

# Le linee AC/AV in Italia

---

Gli impianti di energia e trazione elettrica delle nuove linee ferroviarie ad Alta Velocità sono realizzati con il sistema 2 x 25 kV a 50 Hz.

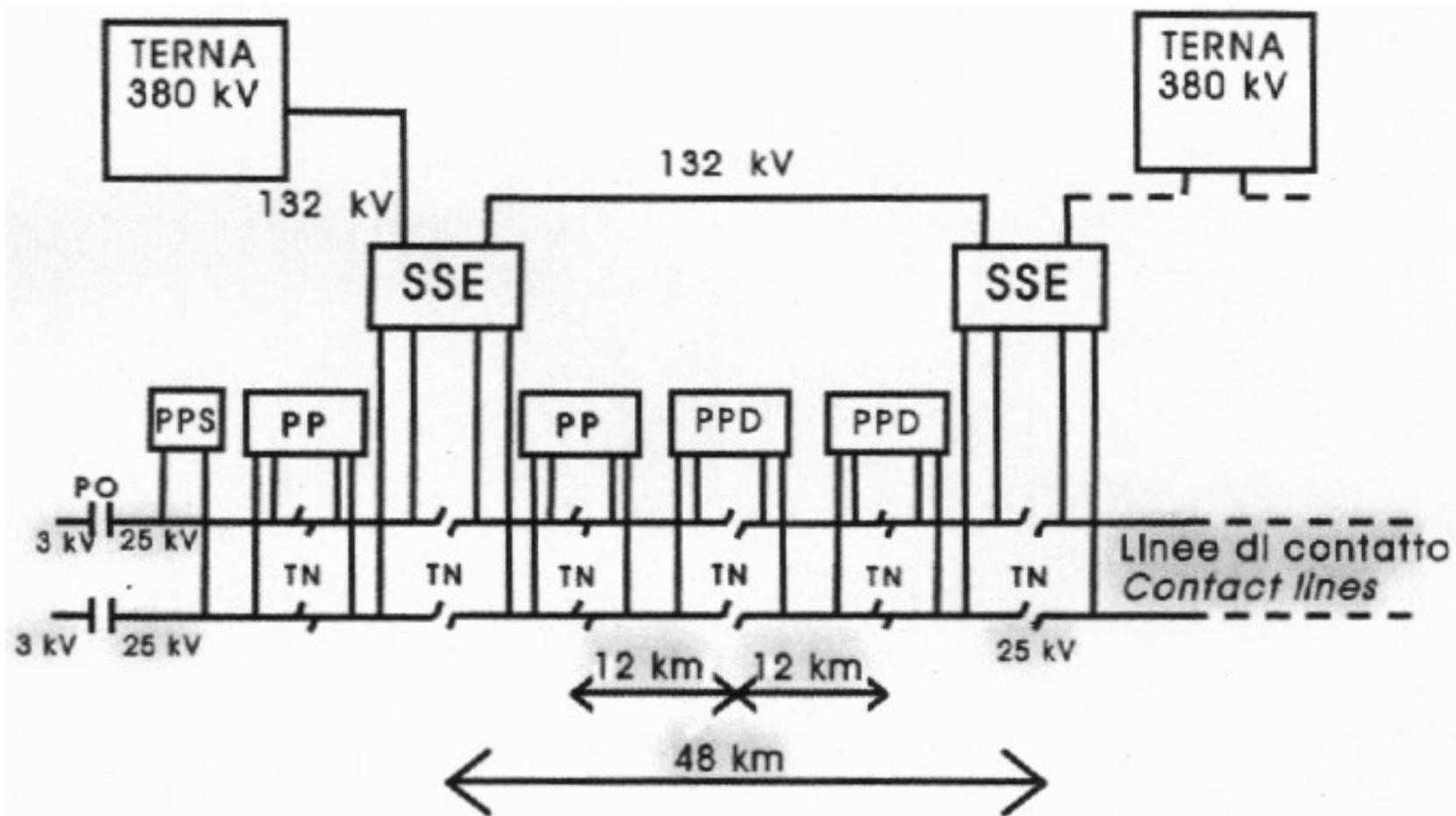
Si tratta di linee con velocità superiori ai 250 km/h caratterizzate da elevate prestazioni con notevoli potenze assorbite e con un frequente cadenzamento di treni.



Le linee AC/AV in Italia sono oggi:

- la Torino-Milano;
- la Milano-Bologna-Firenze-Roma-Napoli

# Schema di alimentazione



# Componenti del sistema 2 x 25 kV

---

Il sistema 2 x 25 kV prevede, per una linea a doppio binario, oltre alle due linee di contatto alimentate a 25 kV, due feeder alimentati a 25 kV **in opposizione di fase**.

Ogni 10-15 km sono installati nei cosiddetti **Posti di Parallelo Doppio (PPD)**, due autotrasformatori con rapporto 1:2 con i terminali estremi collegati rispettivamente alle linee di contatto ed ai feeder ed il terminale centrale collegato al binario.

In ciascun PPD tra i due autotrasformatori è installato un **Tratto Neutro (TN)** rialimentabile mediante appositi sezionatori ed interruttori. Un TN è installato anche in corrispondenza di ciascuna SSE.

In prossimità dei Posti di Confine con il 3 kV<sub>cc</sub> sono installati **Posti di Parallelo Semplice (PPS)** provvisti di un solo autotrasformatore.

# Caratteristiche del sistema 2 x 25 kV

---

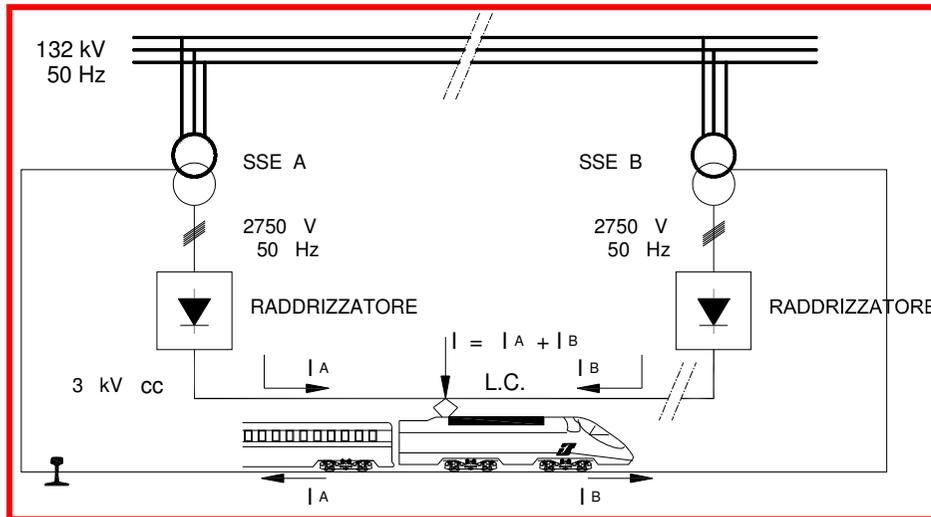
Nel caso dell'AV italiana le specifiche di base hanno imposto al sistema elettrico un elevato valore di potenzialità pari a circa 2 MW/km di linea.

Di conseguenza la distanza tipo tra le SSE è risultata dell'ordine di 48 km con il passo tipo tra i PPD pari a 12 km.

Ciascuna SSE alimenta in antenna ai 2 lati, tramite un trasformatore di 60 MVA una semitratta di 24 km comprendente due celle di 12 km.

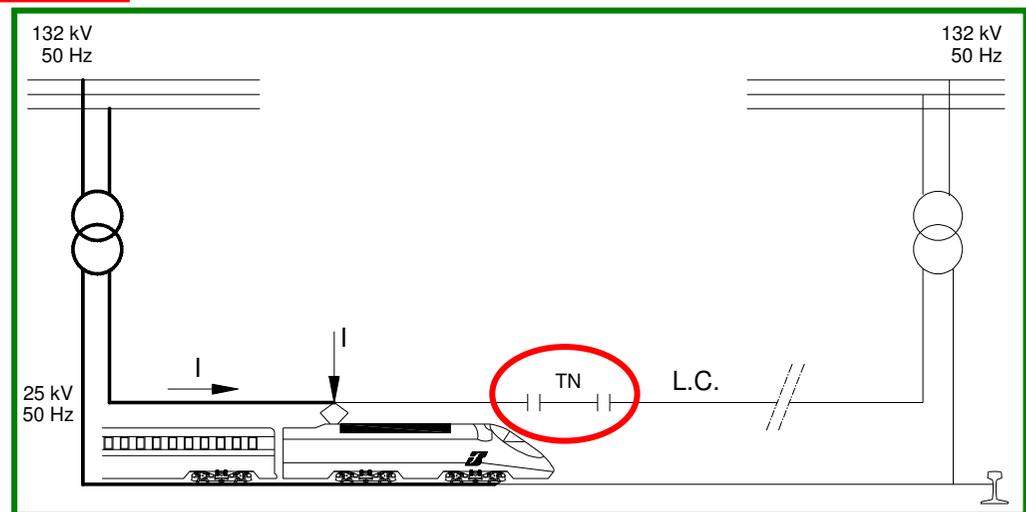


# Alimentazione $3 \text{ kV}_{cc}$ e $25 \text{ kV}_{ca}$

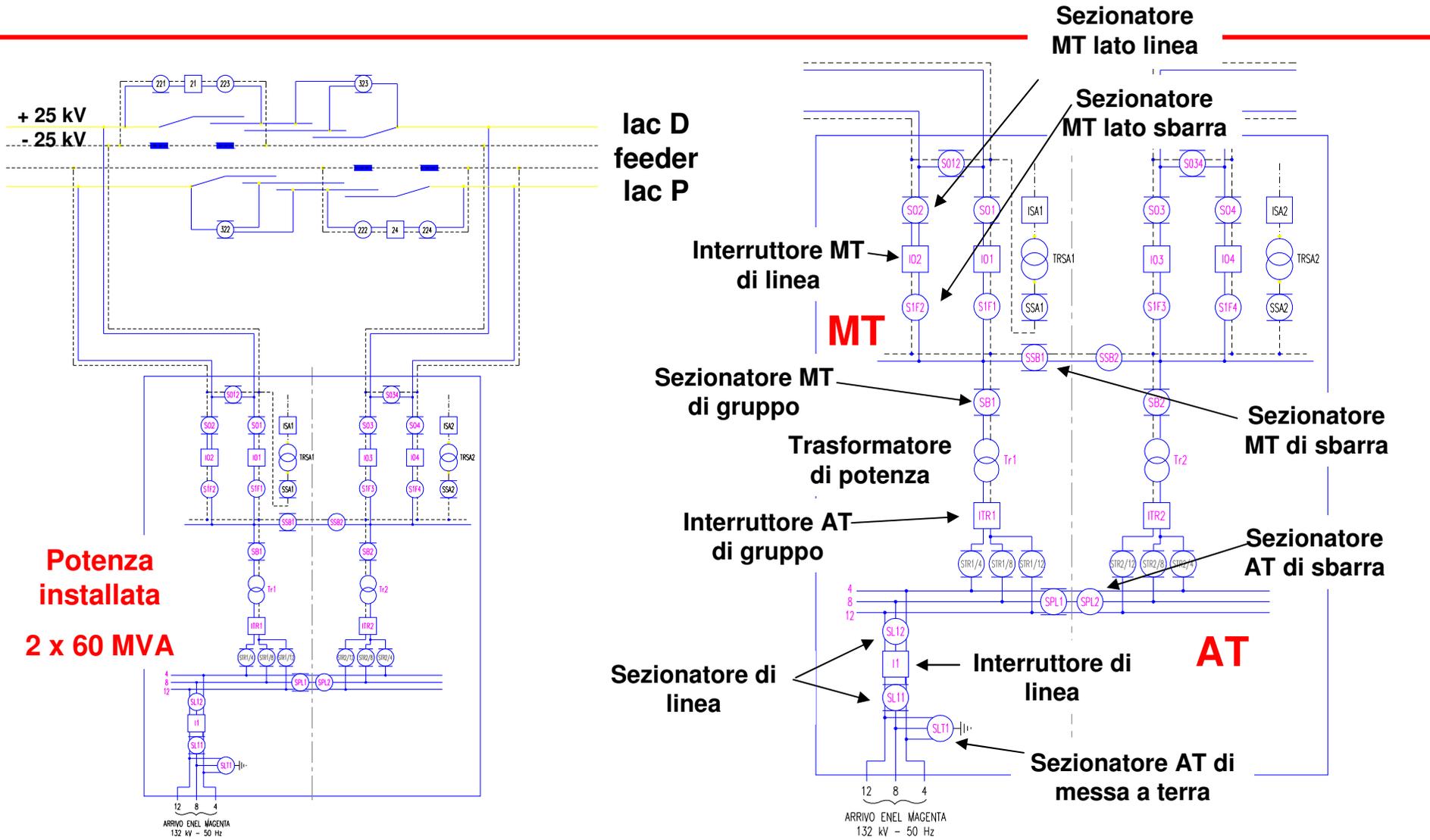


**$3 \text{ kV}_{cc}$**   
**Alimentazione bilaterale**

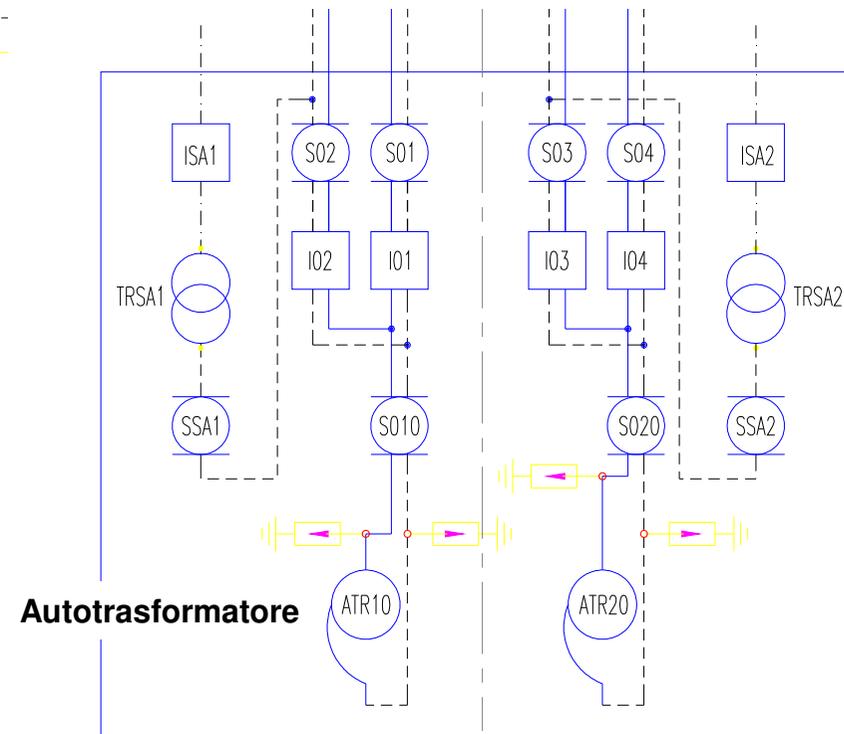
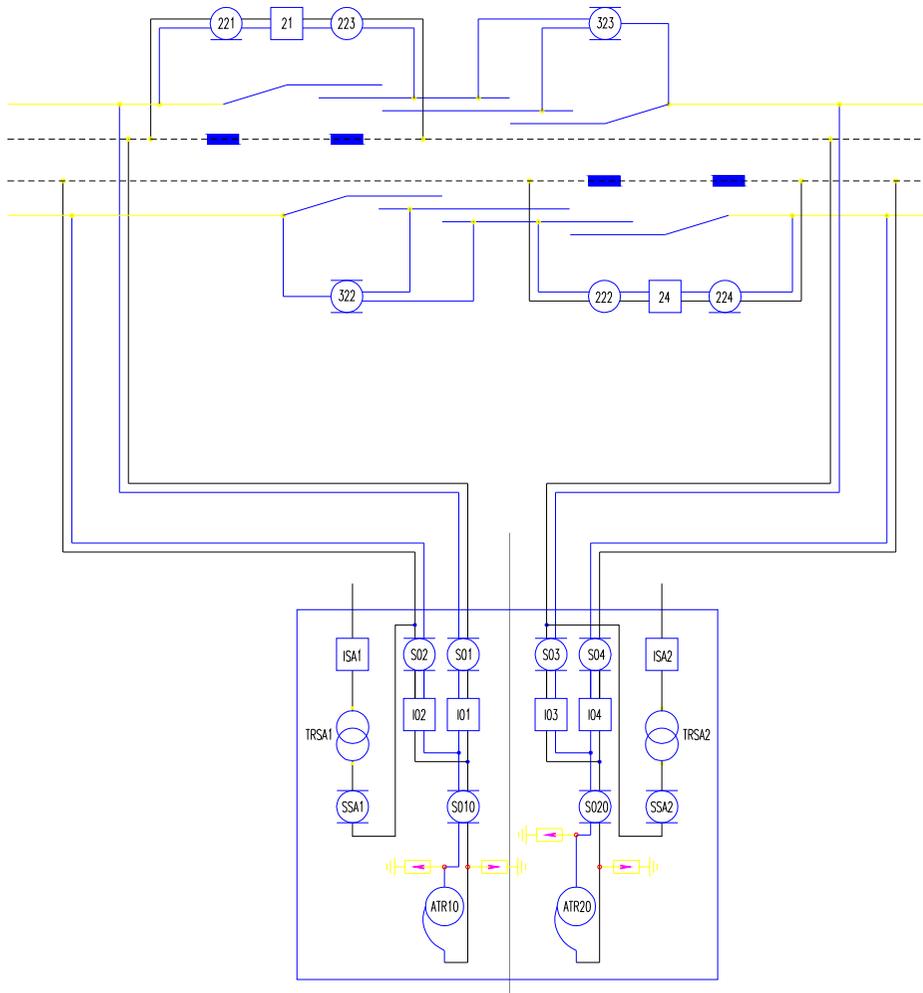
**$25 \text{ kV}_{ca}$**   
**Alimentazione a sbalzo**



# La Sottostazione Elettrica



# Il Posto di Parallelo Doppio



**Potenza  
installata**

**2 x 15 MVA**



# Il Posto di Parallelo Doppio

---

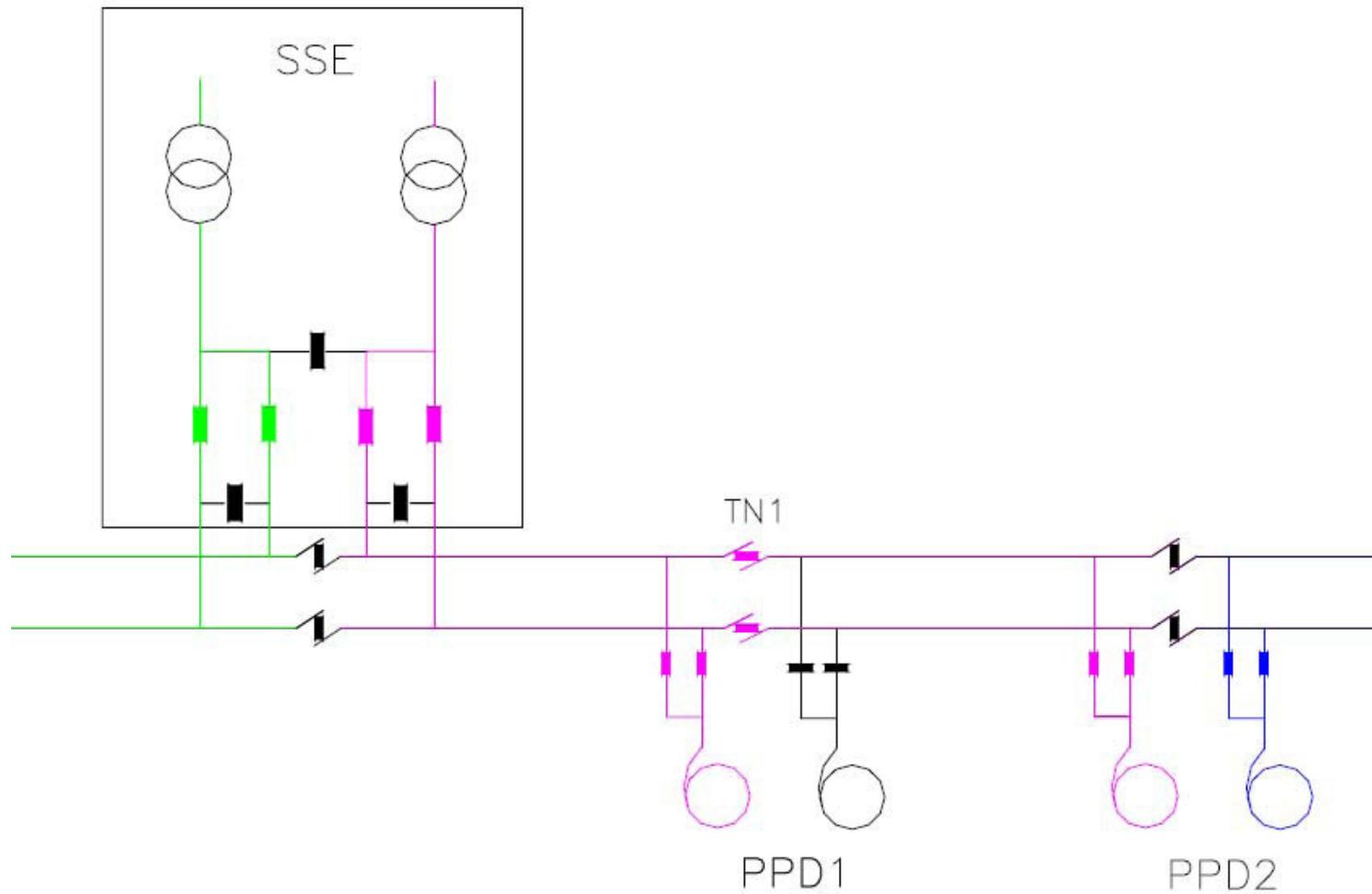
Ciascun posto intermedio di autotrasformazione (passo medio 12 km) è dotato di due autotrasformatori da 15 MVA che sono ambedue in servizio soltanto nel caso in cui il posto svolga oltre che la funzione di parallelo anche quella di sezionamento; in tal caso sulla linea di contatto gli interruttori di manovra e i sezionatori del posto di sezionamento sono aperti (tratto neutro attivo): il "posto di linea" ha la configurazione di tratto tampone per effettuare il cambio fase di alimentazione.

Pertanto, dato il distanziamento di 50 km delle sottostazioni, tra 2 sottostazioni vi sono 3 posti di parallelo, dei quali quello centrale svolge funzioni anche di sezionamento e cambio fase.

In caso di necessità, tale funzione può essere spostata in uno dei PPD limitrofi.

I posti di parallelo pari/dispari e autotrasformazione sono costituiti da due moduli uguali. Ciascun modulo comprende un autotrasformatore e due interruttori di manovra che collegano l'autotrasformatore alle due linee di contatto e nel contempo realizzano il parallelo tra le medesime.

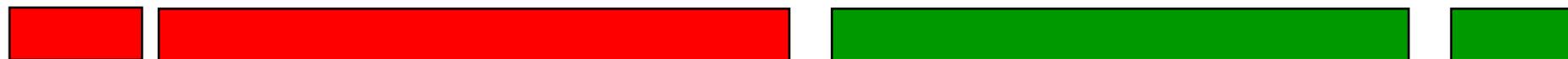
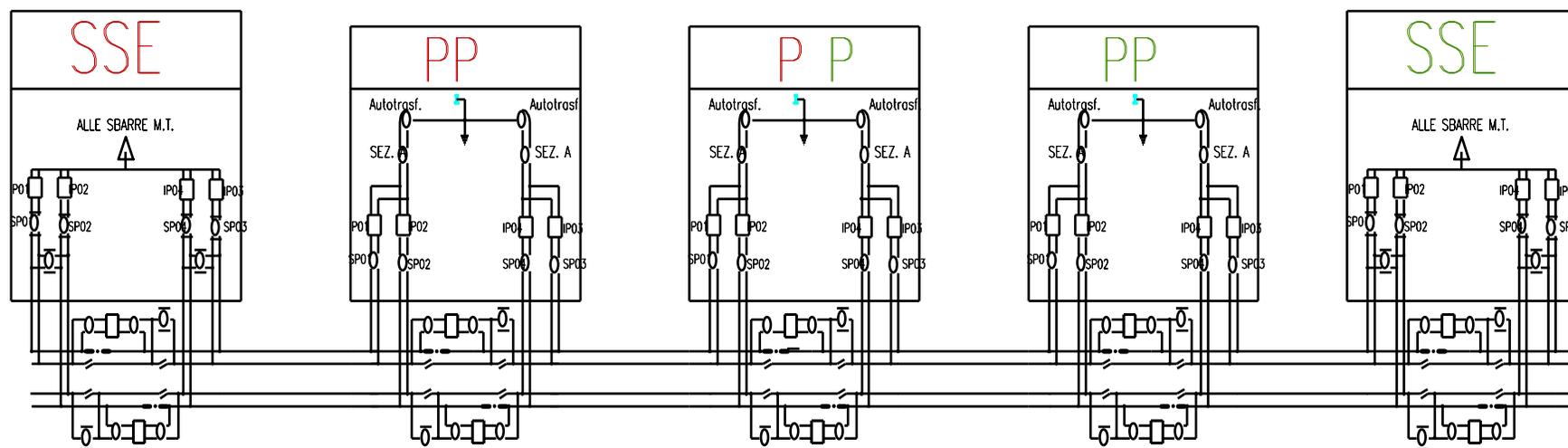
# La SSE ed i PPD



# Distribuzione dei Tratti Neutri

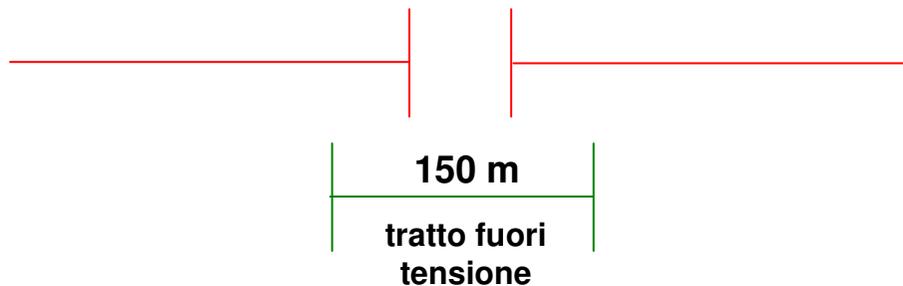
In base alle norme di esercizio risulta normalmente aperto solo il tratto neutro in posizione intermedia tra le due SSE al passaggio del quale avviene il cambio fasi fra una semitratta e l'altra, mentre risultano chiusi gli altri tratti neutri intermedi in corrispondenza degli altri PPD.

In corrispondenza della SSE il Tratto Neutro è gestito come un normale sezionamento, non essendo previsto il cambio fasi; l'alimentazione viene derivata da due interruttori di SSE diversi, al fine di garantire la separazione dell'intervento in caso di guasto tra la tratta a monte e la tratta a valle della SSE stessa.



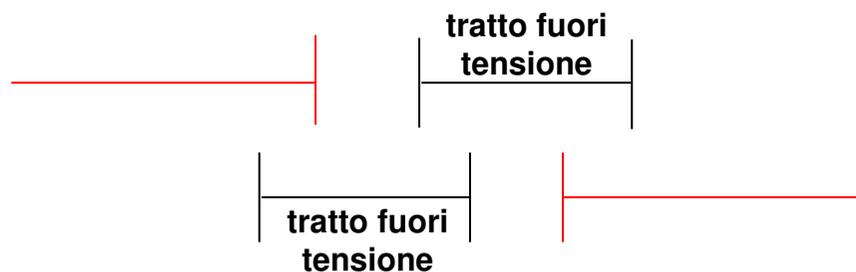
# Schema dei Tratti Neutri

## Schema di tratto neutro semplice

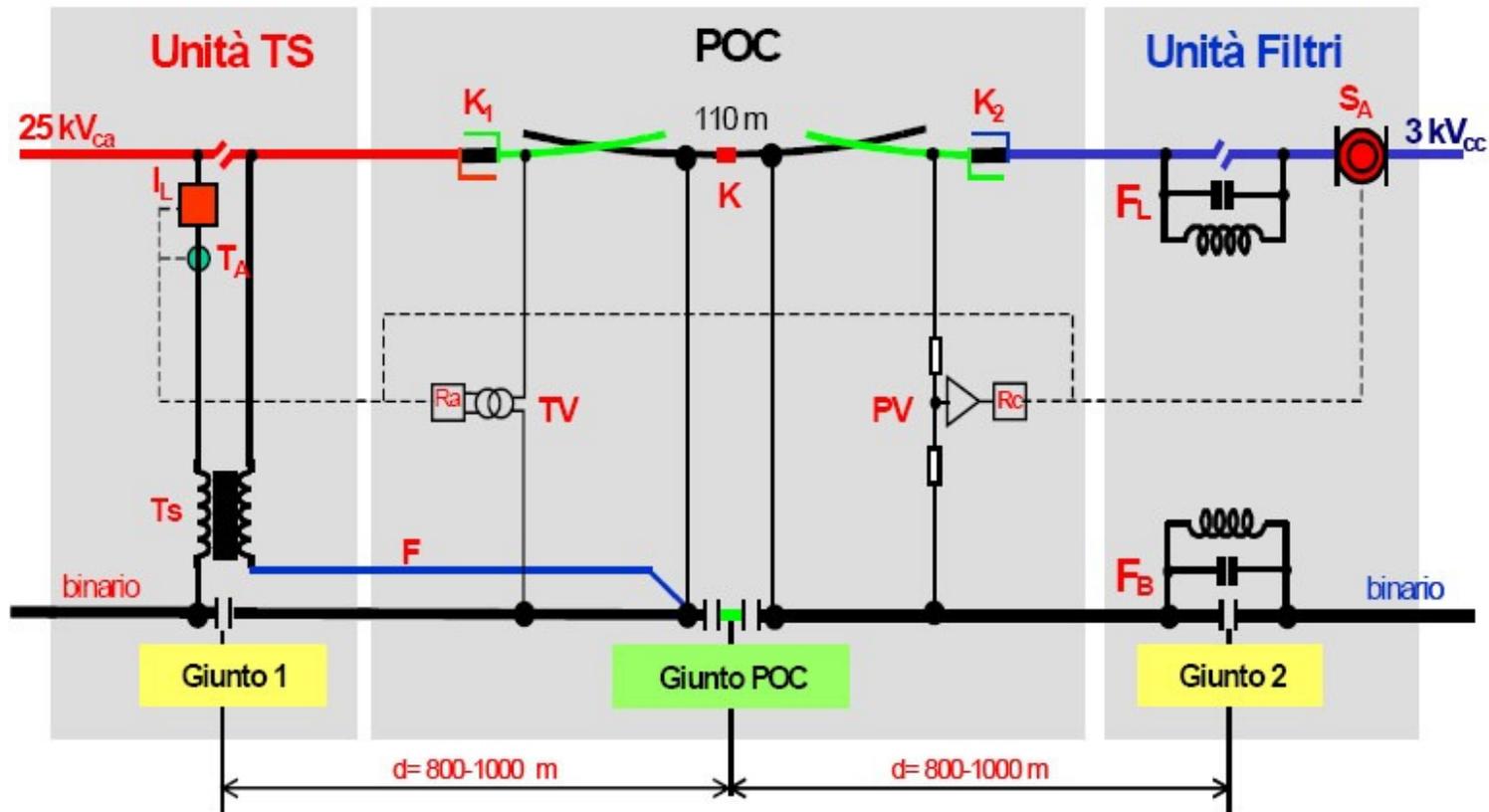


Il potenziale vincolo dato dallo schema di tratto neutro semplice (un solo tratto di condotta fuori tensione e due zone di sovrapposizione) si presenterebbe nel caso di due pantografi consecutivi in presa con distanza al di sotto dei 150 m. In questo caso i due pantografi determinerebbero un corto circuito fase-fase in linea.

## Schema della nuova tipologia di tratto neutro semplice



# Esempio di POC



Il POC svolge la funzione di separare fisicamente la tratta a 25 kV<sub>ca</sub> da quella a 3 kV<sub>cc</sub>.  
Le apparecchiature installate (TS lato 25 kV e filtri LC lato 3 kV) hanno la funzione di garantire uno sbarramento della corrente a 50 Hz verso la parte alimentata in continua.

# Vantaggi del sistema 2 x 25 kV

---

I due vantaggi fondamentali del sistema 2 x 25 kV rispetto al 25 kV classico sono:

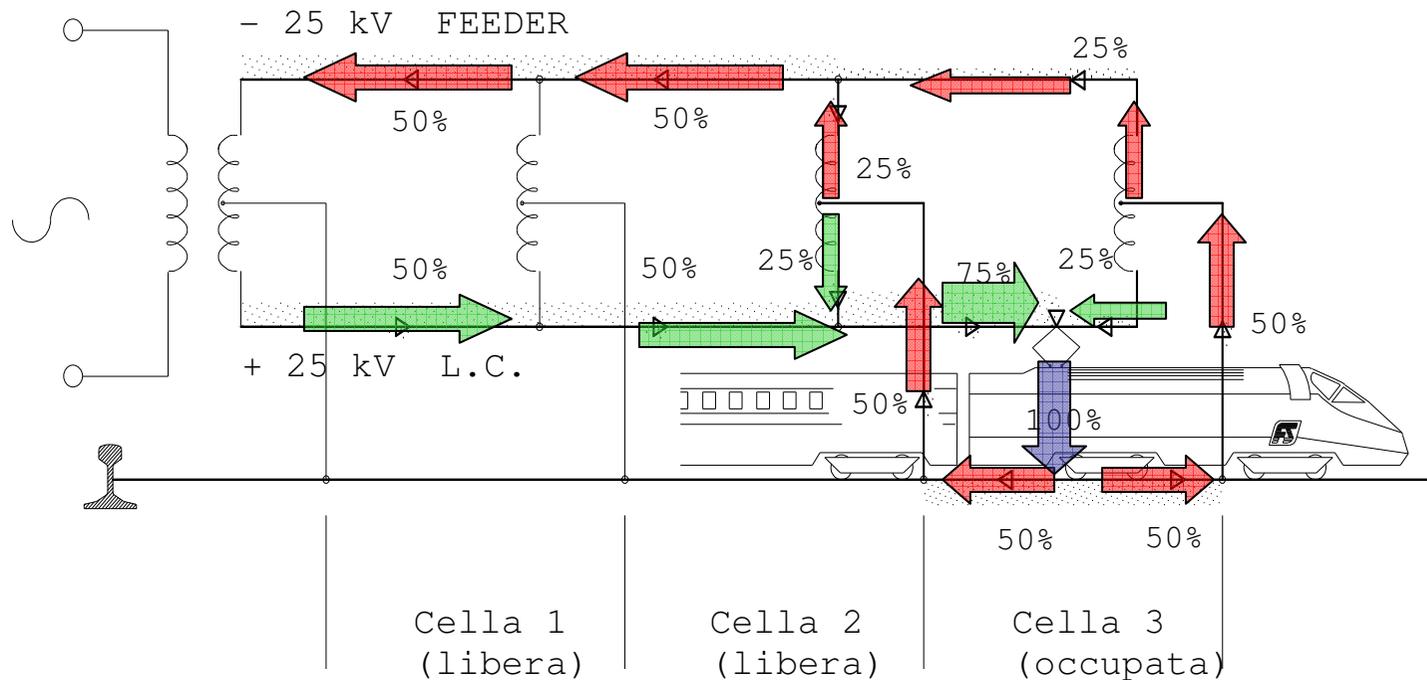
1. potenzialità molto più elevata a parità di distanziamento tra le SSE
2. ridotta emissione di interferenze nei riguardi dell'ambiente, degli impianti di terzi e degli impianti ferroviari esistenti.

Il punto 1. è la naturale conseguenza del'alto livello di tensione (50 kV) a cui viene erogata la potenza a disposizione dei treni → correnti più basse di quelle viste nel sistema a 3 kV → minori cadute di tensione



# Vantaggi del sistema 2 x 25 kV

Relativamente al punto 2., guardando la figura, si possono fare le seguenti considerazioni:



# Vantaggi del sistema 2 x 25 kV

---

La corrente assorbita dal treno si ripartisce percentualmente come indicato in figura: al di là della trattazione analitica, è importante notare la percentuale di corrente che interessa i diversi conduttori (linea di contatto, feeder e binario) e il verso corrispondente in ciascuno di essi, entrambi parametri che danno luogo all'interferenza.

Innanzitutto è da notare che i tratti di binario della 1° e 2° cella non sono interessati da corrente in quanto quest'ultima passa tutta attraverso le condutture di contatto e il feeder.

La portata di questa situazione è immediata: se le interferenze sono dovute alla corrente che dal binario si incanala nel terreno, è evidente che se le rotaie non sono percorse da corrente non c'è coinvolgimento elettrico del suolo e, quindi, viene meno la condizione di inquinamento elettromagnetico.

Anche nella cella dove è presente il treno (3° cella) la situazione è migliorata, rispetto al caso del 25 kV semplice, poiché si realizza una condizione di alimentazione bilaterale e quindi, sia il binario che la linea di contatto, sono interessati da correnti inferiori a quella assorbita dal treno.

In conclusione si ottiene che il tratto di linea inducente è ridotto alla sola cella ove è presente il treno e con un effetto minore rispetto alla condizione originaria: infatti se per tutta l'estesa della cella esistesse un conduttore vittima questi per la prima metà sarebbe soggetto ad una f.e.m.i. in un verso e per la seconda metà da una f.e.m.i. di verso opposto talché, su tutta l'estesa, esse si compensano, annullandosi nella migliore delle ipotesi.



# Sezioni tipo della linea TE a 25 kV

---

La linea di contatto è costituita da una **fune portante** di rame da 120 mm<sup>2</sup> ad un tiro nominale di 1600 daN ed un **filo di contatto** da 150 mm<sup>2</sup> ad un tiro nominale di 2000 daN. La scelta dei tiri (valore specifico di 133 N/mm<sup>2</sup>) è stata operata per il raggiungimento dei requisiti connessi alla qualità di captazione.

Il **feeder** è costituito da una corda di Al/Acciaio con diametro nominale di 22,8 mm.

Tale conduttore è utilizzato anche per gli elettrodotti AT della rete RFI.

Il feeder può essere posizionato rispetto alla linea di contatto in posizione esterna al binario o interna; il posizionamento all'interno, come indicato nella precedente figura, consente di evitare che la eventuale caduta dello stesso avvenga al di fuori della sede ferroviaria ed è pertanto sempre utilizzato in viadotto.

## Impiego filo-conduttore Cu-Mg: Tiro massimo

---

Allo scopo di verificare i miglioramenti ottenibili sulla qualità di captazione grazie all'impiego di nuovi materiali di recente diffusione, si è proceduto alla sperimentazione di un filo di contatto di tipo innovativo.

Si tratta di filo in Cu-Mg 0,2 che presenta proprietà meccaniche superiori rispetto al filo tradizionale in rame: il carico di rottura passa dai 5200 daN ai 6110 daN.

Il tiro massimo ammissibile, supponendo un consumo del 20%, risulta pari a:

$$T_{\max} = T_{\text{rott}} \times 0,65 \times K_{\text{temp}} \times K_{\text{wear}} \times K_{\text{load}} \times K_{\text{eff}} \times K_{\text{clamp}} \times K_{\text{joint}} = \boxed{3018 \text{ daN}}$$

$T_{\text{rott}}$  = carico di rottura

$K_{\text{temp}}$  = 1 con temperatura max di 80°C

$K_{\text{wear}}$  = 0,8 per consumo filo

$K_{\text{load}}$  = 0,95 per condizione di vento e ghiaccio

$K_{\text{eff}}$  = 1 con dispositivo di tensionatura efficiente > 95%

$K_{\text{clamp}}$  = 1 con materiali di amarro con rottura > 95% del filo

$K_{\text{joint}}$  = 1 con filo senza giunzioni saldate

## Impiego filo-conduttore Cu-Mg: Velocità di propagazione

---

Per il filo Cu-Mg si è pertanto assunto un tiro nominale di progetto pari a 3000 daN che è pari a 1,5 volte il tiro di 2000 daN del filo tradizionale.

L'aumento del tiro determina la crescita della velocità di propagazione d'onda sulla linea di contatto ( $V_p$ ) calcolabile come:

$$V_p = \sqrt{\frac{T_{fp} + T_{fc}}{m_{fp} + m_{fc}}} = 139 \text{ m/s} \quad \text{pari a } 500 \text{ km/h}$$

$T_{fp}$  = tiro della fune portante = 1625 daN

$T_{fc}$  = tiro filo di contatto = 3000 daN

$m_{fp}$  = massa fune portante = 1,071 kg/m

$m_{fc}$  = massa filo di contatto = 1,335 kg/m

# Impiego filo-conduttore Cu-Mg: conclusioni

---

Quindi con il filo di contatto in Cu-Mg la velocità di marcia di 300 km/h risulta pari al 60% della velocità di propagazione con un notevole margine rispetto al massimo del 70% stabilito dalla norma.

In pratica la linea, sotto tale aspetto, diventerebbe idonea ad una velocità di 350 km/h (70% di 500 km/h).

Con il filo attuale, tesato a 2000 daN, la velocità di propagazione è pari a 443 km/h: pertanto il rapporto tra velocità di esercizio e velocità di propagazione risulta pari al 68%.



# Protezione degli impianti TE

---

La protezione degli impianti TE è affidata agli interruttori delle SSE che intervengono in apertura al verificarsi di cortocircuiti o sovraccarichi sulle linee o sulle apparecchiature da esse alimentate.

Tale protezione è in genere del tipo:

- distanziometrico selettivo e di massima corrente, sulle linee AT;
- distanziometrico e di massima corrente sulla linea di contatto a 25 kV e sulle apparecchiature di linea da essa alimentate;
- di massima corrente sulle apparecchiature di SSE.

# Protezione delle linee in AT

---

Le modalità di taratura delle protezioni distanziometriche selettive e di quelle per massima corrente delle tratte di linea in AT sono analoghe a quelle normalmente adottate sull'intera rete AT ferroviaria.

Nel caso specifico, in considerazione della particolarità dei carichi elettrici delle linee primarie, occorre procedere alla disabilitazione della funzione di protezione per squilibrio di correnti tra le fasi.

Tutti gli interruttori devono essere predisposti per compiere, a seguito dell'intervento delle protezioni, una manovra di apertura con una successiva manovra di autorichiusura in modalità tripolare. L'eventuale ulteriore intervento delle protezioni dovrà comportare la definitiva apertura trifase degli interruttori.



# Protezione delle linee di contatto

---

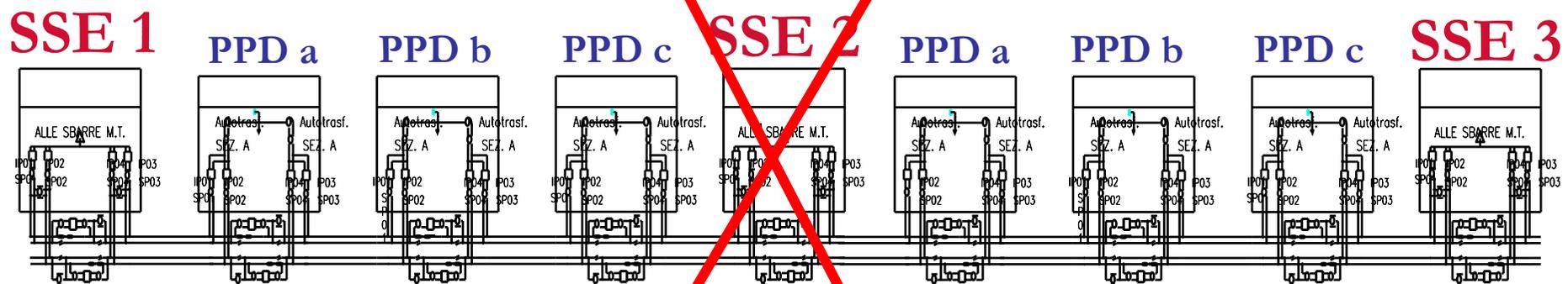
- Ogni sistema di protezione deve proteggere, a fronte di qualsiasi configurazione elettrica, il tratto di linea alimentato dal relativo interruttore;
- la protezione deve essere assicurata anche quando l'alimentazione di un tratto di linea, di norma alimentato da una coppia di interruttori bipolari, rimanga alimentato da uno solo di essi;
- la protezione deve essere efficace contro i cortocircuiti tra catenaria e terra, tra feeder e terra, tra feeder e catenaria e tra feeder, catenaria e terra anche in presenza di assetti particolari con il prolungamento della tratta protetta dovuto al fuori servizio di una SSE;
- il tratto di linea alimentabile da una SSE si può estendere (nel caso più sfavorevole) fino al primo posto di parallelo successivo alla SSE limitrofa fuori servizio. Ciò comporta la ripartizione delle alimentazioni fra le due SSE limitrofe rimaste in servizio, distanti mediamente 96 km, con una copertura pari a 60 km per l'una e 36 km per l'altra;
- la protezione deve essere efficace contro i corto circuiti bifasi in aria fra linee alimentate con tensioni sfasate reciprocamente di un angolo pari a  $120^\circ$ ;
- la protezione deve essere insensibile ai disturbi generati dalle sovracorrenti di inserzione degli autotrasformatori presenti nei posti di parallelo.



# Protezione delle linee di contatto – CTO CTO monofasi a terra

La condizione d'impianto più sfavorevole per questo tipo di guasto è quella di temporaneo fuori servizio di una SSE con copertura di 60 km e 36 km di linea di contatto per le due SSE rimaste in servizio con due particolari configurazioni dei PPD interessati:

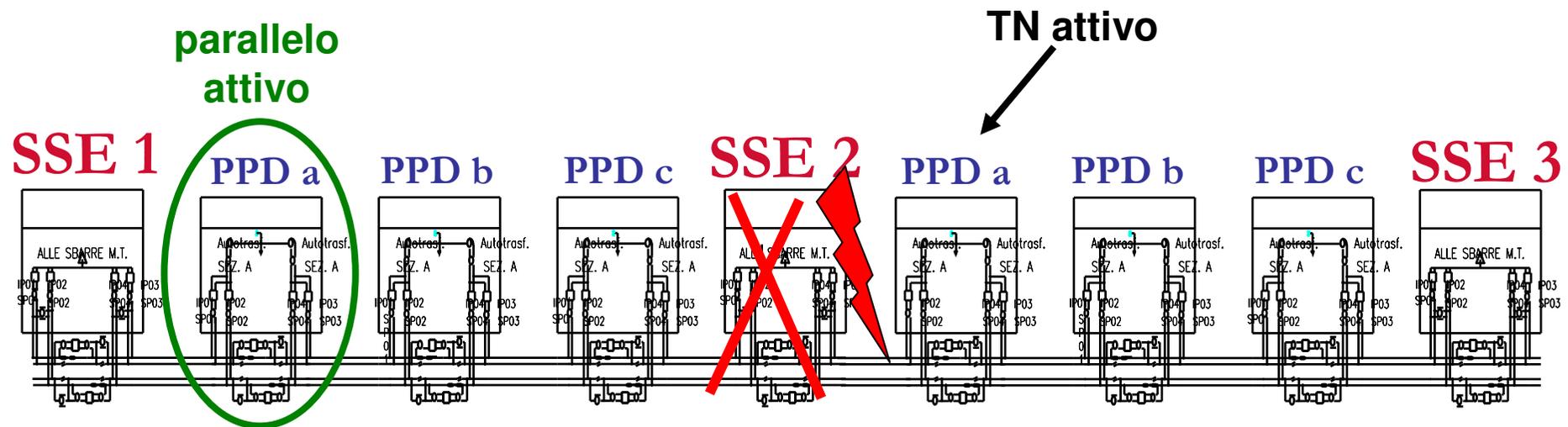
1. il parallelo fra le linee attivo solo in corrispondenza del PPD più vicino (alla distanza di 12 km dalla SSE alimentante);
2. il parallelo fra le linee attivo solo in corrispondenza del PPD più lontano (alla distanza di 60 km dalla SSE alimentante).



# Protezione delle linee di contatto – CTO CTO monofasi a terra

## Caso 1.

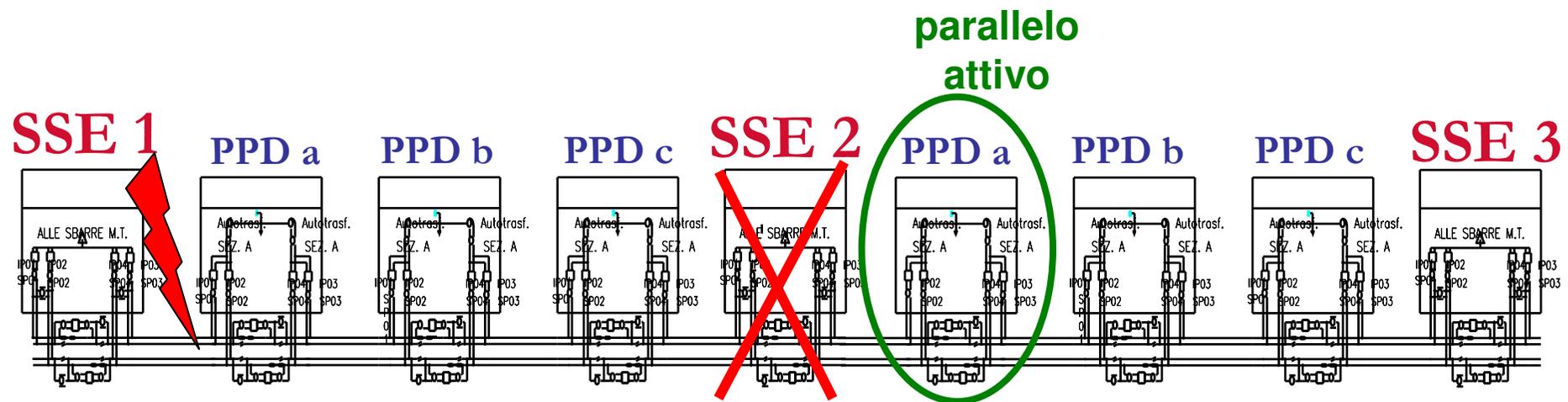
Con la configurazione 1. della slide precedente, la situazione più critica si può manifestare con il verificarsi di un corto circuito fra linee e/o tra linee e terra alla massima distanza (60 km) dalla SSE alimentante. In questo caso la corrente di guasto, che interessa la linea di contatto a valle del PPD, a monte di questo si riduce drasticamente per la presenza dell'autotrasformatore e di due linee in parallelo.



# Protezione delle linee di contatto – CTO CTO monofasi a terra

## Caso 2.

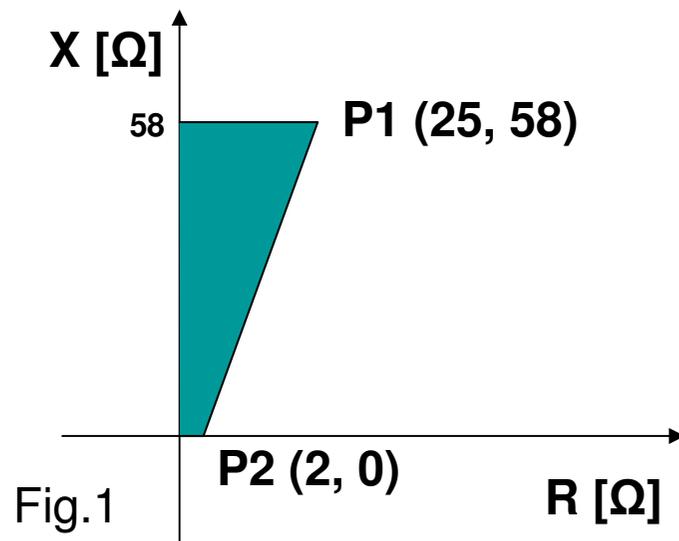
Con la configurazione 2. della slide precedente, la situazione più critica si può manifestare con il verificarsi di un corto circuito fra linee e/o tra linee e terra alla minima distanza (0 km) dalla SSE alimentante. In questo caso la protezione di un interruttore rileverà un bassissimo valore di impedenza di guasto con immediato intervento di apertura (interruttore vicino al guasto), mentre la protezione dell'altro interruttore (lontano dal guasto circa 120 km) sentirà invece un'impedenza di guasto di valore prossimo a quelli di carico.



## Protezione delle linee di contatto – CTO CTO monofasi a terra

I casi considerati costituiscono, a fronte delle situazioni impiantistiche descritte ai precedenti punti 1. e 2., le condizioni più sfavorevoli a cui dovrà essere fatto riferimento nel definire la zona di intervento delle protezioni della linea di contatto.

Le tipologie di apparecchiature normalmente utilizzate per la protezione delle linee a 25 kV sono implementabili con algoritmi che tengono conto della somma delle correnti che, in uscita dalle SSE, interessano i conduttori del feeder e della catenaria.



In questi casi, l'impedenza apparente di guasto (calcolata come rapporto tra tensione verso terra e la somma delle correnti) risulta compresa all'interno del poligono rappresentato accanto.

**R** ed **X** rappresentano la parte reale ed immaginaria dell'impedenza apparente calcolata dalla protezione.

## Protezione delle linee di contatto – CTO CTO bifasi in aria

---

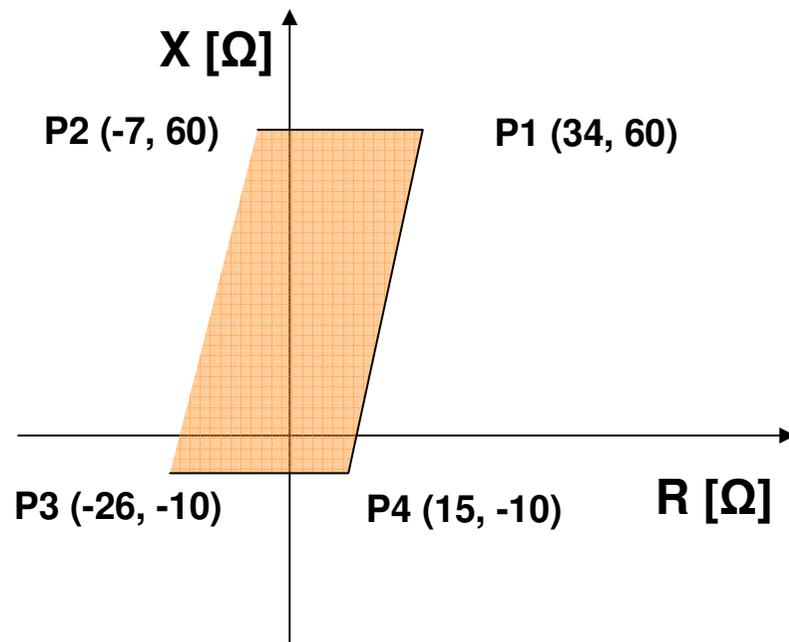
Anche per questa tipologia di guasto le condizioni di maggiore criticità per le protezioni si hanno per le configurazioni analizzate nelle slide precedenti.

Dai calcoli effettuati risulta che la zona sensibile all'intervento delle protezioni va a comprendere, sul piano "R" ed "X", valori di impedenze apparenti correlabili a quelle delle impedenze caratteristiche dei treni in circolazione e che la loro approssimazione è tanto maggiore quanto minore risulta l'angolo di sfasamento tra i vettori tensione interessati dal guasto. Conseguentemente la protezione contro questa tipologia di guasto potrà risultare accettabile soltanto se l'arco elettrico ad esso associato si sviluppa tra vettori sfasati di  $120^\circ$ . Con tale configurazione risulterà infatti possibile garantire una protezione contro qualsiasi tipologia di guasto e nel contempo consentire ai treni circolanti in linea (caratterizzati da  $\cos\varphi$  maggiore di 0,9) di assorbire fino a 40 MW da ogni interruttore alimentatore di SSE. Configurazioni diverse invece, caratterizzate da sfasamenti di  $60^\circ$  tra i vettori tensione, limiterebbero gli assorbimenti, in presenza delle stesse condizioni di protezione, a valori prossimi a 10 MW.



## Protezione delle linee di contatto – CTO CTO bifasi in aria

---



*Fig. 2*

*Area di intervento delle protezioni operanti per "somma di correnti" su corto circuito in aria fra vettori tensione sfasati di  $120^\circ$*

In considerazione della sovrapposizione fra zona di intervento per corto circuito a terra e zona di intervento per corto circuito in aria, nell'impostazione della taratura delle protezioni distanziometriche della linea di contatto occorrerà fare riferimento alla fig. 2 limitandosi a considerare la fig. 1 solo nei casi di inammissibilità di questa tipologia di rischio (esempio: tratti di linea adiacenti ai POC).

# Protezione nei PPS, nei PPD e nei POC

---

Nei PPS e PPD sono mantenute attive le sole funzioni di protezione per minima tensione. Tali funzioni, che intervengono dopo un tempo compreso fra i 2 ed i 3 secondi dal raggiungimento di un valore di tensione della catenaria o del feeder verso terra inferiore a 17,5 kV, produrranno l'apertura degli interruttori a 25 kV di parallelo tra le linee di contatto pari e dispari impedendone la richiusura.

In corrispondenza dei POC, gli interruttori di protezione dei trasformatori TS dovranno risultare invece sensibili alla sola corrente erogata per assicurare il loro intervento in sola apertura al verificarsi delle seguenti situazioni anomale:

- superamento del valore di corrente di 500 A per  $t > 2,5$  s (protezione per sovraccarico);
- superamento del valore di corrente di 1000 A per  $t = 0$  s (protezione per corto circuito).