

La Trazione Elettrica In Italia

Area di progetto

Anno Scolastico 2002/2003

5^a Elettrotecnica

Calusini Davide

Darù Marco

Franzinetti Davide

Ottinetti Adriano

Riccomagno Gabriele

Sorrenti Davide

Indice generale

Pag	Argomento
2	Indice generale
3	Nascita della trazione a vapore
4	Evoluzione della trazione elettrica in Italia
8	Scelta del sistema di alimentazione
11	Evoluzione dei sistemi di trazione elettrica
11	Sistemi di trazione elettrica impiegati tutt'oggi <ul style="list-style-type: none">- corrente continua- corrente alternata trifase- corrente alternata monofase- alimentazione delle linee monofase- produzione autonoma- conversione centralizzata- conversione ripartita- alimentazione della linea a frequenza industriale- alimentazione a 2 x 25 kV
16	Sottostazioni di conversione
18	Linee di contatto <ul style="list-style-type: none">- alimentazione delle linee di contatto- caduta di tensione in linea- sistemi di sospensione
20	Meccanica della locomozione <ul style="list-style-type: none">- rodiggio
23	Caratteristiche delle locomotive elettriche
23	Captazione della corrente <ul style="list-style-type: none">- presa ad asta- presa di corrente a pantografo- presa di corrente con sistema a terza rotaia
26	Avviamento
29	Regolazione della velocità
30	Inversione del senso di marcia
31	Frenatura elettrica
32	Caratteristica meccanica del mezzo di trazione
33	Analisi di vantaggi e svantaggi dei diversi tipi di alimentazione e dei motori impiegati <ul style="list-style-type: none">- vantaggi della trazione elettrica nel 1928- vantaggi della trazione elettrica ai giorni nostri
35	Apparecchiature e sistemi di comando <ul style="list-style-type: none">- circuito di trazione e comandi
36	Cenni sui sistemi automatici di controllo del traffico
37	Linee ad alta velocità ai giorni nostri
44	Le future linee ad alta velocità in Italia <ul style="list-style-type: none">- il nuovo sistema di controllo e di comando- le nuove linee ferroviarie
50	Bibliografia

Nascita della trazione a vapore

Dopo l'invenzione della macchina a vapore, ad opera di Newcomen nel 1712, la forza vapore fu utilizzata anche per la trazione ferroviaria.

Una primitiva locomotiva a vapore fu progettata e costruita dall'ingegnere inglese Trevithick nel 1804 la quale pesava 5 t ed era posta su rotaie rudimentali che non ne reggevano il peso.

Nel 1812 Murray fu il primo costruttore industriale di locomotive per il successo ottenuto dalla sua prova con due locomotive sulla distanza di 2.4 km.

Dopo successivi miglioramenti tecnologici si arrivò, con Stephenson nel 1814, alla prima vera locomotiva a vapore.



Il 15 settembre 1830 fu inaugurata la Liverpool-Manchester, prima linea ferroviaria destinata al trasporto di merci e passeggeri.

Nel 1860 il carbon fossile sostituì il coke come fonte di alimentazione delle locomotive.

Nel 1879 Siemens presentò alla fiera campionaria di Berlino la prima locomotiva, la cui fonte di alimentazione era una spazzola che stava a contatto con una terza rotaia, esclusivamente destinata alla trasmissione dell'energia elettrica. L'idea di Siemens sarebbe stata il prototipo della moderna ferrovia elettrica.

Nel 1883 fu creata la prima linea ferroviaria completamente elettrica. Questa ferrovia fu la prima a mettere in circolazione un treno formato solamente da carrozze passeggeri. Tale linea faceva la spola tra Londra e Brighton.

Nel 1890 venne inaugurata la prima linea elettrica ferroviaria sotterranea che collegava il centro di Londra e la periferia.

Nel 1898 venne costruita la prima locomotiva elettrica per la linea Londra - Waterloo, la quale traeva l'energia elettrica, come gli altri modelli, da una terza rotaia della linea ferrata.

Evoluzione della trazione elettrica in Italia

La trazione elettrica ferroviaria è stata uno degli elementi fondamentali per lo sviluppo e l'affermazione della ferrovia. A partire dal 1890 molte linee tranviarie, come la Firenze-Fiesole, vennero elettrificate rappresentando un banco di prova per valutare l'efficienza di tale sistema. Verso la fine del secolo, si inaugurarono le prime elettrificazioni ferroviarie significative, nate per risolvere particolari situazioni di esercizio: la rete ferroviaria del nostro Paese comprende numerose linee di montagna con salite abbastanza lunghe e con forti pendenze e numerose gallerie lunghe di penetrazione urbana, e questo è già un primo motivo per elettrificare. La seconda ragione è che l'Italia, un Paese da sempre povero di materie prime e proprie fonti energetiche, spendeva delle somme considerevoli per l'approvvigionamento del carbone destinato alla trazione ferroviaria, che doveva essere necessariamente di buona qualità e veniva in gran parte importato dal Regno Unito a costi elevati. Le potenzialità offerte dall'energia idroelettrica, che si iniziava a sfruttare al nord, potevano invece favorire ed avvantaggiare l'elettrificazione. Ma le elettrificazioni ferroviarie incontrarono diverse difficoltà tecniche, rispetto a quelle tranviarie, in relazione alle linee di maggior lunghezza e tortuosità, ed alle maggiori prestazioni di potenze e velocità costanti richieste dall'esercizio ferroviario. Proprio in quel periodo, precisamente nel 1897, il Ministro dei Lavori Pubblici, Prinetti, insediò la commissione "Grismayer", formata da tecnici incaricati di studiare efficacia e possibilità di applicazione della trazione elettrica ferroviaria, con lo scopo di rendere più economico e rapido l'esercizio sulle linee secondarie della rete, allora divisa in tre amministrazioni principali RM (Rete Mediterranea), RA (Rete Adriatica) e RS (Rete Sicula).

I limiti tecnici e le potenzialità della trazione elettrica infatti non erano ancora conosciuti e valutabili completamente con sicurezza; si pensava quindi di relegarla su linee particolari, comunque al di fuori dalla rete fondamentale, che si intendeva da lasciare alla trazione a vapore.

I tecnici della commissione Grismayer valutarono i diversi sistemi di elettrificazione sperimentati all'estero fino ad allora, e ripresero degli studi già intrapresi dalla Rete Mediterranea e dalla Rete Adriatica. Non potendo ovviamente stabilire il sistema di elettrificazione più idoneo, la commissione nel 1899 stabilì l'effettuazione di diversi esperimenti, tutti su linee secondarie, o comunque ad interesse locale, senza intralcio per l'esercizio ordinario. Questa tendenza iniziale spiega anche perché in tutti gli esperimenti ebbero prevalenza mezzi di trazione automotori (automotrici elettriche) in luogo delle locomotive.

La Rete Mediterranea avrebbe sperimentato l'elettrificazione a corrente continua a 650 V con alimentazione mediante terza rotaia; la Rete Adriatica invece l'elettrificazione a corrente alternata trifase a 3'000 V con alimentazione mediante linea aerea di contatto. Entrambe avrebbero ulteriormente sperimentato la trazione elettrica ad accumulatori:

- ? Milano C.le-Monza di 12 km (anni di esercizio: 1898-1904)
Esercizio gestito dalla RM con capolinea nella vecchia stazione di Milano Centrale. Prove iniziate nel dicembre 1898; servizio pubblico a partire dall'8 febbraio 1899.
- ? Bologna C.le-Modena di 37 km (anni di esercizio: 1900-1903)
Esercizio gestito dalla RA.
- ? Bologna C.le-Poggio Rusco di 60 km (anni di esercizio: 1901-1903)
Esercizio gestito dalla RA. Il tratto di 17 km tra San Felice sul Panaro e Poggio Rusco è stato aperto all'esercizio il 20/01/1902, direttamente a trazione elettrica.
- ? Bologna C.le-Ferrara di 47 km (anni di esercizio: 1901-1903)
Esercizio gestito dalla RA.

Anche se tutti questi esperimenti si sono svolti grazie a brevetti, equipaggiamenti e rotabili di progetto e costruzione straniera, all'Italia va riconosciuto il merito di aver creduto, più di ogni altro Paese, in questo nuovo sistema di trazione, conseguendo in breve tempo risultati positivi e significativi,

alcuni dei quali costituiscono dei veri primati. Tra questi, ad esempio, il sistema di elettrificazione trifase per le linee ferroviarie ha avuto sviluppi notevoli ed interessanti soprattutto in Italia tanto da guadagnarsi l'aggettivo "italiano". Tale sistema ebbe nel nostro Paese le sue prime applicazioni nel 1901, con il tentativo di compiere la prima elettrificazione mondiale ad alta tensione: un'originalissima elettrificazione trifase alla tensione di 3'000 V - 15.6 Hz della linea detta "Ferrovia dell'Alta Valtellina" sulle linee Colico-Chiavenna e Colico-Sondrio sulla quale il 15 ottobre 1902 transitò il primo treno trifase.



Locomotiva Trifase E 440 della FAV - Ferrovia Alta Valtellina

L'Italia poteva inoltre vantare:

- ? il primo stabilimento appositamente concepito per la costruzione di locomotive elettriche (Westinghouse di Vado Ligure, poi TI BB, ABB e attualmente Adtranz);
- ? il primo gruppo di locomotive elettriche costruite in grande numero (E 550, 186 unità tra il 1908 ed il 1921);
- ? uno dei primi notevoli programmi di elettrificazione ferroviaria in Europa.

Dall'inizio del secolo gli ingegneri italiani elettrificarono numerose linee come la Milano C.le-Monza e la Milano-Varese-Porto Ceresio.

L'evoluzione e l'innovazione della trazione elettrica in Italia, ovviamente non si ferma a questo periodo eroico e pionieristico, ma continua negli anni con altri esperimenti e nuove soluzioni che porteranno all'elettrificazione di quasi tutta la rete ferroviaria FS e di buona parte delle linee in concessione.

Il successo del sistema trifase portò ad un'estensione dell'elettrificazione tra Genova e Novi Ligure e successivamente all'intero Piemonte, Lombardia e Italia centrale.

Nel 1905 al confine tra l'Ossola ed il Canton Ticino venne costruita la linea del Sempione tra Domodossola e Brig attrezzata per treni merci e viaggiatori per velocità fino a 60 km/h; il sistema che venne impiegato era trifase in c.a. a 3'000 V - 15 Hz.

Nel 1913 la tensione del sistema trifase venne portata a 3'400 V - 16 2/3 Hz; successivamente anche il tratto Pontedecimo-Busalla sulla linea dei Giovi subì l'elettrificazione per sostituire le locomotive a vapore sulle forti pendenze imposte dal tracciato - fino al 35‰ - con locomotive elettriche che potevano trainare treni pesanti fino a 500 t ad una velocità max di 50 km/h. Con la realizzazione di tale impianto l'elettrificazione in Italia entrava nella fase attiva.

Contemporaneamente all'adozione del sistema trifase a frequenza ferroviaria di 16 2/3 Hz, nel biennio 1927-28 vennero eseguiti alcuni esperimenti di elettrificazione a 10'000 V - 50 Hz sulla linea

Roma-Sulmona che vennero ben presto abbandonati a causa degli ottimi risultati che stava dando, negli stessi anni, la sperimentazione della corrente continua sulla linea Benevento-Foggia.

La vera diffusione della trazione elettrica in Italia si verifica con l'adozione per l'alimentazione a corrente continua di tensioni a 1'500 e 3'000 V e per la corrente alternata monofase di tensioni a 15'000 e 25'000 V.

L'Italia al 1° gennaio 1928 aveva circa 1'170 km elettrificati e 880 in corso di elettrificazione.

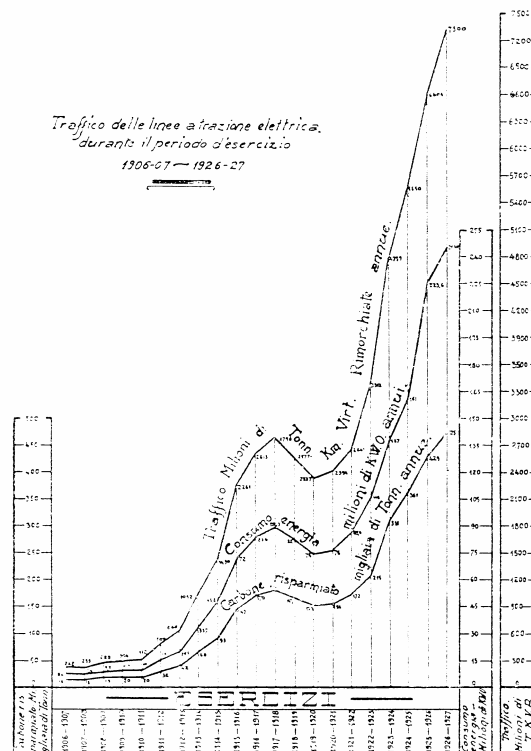
Dopo i Giovi sono ancora state costruite la succursale dei Giovi, la Savona-Ceva, la Bussoleno-Modane (quest'ultima con un tunnel di 13.6 km) e molte altre importanti linee. Nell'anno 1928 sono state completate la Bologna-Firenze, la Roma-Avezzano, la Foggia-Benevento, la Genova-Sampierdarena-Alessandria, la Avezzano-Sulmona, la Cuneo-S. Dalmazzo di Tenda. Il complesso di tali linee può dividersi in due grandi gruppi: un gruppo settentrionale e centrale sopra la trasversale Livorno-Firenze-Bologna, un gruppo meridionale sotto la trasversale Roma-Sulmona. Il meridionale comprende linee separate che formano però l'avanguardia di un sistema omogeneo.

A partire dal 1928 la scelta si sposta sulla corrente continua a 3'000 V, scelta rimasta definitiva e sempre in vigore: questo porterà alla sospensione dell'elettrificazione trifase e alla conversione delle linee. Nel 1940 le FS dispongono di circa 5'200 km di linee elettrificate, cioè circa un terzo della lunghezza della rete, di cui ben 1'820 km risultavano elettrificati con sistema trifase alla tensione di 3'400 V - 16 2/3 Hz ai quali bisogna aggiungere ancora 1'000 km su 6'000 km di linee private. Il totale pone l'Italia in testa alle reti europee, davanti anche alla Svizzera, che disponeva di circa 5'000 km.

Uno sguardo generale all'evoluzione della trazione elettrica ci dice che, entrata essa a competere con le ferrovie a vapore su linee di poco traffico, evolvendosi, ha invece dimostrato la sua superiorità su linee importanti a traffico intenso.

Un locomotore, creato nel 1935 negli Stati Uniti, che ha contribuito in modo decisivo allo sviluppo della ferrovia in questo Paese, è il diesel-elettrico, corredato di un motore diesel più leggero di quelli convenzionali, a due tempi, che aziona un generatore elettrico, la cui potenza è inviata ai motori elettrici accoppiati alle ruote. Questo tipo di locomotore, che non può dirsi propriamente elettrico, presenta il vantaggio di poter essere impiegato anche laddove non esiste la linea elettrificata, non necessitando di alimentazione elettrica esterna.

Riportiamo un diagramma di sviluppo della trazione elettrica in Italia.



Alla fine della seconda guerra mondiale, la Francia e l'Italia si trovano con metà della rete ferroviaria distrutta, l'Olanda con il 90% del parco locomotive distrutto: occorre ricostruire tutto.

L'elettrificazione delle linee rallenta, anche perché ormai tutte le linee economicamente più remunerative sono già state elettrificate, comunque in tutta la CEE, alla fine del 1970, risultava elettrificato solo il 30% dell'intera rete.

Il potenziamento della rete ferroviaria e la costruzione di treni più veloci e confortevoli è nei programmi di tutti i Paesi industrializzati. La Russia ha quadruplicato la Transiberiana impiegando binari in acciaio temperato al cromo, capaci di sopportare pesantissimi carichi, linea che viene usata anche dal Giappone per i trasporti rapidi verso l'Europa, a costi inferiori rispetto ai trasporti via mare.

In Francia in diversi tratti i treni TGV possono tranquillamente viaggiare a 300 km/h, ma la loro velocità massima potrebbe raggiungere i 580 km/h, cosa non ancora possibile soprattutto per problemi legati sia ai binari che alla linea aerea di alimentazione.

Esiste anche il problema delle stazioni di passaggio, dove treni ad alta velocità non fermano e devono transitare ad almeno 200 km/h, velocità che può creare, a causa delle vibrazioni, danni alle strutture delle stazioni; sempre in Francia sono state costruite apposite stazioni con particolari accorgimenti per l'attenuazione di queste vibrazioni.

L'Italia ha introdotto con successo, ed anche esportato ad altri Paesi, i treni ad assetto variabile, come l'ETR 450, noto anche come "Pendolino" ed è in progetto il collegamento con la rete ad alta velocità francese attraverso un nuovo tunnel sulla linea Torino-Lione.

L'alta velocità è ormai alle porte anche in Italia: nel maggio 1976 è entrato in servizio il nuovo elettrotreno ETR 450 che collega Roma con Milano in 4 ore e 20 minuti.

Su distanze relativamente limitate il treno è destinato a divenire un temibile concorrente dell'aereo.

Mentre da anni Germania e Giappone continuano a far correre i propri treni a levitazione magnetica su percorsi sperimentali, la Cina ha inaugurato il 31 dicembre scorso la sua prima linea commerciale, che diviene così la prima al mondo in servizio permanente effettivo.

Si tratta di una linea di 31,5 km tra il distretto finanziario di Shanghai ed il nuovo aeroporto della metropoli cinese. A percorrerla sono treni a levitazione magnetica Transrapid, costruiti da un consorzio tedesco guidati da Siemens, Thyssen e Krupp.

I treni viaggiano a 430 km/h, sostenuti in aria e guidati da potentissimi elettromagneti attorno ad una rotaia a forma di T.

Si concretizza così il vecchio sogno di un mezzo di trasporto che vola anche senza decollare da Terra, dato che resta sospeso sulla rotaia a circa 15 cm. Alla base dei treni a levitazione magnetica c'è sempre, infatti, il gioco di attrazione e repulsione tra magneti, in grado di sostenere per aria convogli formati da carrozze da 20 t ciascuna.

Le tecnologie sviluppate da Germania e Giappone sono piuttosto diverse. Il Transrapid tedesco usa elettromagneti tradizionali nelle rotaie e sul treno, utilizzando sostanzialmente la forza di attrazione.

La tecnologia del treno giapponese MLX01, attualmente in sperimentazione su una tratta di alcune decine di chilometri, sfrutta invece magneti superconduttori, una rotaia ad U entro la quale il treno si muove, ed utilizza alternativamente le forze di attrazione e di repulsione per mantenere il treno sollevato e spingerlo in avanti. Il treno usa un carrello di derivazione aeronautica con ruote di gomma fino al raggiungimento dei 100 km/h; poi interviene la levitazione magnetica che lo solleva di 10 cm al di sopra della base della rotaia.

Nelle sperimentazioni compiute finora il MLX01 ha raggiunto la velocità record di 552 km/h. La versione commerciale avrà una velocità di crociera di 500 km/h.

Scelta del sistema di alimentazione

In un sistema di trasporto a trazione elettrica i veicoli, provvisti di motori elettrici, sono alimentati da una linea di contatto opportunamente disposta lungo il percorso.

Il sistema comprende quindi, oltre ai veicoli elettrici o mezzi di trazione, gli impianti fissi di alimentazione: linee di contatto, sottostazioni, linee primarie di allacciamento delle sottostazioni alla rete industriale.

Rientrano nell'ambito della trazione elettrica anche i veicoli azionati da motori elettrici alimentati da accumulatori o da gruppi installati a bordo, formati da un motore termico e da un generatore elettrico; in questo caso si usano di solito motori diesel, per cui si parla di trazione diesel-elettrica.

Il sistema trifase a 3'400 V 16 2/3 Hz trovò larga diffusione in Italia dopo l'apertura nel 1902 della linea piemontese-ligure, della linea della Valtellina e della linea del Brennero, con uno sviluppo ferroviario di 1'800 km.

Parallelamente si cercò di elevare il livello della tensione del sistema a corrente continua a 3'000 V, sperimentandolo prima su una ferrovia locale, la Torino-Ceres, poi la Benevento-Foggia nel 1928: i buoni risultati raggiunti con quest'ultimo esperimento indussero le Ferrovie dello Stato ad adottare la corrente continua a 3'000 V per le nuove elettrificazioni.

Con il passare degli anni l'esperienza dimostrò la superiorità dei sistemi a corrente continua ed a corrente alternata monofase a frequenza ferroviaria: i loro pregi erano l'utilizzo di una linea di contatto unipolare, e del motore a collettore eccitato in serie.

Nel sistema monofase era possibile, installando un trasformatore a bordo dei veicoli, adottare una tensione elevata alla linea di contatto e regolare la velocità di marcia mediante la semplice variazione della tensione secondaria del trasformatore.

Con il passare del tempo si capì che era più conveniente allacciare le linee direttamente alla rete industriale, evitando la costruzione di impianti speciali di produzione e distribuzione dell'energia per uso esclusivo di trazione.

Nel campo della corrente alternata monofase ebbero grande importanza le ricerche per eliminare la grave soggezione costituita dalla frequenza speciale, che richiedeva centrali di produzione e linee di distribuzione apposite, equipaggiate con gruppi rotanti. Per potere derivare l'energia direttamente dalla rete industriale mediante semplici sottostazioni di trasformazione, era necessario potere costruire veicoli a 50 Hz, superando le difficoltà derivanti dalla commutazione dei motori monofasi.

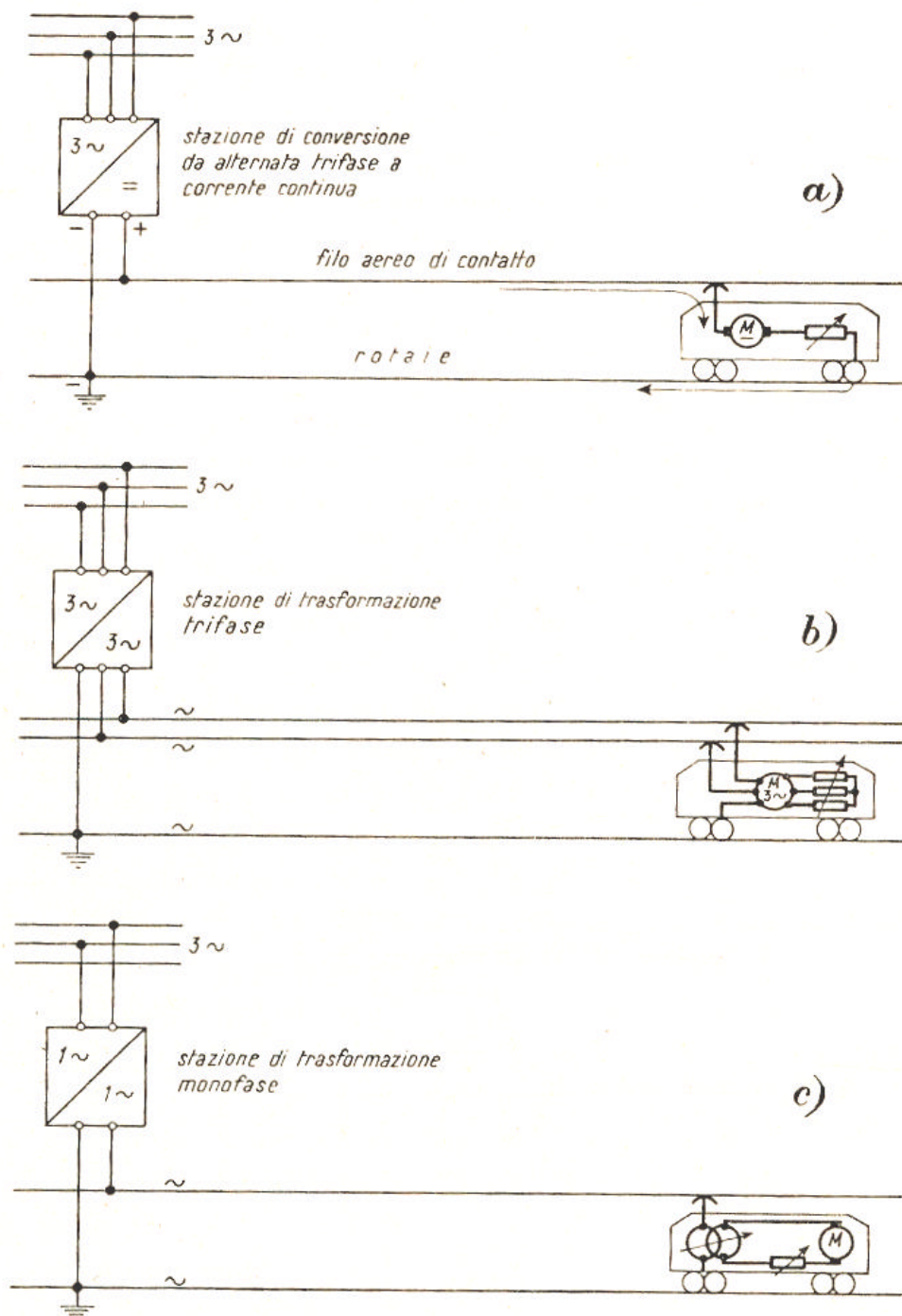
In generale la trazione elettrica con alimentazione a filo, può essere organizzata su uno dei sistemi seguenti:

- a) a corrente continua;
- b) a corrente alternata trifase;
- c) a corrente alternata monofase.

Nella trazione su rotaie si applica il principio dell'utilizzazione dello stesso binario di corsa in sostituzione di uno dei conduttori della linea elettrica di alimentazione dei motori; i sistemi a corrente continua e alternata monofase richiedono una linea di contatto monofilare utilizzando come conduttore di ritorno le rotaie; il sistema trifase richiede invece una linea di contatto bifilare per due delle tre fasi, utilizzando il binario di corsa come conduttore della terza fase.

La presa di corrente dai conduttori aerei viene realizzata mediante contatti striscianti premuti contro i fili da uno speciale organo molleggiato eseguito nelle forme di aste, archetti, pantografi; il contatto elettrico sulle rotaie viene invece stabilito direttamente attraverso la massa metallica del veicolo e delle ruote.

Ai tre diversi sistemi di trazione sopra indicati corrispondono i seguenti schemi simbolici di principio:

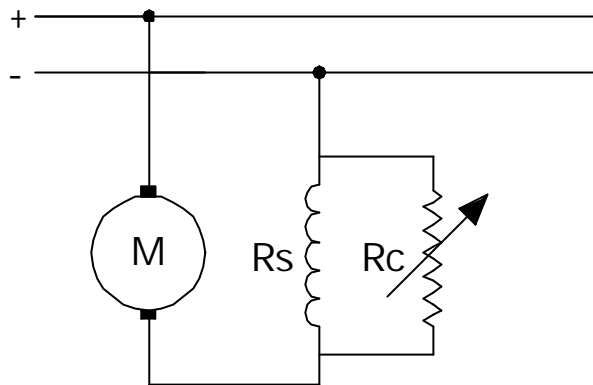


Per il sistema a corrente alternata monofase è posto in rilievo il principio dell'alimentazione indiretta dei motori attraverso un trasformatore installato a bordo del veicolo: ciò consente di scegliere liberamente la tensione della linea di contatto indipendentemente dal valore della tensione ritenuto più idoneo per l'alimentazione dei motori. Nel sistema a corrente continua tale possibilità è invece esclusa, mentre nella trazione trifase l'applicazione dell'alimentazione indiretta è superflua e può essere evitata perché il motore asincrono può essere costruito senza difficoltà per tensioni notevolmente più elevate che non gli altri motori.

I sistemi sopra indicati si sono affermati nell'ordine seguente:

- a) *Trazione a corrente continua a bassa tensione*: utilizzato prevalentemente nei trasporti pubblici, con condizioni che richiedono:
- elevate coppie di spunto e accelerazione facilmente graduabili con carattere di continuità per evitare bruschi contraccolpi;
 - velocità facilmente regolabile con continuità.

Il motore elettrico che può soddisfare tutte queste esigenze è il motore a corrente continua con eccitazione serie.



Per l'avviamento si esclude gradualmente un reostato di avviamento inserito in serie al motore.

Per gli aumenti di velocità successivi si indebolisce il campo induttore, derivando ai capi dell'intero avvolgimento un adeguato reostato di campo.

- b) *Trazione a corrente alternata trifase*: utilizzato per far fronte al problema di poter disporre di un rilevante aumento della potenza dei motori per equipaggiare locomotive più potenti, e di elevare in misura notevole la tensione di esercizio, contenendo in termini ancora accessibili la sezione dei conduttori. Il sistema trifase poteva proporre caratteristiche di semplicità e robustezza meccanica ed elettrica che sono peculiari del motore asincrono, che può essere costruito senza grandi difficoltà su potenze elevate con tensioni fino a 10'000 V.

Questo sistema fu abbandonato perché presentava l'inconveniente di una complessità della linea di contatto, soprattutto negli scambi e negli incroci; inoltre il motore asincrono è costituzionalmente dotato di caratteristiche di avviamento e regolazione assai meno elastiche del motore a corrente continua; infatti con il motore asincrono trifase si potevano avere solamente velocità fisse di 25 - 50 - 75 - 100 km/h, che non si potevano regolare a posizioni intermedie.

- c) *Trazione a corrente alternata monofase ad alta tensione*: per eliminare le difficoltà inerenti alla doppia linea di contatto e per poter disporre di un motore più elastico del motore asincrono, si è sviluppata la trazione monofase; si impiega in questo modo una linea di contatto monofilare a tensione anche elevata.

La trazione ferroviaria monofase si è venuta perciò normalizzando in vari Paesi nel periodo tra il 1900 e il 1930 su tensioni della linea di contatto dell'ordine di 15'000 V - 25 Hz.

Il motore monofase a collettore non può essere costruito per l'alimentazione diretta con tensioni così elevate; esso richiede perciò l'alimentazione indiretta attraverso un adeguato trasformatore installato a bordo dello stesso veicolo: si è venuta normalizzando a tale riguardo l'impiego di una tensione ai motori dell'ordine di 500 V e potenze di 400-800 kW su gruppi di più motori (da 2 a 6) ripartiti sui diversi assi.

Evoluzione dei sistemi di trazione elettrica

I sistemi di alimentazione a corrente continua e corrente alternata monofase a bassa frequenza dimostrarono la loro superiorità rispetto agli altri sistemi sperimentati ed utilizzati. I pregi erano la possibilità di utilizzo di una linea di contatto unipolare ed un motore a collettore con eccitazione in serie (caratteristica meccanica in grado di adattarsi alle esigenze di trazione). Installando un trasformatore era possibile avere una tensione elevata alla linea di contatto e regolare la velocità di marcia attraverso la tensione secondaria del trasformatore. Un problema era la f.e.m. statorica proporzionale alla frequenza. Il problema si risolse adottando la frequenza di $16 \frac{2}{3}$ Hz o 25 Hz. Le linee elettrificate vennero poi allacciate alle linee industriali, sviluppatesi rapidamente, a causa della necessità di non costruire impianti speciali per la produzione e distribuzione dell'energia per la trazione, perché essa rappresentava ormai una percentuale limitata del consumo di energia. Il sistema a corrente continua poteva essere direttamente allacciato alle linee industriali attraverso le sottostazioni di conversione; dagli anni 60-70, l'adozione di telecomandi ha permesso il funzionamento con controllo a distanza con un notevole risparmio delle spese di personale.

Sistemi di trazione elettrica impiegati tutt'oggi

I più importanti sono:

- ? corrente continua 600-750-1'500 V: trasporti urbani – tram, filobus, metropolitana;
- ? corrente continua 1'500 V: Francia, Spagna, Giappone, ecc;
- ? corrente continua 3'000 V: Italia, Russia, Belgio, ecc;
- ? corrente alternata monofase a bassa frequenza $16 \frac{2}{3}$ Hz-16 kV: Germania, Svezia, Svizzera, ecc;
- ? corrente alternata monofase a frequenza industriale 50-60 Hz-25 kV: Gran Bretagna, Ungheria, Francia, ecc;
- ? corrente alternata monofase a frequenza industriale 50 Hz-6.25 kV: alcune linee della Gran Bretagna.

L'esistenza di sistemi di elettrificazione diversi tra due Paesi confinanti o nello stesso Paese, come ad esempio in Francia, crea complicazioni d'esercizio e costi elevati, per ovviare ai quali si sono introdotte le locomotive poli-correnti in grado di funzionare con diversi sistemi di alimentazione.



Locomotiva trifase delle compagnie del Löt Schberg, utilizzata per servizi tra Berna e Domodossola sulla linea del Sempione negli anni '30 - '40

Corrente continua

Tensione di alimentazione

La tensione di tali linee varia da un minimo di qualche centinaio di volt a un massimo di 4'000 V.

Tensioni nominali: 600–750–1'000–1'300–1'500–2'400–2'700–3'000 V.

Le norme ammettono variazioni di tensione rispetto ai valori nominali di –33% e +20%. Nelle reti a 3'000 V la tensione effettiva può variare tra 2'000 V (nelle condizioni di esercizio più gravose) e 3'600 V, per alcune reti fino a 4'000 V. L'energia per l'alimentazione delle linee elettriche di solito è prelevata dalla rete industriale o, raramente, attraverso appositi impianti di produzione e distribuzione.

Nelle sottostazioni di conversione la corrente alternata trifase viene convertita in corrente continua. Nelle reti ferroviarie esse sono collocate lungo le linee; la distanza media dipende dal volume di traffico e dalla tensione: nel sistema a 3'000 V la distanza raggiunge al massimo 20-25 km nelle linee principali, mentre in quelle secondarie è di 35-40 km; nel sistema a 1'500 V la distanza media è compresa tra 12 e 20 km. Nel caso di reti urbane le sottostazioni sono collocate in corrispondenza di opportuni nodi.

L'alimentazione di un tronco della linea di contatto compresa tra due sottostazioni è alimentato da entrambe le sottostazioni: si ha cioè un'alimentazione bilaterale. I tronchi estremi sono invece alimentati da una sola sottostazione.

Caratteristiche costruttive e funzionali

Nella trazione a corrente continua vengono usati:

- ? *il motore ad eccitazione in derivazione* che ha il pregio di una regolazione economica della velocità per una stessa coppia resistente (bastando variare la sola corrente di eccitazione), e permette la frenatura in discesa con recupero; ha però l'inconveniente di assorbire dalla rete una quantità d'energia quasi proporzionale alla coppia da sviluppare, data la costanza della velocità;
- ? *il motore ad eccitazione in serie* è però da preferirsi in trazione a quello in derivazione poiché, marciando con velocità decrescenti al crescere della coppia, assorbe dalla rete una quantità d'energia quasi costante, può sviluppare sia all'avviamento sia quando è attraversato da una corrente superiore alla normale, delle coppie particolarmente elevate; è inoltre di costruzione più semplice e robusta e di più facile commutazione ed isolamento. Essi debbono soddisfare a severe esigenze costruttive e funzionali, derivanti dal limitato spazio a disposizione, dalle notevoli sollecitazioni meccaniche cui sono sottoposti per effetto del moto (vibrazioni, urti), dalle continue ed ampie variazioni del carico e delle condizioni di alimentazione. Ha però una regolazione meno economica della velocità e la tendenza ad accelerare la marcia indefinitamente col diminuire della coppia resistente, quindi non può girare a vuoto senza dispositivi di sicurezza speciali.

Il numero di poli $2p$ è di solito uguale a 4; per grandi potenze si ha $2p=6$, raramente $2p=8$. Il passo polare $\frac{D}{2p}$ (D = diametro dell'indotto) è quindi notevolmente ampio.

L'indotto è laminato; la velocità periferica dell'indotto può raggiungere i 50?60 m/s.

L'avvolgimento indotto è composto da N conduttori attivi, che possono essere di tipo ondulato (serie) oppure embricato (parallelo).

Il collettore è costituito da lamelle. Esso è particolarmente robusto potendo raggiungere la velocità sopra citata. Il diametro del collettore sarà $D_k = (0.75? 0.9) \cdot D$.

I motori di trazione sono sempre provvisti di poli ausiliari di commutazione, con i quali è possibile mantenere al collettore tensioni più elevate ed aumentare la capacità di sovraccarico.

Per motori di grande potenza o per particolari esigenze si utilizzano gli avvolgimenti compensatori, collocati nelle cave delle espansioni polari principali.

Corrente Alternata Trifase

Il sistema a corrente alternata trifase, che utilizzava per l'alimentazione dei locomotori elettrici due fasi aeree e come terza fase le rotaie, nonostante diede notevoli contributi alla trazione ferroviaria, richiese anche forti attenzioni e particolarità nella sua realizzazione.

Uno dei problemi principali di questo sistema era legato all'adozione della frequenza ferroviaria a $16 \frac{2}{3}$ Hz che, se da un lato presentava il vantaggio di una minore reattanza di linea e quindi minore caduta di tensione che alla frequenza di 50 Hz, dall'altro richiese la realizzazione di appositi impianti per la produzione ed il trasporto dell'energia elettrica.

Un'altra grossa limitazione del sistema trifase fu l'adozione delle due fasi aeree che portò a non poche complicazioni nella costruzione della linea di contatto che non consentiva velocità superiori ai 100 km/h.

Nella posa in opera della linea aerea, inoltre, bisognava mantenere sempre separati ed isolati i due fili per evitare cortocircuiti tra le fasi, operazione che presentava le sue maggiori complessità soprattutto in presenza degli scambi sui quali bisognava assicurare sempre una perfetta captazione di corrente ai mezzi di trazione.

Furono questi ed altri problemi legati ai mezzi di trazione a lasciare progressivamente il passo alla corrente continua anche se c'è da sottolineare che tra singhiozzi ed agonie l'ultima locomotiva trifase "ha abbassato gli archetti" nel maggio del 1976.

Il motore asincrono lavora per qualunque momento resistente, a velocità quasi costante; se sollecitato da forze motrici esterne marcia con velocità poco superiore al sincronismo, mentre il momento cambia segno ed il motore diventa generatore asincrono. Il campo rotante sviluppato dal rotore induce infatti delle f.e.m. nello statore concordanti con quelle della rete e restituisce ad essa energia. Il motore trifase ha quindi la proprietà preziosa in trazione di funzionare da freno elettromagnetico con recupero, senza alcuna speciale manovra, a velocità quasi costante; è inoltre di costruzione molto semplice e robusta, e permette l'alimentazione diretta ad alta tensione. A questi pregi del sistema trifase con motore asincrono contrastano la complicazione della linea di contatto con almeno due fili aerei, il maggior pericolo generico di corti circuiti fra le fasi opposte sospese, la forte variazione della coppia motrice al variare della tensione, una distribuzione di carico nella marcia in parallelo di più locomotori non sempre uniforme e, soprattutto, l'inconveniente molto grave di marciare a velocità costante, assorbendo dalla rete delle quantità di energia proporzionale alla coppia da sviluppare. Si ovvia a tale inconveniente con dispositivi che anche quando non abbassano il rendimento del motore ne complicano la costruzione e la manovra frustrando uno dei maggiori requisiti del motore asincrono che consiste nella sua grande semplicità e robustezza. Si provvede infatti a variare la velocità o con resistenze esterne aggiunte al rotore, con che si peggiora molto il rendimento, e si rende la velocità eminentemente variabile col carico, o variando la tensione applicata allo statore, con che però si ha una forte diminuzione della coppia che è proporzionale al quadrato del flusso. Una regolazione saltuaria della velocità senza scapito del rendimento si ottiene raggruppando le spire dello statore in modo da originare nella distribuzione del campo un numero differente di poli, oppure anche raggruppando due motori asincroni in cascata. In queste condizioni, pur non essendoci perdite di lavoro, a causa delle successive trasformazioni il rendimento del gruppo è scarso ed il fattore di potenza basso.

Nella doppia trazione, per ovviare allo squilibrio di carico tra i motori, derivante da possibili differenze di diametro delle ruote delle due locomotive, o si assume per tutti i motori uno scorrimento elevato, o si introducono piccole resistenze nell'indotto delle macchine che tendono ad assumere velocità maggiore.

Corrente Alternata Monofase

Il principio del motore monofase a collettore si fonda, com'è noto, o sull'equilibrio di due specie di forze elettromotrici d'origine statica e dinamica, mantenute da un campo alternativo in un'armatura posta in esso, la prima dovuta alle alternative del flusso, la seconda alla rotazione dell'armatura nel campo e raccolte da due spazzole riunite tra loro in corto circuito (motore a repulsione) o sull'azione combinata di una forza elettromotrice esterna e delle due forze elettromotrici predette (motore in serie).

Per potere allacciare le linee a corrente alternata monofase a quelle industriali senza appositi impianti di produzione e distribuzione dell'energia dovuti alla frequenza speciale, si rese necessario costruire veicoli a 50 Hz, superando le difficoltà della commutazione dei motori monofasi. Un primo tentativo fu tentato nel 1904 in Germania, ma venne subito abbandonato. Il successivo venne compiuto nel 1933 dalle Ferrovie Ungheresi e dalle Ferrovie Tedesche. L'esperimento venne ripreso nel 1950 dalle ferrovie francesi che elettrificarono la linea Aix les bains-Roche sur Foron a 25 kV-50 Hz: grazie ai progressi nelle costruzioni elettromeccaniche i risultati furono ottimi e, ben presto, la Francia adottò tale sistema nella regione nord-orientale del Paese, sistema tutt'oggi in vigore anche in altri Paesi del mondo (nel 1979 risultano 47'000 km di linee elettrificate a corrente alternata monofase 20-25 kV-50-60 Hz – 29% dello sviluppo totale delle reti ferroviarie a trazione elettrica).

Alimentazione delle linee monofase

Nelle linee a frequenza ferroviaria 15 kV-16 2/3 Hz (Europa) le sottostazioni che alimentano la linea di contatto sono equipaggiate con trasformatori monofasi, sono alimentate da linee primarie monofasi a 16 2/3 Hz; queste ultime sono collegate a gruppi di produzione speciali oppure a stazioni di conversione trifase 50 Hz / monofase 16 2/3 Hz.

Nelle linee alimentate a frequenza industriale le sottostazioni di trazione, costituite da semplici trasformatori monofasi a 50-60 Hz, sono direttamente collegate alla linea industriale.

Le linee di contatto monofasi sono simili in tutto a quelle in corrente continua ma sono più leggere per i valori più elevati della tensione di linea.

Con riferimento alla rete ferroviaria europea, a 15 kV-16 2/3 Hz, si possono avere i seguenti sistemi d'alimentazione della linea di contatto.

Produzione autonoma

L'energia a corrente alternata monofase a 16 2/3 Hz viene prodotta in apposite centrali, termiche oppure idrauliche, e trasportata alle sottostazioni di trazione mediante linee monofasi ad alta tensione, denominate primarie. La tensione di queste linee è dell'ordine di 60÷100 kV.

Generalmente i gruppi generatori monofase sono installati in centrali miste, equipaggiate anche con normali generatori trifasi a frequenza industriale.

Le sottostazioni, dislocate lungo le linee ferroviarie, sono molto semplici; il macchinario è costituito da trasformatori monofasi a bassa frequenza.

Questo sistema d'alimentazione è usato in Svizzera, Germania e Austria.

Conversione centralizzata

Stazioni d'elevata potenza convertono in questo caso la corrente alternata trifase, prelevata dalla rete industriale, in corrente alternata monofase ad alta tensione a 16 2/3 Hz; esse si collegano quindi alle linee primarie monofasi delle ferrovie e funzionano in parallelo con le centrali oppure i gruppi generatori monofasi.

Le stazioni di conversione possono raggiungere potenze dell'ordine di 100 MW; i gruppi sono costituiti essenzialmente da:

- ? un trasformatore trifase abbassatore, alimentato dalle linee ad alta tensione in arrivo;
- ? un gruppo rotante, formato da un motore trifase a 50 Hz e da un alternatore monofase a 16 2/3 Hz;

- ? un trasformatore monofase elevatore, che alimenta le linee primarie.

Le stazioni convertitrici, di proprietà delle amministrazioni ferroviarie, sono di solito ubicate in prossimità delle sottostazioni di trazione più importanti. Il sistema è impiegato in Germania ed in Austria.

Conversione ripartita

Brevi linee trifasi a media oppure alta tensione, derivata dalle rete trifase industriale, alimentano direttamente le sottostazioni di trazione. Queste sono equipaggiate con gruppi di conversione rotanti, costituiti da un motore trifase a 50 Hz e da un alternatore monofase a 16 2/3 Hz.

Il sistema, usato dalle ferrovie svedesi, ha il vantaggio di richiedere un limitato sviluppo di linee ad alta tensione, a costo tuttavia d'una notevole complicazione delle sottostazioni. I gruppi di conversione consentono di regolare la tensione applicata alla linea di contatto, in modo da compensare le relative cadute di tensione; è quindi possibile aumentare la distanza fra le diverse sottostazioni, rispetto agli altri sistemi.

Nel sistema con conversione ripartita, le sottostazioni sono sempre in fase tra loro, per cui possono funzionare in parallelo, come quelle a corrente continua. L'alimentazione bilaterale della linea di contatto è anche possibile con gli altri schemi d'alimentazione sopra ricordati, a condizione che vengano contenuti gli scambi di potenza attiva e reattiva fra le sottostazioni.

Per limitare le cadute di tensione in linea, nelle ferrovie a doppio binario si effettuano inoltre, generalmente, il collegamento in parallelo delle due linee di contatto, a metà di ciascuna tratta.

Rispetto alla tensione nominale di 15 kV, si ammettono le seguenti variazioni:

- ? valore massimo 16.5 kV (+10%);
- ? valore minimo 12 kV (-20%), eccezionalmente 11 kV.

Alimentazione della linea a frequenza industriale

La forte reattanza della linea di contatto provocherebbe, rispetto al sistema a bassa frequenza, maggiori cadute di tensione in linea, a parità di corrente assorbita dai singoli convogli. Per ottenere anche a 50 Hz distanze fra le sottostazioni elevate (nelle elettrificazioni francesi a 50 Hz, la distanza tra le sottostazioni è mediamente dell'ordine dei 60 km), la tensione nominale di linea è stata aumentata a 25 kV, con le seguenti variazioni ammissibili:

- ? valore massimo 27.5 kV (+10%);
- ? valore minimo 19 kV (-24 %), eccezionalmente 17.5 kV.

Com'è noto, caratteristica fondamentale è la possibilità di allacciare direttamente le sottostazioni alla rete industriale, mediante brevi linee monofasi ad alta tensione a 50 Hz. Le sottostazioni sono sempre costituite da semplici trasformatori monofasi, più leggeri, a pari potenza, di quelli a 16 2/3 Hz.

Alimentazione a 2x25 kV

In qualche caso la linea di alimentazione è alimentata a 50 kV, applicando tale tensione fra il filo di contatto ed un alimentatore e collegando a massa il centro del secondario del trasformatore della sottostazione e degli autotrasformatori distribuiti lungo la linea.

Il sistema consente di ridurre notevolmente l'impedenza equivalente della linea e quindi di aumentare la distanza tra le sottostazioni, semplificando il problema degli allacciamenti alla rete ad alta tensione. Naturalmente il costo degli impianti di alimentazione è più elevato.

Sottostazioni di conversione

Le caratteristiche dei gruppi di conversione delle sottostazioni che alimentano le linee a corrente continua hanno subito nel corso dei decenni notevoli progressi per quanto riguarda prestazioni, rendimento, manutenzione ed affidabilità.

Nella sottostazione di Apice (BN), fu sperimentato un gruppo statico con raddrizzatore a vapore di mercurio. Gli ottimi risultati conseguiti con questo tipo di raddrizzatore ne imposero l'adozione generalizzata in tutte le sottostazioni di conversione.

Fu in tal modo possibile realizzare, ove necessario, sottostazioni a funzionamento completamente automatico, quindi non presidiate, con telecomando e telecontrollo dalle sottostazioni principali.

Un ulteriore importante passo avanti fu l'introduzione, dei raddrizzatori al silicio, che hanno in breve tempo soppiantato, in tutte le nuove costruzioni, quelli a vapore di mercurio.

Sottostazioni con raddrizzatore al silicio

La sottostazione comprende:

- ? le linee trifase ad alta tensione in arrivo (linee primarie);
- ? le sbarre trifasi AT;
- ? i gruppi di conversione;
- ? le sbarre a corrente continua delle quali, nel caso considerato, quella negativa è collegata alla rotaia di corsa, cioè è a massa;
- ? gli alimentatori positivi, che collegano le sbarre positive alla linea di contatto.

Si possono avere una o più linee primarie di alimentazione, rispetto alle quali la sottostazione può essere inserita in serie oppure in derivazione; nel primo caso le primarie fanno capo alle sbarre della sottostazione, nel secondo caso, la sottostazione è collegata ad una o più primarie passanti.

Il sistema di sbarre AT delle sottostazioni può essere semplice o doppio.

I gruppi di conversione, protetti lato AT da un interruttore trifase, sono costituiti da:

- ? un trasformatore trifase, che ha il compito di abbassare la tensione in relazione al valore della tensione continua U_d ;
- ? un raddrizzatore costituito da diodi al silicio.

Gli alimentatori positivi sono protetti da interruttori extrarapidi, che intervengono in caso di cortocircuiti nella linea di contatto.

Sottostazioni con raddrizzatori a vapore di mercurio

I gruppi di conversione a vapore di mercurio sono costituiti da:

- ? un trasformatore, che ha il duplice compito di abbassare la tensione e di variare il numero delle fasi; in questo caso, infatti, il secondario è sempre esafase;
- ? uno o più raddrizzatori a vapore di mercurio.

Conversione trifase/continua

Date le potenze in gioco, nelle sottostazioni di trazione si impiegano raddrizzatori polifase, comprendente un certo numero di rami, ciascuno costituito idealmente da una valvola.

Un insieme di valvole forma un gruppo commutante.

Impiego dei diodi al silicio nelle sottostazioni

Con i diodi al silicio si possono realizzare unità di potenza molto elevata, avente dimensioni relativamente ridotte, elevatissimi rendimenti e grande sicurezza di funzionamento.

Alte caratteristiche favorevoli sono la possibilità di entrare in servizio quasi istantaneamente, di funzionare regolarmente in tutte le condizioni di temperatura che si presentano in pratica, cioè fra -50°C e $+50^{\circ}\text{C}$.

Per contro, i diodi hanno una scarsa capacità di sovraccarico ed una notevole sensibilità alle sovratensioni, anche di breve durata. Tali limitazioni sono particolarmente gravose nei gruppi per trazione, caratterizzati per loro natura da forti sovraccarichi e sovratensioni.

I raddrizzatori al silicio devono essere dimensionati in funzione della massima punta di corrente ed opportunamente protetti contro gli effetti di cortocircuiti.

Protezione contro i cortocircuiti

I cortocircuiti possono essere interni, quando viene a mancare la proprietà valvolare di un diodo, oppure esterni, cioè lato corrente continua; in questo caso il gradiente ed il valore finale della corrente dipendono dalla distanza del punto in cui si verifica il guasto dalla sottostazione.

Grazie alle elevate prestazioni dei diodi, attualmente gli armadi raddrizzatori vengono dimensionati in modo da poter sopportare senza danni cortocircuiti lato corrente continua di durata almeno uguale al tempo d'apertura dell'interruttore trifase inserito a monte del trasformatore.

Protezione contro le sovratensioni

Vengono usati complessi di resistori e condensatori, lato corrente continua, o particolari tipi di scaricatori, inseriti tra le fasi del trasformatore e le sbarre d'uscita.

Sovraccarichi

I gruppi raddrizzatori per trazione sono sottoposti a sovraccarichi notevoli, la cui entità è direttamente legata alla natura del servizio; in linea generale essa aumenta passando dalle reti urbane, alle ferrovie a doppio binario e quelle a binario singolo.

Impiego dei raddrizzatori a vapore di mercurio

Le prestazioni del raddrizzatore dipendono dalle sollecitazioni ammissibili per i singoli anodi durante le fasi di conduzione e di blocco.

Durante la fase di blocco la sollecitazione anodica dipende, oltre che dalla tensione inversa massima U_{RM} , dal valore massimo della corrente inversa che si manifesta all'inizio del periodo di blocco e che determina la probabilità che si verifichi il cosiddetto "arco di ritorno".

Archi di ritorno

Tra gli inconvenienti che si possono verificare in un raddrizzatore a vapore di mercurio, i più gravi derivano dalla formazione di macchie catodiche fuori dal catodo. Di queste accensioni anormali, particolarmente grave è l'arco di ritorno, che ha luogo quando una macchia si forma su un anodo; in tal caso l'anodo funziona da catodo e riceve corrente dagli altri anodi positivi. Poiché la resistenza dell'arco è molto piccola, ciò equivale ad un corto circuito sul secondario del trasformatore.

L'istante più pericoloso per la formazione dell'arco di ritorno è l'inizio della fase di blocco: per effetto del potenziale negativo dovuto alla tensione inversa iniziale, gli elettroni vengono violentemente ricacciati dall'anodo, mentre gli ioni formano nello spazio circostante uno schermo positivo.

La possibilità che si verifichi un arco di ritorno è legata ad un aumento anormale della punta iniziale della corrente inversa, che può avere luogo sia per cause accidentali, sia per condizioni di carico troppo gravose.

Si prevedono in ogni caso dispositivi di protezione, sensibili all'inversione della corrente catodica (relè a ritorno di corrente), che in caso di guasto determinano l'apertura dell'interruttore trifase posto sul primario del trasformatore.

Linee di contatto

La linea di contatto aerea ha il compito di alimentare i mezzi di trazione; le rotaie di corsa costituiscono i conduttori di ritorno. La linea è costituita da un filo di rame trafilato duro e sagomato per consentire l'attacco ai morsetti di sospensione; deve inoltre possedere una elasticità verticale il più possibile uniforme; questo viene richiesto perché vi è il problema di una regolare captazione di corrente mediante un contatto che, dal punto di vista elettrico, non è perfetto. Nelle linee principali vengono utilizzati 2 fili vicini in parallelo di sezione pari a $100\text{--}150\text{ mm}^2$ a causa delle elevate correnti assorbite dalle macchine, mentre nelle linee secondarie viene utilizzato un filo semplice di sezione anche inferiore a 100 mm^2 .

La linea di contatto monofase è normalmente del tipo a catenaria, in tutto simile a quella impiegata in corrente continua; la differenza principale consiste nella minor sezione complessiva dei conduttori, consentita dai ridotti valori delle correnti in gioco. È questo uno dei vantaggi del sistema a corrente alternata, dovuto all'impiego di tensioni molto elevate al filo di contatto.

Normalmente si adotta la catenaria semplice, costituita da un filo di contatto sagomato di rame, della sezione di $100\div 110\text{ mm}^2$, e da una corda portante, normalmente di bronzo, a volte di acciaio, della sezione di $60\div 70\text{ mm}^2$. La sezione complessiva equivalente di rame è quindi dell'ordine di 150 mm^2 .

Nel calcolo delle cadute di tensione in linea è necessario considerare, oltre alla resistenza ohmica, anche la reattanza, che diventa preponderante rispetto alla resistenza del sistema a frequenza industriale.

L'impedenza complessiva Z è fortemente influenzata, a pari sezione equivalente di rame, dalla disposizione della catenaria, dalla qualità della corda portante, dalla natura del terreno e, nelle linee a doppio binario, dalla presenza del binario vicino.

Per ridurre la Z , nelle linee a due binari questi vengono messi di solito in parallelo a metà tratta.

Nel sistema a $50\div 60\text{ Hz}$ ciascuna semitratta, alimentata normalmente a sbalzo dalla sottostazione più vicina, presenta un collegamento in parallelo fra i due binari all'estremità e nel punto centrale della semitratta medesima.

Alimentazione delle linee di contatto

Alimentazione a sbalzo: la sottostazione è situata ad un'estremità oppure a metà della linea; il tronco di linea viene alimentato solo da un lato e la sottostazione eroga l'intera corrente assorbita dai mezzi di trazione che si trovano nel tronco stesso.

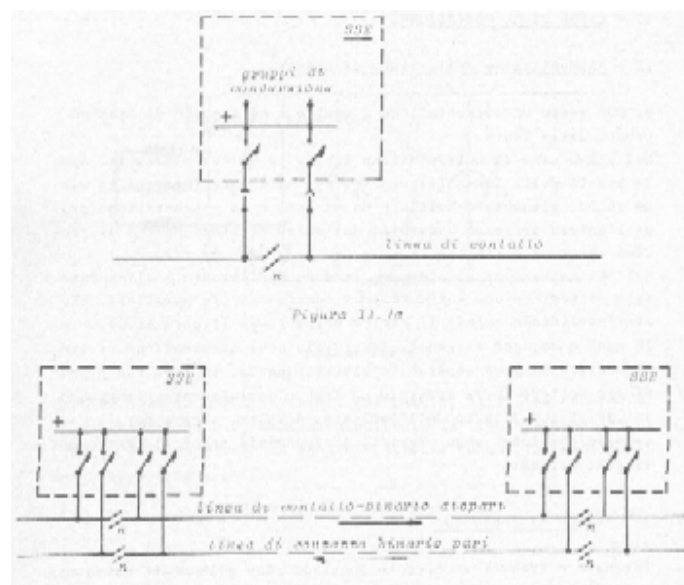


Figura 11.1 a – sottostazione a metà linea

Figura 11.1 b – posizione delle sottostazioni nell'alimentazione bilaterale

Alimentazione bilaterale: ogni tronco è alimentato da 2 sottostazioni in parallelo poste ognuna alle estremità del tronco interessato. Le 2 sottostazioni si ripartiscono il carico di linea.

I tronchi possono essere sezionati in più punti per permettere il funzionamento dell'impianto nel caso in cui debbano essere svolti lavori di manutenzione su un dato tronco.

Cadute di tensione in linea

Nella determinazione della tensione al pantografo dei mezzi di trazione, è necessario in primo luogo considerare le cadute di tensione dei trasformatori delle sottostazioni, che hanno tensioni di corto circuito dell'ordine del 7÷10%. Il calcolo delle cadute complessive, in sottostazioni ed in linea, è laborioso, particolarmente se si suppone che le due sottostazioni funzionino in parallelo.

Le cadute di tensione sono fortemente influenzate dai fattori di potenza dei veicoli. Alla frequenza di 16 2/3 Hz, i mezzi di trazione equipaggiati con motori "diretti" hanno un basso fattore di potenza e velocità ridotta.

I veicoli equipaggiati con raddrizzatori non controllati hanno un fattore di potenza compreso fra 0.8 e 0.85, in tutta la gamma delle velocità normali di marcia.

Nonostante che l'impedenza a 16 2/3 Hz sia minore di quella a 50 Hz, le cadute di tensione, a pari potenza assorbita e per velocità elevate, sono equivalenti nei due casi, dato l'aumento della tensione nominale da 15 a 25 kV.

Per aumentare la tensione al pantografo nelle linee a 50 Hz, sono stati anche adottati alcuni accorgimenti (compensazione parziale della caduta di tensione in linea mediante condensatori in serie, compensazione della caduta di tensione interna dei trasformatori mediante dispositivi di regolazione sotto carico, il miglioramento del fattore di potenza totale).

Sistemi di sospensione

Nelle linee ferroviarie viene utilizzato il sistema di sospensione longitudinale, detto più comunemente a catenaria. In tale sistema il filo di contatto – semplice o doppio – è sospeso ad una fune in treccia di rame, bronzo oppure acciaio zincato, sostenuta a sua volta dai pali; la distanza tra i pali è di circa 60-70 m in rettilineo. Il filo di contatto è sostenuto mediante la corda portante attraverso dei pendini situati a distanza ridotta; la lunghezza dei pendini stessi è calcolata in modo tale che i fili risultino orizzontali. La linea deve avere un'elasticità verticale per garantire un consumo uniforme dei pantografi.

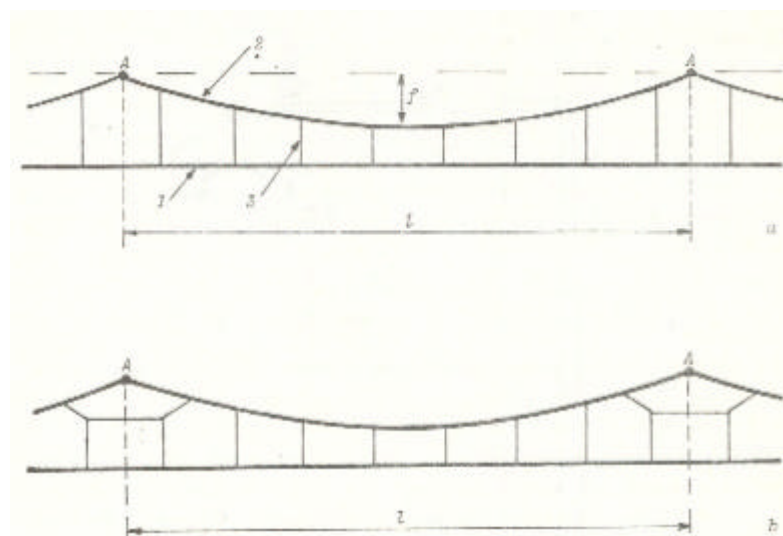
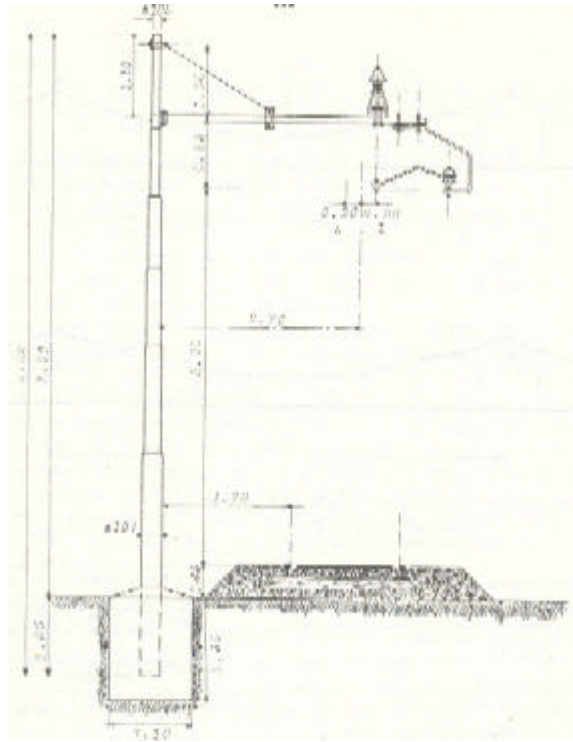


Figura a: catenaria semplice

Figura b: catenaria con sospensione a Y



Esempio di palo di sospensione della catenaria

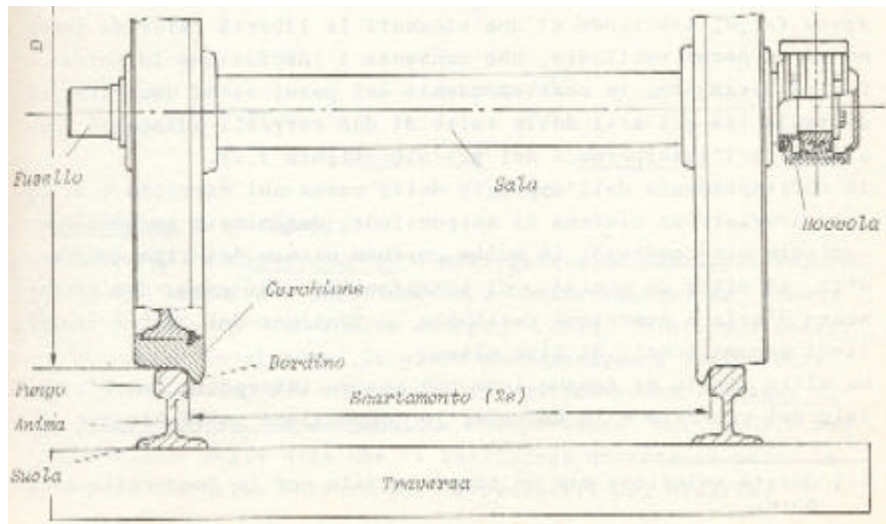
Meccanica della locomozione

Nei mezzi ferroviari vengono utilizzate coppie cinematiche ruota d'acciaio/rotaia.

In un veicolo ferroviario si ha un certo numero di sale, ciascuna delle quali è costituita da un asse e da due ruote, calettate rigidamente sull'asse e quindi tra loro solidali nel senso della rotazione.

La parte della ruota che viene a contatto con la superficie del fungo della rotaia è denominata cerchione ed è provvisto di un bordino, che assicura la guida del veicolo. Ciascuna sala è collegata al telaio del veicolo mediante coppie cinematiche perno/cuscinetto; il perno fa parte dell'asse e si chiama fusello; il cuscinetto ha un anello esterno fisso ed è racchiuso nella boccola, che è a sua volta collegata al telaio mediante un opportuno sistema di sospensione e di guida e trasmette ad esso le diverse forze verticali e orizzontali. Il complesso delle sale del veicolo ne costituisce il rodiggio; si possono avere veicoli ad assi rigidi, nei quali cioè le sale fanno parte di un unico telaio.

In questo caso la distanza tra le sale estreme solidali con il telaio si chiama passo rigido del veicolo; quando gli assi rigidamente collegati sono più di due, per facilitare l'iscrizione in curva si prevede la spostabilità trasversale delle sale esterne, oppure si elimina il bordino dei cerchioni di uno o più assi.



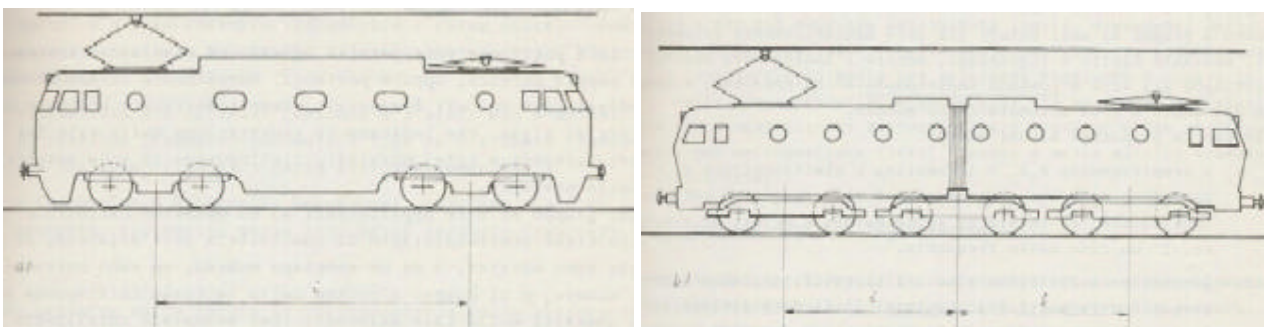
Nella maggior parte dei veicoli a trazione elettrica, il rodiggio è suddiviso in carrelli a 2 o 3 sale, sui quali appoggia la cassa; esistono anche veicoli articolati, nei quali le estremità di due casse adiacenti appoggiano su un medesimo carrello (esempio: le elettromotrici tranviarie e ferroviarie, le locomotive articolate a 2 assi su 3 carrelli, le elettromotrici tranviarie ed elettrotreni a 3 casse su 4 carrelli).

Il collegamento cassa-carrello assicura la trasmissione delle diverse forze, lasciando ai due elementi la libertà relativa intorno ad un perno verticale, che consente l'inscrizione in curva.

La distanza fra gli assi delle ralle di due carrelli adiacenti costituisce l'interperno del veicolo.

In corrispondenza dell'appoggio della cassa sul carrello è previsto un sistema di sospensioni, denominato sospensione centrale o secondaria; le molle possono essere del tipo a balestra, ad elica di acciaio, di gomma/acciaio, di gomma con riempimento d'aria a pressione variabile in funzione del carico (sospensioni pneumatiche), di tipo misto.

Un'altra sospensione può essere interposta tra il telaio del carrello e le boccole; la sospensione sulle boccole è denominata anche primaria.



Rappresentazione interperno per elementi a cassa unica (fig. sinistra) o a semicasse (fig. destra).

Costituiscono la massa sospesa o molleggiata le parti del veicolo che sono sopportate direttamente oppure indirettamente da almeno un sistema di sospensioni (per esempio: cassa, telaio dei carrelli). Le parti che appoggiano rigidamente sulla rotaia (boccole e sale montate) costituiscono la massa rigida o non sospesa. La distinzione è importante, nella valutazione degli urti che si verificano durante il moto (esempio: inevitabili irregolarità del binario).

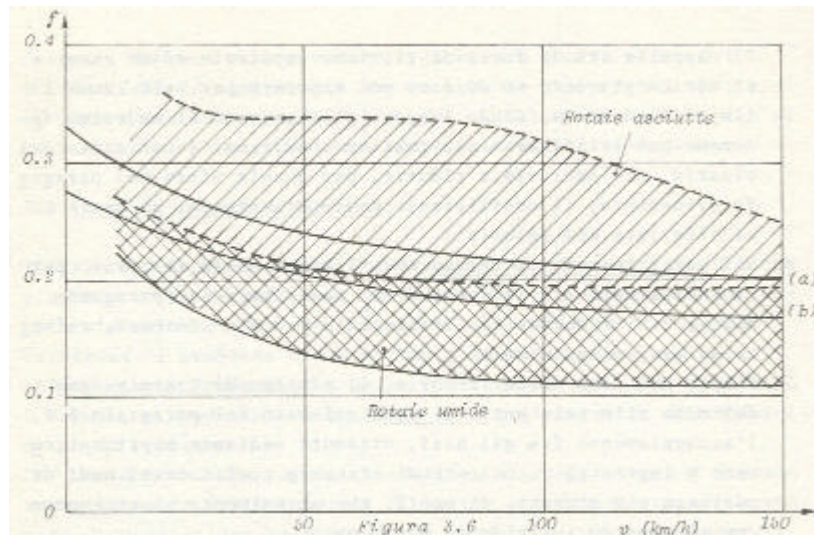


Grafico che illustra l'andamento dell'aderenza delle ruote sulla rotaia in base alla velocità del convoglio e allo stato della rotaia - asciutta o bagnata.

Rodiggio

Le sale possono essere motrici (trasmettono la coppia motrice), oppure portanti. Lo schema del rodiggio dei veicoli ferroviari viene individuato mediante una serie di sigle, tali sigle indicano la ripartizione delle sale fra i vari carrelli o telai parziali, distinguendo le sale motrici da quelle portanti.

Ogni gruppo di sale appartenenti ad un medesimo carrello o telaio viene contraddistinto da una lettera dell'alfabeto, se le sale sono motrici, o da un semplice numero, se sono portanti; il numero, o il numero d'ordine della lettera, corrisponde alla quantità delle sale adiacenti (B 2 sale, C 3 sale). Le lettere senza indice si riferiscono a gruppi di assi motori tra loro meccanicamente accoppiati, mediante bielle o ingranaggi, mentre l'indice zero contraddistingue gli assi a comando individuale o indipendente, ciascuno dei quali è cioè azionato da un motore.

B_0B_0 = locomotiva o elettromotrice a due carrelli, ciascuno comprendente due sale motrici a comando individuale; (totale 4 motori di trazione)

B B = locomotiva o elettromotrice a 2 carrelli, ciascuno comprende 2 sale motrici accoppiate. (elettromotrici e locomotive con carrelli monomotori).

$B_0B_0B_0$ = locomotiva o elettromotrice provvista di 3 carrelli a 2 sale, con comando individuale degli assi. Si possono avere mezzi articolati a 2 casse, con articolazione in corrispondenza del carrello intermedio (esempio: E656 FS), oppure locomotive a cassa unica, con il carrello centrale spostabile trasversalmente rispetto alla cassa (esempio FS).

B B B = locomotiva o elettromotrice provvista di 3 carrelli monomotori a 2 sale, tipo E633 delle FS

C_0C_0 = locomotiva a 2 carrelli ciascuno a 3 assi, con 6 motori di trazione come Ae 6/6 delle FS

C C = locomotiva a 2 carrelli monomotori, ciascuno a 3 assi.

Caratteristiche delle locomotive elettriche

Si chiama circuito di trazione in un mezzo di locomozione elettrico il circuito che, attraversato dalla corrente dei motori, comprende tutte le apparecchiature necessarie per assicurarne il funzionamento in ogni condizione di marcia. Esso comprende, in generale, un certo numero di apparecchiature di tipo elettromeccanico ed uno o più convertitori elettronici di potenza.

Il circuito di trazione deve essere in grado di garantire:

- ? captazione della corrente;
- ? avviamento, regolazione della velocità ed inversione del senso di marcia;
- ? frenatura elettrica;
- ? protezione dei motori dai sovraccarichi.

Captazione della corrente

Nel sistema a corrente continua i veicoli vengono alimentati da due conduttori, uno positivo ed uno negativo, con possibilità di più soluzioni:

- ? positivo costituito da una linea di contatto aerea, negativo (circuito di ritorno) dalle rotaie di corsa (es: le linee tranviarie e ferroviarie);
- ? positivo costituito da una terza rotaia, negativo dalle rotaie di corsa. Il sistema è impiegato spesso nelle metropolitane, per tensioni fino a 750 V, e in qualche tronco ferroviario, eccezionalmente con tensione fino a 1'500 V;
- ? linea di contatto aerea bifilare, impiegata negli impianti filoviari.

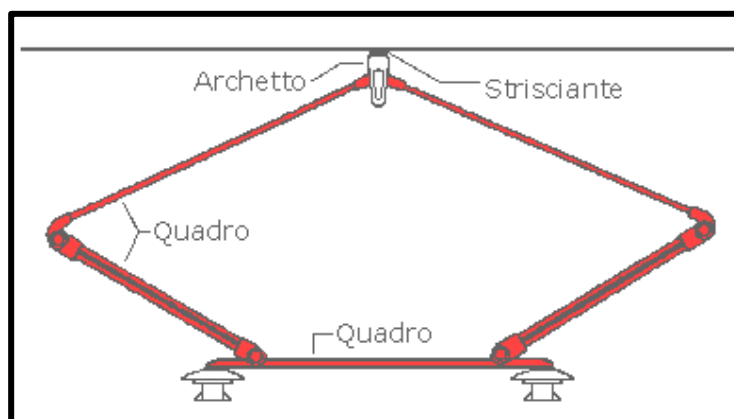
Prese ad asta

Le prese ad asta vengono impiegate soltanto per veicoli a bassa velocità e di potenza modesta quali tram e filobus. Le aste sono montate sul tetto e vengono tenute sollevate mediante molle che neutralizzano l'azione del peso ed esercitano una forza sul filo di contatto diretta verso l'alto, di alcune decine di Newton. L'abbassamento viene ottenuto mediante una corda, che si avvolge su un tamburo e rende possibile il bloccaggio dell'asta contro opportuni riscontri.

Con le prese ad asta, pur non superandosi normalmente la velocità di 50-60 km/h, si possono avere frequenti scarrucolamenti; per evitare che la presa vada in tal caso ad urtare violentemente contro la rete aerea, il tamburo d'ancoraggio della corda è normalmente munito d'un dispositivo di richiamo, che, in caso di scarrucolamento, provoca l'abbassamento rapido dell'asta.

Presa di corrente a pantografo

È il tipo comunemente impiegato negli impianti ferroviari, per potenze e velocità elevate. È denominata anche semplicemente pantografo ed è costituita dal quadro e dall'archetto, provvisto di striscianti che vengono direttamente a contatto con il filo o i fili.

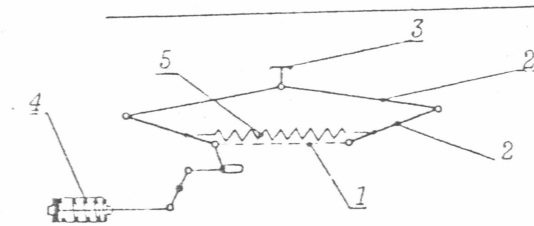


Il quadro è deformabile, in modo che l'archetto possa spostarsi liberamente in senso verticale e rimanere sempre a contatto con la linea aerea. I supporti dell'archetto sono molleggiati, per consentire i piccoli spostamenti verticali; le estremità laterali sono opportunamente sagomate, per facilitare l'accoppiamento con i fili di contatto.

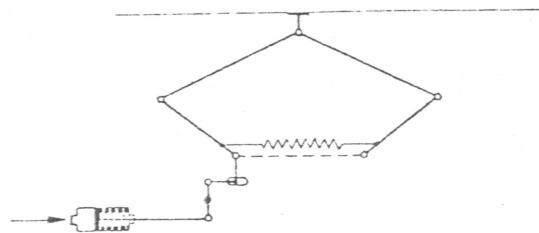
Le prese asimmetriche hanno le medesime caratteristiche dei pantografi normali, ma sono formate da sistemi articolati deformabili situati da una sola parte.

Il pantografo può assumere le seguenti posizioni:

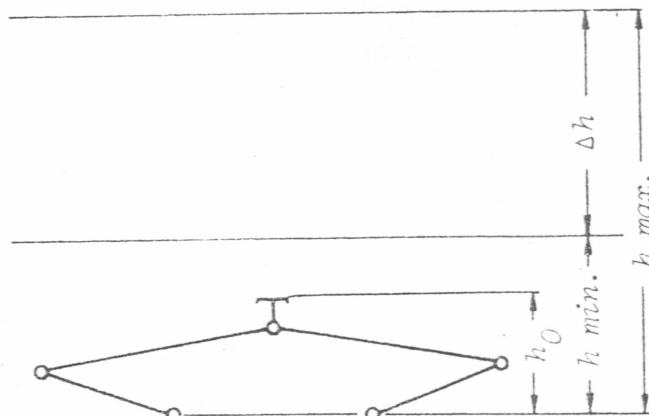
? *di riposo*, quando è completamente abbassato e quindi distaccato dalla linea;



? *di lavoro*, quando è sollevato, a contatto con il filo.



Le altezze di lavoro, misurate verticalmente come la h_0 , possono variare dal valore minimo h_{\min} al valore massimo h_{\max} , a seconda dell'andamento della linea di contatto; per questa è fissata infatti una quota normale, ma si possono avere quote diverse, in più o in meno, in corrispondenza di punti singolari (sottopassi, gallerie, passaggi a livello, ecc.). È necessario quindi che il pantografo garantisca una soddisfacente captazione di corrente in una zona di lavoro che risulta in genere molto ampia, fino a 1-1,5 m:



$$\Delta h = h_{\max} - h_{\min}$$

Gli striscianti sono costituiti da sbarre di materiale conduttore (rame, acciaio, alluminio, carbone). Il numero degli striscianti dipende dall'intensità di corrente da captare; un medesimo pantografo può avere striscianti uguali oppure di materiali differenti (es: rame e acciaio).

Strisciando contro il filo, le sbarre si consumano e debbono essere sostituite; è necessario che si usuri meno la linea aerea che le sbarre di contatto, di più facile ed economica sostituzione, e che inoltre l'usura si ripartisca uniformemente su tutta la larghezza utile dell'archetto. A tale scopo la linea, nei tratti in rettilineo, è disposta a zig-zag. È da notare che gli striscianti di carbone usurano il filo meno di quelli metallici, ma sono più fragili e sopportano male il passaggio della corrente a veicolo fermo.

L'archetto ed il quadro, essendo sotto tensione, sono isolati rispetto alla cassa del veicolo. La corrente passa attraverso il telaio, fino agli elementi di base, ai quali fa capo il circuito di trazione; le articolazioni sono cortocircuitate da connessioni flessibili di rame, per evitare che i relativi cuscinetti vengano danneggiati dal passaggio della corrente.

Per una efficiente captazione della corrente ed una buona conservazione del filo e degli striscianti, è necessario che questi due elementi rimangano costantemente a contatto, anche alla massima velocità, nonostante le variazioni di livello della linea aerea e gli spostamenti del pantografo dovuti alle oscillazioni del veicolo. A tal fine occorre che l'inerzia del pantografo sia sufficientemente piccola.

La presa di corrente è sottoposta in genere a due sistemi di molle:

- ? *molle di lavoro*, che contrastando l'azione del peso determinano l'innalzamento del pantografo ed esercitano una forza verticale contro il filo che si aggira intorno a 40÷100 N, a velocità nulla, e deve rimanere costante al variare dell'altezza del pantografo entro la zona di lavoro;
- ? *molle principali* o di discesa, aventi azione contraria e prevalente rispetto alle precedenti, in modo da tenere abbassato il pantografo.

L'azionamento del pantografo è di solito elettropneumatico; l'aria viene immessa mediante un'elettrovalvola in un cilindro di comando, nel quale si trovano le molle principali.

In condizioni di riposo l'elettrovalvola è diseccitata e le molle principali sono libere tenendo abbassato il pantografo. Eccitando l'elettrovalvola, le molle di lavoro vengono liberate e determinano il sollevamento del pantografo. In caso di mancanza d'aria, la presa si abbassa automaticamente.

Vi sono inoltre dei dispositivi accessori che rendono possibile:

- ? lo scarico repentino del cilindro, quando si comanda l'abbassamento, in modo di avere un rapido distacco del pantografo dalla linea; poi, verso la fine della corsa di discesa, il movimento viene opportunamente rallentato;
- ? la salita lenta del pantografo, per evitare che l'archetto vada ad urtare troppo violentemente contro il filo;
- ? il sollevamento iniziale del pantografo dopo un lungo stazionamento, quando i serbatoi dell'aria compressa sono ancora vuoti.

Presa di corrente con sistema a terza rotaia

La terza rotaia è situata lateralmente rispetto al binario e la superficie di contatto orizzontale si trova ad una certa altezza rispetto al piano delle rotaie.

La terza rotaia è di solito appoggiata su isolatori, per cui la superficie di contatto è rivolta verso l'alto. L'organo di presa è costituito da un braccio articolato montato mediante isolatori su un fianco del carrello, e da un pattino generalmente di ghisa, che va ad appoggiare sulla terza rotaia.

Poiché la presa è fissata al carrello, gli spostamenti relativi tra pattino e terza rotaia sono molto limitati; il braccio consente tuttavia i piccoli movimenti necessari. La pressione di lavoro è data, oltre che dal peso del pattino, dall'azione di molle.

In alcuni impianti la terza rotaia è sostenuta da isolatori e presenta la superficie di contatto rivolta verso il basso; è così più facile prevedere una protezione contro i contatti accidentali. La presa è di tipo analogo al precedente, con il pattino spinto verso l'alto da molle.

Avviamento

Durante la fase di avviamento, di regolazione della velocità e di frenatura il circuito di trazione assume diverse configurazioni elettriche che si determinano e controllano attraverso un sistema di comando che può essere diretto oppure indiretto.

A quest'ultimo tipo appartengono anche il comando a distanza ed il comando multiplo particolarmente utili, rispettivamente, per la trazione da due o più posti di guida e per comandare da una cabina più motrici accoppiate. Per la realizzazione di questi tipi di comando tutti i veicoli che compongono il treno sono collegati fra loro elettricamente a mezzo di accoppiatori che permettono la necessaria continuità elettrica dei principali circuiti di comando.

Come già accennato, il circuito di trazione risulta essere costruito da un certo numero di apparecchiature elettromeccaniche, come nel caso di locomotive di tipo tradizionale, ed eventualmente da una o più unità elettroniche di conversione come nel caso di locomotive più moderne.

Sono denominati tradizionali quegli azionamenti per i quali non si fa alcun uso di convertitori elettronici di potenza nel circuito di trazione la cui configurazione consente ai motori di essere alimentati direttamente dalla linea di contatto a mezzo dell'interposizione di reostati e con opportune combinazioni serie-parallelo degli stessi.

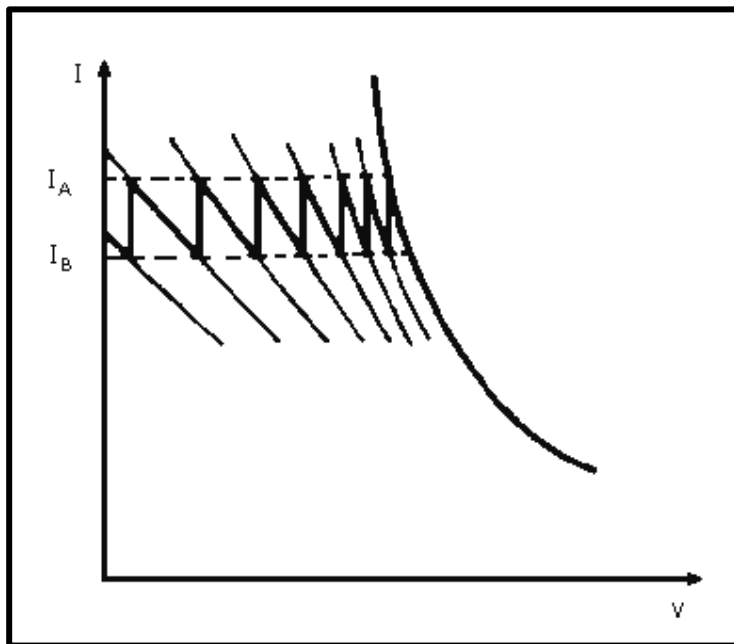
Questo tipo di azionamento, prima dello sviluppo dell'elettronica di potenza, è stato installato per molti anni su diverse locomotive elettriche delle FS a 3'000 V c.c. quali quelle appartenenti al gruppo E326, E424, E428, E626, E636, E645, E646, E444, fatta eccezione di eventuali unità sperimentali che sono state equipaggiate con convertitori statici.



Locomotiva E428 di 2^a serie delle FS

Durante la fase di avviamento bisogna sempre rispettare i limiti di aderenza che impongono uno sforzo di trazione praticamente costante per basse velocità. Nel caso della trazione con motori in c.c., quindi, bisogna fare in modo che la corrente di spunto non superi un certo valore predeterminato.

Nel caso si supponga di utilizzare un solo motore di trazione, la regolazione della corrente di avviamento può essere effettuata mediante l'inserimento in serie ad esso di un reostato di avviamento munito di una serie di gradini che ne permettono una esclusione graduale fino a collegare direttamente il motore alla linea di alimentazione. Nella realtà tale reostato è costituito da elementi in serie di resistenza R_1 , R_2 , ..., R_n che vengono progressivamente cortocircuitati mediante la chiusura di contattori.



Andamento della corrente in funzione della velocità

Come è possibile vedere dal diagramma, durante la fase di avviamento reostatico, la corrente del motore non è perfettamente costante ma oscilla tra due valori I_A ed I_B che risultano tanto più vicini quanto più numerose saranno le posizioni reostatiche intermedie.

Nella realtà il mezzo di trazione è munito di più motori, pertanto, la fase di avviamento viene effettuata collegando tutti i motori in serie tra loro e con il reostato di avviamento. Quest'ultimo viene gradualmente escluso fino ad ottenere la prima posizione economica di marcia con i motori in serie a pieno campo. Ciò è quanto accadeva, ad esempio, sulle locomotive elettriche delle FS E424 dotate di un reostato composto da elementi in ghisa del valore complessivo di 28.5 W e di quattro motori di trazione che, nella fase di avviamento, erano collegati tutti in serie tra loro per poter limitare in modo conveniente la corrente e quindi lo sforzo di trazione nel rispetto dei limiti di aderenza.

Il passaggio da una posizione reostatica alla successiva può essere, oltre che comandata direttamente dall'operatore, anche eseguita automaticamente da appositi circuiti in modo da realizzare un avviamento automatico.

La regolazione di velocità di un motore a corrente continua può essere effettuata nei seguenti due modi:

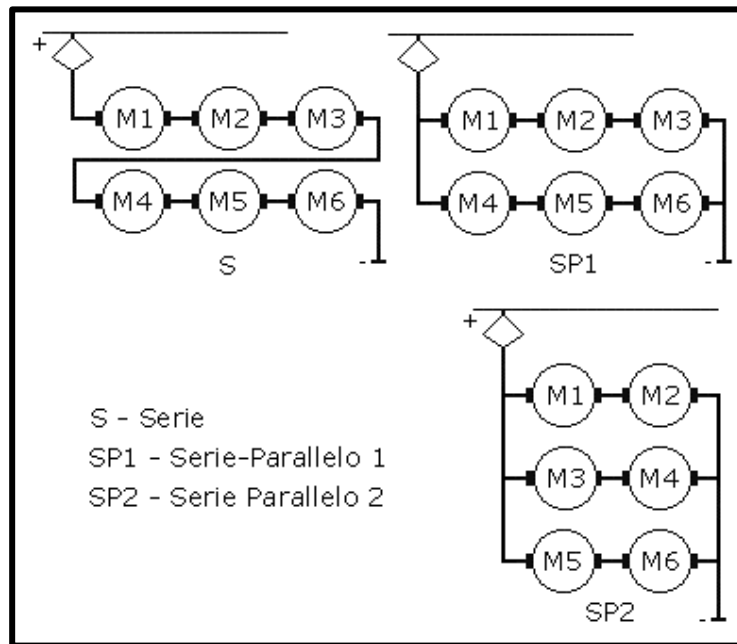
- ? variando la tensione di alimentazione ai suoi morsetti;
- ? regolando opportunamente il campo.

In un mezzo di trazione ferroviaria la regolazione della velocità con il primo metodo (variazione della tensione di alimentazione) viene effettuata con opportuni gruppi di collegamento serie-parallelo dei motori di trazione in modo da variare l'alimentazione di essi fino a portarla al valore nominale.

La regolazione del campo, invece, è effettuata mediante la variazione del numero di spire attive di ciascun polo principale oppure mediante l'applicazione di un derivatore induttivo in parallelo all'avvolgimento di campo di ciascun motore di trazione.

Le locomotive elettriche del gruppo E626, ad esempio, utilizzavano 6 motori di trazione a 4 poli ad eccitazione serie ciascuno con tensione nominale di 1'500 V e così configurabili:

- ? serie (S);
- ? serie-parallelo (SP1) con due gruppi in parallelo ciascuno formato da tre motori;
- ? serie-parallelo (SP2) con tre gruppi in parallelo ciascuno formato da due motori.



Schema semplificato del circuito di trazione del locomotore E626

Alle tre combinazioni suddette, si affiancavano altre tre corrispondenti ad un grado di indebolimento del campo induttore ottenuto mediante shuntaggio induttivo.

All'inizio la scelta del tipo di locomotore è stata piuttosto laboriosa: dopo un tentativo di impiegare locomotori ad accumulatori, scartato per la limitata autonomia e la bassa velocità, ci si è orientati sui locomotori trifase. Le locomotive trifase, per le quali la captazione di corrente sulle fasi aeree avveniva con pantografi muniti di doppio archetto, erano generalmente equipaggiate con due motori di trazione asincroni a rotore avvolto che distribuivano il moto agli assi.

La regolazione della velocità era effettuata nella fase di avviamento con un reostato a liquido, mentre per la marcia si utilizzava il collegamento in cascata ed in parallelo dei motori o la commutazione dei poli. Tutte queste regolazioni, opportunamente combinate, permettevano al massimo di disporre di due o quattro velocità economiche che erano rigidamente legate alla frequenza di alimentazione.



Locomotiva Trifase E 432 nel Museo di Pietrarsa (NA)

Le locomotive trifase tipo E550, E551, E554 avevano, ad esempio, due sole posizioni di marcia normali (25-50 km/h) che si ottenevano con un collegamento in cascata dei due motori. Su altri tipi di locomotive variando anche il numero di poli (6 oppure 8), si riuscivano ad ottenere le quattro posizioni di marcia corrispondenti alle velocità 37.5-50-75-100 km/h.

Questo carattere di rigidità della caratteristica meccanica e l'impossibilità di adeguare la velocità di marcia alle condizioni del tracciato ed alle esigenze del servizio, costituì uno dei principali handicap delle locomotive trifase che si rivelarono subito inadeguate nei confronti delle nascenti locomotive a corrente continua che, nei primi '30, iniziavano a mostrare le grandi capacità di versatilità ed efficienza che si desideravano dalla trazione elettrica.

Le locomotive trifase avevano una numerazione del tipo:

E 000 000

in cui le prime tre cifre distinguevano la serie ed il tipo mentre le altre tre rappresentavano una numerazione progressiva delle unità all'interno della stessa serie.

Con riferimento alle prime tre cifre, si riporta di seguito il loro significato.

Prima cifra indica il numero degli assi motori

Seconda cifra individua la categoria della macchina (3 per treni viaggiatori e 5 per treni merci)

Terza cifra la successione dei tipi. Ad esempio la locomotiva E554 era il quarto tipo delle locomotive a 5 assi per servizio merci.

Alla fine il sistema più adottato è stato quello a corrente continua a 3'000 V. L'energia elettrica viene fornita da sottostazioni di raddrizzamento, alimentate a loro volta da linee trifasi ad alta tensione (120-230 kV).

I motori di trazione sono del tipo con eccitazione serie; la loro velocità viene ottenuta variando la tensione di alimentazione od il flusso magnetico, l'inversione di marcia si ottiene invertendo il collegamento fra motore ed avvolgimento di campo dei motori, e serve anche per frenare dinamicamente il treno.

Regolazione della velocità

Il veicolo deve essere avviato senza che la corrente assorbita superi i limiti ammissibili per i motori e la forza di trazione oltrepassi il limite d'aderenza.

Nei mezzi con equipaggiamento di trazione di tipo tradizionale, alimentando il motore alla tensione nominale occorre inserire un reostato in modo da avviare il convoglio con la corrente prefissata; la forza di trazione corrispondente dev'essere inferiore al limite d'aderenza.

La resistenza del reostato deve essere variata opportunamente in modo che la forza di trazione si mantenga mediamente uguale a F_a , finché non venga raggiunta la caratteristica meccanica a piena tensione $F(v)$, alla velocità v_a .

Effettuato l'avviamento e raggiunte le condizioni di regime, è necessario poter variare entro certi limiti la velocità v_r attraverso la regolazione di tensione e la regolazione di campo dei motori.

Inversione del senso di marcia

Per i veicoli elettrici, l'inversione di marcia è realizzabile molto facilmente, mediante una semplice modifica del circuito di trazione.

Poiché le relazioni:

$$E = k_E \cdot \Phi \cdot n \quad \text{e} \quad T = k_T \cdot \Phi \cdot I$$

sono valide anche per quanto riguarda i segni, per invertire la marcia occorre invertire E oppure Φ al fine di cambiar segno a n .

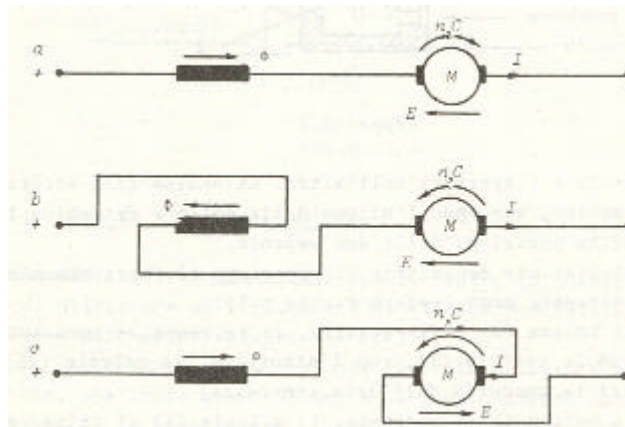


Figura a – grandezze nella marcia avanti

Figura b – inversione delle connessioni degli avvolgimenti di campo

Figura c – inversione delle connessioni dell'avvolgimento d'indotto

Per effettuare la marcia indietro si può:

- ? invertire le connessioni dell'avvolgimento di campo in modo da cambiare il segno di Φ ;
- ? invertire le connessioni dell'avvolgimento d'indotto in modo da cambiare il segno di E e di I ;

L'apparecchio che effettua l'inversione dei collegamenti del campo o dell'indotto è denominato invertitore di marcia. Esso deve sempre essere manovrato con circuito di trazione aperto, cioè senza corrente. I suoi contatti possono essere realizzati mediante semplici spazzole striscianti su settori opportunamente sagomati e montati su un albero.

È necessario un blocco meccanico per impedire l'inversione di marcia quando il circuito di trazione è percorso da corrente. In pratica un sistema di blocco lega il comando dell'invertitore al combinatore principale di marcia, in modo da evitare che quest'ultimo venga azionato indebitamente.

Frenatura elettrica

La frenatura elettrica può avvenire:

- ? mediante resistore di carico (*frenatura dinamica*), staccando il motore dalla rete di alimentazione e chiudendolo immediatamente su di un reostato di carico. Il motore passa allora a funzionare come generatore, dissipando in calore nel resistore di carico l'energia generata dall'indotto della macchina;
- ? a *recupero*, facendo funzionare il motore sulla linea di alimentazione come generatore. Ciò si ottiene automaticamente tutte le volte che la macchina supera la velocità n^* , quando incomincia a funzionare come generatore (in parallelo ad altri, perché rimane allacciata alla linea di alimentazione in tensione): infatti avviene che per $n > n^*$ risulta $E > V$.

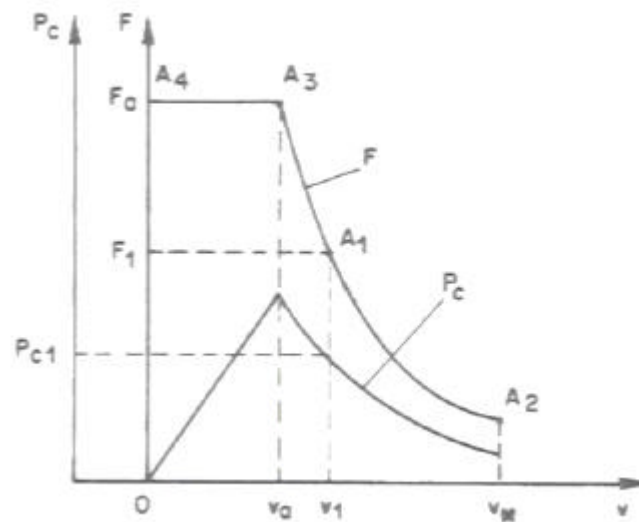
L'azione frenante diverrà naturalmente più forte se si aumenterà la corrente di eccitazione. In sostanza il motore frena come generatore non appena esso, accelerando sotto l'azione di una causa esterna, supera la velocità caratteristica n^* oppure esso viene sovraeccitato;

- ? per *controcorrente*, invertendo la corrente di eccitazione mediante un dispositivo di commutazione. Il motore si trova allora in condizioni di sviluppare una coppia frenante notevole. Naturalmente, di per sé esso girerebbe all'incontrario. Durante tale periodo la forza elettromotrice indotta, invertendo segno (l'equazione del circuito d'indotto è $V = -E + R_i I_i$), non risulta più di limitazione alla corrente d'indotto, anzi si comporta in maniera opposta, per cui si rende assolutamente necessario introdurre in serie all'indotto, all'atto della manovra, degli opportuni resistori limitatori di corrente.

La frenatura per controcorrente può essere molto violenta e conviene solo in casi molto particolari.

Caratteristica meccanica del mezzo di trazione

È la curva che dà la forza di trazione ai cerchioni, indicata con F , in funzione della velocità di marcia del veicolo. Per i mezzi a trazione elettrica, essa ha di solito il seguente andamento:



La potenza meccanica ai cerchioni è data da:

$$P_c = F \cdot v$$

Esprimendo F in kN e v in km/h, si ha:

$$P_c \text{ [kW]} = \frac{F \text{ [kN]} \cdot v \text{ [km/h]}}{3.6}$$

Nella caratteristica meccanica si possono rilevare i seguenti punti caratteristici:

A_1 - velocità v_1 , forza F_1 funzionamento dei motori elettrici a regime nominale, corrispondente alla potenza ai cerchioni:

$$P_{c1} = F_1 \cdot v_1$$

A_2 - velocità massima v_M funzionamento dei motori alla massima velocità ammissibile

A_3 - velocità v_a , forza F_a limite di utilizzazione della caratteristica $F(v)$.

Analisi di vantaggi e svantaggi dei diversi tipi di alimentazione e dei motori impiegati

Vantaggi della trazione elettrica nel 1928

Aspetto finanziario

Il costo d'elettrificazione può valutarsi tra le 600'000 lire ed il milione per km di linea a grande traffico e doppio binario, il che vuol dire ai tassi d'uso, un onere annuo di 60'000 o di 100'000 lire per km. Partendo da un consumo base per T.K.V.R. (tonnellata-km riportata su linea pianeggiante e riferita al gancio di trazione) di 57 g di carbone nella trazione a vapore e 32 Wh in trazione elettrica, e da un costo di lire 200 la tonnellata pel carbone, e 0.15 lire il kWh per l'energia elettrica, il risparmio consentito dalla trazione elettrica, comprese anche le possibili economie accessorie, si può ritenere di 9'900 lire per ogni milione di T.K.V.R. Ne risulta che, se gli impianti fissi costano, nella peggiore delle ipotesi, un milione al km, occorre un traffico di 10 milioni di T.K.V.R., per avere il pareggio su di una linea a doppio binario.

Aspetto economico

La trazione elettrica offre indiscutibili vantaggi, quali l'aumentata potenzialità delle linee ed altri minori, e per Paesi come l'Italia poco provvisti di carbone, la maggior indipendenza dall'estero, che però non devesi sopravvalutare data sempre la necessità d'importare ferro e rame per l'industria elettrica. Con 1'060 km di linee elettrificate quali si avevano nel 1927 in Italia ed un traffico di 7'500 milioni di T.K.V.R., il risparmio annuo di combustione è risultato di circa 410'000 t di fronte ad un consumo totale nelle FS di 3'000'000 t.

Per quanto riguarda le spese d'impianto, l'elettrificazione delle grandi reti ferroviarie già esistenti è conveniente solo col concorso di circostanze speciali come la possibilità d'accrescere il traffico e rendere il servizio più rapido e sicuro, utilizzando forze idrauliche di costo moderato; l'elettrificazione invece di linee nuove offre maggiori vantaggi. Per quanto riguarda l'esercizio, l'utilizzazione di grandi sorgenti idrauliche che si sottraggono all'industria privata è economica nel solo caso di carico uniforme senza punte: quindi le linee isolate a traffico discontinuo mal si prestano alla nuova forma di esercizio.

Aspetto tecnico

La trazione elettrica ha invece una indiscussa superiorità tecnica su quella a vapore adattandosi alle più svariate esigenze dei servizi moderni. Permette un aumento di traffico in grazia d'una più forte composizione di treni consentita dal maggiore sforzo di trazione dei locomotori elettrici, di una aumentata velocità commerciale, conseguente alla maggiore accelerazione iniziale d'avviamento di cui i motori elettrici sono capaci e quindi d'una successione più rapida dei treni stessi con aumento di traffico specialmente vantaggioso per quelle linee che hanno raggiunto la saturazione e dove la trazione elettrica può risparmiare altre opere costose e richiedenti tempo (come ad es. il doppio binario). Sono ancora vantaggi di grande importanza della trazione elettrica una diminuzione notevole del peso e delle dimensioni delle locomotive (i locomotori moderni pesano circa la metà a parità di potenza delle locomotive termiche), la migliore adattabilità alle condizioni di traffico (avendosi quasi uniformità di rendimento sia nelle piccole che nelle grandi potenze), una forte capacità di sovraccarico con maggiore osservanza quindi degli orari in caso di fermate accidentali, l'attitudine dei motori elettrici a sviluppare il momento massimo a velocità disparate e quello di poter funzionare da freni potenti con possibilità anche di ricupero dell'energia; la riduzione di sforzi anormali sull'armamento, la diminuzione della possibilità di slittamento soprattutto in galleria, la simmetria longitudinale che permette la marcia nei due sensi con facilità, il risparmio di acqua e la diminuzione del materiale di riserva. L'assenza di fumo poi in alcuni casi basterebbe a giustificare da sola l'adozione della trazione elettrica.

In conclusione, quindi, sulle linee a traffico intenso dove le spese d'impianto e d'esercizio incidono meno sul costo unitario del trasporto, e su linee a forti pendenze, con grandi consumi unitari di carbone, in ferrovie a lunghe e frequenti gallerie, dov'è possibile conseguire un miglior sfruttamento dei sotterranei, la trazione elettrica è assolutamente da preferirsi a quella a vapore.

Vantaggi della trazione elettrica ai giorni nostri

La trazione elettrica presenta una serie di vantaggi tecnici ed economici, che si possono così sintetizzare:

- ? grande capacità di sovraccarico dei motori elettrici, e quindi dei mezzi di trazione;
- ? possibilità di installare a bordo delle locomotive e delle elettromotrici elevate potenze unitarie;
- ? aumento della massa dei convogli rimorchiati dalle locomotive e della velocità di marcia;
- ? aumento della potenzialità delle linee;
- ? possibilità di utilizzare nelle centrali elettriche le forme di energia più diverse (energia idraulica, combustibili di vari tipi, energia nucleare);
- ? economia d'esercizio;
- ? assenza di gas di scarico, particolarmente nocivi nei percorsi in gallerie, e riduzione della rumorosità.

Costi

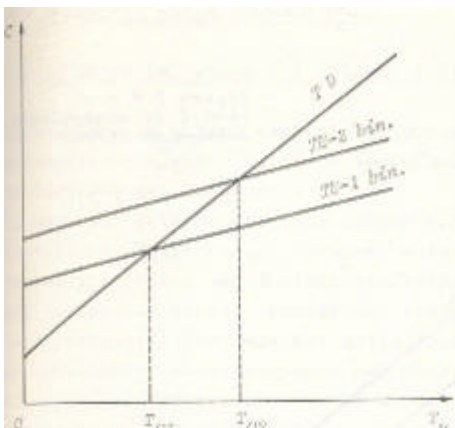
Il problema energetico

I trasporti terrestri assorbono una quota di energia inferiore rispetto all'industria ed agli impieghi domestici, ma non trascurabile; di questa energia il 94% va ai mezzi stradali e solo il 6% a quelli ferroviari.

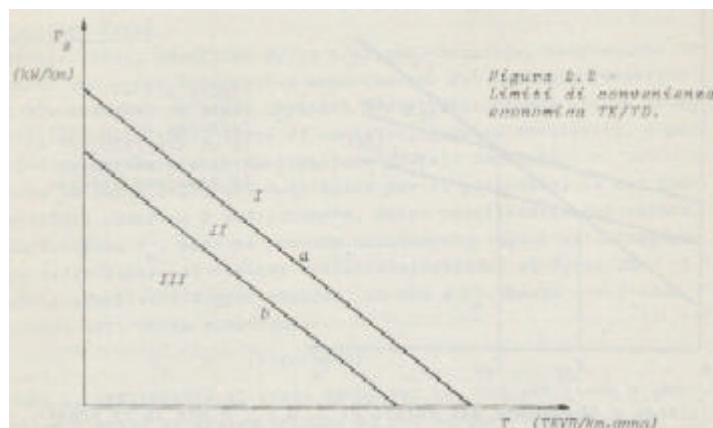
La strada ferrata presenta un consumo riferito alla somma tara + carico più ridotto rispetto al trasporto su strada, ma la tara dei veicoli per viaggiatore trasportato è molto più elevata.

Anche per quanto riguarda il trasporto merci, i consumi specifici sono sensibilmente superiori su strada.

La trazione elettrica offre notevoli possibilità per quanto attiene alla natura delle fonti primarie, attuali e future. In realtà l'energia elettrica è oggi prodotta prevalentemente da centrali termoelettriche tradizionali ad olio combustibile, per cui i trasporti sono legati ad un'unica fonte, il petrolio, ma, in prospettiva futura, per la produzione elettrica saranno utilizzate fonti di energia alternative. Sarà così possibile, con la trazione elettrica, rendere in parte il trasporto collettivo di viaggiatori e merci indipendente rispetto al petrolio.



A sinistra: costi di esercizio in funzione della quantità di traffico, per la trazione elettrica e la trazione diesel.



A destra: limiti di convenienza economica trazione elettrica/trazione diesel.

Altri costi di esercizio

I costi per il personale di condotta dei mezzi di trazione sono proporzionali al traffico. La trazione diesel e la trazione elettrica offrono la possibilità della condotta con un solo agente, con conseguente sensibile risparmio, ma in pratica questo provvedimento non è sempre adottato, per ragioni che non riguardano il campo tecnico.

Per quanto riguarda i costi per la manutenzione e la riparazione dei mezzi di trazione, la trazione elettrica consente una sensibile economia rispetto alla trazione diesel con un risparmio del 60-70%.

Le quote annue di interessi ed ammortamento del capitale investito per l'acquisto dei mezzi di trazione sono legati al costo iniziale ed alla vita media di questi. Il primo dipende dal numero e dalle caratteristiche delle locomotive che occorre acquistare in base al traffico sulla linea considerata.

Altri elementi da considerare sono:

- ? costo medio dell'unità di potenza installata a bordo dei mezzi di trazione;
- ? percentuale di unità mediamente ferme per riparazioni o per manutenzione;
- ? vita media delle locomotive: nelle valutazioni statistiche, si assume di solito pari a 35-40 anni per i mezzi elettrici e 30-35 anni per le parti meccaniche dei mezzi a trazione diesel; per questi la vita media dell'apparato motore termico si riduce a 15-20 anni.

Infine vi sono i costi, specifici della trazione elettrica, che comprendono l'onere annuo per interessi ed ammortamento del capitale investito nella costruzione degli impianti d'elettificazione (linee primarie, sottostazioni, linee di contatto, servizi ausiliari) e per il funzionamento e la manutenzione di tali impianti. Si possono considerare legati alla lunghezza della linea, al sistema d'elettificazione, al fatto che si abbia semplice o doppio binario: il costo annuo per km per le linee a semplice binario si aggira intorno al 60% di quello delle linee a doppio binario.

Apparecchiature e sistemi di comando

Circuito di trazione e comandi

Il circuito principale dei veicoli a trazione elettrica, percorso dalla corrente dei motori, comprende le apparecchiature necessarie per assicurare il funzionamento nelle diverse condizioni di marcia.

Il circuito di trazione può assumere diverse configurazioni, ognuna corrispondente ad una determinata condizione di funzionamento dei motori. Tali configurazioni, sono denominate posizioni di marcia e si susseguono normalmente secondo un ordine prestabilito. In particolare, esiste sempre una posizione iniziale di "zero", nella quale il circuito di trazione è aperto, cioè la corrente è interrotta.

Per passare da una posizione ad un'altra, è necessario stabilire oppure interrompere un certo numero di collegamenti nei diversi punti del circuito mediante opportuni apparecchi. Il comando di tali apparecchi può essere del tipo:

- ? *diretto*: agisce direttamente oppure attraverso una trasmissione meccanica sull'apparecchio. Viene attualmente usato solo per alcuni comandi e con particolari modalità di funzionamento, oppure nel caso in cui le tensioni e le potenze in gioco siano ridotte e gli organi da comandare direttamente accessibili.
- ? *indiretto*: l'operatore provoca la chiusura o l'apertura di circuiti di comando, alimentati normalmente a bassa tensione (fino a 100-110 V), i quali a loro volta agiscono sui dispositivi d'azionamento degli apparecchi.

Nei veicoli di tipo tradizionale il circuito di trazione comprende, oltre ai motori anche apparecchiature di tipo elettromeccanico. Nei veicoli tradizionali il comando della marcia consiste nel far assumere al circuito di trazione un certo numero di posizioni, per mezzo dei veicoli

elettromeccanici, mentre nei veicoli elettronici esso agisce sia su un certo numero (ovviamente più ridotto) di apparecchi elettromeccanici, per stabilire le necessarie configurazioni circuitali, sia sul convertitore di potenza.

I comandi elettrici vengono trasmessi molto facilmente a distanza e non esistono vincoli tra la posizione del posto di guida e quella degli organi da comandare. Si può quindi:

- ? comandare un determinato apparecchio o dispositivo alternativamente da due o più posti di guida, *comando a distanza* (esempio: da ciascuna delle due cabine di guida situate alle estremità di un veicolo bidirezionale, oppure da una cabina di guida situata in un altro veicolo accoppiato);
- ? comandare da una cabina di guida più motrici accoppiate, *comando multiplo*.

Il comando a distanza o multiplo è realizzato collegando elettricamente i veicoli fra loro per mezzo di accoppiatori, che stabiliscono la continuità elettrica di un certo numero di circuiti di comando.

Oltre al circuito di trazione ed ai relativi circuiti di comando, vi sono i circuiti ausiliari, alcuni dei quali d'importanza essenziale per la marcia del veicolo.

Cenni sui sistemi automatici di controllo del traffico

Le decelerazioni realizzabili nei veicoli su rotaia sono limitate dal basso valore del coefficiente d'aderenza tra ruote e rotaie; per questa ragione si attua sempre un comando della marcia "strumentale", basato cioè sul rispetto di segnali fissi, che comandano l'inizio della fase di frenatura.

La distanza fra un segnale che avvisa l'inizio della fase di arresto (di solito di colore giallo) ed il successivo segnale principale disposto a via impedita (di colore rosso) deve essere superiore, con un congruo margine, allo spazio di frenatura. Tale distanza con velocità dell'ordine di 140-160 km/h, supera il chilometro.

Le linee a doppio binario attrezzate con sistemi di blocco automatico sono suddivise in tante "sezioni"; il segnale di protezione di una sezione costituisce allora l'avviso del successivo.

Un treno in marcia, libera automaticamente, man mano che avanza, i segnali che lo proteggono alle spalle, che in condizioni normali (linea non occupata) sono disposti a via libera.

È da tenere presente che, invece, i segnali di ingresso nelle stazioni o di partenza dalle stesse o di protezione di bivi indicano normalmente via impedita; la loro apertura deve essere comandata dall'ente che dirige il traffico ed è ovviamente condizionata a tutte le condizioni di compatibilità con gli altri segnali ed itinerari.

Il rispetto dei segnali è affidato normalmente al macchinista, ed è quindi fondamentale che vi sia una sufficiente visibilità; un progresso importante è stato compiuto con i sistemi di ripetizione dei segnali in cabina, che, per mezzo di opportuni dispositivi installati a terra (emettitori) e nei veicoli (captatori), indicano visivamente al macchinista l'aspetto dei segnali. Un sistema del genere può essere reso più efficiente prevedendo il controllo automatico del rispetto, da parte del macchinista, delle segnalazioni di arresto o di rallentamento, con intervento della frenatura nel caso in cui tali prescrizioni non vengano osservate.

Un ulteriore passo è il controllo continuo della velocità, attuato con circuiti di binario a correnti opportunamente codificate, che forniscono al treno, in ogni singola sezione di blocco, le limitazioni di velocità da osservare e comandano automaticamente la frenatura non appena la velocità effettiva superi, per qualsiasi ragione, tali limitazioni.

Sono stati studiati anche sistemi di marcia completamente automatici; risulta tuttavia in ogni caso difficile, per un mezzo di trasporto pubblico di persone, rinunciare alla presenza a bordo del macchinista.

Questi sistemi di controllo sono indispensabili per le linee ad alta velocità, per le quali le distanze di arresto equivalgono a 2/3 sezioni normali di blocco.

Linee ad alta velocità ai giorni nostri

La Direttissima Firenze-Roma

Il 25 giugno 1970 c'è stata la posa ufficiale del primo palo per i lavori di costruzione della linea ad alta velocità Firenze-Roma. La Direttissima si propone come un sistema articolato a 4 binari – 2 per la linea lenta e 2 per la linea veloce – destinato a smaltire i crescenti flussi di traffico a medio e lungo percorso tra le stazioni di Firenze Santa Maria Novella e Roma Termini.

Il raggio minimo di curva è di 3'000 metri con una pendenza massima del 7,5-8‰ in galleria.

È interamente recintata con una rete metallica e non ci sono né passaggi a livello né attraversamenti a raso da parte di altre linee ferroviarie. La linea è armata con rotaie tipo UIC 60 posate su traverse di cemento armato precompresso; la massicciata, che ha uno spessore minimo di 350 mm, è costituita da pietrisco di roccia basaltica.

La Direttissima è alimentata tutt'oggi in corrente continua a 3'000 V con impianti già predisposti per il passaggio a 6'000 V. Ogni 16 km c'è una sottostazione elettrica di trasformazione e conversione alimentate da una tensione di 130 kV; esse garantiscono un'elevata potenzialità di traffico con una caduta massima di tensione del 15%. Tutti gli impianti sono telecomandati e sono provvisti di un circuito chiuso di sorveglianza con telecamere; hanno una potenza nominale di 5400 kW e offrono la possibilità di sovraccargarli del 100% per un periodo di tempo di 2 ore.



Un ETR500 in piena corsa nei pressi di Arezzo

La linea di contatto è ancorata su portali a traliccio ed è costituita da 2 fili sagomati, affiancati e direttamente pendinati ad un'unica corda in rame elettrolitico crudo aventi ognuno sezione di 150 mm². I sostegni a portale hanno lo scopo di assorbire le forti sollecitazioni provocate dal passaggio di veicoli ad alta velocità e di ridurre le propagazioni delle vibrazioni verso il terreno. Tale struttura è ideale per la posa delle protezioni contro i fulmini.

La linea veloce si interseca con la linea lenta in 10 punti, chiamati interconnessioni; le interconnessioni sono dei punti di scambio che permettono ad un qualsiasi convoglio di entrare oppure uscire dalla linea veloce ed immettersi nella linea lenta e viceversa; sono dotati di deviatori che permettono una velocità massima di 100 km/h. Vi sono inoltre 13 posti di comunicazione, uno ogni 16 km, che permettono di eseguire dei sorpassi in linea (anche se in realtà sono molto rari) o cambi di binario a una velocità massima di 160 km/h grazie a particolari deviatori con ramo deviato di 3'000 m; tali posti di comunicazione sono inoltre attrezzati per ricoverare i mezzi di manutenzione della linea.



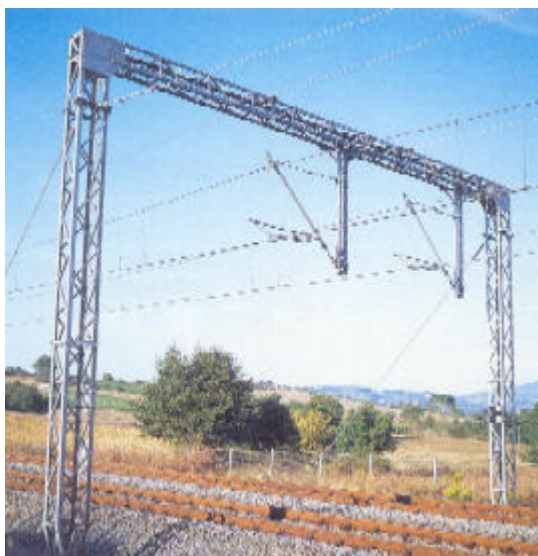
Un ETR500 in piena corsa sulla Direttissima nei pressi di Chiusi

Il traffico di entrambe le linee della Direttissima – linea lenta e veloce – è regolato da un posto centrale a Roma Termini dove risiede il Dirigente Centrale Operativo (DCO) che ha costantemente sotto controllo l'andamento del traffico. Gli impianti di sicurezza sono inoltre completamente centralizzati e telecomandati del tipo a comandi d'itinerario (ACEI = Apparato a Comando Elettrico d'itinerario).

Su tutta la linea ci sono:

- ? 42 gallerie per una lunghezza di 71 km, pari a circa il 30% della lunghezza dell'intera linea;
- ? 65 viadotti di lunghezza compresa tra 1'000 e 5'000 m.

Degno di nota è il viadotto Paglia, nei pressi di Orvieto, che con i suoi 5'375 m di lunghezza è uno dei più lunghi viadotti ferroviari del mondo: è costituito da 205 campate da 25 m e 5 arcate da 50 m l'una; ogni pilastro è stato rinforzato con pali di cemento armato e se tutti questi pali venissero allineati si otterrebbe una lunghezza di ben 50 km!



A sinistra: l'impiego dei particolari portali ha lo scopo di assorbire le sollecitazioni prodotte da velocità fino a 300 km/h

A destra: un'intersezione tra la linea lenta (in basso) e quella veloce (in alto) della Direttissima, nei pressi di Chiusi

La prima tratta Settebagni-Città della Pieve, fu inaugurata il 24 febbraio 1977; nel settembre del 1985 viene inaugurata la sezione Città della Pieve-Arezzo sud di lunghezza di 51 km; nel maggio del 1986 viene inaugurata la tratta Rovezzano-Figline Valdarno di 20 km; nell'estate del 1990 viene inaugurata la tratta Arezzo Sud-Valdarno Sud di circa 32 km; nel 1992 viene inaugurata l'ultima tratta,

la Figline-Valdarno Sud, utilizzata prima dell'apertura per prove ad alta velocità fino a 300 km/h in previsione delle nuove linee ad alta velocità.

Dal 1977 al 1985 si sono alternati nell'esercizio i TEE interni, ALe 601 A.V., ETR220 A.V. e per un breve periodo anche l'ETR401 in servizio Roma-Ancona, impostati a 180 km/h. Nell'estate del 1985 viene istituita la prima coppia di rapidi con velocità massima di 200 km/h grazie all'adozione della ripetizione segnali a 9 codici. Nel 1986 hanno incominciato a fare la loro comparsa anche i treni InterCity.

La linea francese del TGV

Il 24 marzo del 1972 è la data forse più importante per la storia del TGV – Train Gran Vitesse – e per le SNCF: il primo prototipo del TGV – TGV 001 – usciva dalle officine meccaniche Alstom-Atlantique per iniziare le prime prove di velocità che qualche mese più tardi si concretizzavano in una corsa a 318 km/h.



Il TGV 001 con motori a turbina, che nel 1972 superò la barriera dei 300 km/h!

Le linee dove sfrecciano i TGV sono linee esclusivamente riservate al traffico passeggero ed a convogli marcianti ad alta velocità, elettrificate a 25 kV tensione alternata monofase a frequenza industriale 50 Hz: sono inoltre dotate di infrastrutture che non si distaccano da quelle di una linea classica: rotaie interamente saldate di tipo UIC 60, traverse in cemento armato, massicciata alta e raggio minimo di curva di 4'000 m; non esistono passaggi a livello che intersecano la linea. La presenza di poche gallerie sul percorso ha permesso un abbattimento dei costi con una riduzione del 20-30%; le rampe, anche se di 35 ‰, non rappresentano un problema per l'elevata potenza dei TGV.

Anche l'impianto che regola la circolazione dei treni è completamente nuovo e non si basa più sul segnalamento luminoso tradizionale: tutte le informazioni relative alla marcia dei convogli vengono trasmesse da circuiti e ricevute da captatori fissi installati su ogni motrice, questi captatori sono interfacciati nella cabina di guida della motrice stessa su appositi monitor: il macchinista viene avvisato in anticipo su come regolare la velocità. Ogni azione del macchinista viene inoltre controllata da un dispositivo di vigilanza automatica. L'equipaggiamento radio-telefonico permette allo stesso di essere in costante comunicazione con il posto centrale di regolazione del traffico lungo la linea.



Un TGV Paris Sud-Est fotografato a Antibes

Alcune linee del TGV: Parigi-Les Mans, Parigi-Tours, Parigi-Rennes, Parigi-Nantes, Parigi-Bordeaux, Parigi-Lione, Parigi-Marsiglia, Parigi-La Rochelle, Parigi-Bruxelles.

Nota particolare: alle ore 10 e 6 minuti del 18 maggio 1990, sulla linea Parigi-Bordeaux, il treno TGV-A numero 325 attraversava il viadotto sulla Loira, tra Courtalain e Calais alla velocità di 515,3 km/h, con i quali si superarono i primati stabiliti nei mesi precedenti. Questo treno, una versione speciale del treno che prestava servizio commerciale, era composto da 5 vagoni, 2 di questi automotrici. I suoi componenti, come quelli degli altri TGV, furono costruiti in modo tale che potesse superare senza problemi i 300 km/h. Con questo record ottenuto dopo sei mesi di preparativi, il TGV-A battè quello stabilito precedentemente dal TGV Sud-Est.



Il TGV-Atlantique 325, il treno del record a 515,3 km/h!



Un TGV-Atlantique lanciato a 300 km/h sulla Parigi-Les Mans

La linea tedesca dell'ICE

Il progetto tedesco per l'Alta Velocità viene avviato nel 1972 dal Ministero Federale per la Ricerca e la Tecnologia. Nel 1973 su un tratto sperimentale di 28 km sulla linea Hannover-Hamm, veniva realizzato un vasto programma di studi con velocità fino a 250 km/h. Dal 1973 vennero eseguite alcune prove ad alta velocità con convolgi preparati appositamente per tali prove, mentre dall'inizio degli anni '80 furono costruiti due elettromotrici prototipo, con lo scopo di approfondire il problema dell'interazione veicolo-via.



Una corsa prova delle motrici dell'ICE-H alimentate dalla carrozza misure

Si aprì così la strada all'InterCity Experimental, futuro ICE/V, composto da due locomotive, una carrozza laboratorio e 5 carrozze dimostrative con diversi arredamenti diversi. Il convoglio aveva come obiettivi lo studio dell'elevazione della velocità da 250 km/h a 300 km/h con punte in rettilineo fino a 350 km/h ed una capienza di circa 400 passeggeri. Il 6 settembre del 1982 si formalizzò la prima commessa ICE. Nel novembre del 1985 venne superato per la prima volta il limite di 300 km/h, cui susseguirono altri records.



L'ICE-H in piena corsa verso Stoccarda, fotografato nei pressi di Hambrücken

La linea Hannover-Wurzburg è lunga circa 300 km con pendenza massime del 13‰ con raggio minimo di curvatura di 7'000 m e velocità massima di 250 km/h. La linea Mannheim-Stoccarda è lunga circa 100 km, con una pendenza massima del 12,5‰ e raggio di curvatura e velocità massima analoghi alla Hannover-Wurzburg. Un'altra linea molto importante è la Monaco-Amburgo, entrata in esercizio nel giugno del 1990.

La linea spagnola e l'AVE

Il progetto dell'alta velocità spagnola ha preso il via nell'ottobre del 1986, quando il ministro dei trasporti spagnolo ha comunicato la decisione del governo di destinare molti fondi alla costruzione di una nuova rete ferroviaria destinata all'alta velocità con scartamento 1'435 mm. L'inaugurazione del servizio ad alta velocità ferroviaria è avvenuto nell'aprile del 1992.



A sinistra: coppia di AVE, i treni spagnoli ad alta velocità.

A destra: il Talgo, treno di qualità delle ferrovie spagnole

I lavori per l'alta velocità sono iniziati con la costruzione della Siviglia-Madrid, lunga 470 km, che andava ad affiancarsi nel tratto iniziale alla già esistente Siviglia-Cordova. La conformazione dei territori ha richiesto un considerevole impegno per la realizzazione delle opere d'arte: 31 viadotti e 17 gallerie. Particolare importanza è stata data al rispetto ambientale: per l'inquinamento acustico sono state utilizzate delle barriere fonoassorbenti, soprattutto in prossimità dei centri urbani. Il programma innovativo della Renfe si è concluso nel 1997 con il raccordo alla linea francese a Port Bou e l'estensione del servizio Alta Velocità fino a Barcellona.

La linea giapponese e lo SHINKANSEN

La prima decisione di costruire linee ad alta velocità in Giappone è stata presa negli anni '50 dalla IGR - Imperial Government Railways - con la decisione di costruire una linea ad alta velocità con scartamento di 1435 mm che colleghi Tokyo a Osaka. Iniziò così l'epoca dello Shinkansen, "Nuova Ferrovia". Nel marzo del '63 il primo Shinkansen sperimentale aveva superato i 250 km/h, prestazione notevole considerando l'epoca; nell'ottobre del '64 viene inaugurata la prima linea ad alta velocità del mondo, la Tokyo-Osaka, cui fa seguito nel 1973 la linea Tokaido - dove Osaka - Hakata, dove si superavano i 300 km/h. Nel 1979 venne inaugurata la linea Tohoku (da Tokyo in direzione nord). Da quell'epoca fino ad oggi la rete giapponese è stata in continua espansione, fino ad arrivare agli odierni oltre 2'000 km.

Del treno "Shinkansen" ne esistono diverse serie, partendo dalla prima, serie 000, passando per le altre serie 100, 200, 300, 400, differenti per potenze e velocità di esercizio.



A sinistra: Shinkansen serie 200

A destra: Shinkansen serie 300



In alto a sinistra: Shinkansen serie 400

In alto a destra: Shinkansen serie 000

In basso: Shinkansen serie 100

L'Eurotunnel

Il 1 dicembre 1990 è avvenuto il completamento dei lavori con il congiungimento dei due fronti di scavo. L'entrata in servizio parziale è avvenuta nel giugno del 1993 (15 giugno 1993), con una distanza di circa 30' da terminal a terminal per il collegamento della Francia con l'Inghilterra. Nei primi mesi del 1994 è entrato in funzione il servizio commerciale. Pur non essendo il tunnel un'opera realizzata espressamente per l'alta velocità - la velocità massima ammessa è di 160 km/h - essa riveste un ruolo molto importante all'interno di quella che è la rete A.V. europea.

Il tunnel è composto da 2 gallerie, con sezione di 7.6 m² ed una galleria di servizio di sezione di 4.8 m²; la lunghezza totale è di 49.4 km, 38 dei quali si sviluppano sul fondo marino protetti da uno strato composto da 20 a 30 m di solido ed impermeabile gesso marnoso azzurro. Il livello di inabissamento del piano binari è di 1'000 m dalla superficie del Canale e di 40 m dal fondo marino.

I terminali sono a Coquelles, per la Francia, ed a Folkestone, per l'Inghilterra.

L'Eurotunnel è percorso da treni come il TGV francese, dall'Eurostar e dai treni navetta per il trasporto delle auto. L'Eurostar è un particolare treno ad alta velocità, che può essere alimentato a 3 tensioni diverse, ed adatto a circolare sulla linea inglese; è un convoglio studiato in tutti i particolari per garantire massima affidabilità e sicurezza; nel caso di guasto a una delle 2 motrici, il treno può continuare la corsa con metà dei vagoni e la motrice funzionante.

I treni navetta per il trasporto delle auto hanno questa composizione:

LOCOMOTIVA - VAGONE CARICATORE - 12 CARRI - 2 CARRI CARICATORI - 12 CARRI - 1 CARRO CARICATORE - LOCOMOTIVA, per un totale di 30 veicoli formanti un treno di circa 800 m, viaggianti alla velocità massima di 130 km/h.



Due Eurostar in sosta nel terminal di Folkestone

Le future linee ad alta velocità in Italia

Sulle nuove linee veloci Torino-Milano-Napoli è stato adottato il sistema di elettrificazione monofase a 25 kV c.a. 50 Hz, innovativo rispetto al sistema a 3'000 V corrente continua con il quale è elettrificata l'intera rete ferroviaria italiana. Sulle interconnessioni e sui nodi urbani la tensione di alimentazione risulta pari a 3'000 V.

Il sistema di alimentazione a 25 kV è il più utilizzato in Europa per linee veloci ad elevata capacità di traffico, consente di disporre della potenza necessaria a far viaggiare convogli frequenti e veloci in modo economicamente più vantaggioso rispetto ai 3'000 V. Allo stesso tempo:

- ? evita l'impiego all'interno delle Sottostazioni Elettriche Ferroviarie di apparecchiature di conversione da corrente alternata a continua;
- ? riduce il numero di Sottostazioni Elettriche lungo la linea;
- ? riduce le cadute di tensione lungo la linea;
- ? permette potenziamenti futuri della capacità della linea senza ulteriori interventi sugli impianti;
- ? facilita gli interventi di manutenzione e riparazione.

Il sistema di alimentazione sarà allacciato direttamente alla rete elettrica Enel a 380 kV e sarà in grado di assorbire carichi monofase con squilibri ridotti rispetto alla rete a 132 kV, senza arrecare disturbi alla distribuzione urbana di energia elettrica.

I locomotori dei treni - sia merci che passeggeri - che viaggeranno sulle nuove linee saranno politensione in modo da poter viaggiare anche sulla rete esistente e sulle linee dei confinanti Paesi europei. In Spagna, come da noi, l'Alta Velocità è alimentata a 25 kV c.a. e 3'000 V c.c., in Francia a 25 kV c.a. e 1'500 V c.c., mentre in Germania l'intera rete è alimentata a 15 kV c.a.

Per l'architettura del sistema di alimentazione delle nuove linee veloci si è scelto di adottare il sistema ad anello, ritenuto in grado di garantire allo stesso tempo la maggiore efficacia e sicurezza, il minore impatto sul territorio e la migliore salvaguardia della salute delle popolazioni residenti. Tale sistema prevede che le sottostazioni elettriche ferroviarie siano collegate fra di loro e che la prima e l'ultima sottostazione sia connessa a due centrali Enel. In alternativa si è valutata la possibilità di utilizzare il sistema a bastone, in cui ogni sottostazione è collegata ad una centrale della rete elettrica nazionale.

La scelta è caduta sulla struttura ad anello perché:

- ? in grado di garantire una riserva di linea in caso di guasto di una sottostazione ferroviaria;
- ? più economica del sistema a bastone che utilizza un numero doppio di trasformatori dedicati;
- ? dotata di minore impatto sul territorio in quanto può seguire il tracciato della linea ad Alta Velocità;
- ? non richiede la costruzione di altre stazioni Enel, comportando un risparmio oltre che economico anche in termini di occupazione del suolo.

La tipologia costruttiva adottata per gli elettrodotti a 132 kV è del *tipo aereo con sostegni a traliccio* a basso impatto ambientale. In ambito urbano, in limitati tratti particolarmente complessi dal punto di vista urbanistico o ambientale, è stata utilizzata la tipologia interrata.

Per le linee ad Alta Velocità, sono stati effettuati dei test per verificare i livelli di esposizione ai campi elettromagnetici, per mezzo di un modello, ipotizzando le condizioni più gravose di esercizio dal punto di vista dell'assorbimento di potenza elettrica.

Questi risultati sono stati poi raffrontati con i limiti previsti dalla normativa vigente in materia di esposizione ai campi elettrici e magnetici (DCPM del 23 aprile 1992) ed ai valori fissati dal CENELEC, l'organismo europeo deputato ad emettere la normativa in tema di impianti elettrici, che ha di recente emesso una nuova norma ancora al vaglio degli Stati membri.

La normativa italiana assume gli stessi limiti stabiliti dall'Organizzazione Mondiale della Sanità.

Tali limiti - riportati nella tabella seguente - sono distinti in due livelli a seconda che la durata dell'esposizione sia superiore alle 24 ore o sia limitata a poche ore al giorno.

Valori limite di campo elettromagnetico in base alla durata dell'esposizione:

Normativa	Campo elettrico [kV/m]		Campo magnetico [µT]	
	fino a 24 h al giorno	poche ore al giorno	fino a 24 h al giorno	poche ore al giorno
DCPM Italia	5	10	100	1'000
CENELEC	10	30	640	1'600

I risultati hanno confermato che i valori di esposizione al campo elettrico e magnetico sono largamente inferiori ai limiti indicati, non determinando situazioni di rischio né per la popolazione residente né per il passeggero a bordo del treno.

In particolare in prossimità della linea veloce risulta che a 2 m di altezza dal suolo nella zona sottostante l'elettrodotto il valore massimo del campo elettrico è di 3 kV/m, quello del campo magnetico è di 8 µT, mentre a 15 m dall'asse dell'elettrodotto (limite della fascia di asservimento) il campo magnetico è di 4 µT.

Da un calcolo realizzato all'interno delle carrozze alle condizioni di massimo traffico (circolazione su entrambi i binari con distanziamenti tra un treno e l'altro di circa tre minuti e mezzo), non esistono situazioni di rischio.

In vista della prossima emissione dei decreti attuativi relativi alla Legge 36/2001, che stabiliranno i nuovi limiti di esposizione ai campi EM, sono stati allestiti, con finanziamento TAV, due "siti prova" a Empoli (FI) e Castiglione del Lago, nei pressi di Chiusi (PG) per studiare le interferenze indotte dai campi elettrici e magnetici a bordo del treno e sugli impianti interferiti.

Sono state inoltre svolte da Trenitalia S.p.A., in collaborazione con l'Istituto Superiore della Sanità e per la Prevenzione e Sicurezza del lavoro, il Politecnico di Milano, e l'Università di studi di Genova, Napoli e Roma, campagne di misura finalizzate alla caratterizzazione dei livelli di esposizione a campi magnetici (5 Hz ÷ 10 kHz) rilevati a bordo di rotabili ferroviari.

Il nuovo sistema di controllo e comando

Per prima in Europa, l'Italia adotterà sulle nuove linee, l'ERTMS (European Railway Management System), il nuovo sistema di comando-controllo e distanziamento dei treni ideato a livello europeo per garantire l'interoperabilità ferroviaria, cioè la possibilità di far circolare sulle nuove linee treni di operatori di trasporto di diversa nazionalità in modo da aumentare la competitività del servizio offerto garantendo al contempo i più alti livelli di sicurezza. Il nuovo standard prevede l'uniformità dei messaggi e dei "mezzi" utilizzati per lo scambio delle informazioni relative al segnalamento tra impianti di terra e treni, messaggi e mezzi oggi diversificati da Paese a Paese. L'ERTMS, realizzato in Italia prevede di utilizzare quale mezzo per il dialogo terra-treno il sistema GSM Railway (basato sulla oramai consolidata tecnologia cellulare), tramite il quale i segnali trasmessi da terra - sotto la supervisione del macchinista - vengono recepiti direttamente dalle apparecchiature di bordo e tradotti in istruzioni di circolazione, distanziamento e frenata. Il sistema è caratterizzato da un'apparecchiatura centrale (il Radio Block Centre) che trasmette via radio con continuità a ciascun treno la velocità da rispettare in funzione sia della marcia dei treni che dei vincoli imposti dal tracciato o da eventuali rallentamenti temporanei. Nello stesso tempo il treno invia la sua posizione al Posto Centrale.

Sulle linee veloci italiane, l'insieme formato dagli impianti di segnalamento installati lungo i binari e dalle apparecchiature di bordo (che comprendono anche quelle «tradizionali» per consentire al treno di circolare anche sulle linee esistenti) consente il controllo costante della marcia del treno e l'intervento automatico della frenata solo in caso di errato comportamento del macchinista per fermare il treno prima di un punto pericoloso (sistema ATC).

L'Italia ha già iniziato nel 2001, la sperimentazione dei nuovi sistemi sul tratto della Direttissima tra Arezzo e Figline, cui seguirà nel 2003, una volta completata l'installazione degli impianti sulla nuova linea Roma-Napoli, la fase di test "sul campo" necessaria per affinare e calibrare, per la prima volta in Europa, il nuovo sistema su una linea operativa a tutti gli effetti.

Le nuove linee ferroviarie

Le linee ferroviarie ad alta velocità si sviluppano per oltre 1'100 km sulle principali direttrici del Paese: da Torino a Venezia e da Milano a Napoli. Attualmente sono:

- ? in costruzione le linee tra Torino, Milano e Napoli per circa 630 km e tra Padova e Mestre per 14 km;
- ? in progettazione le linee tra Milano e Padova e tra Genova e la rete padana per oltre 270 km;
- ? in corso di adeguamento i 250 km della Direttissima Firenze-Roma.

Nuove linee veloci sono allo studio verso la Calabria e la Sicilia, tra Messina e Palermo.

Linea Bologna-Firenze

La linea veloce Bologna-Firenze si articola su un percorso di 78.5 km ed interessa il territorio di 12 comuni, 6 in provincia di Bologna e 6 in provincia di Firenze. A causa della particolare complessità morfologica e dell'alta sensibilità ambientale delle zone attraversate (i comuni dell'Appennino emiliano e l'area del Mugello, in Toscana), si è deciso di minimizzarne l'impatto ambientale facendone passare la maggior parte (il 93% circa) in galleria. Una volta operativa, la linea consentirà un incremento pari al 108% dell'attuale offerta quotidiana di trasporto passeggeri e merci, e collegherà Bologna e Firenze in 30 min.



Linea Milano-Verona

La linea veloce Milano-Verona si sviluppa per una lunghezza di circa 112 km, attraversando un territorio che comprende 37 comuni lombardi e 5 veneti.

Prevede circa 24 km di interconnessioni con la rete tradizionale in corrispondenza di Treviglio e Brescia.



Linea Verona-Venezia

Per la linea veloce Verona-Venezia sono già stati approvati i 25 km da Padova a Mestre. Il resto del tracciato, lungo circa 75 km è ancora allo studio, affianca quasi interamente la tratta ferroviaria attuale.



Linea Milano-Genova

Il collegamento tra il porto di Genova e la rete ferroviaria padana sarà realizzato attraverso il Terzo Valico.

Il 30 settembre 2002 la Conferenza di Servizi Istruttoria - iniziata a dicembre 2000 - ha concluso i suoi lavori con l'individuazione di un'ipotesi di tracciato su cui verrà sviluppata la progettazione preliminare.



Bibliografia

- "Atti del congresso A.E.I. 1925, 1928"
- "Elettrotecnica 25 maggio 1919"
- "Impianti ferroviari, tecnica ed esercizio" - Lucio Mayer
- "La ferrovia nel 2000" - DueGi Editrice
- "La trazione elettrica sulle ferrovie italiane"
- "Macchine elettriche" seconda edizione - Mario Pezzi
- "Manuale Cremonese di Elettrotecnica" parte specialistica - Vol. I I I seconda edizione
- "Organizzazione e tecnica ferroviaria" - Giuseppe Vicuna
- "Sistemi elettrici per i trasporti, trazione elettrica" - Francesco Perticalori
- "Treni e trenini"