

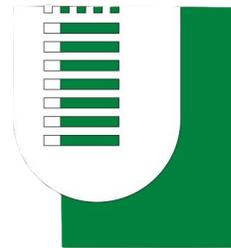
Corso di Elettrotecnica

Prof. Giovanni Costantini

Ing. Valerio Cesarini



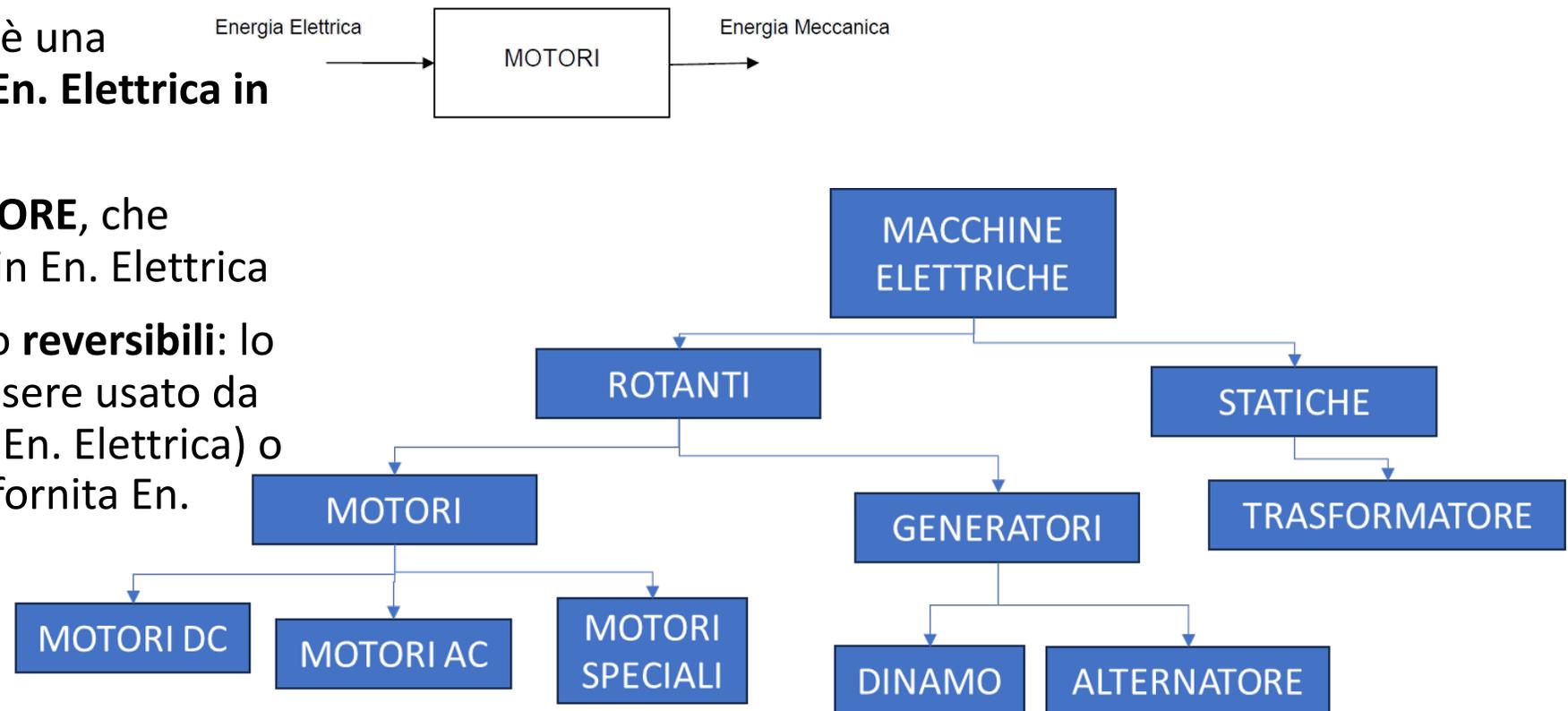
MACCHINE ELETTRICHE IN DC



TOR VERGATA
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI ROMA

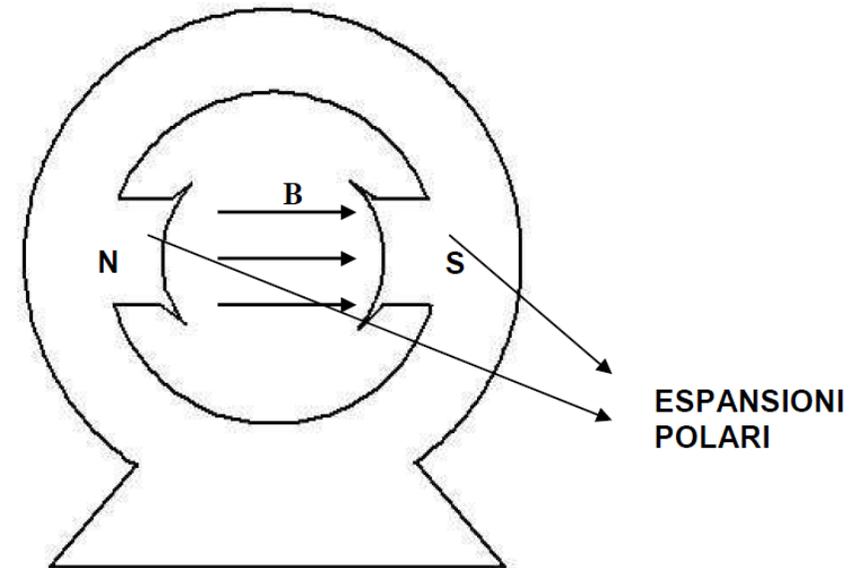
MACCHINE ELETTRICHE

- 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
- Le macchine rotanti sono **reversibili**: lo stesso dispositivo può essere usato da motore (se viene fornita En. Elettrica) o da generatore (se viene fornita En. Meccanica)



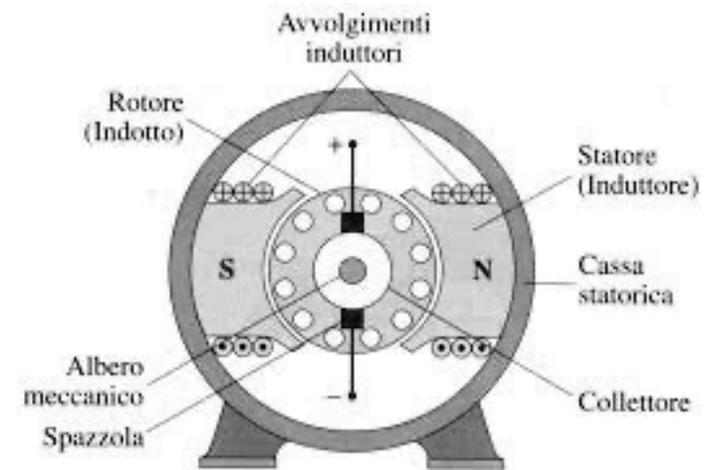
MOTORE IN DC - FUNZIONAMENTO

- Il motore in DC funziona per **induzione magnetica** tramite un campo **B** che fa ruotare un sistema di spire attraversate da corrente
- L'elemento esterno del motore si dice **STATORE**: è un cilindro cavo
- All'interno dello statore, due **POLI** (o espansioni polari) producono un campo magnetico:
 - Tramite **MAGNETI PERMANENTI**
 - Tramite **AVVOLGIMENTI DI ECCITAZIONE** percorsi da corrente



MOTORE IN DC - FUNZIONAMENTO

- Nello spazio interno al rotore (**TRAFERRO**) c'è un elemento rotante detto **ROTORE**
- Il **ROTORE** ruota a causa del campo magnetico ed ospita spire di conduttore attraversate da corrente
- Il conduttore è alimentato tramite un **COLLETTORE**, che è concentrico e solidale al rotore, diviso in contatti mobili detti **LAMELLE**
- **L'ALBERO** del motore è l'elemento meccanico centrale, concentrico e solidale al rotore, dove viene «prelevata» l'En. Meccanica. Non ha ruolo elettrico

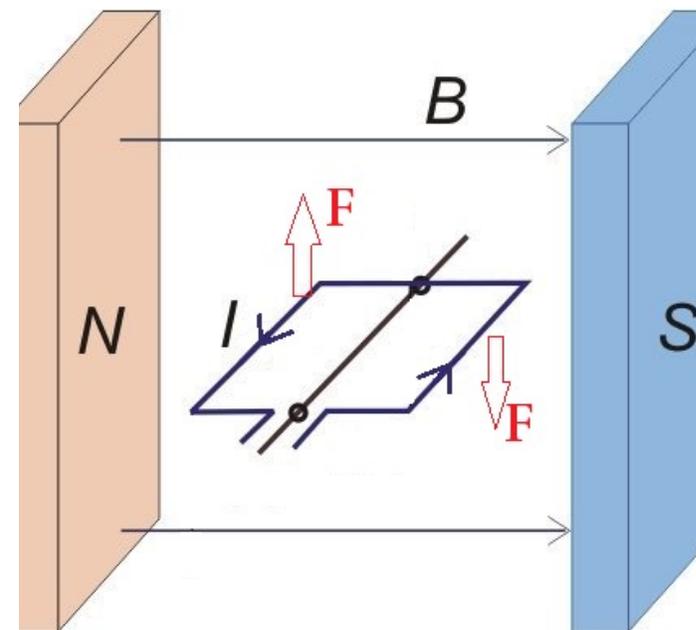


ANELLO DI PACINOTTI - 1

- Un **filo percorso da corrente** immerso in un campo magnetico subisce la Forza di Lorentz, di valore:

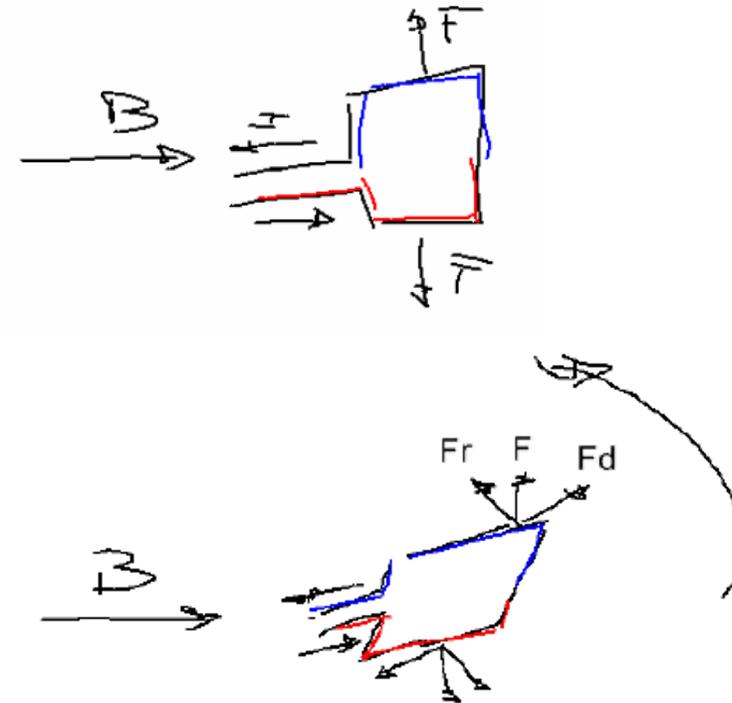
$$F_L = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) = I \int \mathbf{B} \times d\mathbf{r} \rightarrow \mathbf{B} I l * \sin \alpha$$

- Il verso deriva dal prodotto vettoriale fra B e la velocità delle cariche, determinabile con la regola della mano sx. (B = Indice, I = medio, F = pollice).
- Una **spira percorsa da corrente** si può modellizzare come 4 fili. Però, i due lati «corti» sono paralleli al campo e dunque non contribuiscono al prodotto vettoriale
- Quindi **una spira immersa nel campo subisce una doppia forza di Lorentz ai due lati (COPPIA) che la fa ruotare**



ANELLO DI PACINOTTI - 2

- Quando la spira compie un giro di 90° («si mette verticale») allora **le due forze di coppia sono uguali e opposte: la spira starebbe ferma**
- In realtà, continua a girare per inerzia
- Appena supera i 90° , **i versi delle correnti risultano al contrario rispetto all'istante iniziale** (in realtà, le loro componenti sui lati della spira).
- Le forze di coppia risultano con direzione opposta, e **la spira tende a girare al contrario**



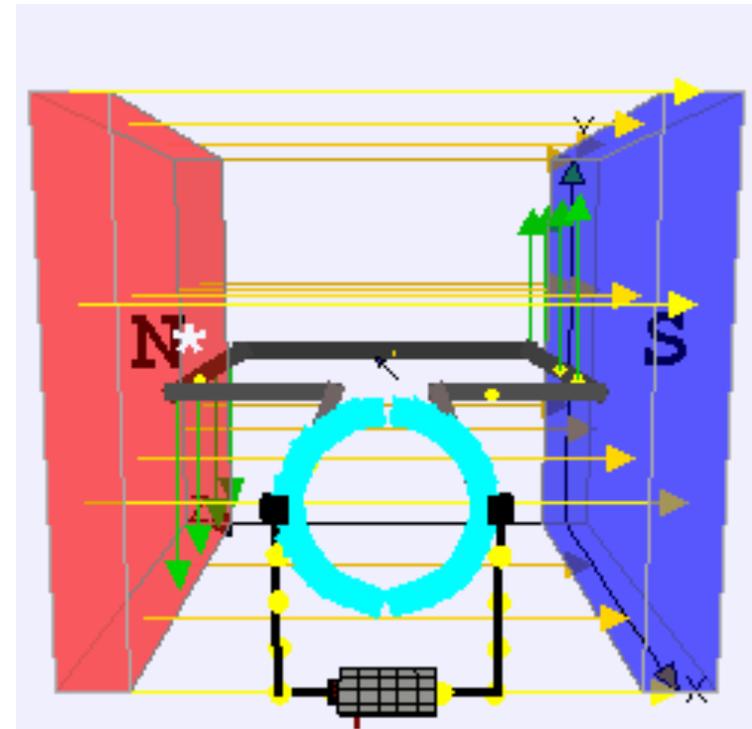
ANELLO DI PACINOTTI - 3

SOLUZIONE:

- Occorre **INVERTIRE IL VERSO DELLA CORRENTE** (commutare) dopo che la spira ha compiuto un giro di 90°
- In questo modo, **la coppia di forze rimane come in origine, garantendo la rotazione nella stessa direzione**
- Dopo altri 90° , si ri-mette verticale e deve essere commutata di nuovo per tornare finalmente allo stato iniziale

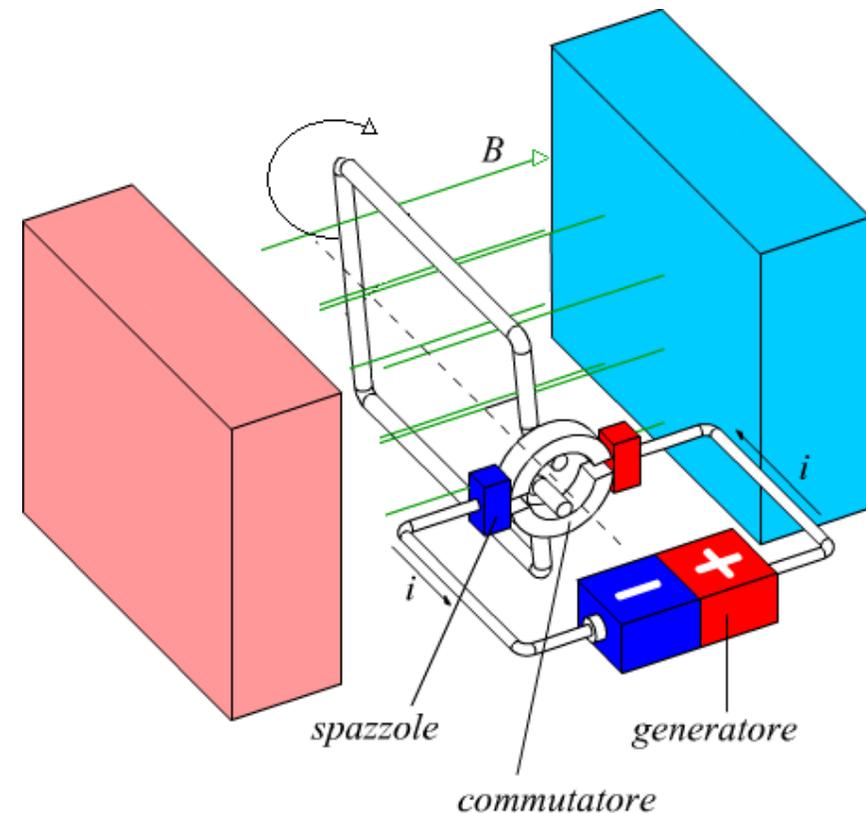
$$Coppia = F_L * 2r = BIl * \text{sena} * 2r$$

«Raggio» della spira (BRACCIO)



ANELLO DI PACINOTTI - 4

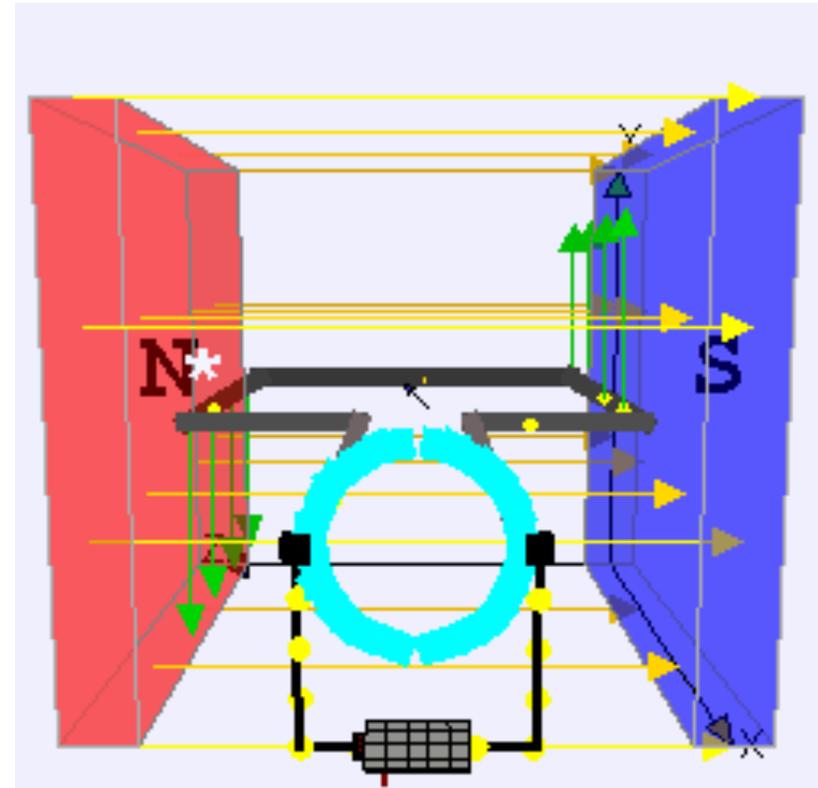
- E' possibile commutare periodicamente il verso della corrente che attraversa la spira lasciando fissi i due contatti di alimentazione e lasciando che la spira vi «giri» dentro
- Contatti a semianello (**LAMELLE**) che possono girare dentro i contatti fissi di alimentazione (**SPAZZOLE**)



ANELLO DI PACINOTTI → MOTORE DC

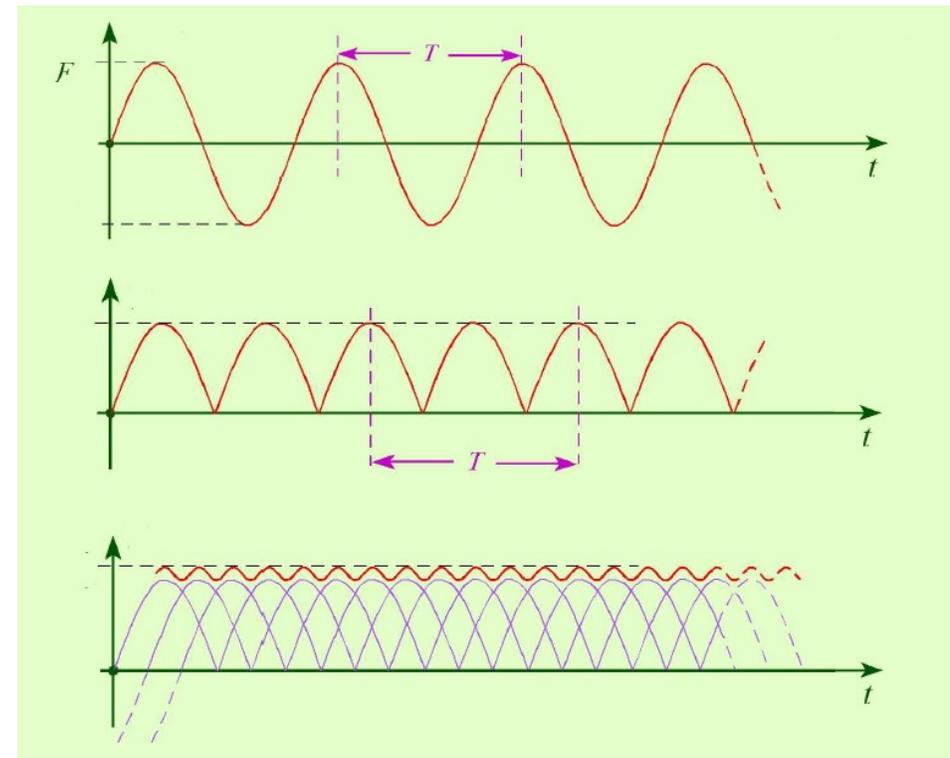
Quindi, il motore DC non è altro che un sistema ad Anello di Pacinotti:

- Lo STATORE genera il campo
- Il ROTORE è rappresentato dalla spira che ruota (in realtà sono molte spire)
- Il COLLETTORE possiede le LAMELLE che sono i contatti girevoli solidali al rotore
- Le SPAZZOLE sono l'alimentazione fissa



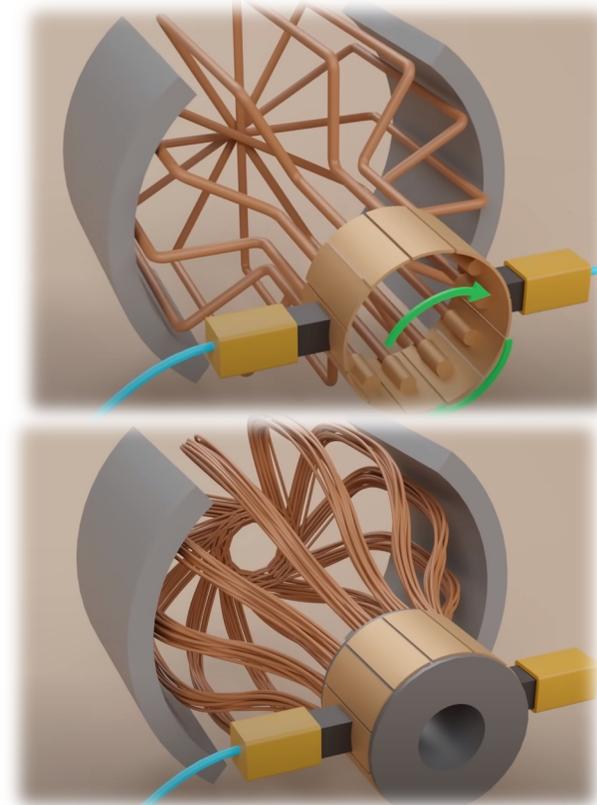
ANELLO DI PACINOTTI - 5

- La Forza dipende dal seno dell'angolo di rotazione $\alpha = \omega t$ (cambia col tempo poiché ruota)
- Dunque, la forza subita dalla spira è sinusoidale
- Un anello di Pacinotti che commuta ogni 90° ($= T/2$) funziona come un **raddrizzatore**: inverte la semionda negativa
- Se si mettono **molte spire sfasate** è possibile correggere l'andamento «pulsante» fino a raggiungere quasi una rotazione continua



ANELLO DI PACINOTTI - 6

- Uso tante spire per compensare l'andamento sinusoidale: ogni spira avrà la sua coppia di contatti girevoli (**LAMELLE DI COLLETTORE**)
- Lo «sfasamento» delle spire è puramente fisico, in modo da avere diversi angoli e dunque stare su punti diversi della sinusoide
- Per avere più coppia, alla spira si sostituisce una **MATASSA** → ci saranno tanti fili percorsi dalla stessa corrente → più Forza di Lorentz



ANELLO DI PACINOTTI - 7

- Le SPAZZOLE devono commutare ogni 90° rispetto alla singola spira. Anche se ci sono molte spire vicine, **le spazzole danno l'alimentazione in due punti fissi che fanno commutare una spira per volta quando serve.**
- Però, è necessario **che l'intero sistema di spire sia percorso da corrente: l'alimentazione deve arrivare sempre a tutto il rame**



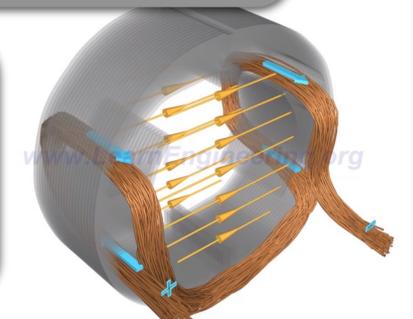
Ogni spira ha i suoi personali contatti girevoli (LAMELLE). Dato che il sistema gira, una spira per volta è attaccata all'alimentazione.



L'intero sistema di spire è fatto con un unico filo, in cui scorre corrente quando è alimentato

La singola spira alimentata (lamelle in concomitanza con le spazzole) «passa» la corrente in tutto il sistema, dato che è fatto da un solo filo.

Grazie all'alimentazione «girevole» che passa da una spira per volta (quella posizionata in maniera «giusta»), è garantito che i versi delle correnti siano tali da garantire la rotazione secondo l'Anello di Pacinotti.



DINAMO

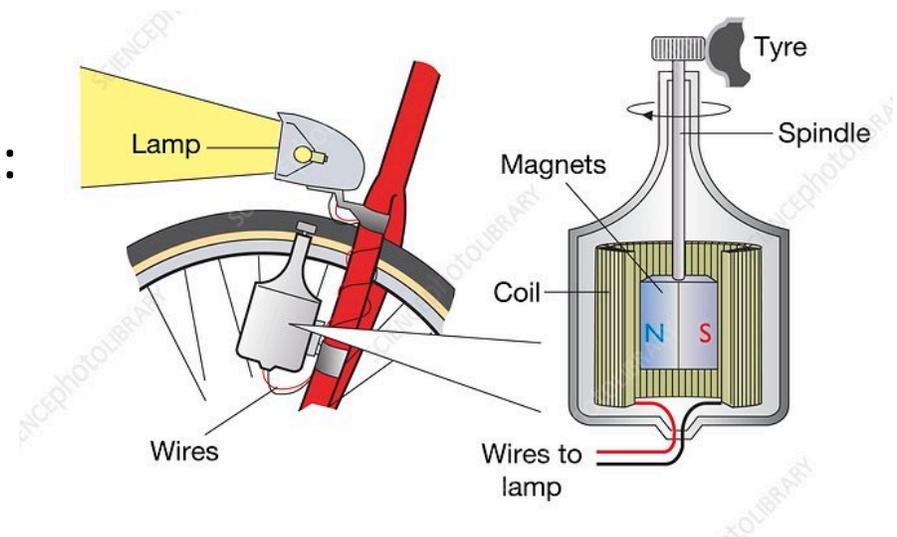
- E' la **macchina inversa di un motore DC** ad anello di Pacinotti: **la spira è messa in rotazione da En. Meccanica**, e si preleva l'En. Elettrica

- Un conduttore in movimento genera **FEM INDOTTA**:

$$\text{Flusso } \phi = \mathbf{B} \cdot \mathbf{S} \rightarrow BS \cos \alpha = BS \cdot \cos(\omega t)$$

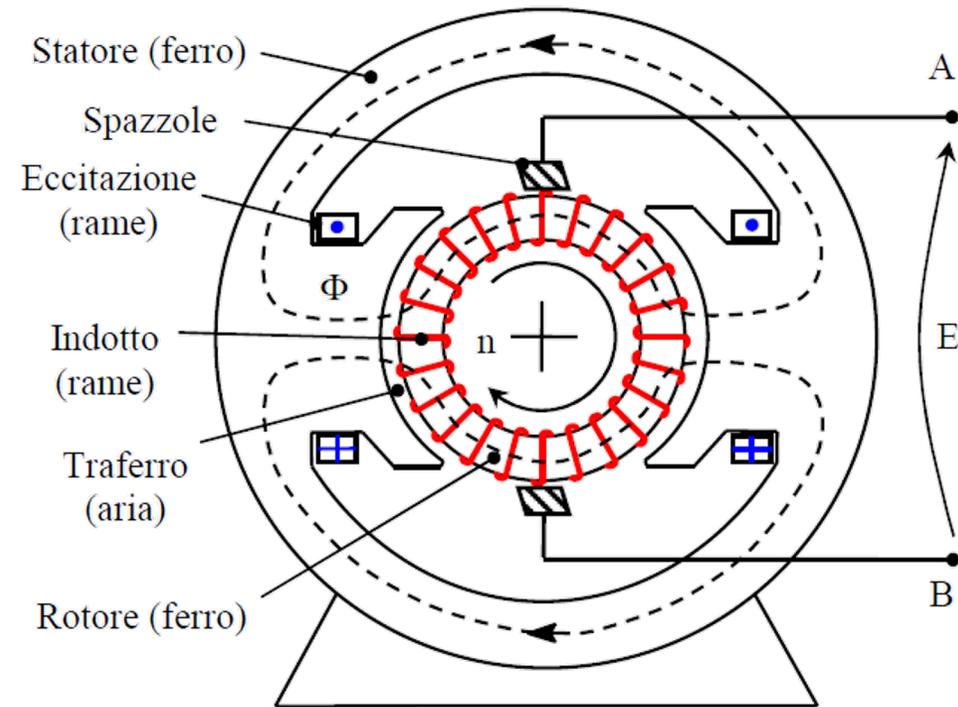
$$FEM = -\frac{d\phi}{dt} = B\omega S \cdot \sin(\omega t)$$

- La FEM è sinusoidale come era la forza nel motore
- Es: dinamo di una bicicletta, alimentata dalla rotazione della ruota



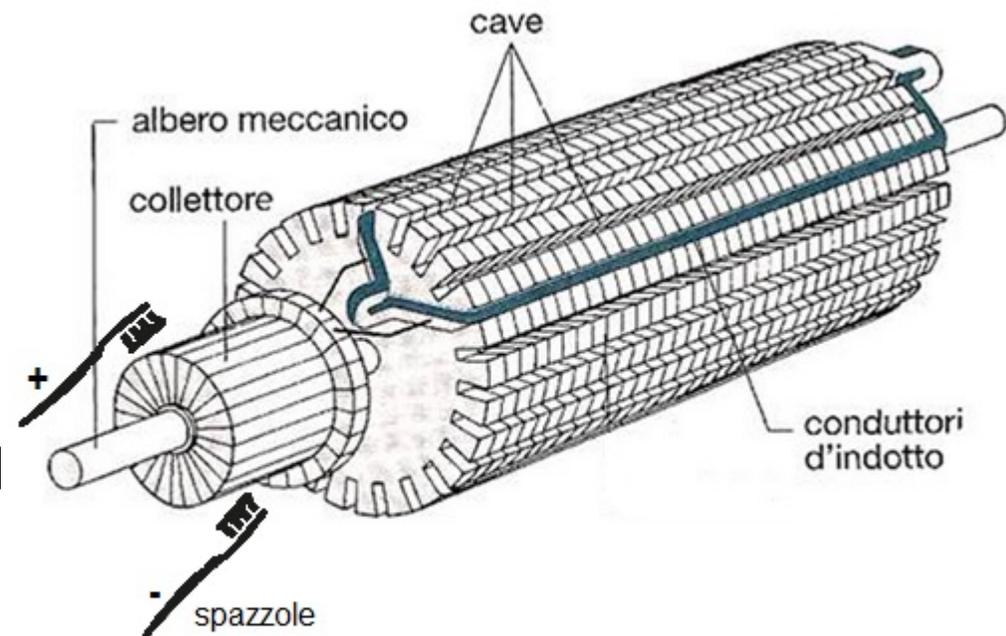
MOTORE IN DC

- **STATORE** = Cilindro cavo che contiene gli elementi rotanti
 - **AVVOLGIMENTI DI ECCITAZIONE** = Avvolgimenti sui poli che generano il campo
- **ROTORE** = Elemento girevole dentro allo statore
 - **INDOTTO** = Avvolgimenti del rotore (anello di Pacinotti)
- **TRAFERRO** = Spazio vuoto fra statore e rotore
- **SPAZZOLE** = Contatti elettrici di alimentazione fissi, dentro cui gira il rotore



ROTORE – COLLETTORE – SPAZZOLE

- Il **ROTORE** è l'elemento girevole che contiene le spire (**INDOTTO**)
- **COLLETTORE** = Elemento concentrico e solidale al rotore che dà corrente alle sue spire. E' diviso in **LAMELLE** conduttive isolate fra loro, ciascuna collegata ad un avvolgimento di rotore.
- **SPAZZOLE** = Terminali fissi di alimentazione. Il collettore vi gira dentro permettendo la commutazione delle lamelle, che alimentano gli avvolgimenti di rotore.



CAMPO RISULTANTE

- Un filo percorso da corrente «si muove» (subisce la Forza di Lorentz) ma **genera anche un campo magnetico (legge di Biot-Savart)**
- Anche se il suo movimento è senza dubbio rotazionale, **il rotore produce un campo magnetico (costante)**
- Il campo risultante nel motore deriva dal contributo di statore e di rotore

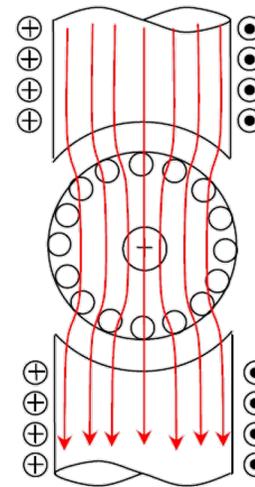


Figura 4.a
CAMPO INDUTTORE

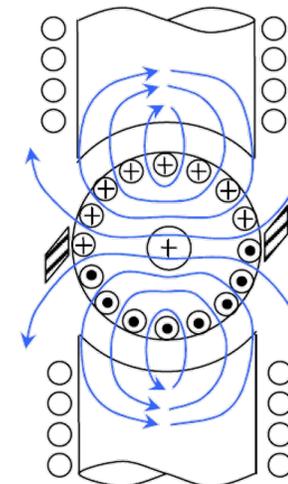


Figura 4.b
CAMPO INDOTTO

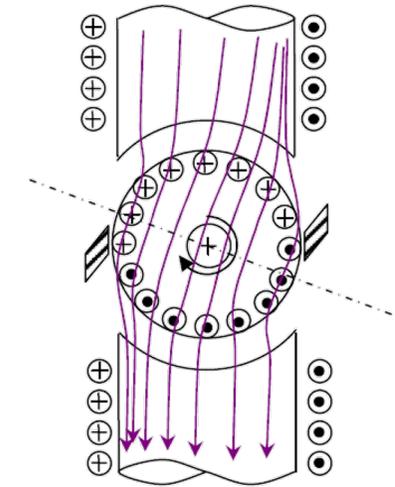
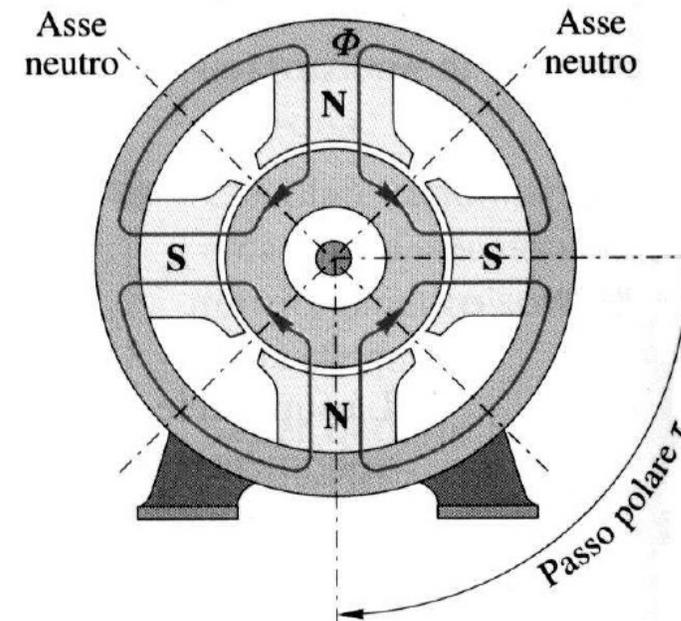


Figura 4.c
CAMPO RISULTANTE

POLI NEL MOTORE DC

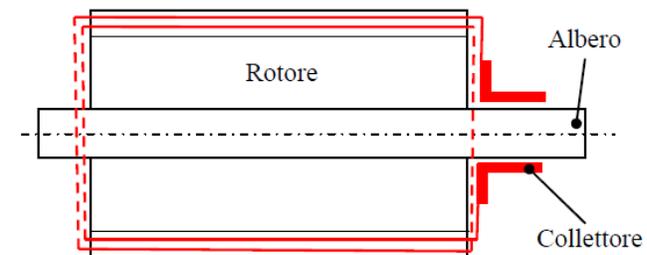
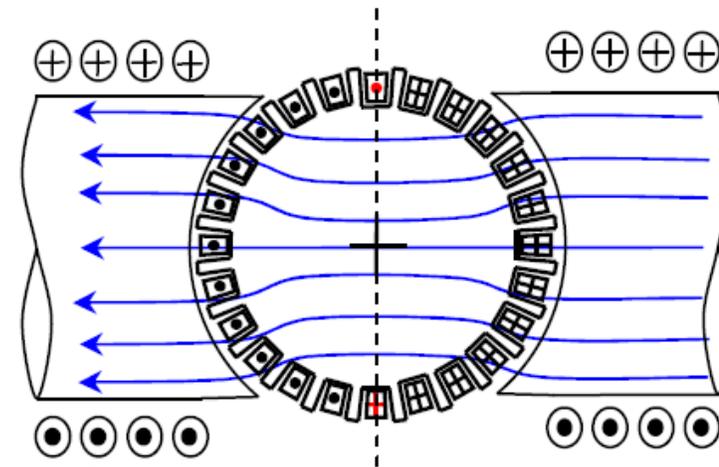
- **Si possono avere più di due poli:**
 - Aumenta la coppia aumentando le interazioni fra rotore e statore
 - La rotazione è più continua (smooth)
 - Maggiore efficienza in termini di sfruttamento del campo magnetico
 - Maggiore controllabilità
- **PASSO POLARE** = Distanza angolare fra un polo e quello adiacente di senso opposto



Esempio di motore CC a 4 poli

INDOTTO DI ROTORE

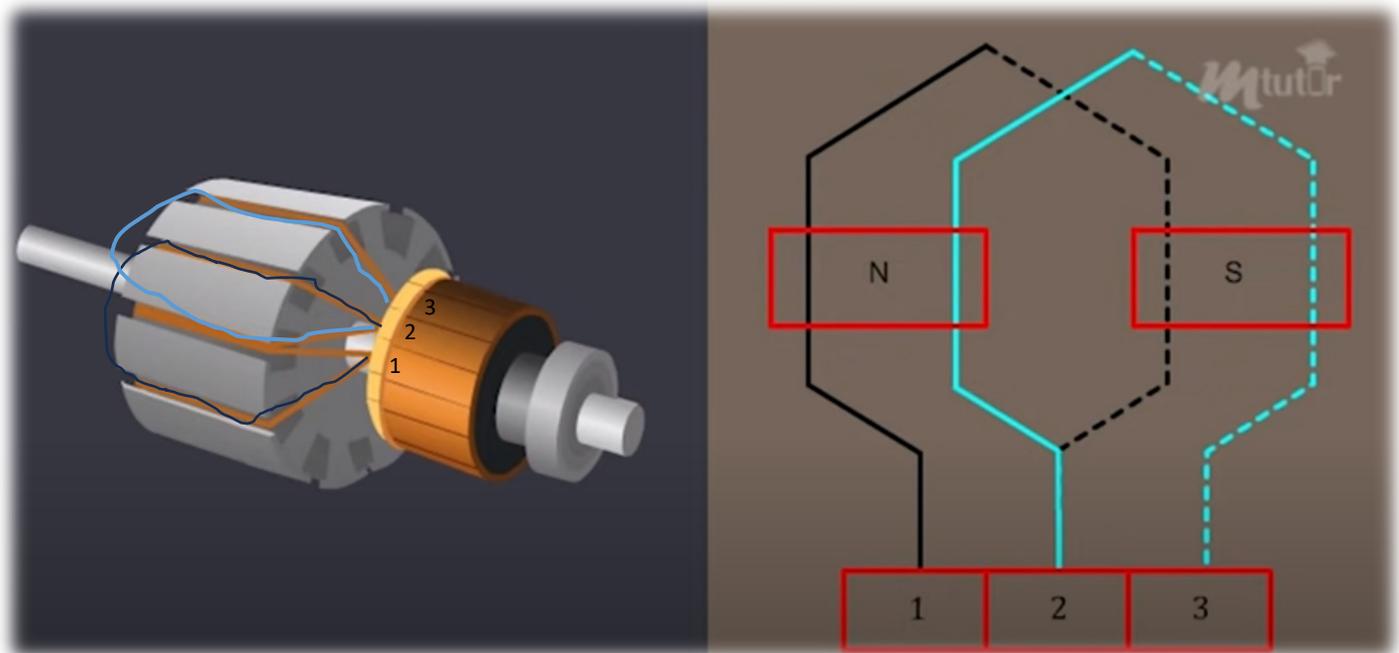
- **INDOTTO AD ANELLO:** un solo conduttore realizza molte spire attorno ad un anello
 - E' logisticamente difficile l'avvolgimento
 - Le spire devono essere isolate tra loro ma NON rispetto alle spazzole
- **INDOTTO A TAMBURO:** Spire avvolte attorno a intercapedini (**CAVE**) attorno al corpo del rotore. E' quello che viene usato normalmente (cfr. immagine)



Indotto a tamburo: vista dall'alto e sezione.

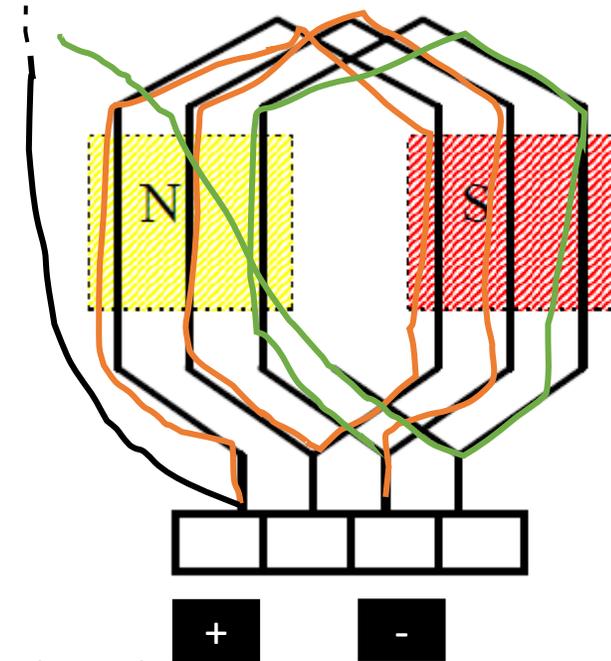
AVVOLGIMENTO EMBRICATO (parallelo)

- Una spira è formata da un filo che occupa due lamelle adiacenti
- Dalla «fine» della spira, si forma un'altra spira che terminerà nella lamella ancora adiacente
- Dunque, è come avere molte spire in parallelo, ciascuna «centrata» su una lamella successiva



AVVOLGIMENTO EMBRICATO (parallelo) - 2

- Le SPAZZOLE alimentano in concomitanza coi poli magnetici, e sono a **un passo polare di distanza** l'una dall'altra
- Un circuito di alimentazione chiuso (arancione), si ottiene osservando il percorso da una spazzola (+) all'altra (-)
- Partendo invece dalla spazzola (-) a ritroso fino alla (+), si delinea un altro percorso (verde)
- Entrambi i lati sono collegati alla stessa tensione, e sono quindi in parallelo
- Nell'avvolgimento embricato, **il numero di percorsi in parallelo è uguale al numero di poli**

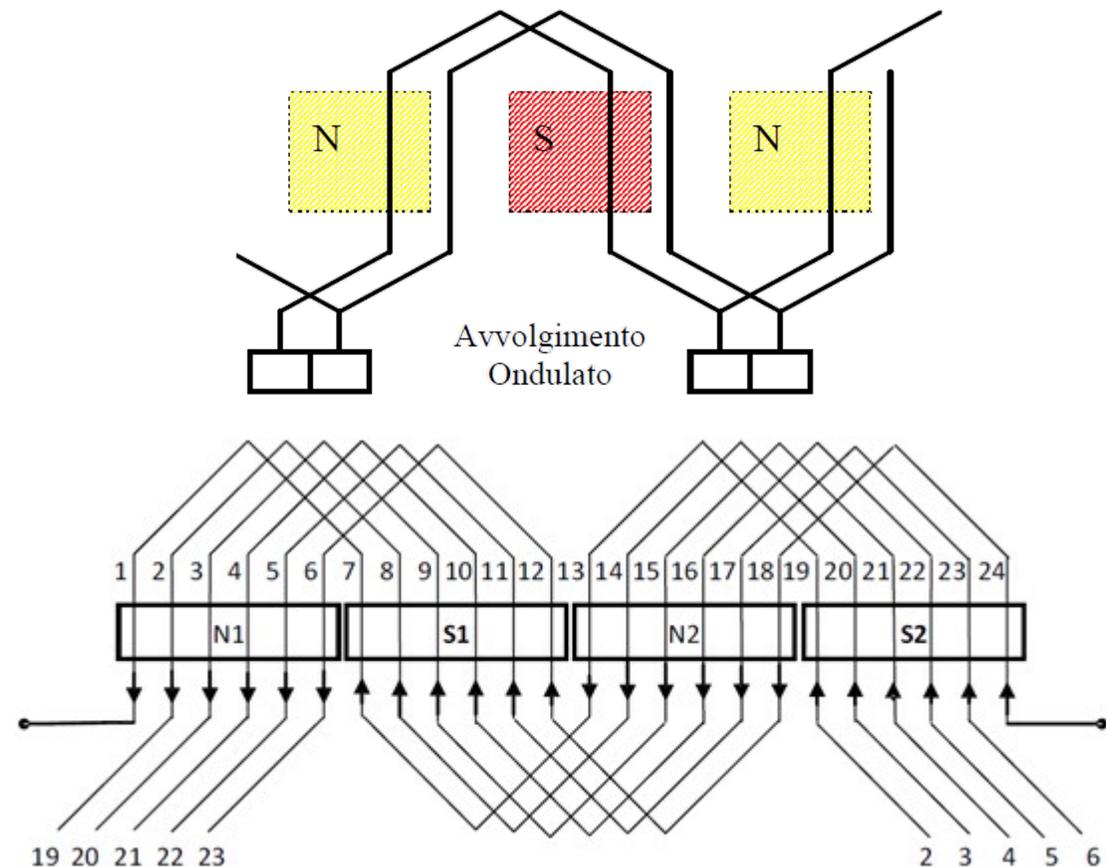


NB = Ricorda che è un flattening di una circonferenza (rotore).

Inoltre, è tutto composto dallo stesso filo, quindi la prima spira avrà un' origine (filo in nero che viene «da qualche parte») a cui si connette la fine dell' «ultima» spira.

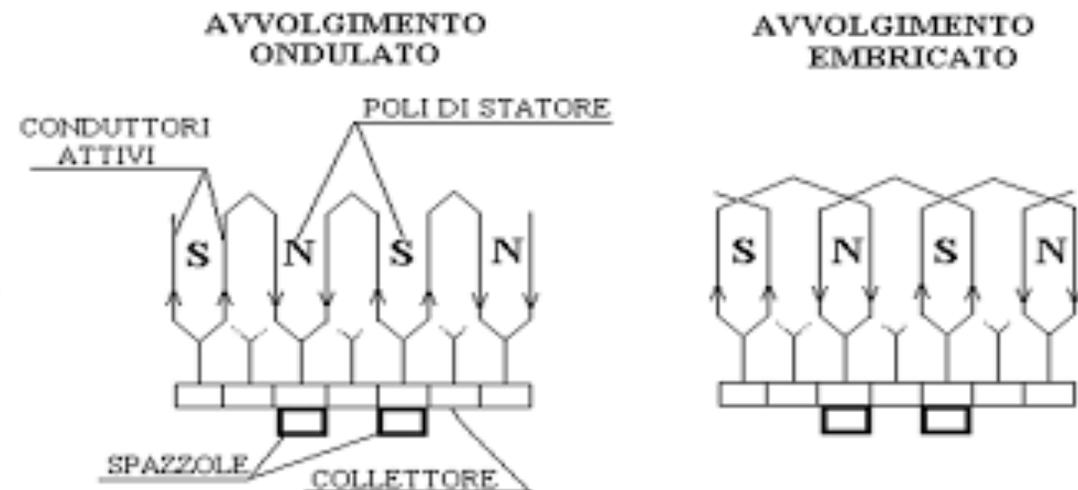
AVVOLGIMENTO ONDULATO (serie)

- Ha più senso parlarne con più di 2 poli
- Infatti, la fine della prima spira viene collegata su una lamella in corrispondenza di un'altra coppia polare
- Questo genera un percorso progressivo (serie)
- A prescindere dal n° di poli, ci saranno solo due percorsi paralleli (quello d'andata e quello di ritorno) dalle spazzole



AVVOLGIMENTI VS POLI

- Se c'è più di una coppia polare, occorre alimentare in maniera corretta porzioni di circuito, a seconda della coppia polare sotto cui si trova
- Il circuito che riceve l'alimentazione (e dunque passa la corrente) si dice **circuito attivo**. Ce n'è uno per ogni coppia di poli.
- **EMBRICATO**: I percorsi sono tutti paralleli e geograficamente vicini. Se c'è un'altra coppia polare, servono altre due spazzole per alimentare l'insieme di spire ad essa sottostanti. Quindi, c'è un **n° di spazzole pari al n° di poli**.
- **ONDULATO**: Con lo scorrere del collettore, le spazzole alimentano progressivamente una diversa porzione di spire (seriali), relativa ad una diversa coppia polare. Quindi, bastano **due spazzole a prescindere dal n° di poli**.



Esempio di avvolgimenti su motore a **4 poli**

AVVOLGIMENTI VS MOTORE

Avvolgimento embricato

n. poli	p
n. spazzole	p
n. vie interne ($2a$)	p
n. lati per via interna	$(\text{n. lati totali})/p$
Tensione totale = quella che si ha su $1/p$ conduttori	
Corrente totale = p volte quella che percorre i conduttori	

- Necessario per applicazioni ad **alte correnti**.
- Produce meno FEM (circuiti in parallelo).
- Permette quindi di **controllare in maniera molto precisa la coppia**, girando a v quasi costante
- Utile per: applicazioni a vel. Costante che non cambia col carico (montacarichi, nastri trasportatori)

Avvolgimento ondulato

n. poli	p
n. spazzole	2
n. vie interne ($2a$)	2
n. lati per via interna	$(\text{n. lati totali})/2$
Tensione totale = quella che si ha su $1/2$ conduttori	
Corrente totale = 2 volte quella che percorre i conduttori	

- Necessario per applicazioni ad **alte tensioni**
- A prescindere dal n° di poli, è sempre tutto alimentato: tutta la corrente passa al campo e la coppia raggiunta è maggiore
- **Arriva a velocità più elevate, ma meno stabili**
- Utile per: piccoli utensili elettrici, macchine per cucire

MOTORE BRUSHLESS

- In un motore a spazzole, esse sono **in grafite**: conduttore morbido che permette la rotazione di parti dure al suo interno. Per definizione, **le SPAZZOLE sono la parte più soggetta ad usura**
- **Il motore BRUSHLESS non ha spazzole**: la commutazione viene effettuata tramite un circuito elettronico
- **Il ROTORE è costruito con MAGNETI PERMANENTI**, in questo caso: non può essere commutato
- **Viene commutata la corrente negli avvolgimenti di STATORE**
- Un **SENSORE** (ad effetto Hall) legge la posizione del rotore, ed un **MICROCONTROLLORE** inverte la corrente

PRO

- Vita attesa molto più lunga (poca usura)
- Massimo rendimento (0.98)
- Coppie molto elevate

CONTRO

- Costo costruttivo maggiore
- Coppia incostante, dato che si commuta il campo induttore (e non dell'indotto) che è meno stabile

MOTORE PASSO-PASSO (STEP)

- E' un motore brushless progettato per effettuare solo piccoli passi di rotazione, e poi fermarsi fino a nuovo avviamento
- L'intero giro del motore viene diviso in un numero di «passi» (**RISOLUZIONE**). Rotore e statore hanno dei dentini che evidenziano questi passi.
- Il fatto di effettuare solo una rotazione parziale di ampiezza nota viene realizzando **controllando elettronicamente l'alimentazione**, che verrà data solo in un certo lasso di tempo , garantendo FEM indotte e dunque coppia necessaria a fare uno step predefinito.
- Si possono anche effettuare dei **microstep** controllando in maniera più precisa la corrente negli avvolgimenti. Muoversi a microstep permette di raggiungere posizioni intermedie ma anche di avere in generale un giro più fluido.
- **Usati per:** stampanti e stampanti 3D, macchine CNC, controllo di componenti in automotive (es. specchietti), droni e controllo di posizione (es. telescopi).