

# LE MACCHINE E GLI AZIONAMENTI ELETTRICI

Corso di Laurea di Ingegneria Industriale

Prof. Francesco Benzi

## INTRODUZIONE

Nell'ambito dell'ingegneria industriale si definiscono come **azionamenti** i dispositivi che consentono la movimentazione di materiali e componenti in diversi tipi di operazione : dalla fabbricazione di prodotti attraverso l'impiego dei macchinari adeguati (industrie primarie o manifatturiere), allo spostamento degli oggetti (stoccaggio, magazzini), al trasporto dei beni e delle persone (mezzi di trasporto e locomozione), alla realizzazione delle operazioni di servizio ad altre attività (pompaggio, ventilazione, condizionamento). Gli azionamenti sono quindi elementi indispensabili e molto diffusi nella moderna civiltà industriale.

Per realizzare la movimentazione gli azionamenti si servono di diverse fonti di energia e si distinguono di conseguenza :

**azionamenti idraulici** che utilizzano lo spostamento di fluidi come acqua o olio in pressione;

**azionamenti pneumatici** che utilizzano l'energia associata al gas in pressione, in particolare l'aria compressa;

**azionamenti elettrici** che sfruttano l'energia elettrica.

In ogni caso l'energia sorgente si deve trasformare in **energia meccanica** per potere produrre il movimento; per questo motivo in ogni azionamento è sempre presente una **macchina** che realizza questa trasformazione. Si parlerà di volta in volta di *macchine idrauliche, pneumatiche o elettriche*. Ma, oltre alla macchina, un azionamento deve comprendere diversi altri componenti affinché la trasformazione di energia si verifichi secondo le modalità richieste dall'utente e rispettando alcuni criteri generali di economia e sicurezza. In particolare si troveranno all'interno di un azionamento dispositivi di interfaccia con la sorgente principale di energia (**alimentatori, convertitori**), componenti di misura e **sensori** e un **sistema di controllo** costituito da elementi di logica circuitale e sempre più frequentemente di elementi intelligenti quali calcolatori, microprocessori, i relativi sistemi di comunicazione e di calcolo e le interfacce verso l'utilizzatore.

### Azionamenti idraulici e pneumatici:



potenze elevate (diverse migliaia di kW)



movimento lineare senza riduttori o ingranaggi



rendimento molto basso



dinamica lenta



costi e ingombri elevati

## Azionamenti elettrici:

-  potenze piccole, medie e medio alte
-  movimento rotatorio, eventualmente con riduttori o ingranaggi, movimento lineare
-  rendimento elevato
-  dinamica rapida
-  costi e ingombri accettabili

Per queste ragioni gli azionamenti elettrici, coprendo le esigenze di vasti settori applicativi, sono sempre più diffusi.

Nel seguito si parlerà in dettaglio delle macchine e degli azionamenti elettrici illustrandone le caratteristiche costruttive e le applicazioni.

## MACCHINE E AZIONAMENTI ELETTRICI

### La macchina elettrica

La **macchina elettrica**: realizza trasformazioni di energia.

*Energia Elettrica* ↔ *Energia Elettrica* <1>

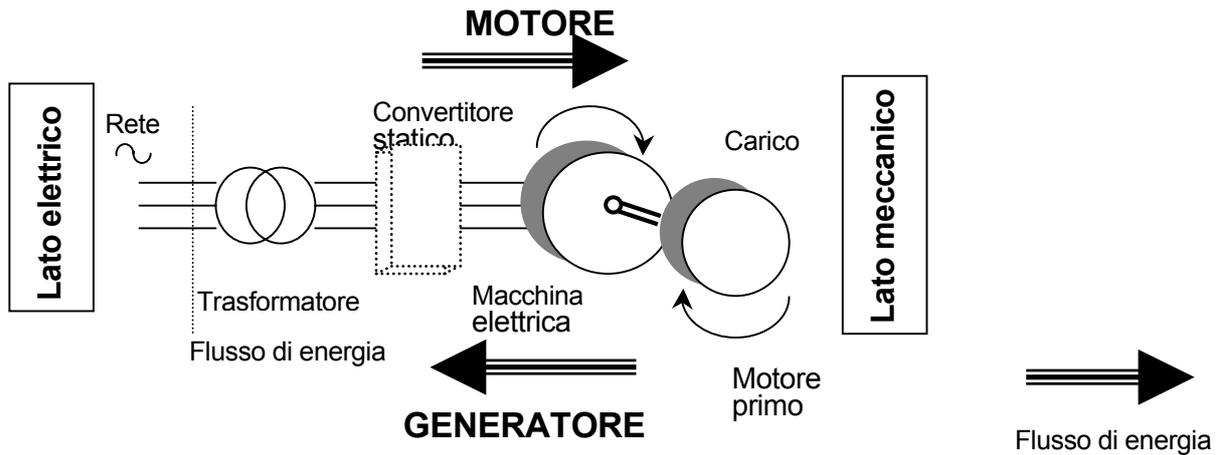
*Energia Elettrica* ↔ *Energia Meccanica* <2>

<1> Il primo tipo di conversione è realizzato generalmente da macchine elettriche statiche, di tipo *elettromeccanico* come i **trasformatori** o di tipo *elettronico* con dispositivi a semiconduttore di potenza (**convertitori statici**). Queste macchine possono trasformare l'ampiezza, la frequenza o la forma d'onda delle grandezze elettriche, in modo da adattarle alle esigenze del carico utilizzatore.

<2> La conversione dell'energia da elettrica in meccanica è quella che consente il funzionamento vero e proprio degli azionamenti e avviene per mezzo delle **macchine elettriche rotanti o lineari**. Tuttavia la conversione di energia è generalmente bidirezionale e pertanto essa può avvenire in una stessa macchina anche nella direzione opposta, di modo che l'energia meccanica fornita dall'esterno si trasforma in elettrica; questo può avvenire o temporaneamente (ad es. durante la frenatura di un motore), o stabilmente (ad es. quando la macchina elettrica è utilizzata come *generatore*).

Con il termine **azionamento elettrico** ci si riferisce di norma a un dispositivo che comprenda un **motore elettrico** per la produzione di movimento. Tuttavia lo studio della macchina elettrica svolto nel seguito si riferisce più in generale ai principi fondamentali di operazione sia come motore, sia come generatore, data l'importanza che anche quest'ultima modalità di funzionamento assume nella studio degli azionamenti. Una trattazione più completa e approfondita dei generatori e alternatori elettrici, inseriti nella rete di produzione dell'energia viene svolta nei corsi di impiantistica elettrica.

Lo schema seguente illustra come una stessa macchina elettrica possa funzionare da motore o da generatore.



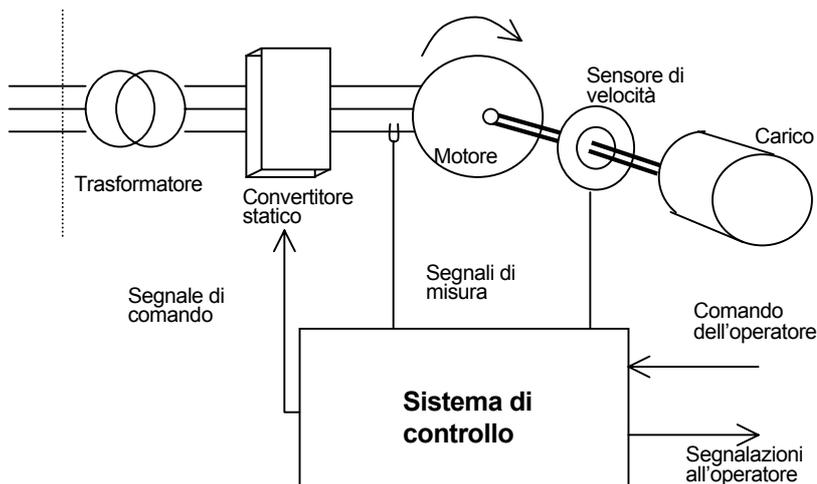
Nel funzionamento da motore il carico assorbe la potenza meccanica trasformandola in movimento.

Nel funzionamento da generatore il motore primo (turbina a vapore, idraulica) fornisce la potenza meccanica che sarà trasformata in elettrica e fornita all'utilizzatore o alla rete.

Ogni trasformazione di energia è caratterizzata da un rendimento:

$$\eta = \frac{\text{Energia uscente}}{\text{Energia entrante}} < 1$$

## L'azionamento elettrico



## Grandezze caratteristiche delle macchine elettriche e dei carichi meccanici

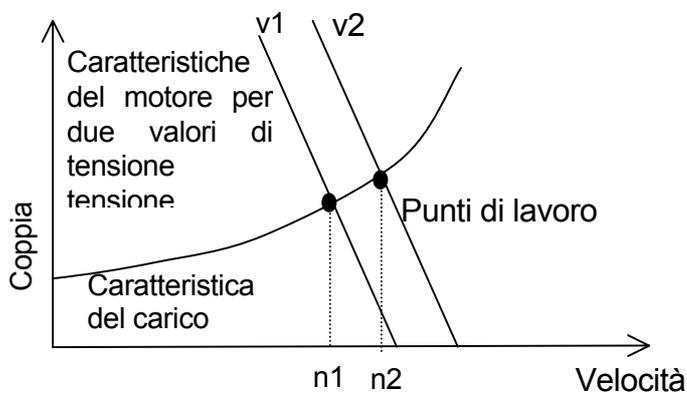
Sia il motore elettrico, sia il carico meccanico che esso deve trascinare possono essere individuati dalle rispettive caratteristiche esterne. Da queste ultime si possono dedurre le proprietà meccaniche nelle diverse condizioni di funzionamento e la potenza meccanica assorbita o erogata.

La caratteristica esterna meccanica di un motore o di un carico si può rappresentare su un grafico che riporta sugli assi la coppia e la velocità. Da queste due grandezze si può dedurre direttamente la potenza meccanica, infatti:

$$P_m = \text{Potenza meccanica} = \text{Coppia} \times \text{velocità angolare} = C_m \times n = [Nm \times rad / s] = [W]$$

Per verificare se un motore è in grado di trascinare un determinato carico si possono riportare su uno stesso grafico le due caratteristiche. Es. si consideri un ventilatore.

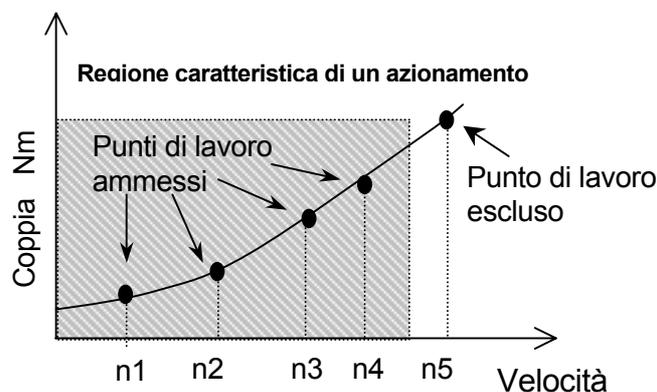
L'intersezione tra le due caratteristiche indica il punto di lavoro.



La caratteristica del motore si modifica variando alcune grandezze di alimentazione (es. tensione, frequenza). Un motore collegato direttamente alla rete, senza possibilità di variare la tensione o la frequenza può fornire una sola caratteristica di funzionamento e quindi il carico potrà muoversi solo ad una determinata velocità.

Un azionamento consente di far variare l'alimentazione secondo le necessità determinando così non più una sola curva caratteristica, ma un insieme di curve che descrivono un'intera regione nel piano coppia-velocità, in modo che il carico può essere trascinato ad ogni valore di velocità, all'interno di questa regione (l'unica condizione è che la potenza richiesta sia inferiore o uguale a quella che il motore può erogare).

Da qui la superiorità dell'azionamento elettrico sul semplice motore ogni volta che sia necessario far variare la velocità o la coppia del carico.



## Caratterizzazione dinamica dei carichi e dimensionamento.

Il dimensionamento suggerito nel paragrafo precedente si riferisce solamente alle coppie richieste dal carico a regime. Spesso tuttavia si devono considerare applicazioni delle macchine in cui anche la fase transitoria, di avviamento, frenatura o variazione della velocità, non costituiscono un aspetto secondario o ridotto nel tempo, ma rappresentano la modalità principale di funzionamento. Questo avviene ad es. se si considerano tipi di servizio in cui il motore richiede frequenti avviamenti (applicazioni di pompe o compressori), o applicazioni di motori nelle macchine utensili o nella robotica, quando si richiedono frequenti e ripetuti spostamenti dei pezzi, e altrettanto frequenti operazioni di lavorazione di breve durata.

L'ipotesi di trascurare la componente di accelerazione nell'equazione meccanica non è più accettabile, ma il dimensionamento del motore deve tenere conto anche della *coppia d'inerzia*, secondo l'espressione:

$$C_e = C_r + J_{tot} \frac{d\omega_m}{dt}$$

Il motore deve cioè fornire, oltre ad una coppia uguale alla coppia resistente a regime, anche la coppia necessaria per accelerare la macchina:  $J_{tot} \frac{d\omega_m}{dt}$

Questa componente dovrà essere tanto maggiore, quanto maggiore è l'inerzia totale riportata all'albero e quanto più rapido si desidera l'avviamento.

Un caso particolare in cui ha rilievo la componente dinamica della coppia è l'avviamento della macchina, a partire da velocità nulla. In questo caso il transitorio può occupare anche un periodo relativamente lungo (da pochi secondi a decine di secondi e minuti a seconda delle dimensioni e del peso del rotore e del carico).

La **coppia di spunto** della macchina è quindi quella richiesta per vincere non solo la resistenza del carico a velocità nulla, ma anche per fornire l'accelerazione richiesta. Inoltre in fase di avviamento si possono presentare coppie resistenti, per lo più d'attrito, che vengono meno quando la macchina raggiunge il regime meccanico. Esempi tipici si presentano quando si tratti di avviare una macchina a freddo: in questo caso alcuni sistemi di lubrificazione possono offrire una resistenza aggiuntiva dei cuscinetti, che si riduce a caldo. Così pure macchine particolari (ad es. frantumatrici, mescolatrici ) possono offrire all'inizio delle loro operazioni un carico aggiuntivo che viene meno una volta che l'operazione abbia raggiunto il regime.

## Equazioni della macchina elettrica

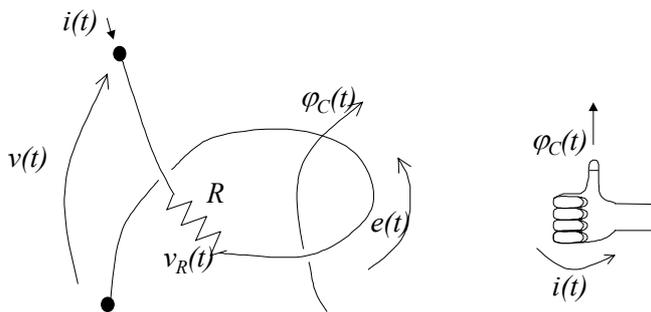
Il principio di funzionamento delle macchine elettriche, e in particolare la capacità di realizzare trasformazioni di energia, è legato alle interazioni dei campi elettromagnetici all'interno della macchina, che possono produrre forze meccaniche e forze elettromotrici.

Questo processo è basato su alcuni principi elementari della fisica, quali la *legge dell'induzione elettromagnetica* o la *legge relativa alla forza di Lorentz*<sup>1</sup>, ma si manifesta

<sup>1</sup> **Legge dell'induzione.** Generazione di una forza elettromotrice al variare del flusso.

Dalla legge di Ohm:  $v(t) = R i(t) + e(t)$

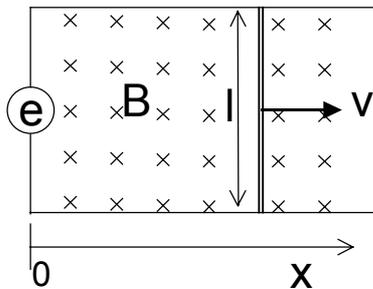
$e(t) = d\phi_c/dt$  (Regola mano destra)



Le caratteristiche elettriche delle ME sono in genere nonlineari. (Sia per le proprietà dei materiali, sia per il tipo di costruzione: le linee di flusso non sono distribuite uniformemente).

Es. nel trasformatore le linee di flusso sono distribuite nel nucleo di ferro e non nell'aria circostante ( $\mu_{Fe} \gg \mu_0$ ). All'interno del ferro però non sono distribuite uniformemente, per i motivi detti. Tuttavia spesso si assume per semplicità l'ipotesi di uniformità rispetto ad un circuito magnetico equivalente a quello reale.

**Generazione della forza elettromotrice in un circuito ad assetto variabile.**



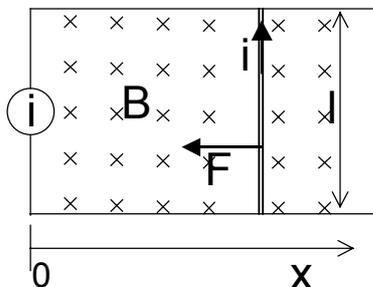
Induzione magnetica:  $\mathbf{B} = \text{costante}$  (diretta normalmente al piano del foglio)

Forza elettromotrice indotta sul conduttore:

$$e = d\phi_c/dt = d(BS)/dt = d(Bxl)/dt$$

$$e = \mathbf{Blv} \quad (\mathbf{B}, \mathbf{l} \text{ costanti; } dx/dt=v)$$

**Forza generata da una corrente in un conduttore investito da un campo magnetico.**



$$\vec{F} = q(\vec{v} \times \vec{B})$$

$$d\vec{F} = \rho dl(\vec{v} \times \vec{B}) = \rho v dl(\frac{\vec{v}}{v} \times \vec{B}) = i d\vec{l} \times \vec{B}$$

$$\mathbf{F} = \mathbf{Bil}$$

In modo analogo, per sistemi vincolati su un asse, come le macchine elettriche rotanti, si genera la **Coppia** che produce il movimento rotatorio.

in modo complesso dal momento che comprende: i) problemi di tipo meccanico e scelte costruttive e di materiali; ii) l'interazione di campi elettromagnetici difficili da descrivere in una struttura costruttivamente complicata per la varietà dei materiali e l'irregolarità delle forme; iii) i problemi termici legati alla dissipazione di calore e al riscaldamento delle parti della macchina e di conseguenza alla sicurezza dell'esercizio. Per questi motivi risulta praticamente impossibile realizzare un modello analitico completo della macchina e dell'azionamento elettrico. Tuttavia i principali aspetti del funzionamento possono essere valutati considerando **modelli semplificati** della macchina nei quali, di volta in volta, si concentra l'attenzione su uno degli aspetti funzionali o costruttivi a seconda delle proprie esigenze.

Ad esempio, per valutare il funzionamento esterno della macchina ai fini della sua selezione per una determinata applicazione può essere sufficiente un'analisi a regime delle caratteristiche "esterne", quelle cioè che appaiono e servono all'utente (coppia, velocità). Un modello più completo, che tenga conto anche dei fenomeni elettromagnetici, considera le equazioni elettriche e meccaniche, relativamente ad uno schema con i principali avvolgimenti elettrici, e ipotizza modalità costruttive semplificate,

Lo stesso modello può valere anche per un'analisi dinamica del funzionamento (transitori di avviamento, prese di carico, guasti).

Un diverso modello semplificato della macchina è utilizzato per descrivere i problemi termici legati alla dissipazione dell'energia sotto forma di calore e i conseguenti problemi di raffreddamento, tipo di servizio, misure di sicurezza.

I modelli ora citati, costituiscono la conoscenza di base necessaria all'utilizzatore della macchina e verranno spesso utilizzati in questa trattazione.

### Equazioni meccaniche ed elettriche elementari

Le macchine sono costituite da materiale ferromagnetico (ferro, o leghe metalliche) e materiale conduttore (rame), che definiscono un insieme di circuiti elettromagnetici.

Si possono schematizzare come un insieme di **circuiti elettrici mutuamente concatenati**, disposti nello spazio in posizione relativamente fissa (macchine statiche) o rotante (macchine rotanti).

Le equazioni della macchina descrivono sia il funzionamento elettrico, sia quello meccanico. In particolare l'equazione meccanica mette in relazione la velocità angolare dell'albero con l'inerzia complessiva della macchina e del carico ( $J$ ), con la coppia elettromagnetica sviluppata dalla macchina ( $C_e$ ) e, nel caso del motore, la coppia meccanica resistente  $C_r$ .

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

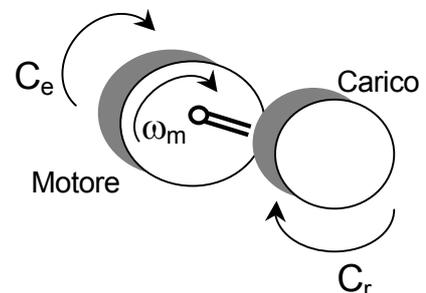
Si notino le convenzioni adottate (*convenzione dei motori*):

$C_e$  è positiva quando agisce nello stesso senso della velocità meccanica  $\omega_m$

$C_r$  è positiva quando agisce in senso opposto alla velocità meccanica  $\omega_m$

Se  $C_e > C_r$   $d/dt > 0$  -->  $\omega_m$  crescente --> **Accelerazione**

Se  $C_e < C_r$   $d/dt < 0$  -->  $\omega_m$  decrescente --> **Decelerazione**



La coppia elettromagnetica prodotta dalla macchina, che è funzione delle correnti e dei flussi elettromagnetici, stabilisce il legame tra le grandezze elettriche e quelle meccaniche.

$$C_e = f(v, i, \varphi)$$

Infine le relazioni tra tensioni, correnti e flussi sono descritte dalle equazioni elettriche che hanno la forma generale:

$$v = Ri + \frac{d\varphi_c}{dt}; \quad \varphi_c = Li;$$

$$v = Ri + \frac{d(Li)}{dt} = Ri + L \frac{di}{dt} + \frac{dL}{dt} i$$

La scrittura si deve intendere come vettoriale e rappresenta un sistema di  $n$  equazioni differenziali, ciascuna riferita a un avvolgimento.

Il numero di avvolgimenti di una macchina elettrica, ossia il numero dei circuiti elettrici alimentati separatamente o con caratteristiche elettriche omogenee, dipende dagli aspetti costruttivi e dal tipo di alimentazione. Considerando che si hanno generalmente alimentazioni monofase, bifase e trifase, e che gli avvolgimenti possono essere disposti sia sullo statore, sia sul rotore, il numero di avvolgimenti da prendere in considerazione e di conseguenza l'ordine del sistema di equazioni elettriche, può variare da 2 a 7. Gli avvolgimenti possono essere *concentrati*, ovvero le spire che li costituiscono sono avvolte lungo un'unica cava e la matassa risultante si può quindi pensare come un unico conduttore di sezione più ampia. Più spesso tuttavia le spire di uno stesso avvolgimento sono distribuite lungo la periferia dello statore o del rotore (*avvolgimenti distribuiti*) per sfruttare meglio l'intero volume della macchina distribuendone sia il flusso, sia le perdite. Anche in questo caso le equazioni che ne descrivono il funzionamento possono essere ricondotte a quella di avvolgimenti concentrati.

Rispetto alle equazioni che descrivono il comportamento elettromagnetico di circuiti fissi, in quelle delle macchine rotanti si deve notare che il termine legato alla variazione della matrice  $L$  in funzione del tempo non è in generale costante. Pertanto il termine

$$\frac{dL}{dt} i \text{ è diverso da zero.}$$