'2.18"N 8°35'6.81"E
Gösgen	Soletta		51,3 MW	idroelettrica	47°22'8.01"N 7°58'45.92"E
Klosters	Grigioni			idroelettrica	46°51'39.62"N 9°53'44.9"E
Massaboden	Vallese	1916	7,2 MW	idroelettrica	46°19'56.92"N 8°0'43.2"E
Mühleberg	Berna	1921	45 MW	idroelettrica	46°58'9"N 7°17'4"E
Ritom	Ticino	1920		idroelettrica	46°31'2.05"N 8°40'33.41"E
Rupperswil	Argovia	1945		idroelettrica	47°24'42.34"N 8°6'52.66"E
Vernayaz	Vallese			idroelettrica	46°7'59.93"N 7°2'8.8"E
Wassen	Uri			idroelettrica	46°42'55.96"N 8°36'36.55"E

**A.B.5) Linee transfrontaliere Germania – Svizzera di trasmissione dell'energia elettrica per la trazione ferroviaria**

<b>Linea [De - Ch]</b>	<b>Coordinate del punto di passaggio della frontiera</b>
Holdingen - Muttenz	47°34'53"N 07°36'14"E
Singen - Etwilen	

## A.C) AUSTRIA

### A.C.1) Sottostazioni

Impianto/ Località	Land Federale	Coordinate
Absdorf	Bassa Austria	48°23'52"N 15°59'38"E
Angern	Bassa Austria	48°22'56"N 16°49'19"E
Amstetten	Bassa Austria	48°7'9"N 14°53'7"E
Asten	Alta Austria	48°14'2"N 14°24'20"E
Attnang-Puchheim	Alta Austria	48°1'8"N 13°43'38"E
Bad Vöslau	Bassa Austria	47°58'06"N 16°13'28"E
Bludenz	Vorarlberg	47°8'41"N 9°49'44"E
Bruck an der Mur	Stiria	47°25'42"N 15°16'26"E
Dölsach	Tirolo	46°48'53"N 12°49'55"E
Dorfgastein	Salisburghese	47°14'5"N 13°6'17"E
Elsbethen	Salisburghese	47°45'9"N 13°5'4"E
Feldkirch	Vorarlberg	47°15'8"N 9°37'4"E
Florisdorf	Vienna	48°15'42"N 16°24'19"E
Fritzens-Wattens	Tirolo	47°18'6"N 11°35'48"E
Gaisbach Wartberg	Alta Austria	48°19'51"N 14°29'52"E
Golling-Abtenau	Salisburghese	47°35'53"N 13°9'53"E
Göpfritz	Bassa Austria	48°43'48"N 15°23'29"E

Gries am Brenner	Tirolo	47°2'36"N 11°29'9"E
Götzendorf	Bassa Austria	48°1'34"N 16°34'59"E
Graz	Stiria	47°04'40"N 15°24'48"E
Haag	Bassa Austria	48°05'33"N 14°35'36"E
Hütteldorf	Vienna	48°11'43"N 16°16'17"E
Kitzbühel	Tirolo	47°28'52"N 12°22'59"E
Küpfern	Alta Austria	47°51'9"N 14°37'3"E
Landeck	Tirolo	47°9'8"N 10°35'11"E
Mallnitz	Carinzia	46°58'40"N 13°10'44"E
Marchtrenk	Alta Austria	48°12'11"N 14°6'11"E
Mariahof	Stiria	47°06'16"N 14°22'28"E
Matrei	Tirolo	47°7'38"N 11°27'11"E
Meidling	Vienna	48°10'30"N 16°20'29"E
Mistelbach	Bassa Austria	48°33'51"N 16°33'33"E
Münster	Tirolo	
Parndorf	Burgenland	47°59'45"N 16°50'33"E
Pettneu	Tirolo	47°08'55"N 10°21'46"E
Pusarnitz	Carinzia	46°50'5"N 13°24'17"E
Riedau	Alta Austria	48°18'31"N 13°37'37"E
Rohr	Bassa Austria	48°11'15"N 15°25'47"E

Sankt Johann im Pongau	Salisburghese	47°20'10"N 13°11'23"E
Sankt Pölten	Bassa Austria	48°13'55"N 15°39'19"E
Sankt Veit	Carinzia	46°45'39"N 14°22'28"E
Schladming	Stiria	47°23'38"N 13°40'43"E
Schlöglmühl	Bassa Austria	47°40'57"N 15°54'46"E
Semmering	Stiria	47°37'36"N 15°48'53"E
Wien-Simmering	Vienna	48°09'05"N 16°25'37"E
Steindorf	Salisburghese	47°58'0"N 13°14'24"E
Tulln	Bassa Austria	48°19'24"N 16°2'37"E
Unterberg	Tirol	47°12'50"N 11°23'32"E
Villach	Carinzia	46°35'42"N 13°49'55"E
Wald am Schoberpass	Stiria	47°27'5"N 14°40'7"E
Wartberg an der Krems	Alta Austria	47°59'21"N 14°7'18"E
Wegscheid	Alta Austria	48°14'16"N 14°16'3"E
Wiener Neustadt	Bassa Austria	47°47'54"N 16°13'13"E
Wörgl	Tirol	47°29'58"N 12°4'19"E
Zellerndorf	Bassa Austria	48°41'31"N 15°58'9"E
Zirl (old)	Tirol	47°15'53"N 11°13'59"E
Zirl (neu)	Tirol	47°15'55"N 11°13'18"E

## A.C.2) Impianti di conversione centralizzata

<b>Impianto/ Località</b>	<b>Land Federale</b>	<b>Anno di entrata in servizio</b>	<b>Potenza installata</b>	<b>Coordinate</b>
Auhof	Vienna	1956	90 MW	48°12'00"N 16°14'12"E
Bergern	Bassa Austria	1983		48°13'3"N 15°16'17"E
Haiming	Tirolo	1995		47°14'47"N 10°52'27"E
Kledering	Vienna	1989		48°8'21"N 16°25'56"E
Sankt Michael	Stiria	1975		47°21'27"N 15°0'9"E

### A.C.3) Centrali di produzione

Impianto/ Località	Land Federale	Anno di entrata in servizio	Potenza installata	Tipologia	Coordinate
Annabrücke	Carinzia		20 MW	idroelettrica	46°33'40.77"N 14°28'46.08"E
Braz	Vorarlberg	1954	20 MW	idroelettrica	47°7'58.19"N 9°56'43.73"E
Enzigerboden	Salisburghese		20 MW	idroelettrica	47°10'10.35"N 12°37'35.9"E
Fulpmes	Tirolo	1983	15 MW	idroelettrica	47°9'30.81"N 11°21'30.7"E
Obervellach	Carinzia			idroelettrica	46°56'12.69"N 13°11'30.06"E
Rützkraftwerk (Schaltposten Schönberg)	Tirolo			idroelettrica	47°11'59.81"N 11°23'29.72"E
Sankt Pantaleon	Bassa Austria			idroelettrica	48°13'29.41"N 14°31'50.85"E
Schneiderau	Salisburghese			idroelettrica	47°11'50.39"N 12°36'30.35"E
Spullersee	Vorarlberg	1925	36 MW	idroelettrica	47°7'58.18"N 10°3'15.76"E
Steeg	Alta Austria	1910		idroelettrica (l'unica ad alimentare direttamente le linee di contatto)	47°36'29.78"N 13°37'57.13"E
Uttendorf	Salisburghese			idroelettrica	47°15'44.11"N 12°34'4.97"E
Weyer	Alta Austria			idroelettrica	47°51'08"N 14°38'3.49"E

**A.C.4) Linee transfrontaliere Germania – Austria di trasmissione dell'energia elettrica per la trazione ferroviaria**

<b>Linea [De - At]</b>	<b>Coordinate del punto di passaggio della frontiera</b>
Walchenseekraftwerk - Zirl	47°23'55"N 11°15'53"E
Traunstein - Steinsdorf	47°53'20"N 12°58'25"E

## A.D) Mappe delle installazioni

### ✧ A.D.A Germania:

#### ○ A.D.A.1 quadro d'unione:

[http://maps.google.com/maps?q=http://toolserver.org/~para/cgi-bin/kmlexport?article=List\\_of\\_installations\\_for\\_15kV\\_AC\\_railway\\_electrification\\_in\\_Germany,\\_Austria\\_and\\_Switzerland&usecache=1&ll=51.303145,10.349121&spn=8.286346,19.753418&t=h&z=6&vpsrc=6](http://maps.google.com/maps?q=http://toolserver.org/~para/cgi-bin/kmlexport?article=List_of_installations_for_15kV_AC_railway_electrification_in_Germany,_Austria_and_Switzerland&usecache=1&ll=51.303145,10.349121&spn=8.286346,19.753418&t=h&z=6&vpsrc=6)

#### ○ A.D.A.2 settore centro-nord:

[http://maps.google.com/maps?q=http://toolserver.org/~para/cgi-bin/kmlexport?article=List\\_of\\_installations\\_for\\_15kV\\_AC\\_railway\\_electrification\\_in\\_Germany,\\_Austria\\_and\\_Switzerland&usecache=1&ll=53.173119,10.349121&spn=3.97119,9.876709&t=h&z=7&vpsrc=6](http://maps.google.com/maps?q=http://toolserver.org/~para/cgi-bin/kmlexport?article=List_of_installations_for_15kV_AC_railway_electrification_in_Germany,_Austria_and_Switzerland&usecache=1&ll=53.173119,10.349121&spn=3.97119,9.876709&t=h&z=7&vpsrc=6)

#### ○ A.D.A.3 settore centro-sud:

[http://maps.google.com/maps?q=http://toolserver.org/~para/cgi-bin/kmlexport?article=List\\_of\\_installations\\_for\\_15kV\\_AC\\_railway\\_electrification\\_in\\_Germany,\\_Austria\\_and\\_Switzerland&usecache=1&ll=49.4467,10.349121&spn=4.307175,9.876709&t=h&z=7&vpsrc=6](http://maps.google.com/maps?q=http://toolserver.org/~para/cgi-bin/kmlexport?article=List_of_installations_for_15kV_AC_railway_electrification_in_Germany,_Austria_and_Switzerland&usecache=1&ll=49.4467,10.349121&spn=4.307175,9.876709&t=h&z=7&vpsrc=6)

### ✧ A.D.B Svizzera:

#### ○ A.D.B.1 quadro d'unione:

[http://maps.google.com/maps?q=http://toolserver.org/~para/cgi-bin/kmlexport?article=List\\_of\\_installations\\_for\\_15kV\\_AC\\_railway\\_electrification\\_in\\_Germany,\\_Austria\\_and\\_Switzerland&usecache=1&ll=46.841407,8.22876&spn=2.265674,4.938354&t=h&z=8&vpsrc=6](http://maps.google.com/maps?q=http://toolserver.org/~para/cgi-bin/kmlexport?article=List_of_installations_for_15kV_AC_railway_electrification_in_Germany,_Austria_and_Switzerland&usecache=1&ll=46.841407,8.22876&spn=2.265674,4.938354&t=h&z=8&vpsrc=6)

#### ○ A.D.B.2 settore nord-ovest:

[http://maps.google.com/maps?q=http://toolserver.org/~para/cgi-bin/kmlexport?article=List\\_of\\_installations\\_for\\_15kV\\_AC\\_railway\\_electrification\\_in\\_Germany,\\_Austria\\_and\\_Switzerland&usecache=1&ll=47.176645,7.064209&spn=1.125762,2.469177&t=h&z=9&vpsrc=6](http://maps.google.com/maps?q=http://toolserver.org/~para/cgi-bin/kmlexport?article=List_of_installations_for_15kV_AC_railway_electrification_in_Germany,_Austria_and_Switzerland&usecache=1&ll=47.176645,7.064209&spn=1.125762,2.469177&t=h&z=9&vpsrc=6)

#### ○ A.D.B.3 settore nord-est:

[http://maps.google.com/maps?q=http://toolserver.org/~para/cgi-bin/kmlexport?article=List\\_of\\_installations\\_for\\_15kV\\_AC\\_railway\\_electrification\\_in\\_Germany,\\_Austria\\_and\\_Switzerland&usecache=1&ll=47.314621,9.302673&spn=1.122833,2.469177&t=h&z=9&vpsrc=6](http://maps.google.com/maps?q=http://toolserver.org/~para/cgi-bin/kmlexport?article=List_of_installations_for_15kV_AC_railway_electrification_in_Germany,_Austria_and_Switzerland&usecache=1&ll=47.314621,9.302673&spn=1.122833,2.469177&t=h&z=9&vpsrc=6)

#### ○ A.D.B.4 settore sud-ovest:

[http://maps.google.com/maps?q=http://toolserver.org/~para/cgi-bin/kmlexport?article=List\\_of\\_installations\\_for\\_15kV\\_AC\\_railway\\_electrification\\_in\\_Germany,\\_Austria\\_and\\_Switzerland&usecache=1&ll=46.1532,7.064209&spn=1.147278,2.469177&t=h&z=9&vpsrc=6](http://maps.google.com/maps?q=http://toolserver.org/~para/cgi-bin/kmlexport?article=List_of_installations_for_15kV_AC_railway_electrification_in_Germany,_Austria_and_Switzerland&usecache=1&ll=46.1532,7.064209&spn=1.147278,2.469177&t=h&z=9&vpsrc=6)

#### ○ A.D.B.5 settore sud-est:

[http://maps.google.com/maps?q=http://toolserver.org/~para/cgi-bin/kmlexport?article=List\\_of\\_installations\\_for\\_15kV\\_AC\\_railway\\_electrification\\_in\\_Germany,\\_Austria\\_and\\_Switzerland&usecache=1&ll=46.293816,9.302673&spn=1.144343,2.469177&t=h&z=9&vpsrc=6](http://maps.google.com/maps?q=http://toolserver.org/~para/cgi-bin/kmlexport?article=List_of_installations_for_15kV_AC_railway_electrification_in_Germany,_Austria_and_Switzerland&usecache=1&ll=46.293816,9.302673&spn=1.144343,2.469177&t=h&z=9&vpsrc=6)

▲ **A.D.C Austria:**

○ **A.D.C.1 quadro d'unione:**

[http://maps.google.com/maps?q=http://toolserver.org/~para/cgi-bin/kmlexport?article=List\\_of\\_installations\\_for\\_15kV\\_AC\\_railway\\_electrification\\_in\\_Germany\\_Austria\\_and\\_Switzerland&usecache=1&ll=47.665387,13.579102&spn=4.461417,9.876709&t=h&z=7&vpsrc=6](http://maps.google.com/maps?q=http://toolserver.org/~para/cgi-bin/kmlexport?article=List_of_installations_for_15kV_AC_railway_electrification_in_Germany_Austria_and_Switzerland&usecache=1&ll=47.665387,13.579102&spn=4.461417,9.876709&t=h&z=7&vpsrc=6)

○ **A.D.C.2 settore ovest:**

[http://maps.google.com/maps?q=http://toolserver.org/~para/cgi-bin/kmlexport?article=List\\_of\\_installations\\_for\\_15kV\\_AC\\_railway\\_electrification\\_in\\_Germany\\_Austria\\_and\\_Switzerland&usecache=1&ll=47.513491,11.513672&spn=2.237183,4.938354&t=h&z=8&vpsrc=6](http://maps.google.com/maps?q=http://toolserver.org/~para/cgi-bin/kmlexport?article=List_of_installations_for_15kV_AC_railway_electrification_in_Germany_Austria_and_Switzerland&usecache=1&ll=47.513491,11.513672&spn=2.237183,4.938354&t=h&z=8&vpsrc=6)

○ **A.D.C.3 settore nord-est:**

[http://maps.google.com/maps?q=http://toolserver.org/~para/cgi-bin/kmlexport?article=List\\_of\\_installations\\_for\\_15kV\\_AC\\_railway\\_electrification\\_in\\_Germany\\_Austria\\_and\\_Switzerland&usecache=1&ll=48.180739,15.963135&spn=2.208593,4.938354&t=h&z=8&vpsrc=6](http://maps.google.com/maps?q=http://toolserver.org/~para/cgi-bin/kmlexport?article=List_of_installations_for_15kV_AC_railway_electrification_in_Germany_Austria_and_Switzerland&usecache=1&ll=48.180739,15.963135&spn=2.208593,4.938354&t=h&z=8&vpsrc=6)

○ **A.D.C.4 settore sud-est:**

[http://maps.google.com/maps?q=http://toolserver.org/~para/cgi-bin/kmlexport?article=List\\_of\\_installations\\_for\\_15kV\\_AC\\_railway\\_electrification\\_in\\_Germany\\_Austria\\_and\\_Switzerland&usecache=1&ll=48.180739,15.963135&spn=2.208593,4.938354&t=h&z=8&vpsrc=6](http://maps.google.com/maps?q=http://toolserver.org/~para/cgi-bin/kmlexport?article=List_of_installations_for_15kV_AC_railway_electrification_in_Germany_Austria_and_Switzerland&usecache=1&ll=48.180739,15.963135&spn=2.208593,4.938354&t=h&z=8&vpsrc=6)

## A.E) NORVEGIA

### A.E.1) Centrali di produzione

Impianto/ Località	Contea	Potenza installata	Anno di entrata in servizio	Coordinate
Hakavik	Øvre Eiker	7 MW	1922	59°37'29"N 9°57'13"E
Kjofossen	Sogn og Fjordane.	3.5 MW	Anni '40	60°44'49"N 07°08'05"E

### A.E.2) Sottostazioni alimentate dalla rete a 55 kV

Impianto/ Località	Contea	Coordinate
Asker	Akershus	59°49'48"N 10°25'46"E
Neslandsvatn	Telemark	58°58'32"N 9°09'11"E
Nordagutu	Telemark	59°25'8"N 9°19'19"E
Sande	Vestfold	59°35'1"N 10°12'55"E, east of powerline crosses railway line at 59°34'51"N 10°12'26"E
Skollenberg	Buskerud	59°37'21"N 9°41'32"E

### A.E.3) Stazioni di commutazione

Impianto/ Località	Contea	Coordinate
Sundhaugen	Buskerud	59°41'51"N 9°50'30"E

#### A.E.4) Sottostazioni con conversione

Impianto/ Località	Contea	Coordinate
Alnabru	Oslo	59°55'46"N 10°49'53"E
Asker	Akershus	59°49'48"N 10°25'46"E
Bergen	Hordaland	60°23'12"N 5°20'19"E
Dale	Hordaland	60°34'55"N 5°48'24"E
Dombas	Oppland	62°03'47"N 9°07'34"E
Fåberg	Oppland	61°09'49"N 10°24'23"E
Fron	Oppland	61°34'15"N 9°52'45"E
Ganddal	Rogaland	58°48'37"N 5°42'2"E
Haugastøl	Buskerud	60°30'41"N 7°52'21"E
Holmlia	Oslo	59°49'42"N 10°47'55"E
Hønefoss	Buskerud	60°11'57"N 10°09'11"E
Jessheim	Akershus	60°8'33"N 11°09'06"E
Kielland	Rogaland	58°29'42"N 6°01'58"E
Kongsvinger	Hedmark	60°11'26"N 11°59'11"E
Krossen	Vest-Adger	58°9'12"N 7°57'31"E
Larvik	Vestfold	59°2'55"N 10°3'45"E
Leivoll	Vest-Adger	58°16'01"N 7°27'09"E
Lillestrøm	Akershus	59°57'12"N 11°03'28"E?

Lundamo	Sør-Trøndelag	63°09'09"N 10°16'56"E?
Lunner	Oppland	60°17'49"N 10°35'08"E
Mjøllfell	Hordaland	60°41'40"N 6°50'25"E
Narvik	Nordland	68°24'15"N 17°46'51"E
Nelaug	Aust-Adger	58°39'33"N 8°37'39"E
Neslandsbyen	Buskerud	60°34'46"N 9°6'34"E
Nordagutu	Telemark	59°25'8"N 9°19'19"E
Otta	Oppland	61°46'58"N 9°32'32"E
Rudshøgda	Hedmark	60°54'57"N 10°49'16"E
Sarpborg	Østfold	59°16'37"N 11°05'27"E
Sira	Vest-Adger	58°24'50"N 6°39'44"E
Smørbekk	Akershus	59°30'12"N 10°42'56"E
Ski	Akershus	59°43'11"N 10°50'0"E
Skoppum	Vestfold	59°22'40"N 10°24'36"E
Stavne	Sør-Trøndelag	63°24'50"N 10°23'0"E
Tangen	Hedmark	60°37'26"N 11°15'16"E

## A.F) SVEZIA

### A.F.1) Impianti di conversione distribuita

Impianto/ Località	Contea	Tipologia di conversione	Coordinate
Alingsås	Älvsborg	rotante, statica	57°55'37"N 12°30'39"E
Alvesta	Kronoberg	rotante	56°52'58"N 14°32'29"E
Älvsjön	Stockholm	statica	59°17'25"N 18°01'19"E
Åstorp	Kristianstad	statica	56°07'33"N 12°56'37"E
Duved	Jämtland	rotante	63°23'23"N 12°54'19"E
Eksund	Östergötland	statica	58°35'13"N 16°05'45"E
Eldsberga	Halland	statica	56°35'29"N 12°59'55"E
Emmaboda	Kalmar	rotante	56°37'56"N 15°30'58"E
Eskilstuna	Södermanland	statica	59°22'41"N 16°29'13"E
Falköping	Skaraborg	rotante	58°10'03"N 13°32'16"E
Gällivare	Norrbottn	rotante	67°08'34"N 20°38'00"E
Hässleholm	Kristianstad	rotante, statica	56°10'39"N 13°46'33"E
Jakobshyttan	Östergötland	rotante	58°47'41"N 15°09'46"E
Järna	Stockholm	statica	59°03'57"N 17°31'36"E
Kil	Värmland	rotante	59°30'07"N 13°20'29"E
Kiruna	Norrbottn	rotante	67°50'29"N 20°13'29"E
Kristinehamn	Värmland	rotante	
Malmö	Malmöhus	statica	55°36'34"N 13°01'30"E

Mellerud	Älvsborg	rotante	58°41'48"N 12°25'28"E
Mjölby	Östergötland	rotante	58°19'56"N 15°08'50"E
Moholm	Skaraborg	rotante, statica	58°36'45"N 14°02'30"E
Mora	Dalarna	rotante	61°00'07"N 14°34'50"E
Murjek	Norrbottn	rotante	66°28'04"N 20°53'02"E
Nässjö	Jönköping	statica	57°39'40"N 14°40'15"E
Nyköping	Södermanland	rotante	58°45'29"N 16°58'20"E
Olskrokan	Göteborgs och Bohus	statica	57°43'23"N 12°00'17"E
Ösmo	Stockholm	rotante	58°58'31"N 17°53'57"E
Östersund	Jämtland	rotante	63°09'28"N 14°39'50"E
Ottebol	Värmland	rotante	59°41'50"N 12°28'08"E
Ramvik	Västernorrland	rotante	
Sjömarken	Älvsborg	rotante	57°42'44"N 12°51'36"E
Sköldinge	Södermanland	rotante	59°01'58"N 16°29'00"E
Stenbacken	Norrbottn	rotante	68°15'00"N 19°30'01"E
Tornehamn	Norrbottn	rotante	68°26'03"N 18°35'42"E
Uddevalla	Västra Götaland	rotante	
Varberg	Halland	rotante	57°09'07"N 12°16'54"E
Västerås	Västmanland	statica	59°38'52"N 16°34'57"E
Ystad	Skåne	statica	

## A.F.2) Impianti di conversione centralizzata

Impianto/ Località	Contea	Tipologia di conversione	Coordinate
Änge	Västernorrland	statica	62°31'22"N 15°40'39"E
Baluträsk	Västerbotten	statica	64°47'1"N 20°2'31"E
Borlänge	Dalarna	statica	60°28'0"N 15°26'7"E
Boden	Norrbottn	statica/ rotante	65°46'57"N 21°44'39"E
Häggvik	Stockholm	rotante	59°26'53"N 17°55'32"E
Mellansel	Västernorrland	statica	63°26'1"N 18°20'43"E
Ockelbo	Gävleborg	statica	60°56'28"N 16°42'29"E

### A.F.3) Sottostazioni

Impianto/ Località	Contea	Coordinate
Älvsbyn	Norrbotten	65°40'28"N 20°58'37"E
Bäckhaga	Örebro	59°45'55"N 15°7'14"E
Bispgården	Jämtland	63°1'56"N 16°33'57"E
Dalstorp	Västerbotten	64°26'5"N 19°42'54"E
Dockmyr	Jämtland	62°57'23"N 15°45'0"E
Frövi	Örebro	59°28'18"N 15°21'19"E
Gävle	Gävleborg	60°39'11"N 17°10'48"E
Gnarp	Gävleborg	62°1'38"N 17°15'8"E
Habo	Uppsala	59°35'9"N 17°29'1"E
Holmsjön	Västernorrland	63°23'8"N 17°41'18"E
Hudiksvall	Gävleborg	61°42'3"N 17°5'37"E
Jönssen	Gävleborg	61°16'12"N 16°30'18"E
Jörn	Västerbotten	65°3'53"N 20°2'26"E
Kullsbjörken	Dalarna	60°50'00"N 15°4'59"E
Ljusdal	Gävleborg	61°47'55"N 16°9'44"E
Ludvika	Dalarna	60°9'9"N 15°14'57"E
Längträsk	Norrbotten	65°22'26"N 20°20'3"E
Norrfors	Västerbotten	63°46'5"N 19°0'27"E

Odensala	Stockholm	59°40'23"N 17°50'5"E
Österraden	Västernorrland	63°13'15"N 17°11'47"E
Ramsjö	Gävleborg	62°11'19"N 15°40'14"E
Ryggan	Dalarna	60°35'18"N 15°49'21"E
Storvik	Gävleborg	60°34'39"N 16°29'1"E
Sundsvall	Västernorrland	62°24'0"N 17°14'29"E
Söderhamn	Gävleborg	61°18'6"N 17°1'30"E
Tierp	Uppsala	60°19'30"N 17°32'6"E
Uppsala	Uppsala	59°51'13"N 17°39'27"E
Viskan	Västernorrland	62°25'52"N 16°28'2"E
Vännäs	Västerbotten	63°55'9"N 19°44'48"E

#### .F.4) Linea di interconnessione Mon – Varp a 30 kV

Impianto/ Località	Contea	Coordinate
Mon	Älvsborg	58°54'34"N 11°45'15"E
Varp	Göteborgs och Bohus	58°53'16"N 11°17'25"E

## GLOSSARIO DEI TERMINI TECNICI E/O FERROVIARI

<b>Termine inglese</b>	<b>Traduzione in italiano</b>	<b>Ulteriori informazioni</b>
Axle counting equipment	Sistema conta-assi	
Axle shunt	Connessione elettrica fra rotaie per mezzo degli assi dei veicoli	
Back up protection	Protezione di sostegno	
Ball type earthing stud	Dispersore sferico	
Block-type substation	Sottostazione in configurazione solo entrante	
Bogie	Carrello	Telaio meccanico montato su ruote di forme e dimensioni molto variabili, che serve a sostenere e guidare, su rotaie, i veicoli o sostiene la cassa degli stessi
bracket	Fascia di chiusura	
Brake resistor	Reostato di frenatura	
Cab signalling	Ripetizione dei segnali in macchina (a bordo)	
Cardan shaft	Giunto cardanico	
Carrier frequency	Frequenza portante	
Central traction power supply	Sistema di alimentazione a conversione centralizzata	
centre-tap	Presca centrale	
CIR-NET (computer integrated railroading net)		
Commutator motor	Motore a collettore	
Concrete slab	Lastre di cemento	
Conductor rail	Terza rotaia	linea elettrica di contatto impiegata per trasportare l'energia lungo il percorso dei binari ferroviari, costituita da un conduttore che ha generalmente il profilo di una normale rotaia: corre parallela alla rotaia esterna del binario, isolata dal suolo e dal binario stesso
Continuous power	Potenza continuativa	
Copper expansion strip	Striscia di rame	
Cross-span wire	Corde trasversali	
Cyclic measure	Misura periodica	
Decentralised traction power supply	Sistema di alimentazione a conversione distribuita	
Dialed measure	Misura su richiesta	

Diesel-electric locomotive	Locomotiva diesel-elettrica	Locomotiva a motori elettrici alimentati da generatore di bordo trascinato da motore diesel
Direct converter	Convertitore diretto	
Double-pole rotary disconnecter with attached earthers	sezionatore di linea del tipo rotante a due poli con giunzione di terra	
Double-row steel rack	Gabbie sovrapposte in acciaio	
Double-tier transformer dropper	Trasformatore a doppia uscita pendino	tirante verticale, generalmente di funicella d'acciaio, che sospende il filo di contatto alla fune portante delle linee elettriche utilizzate per trazione ferroviaria
Earthing rod	Sbarra di terra	
Elastic conversion	Conversione in frequenza a rapporto variabile	
Electric braking	Frenatura elettrica	
Exciter-current converter	Rettificatore per la produzione di corrente continua per l'eccitazione del generatore	
Fishplate joint	Giunto longitudinale	
Fittings	Parti accessorie	
Five-span overlaps	Sezionamenti ogni cinque campate longitudinali	
Flexible head-span constructions	Supporti flessibili a ponte (corde trasversali)	Che può esercire su linee di amministrazioni ferroviarie differenti
Four-quadrant controller	Controllore a quattro quadranti	
Frame-suspended motor	Motore sospeso	
Hot dip galvanised support	Supporto zincato a caldo	
GWS (gateway substation)	Sottostazione di ingresso	
GDR (German Democratic Republic)	Repubblica democratica tedesca	
Gear ratio	Rapporto di trasmissione	rapporto tra velocità angolare dell'albero condotto e velocità angolare dell'albero motore; se la trasmissione è realizzata mediante ingranaggi, tale rapporto può essere espresso in funzione del numero z di denti: $z_1/z_2$
GTO (gate turn off) thyristor	Tiristore tipo GTO	
Hard-drive technology	Tecnologia computerizzata	
High current time protection	Protezione da elevate correnti permanenti	
Hinged cantilever	Mensola incernierata	
IGCT (integrated gate commutated)	Tiristore tipo IGCT	

thyristor		
Induction motor	Motore asincrono	
Integrated neutral point	Zona a potenziale zero inclusa	
Lift limiting device	Sistema di limitazione della corrente	
Lightning mast	Ombrello parafulmine	
Low voltage transformer	Trasformatore a secondario in bassa tensione	
MCC (master control center)	Centro di controllo principale	
Mesh earth electrodes	Maglia di terra	
Modular locomotive	Locomotore modulare	Di una famiglia di locomotori, adattato dal costruttore al traino di una particolare tipologia di treni
NCC (network command centre)	Centro di gestione delle reti	
Neutral bar cubicle	Cubicolo della sbarra di neutro	
Neutral-voltage displacement	Spostamento del punto neutro	
Node-type substation	Sottostazione in configurazione entra ed esci	
OBB (operating bus bar)	Sbarra omnibus in esercizio	
One-hour power	Potenza oraria	
Open stretches	In campo aperto	
Operated at phase-shifted square-wave (block) modulation	Operanti a modulazione di fase in onda quadra	
Over-current time protection	Protezione da sovracorrenti permanenti	
Parallel operation	Alimentazione bilaterale	
Power electronics	Elettronica di potenza	
Pull-off support	Supporto introflesso	
Push-off support	Supporto estroflesso	
Regenerated braking energy	energia immessa in rete da veicoli elettrici a seguito di frenatura elettrica	
Registration tube	Asta di registrazione	
Repulsion motor	Motore a repulsione	
Rheostatic braking	Frenatura elettrica reostatica	
Rigid conversion	Conversione in frequenza a rapporto fisso	
Roller test ring	Circuito di test/ area di prova	
Rotary-spring supports	Supporti rotanti a molla	
SCADA (supervisory control and data acquisition system)	sistema di supervisione per il controllo e l'acquisizione dei dati	
SCC (satellite control centre)	Centro ausiliario di controllo	
Short-term power	Potenza per brevi periodi	

Side rod	Biella	
Signal boxes	Boe di segnalamento	
Signalling systems	Apparati di segnalamento	Segnali della linea e delle stazioni situati in punti determinati della linea e indicanti al personale dei treni la via libera o la via impedita
Sliding-type disconnecter	Sezionatore scorrevole	
Slip-power and starting cycloconverter	Cicloconvertitore di avviamento e controllo della velocità del motore	
Slip ring motor	Motore ad anelli	
Solid steel door	Porta in acciaio compatto	
SP (switching post)	Posto di interruzione	
Steady arms	Braccetti fissi	
Stepping switch	Interruttore passo-passo	
Stitch wire	Geometria magliata	
Strip foundations	Banchine di fondazione	
Strut	Montante	
Switching section	Sezione di interruzione	
Tank leakage protection transformer	Trasformatore di protezione da perdite del cassone	
Tap-charger transformer	Trasformatore a prese multiple	
TBB (test bus bar)	Sbarra omnibus di testaggio	
TCC (transmission control centre)	Centro di controllo della rete di trasmissione	
Ten-minute power	Potenza per dieci minuti	
Time and direction distance steps	Gradini temporali e selettivi della direzione di alimentazione	
Three-level pattern	Schema a tre livelli	
Tinned copper	Rame stagnato	
Track release circuits	Circuiti di occupazione del binario	
turnout	scambio	
Twelve-pulse thyristor bridge circuit	Circuiti a ponte a dodici impulsi con tiristori	
Universal locomotive	Locomotore ad uso universale	Per il traino di tutte le tipologie di treni
Wheel arrangement	Rodiggio	Complesso degli organi di un rotabile ferroviario compresi tra il binario e la sospensione elastica e non soggetti quindi a moti oscillatori, costituito dalle ruote, dalle sale o dagli assi, dalle boccole o dai cuscinetti
Wheel tensioner	Sistema di tensionamento delle funi a ruote dentate	

With step switches	Con regolazione a gradini	
--------------------	---------------------------	--

## BIBLIOGRAFIA

- ✧ **M. C. Duffy --- Electric railways 1880 – 1990 --- The Institution of Electrical Engineers --- London --- 2003**
- ✧ **A. Steimel --- Electric traction – Motive power and energy supply --- Oldenbourg Industrieverlag GmbH --- München --- 2008**
- ✧ **F. Kiessling, R. Puschmann, A. Schmieder --- Contact lines for electric railways --- Publicis Kommunikationsagentur GmbH GWA (per Siemens AG) --- München --- 2001**
- ✧ **vari siti internet:**
  - **divulgativi:**
    - **wikipedia:** <http://en.wikipedia.org/>
    - **treccani:** <http://www.treccani.it/>
  - **geografici:**
    - **google maps:** <http://maps.google.com/>
    - **bing maps:** <http://www.bing.com/maps>
  - **aziendali:**
    - **Asea Brown Boveri Ltd (ABB):** <http://www.abb.com/>
    - **Bombardier Inc.:** <http://www.bombardier.com/>
    - **Siemens AG:** <http://www.siemens.com/>

## RINGRAZIAMENTI

Vorrei sentimanente ringraziare il prof. Roberto Turri per la grande disponibilit  concessami durante la stesura della tesi, nonch  durante lo svolgimento del corso di *Sistemi elettrici per i trasporti*, al quale la tesi   strettamente collegata.



