

6.1) Circuiti con accoppiamento magnetico:

Argomenti:

- Introduzione alle macchine elettriche;
- Principi di conversione Elettro-Meccanica;
- I motori elettrici.

Introduzione alle macchine elettriche:

-> **DEF:** sono dispositivi atti a convertire energia elettrica in energia meccanica, energia meccanica in energia elettrica o modificare i parametri di tensione e corrente.

- **MOTORI:** energia elettrica -> energia meccanica (avere qualcosa che ruota);
- **GENERATORI:** energia meccanica -> energia elettrica (contrario del primo);
- **TRASFORMATORI:** converte i parametri dell'energia elettrica (V, I) (non hanno parti meccaniche in movimento e non hanno perdite).

Tipi di macchine elettriche:

Macchine ROTANTI: macchine che hanno parti meccaniche in movimento,

- Macchine in corrente continua;
- Macchine sincrone/ asincrone.

Macchine STATICHE: macchine che NON hanno parti meccaniche in movimento.

- Trasformatori.

Funzionamento:

-> Il funzionamento si basa sull'interazione tra campi magnetici (e le correnti elettriche che ne sono sorgente) prodotti da circuiti elettrici (avvolgimenti) all'interno della macchina.

-> REVERSIBILITÀ. Tutte le macchine elettriche sono reversibili, interagiscono con i sistemi cui sono connesse indipendentemente dal verso della potenza alle porte attraverso le quali avviene lo scambio energetico.

✚ L'interazione con i campi magnetici può avvenire in diversi versi. Possiamo quindi decidere di spendere energia meccanica per avere un flusso di elettroni in uscita oppure usare l'energia elettrica per ottenere movimento => tutte le macchine possono essere motori e generatori.

Perdite:

-> Le perdite sono causate da:

- **Effetto Joule** ($R * I^2$): avviene negli avvolgimenti della macchina;
- **Isteresi** e correnti parassite nel ferro dei circuiti magnetici;
- **Attrito** e ventilazioni (solo macchine rotanti).

Conversione Elettro-Meccanica:

-> Esistono tre principi di conversione Elettro-Meccanica:

- **Legge di Ampere:** $\oint_{\gamma} \vec{H} * d\vec{l} = \sum I$;

-> Cariche elettriche in movimento (I) generano campi magnetici ($\vec{H} \left[\frac{A}{m} \right], \vec{B} \left[\frac{Wb}{m^2} \right]$).

- **Forza di Lorentz:** $\vec{F}_L = q * \vec{u} \times \vec{B}$;

-> Cariche elettriche in movimento (\vec{u}) all'interno di un campo magnetico (\vec{B}) subiscono forze di attrazione o repulsione => c'è movimento (= Forza di Lorentz, \vec{F}_L).

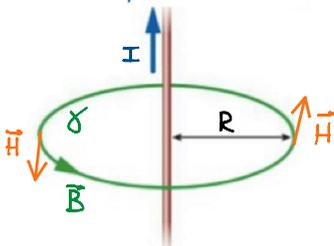
- **Legge di Faraday:** $e = - \frac{d\phi}{dt}$;

-> Un campo magnetico variabile nel tempo induce una tensione sui conduttori (Legge di Faraday o di induzione magnetica).

-> Analizziamoli uno ad uno...

1. Legge di Ampere: $\oint_{\gamma} \vec{H} * d\vec{l} = \sum I$

Esempio:



-> Dato un filo percorso da corrente, si generano (x L. Ampere) linee di campo magnetico \vec{H} (chiuso e tangenziali) rispetto alle linee γ ;

-> Trasformiamo l'integrale in un calcolo infinitesimale:

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum I \Rightarrow \sum H_i \cdot \Delta l_i = \sum I$$

$H \cdot 2\pi R = I$ UNA CORRENTE

6.2) Circuiti con accoppiamento magnetico:

=> A parità di corrente, più ci avviciniamo al filo, maggiore è l'attrazione del campo magnetico: $H \uparrow \quad 2\pi R \downarrow = I$

-> Il campo magnetico si propaga nel vuoto all'infinito:

$$\uparrow H = \frac{I}{2\pi R \downarrow}$$

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H} = \mu_v \cdot \mu_0 \cdot \vec{H} \text{ [T]}$$

$$\vec{D} = \epsilon_v \cdot \epsilon_0 \cdot \vec{E}$$

$$\vec{B} = \mu_v \cdot \mu_0 \cdot \vec{H}$$

COSTANTE DIELETTRICA NEL VUOTO $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ [Wb/mA]}$

★ **COSTANTI DIELETTRICHE:** ci danno informazioni circa il comportamento del campo a seconda del materiale che attraversa.

LEGGE BIOT-SAVART:
$$\vec{B} = \mu \cdot H = \mu \cdot \frac{I}{2\pi R}$$

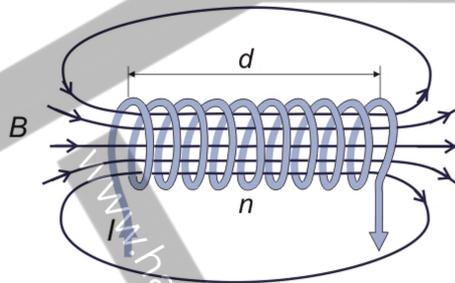
Principio:

-> **Cariche elettriche in movimento** (quelle che attraversano il filo) **generano un campo magnetico \vec{H}** .

- Il campo è composto da **linee di campo chiuse concentriche**;
- **L'intensità del campo aumenta** al **diminuire della distanza**, tende a 0 per $R \rightarrow \infty$;

Applicazione:

-> Appliciamo questo principio ad un solenoide: avvolgendo un filo e facendo scorrere corrente questo crea un campo magnetico



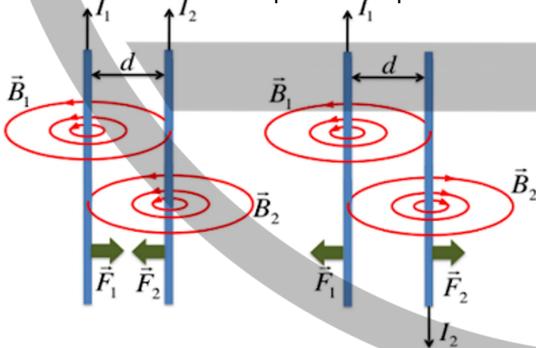
-> Aumentiamo il campo magnetico se: $B \uparrow$

- $N \uparrow$ ▪ Aumentiamo il numero di spire del filo;
- Inseriamo all'interno delle spire un materiale che conduce meglio dell'aria;
- $I \uparrow$ ▪ Aumentiamo la corrente in circolo.

2. Forza di Lorentz: $\vec{F}_L = q * \vec{u} \times \vec{B}$

Esempio:

-> Prendiamo sempre due fili percorsi da corrente e il loro campo magnetico tangenziale...



-> Se prendiamo un altro filo percorso da corrente I_2 e il campo magnetico da questa generato => tenderà ad...

- **Avvicinarsi** se le correnti hanno **stesso verso**;
- **Allontanarsi** se le correnti hanno **verso opposto**.

Principio:

-> Per la forza di Lorentz i **due fili tendono ad avvicinarsi/ allontanarsi** a seconda della **corrente che fluisce** e dei campi magnetici che genera.

★ Se non separati meccanicamente i due fili tendono ad unirsi e in quel caso gli effetti della corrente si sommano (come fosse un unico filo cui scorre corrente I_{1+2}).

3. Legge di Faraday: $e = - \frac{d\phi}{dt}$

Principio:

-> Tutte le volte che c'è **variazione di flusso magnetico** in una **unità di tempo** => abbiamo una tensione indotta ("Forza Elettromotrice" f.e.m.)

-> Le macchine elettriche sfruttano tutti e tre questi principi...

6.3) Circuiti con accoppiamento magnetico:

Principi di conversione Elettro-Meccanica nelle macchine.

-> Vediamo come agiscono i tre principi:

- **Forza di Lorenz:** agisce su un oggetto elettricamente carico che si muove all'interno del campo magnetico.
- **Legge Ampere:** nelle macchine ROTANTI il campo magnetico è generato da un opportuno avvolgimento (eccitazione) in modo tale che la forza che si genera sulle sbarre del rotore sia tangenziale al rotore stesso (forza di Lorenz).
- Legge Faraday: le macchine STATICHE (trasformatori) si basano sul principio di induzione:

La forza elettromotrice indotta su un circuito elettrico (spira) è pari all'opposto della variazione temporale del flusso del campo magnetico attraverso la superficie delimitata dallo stesso circuito elettrico.

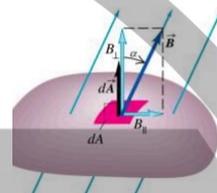
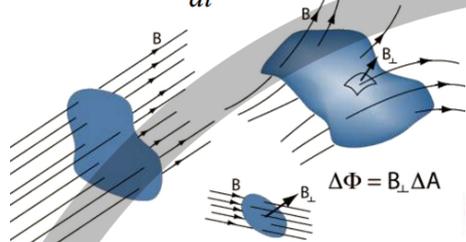
$$fem(t) = - \frac{d\Phi_B(t)}{dt}$$

$$\Phi_B = \iint_S \vec{B} \cdot \vec{n} dA = \iint_S B \cdot \cos \alpha \cdot dA$$

\vec{B} campo magnetico

\vec{n} vettore normale all'elemento di superficie dS

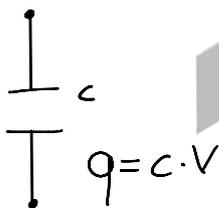
α angolo compreso tra \vec{B} ed \vec{n}



N.B. Il circuito elettrico sul quale viene indotta la f.e.m. coincide con il bordo della superficie considerata.

Comportamento dei bipoli:

-> Induttore e condensatore hanno un comportamento opposto:



Le armature accumulano energia sotto forma di Campo Elettrico.

www.handouts.it



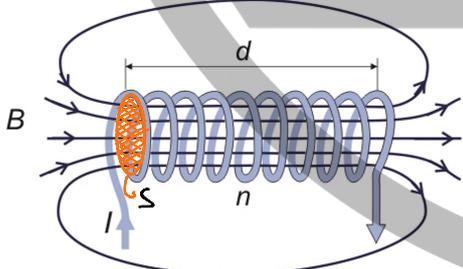
Abbiamo una proporzione diretta tra flusso e corrente:

$$\Phi \triangleq L \cdot i$$

$$\frac{d\Phi}{dt} = \frac{dL \cdot i}{dt} = L \frac{di}{dt} \rightarrow v = L \cdot \frac{di}{dt}$$

= v(t) GRAZIE AL 3° PRINCIPIO (LEGGE FARADAY)

Relazione tra induttanza e numero di spire:



- n: # AVVOLGIMENTI
- d: LUNGHEZZA SOLENOIDE
- S: SUPERFICIE

↳ CAMPO MAGNETICO COSTANTE INTERAMENTE, ALL'ESTERNO SI DIRADA.

VALORE DI UN C. MAGNETICO GENERATO DA SOLENOIDE

$$B = \mu \cdot \frac{n \cdot I}{d} \quad \text{SOSTITUIAMO} \quad \Phi = \int_{sup} \vec{B} \cdot d\vec{s} = \frac{\mu \cdot n \cdot I}{d} \cdot S \cdot n = \mu \cdot \frac{n^2 \cdot I \cdot S}{d}$$

$$\Rightarrow L = \mu \cdot \frac{n^2 \cdot S}{d}$$

🔴 Vedere esempi a pag 6.1E.

⚠ Se non c'è campo magnetico B la macchina elettrica non funziona.

-> Per generarlo posso:

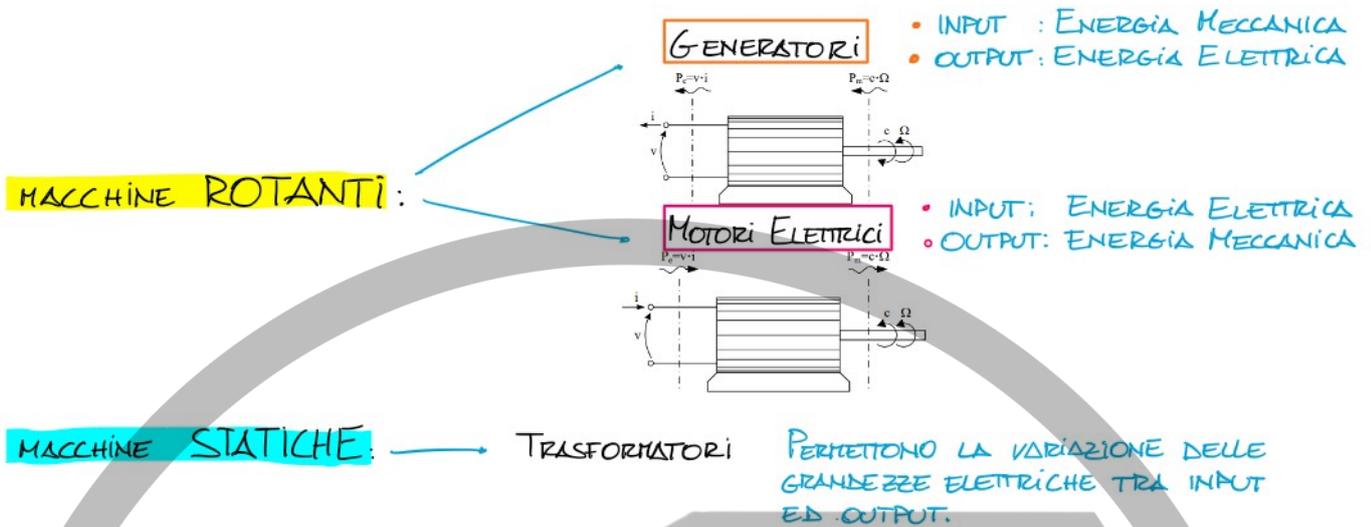
- Usare dei circuiti percorsi da corrente;
- Utilizzare macchine magnetiche (= calamite).

⚠ Ci sono 3 modi per far variare il flusso. Nella macchina rotante la cosa più facile è far variare l'angolo α .

6.4) Circuiti con accoppiamento magnetico:

Introduzione ai motori elettrici:

-> Nella conversione Elettro-Magnetica abbiamo distinto:



-> La nostra concentrazione sarà sui motori elettrici, ma vedremo anche i trasformatori.

Motori elettrici:

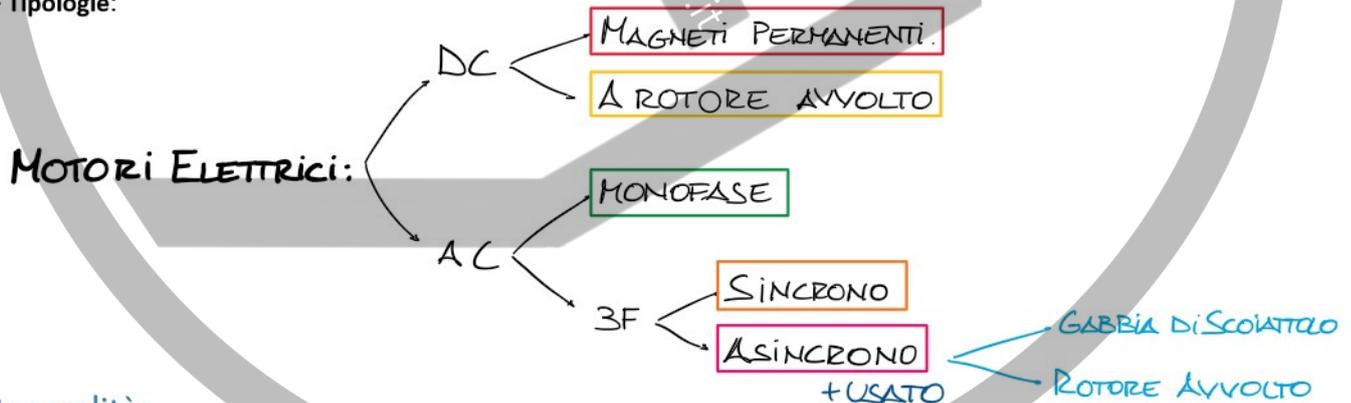
Introduzione:

-> **DEF:** Un motore elettrico è una particolare macchina elettrica rotante, ma non esclusivamente, che trasforma l'energia elettrica in ingresso, applicata ai morsetti di alimentazione, in energia meccanica in uscita resa disponibile sull'asse del motore.

-> Caratteristiche:

- Macchina più diffusa/ utilizzata;
- Alcune macchine funzionano sia in continua che in alternata.
- Ogni M.E. ha una parte
 - o Stazionaria (STATORE)
 - o Rotante (ROTORE): crea il campo magnetico rotante.
- La scelta tra AC o DC dipende da cosa bisogna realizzare;

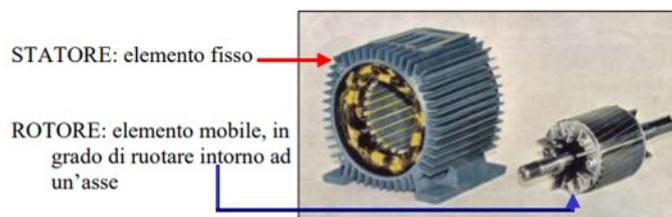
-> Tipologie:



Generalità:

-> Le macchine elettriche sono composte da due elementi principali:

- **STATORE**, che costituisce la **fissa** della macchina: costituito da una struttura di materiale ferromagnetico (come i nuclei dei trasformatori), generalmente di forma cilindrica cava, sul quale sono alloggiati uno o più circuiti elettrici (avvolgimenti statorici).
- **ROTORE** che costituisce la parte **rotante** della macchina: costituito da una struttura di materiale ferromagnetico, generalmente di forma cilindrica, sul quale sono alloggiati uno o più circuiti elettrici (avvolgimenti rotorici) alloggiati in apposite scanalature chiamate cave.
- **TRAFERRO**: spazio d'aria compreso tra rotore e statore.



6.5) Circuiti con accoppiamento magnetico:

Direct Current:

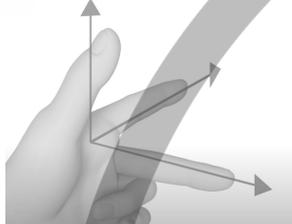
Principi di funzionamento:

-> Dai principi di conversione di elettromagnetismo sappiamo che, generato un campo magnetico, muovendo una barra di metallo all'interno di questo si creerebbe una differenza di potenziale, legata alla legge fisica:

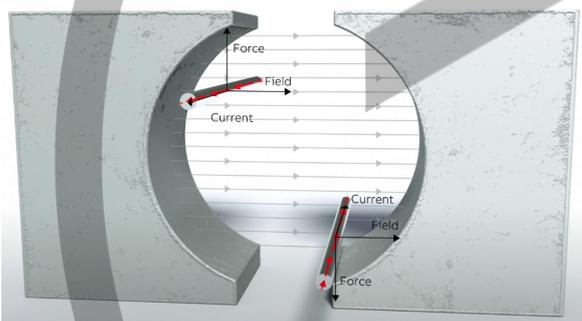
$$U = v \times B \times l$$

(VOLTAGGIO INDOTTO) = (VELOCITÀ BARRA) × (DENSITÀ CAMPO MAGNETICO) × (LUNGHEZZA CONDUTTORE)

-> Nel caso in cui collegassimo una differenza di potenziale (con per esempio una batteria) => per via dei principi avremmo un movimento forzato della barra di metallo, nel verso indicato dalla regola della mano sinistra di Fleming.



-> I motori in corrente continua sfruttano questa relazione:



1.1 Magneti permanenti:

-> **DEF:** chiamati così perché sono dotati di barre magnetiche aggiunte nel rotore, le quali aumentano la spinta rendendoli più efficienti.

-> **Caratteristiche:**

- P < 7 kW;
- Sono versatili e piccoli;
- Taglie di potenza piccole;

-> **Esempi:** piccole ventole, utenze domestiche, pc.

✓ **Vantaggi:** semplicità

✗ **Svantaggi:**

- I magneti possono smagnetizzarsi nel tempo;
- Intensità di campo fissa nel tempo.



1.2 Motore a rotore avvolto:

-> **DEF:** il rotore presenta degli avvolgimenti realizzati con un filo conduttore o piattina di rame. Questi attraversati da corrente generano un campo magnetico grazie al quale funziona la macchina.

-> **Caratteristiche:**

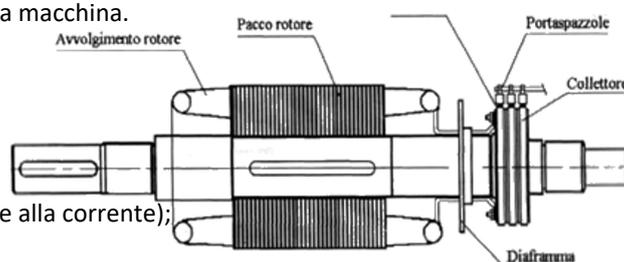
- P > 7 kW (150 kW);
- Versatili;
- Possono essere in serie o in parallelo

-> **Esempi:** macchine industriali, utensili da lavoro;

✓ **Vantaggi:** intensità del campo variabile nel tempo (in relazione alla corrente);

✗ **Svantaggi:**

- Problematiche di usura, manutenzione e costi;
- Inefficiente se usato per potenze elevate (si hanno maggiori complessità e costi);



6.6) Circuiti con accoppiamento magnetico:

2.1 Monofase:

-> Potenze modeste (utenze domestiche);

2.2 3F Asincroni:

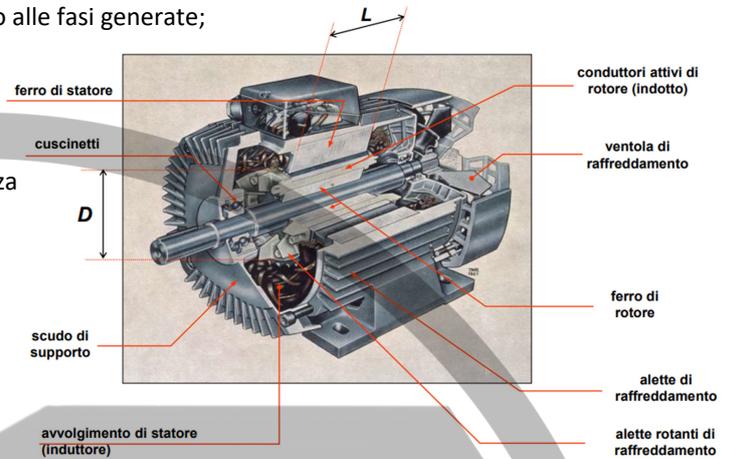
-> **DEF:** il loro rotore ruota in maniera asincrona rispetto alle fasi generate;

-> **Caratteristiche:**

- Funzionamento ad elevate velocità;
- $P < 3,5 \text{ kW}$
- Tipo di motore più diffuso ed utilizzato perché ha costi di manutenzione minimi, ottima efficienza e facilità di costruzione.
- Motore ad induzione;

-> **Utilizzi:** applicazioni industriali;

🔥 Il 90% dei motori è asincrono trifase.



2.3 3F Sincroni:

-> **DEF:** il rotore ruota in maniera sincrona alle fasi generate.

-> **Caratteristiche:**

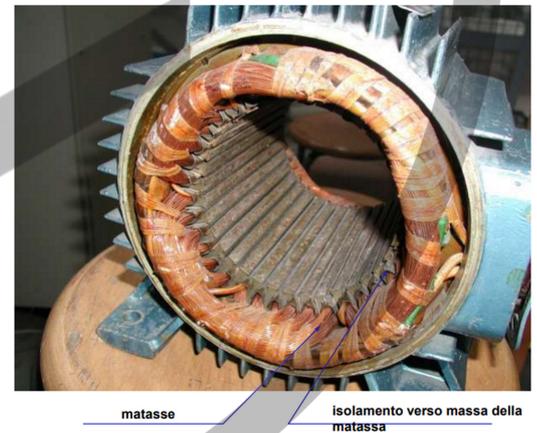
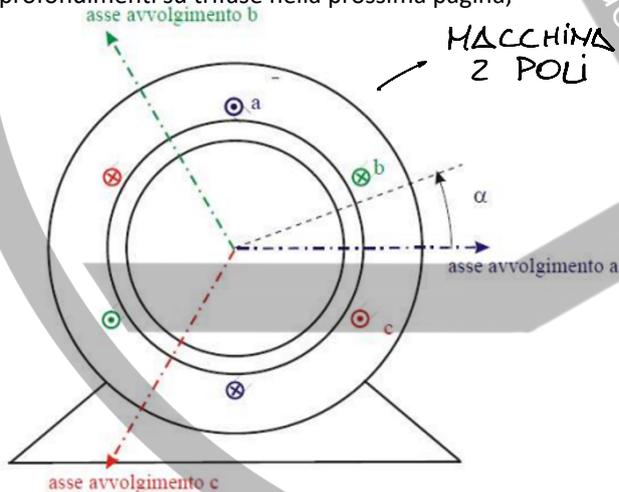
- Utilizzato nelle centrali di produzione;
- $P < 30 \text{ MW}$;

-> **Utilizzo:** alternatore, distribuzione e.e.

- Sfrutta l'energia meccanica in ingresso per avere in uscita una terna 3F ad una certa frequenza

🔥 Italia 50 Hz; USA 60Hz.

-> Approfondimenti su trifase nella prossima pagina;



Efficienza dei motori:

-> Principio base: interazione tra campi magnetici:

$$P_{IN} = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot \cos(\varphi)$$

[W] ELETTRICI VALORI EFFICACI.

$$P_{OUT} = T \cdot \omega \quad [W] \text{ MECCANICI}$$

↳ $P_{OUT} < P_{IN}$ CAUSA PERDITE

→ RENDIMENTO:

$$\eta = \frac{P_{OUT}}{P_{IN}} \cdot 100$$

-> L'efficienza delle macchine elettriche sono elevate [90%-95%] di efficienza.

6.7) Circuiti con accoppiamento magnetico:

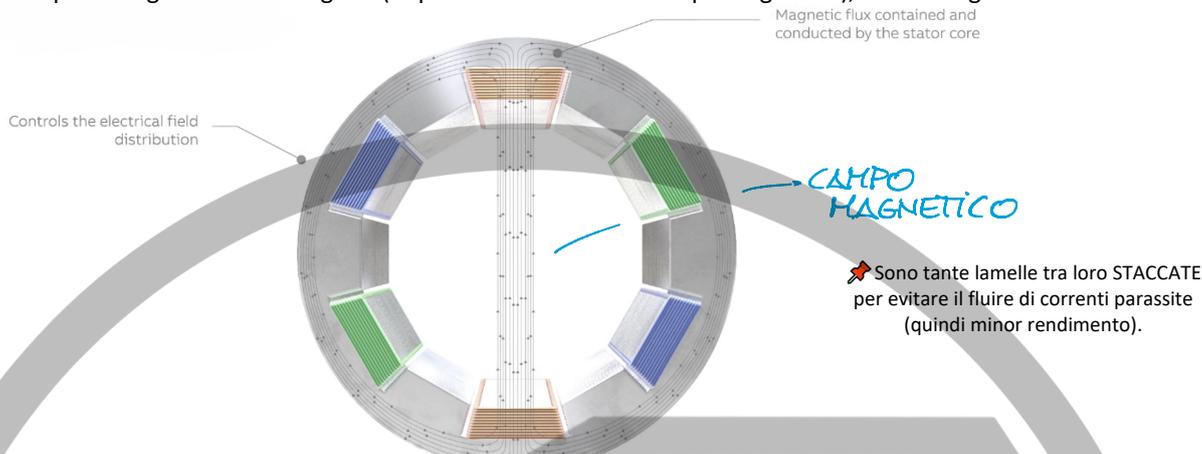
-> La principale differenza tra i motori in AC sta nella sincronicità di velocità... ma di che cosa?

-> In questi motori possiamo rilevare la velocità di due entità:

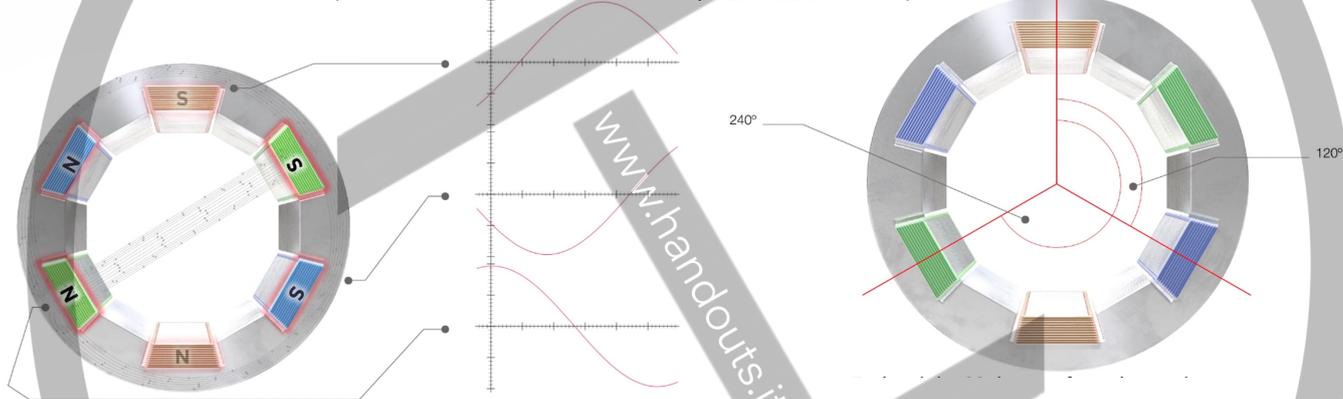
- ω_1 Velocità di rotazione del **CAMPO MAGNETICO**;
- ω_2 Velocità di rotazione meccanica del **ROTORE** (dell'albero della macchina).

-> Nei motori in alternata, lo statore presenta una forma simile a quella che si vede sotto. È un cilindro formato da lamelle che presentano degli incavi.

-> L'obbiettivo sta nel porre negli incavi dei magneti (o qualcosa che simuli il campo magnetico), come in figura.



-> Grazie ai principi di conversione Elettro-Magnetica, precedentemente visti, è possibile generare un campo magnetico "rotante" all'interno del cilindro (utilizzando dei circuiti in cui si fa passare la corrente).

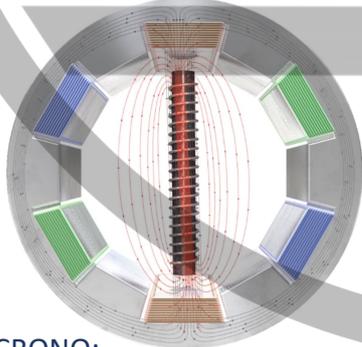


-> Le correnti attraverseranno i circuiti in maniera tale da simulare un trifase (facendo diventare questo motore a tutti gli effetti un trifase).

-> Arriviamo adesso alla distinzione tra motore sincrono e motore asincrono:

Motore SINCRONO:

-> Nel motore sincrono il rotore si muove con velocità angolare sincrona alla velocità angolare del campo magnetico

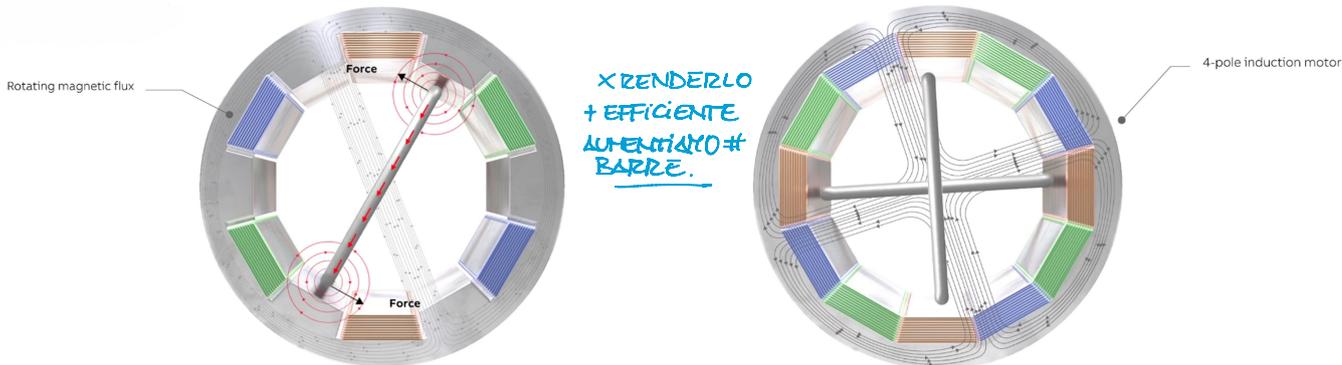


$$\omega_1 = \omega_2$$

-> Sono macchine reversibili, quindi possiamo parlare sia di motore che di generatore.

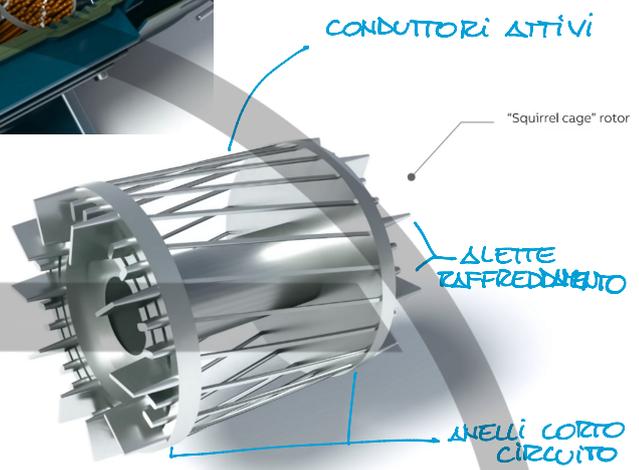
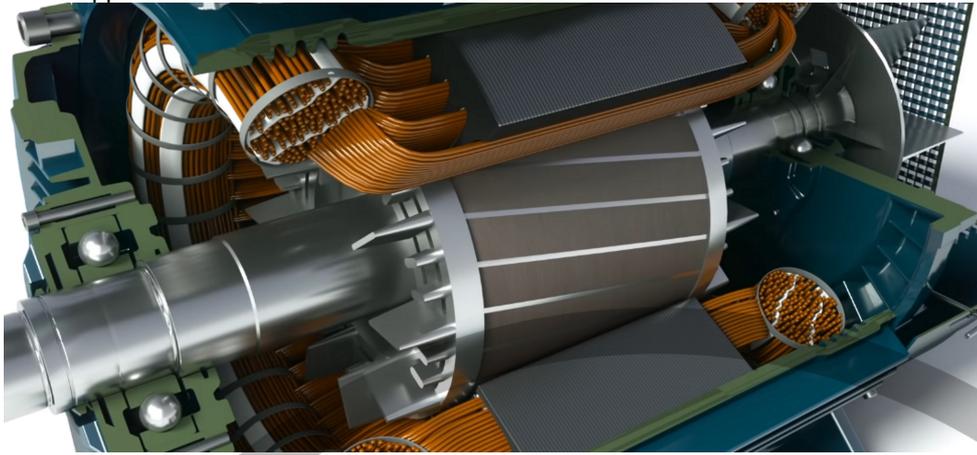
Motore ASINCRONO:

-> Nel motore asincrono rotore e campo magnetico hanno diversa velocità angolare.

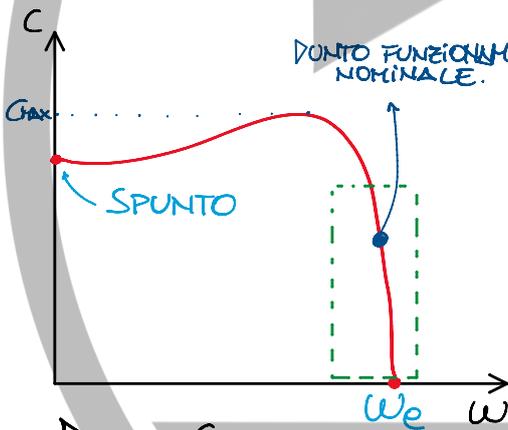


6.8) Circuiti con accoppiamento magnetico:

-> Rappresentazione di un motore asincrono.



Caratterizzazione meccanica:



-> Utilizziamo il piano coppia-velocità angolare perché la potenza meccanica è data dal prodotto dei due.

-> è interessante di questo motore che, anche se il rotore è fermo genera un campo magnetico.

-> Quando si raggiunge la velocità di sincronismo (w_e) la coppia è pari a zero.

w_e : zona in cui solitamente si fanno lavorare i motori.

PUNTO DI FUNZIONAMENTO NOMINALE: punto di riferimento cui tutti i valori del data sheet sono riferiti.

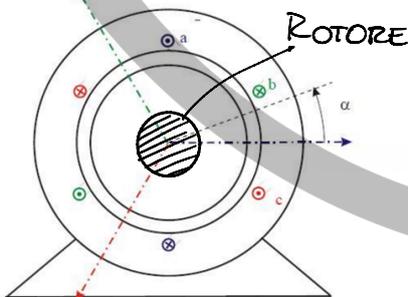
COPPIA MASSIMA RAGGIUNGA DAL ROTORE: solitamente maggiore del punto di spunto,

PUNTO DI FUNZIONAMENTO: dato dall'incontro tra la potenza meccanica e

-> Allo spugnò il rendimento di una macchina è nullo. Infatti o la corrente o la differenza di potenziale sono nulle ($w=0$). Questo vuol dire che la potenza meccanica è nulla. Ma dato che la potenza elettrica non è nulla => il rendimento è nullo.

$$P_{MECC} = C \cdot w$$

w_e VELOCITÀ SINCRONISTICO



⊙ : CORRENTE USCENTE

⊗ : CORRENTE ENTRANTE

$$i_a = I_m \cos(\omega t)$$

$$i_b = I_m \cos(\omega t - 120^\circ)$$

$$i_c = I_m \cos(\omega t - 240^\circ)$$

SFASAMENTO 120°
SFASAMENTO 240°
SFASAMENTO 120°

- Si GENERANO 3 CAMPI MAGNETICI: $\vec{B}_a, \vec{B}_b, \vec{B}_c$

$$- B_j = k \cdot i_j(t) \cos(\alpha)$$

k COSTANTE DEL MATERIALE

- CAMPO MAGNETICO RISULTANTE:

$$B = B_a + B_b + B_c = B \cdot \cos(\omega t - \alpha)$$

\hookrightarrow IL CAMPO RUOTA CON UN ANGOLO α RISPETTO ALLA VELOCITÀ DI ROTAZIONE w .

6.9) Circuiti con accoppiamento magnetico:

→ Si può dimostrare che: $\omega_s = \frac{\omega}{P/2}$ [rad/s]
 VELOCITÀ ROTAZIONE CAMPO → # POLI

→ Solitamente la velocità è espressa in giri al minuto (RPM: Roun Per Minut): $n_s = \frac{120}{P} f$;

Coppia di poli	Numero di poli	Velocità n_s
1	2	3000 rpm
2	4	1500 rpm
3	6	1000 rpm
4	8	750 rpm

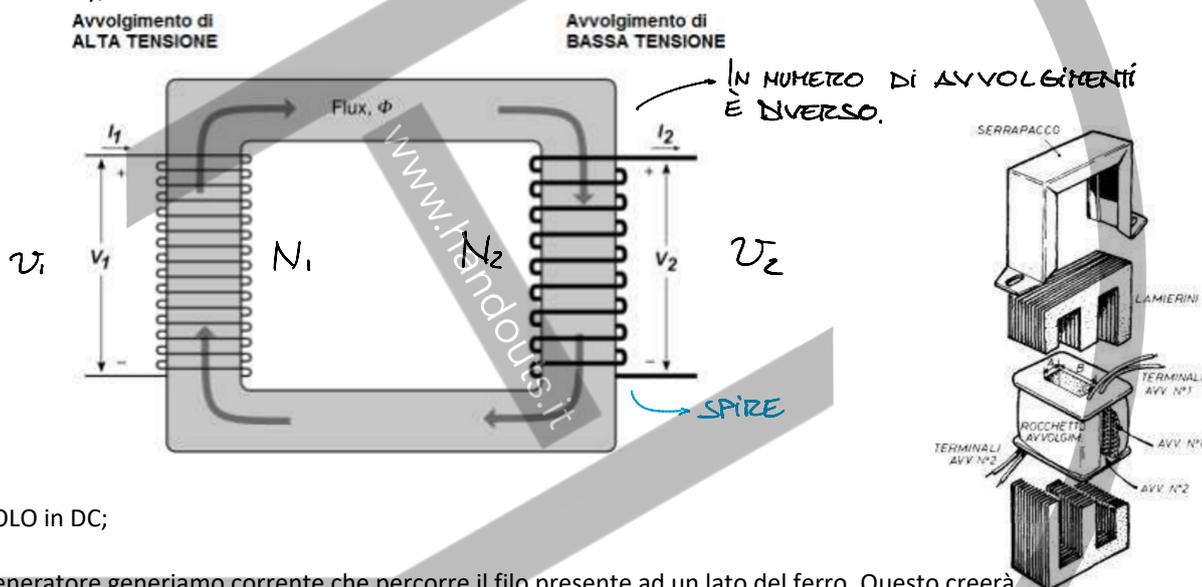
→ IN ITALIA $f = 50$ Hz

→ All'aumentare del numero di coppie abbiamo una minore velocità dell'albero

Il trasformatore:

→ DEF: composto da due avvolgimenti ed una barra di metallo modellata a cornice quadrata, è uno strumento in grado di adattare tensione (e corrente) tra diversi sistemi elettrici.

- Permette la connessione e gestione ottimale dai punti dal punto di vista tecnico-economico.
- Basato su legge Faraday;



→ **Caratteristiche:**

- ⚠ Funziona SOLO in DC;

→ **Funzionamento:**

- Grazie ad un generatore generiamo corrente che percorre il filo presente ad un lato del ferro. Questo creerà un campo magnetico internamente al ferro.
- Il campo magnetico influenza la bobina nell'altro braccio, la quale genererà una corrente, diversa da quella entrante per via del numero di spire diverso.

→ **Matematicamente:**

↳ LEGGE FARADAY: $v_1(t) = V_1 \cdot \cos(\omega t) = N_1 \cdot \frac{d\phi}{dt}$
 VARIAZIONE FLUSSO

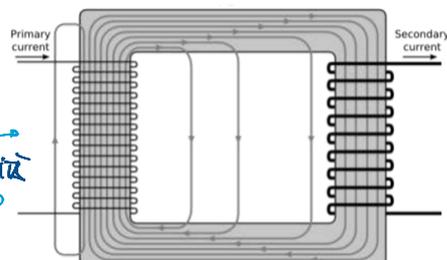
↳ $d\phi = \frac{V_1 \cdot \cos(\omega t)}{N_1} \cdot dt \Rightarrow \phi_1 = \int \frac{V_1 \cdot \cos(\omega t)}{N_1} dt = \frac{V_1}{N_1 \omega} \cdot \sin(\omega t)$

↳ $V_2 =$ TENSIONE INDOTTA = DERIVATA FLUSSO CHE SI CONCATENA N_2 VOLTE.

$= N_2 \cdot \frac{d\phi_1(t)}{dt} = N_2 \cdot \frac{V_1}{N_1 \omega} \omega \cos(\omega t) = \frac{N_2}{N_1} V_1(t)$

- $N_2 < N_1 \Rightarrow$ ALTA → BASSA TENSIONE
- $N_2 > N_1 \Rightarrow$ BASSA → ALTA TENSIONE

NON AVENDO, IL FERRO, PERMEABILITÀ MAGNETICA $\infty \Rightarrow$ PARTE DEL Φ DISPERSA



6.10) Circuiti con accoppiamento magnetico:

-> Generalità:

- Generazione: 10-15 kV.
- Trasmissione: 230 kV e 400 kV.
- Distribuzione in AT: 132 kV
- Distribuzione in MT: storicamente 3, 6, 12, 15, 20 e 30 kV .

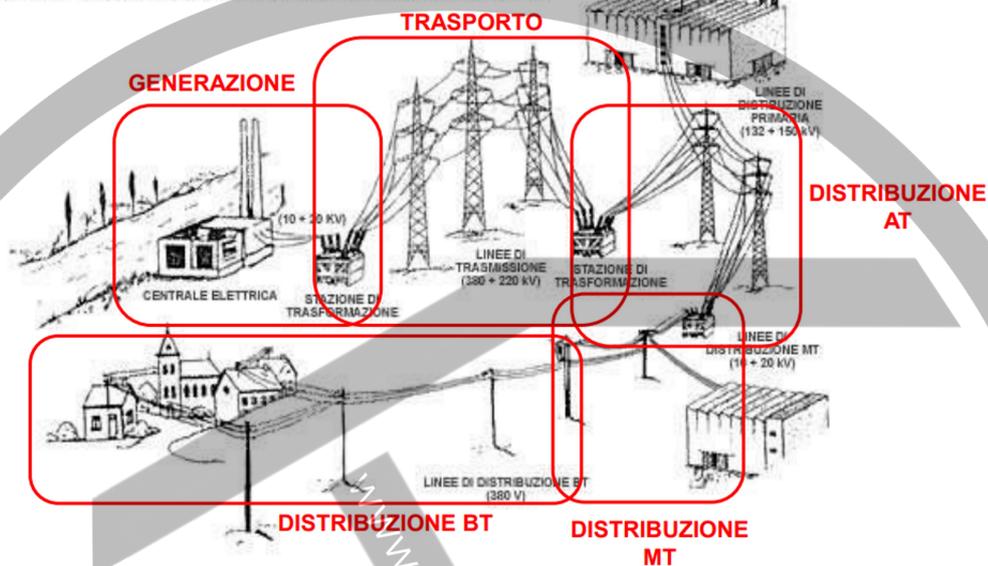
(Attualmente standardizzata a 20 kV)

- Utilizzazione: 230 - 400 V.

-> Accanto all'applicazione strettamente energetica, i trasformatori sono utilizzati:

- Per garantire isolamento galvanico tra circuiti ("trasformatori di isolamento").
- Per misurare tensioni e correnti elevate negli impianti ("trasformatori di misura TA e TV")

STRUTTURA GENERALE DI UN SISTEMA ELETTRICO

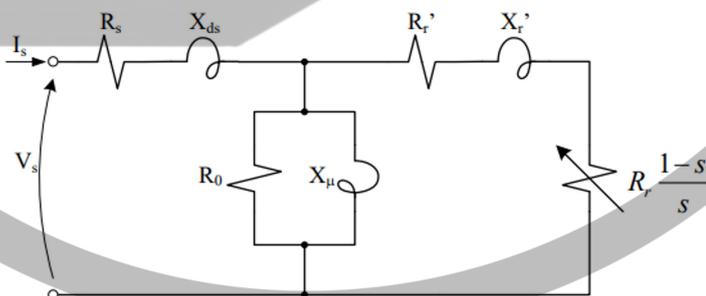


Similitudini motore asincrono e trasformatore:

-> Il suo circuito equivalente sarà quindi del tutto simile al circuito equivalente di un trasformatore. Ma...

- In un trasformatore primario e secondario non si muovono e la pulsazione delle grandezze elettriche al primario ed al secondario è uguale.
- In un motore asincrono la pulsazione delle grandezze elettriche rotoriche (ω_r) è diversa dalla pulsazione delle grandezze elettriche statoriche (ω_s).
- In un motore asincrono l'avvolgimento rotorico è in corto circuito.

-> E' necessario "riportare" il circuito rotorico alla frequenza del circuito statorico (teorema di equivalenza), mantenendo inalterati i flussi energetici.



-> COPPIA:

$$c(s) = \frac{P_r}{\omega_c} = 3 \cdot \frac{V_s^2}{\omega_c} \cdot \frac{\frac{R_r'}{s}}{\left(R_s + \frac{R_r'}{s}\right)^2 + (X_s + X_r')^2}$$