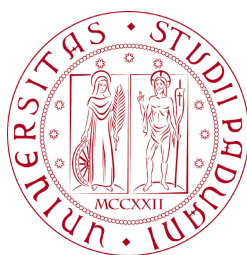


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
FACOLTÀ DI INGEGNERIA



Finito di scrivere il giorno 8 settembre 2010 utilizzando L^AT_EX 2_ε

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

—
DIPARTIMENTO DI INNOVAZIONE MECCANICA E GESTIONALE

—
TESI DI LAUREA TRIENNALE IN INGEGNERIA
DELL'AUTOMAZIONE

MOTORI ASINCRONI PER L'AUTOMAZIONE INDUSTRIALE

RELATORE: CH.MO PROF. ING. GIULIO ROSATI

LAUREANDO: ROBERTO CHIENAROLI

ANNO ACCADEMICO 2009-2010

alla mia famiglia...

*“Felix qui potuit rerum cognoscere causas -
Felice colui a cui fu dato conoscere le cause delle cose.”*

VIRGILIO, GEORGICHE, II, 489

Indice

Sommario	XI
Introduzione	XIII
1 Struttura e funzionamento	1
1.1 Principio di funzionamento	1
1.2 Struttura generale	4
1.3 Statore	7
1.4 Rotore	8
1.4.1 Rotore a gabbia di scoiattolo	9
1.4.2 Rotore avvolto	10
1.5 Funzionamento con rotore fermo	11
1.6 Funzionamento con rotore in movimento	11
1.6.1 Scorrimento	11
1.6.2 Fenomeni tensioni-correnti nel funzionamento a vuoto . . .	12
1.6.3 Presenza di coppia al carico	13
1.6.4 Potenze e rendimenti	15
1.7 Curve caratteristiche	18
1.7.1 Caratteristica elettrica	18
1.7.2 Curva coppia-velocità	20
1.8 Motore asincrono monofase	24
1.8.1 Funzionamento di un MAT con alimentazione monofase . .	25
2 Avviamento	27
2.1 Avviamento con reostato	27

2.2	Avviamento con tensione ridotta	29
2.2.1	Resistori rotorici variabili	30
2.2.2	Auto-trasformatore	32
2.2.3	Stella-triangolo (Y/D)	33
2.2.4	Soft starting	35
2.3	Inversione marcia	37
3	Variazione velocità	39
3.1	Controllo velocità con asincrono	39
3.1.1	Variazione della resistenza	41
3.1.2	Cambiamento dei poli	41
3.1.3	Modifica del modulo della tensione di alimentazione	42
3.2	Variazione frequenza	44
3.2.1	Inverter: schema a blocchi	45
3.2.2	Modalità di funzionamento	45
3.2.3	Controllo con inverter	48
3.2.3.1	Parametri di regolazione di un inverter scalare	48
4	Disponibilità del mercato	51
4.1	Dati di targa	51
4.1.1	Gamma Nerimotori:	53
4.1.2	Gamma Orientalmotor	54
4.1.3	Gamma Motoinverter	54
4.2	Peculiarità rispetto ad un motore in c.c.	57
5	Scelta motore	61
	Conclusioni	67
	Glossario	69
	Bibliografia	71

Sommario

In questo elaborato è stato presentato per prima cosa il suo principio di funzionamento, e cioè l'origine della coppia motrice, per poi analizzare la struttura della macchina in maggior dettaglio, presentando le diverse tipologie. Si è passati successivamente all'analisi del funzionamento del motore, ricavando i grafici della coppia motrice e della corrente assorbita in funzione della velocità riuscendo a capire meglio il comportamento generale di questo tipo di motori ed in particolare il concetto di velocità auto-regolata. Si è passati poi alla descrizione dei metodi di avviamento per ridurre i problemi di spunto quali coppia limitata ed elevata corrente assorbita. Fatto ciò è stata fatta la descrizione dei metodi di controllo della velocità del rotore, ed in particolare dei metodi di variazione della velocità nominale. Sono stati presi a titolo di esempio i data sheet di alcuni costruttori e successivamente un esempio di dimensionamento del motore per un nastro trasportatore.

Introduzione

Il motore asincrono trifase (MAT) fu inventato nel 1885 da Galileo Ferraris. Esso rappresenta il motore elettrico più semplice, economico, robusto ed affidabile che la tecnica conosca. È ad elevato rendimento, non richiede lubrificazione, né manutenzione, non presenta alcuna difficoltà o particolarità per l'avviamento e, pertanto, è il dispositivo più diffuso nell'utilizzazione dell'energia elettrica come "forza motrice". Può inoltre essere semplicemente collegato direttamente alla rete di distribuzione con tensione e frequenza costanti se non si desidera una precisa velocità di utilizzo.

Il principio che sta alla base del suo funzionamento è il campo magnetico rotante generato nello statore per mezzo di circuiti fissi nello spazio e attraversati da correnti polifasi (solitamente trifasi). Esistono anche realizzazioni di motori asincroni monofase per applicazioni di piccola potenza.

Se facciamo un confronto tra MAT ed altri tipi di motori elettrici riscontriamo i seguenti *vantaggi*:

- peso ed ingombro ridotti a parità di potenza
- mancanza di particolari dispositivi di eccitazione prelevando, direttamente dalla rete, la potenza magnetizzante necessaria per creare il flusso induttore della macchina
- è autoavviante
- sviluppa, spontaneamente ed automaticamente, variando la propria velocità, una coppia motrice atta a controbilanciare la coppia resistente applicata all'albero motore, determinando un funzionamento stabile (all'aumentare del carico rallenta)

- sovraccaricabilità, anche il 100% della sua potenza nominale; esigenze di manutenzione molto ridotte, semplicità di esercizio ed alto rendimento

ed i seguenti *svantaggi*:

- all'avviamento, con inserzione diretta sulla rete, la corrente di spunto può risultare anche 4 - 10 volte maggiore della corrente assorbita a pieno carico, con problemi alla rete di distribuzione (cadute di tensione) ed agli interruttori
- questa corrente risulta, inoltre, essere tanto sfasata rispetto alla tensione (come nei trasformatori in corto circuito) che la coppia motrice sviluppata dal motore all'avviamento, detta coppia di spunto, è piccola nonostante l'elevato valore della corrente assorbita
- la velocità di rotazione del MAT, nel campo di funzionamento normale, praticamente costante, perché strettamente legata alla frequenza della corrente di alimentazione
- la coppia massima (proporzionale al quadrato del rapporto tra il valor efficace della tensione di alimentazione e la frequenza) costante ed ad una ben precisa velocità

Si intuisce quindi facilmente che qualora avessimo bisogno di determinate e precise velocità o coppie, il MAT non è l'ideale. Nel caso in cui, invece, non siamo interessati ad una determinata velocità dell'albero motore, ivi è il regno incontrastato di applicazione del MAT: montacarichi, gru, ascensori, macchine utensili tradizionali, pompe, ventilatori sono da decenni azionati in maniera soddisfacente da questo tipo di motore. Caratteristica importante del MAT è la sua capacità di "auto-regolarsi" qualora cambiasse il carico che movimentava il motore, riuscendo quindi a mantenere una velocità pressoché costante (entro certi limiti di variazione del carico).

Oggigiorno l'elettronica di potenza, grazie ad inverter e modulatori di fase, rendono il MAT ancora più flessibile per maggiori utilizzi. Si ha infatti che la velocità del motore asincrono è strettamente legata alla frequenza (e intensità)

della rete di alimentazione. Riuscendo quindi a comandare la frequenza in ingresso al motore, si riesce a realizzare un controllo per il MAT. Si tratta comunque di un controllo non preciso che non può essere paragonato ad un controllo di motori in corrente continua, brushless o passo-passo, ma che riesce comunque ad aumentare il campo di utilizzo del motore trifase asincrono. Il maggiore utilizzo di MAT si ha comunque per applicazioni semplici e senza l'ausilio di controllo.

In conclusione il MAT è, generalmente, sotto l'aspetto elettrico, un utilizzatore trifase che provvede a convertire energia elettrica in meccanica per azionare meccanismi semplici ed economici, viene alimentato direttamente dalla rete, a tensione e frequenza costanti, e la sua velocità di rotazione è praticamente costante in quanto lo scarto di velocità, da vuoto a pieno carico, non supera, generalmente, il 4%.

Si può anche notare che:

- il motore asincrono può funzionare con un'alimentazione qualunque di tensioni polifase simmetrica, ma poiché la rete fornisce un'alimentazione trifase, nella pratica vengono realizzati esclusivamente motori asincroni trifase (esistono anche i motori asincroni monofase ma sono molto poco diffusi)
- questa macchina può essere usata anche come generatore ma questo tipo di utilizzo è assai poco diffuso, se non per un uso di "freno motore"

Capitolo 1

Struttura e funzionamento

1.1 Principio di funzionamento

Come per qualsiasi altro motore elettrico, il principio di funzionamento del motore asincrono si basa sulle azioni meccaniche (forze) che si esercitano tra magneti/elettromagneti e correnti. Com'è noto dalla fisica queste forze sollecitano i conduttori quando sono percorsi da corrente ed “immersi” in un campo magnetico. In particolare quando la corrente che transita nel conduttore è perpendicolare alla direzione del campo magnetico, sul conduttore sarà esercitata una forza di

$$F = i * l * B$$

misurata in Newton quando la corrente i è misurata in ampere, l'intensità B del campo magnetico in Tesla e la lunghezza l del conduttore in metri.

Mentre nei motori con un principio di funzionamento più semplice, come quelli a corrente continua, si ha un campo magnetico fisso generato da magneti permanenti, il funzionamento del MAT si basa sull'impiego del *campo magnetico rotante*. Vediamo concretamente cosa accade prendendo in esame il caso in cui una spirale (di materiale conduttore) è immersa in un campo magnetico rotante come illustrato in figura 1.1:

Consideriamo il caso in cui la spirale abbia un perno e possa quindi ruotare liberamente (a velocità ω_0) attorno al suo asse, che è parallelo o anche coincidente con quello di rotazione del campo magnetico B . Supponiamo che il campo magnetico del vettore induzione \vec{B} sia uniforme e che tutte le linee di flusso costituiscano

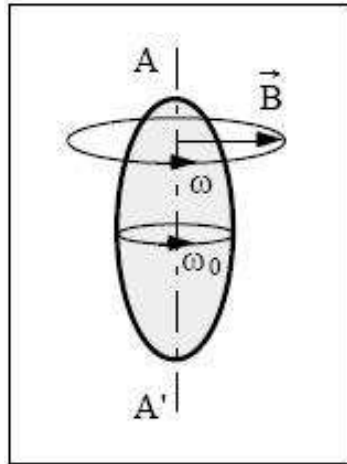


Figura 1.1: Spira in campo magnetico rotante [1]

un complesso solidale rotante con velocità angolare ω intorno all'asse A - A', in verso antiorario per chi guarda da A. Si avranno quindi fenomeni di induzione elettromagnetica sulla spira (legge di Faraday) quando $\omega \neq \omega_0$; nel caso in cui $\omega = \omega_0$, invece, non si avrebbe una variazione del flusso elettromagnetico, e quindi non ci sarebbero fenomeni elettromagnetici e quindi tantomeno coppie motrici.

Nel caso in cui la spira fosse ferma ($\omega_0 = 0$) si avrebbe che il flusso del campo magnetico concatenato con essa varierebbe nel tempo con andamento sinusoidale a pulsazione ω . Per la legge di Faraday questa variazione di flusso genererà nella spira una f.e.m. indotta che a sua volta genererà una corrente indotta anche lei con pulsazione ω . Per la legge di Lenz questa corrente indotta sarà tale da opporsi alla variazione che l'ha causata, e tenderà quindi ad annullare o comunque diminuire l'entità del moto relativo. Si avrà quindi, in pratica, che la spira inizierà a muoversi nello stesso verso di rotazione del campo magnetico rotante B, cercando quindi di diminuire la velocità relativa del campo B rispetto alla spira, come illustrato in figura 1.2:

I ben noti fenomeni elettromagnetici che danno luogo a coppie meccaniche, hanno luogo, nel sistema considerato, solo se nella spira circola corrente. Questa corrente non può esistere che per "induzione", la quale può sostenersi *solo se* la spira ruota in maniera "asincrona" rispetto al campo rotante, cioè ruota con una velocità angolare diversa da ω ; nasce da qui l'aggettivo "asincrono" adoperato per

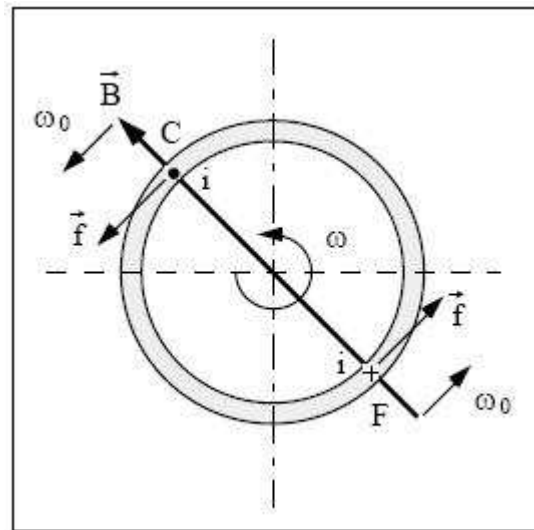


Figura 1.2: Generazione coppia motrice nel motore asincrono [1]

definire questo tipo di motore, o anche motore ad “induzione”¹ non tanto perché il fenomeno dell’induzione elettromagnetica sia fondamentale, come del resto lo è per tutte le macchine che sfruttano tale fenomeno, ma perché la parte rotante è sede esclusivamente di correnti indotte, indispensabili per il suo funzionamento.

Ciò detto, si evince che la spirale deve quindi ruotare attorno all’asse A-A’ con una velocità ω_0 diversa da ω . In base alla relazione tra la velocità della spirale e del campo magnetico si possono distinguere i seguenti casi:

- nel caso in cui $0 < \omega_0 < \omega$ la coppia motrice generata dalla corrente indotta sulla spirale è concorde con il verso di rotazione del campo magnetico, e si avrà quindi un funzionamento di *motore*
- se invece $\omega_0 > \omega$ si avrà l’effetto contrario: la coppia generata sarà discorde con il verso del campo magnetico, e si avrà un funzionamento da *generatore*
- supposto il campo magnetico con verso di rotazione positiva $\omega > 0$ ed avendo la spirale che si muove forzatamente con verso opposto, $\omega_0 < 0$ si avrà un funzionamento da *freno*

Concettualmente anche nel funzionamento di generatore si ha una sorta di freno con una coppia motrice che tende a frenare la spirale, però in questo funzionamento

¹nella cultura anglosassone viene chiamato “induction motor”

viene inviata sulla rete molta energia elettrica, mentre nel funzionamento di freno vi è una consistente parte di energia persa per effetto joule.

Qui verrà trattato prevalentemente il funzionamento di motore, in quanto è il tipo di uso prevalente nelle applicazioni industriali di nostro interesse.

Si può quindi ora capire cosa si intende quando si dice che il MAT è capace di auto-regolarsi (in regime di motore), cioè di mantenere la stessa velocità con una variazione della coppia al carico lasciando invariata l'alimentazione: si ha questo perchè, una volta raggiunto un punto di equilibrio ad una certa velocità, aumentando la coppia resistente si avrebbe una conseguente diminuzione della velocità della spira, mentre il campo magnetico rotante continuerebbe a girare alla stessa velocità. Aumenta quindi la differenza di velocità tra quella della spira e di B, con un conseguente aumento della corrente indotta nella spira che cercherà di riportarsi alla precedente velocità di scorrimento.

Quanto qui detto ha preso in esame una semplice spira ed un campo magnetico rotante, ma in linea di massima quanto detto sta alla base del funzionamento del motore asincrono.

1.2 Struttura generale

Si nota in figura che, come nel caso dei motori elettrici più comuni, anche il MAT è formato da due parti cilindriche coassiali, una esterna, fissa, chiamata statore ed una interna, che ruota libera e collegata all'albero motore chiamata rotore. Nella figura 1.3 si possono osservare le seguenti parti:

1. albero con chiavetta
2. anello della gabbia
3. sbarra di rame
4. morsettiera
5. ventola di raffreddamento
6. spaccato delle matasse degli avvolgimenti di statore

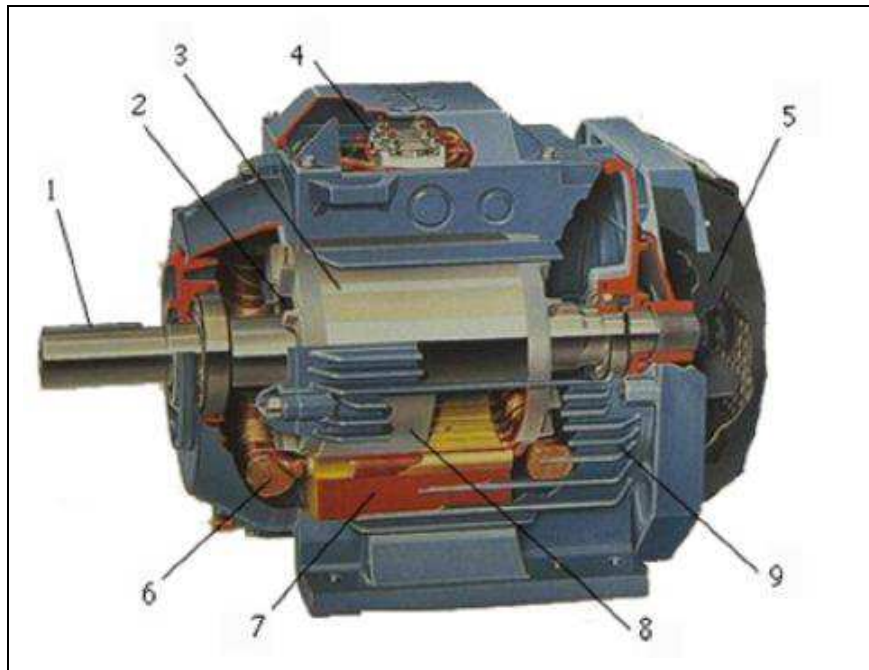


Figura 1.3: Spaccato di motore asincrono [1]

- 7. spaccato del circuito magnetico statorico
- 8. pacco del circuito magnetico rotorico
- 9. alette di raffreddamento della carcassa esterna.

Tra statore e rotore è presente una piccola intercapedine che li separa, costituita da aria, detta traferro. Questa intercapedine è sempre realizzata del minor valore possibile e valori tipici sono compresi tra qualche decimo di millimetro e qualche millimetro, a seconda della variazione della dimensione del motore. Ovviamente questo valore non può essere troppo piccolo da una parte per la presenza di giochi meccanici e imprecisioni in fase di costruzione che porterebbe ad uno sfregamento tra le parti, mentre dall'altra parte si ha un problema di raffreddamento dello statore.

Lo statore, come si vede in figura 1.4, è formato da un pacco di lamierini costituiti di ferro e silicio a forma di corona circolare, isolati tra loro, ed è munito al suo interno di cave in cui trovano posto i conduttori costituenti l'avvolgimento di statore, sempre di tipo polifase.

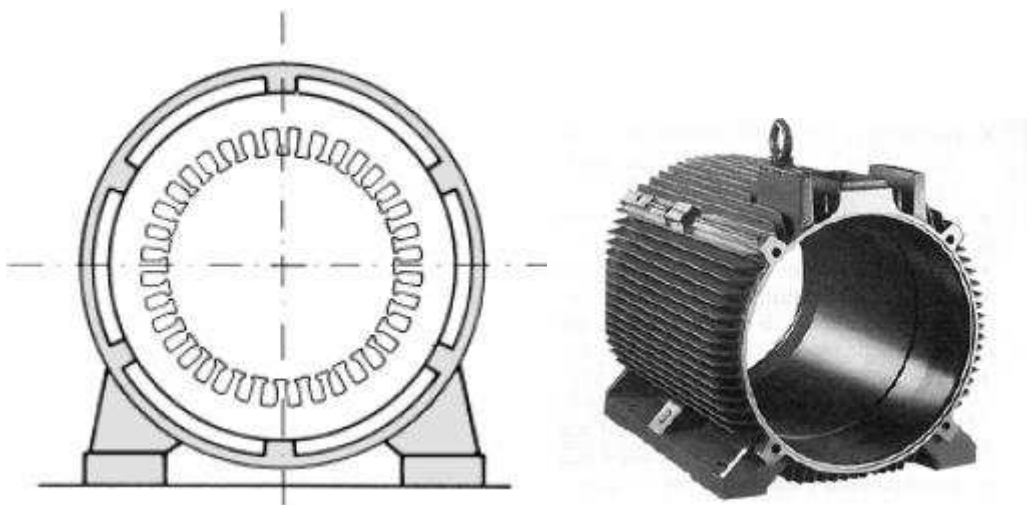


Figura 1.4: Statore e carcassa di motore asincrono [1]



Figura 1.5: Rotore macchina asincrona [1]

A sua volta lo statore è contenuto nella carcassa (Fig 1.4), che costituisce la struttura portante del MAT e prevede la possibilità di essere fissata ad un supporto rigido.

Anche il rotore, mostrato in figura 1.5, è costituito anch'esso da un pacco di lamierini di ferro arricchiti di silicio, all'interno del quale passa l'albero di rotazione e nella cui parte esterna sono disposte un certo numero di cave in cui sono allocati i conduttori che costituiscono l'avvolgimento di rotore.

Un altro aspetto da non trascurare è il problema del raffreddamento del MAT; raffreddamento che, a seconda della potenza della macchina, può essere naturale, forzata o con scambiatori di calore (aria - aria oppure aria - acqua). All'aumentare della potenza crescono le perdite e, quindi, il riscaldamento, ma la superficie disperdente della macchina non cresce secondo la stessa legge, per cui si avrà un aumento della temperatura. Ne deriva un limite superiore a questa potenza,

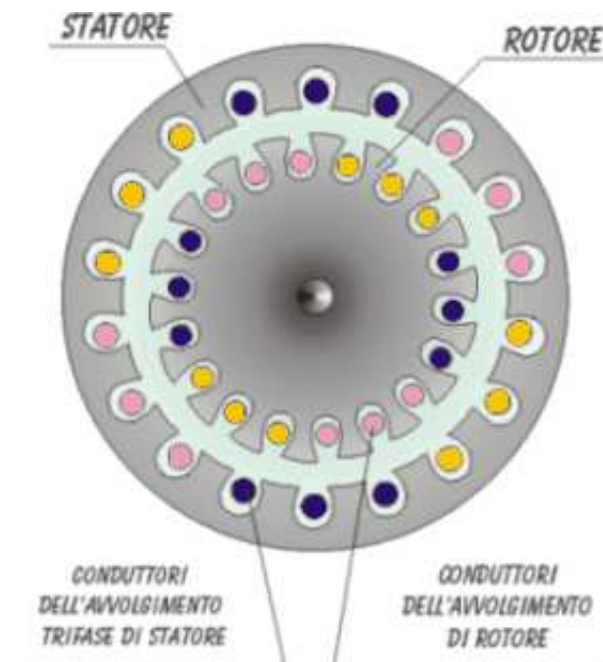


Figura 1.6: Poli rotore-statore [2]

in rapporto alle caratteristiche costruttive e al dimensionamento del MAT, non dovendosi mai raggiungere temperature eccessive tali da portare al degradamento delle parti isolanti. È per questo motivo che, nelle macchine di elevata potenza, vengono lasciati degli spazi vuoti (canali di raffreddamento) lungo lo sviluppo assiale dello statore. Bisogna anche ricordare che ogni materiale isolante ha una propria 'vita', che è il periodo di tempo durante il quale le sue caratteristiche risultano idonee alle funzioni alle quali è deputato e che è accertato che la vita dell'isolante è tanto più breve quanto più alta è la temperatura a cui lavora. Da ciò segue che, considerato che le comuni macchine elettriche sono destinate a funzionare alcune decine di anni, le temperature del MAT non devono superare determinati valori che dipendono dalla 'classe d'isolamento' dei materiali isolanti utilizzati.

1.3 Statore

Lo statore prevede un avvolgimento trifase, costruito mediante un numero "p" di coppie di poli, ed alimentato da rete trifase. Per la perfetta centratura del

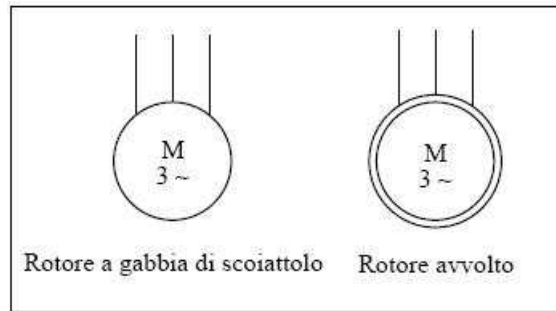


Figura 1.7: Simboli grafici del tipo di rotore [1]

rotore, dato il piccolo traferro, la parte interna dello statore e quella esterna del rotore sono passati al tornio, per correggere eventuali imperfezioni. Lo spessore del traferro deve tener conto, in special modo, delle oscillazioni del rotore o degli spostamenti dell'asse di rotazione a causa dell'usura dei cuscinetti: mai rotore e statore devono venire a contatto, pena l'irreparabile danneggiamento del motore stesso. La relazione che lega la frequenza nominale f di alimentazione, il numero di poli p e la velocità n del campo magnetico rotante è la seguente:

$$n = \frac{60f}{p}$$

ed è quindi strettamente legata al tipo all'alimentazione. Ora, essendo la frequenza f costante (a meno di utilizzare un inverter) e p un numero intero, il numero di giri al minuto n del campo magnetico rotante potrà assumere solamente certi valori e, poiché la velocità effettiva di rotazione di un MAT è solo leggermente inferiore a quella di sincronismo (1.4), queste saranno le sole velocità possibili per un MAT. Se per esempio un motore ha $p = 4$ coppie di poli, alla frequenza $f = 50$ Hz, la velocità di rotazione dell'albero è molto prossima a $n = 750$ giri/min.

1.4 Rotore

In dipendenza del tipo di avvolgimento presente sul rotore, si possono distinguere almeno 2 casi, i quali vengono rappresentati negli schemi industriali con i grafici di figura 1.7:



Figura 1.8: Rotore a gabbia di scoiattolo [1]

1.4.1 Rotore a gabbia di scoiattolo

Chiamato anche “rotore in corto-circuito” questo tipo di avvolgimento realizza il più semplice e robusto dei MAT: si infila una sbarra di rame (il materiale dipende dai metodi costruttivi ma tipicamente è rame) all’interno di ognuno dei canali del rotore, e le estremità di queste sbarre vengono chiuse da un anello (di rame), come illustrato nella figura 1.8.

Per le sue caratteristiche si avrà una resistenza di rotore molto bassa e le tensioni che si andranno a generare sul rotore non saranno elevate; nonostante non siano elevate si avranno comunque elevati valori di corrente, dato il basso valore della resistenza. In più non presenta un numero di poli proprio, ma si adegua naturalmente al numero di poli dello statore. Queste caratteristiche portano ad un inconveniente all’avviamento del motore: in queste condizione si può paragonare il MAT ad un trasformatore, dove il circuito secondario è il rotore, fermo, chiuso in corto circuito. In queste condizioni le correnti statoriche possono assumere anche 4-10 volte (a seconda dei canoni di costruzione del rotore) il valore della corrente nominale. Nonostante l’elevato valore di corrente assorbita, la coppia motrice generata allo spunto è particolarmente bassa. Pare ovvio che in applicazioni di elevata potenza questa caratteristica non sia affatto trascurabile. Bisogna quindi cercare di limitare queste elevate correnti e lo sfasamento tra tensioni e correnti

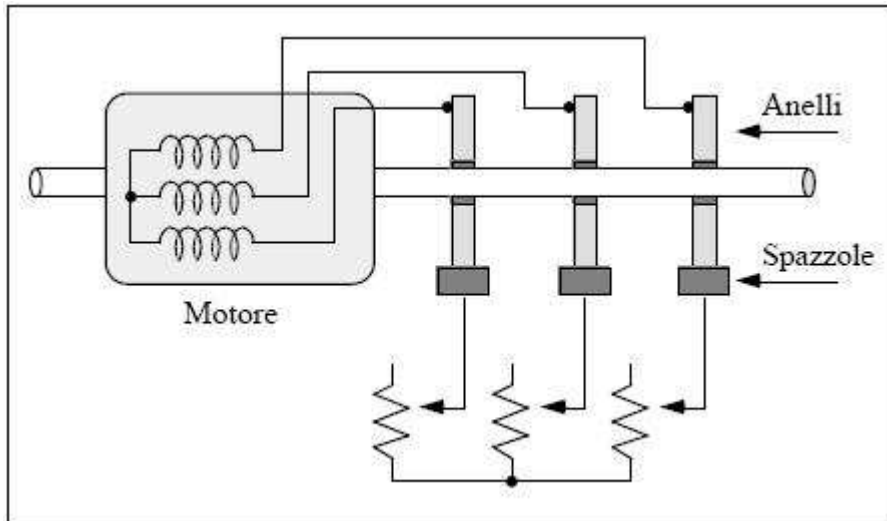


Figura 1.9: Schema rotore avvolto [1]

all'avviamento di un motore di media-elevata potenza sotto carico. Per ridurre la corrente risulta ovvio che l'operazione più semplice da effettuare sia quella di aumentare la resistenza rotorica negli istanti dell'avviamento². Per far ciò nelle applicazioni di elevata potenza si preferisce usare un tipo di rotore alternativo, il rotore avvolto.

1.4.2 Rotore avvolto

In questo tipo di configurazione del rotore, nelle cave rotoriche presenti sul rotore vi è un normale avvolgimento, simile a quello presente nello statore, di tipo trifase e collegato a stella. I capi di queste fasi vengono collegati a degli anelli conduttori, calettati sull'albero del motore ma isolati da questo, sui quali poggiano delle spazzole collegate ad un reostato esterno di avviamento, completamente inserito all'atto di chiusura dell'interruttore sulla linea, ma che va disinserito, gradualmente, all'aumento della velocità di rotazione e completamente escluso, cortocircuitato, in condizioni di normale funzionamento.

Questo reostato ha il compito, come precedentemente detto, di variare il valore della resistenza rotorica, riuscendo ad avere un'elevata resistenza rotorica all'av-

²per contro una maggiore resistenza comporterebbe un minor rendimento a regime, bisogna quindi limitare l'aumento di resistenza solo durante l'avviamento

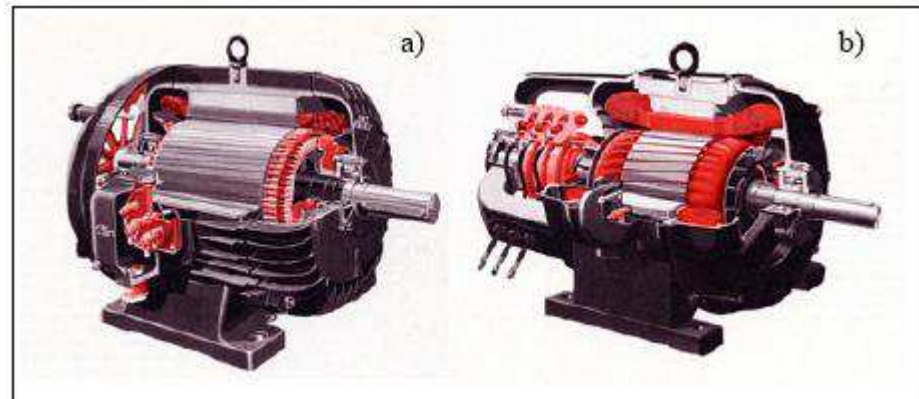


Figura 1.10: Spaccato motore con diverso tipo di rotore[1]

viamento e via via minore all'aumentare della velocità dell'albero motore, fino ad escluderlo lasciando unicamente la resistenza degli avvolgimenti. Va fatto notare che in questa configurazione il numero di poli di statore e rotore deve essere lo stesso, mentre il numero delle fasi può anche essere di valore diverso.

La figura 1.10 illustra lo spaccato di due MAT con diversa configurazione rotorica:

Per quanto visto riguardo i problemi d'avviamento del MAT, risulta comprensibile perchè si cerca di evitare di fermarlo, soprattutto in applicazioni di elevata potenza.

1.5 Funzionamento con rotore fermo

Sotto l'aspetto elettrico un MAT con rotore fermo si comporta sostanzialmente come un trasformatore trifase, in cui lo statore assume il ruolo di primario ed il rotore quello di secondario.[1]

1.6 Funzionamento con rotore in movimento

1.6.1 Scorrimento

Molto spesso quando si parla di motori asincroni, si fa uso della variabile detta "scorrimento", che lega velocità del motore e la velocità del campo magnetico

rotante, strettamente legata alla fase della rete di alimentazione.

La velocità del campo magnetico rotante è data da

$$n_o = \frac{60f}{p} \quad [\text{rpm}]$$

dove le variabili sono:

f : frequenza delle correnti statoriche

p : numero delle coppie di poli della macchina (presenti nello statore)

Detta n_2 la velocità di rotazione (sempre in RPM) del rotore, si definisce lo scorrimento

$$s = \frac{n_o - n_2}{n_o}$$

Si può notare che il numeratore di questa relazione rappresenta la velocità relativa del campo magnetico rotante rispetto ai circuiti del rotore. Si può quindi dire che lo scorrimento rappresenta la frazione di giri persi dal rotore rispetto al campo magnetico rotante, per ogni suo giro. Lo scorrimento può assumere qualsiasi valore, ma verrà qui considerato il caso in cui $s \in [0, 1]$, cioè il caso in cui il MAT si comporta proprio da motore, e non da freno o generatore. In particolare si avrà $s = 0$ quando il rotore va alla stessa velocità del campo magnetico (velocità di sincronismo) ed $s = 1$ quando il rotore è fermo (sfasamento massimo). Si può considerare lo sfasamento anche in termini delle velocità angolari ω_1 e ω_2 .

1.6.2 Fenomeni tensioni-correnti nel funzionamento a vuoto

Prendiamo in analisi il caso ideale con statore alimentato con sistema trifase (simmetrico con sfasamenti di 120° gradi quindi) di tensioni con valore efficace e frequenza nominali. Supponiamo inoltre che l'avvolgimento rotorico sia chiuso (standard) e che non sia presente una coppia resistente all'albero (oltre al carico generato dagli attriti interni, seppur limitati). In queste condizioni di funzionamento il motore inizierà a ruotare fino a portarsi ad una velocità prossima alla velocità di sincronismo (dipendente dalla frequenza nominale di alimentazione dello statore). Si passerà quindi da uno scorrimento iniziale di $s = 1$ fino ad arrivare ad $s \cong 0$. In questo caso (funzionamento a vuoto) il MAT assorbe dalla rete

di alimentazione una terna di correnti nominali comprese tra (20, 40) % del loro valore nominale.

Nella prima fase (sarà analogo per le altre 2) dei conduttori di statore, vengono indotte le f.e.m. di valore efficace (sempre per $s \cong 0$)

$$E_1 = k f N_1 \phi$$

dove k è detto fattore di Kapp, f la frequenza nominale, N il numero di avvolgimenti della fase e ϕ il flusso del campo magnetico.

Mentre sul rotore non saranno presenti f.e.m. indotte in quanto rotore e campo magnetico rotante girano alla stessa velocità (circa), non generando variazioni di flusso e conseguente tensione indotta.

Oltre al flusso principale concatenato tra avvolgimenti di statore e rotore, è presente anche un flusso che si disperde, e quindi la tensione applicata ad ogni fase statorica sarà data da (in forma fasoriale)

$$\bar{V}_1 = \bar{E}_1 + R_1 \bar{I}_{10} + j X_1 \bar{I}_{10}$$

dove X_1 è la reattanza di dispersione della fase statorica e R_1 è la resistenza di dispersione della fase statorica, entrambe attraversate da corrente \bar{I}_{10} .

In queste condizioni il MAT assorbe le potenze

$$P_0 = 3V I_0 \cos \varphi_0 \quad \text{e} \quad Q_0 = 3V I_0 \sin \varphi_0$$

La potenza attiva è dovuta (sempre nell'ipotesi di funzionamento a vuoto) alle dispersioni nel conduttore statorico, a cicli di isteresi, a causa di correnti parassite, perdite meccaniche dovute ad attriti tra cuscinetti e ventilazione per la quasi totalità e si considerano trascurabili le perdite nei circuiti rotorici.

1.6.3 Presenza di coppia al carico

Quando al MAT viene applicata una coppia resistente al carico, esso funzionerà sotto carico. In questo caso l'albero rallenterà, aumentando la velocità di sincronismo ed inducendo delle correnti rotoriche, che genereranno una coppia motrice atta a contrastare il carico. Il motore raggiungerà quindi, in breve tempo, un nuovo punto di equilibrio ad una velocità minore di quella di sincronismo. Maggiore è la coppia resistente, tanto maggiore sarà lo scorrimento s .

Inoltre le f.e.m. rotoriche indotte avranno ampiezza e frequenza che variano a seconda dello scorrimento. Le variazioni di flusso concatenato avvengono con frequenza

$$f_2 = \frac{n_0 - n_2}{60} p = \frac{n_0 - n_2}{n_0} \frac{n_0}{60} p = s f$$

dove n_0 ed n_2 sono rispettivamente le velocità del campo magnetico rotante e del rotore

e avranno valore efficace

$$E_{1s} = s E_{10} \quad ^3$$

Si può quindi notare che (come per il caso elementare di una semplice spira visto precedentemente) sia la f.e.m. indotta che la frequenza f_2 sono legate con rapporto di proporzionalità diretta allo scorrimento s . In particolare quando il rotore ruota alla velocità di sincronismo, $s=0$ si nota che sia la f.e.m. che f_2 valgono 0, in quanto non c'è nessuna variazione di flusso che può indurre delle tensioni-correnti rotoriche. E quando $s=1$, rotore fermo, $f_2 = f$ e si ha la stessa f.e.m., si ha cioè un comportamento da trasformatore.

Nel caso generico in cui $s \in (0, 1)$ le tensioni indotte presenti nel rotore, con frequenza f_2 , genereranno a loro volta un altro campo magnetico rotante, che avrà velocità

$$n = n_0 - n_2$$

ricordando però che il rotore ruota con velocità n_2 , questo campo magnetico ruota rispetto allo statore con velocità $n_0 - n_2 + n_2 = n_0$; ruota quindi alla stessa velocità del campo magnetico rotante generato dallo statore. Dal loro risultate ha origine il flusso al traferro.

Si può ora considerare, per continuare l'analisi di funzionamento del MAT, lo studio di una sola fase. Sono presenti in ogni fase le resistenze ohmiche R_1 ed R_2 degli avvolgimenti di statore e rotore. Troviamo poi in serie a queste, le reattanze di dispersione dello statore e del rotore: $X_1 = \omega_1 L_1$ e $X_2 = s X_{20}$ (sfruttando le proprietà della frequenza delle tensioni rotoriche dipendenti dallo scorrimento) dove X_{20} è la reattanza di dispersione di una fase rotorica a rotore fermo.

Avremo poi, quindi, la corrente

$$\bar{I}_2 = \frac{\bar{E}_{20}}{\frac{R_2}{s} + j X_{20}}$$

³dove il pedice 0 ricorda il motore fermo

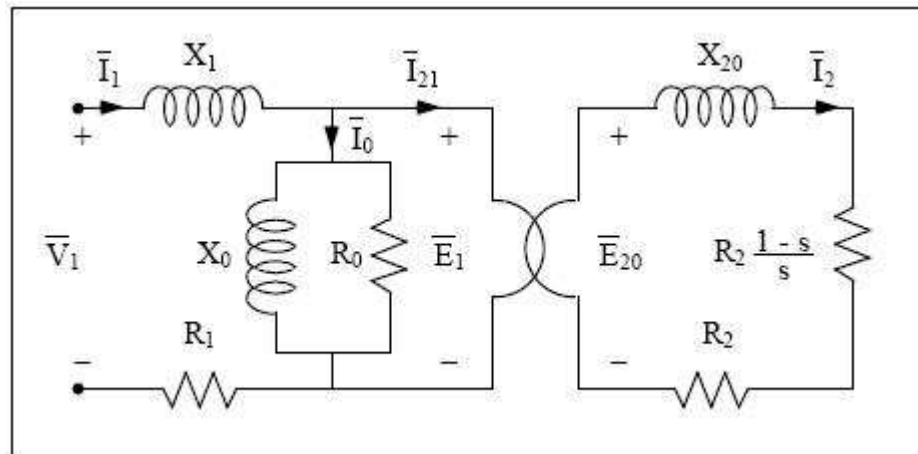


Figura 1.11: Circuito equivalente MAT[1]

che circolerà nel rotore chiuso in corto circuito. Si nota quindi che ogni fase rotorica presenta tensione e corrente a frequenza fissa, corrispondente a quella della rete, ed è come se avesse in più un resistore che varia a seconda dello scorrimento. Possiamo scomporre questo resistore variabile come segue:

$$\frac{R_2}{s} = R_2 + R_2 \frac{1-s}{s}$$

dove la parte R_2 rappresenta la vera e propria resistenza che dipende dalla fase, mentre il secondo termine si può considerare come una resistenza fittizia con lo scopo di rappresentare il carico meccanico del motore (carico che influenza lo scorrimento).

Circuiti Equivalenti Date le analogie con i trasformatori, si può quindi rappresentare ogni singola fase con un circuito equivalente, come in figura 1.11:

Troviamo in questo schema rappresentati gli avvolgimenti statorici (circuito primario), il trasformatore a rappresentare l'accoppiamento magnetico e gli avvolgimenti rotorici (circuito secondario). Si noti che è una buona rappresentazione in quanto nei casi limite troviamo quanto analizzato nei casi precedenti.[1]

1.6.4 Potenze e rendimenti

Sappiamo che, dato il tipo di alimentazione trifase simmetrica, un MAT consuma una potenza apparente

$$A = P + jQ = 3V_i I_i$$

e la potenza attiva P è data da

$$P = 3V_i I_i \cos\varphi_0$$

Ovviamente questa è la potenza assorbita dalla rete, ma non è tutta fruibile all'albero motore; parte di questa va persa per attriti ed effetti joule, riuscendo a determinare la potenza utile effettiva disponibile all'albero motore. Analizziamo quindi le potenze dissipate e non utili:

- Perdite nel ferro (considerato solo per lo statore) P_{Fe} , considerate in base alla potenza assorbita dalla resistenza R_0 :

$$P_{Fe} = 3 \frac{V_i^2}{R_0}$$

- Perdite (nello statore) P_{Cu} dovute all'effetto joule degli avvolgimenti:

$$P_{cu} = R_1 I_1^2$$

- Perdite addizionali P_{ADD} : non sono facilmente calcolabili e sono imputabili all'intera macchina. Sono dovute a correnti parassite, alla non perfetta uniformità delle correnti negli avvolgimenti e vengono poste abitualmente pari allo 0.5% della potenza *utile* del motore

Partendo quindi dalla potenza totale P abbiamo ora il valore della potenza P_T , che è il valore della potenza effettivamente trasmessa dal campo rotante al rotore. Essa si ricava quindi partendo dalla potenza totale e sottraendo le potenze dissipate:

$$P_T = P - P_{Fe} - P_{Cu} - P_{ADD}$$

Sappiamo infatti che, per il principio della conservazione dell'energia in un trasformatore, questa potenza P_T è quella entrante nel circuito primario, e quindi equivalente a quella uscente dal circuito secondario, secondo la rappresentazione realizzata nel circuito equivalente di fig1.11.

Come si nota dal circuito equivalente, questa potenza trasmessa verrà tutta dissipata nell'unico elemento dissipativo, di resistenza R_2/s :

$$P_T = 3 \frac{R_2}{s} I_2^2$$

possiamo inoltre scomporre questa potenza, portando da una parte la parte dissipativa per effetto joule negli avvolgimenti rotorici, ed ottendendo (per il principio di conservazione dell'energia) dall'altra parte, la potenza utile-meccanica disponibile all'albero motore:

$$P_T = 3\frac{R_2}{s}I_2^2 = 3R_2I_2^2 + 3R_2\frac{1-s}{s}I_2^2$$

dove il primo addendo, P_{Cu2} , rappresenta la potenza dissipata per effetto joule negli avvolgimenti rotorici ed in eventuali ulteriori resistenze (vedi reostato di avviamento)

mentre il secondo addendo rappresenta la potenza convertita in potenza meccanica utilizzabile P_C .

Analizzando le equazioni delle potenze si ricava inoltre il rapporto

$$P_{Cu2} = sP_T.$$

Chiamando P_M la potenza meccanica dovuta ad attriti o messa in movimento di sistemi di ventilazioni, abbiamo infine la potenza utile P_U data da:

$$P_U = P_C - P_M.$$

Si può ricavare un'ulteriore relazione tra potenze, molto utile per comprendere perché è bene cercare di far funzionare i MAT a velocità prossime a quelle di sincronismo:

$$P_C = (1 - s) P_T$$

che evidenzia che minore è lo scorrimento (maggiore velocità del MAT) maggiore è la potenza trasmessa convertita in meccanica.

Quanto detto è evidenziato dalla figura 1.12. L'elemento più chiaro è l'elevato valore di potenza assorbita dalla rete per velocità del motore diverse da quelle prossime a alla velocità di sincronismo. Risulta quindi evidente perché per motori di grossa taglia non si possa trascurare il valore di $P_{in,MAX}$ e bisogna prendere degli accorgimenti per ridurre la potenza assorbita all'avviamento. Quando invece il motore raggiunge velocità prossime a quella di sincronismo (basso scorrimento) la differenza da potenza assorbita e potenza generata è quasi nulla, avendo quindi un elevato rendimento.

Come in ogni altra macchina, si ha il *rendimento*, dato dal rapporto tra la potenza utile all'albero motore e la potenza resa:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}}$$

Tipicamente il valore del rendimento è proporzionale alla potenza della macchina, ed inversamente proporzionale al numero di poli della stessa. Valori tipici variano tra 0.65 per motori di ridotta potenza e 0.97 per motori con elevata potenza.

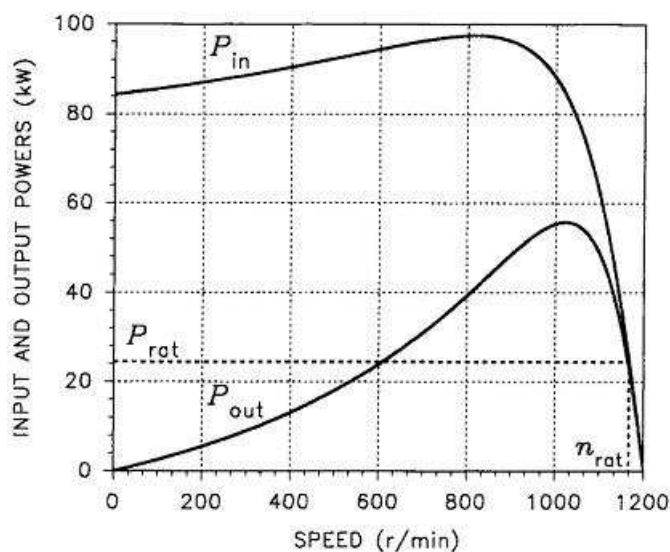


Figura 1.12: Potenza assorbita e generata [3]

La figura 1.13 illustra l'andamento del rendimento al variare della velocità. si nota che, il rendimento è tanto maggiore quando più ci si avvicina alla velocità di sincronismo. Questo è abbastanza intuitivo in quanto all'avviamento c'è un elevato assorbimento di potenza a rotore fermo, mentre a velocità di sincronismo la potenza assorbita è quasi nulla ed il rendimento raggiunge quasi il valore unitario. Con i dati di questo esempio la velocità di rotazione del MAT senza carico sarà di poco inferiore a 1200 giri (1176RPM) a cui corrisponde uno scorrimento di 0.02[3].

Quanto detto per le potenze al rotore, possono essere amplificate per le coppie, avendo la coppia motrice utile data dalla coppia trasmessa meno la coppia di attrito.

1.7 Curve caratteristiche

1.7.1 Caratteristica elettrica

Il grafico di figura 1.14 presenta sull'asse delle ascisse la velocità di scorrimento tra 1 e 0, e cioè limitato al caso nel quale il MAT funge da motore. Sull'asse delle ordinate è invece presente il rapporto tra la corrente assorbita e la corrente massima assorbita (corrispondete al caso di scorrimento "infinito"). La corrente

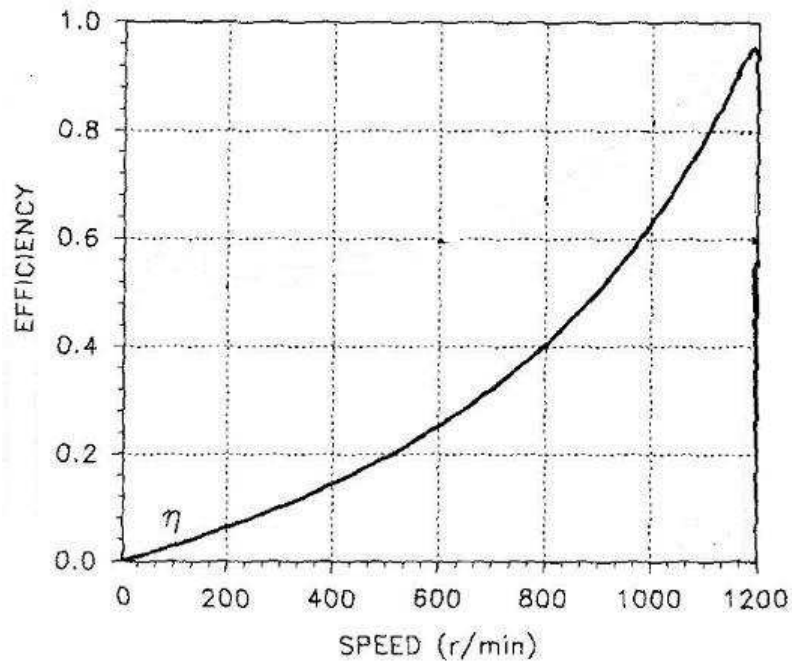


Figura 1.13: Andamento del rendimento di un MAT [3]

è funzione di $I_{21} = \rho(V_1, R_{21}, s, R_1, X_T)$ e la famiglia di curve del grafico è stata trovata lasciando costanti le variabili $(\overline{V_1}, \overline{R_1}, \overline{X_T})$ e variando R_{21} , tutto in funzione dello scorrimento (o equivalentemente della velocità del rotore). Lasciando invariate quelle variabili è come se considerassimo le caratteristiche costruttive di un solo motore, e variando R_{21} è come se cambiassimo la resistenza rotorica, per esempio con un reostato.

La curva più rapida si ottiene con il valore minimo di R_{21} , che si ottiene con il rotore in cortocircuito e l'inclinazione delle altre curve decresce con il crescere di R_{21} , mentre il valore massimo all'infinito non dipende da R_{21} (non si riesce ad apprezzare in questo grafico). Quando il rotore aumenta di velocità, diminuisce lo scorrimento, e la corrente diminuisce, in quanto diminuisce la f.e.m. indotta con scorrimento minore. In particolare si ha corrente nulla a scorrimento nullo (velocità di sincronismo) e corrente massima all'avviamento del motore (motore fermo). Bisogna anche tenere presente che per bassi valori di R_{21} il valore della corrente rimane elevato e quasi costante finché il motore non raggiunge circa il 70% della velocità di sincronismo.

Riassumendo si ha quindi la corrente massima all'avviamento, corrente che

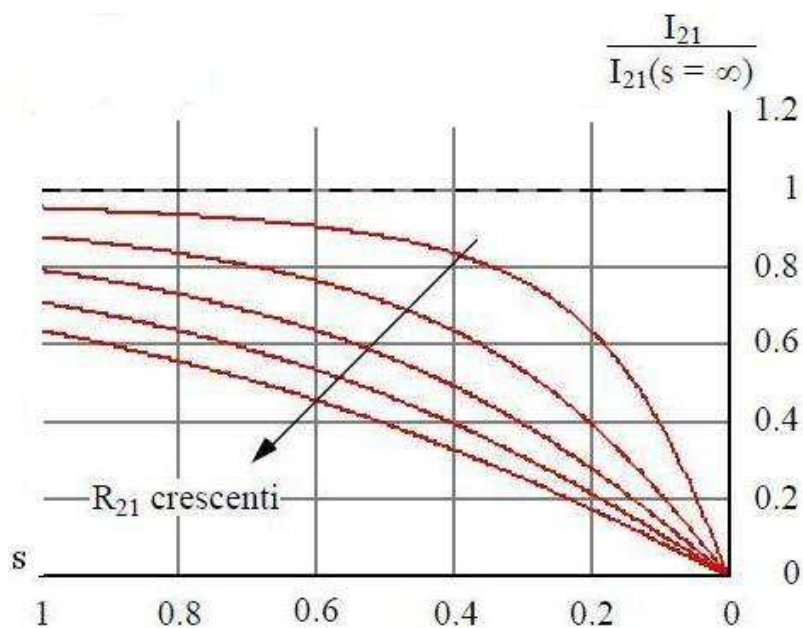


Figura 1.14: Corrente assorbita dalla rete in funzione dello scorrimento [1]

decrece progressivamente fino a diventare pressochè nulla quando il motore ruota a velocità prossime a quella di sincronismo. Tutto ciò giustifica la necessità di metodi per migliorare i consumi all'avviamento e sarà utile per capire come risolvere tale problema.

1.7.2 Curva coppia-velocità

La coppia utile che il motore fornisce al carico, è data da

$$C = \frac{P_T}{\omega_0}$$

Facendo ora riferimento all'espressione per la coppia utile

$$P_T = 3 \frac{R_2}{s} I_2^2$$

ed alla caratteristica elettromeccanica

$$I_{21} = \frac{V_1}{\sqrt{(R_1 + \frac{R_{21}}{s})^2 + X_T^2}}$$

si ottiene

$$P_T = 3 \frac{R_{21}}{s} I_{21}^2 = 3 \frac{R_{21}}{s} \frac{V_1^2}{(R_1 + \frac{R_{21}}{s})^2 + X_T^2}$$

e ricordando la relazione

$$\omega_0 = \frac{\omega_1}{p}$$

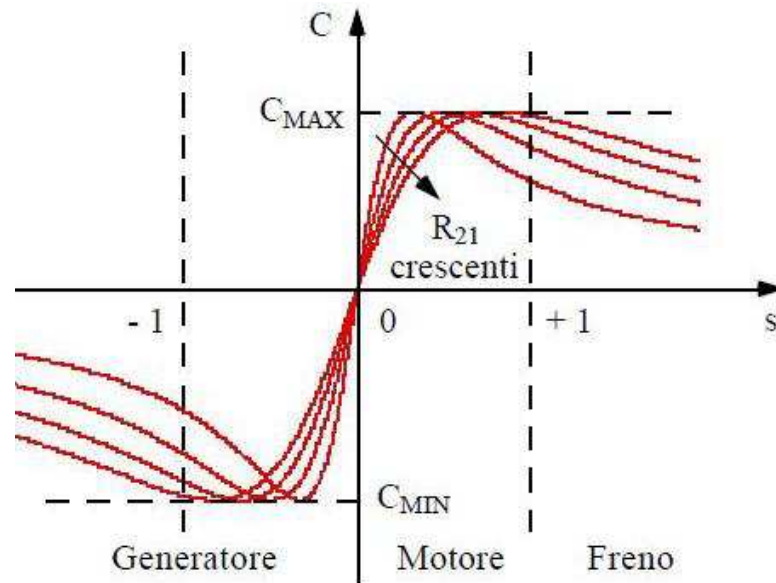


Figura 1.15: Andamento della coppia motrice in funzione dello scorrimento [1]

si ottiene l'espressione per la coppia in funzione dello scorrimento (o equivalentemente della velocità del rotore):

$$C = \frac{3p}{\omega_1} V_1^2 \frac{\frac{R_{21}}{s}}{\left(R_1 + \frac{R_{21}}{s}\right)^2 + X_T^2}$$

Il cui andamento è rappresentato nella figura 1.15:

Si nota dall'illustrazione che il tratto che analizzeremo sarà per $0 < s < 1$, cioè quando il MAT si comporta effettivamente da motore. Importante notare che quando lo scorrimento è nullo (velocità rotazione=velocità sincronismo) non si ha coppia motrice al carico. Si nota inoltre dalla formula matematica che la coppia ha un andamento proporzionale al quadrato della tensione di alimentazione, che influisce quindi notevolmente sulle prestazioni del motore.

Partendo da rotore fermo, $s=1$, il rotore inizia a muoversi ed assume il valore di coppia massima

$$C_{MAX} = \frac{3p}{\omega_1} V_1^2 \frac{\sqrt{R_1^2 + X_T^2}}{R_1^2 + X_T^2 + R_1 \sqrt{R_1^2 + X_T^2}}$$

che si ottiene in corrispondenza del valore di scorrimento s^*

$$s^* = \frac{R_{21}}{\sqrt{R_1^2 + X_T^2}}$$

dove valori tipici sono $0.1 \leq s^* \leq 0.2$.

Si possono molte volte trovare delle formule semplificate, trascurando R_1 rispetto X_T , ottenendo

$s^* \cong \frac{R_{21}}{X_T}$ ottenendo $C_{MAX} \cong \frac{3p}{\omega_1} V_1^2 \frac{1}{X_T}$ quando si hanno piccoli valori per R_1 .

Si nota come la coppia massima disponibile sia inversamente proporzionale alla reattanza di dispersione X_T ed è per questo motivo che si cerca di ridurre al minimo la dimensione del traferro, ricordando però che il limite inferiore per la dimensione del traferro è dato dai giochi dell'albero motore e da imperfezioni costruttive. La coppia massima non è invece dipendente dal valore della resistenza R_{21} , come si può notare dall'espressione per la coppia massima e com'è evidenziato dal grafico. La resistenza dei circuiti rotorici R_{21} influenza invece il posizionamento di s^* . Si trova quindi che, aumentando la resistenza R_{21} la coppia massima si ha ad una minore velocità (maggiore scorrimento).

La coppia di avviamento si ricava dall'espressione della coppia:

$$C_{AVV} = C(s=1) = \frac{3p}{\omega_1} V_1^2 \frac{R_{21}}{(R_1 + R_{21})^2 + X_T^2}$$

Si nota che, trascurando $R_1 + R_{21}$ rispetto ad X_T , la coppia all'avviamento è proporzionale con R_{21} . Si avrà in particolare che essa sarà coincidente con C_{MAX} quando $R_1 + R_{21} = X_T$. Queste relazioni saranno molto utili quando si parlerà dell'avviamento del MAT tramite reostato. Valori tipici della coppia di spunto all'avviamento sono $0.2C_{MAX} \leq C_{AVV} \leq 0.5C_{MAX}$.

Ultima cosa da notare è come la coppia negativa che si oppone al movimento quando il MAT funziona da generatore, è molto maggiore in modulo rispetto al caso in cui funzioni da motore.

Passiamo ora ad analizzare come l'andamento della coppia del MAT si ripercuote nel suo funzionamento, soprattutto quando varia il carico. Per far ciò prendiamo in analisi la figura 1.16, che è equivalente alla precedente dove si è posta la velocità del rotore e del campo magnetico invece dello scorrimento, e si è limitato il dominio ai soli casi in cui il MAT funziona da motore:

Nella figura 1.16 sono presenti C_{MAX} e C_{AVV} che sono state descritte precedentemente. n_{CR} rappresenta la velocità dell'albero motore in corrispondenza della quale si ha la coppia massima. Questa velocità è direttamente ricavabile dallo scorrimento s^* conoscendo numero di poli dello statore e frequenza nominale della rete, trovando così la velocità del campo magnetico rotante n_0 .

Notiamo che questa curva presenta due rami con andamenti significativamente

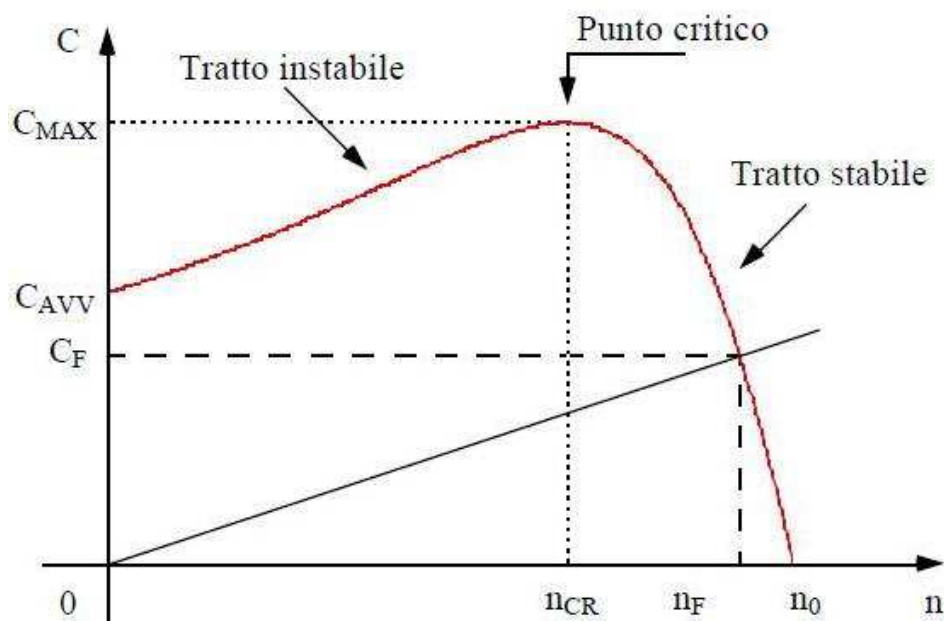


Figura 1.16: Coppia motrice in funzione della velocità di rotazione del rotore [1]

differenti: uno a sinistra ed uno a destra della velocità n_{CR} . Il primo ramo è con derivata positiva, ascendente, mentre il secondo è con derivata prima molto maggiore (in modulo) e negativa, ramo discendente. Nel primo tratto, che è un tratto *instabile*, ad un aumento della coppia al carico il motore rallenterà; ora ad una velocità minore corrisponde qui una coppia motrice minore, e quindi il motore tenderà (se non diminuisce la coppia al carico) via via a rallentare fino a fermarsi completamente. Nel secondo tratto invece, tratto *stabile*, ad un aumento della coppia al carico, corrisponde sì una velocità minore, ma a questa velocità minore qui corrisponde una coppia motrice disponibile maggiore, che contrasterà l'aumento del carico. La nuova condizione di equilibrio sarà raggiunta dopo una serie di oscillazioni intorno alla nuova velocità del motore, ed il tutto dipenderà ovviamente dalla coppia al carico, dalla velocità con cui varia la coppia al carico, dalle inerzie in gioco e dagli attriti e smorzamenti del moto. Bisogna comunque notare che se si applica una coppia resistente eccessiva tale per cui il motore rallenta fino ad una velocità inferiore a n_{CR} il motore entrerà nella zona di funzionamento instabile e quindi non riuscirà più ad autoregolarsi.

Il punto di lavoro in cui dovrebbe lavorare normalmente il MAT è caratterizzato dalla velocità n_F e dalla coppia C_F e solitamente questo pdl si trova nel secondo

ramo di funzionamento, nel tratto stabile. Solitamente nel tratto stabile il valore della coppia scende molto velocemente, cosicchè $n_0 - n_{CR}$ assume solitamente valori molto bassi, e quindi la velocità di rotazione ad una variazione del carico resta pressochè costante: valori tipici per il tratto stabile sono $0.03 < s < 0.1$.

1.8 Motore asincrono monofase

Per potenze modeste si fa spesso uso di motori asincroni *monofase*. Questo tipo di motore asincrono è utilizzato quando non si disponga di un'alimentazione trifase o per applicazioni con una potenza limitata a qualche kW. Esempi di applicazioni possono essere motori per uso domestico quali piccoli elettrodomestici o ventilatori, pompe o comunque piccoli sistemi.

Gli aspetti costruttivi di questi motori sono praticamente uguali a quelli dei motori trifase, ma a parità di dimensioni e velocità generano una coppia ridotta della metà e l'andamento della coppia è peggiore, come vedremo. L'avvolgimento statorico è ad avvolgimento monofase ed il rotore presenta solitamente una configurazione a gabbia di scoiattolo, date le modeste potenze.

Dall'azione tra campi magnetici alternativi generati dall'alimentazione monofase, e dalle correnti indotte, vengono generate due coppie motrici. Queste coppie sono uguali ed opposte e quindi se il motore è fermo queste si equilibrano a vicenda ed il motore non genera coppia allo spunto e non partirà. Avviando però il motore, anche solo con una spinta, il motore continuerà a girare nel verso dello spunto iniziale ed accelererà fino a portarsi ad una velocità prossima a quella di sincronismo. Ciò è dovuto al fatto che la coppia dovuta al campo che ruota nello stesso senso del rotore (campo diretto) diventa maggiore rispetto alla coppia dovuta all'altro (campo inverso) e nasce quindi una coppia risultante con un verso pari a quello del rotore. Ne deriva che il motore asincrono monofase non ha un suo senso di rotazione, ma assume quello che gli viene impresso. Si può calcolare[2] la coppia risultante generata a partire dai valori di scorrimento partendo dai due campi magnetici, figura 1.17:

Si nota subito che questo tipo di motore non ha coppia nulla solamente a velocità di sincronismo, ma anche a velocità nulla e si può anche notare che

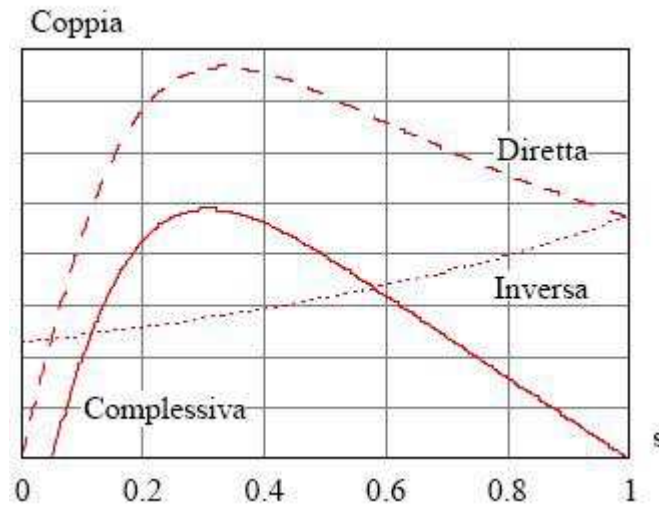


Figura 1.17: Coppia di motore monofase[1]

questo motore ha bisogno di lavorare ad una maggiore velocità di sincronismo ed ha un rendimento minore nella parte a velocità più bassa.

Vengono spesso usati nella pratica accorgimenti per far sì che il motore inizi a muoversi anche senza la spinta iniziale. Una soluzione consiste di dotare lo statore di 2 avvolgimenti sfasati di $\pi/2$, di cui uno perennemente inserito ed un secondo usato per l'avviamento. Il disinserimento dell'avvolgimento ausiliario avviene tramite un interruttore centrifugo che interviene solitamente a $3/4$ della velocità di sincronismo. Può inoltre l'avvolgimento secondario essere attraversato da notevoli correnti per generare una buona coppia di spunto dato che viene utilizzato per un lasso di tempo relativamente breve.

1.8.1 Funzionamento di un MAT con alimentazione monofase

Il motore asincrono trifase può funzionare in monofase collegando un condensatore in derivazione su due morsetti, qualunque sia il tipo di collegamento utilizzato per collegare le fasi del motore. Il condensatore deve avere l'effetto di trasferire sul morsetto non alimentato del motore una tensione che deve essere, in ampiezza e fase, la più possibile corrispondente a quella mancante. Questo tipo di soluzione offre i migliori risultati con motori di piccole dimensioni fino ad una potenza

nominale all'albero non superiore a circa 3,4 kW. La soluzione ottimale, in particolare per i motori che devono avviarsi sotto carico, è quella di utilizzare due condensatori: uno in fase di spunto e di avviamento e uno, di capacità inferiore, da utilizzare solo quando il motore è in marcia a regime. In pratica basta collegare un secondo condensatore, in parallelo al primo, che viene escluso ad avviamento avvenuto. La manovra può essere effettuata manualmente o automaticamente.

Capitolo 2

Avviamento

Come ogni applicazione ingegneristica, bisogna prestare attenzione quando si passa da una condizione di equilibrio ad un'altra. Particolare interesse lo riponiamo nel transitorio di Avviamento, che consiste nel portare il motore da fermo a velocità nominale. Abbiamo già detto che in questa fase il motore assorbe un'elevata corrente, genera una coppia discreta e può provocare cadute di tensione lungo la linea con i conseguenti problemi, tra i quali il riscaldamento eccessivo degli avvolgimenti; esistono delle metodologie per cercare di evitare questi inconvenienti. La prima considerazione ovvia, condizione necessaria per l'avviamento, è che la coppia allo spunto sia superiore della coppia resistente del carico.

Bisogna poi tener conto che l'avvento dell'elettronica di potenza è stato molto importante non solo per il controllo del motore ma anche per il suo avviamento. Potendo infatti, mediante inverter, regolare la frequenza nominale di alimentazione dello statore a piacimento, si può variare quasi linearmente l'andamento della coppia con la velocità. La parte relativa all'elettronica di potenza è presentata più avanti.

2.1 Avviamento con reostato

Quando il rotore presenta la configurazione “a rotore avvolto”, esso presenterà, come già detto, anelli e spazzole in modo tale da poter variare la resistenza rotorica per mezzo di un reostato. Vengono chiamate reostato d'avviamento la terna di

resistenze variabili sul circuito del rotore, e avviamento reostatico l'avviamento con questo tipo di rotor.

L'aumento della resistenza rotorica lasciando invariata la tensione di alimentazione, che potrebbe sembrare teoricamente controproducente, comporta invece diversi vantaggi:

- aumenta anche il modulo dell'impedenza rotorica, e quindi la corrente assorbita dal MAT all'avviamento diminuisce; ciò è evidenziato anche nella figura riguardante la corrente rispetto alla velocità al variare della resistenza(fig1.14).
- si ha una diminuzione dello sfasamento delle correnti del rotore, con un conseguente aumento della coppia di spunto. Questo lo si può notare anche dai grafici della coppia al variare di R_{21} , che presentavano un valore di coppia di spunto maggiore aumentando la resistenza(fig1.15)

La figura 2.1 illustra la variazione della coppia al variare della resistenza rotorica:

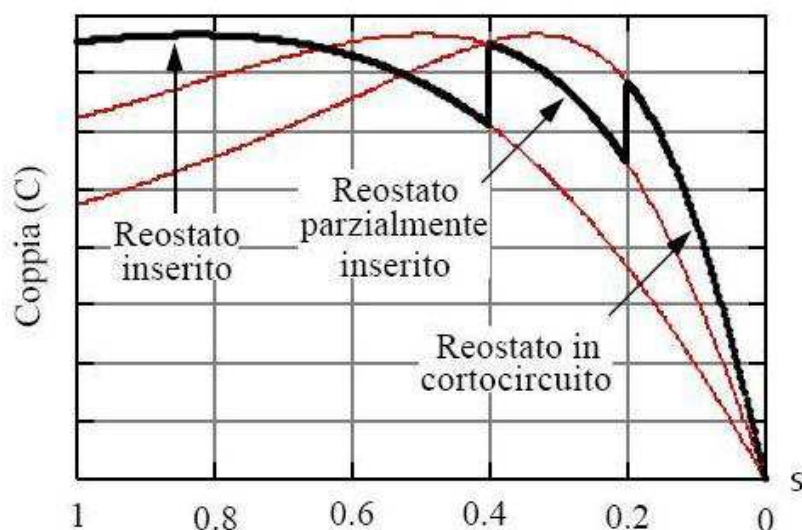


Figura 2.1: Coppia motrice con avviamento mediante reostato[1]

I tre diversi andamenti rappresentano la curva coppia-velocità per tre diversi valori della resistenza del reostato (detti reostato inserito totalmente, parzialmente, cortocircuito). Risulta evidente che in questo caso sono stati presi solo 3

valori di resistenza rotorica differenti ma nella realtà potranno esserci più valori differenti per ottenere un andamento di coppia più lineare e progressivo. Le cose da notare sono le seguenti:

- con il reostato inserito (elevata resistenza rotorica) la coppia allo spunto, $s=1$, è molto maggiore rispetto agli altri valori di resistenza
- sempre con il reostato inserito completamente, quando la velocità inizia ad aumentare la coppia diminuisce sensibilmente, ed è per questo motivo che bisogna via via diminuire il valore della resistenza rotorica
- disinserendo parzialmente il reostato (resistenza rotorica non troppo elevata) la coppia motrice aumenta sensibilmente tornando a valori prossimi alla coppia massima generata dal motore
- anche in questo caso con il reostato parzialmente inserito con l'aumento della velocità diminuisce la coppia motrice, e bisogna quindi diminuire ulteriormente l'influenza del reostato, disinserendolo completamente e portandoci al caso della curva coppia-velocità con il rotore senza resistenza aggiunta

Evidentemente, se avessimo a disposizione un numero molto elevato di valori di resistenza per il rotore (quasi illimitato), potremmo addirittura riuscire a far generare al MAT sempre la coppia massima, finché non si arriverà al tratto stabile rispetto alla curva con il reostato disinserito, ed a quel punto disinserirlo.

Nella casi reali il reostato è completamente inserito all'avviamento, e viene progressivamente disinserito all'aumentare della velocità, fino alla sua completa esclusione che avverrà a circa l'80% della velocità nominale.

2.2 Avviamento con tensione ridotta

Con la configurazione rotorica a gabbia di scoiattolo (od a rotore avvolto senza la presenza di reosato, rotore in cortocircuito) non si ha la possibilità di aumentare la sua resistenza per evitare i problemi già menzionati, e si cercheranno quindi metodi alternativi. Il problema principale dovuto alla forte induttività del circuito

è (oltre a correnti elevate) una coppia motrice allo spunto abbastanza scarsa. Si distinguono due tipi di avviamento a seconda del motore:

- per motori relativamente piccoli ($P_{max} = 10kW$) si parla di *avviamento diretto*. Le correnti allo spunto non risultano essere particolarmente elevate rispetto alla linea elettrica, e non causano quindi nessun tipo di problema. Si può in questo caso quindi avviare il motore senza nessun tipo di accorgimento speciale. In questo caso $C_{AVV} \in [(50\%, 100\%)C_{MAX}]$ e $I_i \in [(4, 6)I_n]$
- con motori di potenza maggiore i problemi di corrente non possono essere assolutamente trascurati, in quanto le correnti in gioco sono simili o superiori alle correnti massime disponibili dalla linea elettrica. Si parla in questo caso di *avviamento a tensione ridotta* per porre rimedio a questi problemi. Si mira in questo metodo a ridurre le correnti di spunto limitando semplicemente la tensione di alimentazione. Come si nota dalla figura 2.2, riducendo la tensione, e quindi la corrente, si riduce anche la coppia motrice; bisogna quindi prestare attenzione che la coppia con la tensione ridotta sia sufficiente a contrastare la coppia resistente. Ciò avviene per piccoli valori di coppia resistente o con una coppia allo spunto sufficientemente elevata da non pregiudicare il movimento.

Si noti come basta una variazione del 20% del valore nominale della tensione in quanto la coppia dipende quadraticamente e non linearmente dalla tensione, motivo in più per prestare molta attenzione.

2.2.1 Resistori rotorici variabili

Il metodo più semplice per realizzare questa tensione ridotta consiste nel porre delle resistenze variabili prima degli avvolgimenti rotorici. Come evidenziato dalla figura 2.3 vengono poste delle resistenze variabili, una per ogni fase dello statore del MAT. Così facendo la tensione sullo statore sarà minore, poichè ci sarà un calo di tensione sulle resistenze. Queste resistenze vanno escluse a regime ed è evidente che sarà presente una forte componente di dissipazione dovuta ad effetto Joule,

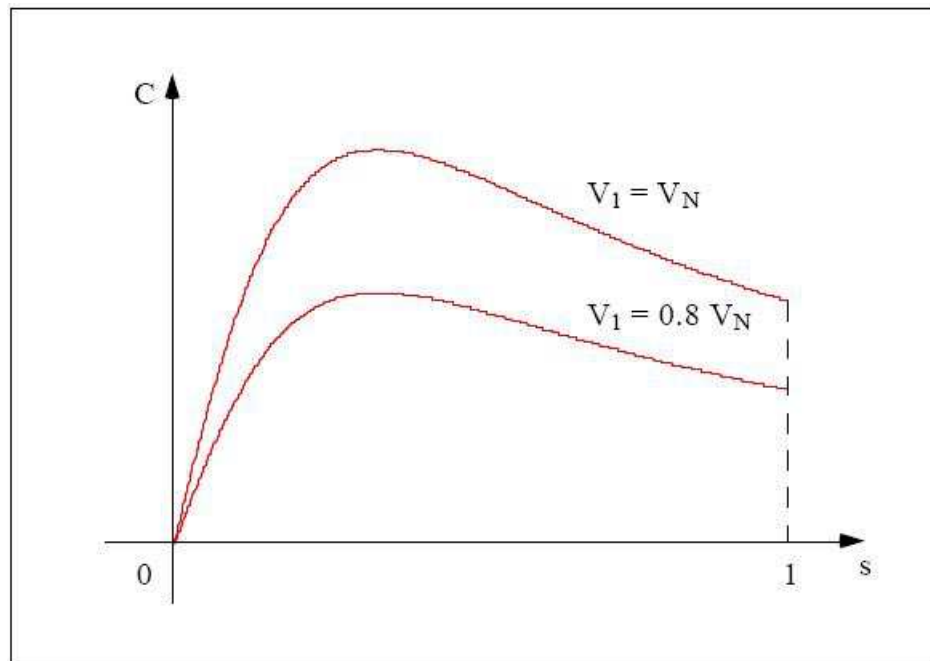


Figura 2.2: Coppia con avviamento a tensione ridotta[1]

e bisogna tenerne conto negli aspetti costruttivi del motore, per evitare danni o surriscaldamenti.

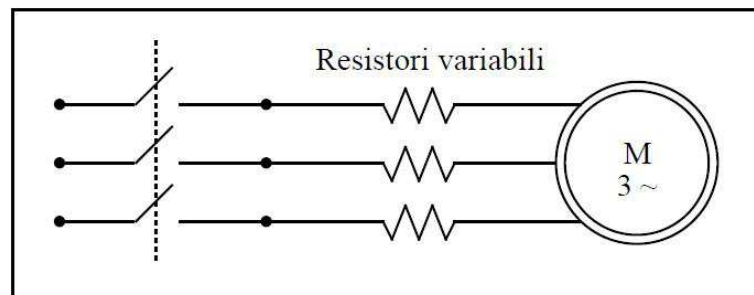


Figura 2.3: Avviamento con resistori variabili [1]

Un metodo alternativo (uso industriale diffuso) consiste nel mettere in parallelo le resistenze ed il collegamento normale tra motore e rete, con l'aggiunta di un interruttore come illustrato in figura 2.4. In questo modo all'avviamento si terrà l'interruttore "K2" aperto in modo tale che la corrente transiterà per le resistenze-reattanze aggiunte "X" in modo tale da provocare la caduta di tensione. Una volta raggiunta una buona velocità si può chiudere l'interruttore "K2" ed in questo modo la corrente non transiterà più per le resistenze-reattanze "X" ma il motore sarà

collegato direttamente alla rete, ristabilendo il funzionamento normale con tensione nominale. L'interruttore "K1" serve unicamente per collegare-scollegare il motore alla rete, non influenza questo metodo di avviamento.

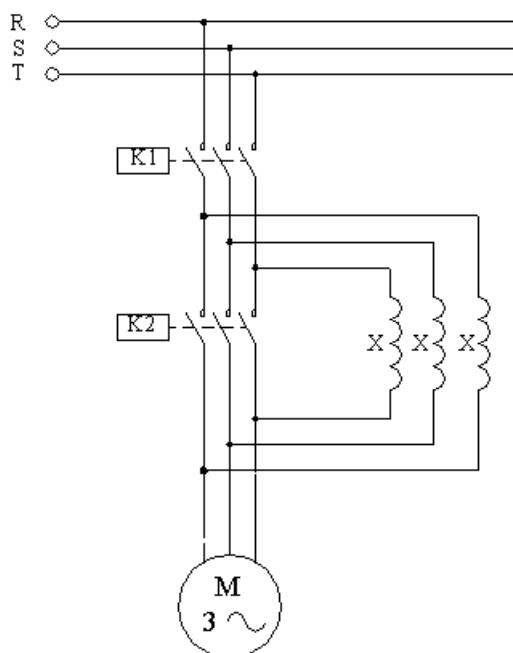


Figura 2.4: Avviamento con resistori escludibili[4]

Allo spunto si limita la corrente a $2,5 \div 3,5$ volte quella nominale, di targa. Si possono realizzare anche più esclusioni graduali di resistenze o reattanze, mediante comandi temporizzati (relè a tempo), per potenze del motore fino a oltre 100kW. L'impiego di reattanze abbassa notevolmente il fattore di potenza, mentre l'eventuale impiego di resistenze provocherebbe una elevata potenza persa per effetto Joule, anche se limitatamente all'avvio. La coppia, per una riduzione "K" della tensione sul motore e della corrente assorbita, si riduce di " K^2 " volte.

2.2.2 Auto-trasformatore

Questo metodo è più costoso rispetto agli altri, in quanto è presente un'ulteriore macchina, un autotrasformatore; tuttavia è adottato comunemente per i motori di potenza più elevata in quanto elimina le punte di corrente all'avviamento non mancando mai la tensione durante l'avviamento. Inoltre permette di rendere più

graduale l'avviamento essendo possibile adottare per l'autotrasformatore più prese intermedie. Anche per questo tipo di avviamento, considerando la dipendenza della coppia dal quadrato della tensione ed il basso valore che di solito si adotta per la tensione iniziale, si deve avere il motore a vuoto o comunque avere un carico inferiore alla coppia di spunto a tensione ridotta.

La figura 2.5 riporta lo schema di potenza di un avviamento mediante un autotrasformatore ad un'unica presa intermedia (u , v , w sono i morsetti d'inizio delle fasi del motore).

La successione delle operazioni da eseguirsi per avviare il motore è la seguente: per primo viene chiuso l'interruttore T1 così che l'autotrasformatore sia predisposto per il funzionamento a stella. Poi si chiude T2 (conservando chiuso T1) ed il motore viene alimentato tramite l'autotrasformatore ad una tensione pari a $0,5 \cdot V_n$ (questo valore dipende dall'autotrasformatore che abbiamo acquistato). Quindi si apre T1 così che il motore venga alimentato attraverso le bobine di reattanza dell'autotrasformatore che si trovano in serie alla linea. Per ultimo si chiude T3 ed il motore si trova ad essere alimentato a piena tensione essendo le bobine di reattanza cortocircuitate.

Nel caso preso in considerazione di un autotrasformatore ad un'unica presa intermedia, la coppia all'avviamento è ridotta di un fattore $1/4$ (essendo la tensione $1/2$ della nominale) ed anche la corrente assorbita è ridotta ad $1/4$ della nominale.

Gli autotrasformatori per questo impiego, essendo destinati ad un servizio di durata limitata (1 minuto circa), lavorano con elevati valori di induzione magnetica (fino a $1,6$ [Wb/m²]) e con elevati valori di densità di corrente (fino a 20 [A/mm²]). Si sconsiglia comunque l'utilizzo quando si hanno frequenti avviamenti.

2.2.3 Stella-triangolo (Y/D)

Questo metodo, molto usato in passato, si utilizza per motori di potenza fino a 50 [kW] ed aventi l'avvolgimento statorico collegato con le fasi a triangolo nel funzionamento normale. Il rotore può essere indifferentemente del tipo avvolto od a gabbia. Essendo la coppia di spunto notevolmente ridotta, si presta solo per

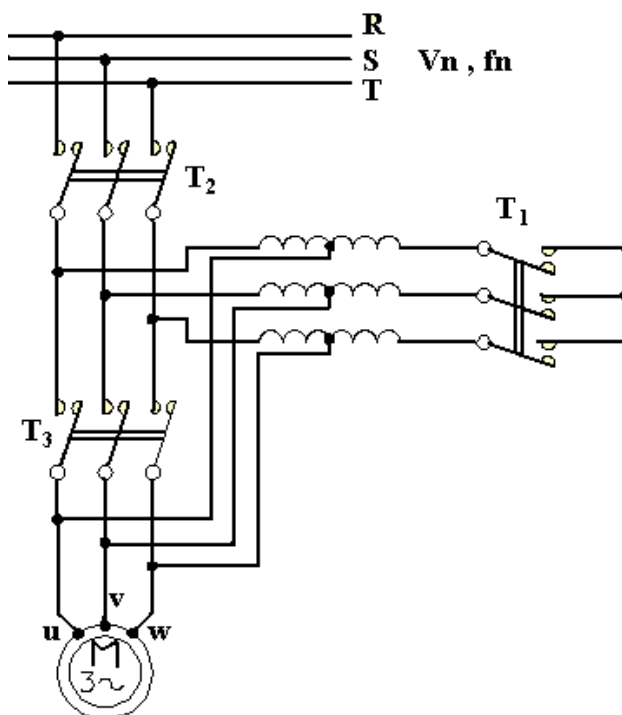


Figura 2.5: Avviamento con auto-trasformatore[4]

avviamenti a vuoto o comunque con una coppia al carico minore della coppia di spunto.

La figura 2.6riporta lo schema di potenza di un avviamento Y/D (u, v, w sono i morsetti d'inizio delle fasi statoriche del motore, x, y, z sono i morsetti d'uscita delle fasi statoriche del motore).

All'avviamento, l'interruttore Y deve essere chiuso così che il MAT parta con gli avvolgimenti statorici a stella. Dopo aver chiuso l'interruttore di linea L si dovrà attendere che il motore abbia raggiunto circa l'80% della velocità a vuoto prima di aprire l'interruttore Y e, subito dopo, chiudere l'interruttore D relativo al funzionamento con gli avvolgimenti statorici a triangolo. E' importante che l'interruttore D venga chiuso solo dopo avere aperto l'interruttore Y per evitare il cortocircuito tra due fasi. Ovviamente accade che viene a mancare per un breve intervallo di tempo l'alimentazione al motore, così che nell'istante in cui essa si ripristina si presenta una punta di corrente assorbita che può provocare gravi disturbi elettrici nella linea di alimentazione ed altrettanto gravi disturbi elettromagnetici nell'ambiente circostante. Per questo motivo questo metodo di

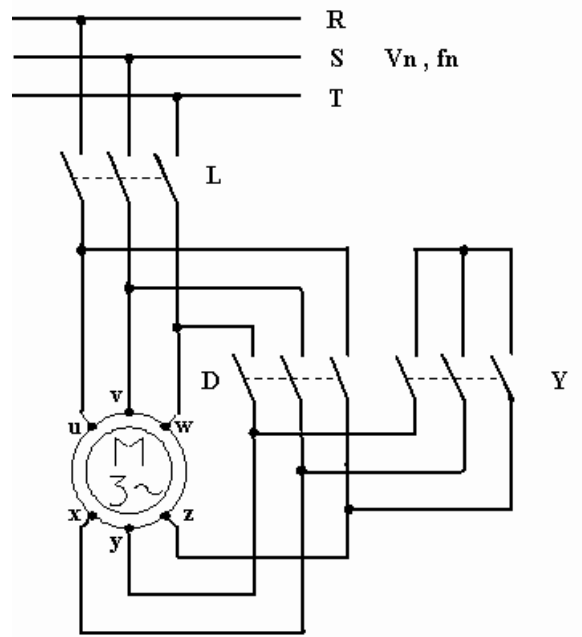


Figura 2.6: Avviamento con commutazione stella triangolo [4]

avviamento non è assolutamente sicuro ed in applicazioni pratiche si cerca di evitarlo, poichè, quando si passa da collegamento stella a triangolo, si ha un picco di corrente per ogni fase statorica non trascurabile. L'avviamento a Y (a stella) comporta la riduzione di tre volte della corrente assorbita e di tre volte della coppia di spunto (perché la coppia dipende dal quadrato della tensione applicata ed a stella la tensione è $\sqrt{3}$ più piccola che non a triangolo), come illustrato nella figura 2.7. L'istante oltre il quale conviene effettuare la commutazione a triangolo viene determinato sperimentalmente: occorrerebbe che la corrente assorbita dal motore nel momento della commutazione non superasse quella assorbita nell'istante iniziale dell'avviamento a stella.

2.2.4 Soft starting

In questo metodo, come illustrato in figura 2.8, degli interruttori di potenza basati su semiconduttori sono usati per ridurre la corrente di statore. Ciò è realizzato facendo passare unicamente una parte della forma d'onda sinusoidale della tensione e "bloccando" la parte restante. Le forme d'onda di tensione e corrente vengono distorte generando delle coppie armoniche, finchè il motore non raggiunge una

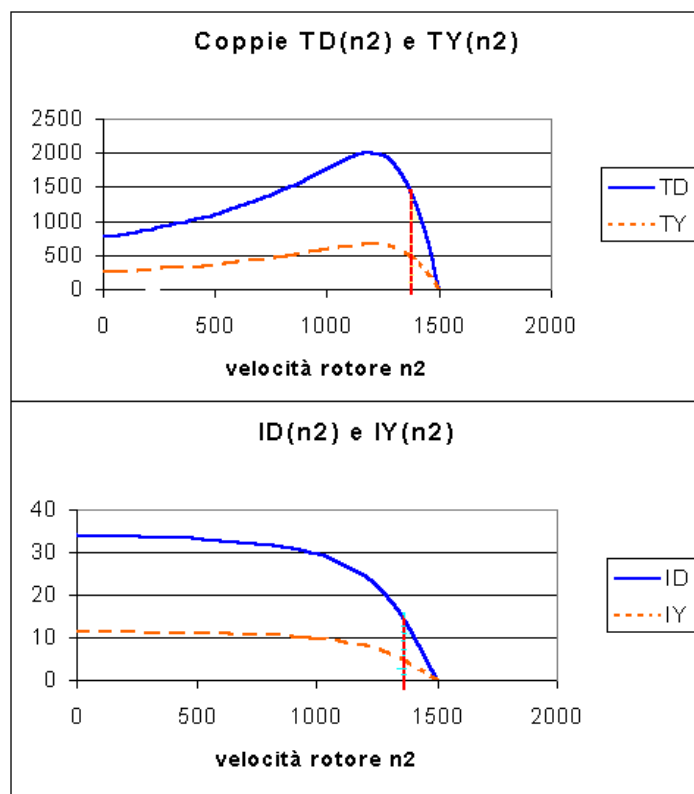


Figura 2.7: Coppia e corrente con le configurazione a stella e triangolo [4]

sufficiente velocità e può essere collegato direttamente alla rete. Possono essere implementati vari metodi di avviamento regolando questi dispositivi elettronici, come per esempio mantenere una corrente costante o facendo crescere la tensione seguendo un andamento a rampa.

Il soft-starting è sicuramente il migliore di tutti i sistemi classici di avviamento a tensione ridotta, ma ha lo stesso inconveniente della riduzione della coppia. Il soft-starting può andar bene per carichi che hanno una coppia resistente che cresce gradualmente con la velocità. E' invece inadatto per carichi che hanno una coppia d'attrito allo stacco elevata. La rampa di tensione inizialmente non riesce a generare una coppia sufficiente, e quando vi riesce può imprimere al carico un'accelerazione eccessiva. Le cose cambierebbero radicalmente se la variazione di tensione fosse accompagnata da una variazione di frequenza. Ma allora si avrebbe a che fare con un inverter, più complesso e costoso di un soft starting classico.

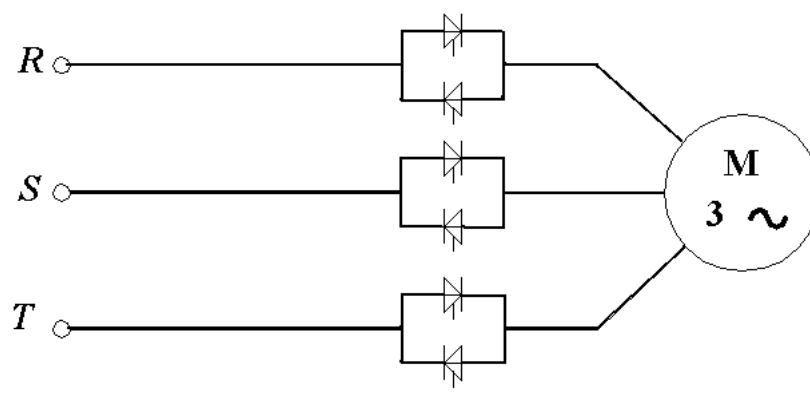


Figura 2.8: Avviamento mediante soft starting [4]

2.3 Inversione marcia

Per invertire il senso di marcia di un MAT è sufficiente invertire il senso di rotazione del campo magnetico rotante. Il modo più semplice per eseguire questa operazione consiste nello scambiare tra di loro 2 dei 3 collegamenti trifase che alimentano gli avvolgimenti di statore, come illustrato in figura 2.9. Gli interruttori che gestiscono la marcia “avanti” o “indietro” dovrebbero essere muniti di interblocco (dispositivo di sicurezza) per evitare che si commutino quando il motore è in marcia ma solo quando è fermo. Cambiando direzione in marcia infatti, si avrebbe un assorbimento di corrente molto maggiore rispetto a quella assorbita allo spunto.

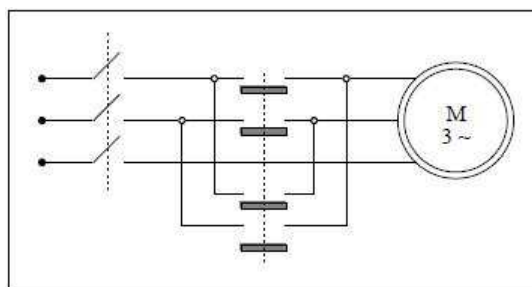


Figura 2.9: Grafico per inversione di marcia [1]

Capitolo 3

Variazione velocità

Gli azionamenti a velocità variabile sono un insieme costituito dal motore elettrico (attuatore), dal sistema elettronico di alimentazione e controllo assistito da trasduttori di posizione e velocità. Oltre ad essere, per certe applicazioni, assolutamente indispensabili, consentono un'ottimizzazione dei processi con incremento di produzione e miglior rendimento degli impianti. Spesso si ottiene un risparmio energetico se si può disporre di una rampa di accelerazione controllata e con certi carichi, come pompe e ventilatori, una riduzione del 20% della velocità significa ridurre la potenza assorbita del 50%. L'azionamento può essere collegato mediante opportuno bus di comunicazione alle logiche di controllo (PLC e/o PC) aumentando le potenzialità e la flessibilità del sistema di automazione.

3.1 Controllo velocità con asincrono

Abbiamo visto precedentemente che la velocità di un MAT è data da

$$n = \frac{60f}{p}(1 - s)$$

e quindi perchè si verifichi una sua variazione bisogna modificare una o più delle seguenti grandezze: frequenza nominale di alimentazione, scorrimento, poli statorici.

Il motore asincrono è, a grandi linee, un motore a velocità praticamente costante se la frequenza è costante. Nella zona di stabilità, che va dalla velocità di sincronismo alla velocità cui si ha la coppia massima, la caratteristica meccanica

è in genere ripida e la variazione di velocità è grossomodo del 10%. Se poi si tiene conto che la corrente non può superare il valore nominale che si ha alla velocità nominale cui corrisponde uno scorrimento sull'ordine del 3-5%, l'intervallo di variazione si riduce drasticamente, non potendo il motore sostenere per lungo tempo una velocità inferiore, per il surriscaldamento che l'intensità di corrente, superiore al valore nominale, determina. C'è dunque una variazione dipendente dal carico che non è controllabile in modo efficace modificando la tensione. Diminuendo la tensione diminuisce la coppia massima e si ha, di conseguenza, una minor pendenza del tratto stabile, per cui, a parità di coppia resistente, la velocità diminuisce; però l'aumento dello scorrimento può richiedere al motore una corrente maggiore nonostante la tensione ridotta. E', in altre parole, una regolazione di scarsa efficacia.

La regolazione migliore si ottiene variando la frequenza, quindi la velocità del campo rotante o di sincronismo che è data da $n_0 = \frac{60f}{p}$ in giri/min (rpm) con f frequenza di alimentazione e p coppie polari dell'avvolgimento. La variazione della frequenza richiede un circuito elettronico più complesso di un circuito elettronico che vari la sola tensione. Maggior complessità implica un maggiore costo ma il rapido sviluppo dell'elettronica di potenza ha fatto sì che, se qualche decennio fa un sistema di regolazione della velocità era un dominio assoluto del motore a corrente continua, la cui velocità è facilmente regolabile con la tensione o corrente d'armatura, attualmente la regolazione di velocità con variazione di frequenza ottenuta con motori asincroni, sottrae sempre più spazi agli azionamenti in continua, che comunque non sono scomparsi per le ancora migliori proprietà dinamiche del motore a cc. I motori asincroni hanno infatti un momento di inerzia più alto degli equivalenti in continua, il che ne peggiora dinamica. E' possibile utilizzare motori particolari, ma così si vanificano in parte i vantaggi dell'azionamento in ca. Un sistema con regolazione di velocità con un asincrono trifase è dunque essenzialmente costituito, oltre al motore, da un convertitore statico di frequenza ed il vantaggio che esso offre rispetto all'azionamento in corrente continua è che l'asincrono, più semplice costruttivamente quindi meno costoso, non richiede manutenzione ed i convertitori statici hanno ormai raggiunto standard qualitativi che assicurano un'ottima durata nel tempo.

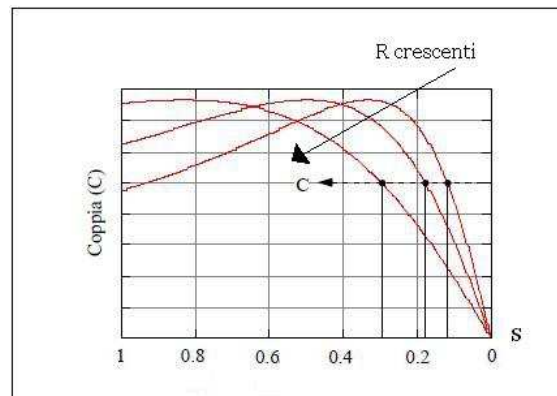


Figura 3.1: Andamento della coppia nominale variando la resistenza rotorica[1]

3.1.1 Variazione della resistenza

Il metodo più semplice per variare la velocità del rotore è quello analizzato precedentemente, cioè l'inserzione di resistenze in serie al rotore come illustrato per l'avviamento del motore. Così facendo si riesce a variare la curva di coppia e conseguentemente lo scorrimento del motore. In particolare un aumento di resistenza aumenta lo scorrimento lasciando invariato il carico, come illustrato nella figura 3.1. Risulta evidente che non variando la velocità di sincronismo del motore le variazioni di velocità non possono essere elevate, ma resteranno in un intervallo vicino alla precedente velocità. Si può anche notare che le variazioni di velocità, per una stessa resistenza, dipendono dal carico: esse sono alte a carichi elevati, trascurabili a bassi carichi. Inoltre, qualunque diminuzione di velocità si traduce in un corrispondente aumento delle perdite, in calore, nelle resistenze addizionali con abbassamento del rendimento.

3.1.2 Cambiamento dei poli

Questo metodo si può utilizzare unicamente quando si ha un rotore a gabbia poiché questo può funzionare con qualsiasi numero di poli nello statore. Questo metodo consiste infatti nel cambiare il numero di coppie di poli statorici. Per fare ciò si utilizza un avvolgimento statorico (avvolgimento di Dalhander) il quale permette di cambiare il numero di coppia di poli con una semplice variazione della connessione di morsetti, come illustrato in figura 3.2.

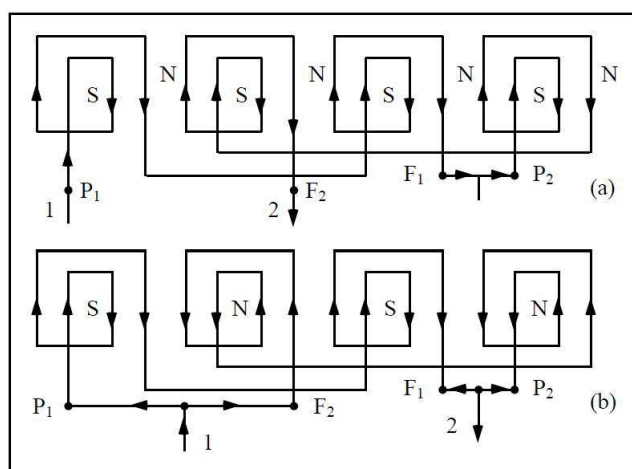


Figura 3.2: Cambiamento poli statorici[1]

In particolare questo metodo riesce a far dimezzare il numero di coppie di poli; nell'esempio della figura 3.2 le coppie passano da 8 ad 4. Il dimezzamento delle coppie di poli comporta il raddoppio della velocità di sincronismo, e quindi il raddoppio, circa, della velocità di equilibrio del rotore.

Nonostante sia molto semplice come metodo, riesce a far ruotare il motore a solo 2 velocità diverse, ed essendo una la metà dell'altra la differenza tra le 2 velocità può essere molto elevato e dimezzando il numero di coppie di poli diminuisce sia il rendimento che la potenza del motore. Si possono comunque implementare anche altri metodi che permettono una variazione del numero di poli di un fattore 2, 4, 6 permettendo un migliore aggiustamento.

3.1.3 Modifica del modulo della tensione di alimentazione

Porta a regolazioni in un campo abbastanza ristretto, come si può dedurre dall'esempio grafico di Fig. 3.3.

Si può variare il modulo della tensione con la parzializzazione mediante tiristori. Le caratteristiche si riducono col quadrato della tensione e di conseguenza cambia la loro pendenza nel tratto utile: pertanto il punto di equilibrio tra coppia motrice e coppia resistente si ottiene a velocità più basse. Non si modifica invece lo scorrimento di coppia massima, che infatti non dipende dalla tensione.

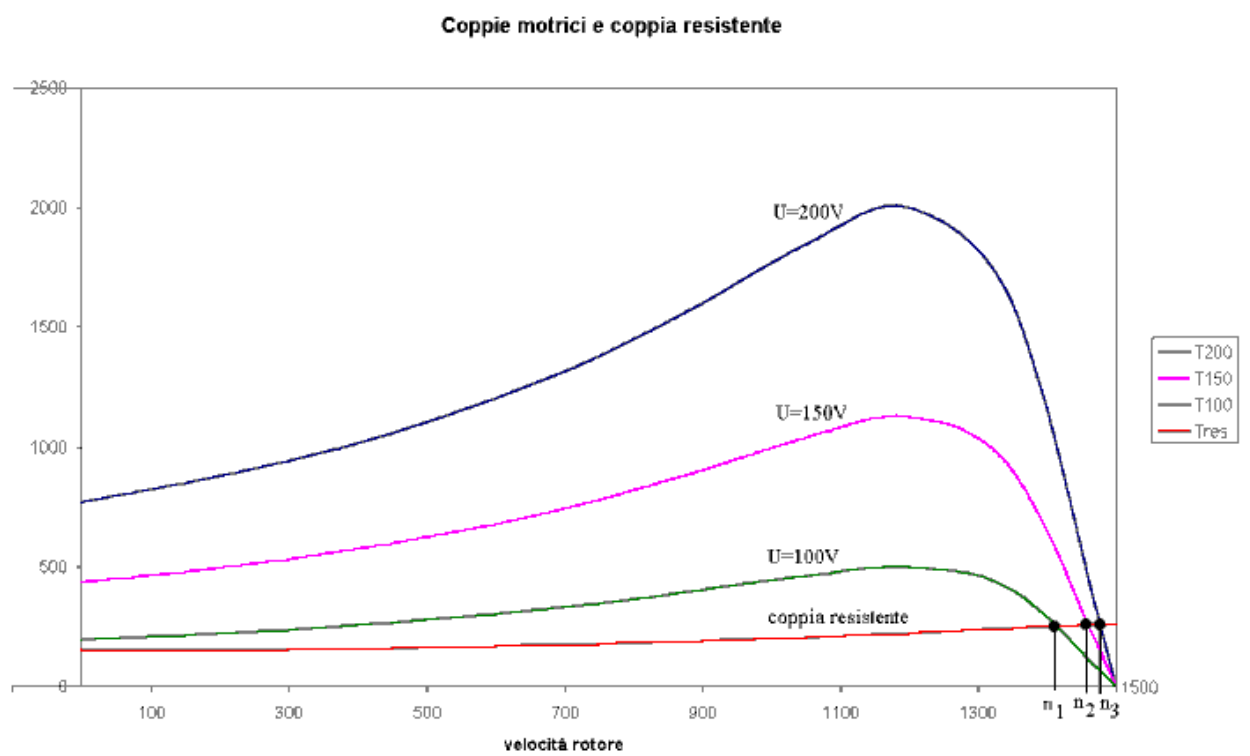


Figura 3.3: Variazione del numero di giri del rotore per variazione di scorrimento, ottenuto con tensioni diverse. [4]

3.2 Variazione frequenza

Per comprendere il funzionamento del motore asincrono alimentato da inverter sfruttiamo un modello matematico della macchina molto semplificato:

1. La velocità del campo rotante, o velocità di sincronismo (praticamente la velocità a vuoto del motore), è direttamente proporzionale alla frequenza di alimentazione f :

$$n \propto f$$

2. Il flusso del campo magnetico rotante è proporzionale al rapporto tra la tensione e la frequenza:

$$\phi \propto \frac{V}{f}$$

3. La corrente che si sviluppa nei conduttori di rotore, I_r , è proporzionale alla tensione indotta dal flusso del campo rotante, quindi alla tensione di alimentazione ed allo scorrimento:

$$I_r \propto V \cdot s$$

4. La coppia motrice C , è proporzionale al prodotto del flusso magnetico per la corrente di rotore. Quindi si possono scrivere le espressioni:

$$C \propto \phi \cdot I_r$$

$$\text{e } C \propto s \cdot \phi \cdot V$$

Si vede quindi che al valore nominale di tensione è legato il flusso magnetico al traferro, quindi la corrente a vuoto. Devono essere comunque sempre rispettate le condizioni per il buon funzionamento del motore, che sono le seguenti:

1. La corrente assorbita non deve superare il valore nominale per evitare aumento delle perdite nel rame e surriscaldamenti eccessivi
2. La tensione non deve superare il valore nominale per il quale è dimensionato l'isolamento
3. La corrente a vuoto non deve superare il valore nominale per non saturare il circuito magnetico ed evitare l'aumento di perdite nel ferro con conseguente surriscaldamento.

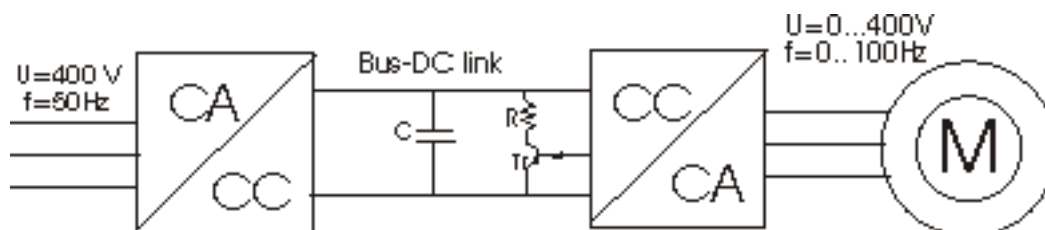


Figura 3.4: Schema a blocchi di un inverter e raddrizzatore [2]

3.2.1 Inverter: schema a blocchi

Poiché nella zona di funzionamento stabile lo scorrimento ha un valore nell'ordine dei centesimi la velocità generata dal MAT si può considerare dipendente unicamente dalla frequenza. La frequenza varia la velocità a vuoto (in conseguenza della variazione della velocità del campo magnetico rotante), quindi anche la velocità a carico che differirà di poco. L'inverter è l'apparecchiatura che sfruttando l'elettronica di potenza riesce a convertire una tensione continua, mediante interruttori elettronici (diodi), in alternata, con la possibilità di ottenere frequenza e valore efficaci desiderati per la tensione elettrica che alimenterà il motore. L'inverter è solitamente preceduto da un circuito rettificatore che converte dapprima la tensione di rete, alternata, in tensione continua, creando quello che comunemente è detto BUS della continua o DC LINK. Lo schema a blocchi è dunque del tipo in figura 3.4:

Riuscendo quindi a modificare la frequenza dell'alimentazione del motore si riuscirà quindi ad avere un utilizzo del MAT molto più ampio riuscendo ad avere velocità variabile in funzione della frequenza.

3.2.2 Modalità di funzionamento

La variazione di frequenza influenza il flusso. Se la frequenza scende sotto il valore nominale (tipicamente 50 Hz) per mantenere costante il flusso occorre diminuire proporzionalmente la tensione. Alla frequenza nominale la tensione è la nominale. Se f supera il valore nominale, il flusso non può mantenere il valore nominale perché si dovrebbe aumentare la tensione. Il flusso pertanto diminuisce. Poiché

la corrente non può superare il valore nominale, finché il flusso mantiene il valore nominale, quindi per frequenze inferiori alla nominale, si può avere la coppia nominale; quando invece il flusso diminuisce, necessariamente la coppia continuativa erogabile dal motore diminuisce. Se il rotore, qualunque sia la frequenza, gira a vuoto lo scorrimento è piccolissimo e, praticamente, come già detto, la sua velocità è quella di sincronismo. Quando all'albero è applicato un carico, cioè una coppia resistente, mentre tensione e frequenza sono mantenute costanti, la sua velocità diminuisce rispetto a quella del campo rotante, cioè lo scorrimento cresce. Il motore assorbe allora una corrente maggiore e la coppia motrice aumenta fino ad eguagliare la coppia resistente. A questo punto la velocità si stabilizza. Il valore della velocità di regime dipende perciò, oltre che dalla frequenza, anche dal carico. Esiste cioè un errore di velocità dovuto allo scorrimento. L'entità dello scorrimento è, a parità di coppia, inversamente proporzionale al flusso ed al valore efficace della tensione. A parità di coppia quindi lo scorrimento aumenta a frequenze diverse dalla nominale perché il prodotto $V \cdot F$ diminuisce in ogni caso.

Le considerazioni che seguono per valutarne le prestazioni al variare della frequenza, si basano sul circuito equivalente semplificato e sono valide finché lo scorrimento è piccolo, e per una frequenza non eccessivamente piccola. La corrente di rotore riportata allo statore, nelle ipotesi specificate, può essere approssimata con $I_{12} = s \frac{V}{R_{12} \cdot 1.73} [2]$ cioè la corrente assorbita è proporzionale allo scorrimento.

Per *ridurre la velocità* si diminuiscono frequenza e tensione mantenendo costante il rapporto V/f . Poiché la tensione diminuisce, la corrente nominale si ha ad uno scorrimento che aumenta al diminuire della frequenza. La coppia che si ottiene con la corrente nominale è uguale alla coppia nominale perché il flusso si mantiene costante. Anche la coppia massima ottenibile rimane la stessa, mentre lo scorrimento a cui essa si verifica aumenta, poiché la differenza tra la velocità di sincronismo e la velocità cui si ha la coppia massima rimane costante: si ha il funzionamento a coppia costante. La caratteristica meccanica si sposta parallelamente a se stessa come mostrano i diagrammi di figura 3.5. La coppia di avviamento cresce, e la potenza ottenibile è proporzionale alla frequenza.

Si vede nei diagrammi, tracciati sulla base del circuito equivalente semplificato, che al di sotto di una certa frequenza la coppia massima diminuisce e si intuisce

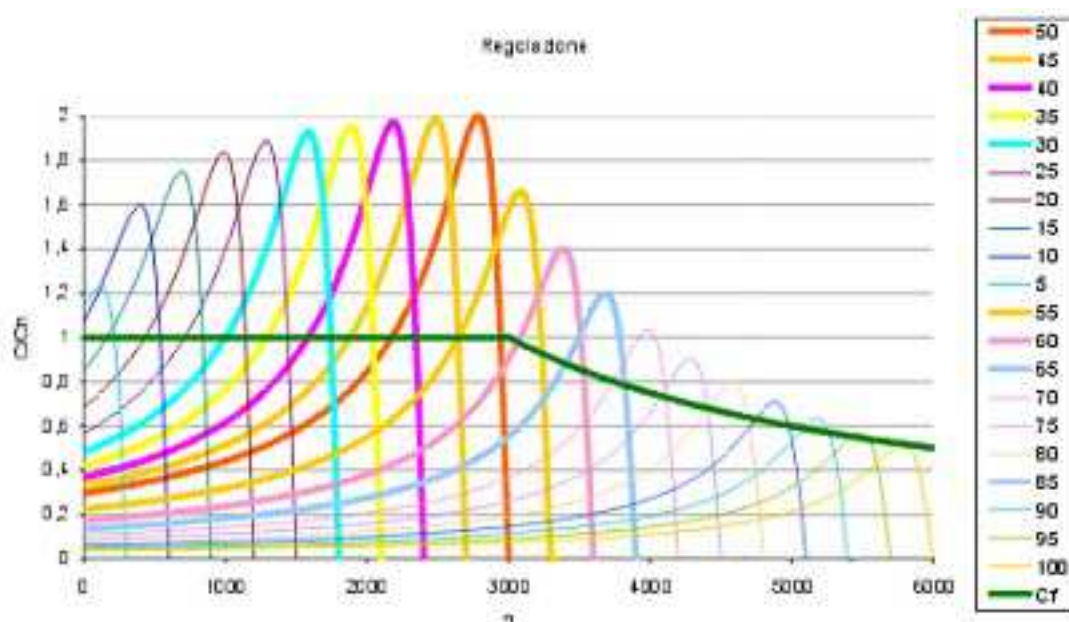


Figura 3.5: Andamento della coppia al variare della frequenza di alimentazione [2]

che per ottenere realmente, anche alle basse frequenze, una regolazione a coppia costante non è più possibile mantenere costante il rapporto V/f .

Se si vuole superare la velocità di sincronismo, bisogna aumentare la frequenza rispetto al valore nominale. Aumentando la frequenza e non potendo, per il dimensionamento dell'isolamento, superare la tensione nominale, il flusso magnetico diminuisce (deflussaggio). La coppia, con il motore che assorbe la corrente nominale, è inferiore alla coppia nominale. Essa diminuisce proporzionalmente all'aumento della frequenza, quindi della velocità. La potenza che il motore può erogare rimane costante e pari al valore nominale è il funzionamento a potenza costante. Contemporaneamente diminuisce, ancora più rapidamente, la coppia massima, che, da un certo punto in poi diventa addirittura minore della coppia che parrebbe erogabile con la corrente nominale. Per velocità superiori il motore può lavorare erogando una coppia massima ottenuta da una corrente inferiore alla nominale. La potenza fornibile decresce all'ulteriore aumentare della frequenza, proporzionalmente. Quando il motore raggiunge la velocità massima ammissibile per ragioni di sollecitazione meccanica, non si può ulteriormente aumentare la frequenza di alimentazione.

3.2.3 Controllo con inverter

Il controllo di velocità può essere effettuato con o senza retroazione. Lo scorrimento piccolo dà la possibilità di un controllo accettabile anche senza retroazione, ad anello aperto. L'errore di velocità dipende dal carico. La velocità impostata con la frequenza f è, indicando con p le coppie polari, $n_o = \frac{60f}{p}$, ma la velocità effettiva è $n = n_o(1 - s)$ con s dipendente dalla coppia resistente del carico. L'errore di velocità può essere compensato da un'opportuna regolazione della frequenza e si possono raggiungere precisioni dell'1%. Per eliminarlo completamente occorre un anello di retroazione. Si misura in tal caso l'effettiva velocità, la si confronta con quella impostata, e si aggiusta la frequenza fino ad ottenere a carico la velocità desiderata. La regolazione $\frac{V}{f} = costante$ è però inadeguata alle basse frequenze perché non garantisce la costanza della coppia erogabile legata alla costanza del flusso. La proporzionalità del flusso al rapporto tensione/frequenza è accettabile finché la caduta di tensione resistiva negli avvolgimenti è trascurabile. Ciò che occorre mantenere costante è in realtà il rapporto tra la tensione applicata diminuita della caduta resistiva, e la frequenza. A frequenze inferiori ai 10 Hz è indispensabile aumentare la tensione per contrastare l'indebolimento del flusso dovuto alla caduta ohmica (boost). Ci sono vari criteri per farlo e la tecnica è nota come "low-speed voltage boosting". Le figure 3.6 mostrano gli schemi a blocchi di un controllo ad anello aperto e controreazionato:

Nella catena chiusa c'è un trasduttore di velocità T (analogico: dinamo tachimetrica o, per una maggior precisione un encoder digitale) ed il segnale della velocità effettiva è confrontato con il segnale di riferimento impostato (n_{Rif}). Il risultato del confronto, non direttamente il segnale di riferimento come nella catena aperta, pilota i blocchi circuitali che variano frequenza e tensione in uscita dall'inverter.

3.2.3.1 Parametri di regolazione di un inverter scalare

Negli inverter scalari oltre alla frequenza si varia solamente il valore efficace della tensione. Non ci si occupa cioè delle relazioni di fase tra tensioni e correnti che si

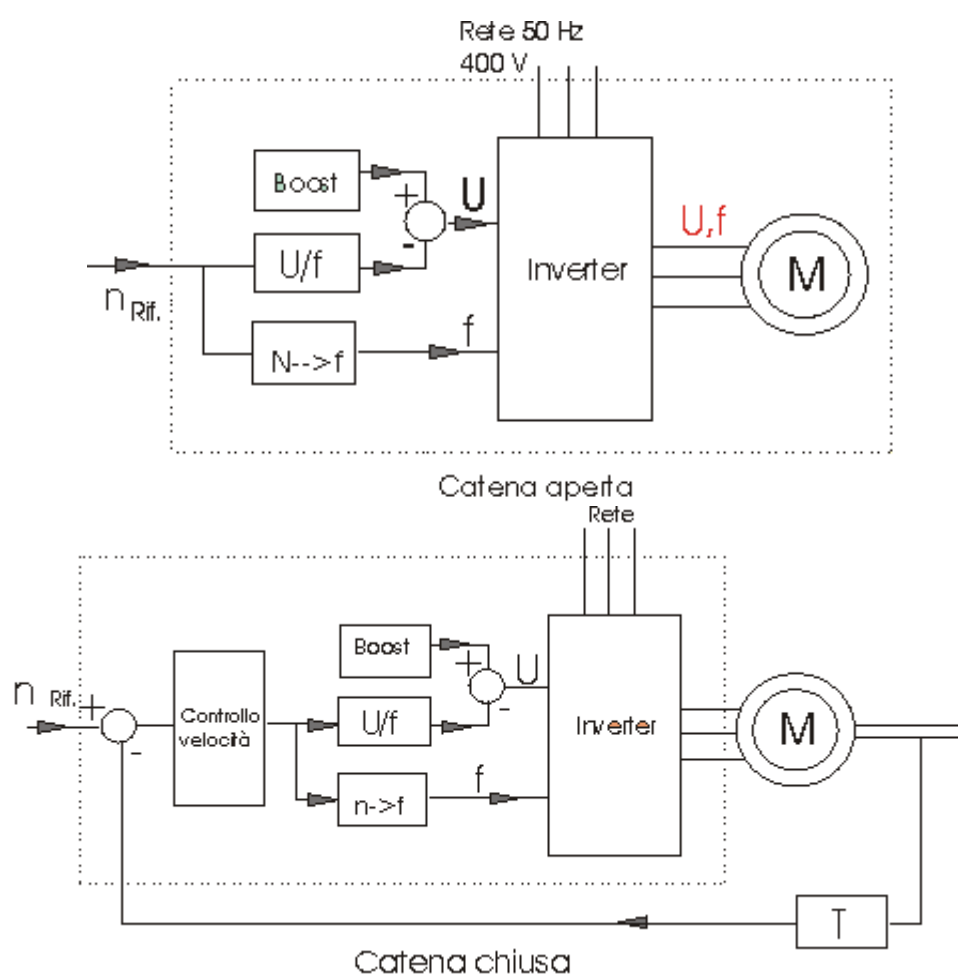


Figura 3.6: Controllo in catena aperta ed in catena chiusa [2]

riflettono nella posizione relativa dei campi magnetici di statore e di rotore, e che influenza sensibilmente la coppia per elevati scorrimenti. La frequenza d'uscita, quindi la velocità a vuoto del motore, è impostata con un segnale di riferimento analogico ($nRif$), una tensione (0-10 V) o una corrente (4-20 mA), che può essere fornito o da un semplice potenziometro o da un convertitore digitale analogico comandato da un computer. La regolazione del tipo V/f ha opzioni impostabili dall'utente. Ad esempio, l'incremento di tensione (boost) alle basse velocità, la velocità massima e minima, le accelerazioni. Se la coppia resistente supera la coppia nominale, intervengono le protezioni interne di massima corrente per impedire che l'eccessivo rallentamento porti il motore a funzionare nella zona instabile. Improvvise modifiche del riferimento sono trasformate internamente in una rampa che obbliga la frequenza a variare gradualmente. Se l'inerzia complessiva è bassa la velocità di regime è raggiunta senza problemi di eccessivo assorbimento di corrente.

Migliori risultati per il controllo e per la variazione di velocità si possono ottenere mediante inverter vettoriali e sfruttando il modello dinamico del motore asincrono, molto complesso[3].

Capitolo 4

Disponibilità del mercato

4.1 Dati di targa

Le caratteristiche principali che distinguono un motore asincrono, per la sua scelta, sono le seguenti:¹

- *La tensione nominale* che alimenta lo statore, e cioè la tensione concatenata di alimentazione statorica per la quale il motore è stato dimensionato. Questa grandezza può essere espressa con la lettera “U” nella letteratura anglosassone e tipicamente con la “V” in quella italiana ed è espressa in [Volt]
- Il tipo di alimentazione *monofase-trifase* ed il conseguente tipo di motore corrispondente
- *La frequenza nominale*, che è la frequenza di alimentazione da rete. Espressa in [Hz] ed indicata solitamente con la lettera “f”. Solitamente il valore nominale è di 50Hz
- *La velocità nominale* di rotazione del motore, in condizioni nominali di funzionamento. Velocità espressa solitamente in giri al minuto [RPM] ed indicata o per esteso o mediante il simbolo “ n_0 ”

¹NB: A volte il termine “nominale” è sostituito con “caratteristico”

- La *potenza nominale* generata dal motore e disponibile sull'albero motore come coppia motrice. Potenza calcolata in condizioni nominali di utilizzo (V, f e velocità). La potenza è spesso espressa in $[kW]$ ma si può trovare anche in cavalli $[HP]$, ricordando il fattore di conversione $1kW = 1.34HP$. Potenza indicata per esteso o semplicemente indicando l'unità di misura
- La *corrente nominale* assorbita dalla linea da ogni fase statorica in condizioni nominali di utilizzo
- Il fattore di potenza in condizioni nominali, espresso dal coseno dell'angolo di sfasamento tra tensione e corrente, per ogni fase statorica. Espresso abitualmente con il termine " $\cos\varphi$ ". Maggiore sarà lo sfasamento φ minore sarà questo termine e minore sarà il rendimento del motore perchè verrà dissipata più energia nel traferro
- Il *rendimento* in condizioni nominali, indicato solitamente con il termine η con un valore compreso tra 0 e 1 e più prossimo all'unità.
- La *coppia nominale motrice* disponibile sull'albero motore in condizioni nominali. Coppia espressa in $[Nm]$ ed indicata con " C_n " nelle letteratura italiana e " T_n " in quella anglosassone
- Alcuni costruttori mettono anche a disposizione il numero di *poli statorici* con cui sono realizzati gli avvolgimenti statorici.
- Il tipo di rotore, che può essere:
 - con rotore avvolto chiamato anche ad anelli
 - con rotore a gabbia di scoiattolo, detto anche rotore in cortocircuito;

Il primo tipo il rotore è costituito da avvolgimenti veri e propri come quelli dello statore, presenta una struttura più complessa e delicata (spazzole che strisciano sul rotore, con possibile interposizione di resistenze per il controllo della fase di avviamento) con necessità di manutenzione periodica e dimensioni d'ingombro elevate, sono usati in applicazioni dove sono richieste elevate coppie di avviamento e basse correnti di spunto. Questi motori

garantiscono la massima affidabilità e sono raccomandati nel caso di elevata inerzia del carico come mulini. Il secondo tipo invece ha un rotore costituito da sbarre chiuse in cortocircuito, quindi grazie ad una maggiore semplicità costruttiva dà origine ad un tipo di motore molto semplice, robusto ed economico. Il campo di potenze coperto da un tipo o l'altro di rotore è descritto nel capitolo 1.

- Il materiale di cui è fatta la carcassa
- Peso ed ingombro del motore
- Tipo di collegamento delle fasi (stella-triangolo) a cui bisogna prestare molta attenzione per evitare di compromettere il motore con disposizioni sbagliate
- Alcuni costruttori indicano anche il *rumore* prodotto dal motore in condizioni nominali di utilizzo, espresso in [dB]
- Standard di sicurezza e isolamento dei materiali che rispettano i motori in base alle leggi dell'unione europea (nel caso di costruttori europei)

I valori più importanti, tra quelli elencati, per la caratterizzazione di un motore e per una suddivisione in categorie sono, in ordine dal generale allo specifico: potenza nominale, tipo di rete di alimentazione (V, f e mono-tri fase) e velocità nominale di rotazione.

La potenza nominale dei motori disponibili varia da qualche W per piccole movimentazioni fino a centinaia di kW (con pesi dei motori nell'ordine delle tonnellate) per usi industriali con grandi coppie in gioco.

Prendiamo ora in esame a titolo di esempio i motori disponibili per qualche costruttore, evidenziando che il mercato disponibile per i MAT è vastissimo e ci sono molteplici costruttori.

4.1.1 Gamma Nerimotori:

La figura 4.1 riporta un esempio di data sheet di questo costruttore. Le voci fornite sono pressochè quelle elencate precedentemente, ma sono presenti in più varie voci per caratterizzare il motore. In particolare sono presenti i termini

- $\frac{I_s}{I_n} = \frac{\text{corrente di spunto}}{\text{corrente nominale}}$
- $\frac{C_s}{C_n} = \frac{\text{coppia di spunto}}{\text{coppia nominale}}$
- $\frac{C_{max}}{C_n} = \frac{\text{coppia massima}}{\text{coppia nominale}}$

Questi ulteriori parametri consentono di calcolare la corrente di spunto assorbita durante l'avviamento, la coppia motrice sempre all'avviamento (coppia di spunto) e la coppia massima che il motore riesce a generare; valori molto importanti per scegliere il motore giusto nel dimensionamento in base all'impiego che deve realizzare.

Si nota anche come all'aumentare di potenza ci sia bisogno di impiego di un materiale diverso per evitare problemi di surriscaldamento, vibrazioni e robustezza.

4.1.2 Gamma Orientalmotor

Nella figura 4.2 è rappresentata una categoria di motori del costruttore “Orientalmotor” per piccole potenze (fino a 90W). Viene indicata sia la coppia nominale che la coppia allo spunto, molto utile per il dimensionamento-scelta del motore. Nel capitolo del dimensionamento del motore è presente il data sheet con maggiore dettagli per il range di potenza a 25W (figura 5.2). Si ha per esempio il valore della corrente assorbita ed in più si ha la tabella dei vari riduttori compatibili con quel tipo di motore con le corrispondenti velocità di rotazione del moto-riduttore alla velocità nominale del motore e la coppia disponibile al carico del motoriduttore partendo dalla coppia nominale disponibile al carico del motore.

4.1.3 Gamma Motoinverter

Ultimamente, grazie al miglioramento dell'elettronica di potenza, sono usciti sul mercato dei sistemi denominati “Motoinverter” che sono comuni motori asincroni con l'aggiunta al loro interno anche di un inverter. Questa macchina ha quindi la possibilità di far variare la frequenza di alimentazione del motore variando così la velocità di rotazione del motore. Come detto nel capitolo 3 la potenza (e



2 POLI 3000 rpm – Volt 230/400/50 Hz

Potenza		Rpm	In (V 400)	Is / In	Cn (Nm)	Cs / Cn	Cmax / Cn	Rend. % η	Cos ϕ %	LwA (dB)	Peso kg
kW	HP										
Motori alluminio											
0,09	0,12	2750	0,30	5,2	0,31	2,1	2,2	62,0	0,70	57	3,6
0,12	0,18	2750	0,36	5,2	0,41	2,1	2,2	67,0	0,72	57	3,9
0,18	0,25	2720	0,50	5,5	0,61	2,2	2,3	65,0	0,80	58	4,8
0,25	0,37	2720	0,66	5,5	0,96	2,2	2,3	68,0	0,81	58	5,1
0,37	0,50	2740	0,94	6,1	1,26	2,2	2,3	70,0	0,81	61	6,0
0,55	0,75	2740	1,33	6,1	1,88	2,2	2,3	73,0	0,82	61	6,5
0,75	1,00	2840	1,73	6,1	2,54	2,2	2,3	75,1	0,83	64	8,7
1,10	1,50	2840	2,45	7,0	3,72	2,2	2,3	77,0	0,84	64	9,5
1,50	2,00	2840	3,26	7,0	5,14	2,2	2,3	79,0	0,84	69	11,8
2,20	3,00	2840	4,61	7,0	7,40	2,2	2,3	81,1	0,85	69	13,5
3,00	4,00	2860	6,01	7,5	9,95	2,2	2,3	82,8	0,87	73	21,0
4,00	5,50	2880	7,77	7,5	13,22	2,2	2,3	84,4	0,88	74	28,0
5,50	7,50	2900	10,50	7,5	18,11	2,2	2,3	85,9	0,88	77	39,0
7,50	10,00	2900	14,10	7,5	24,70	2,2	2,3	87,2	0,88	77	44,5
Motori ghisa											
11,00	15,00	2930	20,20	7,5	35,85	2,2	2,3	88,5	0,89	86	110,0
15,00	20,00	2930	27,20	7,5	48,89	2,2	2,3	89,5	0,89	86	120,0
18,50	25,00	2930	32,90	7,5	60,30	2,0	2,3	90,2	0,90	86	135,0
22,00	30,00	2940	38,90	7,5	71,46	2,0	2,3	90,7	0,90	89	165,0
30,00	40,00	2950	52,60	7,5	97,12	2,0	2,3	91,5	0,90	92	218,0
37,00	50,00	2950	64,40	7,5	119,78	2,0	2,3	92,2	0,90	92	230,0
45,00	60,00	2960	77,90	7,5	144,70	2,0	2,3	92,7	0,90	92	280,0
55,00	75,00	2965	94,60	7,5	176,85	2,0	2,3	93,2	0,90	93	365,0
75,00	100,00	2970	128,00	7,5	241,16	2,0	2,3	93,8	0,90	94	495,0
90,00	125,00	2970	152,00	7,1	289,39	2,0	2,3	94,0	0,91	94	565,0
110,00	150,00	2975	185,00	7,1	352,51	1,8	2,2	94,2	0,91	96	890,0
132,00	180,00	2975	221,00	7,1	423,02	1,8	2,2	94,6	0,91	96	980,0
160,00	220,00	2975	265,00	7,1	512,75	1,8	2,2	94,8	0,92	99	1055,0
200,00	270,00	2975	330,00	7,1	640,94	1,8	2,2	95,0	0,92	99	1110,0
250,00	340,00	2980	411,00	7,1	799,83	1,8	2,2	95,4	0,92	103	1900,0
315,00	430,00	2980	518,00	7,1	1007,90	1,8	2,2	95,5	0,92	103	2300,0

Figura 4.1: Datasheet nerimotori[5]

Motori ad induzione

■ Specifiche dei prodotti

Potenza resa W	Modello		Voltaggio V	Frequenza Hz	Coppia di avvio mN.m	Coppia carat- teristica mN.m	Velocità caratteristica r/min.	Grado di protezione Tipo e fili uscenti / Tipo con scatola terminale	Pagina
	Tipo a fili uscenti	Tipo con scatola terminale							
6	2IK6GN-CWE	2IK6GN-CWTE	Monofase 220	60	40	41	1450	IP20 / IP54 *	7
			Monofase 230	50	45	49	1200		
	2IK6GN-AWU	2IK6GN-AWTU	Monofase 230	60	40	41	1450		
			Monofase 110	60	40	41	1450		
15	3IK15GN-CWE	—	Monofase 220	60	65	105	1450	IP20 / —	9
			Monofase 230	50	75	125	1200		
	3IK15GN-AWU	—	Monofase 230	60	65	105	1450		
			Monofase 110	60	65	105	1450		
25	4IK25GN-CWE	4IK25GN-CWTE	Monofase 220	60	120	170	1450	IP20 / IP54	11
			Monofase 230	50		205	1200		
	4IK25GN-AWU	4IK25GN-AWTU	Monofase 230	60	170	1450			
			Monofase 110	60	120	170	1450		
—	4IK25GN-UT4	Trifase 400	50	240	190	1300	— / IP54		
40	5IK40GN-CWE	5IK40GN-CWTE	Monofase 220	60	200	260	1500	IP20 / IP54	14
			Monofase 230	50		300	1300		
	5IK40GN-AWU	5IK40GN-AWTU	Monofase 230	60	260	1500			
			Monofase 110	60	200	260	1500		
—	5IK40GN-UT4	Trifase 400	50	500	315	1250	— / IP54		
60	5IK60GU-CWE	5IK60GU-CWTE	Monofase 220	60	320	405	1450	IP20 / IP44	17
			Monofase 230	50		490	1200		
	5IK60GU-AWU	5IK60GU-AWTU	Monofase 230	60	405	1450			
			Monofase 110	60	320	405	1450		
—	5IK60GU-UT4F	Trifase 400	50	550	470	1250	— / IP44		
90	5IK90GU-CWE	5IK90GU-CWTE	Monofase 220	60	450	605	1450	IP20 / IP44	20
			Monofase 230	50		730	1200		
	5IK90GU-AWU	5IK90GU-AWTU	Monofase 230	60	605	1450			
			Monofase 110	60	450	585	1500		
—	5IK90GU-UT4F	Trifase 400	50	850	700	1250	— / IP44		

Figura 4.2: Una gamma motori orientalmotor[6]

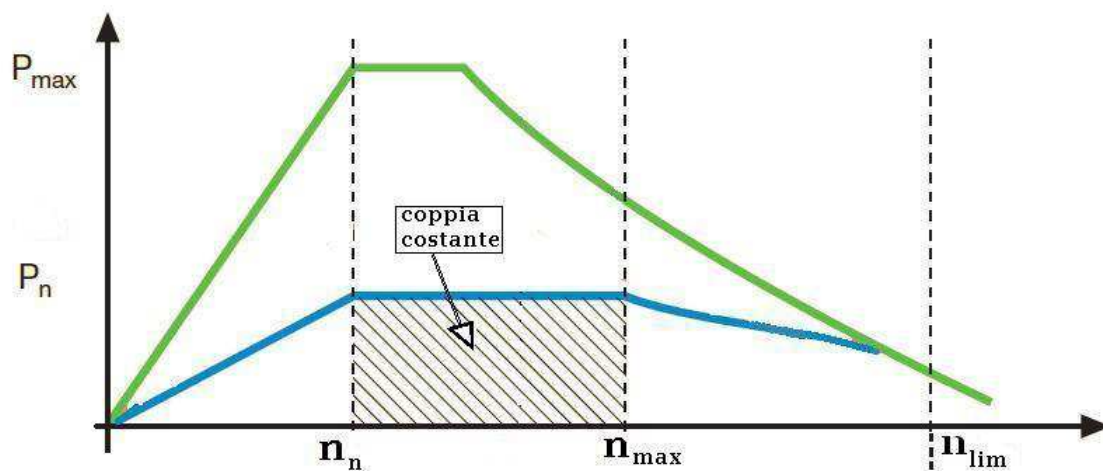


Figura 4.3: Grafico potenza motoinverter ABB[7]

la coppia nominale e massima) non sarà sempre costante per ogni valore della frequenza di alimentazione, e per la gamma di motoinverter del costruttore ABB la potenza varia come evidenziato in figura 4.3. Si avrà quindi potenza costante solo per velocità comprese tra N_n e N_{max} . La curva più bassa indica l'andamento della potenza nominale e si nota come tra N_n e quasi N_{lim} il valore di P_n non si abbassa eccessivamente; mentre, per quanto riguarda la curva superiore indicante la potenza massima, si nota come cala repentinamente e quindi se si utilizza il motore con carichi prossimi al valore della coppia massima bisogna prestare molta attenzione nella scelta del motoinverter giusto.

Nella figura 4.4 si vede l'esempio di un datasheet di un motoinverter del costruttore "ABB". Molte voci dei dati di targa sono comuni ai normali motori asincroni, si notano però alcune voci in aggiunta. Si ha in particolare il valore della velocità nominale N_n a frequenza nominale ed il valore di velocità massima N_{max} fino alla quale il motore funziona a potenza costante ed il range generale di velocità del motore.

4.2 Peculiarità rispetto ad un motore in c.c.

Prendendo in esame uno dei precedenti data sheet con, per esempio, uno qualsiasi di un motore a spazzole a corrente continua notiamo delle differenze. Oltre alle

Rated voltage 400V

CH [H100 IP54]

Duty S1						General data		
Nominal Speed	End Constant power	Freq.	Nominal Power	Nominal Torque	Nominal Current	Tmax/Tn	Inertia	Mech. limit speed
n_n [rpm]	n_{max} [rpm]	f_N [Hz]	P_N [kW]	M_N [Nm]	I_N [A]		J[kg m ²]	n_{lim} [rpm]
1000	2000	52,5	2,0	19,1	5,4	2,3	0,0062	7500*
1500	3000	77,4	3,0	19,1	7,9			
2000	4000	102,4	4,0	19,1	10,2			
3000	6000	152,2	5,0	15,9	12,7			
4000	8000	202,3	6,0	14,3	15,4			
1000	2000	52,4	2,7	25,8	7,1	2,3	0,0075	
1500	3000	77,3	4,0	25,5	10,3			
2000	4000	102,3	5,3	25,3	13,4			
3000	6000	152,1	6,7	21,3	17,1			
4000	8000	202,1	8,2	19,6	21,2			
1000	2000	52,3	3,7	35,4	9,5	2,3	0,0102	
1500	3000	77,2	5,4	34,4	13,7			
2000	4000	102,3	7,2	34,4	17,8			
3000	6000	152,0	9,4	29,9	23,4			
4000	8000	202,2	11,3	27,0	27,8			
1000	2000	52,3	5,0	47,7	12,5	2,3	0,0142	
1500	3000	77,2	7,4	47,1	18,4			
2000	4000	102,2	9,7	46,3	23,5			
3000	6000	151,9	12,6	40,1	31,2			
4000	8000	202,0	15,3	36,5	38,9			
1000	2000	52,2	6,0	57,3	15,0	2,2	0,0168	
1500	3000	77,1	8,9	56,7	22,0			
2000	4000	102,1	11,7	55,9	28,5			
3000	6000	151,9	14,9	47,4	36,4			
4000	8000	202,0	17,9	42,7	44,3			
1000	2000	52,3	7,4	70,6	18,1	2,2	0,0198	
1500	3000	77,1	10,9	69,4	26,7			
2000	4000	102,2	14,2	67,8	33,7			
3000	6000	151,9	18,0	57,3	43,8			
4000	8000	202,0	20,5	48,9	49,8			

Figura 4.4: datasheet motoinverter ABB[7]

differenze riguardanti le velocità che sono dovute al tipo di utilizzo e principio di funzionamento dei motori, notiamo che nei dati del motore asincrono non sono presenti i valori caratteristici degli elementi elettrici presenti nel motore. Non vengono per esempio dati i valori della resistenza di statore-rotore di reattanza o simili. Questa caratteristica può essere scomoda in quanto non si possono effettuare simulazioni in “simulink”, se non acquistando il motore e ricavando i valori elettrici per mezzo di misurazioni sul motore stesso; altresì questa peculiarità evidenzia ulteriormente il tipo di utilizzo del MAT in quanto non ci si preoccupa eccessivamente della precisione della velocità ma vengono indicati esclusivamente i valori di coppia nominale, massima e di spunto sapendo che successivamente il motore si “autoregolerà”, se il carico è compatibile con questi valori. Se per la caratteristica “coppia” ci si accontenta di avere un carico compatibile con i valori che può supportare il motore, un’altra importante caratteristica riguarda la corrente. Sappiamo infatti le difficoltà legate all’assorbimento di corrente durante lo spunto, senza l’ausilio di metodi speciali per l’avviamento, ed un calcolo della corrente di spunto sarebbe risultato utile. Alcuni costruttori, come per esempio la nerimotori (figura 4.1) forniscono questa corrente di spunto, mentre altri no e bisogna quindi accontentarsi di sapere la coppia disponibile allo spunto, ponendo un carico con una coppia resistente minore di quest’ultima senza sapere l’effettiva corrente di spunto assorbita.

Se prendiamo in esame un confronto tra un MAT ed un motore in corrente continua possiamo notare le seguenti peculiarità, riassunte in tabella 4.1.

	MAT	Motore c.c
Variazione di velocità	Con inverter dinamica lenta e meno precisa ed è più costoso	Controllo con driver in corrente o tensione ottenendo ottimi risultati
Coppia massima	A velocità prossime al sincronismo	A rotore fermo
Problemi surriscaldamento	Molto limitati, risolvibili eventualmente con una ventola o metodi avviamento	Molto diffusi, soprattutto a velocità nulla o ad alte velocità causa spazzole
Coppia allo spunto	Molto limitata	Coppia massima
Velocità massima	Molto elevata grazie agli attriti limitati	Limitata da spazzole e fcem
Manutenzione	Limitata, lunga durata	Durata del motore non lunghissima

Tabella 4.1: MAT vs motore c.c.

Capitolo 5

Scelta motore

Per gli esempi riguardanti la scelta motore (dimensionamento) prendiamo in analisi la gamma motori della “orientalmotor”. Si hanno comunque le seguenti operazioni comuni per la scelta di un motore asincrono:

1. Specifiche richieste: per prima cosa bisogna determinare le specifiche richieste come la velocità di rotazione, la coppia al carico, tensione e frequenza nominali.
2. Calcolo velocità operazione: prendiamo in analisi il caso in cui non vi sia l’ausilio dell’elettronica di potenza, e quindi la velocità del motore non è regolabile. Bisogna quindi scegliere un giusto rapporto del cambio per la riduzione della velocità fino alla velocità richiesta dall’applicazione.
3. Calcolo coppia richiesta al carico
4. Scelta motore e rapporto di riduzione: una volta determinati i valori ottimali di coppia velocità e rapporto di riduzione, si analizza cosa mette a disposizione il mercato e si sceglie l’apparecchiatura più consona

Vediamo ora un esempio:

1. Scelta del rapporto di riduzione:

data la velocità che dovrà avere il rullo trasportatore, calcoliamo la velocità N_G che deve essere presente all’uscita dell’albero del motoriduttore:

$$N_G = \frac{V \cdot 60}{\pi \cdot D} = \frac{(140 \pm 14) 60}{\pi \cdot 100} = 26.7 \pm 2.7 \quad [RPM]$$

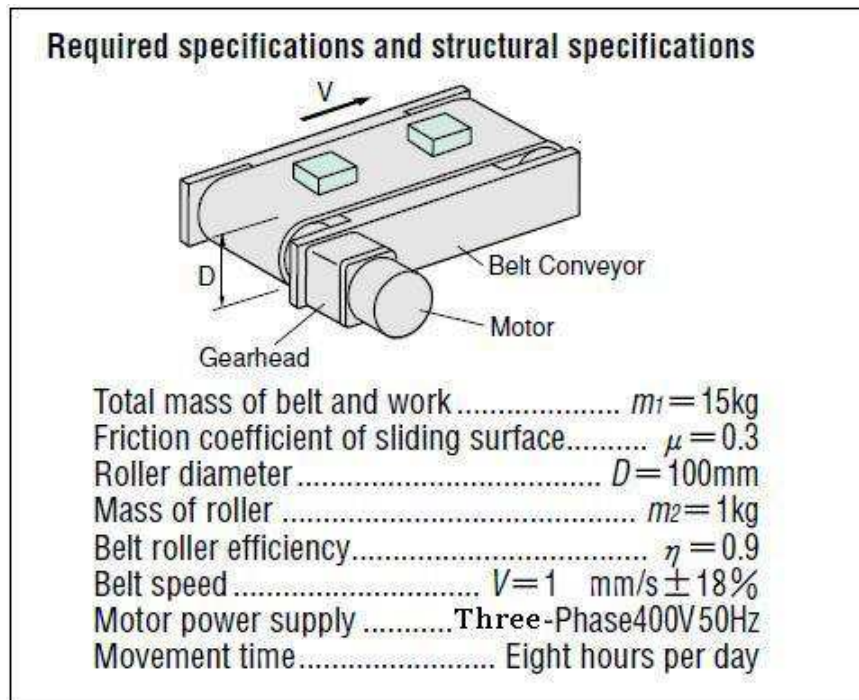


Figura 5.1: Dati dell'esempio [6]

Procediamo sapendo che la velocità nominale di un motore asincrono (della gamma che utilizzeremo) varia solitamente tra $1200 \sim 1300 \text{ RPM}$ e calcoliamo quindi il valore del rapporto di riduzione ottimale i :

$$i = \frac{1200 \div 1300}{N_G} = 40.8 \sim 54.2$$

Visti i rapporti di riduzione offerti dalla gamma motori-riduttori della “orientalmotor” scegliamo un rapporto di $i = 50$ e verifichiamo successivamente che questo vada effettivamente bene.

2. Coppia richiesta:

In un nastro trasportatore la coppia maggiore è richiesta all'avviamento, e per calcolarla determiniamo inizialmente grazie al coefficiente di attrito, la forza F della superficie di scorrimento:

$$F = \mu m_1 g \cong 45 \quad [N]$$

Calcoliamo ora la coppia del carico T_L :

$$T_L = \frac{F \cdot D}{2 \cdot \eta} = 2550 \quad [mNm]$$

Questa appena calcolata è la coppia necessaria all'albero del motoriduttore, vediamo ora di quanto si riduce questa coppia all'albero motore, grazie al

riduttore:

$$T_M = \frac{T_L}{i \cdot \eta_G} = 75.8 \quad [mNm]$$

prendendo un rendimento del riduttore di $\eta_G = 0.66$.

Si prende adesso un margine di sicurezza del doppio della coppia richiesta, considerando l'oscillazione della tensione di alimentazione rispetto alla tensione nominale (si ricordi che la coppia è proporzionale al quadrato della tensione):

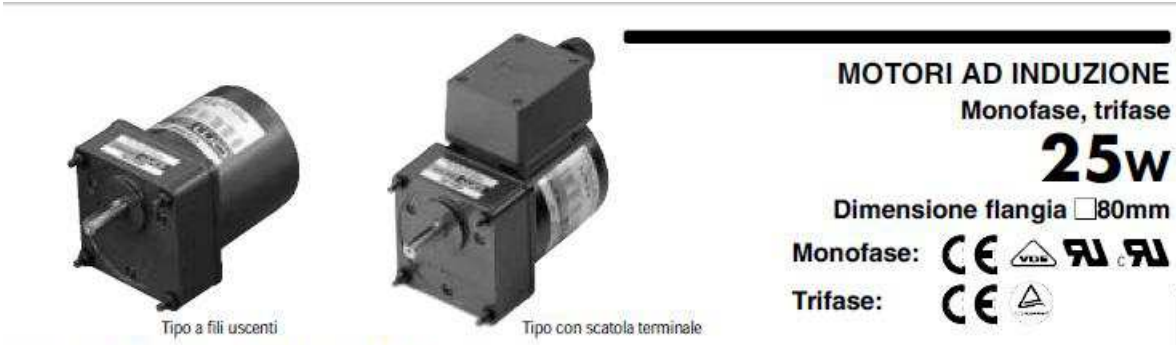
$$75.8 \cdot 2 \cong 152 \quad [mNm]$$

Quindi Come si evince dalla tabella 5.2 un motore adatto per questo tipo di applicazione è quello avente codice "41K25GN – UT4" con alimentazione trifase a 400V. Abbinato a questo motore il riduttore adatto è il "4GN50K" con rapporto di riduzione 50. La velocità caratteristica del motore sarà di circa 1300 RPM mentre la velocità di rotazione del motoriduttore sarà molto più bassa, precisamente di circa 30 RPM. Questa velocità di rotazione rientra nel range del 10% della velocità imposta dalle specifiche ed inoltre con un rapporto di riduzione così elevato il motore riesce ad erogare una coppia massima (autoregolandosi in velocità) di 6.3Nm. Questa coppia è superiore a quella massima calcolata (considerando sia attriti che fluttuazione del voltaggio della rete elettrica) di circa 5.0Nm. Si avrà quindi che il motore ruoterà alla stessa velocità, circa, anche aumentando il carico presente sul rullo. In particolare nel data sheet viene scritto che la velocità di rotazione diminuirà dal 2% al 20% a seconda del carico applicato. Rientriamo quindi nelle specifiche richieste.

Calcoliamo ora la massa totale che può essere applicata al carico riuscendo a mantenere il motore nella parte stabile del suo funzionamento. Dalle espressioni della forza di attrito e della coppia al carico, possiamo trovare:

$$m_{1,max} = \frac{T_{L,max} \eta}{\mu g D} = 19 [kg].$$

Questa è una stima per avere un margine di sicurezza molto ampio, considerando una coppia del doppio rispetto a quella calcolata. Nonostante ciò riusciamo a far funzionare il motore circa alla stessa velocità con un carico che varia tra 0 e 19 Kg.



• Specifiche — Prestazioni a regime

Modello Con albero a pignone (Con albero tondo)		Potenza sviluppata	Voltaggio	Frequenza	Corrente	Coppia di avvio	Coppia caratteristica	Velocità caratteristica	Condensatore	Grado di protezione	
Tipo a fili uscenti	Tipo con scatola terminale	W	V	Hz	A	mN·m	mN·m	r/min.	µF	Tipo a fili uscenti / Tipo con scatola terminale	
4IK25GN-CWE • 4IK25A-CWE •	4IK25GN-CWTE • 4IK25A-CWTE •	25	Monofase 220	60	0.22	170	1450	1.5	1.5	IP20 (IP20) / IP54 (IP40)	
4IK25GN-AWU • 4IK25A-AWU •	4IK25GN-AWTU • 4IK25A-AWTU •		Monofase 230	50	0.24	120	205			1200	IP20 (IP20) / IP54 (IP40)
• •	4IK25GN-UT4 • 4IK25A-UT4 •		Monofase 230	60	0.22	170	1450			IP20 (IP20) / IP54 (IP40)	
• •	• •		Trifase 400	50	0.12	240	190	1300	• •	IP54 (IP40)	

Il prodotto contiene una protezione termica incorporata. Quando un motore si surriscalda per qualsiasi motivo, la protezione termica si apre ed il motore si arresta, quando la temperatura del motore cala, la protezione termica si chiude ed il motore riparte. Assicurarsi che il motore venga spento prima di effettuare verifiche.

La 'U' o la 'E' al termine del numero del particolare indica che l'unità contiene un condensatore. Queste due lettere non sono incluse sulla targa identificativa del motore. Quando il motore è certificato ai sensi delle varie norme di sicurezza, viene adottata la targa di identificazione.

Nota : Non fare funzionare nessun motore a C.A. 400V con un inverter. Questo danneggerà l'isolamento dei fili del motore.

• Motori con riduzione — Tabella delle coppie

La massima coppia possibile con un riduttore decimale con un rapporto di 10 è 8N·m.

Il valore è di 6N·m quando sono utilizzate teste di riduzione da 1/25 • 1/36.

• Possono essere utilizzati riduttori ad angolo retto
Fare riferimento a pag.50 per ulteriori dettagli sui riduttori ad angolo retto.

● Monofase 230V 50Hz, Trifase 400V 50Hz

Modelli	Velocità r/min		Rapporto																		
	500	416	300	250	200	166	120	100	83	60	50	41	30	25	20	16	15	12.5	10	8.3	
4IK25GN-CWE 4IK25GN-CWTE / 4GN_K	0.5	0.6	0.83	1	1.2	1.5	2.1	2.5	3	3.7	4.5	5.4	6.8	8	8	8	8	8	8	8	8
4IK25GN-UT4 / 4GN_K	0.46	0.55	0.77	0.92	1.2	1.4	1.9	2.3	2.8	3.5	4.2	5	6.3	7.5	8	8	8	8	8	8	8

● Monofase 220V/230V 60Hz, 110V/115V 60Hz

Modelli	Velocità r/min		Rapporto																		
	600	500	360	300	240	200	144	120	100	72	60	50	36	30	25	20	18	15	12	10	
4IK25GN-CWE 4IK25GN-CWTE 4IK25GN-AWU 4IK25GN-AWTU / 4GN_K	0.41	0.5	0.69	0.83	1	1.2	1.7	2.1	2.5	3.1	3.7	4.5	5.6	6.7	8	8	8	8	8	8	8

• I riduttori sono venduti separatamente.

• Inserire il rapporto nel riquadro (□) inserito nel numero del modello. Un fondo colorato indica la rotazione dell'asse del riduttore nello stesso verso dell'asse del motore, un fondo bianco indica la rotazione in direzione opposta.

• La velocità è calcolata dividendo la velocità sincrona del motore (50Hz: 1500r/min, 60Hz: 1800r/min) per il rapporto. La velocità effettiva è del 2 -20% inferiore rispetto al valore dichiarato, in funzione del carico applicato.

Figura 5.2: Data sheet per la scelta motore [6]

3. Inerzia del carico

Si passa ora al calcolo dell'inerzia che sarà collegata all'albero del motore, verificando se essa è tollerabile dal riduttore o meno.

L'inerzia dei 2 rulli del nastro trasportatore è così calcolata:

$$J_1 = \frac{1}{8} \cdot m_2 \cdot D^2 \cdot 2 = 25 \cdot 10^{-4} \quad [kgm^2]$$

A cui va sommata l'inerzia del nastro:

$$J_2 = m_1 \frac{(\pi \cdot D)^2}{4\pi^2} = 375 \cdot 10^{-4} \quad [kgm^2]$$

trovando quindi l'inerzia totale

$$J = J_1 + J_2 = 400 \cdot 10^{-4} \quad [kgm^2]$$

Confrontata con l'inerzia permessa dal riduttore, $J_G = 1400 \cdot 10^{-4} [kgm^2]$ si nota che questa è molto maggiore e quindi non ci sono problemi e possiamo usare questo riduttore.

Facendo un confronto con il dimensionamento, per esempio, di un semplice motore a corrente continua, si notano significative differenze. In particolare l' "oriental-motor" (e la maggior parte dei costruttori in genere) non fornisce tutti i dati costruttivi del motore ma fornisce semplicemente la coppia massima con la quale il motore può lavorare, senza dare troppa importanza alla velocità. Questo perché, come già detto, questo tipo di motore (se la coppia al carico non è eccessiva) cercherà di autoregolare la sua velocità; dall'altra parte nelle tipiche applicazioni in cui si fa uso di questo tipo di motore non si è particolarmente interessati alla precisa velocità di rotazione del motore-carico ma interessa il range entro la quale varia.

Conclusioni

Scopo principale di questo elaborato è stato quello di far capire il principio di funzionamento di questa macchina che è economica, stabile, sicura, autoregolante e necessita di pochissima manutenzione. Vantaggio indiscusso di questo motore è la facilità di utilizzo, ed in particolare il fatto di poter variare (entro certi limiti) il carico senza che la velocità di rotazione del motore cambi. Questa caratteristica (insieme alle precedenti) lo ha reso padrone incontrastato per tutte quelle applicazioni in cui sarà presente una variazione del carico, come rulli trasportatori, ascensori, scale mobili ecc. ed in quelle applicazioni in cui l'importante è che il motore ruoti ad una certa, alta e non precisa, velocità come per esempio pompe, impianti di ventilazione ecc. ed in queste applicazioni le caratteristiche importanti sono l'economicità, l'auto-avviamento e la longevità del motore. Fino ad una decina di anni fa il controllo di un MAT non era assolutamente diffuso, ma di recente gli sviluppi dell'elettronica di potenza hanno dato frutto ad inverter molto precisi e sicuri che riescono a far variare la velocità del motore rendendolo in grado di soddisfare un numero molto maggiore di applicazioni e dando anche la possibilità di effettuare un controllo (in catena chiusa, aperta o con inverter vettoriali più complessi). Questo tipo di azionamento elettrico (MAT+controllo.inverter) non potrà mai sostituire per esempio un motore in cc nelle applicazioni dove è richiesta una migliore dinamica ed un controllo molto preciso e veloce, ma sta iniziando ad essere molto diffuso nelle applicazioni che non richiedono prestazioni elevate, sfruttando i vantaggi di questo motore (MAT) già elencati precedentemente.

Glossario

- induction motor: motore asincrono
- squirrel-cage rotor: rotore a gabbia di scoiattolo
- cooling fan: ventola raffreddamento
- slip velocity: velocità di scorrimento
- steady-state: regime stazionario
- data sheet: dati di targa
- torque: coppia
- MAT: Motore asincrono Trifase
- Dimensionamento motore: preventivare i valori massimi di coppia motrice necessaria ed il tipo di movimentazione da eseguire per scegliere il motore più adatto all'applicazione
- Range: intervallo
- Tiristore: dal punto di vista elettrico è pressoché equivalente al diodo con la sola differenza che la conduzione diretta avviene solamente in seguito all'applicazione di un opportuno segnale di innesco su un terzo terminale denominato gate.
- monofase: single phase
- trifase: three phase

- belt: rullo
- roller: puleggia

Bibliografia

- [1] D. Assante, “Motore asincrono,” Ph.D. dissertation, Università degli Studi di Napoli.
- [2] <http://www.electroportal.net>.
- [3] A. M. and Trzynadlowski, *Control of induction motors*. USA: Academic press, 1999.
- [4] <http://www.barrascarpetta.org/>.
- [5] <http://www.nerimotori.com/>.
- [6] <http://www.orientalmotor.it/it/sites/start.php>.
- [7] <http://www.abb.it/>.
- [8] S. Bolognani, *Azionamenti elettrici*, Università degli Studi di Napoli, 1999.

Ringraziamenti

Ringrazio il Professor Giulio Rosati per i preziosi consigli impartiti durante la ricerca del materiale e la stesura di questo elaborato e la mia famiglia.