Macchina asincrona

Parte	Argomenti
1	Generalità Principio di funzionamento Circuito equivalente
2	Caratteristica meccanica Grandezze nominali
3	Determinazione dei parametri del circuito equivalente Macchine con rotore a gabbia speciale
4	Regolazione della velocità

Caratteristica meccanica

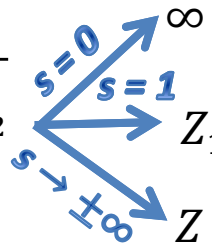
*Comportamento della macchina al **variare della velocità** del rotore e quindi dello **scorrimento** (circuito equivalente **semplificato**, **perdite a vuoto trascurabili**)*

Corrente di rotore

$$I_{12} = \frac{V_1/\sqrt{3}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_{12}}{s}\right)^2 + X^2}}$$

Impedenza di fase

$$Z_{1s} = \sqrt{\left(R_1 + \frac{R_{12}}{s}\right)^2 + X^2}$$



$$Z_{1cc} = \sqrt{(R_1 + R_{12})^2 + X^2}$$

$$Z = Z_{1\infty} = \sqrt{R_1^2 + X^2}$$

Coppia elettromagnetica** prodotta dalla macchina **a regime permanente** al variare di **n** e di **s

$$C = 3\frac{R_{12}}{s\Omega_0} I_{12}^2 \qquad \Omega = \Omega_0(1-s)$$

$$C = 3\frac{R_{12}}{s\Omega_0}\frac{V_1^2/3}{\left(R_1 + \frac{R_{12}}{s}\right)^2 + X^2} = \frac{R_{12}}{s\Omega_0}\frac{V_1^2}{R_1^2 + \left(\frac{R_{12}}{s}\right)^2 + \frac{2R_1R_{12}}{s} + X^2}$$

$$C = \frac{1}{\Omega_0}\frac{V_1^2}{\frac{s}{R_{12}}\left(Z^2 + \frac{R_{12}^2}{s^2} + 2\frac{R_1R_{12}}{s}\right)}$$

Proporzionale al quadrato della tensione

$$C = \frac{V_1^2}{\Omega_0 Z\left(\frac{Zs}{R_{12}} + \frac{R_{12}}{sZ} + 2\frac{R_1}{Z}\right)}$$

coppia in funzione dello scorrimento

Rotore bloccato (n=0, s=1)

Avviamento ⇕ Funzionamento in cortocircuito

corrente di rotore ⇨ $I_{12} = \frac{V_1/\sqrt{3}}{Z_{1cc}} = \frac{V_1/\sqrt{3}}{\sqrt{(R_1 + R_{12})^2 + X^2}} = I_{12cc}$

potenza elettrica ⇨ $P_e = 3(R_1 + R_{12})I_{12cc}^2 = P_{ep1} + P_{ep2}$ *(N.B.: si trascurano le perdite a vuoto)*

potenza trasmessa ⇨ $P_t = 3R_{12}I_{12cc}^2 = P_{ep2}$

potenza meccanica ⇨ $P_m = 0$

coppia di avviamento ⇨ $C_a = \frac{P_t}{\Omega_0} = 3\frac{R_{12}}{\Omega_0}I_{12cc}^2 = \frac{R_{12}}{\Omega_0}\frac{V_1^2}{Z_{1cc}^2} = \frac{P_{ep2}}{\Omega_0}$

$$C_a = \frac{V_1^2}{\Omega_0 \cdot Z\left(\frac{Z}{R_{12}} + \frac{R_{12}}{Z} + 2\frac{R_1}{Z}\right)}$$

$\frac{R_{12}}{Z}$ e $\frac{R_1}{Z}$ *piccoli rispetto a* $\frac{Z}{R_{12}}$ ⇨ $C_a \cong R_{12}\frac{V_1^2}{\Omega_0 \cdot Z^2} \cong R_{12}\frac{V_1^2}{\Omega_0 \cdot X^2}$ *Proporzionale alla* ***resistenza rotorica***

Rotore in moto ($0 < n < n_0$, $1 > s > 0$)

Funzionamento da motore

coppia elettromagnetica ⇨ $C = 3\frac{R_{12}}{s\Omega_0} I_{12}^2 > 0$ (motrice)

potenza meccanica ⇨ $P_m = C\Omega_0(1-s) > 0$ (erogata)

potenza elettrica ⇨ $P_e = P_{ep} + P_m > 0$ (assorbita)

potenza trasmessa ⇨ $P_t = P_{ep2} + P_m > 0$ (assorbita dal rotore)

Profilo di coppia al variare di s ⇨ $C = \frac{V_1^2}{\Omega_0 Z\left(\frac{Zs}{R_{12}} + \frac{R_{12}}{sZ} + 2\frac{R_1}{Z}\right)}$ ⇨ *Dall'avviamento* $\{s = 1,\ C = C_a\}$ *aumenta fino ad un valore massimo* $\{s = s_M,\ C = C_M\}$ *per annullarsi al sincronismo* $\{s = 0, C = 0\}$

Calcolo scorrimento di massimo $s_M > 0$

$$\left.\frac{dC(s)}{ds}\right|_{s>0} = 0 \Rightarrow \left.\frac{d}{ds}\left(\frac{Zs}{R_{12}} + \frac{R_{12}}{sZ} + 2\frac{R_1}{Z}\right)\right|_{s>0} = 0$$

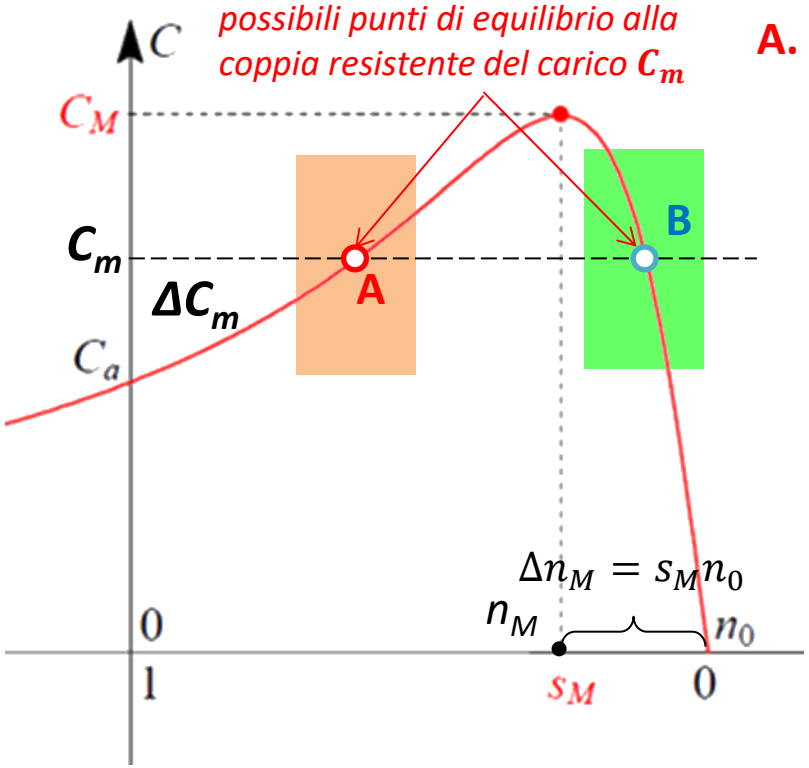
$$\frac{Z}{R_{12}} - \frac{R_{12}}{s^2 Z} = 0 \Rightarrow s^2 = \left(\frac{R_{12}}{Z}\right)^2 \Rightarrow s = \pm\frac{R_{12}}{Z}$$

$$s_M = \frac{R_{12}}{Z}$$

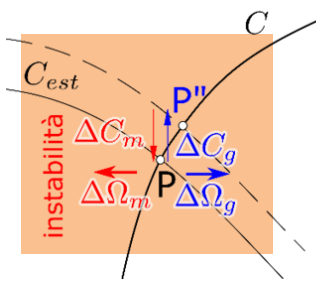
$$C_M = \frac{V_1^2}{2\cdot\Omega_0(Z + R_1)} \cong \frac{V_1^2}{2\cdot\Omega_0\cdot Z} \cong \frac{V_1^2}{2\cdot\Omega_0\cdot X}$$

- C_M *non dipende da* R_{12}, *ma* $\propto 1/X$ $(Z \approx X \gg R_1)$
- s_M $(R_{12} \ll Z) \Rightarrow n_M \rightarrow n_0$

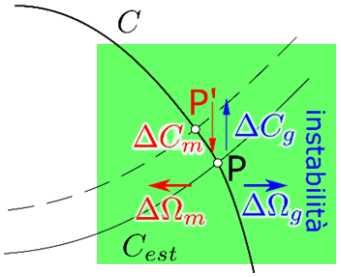
Rotore in moto ($n_M \leq n < n_0$, $s_M \geq s > 0$)



A. **funzionamento <u>instabile</u>**



B. **funzionamento <u>stabile</u>**



- Campo di stabilità molto ristretto

↓

$\Delta n_M = n_0 - n_M = n_0 - n_0(1 - s_M) = s_M n_0$

(s_M basso per limitare le perdite ohmiche)

↓

piccole variazioni di velocità al variare della coppia di carico

- Per **<u>piccoli valori di scorrimento:</u>**

$$I_{12} = \frac{V_{12}/\sqrt{3}}{Z_{1s}} \cong \frac{V_{12}/\sqrt{3}}{R_{12}} s$$

$$C = \frac{3R_{12}I_{12}^2}{\Omega_0 s} \cong \frac{V_1^2}{\Omega_0 R_{12}} s$$

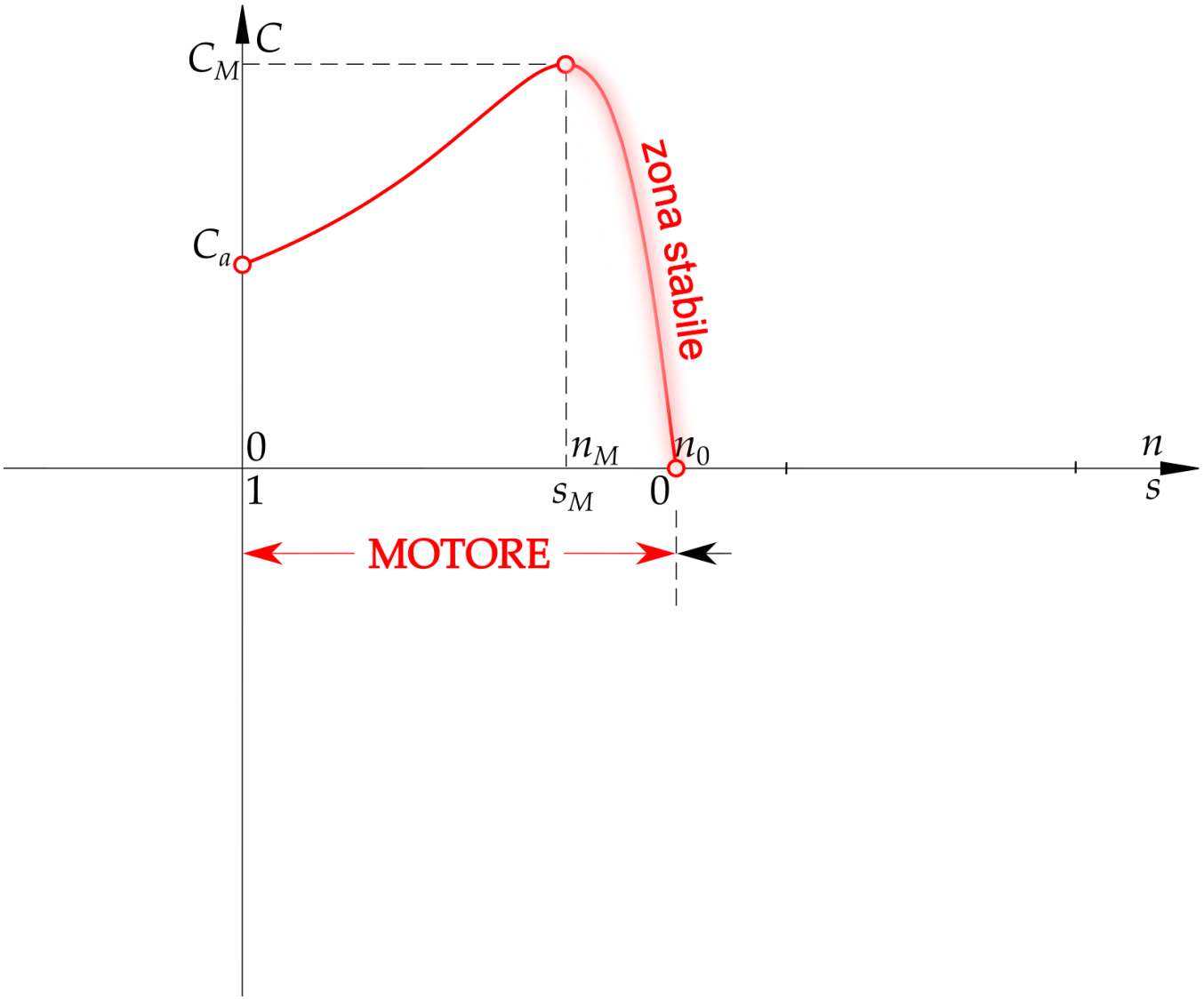
- $I_{12} \propto s$
- $P_{ep} \propto s^2$
- $C \propto s$ (utile per definire strategie di controllo)
- R_{12} piccola $\rightarrow dC/ds$ grande, caratteristica ripida

Rotore in sincronismo ($n = n_0$, $s = 0$)

- Impedenza di fase $\rightarrow \infty$
  - $\boldsymbol{I_{12} \rightarrow 0 \Rightarrow}$ **funzionamento a vuoto**
  - $C \rightarrow 0$
  - $P_e, P_{ep}, P_m \rightarrow 0 \Rightarrow$ la macchina **non dissipa né converte energia**
- $\boldsymbol{P_0 = 0 \Rightarrow}$ condizione **teorica** avendo trascurato il ramo derivato nel circuito, irrealizzabile in condizioni reali
- In **pratica**, nel funzionamento **a vuoto** ($I_0 \neq 0$):
  - presenza di **perdite nel rame di statore** che si aggiungono alle **perdite nel ferro** (localizzate quasi esclusivamente nello statore; si possono ritenere trascurabili perdite nel ferro e rame di rotore)
  - presenza di una coppia anche se ridotta per compensare le **perdite meccaniche** $\Rightarrow$ si richiede una corrente indotta $I_2 \neq 0$, anche se ridotta $\Rightarrow$ la velocità di funzionamento n è leggermente inferiore a n_0
  - assorbimento di potenza attiva P_0 esprimibile come:

$$P_0 = \overbrace{3R_1 I_0^2 + P_{fp,s} + P_{mp}}^{\text{significato fisico}} = \overbrace{3R_0 I_a^2 = V_1^2 / R_0}^{\text{modello circuitale semplificato}}$$

Caratteristica meccanica (motore)



Rotore in moto ($n_0 < n < \infty$, $0 > s > -\infty$)

*Rotore in moto **nel verso del campo rotante** con velocità **maggiore di n_0***

coppia elettromagnetica ⇨ $C = 3\dfrac{R_{12}}{s\Omega_0} I_{12}^2 < 0$ (resistente)

potenza meccanica ⇨ $P_m = C\Omega_0(1-s) < 0$ (assorbita)

potenza elettrica ⇨

$P_{ep} < |P_m| \Rightarrow \quad P_e = P_{ep} + P_m < 0$ (erogata) ⇨ **GENERATORE**

$P_{ep} > |P_m| \Rightarrow \quad P_e = P_{ep} + P_m > 0$ (assorbita) ⇨ **FRENO**

*Passaggio tra i due regimi di funzionamento quando **$P_{ep}=|P_m|$** (tutta la potenza meccanica è dissipata)*

$P_e = P_{ep} + P_m = 3\left(R_1 + \frac{R_{12}}{s}\right) I_{12}^2 = 0$ ⇨ $s_R = -\dfrac{R_{12}}{R_1}$ ⇨ $\begin{cases} s_R \cong -1 \\ n_R \cong 2n_0 \end{cases}$

$0 > s > s_R$ ⇨ **GENERATORE** $\qquad s_R > s > -\infty$ ⇨ **FRENO**

Condizione di transizione ⇨ $s = s_R \;\Rightarrow\; R_1 + \dfrac{R_{12}}{s_R} = 0$ ⇨ *Corrente limitata solo dalla reattanza X → max corrente rotorica*

Rotore in moto ($n_0 < n < \infty$, $0 > s > -\infty$)

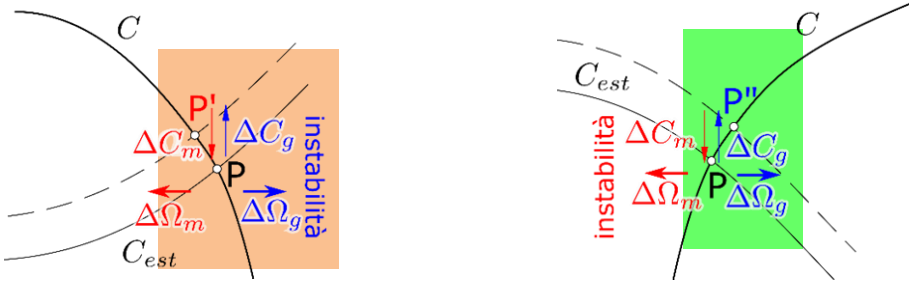
- Coppia elettromagnetica **decrescente** (aumento valore < 0) **da s=0** fino a raggiungere un **valore minimo** C'_M per poi aumentare (riduzione valore < 0) fino ad annullarsi per $s = -\infty$

$$C = \frac{V_1^2}{\Omega_0 Z\left(\frac{Zs}{R_{12}} + \frac{R_{12}}{sZ} + 2\frac{R_1}{Z}\right)} \Rightarrow \left.\frac{dC(s)}{ds}\right|_{s<0} = 0 \Rightarrow \begin{cases} \frac{Z}{R_{12}} - \frac{R_{12}}{s^2 Z} = 0 \\ s < 0 \end{cases} \Rightarrow s'_M = -\frac{R_{12}}{Z}$$

$$\Rightarrow C = -\frac{V_1^2}{2 \cdot \Omega_0 \cdot Z\left(1 - \frac{R_1}{Z}\right)} = C'_M \Rightarrow C'_M = -\frac{V_1^2}{2 \cdot \Omega_0 (Z - R_1)}$$

- $R_1 \ll Z$ $(s'_M > s_R) \Rightarrow C'_M$ nel campo di funzionamento **da generatore**

A. funzionamento instabile **B. funzionamento stabile**

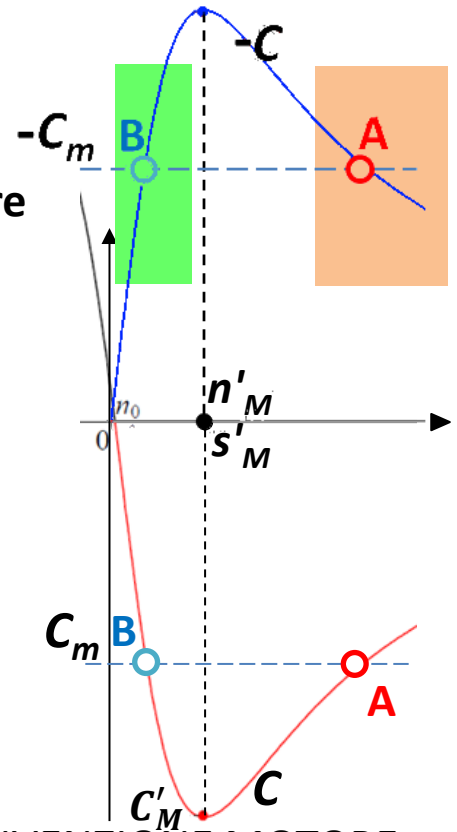


CAMPO DI FUNZIONAMENTO STABILE

- $0 \geq s \geq s'_M (n_0 \leq n \leq n'_M)$ **limite di stabilità** da generatore

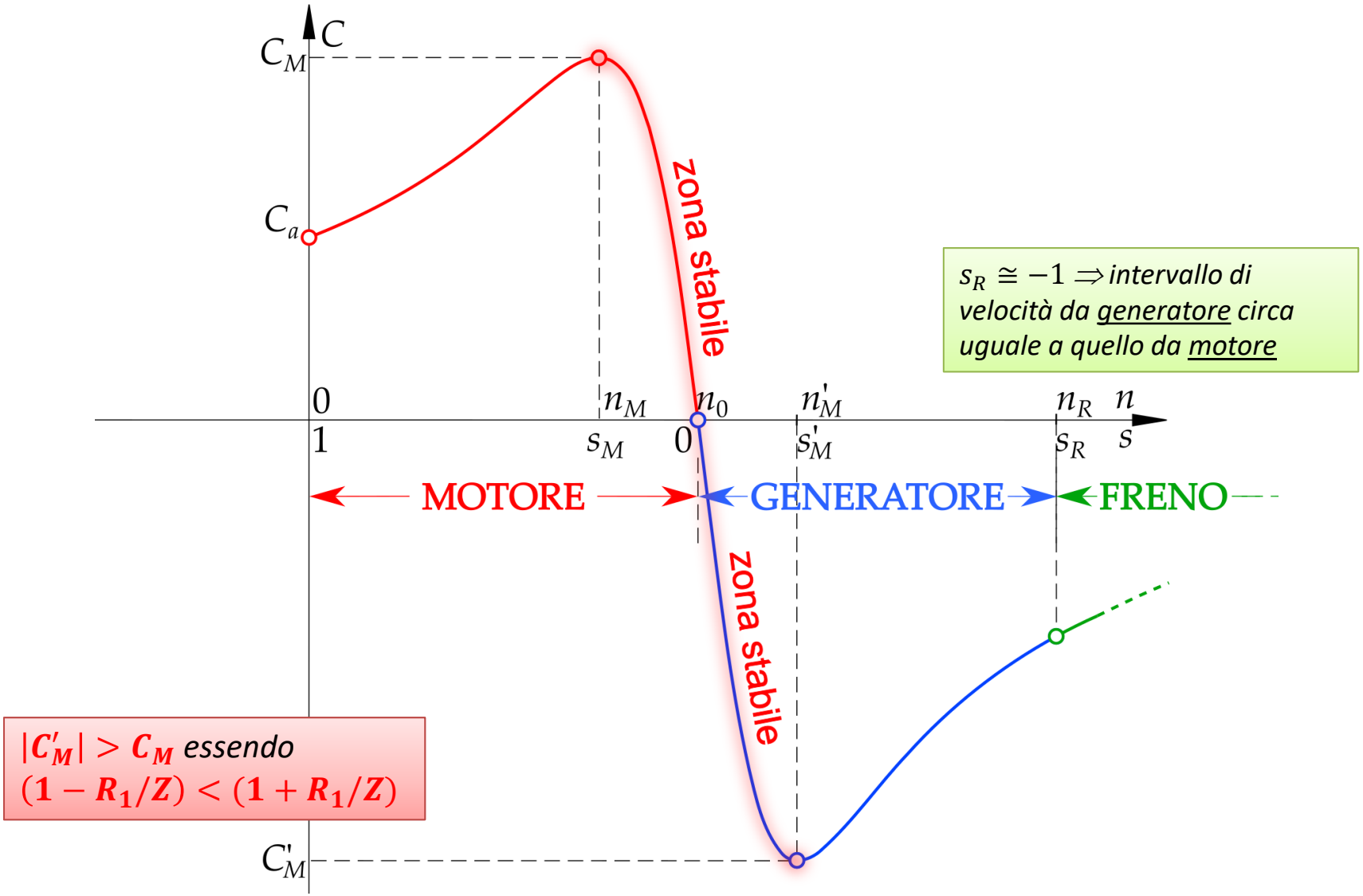
$$\Delta n'_M = n'_M - n_0 = -s'_M n_0 = s_M n_0 = \Delta n_M$$

CONVENZIONE GENERATORE



CONVENZIONE MOTORE

Caratteristica meccanica: generatore/freno

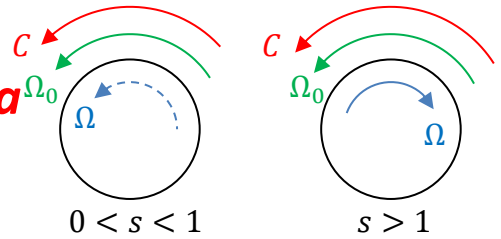


$s_R \cong -1 \Rightarrow$ *intervallo di velocità da <u>generatore</u> circa uguale a quello da <u>motore</u>*

$|C'_M| > C_M$ *essendo* $(1 - R_1/Z) < (1 + R_1/Z)$

Rotore in moto ($-\infty < n < 0$, $\infty > s > 1$)

Rotore in moto ***in verso contrario al campo rotante***



coppia elettromagnetica ⇨ $C = 3\frac{R_{12}}{s\Omega_0} I_{12}^2 > 0$ (positiva, ma ***contraria al moto***)

potenza meccanica ⇨ $P_m = C\Omega_0(1-s) < 0$ (assorbita)

potenza elettrica ⇨

$P_e = P_{ep} + P_m > 0$ (assorbita)

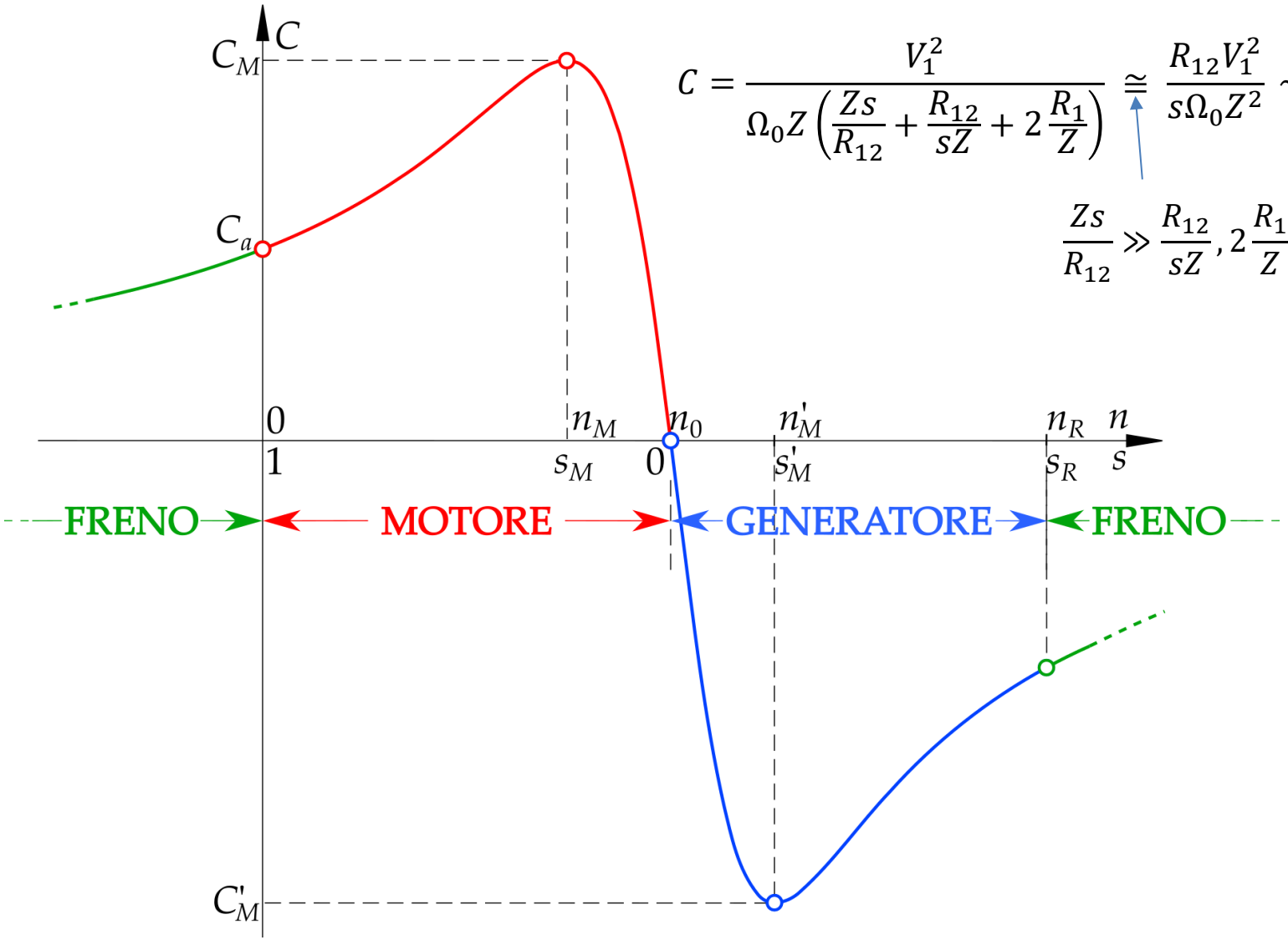
$s > 1 \Rightarrow P_{ep} > |P_m| \Rightarrow$ **FRENO**

$$|P_m| = 3R_{12}\left|\frac{1-s}{s}\right| I_{12}^2 < 3R_{12}I_{12}^2$$

$\left|\frac{1-s}{s}\right| < 1$ per $s > 1$

- Assorbimento sia di potenza elettrica che di potenza meccanica entrambe dissipate sotto forma di perdite
- Funzionamento in questo intervallo utilizzato per **arrestare un motore**
  - **Inversione di due fasi** per invertire il senso di rotazione del campo rotante
  - Frenatura in **'contro corrente'**

Caratteristica meccanica: freno (s>1)



$$C = \frac{V_1^2}{\Omega_0 Z\left(\frac{Zs}{R_{12}} + \frac{R_{12}}{sZ} + 2\frac{R_1}{Z}\right)} \cong \frac{R_{12}V_1^2}{s\Omega_0 Z^2} \sim \frac{1}{s}$$

$$\frac{Zs}{R_{12}} \gg \frac{R_{12}}{sZ}, 2\frac{R_1}{Z}$$

Rotore in moto a velocità infinita

$n = \pm\infty \quad s = \mp\infty$ ⇨ *Situazione limite puramente teorica*

parametri circuito eq. ⇨ $R_{12}\dfrac{1-s}{s} = -R_{12} \qquad Z_{1\infty} = \sqrt{R_1^2 + X^2} = Z$ *impedenza di fase a scorrimento infinito*

corrente rotore a s=∞ ⇨ $I_{12} = \dfrac{V_1/\sqrt{3}}{Z} = \dfrac{V_1/\sqrt{3}}{\sqrt{R_1^2 + X^2}} = I_{12\infty}$

coppia elettromagnetica ⇨ $C = 3\dfrac{R_{12}}{s\Omega_0} I_{12\infty}^2 = 0$ *NO coppia elettromagnetica (rotore mantenuto in movimento da motore esterno)*

potenza elettrica ⇨ $P_e = P_t + P_{ep1} = 3R_1 I_{12\infty}^2 = P_{ep1\infty} > 0$ (assorbita)

potenza trasmessa ⇨ $P_t = 0$

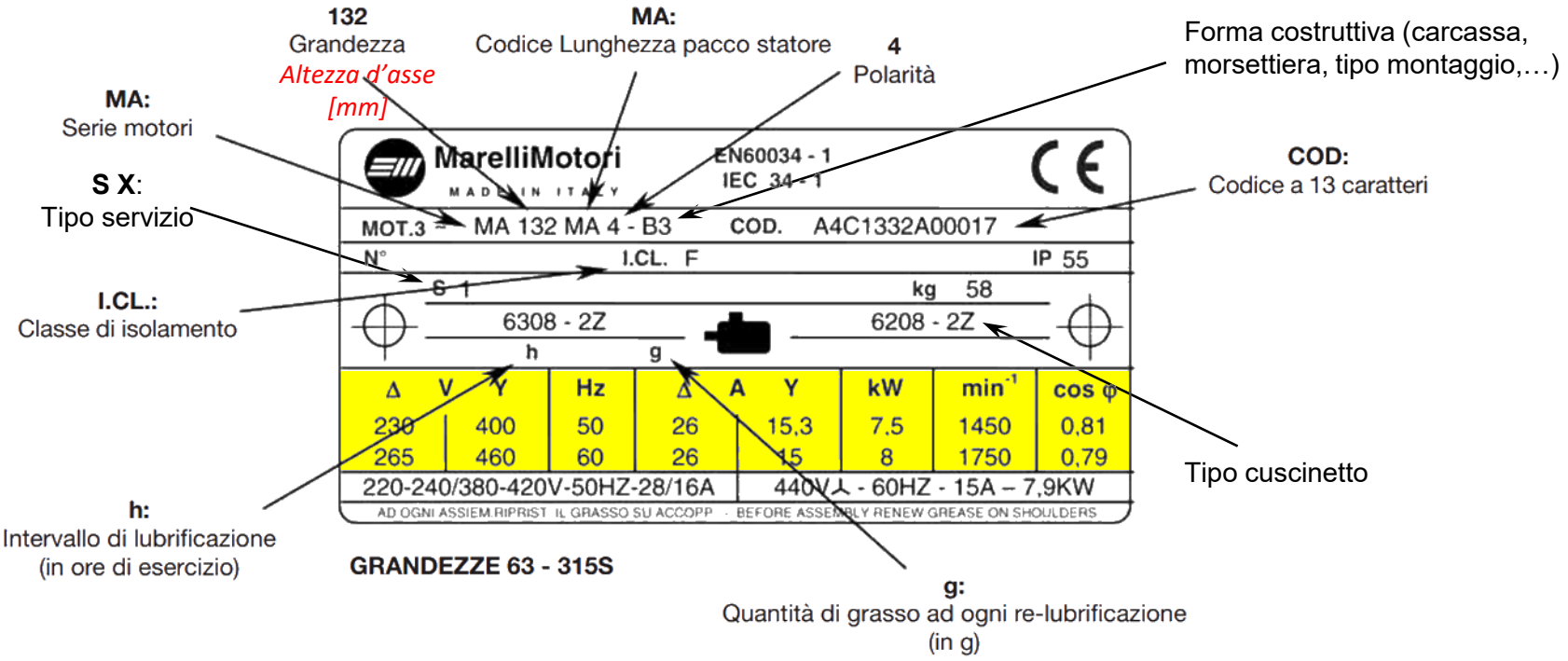
potenza meccanica ⇨ $P_m = P_t - P_{ep2} = -3R_{12} I_{12\infty}^2 = -P_{ep2\infty} < 0$ (assorbita)

- ***Potenza elettrica*** *assorbita ⇒ compensa le* ***perdite nel rame di statore***
- ***Potenza meccanica*** *assorbita ⇒ compensa le* ***perdite nel rame di rotore***
- ***Potenza trasmessa*** *nulla ⇒ statore e rotore non interagiscono*
- *Funzionamento da* ***freno***

Grandezze nominali (motore)

- **Grandezze principali (n. poli *2p* dato)** ***di solito riportate in targa***
  - **potenza nominale** P_n **(potenza meccanica all'albero)**
  - **velocità nominale** n_n
  - **frequenza nominale** f
  - **tensione nominale (concatenata)** V_{1n}
  - **corrente nominale** I_{1n}
  - **fattore di potenza nominale** $\cos\varphi_{1n}$
- **Altre grandezze (ricavabili dalle precedenti o noti i parametri del circuito equivalente)**
  - **scorrimento nominale** $s_n=(60f/p-n_n)/(60f/p)$
  - coppia nominale $C_n=P_n/(2\pi n_n/60)$
  - rendimento nominale $\eta_n=P_n/(\sqrt{3}V_{1n}I_{1n}\cos\varphi_{1n})$
- **Condizioni di funzionamento NOMINALE da motore ($V = V_{1n}$)**
  - Corrente assorbita I_{1n} con fattore di potenza $\cos\varphi_{1n}$
  - Potenza erogata (all'albero) P_n con velocità di rotazione n_n

Esempio di targa e dati catalogo



Motori a 4 poli

POTENZA NOMINALE	TIPO MOTORE	VELOCITÀ	CARATTERISTICHE A POTENZA NOMINALE				FATTORE DI POTENZA	RENDIMENTO 3/4 (CARICO)	PER AVVIAMENTO DIRETTO		COPPIA MASSIMA	RUMOROSITÀ	MOMENTO DI INERZIA	PESO IM 1001 (IM B3)
			COPPIA	CORRENTE (400V)	RENDIMENTO η CLASSE									
kW		rpm min-1	Tn Nm	In A	eff	%	cos φ -	η %	Is/In p.u.	Ts/Tn p.u.	Tmax/Tn p.u.	LPA dB(A)	J kgm2	Approx. kg
1,1	90 S4	1390	7,5	2,7	2	76,6	0,76	77,7	4,1	2,4	2,5	49	0,0033	12,8
30	200 L4	1465	195	58	2	91,6	0,82	91,7	6,6	2,4	2,8	69	0,18	146
90	280 M4	1480	580	157	2	94,5	0,88	94,6	7,1	2,7	2,4	77	1,06	427
400	355 LD4	1490	2561	702	n.c.	95,8	0,86	95,3	6,2	1,9	2,4	79	9,4	2250