

# Azionamenti Elettrici

Parte 2

Tipologie dei motori  
e relativi azionamenti:

Motori asincroni  
Motori e Riluttanza Variabile

**Prof. Alberto Tonielli**

DEIS - Università di Bologna

Tel. 051-6443024

E-mail: [atonielli@deis.unibo.it](mailto:atonielli@deis.unibo.it)

# Indice generale del corso

---

## ■ Parte 1

- Introduzione, richiami di Controlli Automatici ed Elettrotecnica
- Generazione elettromagnetica di coppia

## ■ Parte 2

### ➤ **Tipologie dei motori elettrici e dei relativi azionamenti**

- Motori ed azionamenti C.C.
- Motori ed azionamenti Brushless (sincroni a magneti permanenti)
- **Motori ed azionamenti Asincroni ad Induzione**
- **Motori Passo-passo e coppia**

## ■ Parte 3

- Introduzione al controllo assi

## ■ Parte 4

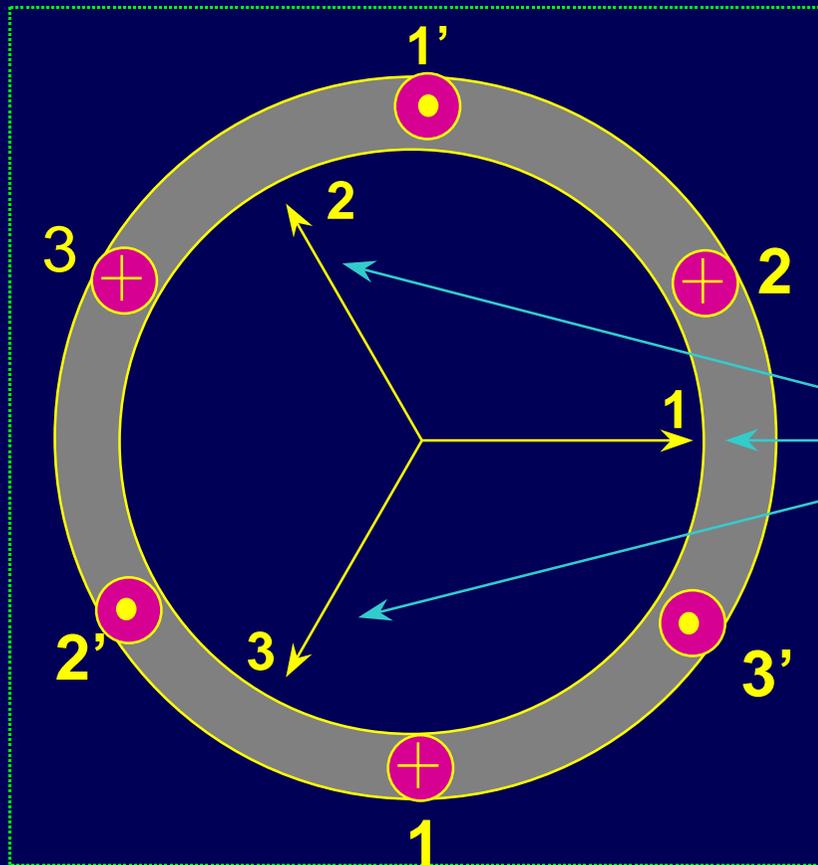
- Scelta dell'azionamento
- Dimensionamento del motore e dell'amplificatore
- Esempi di dimensionamento

# Indice della Seconda Parte

---

- Cenni sugli amplificatori di potenza
- Motori a collettore (C.C.)
  - principio di funzionamento
  - controllo di coppia
- Motori Brushless a campo trapezoidale
  - principio di funzionamento
  - controllo di coppia
- Motori Brushless a campo sinusoidale
  - principio di funzionamento
  - controllo vettoriale di coppia
- **Motori asincroni ad induzione**
  - principio di funzionamento
  - controllo di velocità in catena aperta e vettoriale di coppia
- **Motori a riluttanza variabile**
  - passo-passo e motori coppia

- **Introduzione**
- **Modello statico**
  - equivalente trasformatore
  - curve caratteristiche
- **Controllo basato sul modello statico**
  - controllo V/F costante
  - controllo a scorrimento
- **Modello dinamico**
  - equazioni delle correnti e del flusso
  - equazione della coppia
- **Controllo vettoriale**
  - schemi a blocchi del controllo
  - stima del flusso
- **Motori a Riluttanza Variabile**

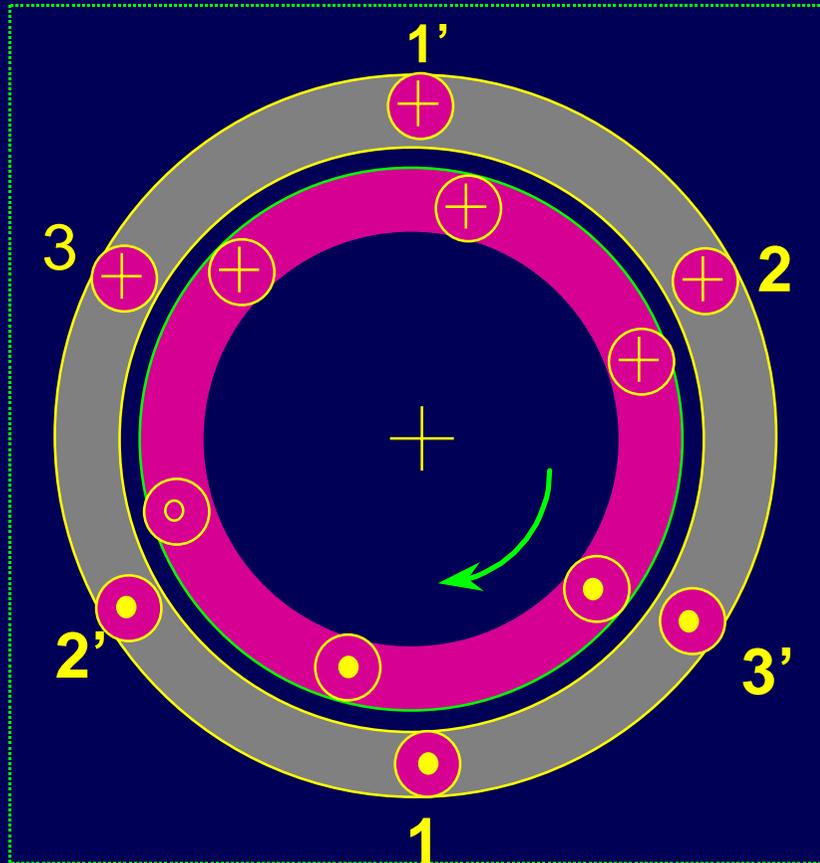


statore analogo a quello del  
motore sincrono

tipica realizzazione trifase

assi magnetici delle tre fasi

siccome si associano le  
correnti ai flussi,  
si assume per le correnti un  
vettore rappresentativo  
allineato con l'asse magnetico  
della relativa fase



rotore con avvolgimenti  
cortocircuitati



gabbia di scoiattolo

Il flusso sul rotore va  
indotto dallo statore



motore asincrono

sistema non lineare  
difficile da controllare

3 circuiti di rotore

3 circuiti di statore

## Caratteristiche generali

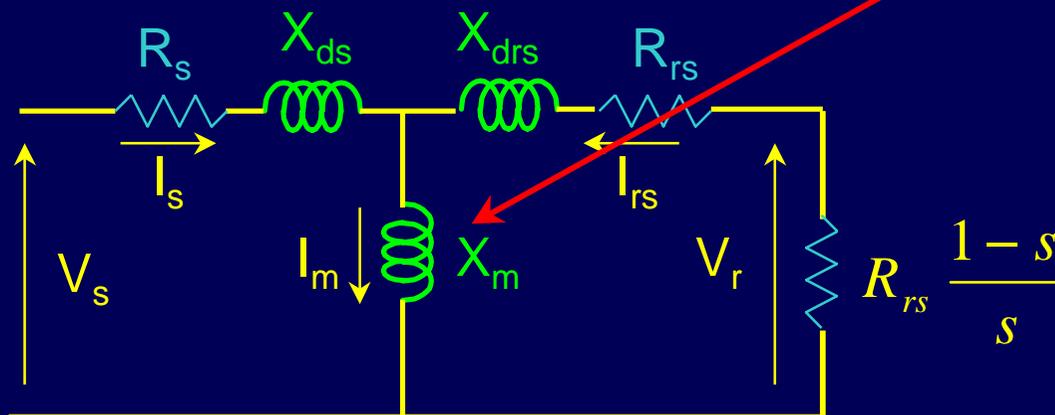
- Il motore produce coppia solo se la velocità meccanica ( $\omega_r$ ) è diversa da quella del campo rotante ( $\omega_s$ )
  - motore asincrono
- Se il rotore taglia le linee di flusso del campo rotante ( $\omega_r \neq \omega_s$ )
  - si induce sul rotore una tensione che fa circolare una corrente sugli avvolgimenti cortocircuitati
  - sul rotore si genera un flusso rotante alla stessa velocità del campo (ma con fase variabile) che, interagendo con esso, genera coppia
  - il campo rotante genera sia il flusso che la coppia
  - la velocità nominale del motore è minore di quella di sincronismo
    - occorre scorrimento per generare coppia

## Equivalente trasformatorico

- Il motore asincrono si comporta come un trasformatore con accoppiamento tra primario e secondario variabile con lo scorrimento

Scorrimento

$$s = \frac{\omega_e - \omega_m}{\omega_e}$$

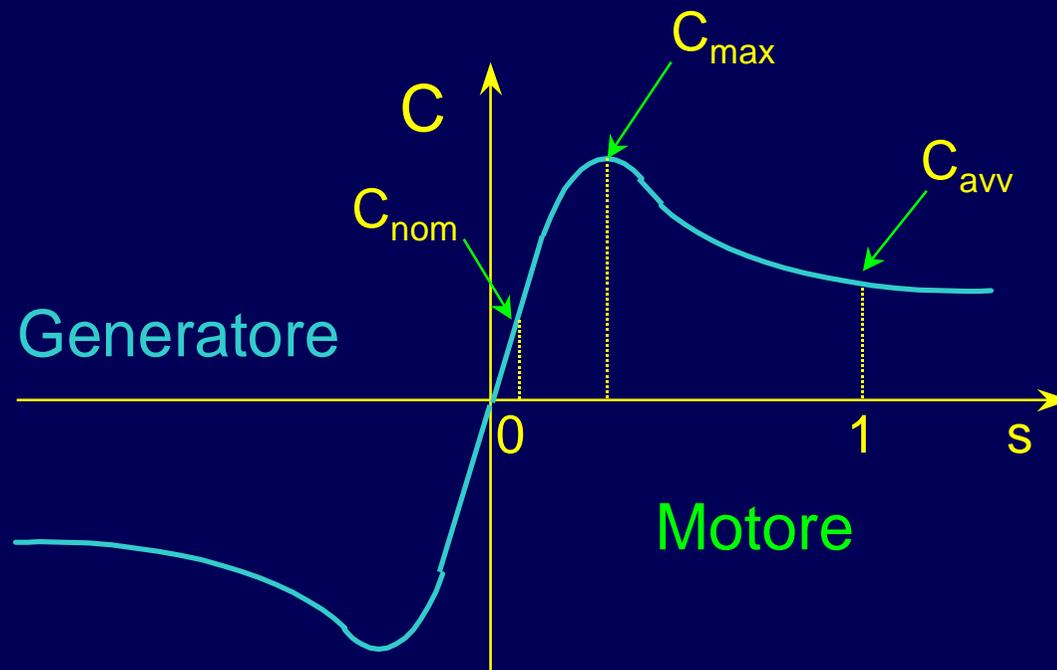


$X_m$  più piccola di quella del trasformatore per la presenza del traferro.  $I_m$  anche 40-50%  $I_{nom}$  nei piccoli motori

Simula come una dissipazione la potenza meccanica trasferita

## Curve caratteristiche

### ■ Caratteristica meccanica a tensione e frequenza costanti



Rendimento rotorico

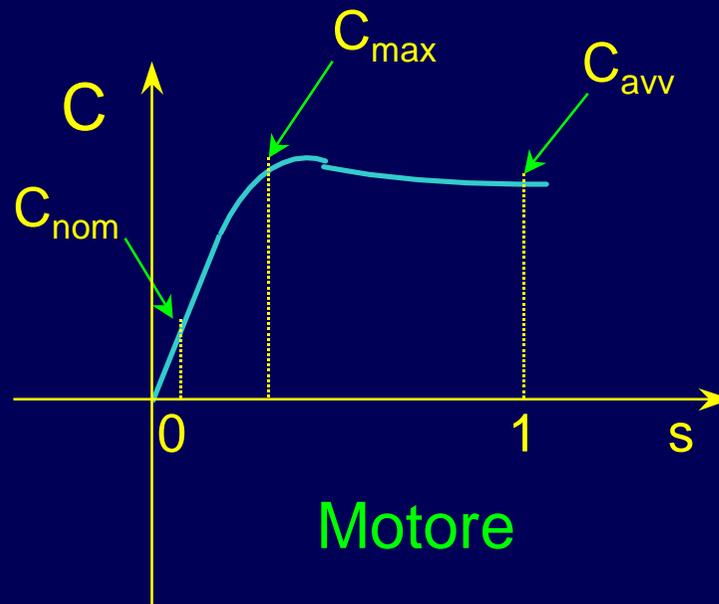
$$\eta_r = 1-s$$

Coppia a basso  $s$

$$C_m = k \cdot s$$

## Curve caratteristiche

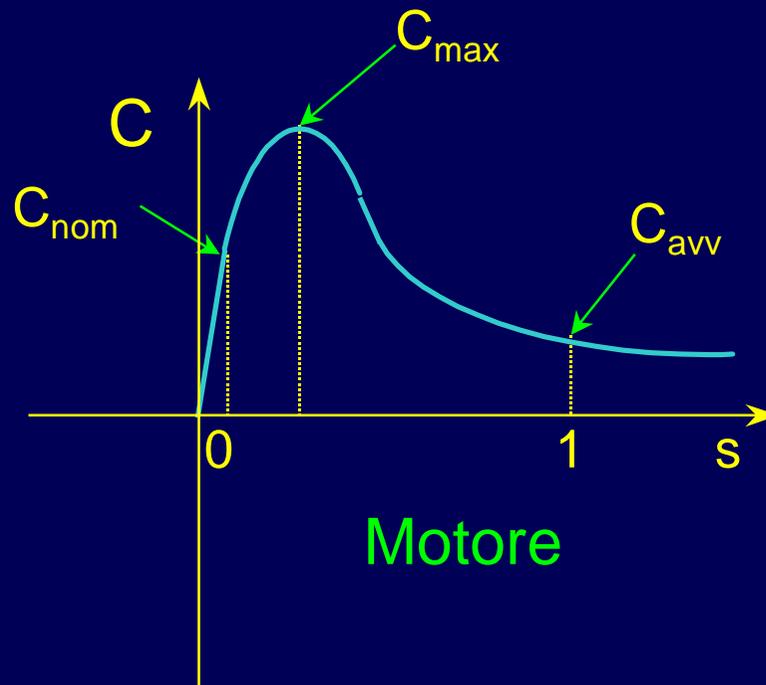
- **Caratteristica meccanica a tensione e frequenza costanti**



**motore standard  
per avviamenti a carico**

## Curve caratteristiche

- **Caratteristica meccanica a tensione e frequenza costanti**



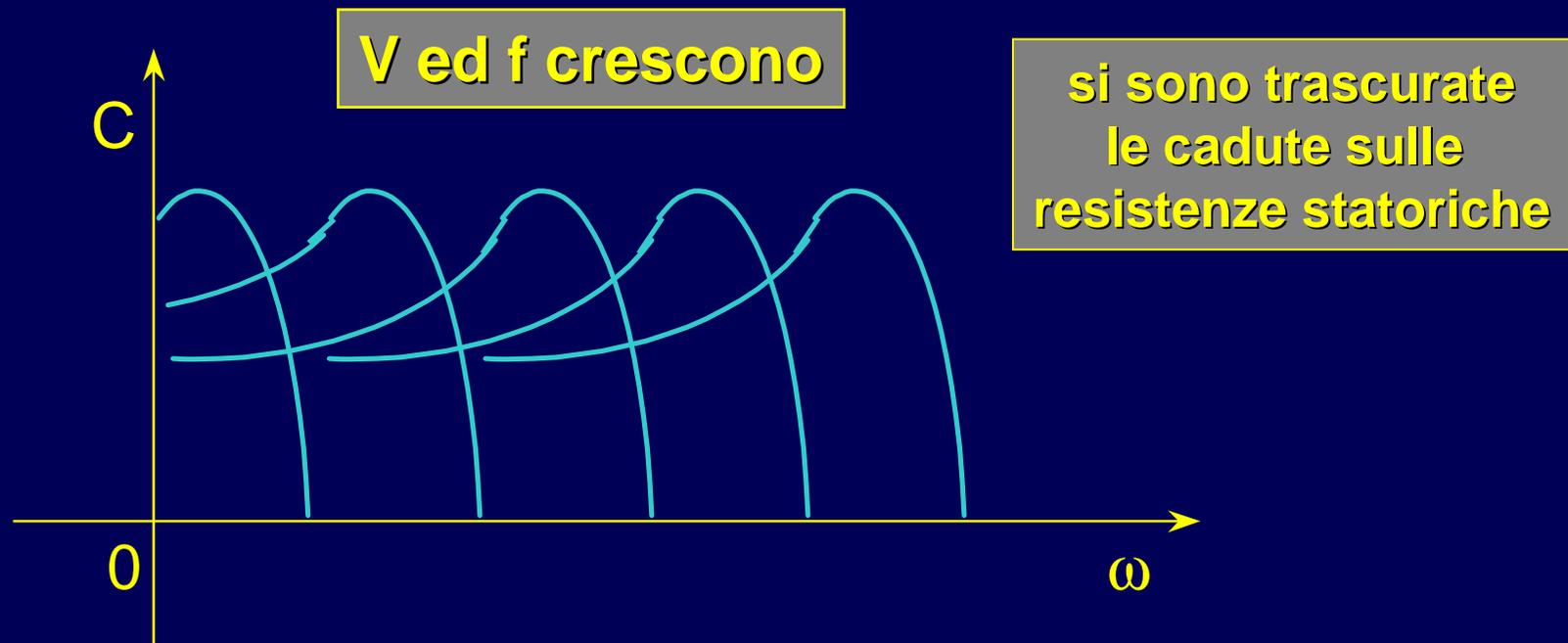
**motore speciale  
per funzionamento  
a frequenza variabile**



**servirebbe anche una  
struttura magnetica  
speciale**

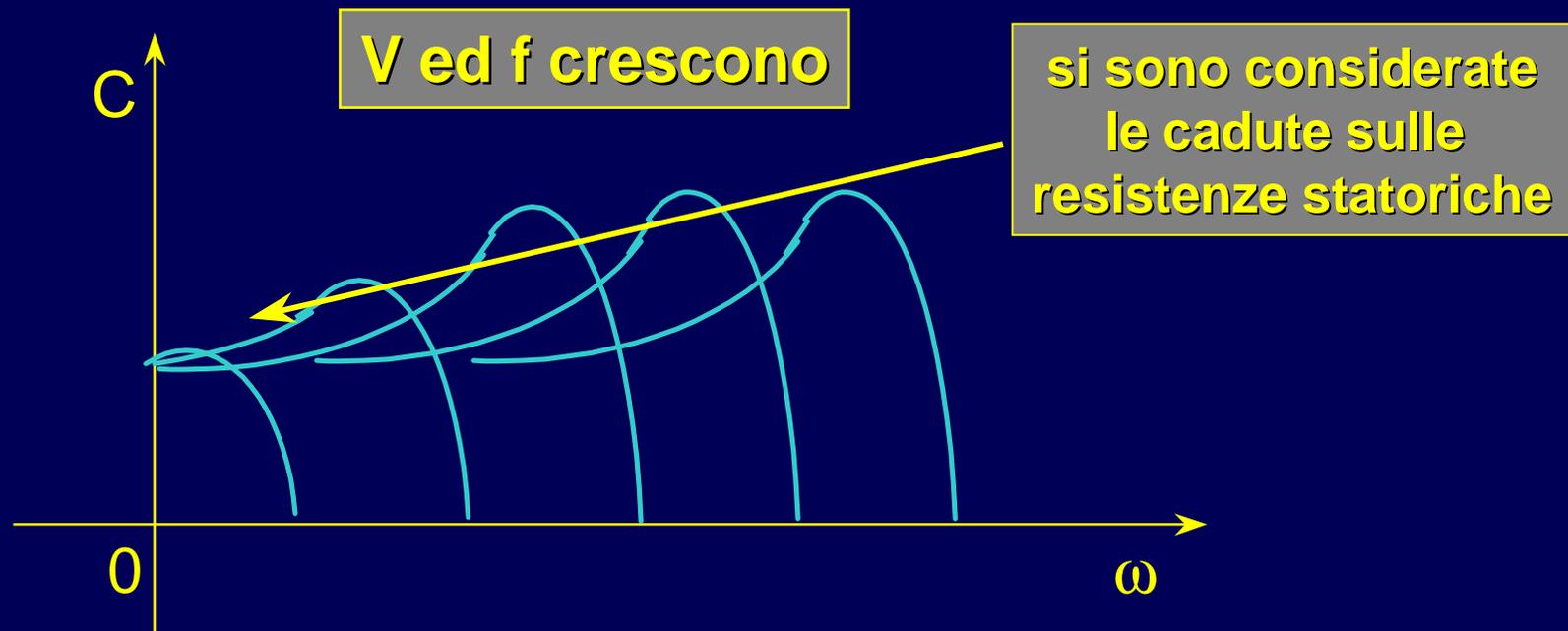
## Curve caratteristiche

- **Caratteristica meccanica ideale a tensione e frequenza variabili ( $V/f = \text{costante}$ )**



## Curve caratteristiche

- **Caratteristica meccanica reale a tensione e frequenza variabili ( $V/f = \text{costante}$ )**



## Numero di poli

### ■ si possono realizzare motori con numero di poli diverso

#### → tipici

- 2, 4, 6 poli

#### → speciali

- 8, 12, 16, 24

#### → per avviamenti con coppie elevate (es. ascensori) doppia polarità

- 2/12, 4/16

### ■ effetto del numero di poli

#### → a parità di potenza

- al crescere del numero di poli si ha una minore velocità nominale e, quindi, una maggiore coppia nominale ( $P=C\omega$ )
- le dimensioni, il peso ed il costo sono funzione della coppia erogata. Crescono quindi al crescere del numero di poli

# Pregi e difetti

## Pro

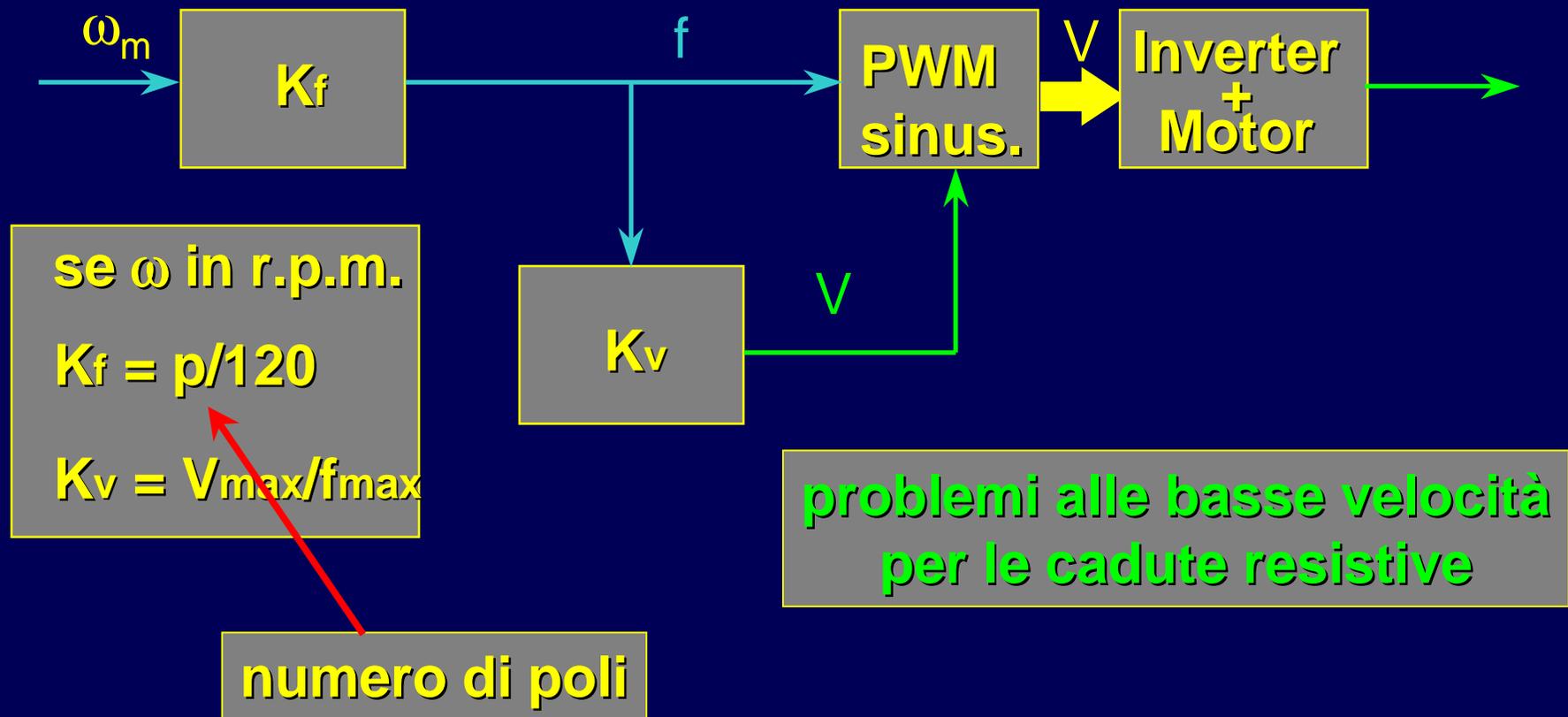
- Pilotaggio sullo statore
- Funzionamento in ambiente ostile anche con presenza di polveri ferromagnetiche
- Basso costo
- Nessun problema alle alte temperature
- Elevata capacita' di sovraccarico
- Coppie dinamiche anche 5-6 volte quella nominale
- Prestazioni elevate in esecuzioni speciali e con azionamenti idonei.
- Possibilita' di funzionamento a velocita' superiori a quella nominale con coppia ridotta (deflussaggio)

## Contro

- calore generato anche sul rotore (ventilaz.)
- la potenza fornita genera coppia e campo
- inerzia relativamente elevata per la presenza di ferro sul rotore
- controllo difficile

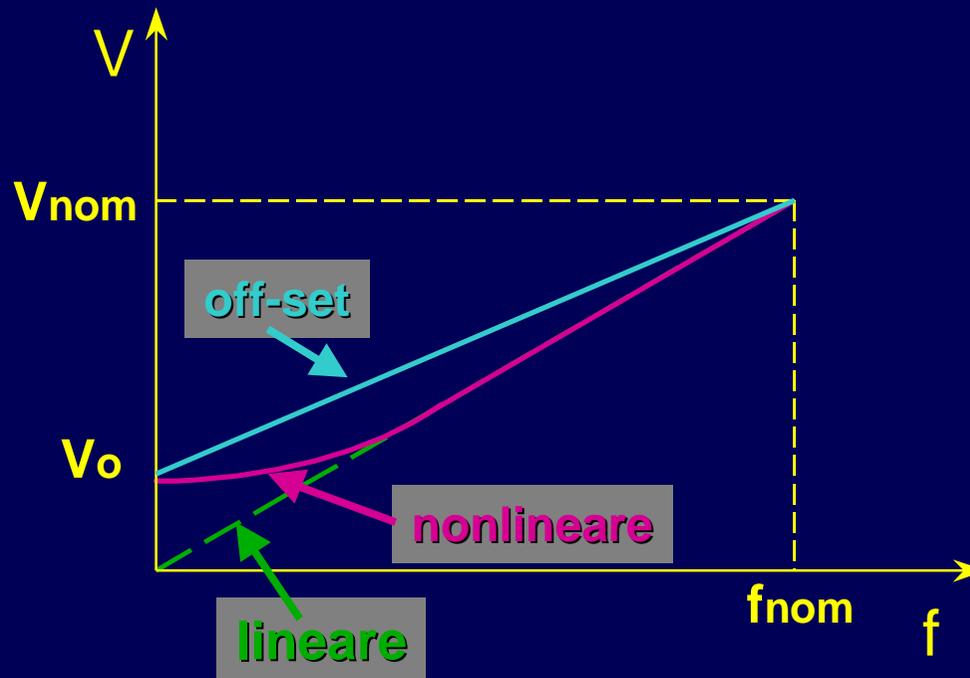
# Azionamenti per motore asincrono

Controlli basati sulle caratteristiche statiche  
Controllo di velocità del tipo  $V/f = K$  costante



# Azionamenti per motore asincrono

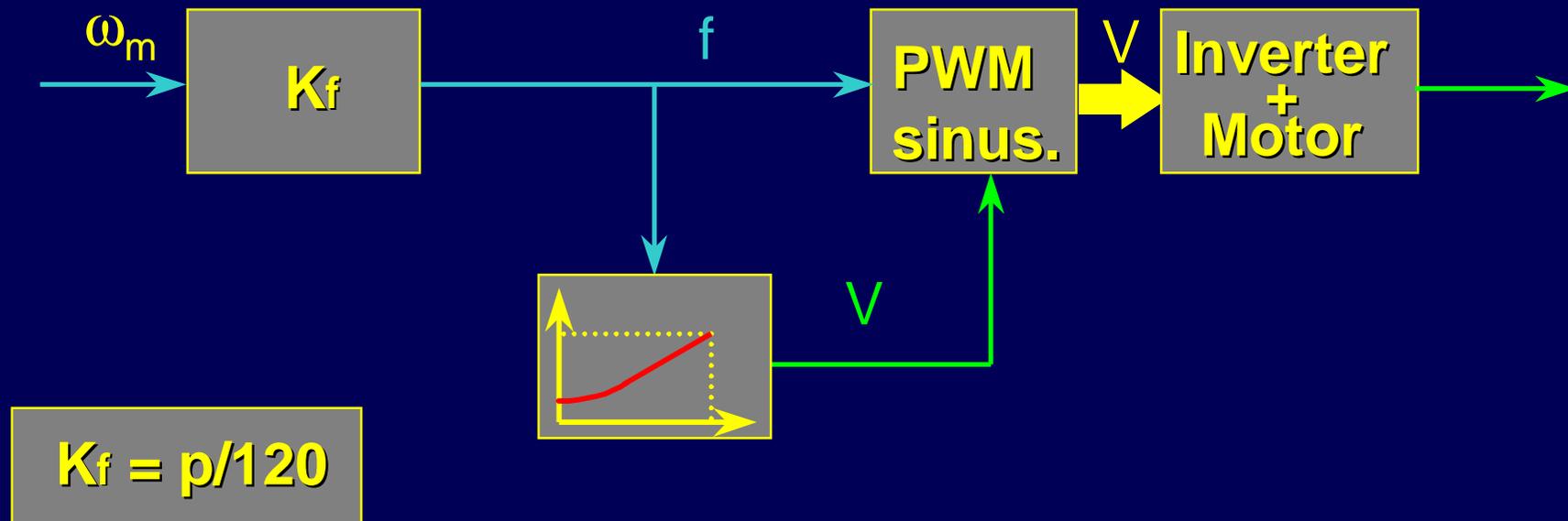
Controlli basati sulle caratteristiche statiche  
Controllo di velocità del tipo  $V/f = K$  costante



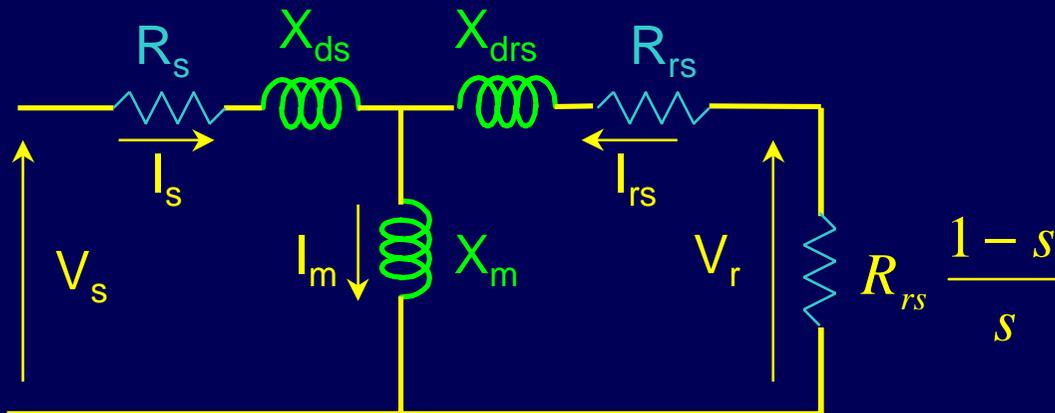
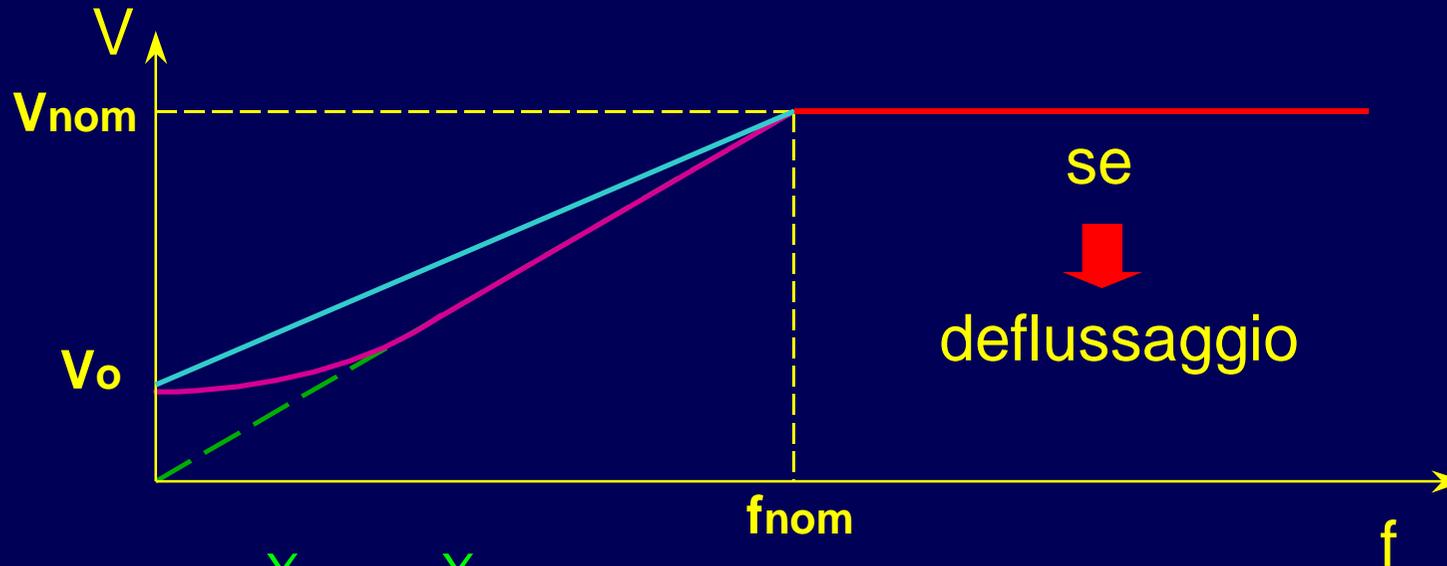
modifiche per  
compensare le  
cadute resistive  
a bassa velocità

# Azionamenti per motore asincrono

Controlli basati sulle caratteristiche statiche  
Controllo di velocità del tipo  $V/f = K$  costante  
compensato



# Azionamenti per motore asincrono



Se  $f > f_{nom}$  e  $V_s = V_{snom}$

$I_m$  cala

deflussaggio

**Attenzione alla potenza**

# Azionamenti per motore asincrono

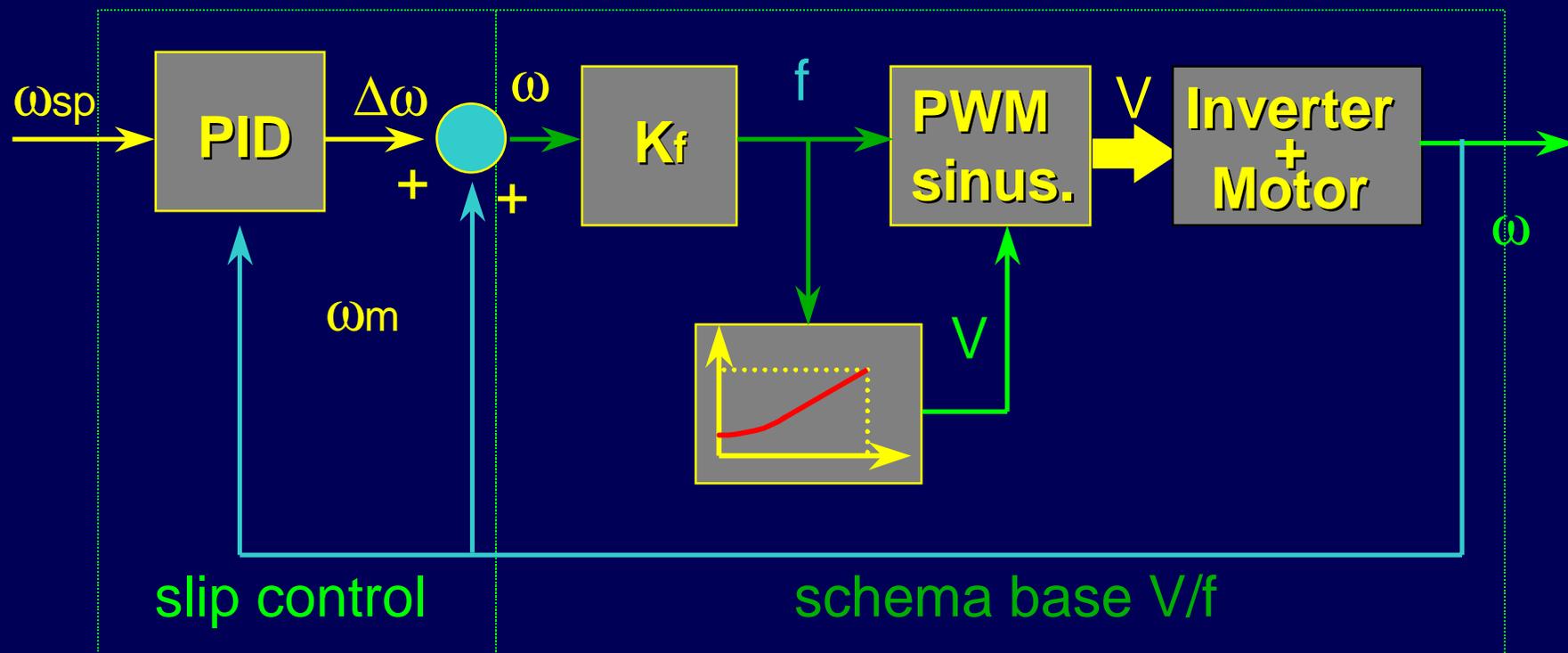
---

## Controllo del tipo V/f costante

- In terminologia tecnica questo tipo di azionamento è chiamato **INVERTER**
  - ➔ controllo di velocità in catena aperta
    - velocità dipendente dal carico
    - si può aggiungere un controllo di velocità
    - la velocità può essere superiore alla velocità nominale
      - + potenza costante
  - ➔ prestazioni dinamiche modeste
  - ➔ problemi alle basse velocità ed in presenza di coppie di carico variabili
  - ➔ costo minimo per Kw

# Azionamenti per motore asincrono

## Controlli basati sulle caratteristiche statiche Controllo di velocità a scorrimento



# Azionamenti per motore asincrono

---

## Controllo di scorrimento

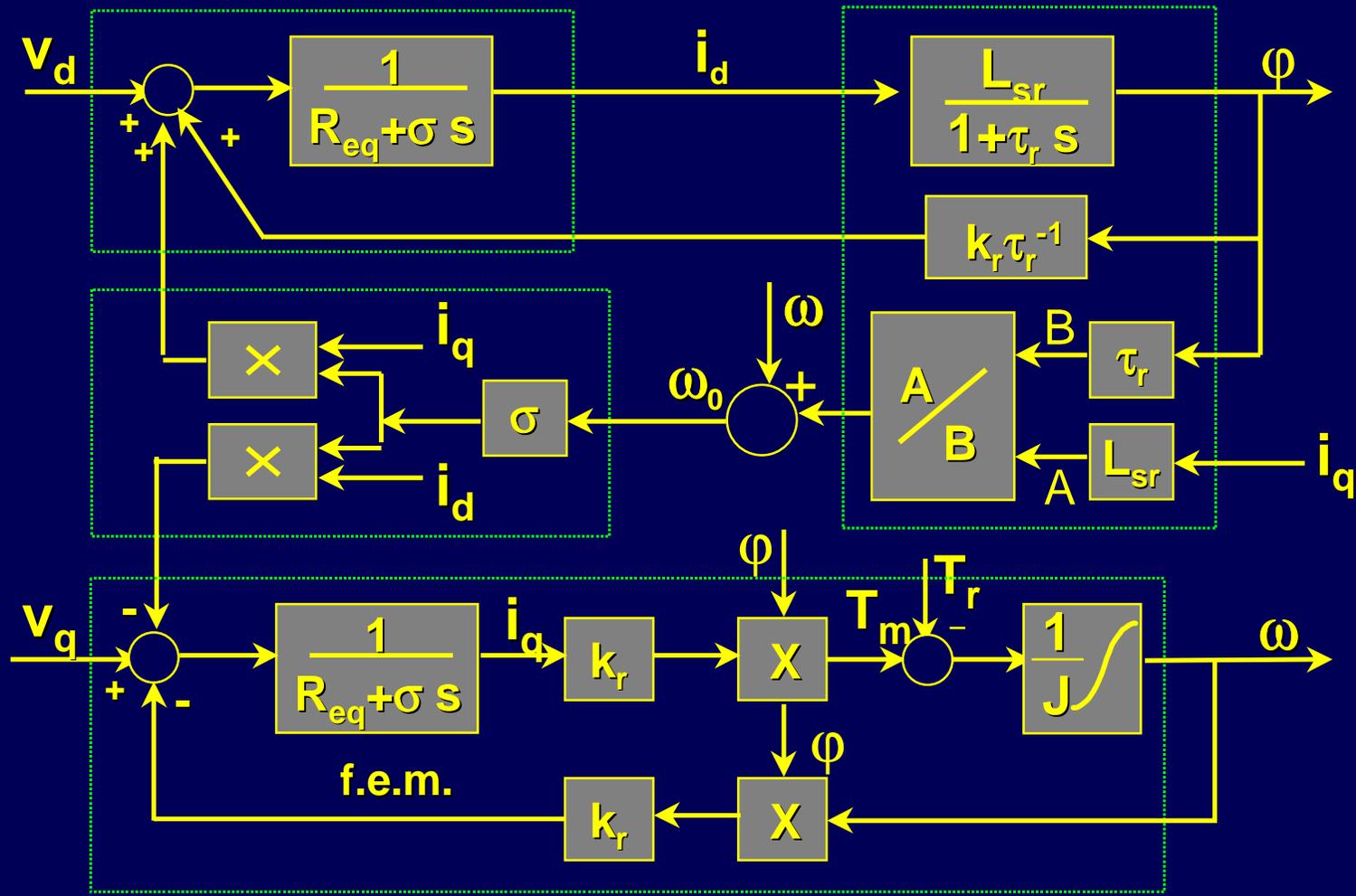
- controllo di velocità in retroazione
  - velocità non dipendente dal carico
- prestazioni dinamiche migliorate ma non eccezionali
- più costoso per la presenza del sensore

## Controllo diretto di coppia

- controllo senza sensore di velocità (sensorless)
  - velocità e coppia di carico stimate con modello
- prestazioni dinamiche buone
- problemi alle bassissime velocità ed in frenata
- più costoso per la necessità di un buon processore

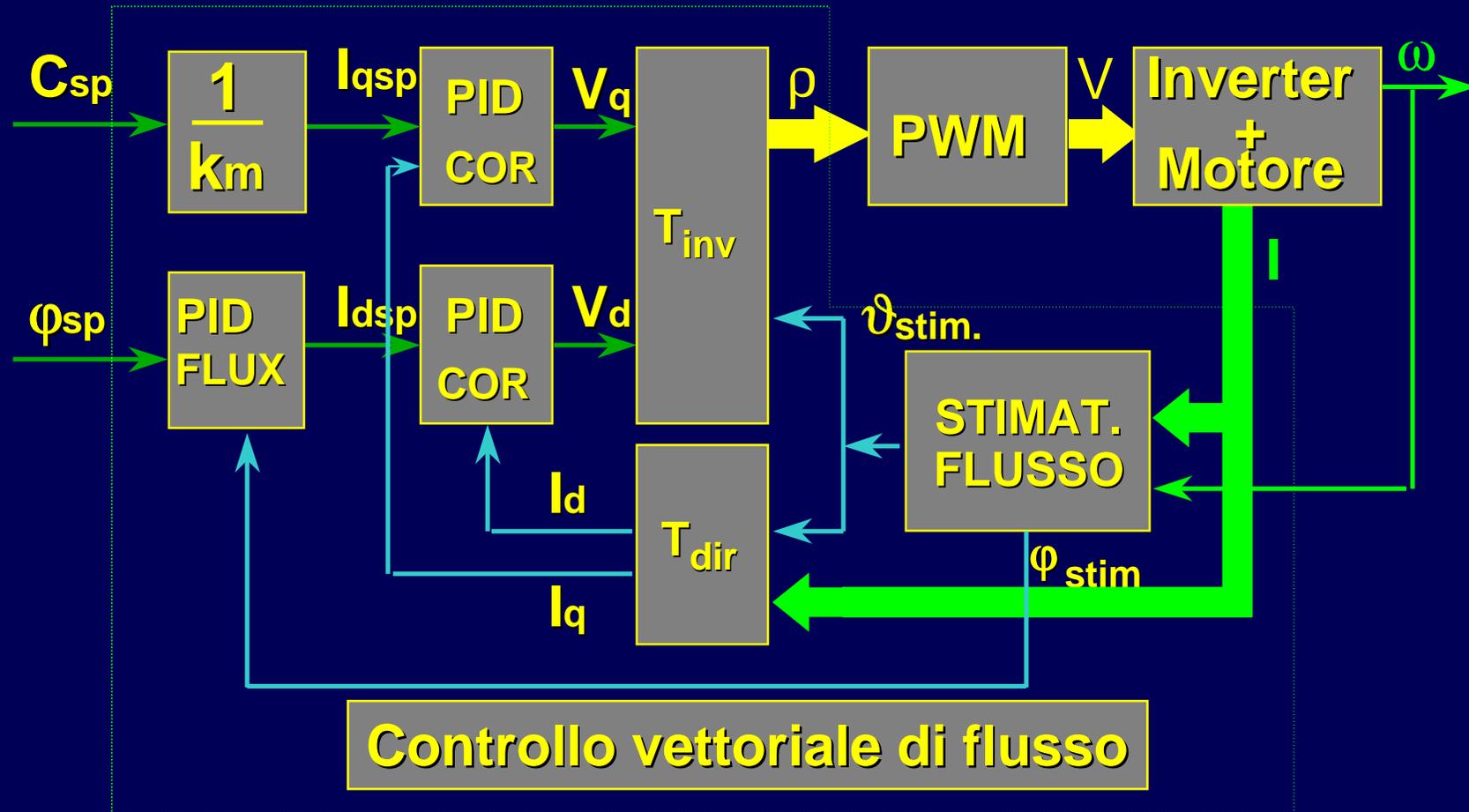
# Motore Asincrono ad Induzione - modello dinamico

## Schema a blocchi equivalente



# Azionamenti basati sul modello dinamico

## Controllo ad Orientamento di Campo



## ■ metodi diretti

### → sensori di flusso (effetto Hall) nel traferro

- motori speciali
- rumore dovuto agli effetti delle cave statoriche

### → avvolgimenti nelle cave

- flusso ottenuto per integrazione del segnale
- errori a bassa frequenza dovuti alle derive degli integratori

### → sono richiesti motori speciali

## ■ metodi indiretti

### → elaborazioni sul modello del motore

#### ● osservatori di flusso

- + sistema non lineare a parametri variabili

#### ● stimatori di flusso

- + più semplici

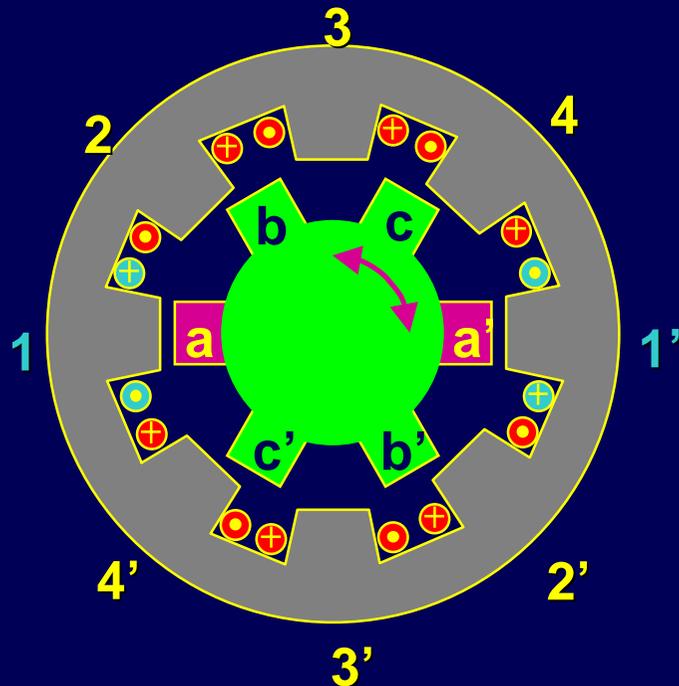
## Motore passo passo

- standard
- a magneti permanenti
- ibrido

## Motore coppia a riluttanza variabile

- standard
- a magneti permanenti

# Motore passo-passo



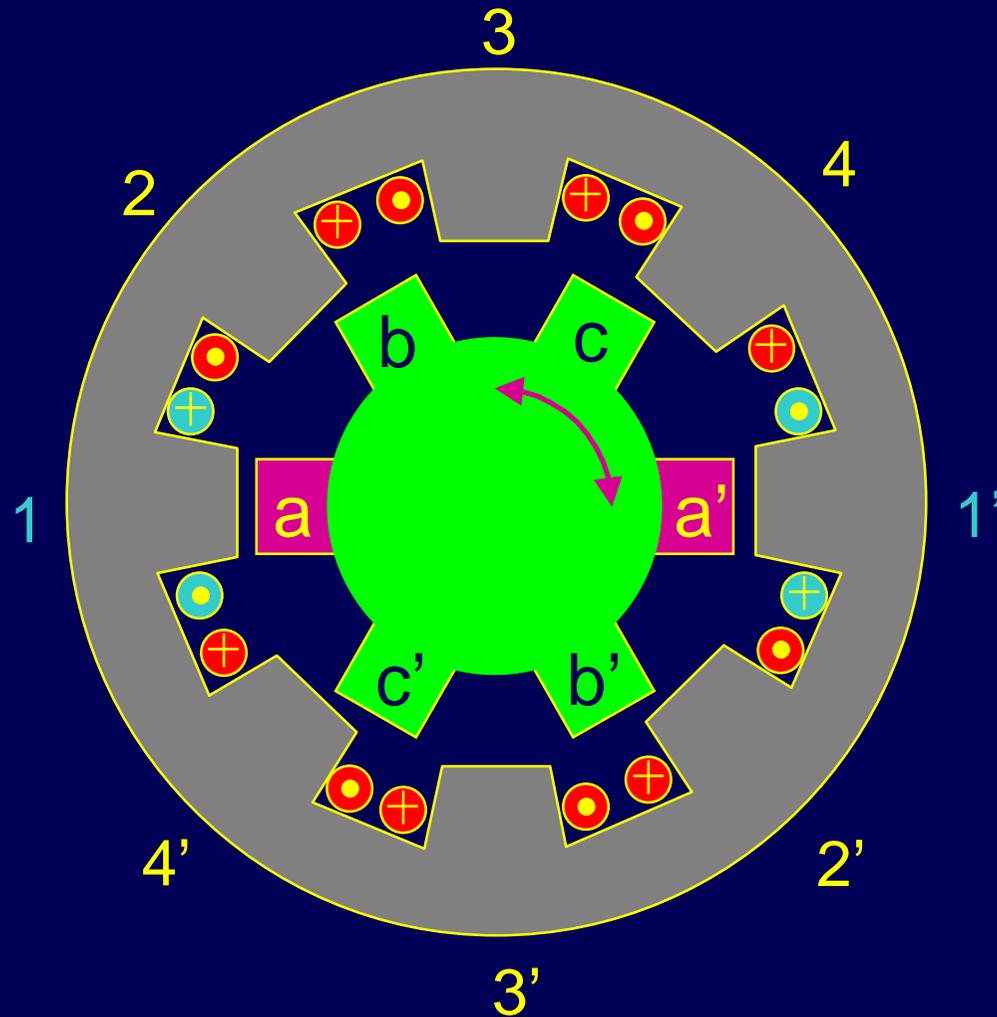
Motore a 4 fasi  
del tipo 6-8

Alimentando una fase con una corrente costante il rotore si porta nella posizione per la quale il circuito magnetico assume la minima riluttanza e cioè con una coppia di denti (a-a') allineati con la fase alimentata (1-1').

La coppia dipende dal quadrato della corrente e dalla posizione.

Motore fortemente nonlineare  
⇒ moti incrementali

# Motore passo-passo

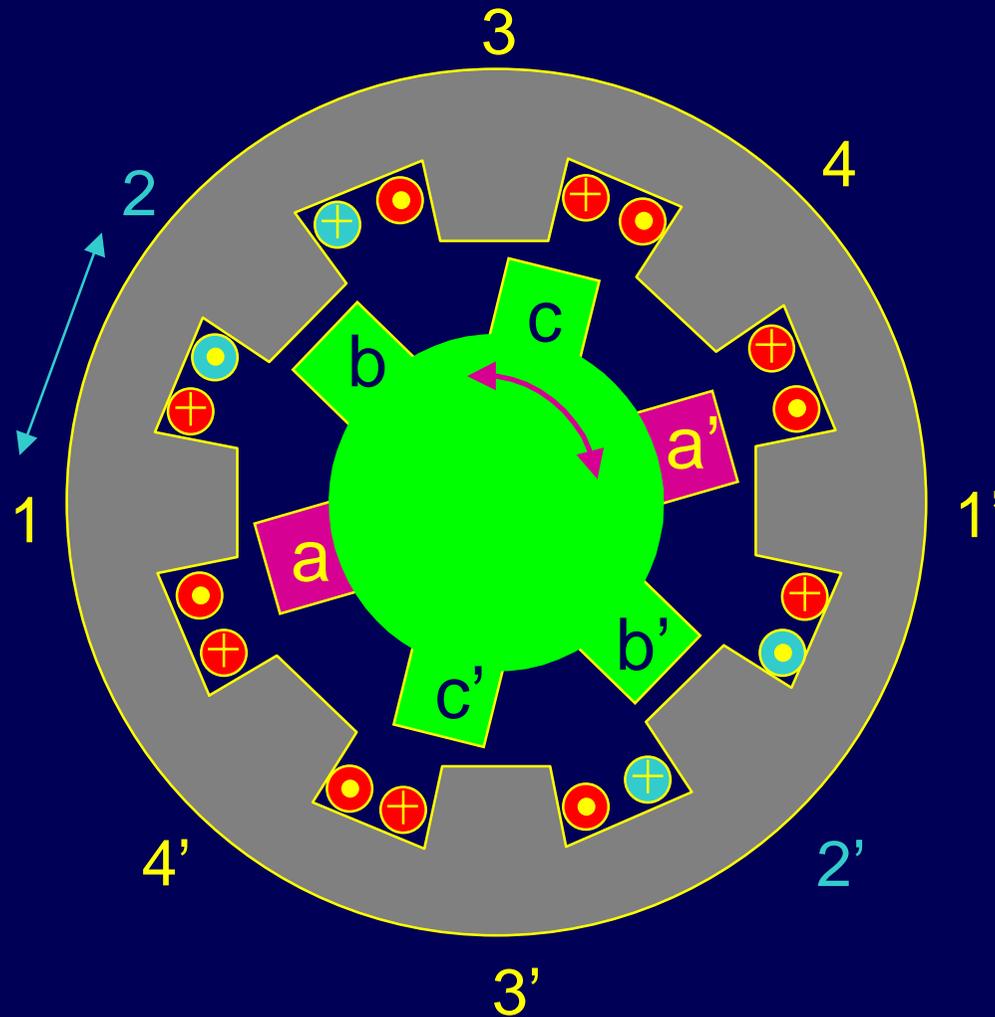


## Funzionamento

Motore a 4 fasi  
del tipo 6-8

fase 1-1' alimentata

# Motore passo-passo

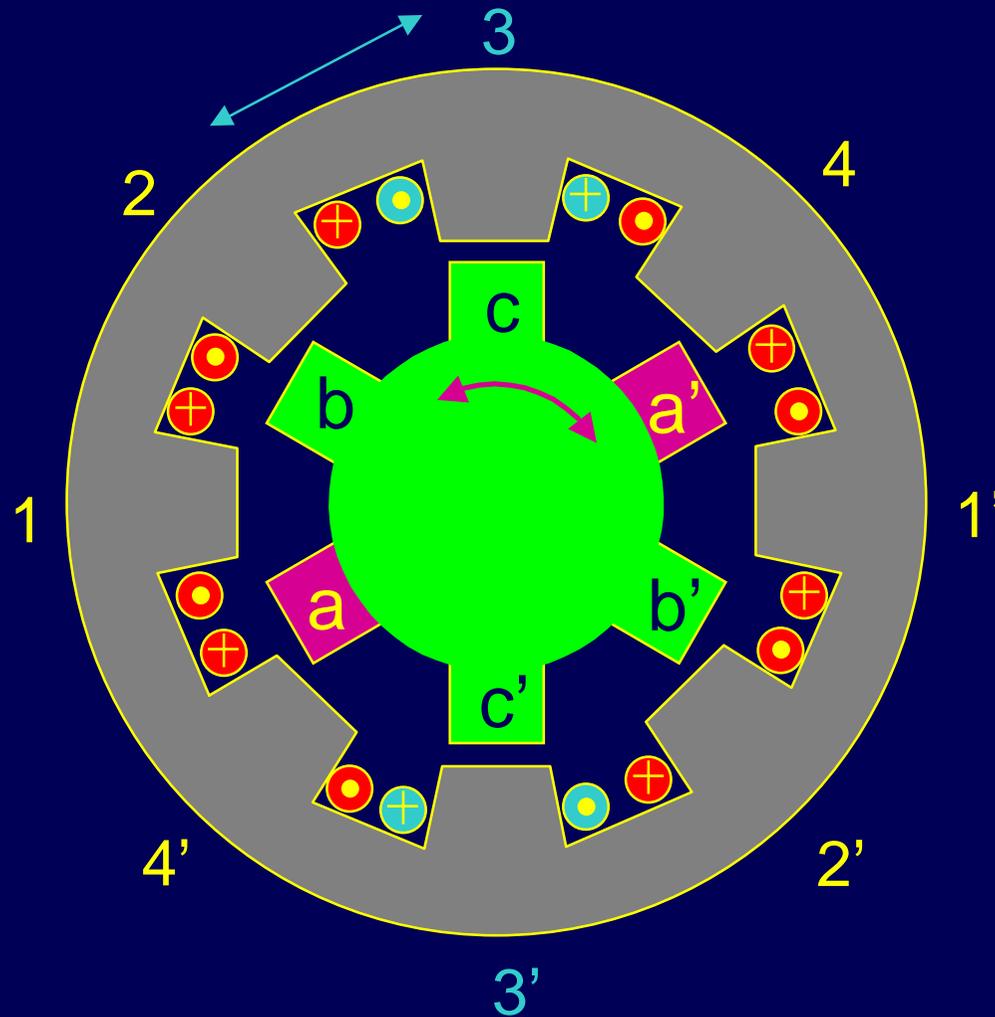


## Funzionamento

Motore a 4 fasi  
del tipo 6-8

fase 2-2' alimentata

# Motore passo-passo

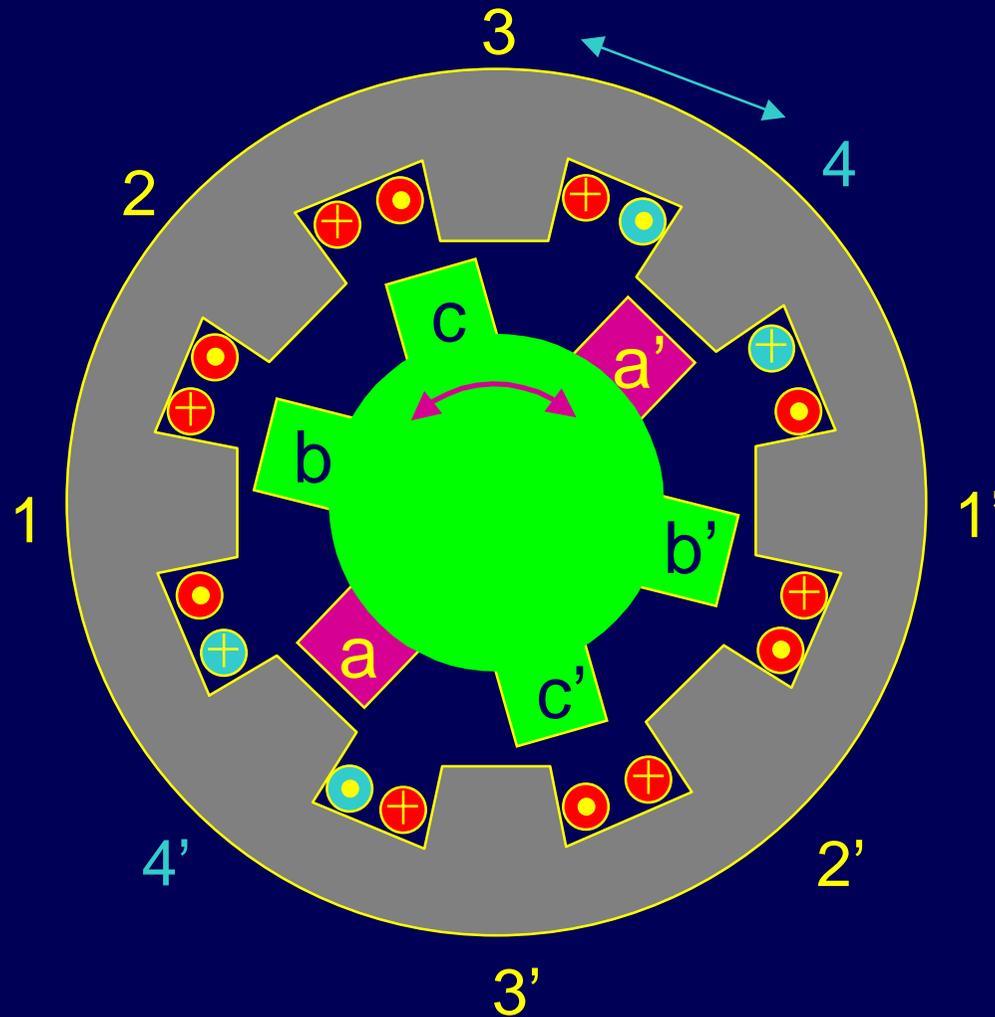


## Funzionamento

Motore a 4 fasi  
del tipo 6-8

fase 3-3' alimentata

# Motore passo-passo

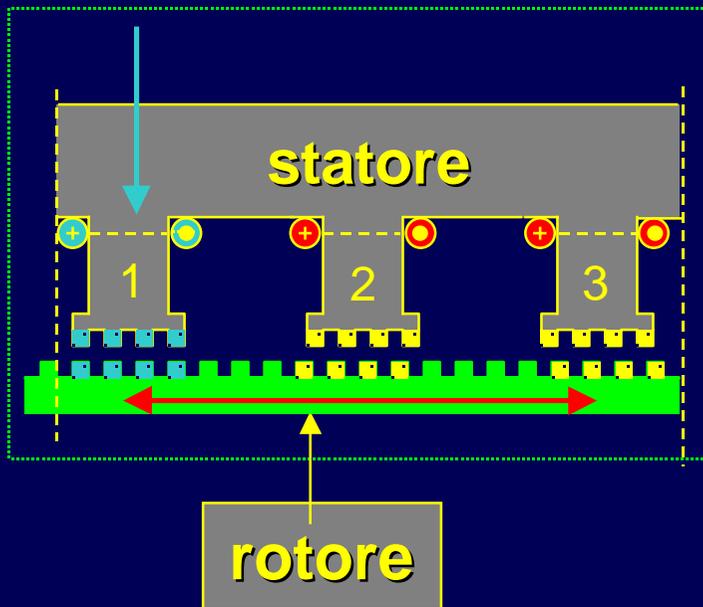


## Funzionamento

Motore a 4 fasi  
del tipo 6-8

fase 4-4' alimentata

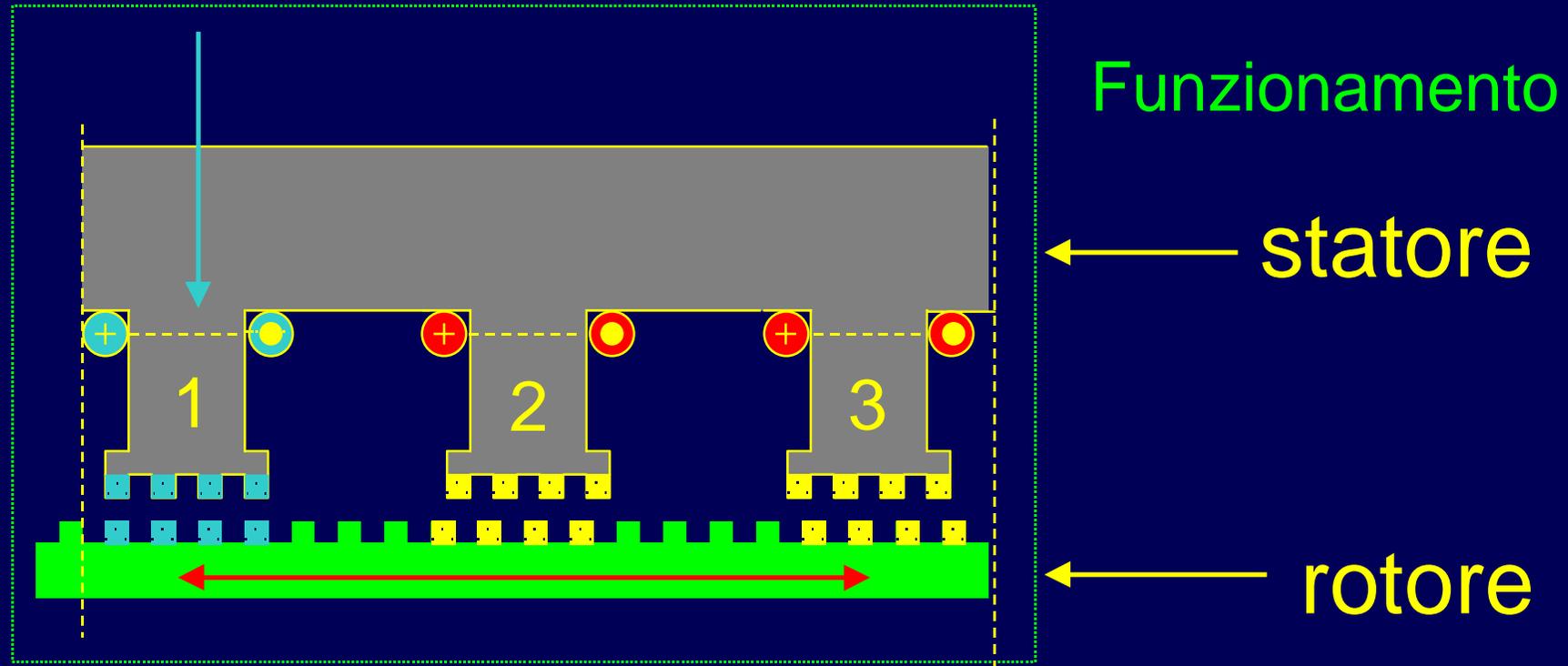
# Motore coppia



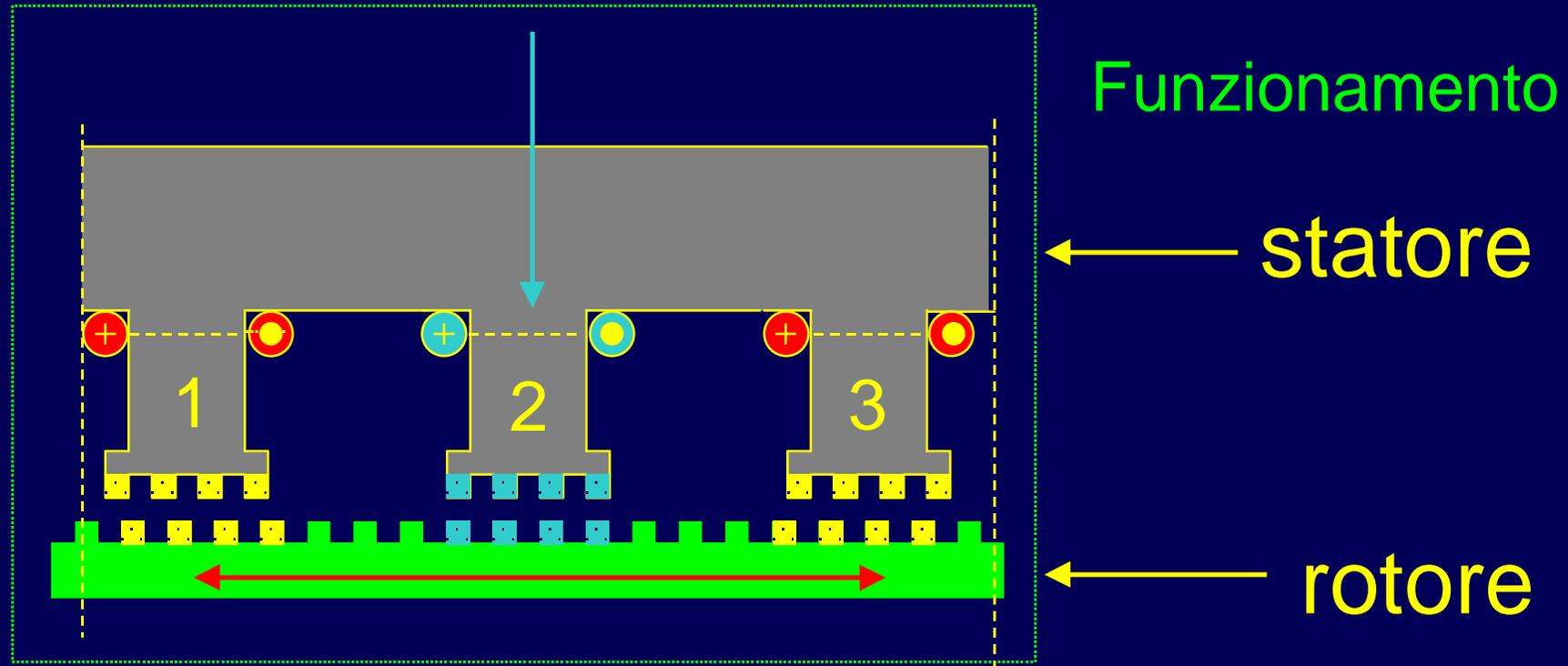
Vista di dettaglio di:  
• motore lineare  
• motore rotativo

- Un solo circuito è necessario per generare coppia
- Più fasi sono necessarie per garantire un movimento continuo
- $N. \text{denti di rotore} = N. \text{poli}$
- molti denti
  - molta coppia e bassa velocità.
- controllo molto complesso

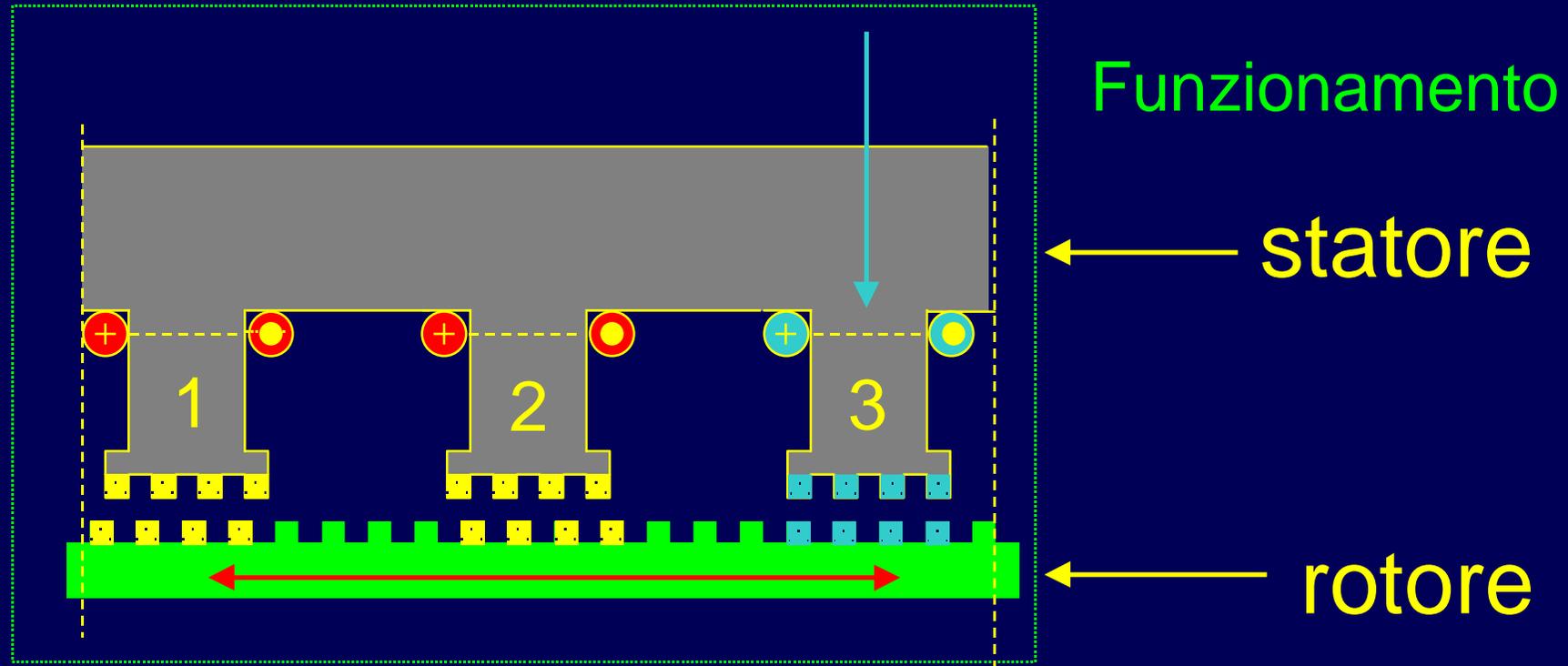
# Motore coppia



# Motore coppia



# Motore coppia



# Motore passo-passo

## Pro

- **Semplicità di controllo**
- **Costo contenuto**
- **Elevato rendimento**
- **Calore sullo statore**
- **Elevate coppie a bassa velocità**
- **Coppia di mantenimento**
- **Controllo di posizione senza sensore**
- **Adatto anche per applicazioni informatiche**
- **grosse potenzialità di sviluppo per i motori a Riluttanza Variabile controllati in modo continuo**

## Contro

- **Caratteristica non lineare**
- **Adatto solo per movimenti incrementali**
- **Bassa potenza**
- **velocità massima limitata dalla tensione**

- La geometria dei circuiti magnetici è tale da generare una forza anzichè una coppia.
- L'allestimento meccanico è realizzato per generare movimenti lineari (spesso limitati)
- Esistono motori lineari
  - ➔ sincroni a magneti permanenti
  - ➔ asincroni ad induzione
  - ➔ a riluttanza variabile

# Azionamenti Elettrici

Parte 2

Tipologie dei motori  
e relativi azionamenti:

Motori asincroni  
Motori e Riluttanza Variabile

**FINE**

**Prof. Alberto Tonielli**

DEIS - Università di Bologna

Tel. 051-6443024

E-mail: [atonielli@deis.unibo.it](mailto:atonielli@deis.unibo.it)