Corso di Elettrotecnica

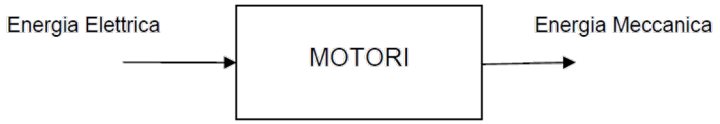
Prof. Giovanni Costantini

Ing. Valerio Cesarini

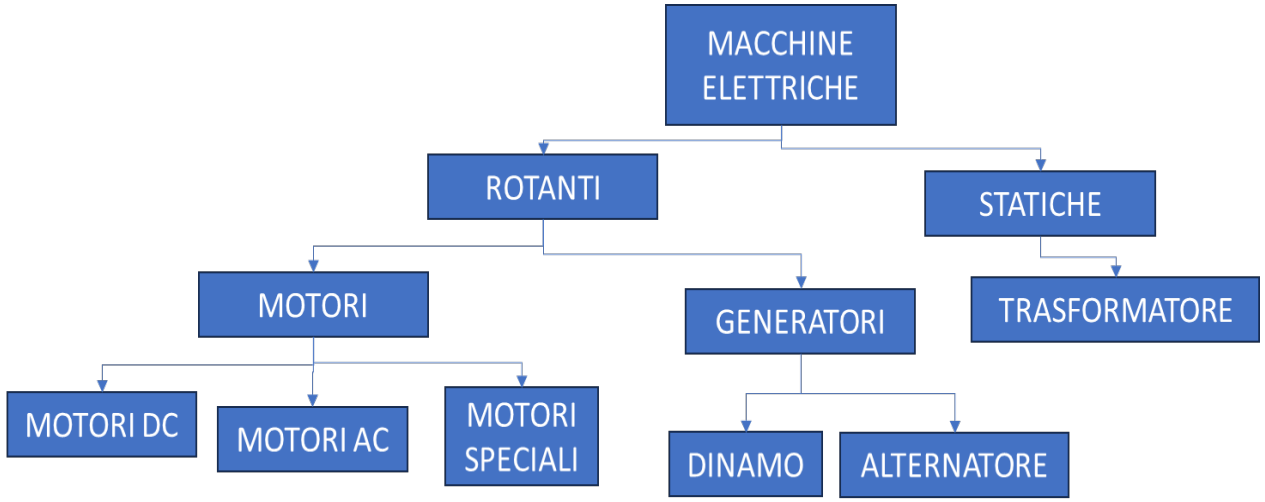
MOTORI AC

TOR VERGATA
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI ROMA

MACCHINE ELETTRICHE

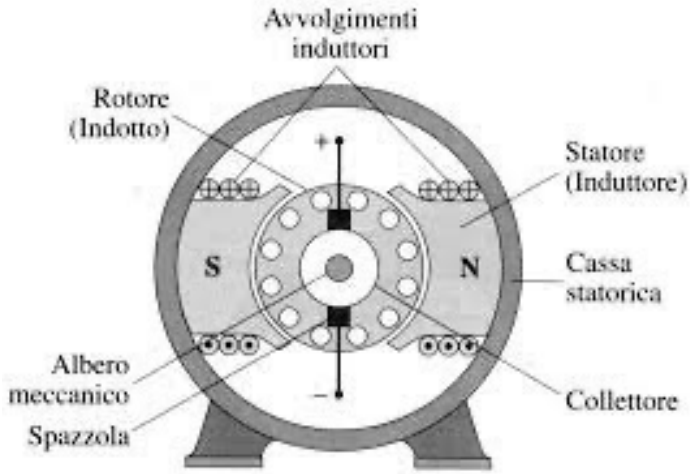


- Un **MOTORE ELETTRICO** è una **macchina che converte En. Elettrica in En. Meccanica**
- L'opposto è un **GENERATORE**, che converte En. Meccanica in En. Elettrica
- Un MOTORE, sia in AC che in DC, è comunque composto da uno **statore** (cavo) che produce un campo magnetico ed un **rotore** interno messo in rotazione per interazioni magnetiche.



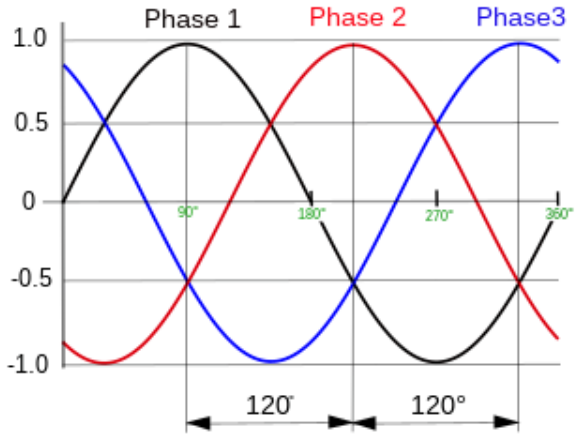
REMINDER: MOTORI DC

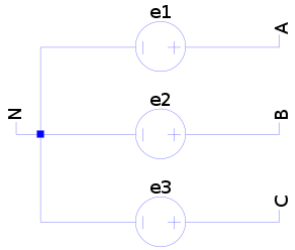
- STATORE metallico dentro cui due o più poli generavano un CAMPO MAGNETICO COSTANTE
- ROTORE alimentato DC, messo in rotazione dal campo
- Si genera Forza di Lorentz fra il campo (costante) e la corrente di rotore → rotazione
- ANELLO DI PACINOTTI: Una spira percorsa da corrente immersa in un campo costante ha rotazione continua se COMMUTA IL VERSO DELLA CORRENTE OGNI 90°
- La commutazione è effettuata lasciando fissi i contatti di alimentazione (SPAZZOLE) lasciandovi scorrere dentro il rotore (con COLLETTORE E LAMELLE)



CENNI SU TRIFASE

- Un **sistema TRIFASE** è un insieme di tre conduttori alimentati da **tre tensioni AC**, di uguale modulo e frequenza ma **SFASATE fra loro**
- E' **SIMMETRICO** se gli sfasamenti sono -120°, 0 e +120°
  E' **EQUILIBRATO** se la tensione di picco è uguale
  E' **BILANCIATO** se simmetrico + equilibrato
- Ricorda: nella trasmissione elettrica, il **NEUTRO** dovrebbe essere sempre trasportato per far sì che i dispositivi riceventi, oltre alla tensione, possano attaccarsi alla stessa terra
- Nel trifase EQUILIBRATO, **la somma delle tre correnti è nulla** → non c'è niente da scaricare a massa → non serve trasportare il neutro





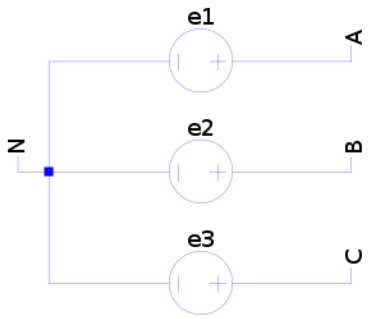
CENNI SU TRIFASE - 2

Sistema trifase

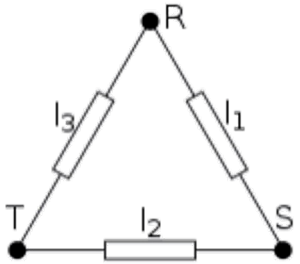
- Equilibrato → Stessa tensione massima → $\sum I = 0$
- Simmetrico → Le tre tens. hanno fasi → $\sum E = 0$
  +120°, 0 e -120°

Bilanciato

$$\begin{cases} e_a(t) = E_{\max}\cos\omega t \\ e_b(t) = E_{\max}\cos(\omega t + \frac{2}{3}\pi) \\ e_c(t) = E_{\max}\cos(\omega t - \frac{2}{3}\pi) \end{cases} \xrightarrow[E_{max} = \sqrt{2}E]{\text{FASORI}} \begin{cases} \bar{E}_a = E \\ \bar{E}_b = Ee^{j\frac{2}{3}\pi} \\ \bar{E}_c = Ee^{-j\frac{2}{3}\pi} \end{cases}$$



Configurazione **A STELLA**



Configurazione **A TRIANGOLO**

Se $\sum I = 0$ non ho corrente da scaricare a massa → Non serve il conduttore (filo) neutro (N)

E' possibile collegare il trifase a stella o a triangolo.
E' possibile trasformare i circuiti l'uno nell'altro.

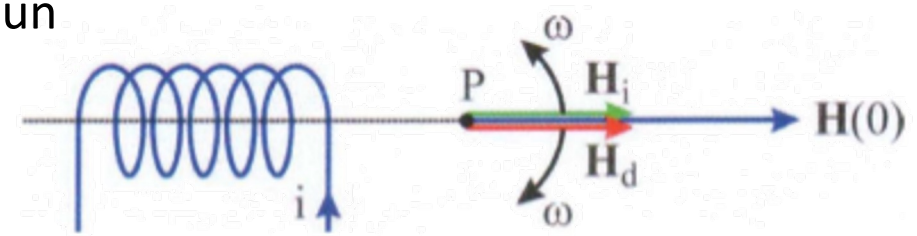
- La stella evidenzia le tensioni fra **fase e neutro** (230 V in EU)
- Il triangolo evidenzia le tensioni fra **fase e fase** (400 V in EU)

PERCHE' IL TRIFASE

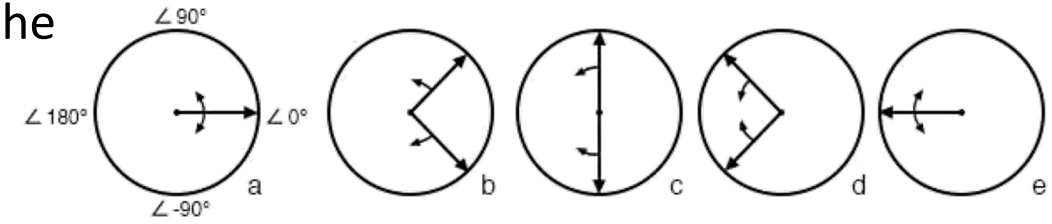
- Non trasporto il neutro → Ho 3 fili di potenza invece che 6 → **Uso meno rame**
- **Minori perdite** di trasporto
- Più comodo per i **motori AC** poiché genera un momento rotazionale

CAMPO MAGNETICO PULSANTE

- Un **SOLENOIDE percorso da corrente alternata AC** produce un **campo magnetico alternato, in direzione assiale**
- Si può scomporre questo campo in due vettori rotanti: **DIRETTO** e **INVERSO**
- Diretto e Inverso sono uguali con velocità angolare opposta
- In ogni istante, la somma di diretto e inverso dà un fasore sempre uguale in direzione ma con modulo e verso che cambiano periodicamente
- Il campo risulta **PULSANTE** in una direzione



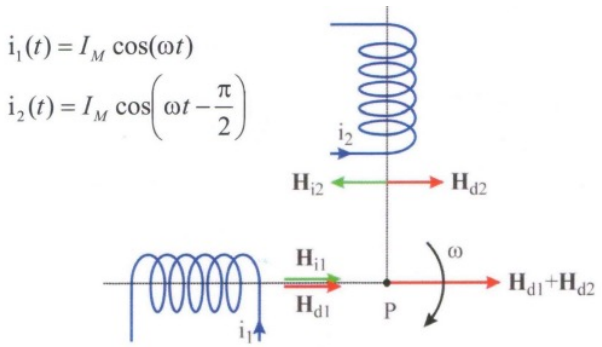
$i(t) = I_M \cos(\omega t)$ $\qquad$ $H(0) = H_M$



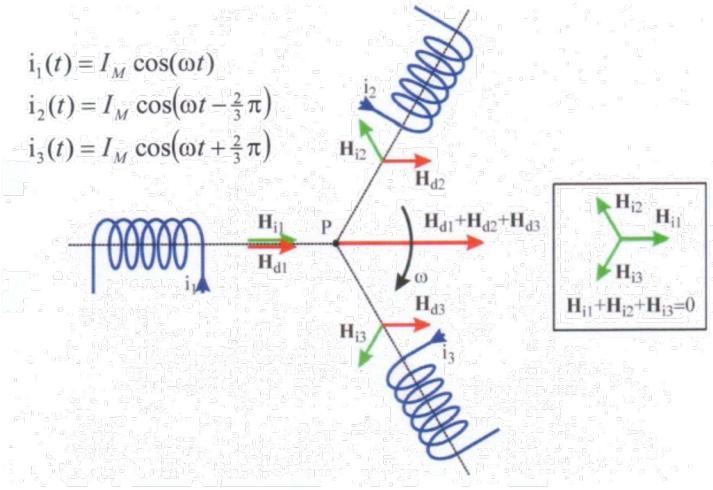
NB: Per i nostri scopi, **H** e **B** possono essere trattati concettualmente allo stesso modo. In realtà, $\boldsymbol{B} = \mu(\boldsymbol{H} + \boldsymbol{M})$ dove **M** è la "Magnetizzazione" del materiale in cui si misura il campo. Non considerandola, $\boldsymbol{B} = \mu\boldsymbol{H}$

CAMPO MAGNETICO ROTANTE

- **Due solenoidi con correnti in quadratura** (sfasate di 90°) annullano la componente rotazionale inversa lasciando solo quella diretta –> il campo risultante ruota

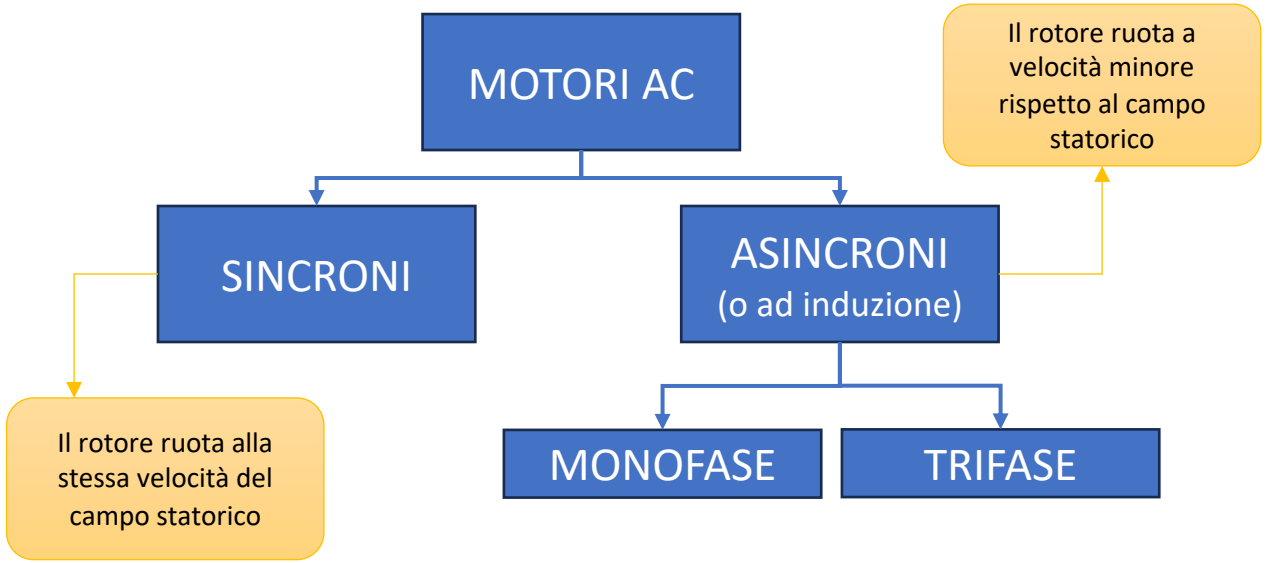


- Anche **tre solenoidi connessi in trifase generano un campo rotante**



MOTORE AC

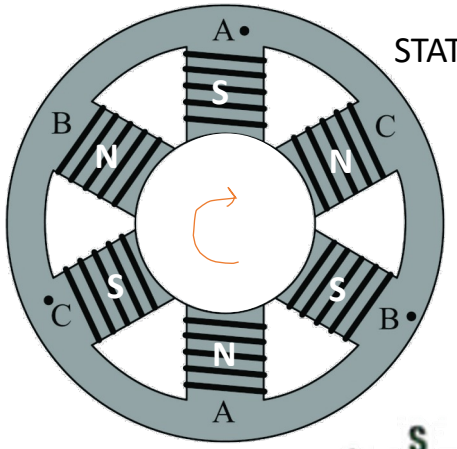
- **Un MOTORE AC prevede un campo statorico non costante**. Quindi, **gli avvolgimenti sui poli di statore sono alimentati in alternata.**
- La velocità impressa dal campo dipende dalla frequenza della corrente alternata di alimentazione (50Hz in Italia)



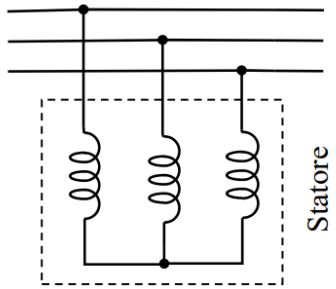
MOTORE SINCRONO

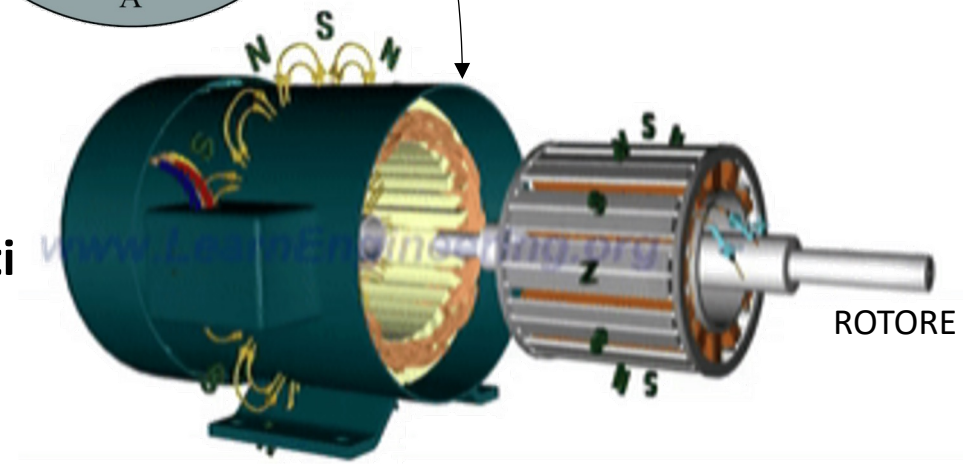
- Lo **STATORE** è costruito con **tre avvolgimenti trifase → Campo rotante →** 6 poli N-S
- Quindi è **lo statore ad essere alimentato** (trifase AC equilibrata)

  Il **ROTORE** deve avere anch'esso dei **poli magnetici**, che si accoppiano a quelli di statore per ruotare in sincronia
- **Il rotore genera un campo costante** e non rotante: può essere realizzato con **magneti permanenti** o **elettromagneti alimentati in DC**.



STATORE

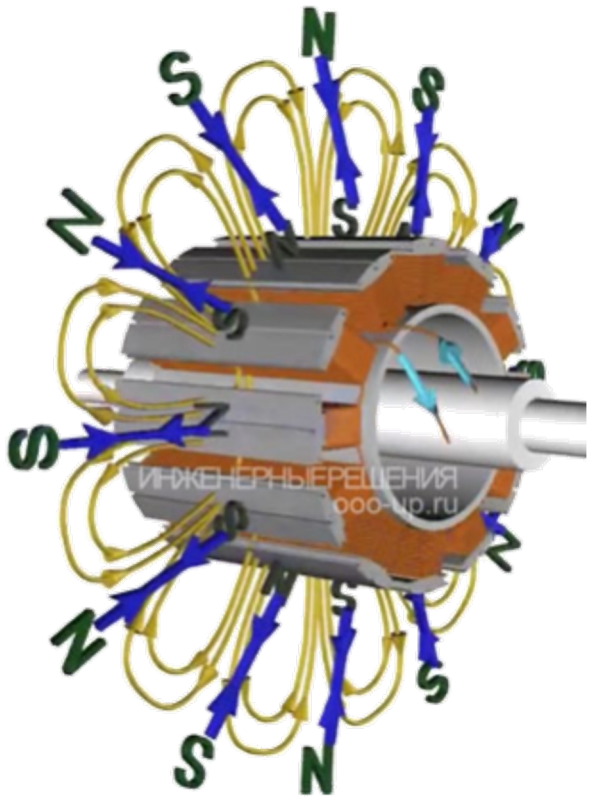




ROTORE

MOTORE SINCRONO – ROTAZIONE DI ROTORE

- Con posizione iniziale casuale, a causa del generale compensarsi di forze attrattive e repulsive e dell'inerzia, **il rotore non si muove da solo** → il motore **non è self-starting**
- Quindi il rotore **ha bisogno di un impulso meccanico esterno di rotazione**
  Una possibilità è **alimentare DC il rotore** per generare un campo costante che gli dia una spinta
- Sfruttando il movimento iniziale, i poli del rotore arriveranno alla **situazione di equilibrio ottimale, accoppiandosi con quelli di statore in coppie N-S** che garantiscono il movimento per repulsione



Frequenza meccanica di rotazione $f_S = \frac{f}{p}$

Velocità di sincronismo $n_s = 120 * \frac{f}{p}$ [rpm]

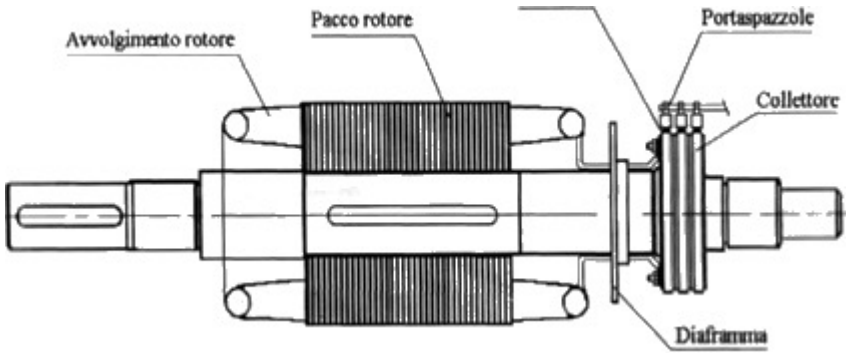
f = freq. di alimentazione
p = n° di poli

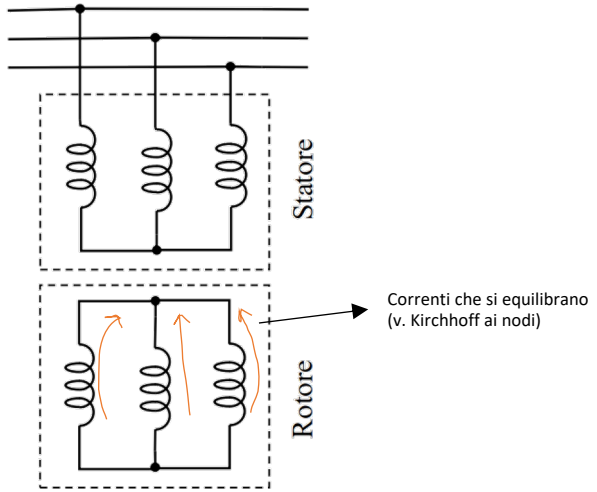
MOTORE ASINCRONO

- Ogni volta che c'è **movimento relativo fra campo e conduttore**, si induce una **FEM** → Forza di Lorentz e corrente indotta
- Un conduttore scarico, se immerso in un **campo magnetico variabile,** riceve una FEM → corrente indotta
- Nel motore DC, il campo era costante (dovevano muoversi le cariche del conduttore/rotore, che era alimentato per far passare corrente)
- **Lo statore trifase AC produce un campo rotante:** è costante in modulo, ma non in direzione → **Un conduttore stazionario nel campo rotante sviluppa corrente indotta**
- Il motore AC ASINCRONO prevede un **ROTORE con CONDUTTORI nei quali circolerà corrente indotta**
- Per questo, il motore AC asincrono si dice anche **motore ad induzione**

MOTORE ASINCRONO – ROTORE AVVOLTO

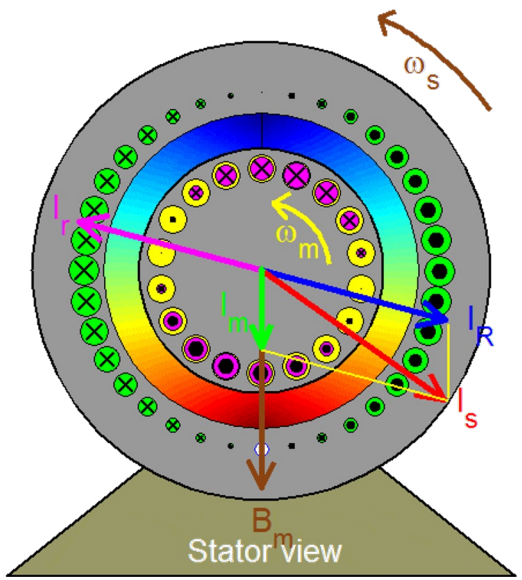
- Il **ROTORE AVVOLTO** prevede la presenza di **avvolgimenti in configurazione trifase** (spire/solenoidi)
- Le spire immerse nel campo statorico variabile riceveranno **corrente indotta:** sono **tre spire percorse da corrente**
- La configurazione trifase del rotore assicura coppie e dunque rotazione concorde
- **Funzionamento stazionario:** Di norma, i **capi del rotore sono cortocircuitati**: bastano le tre correnti indotte per far muovere il rotore
  NB = Ricorda che nel trifase le tre correnti si equilibrano





MOTORE ASINCRONO – ROTAZIONE

- Poniamo che il rotore sia in movimento: dato che il campo è rotante, **in ogni istante ciascuna spira di rotore si troverà in una posizione diversa rispetto al campo**, e sviluppa F_L → coppia → ruotare
- **Se il rotore ruotasse alla stessa velocità del campo statorico**, spire e campo sarebbero sempre parallele e la coppia sarebbe nulla
- In tal caso, **il rotore rallenterebbe**
- Non appena il rotore rallenta, si «sfasa» rispetto al campo, che ora non è più parallelo → ri-subisce F_L → ruota
- Quindi, **il rotore non raggiungerà mai la velocità di campo statorico ma sarà sempre leggermente più lento → ASINCRONO**



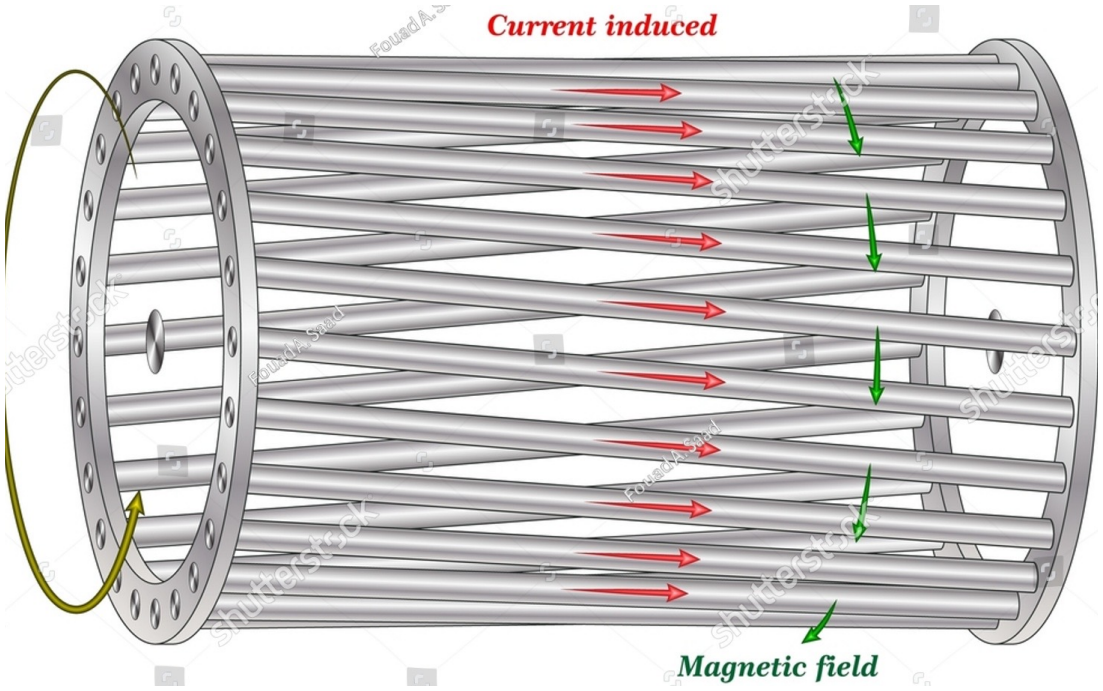
MOTORE ASINCRONO – ROTAZIONE

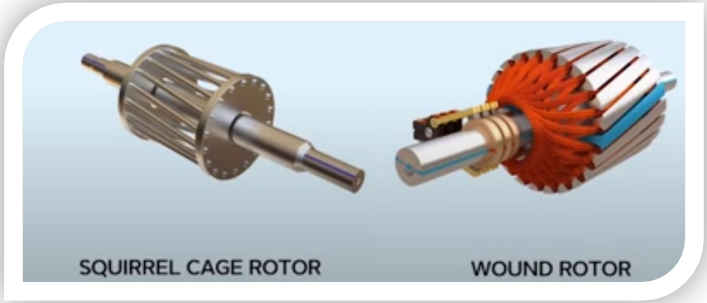
- Lo statore induce correnti nel rotore (è B variabile)
- Ora il rotore ha 3 spire percorse da corrente indotta
- Il rotore è trifase → ora ha un campo magnetico rotante → poli
- Il N e S dei poli di rotore vuole corrispondere a N e S dei poli di statore
- Appena ciò accade, lo statore smette di indurre corrente (perché i campi diventano paralleli)
- Il rotore rallenta → ricomincia l'induzione

- Dato che non ha bisogno di forze esterne per essere avviato, ma basta l'induzione del campo statorico, il motore asincrono è **SELF-STARTING**

ROTORE A GABBIA DI SCOIATTOLO

- ROTORE senza avvolgimenti ma semplicemente composto da barre metalliche → **GABBIA DI SCOIATTOLO**
- Fra le sbarre della gabbia si formano **circuiti chiusi** ed il funzionamento è analogo a quello avvolto: **il campo rotante indurrà FEM** e genererà rotazione asincrona
- Le correnti indotte circolano nelle barre metalliche in modo da **creare tanti poli quanti quelli di statore**
- Vantaggio: costi e manutenzione





GRANDEZZE FISICHE DEL MOTORE

- La **COPPIA** rappresenta la forza motrice che smuove il motore. $C = F * braccio \quad [N \cdot m]$

E' lei che deve vincere le forze inerziali del motore: il peso del rotore, gli attriti, etc.

- Dato che F=ma, a parità di regime, una **coppia elevata garantisce una ELEVATA ACCELERAZIONE**
  → Il motore ha più «spunto»
- La velocità del motore viene normalmente espressa come VELOCITA' ANGOLARE, ovvero numero di GIRI
- **VELOCITA' DI SINCRONISMO** $n_s = 120 * \frac{f}{p} \quad [rpm]$
- **SLIP** o SCORRIMENTO = Fattore di correzione della velocità effettiva rispetto a quella di sincronismo (per motori sincroni, s=0)

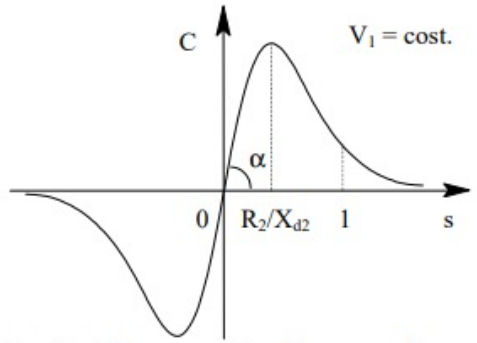
$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s}$$

- La **POTENZA** del motore si ottiene come FORZA x VELOCITA' oppure come COPPIA x VEL. ANGOLARE

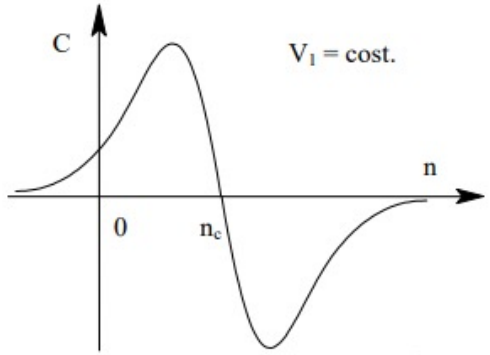
$$P = C * w = C * 2\pi \cdot \frac{n}{60} \quad [W]$$

CURVA DI COPPIA

- Il REGIME di un motore determina il suo modo di funzionamento in termini di giri e di coppia
- E' tipico del principio delle MARCE: aumento la velocità (giri) sacrificando coppia → ogni marcia corrisponde ad una diversa curva di coppia (per avere la coppia ottimale a quei giri)
- Un motore ideale mette a disposizione la **COPPIA MASSIMA col minimo numero di giri, così da dare il massimo spunto**
- In un MOTORE EL. ASINCRONO la coppia max. si ha in generale a bassi regimi (n bassi)



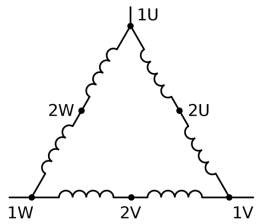
Caratteristica meccanica di una macchina a-sincrona in funzione dello scorrimento.

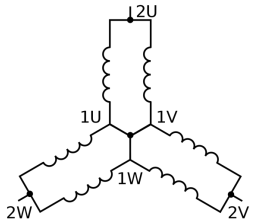


Caratteristica meccanica di una macchina a-sincrona in funzione del numero di giri

CONTROLLO DI UN MOTORE ELETTRICO

- **RESISTENZA DI ROTORE**: Più è alta, più è difficile smuoverlo → Cambia la CURVA DI COPPIA spostando il massimo a sinistra → Si raggiunge la COPPIA MAX a REGIMI INFERIORI (meno giri)
- **TENSIONE DI ALIMENTAZIONE**: Determina il modulo del campo magnetico → Cambia la COPPIA MAX
- **FREQUENZA DI ALIMENTAZIONE**: A parità di tensione, se si riduce la frequenza si «comprime» la curva di coppia verso un numero di giri minori. Di contro, alzando la frequenza si aumenta la velocità di rotazione ma si dilata la curva di coppia.
- **NUMERO DI POLI:** La vel. Di sincronismo è inv. Prop. Al n° di poli. Quindi, più poli → meno velocità



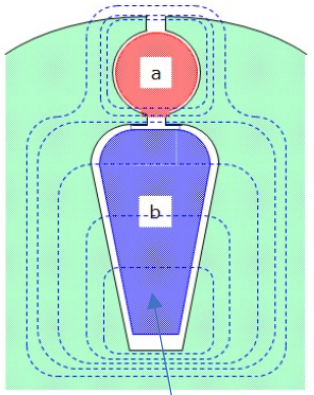


MOTORE DAHLANDER = Lo statore ha 6 avvolgimenti, che possono essere configurati a triangolo (6 poli, bassa velocità) o doppia stella (3 poli, alta velocità)

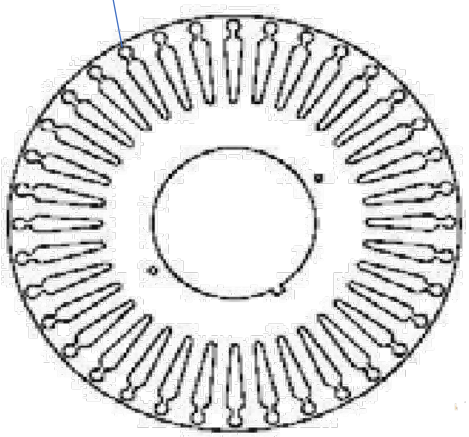
DOPPIA GABBIA

- Svantaggio: Il motore a gabbia all'avvio ha coppie basse e correnti alte
- Soluzione: **due gabbie concentriche**
- Si realizzano delle **cave doppie** attorno all'anello rotorico, in cui inserire le sbarre di 2 gabbie diverse

- **All'avvio** le correnti si distribuiscono sulla **gabbia esterna «a»** → R alta → coppia elevata a bassi giri
- **A regime**, le correnti fanno la **gabbia interna «b» (PROFONDA)** → R bassa → sposto la coppia

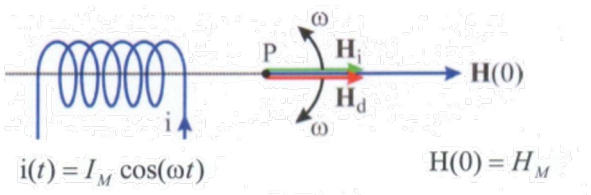


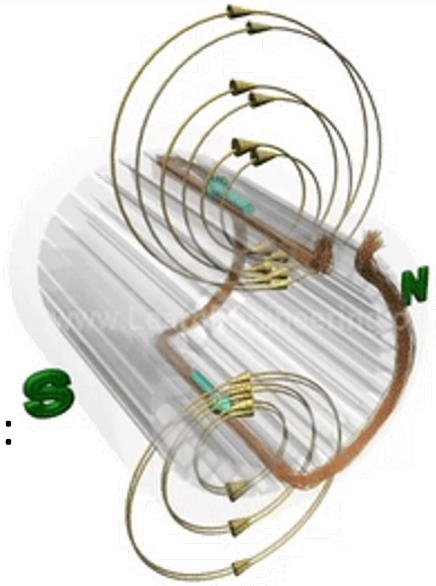
Dettaglio di una doppia cava



MOTORE MONOFASE

- Ricorda: un **singolo avvolgimento** alimentato AC produce un **campo magnetico PULSANTE** (cambia modulo e verso, non direzione)
- Se immergo un **ROTORE fermo** dentro un campo PULSANTE, inizialmente **non c'è forza** perché non c'è moto relativo
- Se però il ROTORE si muovesse, **in ogni momento c'è un angolo diverso fra campo e rotore in movimento → induco FEM** → rotazione (come per l'AC sincrono)
- Il rotore deve **muoversi in maniera asincrona dalla vel. di statore per mantenere sempre moto relativo**
- Il campo pulsante non cambia direzione, ma **cambia di verso**: effettua in automatico la **commutazione** che nel motore DC doveva essere svolta dal sistema a spazzole

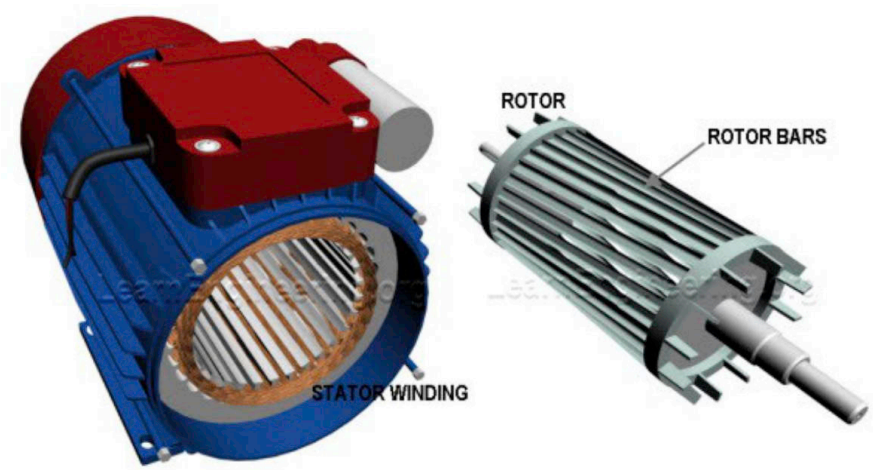




makeagif.com

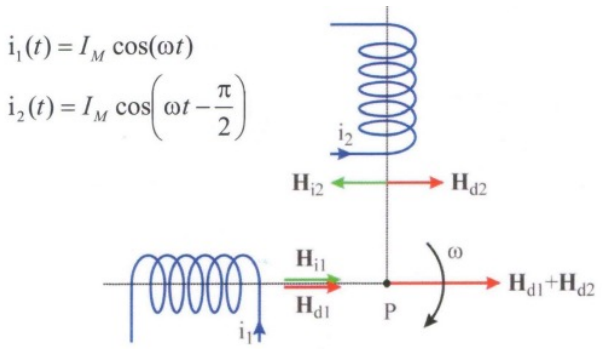
MOTORE MONOFASE - 2

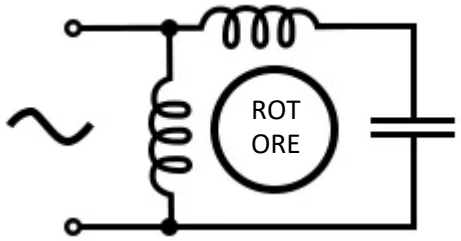
- Il motore monofase **non è self-starting**
- Devo **indurre la rotazione meccanicamente** sul rotore (a gabbia)
- La direzione di rotazione si può scegliere
- Si ha il massimo della coppia a **SLIP s=10%**
- Un motore trifase alimentato con una sola fase AC funziona da monofase: perde dunque la sua caratteristica di self-starting.



AUSILIARIO

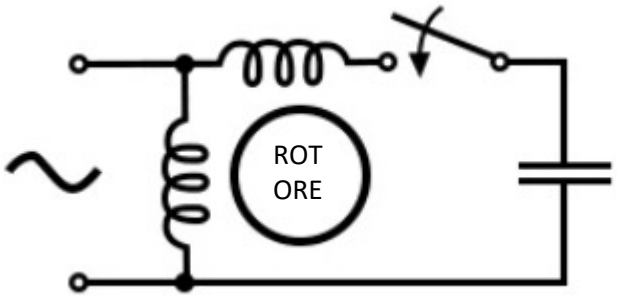
- ***COME RENDERE UN MOTORE SELF-STARTING?*** Mi serve un **campo rotante** che da solo è in grado di muovere il rotore (v. motore trifase)
- Aggiungo **un altro avvolgimento così da realizzare una configurazione in quadratura**, che genera un campo rotante
- L'avvolgimento aggiunto si chiama **AUSILIARIO**
- Ho a disposizione solo una AC di alimentazione:
  COME SI FA A REALIZZARE UNA CORRENTE SFASATA DI 90° PER IL SECONDO AVVOLGIMENTO? → Con un **CONDENSATORE** (sfasa di 90°)
- Attenzione: ora il motore funziona da BIFASE. Ma la presenza del condensatore genera **perdite ed andamento ondivago**





CAPACITOR - START

- Si usa un **condensatore solo per l'avvio del motore**
- All'avvio, il C è nel circuito → sfasamento fra i due avvolgimenti → campo rotante → self-start (con coppia alta perché ho 2 avvolg.)
- A regime, un **INTERRUTTORE CENTRIFUGO** stacca il condensatore (e l'ausiliario) quando il motore si avvicina alla velocità terminale
- Da quel momento in poi, il motore funziona da monofase (un avvolgimento), in maniera continua, senza perdite sul C



AUTO ELETTRICHE

- **MOTORE DC =** Semplice utilizzo con una batteria; alto spunto; molto costanti nella performance; alta efficienza per basse velocità. Richiedono un importante sistema di raffreddamento e si usurano per colpa delle spazzole.
- **DC BRUSHLESS =** Massimo rendimento; poca usura; meno necessità di raffreddamento e manutenzione; più silenziosi. Rotazione meno costante; richiedono componentistica elettronica di controllo.
- **AC SINCRONO =** Buon rendimento VS. asincrono; facili da controllare in velocità tramite l'alimentazione; reattività; semplice da ri-configurare (diverse possibilità di alimentazione o di utilizzo es. generatore).
- **INDUZIONE (AC asyn.) =** Economici; self-starting; facili da controllare in termini di coppia ma NON di velocità.

  - AC richiedono un **inverter** per avere la AC dalla batteria
  - DC sono meno costosi
  - DC hanno **più «spunto»:** perfetti per applicazioni con frequenti accelerate/decelerate
  - AC permettono controlli più ampi
  - DC però è più preciso (es. passo-passo)
  - AC sono più efficienti, richiedono meno manutenzione e sono più adatti per applicazioni industriali/hi power

RIASSUNTO – MOTORI

MOTORE		STATORE	ROTORE	UTILIZZI E CARATTERISTICHE
AC	**Sincrono**	Trifase – campo rotante	Magnete: con una spinta meccanica, i poli di rotore si accoppiano ai poli di statore. Non c'è induzione.	Massimo rendimento, ma costoso. **Auto elettriche** Applicazioni ad **alta precisione** di rotazione (es. industria della carta).
	Induzione	Trifase – campo rotante	A gabbia di scoiattolo. Struttura conduttiva. Viene indotta corrente dal campo rotante. Avvolto. Trifase, viene indotta FEM dal campo rotante.	SELF-STARTING. Applicazioni industriali, ad alta affidabilità ed alta potenza: pompe, ventilatori, compressori. Auto elettriche.
	Monofase	Monofase AC – Campo pulsante Fase + ausiliario con C di avvio (Rotante all'avvio, pulsante a regime)	A gabbia. Necessita di spinta meccanica per generare displacement angolare col campo pulsante. Se c'è il C di avvio, esso genera un campo rotante di statore rendendo il motore (bifase) self-starting.	Utenze domestiche che non hanno accesso immediato al trifase. Applicazioni a basse potenze (piccole pompe, macchinari agricoli).
DC		Magneti permanenti – campo costante	Avvolto, alimentato DC. Le spire percorse da corrente girano nel campo costante.	Auto elettriche. Motori passo-passo precisi per: hard disk e informatica, tessile, ascensori.