

APPUNTI DI ELETTROTECNICA

INVERTER

per

MOTORI ASINCRONI TRIFASI

A cosa servono e come funzionano

A cura di Marco Dal Prà

www.marcodalpra.it

Versione n. 3.3 - Marzo 2013

Prefazione

L'inverter è un dispositivo che ha cambiato radicalmente l'automazione nell'industria, introducendo la possibilità di regolare la velocità dei motori a induzione con costi molto contenuti sia di installazione che di esercizio.

La regolazione di velocità viene oggi implementata anche nelle applicazioni dove l'uso del motore in corrente continua in passato era impensabile e soprattutto antieconomica, rendendolo di fatto un sistema obsoleto in fase di progressivo abbandono.

Vedo e sento spesso domande sugli inverter, ma dato che sembra mancare un documento unico sull'argomento ho deciso di scrivere questa breve guida, raccogliendo notizie da cataloghi tecnici, siti internet e riviste specializzate.

In particolare la scrivo per essere d'aiuto a chi ne sa poco o sa nulla e vuole capirci qualcosa di più ; questa guida infatti non vuole essere esaustiva, ma vuole solo dare le informazioni generali sul principio di funzionamento dei regolatori di velocità per i motori asincroni trifasi.

Nella prima parte si troveranno concetti basilari e molto semplici, mentre nella seconda l'argomento è affrontato anche con le formule del motore.

Per un breve approfondimento sul motore asincrono trifase, si rimanda al Manuale delle Macchine Elettriche.

Bibliografia :

- Mario Pezzi Macchine Elettriche 2a. Ediz. - Zanichelli
- Bassi / Bossi Elettrotecnica Pratica Editoriale Delfino Marzo 2000
- Mario Maggi L'inverter..cuore del sistema Elettrificazione Gennaio 2005
- Principi base dei Motori Trifase a induzione Rockwell Automation Ott.1997
- www.electroyou.it Articoli vari

DEFINIZIONI

Al fine della presente guida valgono le seguenti definizioni :

Azionamento

Per azionamento si intende una sistema costituito da un motore elettrico dal suo apparecchio di comando e controllo.

In un azionamento i due componenti sono dimensionati assieme e finalizzati a produrre un movimento meccanico con parametri modificabili a piacere dall'utente.

I parametri tipici sono la velocità, accelerazione e decelerazione.

Azionamento in c.a.

Sistema composto da un Inverter e da un Motore trifase.

Azionamento in c.c.

Con azionamento in corrente continua si indica una sistema composto da un regolatore e da un motore in corrente continua.

Inverter

Dispositivo elettronico atto a trasformare una corrente continua in corrente alternata di forma sinusoidale o pseudosinusoidale.

Generalmente nel gergo industriale si intende un dispositivo atto alla regolazione della velocità dei motori trifasi.

Molte case costruttrici per evitare questa sovrapposizione di termini chiamano questo dispositivo "Drive".

Frequenza

Cicli al secondo (si misura in Hertz).

Nella presente guida si considera pari a **50 Hz**, che è la frequenza unificata per l'Europa della tensione di rete.

Bassa Tensione (B.T.)

Sono considerati in Bassa Tensione gli impianti elettrici con tensione inferiore a 1000 Volt in corrente alternata (Norma CEI 64-8) : 230 Volt per i circuiti monofase, e 400V per i circuiti trifase.

Sono in B.T. anche i circuiti trifase a 690V, usati per elevate potenze o negli impianti navali.

Capitolo I°

INTRODUZIONE AGLI INVERTER

1.1 Generalità

L'inverter è un dispositivo elettronico atto a generare una corrente alternata a partire da una corrente continua; talvolta viene anche detto "convertitore statico di frequenza".

In linea di massima si individuano due tipi di inverter : a frequenza costante ed a frequenza variabile.

1.2 Inverter a Frequenza Costante

L'inverter a frequenza costante più diffuso è quello che c'è dentro ai Gruppi di Continuità (UPS), i dispositivi usati per alimentare i computer in caso di black-out.

Nel Gruppo di Continuità la tensione di rete viene raddrizzata in corrente continua a livello compatibile con una batteria interna, e quindi viene riconvertita dall'inverter in corrente alternata a valori standard 230V / 50Hz.

Nel caso manchi l'alimentazione, l'inverter continua ad alimentare il carico prelevando l'energia dalla batteria fino alla sua completa scarica.

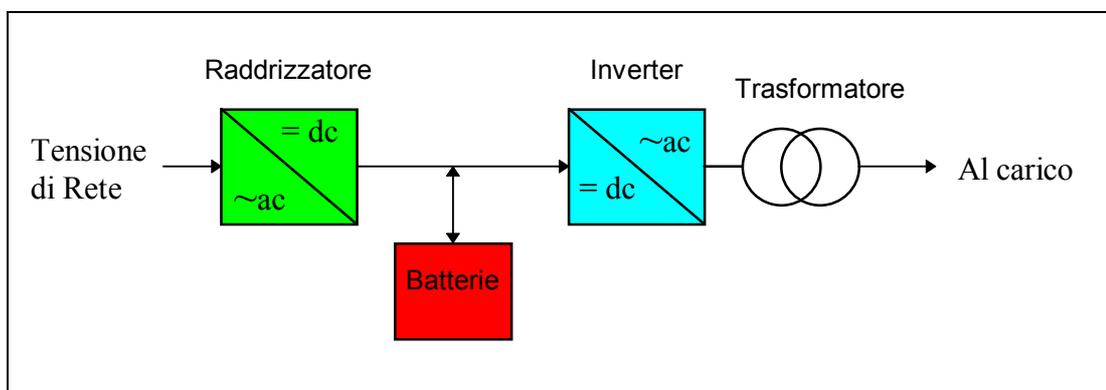


Figura 1.1 Tipico schema a blocchi di un UPS.

Questo tipo di apparecchio spazia da potenze lillipuziane (i 200-300 Watt del PC della nostra scrivani) fino ad arrivare a 20-30kW ed oltre.

Un altro utilizzo degli inverter a frequenza costante è connesso con l'energia solare.

L'inverter, in tal caso serve per convertire l'energia elettrica prodotta dai Pannelli Fotovoltaici in corrente continua in corrente alternata a 50Hz perché sia riversata nella rete pubblica o verso le utenze tradizionali a 230V.

Questo dispositivo, nel caso di allacciamento alle reti pubbliche, è comunque oggetto di particolari normative sia CEI che ENEL.

1.3 Inverter a Frequenza Variabile

L'inverter a frequenza variabile serve per regolare la velocità dei motori trifasi (¹).

Come si vedrà in seguito, infatti, la velocità di rotazione del motore è strettamente connessa con la frequenza della tensione con cui lo si alimenta.

Nell'inverter la tensione alternata della rete (trifase o monofase) viene raddrizzata in corrente continua e quindi viene riconvertita in corrente alternata trifase a frequenza variabile per alimentare il motore.

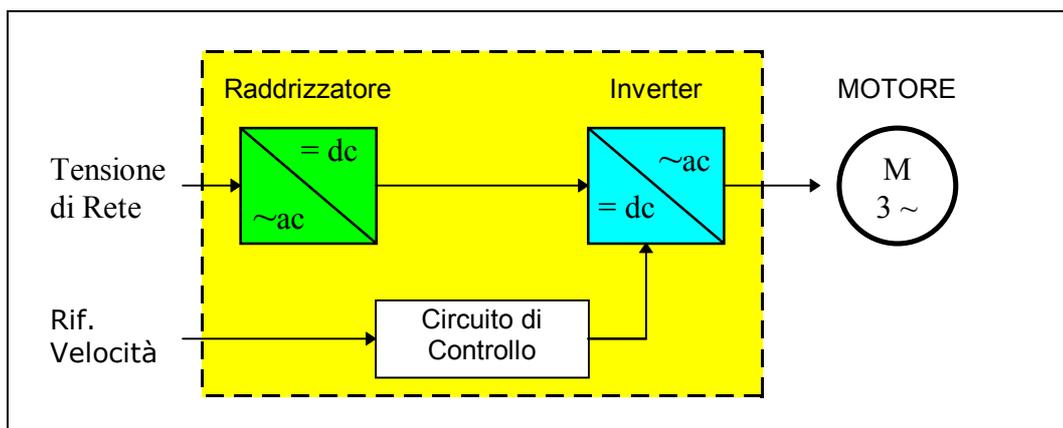


Figura 1.2 Tipico schema a blocchi di un Inverter per motore trifase.

Il valore della frequenza in uscita può quindi essere scelto a piacere dall'utilizzatore a seconda della velocità di funzionamento che si vuole far raggiungere al motore.

Sul mercato sono disponibili taglie che vanno da potenze minime di 500W fino a oltre 500 kW con la tensione industriale di 400V (Bassa Tensione), ed addirittura a 10 MW con gli inverter a 6000V (in media tensione).

In linea generale un inverter potrebbe essere utilizzato sia per motori sincroni che per motori asincroni, ma in questa trattazione ci occuperemo solamente del motore asincrono in bassa tensione.

¹ Altri usi sono possibili ma non rientrano in questa trattazione.

1.4 Vantaggi Involontari

Sia gli UPS che gli inverter per motori asincroni trifasi hanno il vantaggio di assorbire corrente dalla rete di alimentazione praticamente in fase con la tensione ($\text{Cos } \varphi \cong 0.95$).

In pratica il $\text{Cos } \varphi$ del carico non si riflette sulla corrente assorbita, e quindi non deve essere rifasato.

Questa è una caratteristica intrinseca dello stadio raddrizzatore di ingresso, che per contro ha un assorbimento di corrente non proprio lineare.

1.5 Effetti collaterali

Gli inverter a frequenza variabile per la regolazione della velocità dei motori sono dei veri e propri generatori di disturbi elettromagnetici.

Questi “disturbi” vanno verso il carico, verso la rete di alimentazione, e verso l’ambiente circostante sotto forma di radiodisturbi.

I costruttori forniscono comunque dei dispositivi, da installare assieme all’inverter, adatti a contenere questi problemi, e forniscono inoltre i consigli adatti per ottenere un’installazione che rispetti le Norme EN e la Direttiva sulla compatibilità elettromagnetica (EMC).

Si rimanda comunque l’argomento in Appendice A.

1.6 Vantaggi Economici Reali

Un breve esempio può far capire il vantaggio che comporta l’uso di un inverter.

Negli impianti idraulici, il modo più semplice per diminuire o regolare una portata è quello di agire su di una valvola, introducendo in pratica una strozzatura sul percorso del fluido.

Per contro, il motore elettrico che aziona la pompa o il ventilatore, continua ad assorbire la stessa potenza di prima, anzi c’è anche la possibilità che assorba qualcosina di più.

Si rischiano inoltre fenomeni come la cavitazione della girante, oppure sibili ed altri rumori fastidiosi (ad esempio nelle canalizzazioni dell’aria condizionata).

Azionando invece il motore della pompa o del ventilatore con una velocità proporzionata a quanto necessita l’impianto, si avrà un consumo elettrico proporzionato al lavoro richiesto.

E’ vero che l’inverter introduce delle perdite per circa un 4%, ma questo svantaggio viene tipicamente ammortizzato dal minor consumo in un tempo molto breve, soprattutto negli impianti con molte ore di funzionamento annuo.

Capitolo II°

GENERALITA' sul MOTORE ASINCRONO

2.1 Panoramica

Il mercato dei motori elettrici oggi è dominato prevalentemente dal motore asincrono trifase, un tipo di motore molto semplice, robusto ed economico.

Questo motore negli anni ha guadagnato una fetta di mercato sempre maggiore, occupando, grazie all'elettronica di controllo, anche settori che un tempo erano ad uso esclusivo dei motori in corrente continua.



L'uso dei motori asincroni va dalle pompe ai ventilatori, dagli ascensori alle gru, dai compressori d'aria ai gruppi frigoriferi, dai miscelatori ai trasportatori, ma la lista è interminabile in quanto nella maggior parte delle applicazioni tecnologiche, sia industriali che del terziario, per ricavare energia meccanica dall'energia elettrica si usano proprio questi motori.

Sul mercato sono reperibili numerosissimi modelli, e la gamma di potenza spazia da poche centinaia di watt fino a motori che superano i 600 kW.

Tuttavia, come si vedrà più avanti, questi motori quando collegati direttamente alla rete hanno il "difetto" di girare a velocità praticamente costante.

L'inverter è un dispositivo nato proprio per risolvere questo problema, ma prima analizziamo la conformazione dello statore per vedere come da esso dipenda la velocità di un motore trifase.

Per più approfondite spiegazioni sul motore elettrico trifase si rimanda comunque ad un altro documento.

Si precisa infine che la presente trattazione comunque riguarda solamente i motori asincroni con rotore in cortocircuito (a gabbia di scoiattolo), e non i motori a rotore avvolto, ai quali l'applicazione con inverter praticamente non ha senso.

2.2 Statore e Velocità

Lo *statore* di un motore elettrico trifase è la parte fissa nella quale sono inseriti i tre avvolgimenti primari, e ad essi viene applicata la tensione di alimentazione.

All'interno dello statore trova posto il rotore, che trascinato dal campo magnetico degli avvolgimenti statorici si pone in rotazione.

Dato che l'alimentazione è in corrente alternata, e che gli avvolgimenti sono montati sfalsati di 120° , il campo magnetico risultante è un **Campo Magnetico Rotante**, che gira ad una velocità direttamente in proporzione alla frequenza della tensione di alimentazione.

In pratica applicando una tensione a 50Hz esso compie 50 giri al secondo, ossia 3000 giri al minuto.

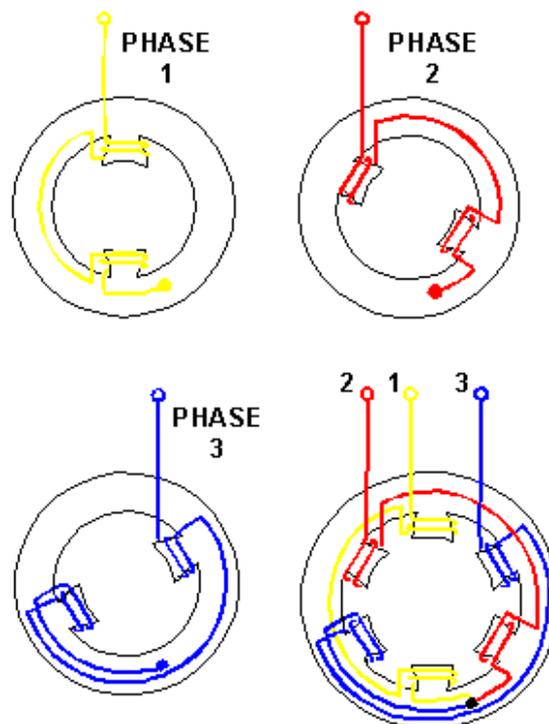


Figura 2.1 - Composizione di un motore ad una coppia polare (ossia con una terna di avvolgimenti trifase)

La tecnologia costruttiva dei motori elettrici permette comunque di costruire motori con più “terne” di avvolgimenti statorici, cosicché ognuna delle quali forma la cosiddetta **Coppia Polare**, (o anche *due poli*).

Quando lo statore viene costruito con più di una coppia polare il Campo Magnetico Rotante non gira più a 3000 Giri, ma a velocità inferiori, vista la presenza di altri poli magnetici che permettono al rotore di percorrere meno spazio prima di trovare il polo che “lo attrae”.

Da ciò deriva che sono realizzabili motori con diverse velocità, che a 50 Hz significa :

Numero di Poli	Coppie Polari	Velocità (giri/min)
2	1	3000
4	2	1500
6	3	1000
8	4	750
10	5	600
ecc..

Tipicamente i costruttori hanno a catalogo motori a 2,4,6,8 poli, mentre per modelli con un numero di poli superiore è necessario richiederne la costruzione su misura.

Ricapitolando quindi, nello statore si trovano i due “fattori” che influiscono nella velocità di rotazione di un motore , e cioè :

- la frequenza della tensione di alimentazione;
- le coppie polari, ossia il numero di “terne” di avvolgimenti che costituiscono lo statore.

Dato che non è possibile modificare le coppie polari, in quanto trattasi di caratteristica costruttiva, si deduce che per regolare la velocità di un motore trifase è necessario variare la frequenza con cui lo si alimenta.

Capitolo III°

FORMULE BASE del MOTORE TRIFASE



3.1 Introduzione

Per capire meglio un azionamento in corrente alternata è necessario capire le formule base che descrivono il funzionamento del motore trifase.
Innanzitutto vediamo l'aspetto velocità di rotazione.

3.2 Giri al Minuto

Come già visto in motore trifase il rotore è mantenuto in rotazione dal campo magnetico rotante prodotto dalle correnti che circolano negli avvolgimenti trifasi dello statore.

La velocità del campo magnetico rotante è calcolabile con la seguente formula :

$$n_s = \frac{120 * f}{p}$$

Dove :
 n_s = Numero di Giri al Minuto (del campo di statore)
 f = frequenza di alimentazione
 p = Numero di poli del motore

Come già detto in precedenza, visto che le coppie polari sono un fattore costruttivo, l'unico parametro elettrico che può influire sulla velocità del motore è appunto la frequenza.

Detto questo sembrerebbe risolto il problema di come regolare la velocità di un motore elettrico.

Basta un dispositivo che alimenti un motore con corrente alternata a frequenza variabile a seconda delle esigenze dell'utente, e questo dispositivo è proprio l'inverter.

Tra l'altro alla luce della formula indicata, nulla toglie alla possibilità di alimentare il motore con una frequenza superiore a quella di targa, per fargli così raggiungere delle velocità più elevate.

Purtroppo però, come si vedrà a breve, ci sono altri parametri elettrici da controllare per mantenere il funzionamento del motore entro le caratteristiche progettuali.

In particolare la frequenza incide notevolmente sulle reattanze e sul flusso magnetico per cui è necessario ricorrere ad alcuni accorgimenti per garantire al motore le prestazioni "meccaniche" nominali.

In pratica, senza addentrarsi in formule specifiche, se si varia la frequenza con cui si alimenta il motore al fine di modificare la velocità si avrebbe come conseguenza :

- Per valori inferiori a 50 Hz - un aumento del flusso magnetico,
- Per valori superiori a 50 Hz - una diminuzione del flusso magnetico.

Come già detto, invece, per conservare inalterate le caratteristiche meccaniche del motore, è necessario garantire che il flusso magnetico rimanga più vicino possibile al valore stabilito dal costruttore.

L'unica variabile che può essere usata per risolvere il problema è la tensione, e quindi per concludere quindi il motore trifase può essere controllato in frequenza a patto che il rapporto

$$V / f$$

venga mantenuto il più costante possibile, in modo da assicurare che nel motore il flusso magnetico si mantenga nei valori stabiliti dal costruttore.

Capitolo IV°

COME REGOLARE LA VELOCITA'



4.1 Regolazione di tensione e frequenza

Come visto nei capitoli precedenti, per mantenere costanti le caratteristiche meccaniche di un motore asincrono trifase, e soprattutto la coppia, è necessario mantenere costante il rapporto tra tensione e frequenza.

Applicando ad un motore una alimentazione con frequenza e tensione ridotte in modo proporzionale tra loro, si ha una diminuzione nella velocità del motore, ma anche il mantenimento della coppia entro lo stesso valore di quella nominale.

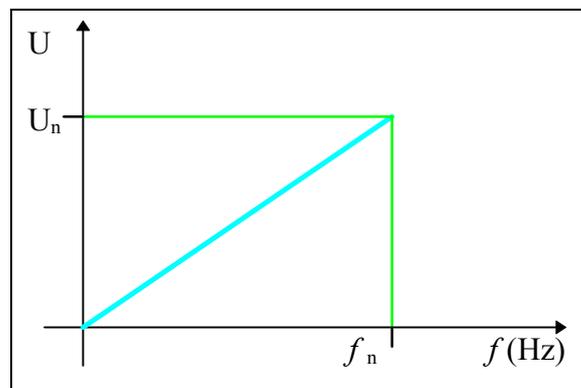


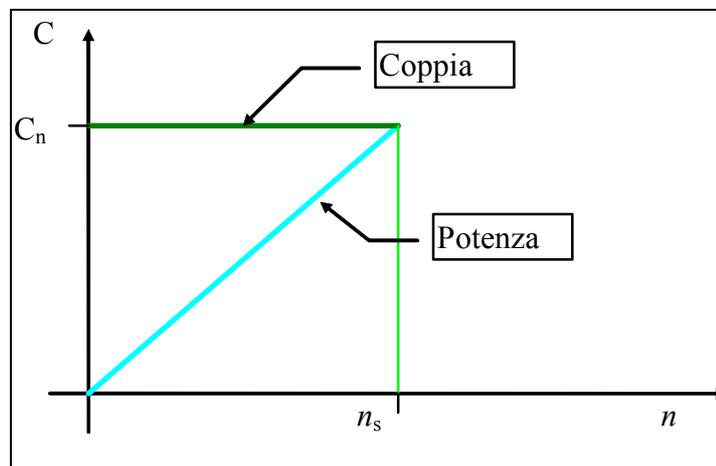
Figura 2.1 Grafico della legge teorica di variazione della tensione in funzione della frequenza.

Si è però anche visto che per non modificare le caratteristiche meccaniche del motore è necessario “accompagnare” la variazione della frequenza con la variazione della tensione.

Ad esempio per ottenere da un motore standard da 5,5 kW a 2 poli, delle diverse velocità di rotazione senza influire nel comportamento della coppia, si dovrà alimentarlo con i seguenti valori di frequenza e tensione :

Frequenza (Hz)	Tensione (V)	Giri / minuto	Coppia (Nm)
50	400	3000	17
40	320	2400	17
30	240	1800	17
25	200	1500	17
20	160	1200	17
10	80	600	17
5	40	300	17

Si può quindi tracciare il grafico che riassume le variabili discusse :



Nel capitolo che segue vedremo come l'inverter riesce ad attuare proprio questa regolazione.

NOTA : l'esempio è puramente matematico e non tiene conto di alcuni effetti, come ad esempio le perdite, che non si comportano in modo propriamente lineare.

Capitolo V°

L'INVERTER



5.1 Introduzione

Come già illustrato nell'introduzione, l'inverter è un dispositivo elettronico che in pratica genera una tensione trifase a frequenza liberamente scelta dall'utente.

Tipicamente il campo di funzionamento in frequenza spazia da 0 a 100 Hz, o addirittura fino a 250 Hz in certi modelli.

Vediamo ora, sulla base dei concetti visti per i motori asincroni trifase, come lavora un inverter per garantirne una buona regolazione della velocità.

5.2 Modalità di funzionamento

Abbiamo visto nel capitolo precedente come si devono regolare la tensione e la frequenza per controllare la velocità di un motore trifase ad induzione.

L'inverter è proprio il dispositivo atto a modificare frequenza e tensione per regolare la velocità del motore ad esso collegato.

Questo tipo di inverter viene detto **SCALARE**.

L'inverter procede quindi a regolare in modo proporzionale frequenza e tensione sulla base del comando esterno impartito dall'utilizzatore del sistema, che in pratica è il comando della velocità richiesta.

Nota In realtà l'inverter non aumenta la tensione sempre in modo proporzionale alla frequenza, ma alle basse frequenze tiene la tensione a valori leggermente superiori, per garantire un maggiore flusso magnetico, per sopperire alle perdite nel ferro.

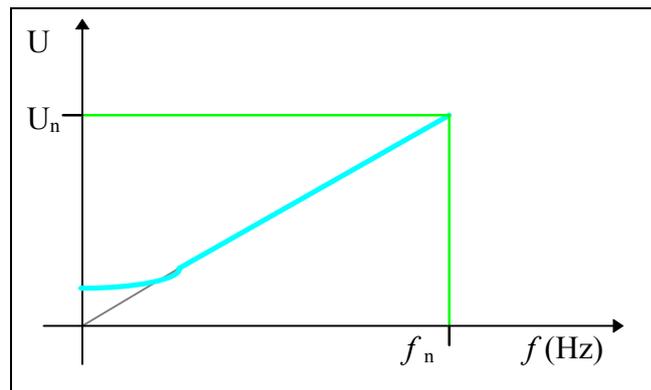


Figura 3.1 Legge di variazione della tensione in funzione della frequenza applicata dalla logica di controllo dell'inverter.

Con l'inverter è possibile, oltre a rallentare il motore rispetto alla velocità di targa, anche accelerare a velocità maggiori generando frequenze maggiori ai 50Hz.

Attenzione !

Quando l'inverter raggiunge la frequenza nominale, contemporaneamente raggiunge anche la piena tensione (ossia quella della rete di alimentazione).

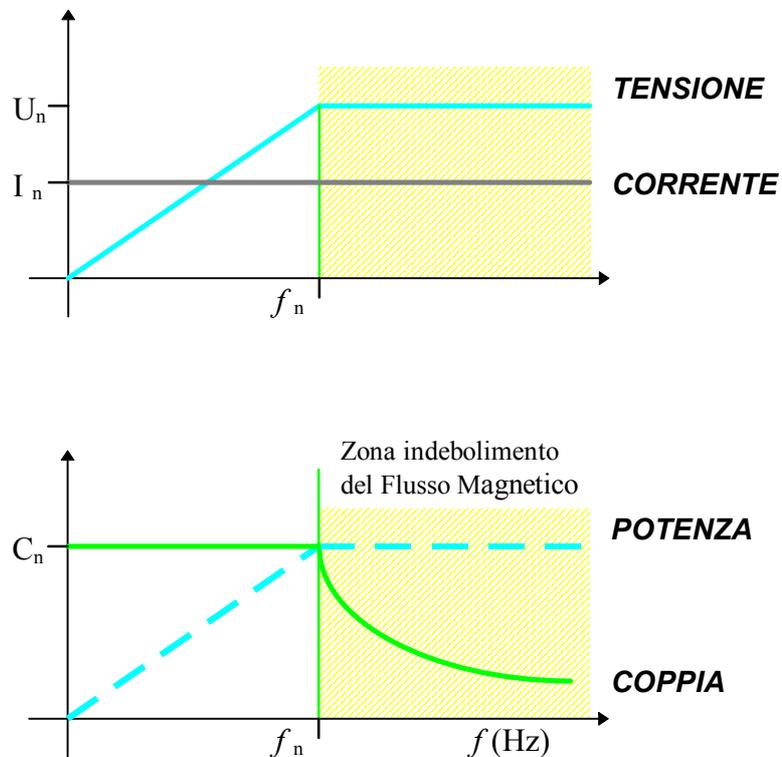
Dopo tale punto è ancora possibile aumentare la frequenza per ottenere velocità maggiori, ma non è più possibile aumentare la tensione.

L'inverter infatti non può elevare la tensione ad un valore più alto di quello con cui viene alimentato, e, anche se fosse possibile aumentare la tensione, si danneggerebbe l'isolamento degli avvolgimenti del motore.

Succede quindi che aumentando la frequenza oltre a quella di targa, l'inverter non rispetta più la legge di proporzionalità tra frequenza e tensione, entrando nella zona di indebolimento del flusso magnetico, che comporta per il motore un progressivo calo della coppia motrice (come visto al paragrafo 3.2).

Nota La zona oltre la frequenza nominale viene anche chiamata "zona a potenza costante".

I grafici che seguono riassumono l'andamento di tutte le variabili, elettriche e meccaniche, in funzione della frequenza, di un motore asincrono trifase (considerando il motore accoppiato con un carico meccanico che a 50Hz assorbe la potenza nominale).



Nota : si deve inoltre tenere conto che a frequenze più elevate del valore di targa le perdite nel ferro aumentano in modo molto marcato.

Nota : gli inverter sono detti anche "a tensione impressa", visto che la corrente è determinata dalle condizioni di carico del motore.

Capitolo V°

INVERTER VETTORIALI



5.1 Concetti generali

La corrente elettrica, quando alimenta componenti induttivi, e non solo resistivi, si sfasa di un certo angolo φ rispetto alla tensione.

Questo fenomeno in elettrotecnica viene spiegato con i vettori, in particolare con il vettore “corrente attiva”, che è in fase con la tensione, e con il vettore “corrente induttiva”, che invece è sfasato di 90° elettrici in ritardo rispetto alla tensione.

Nel motore elettrico la componente induttiva della corrente serve per produrre il flusso magnetico, dal quale dipende la coppia.

La componente attiva è invece quella che produce lavoro “meccanico”.

Controllando queste due componenti, nonché la tensione e la frequenza con cui si alimenta il motore si riesce a controllarne la velocità con molta precisione, tanto da raggiungere quasi le prestazioni di un azionamento in corrente continua.

Maggiore precisione ancora si raggiunge installando sull’asse del motore un Encoder, dispositivo che trasmette al motore la posizione angolare del rotore.

APPENDICI



A. Effetti Collaterali

A. EFFETTI COLLATERALI

Disturbi Elettromagnetici

Gli inverter a frequenza variabile per la regolazione della velocità dei motori sono dei veri e propri generatori di disturbi elettromagnetici.

I sistemi elettronici attualmente contenuti negli inverter infatti, non generano una tensione sinusoidale, ma “la imitano” generando degli impulsi ad alta frequenza (4-8 kHz), la cui risultante “matematica” è appunto una tensione di forma quasi sinusoidale.

Tutto ciò comporta svariate problematiche di tipo elettrico :

- **Disturbi irradiati** nell’ambiente attraverso i cavi di collegamento al motore (detti EMI o disturbi RF); tipicamente questo problema si risolve utilizzando cavi schermati che coprono tutto il percorso dalla morsettiera di uscita dell’inverter fino alla morsettiera del motore.
- **Disturbi Condotti** verso la rete di alimentazione attraverso lo stadio di ingresso dell’inverter : anche questi problemi sono risolvibili, ma impiegando delle reattanze o filtri di ingresso che il costruttore dell’inverter può fornire a parte o talvolta già incorporati con l’apparecchio.
- **Armoniche di corrente**, causate dai raddrizzatori di ingresso dell’inverter; questo problema è un po’ più complesso da risolvere, e può essere affrontato a livello di singolo inverter o a livello di impianto, con filtri per armoniche.

Problematiche Elettriche legate al motore

L’inverter, in pratica, alimenta il motore con un’onda quadra.

Le commutazioni veloci che effettua causano in pratica dei fronti di tensione dove si ha una elevata dv/dt , provocando :

- Sollecitazioni marcate agli isolamenti del motore, per cui tipicamente si sovradimensiona lo stesso di un 10%.
- Correnti indotte ad alta frequenza sul rotore, che tipicamente si scaricano a terra attraverso i cuscinetti del motore provocandone un’usura eccessiva.

Problematiche di Ventilazione

Attenzione che a bassi giri, tipicamente al di sotto del 50% della velocità nominale, la ventola del motore non riesce a raffreddarlo, per cui se si prevedono lunghi periodi a bassa velocità, sarà necessario installare un ventilatore elettrico indipendente.