

MACCHINE ELETTRICHE

Corso di Laurea in Ingegneria Industriale
Anno Accademico 2015-2016

CONVERSIONE ELETTROMECCANICA - PRINCIPI

Docente Francesco Benzi
Università di Pavia
e-mail: fbenzi@unipv.it

**Dispense in collaborazione con
Giovanni Petrecca e Lucia Frosini**

Il corso di Macchine elettriche (laurea magistrale)

Corsi precedenti

Elementi di impianti e macchine elettriche

Macchine e azionamenti elettrici A

Macchine e impianti elettrici

Importanza delle macchine elettriche nell'industria e accoppiamento con i carichi
Cenni sui materiali delle macchine elettriche, le perdite e i problemi termici relativi
Funzionamento a regime e caratteristiche del trasformatore di potenza
Funzionamento a regime e caratteristiche del motore asincrono
Cenni sul funzionamento della macchina sincrona

Il corso di Macchine elettriche (laurea magistrale)

Il corso attuale

Macchine elettriche (I anno Laurea magistrale Ingegneria Elettrica)

- Metodi di calcolo delle induttanze di macchine con parti in movimento
- Distribuzione spaziale e temporale dei campi magnetici nelle macchine rotanti nelle ipotesi semplificative
- Metodi di calcolo della coppia elettromagnetica
- Macchine rotanti elementari
- Macchina elettrica di riferimento (equazioni generali e calcolo della coppia)
- Macchina sincrona (funzionamento a regime da alternatore e da motore)

Il corso di Macchine elettriche (laurea magistrale)

Altri corsi sulle macchine elettriche

Costruzioni elettromeccaniche (I anno LM, II semestre)

Aspetti costruttivi e esempi di progettazione delle macchine elettriche (trasformatori e macchine rotanti)

Azionamenti elettrici industriali e per Energetici (II anno LM, I semestre)

Funzionamento dinamico delle macchine (motori) in relazione ai carichi meccanici, ai sistemi di alimentazione a frequenza variabile e ai diversi metodi di controllo

Diagnostica di macchine e azionamenti elettrici (I-II anno LM)

Metodi diagnostici per individuare e caratterizzare i guasti delle macchine elettriche.

Metodologia dello studio della conversione elettromeccanica

Gli apparati di conversione saranno descritti utilizzando un modello basato su equazioni ricavate a partire da un sistema di n avvolgimenti disposti su strutture di materiale ferromagnetico e da un bilancio di energia all'albero meccanico (nel caso di conversione elettrica/meccanica e viceversa).

- Nel caso di conversione **elettrica/elettrica tramite trasformatori**, gli avvolgimenti sono in posizione relativa invariabile sia tra loro sia rispetto alla struttura di materiale ferromagnetico (una sola struttura).
- Nel caso di conversione **elettrica/meccanica (e viceversa)**, gli avvolgimenti sono disposti su strutture di materiale ferromagnetico, generalmente due, di cui una fissa (statore) e l'altra mobile (rotore). La posizione relativa tra le due strutture è individuata dall'angolo di rotazione (ϑ_r).

Ipotesi di lavoro

- **Si trascurano i fenomeni di saturazione magnetica.** Le induttanze hanno quindi un valore indipendente da quello della corrente.
- **Si trascurano le perdite addizionali** nei materiali conduttori e le perdite per isteresi nei materiali ferromagnetici.
- Altre ipotesi semplificative verranno evidenziate quando necessario.

Equazioni generali della parte elettrica

Equazioni generalizzate di funzionamento della parte elettrica per un sistema con n avvolgimenti concentrati

Equazioni elettriche

$$[v] = [R][i] + \frac{d[\varphi_c]}{dt}; \quad [\varphi_c] = [L][i];$$

$$[v] = [R][i] + \frac{d[L][i]}{dt} = [R][i] + [L]\frac{d[i]}{dt} + \frac{d[L]}{dt}[i]$$

$[v]$ **Vettore colonna delle n tensioni di alimentazione**

$[i]$ **Vettore colonna delle n correnti negli avvolgimenti**

$[\varphi_c]$ **Vettore colonna degli n flussi concatenati con gli avvolgimenti**

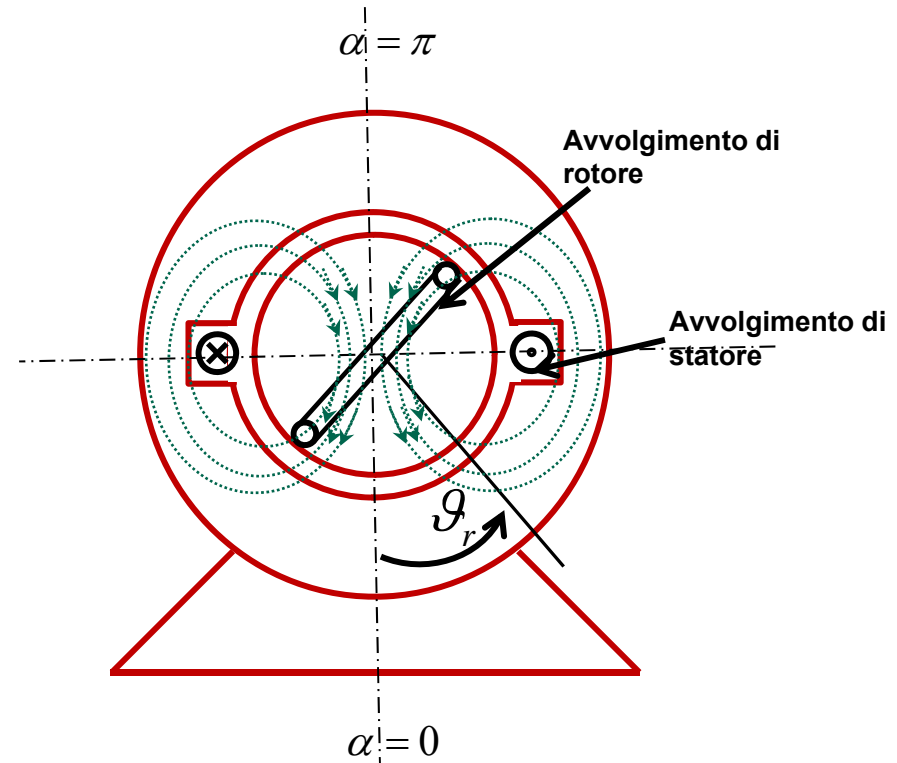
$[R]$ **Matrice $[n \times n]$ delle resistenze (elementi diversi da 0 solo sulla diagonale principale**

$[L]$ **Matrice $[n \times n]$ delle induttanze del sistema di n avvolgimenti, *simmetrica* rispetto alla diagonale principale. Ogni elemento della matrice può essere funzione dell'angolo di rotazione o indipendente da esso a seconda della configurazione relativa dei circuiti elettrici e magnetici. Nell'ipotesi di assenza di saturazione, gli elementi di $[L]$ sono indipendenti dagli elementi del vettore $[i]$.**

Equazioni generali della parte elettrica

$$\begin{aligned} [v] &= [R][i] + [L] \frac{d[i]}{dt} + \frac{d[L]}{dt} [i] = \\ &= [R][i] + [L] \frac{d[i]}{dt} + \frac{d[L]}{d\vartheta_r} \frac{d\vartheta_r}{dt} [i] = \\ &= [R][i] + [L] \frac{d[i]}{dt} + \underbrace{\frac{d[L]}{d\vartheta_r} \omega_r}_{=0} [i] \end{aligned}$$

= 0 nel caso di [L]
indipendente da ϑ_r



**Nel caso di avvolgimenti
e/o strutture
ferromagnetiche in
moto relativo tra di loro,
la matrice [L] è funzione
dell'angolo ϑ_r**

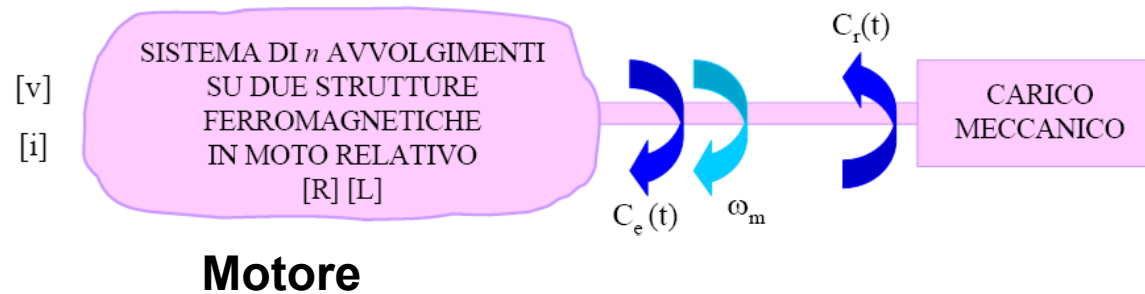
Equazioni generali della parte elettrica

Equazioni meccaniche

$$C_e - C_r = J \frac{d\omega_m}{dt}$$

$$\omega_m = \frac{d\vartheta_m}{dt}$$

$$\theta_r = \theta_m \cdot (pp); \omega_r = \omega_m \cdot (pp)$$



$C_e = C_e(t)$ È la coppia istantanea al traferro, positiva se agisce in senso concorde con la velocità dell'albero ω_m , funzione di [i] e [L], ricavata da un bilancio energetico (Convenzione dei motori).

$C_r = C_r(t)$ È la coppia resistente del carico, positiva se agisce in senso opposto alla velocità ω_m .

$J \frac{d\omega_m}{dt}$ È la coppia d'inerzia, in cui J è l'inerzia complessiva della parte meccanica, sempre riportata all'albero

ϑ_r, ω_r

Posizione e velocità angolari "elettriche" legate ai rispettivi valori meccanici dal numero di coppie polari (pp); vedi oltre.

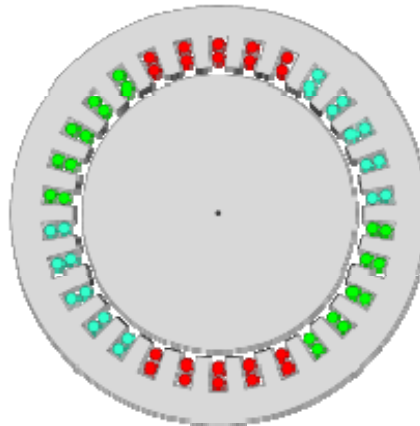
Modello della conversione elettromeccanica

Ipotesi semplificative

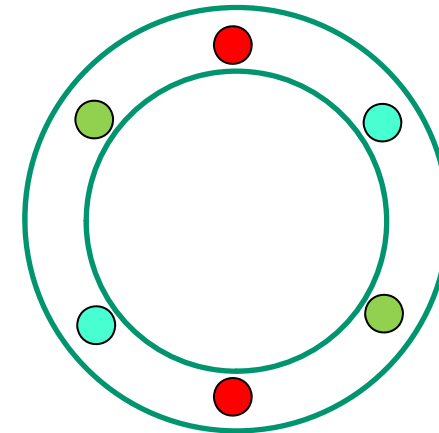
Si procede a partire da alcuni casi elementari, con **avvolgimenti concentrati**, sullo statore e sul rotore.



Avvolgimenti di uno statore trifase (distribuiti)



Schematizzazione avvolgimenti distribuiti



Schematizzazione avvolgimenti concentrati **equivalenti**

Equivalenza fra avvolgimenti distribuiti e concentrati.

Un gruppo di avvolgimenti concentrati è equivalente a un gruppo di avvolgimenti distribuiti se produce la stessa distribuzione di campi magnetici (fmm e flussi) e sviluppa una potenza elettrica complessiva identica.

Modello della conversione elettromeccanica

Ulteriori ipotesi semplificative

- **Le forze magnetomotrici (f.m.m.)** e i flussi al traferro sono rappresentati utilizzando la **componente fondamentale** delle loro distribuzioni spaziali, simmetriche rispetto all'asse di simmetria dell'avvolgimento che li produce. Le distribuzioni spaziali sono quindi sempre sinusoidali.
- Le linee di flusso del campo magnetico sostenuto dagli avvolgimenti **attraversano radialmente il traferro.**
- Tutti **gli avvolgimenti hanno un concatenamento totale** con le linee di flusso del campo.

Calcolo delle induttanze: metodologia

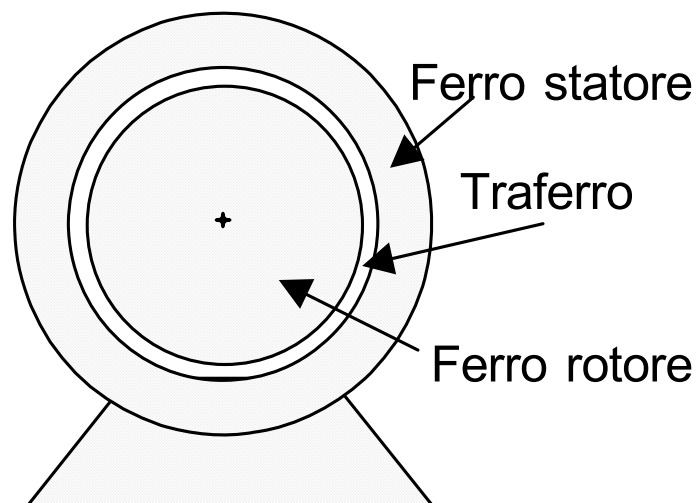
Il procedimento per il calcolo delle singole induttanze che compaiono nella matrice [L] può essere schematizzato nel seguente modo:

a) **calcolo del flusso del campo magnetico** (flusso che attraversa la sezione del singolo avvolgimento):

- si individua la distribuzione spaziale di induzione al traferro prodotta da tutte le f.m.m. presenti;
- si calcola il flusso mediante un'integrazione estesa alla superficie al traferro;

b) **calcolo del flusso concatenato** con il singolo avvolgimento come prodotto del flusso del campo (oppure del flusso mediamente concatenato, nel caso di concatenamenti parziali) per il numero dei concatenamenti;

c) **calcolo delle induttanze** come rapporto tra flusso concatenato e corrente.



Espressione delle induttanze per avvolgimenti concentrati con strutture magnetiche isotrope

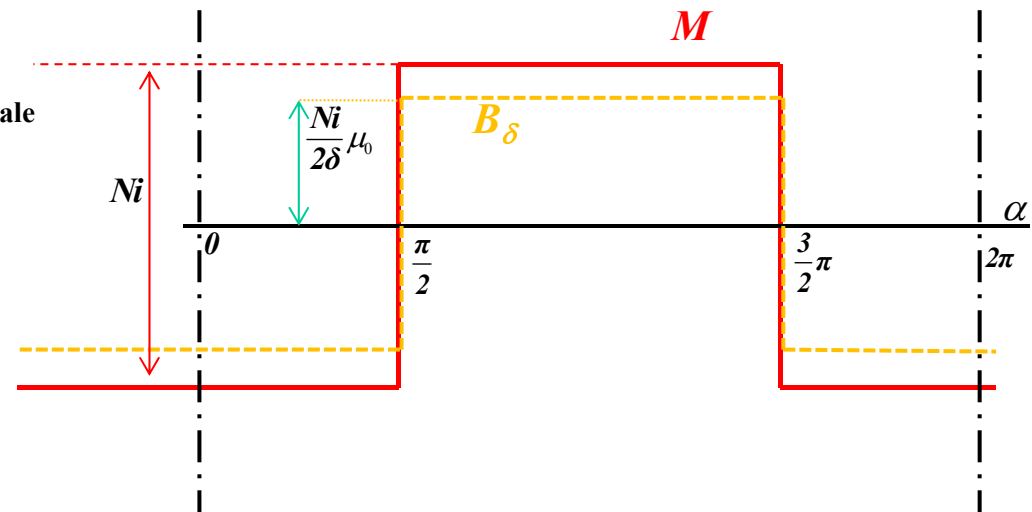
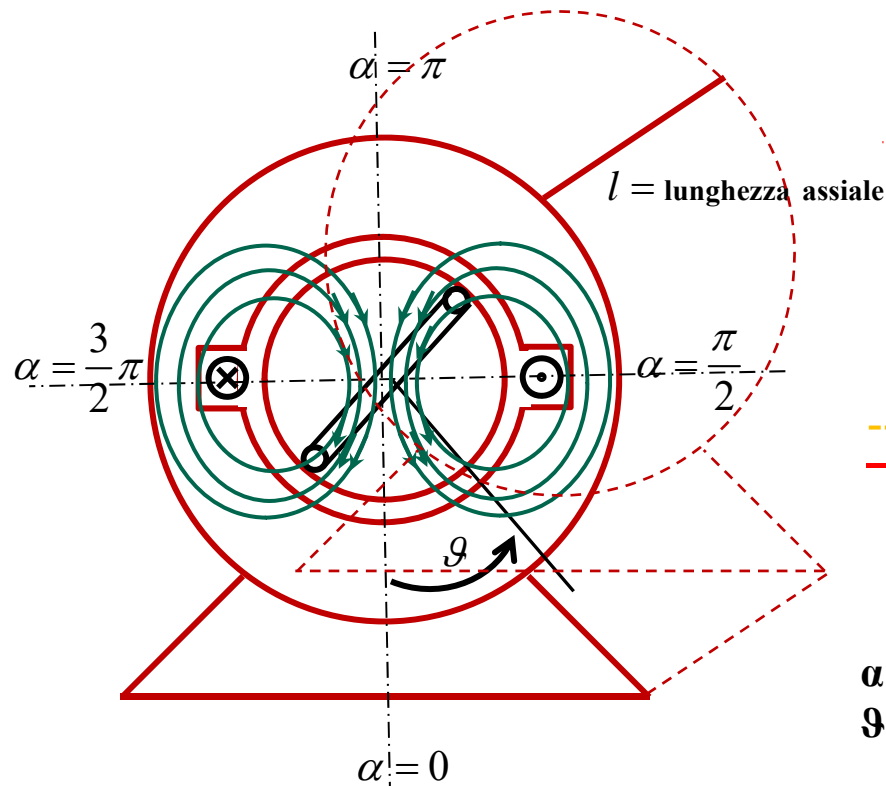
$$[L] = \begin{bmatrix} L_{ss} & L_{sr} \\ L_{rs} & L_{rr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & L_{sr} \\ L_{rs} & L_r \end{bmatrix}$$

ove il primo indice si riferisce all'avvolgimento che concatena il flusso ed il secondo indice all'avvolgimento percorso dalla corrente che sostiene il flusso.

Espressione delle induttanze per avvolgimenti concentrati con strutture magnetiche isotrope

CASO ELEMENTARE:

- 1 avvolgimento di N_s spire sullo statore
- 1 avvolgimento di N_r spire sullo rotore
- Strutture magnetiche isotrope (cilindriche) con $\mu_r = \infty$
- Traferro costante di spessore δ



α coordinata spaziale lungo il traferro
 ϑ posizione angolare del rotore

AVVOLGIMENTI CONCENTRATI CON STRUTTURE MAGNETICHE ISOTROPE

a) CALCOLO DEI FLUSSI DEL CAMPO Φ_{ss} , Φ_{rr} , Φ_{rs} :

Il flusso Φ_{ss} attraversa radialmente il traferro due volte e si concatena con la totale f.m.m. $N_s i_s$ (vedi Figura 1).

Nell'ipotesi di $\mu_r = \infty$, la totale f.m.m. si ripartisce in parti uguali nei due tratti di traferro.

Essendo lo spessore del traferro costante e pari a δ , l'induzione al traferro risulta:

$$B_{\delta} = \mu_0 H_{\delta} = \mu_0 \frac{N_s i_s}{2\delta} \left[\text{W b/m}^2 \right]$$

Le linee di flusso escono dalla superficie di statore per: $\pi/2 < \alpha < 3/2 \pi$
e rientrano nella superficie di statore per: $-\pi/2 < \alpha < \pi/2$

AVVOLGIMENTI CONCENTRATI CON STRUTTURE MAGNETICHE ISOTROPE

Se si stabilisce la convenzione di attribuire segno + ai tubi di flusso uscenti dalla superficie di statore e segno - a quelli entranti, le distribuzioni spaziali di f.m.m. e di induzione al traferro B_δ in funzione dell'angolo α assumono gli andamenti riportati in Figura 2:

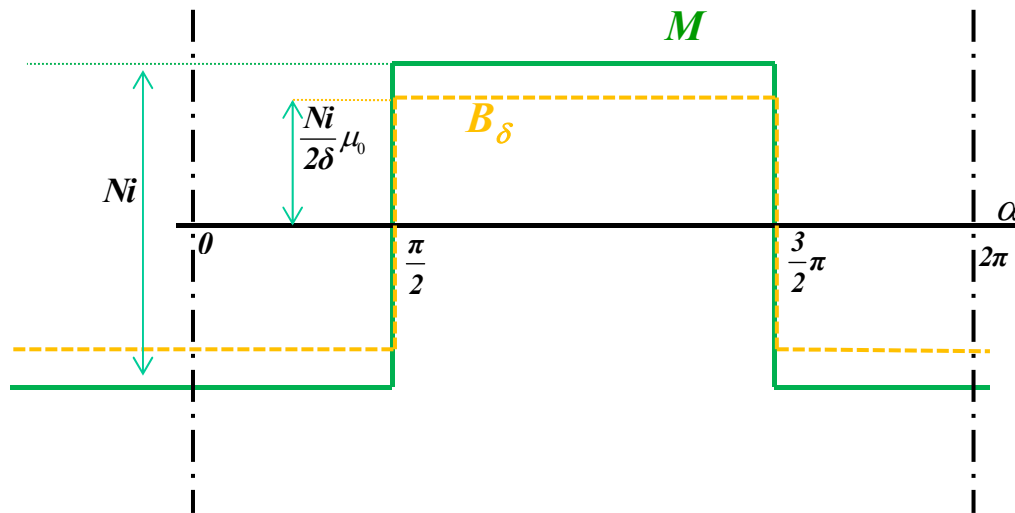


Figura 2

AVVOLGIMENTI CONCENTRATI CON STRUTTURE MAGNETICHE ISOTROPE

Il flusso Φ_{ss} si calcola come prodotto dell'induzione B_δ (costante su un arco di π radianti) per la superficie di statore attraversata dal flusso:

$$\Phi_{ss} = B_\delta \cdot \pi R l = \mu_0 \frac{N_s i_s}{2\delta} \pi R l$$

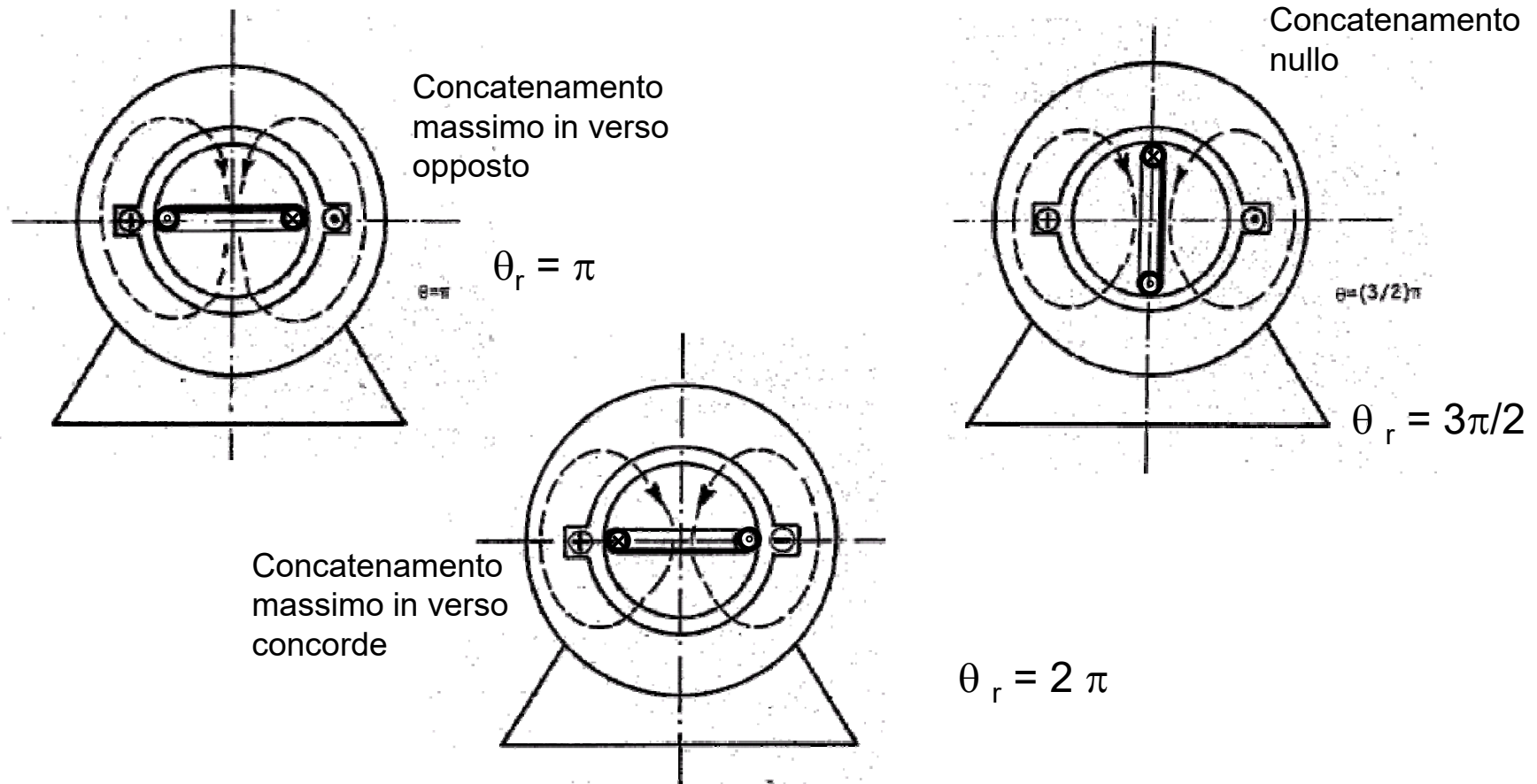
dove R è il raggio al traferro e l è la lunghezza assiale.

Il flusso Φ_{rr} si calcola in modo analogo, supponendo l'avvolgimento r percorso da corrente i_r .

$$\Phi_{rr} = B_\delta \cdot \pi R l = \mu_0 \frac{N_r i_r}{2\delta} \pi R l$$

AVVOLGIMENTI CONCENTRATI CON STRUTTURE MAGNETICHE ISOTROPE

Il flusso Φ_{rs} (flusso che concatena l'avvolgimento r ed è prodotto dalla corrente i_s) può essere valutato con riferimento alle diverse configurazioni che il sistema assume al variare dell'angolo θ_r



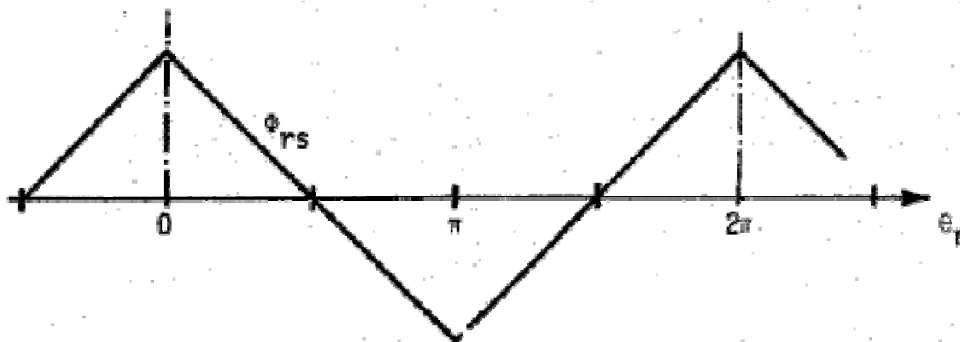
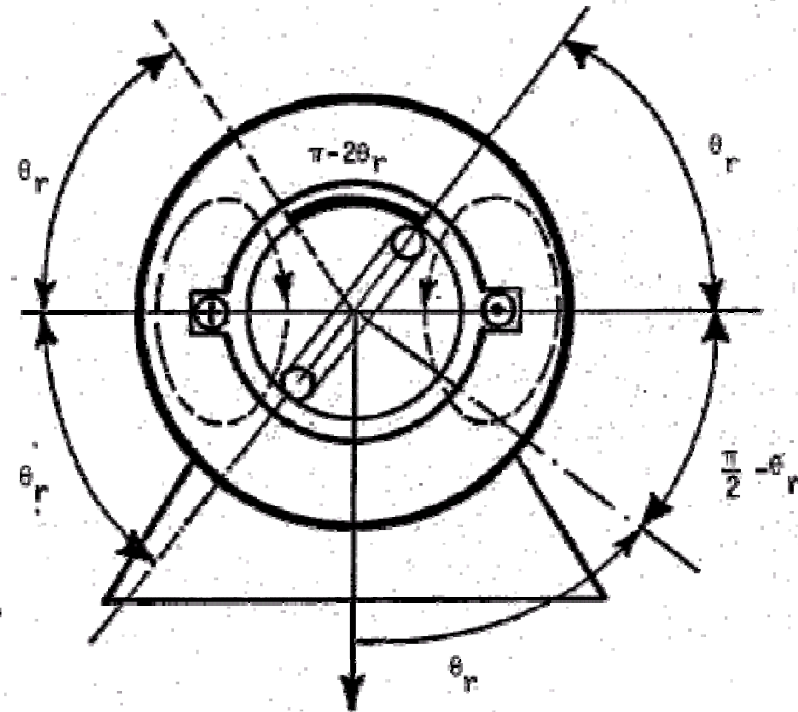
AVVOLGIMENTI CONCENTRATI CON STRUTTURE MAGNETICHE ISOTROPE

Il flusso Φ_{rs} ha un andamento
triangolare definito da:

$$\Phi_{rs} = B_{\delta} \cdot [R l(\pi - 2\theta_r)] \text{ per } 0 < \theta_r < \pi$$

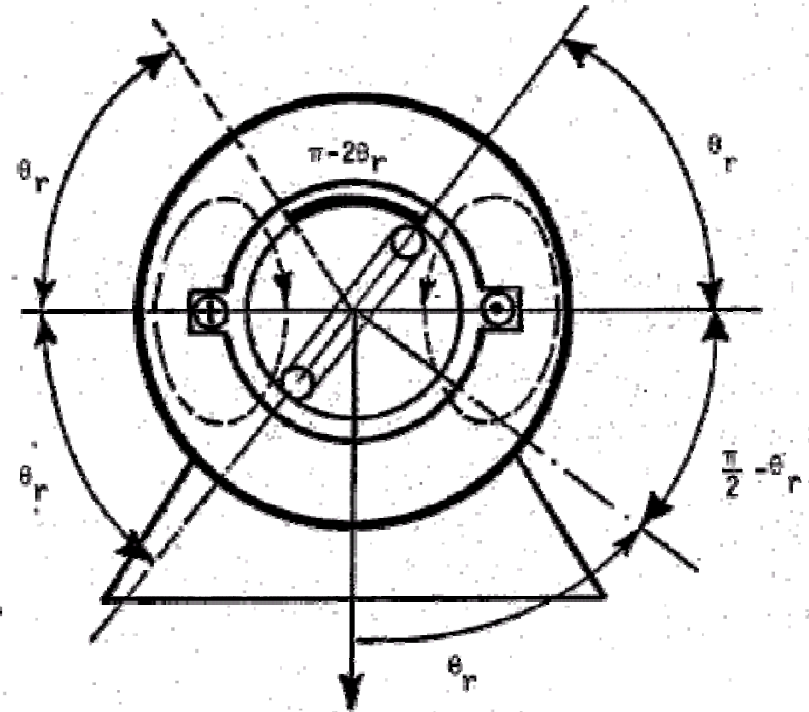
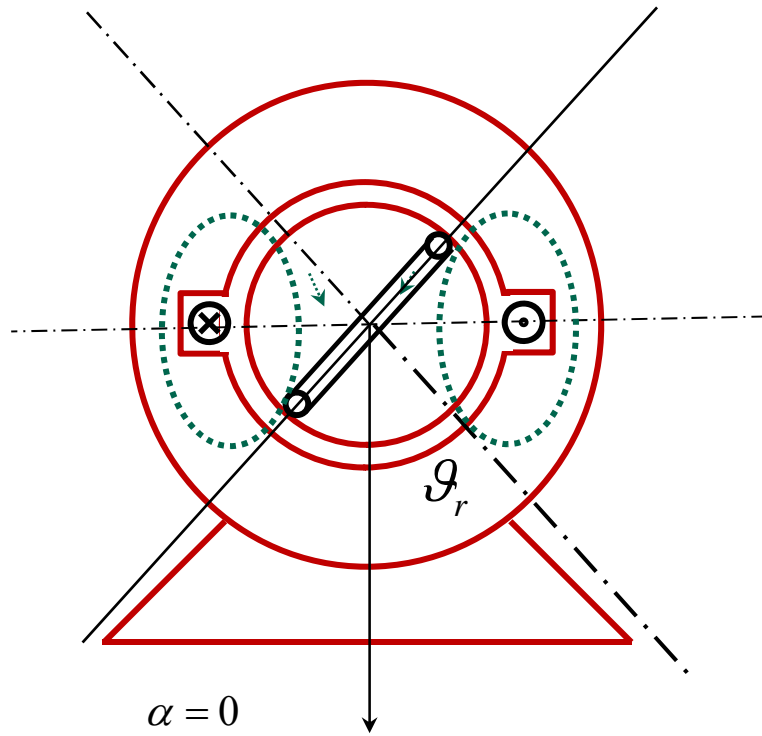
$$\Phi_{rs} = B_{\delta} \cdot [R l(-3\pi + 2\theta_r)] \text{ per } \pi < \theta_r < 2\pi$$

L'andamento del flusso Φ_{rs} in
funzione dell'angolo θ_r è quindi:



$$\alpha = \pi$$

La conversione elettromeccanica



**AVVOLGIMENTI CONCENTRATI CON
STRUTTURE MAGNETICHE ISOTROPE**

b) CALCOLO DEI FLUSSI CONCATENATI:

$$\Psi_{ss} = \Psi_s = N_s \Phi_{ss} = \text{costante rispetto a } \theta_r$$

$$\Psi_{rr} = \Psi_r = N_r \Phi_{rr} = \text{costante rispetto a } \theta_r$$

$$\begin{aligned} \Psi_{rs} &= N_r \Phi_{rs} = N_r B_\delta R l (\pi - 2\theta_r) \quad \text{per } 0 < \theta_r < \pi \\ &= N_r B_\delta R l (-3\pi + 2\theta_r) \quad \text{per } \pi < \theta_r < 2\pi \end{aligned}$$

**AVVOLGIMENTI CONCENTRATI CON
STRUTTURE MAGNETICHE ISOTROPE**

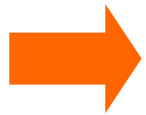
c) CALCOLO DELLE INDUTTANZE:

$$L_s = \frac{\Psi_{ss}}{i_s} = \text{costante rispetto a } \theta_r$$

$$L_r = \frac{\Psi_{rr}}{i_r} = \text{costante rispetto a } \theta_r$$

$$L_{rs} = \frac{\Psi_{rs}}{i_s} = \frac{N_r B_\delta R l (\pi - 2\theta_r)}{i_s} = N_r \mu_0 \frac{N_s i_s R l (\pi - 2\theta_r)}{2\delta i_s}$$

$$L_{rs} = N_s N_r \Lambda_{rs} = L_{sr}$$



$$\text{con } \Lambda_{rs} = \Lambda_{rs}(\theta_r) = \frac{\mu_0 R l (\pi - 2\theta_r)}{2\delta}$$

**NB In questi ultimi passaggi si è sempre considerato il solo intervallo 0- π .
Altrove va considerata la funzione con pendenza positiva (v. sopra)**

AVVOLGIMENTI CONCENTRATI CON STRUTTURE MAGNETICHE ISOTROPE

OSSERVAZIONI (1):

- con spessore del traferro costante, le distribuzioni spaziali dell'induzione B_δ e della f.m.m. hanno lo stesso andamento:

$$B_\delta = \mu_0 H_\delta = \mu_0 \frac{N_s i_s}{2\delta}$$

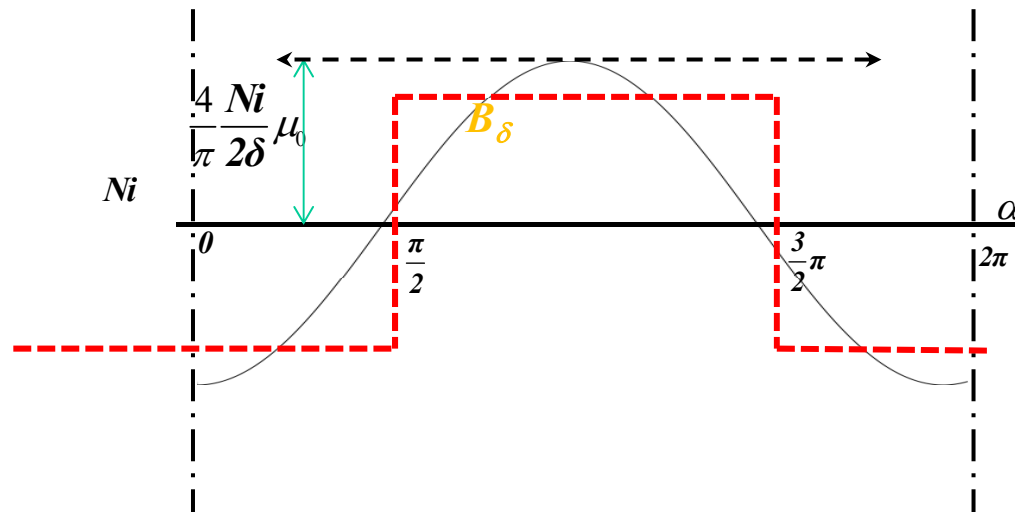
- la legge di variazione dell'induttanza $L_{rs} = L_{sr}$ in funzione dell'angolo di rotazione θ_r non è continua sui 2π radianti, ma è periodica con periodo 2π e non è derivabile nell'intero intervallo di periodicità:

$$L_{rs} = L_{sr} = N_s N_r \frac{\mu_0 R l(\pi - 2\theta_r)}{2\delta}$$

AVVOLGIMENTI CONCENTRATI CON STRUTTURE MAGNETICHE ISOTROPE

OSSERVAZIONI (2):

- se si considera la componente fondamentale della distribuzione spaziale dell'induzione B_δ e della f.m.m. al traferro, la legge di variazione $L_{rs}(\theta_r)$ è una funzione continua in tutto l'intervallo $0-2\pi$ di tipo sinusoidale. In questo caso, il calcolo di Ψ_{rs} e di L_{rs} di può essere condotto attraverso operazioni di integrazione su tutto l'intervallo.



AVVOLGIMENTI CONCENTRATI CON STRUTTURE MAGNETICHE ISOTROPE

OSSERVAZIONI (3):

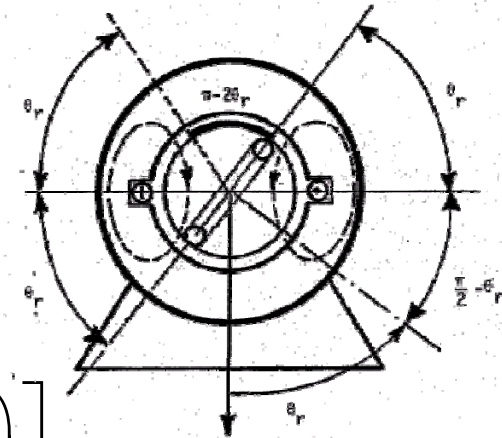
- il valore massimo B_M della distribuzione spaziale dell'induzione B_δ è costante nel tempo se la corrente che la sostiene è continua;
- il valore massimo B_M della distribuzione spaziale dell'induzione B_δ varia con la stessa legge della corrente se quest'ultima è variabile nel tempo.

$$\Phi_{rs} = \int_{\theta_r - \pi/2}^{\theta_r + \pi/2} \frac{4}{\pi} B_M R l \cos \alpha \, d\alpha =$$

$$= \frac{4}{\pi} B_M R l \left[\sin \left(\theta_r + \frac{\pi}{2} \right) - \sin \left(\theta_r - \frac{\pi}{2} \right) \right] =$$

$$= \frac{8}{\pi} B_M R l \cos \theta_r = \frac{8}{\pi} \mu_0 \frac{N_s i_s}{2\delta} R l \cos \theta_r$$

$\rightarrow B_M$



**AVVOLGIMENTI CONCENTRATI CON
STRUTTURE MAGNETICHE ISOTROPE**

$$\Psi_{rs} = N_r \Phi_{rs}$$

$$L_{rs} = \frac{\Psi_{rs}}{i_s} = \frac{8}{\pi} \mu_0 \frac{N_r N_s R l}{2\delta} \cos \theta_r = M_M \cos \theta_r$$



**AVVOLGIMENTI CONCENTRATI CON
STRUTTURE MAGNETICHE
ANISOTROPE**

CASO 1:

- 1 avvolgimento di N_s spire sullo statore
- 1 avvolgimento di N_r spire sullo rotore
- **Struttura di statore isotropa (cilindrica) con $\mu_r = \infty$**
- **Struttura di rotore anisotropa (cilindrica) con $\mu_r = \infty$**
- Traferro variabile

Il traferro è generalmente variabile, mantenendo tuttavia alcuni assi di simmetria passanti per il centro della struttura, per cui il suo andamento rispetto alla variabile angolare α può essere espresso dalla seguente espressione:

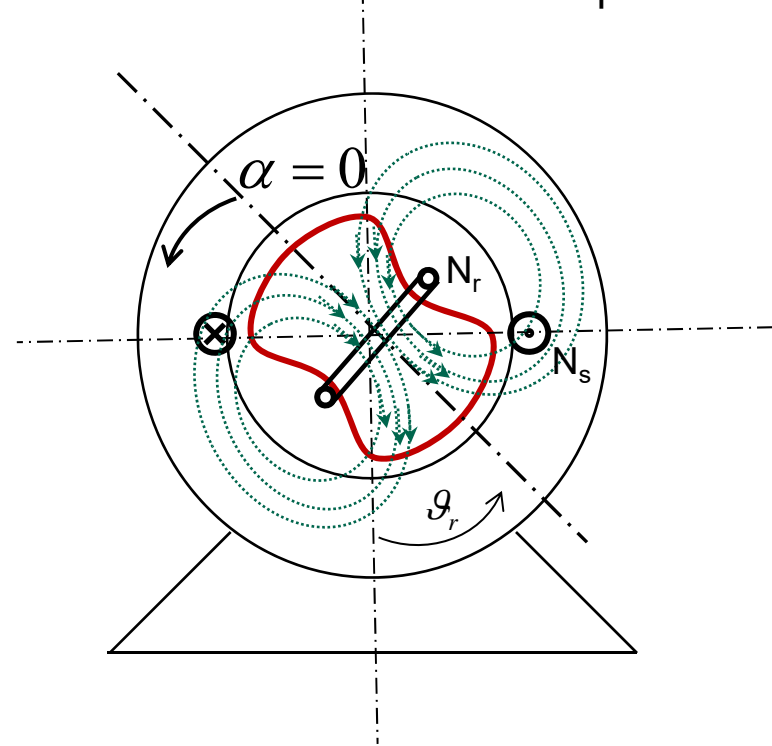
$$\delta(\alpha) = \frac{\delta_M}{\cos \alpha} ; \left[\alpha \neq \frac{\pi}{2}; \alpha \neq \frac{3}{2}\pi \right]$$

**AVVOLGIMENTI CONCENTRATI CON
STRUTTURE MAGNETICHE
ANISOTROPE**

Calcolo dell'induzione al traferro

Poiché l'anisotropia è sul rotore si assume come variabile una coordinata α in corrispondenza all'angolo per cui il traferro è minimo ($\rightarrow 0$)

$$\begin{aligned} B_{\delta}(\alpha) &= \mu_0 H_{\delta}(\alpha) = \mu_0 \frac{N_r i_r}{2\delta(\alpha)} = \\ &= \mu_0 \frac{N_r i_r}{2\delta_M} \cos \alpha = B_M \cos \alpha \end{aligned}$$



AVVOLGIMENTI CONCENTRATI CON STRUTTURE MAGNETICHE ANISOTROPE

Calcolo del flusso di rotore

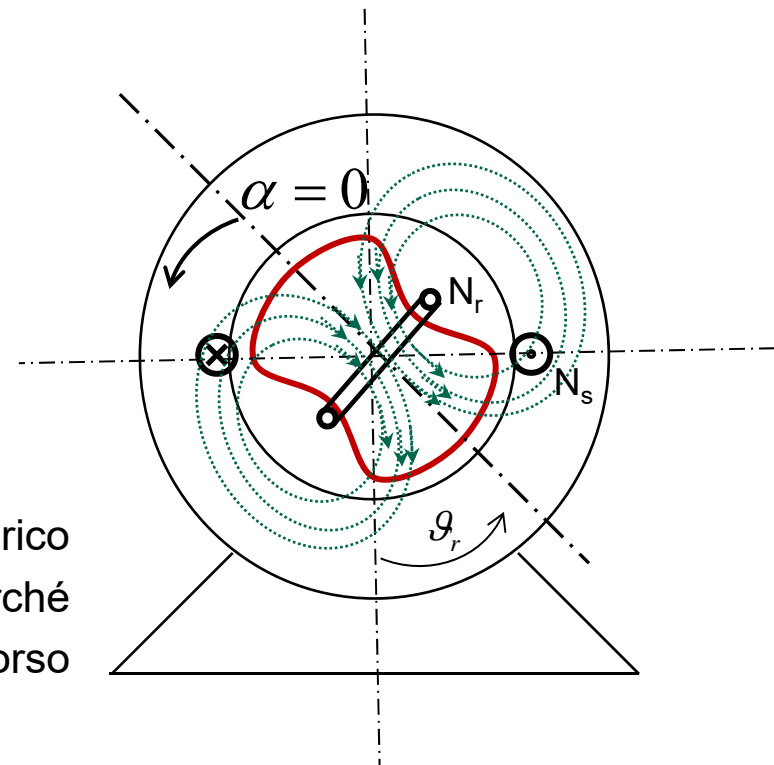
$$\begin{aligned}\Phi_{rr} &= \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} B_{\delta}(\alpha) R l d\alpha = \\ &= \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} B_M \cos \alpha R l d\alpha = 2 B_M R l\end{aligned}$$

Valore costante, indipendente dall'angolo di rotazione

Calcolo del flusso di statore

Il flusso che attraversa l'avvolgimento statorico dipende dalla posizione angolare del rotore, perché quest'ultima modifica il circuito magnetico percorso dalle linee di flusso

$$\Phi_{ss} = \Phi_{ss}(\vartheta_r)$$



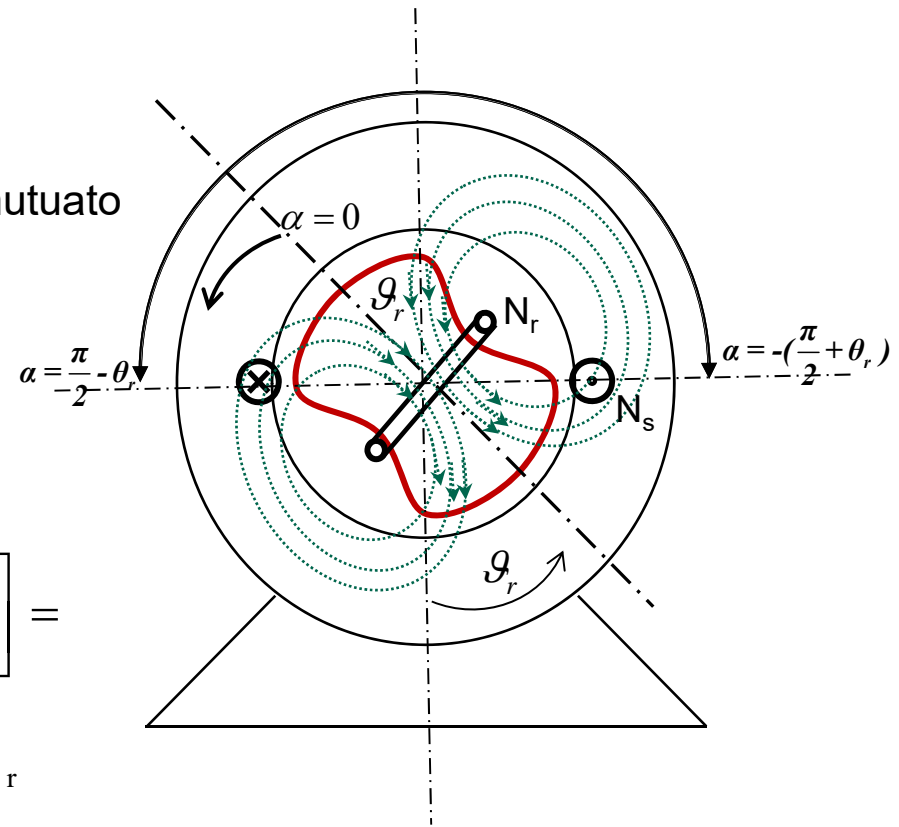
AVVOLGIMENTI CONCENTRATI CON STRUTTURE MAGNETICHE ANISOTROPE

Calcolo del flusso di rotore mutuo con lo statore

Il flusso prodotto dall'avvolgimento di rotore e mutuato dallo statore dipende dalla posizione angolare

$$\begin{aligned}\Phi_{sr} &= \int_{-(\frac{\pi}{2}+\theta_r)}^{(\frac{\pi}{2}-\theta_r)} B_M \cos \alpha R l d\alpha = \\ &= B_M R l \cdot \left[\sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta_r\right) + \sin\left(\frac{\pi}{2} + \theta_r\right) \right] = \\ &= 2B_M R l \cos \theta_r = 2\mu_0 \frac{N_r i_r}{2\delta_M} R l \cos \theta_r\end{aligned}$$

La dipendenza del flusso è quindi di tipo cosinusoidale con lo stesso periodo di rotazione



STRUTTURA DI ROTORE ANISOTROPA

CALCOLO DELLE INDUTTANZE:

$$L_s = \frac{\Psi_{ss}}{i_s} = L_s(\theta_r)$$

$$L_r = \frac{\Psi_{rr}}{i_r} = \text{costante rispetto a } \theta_r$$

$$L_{sr} = \frac{\Psi_{sr}}{i_r} = N_s N_r \Lambda_{sr}(\theta_r) = M_M \cos \theta_r$$

$$L_{rs} = L_{sr} = M_M \cos \theta_r$$

STRUTTURA DI ROTORE ANISOTROPA

CALCOLO DELLE INDUTTANZE:

Si verifica che la variazione dell'induttanza rotorica, in presenza della struttura simmetrica mostrata ha una frequenza doppia rispetto alla velocità di rotore, perché per ogni rotazione completa del rotore si ripresenta due volte la stessa configurazione del circuito magnetico. Si può esprimere tale variazione come segue

$$L_s(\theta_r) = L_{s1} + L_{s2} \cos 2\theta_r$$

AVVOLGIMENTI CONCENTRATI CON STRUTTURE MAGNETICHE ISOTROPE

OSSERVAZIONI:

- con traferro variabile, la distribuzione spaziale di f.m.m. al traferro è rettangolare, mentre la distribuzione spaziale dell'induzione B_δ dipende dalla legge di variazione del traferro (vedi Figura 7).

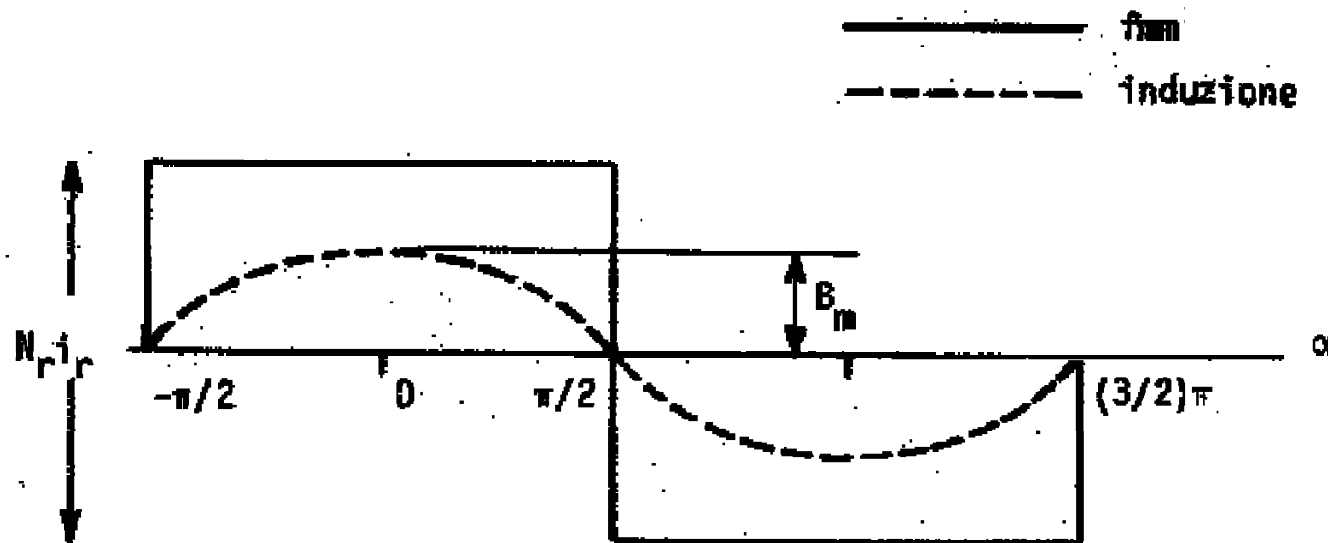


Figura 7

STRUTTURA DI STATORE ANISOTROPA

CASO 2:

- 1 avvolgimento di N_s spire sullo statore
- 1 avvolgimento di N_r spire sullo rotore
- **Struttura di statore anisotropa con $\mu_r = \infty$**
- **Struttura di rotore isotropa (cilindrica) con $\mu_r = \infty$**
- Traferro variabile

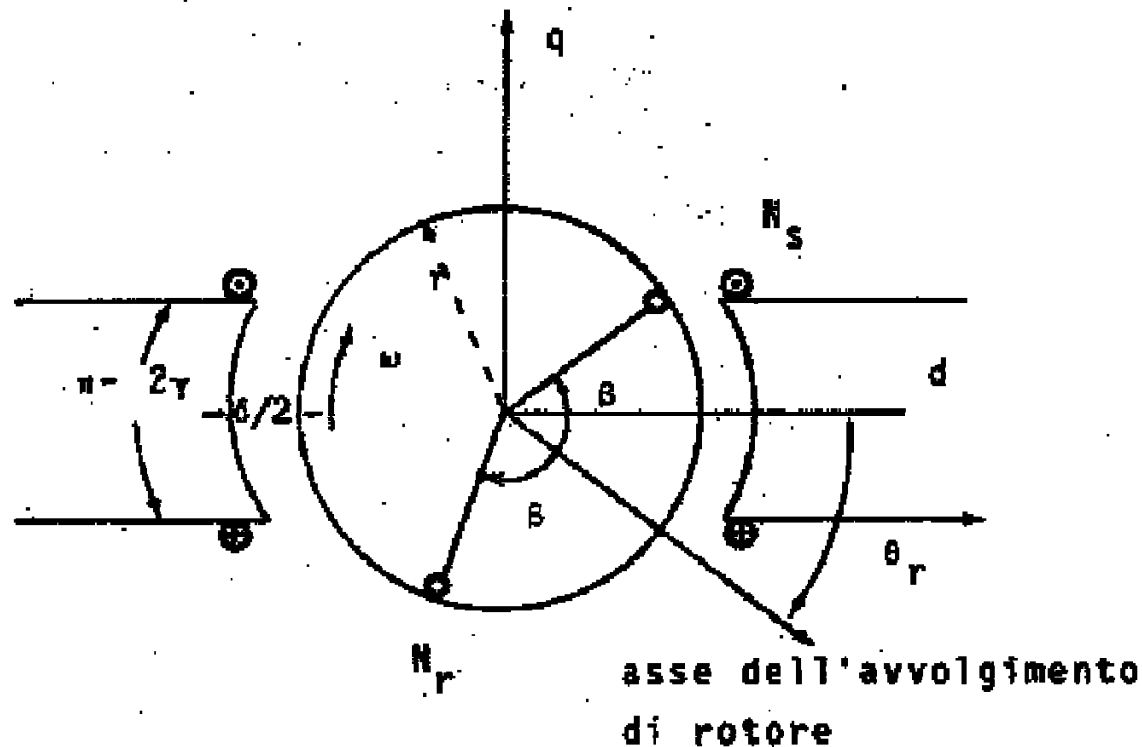


Figura 8

STRUTTURA DI STATORE ANISOTROPA

CALCOLO DELLE INDUTTANZE:

$$L_s = \frac{\Psi_{ss}}{i_s} = \text{costante rispetto a } \theta_r$$

$$L_{sr} = \frac{\Psi_{sr}}{i_r} = L_{rs} = M_m \cos \theta_r$$

$$L_r = \frac{\Psi_{rr}}{i_r} = L_r(\theta_r)$$

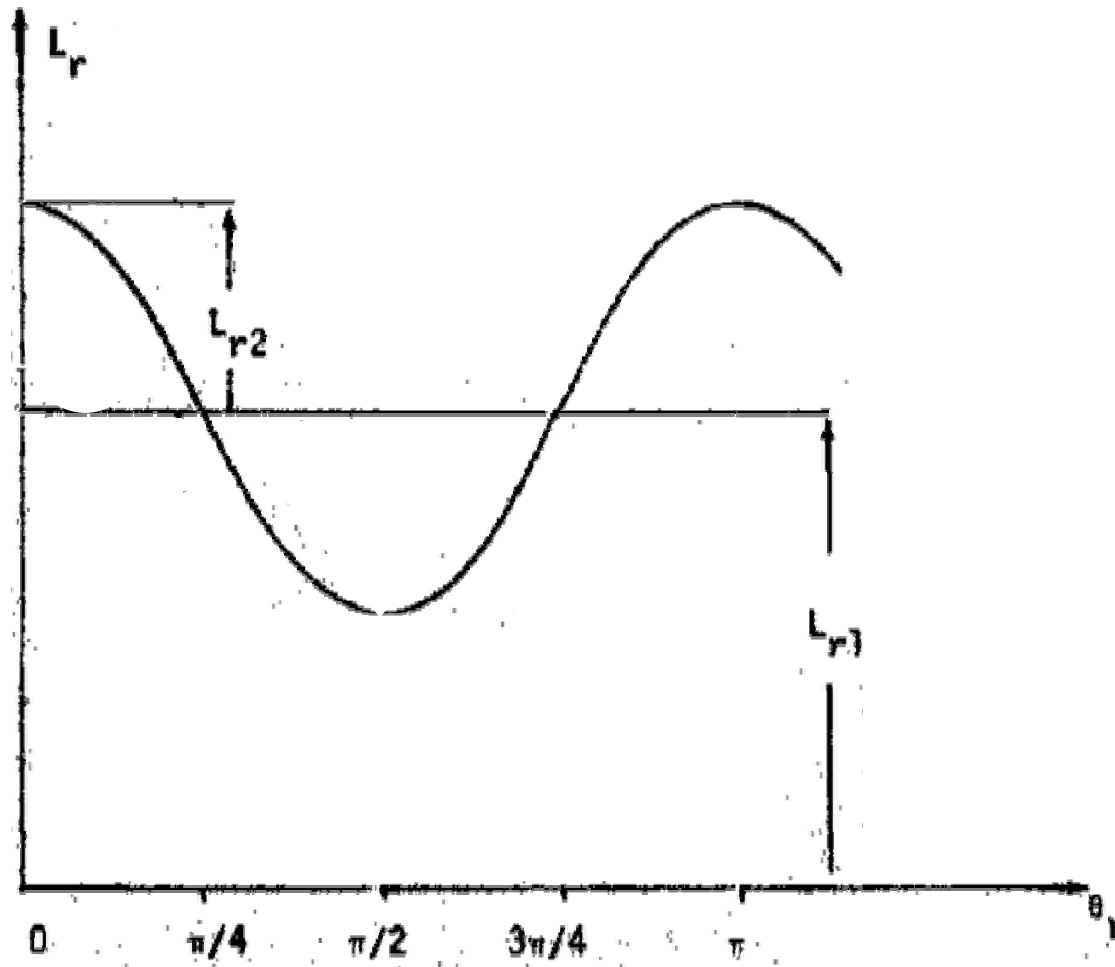
STRUTTURA DI STATORE ANISOTROPA

CALCOLO DELLE INDUTTANZE:

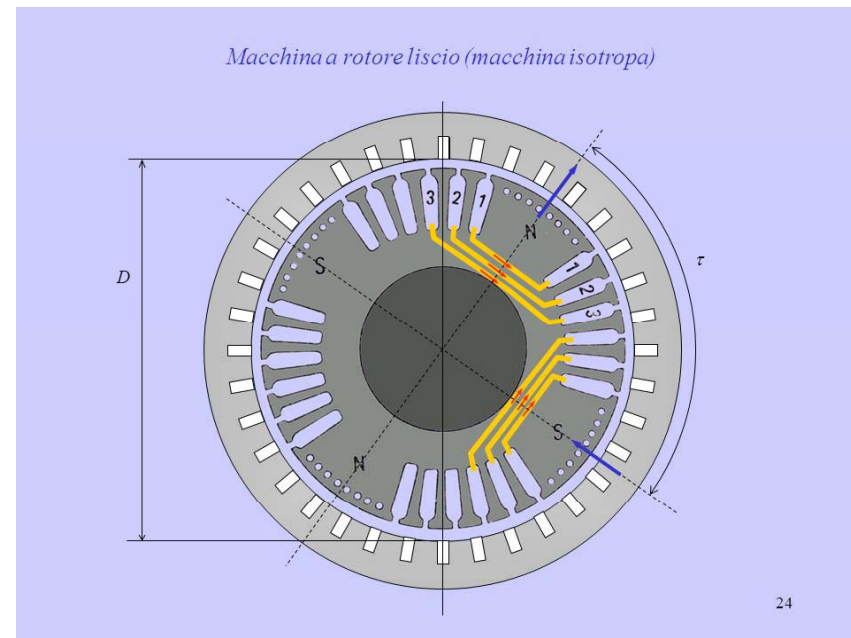
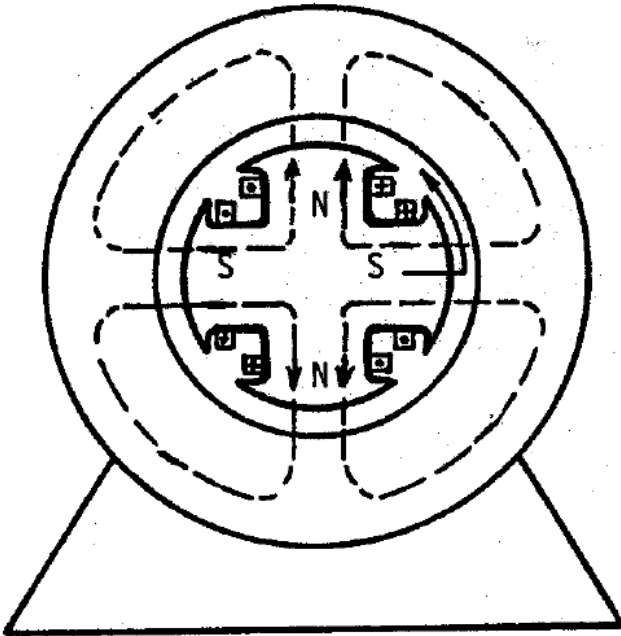
Si verifica che la variazione dell'induttanza rotorica, in presenza della struttura simmetrica mostrata ha una frequenza doppia rispetto alla velocità di rotore, perché per ogni rotazione completa del rotore si ripresenta due volte la stessa configurazione del circuito magnetico

$$L_r(\theta_r) = L_{r1} + L_{r2} \cos 2\theta_r$$

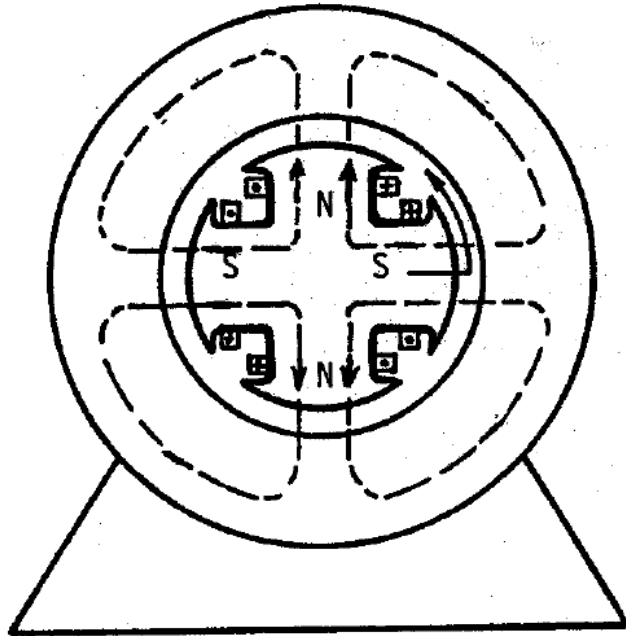
STRUTTURA DI STATORE ANISOTROPA



STRUTTURE MAGNETICHE A DUE E PIÙ POLARITÀ



STRUTTURE MAGNETICHE A DUE E PIÙ POLARITÀ



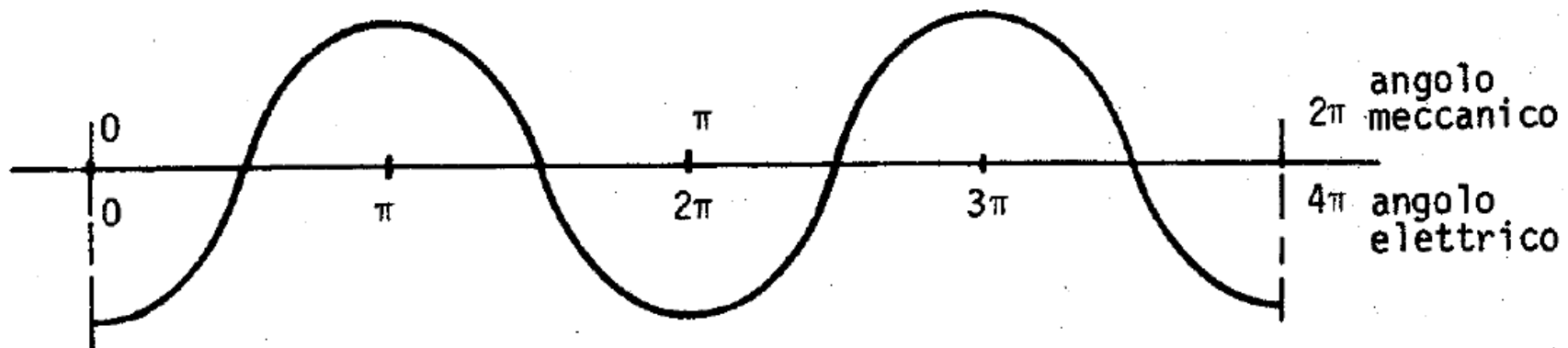
θ_r angolo elettrico

θ_m angolo meccanico

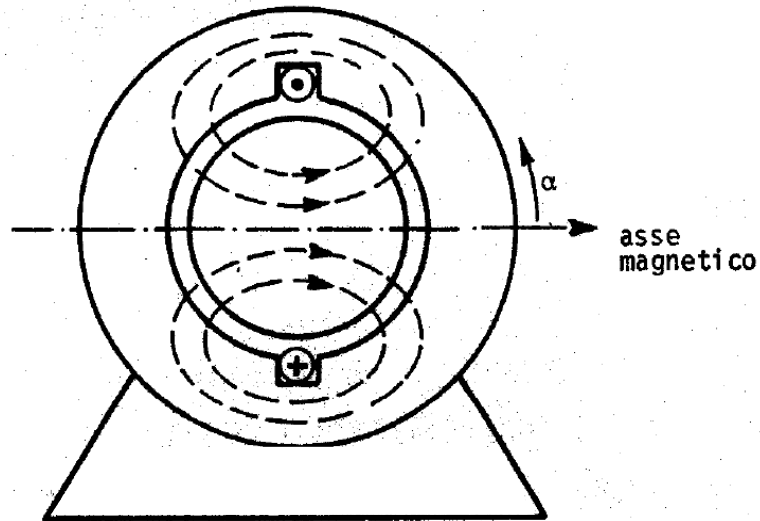
$$\theta_r = (\text{paia poli}) \times \theta_m$$

$$\omega_r = (\text{paia poli}) \times \omega_m$$

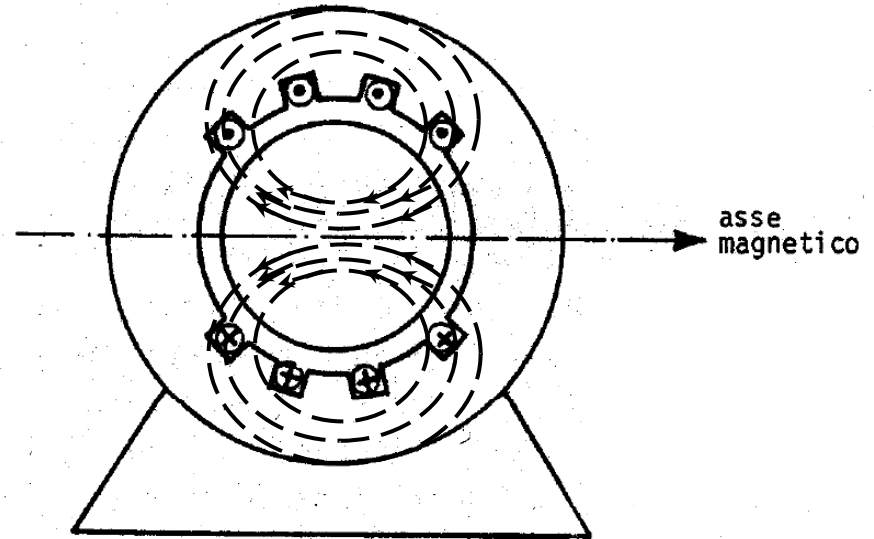
DISTRIBUZIONE DELL'INDUZIONE IN UNA MACCHINA A 4 POLI



AVVOLGIMENTI DISTRIBUITI – SISTEMA ELEMENTARE A PIÙ CAVE



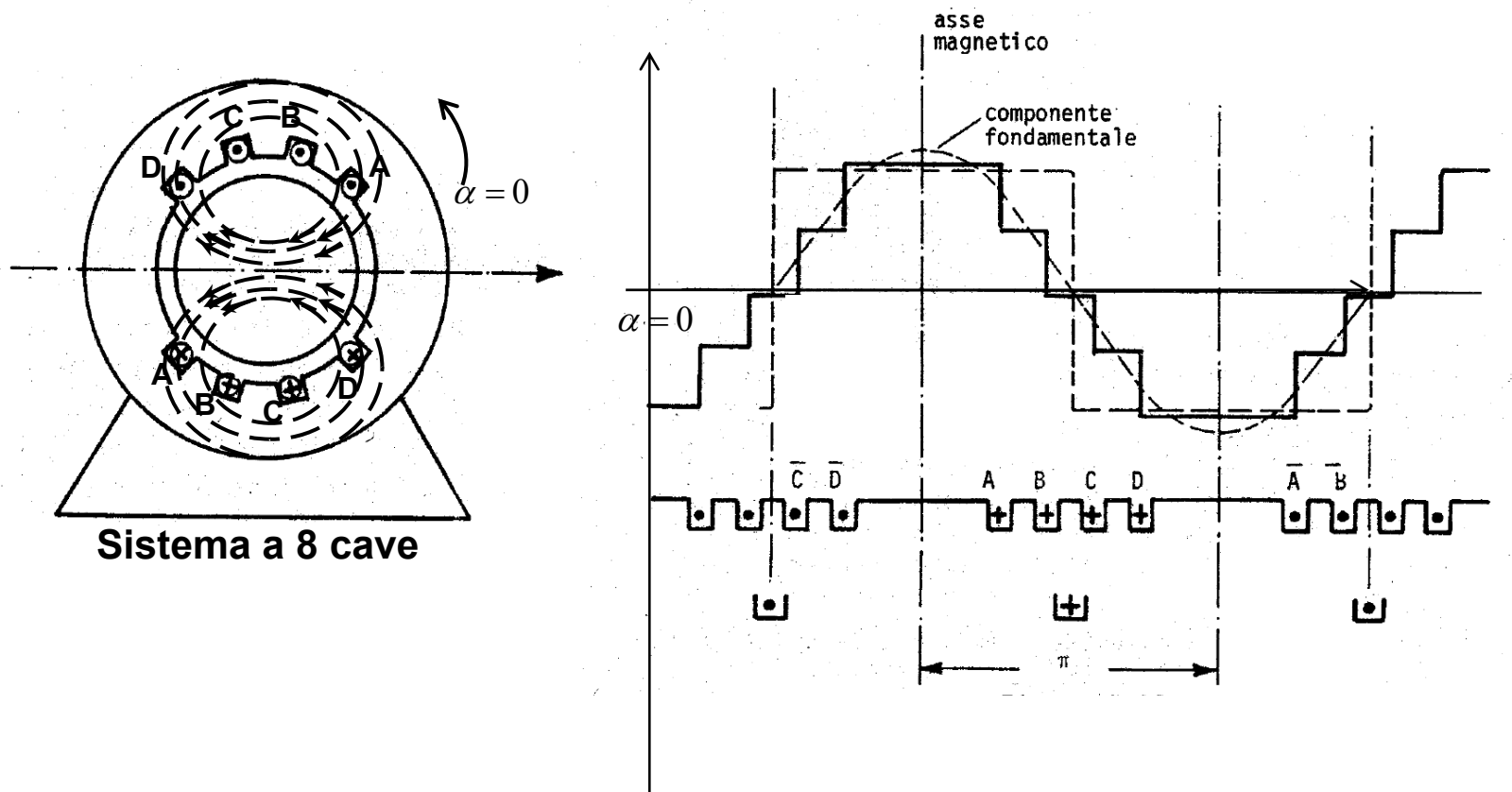
Sistema a 2 cave



Sistema a 8 cave

AVVOLGIMENTI DISTRIBUITI – SISTEMA ELEMENTARE A PIÙ CAVE

Distribuzione di fmm e dell'induzione per sistema a 8 cave (isotropo)



Numero di conduttori per cava: $2 n_c$
 Corrente nel singolo conduttore: i_c

AVVOLGIMENTI DISTRIBUITI – SISTEMA ELEMENTARE A PIÙ CAVE

Distribuzione di fmm e dell'induzione per sistema a 8 cave (isotropo)

Ogni coppia di cave (A-A, B-B, ecc) sostiene una fmm totale pari a $2 n_c i_c$ con andamento rettangolare e massimo sull'asse della bobina A-A (componente fondamentale $4/\pi n_c i_c$)

La distribuzione di fmm complessiva è simmetrica rispetto all'asse dell'avvolgimento (max) e si annulla in corrispondenza dell'asse mediano delle cave

La distribuzione si presenta con una forma a gradini crescenti e decrescenti con incrementi positivi o negativi pari a $2 n_c i_c$

La componente fondamentale F_1 della fmm totale è inferiore a quella della fmm di un sistema a 2 cave con numero equivalente di conduttori per cava ($8 n_c i_c$)

$$F_1 = \frac{4}{\pi} K_a \frac{N_c i_c}{2} \cos \alpha$$

K_a fattore di distribuzione, che dipende dal numero e distribuzione delle cave (**sempre <1**)

N_c numero equivalente di conduttori pari a $(2 n_c) \times$ (numero di cave/2)

All'aumentare del numero di cave la distribuzione di fmm (e di B nel caso isotropo) tende ad un andamento sinusoidale