

# Azionamenti elettrici per la trazione ferroviaria

Ing. Antonino Oscar Di Tommaso

Università degli Studi di Palermo – DIEET  
(Dipartimento di Ingegneria Elettrica, Elettronica e delle  
Telecomunicazioni)

---

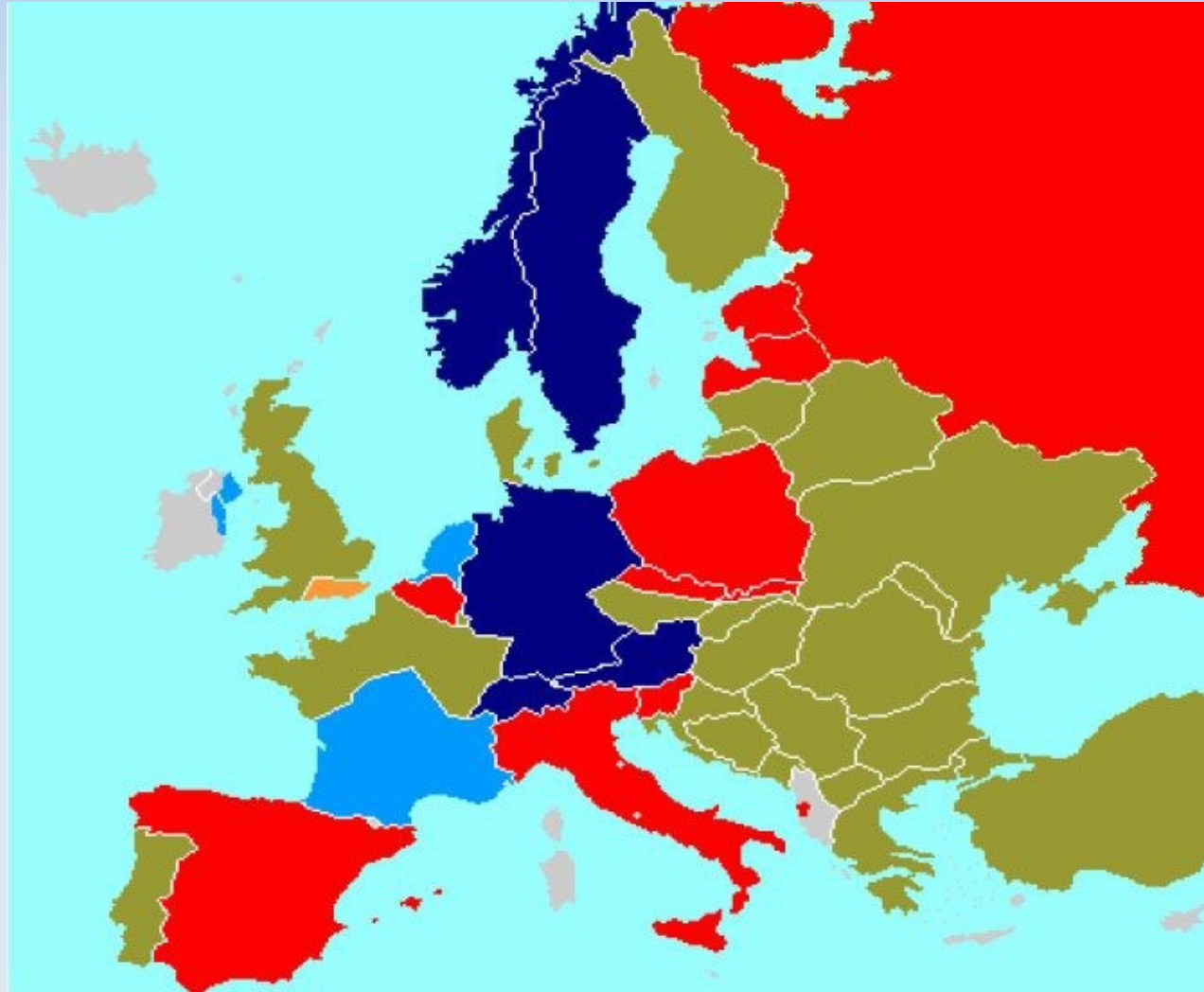
Ing. Calogero Petruzzella

# Sistema elettrico ferroviario europeo

Analizzando il sistema ferroviario europeo si possono evidenziare ben 5 differenti sistemi elettrici di alimentazione della rete, che sono:

- Corrente continua a 1.5 kV o 3 kV.
- Corrente alternata monofase a frequenza ferroviaria a 15 kV e frequenza di 16 e 2/3 Hz oppure a 25 kV a frequenza industriale di 50Hz.
- Corrente continua a 750V.

# Sistema elettrico ferroviario europeo



Palermo, 22 giugno 2011

# Sistema elettrico ferroviario italiano

1. i 3 kV in c.c. hanno limitato la velocità massima a 250 km/h.
2. Siccome le nuove tratte ad alta velocità/alta capacità prevedono che le velocità massime siano di 300 km/h o superiori;
3. si è deciso, dovendo realizzare ex novo l'infrastruttura, di adottare anche in Italia il sistema elettrico in corrente alternata monofase a frequenza industriale 25 kV e 50 Hz, come già in esercizio in altre nazioni europee, quali Francia e Spagna.

# Storia del sistema elettrico ferroviario italiano

- Il primo esperimento in Italia è del 1890, con l'attivazione della tranvia Firenze - Fiesole, prima linea a trazione elettrica aperta in Europa;
- Nel 1902 ebbe inizio l'esperimento in corrente trifase 3000 V, 15 Hz sulle linee Valtellinesi con l'intendimento di sostituire la trazione a vapore;
- 1913 - elettrificazione della linea dei Giovi
- 1927 (linea Roma – Sulmona) - sperimentazione linea elettrica a frequenza industriale a 10 kV.
- 1 marzo 1928 (linea Benevento – Foggia) sperimentazione linea elettrica in corrente continua 3 kV.
- Nel 1930 l'esito dell'esperimento sulla linea Benevento - Foggia, induce ad adottare la trazione elettrica a corrente continua a 3 kV per le ulteriori elettrificazioni.

# Storia del sistema elettrico ferroviario italiano

I vantaggi rispetto agli altri sistemi sperimentati in precedenza sono:

- Possibilità di utilizzare una linea di contatto unipolare (con ritorno attraverso i binari).
- Possibilità di utilizzare il motore a collettore con eccitazione serie, la cui caratteristica meccanica “elastica” si prestava in modo particolare per l’impiego nella trazione.

# Storia del sistema elettrico ferroviario italiano

- Dal 1932 si poteva percorrere l'intera tratta Napoli – Foggia tutta con la trazione elettrica a corrente continua a 3000 V;
- Nel contempo era nato l'ufficio studi delle ferrovie dello stato;
- Lo stesso l'ufficio studi delle ferrovie dello stato, si occupò della realizzazione della prima locomotiva elettrica a sei assi e sei motori
- Nasce, quindi, la locomotiva elettrica del gruppo E 626 a 3000 V in corrente continua, potenza di 2000 kW e velocità massima di 95 km/h.

# Storia del sistema elettrico ferroviario italiano

- si procede, poi, con la realizzazione di nuove tratte a 3 kV in corrente continua e con la riconversione delle tratte, precedentemente realizzate per la sperimentazione, con l'elettificazione a 3 kV in corrente continua:
- Infatti, nel 1934 iniziarono i lavori della Direttissima tra Bologna e Firenze;
- Seguono i lavori attorno all'area di Roma;
- I lavori si fermano durante la II guerra mondiale;
- Nel 1976 cessa l'ultimo servizio "a vapore" (Concludendo più di 75 anni di storia).



# Benefici della trazione elettricaferroviaria (TE )

La TE presenta notevoli vantaggi tecnici ed economici, tra i quali:

- 1) Grande capacità di sovraccarico dei motori elettrici e dei relativi mezzi di trazione;
- 2) Possibilità d'istallare sui mezzi (Locomotive ed Elettromotrici) elevate potenze;
- 3) Elevate prestazioni raggiungibili in tutti i campi d'impiego, nel trasporto passeggeri a frequenti fermate, sia in termini d'accelerazione e d'avviamento che in fase di decelerazione e frenatura;
- 4) Elevate prestazioni raggiungibili in tutti i campi d'impiego, nel trasporto merci, in termini di massa rimorchiabile e velocità di crociera;

# Benefici della trazione elettricaferroviaria (TE )

- 5) Possibilità di realizzare sistemi ad alta velocità (velocità  $> 250$  km/h);
- 6) Possibilità di utilizzare indirettamente diverse forme di energia: (energia idraulica, combustibili di vari tipi, fonti di energia rinnovabili quali eolica o solare, energia nucleare);
- 7) Economia d'esercizio;
- 8) Elevato rendimento;
- 9) Assenza di gas di scarico ed inquinamento atmosferico, particolarmente nocivi nei percorsi in galleria, e nei percorsi vicini ai centri urbani;
- 10) Riduzione della rumorosità, sia per il personale, che nei percorsi vicini ai centri urbani.

# Cosa succede nei paesi confinanti?



Problemi al confine specialmente per i treni ad alta velocità.

Necessità di utilizzare treni o locomotori "politensione" o "policorrente".

# Situazione attuale in Italia



linea convenzionale

22.854 km

linea AV-AC

1.355 km

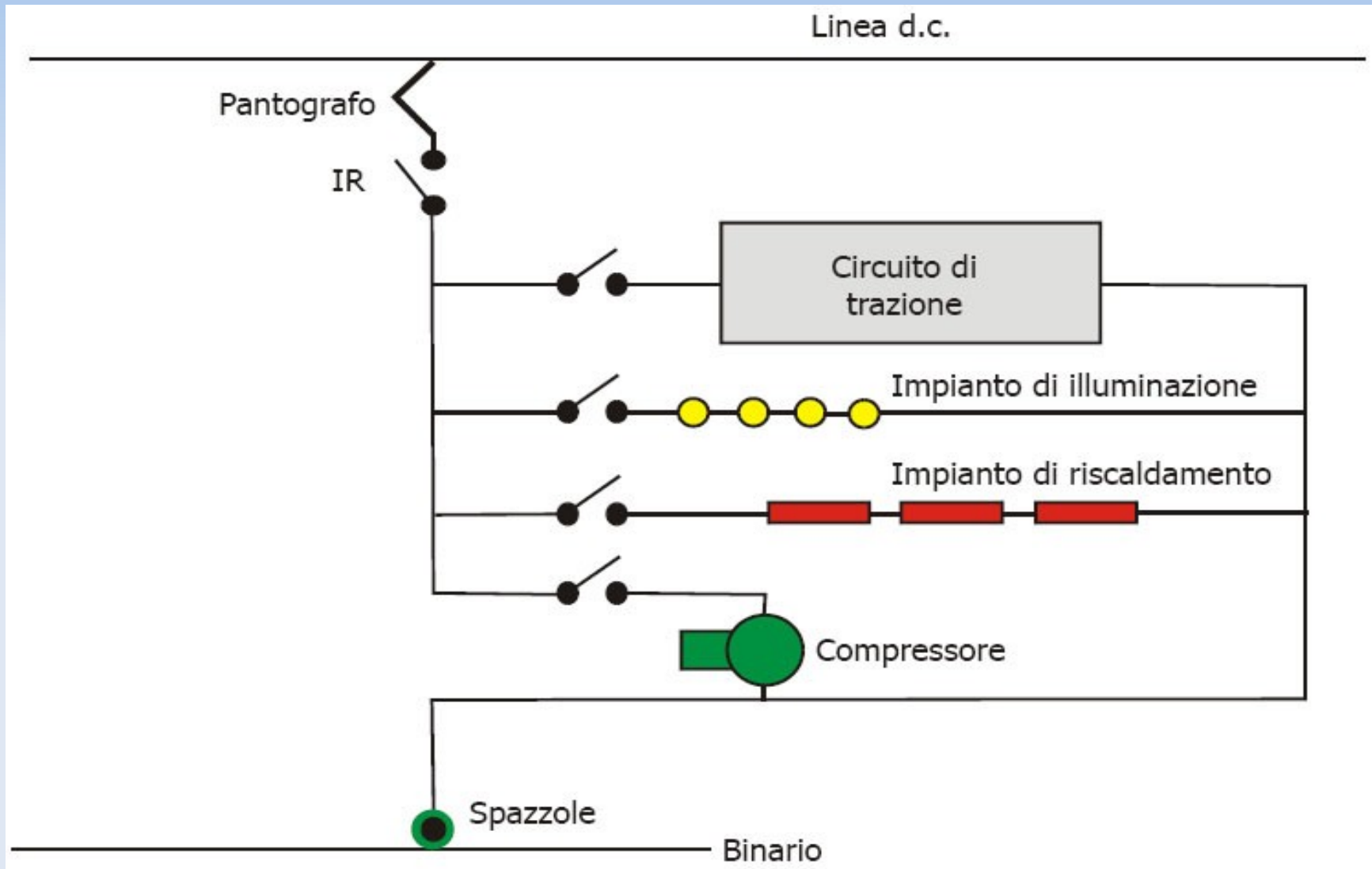
# Situazione attuale in Italia

|                     |           |
|---------------------|-----------|
| linea convenzionale | 22.854 km |
| linea AV-AC         | 1.355 km  |

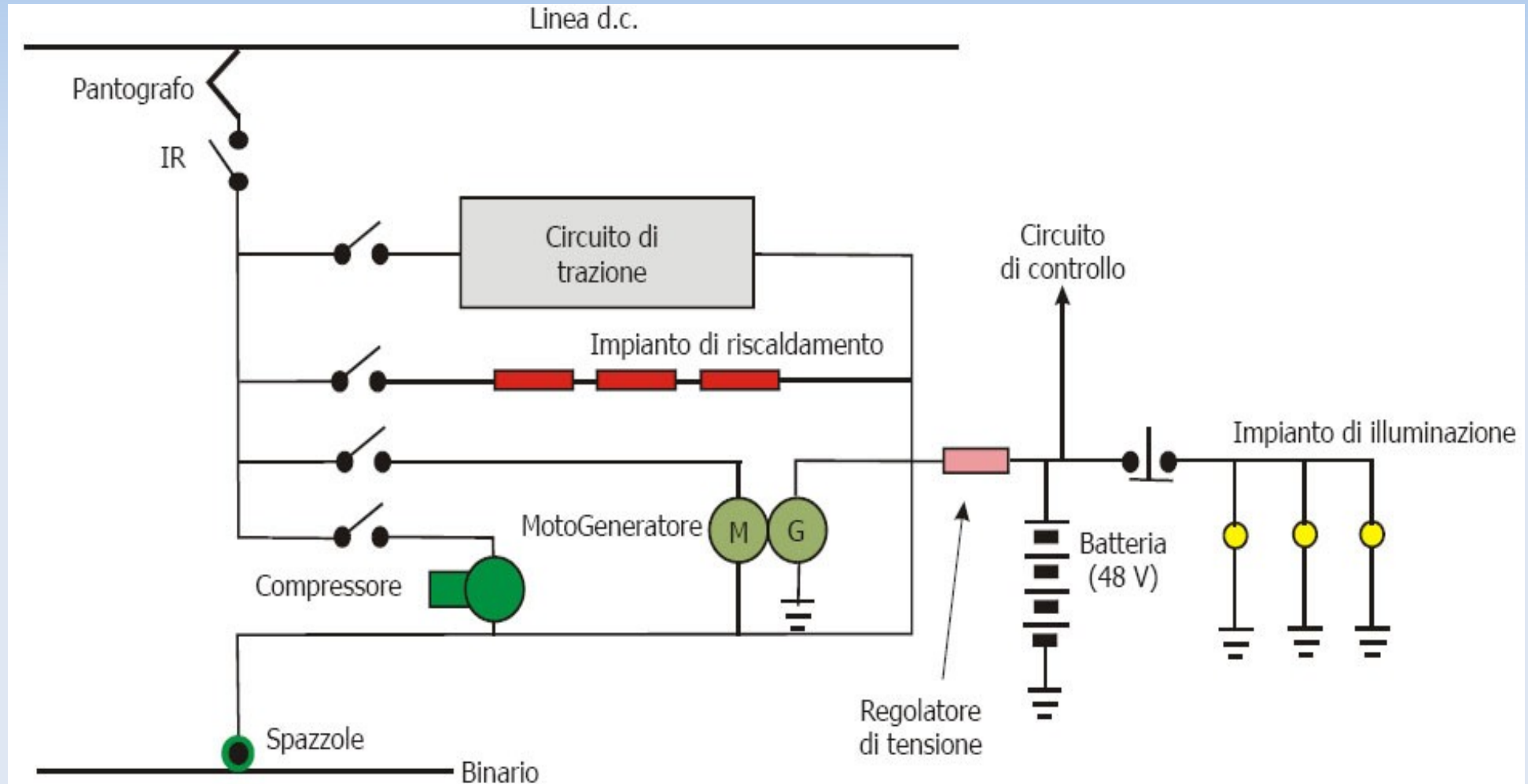


Palermo, 22 giugno 2011

# Evoluzione storica del sistema elettrico a bordo della locomotiva

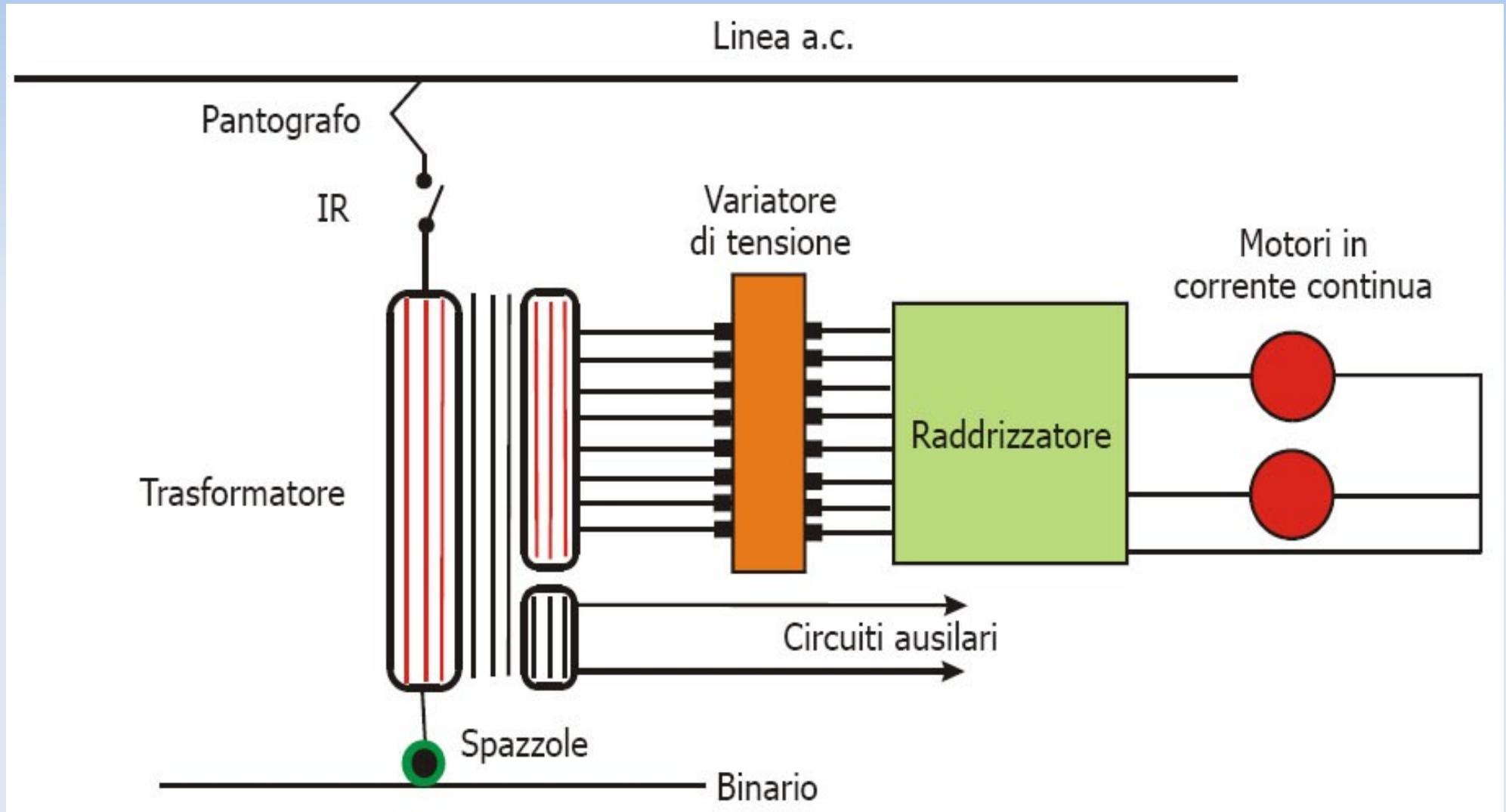


# Evoluzione storica del sistema elettrico a bordo della locomotiva



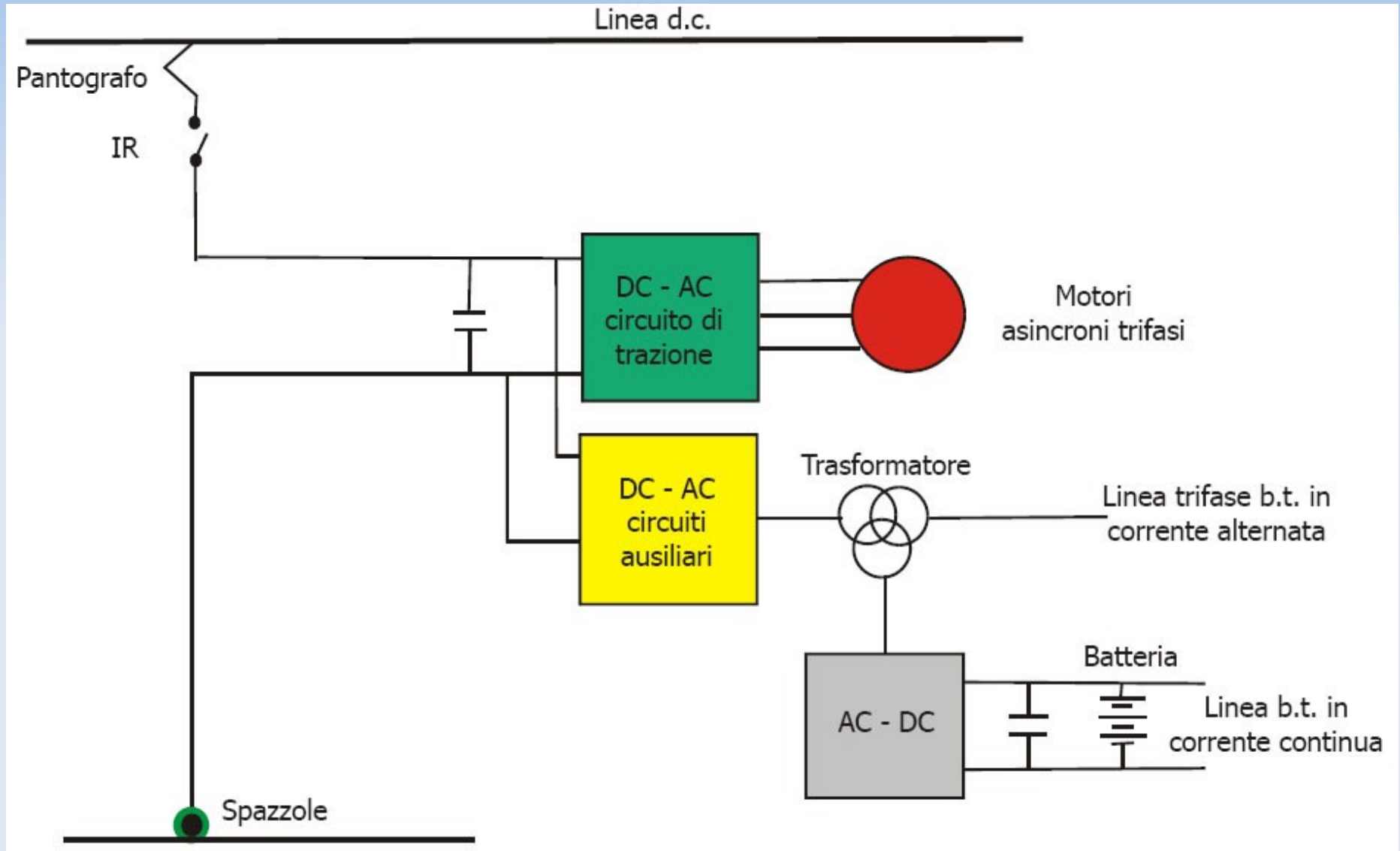


# Evoluzione storica del sistema elettrico a bordo della locomotiva

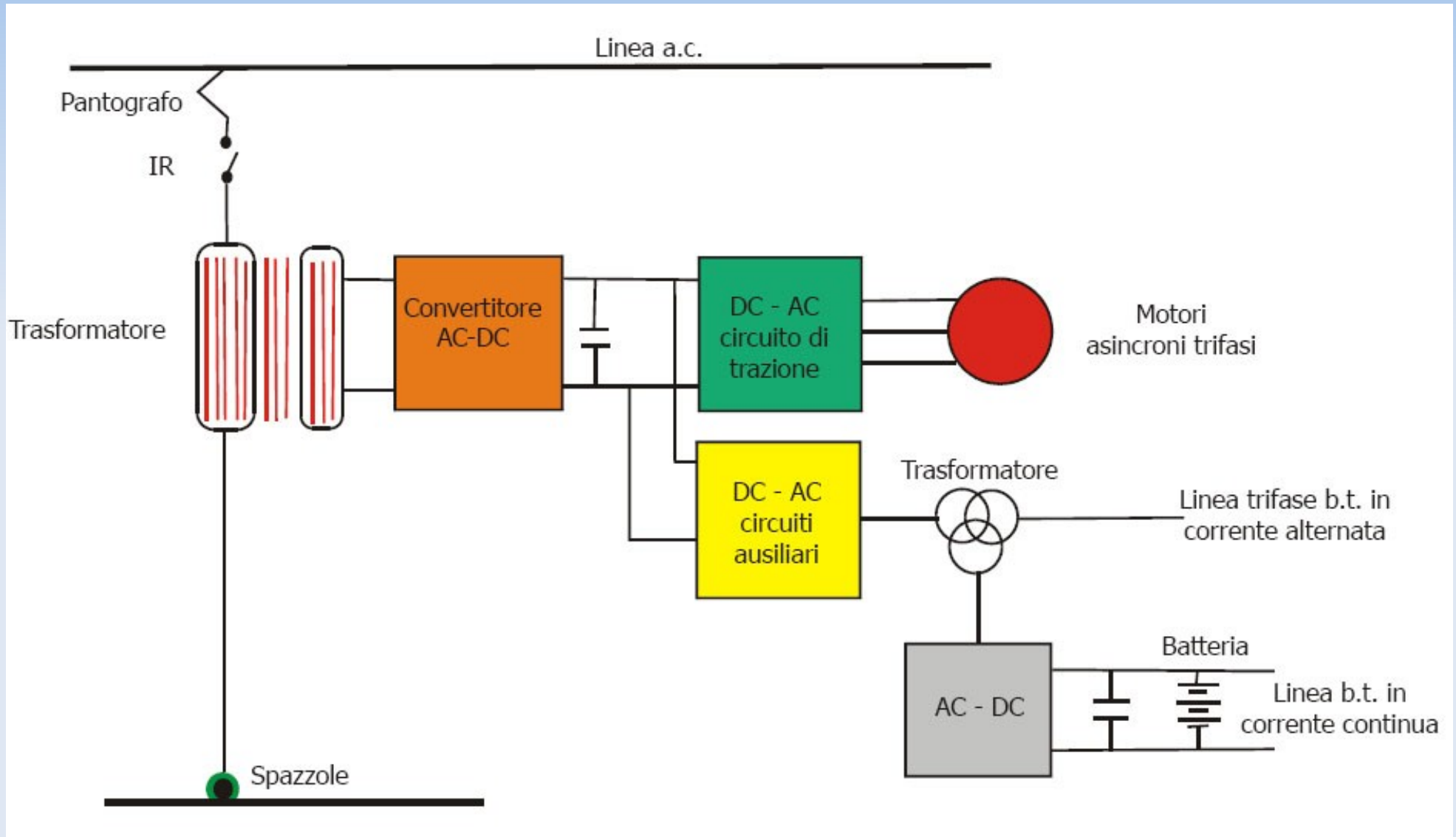




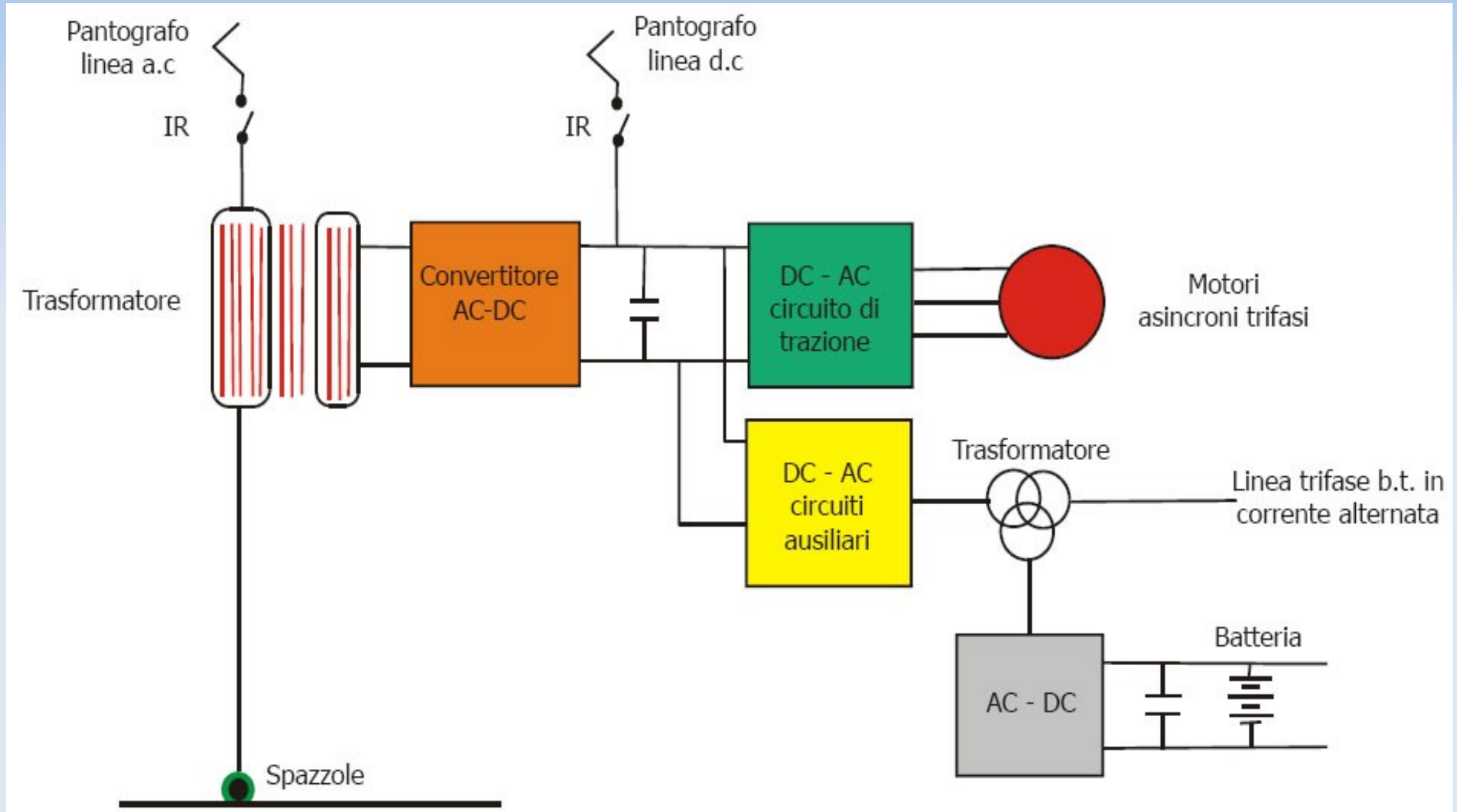
# Evoluzione storica del sistema elettrico a bordo della locomotiva



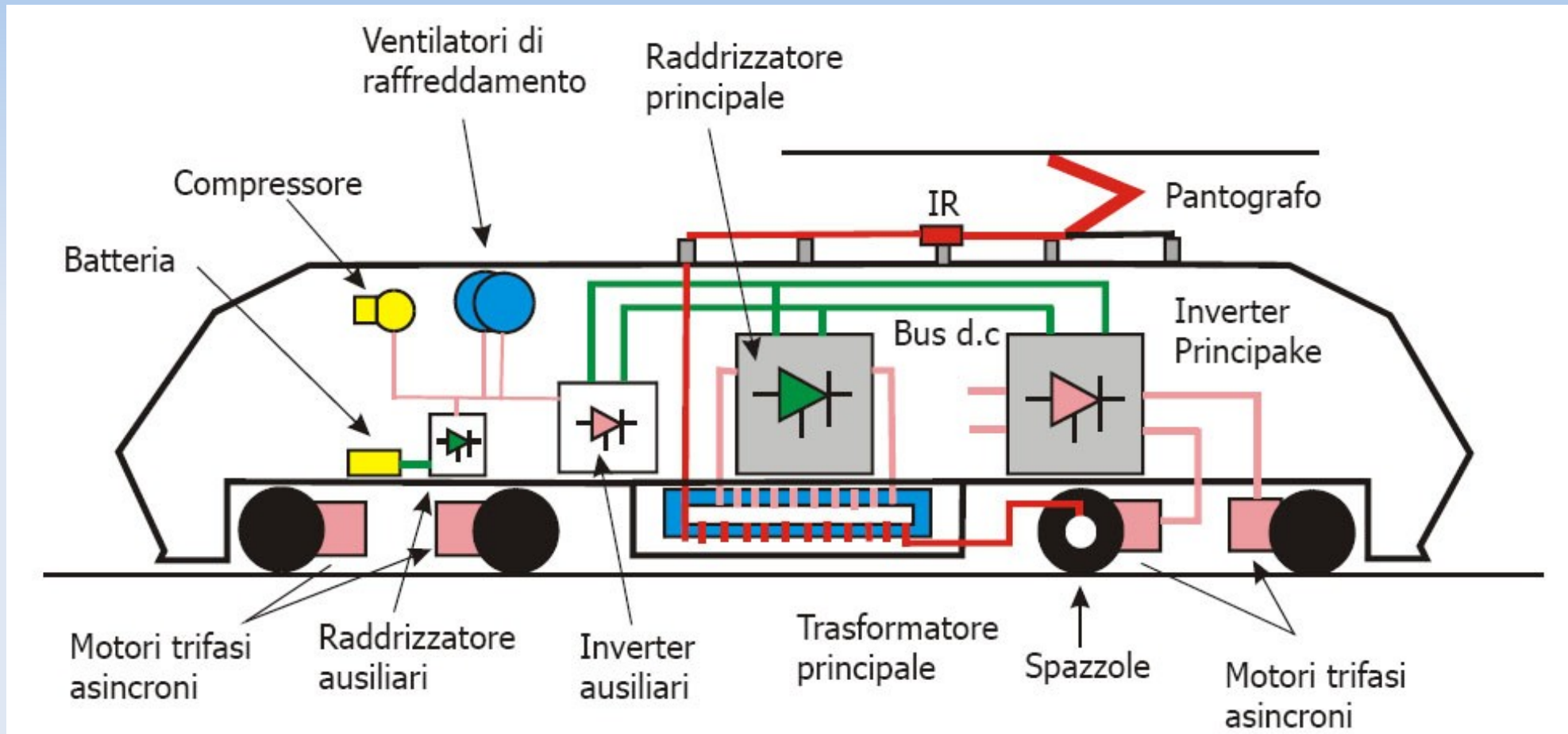
# Evoluzione storica del sistema elettrico a bordo della locomotiva



# Evoluzione storica del sistema elettrico a bordo della locomotiva

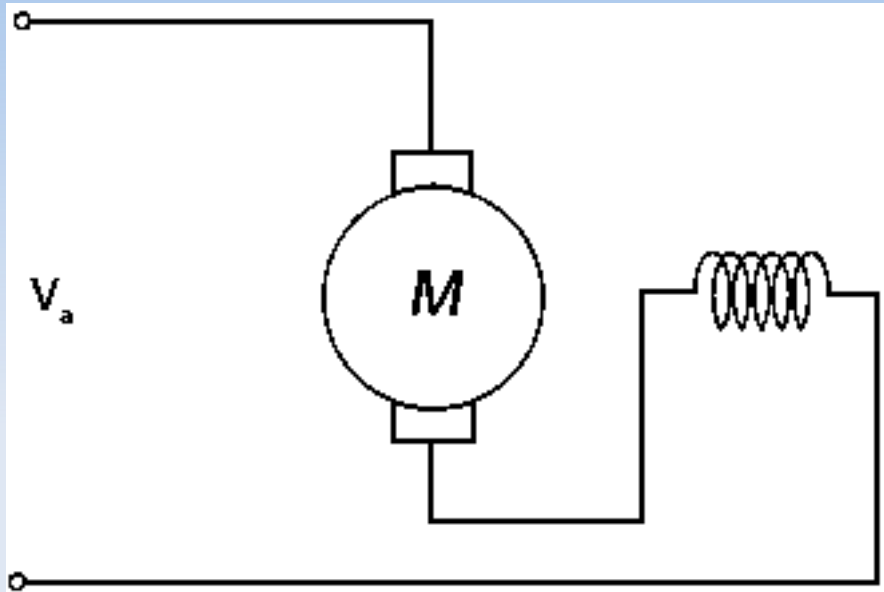


# Evoluzione storica del sistema elettrico a bordo della locomotiva



Schema a blocchi di una locomotiva moderna

# Azionamento elettrico con motore in c.c. con eccitazione in serie

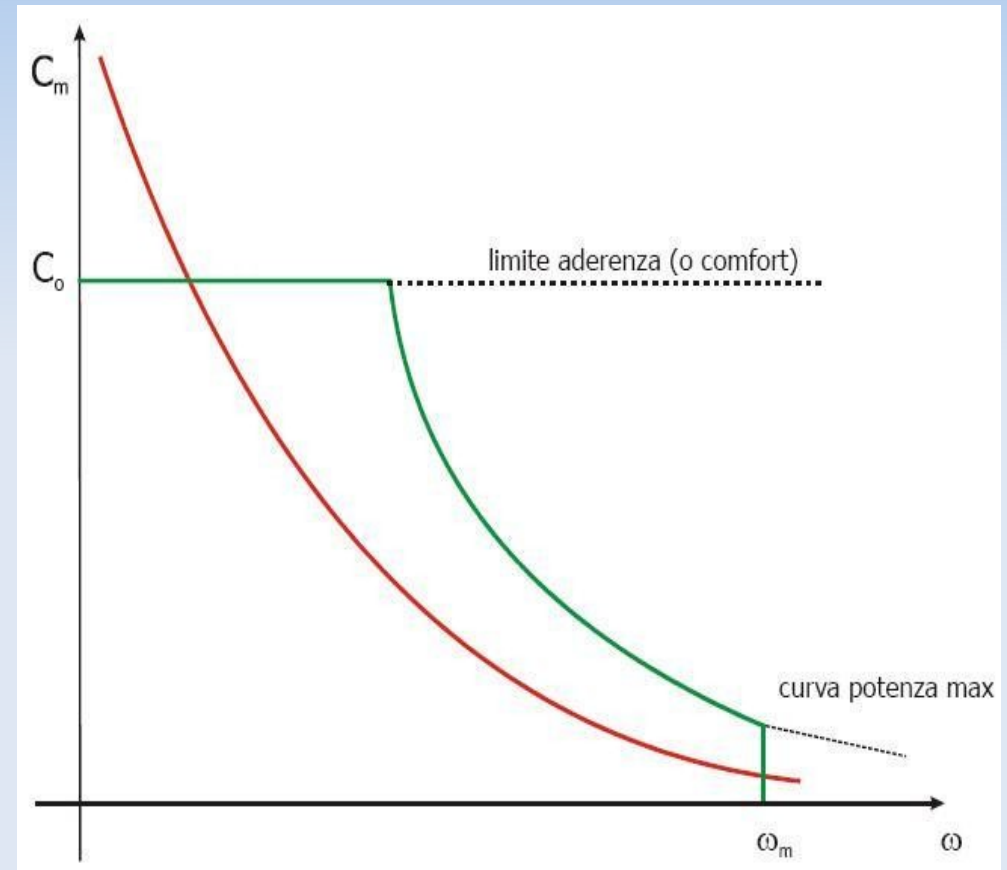


Schema elettrico

$$V_a = E + (R + r) I_a$$

$$C = k \varphi I_a$$

$$E = k \varphi \omega$$



Caratteristica meccanica

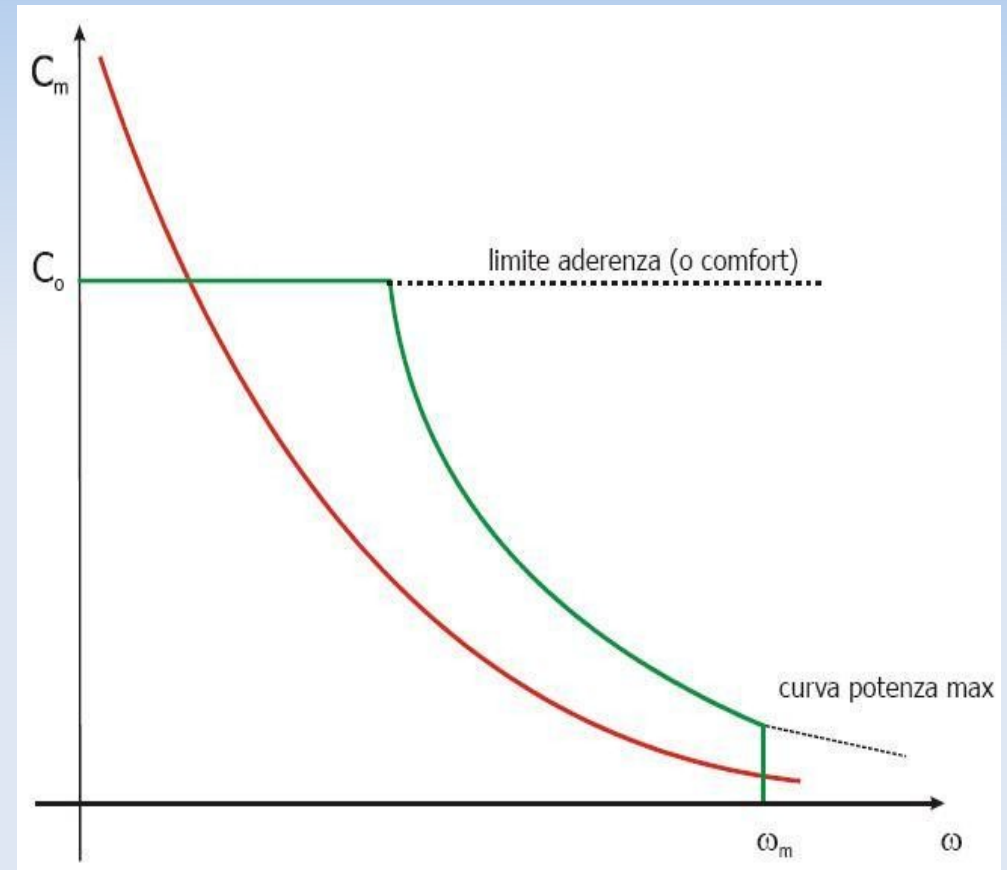
# Azionamento elettrico con motore in c.c. con eccitazione in serie

$$V_a = E + (R + r) I_a$$

$$C = k \varphi I_a$$

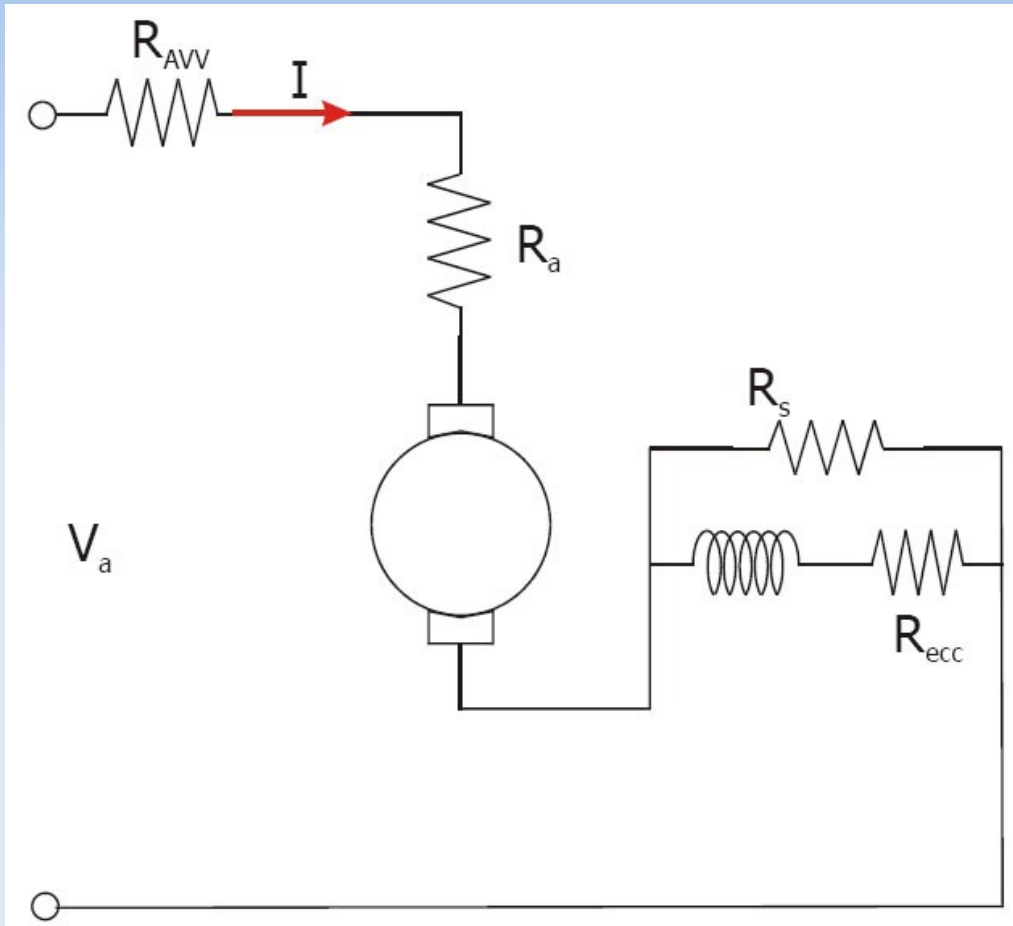
$$E = k \varphi \omega$$

$$C_m = k^2 \frac{V_a^2}{(R_a + k^2 \omega^2)^2}$$



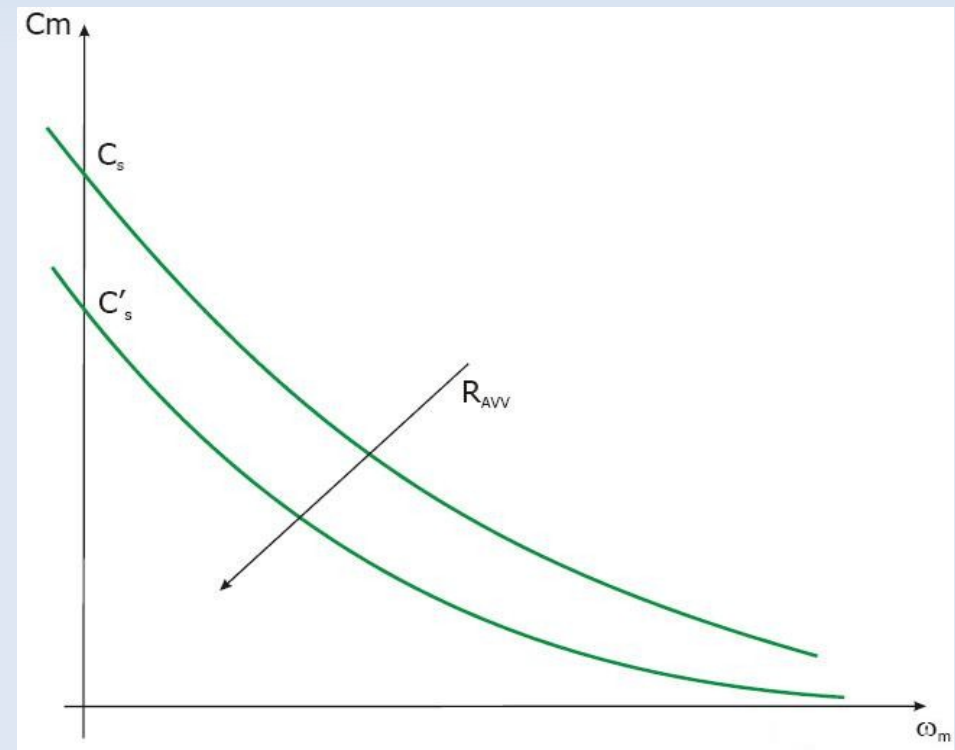
Caratteristica meccanica

# Avviamento reostatico di un motore in c.c. con eccitazione in serie

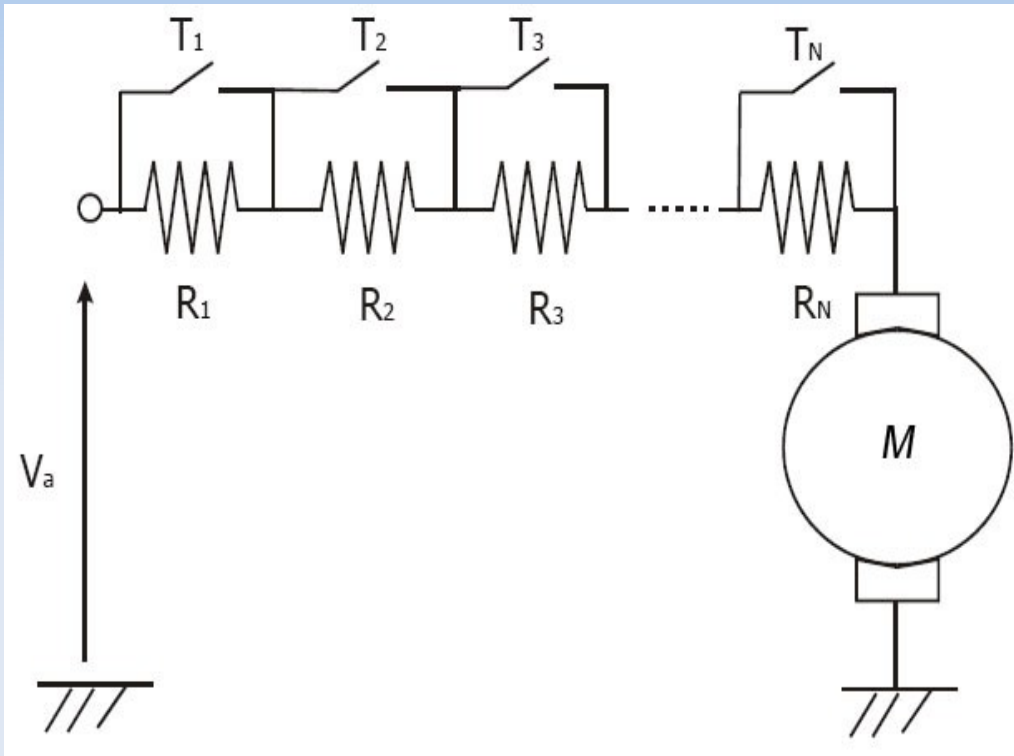


Schema elettrico dell'avviamento reostatico

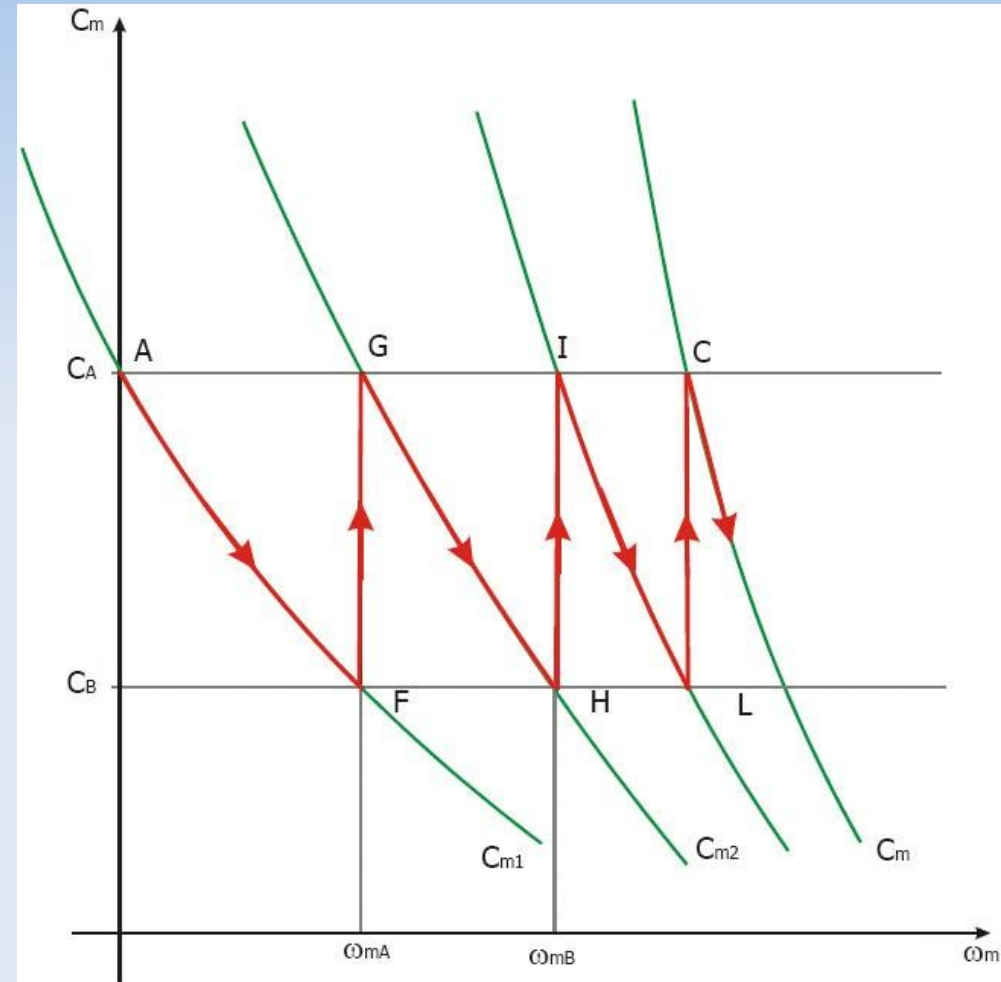
$$C_m = k^2 \frac{V_a^2}{(R_a + k^2 \omega^2)^2}$$



# Avviamento reostatico di un motore in c.c. con eccitazione in serie



Schema elettrico dell'avviamento reostatico con suddivisione dei reostati

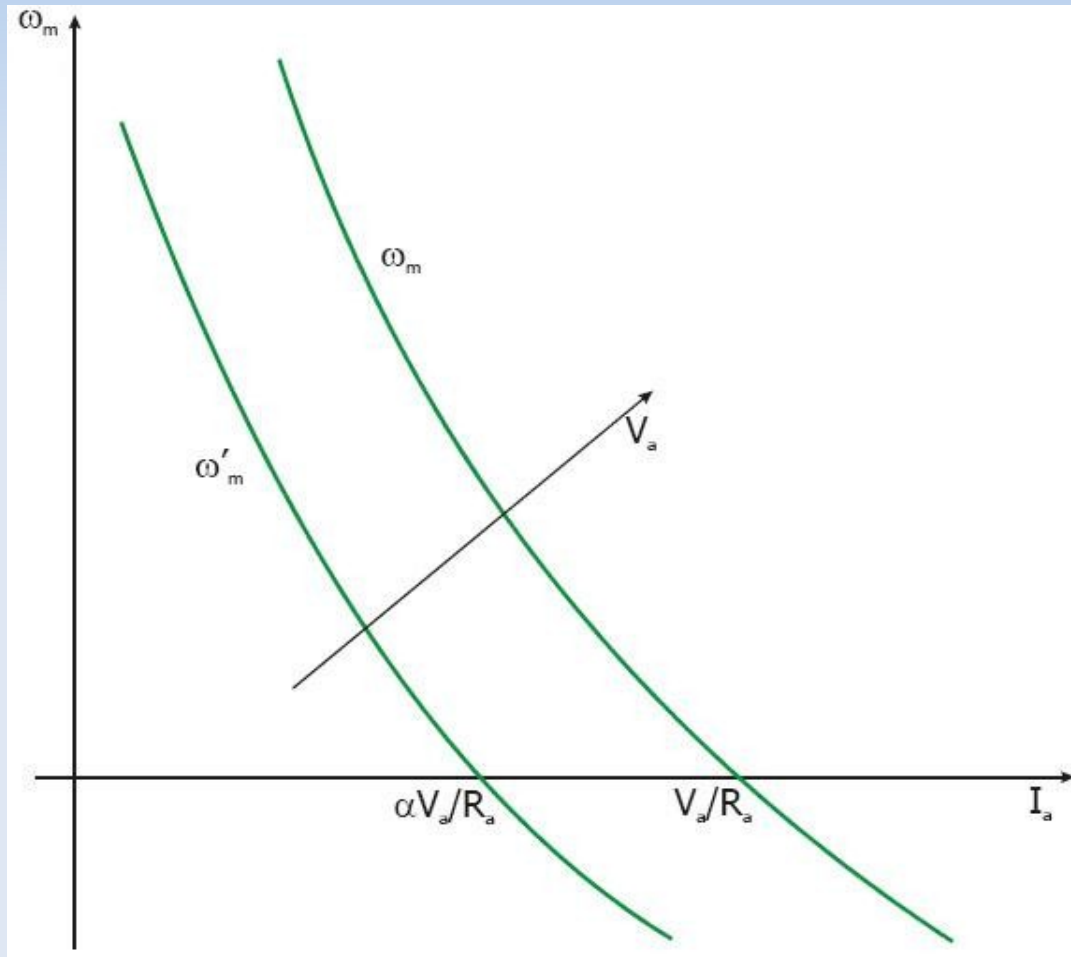


$$R_{avv} = \sum_{i=1}^N R_i$$



# Regolazione della velocità di un motore in c.c. con eccitazione in serie

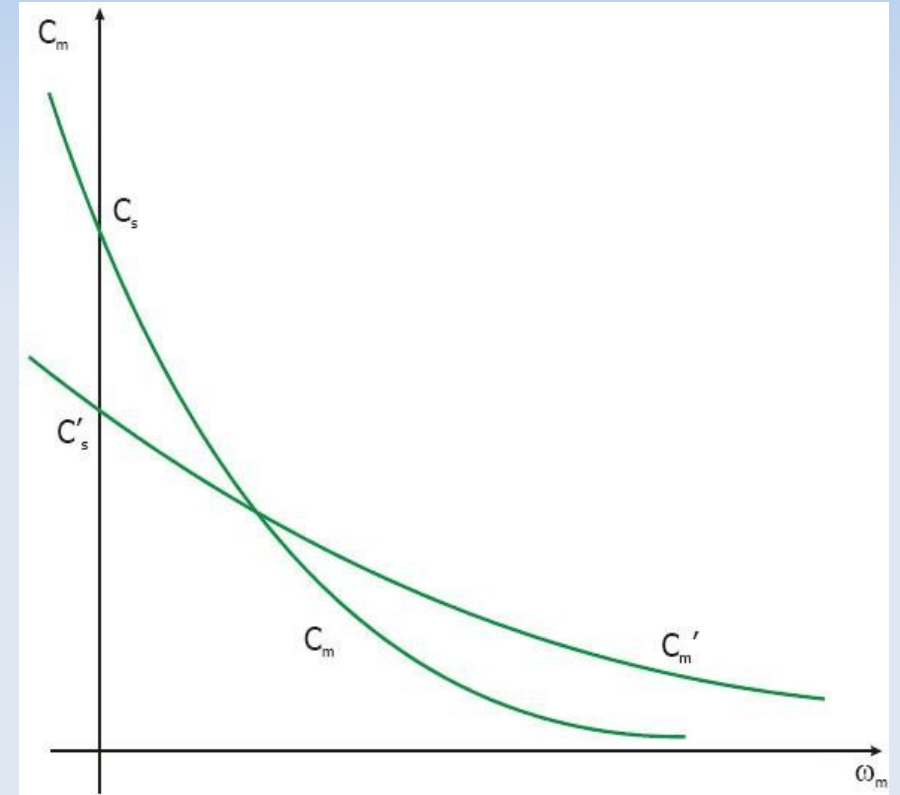
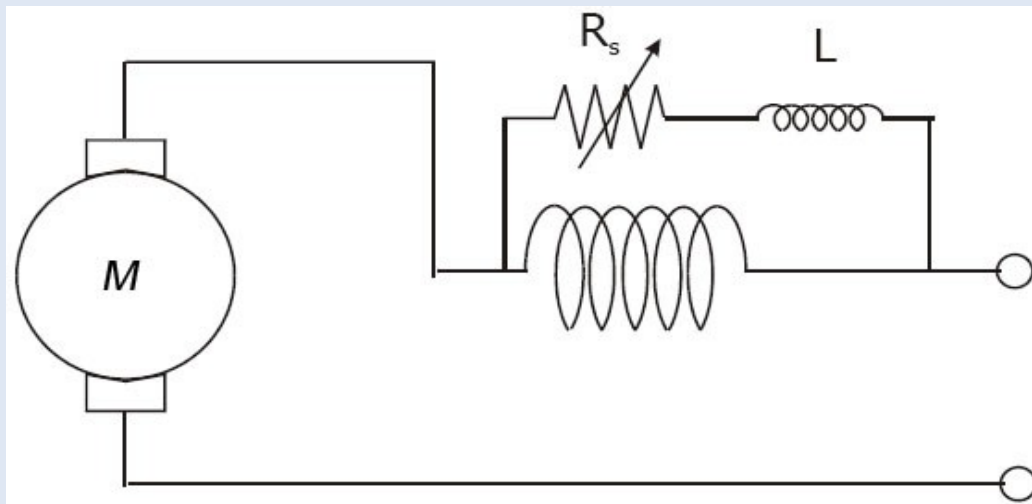
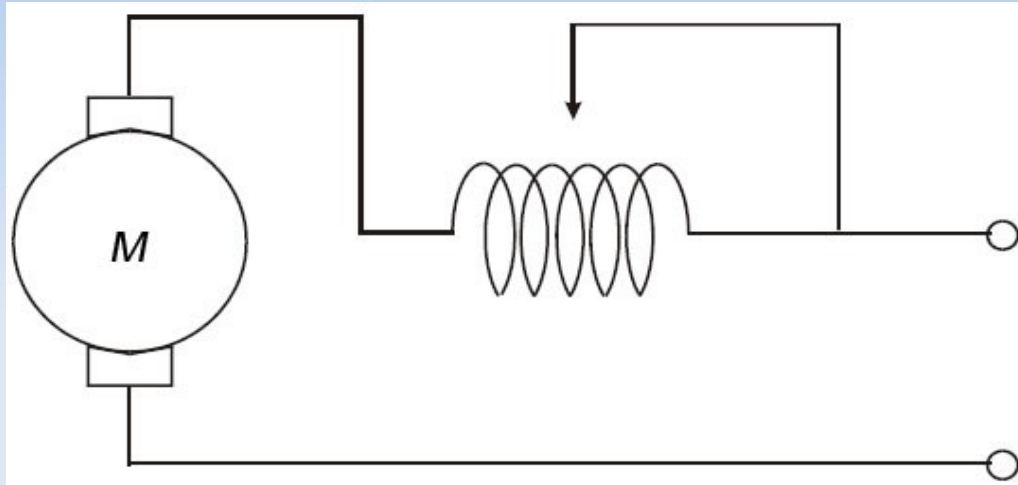
Regolazione con controllo della tensione di alimentazione



$$C_m = k^2 \frac{V_a^2}{(R_a + k^2 \omega^2)^2}$$

# Regolazione della velocità di un motore in c.c. con eccitazione in serie

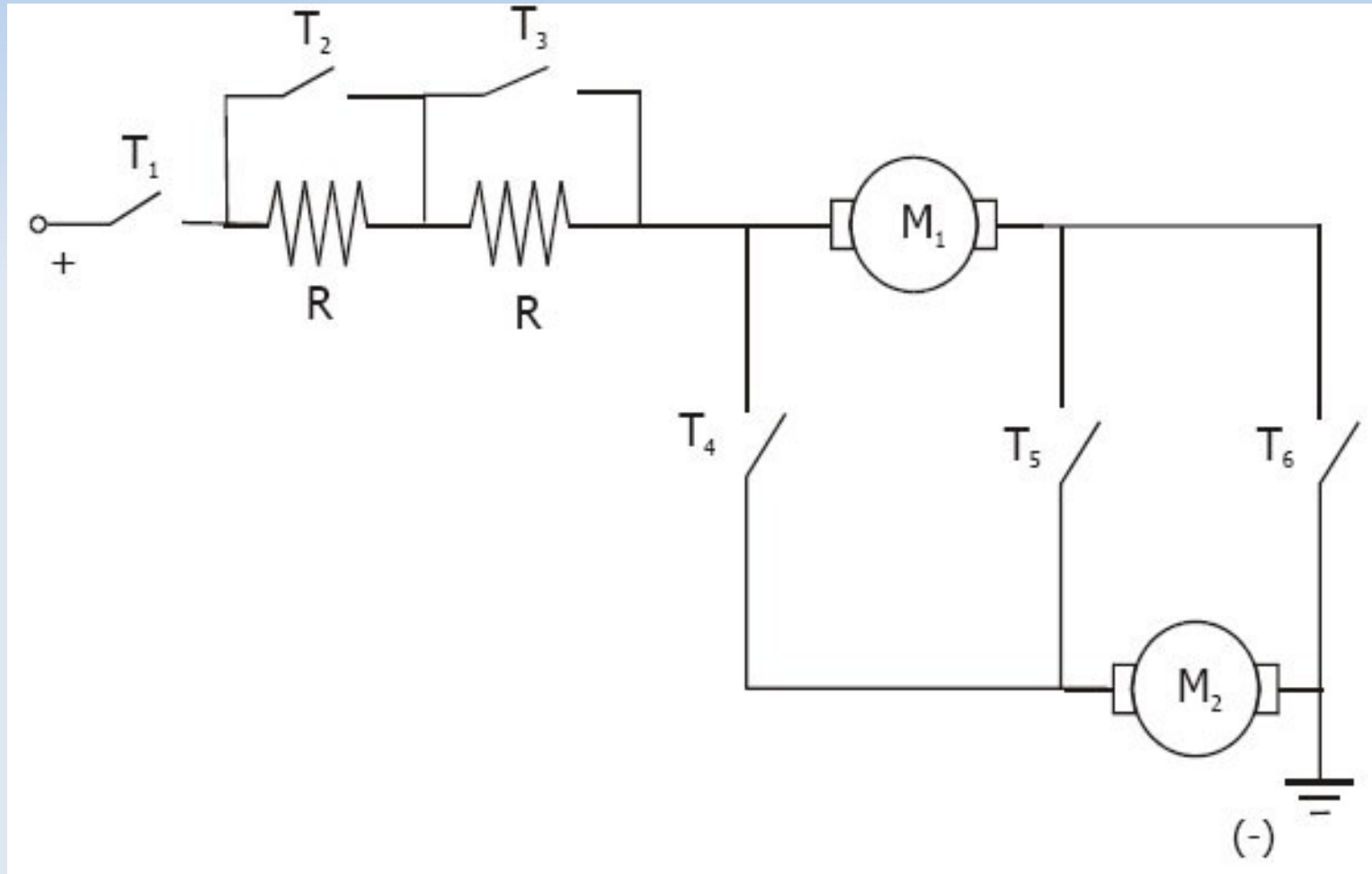
Regolazione con controllo a "indebolimento di campo" (deflussaggio)



$$C_m = k^2 \frac{V_a^2}{(R_a + k^2 \omega^2)^2}$$

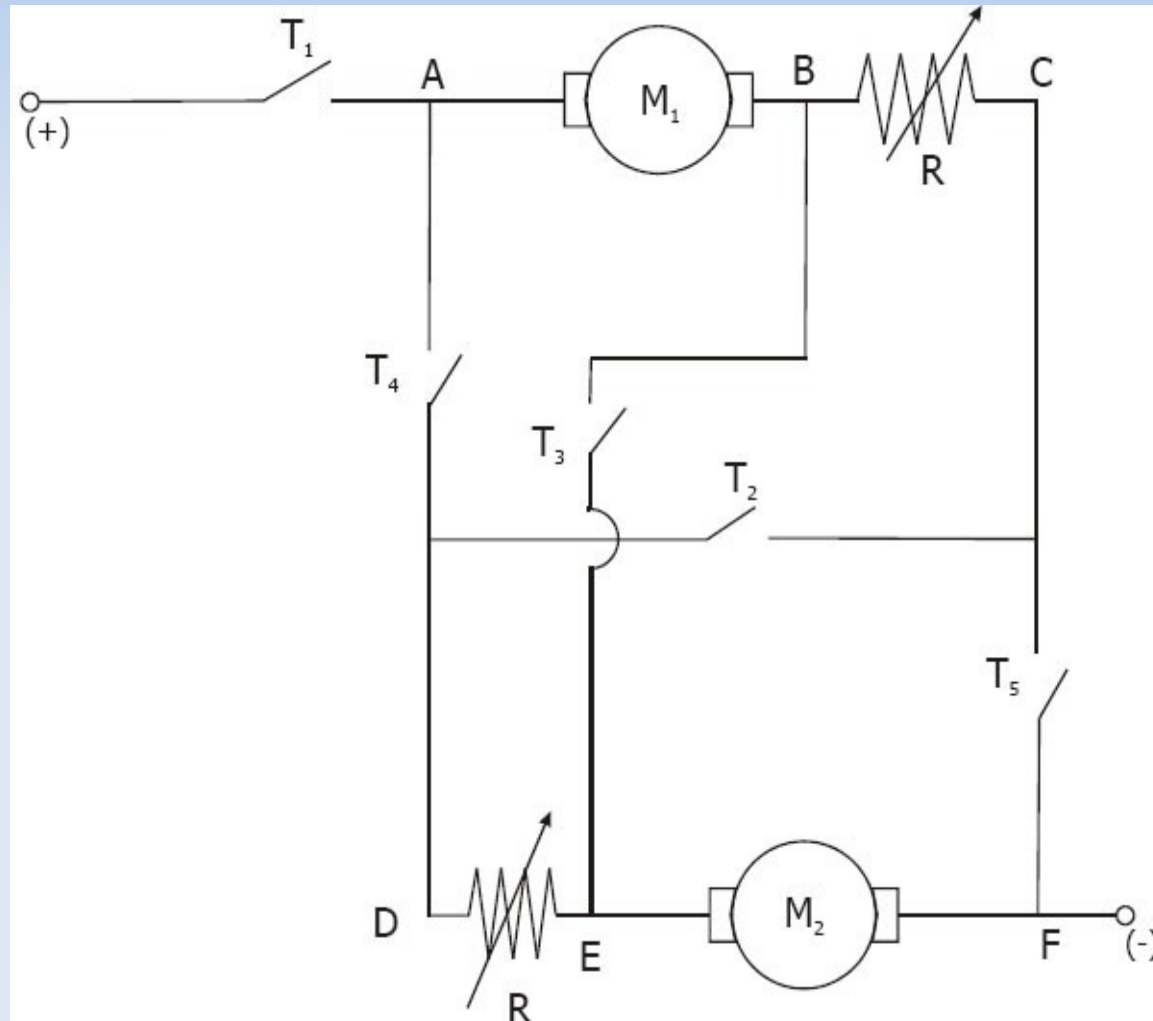
# Regolazione della velocità di un motore in c.c. con eccitazione in serie

Schema di transizione “in corto circuito”



# Regolazione della velocità di un motore in c.c. con eccitazione in serie

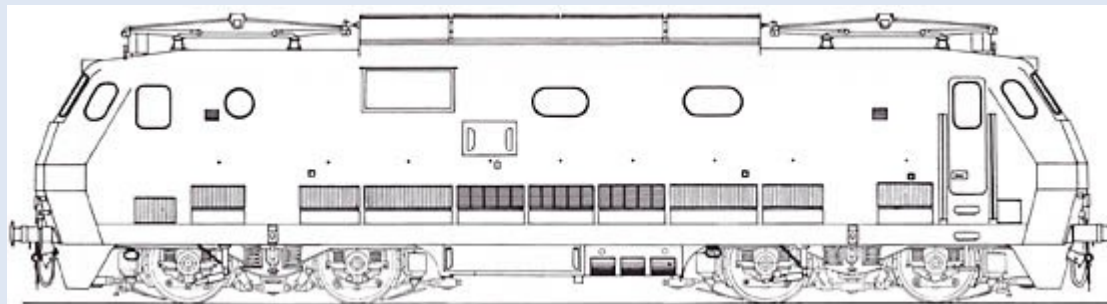
Schema di transizione “a ponte”



# Locomotive elettriche con motori in c.c. a regolazione reostatica

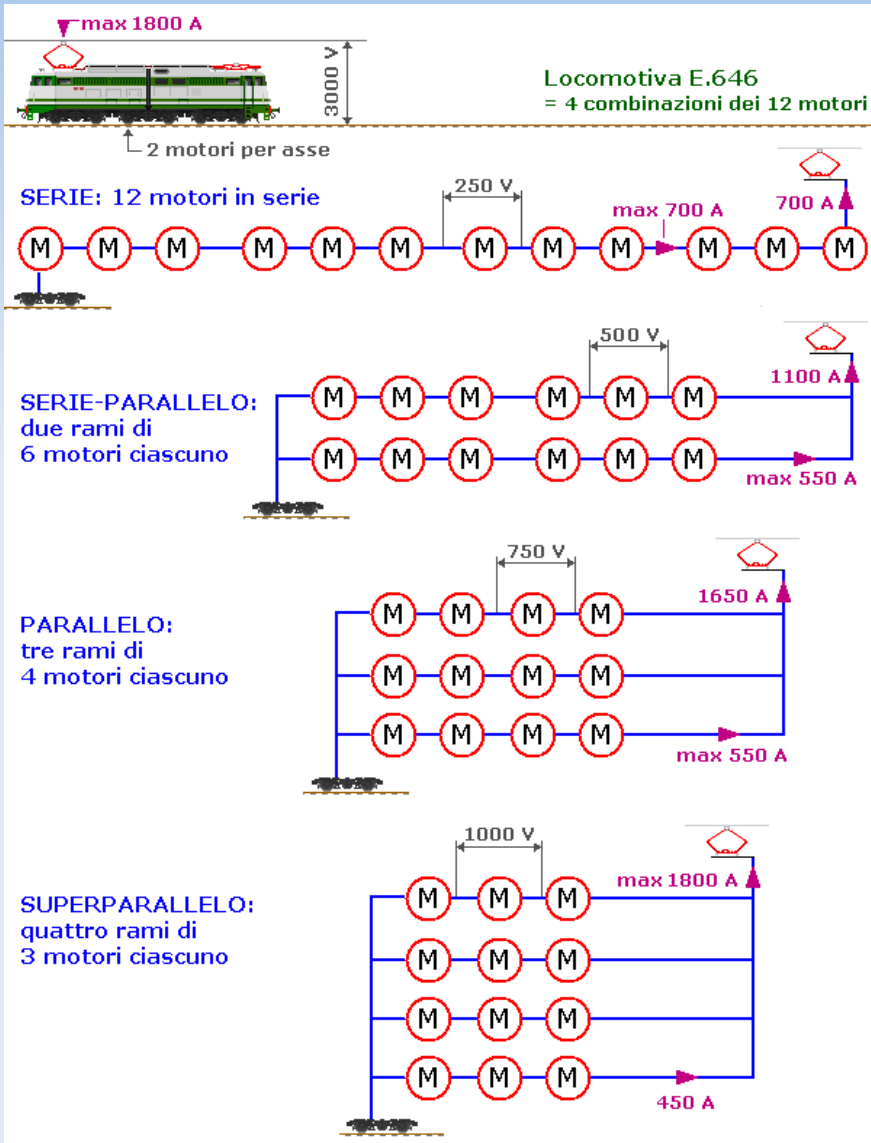
## Locomotiva del gruppo E 444R

La locomotiva dispone di 4 motori in corrente continua con eccitazione serie, e di un reostato composto da resistenze e contattori comandati da un dispositivo elettronico.

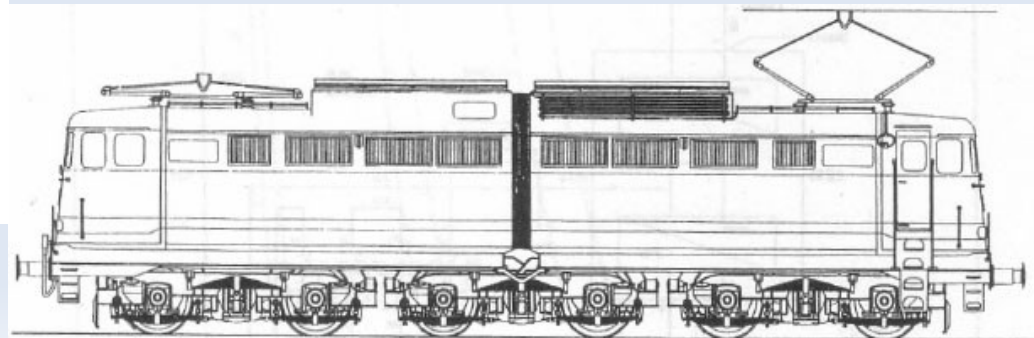




# Locomotive elettriche con motori in c.c. a regolazione reostatica

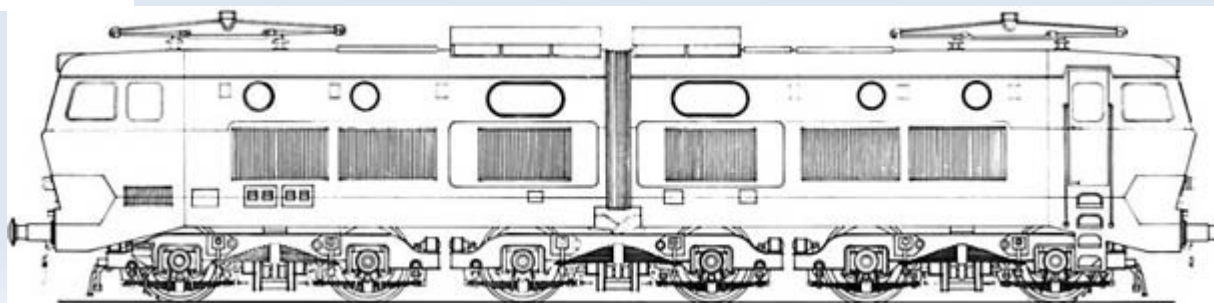
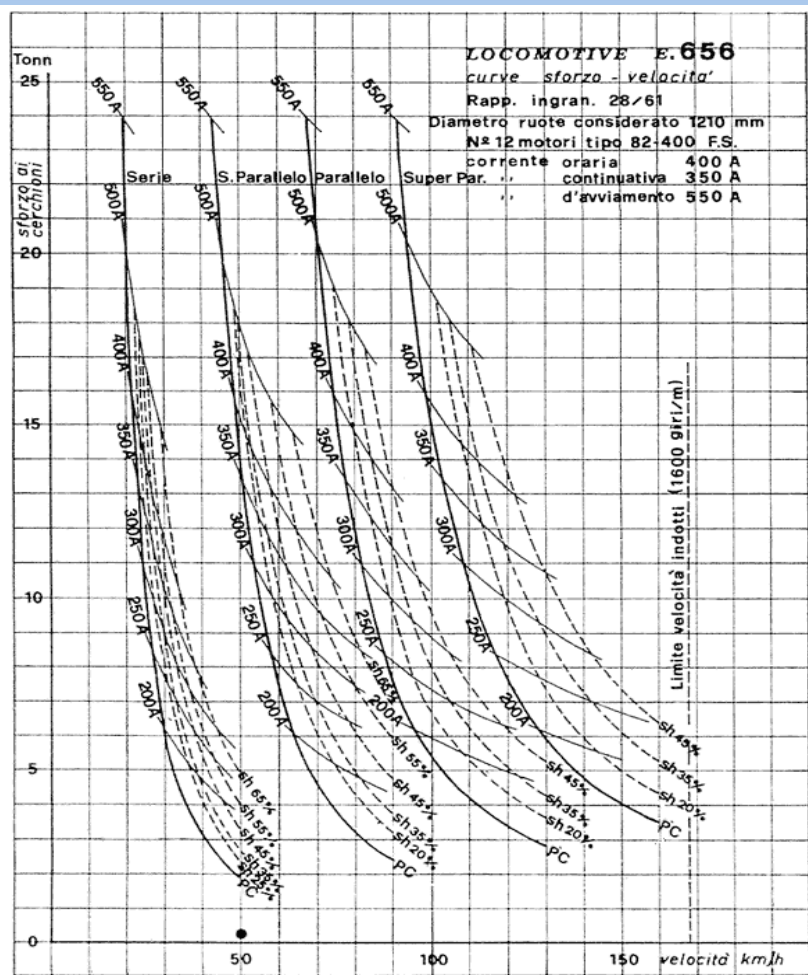


## Locomotiva del gruppo E 646



# Locomotive elettriche con motori in c.c. a regolazione reostatica

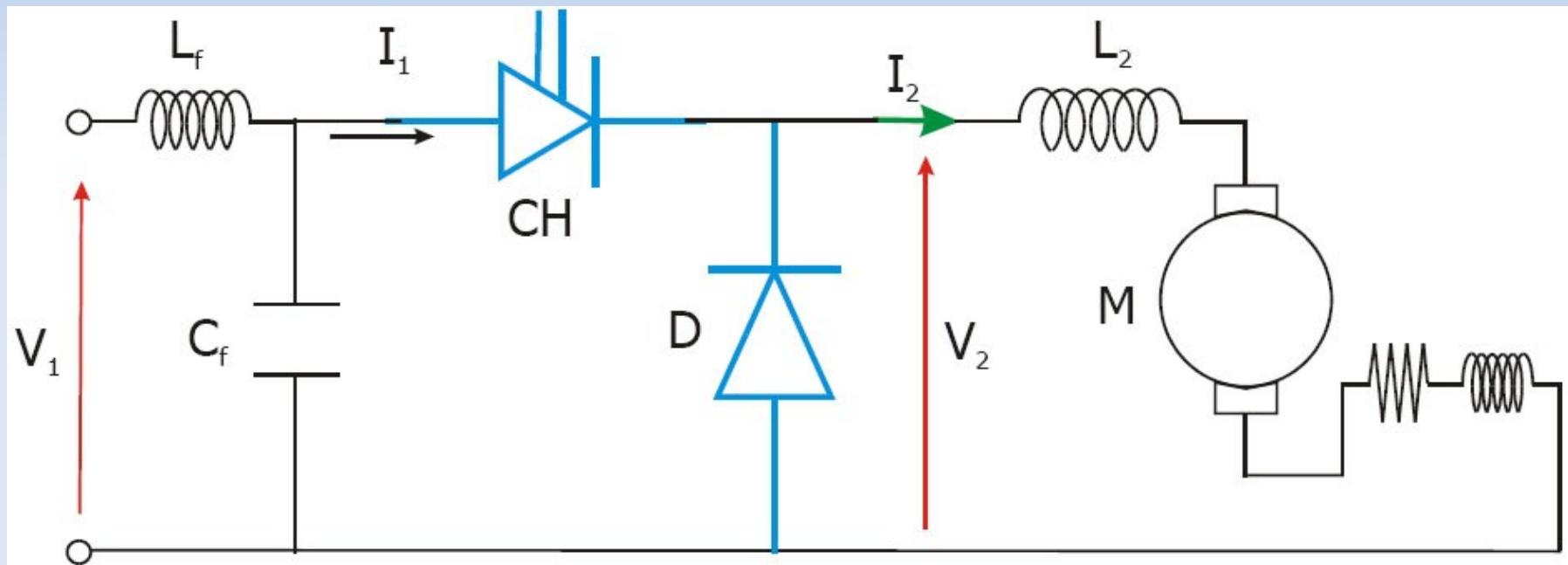
## Locomotiva del gruppo E 656





# Locomotive elettriche con motori in c.c. a regolazione elettronica

Regolazione tramite "chopper" di tipo step-down





# Locomotive elettriche con motori in c.c. a regolazione elettronica

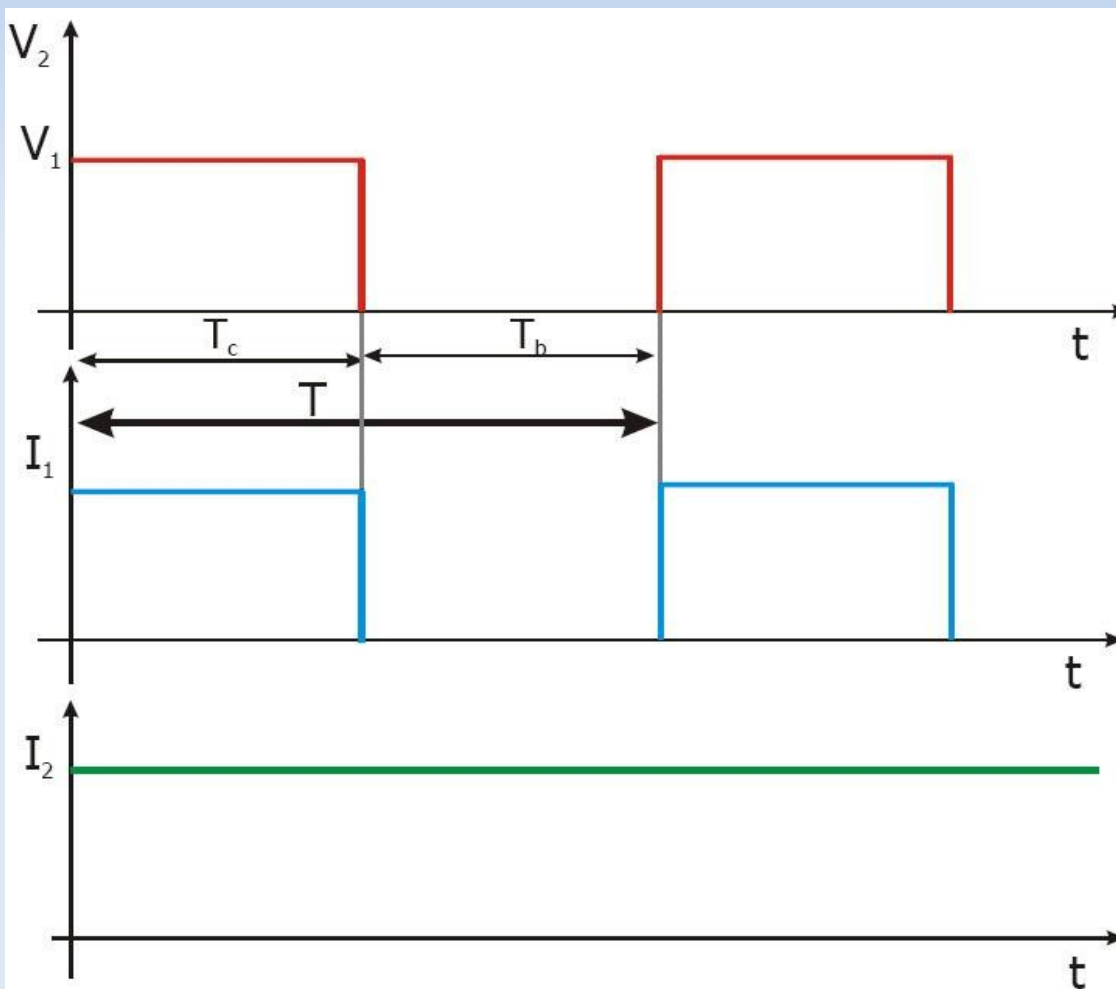
## Regolazione tramite "chopper" di tipo step-down

La tensione è regolata elettronicamente parzializzando la tensione in c.c.

$$V_a = \frac{t_{on}}{T_s} = D$$

Con D= Duty Cycle

$T_s = t_{on} + t_{off}$



# Locomotive elettriche con motori in c.c. a regolazione elettronica

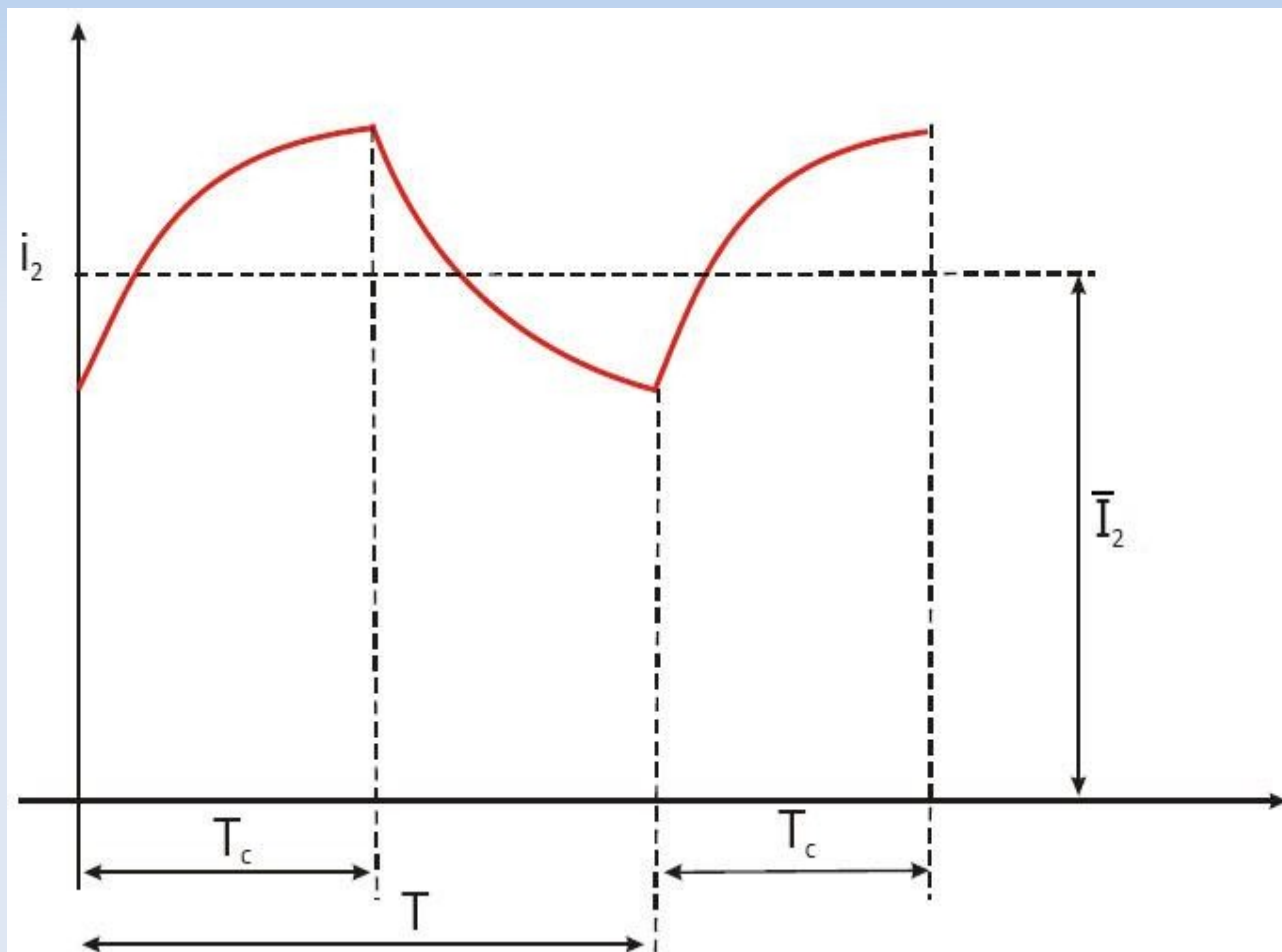
## Regolazione tramite "chopper" di tipo step-down

La tensione è regolata elettronicamente parzializzando la tensione in c.c.

$$V_a = \frac{t_{on}}{T_s} = D$$

Con  $D =$  Duty Cycle

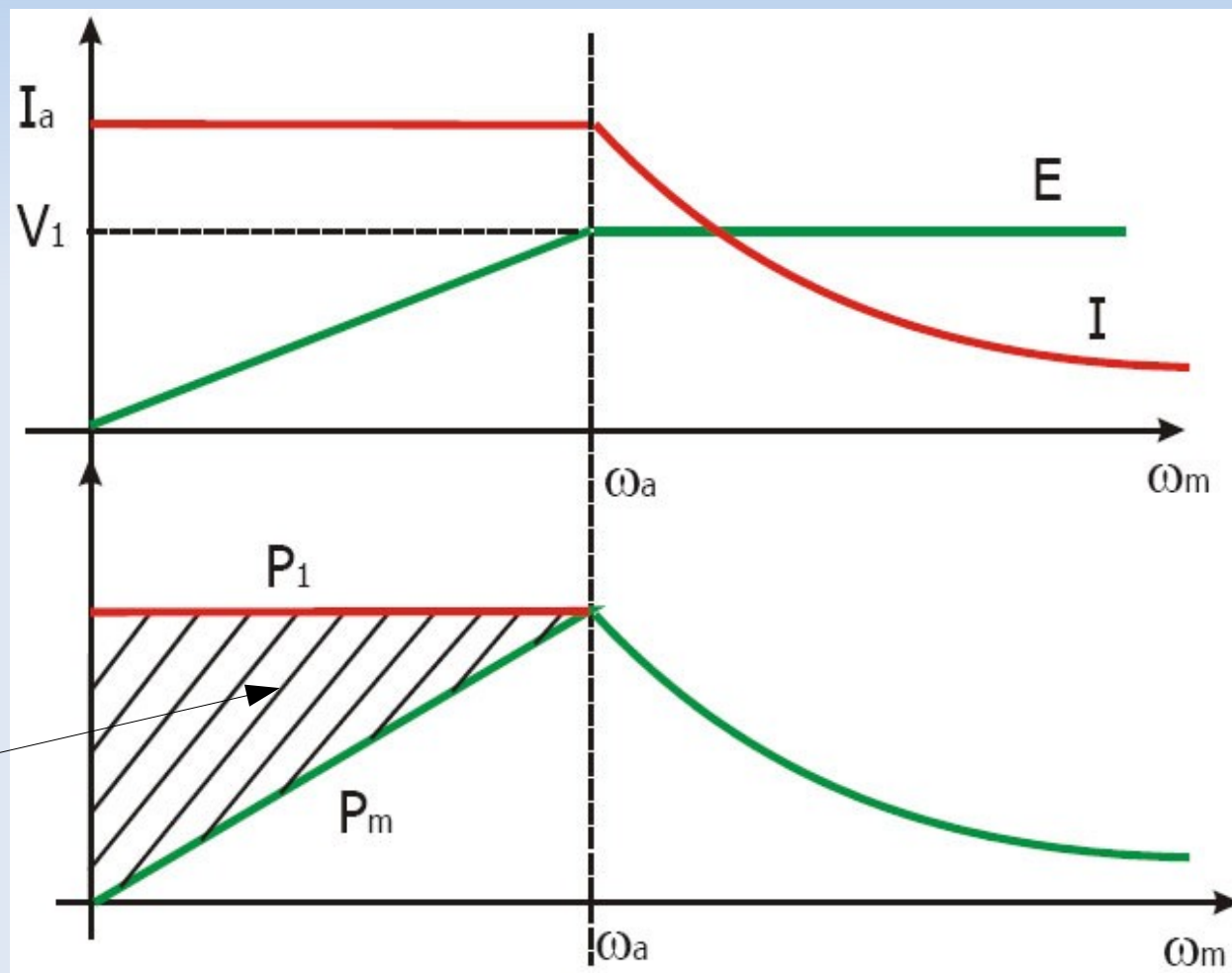
$T_s = t_{on} + t_{off}$



# Locomotive elettriche con motori in c.c. a regolazione elettronica

Regolazione tramite "chopper" di tipo step-down

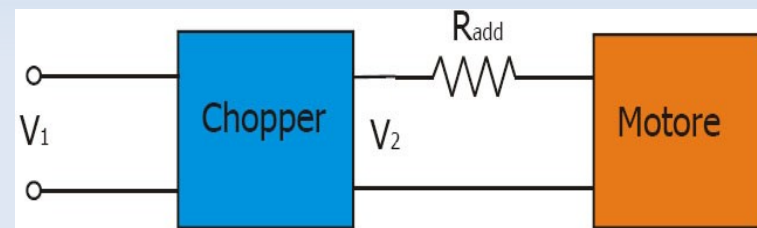
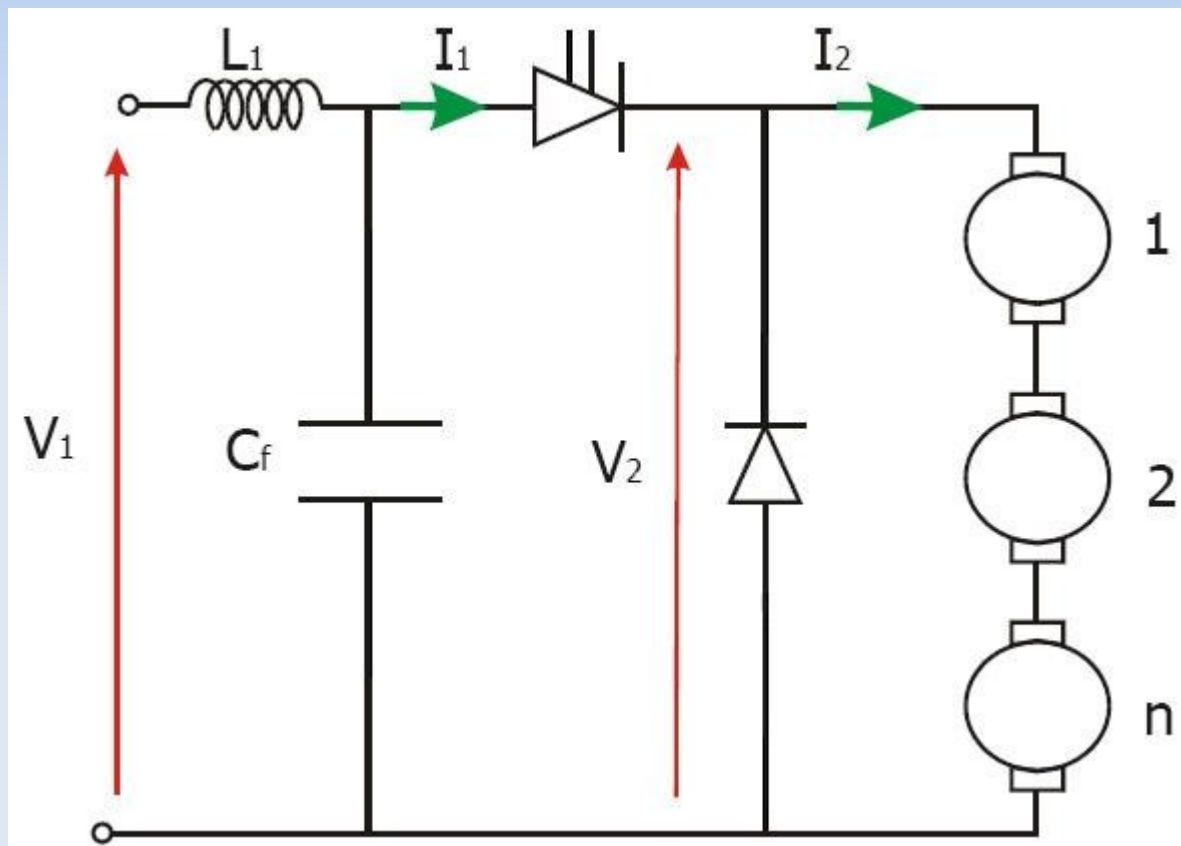
Il chopper determina minori perdite di potenza rispetto alla regolazione reostatica.



Differenza di potenza perduta

# Locomotive elettriche con motori in c.c. a regolazione elettronica

Regolazione tramite "chopper" di tipo step-down

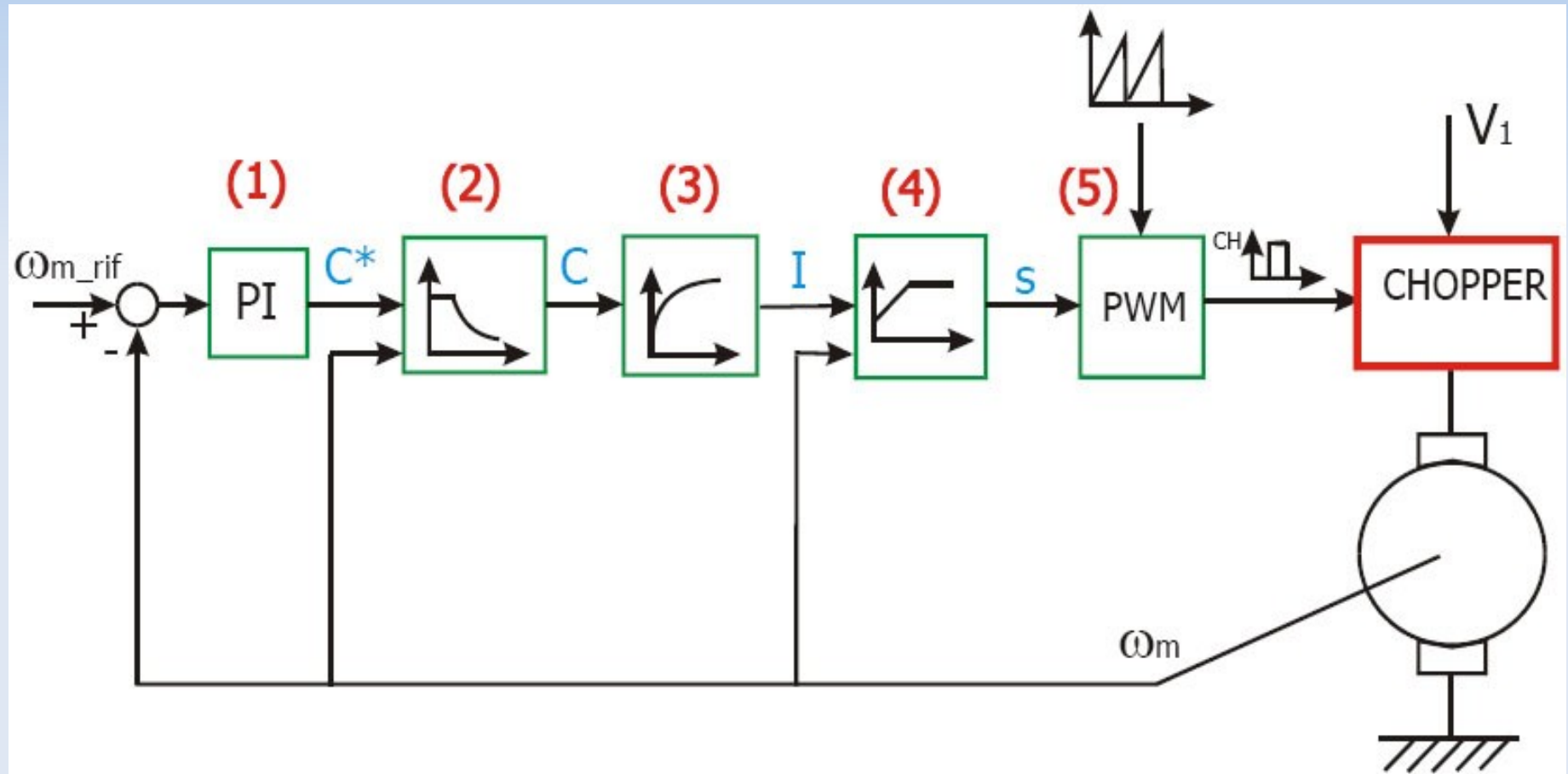


Resistenza aggiuntiva in fase di avviamento.

Azionamento a chopper in configurazione serie

# Locomotive elettriche con motori in c.c. a regolazione elettronica

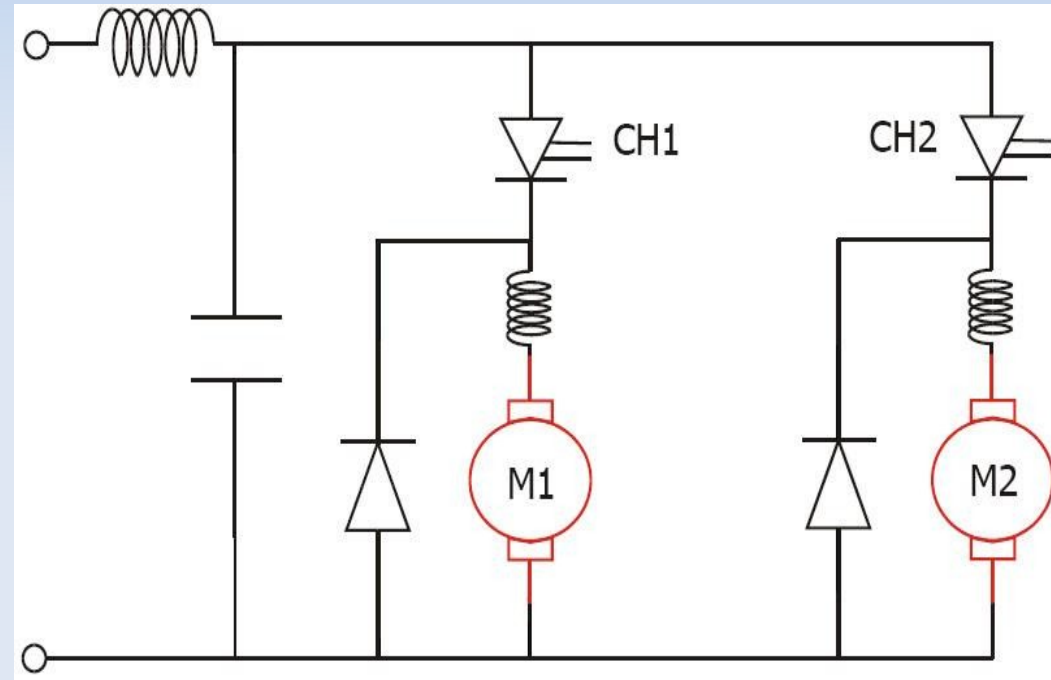
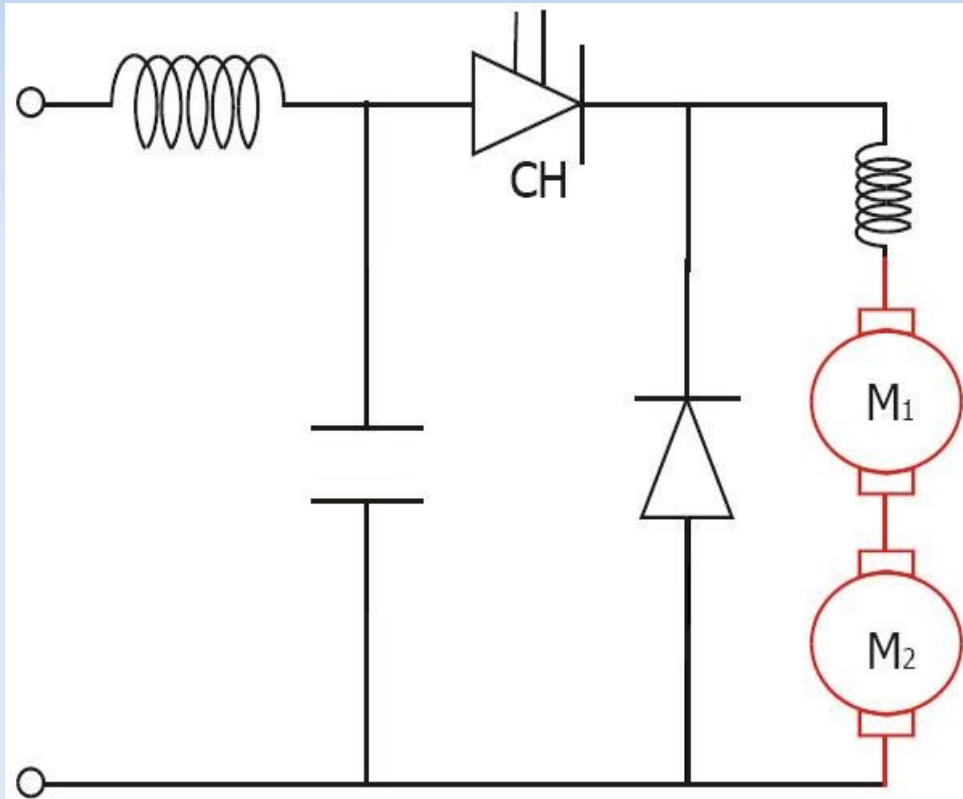
Regolazione tramite "chopper" di tipo step-down



Controllo della velocità con azionamento a chopper.

# Locomotive elettriche con motori in c.c. a regolazione elettronica

Regolazione tramite "chopper" di tipo step-down

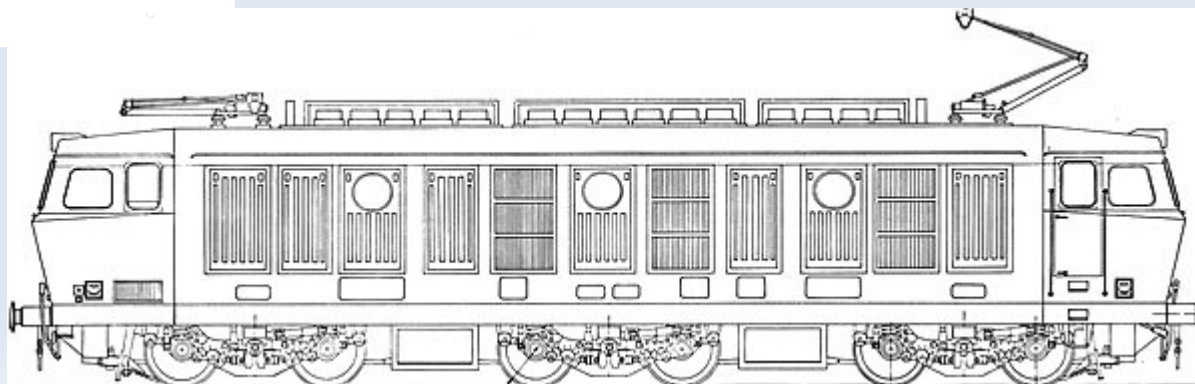
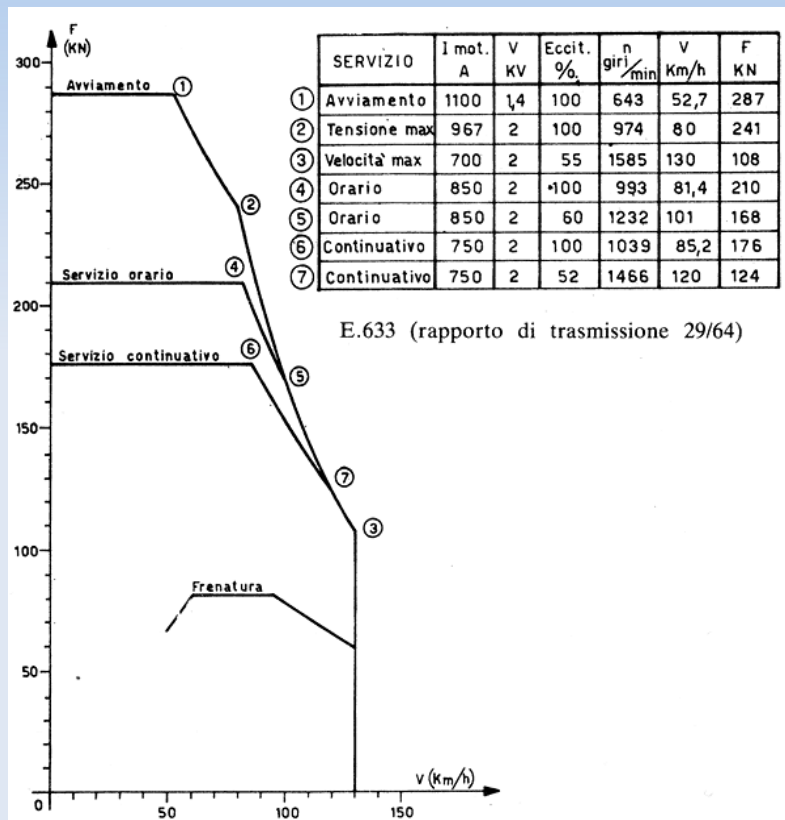


Configurazioni serie e parallelo



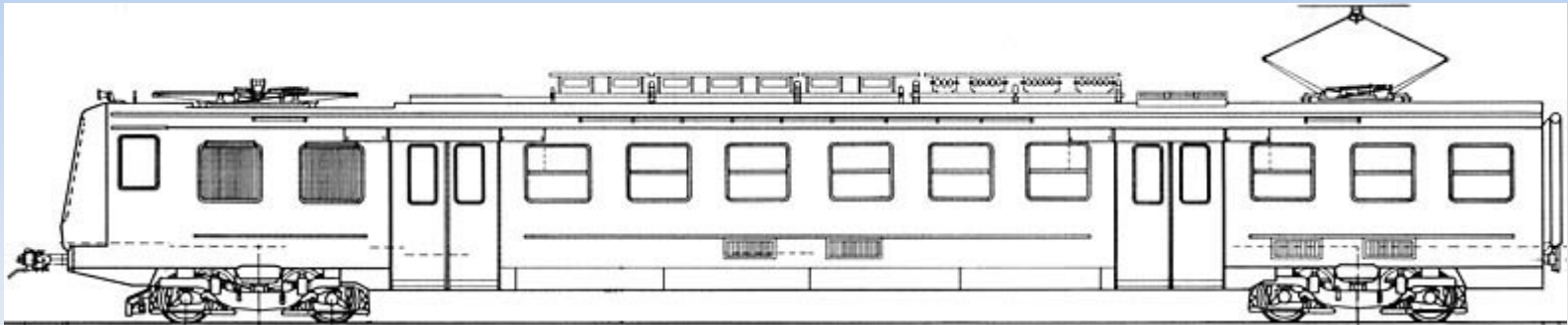
# Locomotive elettriche con motori in c.c. a regolazione elettronica

## Locomotiva E 632/633 "Tigre"

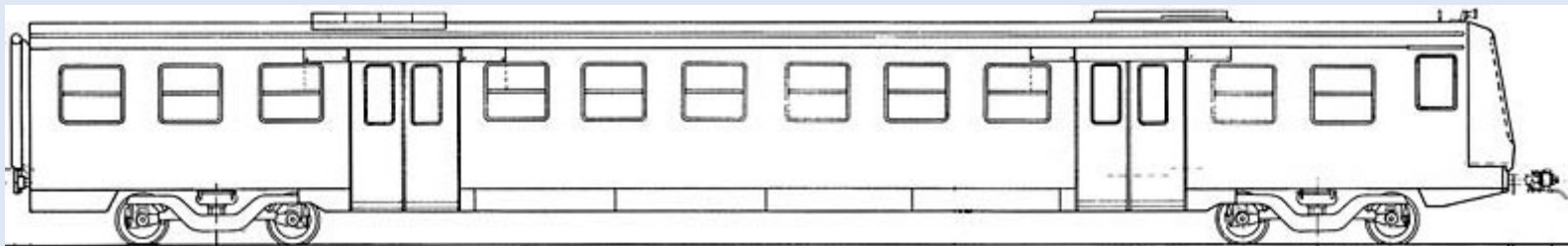


# Locomotive elettriche con motori in c.c. a regolazione elettronica

## Elettromotrici ALe 642.



ALe 582 ed ALe 642



rimorchio Le 682



# Locomotive elettriche con motori in c.c. a regolazione elettronica

## Elettromotrici ALe 642.



Palermo, 22 giugno 2011

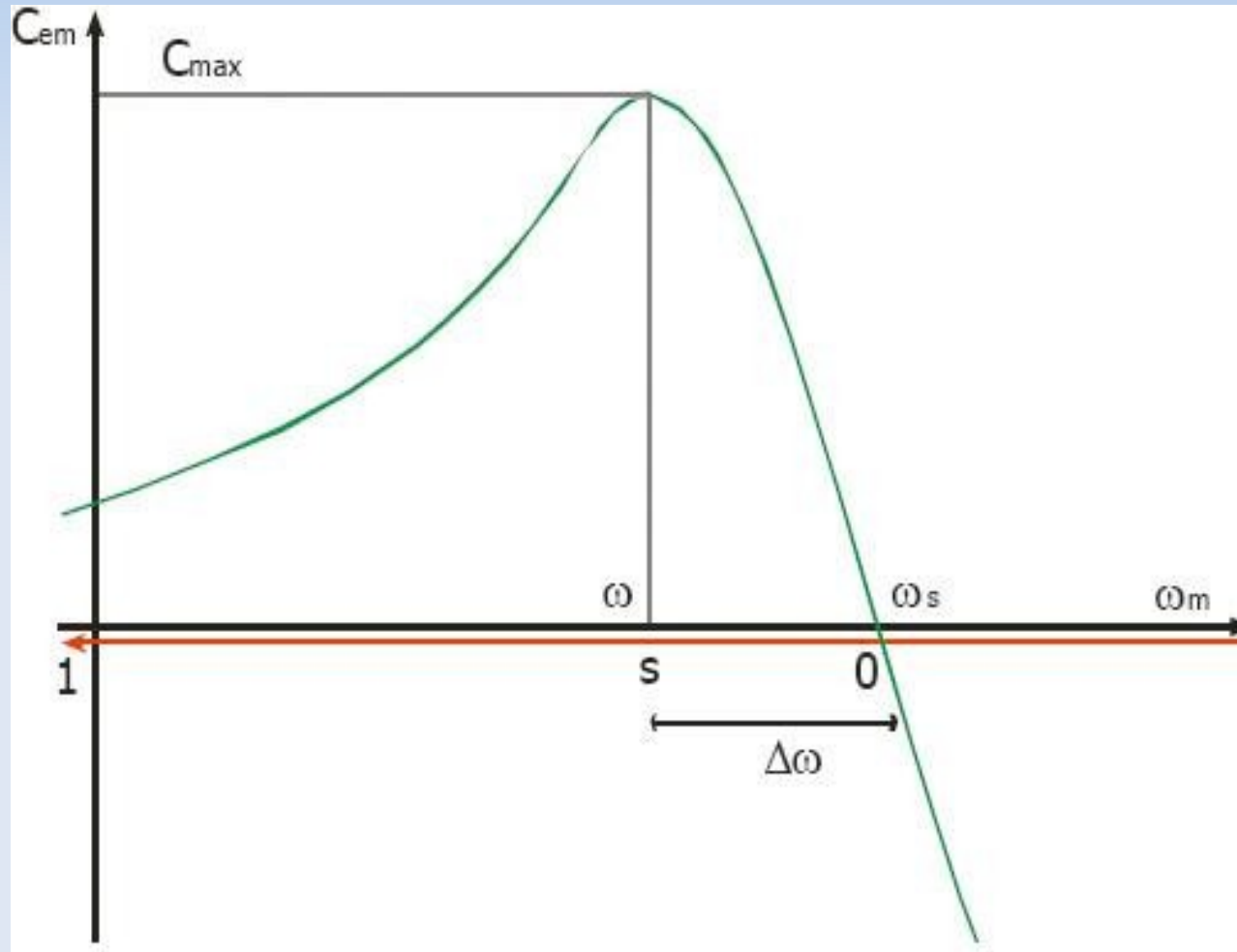
# Locomotive elettriche con motori asincroni trifase (c.a.)

Rispetto alla macchina in corrente continua, quella asincrona trifase presenta i seguenti vantaggi.

- Maggior rapporto potenza/peso (a parità di massa la potenza elettrica di un asincrono è fino ad una volta e mezzo quello di una macchina in continua).
- L'assenza di contatti striscianti e del collettore e la robustezza della macchina consente di limitare al minimo la manutenzione.
- Basso rapporto costo/potenza.
- Per invertire il senso del moto è sufficiente scambiare due fasi dello statore.
- Consente di passare in modo semplice dalla posizione di marcia a quella di frenatura.

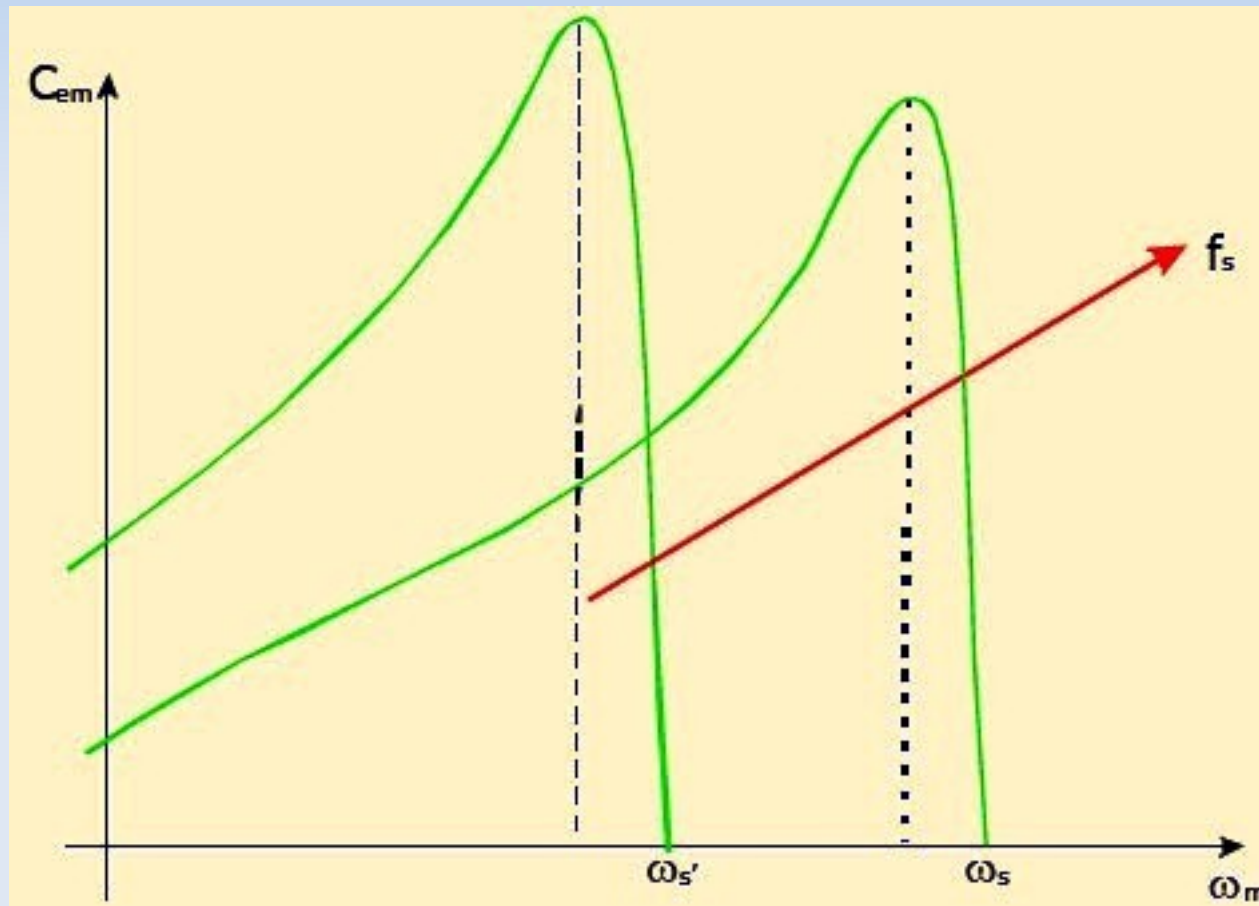
# Locomotive elettriche con motori asincroni trifase (c.a.)

Caratteristica meccanica di un motore asincrono trifase



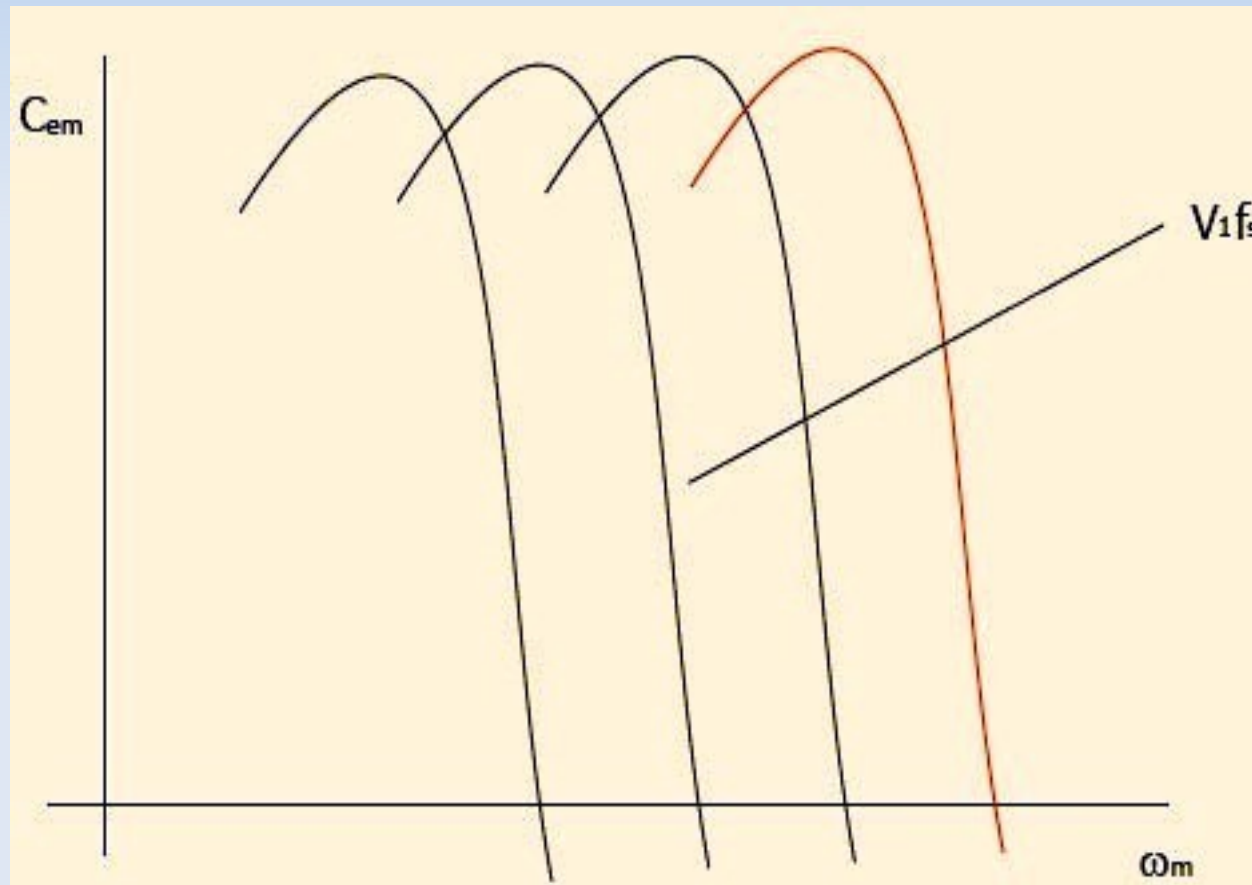
# Locomotive elettriche con motori asincroni trifase (c.a.)

Caratteristica meccanica di un motore asincrono trifase regolato in frequenza a tensione costante



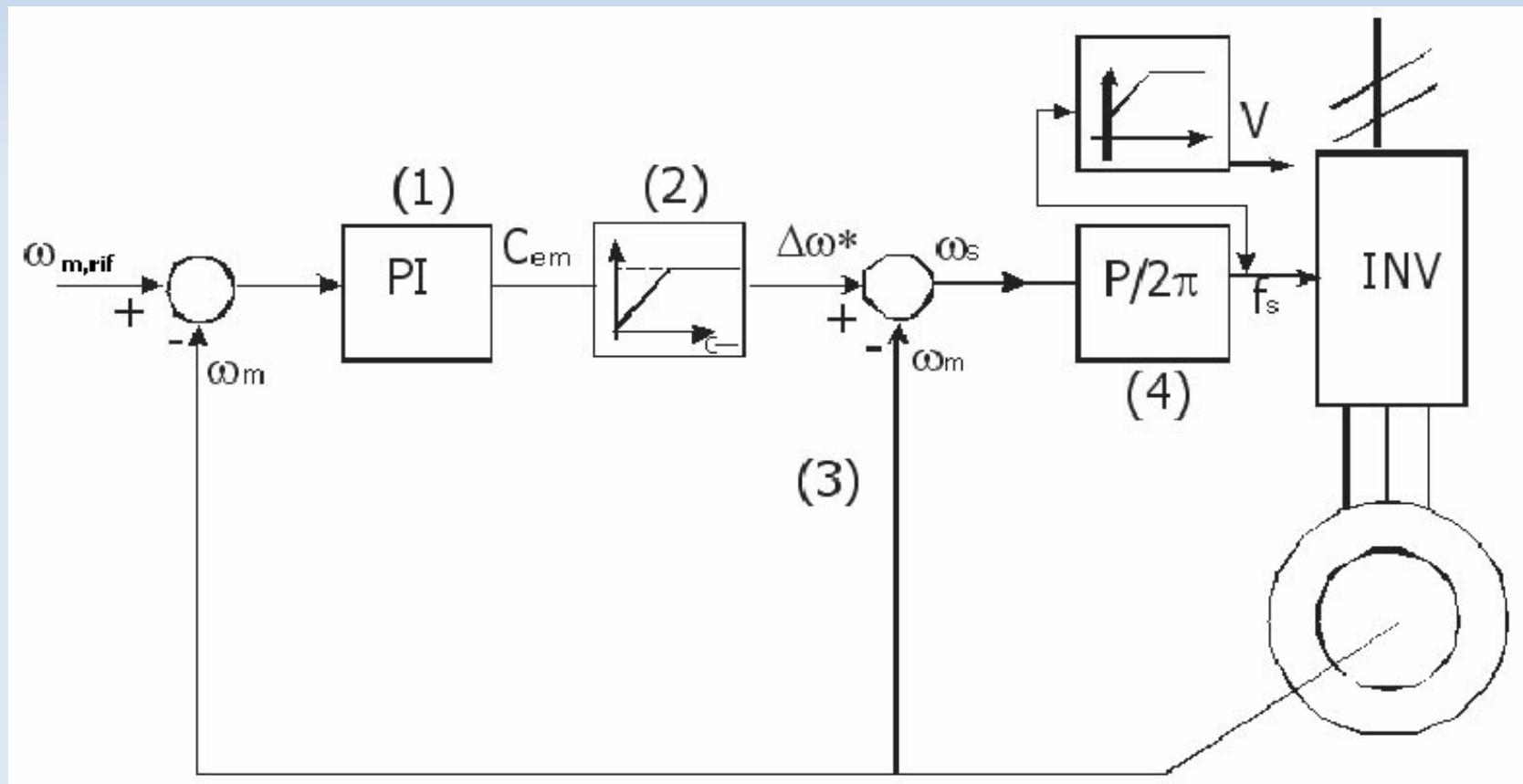
# Locomotive elettriche con motori asincroni trifase (c.a.)

Caratteristica meccanica di un motore asincrono trifase regolato in modo che il rapporto tensione/frequenza=cost.



# Locomotive elettriche con motori asincroni trifase (c.a.)

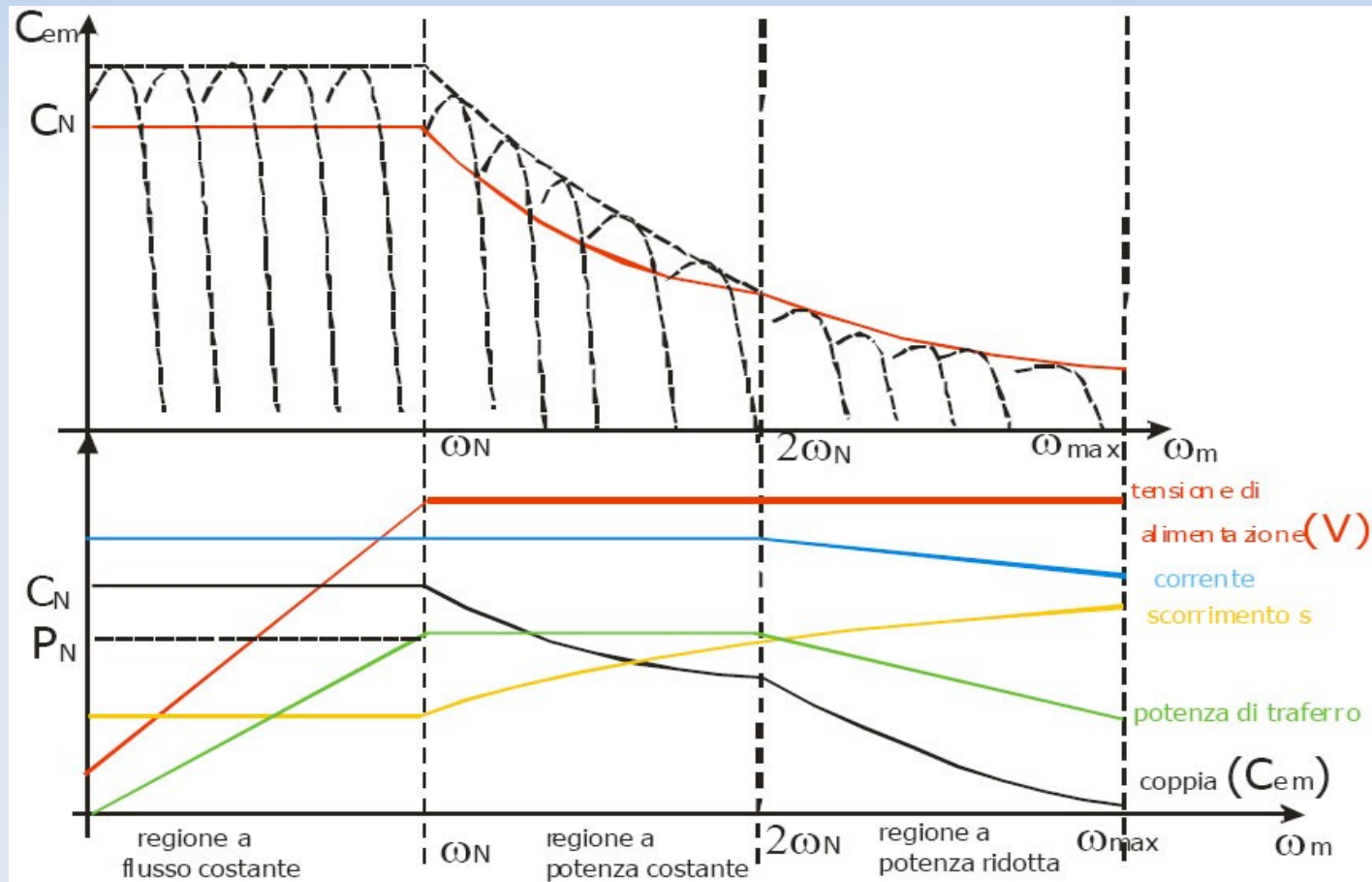
Schema di un azionamento elettrico con motore asincrono trifase regolato in modo che il rapporto tensione/frequenza=cost.





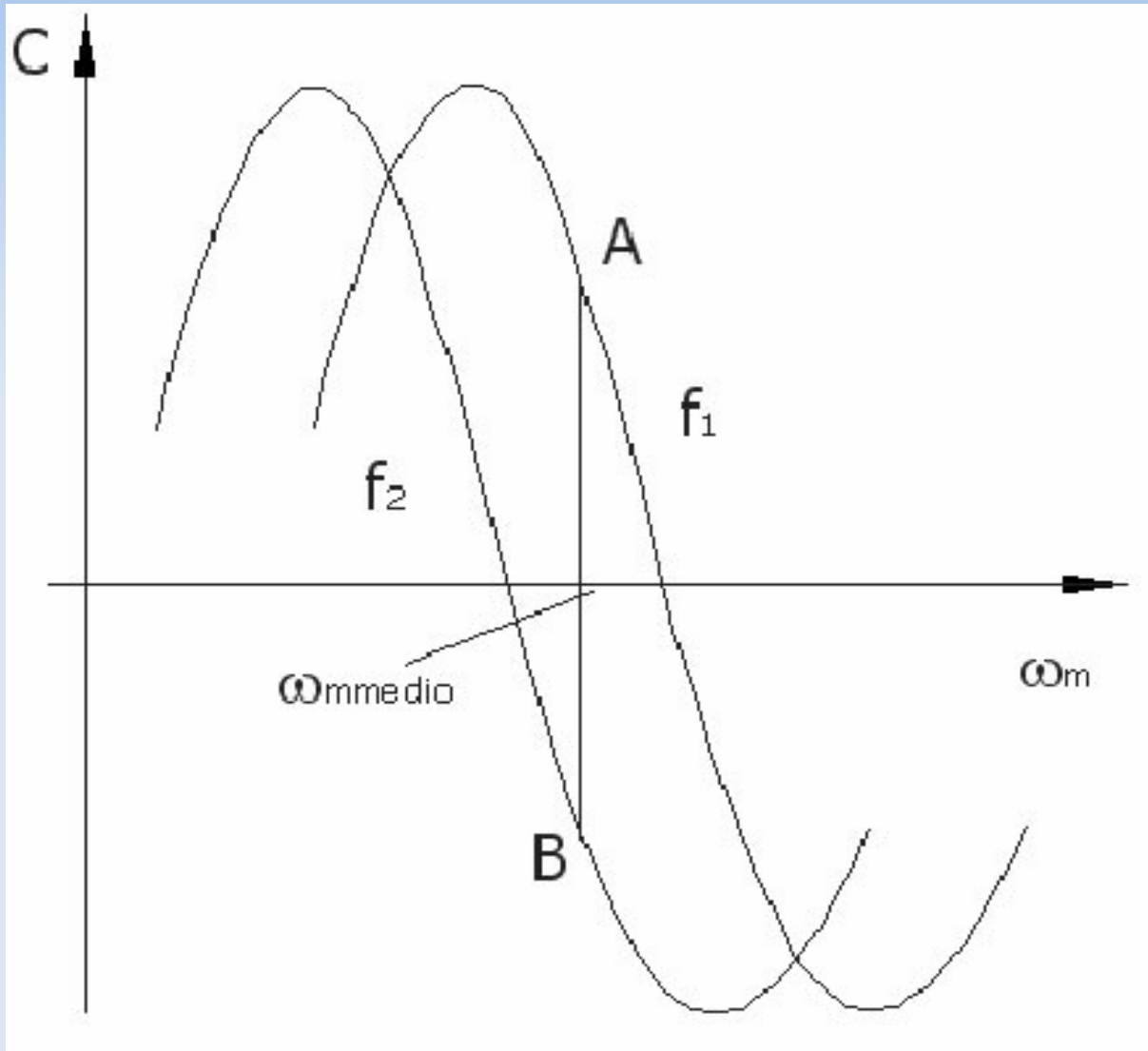
# Locomotive elettriche con motori asincroni trifase (c.a.)

Caratteristica di trazione di un motore asincrono trifase regolato in frequenza.





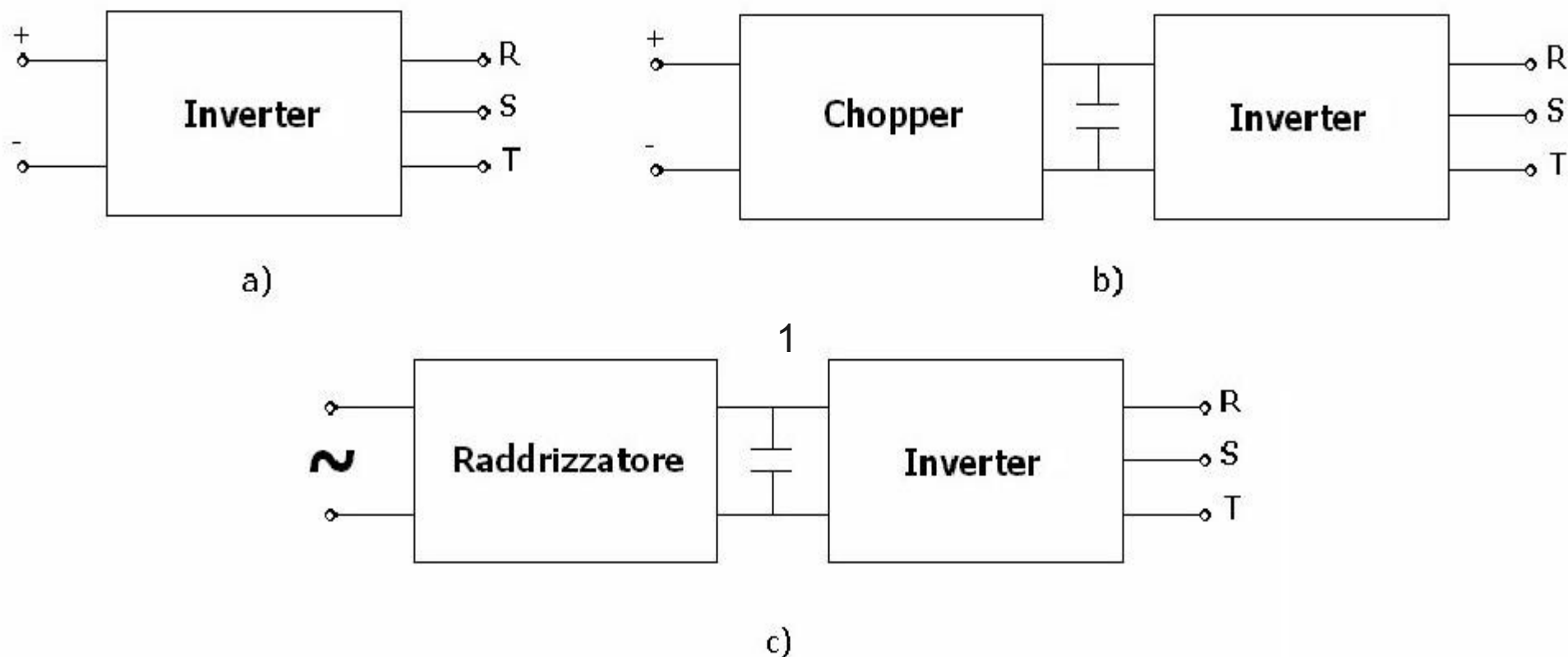
# Locomotive elettriche con motori asincroni trifase (c.a.)



Passaggio dal  
funzionamento da  
motore a quello da  
generatore

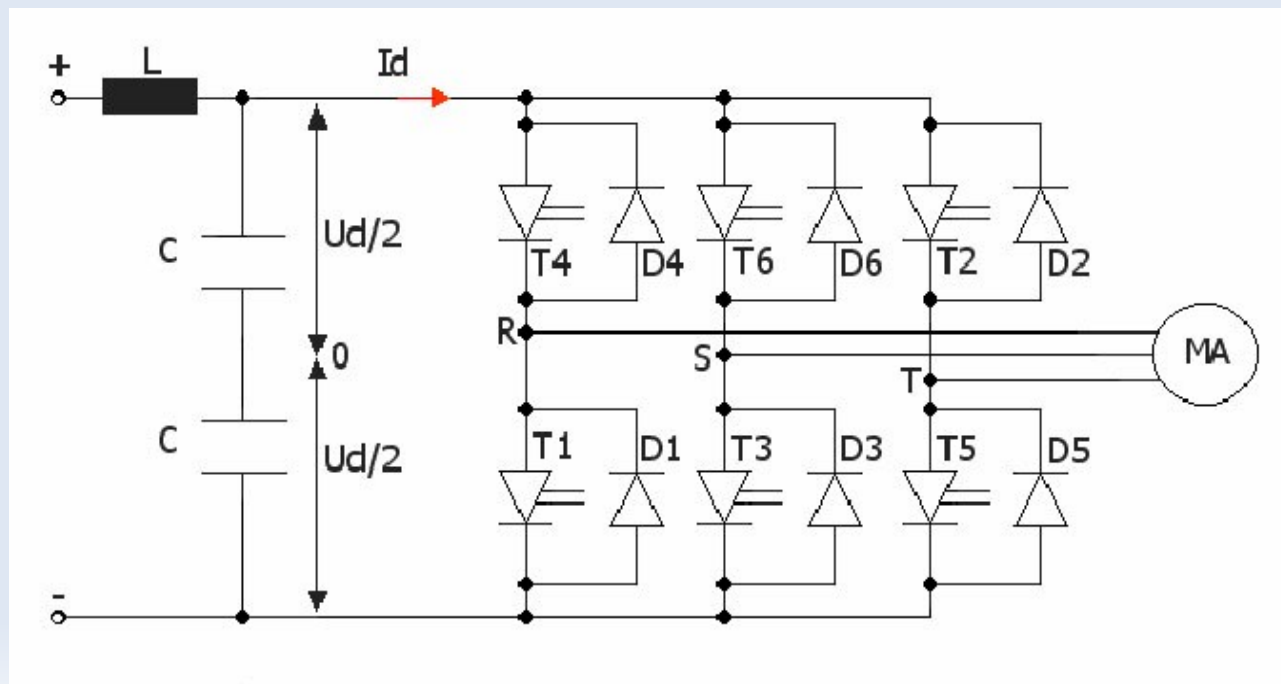
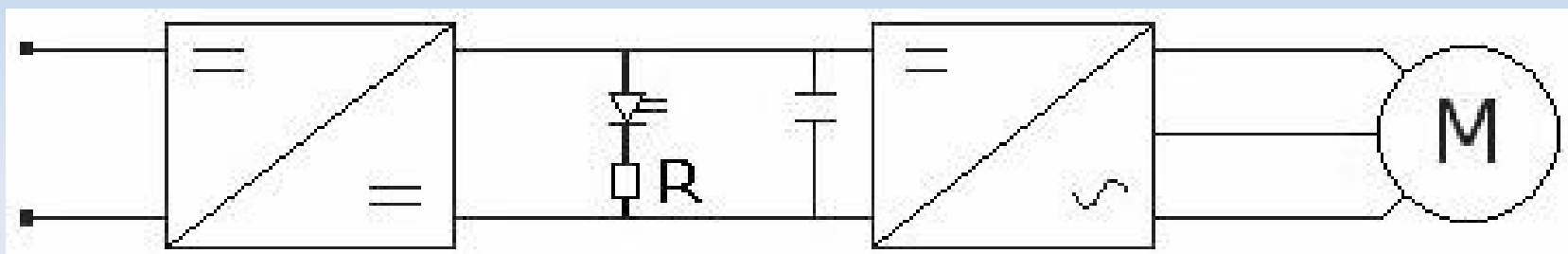
# Locomotive elettriche con motori asincroni trifase (c.a.)

Convertitori per l'alimentazione di motori asincroni



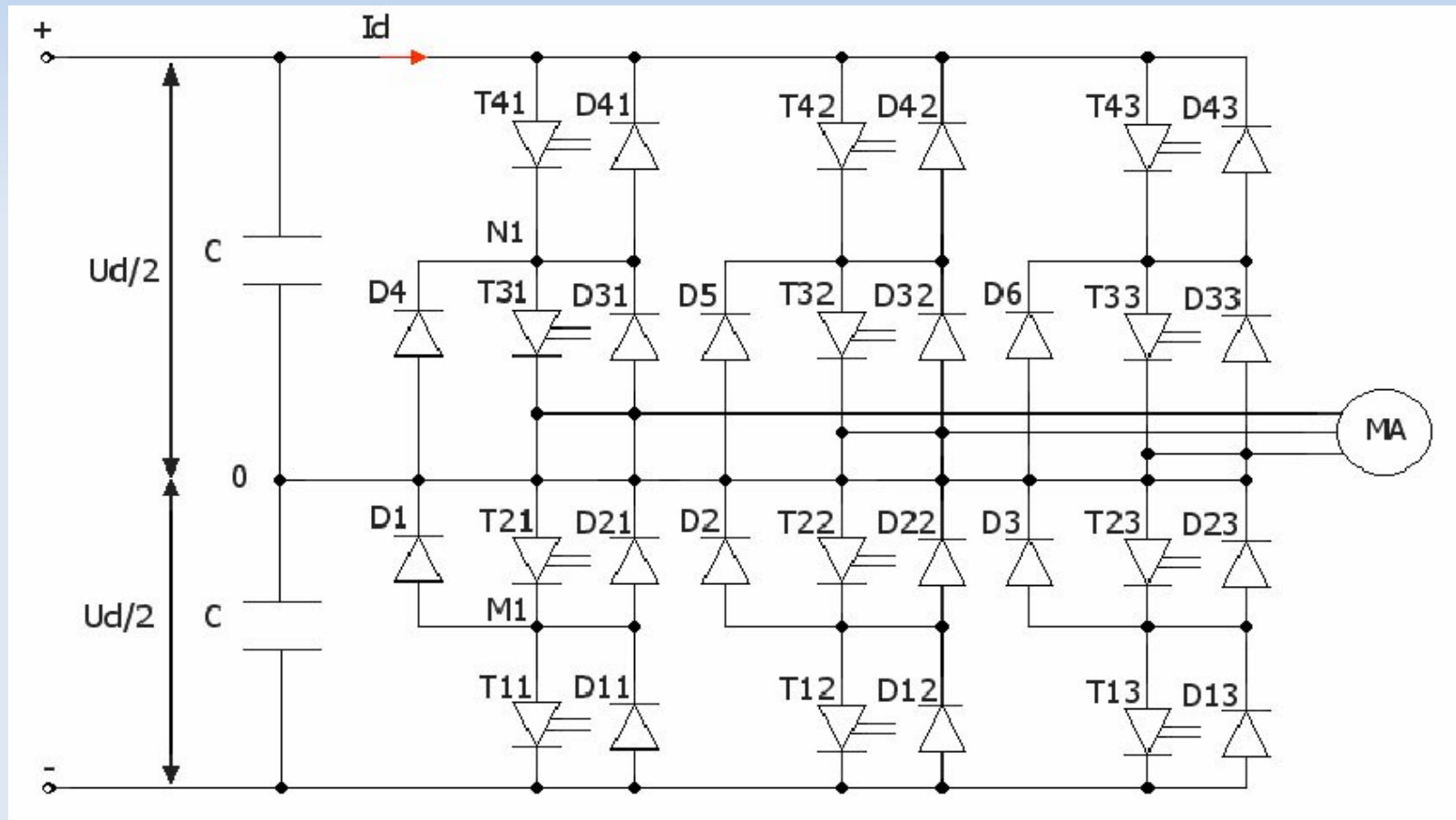
# Locomotive elettriche con motori asincroni trifase (c.a.)

Azionamento asincrono con inverter a tensione impressa, chopper e reostato di frenatura.



# Locomotive elettriche con motori asincroni trifase (c.a.)

Azionamento asincrono con inverter a tensione impressa a tre livelli.

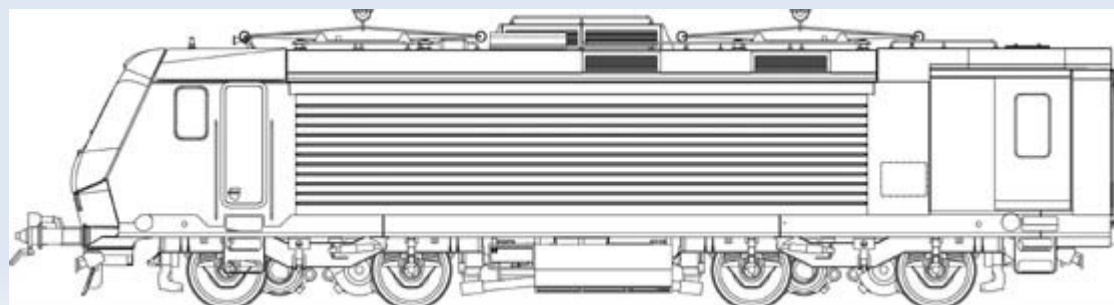


# Locomotive elettriche con motori asincroni trifase (c.a.)

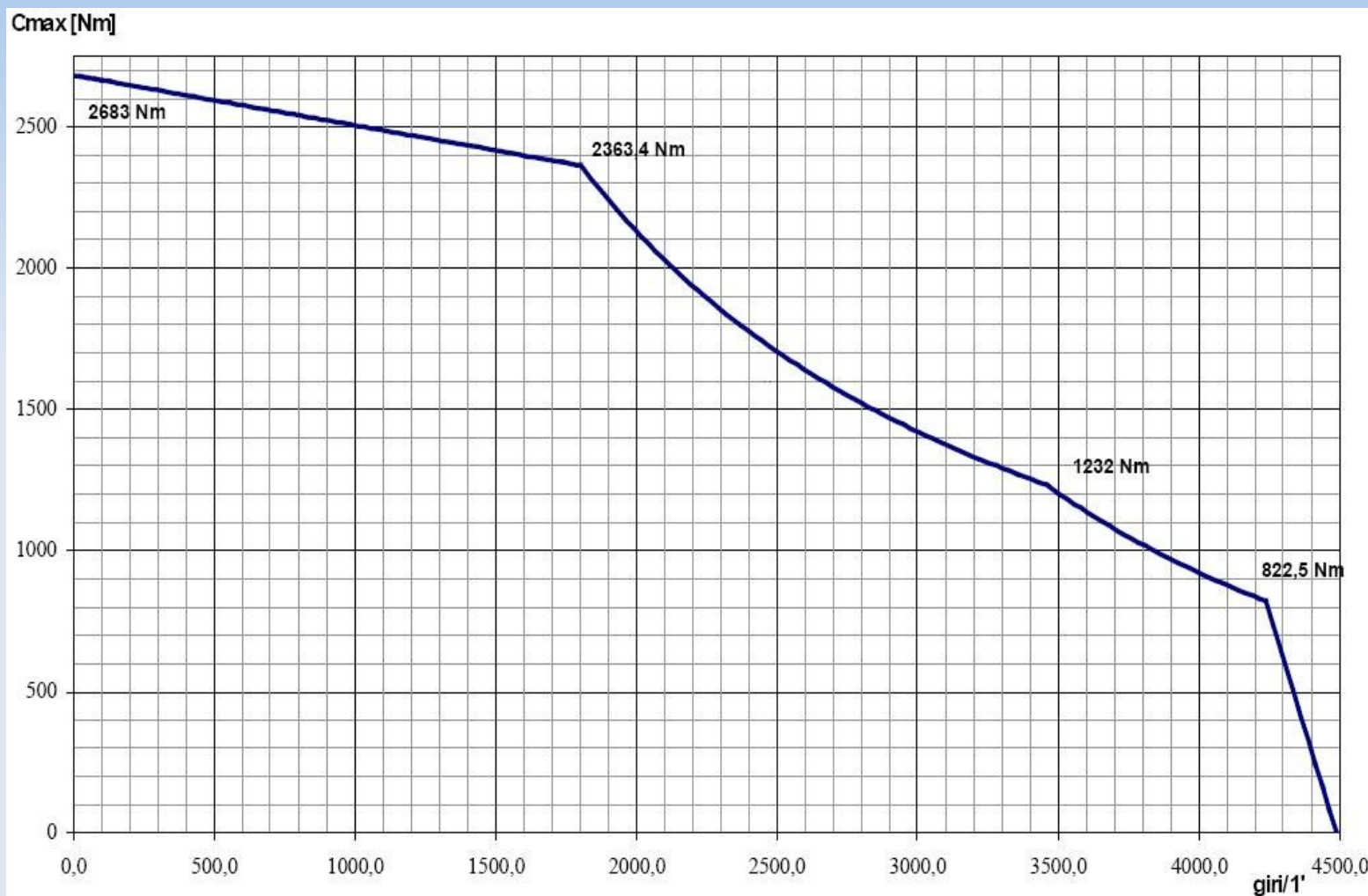


Lillo Petruzzella - E 464 085 Catania C.le, 06/01/2005

Locomotiva E 464



# Locomotive elettriche con motori asincroni trifase (c.a.)

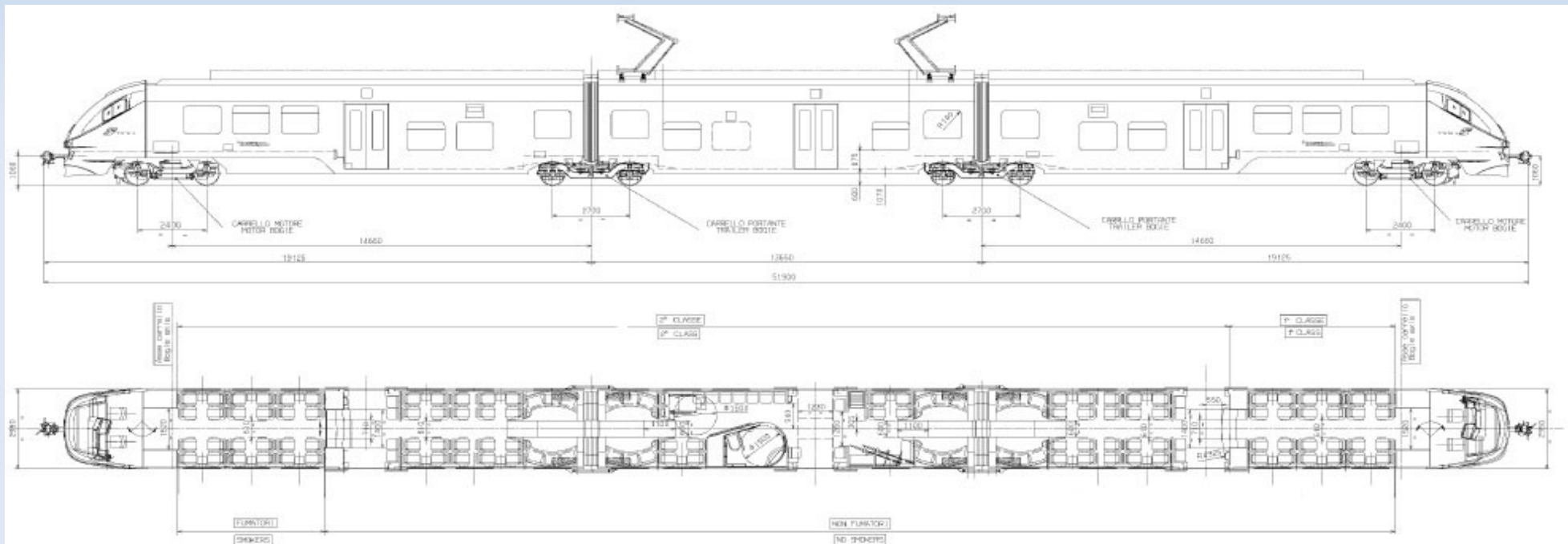


Coppia massima di un motore in funzione della velocità in trazione

Locomotiva E 464

# Locomotive elettriche con motori asincroni trifase (c.a.)

## Automotrice elettrica ALe 501/502 "MINUETTO"





# Locomotive elettriche con motori asincroni trifase (c.a.)

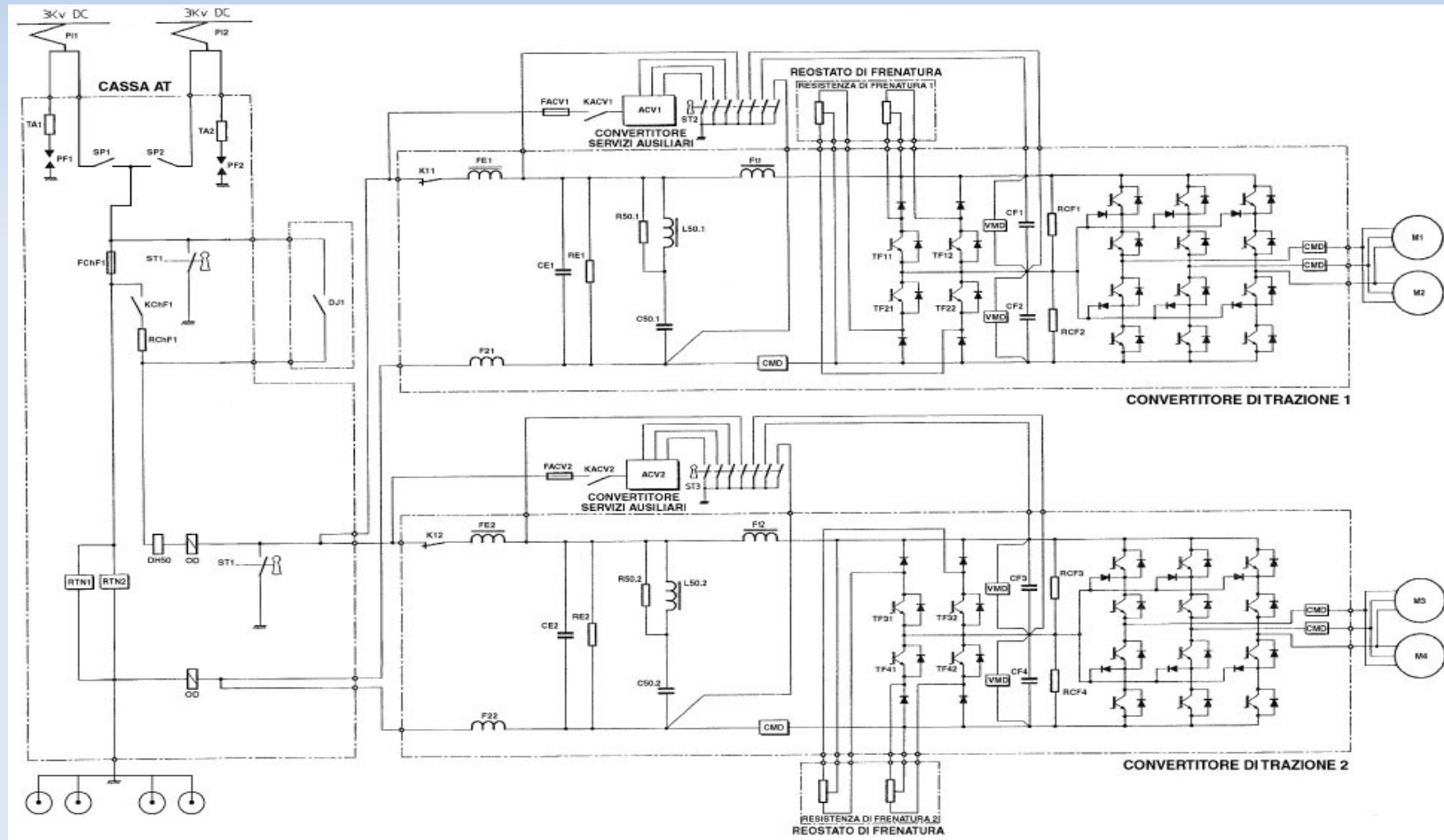
## Automotrice elettrica ALe 501/502 “MINUETTO”

Lillo Petruzzella - ALe 502 050 Racalmuto (AG), 10/04/2006



# Locomotive elettriche con motori asincroni trifase (c.a.)

## Schema elettrico dell'automotrice elettrica ALe 501/502 “MINUETTO”



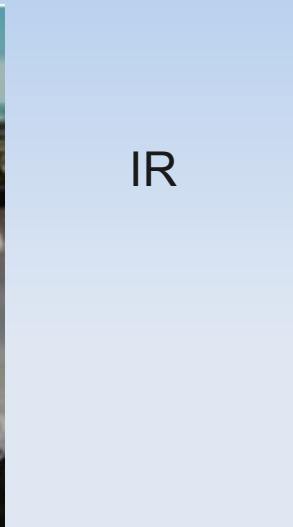


# Locomotive elettriche con motori asincroni trifase (c.a.)

## Automotrice elettrica ALe 501/502 “MINUETTO”



Convertitore



IR



Pantografo

# Locomotive elettriche con motori asincroni trifase (c.a.)

## Automotrice elettrica ALe 501/502 “MINUETTO”

Convertitore servizi ausiliari



# Locomotive elettriche con motori asincroni trifase (c.a.)

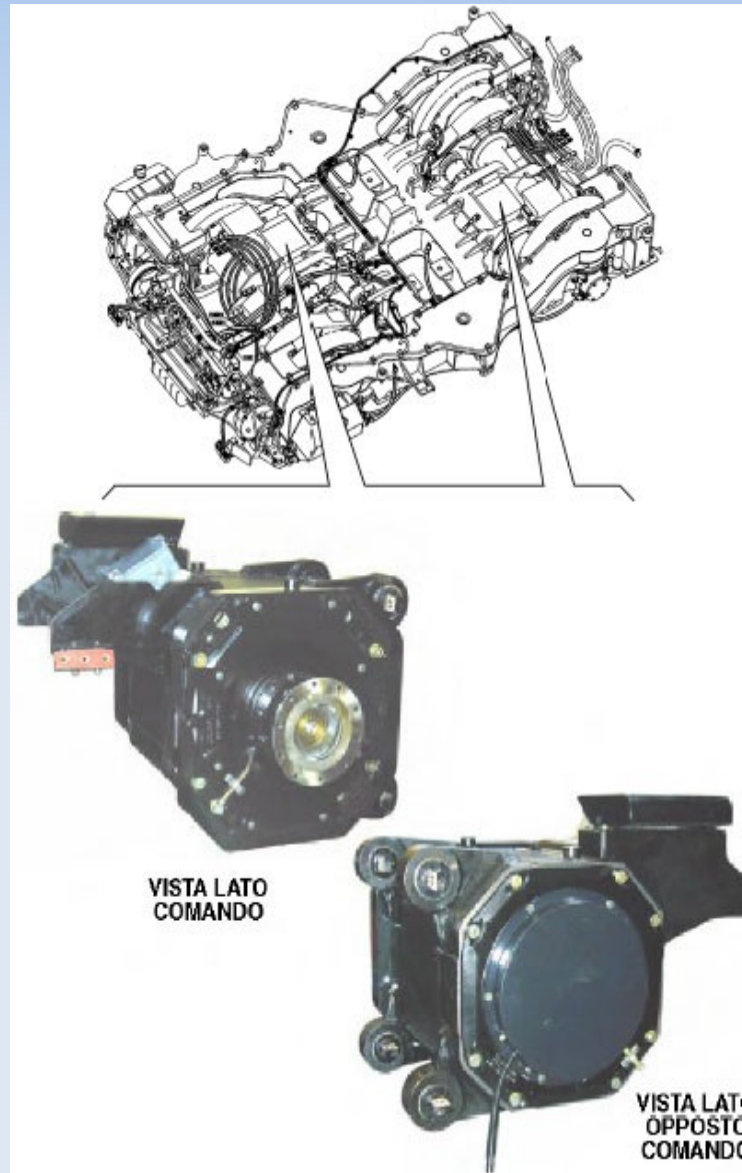
## Automotrice elettrica ALe 501/502 “MINUETTO”

Reostati di frenatura



# Locomotive elettriche con motori asincroni trifase (c.a.)

Motori e loro  
posizionamento sulla  
sala montata



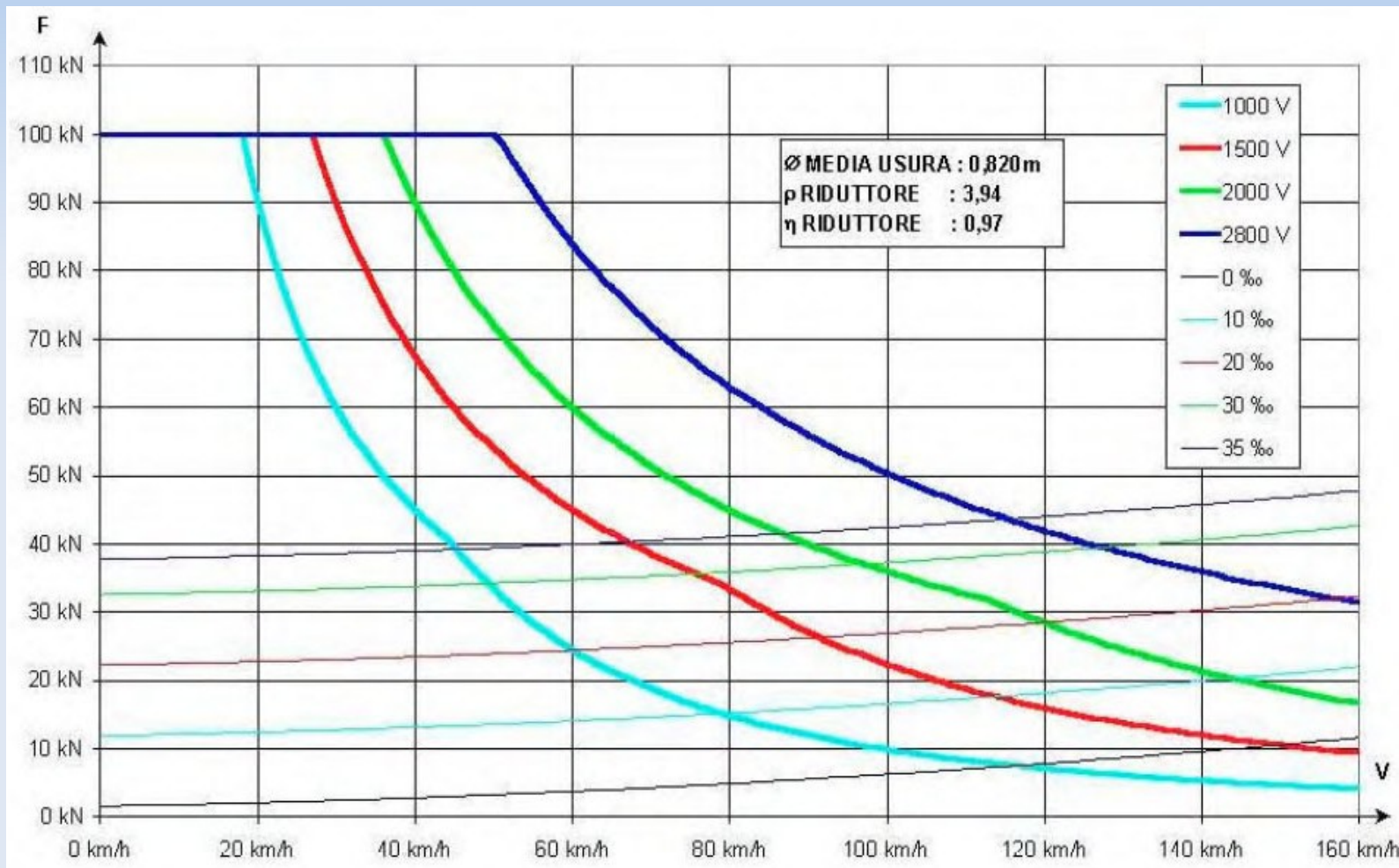
**Automotrice  
elettrica ALe  
501/502  
“MINUETT  
O”**



# Locomotive elettriche con motori asincroni trifase (c.a.)

## Automotrice elettrica ALe 501/502 "MINUETTO"

Curve sforzo di trazione-velocità in funzione della tensione di alimentazione





# Azionamenti elettrici per la trazione ferroviaria

**Grazie per l'attenzione.**