

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

FACOLTA' DI INGEGNERIA ELETTRICA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA ELETTRICA



TESI DI LAUREA

EFFICIENZA ENERGETICA NELLA VENTILAZIONE

RELATORE: PROF. RENATO GOBBO

LAUREANDO: FILIPPO TURCHETTO
MATRICOLA N° 580971/IE

ANNO ACCADEMICO 2010-2011

INDICE

- **CAPITOLO 1**
- **QUADRO GENERALE: AMBIENTE ED EFFICIENZA ENERGETICA**
 - Lo stato dell'ambiente
 - Consumi energetici ed immissioni in Italia
 - Protocollo di Kyoto

- **CAPITOLO 2**
- **POLITICA ENERGETICA**
 - Motori elettrici
 - Classi di efficienza
 - Incentivi fiscali per l'acquisto di motori elettrici e inverter

- **CAPITOLO 3**
- **VARIAZIONE DI VELOCITA' NEGLI IMPIANTI DI VENTILAZIONE**
 - Un po' di storia
 - Cenni sui motori asincroni trifase
 - Regolazione di tensione e frequenza
 - Inverter
 - Le applicazioni nella ventilazione
 - I perché dei vantaggi della variazione di velocità nelle applicazioni di ventilazione
 - Esempio di risparmio energetico
 - Rendimento del sistema motore-inverter

- **CAPITOLO 4**
- **IL CONVERTITORE DI FREQUENZA**
 - Introduzione al convertitore di frequenza
 - Il raddrizzatore trifase controllato a tiristori
 - Inverter trifase con tensione controllata in ampiezza e frequenza
 - Disturbi prodotti dai convertitori di frequenza

Introduzione

Negli ultimi decenni la “gestione dell’energia” ha assunto un peso sempre maggiore per l’industria italiana.

Con questa espressione ci si riferisce a tutta una serie di meccanismi e valutazioni economiche, gestionali, strategiche, burocratiche che oggi sono richieste all’industria.

L’argomento affrontato nella seguente tesi risulta essere estremamente rilevante ed importante al giorno d’oggi e anche negli anni avvenire perché riguarda il risparmio energetico e nello specifico l’efficienza energetica nella ventilazione.

L’elevatissimo consumo delle macchine elettriche, che copre il 74% dei consumi elettrici nel nostro paese, porta i costruttori di tali macchine elettriche e i governi ad attuare piani e normative che possano regolarne i consumi con una progressiva diminuzione nel tempo potendo così diminuire il consumo di energia delle centrali elettriche con una relativa diminuzione delle emissioni di CO2 rispettando così patti stabiliti in passato con alcune nazioni nel mondo come ad esempio il protocollo di Kyoto che prevede una diminuzione di gas serra del 5,2% entro il 2012.

La presente tesi, partendo dall’analisi dell’impatto dell’industria sulle emissioni in atmosfera, dopo una introduzione agli obblighi normativi imposti dalle recenti normative, descrive la tecnologia (motore-inverter) utilizzabile per incrementare l’efficienza energetica nella ventilazione, particolare considerazione sarà fatta al convertitore di frequenza descrivendone le sue principali componenti ed il loro funzionamento.

CAPITOLO 1

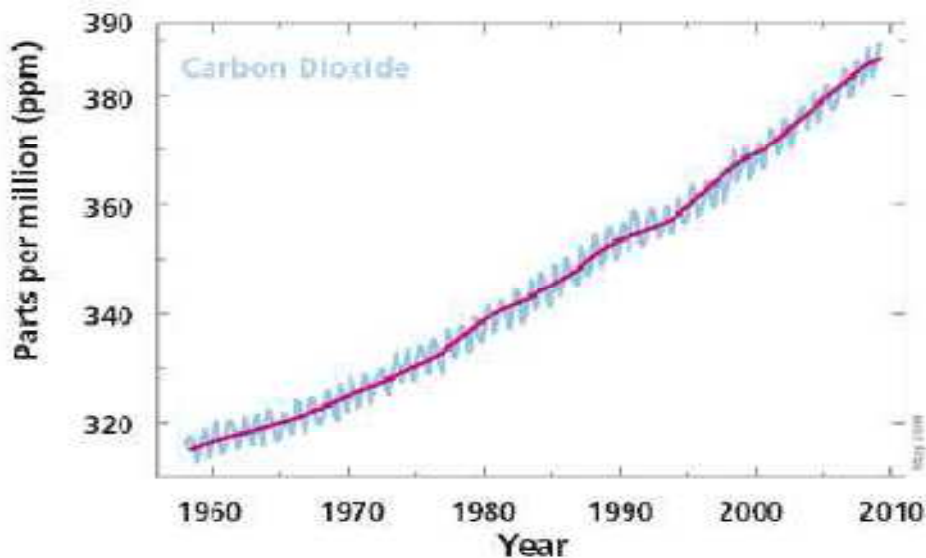
QUADRO GENERALE SULL'EFFICIENZA ENERGETICA

Lo stato dell'ambiente

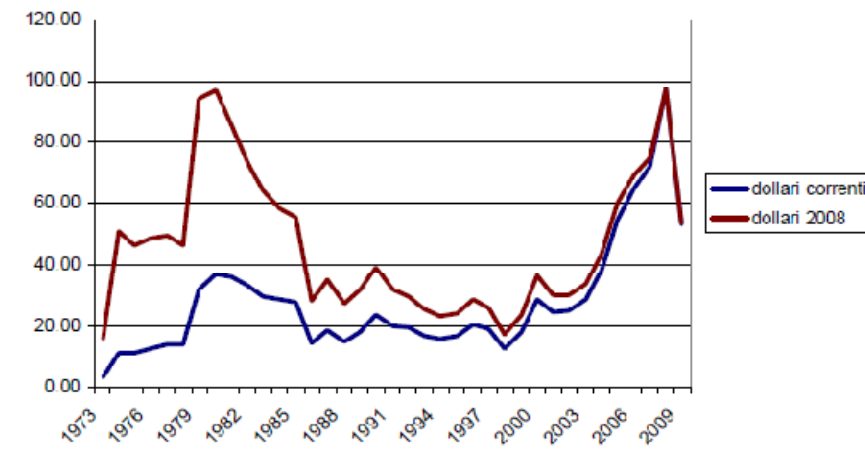
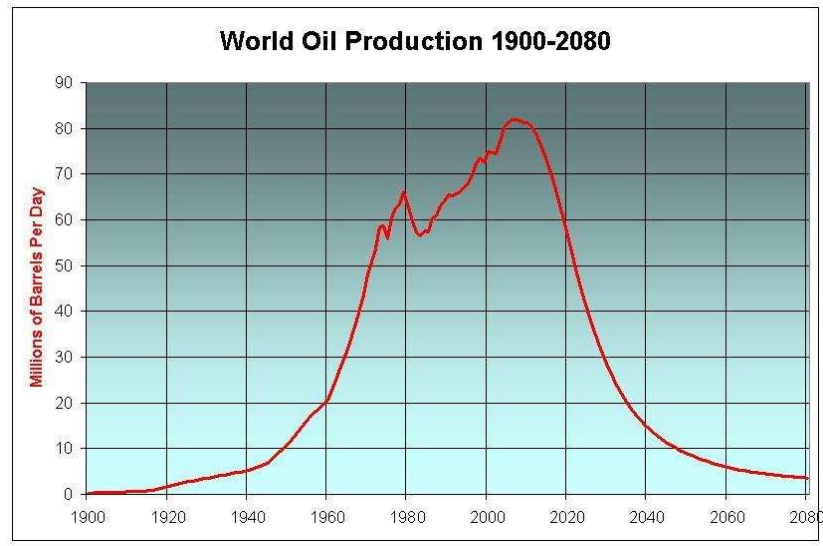
La maggior parte degli scienziati, oggi, pare ormai che converga sulla convinzione che l'incremento dell'effetto serra che si sta riscontrando negli ultimi decenni, sia dovuto ad un incremento, nell'atmosfera, della concentrazione di alcuni gas, fra i quali il più monitorato è senza dubbio l'anidride carbonica (CO₂).

Tale incremento è stato la conseguenza di un notevole sviluppo che si è verificato negli ultimi decenni, che ha innescato un processo secondo il quale la richiesta di energia per i trasporti, l'industria ed il settore civile è sempre in aumento.

Se da parte di alcuni si riscontra la preoccupazione per l'innalzamento della temperatura media del pianeta, conseguenza dell'incremento dell'effetto serra, dal quale discendono lo scioglimento dei ghiacciai, variazioni climatiche ecc.; da parte di altri la preoccupazione è rivolta principalmente alla troppa stretta dipendenza dell'Occidente da combustibili fossili, prossimi ad un esaurimento, o comunque proprietà quasi esclusiva di paesi arabi, con i quali i rapporti economici non erano del tutto semplici anche prima di tristi attentati terroristici.



Entrambe le parti hanno pertanto concordato che la strategia migliore, più immediata, da intraprendere per arginare sia il problema ambientale che quello dello sfruttamento delle risorse, sia quella di contenere i consumi dei combustibili al fine di ridurre le emissioni.

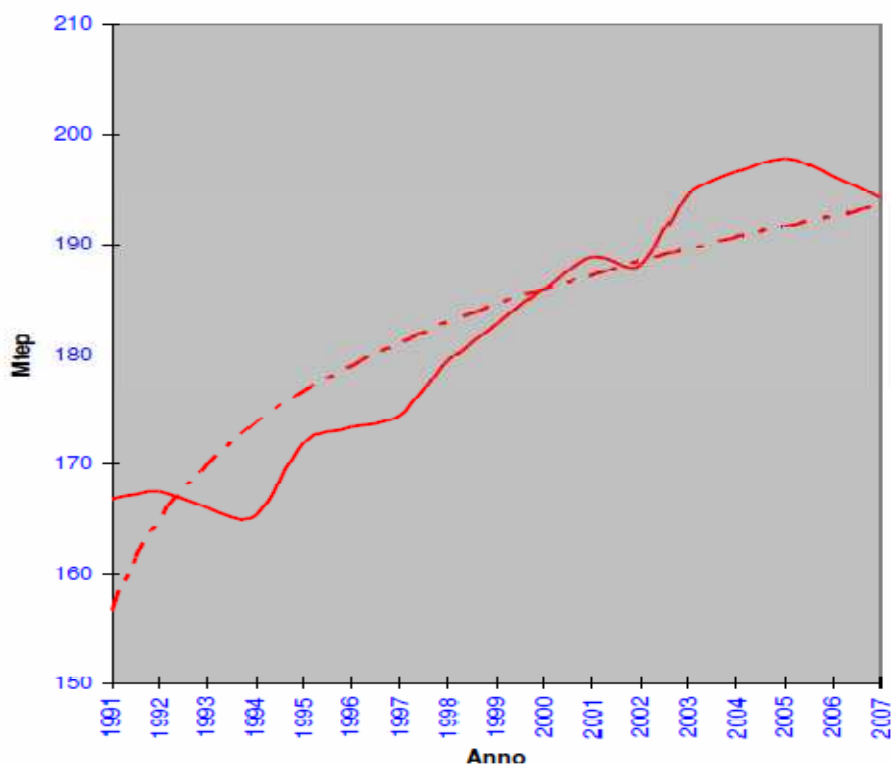


Prezzi del petrolio. Anni 1970-2009
(US\$/barile)

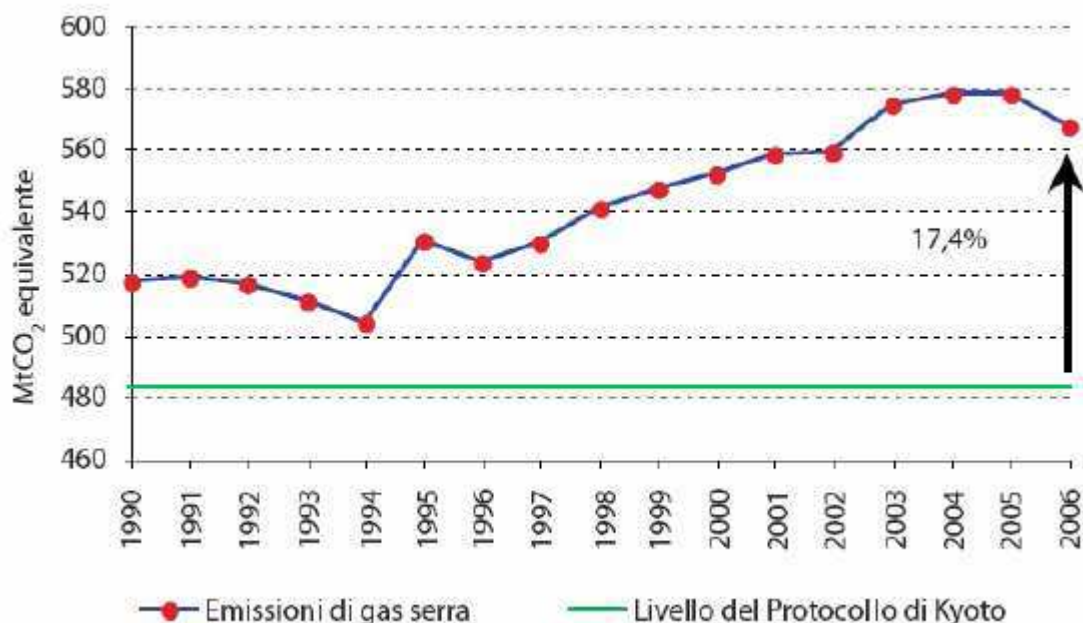
Consumi energetici ed emissioni in Italia

I dati del 2007 sui consumi energetici italiani forniti dal Ministero dello Sviluppo Economico rilevano, contrariamente alle previsioni di crescita dello stesso Ministero, la tendenza al calo dei consumi energetici complessivi, come si può vedere in figura. Sembrerebbe, quindi, che le prime avvisaglie della crisi economica in Italia, probabilmente a causa della competizione internazionale dei paesi emergenti e dell'aumento dei prezzi delle materie prime, siano emerse molto prima dell'esplosione globale della crisi finanziaria in corso.

Quindi, considerando il crollo della domanda mondiale di energia post crisi finanziaria, che i comportamenti riproduttivi degli italiani determineranno comunque una stabilizzazione della popolazione italiana nonostante gli intensi flussi migratori degli anni scorsi, come previsto dallo scenario Istat, e che il sistema industriale ed economico mostra da alcuni anni una tendenza alla saturazione della capacità produttiva, è facile prevedere il permanere della tendenza alla decrescita anche dopo il 2007 e nei prossimi anni. Potremmo cioè aver vissuto in diretta al picco dei consumi energetici italiani, anche perché eventuali scenari di ripresa economica e della domanda energetica rischiano di essere tarpati sul nascere da una nuova impennata dei prezzi del barile.



Conseguenza diretta di questa situazione è chiaramente anche la tendenza alla riduzione delle emissioni di gas serra, come si può facilmente evincere dalla seguente figura



Le emissioni di CO₂ equivalente sono passate da 577,94 Mton. del 2005 a 567,92 Mton. del 2006, con un calo di circa l'1,8% e, ipotizzando per i motivi citati in precedenza, cautelativamente un analogo trend per gli anni successivi, potremmo avere a fine 2012 un valore emissivo di circa 545 Mton.

Questo fatto dimostra in maniera concreta il potente ruolo della decrescita economica nel limitare l'impatto delle attività umane sull'ambiente.

Naturalmente, anche la tecnologia può dare un contributo importante alla riduzione delle emissioni.

Analizzando nel dettaglio l'evoluzione dei consumi energetici degli ultimi tre anni, osserviamo che il Consumo Interno Lordo di energia è passato dai 197,776 Mtep del 2005 ai 194,2 Mtep del 2007, con un calo di ben 1,81%, ma dalla sua scomposizione ricaviamo che, mentre aumentano i consumi di carbone (+1,02%) e rinnovabili (+5,87%), diminuiscono quelli di petrolio (3,27%) e di gas naturale (1,58%), e cala il saldo tra importazioni ed esportazioni di energia elettrica (5,84%).

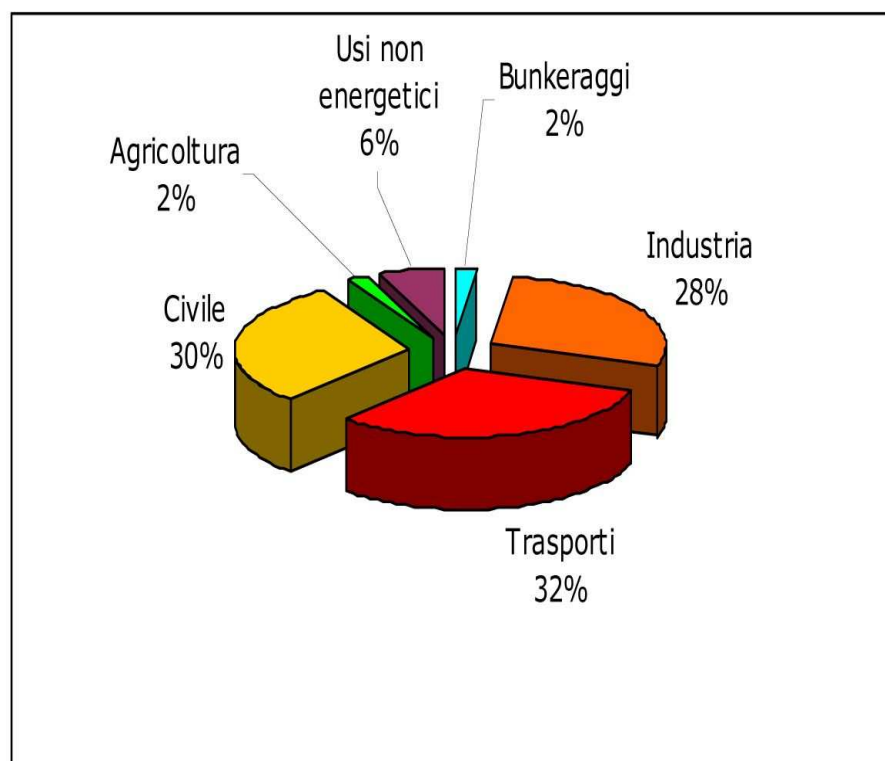
Passando all'analisi dei consumi finali di energia, che si ottengono dal Consumo Interno Lordo sottraendo i consumi e perdite del settore energetico, osserviamo un'analogia e più accentuata tendenza alla riduzione, dai 146,591 Mtep del 2005 ai 143,211 Mtep (2,31%), ma i tre settori di consumo principali mostrano comportamenti diversi: i consumi dell'industria calano del 3,15% e quelli del settore civile calano del 7,91%, mentre, in controtendenza, i consumi dei trasporti crescono del 2,2%, a dimostrazione che, nel periodo considerato, la dinamica dei prezzi petroliferi ha inciso solo marginalmente nel calo dei consumi energetici complessivi.

Anche la ripartizione percentuale dei consumi finali per settore registra il sorpasso dei trasporti (31,37%) rispetto a civile (30,26%) e industria (27,71%).

La dipendenza dal petrolio dei trasporti italiani è arrivata al 96,6% e i consumi finali di petrolio sono assorbiti per il 62,8% dai trasporti, con una tendenza alla crescita determinata dalla progressiva riduzione di questo combustibile fossile nelle centrali termoelettriche.

I Consumi e perdite del settore energetico sono circa il 25% del Consumo Interno Lordo e sono localizzati prevalentemente, per circa l'84%, nel settore elettrico.

Il peso di quest'ultimo nel sistema energetico italiano ha superato nel 2006 il 35% del consumo totale di energia.



Protocollo di Kyoto

Attraverso la sensibilizzazione evolutasi attraverso il bilancio sociale, nel tempo e specialmente in questi ultimi anni si sono create varie norme per il risparmio energetico a livello mondiale.

Una delle tappe più significative in questo percorso è stata la conferenza di Kyoto.

Con il Protocollo di Kyoto i paesi industrializzati si impegnarono a ridurre entro il 2012 le emissioni di gas serra del 5,2% rispetto al 1990.

Il negoziato venne stipulato a Kyoto, in Giappone, nel dicembre 1997 durante la Conferenza COP3 della Convenzione Quadro delle Nazioni Unite sui Cambiamenti Climatici.

La sottoscrizione iniziale dei paesi era un atto puramente formale.

Soltanto la successiva ratifica dell'accordo da parte dei parlamentari nazionali formalizzava l'impegno del paese a ridurre le immissioni.

Dal protocollo di Kyoto erano esclusi i paesi in via di sviluppo per evitare di frapporre ulteriori barriere alla loro crescita economica.

Un punto molto dibattuto e che trova ancora oggi il disaccordo degli Stati Uniti soprattutto per esclusione dagli impegni dei grandi paesi emergenti dell'Asia, India e Cina.

L'assenza degli Usa e della Russia hanno penalizzato per molti anni il lancio operativo dell'accordo, rimasto a lungo tempo "sospeso".

Nel 2002 avevano ratificato l'atto già 55 paesi senza però coprire il 55% della produzione globale di emissione di gas serra.

Solo dopo la Ratifica della Russia nel settembre 2004 si è superato finalmente il limite minimo previsto del 55% e data operatività al Protocollo.

Restano, in ogni caso, ancora fuori paesi come Australia e Stati Uniti, rei di non aver ratificato l'accordo per paura di danneggiare il proprio sistema industriale.

Per il risparmio energetico sono stati fissati alcuni obiettivi:

- Progressivo abbandono delle sorgenti di energia di tipo tradizionale come il petrolio, carbone, gas metano, ecc. , a favore delle fonti rinnovabili come energia eolica, solare e geotermica.
- Sostituzione degli attuali sistemi utilizzatori di energia, generalmente di basso rendimento, con altri caratterizzati da una più alta efficienza.
- Riduzione delle emissioni di CO₂.

CAPITOLO 2

POLITICA ENERGETICA

Motori elettrici

La dipendenza energetica dell'Italia dall'estero è ormai ben nota.

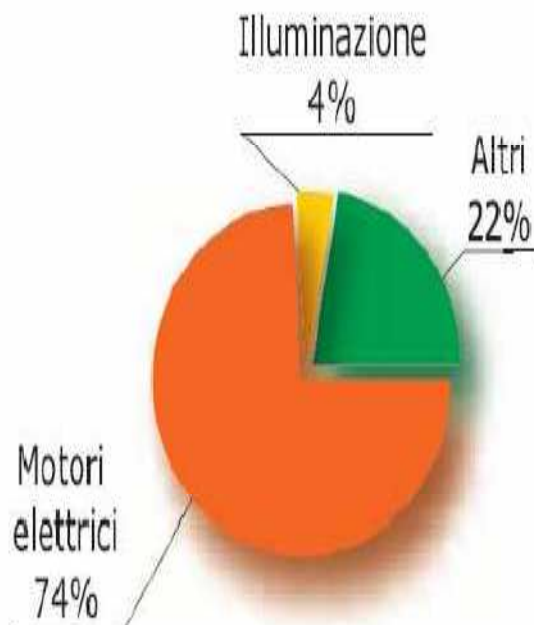
Non disponendo in misura significativa di fonti energetiche nazionali, preso atto dell'apporto limitato delle fonti rinnovabili, il nostro Paese, per far fronte alla crescente domanda di energia elettrica, è costretto da sempre ad importare quote significative sia di combustibili fossili dalle aree di estrazione sia di energia elettrica dai nostri vicini d'oltralpe, evidenziando la sua vulnerabilità a causa delle perduranti oscillazioni del prezzo del greggio e delle possibili tensioni politiche nei Paesi produttori con le conseguenti difficoltà di approvvigionamento.

La forte dipendenza della produzione di energia elettrica dai combustibili fossili si riflette negativamente sia sulle emissioni inquinanti, sia sul costo della bolletta: prova ne sia che l'Italia, tra i paesi europei, ha uno dei prezzi più alti dell'energia elettrica per le aziende industriali, le quali si trovano così a dover competere nel mercato globale con le concorrenti estere gravate da un handicap in partenza.

È dunque imperativo, al fine di migliorare la propria competitività, che le imprese cerchino di contenere i costi della bolletta elettrica, riducendo i consumi.

A livello nazionale l'energia elettrica utilizzata dal settore industriale è pari a circa il 50% del consumo totale e di questa circa il 74% è stata utilizzata per il funzionamento dei sistemi motore.

Vari studi, hanno evidenziato la possibilità di risparmiare sino al 29% dell'energia consumata dagli azionamenti elettrici (il che corrisponde ad un massimo di 16 milioni di tonnellate di CO₂ non immesse in atmosfera, pari a oltre il 17% di quanto l'Italia dovrebbe tagliare per centrare l'obiettivo previsto dal Protocollo di Kyoto), tramite interventi aventi un tempo di ritorno degli investimenti inferiore a tre anni.



Classi di efficienza

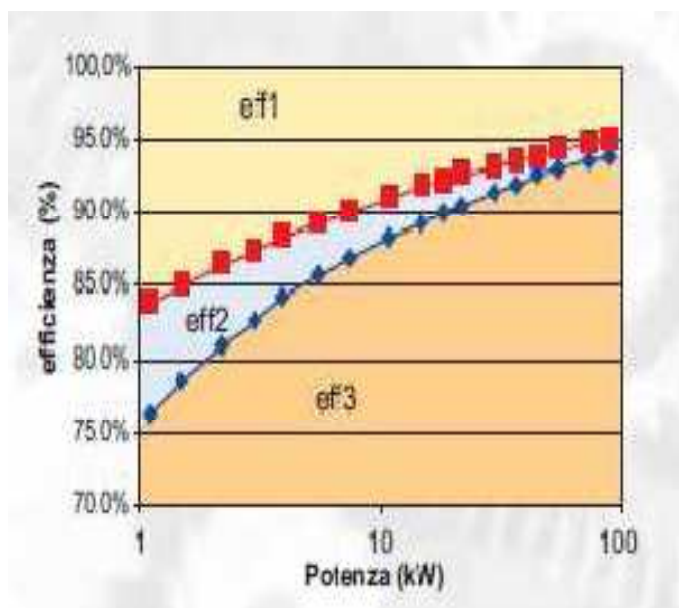
Non c'è una legge che impone standard minimi sui rendimenti dei motori elettrici. Ognuno può costruire il motore che vuole.

Ultimamente, però, il CEMEP (Comitato Europeo Costruttori Macchine Rotanti e Elettronica di Potenza) e la Commissione Europea hanno raggiunto un accordo volontario sulla costruzione di motori elettrici:

si riferisce a motori asincroni trifase di bassa tensione, con rotore a gabbia in corto circuito unificati, autoventilati, in costruzione chiusa, alimentati a tensione di 400 Volt di linea e 50 Hz, in una gamma di potenza compresa tra 1,1 kW e 90 kW a 2 poli e a 4 poli, per servizio continuo S1.



Si sono stabilite tre classi di efficienza eff1, eff2 e eff3 (la eff1 è la migliore, la eff3 la peggiore).



Per ogni classe sono stati definiti i rendimenti minimi.

I costruttori aderenti all'accordo si sono impegnati a rispettare questi valori minimi.

In figura sono riportati, per ciascuna classe di efficienza, i rendimenti minimi di un motore a 4 poli in funzione della potenza. Come si può facilmente dedurre dal grafico, man mano che aumenta la potenza le differenze di rendimento tra le classi si assottigliano.

In virtù di tale accordo ogni motore avrà la sua marcatura a dimostrazione della classe di efficienza alla quale appartiene.

Così, d'ora in poi, un industriale quando acquisterà un motore elettrico, scegliendo la classe di efficienza, avrà fatto una scelta ben precisa sui costi di esercizio.

I motori attualmente montati negli impianti che non rientrano in questo accordo perché antecedenti avranno un rendimento che si trova sicuramente nella zona bassa del grafico contrassegnata da eff3.

| POTENZA NOMINALE | RENDIMENTI MOTORI | RENDIMENTI MOTORI |
|-------------------------|--------------------------|--------------------------|
| [Kw] | A 2 POLI | A 4 POLI |
| | [%] | [%] |
| 5,5 | 88,6 | 89,2 |
| 7,5 | 89,5 | 90,1 |
| 11 | 90,5 | 91 |
| 15 | 91,3 | 91,8 |
| 18,5 | 91,8 | 92,2 |
| 22 | 92,2 | 92,6 |
| 30 | 92,9 | 93,2 |
| 37 | 93,3 | 93,6 |
| 45 | 93,7 | 93,9 |
| 55 | 94 | 94,2 |
| 75 | 94,6 | 94,7 |
| 90 | 95 | 95 |

Rendimenti minimi dei motori ad alta efficienza in funzione della potenza nominale

Incentivi fiscali per l'acquisto di motori elettrici e inverter

L. 27 dicembre 2006 n. 296 (legge finanziaria 2007). Disposizioni per la formazione del bilancio annuale e pluriennale dello Stato. Art. 1 (estratto).

(S.O.G.U. n. 299 del 27/12/2006)

Comma 358 (Detrazione spese per acquisto di motori ad elevata efficienza di potenza elettrica)

Per le spese documentate, sostenute entro il 31 dicembre 2007, per l'acquisto e l'installazione di motori ad elevata efficienza di potenza elettrica, compresa tra 5 e 90 kW, nonché per la sostituzione di motori esistenti con motori ad elevata efficienza di potenza elettrica, compresa tra 5 e 90 kW, spetta una detrazione dall'imposta lorda per una quota pari al 20 per cento degli importi rimasti a carico del contribuente, fino a un valore massimo della detrazione di 1.500 euro per motore, in un'unica rata.

Comma 359 (Detrazione spese per l'acquisto e l'installazione di variatori di velocità (inverter) su impianti con potenza elettrica)

Per le spese documentate, sostenute entro il 31 dicembre 2007, per l'acquisto e l'installazione di variatori di velocità (inverter) su impianti con potenza elettrica compresa tra 7,5 e 90 kW spetta una detrazione dall'imposta lorda per una quota pari al 20 per cento degli importi rimasti a carico del contribuente, fino a un valore massimo della detrazione di 1.500 euro per intervento, in un'unica rata.

Comma 360 (Modalità attuative dei commi 358 e 359)

Entro il 28 febbraio 2007, con decreto del Ministro dello sviluppo economico, di concerto con il Ministro dell'economia e delle finanze, sono definite le caratteristiche cui devono rispondere i motori ad elevata efficienza e i variatori di velocità (inverter) di cui ai commi 358 e 359, i tetti di spesa massima in funzione della potenza dei motori e dei variatori di velocità (inverter) di cui ai medesimi commi, nonché le modalità per l'applicazione di quanto disposto ai commi 357, 358 e 359 e per la verifica del rispetto delle disposizioni in materia di ritiro delle apparecchiature sostituite.

Già la legge finanziaria 2007 (riportata qui per estratto limitatamente ai commi 358, 359 e 360), nell'intento di promuovere il risparmio energetico, dispone – tra le altre provvidenze – incentivi per l'acquisto e l'installazione di motori elettrici ad alta efficienza di potenza compresa tra 5 e 90 kW e per l'installazione di inverter su impianti di potenza tra 7,5 e 90 kW.

Tali incentivi consistono in una detrazione di imposta pari al 20% di quanto speso, sino ad un massimo di 1500 euro in un'unica rata per ciascun apparecchio.

Se si considera che i 2/3 di tutti i consumi elettrici industriali sono dovuti ai motori elettrici, per la maggior parte di efficienza molto bassa, ben si comprende la ragione dell'intervento del legislatore.

Ora, la finanziaria 2008, attraverso il decreto 9 aprile 2008 (vedi Allegato II), pubblicato sulla G.U. n.° 147 del 25-6-2008, ha esteso gli incentivi fino alla fine del 2010.

In sostanza, è prevista una detrazione di imposta del 20% per l'acquisto e l'installazione di motori elettrici trifasi in bassa tensione ad elevata efficienza con potenza compresa tra 5 e 90 kW, sia nel caso di nuova installazione che per la sostituzione di vecchi apparecchi.

Per riqualificare anche i consumi energetici aziendali, la stessa detrazione si ha per l'acquisto e l'installazione di variatori di velocità (o inverter) con potenze da 7,5 a 90 kW. I beneficiari, ovviamente, sono soprattutto imprese e società ma possono esserlo in generale tutti i contribuenti, siano essi persone fisiche o professionisti.

Condizione essenziale è che questi siano comunque gli utilizzatori finali interessati a ridurre i consumi e migliorare la propria competitività.

Ad essere agevolati sono l'acquisto e l'installazione o la locazione finanziaria di motori elettrici asincroni trifasi alimentati a 400 V e 50 Hz, a due o quattro poli, che garantiscano un rendimento in linea con i migliori standard italiani e europei e che siano utilizzati in Italia.

Il rendimento minimo, a pieno carico e per ciascuna fascia di potenza, deve essere dichiarato dal produttore su un certificato che accompagni la macchina ed è chiaramente riportato nella seguente tabella.

| Potenza nominale kW | 2 poli | 4 poli |
|----------------------------|---------------|---------------|
| 5,5 | 88,6% | 89,2% |
| 7,5 | 89,5% | 90,1% |
| 11 | 90,5% | 91,0% |
| 15 | 91,3% | 91,8% |
| 18,5 | 91,8% | 92,2% |
| 22 | 92,2% | 92,6% |
| 30 | 92,9% | 93,2% |
| 37 | 93,3% | 93,6% |
| 45 | 93,7% | 93,9% |
| 55 | 94,0% | 94,2% |
| 75 | 94,6% | 94,7% |
| 90 | 95,0% | 95,0% |

*Motori ad elevata efficienza.
Rendimenti minimi in funzione della potenza nominale*

Inoltre la stessa agevolazione è riservata anche ai variatori di velocità (o inverter) applicati ai motori elettrici e basati sul principio di variazione della frequenza e della tensione di alimentazione.

L'ammontare dell'incentivo è il 20% della spesa totale sostenuta, comprensiva dei costi di acquisto e installazione, che deve essere detratto dall'imposta lorda 2007.

Tuttavia il decreto fissa tetti massimi di acquisto per ciascun motore o inverter per ogni fascia di potenza, avendo come riferimento i prezzi di mercato e anche un costo massimo di installazione a forfait.

In nessun caso la detrazione potrà superare i 1.500 euro per ciascun apparecchio.

| Potenza nominale (kW) | Spesa massima ammissibile per ogni motore (€) | | |
|-----------------------------|--|---------------|--------|
| | Acquisto | Installazione | Totale |
| 5,5 | 700 | 100 | 800 |
| 7,5 | 850 | 100 | 950 |
| 11 | 1000 | 100 | 1100 |
| 15 | 1200 | 100 | 1300 |
| 18,5 | 1500 | 150 | 1650 |
| 22 | 1800 | 150 | 1950 |
| 30 | 2200 | 150 | 2350 |
| 37 | 2600 | 150 | 2750 |
| 45 | 3300 | 200 | 3500 |
| 55 | 4000 | 200 | 4200 |
| 75 | 5300 | 200 | 5500 |
| 90 | 6100 | 200 | 6300 |

*Motori ad alta efficienza.
Tetto di spesa ammissibile in funzione
della potenza nominale*

| Potenza nominale (kW) | Spesa massima ammissibile per ogni variatore (€) | | |
|-----------------------------|---|---------------|--------|
| | Acquisto | Installazione | Totale |
| 7,5 | 1200 | 200 | 1400 |
| 11 | 1450 | 200 | 1650 |
| 15 | 1850 | 200 | 2050 |
| 18,5 | 2400 | 300 | 2700 |
| 22 | 2700 | 300 | 3000 |
| 30 | 3400 | 300 | 3700 |
| 37 | 3800 | 400 | 4200 |
| 45 | 4600 | 400 | 5000 |
| 55 | 5300 | 400 | 5700 |
| 75 | 6200 | 500 | 6700 |
| 90 | 7700 | 500 | 8200 |

*Potenza Variatori di velocità.
Tetto di spesa ammissibile in funzione della
nominale*

CAPITOLO 3

VARIAZIONE DI VELOCITA' NEGLI IMPIANTI DI VENTILAZIONE

Un po' di storia

Il mercato dei motori elettrici degli anni 2000 è sempre più dominato dai motori asincroni trifasi, anche detti motori ad induzione.

Questa tendenza è cominciata nel finire degli anni '80, quando i transistor di tipo IGBT hanno raggiunto una elevata qualità ed affidabilità.

Questi componenti, infatti, si sono dimostrati fondamentali per lo sviluppo dell'elettronica di potenza al fine di realizzare dispositivi per il controllo dei motori asincroni trifasi, ossia gli Inverter.

Prima di allora la regolazione della velocità sui motori asincroni trifasi era pressoché impossibile, e si attuava o con sistemi meccanici (variatori di giri) o con sistemi elettromeccanici, ma con notevoli perdite energetiche.

Si ricorreva quindi ai motori in corrente continua a collettore.

Gli inverter negli anni '90 si sono sempre più affermati per il controllo di velocità dei motori asincroni, e tale tecnologia, nella metà degli anni 90, ha visto l'introduzione di un nuovo modello ancora più rivoluzionario del primo : gli inverter "vettoriali".

Con questa tecnologia si è praticamente arrivati al controllo del motore asincrono trifase completo e di grande precisione, tale da rendere il motore in corrente continua obsoleto.



motore ad alta efficienza

Cenni sui motori asincroni trifase

I motori elettrici costituiscono più dei due terzi dei consumi elettrici industriali, pari a oltre il 30% dei consumi elettrici totali; va da se che, in ambito industriale, sia proprio il miglior impiego di quest'ultimi la migliore opportunità per ridurre i consumi elettrici.

Con i motori ad alta efficienza e l'utilizzo di inverter per regolare la velocità dei motori, tecnologie già in commercio, è possibile ridurre i consumi energetici.

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.

In un 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:

$$n_s = \frac{120 * f}{2p}$$

Dove :

n_s = numero di giri al minuto (del campo di statore)

f = frequenza di alimentazione

$2p$ = numero di coppie di poli che costituiscono il motore



In considerazione del fatto 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, 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, 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.

Regolazione di tensione e frequenza

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.

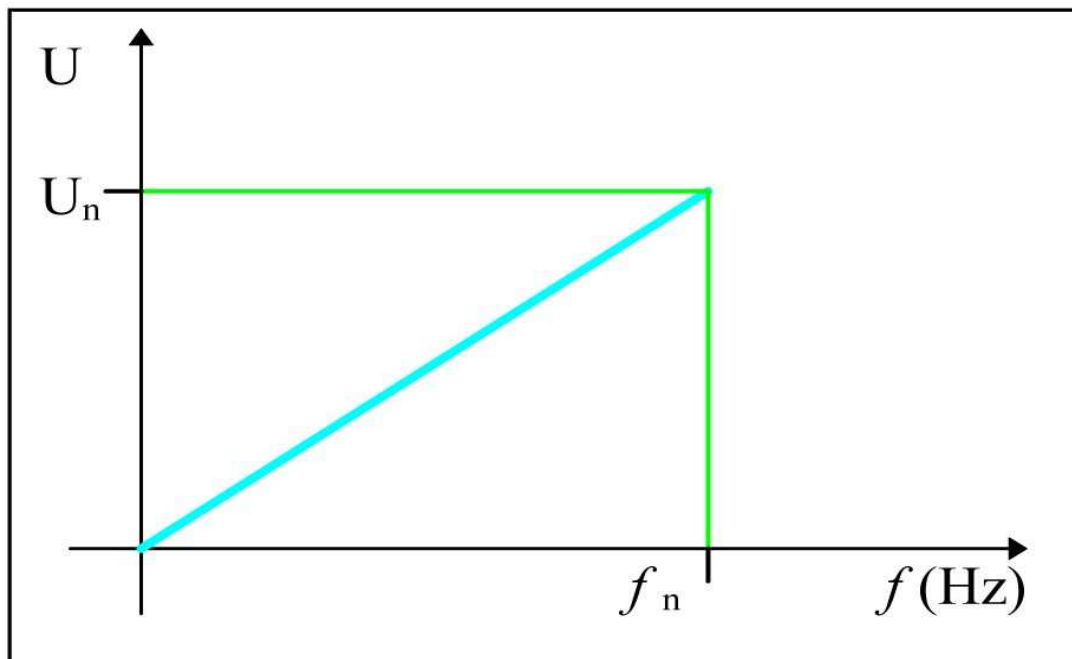


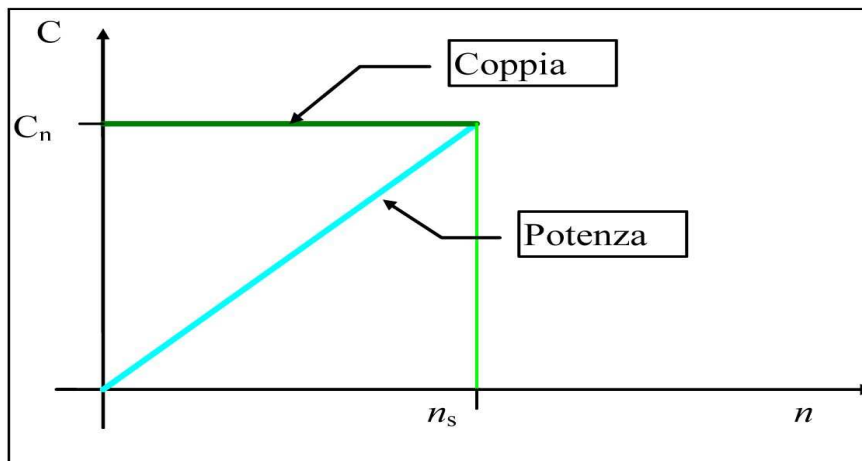
Grafico della legge teorica di variazione della tensione in funzione della frequenza.

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 riepiloga le variabili discusse :



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.

Convertitore statico di frequenza

Il convertitore statico di frequenza è un dispositivo che ha cambiato radicalmente l'automazione nell'industria con costi molto contenuti sia di installazione che di esercizio.

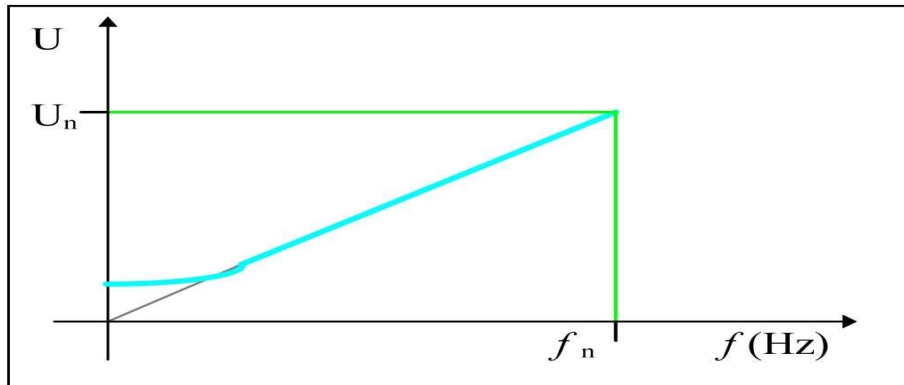
Il convertitore statico di frequenza, più comunemente chiamato "inverter", consente di variare la frequenza e la tensione d'alimentazione di un motore asincrono trifase: per definizione quindi l'inverter è un parzializzatore di tensione a frequenza variabile.

L'inverter regola in modo proporzionale frequenza e tensione sulla base del comando esterno impartito dall'utilizzatore del sistema che è in pratica il comando della velocità richiesta; in questo modo l'inverter consente di sfruttare appieno le caratteristiche del motore e fare sì che venga garantita la coppia costante all'albero del motore in "quasi" tutto l'arco della sua variazione di velocità.



Inverter

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.



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.

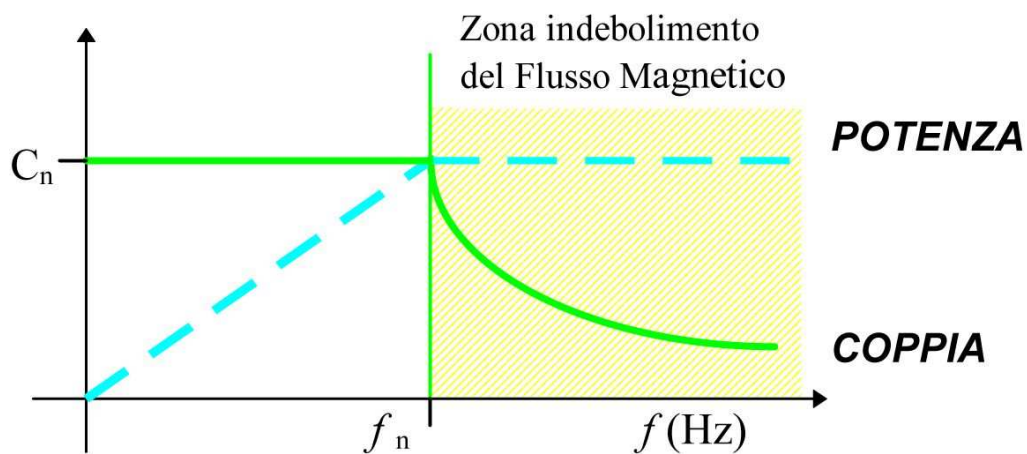
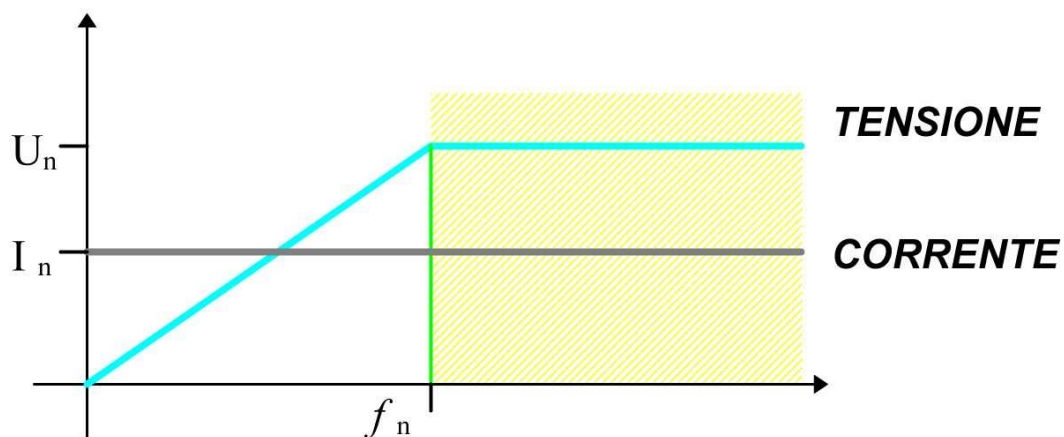
Quando l'inverter raggiunge la frequenza nominale, contemporaneamente raggiunge anche la piena tensione (ossia quella della rete di alimentazione).

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.

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.

Si dice quindi normalmente che un motore AC pilotato da inverter lavora:

- Fino alla sua frequenza nominale:
 - Potenza crescente – Coppia costante
- Oltre la sua frequenza nominale:
 - Potenza costante – Coppia decrescente

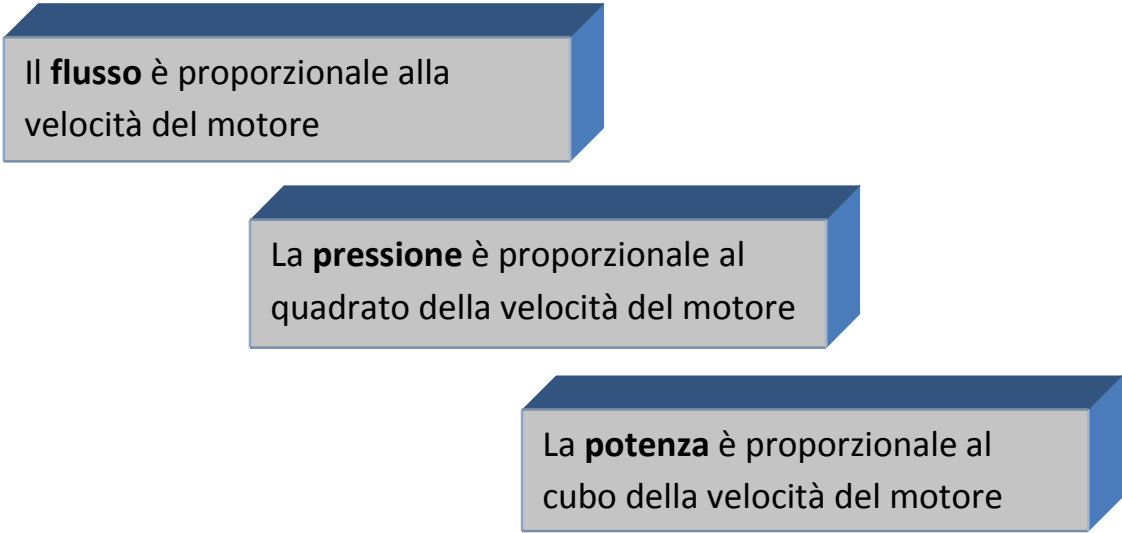
Le applicazioni nella ventilazione

Il risparmio energetico ottenibile con gli “inverter” si riscontra in quasi tutti le applicazioni destinate ai settori industriale e civile ma è particolarmente rilevante nel caso di ventilatori.

Nel caso in cui fosse utilizzato per azionare un ventilatore e le esigenze dell’impianto richiedessero di operare a portata variabile, sarebbe necessario prevedere un sistema di regolazione meccanico per controllare la portata del fluido, la regolazione della portata dei fluidi è ottenibile normalmente attraverso l’ausilio di dispositivi di tipo meccanico/ idraulico a perdita di carico tipo valvole di strozzamento, serrande, sistemi di bypass.

Utilizzando un inverter per comandare il motore, è possibile regolare la portata del fluido agendo direttamente sulla velocità del motore attraverso la variazione della frequenza.

Se si considera un ciclo produttivo che richieda al ventilatore di dimezzare la portata, automaticamente l’inverter dimezzerà la velocità del motore e, ricordando che la potenza richiesta dal carico varia con il cubo della velocità, l’assorbimento energetico scenderebbe dal 100% a solo un ottavo di quello nominale.



Il **flusso** è proporzionale alla velocità del motore

La **pressione** è proporzionale al quadrato della velocità del motore

La **potenza** è proporzionale al cubo della velocità del motore

- ***Installazione classica***

Nell'installazione classica il motore è collegato direttamente alla rete di alimentazione e la velocità di rotazione del motore è uguale alla sua velocità nominale.

La variazione della portata è ottenuta attraverso un dispositivo di restrizione del flusso o di perdita di carico tipo valvole, serrande.

La riduzione della portata riduce in modo non sensibile la potenza assorbita.

Esempio => ventilatore dove la regolazione della portata è fatta con serrande in uscita:

- riduzione della portata nominale = 80%
- potenza consumata = 95% della potenza nominale

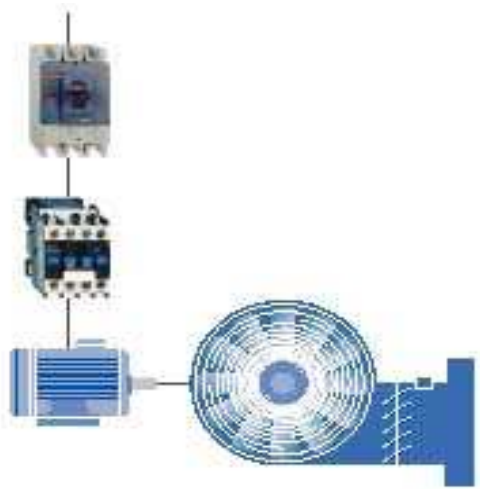


Fig. 1- Regolazione con serranda

- ***Installazione con variatore di velocità***

In questo tipo d'installazione il motore è alimentato da un variatore di velocità.

E' possibile l'eliminazione dei dispositivi meccanici per la regolazione della portata.

La variazione della portata si ottiene variando la velocità del motore ed in questo modo si riduce enormemente la potenza assorbita dal motore.

Esempio => ventilatore dove la regolazione della portata è fatta con variatore di velocità:

- riduzione della portata nominale = 80%
- potenza consumata = 50% della potenza nominale



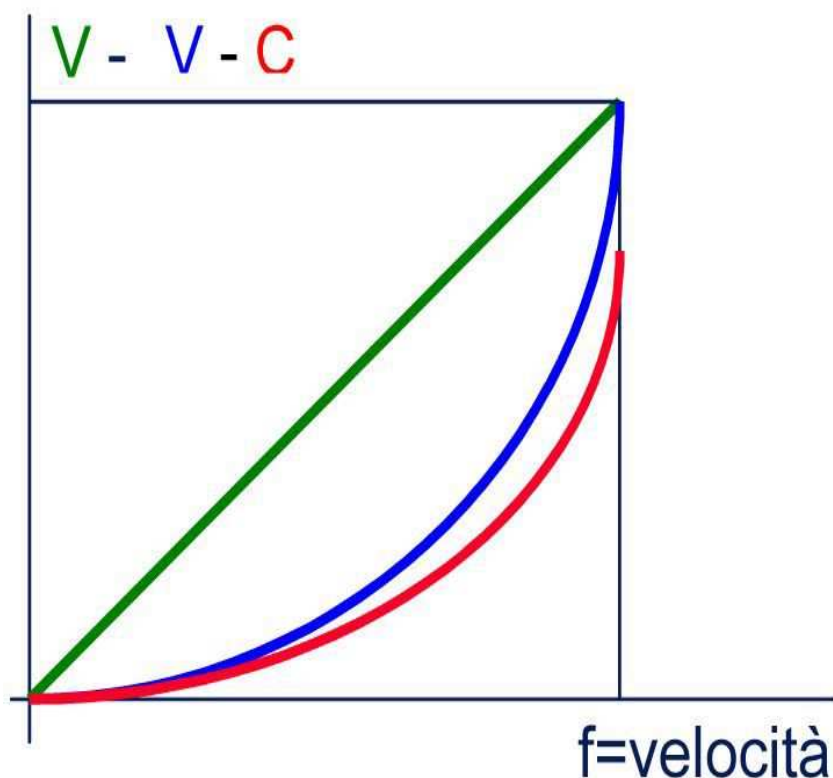
Fig.2- Regolazione con inverter

I perché dei vantaggi della variazione di velocità nelle applicazioni di ventilazione

I ventilatori presentano una caratteristica di coppia resistente all'avanzamento, o meglio alla rotazione, di tipo quadratico (curva rossa) ovvero bassa resistenza a basso regime di giri e alta con l'aumentare della velocità (crescente con il quadrato della velocità).

I motori elettrici asincroni trifasi a gabbia rispondono invece alla legge di comando detta legge tensione – frequenza (curva verde), dove se il rapporto tra le 2 grandezze elettriche è mantenuto costante il motore è capace di esprimere sempre la stessa coppia all'albero indipendentemente dalla velocità di rotazione.

Con i variatori di velocità è possibile adeguare al meglio l'alimentazione del motore adattando la legge V/f in funzione del carico (curva blu); sappiamo ad esempio che i fluidi variano le loro caratteristiche al variare della temperatura; essere capaci di rispondere a queste variazioni apporta dei benefici energetici; il risparmio in questo caso dipende tuttavia anche dalle caratteristiche del motore stesso: più $\cos \phi$ e rendimento sono elevati e minori sono le variazioni di questi due fattori al variare del carico; per conseguenza minore sarà il risparmio che si potrà ottenere.



Nei ventilatori, la portata è direttamente proporzionale alla velocità di rotazione ,dunque riducendo la velocità di rotazione del motore di un 30%, la portata del ventilatore sarà di conseguenza ridotta di un 30%.

Il consumo di energia però, si riduce di circa un 65%, come si può dedurre dal grafico.

Ma il punto sicuramente più importante è quello del risparmio energetico ottenibile utilizzando il variatore per variare la portata di un fluido in luogo dei sistemi meccanici (serrande, valvole di strozzatura, ...).

I benefici ed i vantaggi che si possono ottenere complessivamente possono essere così riassunti:

1. risparmio di energia considerevole, in funzione delle condizioni di carico;
2. risparmio sulla potenza installata e in tutte le apparecchiature che stanno a monte del variatore di velocità (es. trasformatori, gruppi elettrogeni, contattori, ecc.);
3. risparmio sugli oneri di gestione e manutenzione;
4. riduzione della corrente di spunto e delle cadute di tensione in linea;
5. eliminazione dei colpi d'ariete e delle sovrappressioni; riduzione del "rumore" nei circuiti idraulici;
6. rifasamento del carico ad un valore di $\cos\phi$ prossimo a uno.

Ad oggi sono poche le tecnologie in grado di garantire risparmi energetici come quelli illustrati ed è proprio sulla base di tali considerazioni che l'inverter stesso è stato inserito nelle schede per il rilascio dei titoli di efficienza energetica (TEE), come i motori EFF1.

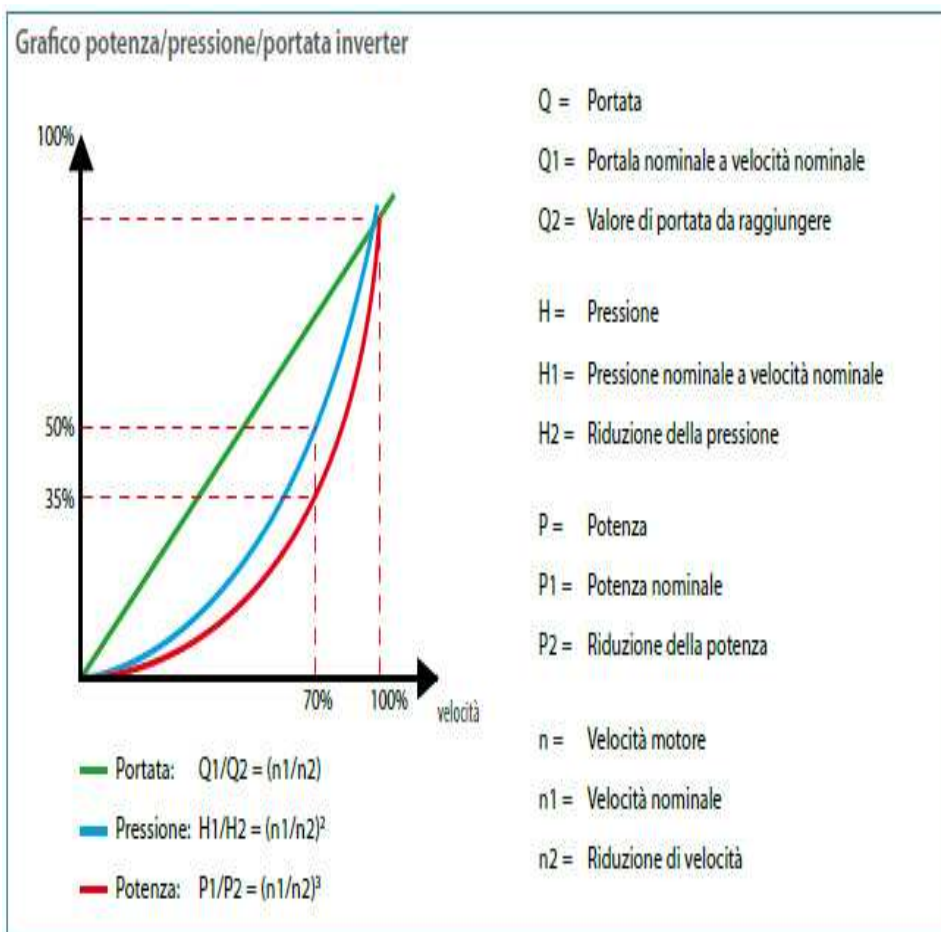
Esempio di risparmio energetico

Supponiamo che il ventilatore sia utilizzato su un impianto di aspirazione, la cui portata viene regolata tramite valvole a serranda.

Consideriamo un ventilatore di potenza nominale 30 kW utilizzato per un tempo medio giornaliero di 8 ore e per un periodo di 350 giorni all'anno.

Con un funzionamento medio giornaliero di:

- 4 ore alla portata nominale
- 2 ore a metà della portata
- 2 ore ad un quarto della portata



nel caso in cui il ventilatore sia alimentato direttamente da rete, il consumo elettrico previsto per un anno sarà di:

Consumo elettrico annuale = $30\text{kW} \times 8\text{h} \times 350\text{ gg} = 84000\text{ kWh}$ Pari a € 10080,00

(ipotizzando un costo di 0,12 €/kWh).

Con sistema ad inverter

Funzionamento a metà portata: per funzionare a portata dimezzata, il motore dovrà funzionare ad una velocità pari al 50% della velocità nominale.

La frequenza di uscita dell'inverter sarà quindi dimezzata.

La potenza richiesta dal motore per lavorare al 50% della velocità sarà pari ad un ottavo della potenza nominale, quindi a solo 3,75 kW. Funzionamento ad un quarto della portata: per lavorare ad un quarto della portata, il motore dovrà girare ad una velocità pari al 25% della velocità nominale.

In questa condizione, la potenza assorbita dal motore sarà pari a solo un sessantaquattresimo della potenza nominale, quindi a solo circa 0,5 kW.

Consumo elettrico annuale con Inverter:

$((30\text{kW} \times 4\text{h}) + (3,75\text{ kW} \times 2\text{h}) + (0,5\text{ kW} \times 2\text{h})) \times 350\text{ gg} = 44,975\text{ kWh}$
pari a € 5575,00

(ipotizzando un costo di 0,12 €/kWh).

Risparmio annuale pari a € 4683,00.

Rendimento del sistema motore inverter

Il rendimento globale di un azionamento dipende dalle perdite a livello del motore e dei controlli. Ambedue i tipi di perdita sono di natura termica e, pertanto, si manifestano sotto forma di calore.

La potenza d'ingresso P_{in} assorbita dal sistema azionamento (motore-inverter) è di tipo elettrico, mentre la potenza di uscita P_{out} è di tipo meccanico.

La potenza in ingresso è calcolabile con la relazione:

$$P_{in} = \sqrt{3} * V * I * \cos \phi [kW]$$

mentre la potenza meccanica in uscita dall'azionamento risulta:

$$P_{out} = C * 2\pi * \frac{n}{60} [kW]$$

Il termine $\cos\phi$ è il fattore di potenza, ossia il rapporto tra la potenza attiva, che genera potenza meccanica, e la potenza reattiva, che serve a produrre la magnetizzazione a livello del motore.

Il fattore di potenza è più elevato per i motori veloci, rispetto a quelli lenti.

Varia, per un regime a pieno carico, da 0,7 fino a massimi intorno a 0,9.

Grande vantaggio in questi termini è garantito proprio dall'inserimento dell'inverter tra motore e rete.

Esso, infatti, permette il rifasamento automatico dell'utenza, portando il $\cos\phi$ a valori pari a 0,98, garantendo un ulteriore risparmio di energia reattiva.

Si definisce rendimento il rapporto tra le due potenze sopra richiamate, secondo la relazione:

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

La commutazione elettrica mediante transistori che avviene nell'inverter è molto efficiente.

Il rendimento del convertitore di frequenza è elevato, in quanto è compreso tra 0,97 e 0,99.

Il rendimento del motore vale normalmente tra 0,82 e 0,97, in base alle sue dimensioni ed alla sua velocità nominale.

Se il controllo di velocità di rotazione di un motore asincrono è effettuato da un convertitore statico di frequenza, il rendimento totale del sistema di azionamento è sempre superiore a 0,8.

Si può affermare che gli azionamenti a velocità variabile del tipo a inverter costituiscono un metodo di controllo ottimale per quasi tutti i sistemi.

I metodi di controllo tradizionali, infatti, anche se semplici, sono caratterizzati da un elevato consumo energetico e, pertanto, da un costo di esercizio più elevato rispetto agli inverter, da cui ne deriva anche un maggiore impatto ambientale, in termini, ad esempio, di emissioni di anidride carbonica.

Per completezza si ricorda che una regolazione standard di tipo meccanico si basa su uno dei seguenti sistemi:

- azionamenti a cinghia: la velocità si regola mediante il movimento di pulegge coniche, manualmente o per mezzo di attuatori;
- accoppiamento idraulico: sfrutta il principio della turbina, modificando il volume dell'olio nell'accoppiamento stesso e modificando la differenza di velocità tra l'albero di azionamento e l'albero condotto (la quantità di olio è controllata mediante pompe e valvole).

Nei convertitori di frequenza si utilizza, invece, un motore standard a gabbia di scoiattolo e la velocità del motore è regolata da un convertitore statico di frequenza, che modifica il valore della frequenza in modo diretto.

Si ottiene in tal modo un'apparecchiatura semplice, economica e sicura.

In Italia, secondo i dati Istat, i ventilatori sotto i 90 kW sono oltre 2 milioni e consumano circa 45 TWh/anno di energia elettrica; oggi meno del 10% sono regolati da inverter.

C'è quindi molto da fare e, ad onor del vero, anche le opportunità di business sia per i costruttori di motori asincroni che di variatori di velocità sono notevoli; non è pensabile infatti di dover rispondere alla sempre più pressante domanda d'energia aumentandone semplicemente la produzione, ma sarà sempre più importante utilizzarla meglio.

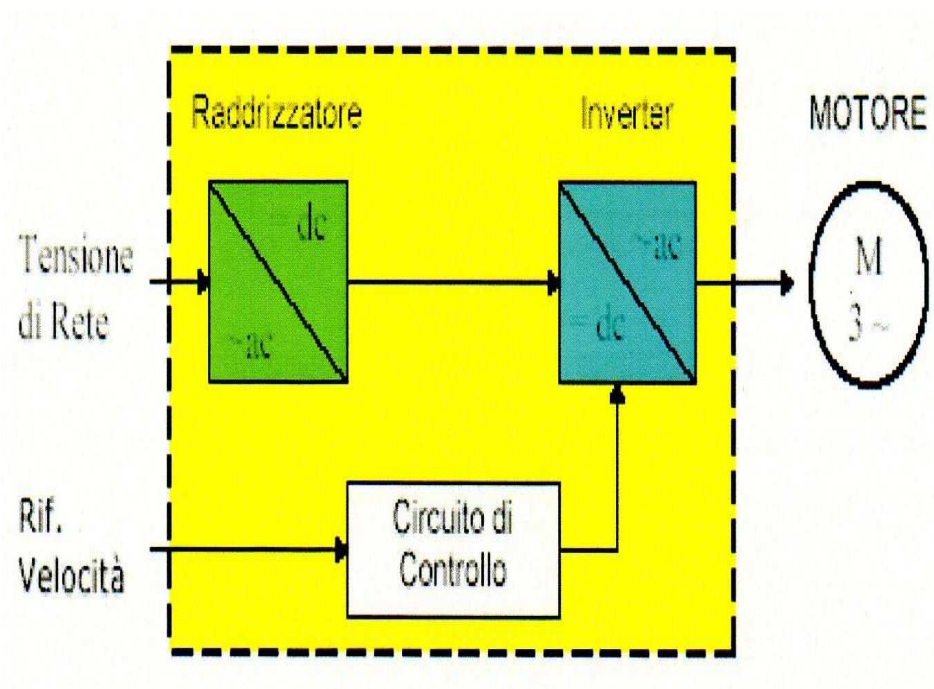
CAPITOLO 4

IL CONVERTITORE DI FREQUENZA (INVERTER)

Introduzione al convertitore di frequenza

Il convertitore di frequenza, come precedentemente affermato, è utile per regolare la velocità di un motore asincrono trifase specialmente nel caso in cui non deve funzionare a piena potenza e quindi per garantire grandi risparmi energetici.

Il convertitore che andiamo ad utilizzare per questa regolazione di velocità è il convertitore di frequenza variabile e può essere riassunto attraverso il seguente schema di principio:



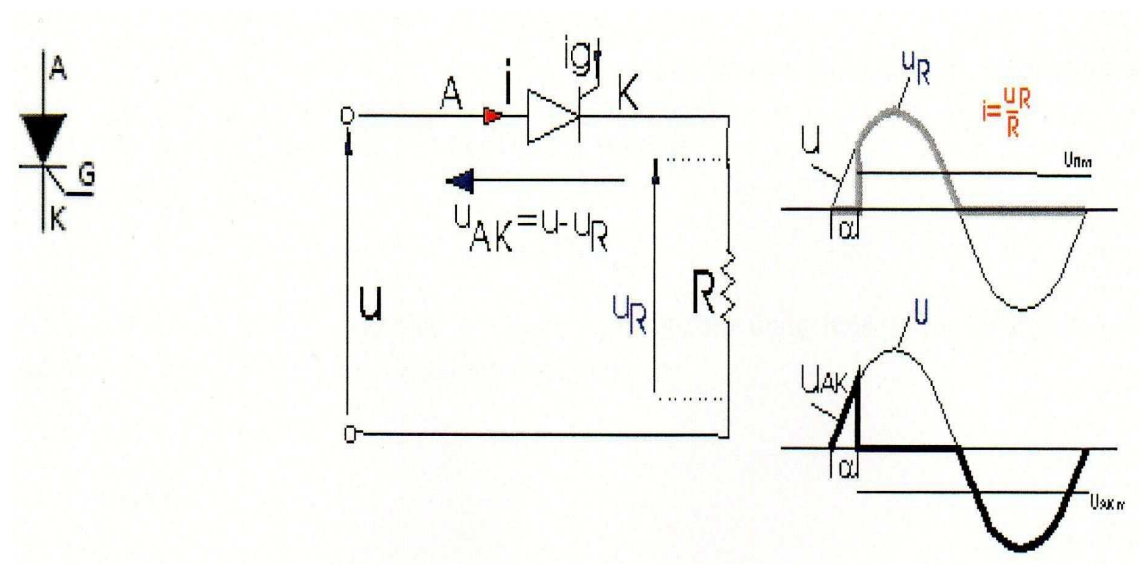
Il raddrizzatore trifase controllato a tiristori

Il raddrizzatore ha il compito di convertire la tensione alternata in tensione continua.

Nel seguente caso, la tensione in uscita deve essere controllata, è necessario l'utilizzo di tiristori.

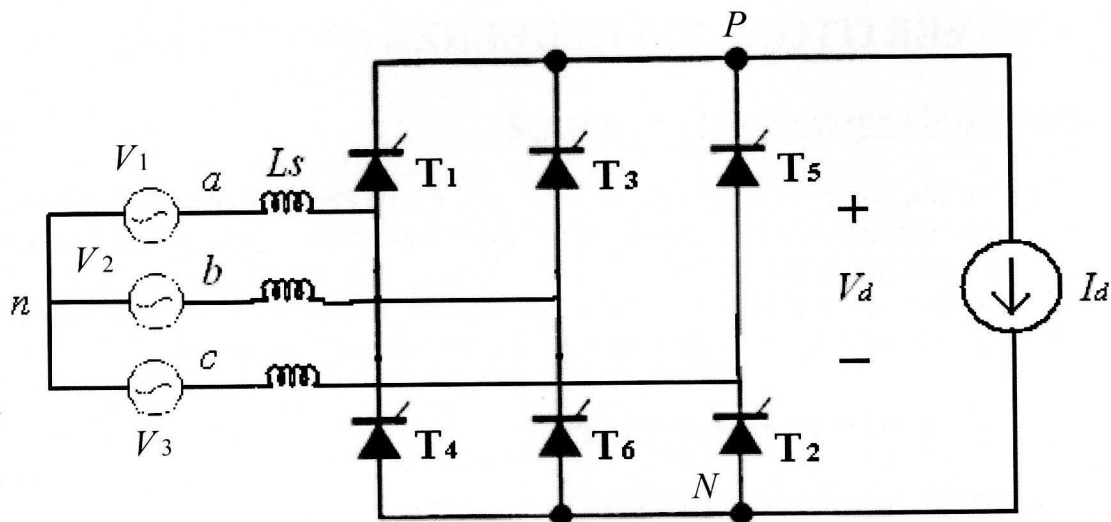
I tiristori sono dei semi-conduttori e si comportano come un semplice diodo a differenza che iniziano a condurre corrente solo nel caso siano polarizzati direttamente e sia dato l'impulso di gate.

Andiamo a vedere uno schema che ne riassume il funzionamento:



Come possiamo vedere l'angolo α rappresenta l'istante in cui viene dato l'impulso di gate e quando il tiristore inizia a condurre.

Andiamo ora a rappresentare un convertitore trifase reale a tiristori:



Come possiamo vedere dal circuito qui sopra abbiamo messo un generatore ideale di corrente continua I_d perché rappresenta la situazione nella quale su un induttore con elevata induttanza può essere connesso in serie all'uscita del raddrizzatore con funzionalità di filtro.

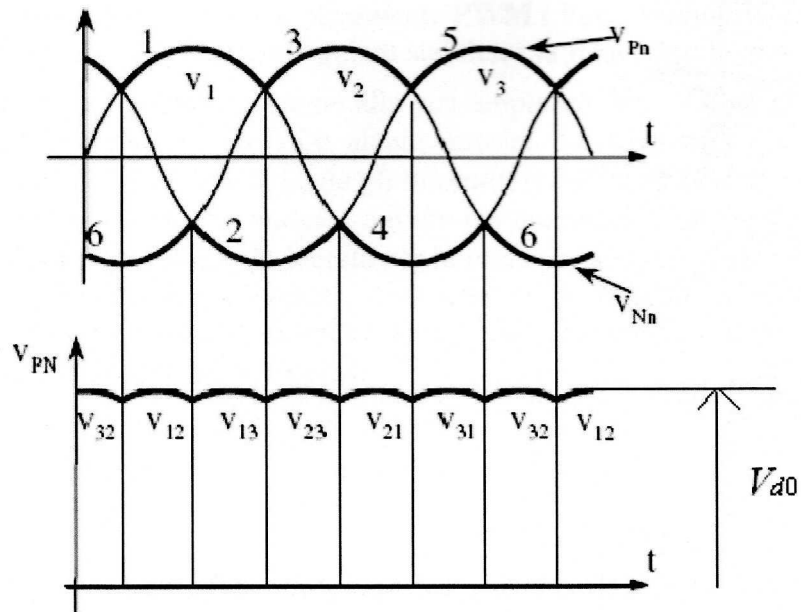
La linea di alimentazione, invece, è rappresentata da un generatore ideale di tensione sinusoidale in serie con la sua impedenza interna, che in pratica è prevalentemente induttiva ed è rappresentata con L_s .

Per migliorare la forma d'onda della corrente di linea si può collegare un induttore in serie sul lato alternato; in pratica tale induttore ha l'effetto di aumentare il valore di L_s .

Trascuriamo momentaneamente l'induttanza L_s per capire meglio il funzionamento di questo raddrizzatore. Supponendo che l'impulso di gate sia dato in continuazione, abbiamo che i tiristori si comportano come dei normali diodi e quindi abbiamo che il valore medio della tensione lato continua V_{d0} è uguale a:

$$V_{d0} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} * V_{LL} = 1,35 * V_{LL}$$

V_{LL} = valore efficace delle tensioni concatenate



Se invece andiamo ad applicare un impulso di gate ad determinato istante periodico α abbiamo che la tensione in lato continua può essere controllata e l'area tratteggiata $A\alpha$ comporta una riduzione del valore medio della tensione nel lato continua.

Andiamo a vedere le seguenti formule:

$$V_{d\alpha} = V_{d0} - \frac{A\alpha}{\pi/3}$$

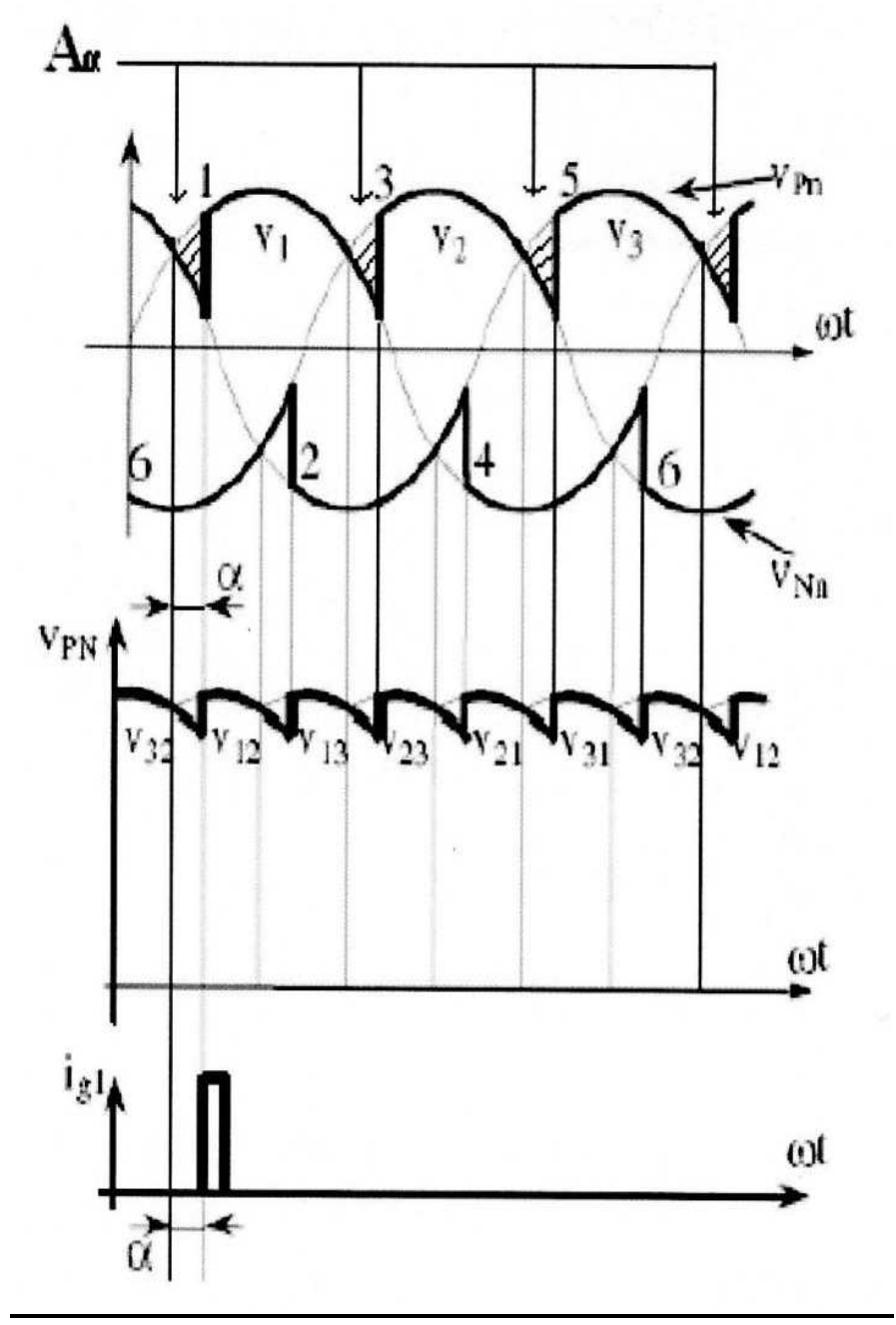
L'area $A\alpha$ è l'integrale dato da:

$$A\alpha = \int_0^\alpha \sqrt{2} V_{LL} \sin \omega t d(\omega t)$$

Quindi :

$$V_{d\alpha} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{LL} \cos \alpha$$

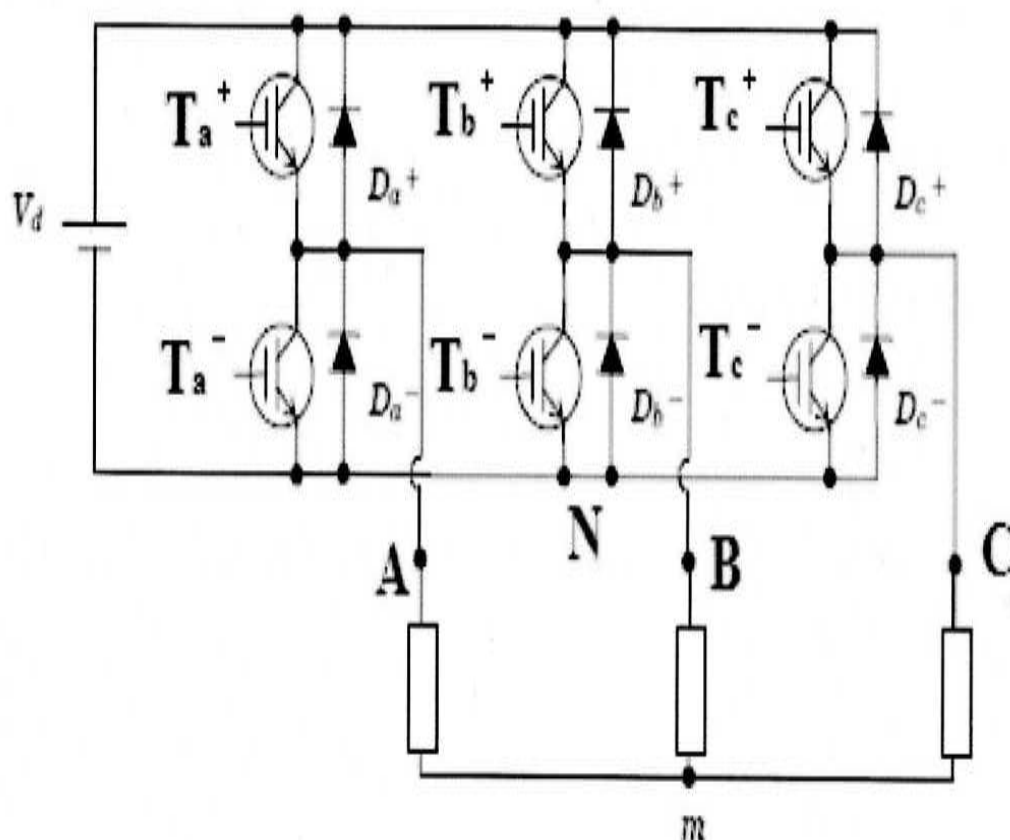
Con il seguente grafico andiamo a vedere l'andamento delle tensioni con l'utilizzo di tiristori applicando l'impulso di gate ad un determinato istante



Inverter trifase con tensione controllata in ampiezza e frequenza

All'uscita del raddrizzatore viene utilizzato un filtro per migliorare la forma d'onda in modo tale che sia il più costante possibile. Dopo di che, questa componente continua viene convertita in alternata con frequenza desiderata dall'inverter che ha proprio il compito di trasformare una tensione continua d'ingresso in una tensione alternata a frequenza e tensione desiderata.

Andiamo a rappresentare graficamente un inverter trifase:



Come possiamo vedere, questo dispositivo è formato da interruttori **T** dove la loro chiusura e apertura è controllata da un modulatore il quale confronta un'onda di tipo triangolare con un'altra onda di tipo sinusoidale con ampiezza e frequenza desiderata (praticamente quella che voglio applicare per variare la velocità al motore).

Questa tecnica è definita **modulazione a larghezza d'impulso** detta anche semplicemente **PWM** (Pulse Width Modulation).

La frequenza dell'onda triangolare stabilisce la frequenza di commutazione degli interruttori ed è di solito tenuta costante assieme alla sua ampiezza \hat{V}_{tri} . Prima di discutere il comportamento della PWM, è necessario definire alcuni termini. La frequenza dell'onda triangolare \hat{V}_{tri} è quella di commutazione f_s , con la quale gli interruttori dell'inverter sono comandati.

Il segnale di controllo **Vcontrollo** è usato per modulare il duty cycle dell'interruttore e ha la frequenza f_1 , che è la frequenza desiderata per la prima armonica della tensione dell'uscita dell'inverter (detta anche frequenza modulante).

Ovviamente la tensione d'uscita dell'inverter non è un'onda sinusoidale perfetta e contiene armoniche di frequenze multiple.

Il rapporto di modulazione d'ampiezza **ma** è definito come:

$$m_a = \frac{V_{controllo}}{\hat{V}_{tri}}$$

dove il numeratore è il valore massimo del segnale di controllo e il denominatore è l'ampiezza del segnale triangolare, che generalmente è tenuta costante.

Il rapporto di modulazione di frequenza **mf** è definito come:

$$m_f = \frac{f_s}{f_1}$$

Molto importante risulta la scelta della frequenza di commutazione e del rapporto di modulazione di frequenza **mf**.

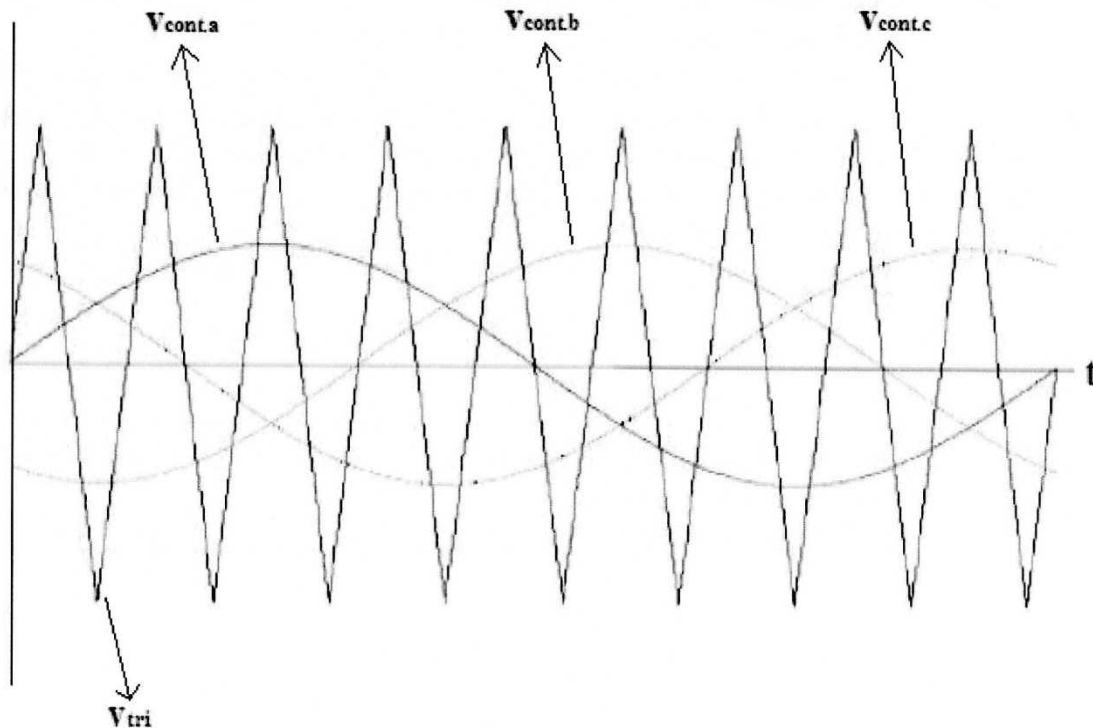
In considerazione della relativa facilità con la quale si possono filtrare le armoniche della tensione a frequenza elevate, è desiderabile scegliere una frequenza di commutazione quanto più alta possibile, eccetto per il significativo svantaggio delle perdite dovute alla commutazione negli interruttori degli inverter che crescono in modo proporzionale alla frequenza di commutazione **fs**.

In applicazioni tipiche a 50-60 Hz, come gli azionamenti a tensione alternata, il rapporto di modulazione di frequenza deve essere 9 o anche meno per frequenze di commutazione inferiori a 2 kHz quindi una buona relazione tra il segnale della triangolare e quello di controllo è determinata da quanto è grande **mf**.

Molto importante è il valore del rapporto della modulazione d'ampiezza il quale deve essere minore di 1:

- Con **mf** < 21 abbiamo che il segnale dell'onda triangolare e il segnale di controllo sono tra loro sincronizzati. Questa modulazione richiede che **mf** sia un numero intero altrimenti avremmo delle sub armoniche (della frequenza fondamentale) che sono veramente indesiderabili nella maggior parte delle applicazioni. Per esempio se abbiamo una frequenza d'uscita dell'inverter e quindi quella di controllo è di 65,42 Hz e **mf** = 15, la frequenza dell'onda triangolare deve essere $15 \times 65,42 = 981,3 \text{ Hz}$.
- Con **mf** > 21 abbiamo la necessità che **mf** sia un numero intero altrimenti perché se l'inverter va ad alimentare carichi come motori a corrente alternata, le sub armoniche con frequenza nulla o vicine allo zero, anche se di piccola ampiezza, producono una corrente elevata che è assai indesiderata.
- Con **ma** > 1 abbiamo una sovramodulazione cioè l'ampiezza della tensione con frequenza fondamentale è superiore all'ampiezza dell'onda triangolare. In questo modo abbiamo che il contenuto armonico è molto superiore di quello con funzionamento a **ma** < 1.

Vediamo ora un grafico che rappresenta il confronto tra il segnale triangolare e tre tensioni di controllo sinusoidali sfasate tra di loro di 120° per avere in uscita tensioni trifasi equilibrate:



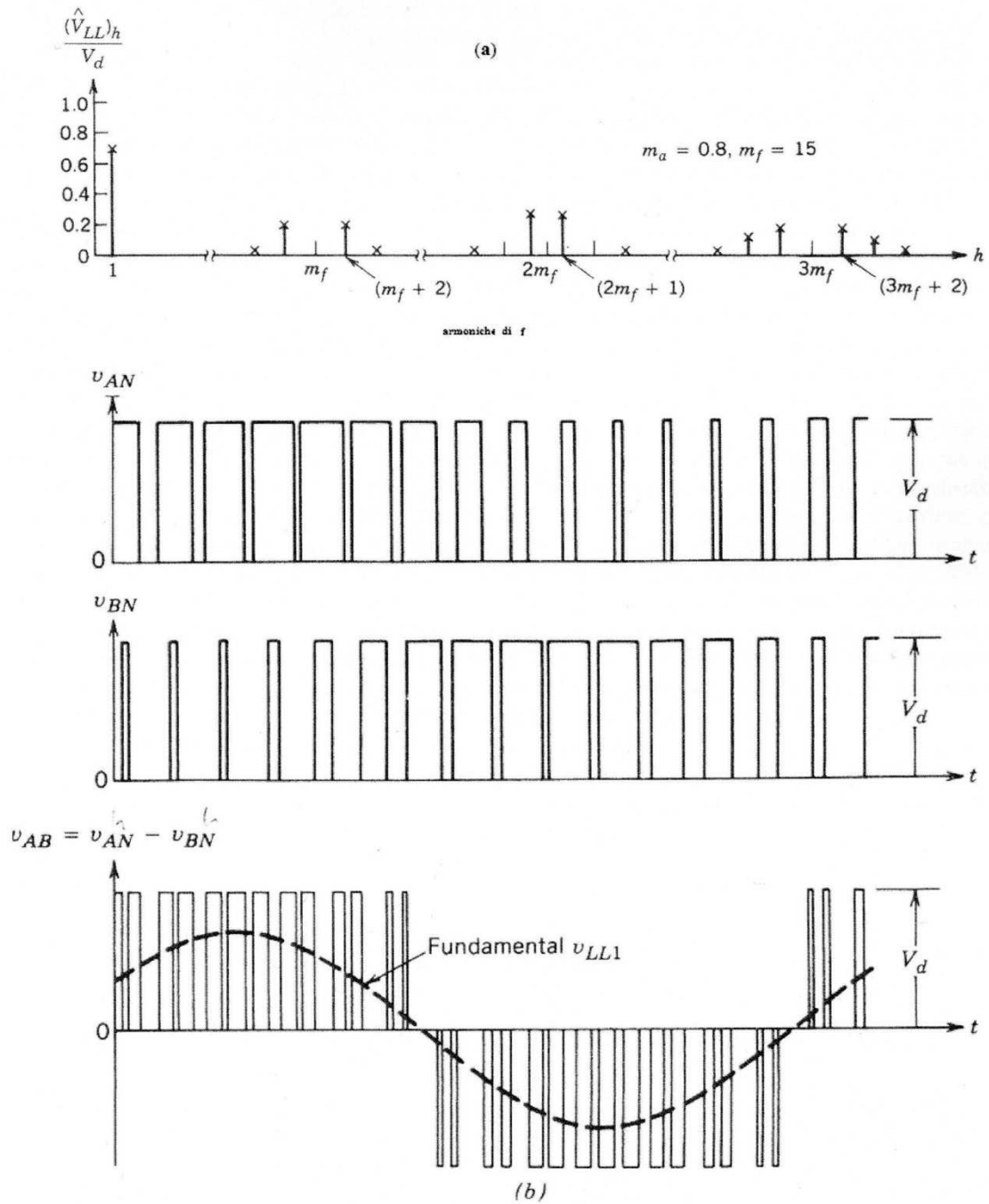
Negli inverter trifase interessano solo le armoniche nelle tensioni concatenate. Le armoniche delle tensioni di ciascuno dei rami, per esempio V_{AN} , contengono solo le armoniche dispari, disposte in bande centrate attorno ad mf e ai suoi multipli, purché mf sia dispari. Considerando solo l'armonica a mf , lo sfasamento tra l'armonica mf di V_{AN} e quella di V_{BN} è uguale a $120^\circ mf$ gradi. Questo sfasamento equivalente a zero se mf è dispari ed è un multiplo di tre.

Come conseguenza, è nulla l'armonica a mf nella tensione concatenata.

La stessa considerazione è valida per la soppressione delle armoniche che sono multipli dispari di mf se per mf è scelto un numero dispari multiplo di tre (la ragione per cui si sceglie mf multiplo dispari di tre è di tenere mf dispari e, perciò di eliminare, di eliminare le armoniche pari).

Così, alcune delle armoniche dominanti in un inverter ad un solo ramo possono essere eliminate dalla tensione concatenata di un inverter trifase.

Andiamo ora a rappresentare graficamente lo spettro delle armoniche di un inverter trifase (grafico a) e la tensione **VAB** d'uscita (grafico b):



Nella zona lineare cioè con $m_a > 1$, la prima armonica della tensione d'uscita varia in modo lineare con il rapporto di modulazione d'ampiezza. Il valore massimo della prima armonica in uno dei dell'inverter è:

$$(VAN) = ma \frac{Vd}{2}$$

Quindi ,il valore efficace della tensione concatenata alla frequenza fondamentale,dovuto ad uno sfasamento di 120° tra le tensioni di fase,può essere scritto come:

$$V_{LL1(\text{concatenata})} = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} (VAN) = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{2}} ma Vd \approx 0,612 ma Vd$$

Disturbi prodotti dai convertitori di frequenza

Gli inverter a frequenza variabile per regolare la velocità dei motori elettrici sono dei veri e propri generatori di disturbi elettromagnetici che vanno verso il carico e verso la rete.

La tensione che essi vanno a generare non è puramente sinusoidale ma contiene degli impulsi ad alta frequenza (4-8 kHz).

Questo comporta svariate problematiche di tipo elettrico:

1. Disturbi irradiati nell'ambiente attraverso i cavi di collegamento del motore; tipicamente questo problema si risolve utilizzando cavi schermati che coprono tutto il percorso della morsettiera di uscita dell'inverter fino alla morsettiera del motore.
2. Disturbi condotti verso la rete di alimentazione attraverso lo stadio di ingresso dell'inverter:
anche questi problemi sono facilmente 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 leggermente più complesso da risolvere, e può essere affrontato a livello di singolo inverter o a livello di impianto, con filtri per armoniche.

Conclusioni

Di solito l'attenzione sia del gran pubblico che dei decisori politici quando si parla d'energia e di disponibilità energetica, è focalizzata sulle fonti rinnovabili ed in subordine sui risparmi d'energia termica realizzabili negli edifici. Poco si dibatte sulla possibilità di risparmiare applicando concetti di efficienza nel campo degli usi dell'elettricità ed in particolare in quello dei motori elettrici.

Nel settore industriale i motori elettrici consumano fra il 60 e l'80% di tutta l'elettricità richiesta nel settore.

I sistemi azionati da motori elettrici costituiscono di gran lunga il più importante tipo di carico elettrico.

Sono impiegati in una vasta gamma d'applicazioni ed è per questo che rappresentano un importante obiettivo di risparmio energetico.

La loro natura varia da difficoltà legate alla struttura del mercato, a conflitti organizzativi e budgetari interni alle industrie stesse, ostacoli economici e finanziari ed infine, naturalmente, a difficoltà tecniche specifiche delle varie tecnologie.

Il mercato dei sistemi azionati da motori elettrici presenta molti soggetti coinvolti e quindi i vari programmi di efficienza energetica che possono essere attivati debbono necessariamente tener conto dei punti di vista dei vari operatori e quindi essere specifici per i diversi comparti del settore.

Troppe piccole e medie industrie ignorano le possibilità e la convenienza ad attivare programmi d'efficienza energetica nei loro stabilimenti.

C'è quindi la necessità di predisporre tutta una serie di programmi, incentivazioni, azioni informative e formative onde poter diffondere l'efficienza energetica anche in questo campo sinora abbastanza trascurato.

Bibliografia

- Boffa, “Motori elettrici ad alto rendimento e inverter. Opportunità e criticità per l’efficienza energetica”, www.regione-toscana.it .
- Stefano Pani, “I vantaggi della variazione di velocità negli impianti di pompaggio e ventilazione”, www.schneider-electric.it.
- ABB Power and productivity for a better world, “Finanziaria 2007 Incentivo all’utilizzo di motori ad alto rendimento e inverter”
- Ned Mohan, Tore M. Undeland, William P. Robbins, “Elettronica di Potenza: convertitori e applicazione”, edizione italiana di Power Electronics, Hoepli 2005.
- Marco dal Prà, “Inverter per motori asincroni trifase: a cosa servono e come funzionano” , Appunti di elettronica, dicembre 2008.
- Change. Intelligent Energy Europe, “Tecnologie e interventi per l’efficienza energetica. Motori ad elevata efficienza e variatori di velocità”, Manuale motori ad elevata efficienza e variatori di velocità.
- Alessandro Pueroni, “Azionamenti a inverter nel settore HVAC”, Costruire impianti.
- ENEA, “Efficienza energetica: motori elettrici e variatori di velocità ad alta efficienza”, marzo 2007
- Leroy Somer s.p.a. , “Motori elettrici. Efficienza energetica nell’industria”, Road Show 2010.