

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PALERMO

**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA
AERONAUTICA E DEI TRASPORTI**

**Corso di Tecnica dei Trasporti
Prof. Luigi La Franca**

TRASPORTI E LORO APPLICAZIONI

1 - Trazione Elettrica

a cura dell'Ing. Pietro Zito

1. Generalità

La trazione elettrica si riferisce per definizione ad ogni applicazione ed uso dell'energia elettrica nel campo dei trasporti; in particolare è quel settore della tecnica dei trasporti interessato allo studio dei mezzi di trazione su strada o su rotaia equipaggiati con motori elettrici, che si muovono su un determinato percorso, e degli impianti fissi destinati a provvedere alla loro alimentazione tramite una linea di contatto opportunamente disposta lungo il percorso stesso, che può essere aerea o costituita da un profilato posto lateralmente od interiormente rispetto al rotabile (terza rotaia). Insieme ad i veicoli alimentati dall'esterno possono essere considerati anche quelli provvisti di motori elettrici di trazione, ma non alimentati da una linea di contatto, ossia i veicoli diesel con trasmissione elettrica (trazione diesel-elettrica), in cui l'energia necessaria alla trazione viene generata a bordo del veicolo.

La trazione elettrica presenta una serie di vantaggi tecnici ed economici:

- 1) favorevole rapporto peso/potenza, e quindi possibilità di elevate potenze installate a bordo;
- 2) elevate prestazioni utilizzabili nei trasporti urbani e suburbani a frequenti fermate, quindi elevata velocità commerciale;
- 3) elevate prestazioni raggiungibili in ferrovia, in termini di massa trainata e velocità;
- 4) elevate potenzialità raggiungibili (vedi traffico ferroviario ad alta velocità);
- 5) possibilità di utilizzare per la produzione, nelle centrali elettriche, diverse forme di energia (dalle fonti di energia rinnovabili idraulica o eolica, ai combustibili fossili fino all'energia nucleare);
- 6) grande capacità dei mezzi di trazione dipendente dalla possibilità di sovraccarico dei motori elettrici;
- 7) economia di esercizio;
- 8) assenza di emissioni inquinanti e riduzione della rumorosità

I vantaggi nell'uso della trazione elettrica sono, quindi, riconducibili in una maggiore efficienza energetica (se confrontata con i tradizionali motori endotermici), maggiore robustezza in termini di potenza specifica installata a bordo, e possibilità di realizzare facilmente una regolazione a coppia costante durante la fase di avviamento e una regolazione a potenza costante durante la fase a velocità di crociera (vedi figura 1). Questo aspetto è fondamentale, in considerazione del fatto che alcuni motori elettrici hanno caratteristiche meccaniche simili a quelle di un motore ideale perfettamente elastico.

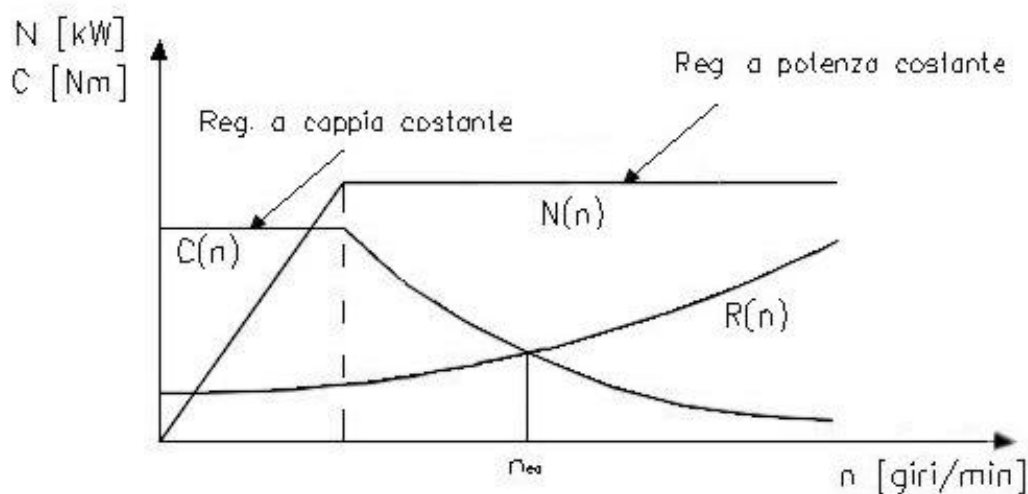


Fig. 1 Regolazione della coppia e della potenza

bassi di tensione in quanto i motori elettrici sono, in genere, macchine a bassa tensione per motivazioni di carattere elettrico.

2. Sistemi di trazione elettrica

I settori di impiego della trazione elettrica sono i seguenti:

- trasporti pubblici urbani di tipo filoviario, tramviario, metropolitano;
- ferrovie di carattere locale o di grande comunicazione;
- veicoli elettrici stradali con produzione autonoma dell'energia elettrica (automobili elettriche, furgoni elettrici, carrelli per trasporti interni industriali, ecc.).

Nel campo dei trasporti urbani si usa sempre il sistema di trazione a corrente continua a 600-750 V oppure a 1500 V. In particolare:

$U_L = 600-750$ V nel caso di filobus, tram e metropolitane con terza rotaia.

$U_L = 1500$ V nelle metropolitane con linea aerea.

Nel campo dei trasporti ferroviari i sistemi impiegati sono i seguenti:

- sistema a corrente continua con $U_L = 750$ V (3^a rotaia), 1500 V, 3000 V;
- sistema a corrente alternata monofase con $U_L = 15$ kV con frequenza 16,7 Hz; 25 kV con frequenza 50 Hz.

I sistemi di trazione si definiscono “diretti” se la corrente di alimentazione dei motori è dello stesso tipo di quella che circola nella linea di contatto; altrimenti i sistemi di trazione si definiscono “indiretti”.

I sistemi su descritti sono diretti; i sistemi indiretti oggi impiegati sono i seguenti:

- sistema continuo-trifase con $U_L = 3000$ V;
- sistema mono-continuo con $U_L = 25$ kV- 50 Hz;
- sistema mono-trifase con $U_L = 25$ kV- 50 Hz.

Esistono locomotori denominati policorrenti per consentire il transito dei treni attraverso i confini senza il cambio della locomotiva.

Tali locomotori si adoperano allorquando in uno stesso paese si utilizzano sistemi di trazione elettrica differenti o quando un locomotore debba recarsi in un paese confinante che usa un sistema differente.

Nella tab. 1 sono evidenziati i sistemi di trazione elettrica in uso nei paesi europei.

Tipo di corrente e tensione	Paese
Continua 750 V	Gran Bretagna (1960 km)
Continua 1500 V	Francia, Olanda
Continua 3000 V	Italia, Belgio, Lussemburgo, Polonia, Cecoslovacchia.
Alternata monofase 25 kV – 50 Hz	Francia, Lussemburgo, Gran Bretagna, Ungheria, Italia (sardegna).
Alternata monofase 15 kV – 16,7 Hz	Germania, Austria, Svizzera, Svezia, Norvegia.

Tab. 1 Sistemi di trazione elettrica in Europa.

Nella tabella 2 è riportato lo sviluppo delle linee ferroviarie elettriche nel mondo; lo sviluppo è di 205.030 Km, pari al 17,2 % dell'estensione globale delle linee ferroviarie pari a circa 1.200.000 Km.

Reti a corrente continua			Reti a corrente alternata monofase		
Fino a 1 kV	1 – 2 kV	Oltre 2 kV	15 kV 16,7 Hz	25 kV 50 Hz	Altri sistemi
7.560 km	20.440 km	68.890 km	32.940 km	72.110 km	3.000 km
96.980 km 47,3%			105.050 km 51,2%		1,5%
Estensione totale delle linee elettrificate = 205.030 km pari al 17,2 % del totale delle linee ferroviarie (1.192.000 km).					

Tab. 2 Estensione delle linee ferroviarie a trazione elettrica nel mondo.

3. Motore a corrente continua con eccitazione in serie

Si consideri dapprima il motore a corrente continua con eccitazione in serie la cui struttura è mostrata in figura 3. Questo tipo di motore si presta bene alla trazione, avendo la sua caratteristica meccanica coppia motrice-numero di giri $C(n)$ un andamento molto simile a quello della caratteristica "ideale" (andamento iperbolico vedi fig. 1).

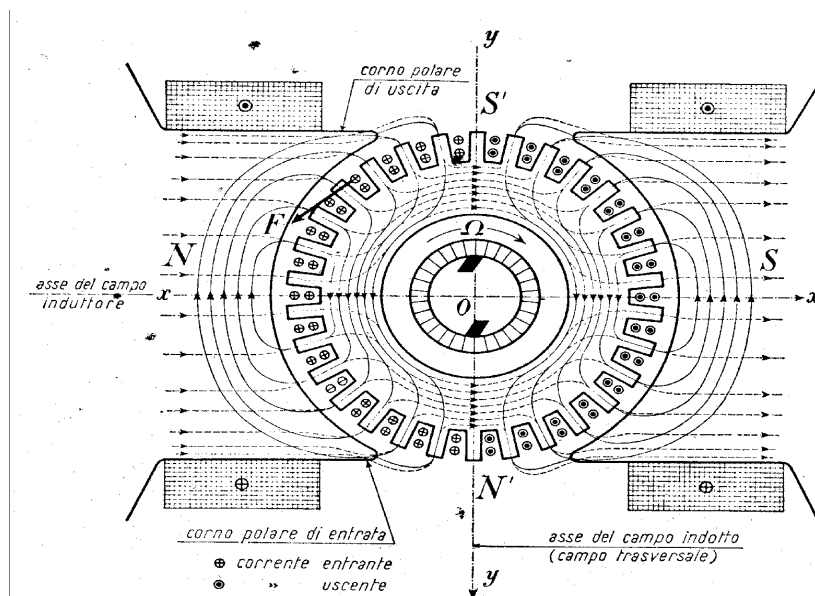


Fig. 3 Struttura di un motore in c.c.

La struttura del motore è costituita da una parte fissa detta statore su cui sono avvolti gli avvolgimenti di eccitazione e una parte mobile detta rotore su cui è avvolto il circuito di armatura. Lo schema elettrico è mostrato in figura 4 dove si vede il funzionamento da motore di trazione.

Si è indicato con:

- E la forza contro-elettromotrice (tensione a vuoto che si avrebbe ai morsetti se il motore funzionasse da generatore);
- U la tensione di alimentazione;
- I la corrente assorbita dal motore;
- ϕ il flusso principale;
- n il numero di giri del motore.

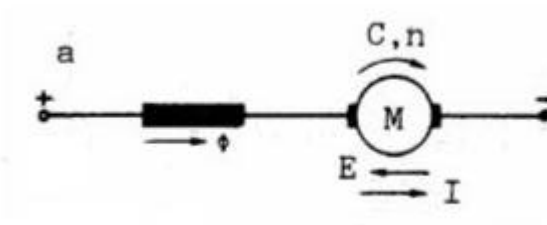


Fig. 4 Schema elettrico di un motore a corrente continua con eccitazione in serie

La caratteristica meccanica $C(n)$ di un motore a corrente continua eccitato in serie è mostrata in figura 5 (ove sono mostrate anche le curve di resistenza per varie livellette). Si nota come la caratteristica meccanica sia simile a quella di un motore ideale adattandosi alle resistenze al moto.

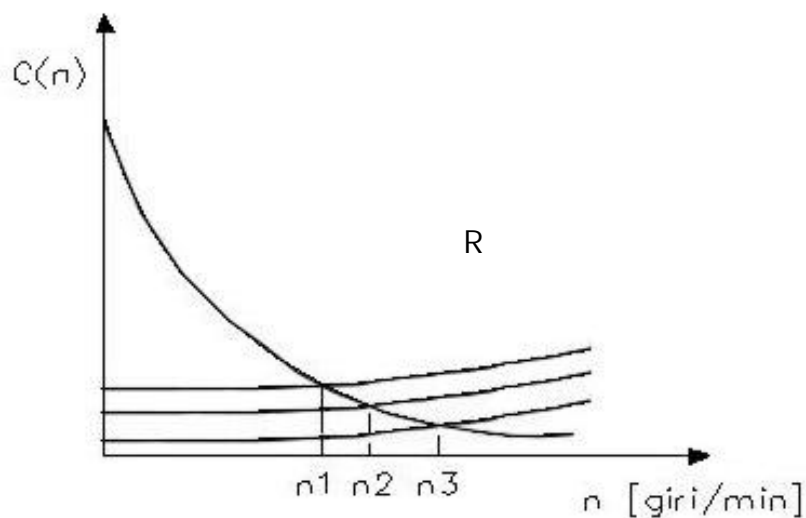


Fig. 5 Caratteristica meccanica di un motore in c.c.

La caratteristica meccanica $C(n)$ rappresenta anche, a scala, la curva di trazione $T(V)$, essendo lo sforzo di trazione T proporzionale alla coppia motrice C e la velocità V proporzionale al numero di giri n . Infatti in generale si ha:

$$T = \frac{C}{D/2} \cdot i \cdot h_r \cdot m$$

$$V = \frac{\pi D n}{60} \cdot 3,6 \cdot \frac{1}{m}$$

con η_r è rendimento della trasmissione, $m = \frac{n}{n_r} = \frac{n_{motore}}{n_{ruote}} > 1$ è il rapporto di riduzione (assume un valore fisso nei veicoli a trazione elettrica), i è numero dei motori, D è il diametro delle ruote motrici.

Se si indica con:

- r_i la resistenza del circuito di indotto;
- r_e la resistenza dell'avvolgimento di eccitazione;
- $r = r_i + r_e$ la resistenza interna della macchina;
- E la forza contro-elettromotrice;
- U la tensione di alimentazione;
- I la corrente assorbita dal motore;
- ϕ il flusso principale;
- n il numero di giri del motore.

Dalle relazioni $E = U - rI$ e $E = K_1 n \phi$, dove $K_1 =$ costante di macchina (dipendente dalle caratteristiche costruttive del motore), si ricava il numero di giri

$$n = \frac{E}{K_1 \phi} = \frac{U - rI}{K_1 \phi}$$

Pertanto, per variare la velocità n , a pari I , si può:

- a) variare la tensione di alimentazione del motore (regolazione di tensione);
- b) variare il flusso, (regolazione di campo);
- c) produrre una caduta di tensione aggiuntiva RI mediante un reostato, di resistenza R , in serie al circuito indotto (regolazione reostatica).

$$n = \frac{U - (r + R)I}{K_1 \phi}$$

a) Regolazione di tensione

Nei veicoli a corrente continua con equipaggiamento di tipo tradizionale a più motori la regolazione di tensione consiste nel collegare secondo schemi diversi i motori.

Negli equipaggiamenti con sei motori da trazione, usati frequentemente nelle reti a 3000 V, i collegamenti possibili sono i seguenti (adottando motori con tensione massima $U_{MAX} = 1500$ V):

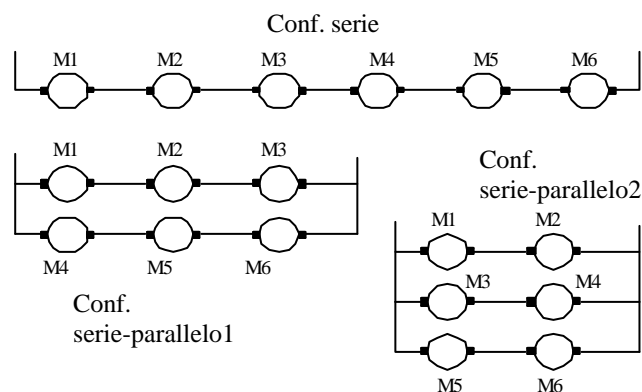


Fig. 6 Configurazioni serie e serie-parallelo di un motore in c.c.

Si può passare dalla tensione $U/6$ alla tensione $U/3$ ed infine a quella $U/2$. Per variare il numero di giri, per le tensioni U_1 ed U_2 si ha:

$$U_1 - rI = K_1 n_1 \boldsymbol{f}$$

$$U_2 - rI = K_1 n_2 \boldsymbol{f}$$

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{U_1 - rI}{U_2 - rI} \cong \frac{U_1}{U_2} \quad \text{se } U_2 > U_1 \Rightarrow n_2 > n_1$$

A parità di corrente la velocità varia, quindi, circa proporzionalmente alla tensione ai morsetti del motore.

L'elettronica di potenza ha modificato le tecniche classiche di regolazione del motore a corrente continua, i convertitori a chopper permettono di regolare finemente la tensione e la corrente di alimentazione del motore. Considerando il dispositivo elettronico come un semplice interruttore che apre e chiude il circuito ed indicando con t_c il tempo di conduzione e con t_b il tempo di interdizione del chopper, il valore medio della tensione ai capi del motore risulta:

$$\bar{U} = \frac{1}{T} \int_0^T U dt = \frac{1}{t_c + t_b} \int_0^{t_c} U dt = \frac{U t_c}{t_c + t_b} = \boldsymbol{a} U$$

$$\boldsymbol{a} = \frac{t_c}{t_c + t_b} \quad 0 \leq \boldsymbol{a} \leq 1$$

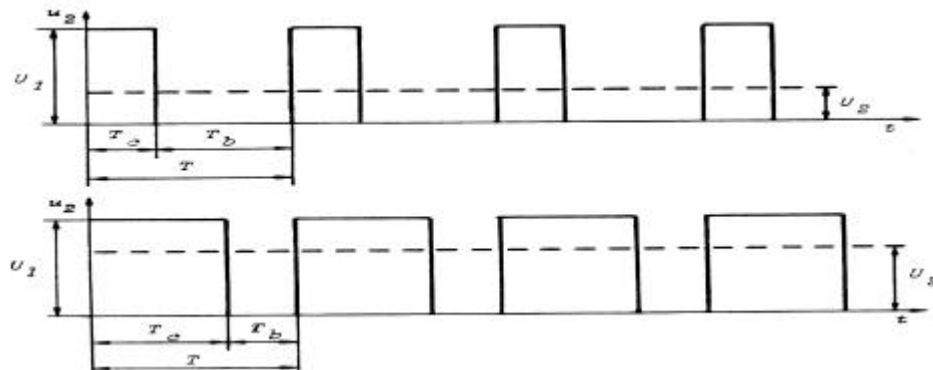


Fig. 7 Regolazione a Chopper

In questo modo è possibile variare in modo continuo ed efficiente la tensione da zero fino alla tensione U del motore (come in figura 7).

b) Regolazione reostatica

Si consideri ora l'avviamento di un solo motore di trazione con eccitazione in serie, alimentato alla tensione U .

$$\text{Dalla: } n = \frac{E}{K_1 \boldsymbol{f}} = \frac{U - rI}{K_1 \boldsymbol{f}}$$

Si nota che per $n = 0$ è nulla anche la forza contro-elettromotrice E e la corrente assorbita dal motore assumerebbe un valore pari a $I = \frac{U}{r}$ (molto elevata).

Per limitare la corrente all'avviamento si inserisce in serie al motore una resistenza R di valore R_0 tale che risulti:

$$I = \frac{U}{r + R_0}$$

con $I \leq ((1,3 \div 1,5)I_0$ essendo I_0 la corrente oraria (corrente che il motore può sopportare per un ora di funzionamento), tale che lo sforzo di trazione corrispondente a questa corrente verifichi la condizione di aderenza ($T \leq 1000 f_{ad} P_a$).

Man mano che il motore si avvia cresce la forza contro elettro motrice. Allora per non far decrescere la corrente e quindi la coppia si riduce progressivamente il reostato di avviamento e le caratteristiche si spostano come in figura 9.

$$U - rI = K_1 n_1 \phi \quad e \quad U - (r + R)I = K_1 n_2 \phi \Rightarrow \frac{n_1}{n_2} = \frac{U - rI}{U - (r + R)I}$$

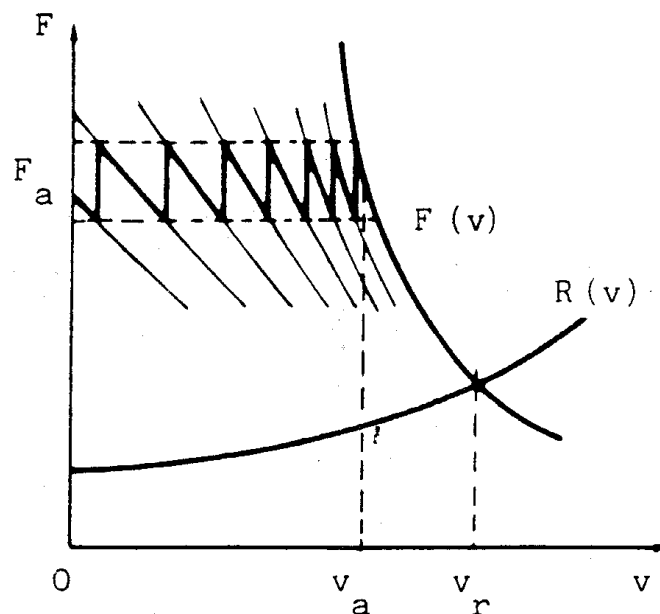


Fig. 9 Regolazione reostatica

c) Regolazione di campo

Infine agendo sul flusso magnetico realizziamo la regolazione di campo.

I metodi per variare il flusso sono i seguenti:

- 1) Variare il numero di spire del circuito di eccitazione;
- 2) Variare la corrente di eccitazione mediante l'inserimento di una resistenza variabile in parallelo all'avvolgimento di eccitazione;
- 3) Variare NI collegando alcune sezioni del circuito di eccitazione in modo diverso passando da serie a serie-parallelo ed infine parallelo.

4. Impianti Fissi

Linee di contatto

La linea aerea di contatto è costituita dal filo, con il quale viene a contatto la presa di corrente dei veicoli, e dagli elementi di sospensione. Il filo è di rame ed è sagomato, come rappresentato in fig. 10, per consentire l'attacco dei morsetti di sospensione. Il problema fondamentale è ottenere una captazione regolare di corrente, attraverso un contatto che dal punto di vista elettrico, non è certamente perfetto. Le locomotive assorbono correnti fino a 2000-3000 A ed anche superiori (si raggiungono i 4000 A nelle linee a 1500 V), a seconda della loro potenza e del valore della tensione di alimentazione; normalmente la linea di contatto è costituita da due fili vicini in parallelo, ciascuno della sezione di 100-150 mm². Il filo semplice, di sezione anche inferiore a 100 mm², è impiegato nelle linee secondarie.

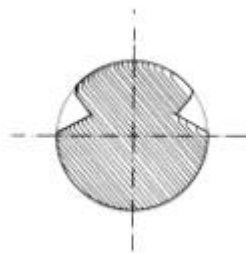


Fig. 10 Sezione trasversale della linea di contatto

Due sono i tipi di sospensione della linea di contatto:

- a) sospensione trasversale
- b) sospensione longitudinale

Nel primo tipo di sospensione il filo di contatto è semplicemente sorretto da mensole applicate, trasversalmente alla linea, su pali di sostegno. Il filo di contatto, disponendosi secondo una catenaria, raggiunge valori notevoli di freccia. In rettilineo si hanno campate di 18-25m. Il sistema è molto semplice ed economico, ma il suo inconveniente fondamentale è rappresentato dalla disuniforme flessibilità del filo, che è elevata a metà campata e molto piccola in corrispondenza degli appoggi.

Nei punti di sospensione si possono avere distacchi della presa ed urti; le interruzioni di corrente provocano scintillio, perlinature del filo e sua usura anormale.

Questo sistema può essere adottato per le linee urbane di superficie, date le modeste velocità di marcia e la possibilità di avere campate abbastanza corte.

Nel secondo tipo di sospensione, normalmente usato nelle ferrovie, il filo di contatto, semplice o doppio, è sospeso ad una fune in treccia di rame, di bronzo o di acciaio zincato, la quale, a sua volta è sostenuta dai pali. La campata, cioè la distanza fra i pali, è compresa tra 50 m ed 80 m in rettilineo. La sospensione longitudinale della linea di contatto è mostrata in fig. 13 (2 corde portanti, 3 pendini, 1 linea di contatto). La corda portante sostiene il filo di contatto mediante pendini di lunghezza variabile, situati a distanze ridotte (circa 8 m) e si dispone secondo una catenaria con freccia massima dell'ordine di 1 m: il sistema è detto anche a catenaria.

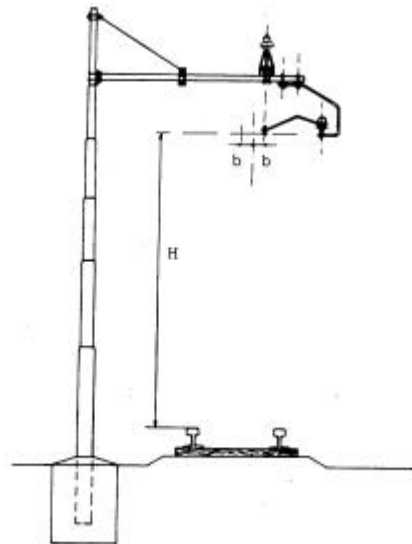


Fig. 11 Sostegno di una linea di contatto a catenaria

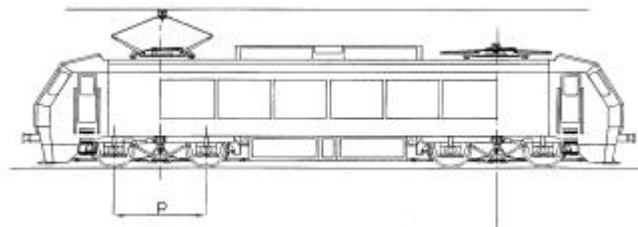


Fig. 12 Dettaglio del captatore di corrente (pantografo)

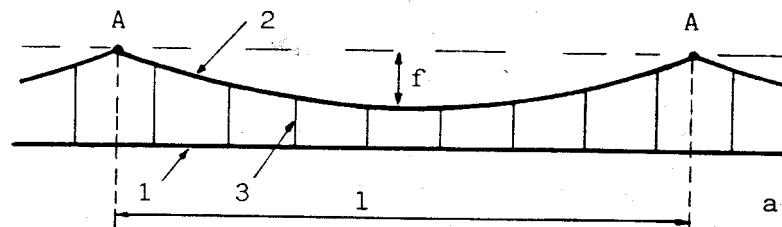


Fig. 13 Sospensione longitudinale

Le sottostazioni

Le sottostazioni sono il luogo fisico dove i parametri di tensione e corrente sono adattati alle esigenze della trazione ferroviaria. Esse vengono alimentate dalla rete nazionale ad Alta Tensione. Le sottostazioni ferroviarie sono distribuite lungo le linee a distanze dipendenti, principalmente, dal valore della tensione della linea di contatto. Nel sistema a 3 kV in c.c. la distanza tra le sotto stazioni è tra i 20 – 35 km.

In una sottostazione sono, normalmente, presenti due trasformatori (6) per trasformare la tensione e la corrente in ingresso (lato alta tensione) a valori adatti alla trazione (lato bassa tensione); se in corrente continua sono inoltre presenti gruppi di conversione che trasformano la corrente alternata in continua (raddrizzatori, 7); infine sono presenti interruttori di potenza (2, 10) e sezionatori (5, 11) per la protezione dai corto circuiti, sovraccarichi e le operazioni di manutenzione della sottostazione (vedi fig.14).

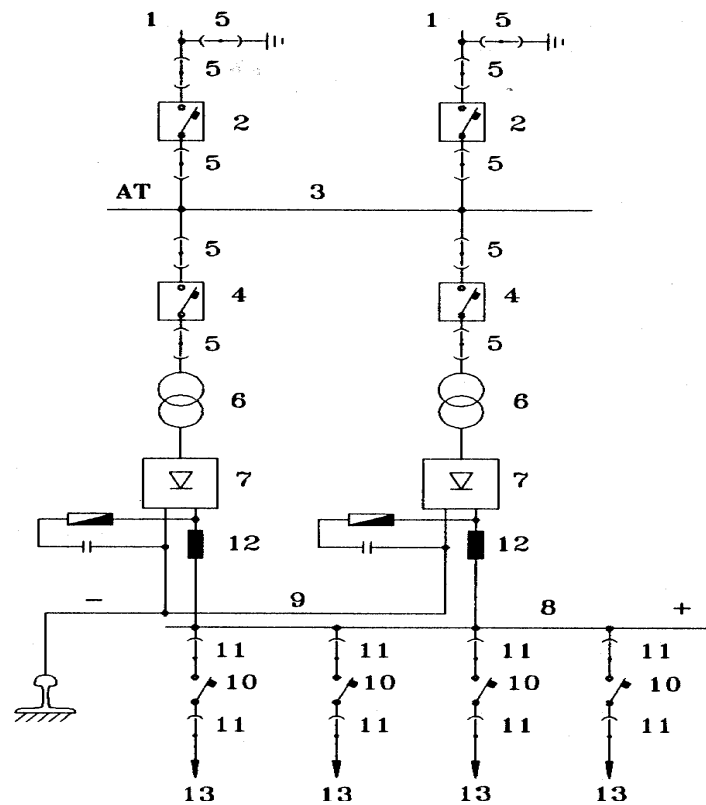


Fig. 14 Schema elettrico di una sotto stazione ferroviaria 3kV in c.c.