AZIONAMENTI MECCANICI

Si definisce azionamento un sistema capace di controllare il moto di un organo meccanico (carico).

Ogni azionamento comprende, quindi, un dispositivo di potenza (motore o attuatore) capace di produrre il lavoro meccanico connesso al moto.

L'attuatore può essere idraulico, pneumatico o elettrico.

Si definisce azionamento elettrico un azionamento che impiega un attuatore elettrico, ossia una macchina elettrica, solitamente funzionante da motore, nella quale avviene una conversione di energia da elettrica a meccanica. L'azionamento eroga potenza meccanica con velocità e coppia adeguate alla movimentazione prevista per il carico meccanico.

In passato la stragrande maggioranza degli azionamenti utilizzava un motore in corrente continua grazie alla maggiore facilità connessa alla alimentazione controllata di un avvolgimento in c.c. rispetto a quella di un avvolgimento in c.a. .
L'evoluzione dell'elettronica di controllo ha portato ad una maggiore diffusione dei motori in c.a. che presentano minori problemi di manutenzione e un ingombro più contenuto dei motori in c.c.; inoltre, se opportunamente controllati, consentono di ottenere prestazioni dinamiche nettamente più elevate.

Lo schema a blocchi di un azionamento elettrico comprende:

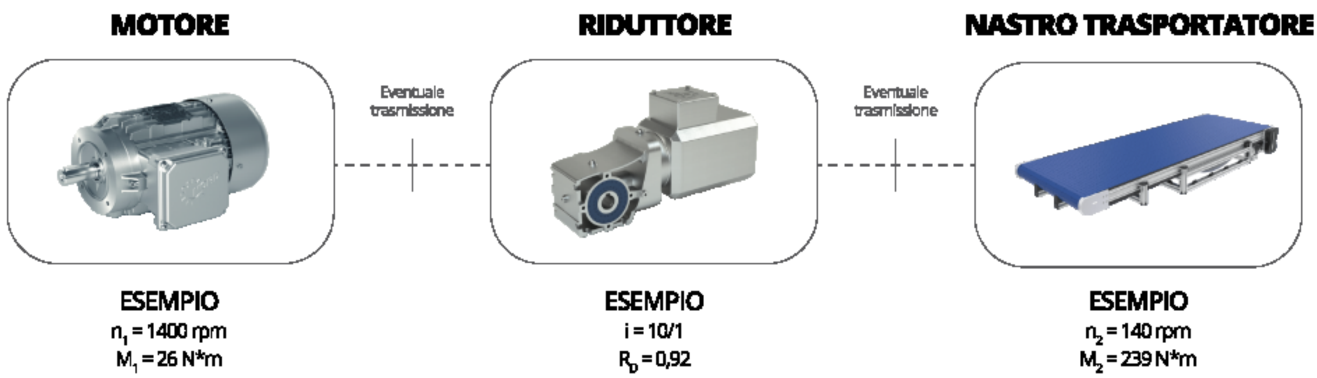
- un motore elettrico che fornisce energia al carico;
- un convertitore statico che alimenta il motore;
- un dispositivo di comando del convertitore;
- un dispositivo di controllo dell'azionamento.

Gli azionamenti con accoppiamento diretto sono, a seconda dell'applicazione nella quale sono inseriti, indicati come:

- Direct Drive (robotica),
- Gearless (ascensori),
- Motor Spindle
- Elettromandrino (macchine utensili).

Più frequentemente l'azionamento è connesso al carico mediante un riduttore meccanico. Tra i principiali abbiamo ad esempio:

- Vite senza fine
- Ad ingranaggi
- Epicicloidali



BILANCIO ENERGETICO DI UN AZIONAMENTO

L'interazione far le parti di un sistema meccanico è caratterizzata da scambi di energia fra le stesse; l'energia scambiata nell'unità di tempo è detta potenza e pertanto si usa il termine flusso di potenza per indicare tale scambio di energia.

Per un sistema puramente meccanico l'energia scambiata è definita dal lavoro (prodotto di una forza F per uno spostamento s o di una coppia M per una rotazione ϑ);

La potenza (prodotto di una forza F per una velocità v o di una coppia M per una velocità angolare ω) è la derivata del lavoro rispetto al tempo.

	Lavoro	Potenza
Movimento lineare	Fs	Fv
Movimento angolare	Mθ	Mω

Nel caso di forza con direzione diversa da quella dello spostamento e della velocità occorre effettuare il prodotto scalare fra i rispettivi vettori, nel caso di forze variabili occorre valutarne l integrale.

Molto spesso nelle macchine sono presenti sottosistemi per i quali si hanno altri flussi (ed accumuli) di potenza: sistemi elettrici, nei quali la potenza è definita in funzione del prodotto fra corrente I e tensione V; sistemi idraulici, nei quali la potenza è definita in funzione del prodotto fra portata Q e pressione p. In tutti i sistemi reali sono presenti dissipazioni di energia che producono flussi di energia termica (calore); in molti problemi di meccanica delle macchine queste dissipazioni possono essere trattate in modo semplice, valutando l'energia dissipata come frazione di quella meccanica che fluisce nella macchina.

In generale un sistema presenta scambi di energia con l'esterno e accumuli o diminuzioni di energia interna: per esempio se è presente una massa questa può accelerare e quindi nel sistema c'è aumento di energia cinetica o rallentare e quindi nel sistema c'è diminuzione di energia cinetica; se è presente una massa che si sposta in verticale si producono aumenti o diminuzioni di energia potenziale gravitazionale; inoltre nei sistemi reali una parte di energia è sempre necessaria per vincere gli attriti ed è dissipata in calore.

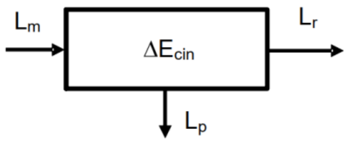
L'EQUAZIONE DI BILANCIO DI ENERGIA

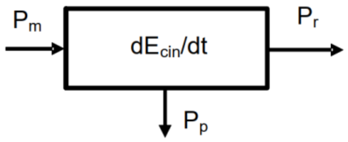
Indicando con Lm il lavoro (positivo) scambiato dalla macchina con l'esterno (lavoro motore); con Lr il valore assoluto del lavoro (negativo) scambiato dalla macchina con l'esterno (lavoro resistente), con Lp il valore assoluto dell'energia (negativa) perduta dovuta a fenomeni dissipativi di attrito (lavoro perduto), con Ec la variazione di energia cinetica delle parti della macchina, si può scrivere l'***equazione di bilancio di energia***:

$Lm - Lr - Lp = E_c$

Facendo riferimento alla potenza (lavoro nell'unità di tempo t) la stessa relazione diventa

$Pm - Pr - Pp = dE_c/dt$





In molti casi le macchine funzionano, per tempi più o meno lunghi, in due condizioni alternative:

- regime assoluto: in ogni istante non ci sono variazioni di energia cinetica quindi $dEc/dt=0$;
- regime periodico: ad intervalli costanti di tempo T (periodo) l energia cinetica assume valori identici, quindi $Ec = 0$ calcolata su un periodo.

Nel primo caso l'equazione di bilancio delle potenze a regime diventa

$Pm - Pr - Pp = 0$

Nel secondo caso si valutano gli scambi di energia in un periodo T, per cui $Ec = 0$ e l'equazione di bilancio a regime diventa

$Lm - Lr - Lp = 0$

In condizioni di regime assoluto si può approssimare che la potenza perduta sia proporzionale alla potenza motrice introducendo il rendimento della macchina η:

$\eta P_m - P_r = 0 \rightarrow P_r = \eta P_m$

In genere la macchina sarà costituita da un certo numero di sottosistemi collegati fra di loro in modo opportuno.
In questo caso quindi il rendimento della macchina è il ***prodotto*** dei rendimenti dei singoli sottosistemi.

TRASMISSIONE DELLE FORZE

A REGIME

Consideriamo una macchina costituita da:

- un motore rotativo che eroga potenza Pm sotto forma di coppia Mm e velocità angolare m (Pm = Mm ωm);
  il momento di inerzia del motore rispetto all asse di rotazione è Jm;
- un carico rotante che assorbe potenza Pr sotto forma di coppia Mr e velocità angolare r (Pr = Mr ωr);
  il momento di inerzia del carico rispetto all asse di rotazione è Jr;
- una trasmissione, che collega motore e carico in modo tale da mantenere un costante rapporto di trasmissione fra la velocità di carico e motore (τ= ωr/ ωm); il rendimento della trasmissione è η; il momento di inerzia della trasmissione è trascurabile.

In condizioni di regime si ricava:

η M_m ω_m - M_r ω_r = 0 → dividendo per ω_m → η M_m - τ M_r = 0

Il funzionamento di una macchina in assenza di attrito viene detto funzionamento ideale.

IN MOTO VARIO

Per effettuare l'analisi del moto vario si esprime ancora la potenza perduta come frazione della potenza motrice, ottenendo l'espressione differenziale:

η P_m – P_r = dE_c/dt

Trascurando l'energia cinetica della trasmissione, l'energia cinetica della macchina è data dalla somma delle energie del motore e del carico:

Ec = ½ J_m ω_m^2 + ½ Jr ω_r^2

Il bilancio di potenza diventa quindi

$$\eta M_m\omega_m - M_r\omega_r = \frac{d}{dt}\left(\frac{1}{2}J_m\omega_m^2 + \frac{1}{2}J_r\omega_r^2\right)$$

Ricordando che τ= ωr/ ωm e derivando l'energia cinetica si ottiene l'***equazione di moto della macchina:***

$$\eta M_m - \tau M_r = \left(J_m + \tau^2 J_r\right)\dot{\omega}_m$$

in cui compare l'***accelerazione angolare*** del motore **α = dω_m/dt**, ma non quella del carico.
Questa equazione è detta ridotta al motore; il secondo termine a primo membro è detto ***coppia resistente ridotta al motore***, il termine in parentesi è detto ***inerzia ridotta al motore***.
Si tratta di una equazione differenziale che può essere integrata quando siano note le espressioni delle coppie motrici e resistenti. In generale le coppie però non sono costanti, ma dipendono dalla dinamica interna dei motori e dei carichi e sono in generale funzione della posizione, della velocità e del tempo.

Si può anche ricavare l'equazione equivalente

$$\frac{\eta M_m}{\tau} - M_r = \left(\frac{J_m}{\tau^2} + J_r\right)\dot{\omega}_r$$

in cui compare l accelerazione angolare del carico, ma non quella del motore.
Questa equazione è detta ridotta al carico; il primo termine è detto ***coppia motrice ridotta al carico***, il termine in parentesi è detto ***inerzia ridotta al carico***.

Non è raro che in una macchina il carico sia costituito da una massa mr che trasla con velocità vr e alla quale è applicata una forza F. Indicando con Fr (forza resistente) la proiezione della forza F nella direzione della velocità vr, la potenza resistente è data da Pr = F vr = Fr vr.

L'equazione del moto della macchina diventa:

$$\eta M_m \omega_m - F_r v_r = \frac{d}{dt}\left(\frac{1}{2} J_m \omega_m^2 + \frac{1}{2} m_r v_r^2\right)$$

Anche in questo caso è possibile esprimere vr in funzione di m: nell'ipotesi che il rapporto fra le velocità v_r e ω_m sia una costante K, si ottiene, riducendo al motore:

$$\eta M_m - K F_r = \left(J_m + K^2 m_r\right) \dot{\omega}_m$$

ovvero, riducendo al carico

$$\frac{\eta M_m}{K} - F_r = \left(\frac{J_m}{K^2} + m_r\right) \dot{v}_r$$

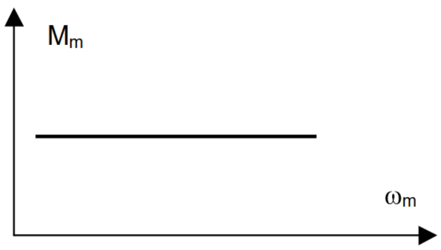
In quest'ultima relazione il termine in parentesi è detto massa ridotta (o apparente). Si noti che mentre il rapporto di trasmissione è adimensionale (rapporto fra due velocità angolari) il rapporto di velocità K ha dimensioni di una lunghezza (rapporto fra una velocità lineare e una angolare).
In modo identico può essere trattato il caso in cui il motore sia lineare e produca una forza Fm che trasla con velocità vm.

CARATTERISTICHE STATICHE DI MOTORI ROTATIVI

Le equazioni differenziali di moto possono essere integrate quando siano note le espressioni delle forze motrici e resistenti. In generale le forze non sono costanti, ma dipendono dalla dinamica interna dei motori e dei carichi e sono in generale funzione della posizione, della velocità e del tempo.

La dipendenza delle forze motrici dalle diverse variabili può essere molto complessa, ma spesso è possibile semplificare il problema trascurando gli effetti dinamici non inerziali che possono svilupparsi nel motore. E' cioè possibile determinare i valori dei momenti in condizioni di regime e applicarli anche a condizioni di moto vario. L'espressione del momento così ottenuta, riportata in funzione della velocità angolare, è detta caratteristica meccanica statica.

Le curve caratteristiche di motori ideali rotativi possono essere definite per due casi limite :



- motore a coppia costante: il momento motore è costante, indipendente dalla velocità di rotazione;
- motore a velocità costante (sincrono): la velocità del motore è costante, indipendente dal momento erogato

Dal punto di vista meccanico i dati principali di un motore elettrico asincrono reale sono:

- la coppia di spunto Ms che il motore fornisce da fermo (indicata con a in figura)
- la coppia massima Mmax (indicata con c in figura) e il corrispondente valore di velocità di coppia massima;
- la coppia nominale Mn (indicata con ordinata 100% in figura) e la corrispondente velocità nominale n alle quali il motore fornisce la potenza nominale;
- la velocità di sincronismo s, alla quale il motore funziona a vuoto e non eroga né coppia né potenza: essa dipende dalla frequenza di alimentazione f del motore (Hz) e dal numero di poli p secondo la relazione

$$\omega_s = \frac{4\pi f}{p} \ \text{rad/s.}$$

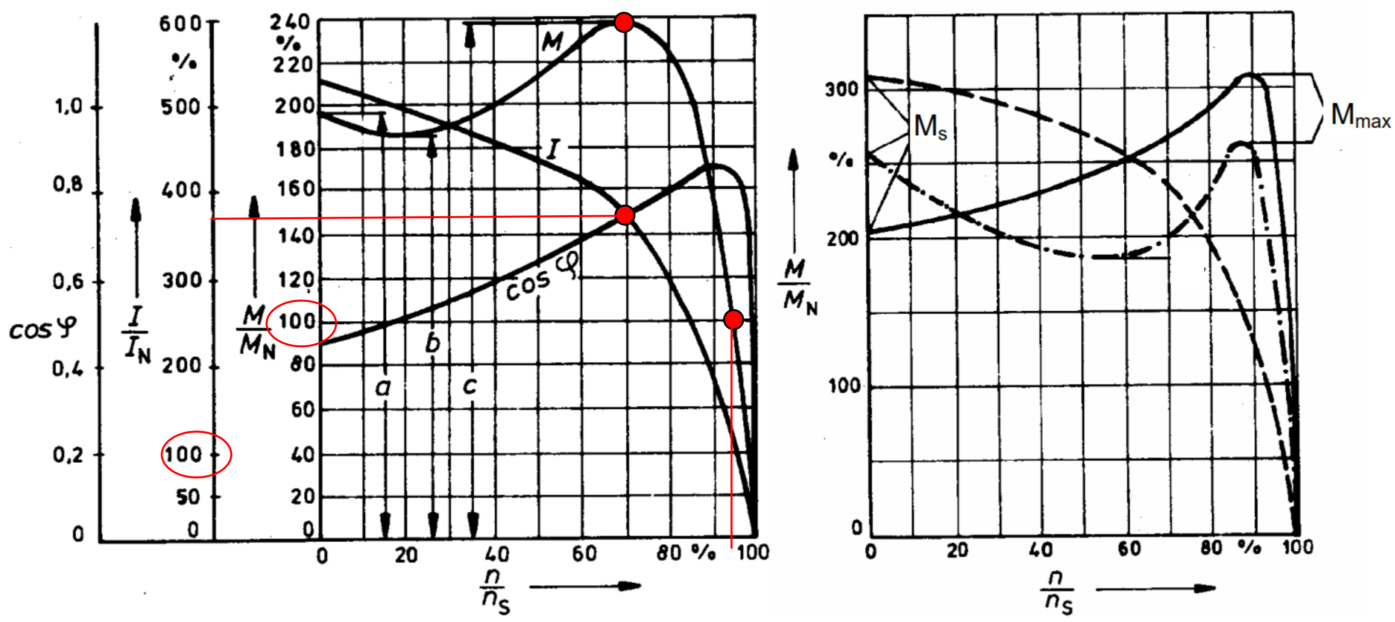
La tabella seguente riporta i valori delle velocità di sincronismo in rad/s e giri/min per motori con diversi numero di poli alimentati a frequenza di rete f=50 Hz (in Europa).

numero di poli	velocità sincronismo (rad/s)	velocità sincronismo (giri/min)
2	314	3000
4	157	1500
6	105	1000
8	78.5	750

Nella parte a sinistra di figura sono riportati gli andamenti della coppia motrice, della corrente assorbita e del cos per un motore elettrico asincrono trifase con rotore a gabbia al variare della velocità angolare. Il grafico riporta in ascissa i valori della velocità angolare in percentuale della velocità di sincronismo (100n/ns = 100 / s), e in ordinate i valori della coppia effettiva in percentuale della coppia nominale (100M/Mn) e della corrente effettiva in percentuale della corrente nominale (100I/In).

Per il motore in figura si vede che: la coppia di spunto è circa 1.95 volte la nominale, la coppia massima è circa 2.4 volte la nominale, la corrente di spunto (che è anche la massima) è circa 5.3 volte la corrente nominale. Al sincronismo il motore non produce coppia e non assorbe corrente. La velocità nominale è circa 0.95 volte quella di sincronismo.

Nella parte destra della figura sono riportati gli andamenti della coppia motrice rapportata a quella nominale per tre diversi tipi di motore asincrono trifase. Due di essi presentano un picco nella curva di coppia corrispondente alla coppia massima Mmax.



ESERCIZIO

Un motore asincrono trifase a 4 poli, alimentato alla frequenza di rete (50 Hz) ha le curve caratteristiche riportate nella parte sinistra di figura.

- Si ricavi dalla figura il valore della velocità nominale ωn.
- Si determini di quanto aumenta rispetto alla corrente nominale la corrente nel motore quando questo eroga la coppia massima.

Calcoliamo la velocità di sincronismo del motore

$$\omega_s = \frac{4\pi f}{p} = \frac{4\pi 50}{4} = 157 \ \text{rad/s}$$

A cui corrisponde ns = 1550 rpm = giri/minuto

Dato che in condizioni nominali si ha M=Mn, si entra nel grafico a M/Mn=100 e in corrispondenza dell'ordinata 100 si trova la condizione in cui il motore eroga la coppia nominale:

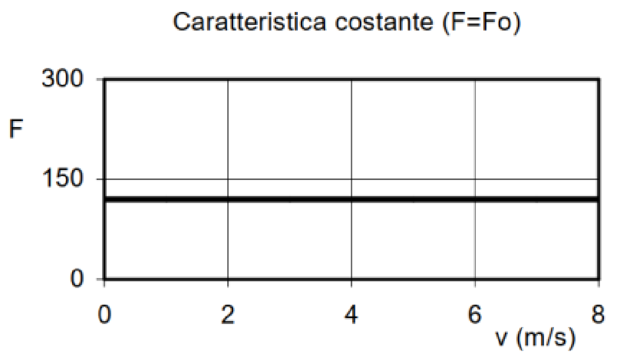
n/ns= 95 → n= 1425 giri/min → ωn= 150 rad/s

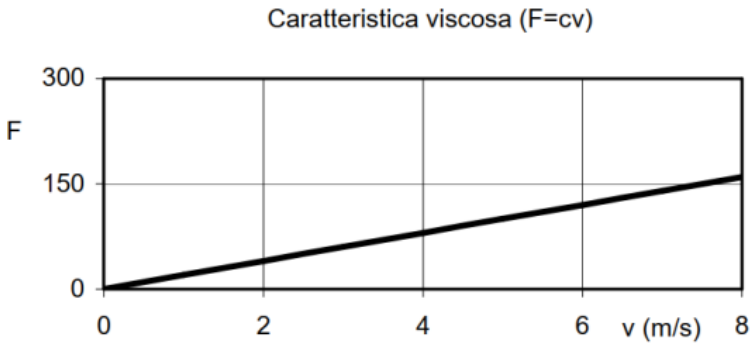
In condizioni nominali abbiamo ovviamente I/In= 100 mentre alla coppia massima abbiamo I/In= 375 quindi la corrente assorbita è 3,75 volte quella nominale.

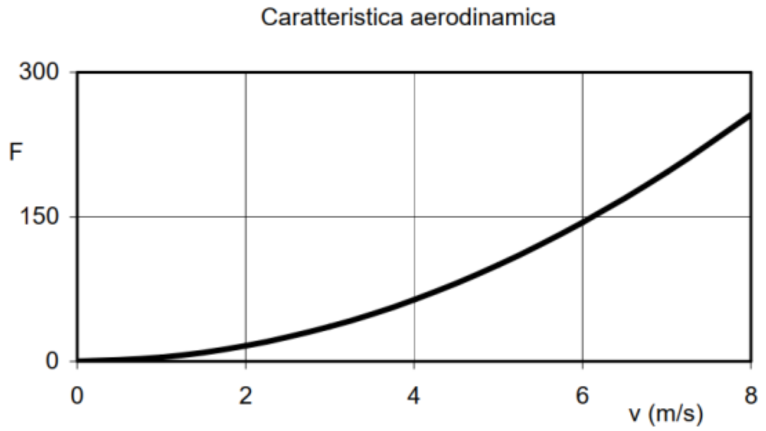
CARATTERISTICHE STATICHE DEI CARICHI

Anche i carichi (forze o coppie) sono caratterizzati da determinate curve caratteristiche. I casi più frequenti sono:

- carico costante (p. es. forza dovuta al sollevamento di un peso);
- carico viscoso (forza/coppia proporzionale alla velocità);
- carico aerodinamico (forza/coppia proporzionale al quadrato della velocità);
- combinazioni dei precedenti.

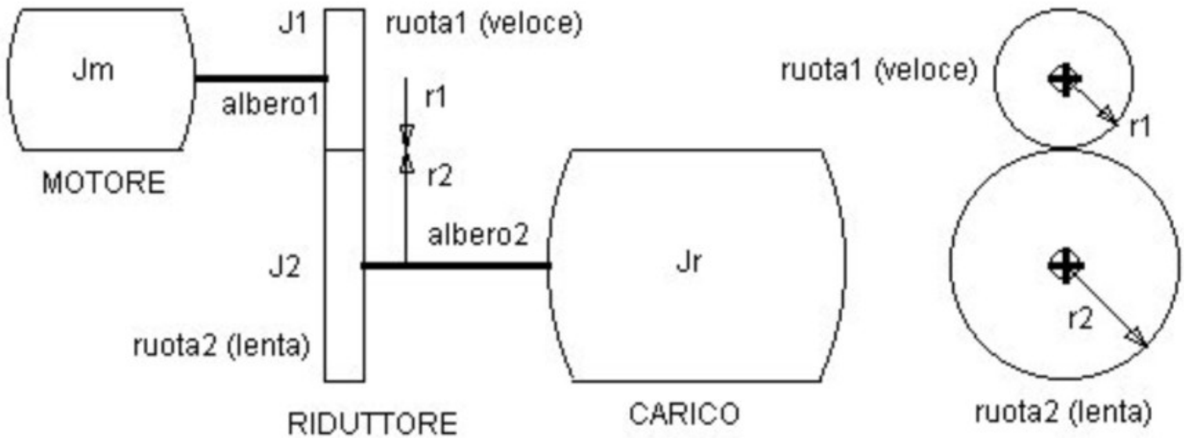


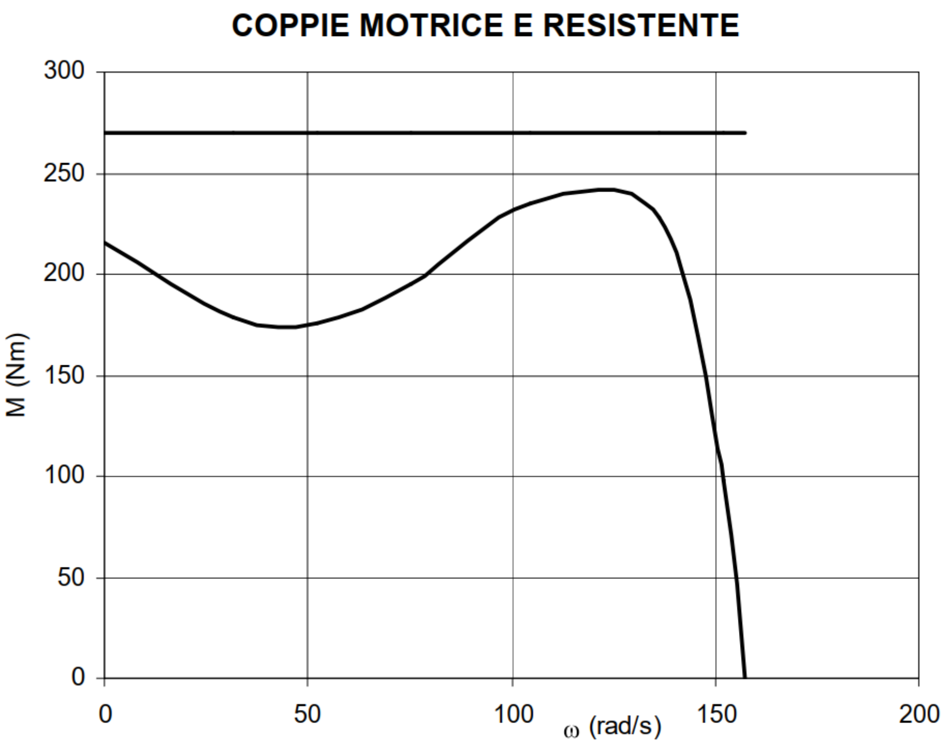




ANALISI A REGIME DI UNA MACCHINA CON MOTORE ASINCRONO E RIDUTTORE DI VELOCITA'

Consideriamo l'azionamento di figura in cui tra motore e carico è presente un riduttore ad ingranaggi.
Il carico presenta una coppia resistente costante M_r=270 Nm mentre il motore la coppia M_m variabile indicata in figura.





CONDIZIONE	Velocità (giri/min)	Velocità (rad/s)	Coppia (Nm)
Di spunto	0	0	215
Di coppia massima	1220	125	240
Nominale	1450	152	98
Di sincronismo	1500	157	0

Supponiamo inizialmente di voler effettuare il collegamento diretto fra motore e carico, senza riduttore; pertanto η=1 e τ=1.

Poiché la coppia resistente Mr è sempre superiore alla coppia motrice M_m per qualunque velocità di rotazione del motore non è possibile collegare direttamente carico e motore per avere $M_m = M_r$. E' necessario inserire un riduttore!

Volendo utilizzare il motore assegnato per far muovere il carico occorre inserire una trasmissione che consenta di rispettare in condizioni accettabili di funzionamento del motore l'equazione di bilancio di energia:

$$\eta M_m - \tau M_r = 0$$

Una buona scelta è far ruotare a regime il motore alla sua velocità nominale, che da tabella risulta essere m_n=152 rad/s e fargli quindi erogare la coppia nominale che risulta Mmn=98 (Nm).

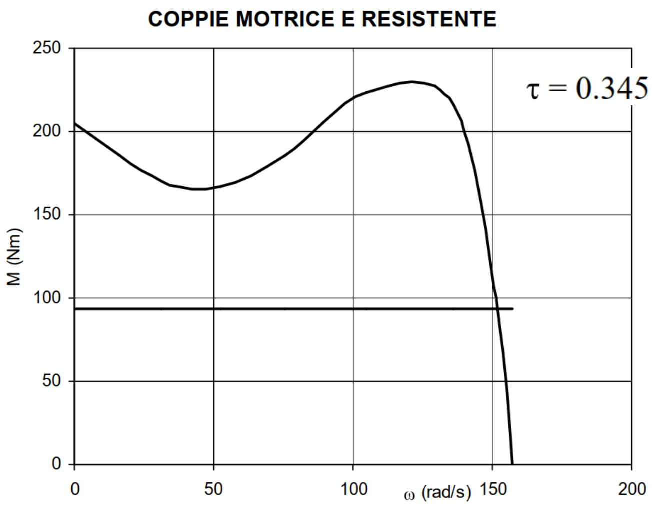
Avendo inserito una trasmissione occorre tener conto del suo rendimento e occorre conoscere come essa è realizzata. Supponendo di adottare una coppia di ruote dentate con rendimento η =0.95 abbiamo:

$0{,}95 * 98 - \tau * 270 = 0 \rightarrow \tau = 0{,}345 = 1/2{,}9$

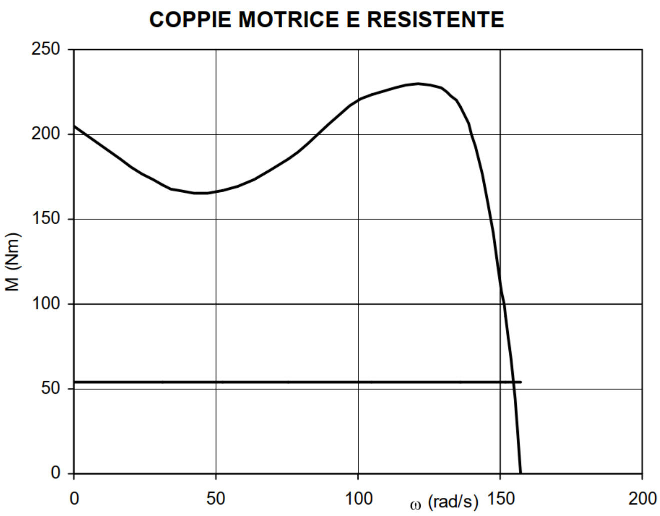
Quindi è necessario ridurre la velocità del motore di circa 3 volte.
A regime il motore ruoterà alla ωn=152 rad/s (1450 rpm) mentre il carico ruoterà alla velocità:

$\omega_r = \omega_m * \tau = 52$ rad/s (497 giri/min).

La figura successiva mostra i gli andamenti di (η Mm) e di (τ Mr) in funzione della velocità angolare del motore. Si vede che le curve si intersecano e che esiste quindi una condizione di regime per la quale è soddisfatta l'equazione di bilancio di energia. Tale condizione corrisponde, per costruzione, alla condizione di funzionamento nominale del motore.



Se si utilizzasse una riduzione di velocità più spinta, per esempio con = 0.2 = 1/5, i grafici delle coppie Mm e Mr in funzione della velocità angolare del motore diventerebbero quelli della figura successiva dove quello di Mm è ovviamente lo stesso mentre quello di Mr è più in basso). Esiste ancora una condizione di funzionamento a regime, corrispondente all'intersezione delle due curve, in un punto più in basso del punto nominale e un po più a destra di questo. Ciò significa che il motore erogherà una coppia uguale a quella resistente e dunque decisamente minore della nominale: non sarà ben sfruttato ma potrà funzionare regolarmente.



ANALISI IN TRANSITORIO DI UNA MACCHINA CON MOTORE ASINCRONO E RIDUTTORE DI VELOCITA’

Per l’analisi dinamica devono essere noti i seguenti dati:

- la coppia motrice M_m
- la coppia resistente M_r
- il rendimento del riduttore η
- il rapporto di trasmissione τ
- il momento di inerzia J_m del rotore del motore rispetto al suo asse di rotazione;
- il momento di inerzia J_r del carico rotante rispetto al suo asse di rotazione;
- il momento di inerzia J_1 della ruota 1 rispetto al suo asse di rotazione,
- il momento di inerzia J_2 della ruota 2 rispetto al suo asse di rotazione

L'energia cinetica della macchina è la somma delle energie cinetiche dei diversi corpi rotanti

$$E_c = \frac{1}{2}J_m\omega_m^2 + \frac{1}{2}J_1\omega_m^2 + \frac{1}{2}J_2\omega_r^2 + \frac{1}{2}J_r\omega_r^2$$

Il bilancio di energia nel transitorio diventa quindi:

$$\eta M_m\omega_m - M_r\omega_r = \frac{d}{dt}\left(\frac{1}{2}J_m\omega_m^2 + \frac{1}{2}J_1\omega_m^2 + \frac{1}{2}J_2\omega_r^2 + \frac{1}{2}J_r\omega_r^2\right)$$

Ricordando che $\tau = \omega_r / \omega_m$

$$\eta M_m - \tau M_r = \left(J_m + J_1 + \tau^2\left(J_2 + J_r\right)\right)\dot{\omega}_m$$

Ovvero indicando J^*_m = inerzia ridotta al motore → $J_m + J_1 + \tau^2\left(J_2 + J_r\right)$

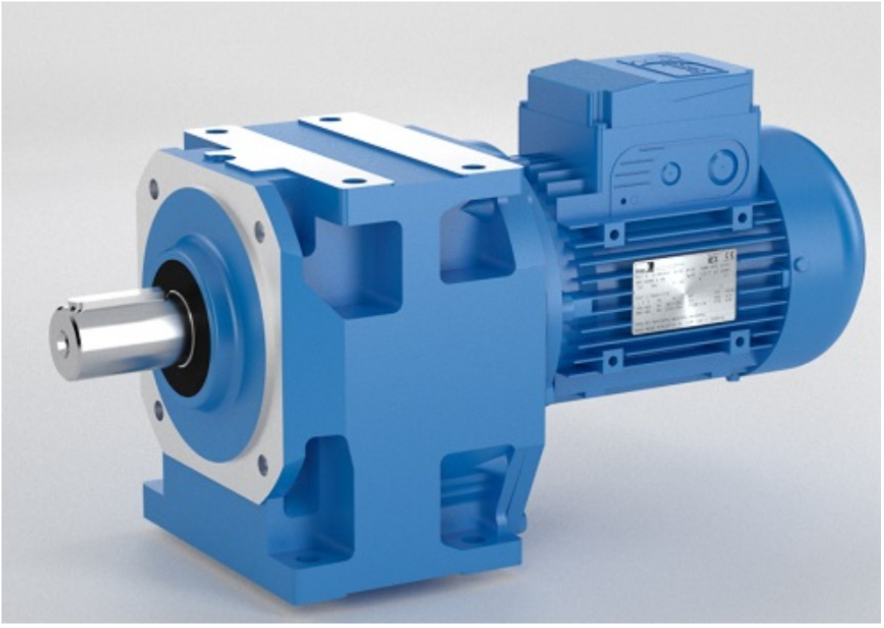
Otteniamo l’equazione (differenziale) di moto della macchina ridotta al motore che fornisce l’accelerazione della macchina:

$$\dot{\omega}_m = \frac{\eta M_m - \tau M_r}{J^*_m}$$

Per risolvere l equazione differenziale bisogna conoscere la coppia motrice e quella resistente in funzione delle rispettive velocità angolari, $M_m = f(\omega_m)$, $M_r = g(\omega_r)$.

MOTORIDUTTORI

Spesso motori elettrici e riduttori meccanici di velocità ad ingranaggi vengono realizzati congiuntamente e costituiscono i motoriduttori. Sono un organo di comando semplice, affidabile di ridotto ingombro per unità di potenza, con buon rendimento, funzionamento regolare, minima rumorosità, elevata durata, semplicità di manutenzione e prezzo favorevole.



Sono normalizzati dai costruttori e ne esistono numerose alternative di montaggio, rilevabili dai cataloghi dei produttori.I costruttori possono fornire i valori dell’inerzia dei riduttori e dei motoriduttori di loro produzione.

Anziché indicare i momenti di inerzia delle singole ruote dentate e dei loro alberi, può esser dato il valore dell inerzia dell'intero riduttore o motoriduttore ridotta all albero veloce o all albero lento. In tal caso il calcolo dell inerzia ridotta complessiva della macchina può essere effettuato in modo simile a quanto visto poco sopra a partire dai dati:

- Jm: momento di inerzia del motore, kg m2;
- Ji: momento di inerzia del riduttore riferito all albero veloce, kg m2;
- Jr: momento di inerzia del carico, kg m2;
- τ : rapporto di trasmissione del riduttore.

Essendo nota l’inerzia Ji del riduttore ridotta all’albero veloce ed essendo questo collegato direttamente al motore, si possono sommare direttamente Ji e Jm e calcolare l inerzia ridotta al motore J_m* della macchina:

$$J_m^* = (J_m + J_i) + \tau^2 J_r$$

ESEMPIO.

Una macchina è costituita da un motore elettrico asincrono trifase a 4 poli con potenza nominale 15 kW, del tipo BN 160L riportato in appendice a questo capitolo, da un carico rotante con momento di inerzia Jr= 2 kg m^2, da un riduttore con rapporto di trasmissione = 0.18 e inerzia ridotta all albero veloce Ji = 0.05 kg m2.
Determinare il momento di inerzia della macchina Jm* ridotto all albero motore e Jr* ridotto all albero del carico.

Pn kW		n min^{-1}	Mn Nm	η %	cos φ	In A (400V)	Is/In	Ms/Mn	Ma/Mn	Jm x 10^{-4} kgm^2	IM B5 Kg
11	BN 160MR 4	1440	73	87	0.82	22.3	5.9	2.7	2.5	360	70
15	BN 160L 4	1460	98	89	0.82	29.7	5.9	2.3	2.1	650	99

Dai dati del motore BN 160L si ricava: J_m= 0,065 Kg m2

Quindi:

$$J_m^* = (J_m + J_i) + \tau^2 J_r = (0.065+0.05) + 0.018^2 * 2 = 0.18 \text{ kg m}^2$$

$$J_r^* = \left(\frac{J_m + J_i}{\tau^2} + J_r\right) = \left(\frac{0.065+0.05}{0.18^2} + 2\right) = 5.55 \text{ kg m}^2$$