



**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI TRIESTE**



Dipartimento di
**Ingegneria
e Architettura**

Introduzione alle macchine elettriche

Elettrotecnica

A.A. 2024 - 2025

Prof. Alessandro Massi Pavan – apavan@units.it

CAMPO MAGNETICO

- Un magnete permanente è in grado di attrarre gli oggetti metallici (ferrosi)
- Nello spazio circostante il magnete esiste un campo di forze (il campo magnetico)
- Esistono punti del magnete dove il campo è più intenso: poli del magnete (polo nord e polo sud)

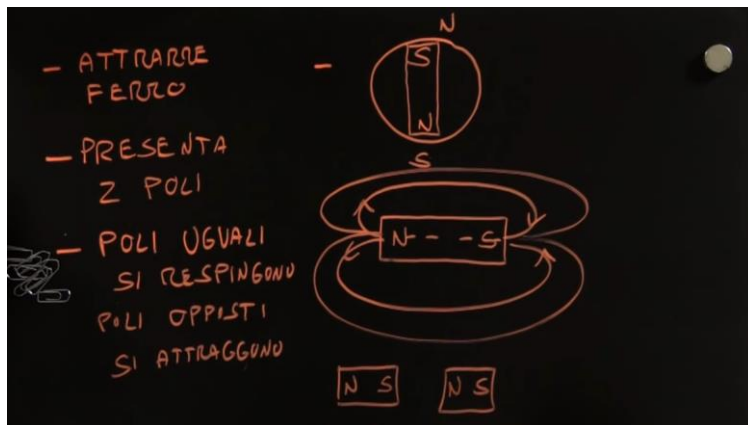
<https://www.youtube.com/watch?v=g5vntRP7als>



CAMPO MAGNETICO

- Il campo di induzione magnetica $\vec{B}$ [T] (detto anche campo magnetico) può essere rappresentato usando delle linee di forza
- Queste originano al polo nord e terminano al polo sud (in realtà sono delle linee chiuse)
- I poli non possono essere isolati, non esistono delle cariche magnetiche ma dei dipoli magnetici

<https://www.youtube.com/watch?v=OMiQk4UMTN4>



FLUSSO MAGNETICO

- Il flusso magnetico Φ_B [Wb] del vettore induzione magnetica attraverso una superficie è la grandezza scalare

$$\Phi_B = \int_S \bar{B} \cdot d\bar{s}$$

- Se il campo magnetico è omogeneo e la superficie attraversata è piana, allora il flusso magnetico vale

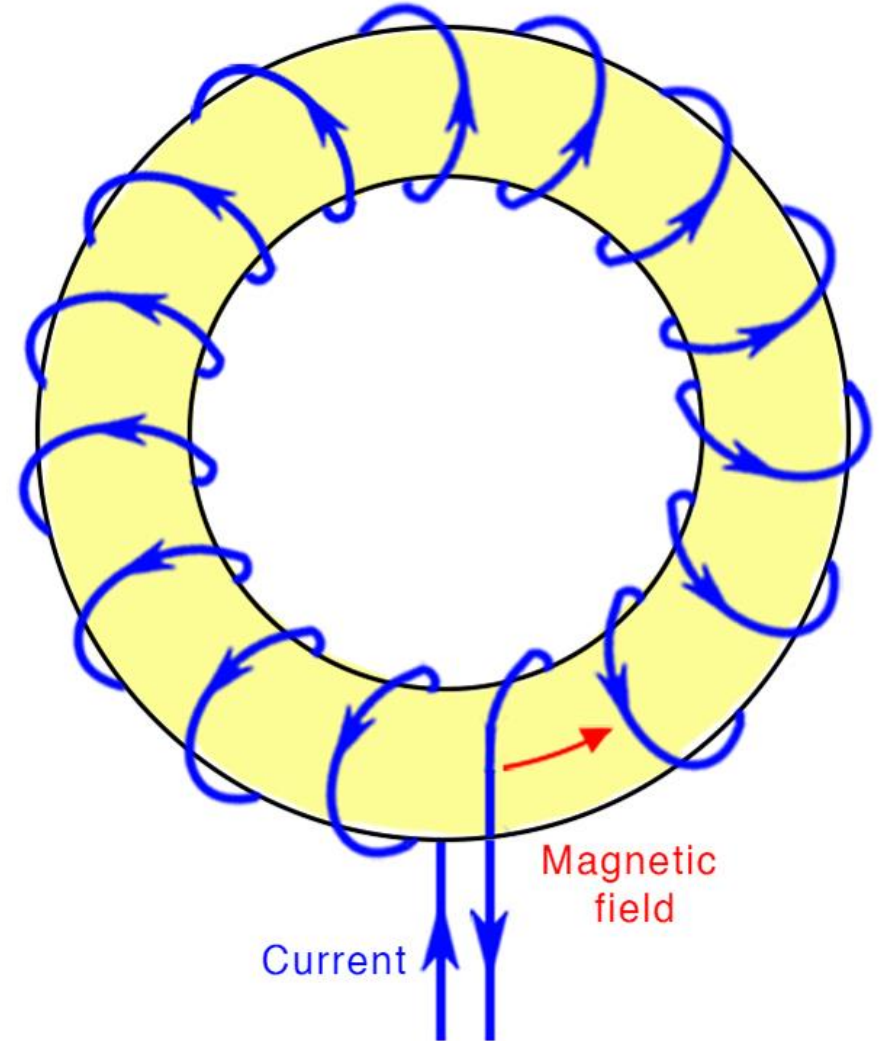
$$\Phi_B = B \times S \times \cos \theta$$

S – superficie attraversata

θ – angolo formato tra il vettore campo magnetico e la perpendicolare alla superficie

CIRCUITI MAGNETICI

- Un circuito magnetico è un tubo di flusso del vettore induzione magnetica Φ_B
- Φ_B è costante in ogni sezione del circuito magnetico
- Vi è quindi un'analogia tra il «flusso in un circuito magnetico» e la «corrente in un circuito elettrico»



LEGGE DI FARADAY

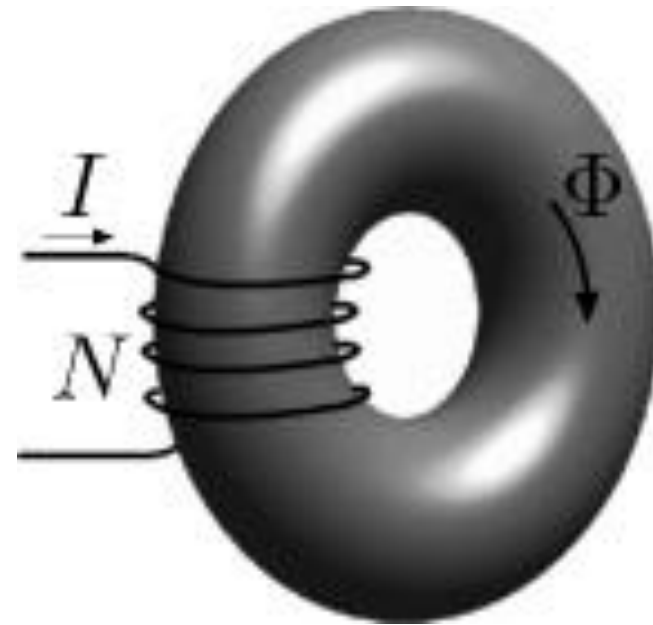
- La legge dell'induzione elettromagnetica di Faraday lega la variazione del flusso magnetico concatenato con una spira e la f.e.m. indotta nella spira
- Il segno negativo indica che la corrente indotta si oppone alla causa che l'ha generata

$$f.e.m. = - \frac{d\Phi_B}{dt}$$

LEGGE DI HOPKINSON

È possibile indurre un campo magnetico facendo scorrere una corrente elettrica « I » in un conduttore avvolto su di un materiale ferromagnetico

$$f.m.m. = R \phi(B)$$



LEGGE DI HOPKINSON

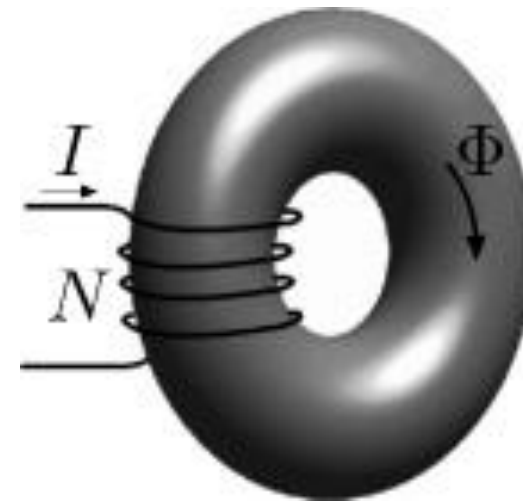
$$f.m.m. = R \phi(B)$$

$$\int_{\gamma} \frac{dl}{\mu_0 \mu_r S} \triangleq \mathbf{R} - [\text{H}^{-1}] \text{ Riluttanza }$$

- μ_0 – permeabilità del vuoto - $4\pi \times 10^{-7}$ H/m
- μ_r – permeabilità magnetica relativa
- S – sezione del tubo di flusso

la forza magnetomotrice vale $N \times I$ (legge di Ampère):

$$f.m.m. = N \times I = R \phi(B)$$



LEGGE DI AMPÈRE

La legge di Ampère afferma che l'integrale del campo magnetico lungo una linea chiusa è proporzionale alla somma delle correnti elettriche concatenate con tale percorso

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \times I_{conc}$$

- μ_0 – permeabilità del vuoto - $4\pi \times 10^{-7}$ H/m

MACCHINE ELETTRICHE

- Sistemi fisici in cui avvengono trasformazioni di energia da una forma all'altra (almeno una delle forme è elettrica)
- Trasformazioni solo elettriche in macchine statiche: trasformatori e convertitori elettronici
- Trasformazioni elettromeccaniche in macchine rotanti (generatori e motori): macchine asincrone (dette anche a induzione), sincrone e a corrente continua

MACCHINE ELETTRICHE

- Lo studio rigoroso delle macchine che si basano su trasformazioni elettromeccaniche dell'energia consiste nello studio di un campo elettromagnetico attraverso l'uso delle equazioni di Maxwell
- Le «ipotesi di campo» permettono di individuare l'andamento qualitativo delle linee di flusso magnetico
- Il campo viene allora determinato ricorrendo a semplici applicazioni delle leggi fondamentali dell'elettromagnetismo

MACCHINE ELETTRICHE

- Ci occupiamo di macchine elettriche rappresentabili con due circuiti elettrici accoppiati magneticamente
- Queste sono descritte da tre equazioni dette equazioni interne della macchina cui corrispondono tre incognite: le due correnti che percorrono i due circuiti e il flusso di induzione magnetica che li accoppia (flusso principale)

MACCHINE ELETTRICHE

- Poiché le macchine elettriche sono collegate ad altri sistemi con cui scambiano energia, esse saranno descritte anche da delle equazioni esterne (che descrivono i vincoli elettrici e meccanici con l'esterno)
- Le equazioni interne non cambiano al variare delle condizioni di funzionamento delle macchine mentre quelle esterne sì

PERDITE

Le trasformazioni di energia comportano sempre delle perdite che nel caso delle macchine elettriche si dividono in:

1. Perdite per effetto Joule e pelle
2. Perdite nel ferro
(isteresi e correnti parassite)
3. Perdite meccaniche (attrito e ventilazione)
4. Altre perdite (flussi dispersi e altre)
5. Interruttori statici

RENDIMENTI

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = 1 - \frac{P_d}{P_{in}} < 1$$

- Piccole macchine a induzione : 60%
- Grandi asincroni industriali: 97-98%
- Grandi sincroni: 98%
- Trasformatori: 99%
- Convertitori elettronici: ...