

FLUSSO DI ENERGIA E TRASMISSIONE DELLE FORZE

6-1 Bilancio energetico

L'interazione fra 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. 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.

Dal punto di vista energetico una macchina può essere schematizzata come un insieme di parti, separata dall'esterno mediante una superficie, attraverso la quale avvengono scambi di energia. Il bilancio delle energie impone che la somma (algebrica) dell'energia scambiata con l'esterno sia pari alla variazione di energia interna alla macchina. Per gli scopi della trattazione seguente si suppone che:

- gli scambi con l'esterno siano solo quelli di lavoro meccanico e quelli termici dovuti ad effetti dissipativi (attriti);
- all'interno della macchina vi siano solo rilevanti accumuli di energia cinetica.

La prima ipotesi esclude dallo studio tutte le macchine in cui si effettua conversione di energia coinvolgente almeno una forma di energia non meccanica (i motori termici o elettrici, per esempio). La seconda ipotesi appare sempre poco realistica in quanto in tutte le macchine si possono accumulare energia meccanica gravitazionale ed energia meccanica di deformazione. Tuttavia la prima può essere valutata considerando, anziché la variazione di energia interna gravitazionale, il corrispondente lavoro delle forze gravitazionali. Per quanto riguarda l'energia elastica, essa è nulla quando si usa il modello di macchina a corpo rigido. Nel capitolo 7 verrà trattato il caso in cui quest'ultimo schema non è proponibile.

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

$$L_m - L_r - L_p = \Delta E_c \quad (6.1)$$

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

$$P_m - P_r - P_p = \frac{dE_c}{dt} \quad (6.2)$$

La Fig. 6.1 Riporta uno schema degli scambi di energia in accordo con le (6.1) e (6.2).

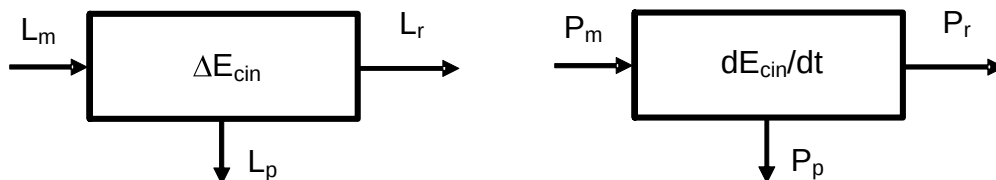


Fig. 6.1 Flusso di energia in una macchina (lavoro e potenza)

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 $dE_c/dt=0$;
- *regime periodico*: ad intervalli costanti di tempo T (*periodo*) l'energia cinetica assume valori identici, quindi $\Delta E_c = 0$ calcolata su un periodo.

Nel primo caso la (6.2) fornisce l'equazione di bilancio delle potenze a regime

$$P_m - P_r - P_p = 0 \quad (6.3)$$

Nel secondo caso si valutano gli scambi di energia in un periodo T , per cui $\Delta E_c = 0$ e la (6.1) fornisce l'equazione di bilancio dei lavori a regime

$$L_m - L_r - L_p = 0 \quad (6.4)$$

In condizioni di regime assoluto si può ammettere, approssimativamente, che la potenza perduta sia proporzionale alla potenza motrice

$$P_p = C P_m$$

Per cui, sostituendo nella (6.3) si ottiene

$$P_m (1 - C) - P_r = 0.$$

Introducendo il *rendimento* della macchina $\eta = 1 - C$, si ottengono quattro espressioni del bilancio di potenza a regime assoluto fra loro equivalenti

$$\eta P_m - P_r = 0 \quad P_r = \eta P_m \quad \eta = \frac{P_r}{P_m} \quad P_m = \frac{P_r}{\eta} \quad (6.5)$$

Ovviamente per macchine a regime periodico un ragionamento identico al precedente, fatto a partire dalla (6.1) porta a scrivere le espressioni equivalenti

$$\eta L_m - L_r = 0 \quad L_r = \eta L_m \quad \eta = \frac{L_r}{L_m} \quad L_m = \frac{L_r}{\eta} \quad (6.6)$$

In genere la macchina sarà costituita da un certo numero di sottosistemi collegati fra di loro in modo opportuno; ad esempio:

- *in serie* (Fig. 6.2), quando la potenza, a meno delle perdite, attraversa tutti i sottosistemi

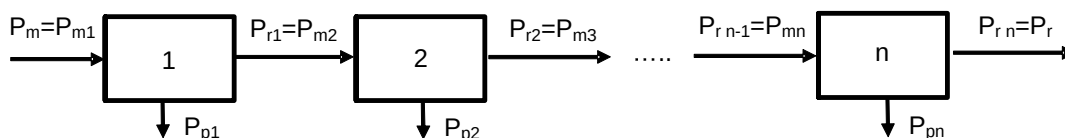


Fig. 6.2 Sottosistemi in serie

In questo caso è immediato verificare che il rendimento della macchina è il prodotto dei rendimenti dei singoli sottosistemi

$$\eta = \frac{P_r}{P_m} = \frac{P_{rn}}{P_{mn}} \dots \frac{P_{r2}}{P_{m2}} \frac{P_{r1}}{P_{m1}} = \eta_n \dots \eta_2 \eta_1 \quad (6.7)$$

- *in parallelo* (Fig. 6.3), quando un'unica sorgente di energia alimenta più sottosistemi

In questo caso è immediato verificare che il rendimento della macchina dipende dalla media pesata dei rendimenti dei singoli sottosistemi, essendo il peso dato dalla potenza che fluisce nel sottosistema stesso

$$\eta = \frac{P_r}{P_m} = \frac{P_{r1} + P_{r2} + \dots + P_{rn}}{P_{m1} + P_{m2} + \dots + P_{mn}} = \frac{\eta_1 P_{m1} + \eta_2 P_{m2} + \dots + \eta_n P_{mn}}{P_{m1} + P_{m2} + \dots + P_{mn}} = \frac{P_{r1} + P_{r2} + \dots + P_{rn}}{\frac{P_{r1}}{\eta_1} + \frac{P_{r2}}{\eta_2} + \dots + \frac{P_{rn}}{\eta_n}} \quad (6.8)$$

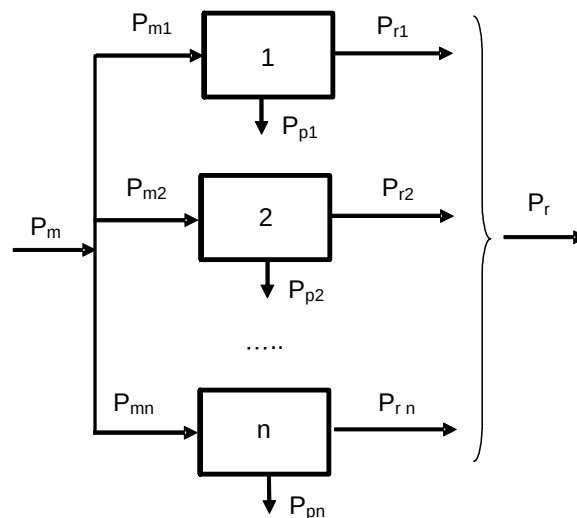


Fig. 6.3 Sottosistemi in parallelo

Si osservi che, mentre con disposizione in serie il rendimento complessivo dipende soltanto dal rendimento di tutti singoli sottosistemi (la cui sequenza può essere scambiata senza alterare il rendimento globale della macchina), nella disposizione in parallelo il rendimento dipende dal flusso di potenza attraverso i vari sottosistemi: sul rendimento complessivo influiscono sensibilmente solo i sottosistemi in cui fluisce una parte significativa della potenza.

ESEMPIO.

1) Una macchina è costituita da due sottosistemi in serie, il primo con rendimento $\eta_1=0.95$, il secondo con rendimento $\eta_2=0.45$. Il rendimento totale è per definizione (6.7) rendimento $\eta=\eta_1\eta_2=0.95*0.45=0.4275$.

2) Scambiando l'ordine dei due sottosistemi il rendimento totale risulta $\eta=\eta_2\eta_1=0.45*0.95=0.4275$.

3) Disponendo i sottosistemi in parallelo la (6.8) mostra che non si può calcolare il rendimento totale se non si conosce la potenza che attraversa ciascun sottosistema. Si abbia $P_{r1}=10$ kW, $P_{r2}=0.5$ kW. La (6.8) fornisce il rendimento totale $\eta=0.9023$.

4) Invertendo i sottosistemi, si ha $P_{r1}=0.5$ kW, $P_{r2}=10$ kW e la (6.8) dà il rendimento totale $\eta=0.4616$.

Come si vede il rendimento non cambia se si cambia la disposizione dei sottosistemi in serie in quanto tutta la potenza fluisce comunque attraverso tutti i sottosistemi. Se si scambiano fra di loro i sottosistemi in parallelo il rendimento cambia e diventa tanto peggiore tanta più potenza fluisce attraverso i sottosistemi a basso rendimento.

Pertanto l'ordine in cui si dispongono i sottosistemi in serie non influisce sul rendimento totale, mentre nelle macchine con sottosistemi in parallelo è conveniente disporre i sottosistemi con rendimento migliore là dove c'è il maggior flusso di potenza. Dato che spesso in una macchina esiste un flusso principale di potenza (per esempio in autoveicolo quello che va dal motore alle ruote) accanto a flussi secondari (per esempio l'alimentazione dell'olio nel circuito frenante del veicolo) è opportuno cercare di avere alto rendimento nei componenti del flusso principale mentre è meno rilevante elevarlo in quelli dei flussi secondari.

Il rendimento dei sottosistemi in serie e parallelo in cui può essere suddivisa una macchina può essere stimato per analogia con sistemi analoghi (ad esempio si può assumere che per ingranaggi ad

assi paralleli con denti elicoidali, ben tagliati e con buona lubrificazione il rendimento possa essere circa 0.97). Nei capitoli successivi saranno forniti alcuni dati numerici in proposito. In genere per componentistica di serie il rendimento dei sottosistemi di una macchina (per esempio i riduttori di velocità) è rilevabile sui cataloghi dei fornitori. Peraltro il rendimento può essere calcolato con l'analisi delle forze reali (compresi gli attriti) agenti tra le parti mobili.

6-2 Trasmissione delle forze

6-2.1 FUNZIONAMENTO A REGIME

Come già ricordato, il lavoro meccanico e la potenza possono essere espressi in funzione di forza F , coppia M , spostamento s , rotazione θ , velocità v e velocità angolare ω . La tabella seguente schematizza le relazioni fra le diverse variabili. 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.

	Lavoro	Potenza
Movimento lineare	Fs	Fv
Movimento angolare	$M\theta$	$M\omega$

Si consideri (Fig. 6.4) una macchina costituita da:

- un motore rotativo che eroga potenza P_m sotto forma di coppia M_m e velocità angolare ω_m ($P_m = M_m \omega_m$); il momento di inerzia del motore rispetto all'asse di rotazione è J_m ;
- un carico rotante che assorbe potenza P_r sotto forma di coppia M_r e velocità angolare ω_r ($P_r = M_r \omega_r$); il momento di inerzia del carico rispetto all'asse di rotazione è J_r ;
- una trasmissione, che collega motore e carico in modo tale da mantenere un costante *rapporto di trasmissione* τ fra la velocità di carico e motore ($\tau = \omega_r/\omega_m$); il rendimento della trasmissione è η ; il momento di inerzia della trasmissione è trascurabile.



Fig. 6.4 Flusso di energia in una macchina

In condizioni di regime si ricava dalla prima delle (6.5)

$$\eta M_m \omega_m - M_r \omega_r = 0, \quad \text{ossia, per definizione di rapporto di trasmissione,} \\ \eta M_m - \tau M_r = 0 \quad (6.9)$$

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

In ogni caso, quando una trasmissione è costituita da n dispositivi in serie, ciascuno con rapporto di trasmissione τ_i , il rapporto di trasmissione totale τ_t è dato dal prodotto dei rapporti dei singoli elementi

$$\tau_t = \tau_1 \tau_2 \dots \tau_i$$

6-2.2 FUNZIONAMENTO IN MOTO VARIO

Per effettuare l'analisi del moto vario si considera l'espressione (6.2) e si esprime ancora la potenza perduta come frazione della potenza motrice, ottenendo l'espressione

$$\eta P_m - P_r = \frac{d}{dt} E_c \quad (6.10)$$

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

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

e quindi dalla (6.10) si ricava in condizione di moto vario

$$\eta M_m \omega_m - M_r \omega_r = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} J_m \omega_m^2 + \frac{1}{2} J_r \omega_r^2 \right) \quad (6.11)$$

La presenza della trasmissione lega fra di loro le velocità angolari di motore e carico ($\tau = \omega_r/\omega_m$), per cui si può eliminare dalla precedente relazione una qualunque delle velocità:

- se si sostituisce $\omega_r = \tau \omega_m$, si ottiene l'equazione di moto della macchina

$$\eta M_m - \tau M_r = (J_m + \tau^2 J_r) \dot{\omega}_m \quad (6.12)$$

in cui compare l'accelerazione angolare del motore, 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*;

- se si sostituisce $\omega_m = \omega_r/\tau$, si ottiene

$$\frac{\eta M_m}{\tau} - M_r = \left(\frac{J_m}{\tau^2} + J_r \right) \dot{\omega}_r \quad (6.13)$$

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*.

Le due espressioni (6.12) e (6.13) sono equivalenti.

Se l'inerzia della trasmissione non è trascurabile se ne può tener conto banalmente se i vari corpi hanno assi di rotazione fissi e se si conoscono i valori dei momenti di inerzia dei corpi rotanti rispetto a tali assi.

Non è raro che in una macchina il carico sia costituito da una massa m_r che trasla con velocità $\mathbf{v}_r$ e alla quale è applicata una forza $\mathbf{F}$. Indicando con F_r (forza resistente) la proiezione della forza $\mathbf{F}$ nella direzione della velocità $\mathbf{v}_r$, la potenza resistente è data da $P_r = \mathbf{F} \cdot \mathbf{v}_r = F_r v_r$. La (6.10) 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 v_r in funzione di ω_m : nell'ipotesi che il *rapporto fra le velocità* v_r e ω_m sia una costante K , si ottiene, riducendo al motore,

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

ovvero, riducendo al carico,

$$\frac{\eta M_m}{K} - F_r = \left(\frac{J_m}{K^2} + m_r \right) \dot{v}_r \quad (6.14)$$

In quest'ultima relazione il termine in parentesi è detto *massa ridotta (o apparente)*. Si noti che mentre il rapporto di trasmissione τ 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 F_m che trasla con velocità v_m .

6-2.3 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*.

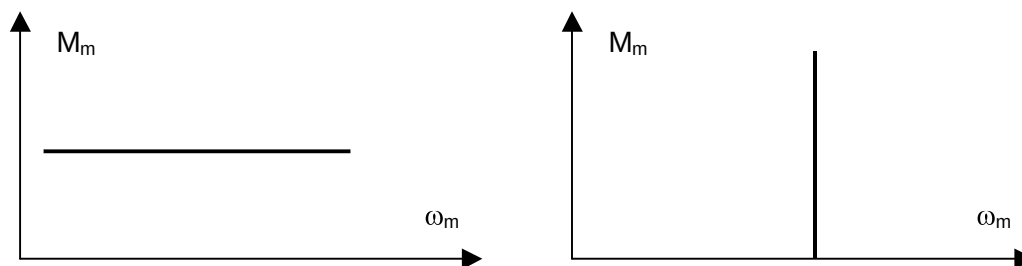


Fig. 6.5 Caratteristiche di motori a coppia e velocità costante

Le curve caratteristiche di motori ideali rotativi possono essere definite per due casi limite (Fig. 6.5):

- *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.

Nelle figure successive sono riportate le caratteristiche meccaniche tipiche (momento motore in funzione della velocità di rotazione) di alcuni motori reali.

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

- la *coppia di spunto* M_s che il motore fornisce da fermo (indicata con a in Fig. 6.6)
- la *coppia massima* M_{max} (indicata con c in figura) e il corrispondente valore di *velocità di coppia massima*;
- la *coppia nominale* M_n (indicata con ordinata 100% in figura) e la corrispondente *velocità nominale* ω_n alle quali il motore fornisce la *potenza nominale*;
- la velocità di sincronismo ω_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 Fig. 6.6 sono riportati gli andamenti della coppia motrice, della corrente assorbita e del $\cos \varphi$ 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 ($100n/n_s = 100\omega/\omega_s$), e in ordinate i valori della coppia effettiva in percentuale della coppia nominale ($100M/M_n$) e della corrente effettiva in percentuale della corrente nominale ($100I/I_n$). 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* $M_{\max}$.

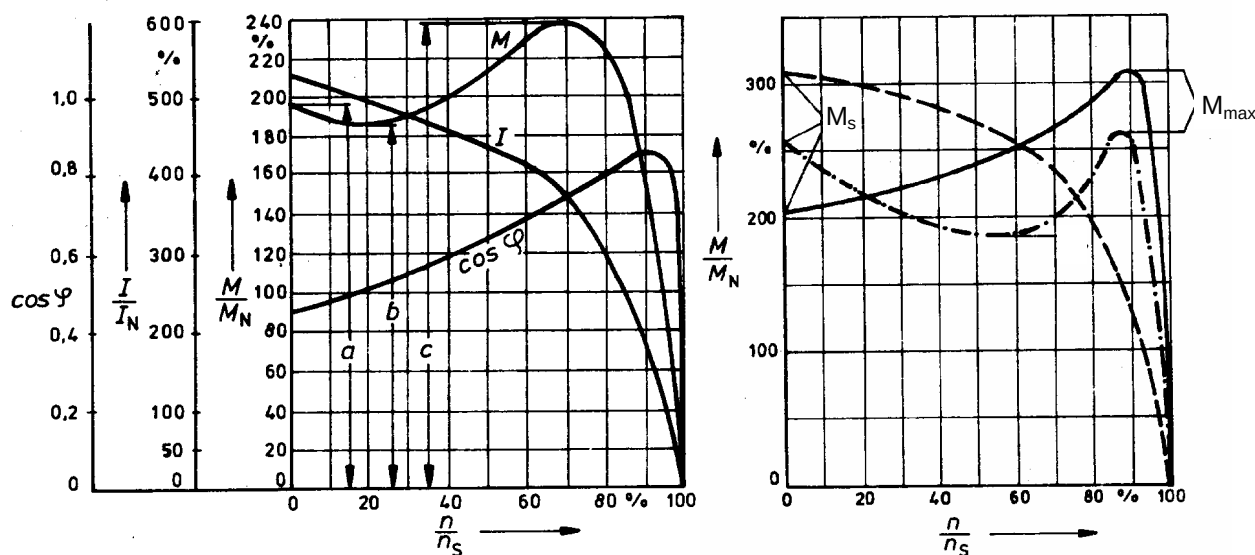


Fig. 6.6 Caratteristica meccanica, di corrente e $\cos \varphi$ di un motore asincrono trifase a gabbia e caratteristiche meccaniche per diversi motori asincroni

Alcune pagine estratte da un catalogo di motori asincroni trifase a 2, 4, 6 e 8 poli sono riportate in appendice a questo capitolo.

Esercizio.

Un motore asincrono trifase a 4 poli, alimentato alla frequenza di rete (50 Hz) ha le curve caratteristiche riportate nella parte sinistra di Fig. 6.6. A) Si ricavi dalla figura il valore della velocità nominale ω_n . B) Si determini di quanto aumenta rispetto alla corrente nominale la corrente nel motore quando questo eroga la coppia massima

Soluzione. A) Dall'espressione della velocità di sincronismo si ricava

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

ovvero $n_s = 1500$ giri/min. Dato che in condizioni nominali si ha $M=M_n$, si entra nel grafico di $100M/M_n$ in corrispondenza dell'ordinata 100 e si trova la condizione in cui il motore eroga la coppia nominale: per $100n/n_s = 95$. Si ottiene $n = n_s \cdot 95/100 = 1500 \cdot 95/100 = 1425$ giri/min = 150 rad/s.

B) Il grafico mostra che in condizioni nominali si ha ovviamente $100I/I_n = 100$. In corrispondenza del funzionamento a coppia massima si ha $100I/I_n = 375$. Pertanto la corrente di coppia massima è $I=375I_n/100 = 3.75I_n$

Per un motore a combustione interna la Fig. 6.7 riporta le curve caratteristiche per diverse condizioni di alimentazione del combustibile (diverse posizioni dell'acceleratore). I diversi grafici riportano: l'andamento della potenza (in cavalli) in funzione della velocità angolare (in giri al minuto); l'andamento della potenza (in kW) in funzione della velocità angolare (in rad/s); l'andamento della coppia (in Nm) in funzione della velocità angolare (in rad/s). In tutti i casi la curva superiore corrisponde alla massima alimentazione di combustibile ed è detta di *massima potenza*. Mentre il motore elettrico asincrono eroga una coppia non nulla anche a velocità zero e può quindi avviarsi da solo, il motore a combustione interna non può funzionare al di sotto di una velocità minima (orientativamente attorno ai 1000 giri/min) e necessita di un dispositivo ausiliario

di avviamento (*motorino di avviamento*). Mentre il motore elettrico asincrono può raggiungere una velocità (di sincronismo) alla quale non eroga coppia e questa velocità mantiene se non c'è coppia resistente, il motore a combustione interna può fornire coppia (e potenza) anche ad elevate velocità: quindi in assenza di coppia resistente o di forze di attrito significative aumenta la propria velocità oltre ai limiti di corretto funzionamento (*fuori giri*) dove le forze di inerzia e la non corretta lubrificazione lo deteriorano rapidamente. Il passaggio dalle curve di coppia $M(\omega)$ a quelle di potenza $P(\omega)$ (o viceversa) è immediato in quanto per ogni ω basta moltiplicare il valore di $M(\omega)$ per quello di ω (o viceversa dividere quello di $P(\omega)$ per ω).

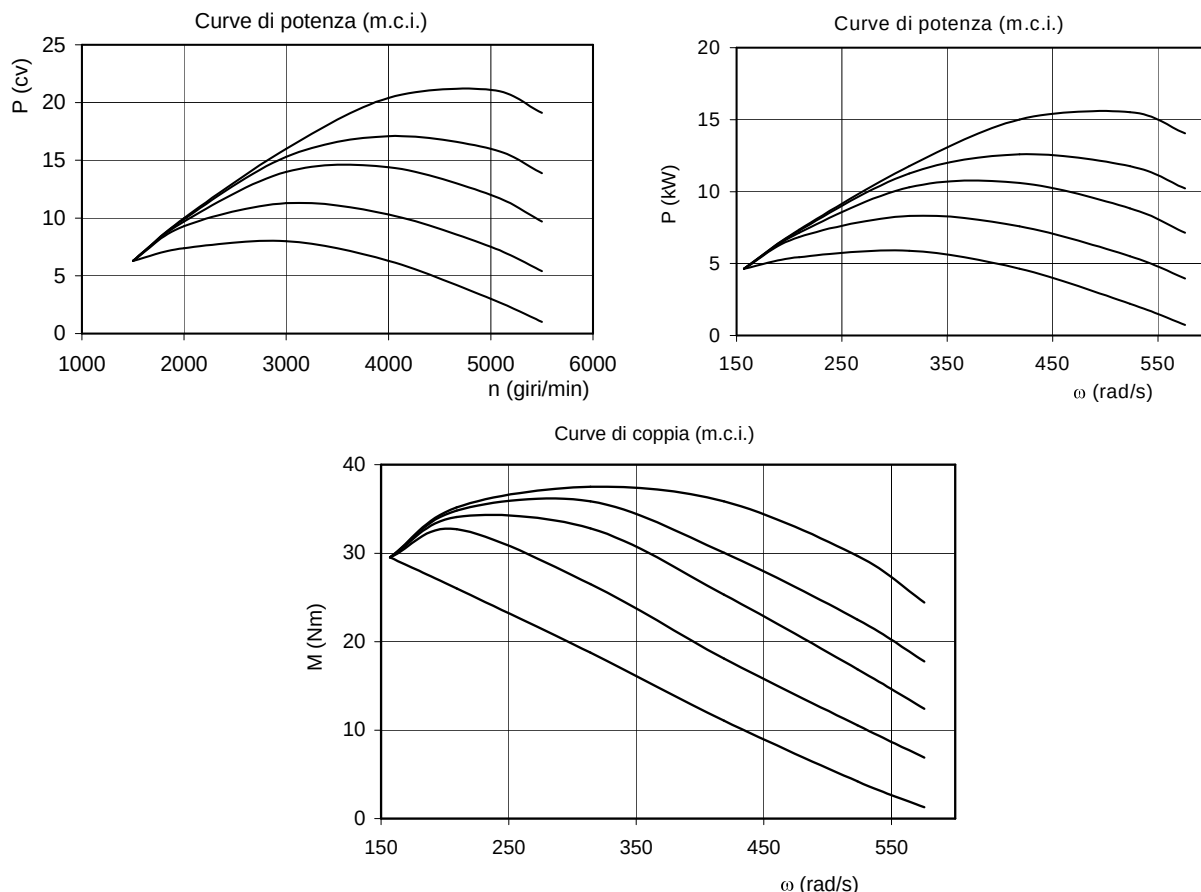
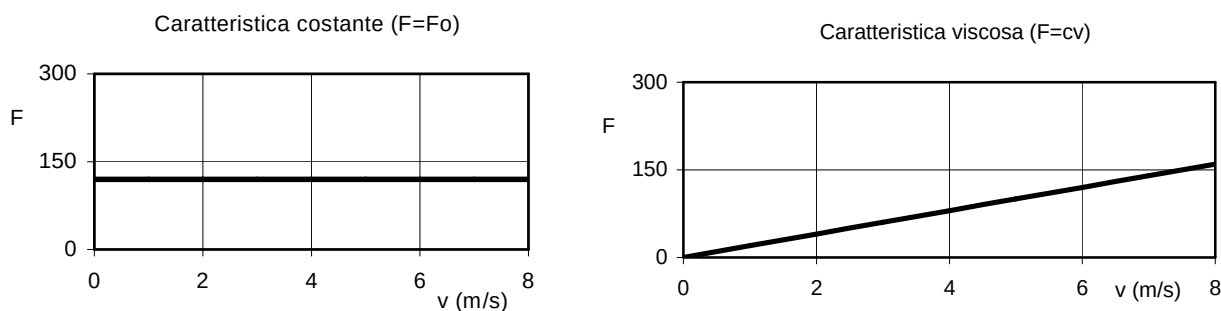


Fig. 6.7 Curve caratteristiche (potenza e coppia) di un motore a combustione interna

6-2.4 CARATTERISTICHE STATICHE DI CARICHI

Anche per i carichi (forze o coppie) possono essere determinate curve caratteristiche. I casi più frequenti (almeno come ragionevole approssimazione di carichi reali) sono (Fig. 2.8):

- 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.



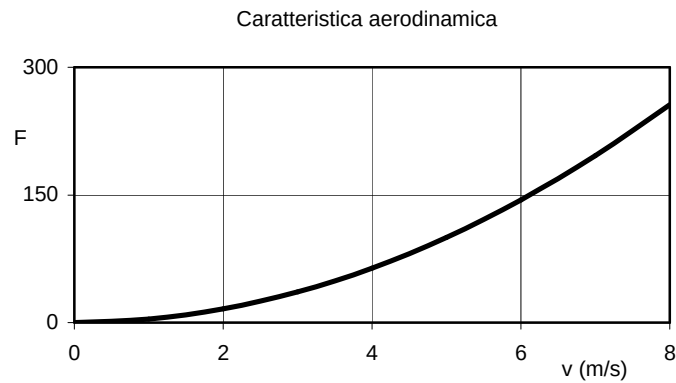


Fig. 6.8 Curve caratteristiche di carichi meccanici tipici

6-3 Analisi a regime di macchine

6-3.1 ANALISI A REGIME DI UNA MACCHINA CON MOTORE ASINCRONO E RIDUTTORE DI VELOCITÀ

La Fig. 6.9 schematizza una macchina con un riduttore di velocità inserito tra il motore ed il carico.

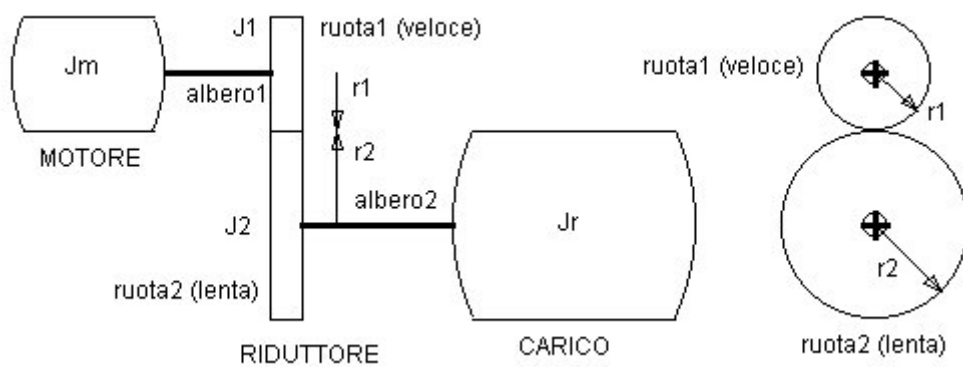


Fig. 6.9 Trasmissione con riduttore di velocità inserito tra motore e carico

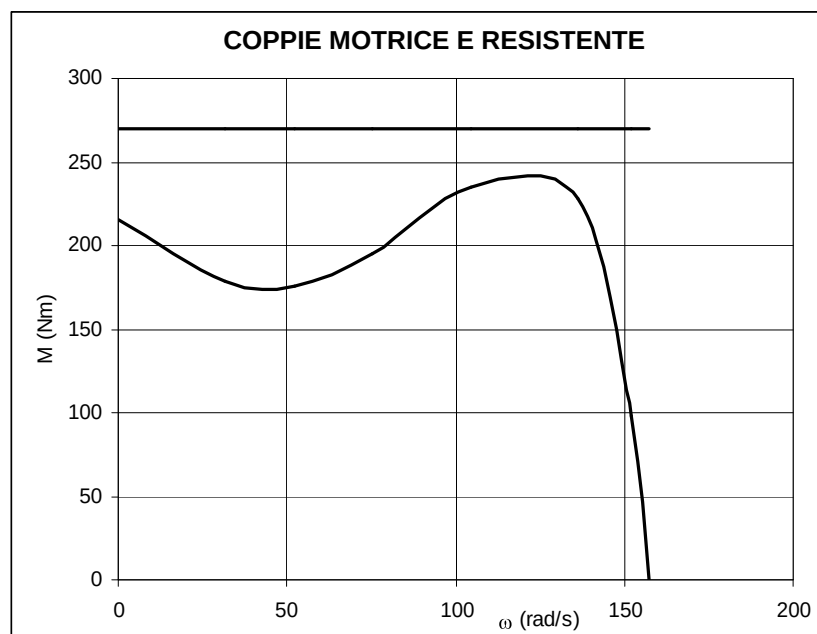


Fig. 6.10 Coppie motrice e resistente senza trasmissione

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

Sono noti:

- caratteristica meccanica del motore motore asincrono trifase: è riportata in Fig. 6.10 e nella tabella qui sopra;
- caratteristica meccanica del carico: coppia costante pari a $M_r = 270$ Nm, riportata nella Fig. 6.10;
- tipo e dimensioni della trasmissione: si suppone inizialmente di voler effettuare il collegamento diretto fra motore e carico, senza riduttore; pertanto $\tau = 1$ e $\eta = 1$.

La Fig. 6.10 mostra che la coppia resistente M_r è sempre superiore alla coppia motrice M_m per qualunque velocità di rotazione del motore. Non esistono pertanto punti ove valga la (6.9) che in assenza di trasmissione diventa

$$M_m = M_r$$

Non è dunque possibile il funzionamento a regime.

Volendo utilizzare il motore assegnato per far muovere il carico occorre inserire una trasmissione che consenta di rispettare la (6.9) in condizioni accettabili di funzionamento del motore. Una buona scelta è far ruotare a regime il motore alla sua velocità nominale, che da tabella risulta essere $\omega_{mn} = 152$ rad/s e fargli quindi erogare la coppia nominale che risulta $M_{mn} = 98$ (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 (di frizione oppure dentate) con rendimento $\eta = 0.95$, la (6.9) diventa

$$\eta M_{mn} - \tau M_r = 0 \quad 0.95 \cdot 98 - \tau \cdot 270 = 0$$

da cui si può ricavare

$$\tau = 0.95 \cdot 98 / 270 = 0.345 = 1/2.9$$

il che mostra che occorre una trasmissione che riduca la velocità del motore di circa 3 volte. In condizioni di regime il motore ruoterà alla velocità nominale di 152 rad/s (1450 giri/min) e il carico a 52 rad/s (497 giri/min).

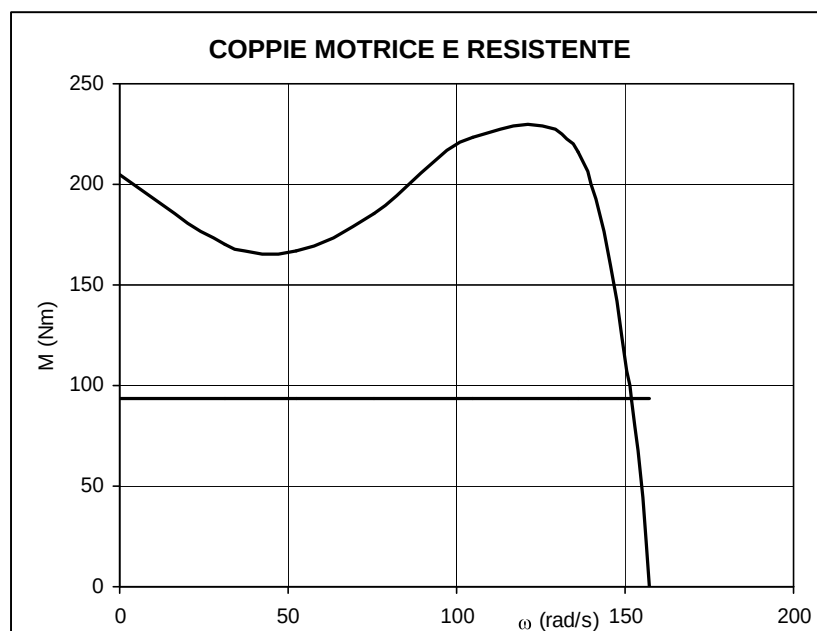


Fig. 6.11 Coppie motrice e resistente con trasmissione $\tau = 0.345$

In Fig. 6.11 sono mostrati gli andamenti di ηM_m e di τM_r 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 la (6.9). Tale condizione corrisponde, per costruzione, alla condizione di funzionamento nominale del motore.

Se si utilizzasse una riduzione di velocità più spinta, per esempio con $\tau = 0.2 = 1/5$, i grafici delle coppie ηM_m e τM_r in funzione della velocità angolare del motore diventerebbero quelli della Fig. 6.12 (quello di ηM_m è ovviamente lo stesso di Fig. 6.11, quello di τM_r 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.

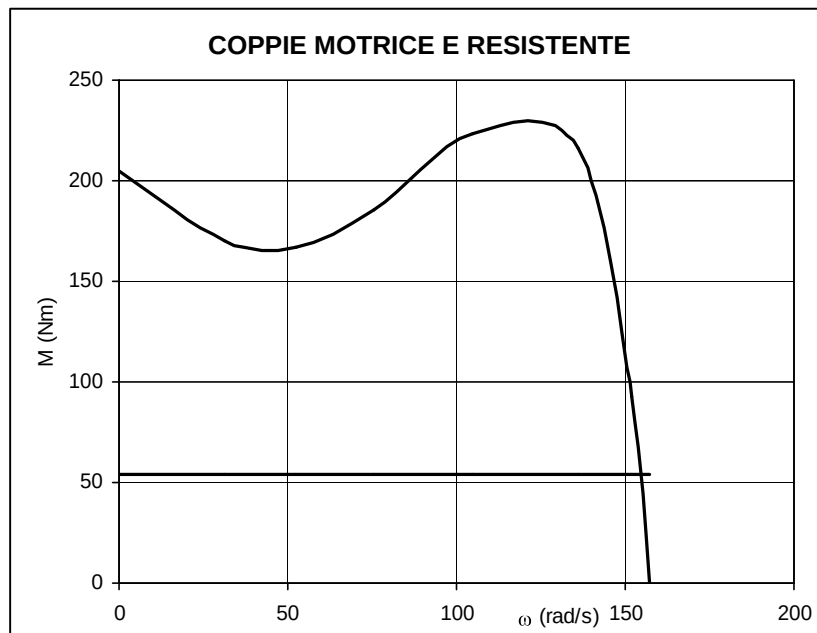


Fig. 6.12 Coppie motrice e resistente con trasmissione $\tau = 0.2$

6-3.2 ANALISI IN TRANSITORIO DI UNA MACCHINA CON RIDUTTORE DI VELOCITÀ

Per analizzare la dinamica della macchina in transitorio della macchina in Fig. 6.9, in accordo con la (6.10) occorre conoscere, oltre ai dati precedenti:

- 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

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

Sostituendo questa espressione nella (6.10) si ottiene, per il moto vario,

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

che generalizza la (6.11) al caso di trasmissione con inerzia non trascurabile.

La presenza della trasmissione lega fra di loro le velocità angolari di motore e carico ($\tau = \omega_r / \omega_m$), per cui si può eliminare dalla precedente relazione una qualunque delle velocità: se si sostituisce ω_r

$= \tau \omega_m$, si ottiene l'equazione di moto della macchina ridotta al motore

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

ovvero, indicando il termine in parentesi come *inerzia ridotta al motore* J_m^*

$$\dot{\omega}_m = \frac{\eta M_m - \tau M_r}{J_m^*} \quad (6.15)$$

Per risolvere l'equazione differenziale (6.15) bisogna conoscere la coppia motrice e quella resistente in funzione delle rispettive velocità angolari, $M_m = f(\omega_m)$, $M_r = g(\omega_r)$. Se queste funzioni sono note, l'integrazione della (6.15) può essere effettuata in via numerica.

Molto 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. Una discussione più ampia sulle caratteristiche di riduttori e motoriduttori è sviluppata nel capitolo 10. 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 essere 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:

- J_m : momento di inerzia del motore, kg m^2 ;
- J_i : momento di inerzia del riduttore riferito all'albero veloce, kg m^2 ;
- J_r : momento di inerzia del carico, kg m^2 ;
- τ : rapporto di trasmissione del riduttore.

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

$$J_m^* = (J_m + J_i) + \tau^2 J_r \quad (6.16)$$

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 $J_r = 2 \text{ kg m}^2$, da un riduttore con rapporto di trasmissione $\tau = 0.18$ e inerzia ridotta all'albero veloce $J_i = 0.05 \text{ kg m}^2$. Determinare il momento di inerzia della macchina J_m^* ridotto all'albero motore e il momento di inerzia della macchina J_r^* ridotto all'albero del carico.

Il momento di inerzia del rotore del motore elettrico è riportato nella tabella in Appendice e vale $J_m = 0.065 \text{ kg m}^2$, quello della macchina ridotto all'albero motore J_m^* è calcolabile con la (6.16)

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

Il momento di inerzia della macchina ridotto all'albero del carico corrisponde al termine in parentesi rotonda della (6.13) in cui al momento di inerzia del rotore del motore si aggiunga il momento di inerzia della trasmissione ridotto all'albero del motore. Pertanto

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

Si può verificare che $J_m^* = \tau^2 J_r^*$

6-4 Analisi a regime di un argano per sollevamento barche

Si vuol analizzare un sistema di sollevamento per barche (Fig. 6.13) costituito da un argano elettrico (a destra), una fune, uno scivolo e una culla sulla quale viene appoggiata la barca da sollevare.

Sono dati:

- massa massima che si vuol sollevare (barca + culla) $m = 4000 \text{ kg}$

- velocità massima di salita $v=0.5$ m/s
- pendenza percentuale dello scivolo $h=18\%$
- diametro del tamburo su cui si avvolge la fune $D=250$ mm
- fattore di attrito volvente fra ruote della culla e scivolo $f_v=0.04$
- tipo di motore da utilizzare: elettrico asincrono trifase a 4 poli, alimentato alla frequenza di rete.

Uno schema che rappresenta funzionalmente la soluzione adottata per l'argano è riportato in Fig. 6.16: essa prevede un corpo di forma cilindrica detto *tamburo* (U) sul quale si avvolge la fune e, tra questo e il motore, una trasmissione il cui elemento principale è un riduttore di velocità a due stadi: quello più a monte è realizzato con una trasmissione a *cinghie trapezie*, l'altro con due ruote dentate che formano un *ingranaggio* (R). Fra l'ingranaggio e il tamburo è interposto un *innesto a frizione* (I) per consentire di mantenere in moto il motore a velocità pressoché costante (intorno alla velocità nominale) e disinserire o inserire gradualmente il carico, senza brusche sollecitazioni quali altrimenti si avrebbero con un accoppiamento rigido. Un *freno a nastro* principale (F) consente di rallentare e bloccare il carico (deve essere a valle dell'innesto per agire sul carico anche quando l'innesto è aperto). Un *freno autobloccante* (A2) e un *arpionismo* (A1) impediscono al carico sollevato di invertire il movimento e procedere in discesa a meno che l'operatore non abiliti questo movimento.

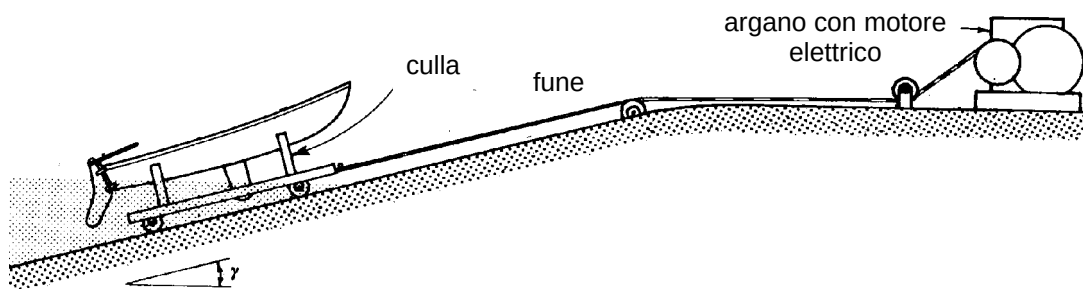


Fig. 6.13 Schema del sistema di sollevamento

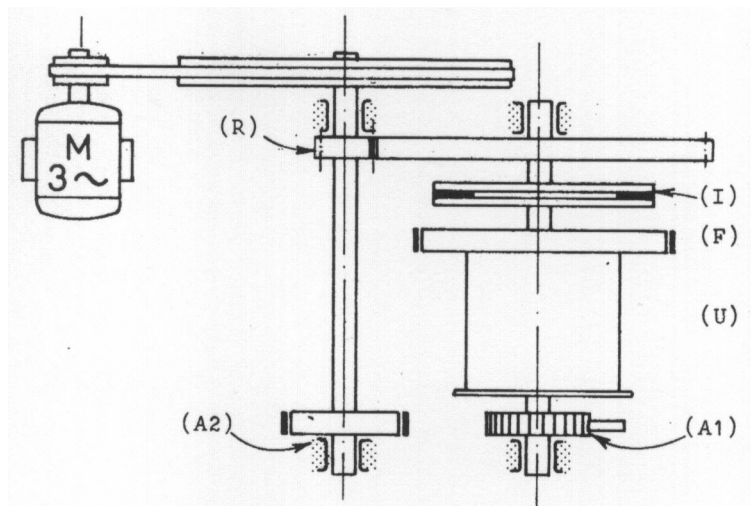


Fig. 6.14 Soluzione funzionale dell'argano

L'analisi dell'argano viene effettuata in condizioni di regime per il carico massimo da sollevare. La velocità di sincronismo del motore a 4 poli alimentato alla frequenza di rete è 157 rad/s. Quella nominale ω_n è un po' inferiore, dipende dalla potenza del motore e, orientativamente la si può stimare in circa 150 rad/s. Questa velocità sarà (teoricamente) raggiunta a regime quando l'argano solleva il carico massimo. La velocità di rotazione del tamburo, a regime, è

$$\omega_t = 2v/D = 4 \text{ rad/s}$$

per cui fra motore e tamburo va interposto un riduttore di velocità con rapporto di trasmissione

$$\tau = \omega_t / \omega_n = 0.027 = 1/37.5$$

La riduzione con una sola coppia di ruote è troppo spinta per l'applicazione (ingombro e costo eccessivo) ed è stata suddivisa in due, con rapporti poco diversi

$$\tau_c = 0.157 = 1/6.35 \quad \tau_i = 0.169 = 1/5.90$$

il primo realizzato con un riduttore a cinghie il secondo con un ingranaggio. Il riduttore a cinghie (che resiste a forze minori rispetto all'ingranaggio) viene posto per primo a valle del motore, dato che lì le velocità sono maggiori e quindi le coppie sono minori. La conseguente riduzione di velocità fa ruotare l'albero intermedio alla velocità

$$\omega_i = \tau_c \omega_n = 23.7 \text{ rad/s}$$

I rendimenti dei due meccanismi sono stimati $\eta_c = 0.94$, $\eta_i = 0.95$. A sua volta il tamburo ha un rendimento stimabile in $\eta_t = 0.95$ per cui il rendimento complessivo della trasmissione risulta essere

$$\eta = \eta_c \eta_i \eta_t = 0.85$$

La potenza resistente nel caso ideale si ottiene moltiplicando la velocità di sollevamento del carico per la componente delle forze agenti sulla barca in direzione della velocità, che è la direzione dello scivolo. Le forze agenti sono: il peso F_g , che ha componente nella direzione detta pari a

$$F_g = mg \sin \gamma = 7025 \text{ N}$$

la forza F_v necessaria per mantenere in rotazione le ruote, che, come si è visto nel capitolo 3, è proporzionale alla componente del peso che si scarica sullo scivolo, ed è quindi

$$F_v = f_v mg \cos \gamma = 1545 \text{ N}$$

e la resistenza aerodinamica che, data la modesta velocità di sollevamento, è trascurabile. L'angolo di inclinazione dello scivolo γ si ricava dalla pendenza con la relazione $\tan(\gamma) = h/100 = 0.18$. Pertanto la forza resistente e la potenza resistente sono

$$F_r = F_g + F_v = 8570 \text{ N}$$

$$P_r = (F_g + F_v)v = 4285 \text{ W} = 4.285 \text{ kW}$$

La potenza motrice viene immediatamente ricavata dalla relazione (6.5)

$$P_m = \frac{P_r}{\eta} = 5.04 \text{ kW}$$

Dal catalogo dei motori elettrici (Vedere Appendice) si verifica che non esiste un motore che abbia potenza nominale pari a quella calcolata. Occorre quindi scegliere un motore con potenza nominale maggiore, ad esempio da 5.5 kW (BN 132S) o anche superiore.

All'atto dell'ordinazione di questo od altro motore alla casa costruttrice occorre specificare le condizioni di esercizio previste: numero di poli (4), potenza nominale (5.5 kW), ambiente di lavoro, tipo di applicazione, variazione del carico (frequenza di carichi massimi, medi e minimi), tipo di servizio (continuo o intermittente), numero massimo di inserzioni orarie, tempo di impiego giornaliero.

I momenti sui diversi alberi possono essere calcolati a partire da quello agente sull'albero del tamburo M_t (albero lento) dato dal prodotto della forza resistente per il raggio del tamburo e diviso per il rendimento di questo

$$M_t = F_r D / (2\eta_t) = 1128 \text{ Nm}$$

passando poi a quello sull'albero intermedio M_i , ottenuto moltiplicando M_t per il rapporto di trasmissione dell'ingranaggio e dividendo per il rendimento di questo

$$M_i = \tau_i M_t / \eta_i = 201 \text{ Nm}$$

per finire con il momento motore M_m (sull'albero veloce) ottenuto moltiplicando M_i per il rapporto di trasmissione della trasmissione a cinghia e dividendo per il rendimento di questa

$$M_m = \tau_c M_i / \eta_c = 34 \text{ Nm}$$

Le velocità angolari e i momenti agenti sui 3 alberi sono riassunti in tabella.

ALBERO	MOMENTO (Nm)	VELOCITÀ ANGOLARE (rad/s)	POTENZA (kW)
Tamburo	1128	4	4.510
Intermedio	201	23.7	4.747
Motore	34	150	5.05

Il motore gira veloce, l'albero intermedio gira più lento per la riduzione della trasmissione a cinghia, l'albero del tamburo gira ancora più lento per l'ulteriore riduzione dell'ingranaggio. La velocità diminuisce dal motore al carico mentre la coppia aumenta: è minima sull'albero motore, media sull'albero intermedio, massima sull'albero del tamburo. La potenza decresce un poco dal motore al carico per via del rendimento della trasmissione.

In Fig. 6.15 è riportato un disegno di gruppo dell'argano.

- 1 telaio
- 2 arpionismo
- 3 puleggia volano per cinghie trapezie
- 4 leva di comando dell'innesto
- 5 leva del freno autobloccante
- 6 tamburo del freno atobloccante
- 7 nastro del freno autobloccante
- 8 pedale del freno principale
- 9 albero di appoggio del tamburo, dell'innesto e della ruota dentata 13
- 10 innesto a frizione conico
- 11 molla
- 12 coppia elicoidale vite-madrevite
- 13 ruota dentata dell'ingranaggio
- 14 pignone dell'ingranaggio
- 15 freno a nastro principale
- 16 tamburo di avvolgimento della fune

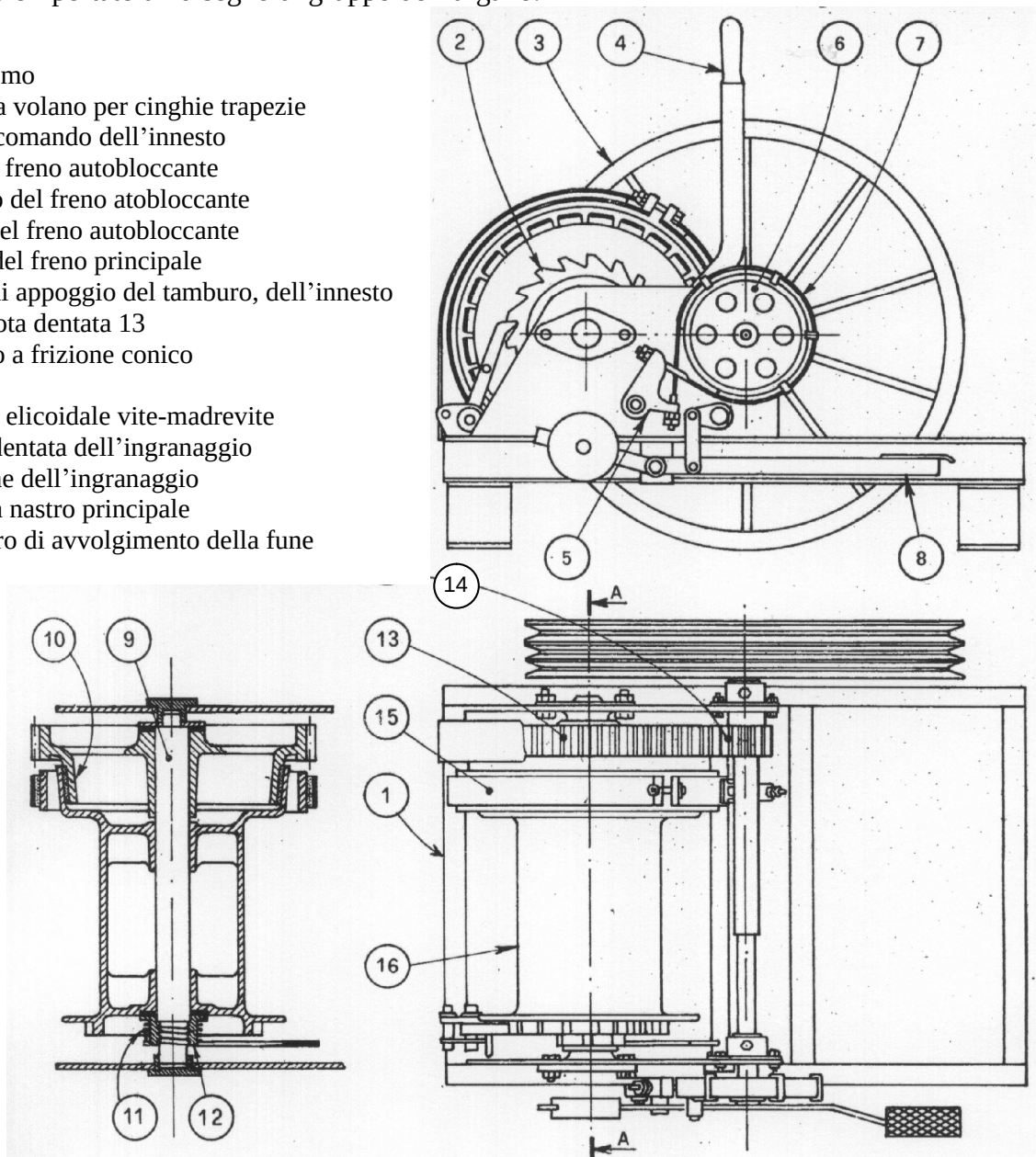


Fig. 6.15 Disegno di gruppo dell'argano

6-5 Analisi a regime di un riduttore per autoveicolo

Date le caratteristiche di coppia di un motore a combustione interna per autotrazione e della forza resistente di un autoveicolo da turismo che procede in pianura, verificare se motore e veicolo possono essere accoppiati direttamente. Si assume la densità dell'aria pari a $\rho=1.225 \text{ kg/m}^3$.

Il motore a combustione interna in oggetto fornisce coppia (e potenza) in un determinato campo di velocità angolare, in questo caso da un minimo di 120 rad/s (circa 1150 giri/min) ad un massimo di 660 rad/s (circa 6300 giri/min).

DATI DEL MOTORE

La seguente tabella riporta il valore della coppia del motore (M_m) in condizioni di massima alimentazione (pedale dell'acceleratore completamente premuto) in funzione della sua velocità angolare (ω_m); nella stessa tabella sono riportati anche i valori della potenza motrice (P_m) in funzione della stessa velocità angolare, ottenuti dalla definizione $P_m = M_m \omega_m$. I rispettivi grafici sono riportati nelle Fig. 6.16 e 6.17.

Velocità angolare del motore ω_m (rad/s)	Coppia motrice M_m (Nm)	Potenza motrice P_m (kW)
120	78	9.4
240	87	21
360	90	32
480	85	41
600	73	44
660	65	43

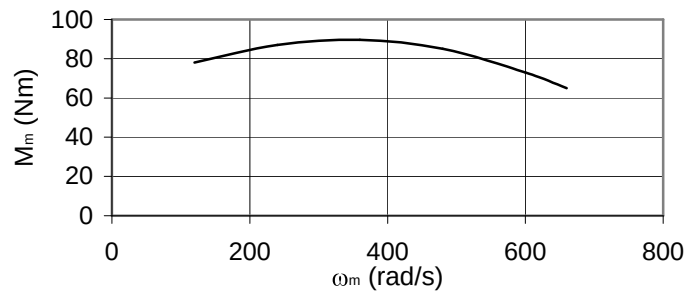


Fig. 6.16 Caratteristica di coppia del motore a combustione interna

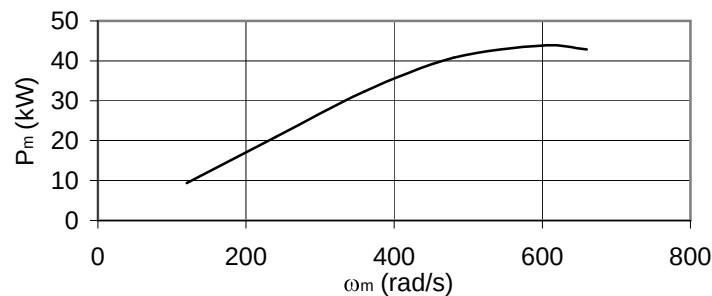


Fig. 6.17 Caratteristica di potenza del motore a combustione interna

DATI DEL VEICOLO

- $m = 1225$ kg, massa a pieno carico
- $c_x = 0.4$ coefficiente di resistenza aerodinamica
- $A = 1.8$ m² sezione maestra del veicolo nella direzione di avanzamento
- $f_v = 0.015$ fattore di attrito al rotolamento (pneumatico-asfalto)
- $r = 0.3$ m raggio di rotolamento delle ruote (raggio delle ruote sotto carico)

SOLUZIONE

La forza resistente F_r che si oppone all'avanzamento del veicolo in pianura è la somma di due termini:

- la forza di rotolamento necessaria a vincere l'effetto dell'attrito volvente, che per la (3.8) risulta essere $F_v = f_v mg$

- la forza necessaria a vincere la resistenza aerodinamica che il veicolo incontra quando avanza a velocità v , la cui espressione è da $F_p = \frac{1}{2} c_x \rho A v^2$

pertanto

$$F_r = F_v + F_p \quad (6.17)$$

Con i dati del problema si ottiene la seguente tabella che fornisce i valori della forza resistente in funzione della sua velocità di avanzamento. La potenza resistente può essere calcolata dalla definizione $P_r = F_r v$.

Velocità del veicolo v (m/s)	Forza resistente F_r (N) in pianura	Potenza resistente P_r (kW) in pianura
0	180	0
5	193	0,965
10	232	2,32
15	297	4,455
20	387	7,74
25	505	12,625
30	648	19,44
35	816	28,56
40	1010	40,4

Le Fig. 6.18 e 6.19 riportano i grafici di forza di trazione e potenza resistente in pianura.

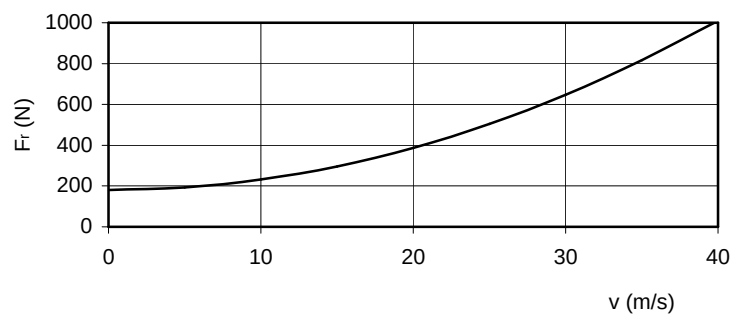


Fig. 6.18 Forza di trazione in pianura

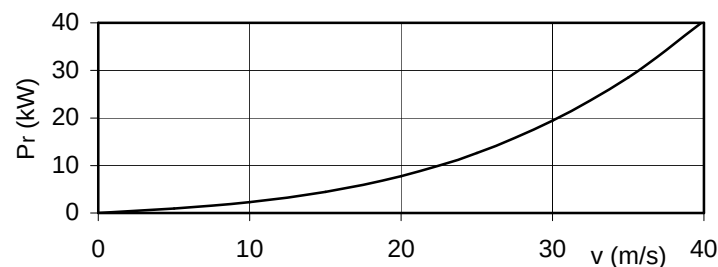


Fig. 6.19 Potenza resistente in pianura

Dalle tabelle o dal grafico di Fig. 6.19 si vede che la potenza richiesta per far avanzare in pianura il veicolo alla velocità di 40 m/s (circa 145 km/h) è di 40 kW; dalle tabelle o dal grafico di Fig. 6.17 si vede che il motore può fornire una potenza massima poco superiore ai 40 kW. Il motore sembra dunque adatto per questo veicolo, almeno per il funzionamento in pianura.

L'esercizio richiede di verificare se esiste condizione di regime quando motore e ruote del veicolo sono direttamente collegate, ossia quando la velocità angolare delle ruote ω_r risulta sempre uguale a quella del motore ω_m ; la velocità di avanzamento v del veicolo, in assenza di strisciamento fra ruote e terreno, può essere ottenuta dalla (1.2), ossia $v = r\omega_r = r\omega_m$.

Pertanto nella tabella di P_m in funzione di ω_m si può aggiungere una colonna che riporta anche i valori di $v = r\omega_m$ e riportare in un grafico l'andamento di P_m in funzione di ω_m (Fig. 6.20).

Velocità angolare del motore ω_m (rad/s)	Potenza motrice P_m (kW)	Velocità del veicolo v con collegamento diretto (m/s)
120	9.4	36
240	21	72
360	32	108
480	41	144
600	44	180
660	43	198

Questo grafico può essere ora confrontato con quello di P_r anche esso in funzione di v (Fig. 6.20).

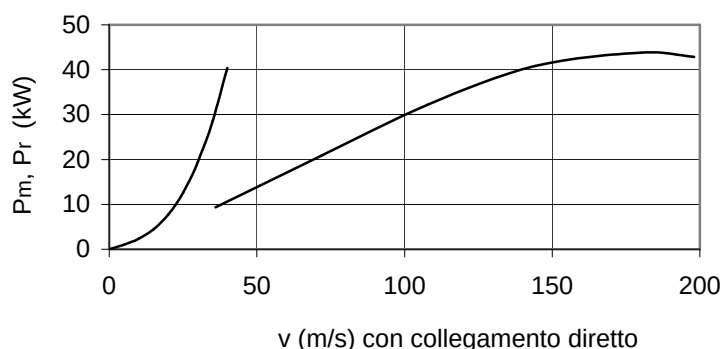


Fig. 6.20 Potenza resistente e motrice con collegamento diretto

Dalla figura si vede che, nel campo di funzionamento del motore non esiste alcuna condizione di regime per la quale sia cioè $P_m = P_r$. Infatti la potenza resistente è, per ogni valore della velocità, sempre maggiore della potenza motrice. Non è dunque possibile collegare direttamente il motore alle ruote del veicolo, ma occorre ridurne la velocità con apposita trasmissione.

Se anziché adottare l'accoppiamento diretto tra motore e ruote, si introduce un riduttore di velocità con un rapporto di trasmissione $\tau = 0.28$ ed un rendimento $\eta = 0.92$, la presenza del riduttore comporta $\omega_r = \tau \omega_m$ e per conseguenza $v = r \omega_r = r \tau \omega_m$. Peraltro la condizione di regime diventa $P_r = \eta P_m$.

Nella tabella di P_m in funzione di ω_m si possono ora aggiungere due colonne che riportano anche i valori di $v = r \tau \omega_m$ e ηP_m . I grafici di ηP_m e di P_r in funzione di v sono riportati in Fig. 6.21.

Velocità angolare del motore ω_m (rad/s)	Potenza motrice P_m (kW)	Velocità del veicolo v (m/s)	Potenza ηP_m (kW)
120	9.4	10	8.6
240	21	20	19
360	32	30	29
480	41	40	38
600	44	50	40.5
660	43	55	39.5

Dalla figura si vede che esiste un valore di v per il quale la potenza motrice, diminuita del rendimento del riduttore, è uguale a quella resistente (le curve si intersecano, $P_r = \eta P_m$): è possibile il funzionamento a regime del veicolo utilizzando la potenza del motore (a meno del rendimento del riduttore). Dal grafico si vede anche che la condizione di regime si verifica a una velocità un po' inferiore a circa 40 m/s (circa 150 km/h) e che è stabile. Velocità di regime inferiori possono essere ottenute alimentando il motore con minor flusso di combustibile, dato che in questo modo si

abbassa la curva della potenza motrice e l'intersezione con la curva di potenza resistente si sposta a sinistra.

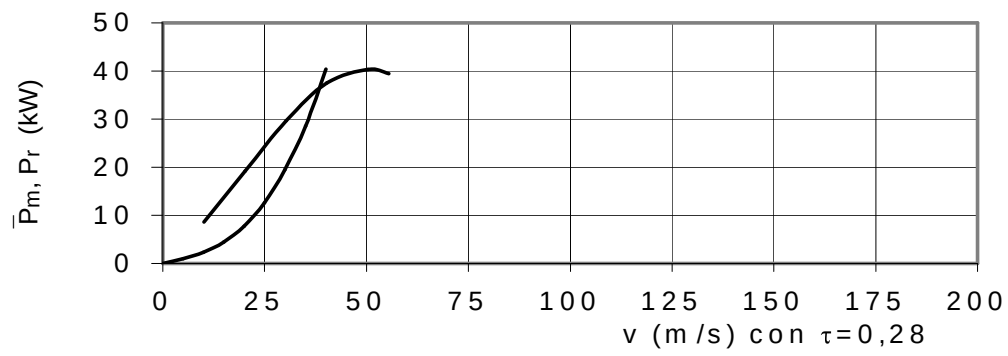
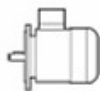


Fig. 6.21 Potenza resistente e motrice con trasmissione

APPENDICE - Esempi di motori asincroni trifase con rotore a gabbia

MOTORI A 2 POLI 3000 min⁻¹ 50Hz

Pn		n	Mn	η	cos φ	In	Is	Ms	Ma	Jm	IM B5	
kW		min ⁻¹	Nm	%		A (400 V)	In	Mn	Mn	x 10 ⁻⁴ kgm ²		
0.18	BN 63A	2	2700	0.64	53	0.78	0.63	3.0	2.1	2	2.0	3.5
0.25	BN 63B	2	2700	0.88	62	0.78	0.75	3.3	2.3	2.3	2.3	3.9
0.37	BN 63C	2	2750	1.29	64	0.79	1.06	3.9	2.6	2.6	3.3	5.1
0.37	BN 71A	2	2810	1.26	70	0.78	0.98	4.8	2.8	2.6	3.5	5.4
0.55	BN 71B	2	2810	1.87	73	0.77	1.41	5.0	2.9	2.8	4.1	6.2
0.75	BN 71C	2	2800	2.6	74	0.77	1.90	5.1	3.1	2.8	5.0	7.3
0.75	BN 80A	2	2800	2.6	74	0.78	1.88	4.8	2.6	2.2	7.8	8.6
1.1	BN 80B	2	2800	3.8	76	0.77	2.71	4.8	2.8	2.4	9.0	9.5
1.5	BN 80C	2	2800	5.1	80	0.81	3.3	4.9	2.7	2.4	11.4	11.3
1.5	BN 90SA	2	2870	5.0	78	0.78	3.6	5.9	2.7	2.6	12.5	12.3
1.85	BN 90SB	2	2880	6.1	79	0.79	4.3	6.2	2.9	2.6	16.7	14
2.2	BN 90L	2	2880	7.3	79	0.79	5.1	6.3	2.9	2.7	16.7	14
3	BN 100L	2	2860	10.0	80	0.80	6.8	5.7	2.6	2.2	31	20
4	BN 100LB	2	2870	13.3	82	0.81	8.7	5.9	2.7	2.5	39	23
4	BN 112M	2	2900	13.2	83	0.84	8.3	6.9	3	2.9	57	28
5.5	BN 132SA	2	2890	18.2	83	0.85	11.3	6	2.6	2.2	101	35
7.5	BN 132SB	2	2900	25	84	0.86	15.0	6.4	2.6	2.2	145	42
9.2	BN 132M	2	2900	30	86	0.87	17.7	6.9	2.8	2.3	178	53
11	BN 160MR	2	2910	36	87	0.86	21	7.0	2.9	2.5	210	65
15	BN 160MB	2	2930	49	88	0.86	29	7.1	2.6	2.3	340	84
18.5	BN 160L	2	2930	60	89	0.86	35	7.6	2.7	2.3	420	97
22	BN 180M	2	2930	72	89	0.87	41	7.8	2.6	2.4	490	109
30	BN 200LA	2	2960	97	90	0.88	55	7.9	2.7	2.9	770	140

Legenda:

P_n: potenza nominale; n: velocità nominale; η: rendimento del motore

cos φ: fattore di potenza in condizioni nominali

I_n: corrente nominale

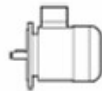
I_s/I_n: rapporto fra la corrente di spunto e la corrente nominale

M_s/M_n: rapporto fra la coppia di spunto e la coppia nominale

M_a/M_n: rapporto fra la coppia accelerante media e la coppia nominale

J_m: momento di inerzia del rotore del motore

MOTORI A 4 POLI 1500 min⁻¹ 50Hz

Pn		n	Mn	η	$\cos \varphi$	In	Is	Ms	Ma	Jm	IM B5
kW		min ⁻¹	Nm	%		A (400V)	In	Mn	Mn	x 10 ⁻⁴ kgm ²	
0.06	BN 56A	4	1350	0.42	47	0.62	0.30	2.6	2.3	2.0	3.1
0.09	BN 56B	4	1350	0.64	52	0.62	0.40	2.6	2.5	2.4	3.1
0.12	BN 63A	4	1310	0.88	51	0.68	0.50	2.6	1.9	1.8	3.5
0.18	BN 63B	4	1320	1.30	53	0.68	0.72	2.6	2.2	2.0	3.9
0.25	BN 63C	4	1320	1.81	60	0.69	0.87	2.7	2.1	1.9	5.1
0.25	BN 71A	4	1375	1.74	62	0.77	0.76	3.3	1.9	1.7	5.1
0.37	BN 71B	4	1370	2.6	65	0.77	1.07	3.7	2.0	1.9	5.9
0.55	BN 71C	4	1380	3.8	69	0.74	1.55	4.1	2.3	2.3	7.3
0.55	BN 80A	4	1390	3.8	72	0.77	1.43	4.1	2.3	2.0	8.2
0.75	BN 80B	4	1400	5.1	75	0.78	1.85	4.9	2.7	2.5	9.9
1.1	BN 80C	4	1400	7.5	75	0.79	2.68	5.1	2.8	2.5	11.3
1.1	BN 90S	4	1400	7.5	73	0.77	2.82	4.6	2.6	2.2	12.2
1.5	BN 90LA	4	1410	10.2	77	0.77	3.7	5.3	2.8	2.4	13.6
1.85	BN 90LB	4	1400	12.6	77	0.78	4.4	5.2	2.8	2.6	15.1
2.2	BN 100LA	4	1410	14.9	78	0.76	5.4	4.5	2.2	2.0	18.3
3	BN 100LB	4	1410	20	80	0.78	6.9	5	2.3	2.2	22
4	BN 112M	4	1420	27	83	0.78	8.9	5.6	2.7	2.5	30
5.5	BN 132S	4	1440	36	84	0.80	11.8	5.5	2.3	2.2	44
7.5	BN 132MA	4	1440	50	85	0.81	15.7	5.7	2.5	2.4	53
9.2	BN 132MB	4	1440	61	86	0.81	19.1	5.9	2.7	2.5	59
11	BN 160MR	4	1440	73	87	0.82	22.3	5.9	2.7	2.5	70
15	BN 160L	4	1460	98	89	0.82	29.7	5.9	2.3	2.1	99
18.5	BN 180M	4	1460	121	89	0.81	37.0	6.2	2.6	2.5	115
22	BN 180L	4	1465	143	89	0.82	45	6.5	2.5	2.5	135
30	BN 200L	4	1465	196	90	0.83	58	7.1	2.7	2.8	157

Legenda:

Pn: potenza nominale; n: velocità nominale; η : rendimento del motore
 $\cos \varphi$: fattore di potenza in condizioni nominali; In: corrente nominale
 I_s/I_n : rapporto fra la corrente di spunto e la corrente nominale
 M_s/M_n : rapporto fra la coppia di spunto e la coppia nominale
 M_a/M_n : rapporto fra la coppia accelerante media e la coppia nominale
Jm: momento di inerzia del rotore del motore

MOTORI A 6 POLI 1000 min⁻¹ 50Hz

Pn		n	Mn	η		In	Is	Ms	Ma	Jm x 10 ⁻⁴	IM B5
kW		min ⁻¹	Nm	%	cos φ	A (400V)	In	Mn	Mn	kgm ²	
0.09	BN 63A	6	880	0.98	41	0.53	0.60	2.1	2.1	1.8	4.6
0.12	BN 63B	6	870	1.32	45	0.60	0.64	2.1	1.9	1.7	4.9
0.18	BN 71A	6	900	1.91	56	0.69	0.67	2.6	1.9	1.7	5.5
0.25	BN 71B	6	900	2.7	62	0.71	0.82	2.6	1.9	1.7	6.7
0.37	BN 71C	6	910	3.9	66	0.69	1.17	3	2.4	2.0	7.7
0.37	BN 80A	6	910	3.9	68	0.68	1.15	3.2	2.2	2.0	9.9
0.55	BN 80B	6	920	5.7	70	0.69	1.64	3.9	2.6	2.2	11.3
0.75	BN 80C	6	920	7.8	70	0.65	2.38	3.8	2.5	2.2	12.2
0.75	BN 90S	6	920	7.8	69	0.68	2.31	3.8	2.4	2.2	12.6
1.1	BN 90L	6	920	11.4	72	0.69	3.2	3.9	2.3	2.0	15
1.5	BN 100LA	6	940	15.2	73	0.72	4.1	4	2.1	2.0	22
1.85	BN 100LB	6	930	19.0	75	0.73	4.9	4.5	2.1	2.0	24
2.2	BN 112M	6	940	22	78	0.73	5.6	4.8	2.2	2.0	32
3	BN 132S	6	940	30	76	0.76	7.5	4.8	1.9	1.8	36
4	BN 132MA	6	950	40	78	0.77	9.6	5.5	2.0	1.8	45
5.5	BN 132MB	6	945	56	80	0.78	12.7	5.9	2.1	1.9	56
7.5	BN 160M	6	955	75	84	0.81	15.9	5.9	2.2	2.0	83
11	BN 160L	6	960	109	87	0.81	22.5	6.5	2.5	2.3	103
15	BN 180L	6	970	148	88	0.82	30	6.2	2.0	2.4	130
18.5	BN 200LA	6	960	184	88	0.81	37	5.9	2.0	2.3	145

Legenda:

P_n: potenza nominale

n: velocità nominale

η: rendimento del motore

cos φ: fattore di potenza in condizioni nominali

I_n: corrente nominale

I_s/I_n: rapporto fra la corrente di spunto e la corrente nominale

M_s/M_n: rapporto fra la coppia di spunto e la coppia nominale

M_a/M_n: rapporto fra la coppia accelerante media e la coppia nominale

J_m: momento di inerzia del rotore del motore

MOTORI A 8 POLI 750 min⁻¹ 50Hz

P _n kW		n min ⁻¹	M _n Nm	η %	cos φ	I _n A (400V)	$\frac{I_s}{I_n}$	$\frac{M_s}{M_n}$	$\frac{M_a}{M_n}$	J _m x 10 ⁻⁴ kgm ²	IM B5 
0.09	BN 71A	8	680	47	0.59	0.47	2.3	2.4	2.3	10.9	6.7
0.12	BN 71B	8	680	51	0.59	0.58	2.1	2.3	2.2	12.9	7.7
0.18	BN 80A	8	690	51	0.60	0.85	2.4	2.2	2.2	15	8.2
0.25	BN 80B	8	680	54	0.63	1.06	2.4	2.0	1.9	20	9.9
0.37	BN 90S	8	675	58	0.60	1.53	2.6	2.3	2.1	26	12.6
0.55	BN 90L	8	670	62	0.60	2.13	2.6	2.2	2.0	33	15
0.75	BN 100LA	8	700	68	0.63	2.53	3.4	1.9	1.7	82	22
1.1	BN 100LB	8	700	68	0.64	3.65	3.2	1.7	1.7	95	24
1.5	BN 112M	8	710	71	0.66	4.6	3.7	1.8	1.9	168	32
2.2	BN 132S	8	710	75	0.66	6.4	3.8	1.8	2.0	295	45
3	BN 132MA	8	710	76	0.69	8.3	3.9	1.6	1.8	370	53

Legenda:

P_n: potenza nominale

n: velocità nominale

η: rendimento del motore

cos φ: fattore di potenza in condizioni nominali

I_n: corrente nominale

I_s/I_n: rapporto fra la corrente di spunto e la corrente nominale

M_s/M_n: rapporto fra la coppia di spunto e la coppia nominale

M_a/M_n: rapporto fra la coppia accelerante media e la coppia nominale

J_m: momento di inerzia del rotore del motore