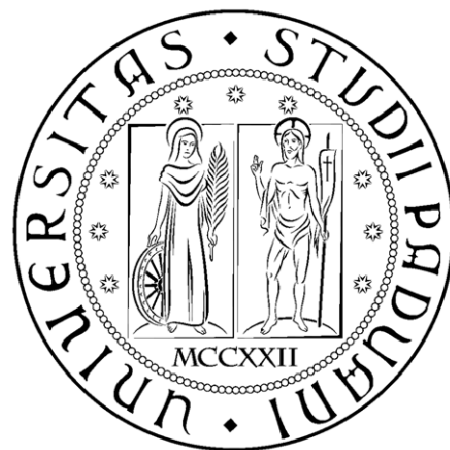


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Elettrica



Tesi di Laurea Magistrale

**RENDIMENTI DELLE MACCHINE ELETTRICHE E LO
SVILUPPO DEI MOTORI ED INVERTER AD ALTA
EFFICIENZA**

**Performance of electrical machines and development of motor and inverter high
efficiency**

Laureando: Andrea Mozzato
Matricola: 1014171

Relatore: Prof. Ing. Renato Gobbo

Anno Accademico: 2012-13

Indice

INTRODUZIONE.....	3
CAPITOLO 1 IL MOTORE ELETTRICO	5
1.1 COS'E' UN MOTORE ELETTRICO (pag. 5)	
1.2 MATERIALI CHE COSTITUISCONO LE VARIE PARTI DI UNA MACCHINA ELETTRICA (pag. 7)	
1.3 PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO DELLA MACCHINA ELETTRICA (pag. 11)	
1.4 RENDIMENTO E PERDITE DELLA MACCHINA ELETTRICA (pag. 12)	
CAPITOLO 2 IL MOTORE ASINCRONO TRIFASE.....	25
2.1 LE MACCHINE ASINCRONE (pag. 25)	
2.2 STRUTTURA ELETTROMAGNETICA DEL MOTORE ASINCRONO TRIFASE (pag. 26)	
2.2.1 Statore (pag. 27)	
2.2.2 Rotore (pag. 27)	
2.3 PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO DELLA MACCHINA ASINCRONA TRIFASE (pag.30)	
2.4 CIRCUITO ELETTRICO EQUIVALENTE (pag. 32)	
2.5 POTENZE E RENDIMENTO DEL MOTORE ASINCRONO (pag. 34)	
2.5.1 Potenza (pag. 34)	
2.5.2 Rendimento (pag. 38)	
2.6 CONFRONTO FRA MOTORE ASINCRONO E MOTORE IN CORRENTE CONTINUA (pag. 38)	
CAPITOLO 3 LA REGOLAZIONE DELLA VELOCITA' DI UN M.A.T.....	41
3.1 METODI DI REGOLAZIONE DELLA VELOCITA' (pag. 41)	
3.2 INVERTER (pag.45)	
3.2.1 Generalità e scelta dell'inverter (pag.47)	
3.3 IL RENDIMENTO DEL SISTEMA DI AZIONAMENTO (pag.52)	
3.4 IL RENDIMENTO EUROPEO NEL CASO DEGLI INVERTER FOTOVOLTAICI (pag. 54)	
CAPITOLO 4 NORMATIVE SUL RENDIMENTO DEI MOTORI ELETTRICI	59
4.1 L'EVOLUZIONE NEL TEMPO DELLE NORMATIVE SUI MOTORI ELETTRICI (pag. 59)	

4.1.1 Norma IEC 60034-2:1996 e IEEE 112-B per la determinazione delle perdite (pag. 61)

4.1.2 Normativa IEC 60034-2-1:2007 & IEC 60034-30:2008 (pag. 62)

4.1.3 Normativa Europea CE 640/2009 (EU-MEPS) (pag.69)

4.1.4 Norma ISO 50001 (pag. 75)

CAPITOLO 5 I MOTORI ELETTRICI ALTA EFFICIENZA..... 79

5.1 L'EFFICIENZA ENERGETICA (pag. 79)

5.2 MOTORI ELETTRICI AD ALTA EFFICIENZA (pag. 80)

5.3 ANALISI DI VALUTAZIONE DI CONVENIENZA DI UN MOTORE ELETTRICO ALTA EFFICIENZA (pag. 85)

CAPITOLO 6 MOTORI SINCRONI A RILUTTANZA E INVERTER AD ALTA EFFICIENZA..... 89

6.1 MACCHINA SINCRONA A RILUTTANZA (RSM) (pag. 89)

6.2 MOTORI SINCRONI A RILUTTANZA E INVERTER AD ALTA EFFICIENZA (pag. 92)

6.2.1 Pacchetto SynRM High-Output (pag.102)

6.2.2 Pacchetto SynRM IE4 Super Premium Efficiency per pompe e ventilatori (pag. 106)

CAPITOLO 7 CENELEC ©EN: 50598-2 113

7.1 STRUTTURA DELLA BOZZA EN: 50598-2 (pag. 113)

7.2 INDICATORI DI EFFICIENZA ENERGETICA - Parte 2 (pag. 115)

7.2.1 Riferimenti Normativi (pag.116)

7.3 PDS di riferimento, CDM di riferimento e il motore di riferimento RM - Parte 1 (pag. 118)

7.3.1 Modello "SAM" per la determinazione dell'indice di efficienza energetica di un PDS (pag. 120)

CONCLUSIONI..... 123

BIBLIOGRAFIA 125

RINGRAZIAMENTI..... 127

Introduzione

Una buona fetta del mercato dei motori elettrici è rappresentata dal motore asincrono trifase, un tipo di motore molto semplice ed economico, che grazie all'uso dell'elettronica di controllo, negli ultimi anni, oltre ad aver guadagnato una fetta di mercato sempre più grande, ha occupato anche settori che un tempo erano ad uso esclusivo dei motori in corrente continua. Questo tipo di motore quando è collegato direttamente alla rete, ha il difetto di girare a velocità praticamente costante; sapendo che il consumo di energia dei motori elettrici è circa il 75% del totale consumo del settore industriale, a fronte di questo dato si capisce come possa essere importante per l'economia aziendale e per il miglioramento dell'efficienza in senso lato, attuare una riduzione dei consumi elettrici ricorrendo all'utilizzo di azionamenti a velocità variabile. Nei primi capitoli della seguente tesi verranno trattati, oltre ad una panoramica sulle generalità della macchina elettrica e sul motore asincrono trifase, anche i vari metodi di regolazione della velocità di un motore asincrono con alcune generalità sulla scelta e sui vari tipi di inverter, e un approfondimento sul rendimento del sistema di azionamento e sul calcolo del rendimento Europeo nel caso particolare degli inverter fotovoltaici. Il capitolo quattro e cinque, sono stati dedicati all'evoluzione delle normative sui rendimenti dei motori elettrici negli ultimi vent'anni, sul calcolo del rendimento da attuare e sui motori elettrici alta efficienza. Nel capitolo sei, ho riservato una trattazione specifica sul nuovo pacchetto ad alta efficienza costituito dai motori sincroni a riluttanza e inverter; questa è una soluzione che attualmente rappresenta una novità, che combina le migliori componenti ad alta efficienza energetica e customer value. Nello specifico mi sono riferito al gruppo ABB, leader nelle tecnologie per l'efficienza e l'automazione, il quale ha lanciato una versione di motore sincro a riluttanza ad alta efficienza, basato sulla tecnologia SynRM, dei suoi più recenti azionamenti, con una innovazione nel design del rotore, che non risulta più avvolto, come nel design del motore sincro tradizionale; con questa nuova tecnologia per applicazioni industriali, sono stati resi disponibili due nuovi pacchetti motore e convertitore di frequenza (SynRM High-Output & SynRM

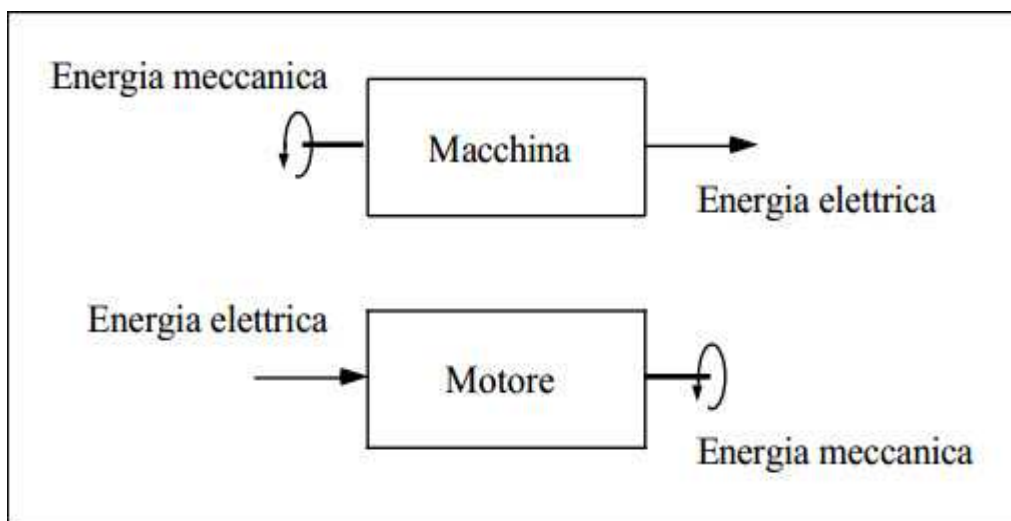
IE4 Super Premium Efficiency), e nella parte finale del capitolo sei, sono andato a metterne in evidenza le caratteristiche principali di questi motori e convertitori e i vantaggi che presentano rispetto ad un tradizionale motore asincrono. Nell'ultimo capitolo della seguente tesi ho messo in evidenza una nuova bozza di norma, la EN: 50598-2, la quale è stata disposta dal Comitato Tecnico *CENELEC TC22X: Elettronica di Potenza*. Il gruppo di lavoro TC22X 6, non è altro che un gruppo di esperti costituito per prendere decisioni di standardizzazione, in base al Mandato M/476 della Commissione europea per la normalizzazione nel settore dei variatori di velocità e/o di prodotti Power Drive System; questo gruppo di lavoro ha impostato una stretta collaborazione con diversi altri comitati tecnici (CLC/TC2; CLC/TC17B; CEN TC 197), avviando un lavoro di standardizzazione per chiarire tutti gli aspetti in materia di efficienza energetica e di requisiti di progettazione ecocompatibile per l'elettronica di potenza, interruttori, dispositivi di controllo, sistemi di trasmissione di potenza e le loro applicazioni industriali.

Capitolo 1

Il motore elettrico

1.1 Cos'è un motore elettrico

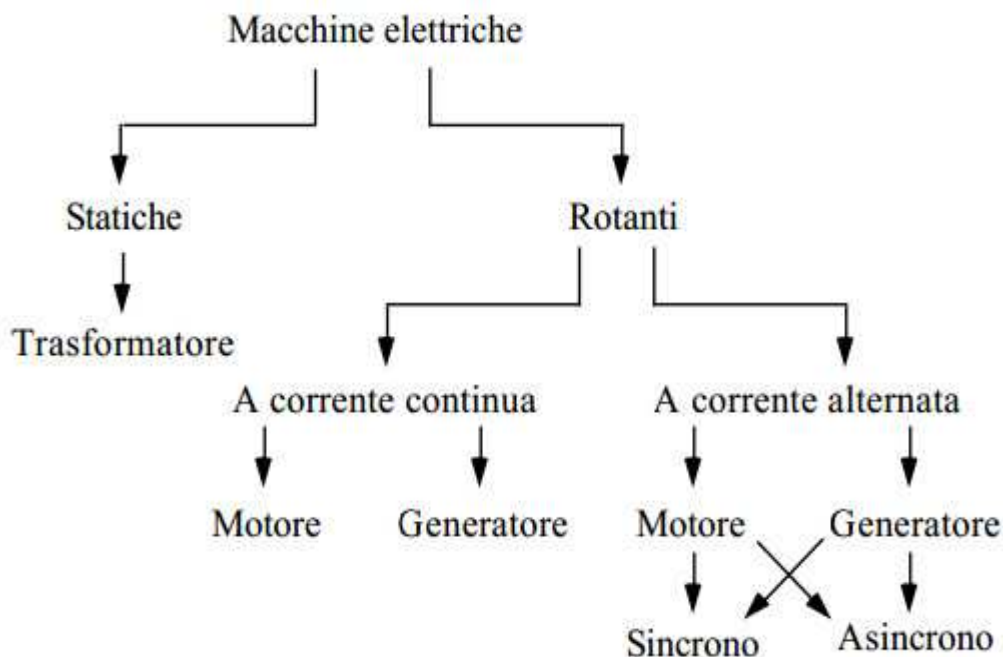
Un motore elettrico è una macchina reversibile in grado di trasformare la potenza in ingresso di tipo elettrico, in potenza in uscita di tipo meccanico; il termine *reversibile* indica che è in grado di fare anche l'operazione inversa e in quel caso prende il nome di generatore. Quindi è un dispositivo che permette di trasformare direttamente l'energia di un campo elettromagnetico variabile nel tempo in movimento. Per rendere più esplicito quanto detto, si parla di **macchina**, senza aggiungere altro, ogni qual volta si ha a che fare con un dispositivo che realizzi la conversione di energia meccanica, o qualsiasi altra forma di energia, in energia elettrica; si può pensare ad esempio, ai generatori di tensione, come dei bipoli, i quali, a spese di un'altra forma di energia, mettono a disposizione del circuito, a cui sono collegati, una certa quantità di energia elettrica. Invece, si chiama **motore** un qualsiasi apparato che realizza la conversione duale, quella, cioè, che trasforma l'energia elettrica in energia meccanica.



Le macchine elettriche vengono poi tradizionalmente divise in due grandi gruppi, le **macchine**

statiche e le **macchine rotanti**. Le macchine statiche, così dette perché prive di parti in movimento, modificano il valore della corrente o della tensione alternata fornita in ingresso, mantenendo pressoché inalterato il valore della potenza e a questa prima categoria appartiene, senza dubbio, il trasformatore. Le macchine rotanti, nelle quali è presente una parte che ruota attorno ad un asse, appartengono tre tipi fondamentali; il tipo sincrono, che opera in regime sinusoidale e con velocità di rotazione costante; il tipo asincrono, che funziona sempre in regime sinusoidale con una velocità di rotazione dipendente dal campo magnetico interno alla macchina e variabile con il carico; e il tipo a corrente continua, che opera in regime stazionario, poiché l'energia viene fornita o prodotta in corrente continua.

Infine, una menzione particolare meritano tre dispositivi che svolgono importanti funzioni che sono, il convertitore, che modifica la frequenza delle grandezze alternate realizzando una trasformazione della frequenza del segnale di ingresso oppure trasformando le grandezze alternate in grandezze continue; l'invertitore, che trasforma grandezze continue in grandezze alternate; e il raddrizzatore, che converte grandezze alternate in grandezze a valor medio non nullo, da cui si estrae una grandezza continua. Lo schema che segue riassume in forma grafica le principali classificazioni delle macchine elettriche date in precedenza.



1.2 Materiali che costituiscono le varie parti di una macchina elettrica

I miglioramenti per rendere questi motori più compatti, più leggeri e più efficienti sono dovuti, oltre che ad un razionale progetto del circuito magnetico, anche all'utilizzo di migliori materiali magnetici, conduttori ed isolanti.

Una classificazione dei materiali usati nelle macchine elettriche è la seguente:

- materiali conduttori;
- materiali isolanti;
- materiali magnetici;
- materiali strutturali.

Per quanto riguarda i **materiali conduttori** vengono generalmente adoperati per formare i circuiti interni alle macchine elettriche e devono presentare un elevato valore di conducibilità elettrica. Quelli più comunemente usati per realizzare gli avvolgimenti sono il rame e l'alluminio; il **rame** è di gran lunga il conduttore più usato per la bassa resistività, per le sue ottime proprietà tecnologiche (trafilabilità, facilità di laminazione, saldabilità, ecc.) e per le sue elevate proprietà meccaniche. Per quanto riguarda l'**alluminio**, rispetto al rame è meno costoso e presenta valori inferiori di peso specifico e temperatura di fusione, ma caratteristiche elettriche e meccaniche inferiori. In entrambi i casi, bisogna sempre tener presente che la resistività è direttamente proporzionale alla temperatura, e quindi, se la temperatura di esercizio della macchina cresce, con essa aumenta anche la resistività.

		rame	alluminio
Resistività a 20° - 75°C	[ohm mm ² /m]	0,017 - 0,021	0,028 - 0,034
Resistenza a traz. materiale ricotto-crudo	[kg/mm ²]	24 - 38	9 - 17
Peso specifico	[kg/dm ³]	8,9	2,7
Temperatura di fusione	[°C]	1083	658

Altri materiali conduttori, meno adoperati nelle applicazioni elettriche, sono l'argento, il bronzo,

l'oro e l'ottone. Le altre caratteristiche da tenere in conto nella scelta di un materiale conduttore sono il peso specifico, la duttilità, la flessibilità e la malleabilità; queste caratteristiche meccaniche, se da un lato riducono il peso totale della macchina, dall'altro ne facilitano la sua realizzazione.

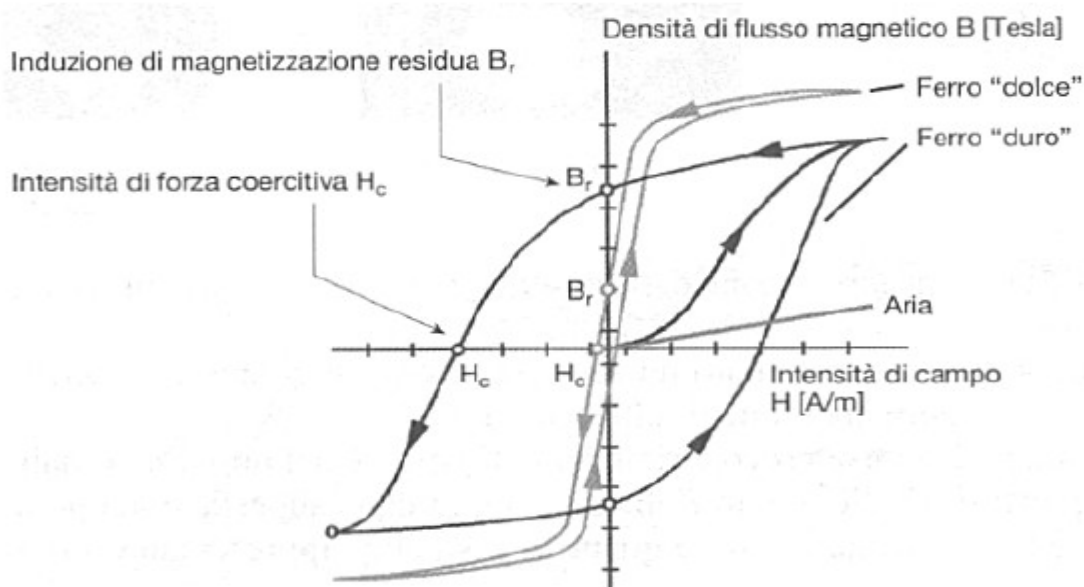
Per quanto riguarda i **materiali isolanti**, da essi dipende il funzionamento e la durata delle macchine elettriche, in quanto sono gli elementi più sensibili alle sollecitazioni termiche, dielettriche e meccaniche. Le principali proprietà dei materiali isolanti sono, la rigidità dielettrica (il più alto valore del gradiente di tensione che il materiale può sopportare senza che avvenga la scarica), la costante dielettrica e la conduttività termica. Un aumento di 10° C della temperatura di esercizio produce circa il dimezzamento della durata di vita di un dielettrico. I materiali isolanti vengono adoperati per isolare elettricamente parti a diversa tensione e sono caratterizzati elettricamente dalla resistività di volume e dalla resistività superficiale (che tiene in conto delle inevitabili anche se piccole, correnti di conduzione), dalla rigidità dielettrica (misurata in volt/metro) e dalla costante dielettrica ϵ . Ciò che invece li caratterizza meccanicamente, è la resistenza ai piegamenti, alle abrasioni, alla corrosione, la tranciabilità (cioè ossia la possibilità di taglio in pezzi di varie forme), la conducibilità termica e l'igroscopicità (ossia la tendenza ad assorbire umidità).

Classi di isolamento	Temperatura massima	Esempi
C	oltre 180°	Mica, porcellana, ceramica, vetro.
H	180°	Come la classe B impregnati con resine siliconiche.
F	155°	Come la classe B impregnati con collanti organici.
B	130°	Fibra di vetro, amianto impregnato, mica.
E	120°	Resine poliesteri, triacetato, fibre particolari.
A	105°	Carta, seta, cotone impregnati.
Y	90°	Carta, seta, cotone senza impregnazione.

Mettendo in risalto ciò che maggiormente interessa per lo studio delle macchine, gli isolanti solidi per le macchine elettriche sono catalogati in base alla temperatura massima ammessa, secondo la tabella qui sopra riportata e presa dalle norme del Comitato Elettrotecnico Italiano (CEI).

Tra gli isolanti liquidi si citano gli oli minerali e alcuni liquidi a base di silicone; l'uso di questi isolanti ha anche lo scopo di asportare il calore eventualmente generato durante il funzionamento della macchina. Tra gli isolanti gassosi si citano invece l'aria e l'idrogeno.

Per quanto riguarda i **materiali magnetici**, tutti i circuiti magnetici sono costituiti da materiali la cui permeabilità magnetica è molto elevata. Lo studio dei campi magnetici nella materia, mostra che più elevata è la permeabilità, migliore è l'approssimazione che considera completamente intrappolato nel materiale il campo di induzione magnetica, in modo tale che la superficie che delimita la frontiera del materiale magnetico diventa un tubo di flusso, dato che contiene al suo interno tutte le linee del campo di induzione magnetica B .



I materiali ferromagnetici si possono dividere nelle due seguenti categorie:

- **Materiali dolci.** Hanno uno stretto ciclo di isteresi ed un'elevata permeabilità e vengono utilizzati come nuclei di induttori o di mutui induttori, o per ottenere elevati valori di induzione in campi prodotti da altri elementi. Questi materiali dolci sono utilizzati in forma massiccia o laminata (lamierini) a seconda che il flusso sia costante o variabile. Le loro principali proprietà sono la permeabilità relativa e nel caso dei lamierini la *cifra di perdita*,

cioè le perdite per isteresi (proporzionali all'area del ciclo di isteresi) e le perdite per correnti parassite (proporzionali circa al quadrato dello spessore dei lamierini) in un kg di materiale nel caso di $f=50$ Herz e $B=1$ Tesla. Tra i materiali dolci si possono menzionare il ferro dolce, l'acciaio dolce, le leghe dei principali materiali ferromagnetici (ferro, cobalto e nichel), e con materiali non ferromagnetici (alluminio, cromo, rame, manganese, molibdeno, silicio, tungsteno), o composti chimici chiamati ferriti dolci.

- **Materiali duri.** Sono materiali che vengono usati per i magneti permanenti; questi magneti permanenti sono caratterizzati dall'andamento della caratteristica $B(H)$ nel secondo quadrante del piano $B-H$ ed in particolare dai valori dell'induzione residua B_r (cioè dell'induzione che rimane quando il campo magnetico viene annullato), dal campo coercitivo H_c (campo magnetico che è necessario per smagnetizzarli), dal massimo prodotto di energia BH_{max} (più alto è questo prodotto e più piccolo è il volume di magnete permanente necessario) e dalla posizione del ginocchio della curva $B(H)$; se il punto di lavoro oltrepassa il ginocchio si verificano nel magnete permanente delle smagnetizzazioni permanenti. Smagnetizzazioni sia reversibili che irreversibili che possono verificarsi nel magnete permanente, possono essere dovute ad un aumento della riluttanza, ad elevati campi smagnetizzanti e a variazioni della temperatura. Questi materiali sono caratterizzati da un largo ciclo di isteresi e consentono di ottenere, in una determinata zona dello spazio, campi magnetici elevati senza l'intervento di circuiti elettrici. Fra i materiali duri si trovano i vari tipi di acciai temperati e variamente legati (acciai alnico, cioè legati con alluminio, nichel e cobalti, acciai al tungsteno, acciai al cobalto) e materiali ceramici sinterizzati (ferriti dure). Esistono quattro famiglie di materiali duri:

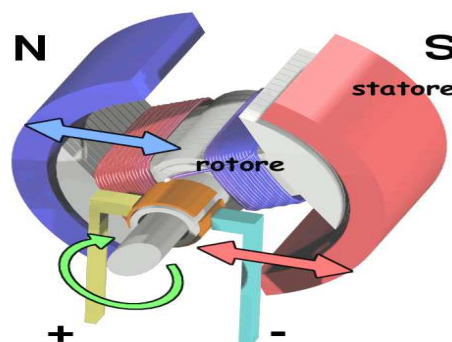
1. Metallici, con $B_r \approx 1,2$ [T], $H_c \approx 100$ [kA/m], $BH_{max} \approx 50$ [kJ/m³]; non sono in pratica più utilizzati a causa del basso H_c e del ginocchio in prossimità di B_r ;

2. Metallici ceramici, con $Br \approx 0,4$ [T], $H_c \approx 300$ [kA/m], $BH_{max} \approx 30$ [kJ/m³]; largamente usati per il loro basso costo e perché presentano il ginocchio in prossimità di H_c ;
3. Metallici ceramici Samario-Cobalto, con $Br \approx 1$ [T], $H_c \approx 1.500$ [kA/m], $BH_{max} \approx 200$ [kJ/m³] e assenza del ginocchio nel secondo quadrante; poco usati, malgrado le ottime caratteristiche magnetiche, in quanto molto costosi;
4. Neodimio-Ferro-Boro, con caratteristiche magnetiche migliori di quelle dei magneti al samario-cobalto e costi più contenuti.

Per quanto riguarda i materiale strutturali, si tratta di quei materiali utilizzati per la costruzione delle diverse parti meccaniche delle macchine elettriche, tra le quali vi sono la carcassa e l'albero. Anche se non intervengono esplicitamente nel funzionamento elettrico della macchina, incidono non poco sul dimensionamento e sul peso. Solitamente si usa la ghisa, l'acciaio e l'alluminio, tutti con il compito di resistere alle varie sollecitazioni meccaniche che la macchina può subire. Comunque per le ottime prestazioni meccaniche offerte, la lega in assoluto più usata, è l'acciaio.

1.3 Principio di funzionamento della macchina elettrica

Il motore elettrico è formato da uno statore formato da due magneti e da un rotore avvolto da un filo di rame (avvolgimento). Uno schema semplice di motore elettrico può essere il seguente, anche se ne esistono numerosi varianti:



La corrente elettrica passa in un filo di rame che avvolge a spirale un pezzo di ferro dolce chiamato rotore. Questo avvolgimento, crea un campo elettromagnetico al passaggio di corrente e tale campo elettromagnetico è immerso in un altro campo magnetico creato dallo statore (che nel caso più semplice è costituito da una o più calamite, o elettrocalamite). Il rotore, per induzione elettromagnetica inizia a girare, in quanto il nord del campo magnetico del rotore è attratto dal sud del campo magnetico dello statore e viceversa. Ogni mezzo giro, la polarità viene invertita, in modo da dare continuità alla rotazione nel secondo mezzo giro e così via. Durante la trasformazione, una modesta parte dell'energia viene dispersa in calore per effetto joule. Il motore elettrico a seconda della sua tensione di alimentazione e del suo comportamento, può essere un motore in corrente continua, un motore sincrono o un motore asincrono. I motori elettrici hanno importanza fondamentale nella società moderna; infatti basti pensare a tutti gli oggetti che normalmente ci circondano, che sono dotati tutti di uno o più motori elettrici che muovono azionamenti meccanici. Il 70% dei motori elettrici attualmente in esercizio è di tipo asincrono trifase o a induzione. Il rotore è sede di correnti indotte nel campo magnetico rotante dello statore e la coppia dovuta alle azioni tra campo dello statore e correnti del rotore determina l'avviamento del rotore. Il motore elettrico viene utilizzato per molte applicazioni nell'industria, nei trasporti (ferrovia, metropolitana e tram) e nelle apparecchiature domestiche ecc.

1.4 Rendimento e perdite della macchina elettrica

I materiali che costituiscono una macchina elettrica sono soggetti a perdite di varia natura durante il suo funzionamento; possono essere sia perdite nei conduttori che costituiscono gli avvolgimenti, tipicamente di rame, sia perdite nel ferro e nel caso delle macchine rotanti, perdite meccaniche, per attrito e ventilazione, che devono essere tenute in debito conto.

Rendimento.

Prima di esaminare queste perdite in dettaglio, vado a definire il rendimento, sapendo che gni

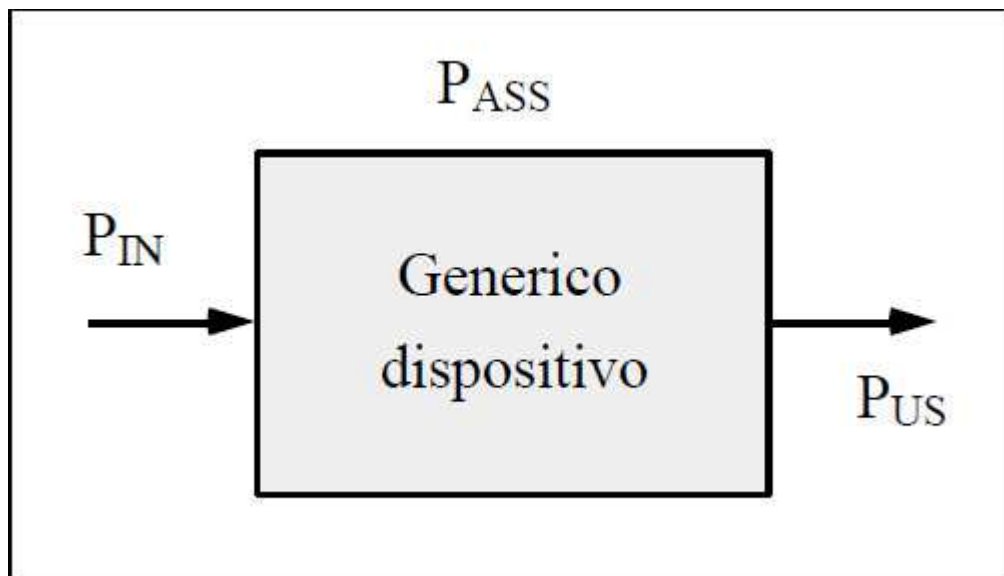
apparato (passivo) funziona per effetto di una potenza fornita in ingresso P_{IN} e restituisce una potenza in uscita P_{US} :

$$P_{ASS} = P_{IN} - P_{US}$$

e questa rappresenta la potenza assorbita dall'apparecchio nel suo funzionamento.

Chiameremo con rendimento, il rapporto tra la potenza resa in uscita e quella fornita in ingresso:

$$\eta = \frac{P_{US}}{P_{IN}}.$$



Questo rapporto, sempre più piccolo dell'unità, può anche essere espresso nelle due forme seguenti:

$$\eta = \frac{P_{IN} - P_{ASS}}{P_{IN}} = \frac{P_{US}}{P_{US} + P_{ASS}},$$

e nel seguito di questo capitolo discuterò in quali circostanze sia più utile usare l'una o l'altra forma. È abitudine diffusa introdurre anche il rendimento percentuale, dato da:

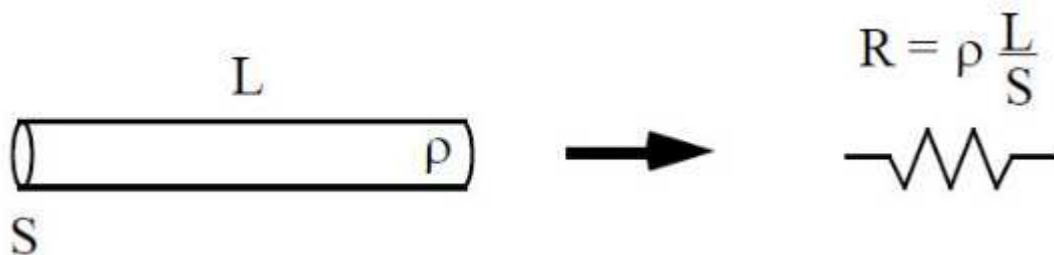
$$\eta \% = 100 \eta = 100 \frac{P_{US}}{P_{IN}}.$$

Si può dire, pertanto, che un certo motore ha un rendimento $\eta = 0.82$ (o $\eta \% = 82\%$) intendendo che restituisce l'82% della potenza fornitagli in ingresso. Il rimanente 18% viene perduto sotto forma di perdite elettriche o meccaniche. Infine, è ovvio che il rendimento è un numero sempre compreso tra zero e uno: $0 \leq \eta \leq 1$.

Dato che, essendo il dispositivo passivo, la potenza resa in uscita è necessariamente più piccola di quella fornita in ingresso. Uno dei problemi fondamentali nello studio delle macchine elettriche, è la messa a punto di tutte quelle strategie che consentano di aumentare il rendimento di una macchina; e questo non è un aspetto affatto semplice.

Perdite nel rame.

La Figura seguente ha lo scopo di ricordare che un conduttore percorso da una corrente si può approssimare con un resistore:



Gli avvolgimenti di una macchina elettrica, che sono dei conduttori tipicamente di rame ($\sigma_{Cu} \approx 58$ MS/m), sono dunque sede di perdite per effetto Joule, rappresentabili per mezzo della relazione:

$$P_{Cu} = R I^2 .$$

Se siamo in regime stazionario, I rappresenta la corrente che passa attraverso il resistore; se siamo invece in regime sinusoidale, questa corrente ne rappresenta invece il suo valore efficace. Per calcolare il corretto valore di resistenza da inserire in questa formula, è necessario considerare il numero totale di avvolgimenti sede di perdite, sia nell'indotto che nell'induttore, numero che dipende dal tipo di macchina, monofase o trifase. Il circuito induttore (anche detto circuito di eccitazione della macchina) ha lo scopo di creare il campo magnetico mediante la circolazione di

corrente (anche detta di eccitazione) nei conduttori che lo costituiscono, mentre il *circuito indotto* raccoglie le variazioni del campo magnetico, diventando sede di tensioni e correnti indotte, che, durante il funzionamento della macchina, contribuiscono a determinare il campo magnetico complessivo; l'insieme delle azioni esercitate da questo avvolgimento prende il nome di *reazione di indotto*. Comunque, nel caso di conduttori di rame funzionanti con una densità di corrente di 4 A/mm^2 , la perdita specifica, intesa come perdita per unità di massa, è pari circa a 40 W/kg .

Perdite nel ferro.

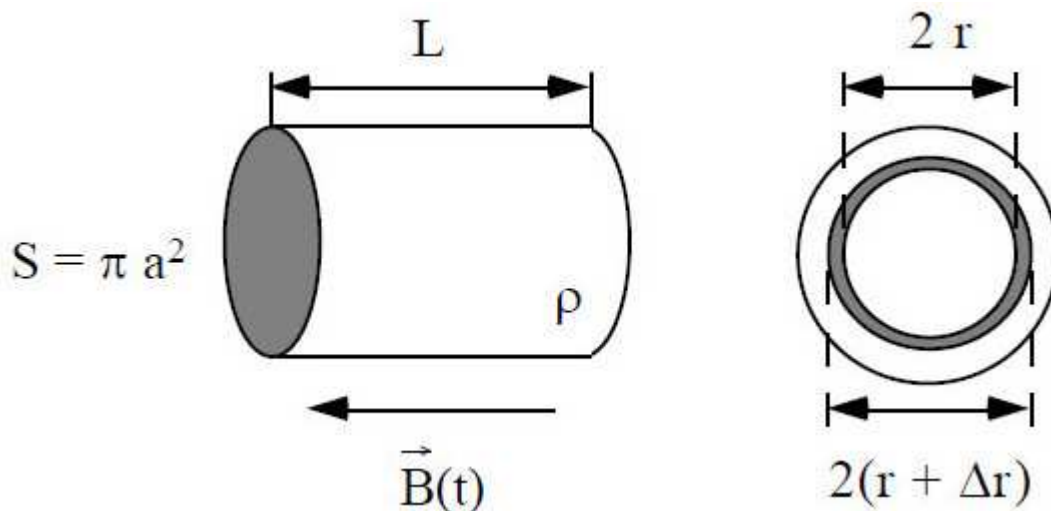
Un materiale ferromagnetico, che indicheremo genericamente come "ferro", quando viene immerso in un campo magnetico variabile, finisce per riscaldarsi. Questo innalzamento di temperatura è sostanzialmente dovuto a due tipi di perdite:

- *le perdite per correnti parassite;*
- *le perdite per isteresi.*

Prima di esaminare questi due fenomeni dissipativi, possiamo dire subito che essi comportano una trasformazione dell'energia del campo elettromagnetico in energia termica, che si manifesta sotto forma di innalzamento della temperatura media del materiale. Ora, questa perdita di energia, che non viene utilizzata per gli scopi per i quali la macchina è stata progettata, produce un eccesso di energia termica che rappresenta uno dei più grossi problemi per le macchine elettriche, soprattutto per quelle macchine che devono lavorare per elevati valori di potenza, dato che, se diventasse troppo sostenuta, potrebbe danneggiare in maniera irreversibile il comportamento dell'intero apparato. Il buon progetto di una macchina, pertanto, non può prescindere da un adeguato sistema di raffreddamento che abbia lo scopo di estrarre, dalle parti più importanti e delicate del nostro apparato, quel calore in eccesso che potrebbe risultare oltremodo dannoso. . Cerchiamo, allora, di spiegare quali processi fisici sono alla base di queste perdite.

Perdite per correnti parassite. Si consideri un cilindro conduttore di resistività ρ , e si supponga che esso sia immerso in un campo di induzione magnetica, uniforme nello spazio, diretto parallelamente all'asse del cilindro e descritto da un'unica componente, che varia nel tempo secondo la funzione sinusoidale di pulsazione ω :

$$B(t) = B_M \text{sen}(\omega t) = B \sqrt{2} \text{sen}(\omega t) .$$



In forma simbolica, questa sinusoide si può rappresentare, facendo una convenzione ai valori efficaci, per mezzo del numero complesso:

$$B(t) \rightarrow \bar{B} = B .$$

Immaginiamo che il conduttore sia composto da tanti tubi cilindrici coassiali di piccolo spessore, che indicheremo con Δr . Il generico tubo di raggio interno r , spessore Δr e lunghezza L , può essere pensato come una spira che si concatena con il flusso $\Phi(t)$ sinusoidale, anch'esso esprimibile in forma simbolica:

$$\Phi(t) = \pi r^2 B(t) \rightarrow \bar{\Phi} = \pi r^2 \bar{B} = \pi r^2 B .$$

Dalla legge dell'induzione elettromagnetica, o legge di *Faraday - Neumann*, è noto che nella spira si induce una forza elettromotrice, ovviamente sinusoidale, rappresentabile con le due seguenti

formulazioni, in funzione del tempo e con numero complesso :

$$e(t) = - \frac{d}{dt} \Phi(t) \rightarrow \bar{E} = -j \omega \bar{\Phi} = -j \omega \pi r^2 B .$$

Questa forza elettromotrice tende a far circolare una corrente nella spira, che fluisce dunque in circuiti circolari coassiali col cilindro. La conduttanza, offerta dalla spira al passaggio della corrente, ricordando la seconda legge di Ohm, vale:

$$\Delta G = \frac{L \Delta r}{2 \pi r \rho} ,$$

mentre il valore efficace della corrente che circola nella spira, trascurando l'induttanza della spira stessa, è pari a:

$$\Delta I = E \Delta G = E \frac{L \Delta r}{2 \pi r \rho} .$$

La potenza attiva ΔP :

$$\Delta P = E \Delta I = E^2 \Delta G ,$$

dissipata nella spira per effetto Joule e legata al passaggio di questa corrente, e in forza delle precedenti espressioni, diventa:

$$\Delta P = \frac{\pi L}{2 \rho} \omega^2 B^2 r^3 \Delta r .$$

Abbiamo immerso un cilindro conduttore in un campo di induzione magnetica, uniforme nello spazio e variabile sinusoidalmente nel tempo; nel conduttore, per effetto del campo elettrico indotto, si è creata una circolazione di corrente, determinata facendo 'a fettine' il cilindro; per ciascuna

porzione, dopo averne valutato la conduttanza, si è calcolato la corrente e quindi la potenza in essa dissipata. Ora è chiaro che le quantità finite, indicate con la lettera greca Δ , possono essere considerate indefinitamente piccole, operando la sostituzione formale della " Δ " con la " d ". Facciamo ciò allo scopo di integrare rispetto al raggio, per calcolare la potenza P , complessivamente assorbita dal cilindro:

$$P = \frac{\pi L}{2 \rho} \omega^2 B^2 \int_0^a r^3 dr = \frac{\pi L}{\rho} \omega^2 B^2 \frac{a^4}{8}.$$

Volendo mettere in evidenza la potenza P_{CP} , ovvero la potenza dovuta alle correnti parassite (anche dette correnti di **Foucault**), ed assorbita nell'unità di volume, questa si può anche scrivere come:

$$P_{CP} = \frac{P}{\pi a^2 L} = \omega^2 B^2 \frac{a^2}{8 \rho}, = \frac{\pi^2 f^2 B_M^2 a^2}{4 \rho}.$$

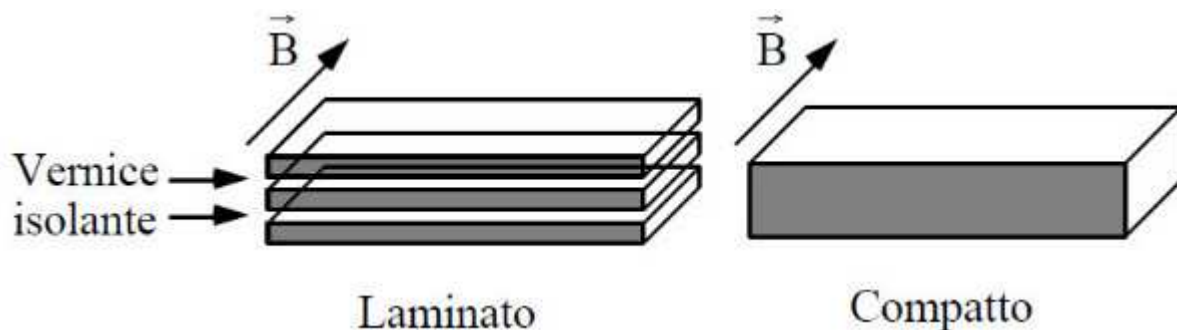
dove il pedice "CP" sta per correnti parassite. Questa formula mette chiaramente in risalto che la potenza per unità di volume assorbita in un conduttore per correnti parassite, dipende dal quadrato sia della frequenza, che del valore efficace del campo. Formule diverse si possono ricavare per conduttori di forma diversa, ma la precedente espressione fornisce un'indicazione del modo in cui influiscono sulle perdite alcuni parametri:

$$P_{CP} = k_{CP} B_M^2 f^2.$$

La costante k_{CP} , seppur ricavata nel caso particolare di conduttore cilindrico, è data dalla seguente relazione:

$$k_{CP} = \frac{\pi^2 a^2}{4 \rho} = \frac{\pi S}{4 \rho},$$

e si può notare che dipende ovviamente, dal tipo di materiale e dalla geometria che si considera. Si noti come, mantenendo fissi tutti gli altri parametri, questa costante dipende dalla superficie della sezione trasversale del conduttore. Ne deriva l'opportunità, quando è possibile, di sostituire a un unico conduttore, un insieme di conduttori isolati tra loro per mezzo di una vernice isolante oppure semplicemente dell'ossido che tra essi si forma, aventi sezione globale equivalente ma con sezione individuale ridotta; è molto diffuso l'uso di laminati, anziché di materiali massicci; ovviamente la laminazione va effettuata in senso parallelo alla direzione di magnetizzazione. Se considero un materiale ferromagnetico composto da lamierini sovrapposti, come quello della figura seguente :



si ha che lo spessore tipico dei lamierini dipende dalle applicazioni cui sono destinati, ma è comunque di pochi millimetri.

Perdite per isteresi. Si consideri il caso comune in tutte le macchine elettriche, di un circuito magnetico, costituito da materiale ferromagnetico, sede di flusso variabile sinusoidalmente nel tempo. Il materiale non solo è dotato di una certa conduttività, che determina come abbiamo appena visto, la presenza di correnti parassite e dunque di una potenza perduta non trascurabile, ma è anche sede di potenza perduta per isteresi. Uno studio sperimentale, condotto su diversi tipi di materiali ferromagnetici, mostra che le perdite di potenza attiva per unità di volume P_I , dovute all'isteresi di un materiale sottoposto a magnetizzazione ciclica alternativa, sono proporzionali all'area del ciclo di isteresi e possono essere espresse per mezzo della relazione:

$$P_I = k_I f B_M^\alpha,$$

dove k_I , rappresenta un coefficiente che dipende dal materiale, f è la frequenza, B_M è il valore massimo di induzione magnetica, ed α detto **coefficiente di Steinmetz**, è un numero reale compreso tra 1.6 e 2, che dipende dal valore massimo dell'induzione magnetica e che va determinato sperimentalmente. Approssimativamente, si può dire che l'esponente di Steinmetz assume i seguenti valori :

$$\alpha = \begin{cases} 1.6, & \text{per } B_M < 1 \text{ T}; \\ 2, & \text{per } B_M \geq 1 \text{ T}. \end{cases}$$

Sommando le perdite per correnti parassite e per isteresi, si ottiene la perdita complessiva nel ferro che, riferita all'unità di volume vale:

$$P_{Fe} = P_{CP} + P_I = k_{CP} B_M^2 f^2 + k_I f B_M^\alpha.$$

Questa formula risulta tuttavia di non facile applicazione, data la difficoltà di calcolo di tutti i parametri presenti, e per caratterizzare il comportamento di un determinato materiale riguardo alle perdite, viene spesso utilizzata anche la cosiddetta "cifra di perdita", che rappresenta la potenza perduta in un chilogrammo di materiale ferromagnetico, quando esso è sottoposto ad un campo di induzione sinusoidale con frequenza di 50 Hz e valore massimo prestabilito di induzione magnetica (che può essere di 1 T oppure di 1.5 T) a seconda dei casi. La cifra di perdita, espressa in watt al chilogrammo, è quindi il parametro più significativo per rappresentare in modo sintetico la bontà del materiale sotto l'aspetto delle perdite; tecnicamente esso è l'unico parametro fornito dai produttori di materiali magnetici, essendo di scarsa utilità pratica la conoscenza dei vari coefficienti che compaiono nelle diverse formule, tra l'altro approssimate, utili essenzialmente per la comprensione dei fenomeni. Informazioni più complete, ma non molto diffuse, sono i vari diagrammi sperimentali sull'andamento delle perdite al variare dei parametri più importanti.

Per avere un'idea dell'ordine di grandezza della cifra di perdita, si ricordi che i lamierini di ferro al silicio di spessore (0.35 ÷ 0.5) mm, con tenore di silicio (0.1 ÷ 5)%, hanno cifre di perdita che vanno da circa 0.8 W/kg, per basso spessore ed alto tenore di silicio, a circa 3 W/kg, per elevato spessore e basso tenore di silicio. Attualmente i materiali più usati per le costruzioni elettromeccaniche hanno cifre di perdita intorno di 1 W/kg. La cifra di perdita viene generalmente riferita a lamiere nuove e nella valutazione delle perdite nel ferro, si deve tener conto di un aumento di circa il 10% per l'invecchiamento del materiale e per le lavorazioni meccaniche a cui i lamierini vengono sottoposti durante le diverse fasi di costituzione dei nuclei magnetici. Riassumendo, i due tipi di perdite esaminate vengono normalmente indicate come perdite nel ferro e costituiscono un inconveniente non soltanto per l'abbassamento del rendimento globale della macchina, ma anche e soprattutto, per gli effetti termici connessi con lo sviluppo di calore conseguente. La loro presenza richiede pertanto, una serie di provvedimenti, che si possono riassumere nella laminazione e nell'uso di leghe speciali, che hanno lo scopo di mantenerle entro limiti economicamente accettabili.

Perdite negli isolamenti.

Anche negli isolamenti delle macchine elettriche vi sono delle perdite di potenza attiva, dette perdite dielettriche. Esse sono dovute al fenomeno dell'isteresi dielettrica che si ha nel funzionamento in corrente alternata, (variando con continuità la polarità della tensione agente su uno strato isolante), e si verifica, in modo analogo a quanto avviene in un condensatore reale, l'inversione ciclica del verso della polarizzazione delle molecole dell'isolante, con un conseguente movimento di cariche elettriche che genera una dissipazione di energia elettrica all'interno dell'isolante. La perdita specifica, per unità di massa, è data dalla seguente relazione:

$$P_{DI} = \frac{\omega \varepsilon}{d} E^2 \tan \delta ,$$

dove (ω) è la pulsazione della tensione applicata, (ε) è la costante dielettrica del materiale, (d)

rappresenta la sua densità, (E) è l'intensità del campo elettrico agente sullo spessore di isolante considerato e $(\tan \delta)$ è il cosiddetto fattore di dissipazione del materiale. Queste perdite dielettriche sono dell'ordine di pochi milliwatt per chilogrammo, assai più piccole quindi delle perdite specifiche nel ferro, e possono essere sempre trascurate nel computo della potenza totale perduta da una macchina elettrica. Invece queste perdite dielettriche vanno tenute in debito conto, nel dimensionamento degli isolamenti al fine di evitare che i riscaldamenti localizzati pregiudichino l'integrità dell'isolamento della macchina.

Perdite meccaniche.

La stima delle perdite meccaniche è assai difficile da fare analiticamente, a causa della diversa natura delle stesse, e viene, di solito, ricavata in maniera sperimentale. Comunque, per le macchine rotanti, come i motori asincroni oppure i generatori sincroni, è necessario considerare le perdite meccaniche, attribuibili ai seguenti motivi:

- *perdite per attrito nei cuscinetti di supporto nell'albero motore*, dipendenti dal peso della parte rotante e proporzionali alla velocità di rotazione;
- *perdite per ventilazione*, dovute essenzialmente all'attrito tra le parti in rotazione e l'aria circostante, le quali rappresentano il grosso delle perdite meccaniche e sono proporzionali al cubo della velocità di rotazione;
- *perdite per attrito tra spazzole e collettore*, si verificano nelle macchine, come quelle in corrente continua, in cui, per stabilire il contatto tra due circuiti elettrici, vengono appoggiate delle spazzole conduttrici fisse su un particolare organo rotante, detto collettore, e sono proporzionali alla superficie delle spazzole, alla pressione sulla superficie di appoggio e alla velocità del collettore.

Perdite addizionali.

Le perdite addizionali sono tutte quelle perdite che si verificano nel funzionamento di una macchina in aggiunta a quelle principali, cioè a quelle ohmiche, nel ferro e meccaniche. Sono di difficile valutazione analitica e vengono determinate sperimentalmente, come differenza tra la potenza totale perduta e la somma delle perdite principali. La maggior parte delle perdite addizionali è dovuta all'azione dei flussi magnetici variabili nel tempo su parti metalliche conduttrici, come le parti strutturali delle macchine, gli alberi meccanici, e così via. Questi flussi determinano delle correnti parassite e se la parte interessata ha anche un comportamento magnetico, anche dei cicli di isteresi, con conseguente perdita di potenza attiva.

.

Capitolo 2

Il motore asincrono trifase

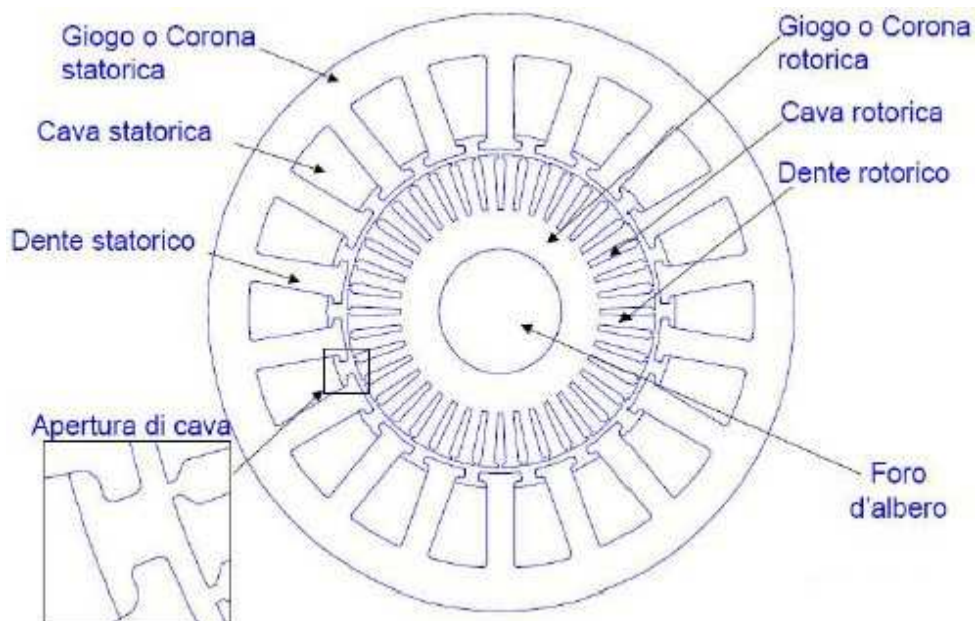
2.1 La macchina asincrona

Le macchine asincrone, o ad induzione, sono normalmente utilizzate come motori. L'impiego come generatori è da considerare eccezionale o temporaneo come avviene per i motori di trazione elettrica (locomotori) nel caso di marcia in discesa (frenatura a recupero). Tali macchine vengono costruite per potenze che vanno da poche centinaia di Watt ad alcuni Mega Watt nella versione trifase e da qualche Watt a qualche kilo Watt nella versione monofase. Una buona fetta del mercato dei motori elettrici oggi è rappresentata dal motore asincrono trifase, un tipo di motore molto semplice, economico, robusto, con inerzia e costi contenuti, con esigenze di manutenzione molto ridotte, e con limitazioni ambientali praticamente nulle e possibilità di funzionare ad alte velocità. 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. I motori asincroni trifase possono essere considerati tra le macchine elettriche più affidabili; svolgono la loro funzione per molti anni con interventi di manutenzione assai ridotti e si adattano a prestazioni diverse in base alle esigenze, coprendo sia applicazioni di produzione che di servizio. I motori trovano come detto, impiego nei settori industriali più svariati, come esempio possiamo citare le industrie alimentari, chimiche, metallurgiche, le cartiere o impianti di trattamenti acqua o di tipo estrattivo. Le applicazioni riguardano quelle macchine con organi in movimento a velocità fissa o variabile quali ad esempio i sistemi di sollevamento (come ascensori o montacarichi), di trasporto (come nastri trasportatori), i sistemi di ventilazione e climatizzazione (unità trattamento aria), senza dimenticare forse il più comune impiego, come pompe e compressori. Il motore asincrono trifase è considerato come la macchina elettrica più diffusa in ambiente

industriale e quando questi motori sono collegati direttamente alla rete, hanno il "difetto" di girare a velocità praticamente costante; sapendo che il consumo di energia dei motori elettrici è circa il 75% del totale consumo del settore industriale, a fronte di questo dato si capisce come possa essere importante per l'economia aziendale e per il miglioramento dell'efficienza energetica in senso lato, attuare una riduzione dei consumi elettrici, ricorrendo all'utilizzo di azionamenti a velocità variabili, attraverso inverter, realizzando un rifasamento per avere un $\cos\phi$ idoneo per evitare di incorrere in penali, oppure ricorrendo all'uso di motori elettrici ad alta efficienza, identificati con la sigla **EFF1**, aventi caratteristiche costruttive e materiali particolarmente evoluti, che permettono di ridurre i consumi di energia elettrica fino al 20% ; ma questi aspetti di riduzione dei consumi elettrici con questi tipi di sistemi appena citati, verranno approfonditi nei capitoli successivi della seguente tesi.

2.2 Struttura elettromagnetica del motore asincrono trifase

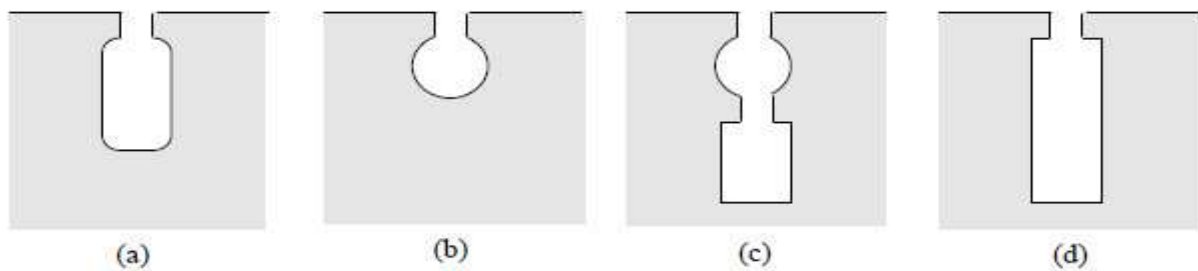
I motori asincroni sono costituiti da una parte fissa (statore), all'interno del quale è situata una parte libera di ruotare su cuscinetti (rotore). Lo statore ed il rotore sono due cilindrici cavi coassiali separati da un traferro di piccolo spessore, che presentano delle cave uniformemente distribuite sulle superfici affacciate al traferro:



Entrambi sono costituiti da lamierini ferromagnetici con percentuale di silicio minori dell'1%, caratterizzati da basse perdite per isteresi ed elevata permeabilità, ed isolati fra di loro.

2.2.1 Statore

Lo statore è formato dalla carcassa (di ghisa per basse potenze, di lamiera saldata per potenze maggiori) e dal pacco statorico nelle cui cave è alloggiato l'avvolgimento destinato alla generazione del campo rotante. Il pacco statorico è formato dalla sovrapposizione di lamiere di piccolo spessore fra loro isolate con vernici, allo scopo di ridurre la potenza perduta per correnti parassite. Nelle grosse macchine, come negli alternatori, il pacco statorico viene suddiviso in più pacchi elementari per formare i canali di ventilazione, al fine di rendere più efficiente il raffreddamento delle macchine. Le cave statoriche sono solitamente del tipo semichiuso:



*Figura 2.1 - Forme più comuni di cave di rotore per macchine asincrone:
 (a) cava semichiusa per rotore avvolto, (b) cava per rotore a gabbia semplice,
 (c) cava per rotore a doppia gabbia, (d) cava per rotore a barre alte.*

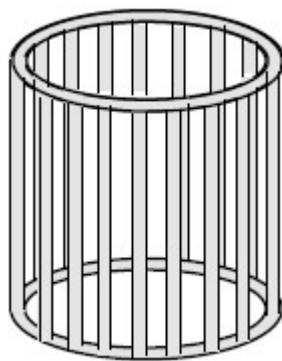
il che permette di ridurre sia il flusso disperso, sia le perturbazioni del campo al traferro. La carcassa porta una base isolante con i morsetti ai quali vengono collegati i terminali delle fasi costituenti l'avvolgimento.

2.2.2 Rotore

Il rotore è costituito essenzialmente dall'albero e dal pacco rotorico. Nei motori di potenza minore il pacco di lamiere viene montato direttamente sull'albero. Nei motori di maggiore potenza il pacco

lamellare rotorico, costituito da corone circolari, viene sistemato su una superficie cilindrica collegata da nervature all'albero. Le cave, uniformemente distribuite sulla periferia del pacco rotorico sono di tipo chiuso o semichiuso. Il numero delle cave rotoriche è diverso (in generale maggiore) del numero delle cave statoriche, ciò per evitare pulsazioni periodiche del flusso da cui derivano vibrazioni e rumore durante la marcia. In particolare, al fine di agevolare l'avviamento del motore e renderlo più silenzioso in marcia, il pacco rotorico ha talvolta le cave inclinate rispetto all'asse; questo artificio richiama i vantaggi che si ottengono in meccanica, sostituendo un ingranaggio a denti dritti con un ingranaggio a denti elicoidali. Per quanto riguarda l'avvolgimento distinguiamo i motori con rotore a gabbia e i motori con rotore avvolto.

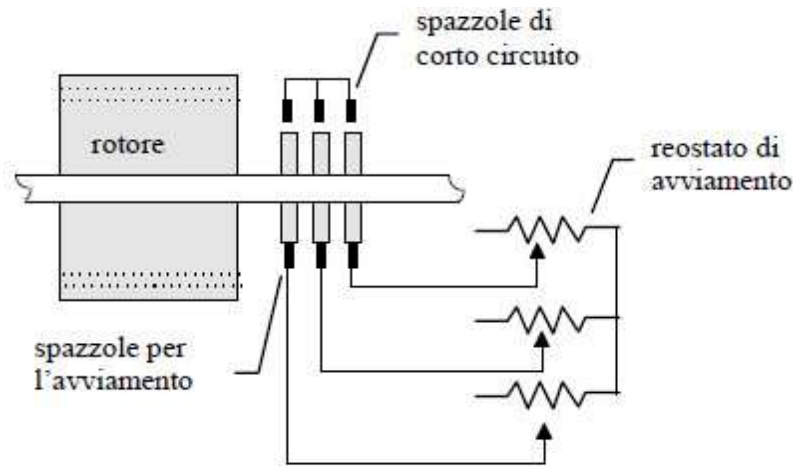
- **Rotore a gabbia semplice.** Nelle cave rotoriche sono alloggiati delle sbarre di rame che vengono saldate a due anelli frontali pure loro di rame, in modo da formare una gabbia, chiamata gabbia di scoiattolo; Così collegate le sbarre formano tra loro circuiti chiusi che sono percorsi dalle correnti indotte dal campo rotante. Si può dimostrare che il numero dei poli magnetici determinati dalle correnti indotte nella gabbia è lo stesso di quello del campo rotante. L'impiego del rotore a gabbia semplice avviene soprattutto per le basse potenze.



- **Rotore a doppia gabbia.** Questo tipo di rotore è molto diffuso per le potenze medie, perché è quello che presenta la maggiore elasticità nelle caratteristiche di avviamento. In questo caso il rotore è provvisto di due gabbie concentriche aventi caratteristiche opposte. La gabbia esterna (o di avviamento), è costituita di barre di piccola sezione aventi una elevata

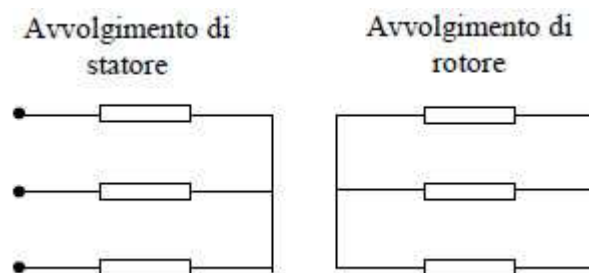
resistenza ed una piccola reattanza di dispersione. La gabbia interna (o di lavoro), è costituita di barre di grande sezione aventi una piccola resistenza ed una elevata reattanza di dispersione. All'avviamento la corrente circola prevalentemente nella gabbia esterna. Mano a mano che la macchina accelera e diminuisce la frequenza delle correnti di rotore, diminuisce la reattanza di dispersione e la corrente si sposta progressivamente sulla gabbia interna.

- **Rotore a barre alte.** Il rotore di questo motore è provvisto di barre di forma allungata, sistemate in cave alte e strette in cui si determina, all'avviamento, uno spostamento di corrente, dall'esterno verso l'interno, in modo simile a quello che si verifica nel rotore a doppia gabbia. Costruttivamente semplice, questa macchina è utilizzata soprattutto per le alte potenze.
- **Rotore avvolto.** Nei motori asincroni con rotore avvolto (prevalentemente utilizzati nelle macchine di media e di grande potenza), nelle cave di rotore è alloggiato un avvolgimento avente lo stesso passo polare dell'avvolgimento di statore. Il numero delle fasi dell'avvolgimento di rotore può in generale essere anche diverso da quello dell'avvolgimento di statore. L'avvolgimento di rotore è collegato a stella con i terminali facenti capo a tre anelli conduttori, isolati sia tra loro che dall'albero sul quale sono calettati. Sugli anelli poggiano delle spazzole mediante le quali le fasi dell'avvolgimento rotorico vengono collegate a tre resistenze esterne, variabili, solitamente collegate a stella. Il complesso delle tre resistenze variabili forma il **reostato di avviamento**, il cui scopo principale è quello di limitare le correnti assorbite dal motore durante l'avviamento ed aumentare la coppia di spunto. La manovra di avviamento si esegue con tutte le resistenze inserite. Man mano che il motore accelera le resistenze vengono gradualmente escluse e durante il funzionamento a regime, i tre anelli vengono cortocircuitati come si vede nella figura di pagina seguente.



2.3 Principio di funzionamento della macchina asincrona trifase

Le macchine asincrone, utilizzate come motore, costituiscono il tipo più diffuso di macchine elettriche a corrente alternata, in quanto presentano una grande semplicità di costruzione a cui corrisponde una notevole robustezza ed una ridotta manutenzione; esse inoltre non richiedono complicate manovre di avviamento e sopportano anche notevoli sovraccarichi. Il traferro delle macchine asincrone ha spessore costante e nelle cave di rotore e statore sono alloggiati due avvolgimenti trifase aventi lo stesso passo polare. L'avvolgimento di statore può essere collegato a stella oppure a triangolo, mentre l'avvolgimento di rotore viene chiuso in corto circuito:



Una volta alimentato con una terna di tensioni concatenate simmetriche aventi una pulsazione ω , l'avvolgimento di statore viene percorso da una terna equilibrata di correnti. Le correnti di statore generano al traferro della macchina un campo, la cui prima armonica ruota con una velocità

angolare ω_c , data dalla seguente espressione:

$$\omega_c = \frac{\omega}{p}$$

dove p è il numero di coppie polari dell'avvolgimento. Il campo di statore (campo induttore) si richiude nel rotore e quindi si concatena con l'avvolgimento di rotore che è in rotazione, nel verso concorde con quello di rotazione del campo induttore, con una velocità angolare ω_m . Se la velocità di rotazione del rotore è diversa da quella del campo, un osservatore solidale con ciascuna fase dell'avvolgimento di rotore, vede un campo rotante avente una velocità angolare ($\omega'_c = \omega_c - \omega_m$), ed è quindi soggetta ad una f.e.m. indotta avente una pulsazione $\omega' = p \omega'_c$, dato che il rotore ha lo stesso numero di coppie polari dello statore. Il sistema di f.e.m. indotte nelle fasi dell'avvolgimento di rotore, essendo queste ultime chiuse in cortocircuito, fa sì che un sistema equilibrato di correnti, aventi pulsazione ω' circoli nell'avvolgimento stesso. Tali correnti, interagendo con il campo induttore, danno origine ad una coppia elettromagnetica che si oppone alla causa che l'ha generata; la coppia elettromagnetica tende quindi a fare sì che il rotore ruoti alla velocità del campo induttore, in modo da annullare la f.e.m. indotta e quindi le correnti di rotore. Ciò significa che se il rotore ruota ad una velocità inferiore a quella del campo induttore, la coppia elettromagnetica è diretta nel verso del moto e la macchina asincrona funziona come un motore; viceversa, se la velocità del rotore è superiore alla velocità del campo induttore la coppia elettromagnetica è diretta nel verso opposto al moto e la macchina asincrona funziona come un generatore o come un freno.

Le correnti di rotore producono al traferro un campo (campo indotto) la cui prima armonica è in rotazione con una velocità angolare ω'_c rispetto al rotore. La velocità di rotazione della prima armonica del campo indotto risulta quindi coincidente con la velocità angolare ω_c del campo induttore. Il campo indotto induce nelle fasi di statore un sistema trifase simmetrico di f.e.m. avente la stessa pulsazione del sistema di tensioni di alimentazione. Tali f.e.m. indotte hanno verso discorde o concorde con le tensioni di alimentazione a seconda che la macchina stia funzionando da

motore o freno oppure da generatore. Il nome di macchina asincrona esprime il fatto che la velocità di rotazione del rotore della macchina (ω_m) non coincide con quella di rotazione del campo al traferro (ω_c); lo scorrimento viene definito come il rapporto tra le velocità di rotazione del campo al traferro rispetto al rotore (ω'_c) e allo statore (ω_c):

$$s = \frac{\omega_c - \omega_m}{\omega_c}$$

La pulsazione delle f.e.m. indotte e delle correnti nelle fasi di rotore risulta quindi:

$$\omega' = p \omega'_c = s \omega$$

2.4 Circuito elettrico equivalente

Quando la macchina asincrona funziona con il rotore bloccato, gli avvolgimenti statorici e gli avvolgimenti rotorici possono essere considerati il primario ed il secondario di un trasformatore; i due avvolgimenti infatti sono magneticamente accoppiati, e correnti alternate nello statore inducono correnti alternate di uguale frequenza nel rotore; da questo fatto deriva il nome di macchine ad induzione con cui vengono spesso indicate le macchine asincrone. Le due macchine, macchina asincrona con rotore bloccato e trasformatore, differiscono unicamente per la diversa struttura del circuito magnetico di accoppiamento tra primario e secondario. In entrambi i casi il circuito magnetico è realizzato in modo da ridurre il più possibile la riluttanza dello stesso ed i flussi dispersi, ma nella macchina asincrona questa esigenza deve essere mediata dalla necessità di garantire in ogni caso un traferro di adeguato spessore tra statore e rotore in grado di permettere la rotazione di quest'ultimo. Si riconosce che le equazioni interne della macchina asincrona sono:

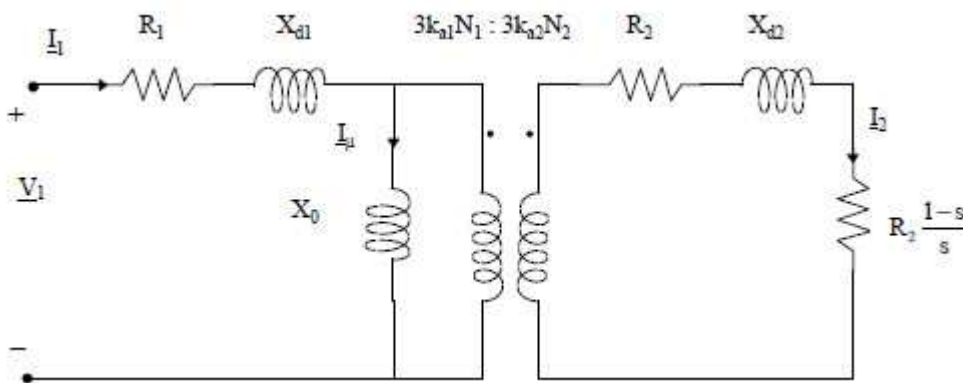
$$\underline{V}_{1e} = (R_1 + jX_{d1})\underline{I}_{1e} + j\omega k_{a1} \frac{N_1}{2} \underline{\Phi}_e$$

$$3 k_{a1} N_1 \underline{I}_{1e} + 3 k_{a2} N_2 \underline{I}_{2e} e^{j\frac{\pi}{\tau} x_1} = 2 p \pi R_t \underline{\Phi}_e$$

e costituiscono le leggi di Kirchhoff del circuito elettrico equivalente per fase della macchina asincrona. La reattanza magnetizzante e la corrente magnetizzante sono date dalle seguenti espressioni:

$$X_0 = \omega \frac{3(k_{a1}N_1)^2}{2R} \quad ; \quad \underline{I}_\mu = \frac{R}{3k_{a1}N_1} \underline{\Phi} \quad \text{dove } R = 2 p \pi R_t$$

Nella trattazione svolta fino ad ora sono state trascurate per semplicità le perdite nel ferro. E' possibile tenere conto di queste ultime, in modo analogo a quanto si fa per i trasformatori, modificando la rete equivalente della macchina asincrona ponendo in parallelo ad X_0 una opportuna resistenza R_0 percorsa da una corrente I_a , denominata componente attiva della corrente a vuoto I_0 .



Si è inoltre considerata una macchina con rotore avvolto. Si può dimostrare che, nel limite delle approssimazioni fatte, una macchina con rotore a gabbia si comporta come una macchina con rotore avvolto. L'unica differenza consiste nel fatto che in una macchina con rotore a gabbia, la corrente rotorica non è direttamente misurabile. Risulta quindi più conveniente riferire tutte le grandezze di rotore a statore, secondo le seguenti trasformazioni:

$$\underline{I}_{12} = \underline{I}_2 \frac{3k_{a2}N_2}{3k_{a1}N_1}$$

corrente della fase di rotore ridotta a statore

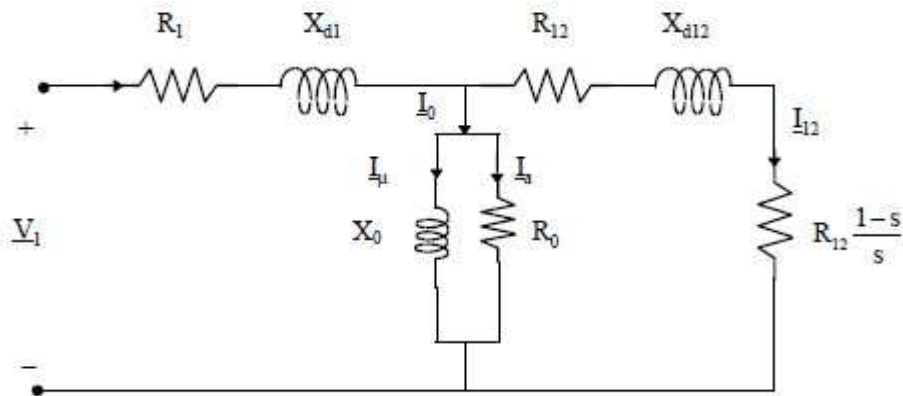
$$R_{12} = R_2 \left(\frac{3k_{a1}N_1}{3k_{a2}N_2} \right)^2$$

resistenza della fase di rotore ridotta a statore

$$X_{d12} = X_{d2} \left(\frac{3k_{a1}N_1}{3k_{a2}N_2} \right)^2$$

reattanza di dispersione della fase di rotore ridotta a statore

e considerare il circuito elettrico equivalente riferito ad una fase di statore:



Il circuito equivalente per fase della macchina asincrona coincide con quello di un trasformatore. Esiste però una differenza significativa relativamente ai valori delle grandezze in gioco. Nel caso del trasformatore la corrente a vuoto è una piccola frazione della corrente nominale primaria; nel caso della macchina asincrona, a causa dell'elevato valore della riluttanza al traferro, la corrente magnetizzante e quindi la corrente a vuoto risultano considerevolmente più elevate. Non è quindi più accettabile, se non in prima approssimazione, semplificare ulteriormente la rete equivalente spostando il parallelo di R_0 ed X_0 a monte della impedenza primaria ed inglobando l'impedenza primaria e secondaria in una unica impedenza equivalente.

2.5 Potenze e rendimento del motore asincrono

Gli schemi circuitali equivalenti, discussi nel paragrafo precedente, riproducono correttamente le grandezze del motore asincrono trifase, ma sarebbero di ben poca utilità se non ci consentissero di interpretare anche altri fenomeni energetici e meccanici, ed in particolare se non ci dessero utili informazioni quantitative nella valutazione della potenza assorbita, dissipata e convertita.

2.5.1 Potenza

Ciascun motore asincrono trifase assorbe dalla linea la potenza apparente:

$$A = P + j Q = 3 V_1 I_1$$

mentre la potenza attiva è data da:

$$P = 3 V_1 I_1 \cos \varphi_1 .$$

Per arrivare alla potenza utile (disponibile cioè sull'asse del motore), occorre sottrarre alla potenza attiva P , tutte le perdite che si verificano sia nello statore che nel rotore. In particolare, si hanno:

- *le perdite P_{Fe} nel ferro*, considerate relativamente al solo statore, che nel circuito equivalente sono rappresentate dalla potenza attiva assorbita da R_0 , valutate in base al modello semplificato a flusso bloccato:

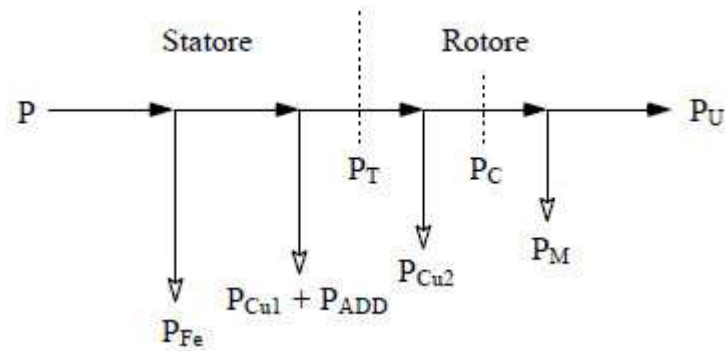
$$P_{Fe} = 3 \frac{V_1^2}{R_0} ,$$

- *le perdite per effetto Joule negli avvolgimenti di statore*, pari a:

$$P_{Cu1} = 3 R_1 I_1^2 ;$$

- *le perdite addizionali*, imputate anche allo statore, anche se distribuite su tutta la macchina, sono perdite non facilmente calcolabili e che tengono conto della non uniforme distribuzione della corrente nei conduttori d'indotto e delle perdite per correnti parassite nelle parti metalliche vicine agli avvolgimenti; vengono convenzionalmente poste pari allo 0.5% della potenza utile del motore. La differenza fra la potenza assorbita e le perdite nello statore dà la potenza che viene trasmessa dal campo rotante al rotore. Infatti, con riferimento alla figura di pagina seguente, (che rappresenta il flusso di potenza di un motore asincrono), questa potenza che viene trasmessa dal campo rotante al rotore, è la potenza entrante nel primario del trasformatore ideale, e quindi uguale a quella uscente dal suo secondario; per questo motivo è chiamata potenza trasmessa, o potenza al traferro, perché è il traferro la zona di

confine tra statore e rotore attraverso cui passa questa potenza sotto forma elettromagnetica:



Essa viene tutta dissipata a valle del trasformatore ideale, cioè nell'unico elemento dissipativo di resistenza R_2/s :

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

Questa potenza può essere scomposta in due parti:

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

dove il primo termine, rappresenta la potenza persa per effetto Joule negli avvolgimenti rotorici e nelle eventuali resistenze esterne collegate al rotore:

$$P_{Cu2} = 3 R_2 I_2^2 .$$

Per il principio di conservazione dell'energia, la parte di potenza P_T , trasferita al rotore e che non viene dissipata per effetto Joule, rappresenta la potenza convertita in meccanica utilizzabile, a meno degli attriti e della ventilazione, sull'albero del motore:

$$P_C = 3 R_2 \frac{1-s}{s} I_2^2 .$$

Per questo motivo abbiamo separato l'ultima resistenza a destra nel tracciare i vari circuiti

equivalenti; tale resistenza equivale al carico meccanico e la potenza elettrica (attiva) in essa dissipata coincide con la potenza convertita in meccanica. Dal confronto tra le precedenti relazioni risulta immediatamente che:

$$P_{Cu2} = s P_T,$$

espressione che consente di definire lo scorrimento in maniera diversa da quella in precedenza data. Il resistore R_2 , rappresenta la resistenza di una fase rotorica per un motore a rotore avvolto, mentre, per un motore a gabbia, R_2 , rappresenta la resistenza equivalente di una fase. Come ho già accennato prima, la vera potenza attiva utile o potenza resa all'albero, è pari a:

$$P_U = P_C - P_M,$$

dove P_M rappresenta la piccola parte di perdite meccaniche dovute agli attriti ed alla ventilazione. Alcune interessanti osservazioni si possono ricavare dalla relazione:

$$P_C = 3 R_2 \frac{1-s}{s} I_{2s}^2 = (1-s) P_T,$$

secondo cui la potenza convertita in meccanica, a parità di P_T , è tanto maggiore quanto minore è lo scorrimento, da cui discende la necessità che i motori asincroni trifase funzionino a velocità molto prossime a quelle di sincronismo. Inoltre, risulta che:

1. $P_C = 0$, per $s = 1$, cioè a rotore fermo, e per $s = 0$ in quanto $I_{2s} = 0$ perché la velocità è quella di sincronismo;
2. $P_C > 0$, per $0 < s < 1$, cioè per velocità comprese tra quella di sincronismo e quella nulla (rotore bloccato); il segno positivo di P_C indica che la potenza elettrica

assorbita dalla linea si è trasformata in meccanica e quindi, la macchina funziona da motore;

3. $PC < 0$, per $s < 0$ ($n_2 > n_0$) e $s > 1$ ($n_2 < 0$), la macchina funziona da generatore e da freno.

2.5.2 Rendimento

Il rendimento è, come al solito, il rapporto tra la potenza resa e quella assorbita:

$$\eta = \frac{P_U}{P} = \frac{P_U}{P_U + P_P} = \frac{P - P_P}{P} = 1 - \frac{P_P}{P},$$

in cui P_p è la somma di tutte le potenze perdute e vale:

$$P_P = P_M + P_{Cu1} + P_{Fe} + P_{Cu2} + P_{ADD}.$$

Pertanto, il rendimento si può scrivere come:

$$\eta = \frac{P_U}{P_U + P_M + P_{Cu1} + P_{Fe} + P_{Cu2} + P_{ADD}}$$

ed aumenta all'aumentare della potenza e diminuisce all'aumentare del numero di poli; in condizioni normali varia da 0.67 a 0.97 da piccoli a grandi motori.

2.6 Confronto fra motore asincrono e motore in corrente continua

Per le esigenze di attuazione della regolazione di velocità nell'automazione industriale, il motore asincrono ha ormai quasi del tutto sostituito il motore a corrente continua, per una serie di vantaggi

che sono i seguenti:

- Le alte velocità sono limitate solo da problemi meccanici (cuscinetti, forze centrifughe);
- Assenza di scintillio dovuto a spazzole e collettore;
- Manutenzione molto limitata;
- Assenza dei fenomeni legati alla commutazione che limitano i valori massimi di corrente assorbita e di coppia;
- Il rotore a gabbia consente stabilità di equilibratura ed elevata affidabilità; inoltre le dimensioni ridotte comportano minori problemi di installazione;
- In caso di rottura dell'inverter il motore può essere alimentato direttamente dalla rete per manovre di emergenza;
- I disturbi in rete e quelli irradiati sono molto ridotti in particolare con gli inverter operanti in tecnica PWM;
- L'avvolgimento a diretto contatto (opportunosamente isolato) con la struttura esterna, consente anche nei motori stagni, una buona dissipazione del calore;
- La costruzione è meno costosa, più robusta sia meccanicamente che elettricamente;
- Il rendimento è più elevato con conseguente risparmio energetico.

Per contro i motori in corrente continua, soprattutto in certe esecuzioni speciali, presentano alcuni vantaggi:

- Gamme estese di velocità e grande precisione nella regolazione specie a basse velocità;

- Funzionamento a potenza costante in un campo esteso e azionamenti a quattro quadranti con dinamiche molto elevate, specie con impiego di motori a magneti permanenti;
- Coppie di spunto elevate, anche fino a sei volte il valore nominale.

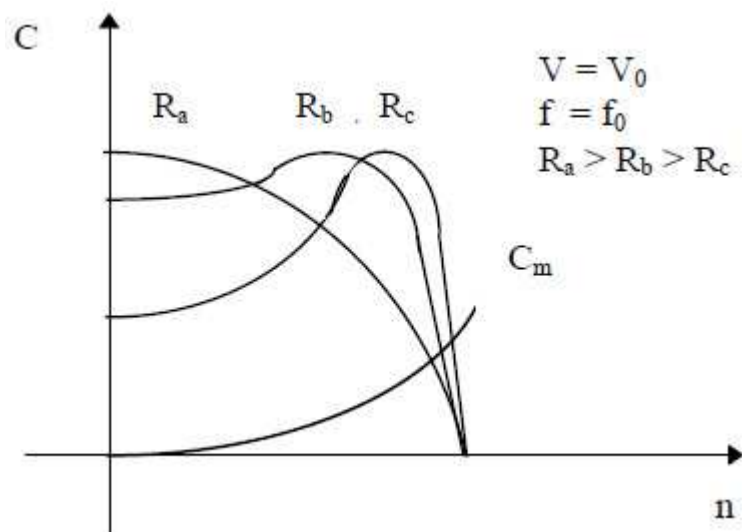
Capitolo 3

Regolazione della velocità di un M.A.T

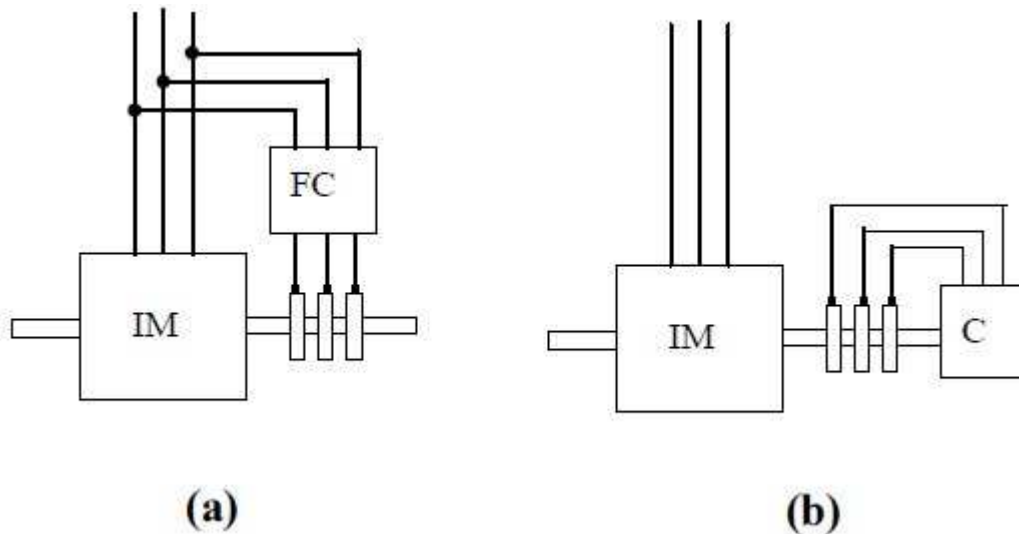
3.1 Metodi di regolazione della velocità

Il motore asincrono parte autonomamente e raggiunge la velocità di regime quando la coppia motrice elettromagnetica uguaglia la coppia resistente meccanica. Per variare la velocità di regime è quindi necessario variare la caratteristica meccanica del motore. E' possibile ottenere la regolazione della velocità del motore agendo sulle caratteristiche del circuito rotorico, sulle caratteristiche del circuito statorico, sul valore efficace della tensione di alimentazione e sulla frequenza della tensione di alimentazione.

- **Variazione della resistenza rotorica.** Se il rotore è avvolto, è possibile variare, tramite il reostato di avviamento, la resistenza di ciascuna fase dell'avvolgimento rotorico. La conseguente variazione della caratteristica meccanica avviene a coppia massima costante; la velocità varia in un campo molto piccolo, ed il rendimento del motore viene penalizzato dalle perdite per effetto Joule sulle resistenze rotoriche;



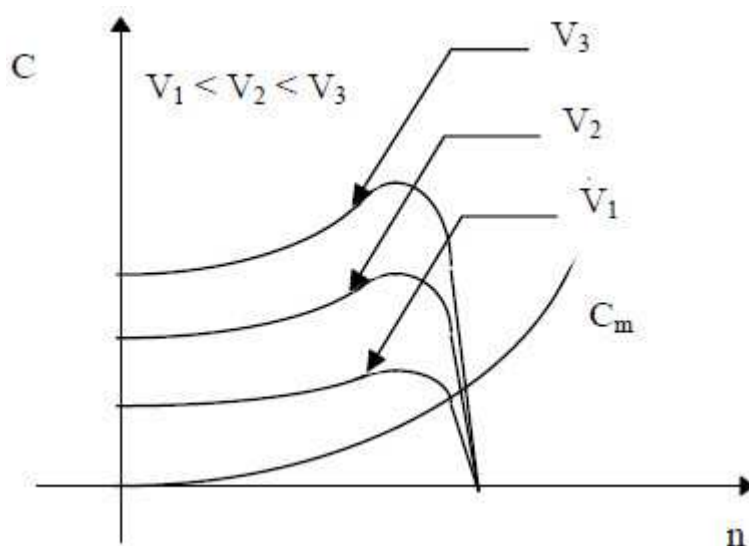
- **Iniezione di f.e.m. nei circuiti di rotore.** E' possibile modificare la caratteristica meccanica del motore asincrono con rotore avvolto, inserendo in ciascuna fase di rotore una f.e.m. alla frequenza di rotore, regolabile in valore efficace e fase. Numerosi schemi sono stati proposti per la realizzazione di tale dispositivo. Grossolanamente, tali schemi possono essere suddivisi in due tipi:



dove IM rappresenta il motore di cui si vuole regolare la velocità. Nello **schema (a)**, i circuiti di rotore del motore IM sono collegati ad un dispositivo ausiliario di conversione di frequenza che viene realizzato mediante componenti elettronici; questo dispositivo è rappresentato dal blocco FC, nel quale la potenza elettrica a frequenza di scorrimento generata nel rotore del motore principale è convertita in potenza elettrica a frequenza di statore e restituita alla linea. Nello **schema (b)**, i circuiti di rotore del motore IM sono collegati ad una apparecchiatura ausiliaria; questa è rappresentata dal blocco C che può essere costituito da un sistema discretamente complicato di macchine rotanti, nella quale la potenza elettrica a frequenza di scorrimento è convertita in potenza meccanica ed aggiunta alla potenza sull'albero sviluppata dal motore principale. In entrambi gli schemi, la velocità ed il fattore di potenza del motore principale possono essere regolati controllando l'ampiezza e la fase delle f.e.m. a frequenza di scorrimento del dispositivo ausiliario. Tale

dispositivo ausiliario risulta in generale piuttosto piccolo rispetto al motore principale, perché deve essere dimensionato solo per la frazione di potenza elettrica assorbita dallo statore e ceduta al rotore. Tra i sistemi più impiegati vi sono il Sistema Leblanc, il Motore Schrage ed il Sistema Kramer Modificato.

- **Variazione della tensione di alimentazione.** Aumentando o diminuendo il valore efficace della tensione di alimentazione si ottiene una regolazione della velocità come mostrato nella figura seguente:

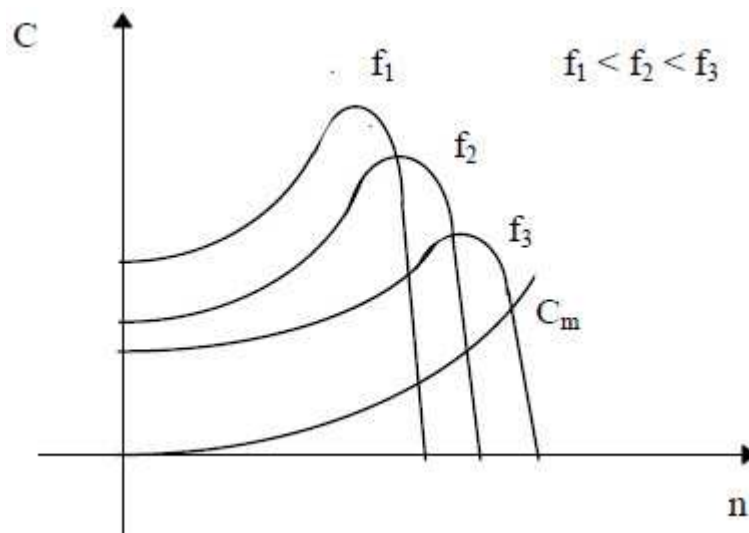


La variazione del valore efficace della tensione di alimentazione può essere ottenuta alimentando lo statore con un autotrasformatore con rapporto di trasformazione variabile oppure mediante un opportuno dispositivo elettronico. La variazione di velocità che si ottiene è in ogni caso molto contenuta ed ottenuta a scapito della coppia massima.

- **Variazione del numero di coppie polari.** Nelle macchine con rotore a gabbia, è possibile, tramite opportuni commutatori, variare il numero di coppie polari dell'avvolgimento statorico (e conseguentemente dell'avvolgimento rotorico, in quanto il rotore a gabbia assume spontaneamente un passo polare pari a quello del campo induttore). Generalmente si utilizzano motori con l'avvolgimento statorico eseguito in modo da realizzare, a seconda dei

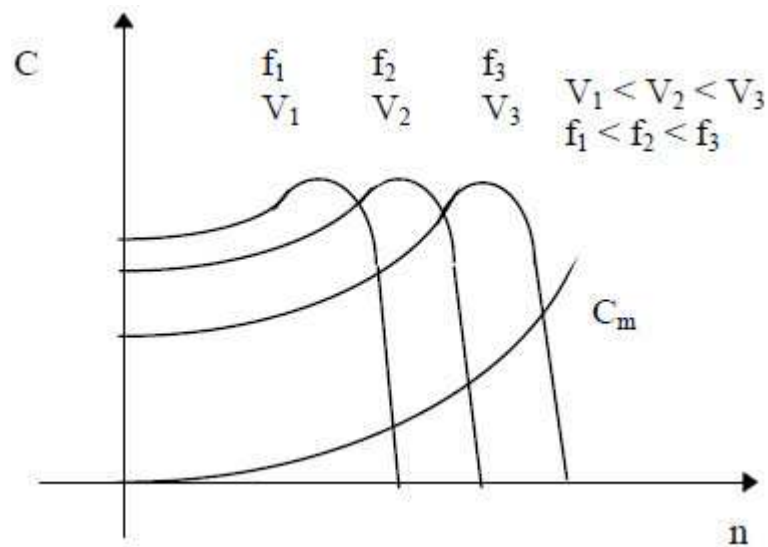
collegamenti sulla morsettiera, 2 oppure 4 coppie polari. Questo schema permette di ottenere un motore asincrono a due velocità. Avvolgimenti più complessi permettono di ottenere motori asincroni anche a tre o quattro regimi di velocità.

- **Variazione della frequenza di alimentazione.** E' possibile, pur disponendo di una rete trifase a frequenza e tensione costante, alimentare gli avvolgimenti statorici con un sistema di tensioni concatenate aventi frequenza e valore efficace variabili. Ciò viene ottenuto inserendo tra la rete a frequenza e tensione costante e lo statore del motore asincrono, un opportuno dispositivo elettronico, costituito ad esempio da un raddrizzatore ad onda intera, realizzato mediante diodi, che trasforma la tensione alternata in tensione continua, e da un inverter in serie al raddrizzatore. Quest'ultimo è realizzato mediante transistori di potenza e la frequenza ed il valore efficace delle tensioni concatenate in uscita è facilmente variabile agendo sul circuito di controllo dell'angolo di innesco dei transistori. La figura seguente mostra la regolazione della velocità, ottenibile con una variazione della frequenza, mantenendo inalterato il valore efficace della tensione di alimentazione:



Si può notare che così facendo è possibile ottenere ampie variazioni della velocità, a scapito però della coppia massima. A tale inconveniente si può ovviare, variando contemporaneamente anche il valore efficace della tensione di alimentazione, in modo da

mantenere costante il flusso per polo; Si ottiene così la regolazione della velocità desiderata mantenendo inalterata la coppia massima.

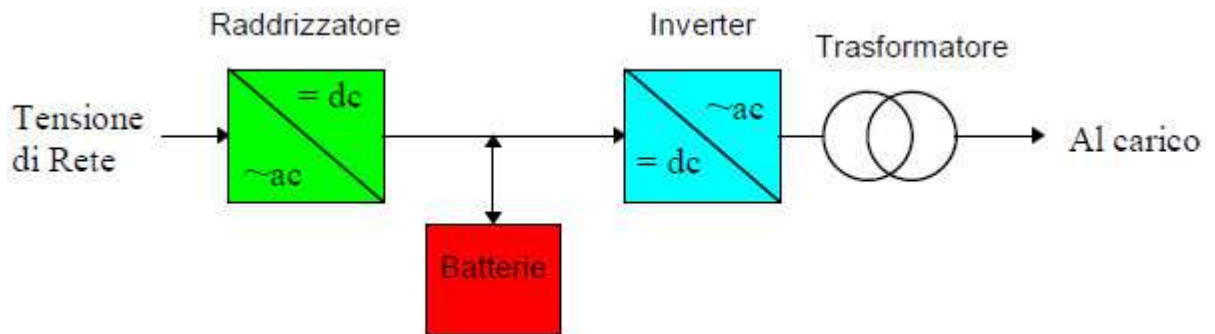


3.2 Inverter

È un dispositivo elettronico atto a trasformare una corrente continua in corrente alternata di forma sinusoidale o pseudo sinusoidale. L'inverter varia la frequenza e la tensione di alimentazione di un motore elettrico, adeguandone la velocità alle effettive esigenze del dispositivo a cui è collegato. 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*. L'inverter 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; talvolta viene anche detto convertitore statico di frequenza. In linea di massima si individuano inverter a frequenza costante e inverter a frequenza variabile.

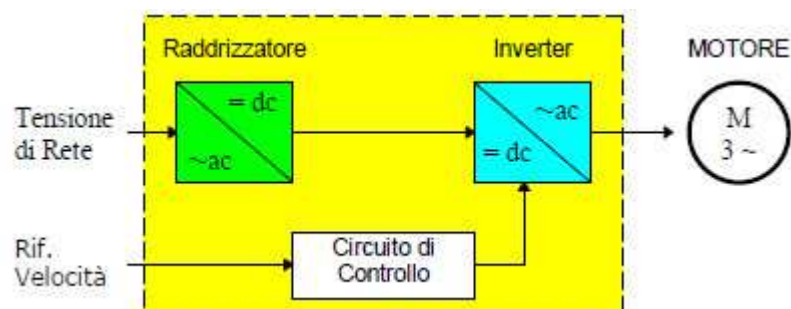
- **Inverter a frequenza costante.** L'inverter a frequenza costante più diffuso è quello che si trova dentro ai gruppi di continuità (UPS), i dispositivi usati per alimentare i computer in caso di black-out. Nel gruppo di continuità la tensione di rete viene raddrizzata in corrente

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.



Questo tipo di apparecchio spazia da potenze minime (dai 200-300 Watt del PC della nostra scrivania, fino ad arrivare a 20-30 kW 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.

- **Inverter a frequenza variabile.** L'inverter a frequenza variabile serve per regolare la velocità dei motori trifasi, e 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. 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 500 Watt fino a oltre 500 kWatt 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. 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 ($\text{Cos } \varphi \approx 0.95$). 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. 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).

3.2.1 Generalità e scelta del inverter

Supponiamo di considerare un motore asincrono trifase a gabbia, grazie alla sua semplicità costruttiva, robustezza ed economia, esso trova largo impiego in ambito industriale. Tuttavia esso ruota, se collegato direttamente alla rete di alimentazione, ad una determinata velocità che dipende dalla frequenza della rete stessa e dal numero dei poli dell'avvolgimento statorico della macchina,

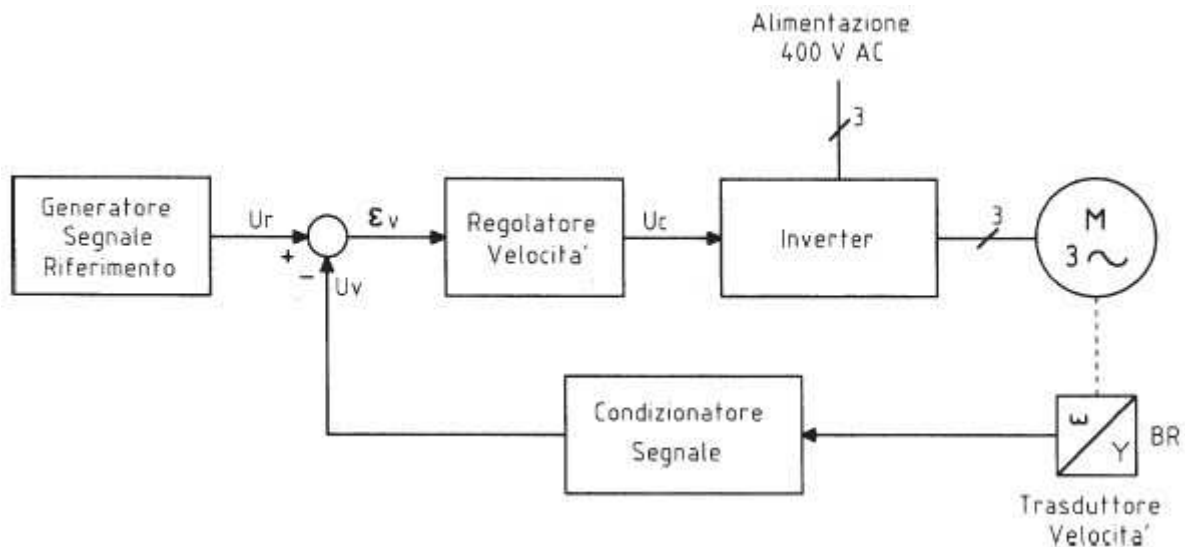
secondo la relazione:

$$n = 60 \cdot f/p$$

dove **p** sono le coppie polari che costituiscono il motore, **n** il numero di giri al minuto del campo di statore e **f** la frequenza di alimentazione. Un primo metodo per la variazione di velocità consiste nell'utilizzare un motore asincrono a poli commutabili (sistema Dahlander) in cui, tramite contattori, vengono inseriti gli avvolgimenti, ad esempio a triangolo o a doppia stella (D-YY), a cui corrispondono due velocità diverse ma fisse (il rapporto è sempre 1:2). In altri termini non è possibile, con questo metodo, ottenere una variazione di velocità di tipo continuo; inoltre la potenza resa non è costante nelle due velocità.

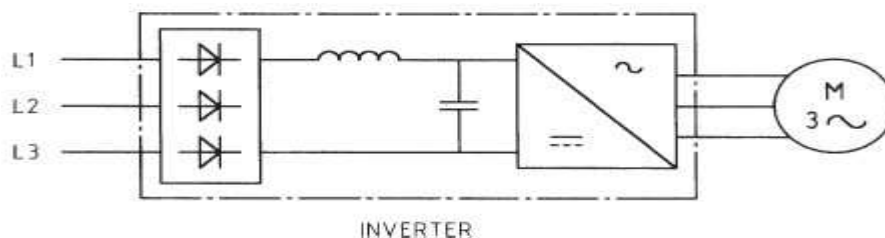
Nel caso si abbia invece un motore asincrono a polarità fisse, la velocità della macchina dipende essenzialmente dalla frequenza della rete di alimentazione e l'unico modo per poterla variare è quello di disporre di un alimentatore a frequenza variabile. Tutto questo è stato consentito dallo sviluppo tecnologico che ha reso disponibili, ormai da parecchi anni, convertitori DC/AC di grande affidabilità e costo relativamente contenuto. Oltre a richiedere una frequenza variabile, il motore asincrono richiede anche una variazione proporzionale della tensione di alimentazione per permettere alla corrente magnetizzante e al flusso di rimanere costanti al variare della frequenza. Gli inverter sono costituiti da un ponte raddrizzatore per convertire la tensione alternata di rete in una tensione continua (conversione AC/DC) e da un ponte trifase a semiconduttori controllabili per la conversione inversa da DC a AC a frequenza e tensione variabili. Con l'impiego degli inverter si può realizzare una variazione continua della velocità a coppia costante, da pochi giri al secondo fino alla velocità nominale del motore; velocità che può essere anche superata se l'inverter mette a disposizione frequenze di uscita più elevate di 50 Hz (ovvero della frequenza nominale di funzionamento dei motori asincroni). Per evitare correnti armoniche l'inverter deve produrre una tensione d'uscita essenzialmente sinusoidale, anche se i semiconduttori che lo costituiscono lavorano in regime di commutazione. La struttura del controllo di velocità di un motore asincrono non si discosta da quella dei motori in corrente continua se non per il diverso tipo di convertitore

adottato; Lo schema a blocchi generale di un controllo di velocità con singolo anello di retroazione di un motore asincrono trifase, è sostanzialmente il seguente:



La retroazione della velocità viene effettuata mediante una **dinamo tachimetrica BR** (trasduttore di velocità) e relativo condizionatore di segnale, quando il controllo è di tipo analogico; oppure, per l'interfacciamento con controlli di tipo digitale, si ricorre ad un encoder incrementale il cui segnale d'uscita (digitale) viene elaborato direttamente. Se il circuito di controllo prevede anche l'anello di corrente il suo segnale viene prelevato direttamente sulla linea alternata di alimentazione mediante un trasformatore di corrente e portato al nodo di confronto interponendo un idoneo condizionatore di segnale. Il segnale di controllo U_c verrà inviato all'inverter, il cui circuito di controllo provvederà, regolando tensione e frequenza, alla correzione della velocità di rotazione del motore. I regolatori più usati in questo tipo di controllo sono di tipo P. e P.I.

Per quanto riguarda la scelta del convertitore di frequenza (inverter), noi sappiamo che gli azionamenti statici per la regolazione di velocità dei motori asincroni trifasi provvedono, in primo luogo, a raddrizzare la tensione di rete, quindi a trasformarla di nuovo in alternata trifase a frequenza e ampiezza variabile, tramite un convertitore:

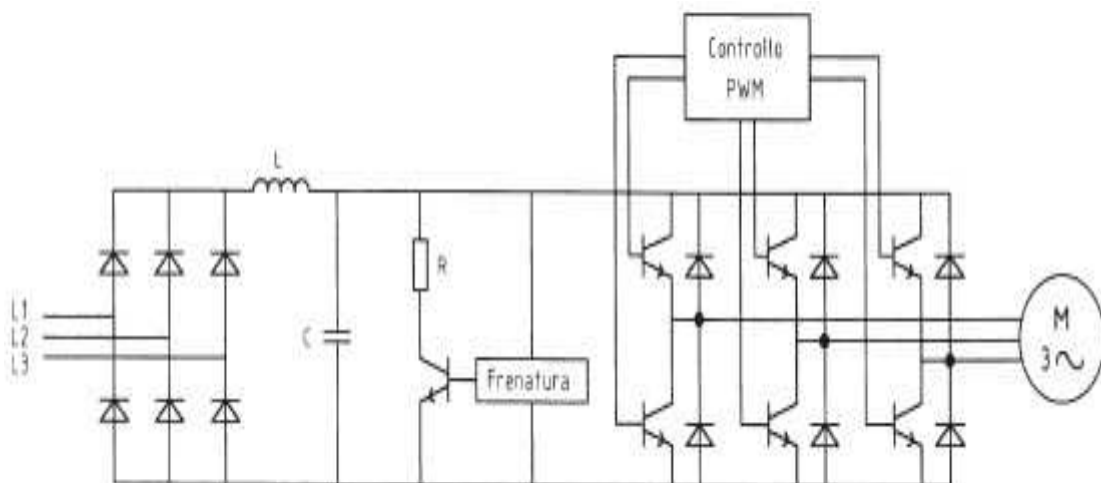


La prima operazione viene in genere attuata mediante un ponte raddrizzatore trifase a diodi o, in alcune tipologie, mediante SCR; mentre la **conversione DC/AC** può essere realizzata con diverse tecniche di cui le più utilizzate sono:

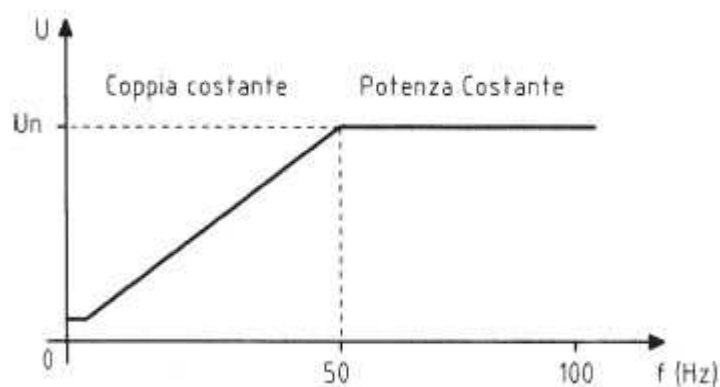
- a controllo di corrente (corrente impressa);
- a controllo di tensione (tensione impressa).

Negli inverter a corrente impressa la regolazione viene eseguita direttamente sulla corrente del motore, in funzione della coppia richiesta dal carico. Questa tecnica di regolazione comporta, alle basse velocità, un forte assorbimento di corrente, potenza reattiva e quindi un basso $\cos\phi$; non viene consentito, inoltre, il comando di più motori anche quando la potenza complessiva non supera quella di targa del convertitore. Di norma negli inverter, vengono utilizzati tiristori (SCR) a commutazione forzata con i relativi circuiti di spegnimento. Gli inverter a tensione impressa utilizzano, in genere, come dispositivi di potenza, transistor bipolari o transistor ad effetto di campo (MOSFET), e va detto inoltre che questa è la tecnica più utilizzata.

Nei controlli di velocità, il tipo di inverter più adatto è senz'altro quello a tensione impressa con tecnica di modulazione PWM, che consente di ottenere in uscita una tensione con andamento medio praticamente sinusoidale ed una forte riduzione delle armoniche superiori; inoltre vengono eliminati i circuiti di spegnimento usati invece con i tiristori. Lo schema tipico del circuito di potenza di un inverter a tensione impressa è il seguente:



L'alimentazione trifase è convertita in tensione continua da un ponte raddrizzatore a diodi e filtrata attraverso l'induttanza L e il condensatore C ; la tensione continua viene poi inviata all'inverter vero e proprio, impiegante come dispositivi di commutazione, i transistor. La variazione tensione/frequenza viene realizzata pilotando questi dispositivi in tecnica PWM e il circuito di pilotaggio viene gestito da un microprocessore. La **sezione frenatura** dello schema precedente, interviene durante la fase di frenatura del motore; in questa circostanza il motore si comporta infatti come un generatore e restituisce l'energia accumulata che verrà immagazzinata dal condensatore C . Questo comporta un aumento della tensione disponibile sul condensatore, poiché il ponte di diodi non consente di restituire l'energia alla linea di alimentazione. L'aumento della tensione porterebbe alla distruzione dei dispositivi da essa alimentati se non intervenisse un elemento in grado di scaricare il condensatore; questa funzione viene svolta dal transistor V che inserisce in circuito la resistenza R che svolge quindi il compito della frenatura dinamica del motore, la quale frenatura dinamica accelera il rallentamento dissipando in calore, sulla resistenza R , l'energia cinetica del motore. La logica di controllo dell'inverter, in base al segnale di controllo, provvederà ad aumentare la tensione d'uscita in modo proporzionale alla frequenza fornita al motore; questa legge di controllo:



è valida nel tratto compreso fra zero e la frequenza nominale. In questo tratto l'andamento della tensione al variare della frequenza, se si trascura la compensazione introdotta alle basse velocità, è praticamente una retta. Quando la frequenza raggiunge il valore nominale, anche la tensione deve raggiungere il valore nominale d'alimentazione del motore; in questo tratto della caratteristica il

motore funzionerà a coppia massima disponibile costante. Raggiunto il valore nominale, la tensione, per problemi d'isolamento, non verrà più aumentata; la frequenza invece potrà continuare ad aumentare con conseguente diminuzione del flusso e quindi della coppia. In questo secondo tratto della caratteristica, il motore funzionerà quindi a potenza costante. Occorre evidenziare che alle basse velocità, il motore opera in pessime condizioni termiche, poiché l'effetto autoventilante viene a ridursi drasticamente; per contro alle alte velocità (maggiore di quella nominale), la ventola richiede notevole potenza. La velocità massima di funzionamento del motore sarà limitata solo da ragioni meccaniche, quali cuscinetti e forze centrifughe del rotore.

3.3 Il rendimento del sistema di azionamento

Il rendimento globale di azionamento dipende dalle perdite a livello del motore e dei controlli, ed entrambi i tipi di perdita sono di natura termica e pertanto si manifestano sotto forma di calore. La potenza di uscita è di tipo meccanico, mentre la potenza d'ingresso alimentata al sistema di azionamento è di tipo elettrico, e quest'ultima è quindi calcolabile con seguente la relazione:

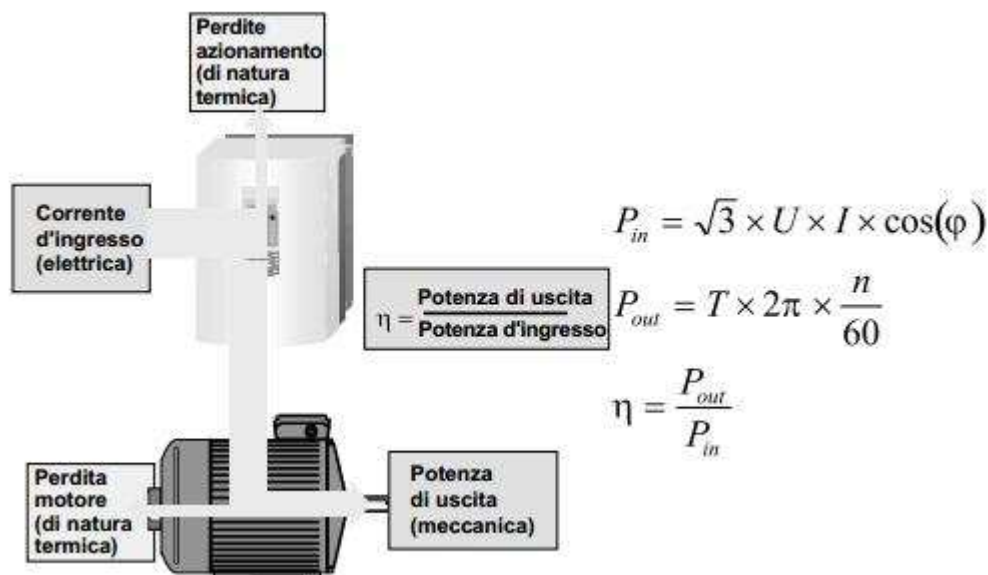
$$P_{in} = \sqrt{3} * V * I * \cos \phi \text{ [kW]}$$

mentre per la potenza meccanica in uscita dall'azionamento risulta:

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

La potenza elettrica d'ingresso P_{in} dipende dalla tensione (U), dalla corrente (I) e dal fattore di potenza ($\cos\phi$). Il fattore di potenza esprime la ripartizione della potenza elettrica totale in potenza attiva e in potenza reattiva. La potenza attiva è necessaria per generare la potenza meccanica richiesta mentre la potenza reattiva è necessaria per produrre la magnetizzazione a livello del motore. La potenza meccanica di uscita, dipende quindi dalla coppia richiesta (T) e dalla velocità di

rotazione (n). La potenza richiesta è direttamente proporzionale alla velocità e alla coppia richieste e questo determina la quantità di potenza assorbita dall'alimentazione elettrica. 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.



I convertitori di frequenza regolano la tensione alimentata al motore, e in tal modo controllano direttamente la potenza utilizzata sia a livello del motore che a livello del processo controllato. La commutazione elettrica mediante transistori che avviene, è molto efficiente e il rendimento del convertitore di frequenza è elevato, in quanto è compreso tra 0,97 e 0,99. Per quanto riguarda invece 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; si 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.

3.4 Il rendimento Europeo nel caso degli inverter fotovoltaici

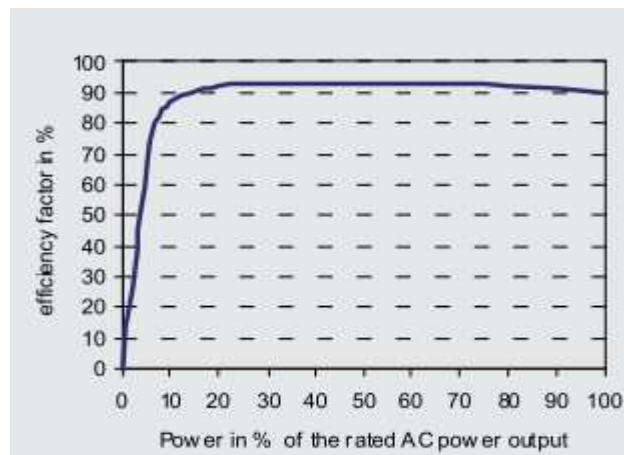
Un inverter fotovoltaico produce energia elettrica grazie all'energia fornita dal generatore fotovoltaico. Il rendimento o efficienza (P_{ac}), di un inverter, è il rapporto tra quanto erogato verso la rete elettrica (potenza in alternata), e l'energia in ingresso all'inverter stesso (potenza del generatore, P_{dc}), prodotta dal generatore fotovoltaico. Naturalmente tale rapporto sarà sempre inferiore ad 1, in quanto non tutta l'energia potrà essere convertita, ma una parte verrà dissipata

dall'inverter nel suo funzionamento ($P_{\text{autoconsumo dell'inverter}}$):

$$P_{ac} = P_{dc} - P_{\text{autoconsumo}}$$

$$\eta = \frac{P_{dc} - P_{\text{autoconsumo}}}{P_{dc}} < 1$$

Poiché l'energia fotovoltaica è una risorsa preziosa, ne deve essere sprecata il minimo possibile, per cui è fondamentale che il rendimento dell'inverter sia molto alto, con un valore quindi più vicino possibile all'unità. Il rendimento di un inverter fotovoltaico, alle prime luci dell'alba, quando il generatore eroga una potenza minima, sarà minore, in quanto l'energia necessaria all'inverter per il proprio funzionamento ($P_{\text{autoconsumo dell'inverter}}$), risulta essere una fetta importante dell'energia al suo ingresso:



Si può notare che a bassa potenza il valore dell'efficienza parte da 0; crescendo l'irraggiamento solare, e con esso l'energia del generatore, il rendimento cresce; è importante che l'inverter abbia un rendimento alto già a una potenza di ingresso minima, in modo da sfruttare al meglio anche le ore di minor irraggiamento. All'aumentare dell'energia prodotta dall'impianto, il rendimento cresce ulteriormente fino a raggiungere picchi elevatissimi; il rendimento massimo (η_{MAX}) può raggiungere valori del 97-98% nei prodotti migliori. Un dato altrettanto importante è la costanza del rendimento; la curva dovrebbe infatti raggiungere valori molto elevati e rimanere piatta per un campo di funzionamento della potenza il più ampio possibile, in modo da mantenere la massima

produttività in tutte le condizioni di irraggiamento, dal minimo della mattina o delle giornate più cupe, al massimo irraggiamento delle giornate estive più luminose. Il rendimento di un inverter però non è costante e in generale vi è un punto o una zona ristretta di funzionamento della macchina, nel quale il rendimento è massimo, mentre cala man mano che ci si allontana, solitamente con un andamento chiamato curva a campana o di Gauss. Ogni modulo fotovoltaico eroga la sua massima potenza con l'irraggiamento massimo a cui viene testato in laboratorio (pari a 1000 W/m^2), e con valori inferiori, la potenza sarà proporzionalmente inferiore. Un irraggiamento solare di 1000 W/m^2 è difficilmente raggiungibile nelle applicazioni pratiche, e studi sul campo, hanno dimostrato che per circa il 90% della vita di esercizio, un generatore fotovoltaico lavorerà con irraggiamenti compresi tra 200 e 900 W/m^2 , quindi esso non fornirà quasi mai all'inverter la massima potenza che può generare, ma si assesterà prevalentemente su valori intermedi, variabili continuamente durante la giornata. Nel caso degli inverter fotovoltaici entrano in gioco vari fattori relativi alla variabilità delle condizioni di funzionamento, perché la macchina è chiamata a convertire l'energia fornita dal campo fotovoltaico che ha andamenti molto variabili e difficilmente prevedibili. Tutti i produttori di inverter forniscono sia il valore del rendimento massimo, che il valore del **rendimento europeo**, cioè il valore di rendimento calcolato pesando opportunamente le efficienze di conversione a diversi carichi parziali; quindi questo rendimento non è altro che una media pesata dei valori dei rendimenti a varie percentuali dell'irraggiamento (al 5, 10, 20, 30, 50 e 100% della potenza in ingresso). Poiché l'inverter non lavora sempre nelle condizioni migliori (dipende dalle condizioni di insolazione), il rendimento europeo è un valore che da meglio l'idea delle prestazioni medie dell'inverter piuttosto che il suo valore di picco; tenendo conto di questo aspetto, il rendimento europeo che si determina, sulla base delle efficienze a carico parziale, risulta perciò:

$$\eta_{\text{Euro}} = 0,03 \times \eta_{5\%} + 0,06 \times \eta_{10\%} + 0,13 \times \eta_{20\%} + 0,10 \times \eta_{30\%} + 0,48 \times \eta_{50\%} + 0,20 \times \eta_{100\%}$$

La media è pesata, vale a dire che i rendimenti vengono moltiplicati per dei coefficienti, in funzione dell'effettivo tempo di utilizzo nella giornata. Ad esempio, in una tipica giornata di sole, l'irraggiamento che produce il 5% di potenza all'ingresso dell'inverter sarà presente per pochi

minuti, all'alba e al tramonto, quindi il suo valore deve valere (pesare) poco nella media (coefficiente 0,03 nella formula). Verrà viceversa dato massimo peso al rendimento corrispondente al 50% di carico, perché i valori intermedi di potenza del generatore fotovoltaico sono a lungo presenti nella giornata (coefficiente 0,48 nella formula), e così via. Quindi si può notare subito dall'espressione precedente, che il rendimento europeo va a ponderare i diversi regimi di carico parziale, che caratterizzano il reale funzionamento del generatore fotovoltaico. Andando a sommare i rendimenti reali pesati nelle varie condizioni di funzionamento, mi permette di ottenere un rendimento globale più corrispondente alla realtà, invece che indicare il massimo rendimento possibile. I valori di efficienza europea ed efficienza massima sono obbligatoriamente presenti in tutti i data-sheet degli inverter. Questi parametri sono elevatissimi, quasi prossimi al 100% sui moderni prodotti di elevata qualità. L'efficienza europea è naturalmente inferiore a quella massima, essendo questa il picco dell'efficienza, ma il suo valore è quello che viene normalmente utilizzato nel calcolo dell'effettiva produttività dell'impianto, essendo l'irraggiamento continuamente variabile durante il giorno. Un'indicazione della costanza di rendimento di un inverter è fornita anche dallo scostamento tra questi due valori:

$$(\eta_{\text{Max}} - \eta_{\text{Europeo}})$$

tanto più il valore dell'efficienza europea si avvicina al valore massimo, tanto più la curva si assesterà su valori costanti al variare del carico, evitando picchi di efficienza, di scarso interesse pratico. Un'ultima considerazione riguardo al rendimento, va fatta considerando che quest'ultimo può variare non solo in funzione della percentuale di carico, ma anche in funzione della tensione del generatore fotovoltaico. Non è infatti possibile che un inverter abbia sempre lo stesso rendimento, a qualunque tensione di lavoro. Facendo un esempio concreto, se un impianto è costituito da 30 moduli, è possibile collegarlo utilizzando 3 stringhe in parallelo da 10 moduli, o 2 stringhe in parallelo da 15 moduli. Queste due scelte comportano una diversa tensione operativa dell'impianto e quindi bisogna valutare quale di queste tensioni è ottimale per l'efficienza in ogni situazione di

irraggiamento. Il costruttore fornisce obbligatoriamente i dati di rendimento massimo ed europeo, ma non è tenuto a comunicare quale sia il valore di tensione di ingresso su cui si basano i calcoli. L'inverter può quindi lavorare in un range di tensione diverso da quello per cui il costruttore ha fornito i dati di efficienza (che tipicamente sarà la tensione ottimale). Il tecnico dovrebbe quindi prendere in considerazione inverter le cui schede tecniche riportino non solo i dati obbligatori η_{MAX} e $\eta_{Europeo}$, ma anche l'andamento in funzione della tensione del generatore. Nel definire la lunghezza della stringa, il progettista accorto, conoscendo l'andamento dell'efficienza, dovrà cercare se possibile di formare stringhe di moduli con tensioni di lavoro che massimizzino l'efficienza dell'impianto. Durante la notte l'inverter è spento e i circuiti di controllo sono in stand-by; in questi casi è spesso possibile, alimentando l'inverter con normale presa di corrente, effettuare delle verifiche della produzione giornaliera accendendo il display e visualizzando i dati in memoria; risulta quindi importante che in queste condizioni di lavoro, il consumo sia minimo. All'alba, l'inverter comincerà a erogare energia in rete, solo quando l'irraggiamento avrà raggiunto un valore minimo, tale da garantire l'effettivo auto-sostentamento dell'inverter; un basso valore della potenza minima implica un funzionamento anche in condizioni di scarso irraggiamento, quindi maggiore produzione di energia.

Capitolo 4

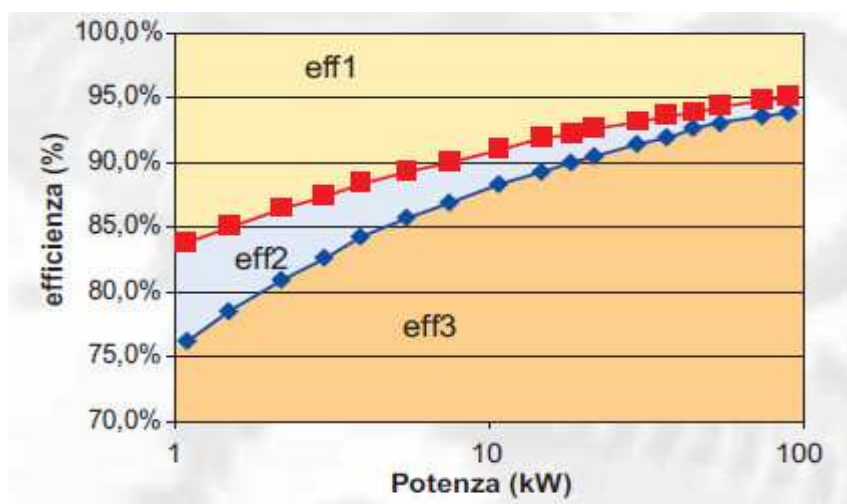
NORMATIVE SUI RENDIMENTI DEI MOTORI ELETTRICI

4.1 L'evoluzione nel tempo delle normative sui rendimenti dei motori elettrici

Sulla base di un accordo volontario tra il Comitato di settore europeo dei Costruttori di Macchine Elettriche ed Elettronica di Potenza (**CEMEP**) e la **Commissione Europea**, nel 1998, sono state definite 3 classi di efficienza per i motori 2-4 poli, di potenza resa da 1,1 kW a 90 kW, con $V \leq 400V$:

- EFF1, motori ad alto livello di rendimento;
- EFF2, motori a livello di rendimento standard;
- EFF3; motori a basso livello di rendimento;

Per ogni classe di efficienza individuata, in base alla normativa stabilita dal CEMEP, sono stati definiti i rendimenti minimi e i costruttori aderenti all'accordo si sono impegnati a rispettare questi valori minimi. Nel grafico seguente sono riportati ad esempio, 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 precedente, man mano che aumenta la potenza, le differenze di rendimento tra le classi si assottigliano. In virtù di tale accordo volontario tra il CEMEP e la Commissione Europea, ogni motore aveva quindi 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 vecchi motori elettrici montati negli impianti, ovviamente non rientrano in questo accordo perché antecedenti. Possiamo dire che il loro rendimento si trova sicuramente nella zona bassa del grafico precedente, contrassegnata da EFF3. Questo accordo volontario è nel frattempo scaduto il 10 febbraio 2010, anche se poteva essere esteso fino al 15 giugno 2011 su richiesta. Questo sistema di classificazione era ben collaudato ed è stato adattato in molti Paesi in tutto il mondo; purtroppo, altri Paesi hanno anche sviluppato i propri sistemi nazionali, che sono molto diversi dal sistema europeo. Per questo motivo i produttori europei di motori del **CEMEP** hanno sviluppato uno *standard di efficienza energetica per la Commissione Elettrotecnica Internazionale (IEC)*, cioè una organizzazione internazionale per la definizione di standard in materia di elettricità, elettronica e tecnologie correlate. Molti dei suoi standard sono definiti in collaborazione con l'**ISO** (organizzazione internazionale che si occupa di stabilire e diffondere norme di unificazione) e con il **CEI** (comitato elettrotecnico italiano). L'obiettivo era quello di avere uno standard internazionale comune che sostituisse tutti i diversi sistemi nazionali.

La globalizzazione dei mercati ha comportato la necessità di confrontare i livelli di efficienza dei dispositivi appartenenti alla stessa categoria di prodotto, indipendentemente dallo specifico luogo di produzione e giungere così all'armonizzazione delle norme e della legislazione di riferimento; questo infatti è stato il prerequisito indispensabile per il diffondersi con successo delle tecnologie a supporto dell'efficienza energetica. Il miglioramento dell'efficienza dei motori dipende dalla riduzione totale di tutti i tipi di perdite che si verificano al loro interno.

4.1.1 Norma IEC 60034-2:1996 e IEEE 112-B per la determinazione delle perdite

Per molti anni, le norme in uso a livello internazionale per determinare queste perdite furono due sostanzialmente:

- **IEC/EN 60034-2:1996.** Questa norma era utilizzata prevalentemente in Europa, India e Cina e in precedenza in Australia e Nuova Zelanda. Ormai scaduta nel novembre del 2010, questa prevedeva due modalità di determinazione dell'efficienza:
 - Il metodo diretto; $\eta = (\text{coppia} \cdot \text{velocità}) / (\text{potenza attiva assorbita})$ per potenze fino a 1 kW ;
 - Il metodo indiretto, per il quale la norma specifica i seguenti parametri:
 - le perdite nel rotore e nello statore dovevano essere determinate ad una temperatura degli avvolgimenti di 95°C;
 - mentre le perdite di carico aggiuntive venivano stimate pari allo 0.5% della potenza attiva assorbita.

I rendimenti così ottenuti erano leggermente più alti di quelli misurati oggi sugli stessi motori.

- **IEEE 112-B.** Questo metodo era adottato in Nord America e nei paesi con fonti di

alimentazione a 60 Hz e prevedeva la misurazione diretta di tutte le perdite a una frequenza di alimentazione di 50 o 60Hz. Alle soglie del 2000 in Australia e in Nuova Zelanda venne introdotto un metodo simile a quello prescritto dalla IEEE 112-B, anche se la IEC 60034-2 trova ancora applicazione in questi paesi; mentre in Canada venne introdotta una norma equivalente (CSA C390). Negli Stati Uniti, il metodo per la determinazione dell'efficienza si basava sulla norma IEEE 112-B.

4.1.2 Normativa IEC 60034-2-1:2007-09 & IEC 60034-30:2008

L'esistenza di metodi di prova e sistemi di etichettatura differenti causava problemi quando si trattava di confrontare l'efficienza dei diversi prodotti. Anche la nomenclatura utilizzata nei diversi paesi creava non poche difficoltà. Per eliminare la ridondanza delle pratiche di standardizzazione esistenti e imboccare la via dell'unificazione, sono stati compiuti notevoli sforzi. Le attività intraprese dal **Comitato Tecnico IEC TC 2**, portarono alla definizione delle seguenti norme:

- **IEC 60034-2-1:2007**, cioè la (**CEI-EN 60034-2-1:2008-02**) specifica le nuove regole per i metodi di misura dell'efficienza e sostituisce la precedente IEC/EN 60034-2:1996:

	Vecchio Metodo Misurazione efficienza, standard IEC 60034-2: 1996	Nuovo Metodo Misurazione efficienza, standard IEC 60034-2-1: 2007 Sept.
Temperatura di riferimento	Perdite nell'avvolgimento in statore e rotore determinate a 95°	Perdite nell'avvolgimento in statore e rotore determinato a [25 °C + effettivo aumento di temperatura rilevato]
Metodo	Metodo indiretto: Valore fissato: $P_{\text{addizionali di carico}}$ 0.5% di potenza in entrata a carico nominale	Metodo indiretto: Tre alternative, quella usata deve essere indicata in documentazione - Misurazione: $P_{\text{addizionali di carico}}$ calcolato da test di perdita - Valore assegnato: $P_{\text{addizionali di carico}}$ al 2.5%-1.0% potenza in entrata a carico nominale tra 0.1KW e 1000 KW - Calcolo matematico: $E_h \text{ star}$ –metodo indiretto alternativo con calcolo matematico di $P_{\text{addizionali di carico}}$
	Metodo diretto	Metodo diretto (nessun cambiamento)

Questo nuovo standard, entrato in vigore a settembre del 2007, riguardava l'efficienza energetica dei motori e introduceva le nuove regole relative ai metodi di prova da utilizzare per la determinazione delle perdite e dell'efficienza. La direttiva Eup (Eco-Design Requirements for Energy Using Products) richiedeva di effettuare prove per la determinazione del rendimento utilizzando metodi di bassa incertezza, e questa IEC 60034-2-1:2007 indicava come metodi di bassa incertezza, due modalità di determinazione dell'efficienza:

- Il metodo diretto, $\eta = (\text{coppia} \cdot \text{velocità}) / (\text{potenza attiva assorbita})$, per potenze fino a 1kW;
- Il metodo indiretto, per potenze superiori, $\eta = (1 - \text{somma delle perdite}) / (\text{potenza attiva assorbita})$, con misura delle perdite di carico supplementari; per questo metodo, la nuova norma specificava i seguenti parametri:
 - la temperatura di riferimento;
 - tre opzioni per la determinazione delle perdite di carico supplementari:
 1. *Misurazione*: perdite addizionali calcolate dalla prova di carico;
 2. *Valore assegnato*: perdite addizionali stimate dal 2,5% al 1% della potenza in ingresso a carico nominale, compresa tra 0,1 kW e 1000 kW;
 3. *Calcolo matematico*: perdite nello statore e nel rotore sono determinate a 25 °C più la temperatura reale misurata.

Il metodo indiretto si differenzia dal metodo diretto perché nel rapporto tra potenza in uscita e potenza in entrata, si considera anche la misurazione delle perdite che si creano all'interno del motore. Con queste nuove regole relative ai metodi di prova da utilizzare per la determinazione delle perdite e dell'efficienza, i produttori tra le alternative potranno scegliere quale metodo di misurazione applicare, ma la documentazione del motore dovrà dichiarare quale metodo verrà usato; per esempio riferendomi ad un gruppo leader nelle tecnologie per l'energia e l'automazione come ABB, loro si riferiscono al metodo indiretto con $P_{\text{addizionali di carico}}$ calcolate da test di perdita, e quindi loro selezionano tra le alternative, il metodo che garantisce i valori più precisi. Bisogna fare attenzione che valori di efficienza di diversi produttori, sono comparabili solo se tra le tre alternative è stato utilizzato lo stesso metodo di misurazione. Sempre riferendomi al gruppo ABB, di seguito è riportato un esempio di catalogo, in questo caso riferito all'anno 2009, dove si può notare subito che nel catalogo sono indicati, sia i valori di efficienza con riferimento alla IEC 60034-2-1:2007, sia i valori di efficienza con riferimento alla IEC 60034-2:1996, per tutti i motori a singola velocità, a pieno carico e a $\frac{3}{4}$ del carico:

IP 55, IC 411; Insulation class F, temperature rise class B

Output kW	Type designation	Product code	Speed r/min	Efficiency, IEC 60034- 2-1; 2007		Efficiency, IEC 60034- 2; 1996		Power factor cos ϕ	Current		Torque		
				Full load 100 %	3/4 load 75 %	Full load 100 %	3/4 load 75 %		I_N A	I_L I_N	T_N Nm	T_s T_N	T_{max} T_N
2-poles = 3000 r/min			400 V	50 Hz				Basic design					
11	M3BP 160 MLA	3GBP 161 031-...G	2929	89.8	90.3	91.1	91.6	0.91	19.2	7.7	36	2.6	3.0
15	M3BP 160 MLB	3GBP 161 032-...G	2933	90.7	91.2	92.0	92.5	0.91	26	7.8	49	2.7	3.1
18.5	M3BP 160 MLC	3GBP 161 033-...G	2936	91.3	91.7	92.6	93.0	0.90	32.5	7.3	60	2.3	3.1
22	M3BP 180 MLA	3GBP 181 031-...G	2950	91.6	91.8	92.6	92.8	0.88	39	7.9	71	2.8	3.2
30	M3BP 200 MLA	3GBP 201 031-...G	2952	92.3	92.5	93.4	93.6	0.90	52	7.9	97	2.8	3.0
37	M3BP 200 MLB	3GBP 201 032-...G	2949	92.7	93.0	93.8	94.1	0.90	64	7.7	120	2.6	3.0

I valori riportati con il nuovo metodo, in molti casi saranno leggermente inferiori rispetto ai valori riportati con il vecchio metodo, questo non vuol dire che il motore è meno efficiente, ma che è stato utilizzato un metodo di misura più accurato.

L' unico cambiamento è il metodo di misurazione, non le performance del motore. Di seguito è riportato un esempio di calcolo dell'efficienza, fatto dal gruppo ABB, sia con il metodo vecchio che con il metodo nuovo, e in questo caso specifico, si è preso in considerazione un motore asincrono a 4 poli, 11 kW e Δ °56 K:

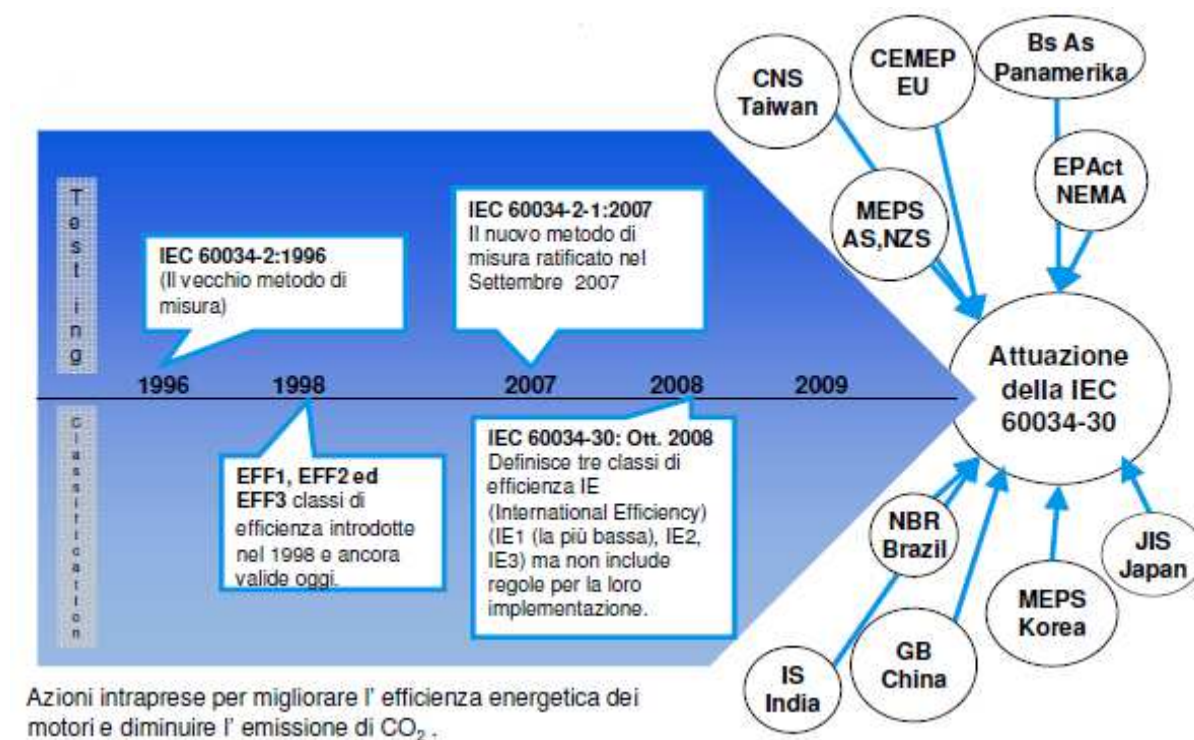
Perdite	IEC 60034-2:1996	Misurazione IEC 60034-2-1:2007 (ABB)	IEC 60034-2-1:2007 Valore assegnato dalla curva
P_{frizione}	68 W	68 W	68 W
P_{ferro}	223 W	223 W	223 W
$P_{\text{avvolgimento}}$	484 W ricalcolato a 95 °C (ΔT 75K +20 °C T_{ambient})	463 W realmente misurato a 81 °C (ΔT 56K +25 °C T_{ambient})	463 W
P_{rotore}	258 W ricalcolato a 95 °C (ΔT 75K +20 °C T_{ambient})	262 W ricalcolato a 105 °C (ΔT 80K +25 °C T_{ambient})	262 W
$P_{\text{Addizionali}}$	60 W calcolato $P_{\text{input}} \times 0.5\%$	156 W calcolato $P_{\text{input}} - P_{\text{friction}} - P_{\text{iron}} - P_{\text{winding}} - P_{\text{rotor}} - P_{\text{output}}$	234 W
Somma delle perdite	1 093 W	1 172 W	1 250 W
Potenza resa + perdite	12 093 W	12 172 W	12 250 W
Efficienza	90.96%	90.37%	89.80%

➤ **IEC 60034-30:2008-09**, definisce tre classi di efficienza IE (International Efficiency) che vanno a sostituire le tre classi di efficienza europee EFF1, EFF2 e EFF3. Questo standard va a definire le classi di rendimento per i motori asincroni monofase e trifase. Il Codice **IE** sta per “Efficienza Internazionale” e si combina con un numero nel seguente modo:

- IE1 = Efficienza Standard, con livelli di efficienza paragonabili all'EFF2;
- IE2 = Alta Efficienza, con livelli di efficienza paragonabili all'EFF1;

- IE3 = Premium Efficiency; una classe di efficienza a livello europeo, identica alla NEMA PREMIUM americana a 60 Hz;

La 60034-30:2008-09, definisce le classi di efficienza IE1, IE2 e IE3, ha lo scopo di armonizzare le diverse regolamentazioni in materia di efficienza presenti nei vari paesi; dalla figura seguente si vede che le classi di efficienza definite dalla 60034-30:2008-09, sono armonizzate con le normative brasiliane per la frequenza a 60 Hz (IE1) e con le normative americane vigenti per i motori chiusi (EPAAct per IE2 e NEMA PREMIUM per IE3), ovvero IP44 e IP55:

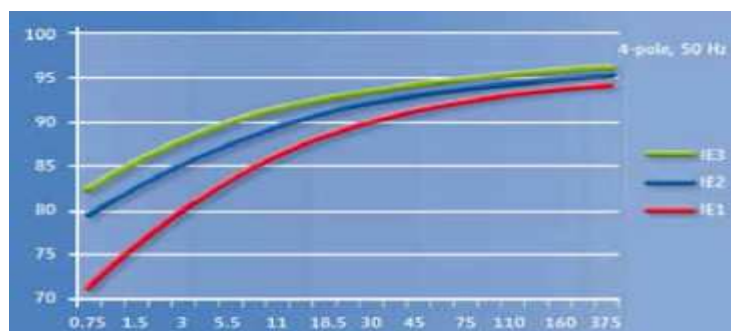


La classe IE3 introdotta per la frequenza a 50 Hz deriva dalla IE2 con una riduzione delle perdite di circa il 15%. Le nuove classi IE si basano sul metodo di prova IEC 60034-2-1:2007-09 e sono valide anche per motori per aree classificate. Nella pagina seguente è riportata nella tabella, oltre alle 3 classi di rendimento appena citate, anche la nuova classe di rendimento IE4 (SUPER PREMIUM), la quale verrà trattata successivamente al capitolo 6 della seguente tesi. I valori indicati nella norma 60034:30:2008-09, per definire la classe di

rendimento sono valori minimi, quindi non è prevista alcuna tolleranza. Si richiede per curiosità il rendimento minimo richiesto dalla norma 60034:30:2008-09, per classificare un motore IE2 quando la frequenza nominale è di 50 Hz; questa norma assicura quindi una base comune internazionale per la progettazione e la classificazione dei motori, nonché per le attività legislative nazionali:

60034-30	EuP	CEMEP	US EPAct
IE1 - STANDARD		EFF 2	
IE2 - HIGH	IE2 - HIGH	EFF 1	NEMA Energy efficiency / EPACT
IE3 - PREMIUM	IE3 - PREMIUM		NEMA Premium efficiency
IE4 - SUPER-PREMIUM			

Il sistema internazionale di classi di rendimento (**Codice IE**) ha un metodo di numerazione aperto e rispetto alle vecchie classi di efficienza EFF, è ora più facile aggiungere gli sviluppi futuri. Inoltre, vi è nuova classe IE3 e ora anche la IE4, che non esistevano nel vecchio sistema europeo di classificazione EFF. Anche il campo **di applicazione è stato esteso** in modo significativo; La principale differenza tra le classi di rendimento (EFF e IE) sta nel metodo utilizzato per determinarle. In un confronto diretto per lo stesso motore, ci si aspetta che il rendimento determinato secondo il nuovo metodo di misura, sia più basso. Ad esempio, un motore EFF1 a 4 poli di 11 kW con $\eta = 91\%$, è fisicamente identico a un motore IE2 con $\eta = 89,8\%$:



Allo stesso tempo, la IEC sviluppò dei metodi migliorati per determinare il rendimento di questi motori. Le Norme (IEC 60034-30:2008-09) classi di rendimento e (IEC 60034-2-

1:2007-09) metodi normalizzati per la determinazione mediante prove delle perdite e del rendimento delle macchine elettriche rotanti, sono state adottate poi anche come norme europee, senza alcuna modifica, rispettivamente come, **(CEI-EN 60034-30:2009-03)** e **(CEI-EN 60034-2-1:2008-02)**. Questi metodi consentono di ottenere dati più precisi sulle perdite addizionali a carico. I motori che vengono contrassegnati in base al nuovo sistema di classe di rendimento (Codice IE), devono essere sottoposti a prova, utilizzando i nuovi metodi di misura. Il sistema di classi di rendimento specificato nella norma **IEC 60034-30:2008-09** era valido per motori (asincroni trifase, a gabbia o monovelocità), a frequenza 50 Hz e 60 Hz, con le seguenti caratteristiche:

- Tensione nominale ≤ 1000 V;
- Potenza nominale compresa tra 0,75 kW e 375 kW;
- Numero di poli 2, 4 o 6;
- Targati o in base al tipo di servizio S1 (servizio continuo) o S3 (servizio intermittente periodico), con un rapporto di intermittenza nominale uguale o superiore all'80%;
- In grado di funzionare collegati direttamente alla linea di alimentazione;
- Adatti per le condizioni di funzionamento con altitudine ≤ 1000 metri sopra il livello del mare e temperatura dell'aria ambiente $\leq 40^{\circ}\text{C}$ e $\geq 0^{\circ}\text{C}$.

I motori con flange, piedi e/o alberi di dimensioni meccaniche diverse da quelle stabilite nella **IEC 60072-1** rientrano nella presente norma. I motoriduttori e i motori autofrenanti rientrano nella presente norma, sebbene in tali motori possano essere utilizzati alberi e flange speciali. Alcuni motori elettrici inclusi nella presente norma possono essere dotati di

dispositivi ausiliari. Tuttavia, finché questi dispositivi ausiliari non costituiscono parte integrante del motore, non è pratico determinare il rendimento in tutte le combinazioni possibili. Le prove relative al rendimento di tali motori di serie modificati devono essere effettuate su motori base senza dispositivi ausiliari installati. Sono esclusi da questo sistema:

- i motori per breve tempo di funzionamento (servizio S2) o per operazioni di commutazione (servizio da S3 con rapporto di intermittenza nominale < 80% a S10);
- i motori realizzati solo per funzionamento con convertitore in accordo con la IEC 60034-25;
- i motori completamente integrati in una macchina (per esempio pompe, ventilatori e compressori) che non possono essere provati separatamente dalla macchina.

Questa norma non contempla i motori progettati in conformità alla **IEC 60034-25** (ovvero i motori appositamente concepiti per l'alimentazione tramite convertitore), né i motori che costituiscono parte integrante di altre apparecchiature, come pompe, ventole, ecc.

4.1.3 Normativa Europea CE 640/2009 (EU-MEPS)

Il 22 luglio 2009 la Commissione Europea, ha varato la **CE 640/2009 (EU-MEPS) specifiche per la progettazione ecocompatibile dei motori elettrici**, dove EU-MEPS è l'acronimo di (European Union Minimum Energy Performance Standards), cioè una normativa europea che introduceva i livelli di efficienza minimi per i motori elettrici commercializzati all'interno dell'unione europea, nonché i tempi massimi per rispettare i suddetti vincoli. Questa normativa fa parte del progetto Eu eco-design, il cui scopo è di ridurre il consumo di energia elettrica e di conseguenza diminuire i

costi energetici e le emissioni di CO₂; quindi questo regolamento CE 640/2009, che è essenzialmente basato sulla IEC 60034-30:2008-09, impondeva a tutti i paesi dell'Unione Europea a conformarsi ai nuovi parametri di efficienza, diventando effettivo in tre differenti fasi:

1. a partire dal 16 giugno 2011, tutti i motori con 2, 4 o 6 poli, con potenza nominale (P_N) compresa tra 0,75 e 375 kW, dovevano avere come livello minimo di efficienza la classe IE2 (HIGH);
2. mentre prevedeva per i motori con potenza nominale (P_N) compresa tra 7,5 e 375 kW a partire dal 1° gennaio 2015, una efficienza minima IE3 (PREMIUM), oppure IE2 (HIGH) se alimentati con l'uso di inverter;
3. infine prevedeva per i motori 2, 4 o 6 poli, con potenza P_N compresa tra 0,75 e 375 kW, a partire dal 1° gennaio 2017, una efficienza minima IE3 (PREMIUM), oppure IE2 (HIGH) se alimentati con l'uso di inverter.

I motori di classe IE2 potranno essere utilizzati al posto dei motori IE3 se alimentati tramite convertitore; quindi per applicazioni con inverter questa norma consentiva una classe di efficienza minore. La direttiva prevedeva che i motori con efficienza (IE1) non potevano più essere commercializzati nell'Unione Europea a partire dal 16 Giugno 2011. Essendo questa, una direttiva a livello europeo, sarà possibile continuare a produrre comunque motori IE1 destinati a quei mercati dove non esistono livelli minimi di efficienza richiesti.

Per quanto riguarda la tutela dell'acquirente quando va ad acquistare un motore dopo il 15 giugno 2015, la direttiva prevede che le autorità degli stati membri verificano con dei test quanto dichiarato dai venditori dei motori sulla loro targa. Nel caso un motore non presenti tutte le caratteristiche richieste dalla norma, questo potrà avere rendimento inferiore a quello previsto dalla stessa (ad esempio, motori S2, S3 30%, ecc). Il livello di efficienza e la classe di appartenenza IE (International Efficiency), dovranno essere comunque riportati in targa e nella documentazione di

prodotto; inoltre sulla targhetta dovrà essere riportato obbligatoriamente anche l'anno di fabbricazione del motore, l'efficienza nominale (η) a pieno carico e le tensioni nominali massime (al 75% e al 50 % del carico e della tensione nominale U_n). Di seguito è riportato un esempio di targhetta che la ditta **CIMA Spa (Vi)** applica ai propri motori e la legenda che descrive i parametri che sono riportati in tale targhetta:

TARGHETTA MOTORE

CIMA MOTORI ELETTRICI SpA CREAZZO VICENZA (ITALY)
 TEL. 0444/341220 FAX 0444/341223 www.cimamotori.com
 ASYNCHRONOUS MOTOR 3~PHASE

IE2 Type CODE

kW Poles Duty IP

Ins. CL.

	Volt	A	rpm	Cos.φ	Hz
Δ	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Y	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Δ	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Y	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

η 100% η 75% η 50%

N° YEAR

MADE IN ITALY IEC 60034-1 CERTIFICATE N°6329/01/S ISO 9001

LEGENDA:

TYPE	classe costruttiva motore
CODE	codice motore
kW	potenza resa motore
Poles	numero poli
Duty	servizio di funzionamento
IP	grado di protezione
Ins.CL.	classe di isolamento
Volt Δ	tensione nominale colleg. a triangolo
Volt Y	tensione nominale colleg. a stella
A	corrente nominale
Rpm	numero giri
Cos φ	fattore di potenza
Hz	frequenza nominale
η 100%	rendimento a pieno carico
η 75%	rendimento $\frac{3}{4}$ del carico
η 50%	rendimento $\frac{1}{2}$ del carico
N°	matricola seriale motore
YEAR	anno di fabbricazione motore

Prendendo sempre in considerazione la CIMA Spa, nella figura sottostante e nella pagina seguente, sono riportate due tabelle che rappresentano i valori di rendimento a 50 e 60 Hz, in base alla potenza nominale e al numero di poli che i motori di questa ditta presentano:

Tabella dei valori di rendimento a 50 Hz

Pn in kW	Livello Rendimento ALTO IE2			Livello Rendimento PREMIUM IE3		
	2 poli	4 poli	6 poli	2 poli	4 poli	6 poli
0.75	77,4	79,6	75,9	80,7	82,5	78,9
1,1	79,6	81,4	78,1	82,7	84,1	81,0
1,5	81,3	82,8	79,8	84,2	85,3	82,5
2,2	83,2	84,3	81,8	85,9	86,7	84,3
3	84,6	85,5	83,3	87,1	87,7	85,6
4	85,8	86,6	84,6	88,1	88,6	86,8
5,5	87,0	87,7	86,0	89,2	89,6	88,0
7,5	88,1	88,7	87,2	90,1	90,4	89,1
11	89,4	89,8	88,7	91,2	91,4	90,3
15	90,3	90,6	89,7	91,9	92,1	91,2
18,5	90,9	91,2	90,4	92,4	92,6	91,7
22	91,3	91,6	90,9	92,7	93,0	92,2
30	92,0	92,3	91,7	93,3	93,6	92,9
37	92,5	92,7	92,2	93,7	93,9	93,3
45	92,9	93,1	92,7	94,0	94,2	93,7

Tabella dei valori di rendimento a 60 Hz

Pn in kW	Livello Rendimento ALTO IE2			Livello Rendimento PREMIUM IE3		
	2 poli	4 poli	6 poli	2 poli	4 poli	6 poli
0,75	75,5	82,5	80,0	77,0	85,5	82,5
1,1	82,5	84,0	85,5	84,0	86,5	87,5
1,5	84,0	84,0	86,5	85,5	86,5	88,5
2,2	85,5	87,5	87,5	86,5	89,5	89,5
3,7	87,5	87,5	87,5	88,5	89,5	89,5
5,5	88,5	89,5	89,5	89,5	91,7	91,0
7,5	89,5	89,5	89,5	90,2	91,7	91,0
11	90,2	91,0	90,2	91,0	92,4	91,7
15	90,2	91,0	90,2	91,0	93,0	91,7
18,5	91,0	92,4	91,7	91,7	93,6	93,0
22	91,0	92,4	91,7	91,7	93,6	93,0
30	91,7	93,0	93,0	92,4	94,1	94,1
37	92,4	93,0	93,0	93,0	94,5	94,1
45	93,0	93,6	93,6	93,6	95,0	94,5

La CE 640/2009 per quanto riguarda la documentazione tecnica, stabiliva che per tutti i motori (asincroni trifase, a gabbia o monovelocità) con servizio S1, dovevano essere fornite la seguenti informazioni nell'ordine in cui sono presentate nei seguenti dodici punti:

1. Efficienza nominale (η) a carico e tensione nominali massimi, al 75 % e al 50 % del carico e della tensione nominali (U_n);
2. Livello di efficienza, IE2 o IE3;
3. Anno di fabbricazione;
4. Ragione sociale del fabbricante o marchio di fabbrica, numero di registrazione commerciale e sede del fabbricante;
5. Numero di modello del prodotto;
6. Numero di poli: 2, 4 o 6;
7. Potenza nominale $0,75 \leq P_n \leq 375\text{kW}$;
8. Frequenza 50-60 Hz;

9. Tensione nominale $\leq 1000\text{V}$;
10. Velocità nominale(i) o intervallo di velocità nominale (rpm);
11. Informazioni utili per lo smontaggio, il riciclaggio o lo smaltimento a fine vita;
12. Informazioni sulla serie di condizioni di esercizio per le quali è stato appositamente progettato il motore:
 - I. Altitudine ≤ 1000 metri sopra il livello del mare;
 - II. Temperature dell'aria ambiente $\leq 40^{\circ}\text{C}$ e $\geq 0^{\circ}\text{C}$, anche per i motori con raffreddamento dell'aria;
 - III. Temperatura del refrigerante dell'acqua in entrata al prodotto;
 - IV. Temperatura massima di esercizio;
 - V. Atmosfere potenzialmente esplosive.

La CE 640/2009 si applica ai motori trifase 2, 4 e 6 poli a singola velocità, con potenze da 0,75 kW a 375 kW compresi e tensione fino a 1000 V, operanti in servizio continuo. Sono escluse le seguenti tipologie di motori:

- Motori progettati per operare totalmente immersi in liquido;
- Motori completamente integrati in un prodotto (es. pompa o ventola) dove non sia possibile testare il rendimento del motore in maniera indipendente dal resto del prodotto;

- Motori autofrenanti;

- Motori progettati specificatamente per operare:
 - I. Ad altitudini superiori ai 1000 metri sul livello del mare;

 - II. In luoghi con temperatura ambiente superiore ai 40° C;

 - III. Con temperature di lavoro superiori ai 400° C;

 - IV. In luoghi con temperatura ambiente inferiore ai -15° C (qualsiasi motore) o inferiore ai 0° C (nel caso di motori raffreddati ad aria);

 - V. Qualora il liquido di raffreddamento utilizzato sia inferiore ai 5°C o superiore ai 25°C;

 - VI. In aree classificate così come definite dalla direttiva 94/9/EC.

La direttiva CE 640/2009 vincola tutti i venditori di motori in Europa, per cui una volta che un motore è conforme alla direttiva, può essere immesso nel mercato europeo. Tuttavia un cliente può richiedere che il motore soddisfi la normativa anche se escluso dalla direttiva, come nel caso per esempio dei motori Atex, ovvero può richiedere che un motore appartenga alla classe di rendimento IE2 o IE3. Ciò significa essere più esigenti della legge in vigore; per effettuare un paragone, è come effettuare mensilmente la revisione dell'automobile, quando la legge richiede una cadenza annuale; è chiaro che ciò si traduce in un maggior costo. Per confrontare due motori con le stesse caratteristiche nominali, tale confronto, sotto il profilo dell'efficienza energetica, può essere fatto solo se il metodo di misura del rendimento è lo stesso in entrambi i casi. Tale metodo deve essere indicato nella documentazione in allegato al motore; perciò se due motori con le stesse caratteristiche nominali hanno rendimenti nominali diversi, non è detto che il motore col

rendimento più elevato sia migliore dell'altro, perché dipende sempre dal metodo di misura usato per i due motori. Il Dipartimento Americano per l'Energia ha disposto che dal 19 dicembre 2010, il requisito **NEMA** (National Electrical Manufacturers Association) **PREMIUM** (IE3), diventasse lo standard minimo di prestazioni energetiche per i motori negli Stati Uniti. Per ottenere la certificazione, i produttori dovranno far testare i prodotti presso laboratori accreditati. Nei paesi dell'Unione Europea la situazione invece è diversa, in quanto spetta al produttore la responsabilità di conformarsi agli standard. La certificazione da parte di un ente terzo non è obbligatoria, tuttavia le agenzie governative eseguiranno audit di mercato sporadici. Qualora un dispositivo non sia conforme ai livelli di efficienza previsti e dichiarati, il produttore sarà obbligato a ritirarlo dal mercato a proprie spese. Il potenziale di efficienza energetica dei sistemi motore risiede, non solo nella possibilità di adottare motori con un rendimento più elevato, ma come detto in precedenza, anche nell'impiego di azionamenti a velocità variabile (VSD). Nel corso del 2011 il CEI ha pubblicato due guide su questo tema, che permettevano di stimare il potenziale di risparmio legato all'adozione di azionamenti a velocità variabile e di coordinare le caratteristiche dell'azionamento con quelle del motore. La Specifica Tecnica **CEI CLC TS 60034-31** descrive gli elementi che devono essere presi in considerazione nel caso di sostituzione di motori elettrici con motori elettrici con cosiddetti motori elettrici ad alta efficienza, o nel caso in cui si voglia modificare l'esercizio di un motore elettrico da velocità fissa a velocità variabile. La guida **CEI 315-18** descrive invece una metodologia per determinare il risparmio energetico conseguibile attraverso l'impiego di VSD applicati a motori elettrici operanti su sistemi che utilizzano pompe di tipo centrifugo.

4.1.4 Norma ISO 50001

Come la IEC, anche l'ente di standardizzazione **ISO** guarda con profonda attenzione ai diversi aspetti dell'efficienza energetica. Oltre a sviluppare congiuntamente uno standard terminologico univoco per il settore dell'efficienza energetica, i comitati tecnici ISO lavorano alla standardizzazione dei metodi di calcolo, confronto ed etichettatura nell'ambito delle prestazioni, dei

consumi e dell'efficienza per una varietà di dispositivi, mezzi di trasporto ed edifici. Un altro nuovo territorio di esplorazione nell'ambito della standardizzazione è stato rappresentato dai sistemi per la gestione energetica, il quali se ne occupa nello specifico la norma **ISO 50001**, (*Sistemi di gestione dell'energia - Requisiti e linee guida per l'uso*), la cui versione definitiva, recepita dall'UNI a fine del 2011, offre alle organizzazioni di qualsiasi settore, sia private che pubbliche, delle strategie di gestione che hanno l'obiettivo di portare:

- un aumento **dell'efficienza energetica**;
- una riduzione dei **costi**;
- un miglioramento delle **prestazioni energetiche**, che vanno pertanto integrate nella gestione delle attività quotidiane dell'organizzazione.

La norma infatti specifica come organizzare sistemi e processi finalizzati al miglioramento continuo dell'efficienza energetica con gli obiettivi primari di portare alle organizzazioni, benefici economici derivanti dal minore consumo energetico e la riduzione delle emissioni di gas serra. La norma non stabilisce specifici criteri di prestazione energetica. E' una norma ad adesione volontaria, sostenuta nella legislazione nazionale ed europea. Inoltre, un SGE ISO 50001 è facilmente integrabile con altri sistemi di gestione (ad esempio **ISO 14001**, **ISO 9001**). L'energia è uno dei problemi più critici che la comunità internazionale deve oggi affrontare. Per questo motivo l'introduzione della norma ISO 50001 sui sistemi di gestione dell'energia è da ritenersi un evento nel panorama normativo mondiale; si stima che la norma internazionale potrebbe avere un impatto positivo sull'utilizzo del 60% circa dell'energia mondiale. Nella quasi totalità dei casi, armonizzando le norme nazionali sulle apparecchiature elettriche con quelle internazionali corrispondenti, si otterrebbero i seguenti vantaggi:

- riduzione al minimo delle spese di prova, in particolare per i produttori di apparecchiature elettriche destinate ai mercati internazionali;

- confronto più facile tra i livelli di efficienza e di consumo dei dispositivi analoghi, in diverse regioni o sistemi economici;
- produzione semplificata di dispositivi con una maggiore efficienza energetica;
- trasferimento più facile delle conoscenze con conseguente recepimento delle norme nella legislazione.

Oltre a definire i livelli di efficienza e a fornire i metodi per la loro valutazione, le norme delineano la situazione in un quadro più ampio, descrivendo ad esempio come gestire l'energia in un sistema e come monitorare, individuare e verificare i risparmi ottenuti dalle azioni specifiche intraprese. Questo approccio rientra in una visione più estesa dei mercati dell'efficienza energetica, dove le prestazioni e i risparmi energetici rappresentano un servizio che si può acquistare e vendere proprio come l'elettricità o il gas.

Capitolo 5

I Motori elettrici alta efficienza

5.1 L'efficienza energetica

Il consumo di energia dei motori elettrici nel settore industriale è circa il 74% di quello totale:



Non a caso, quindi, l'adozione dei motori ad alta efficienza è una delle misure esplicitamente suggerite sia dai decreti del luglio 2004, sia dalla finanziaria 2007 per ottenere una detrazione di imposta e vale la pena parlarne un po' in dettaglio. I motori sono tra le macchine elettriche più affidabili, in quanto fanno il loro lavoro per molti anni con manutenzione assai ridotta e si adattano a prestazioni diverse a seconda delle esigenze richieste. Nonostante ciò, non ci si preoccupa in genere di quanto consumano, ma solo del prezzo d'acquisto; però se si considera che il costo di un motore nella propria vita è mediamente dovuto per il 98,4% , al consumo di energia elettrica e solo per l'1,6% alle spese per acquisto e manutenzione:



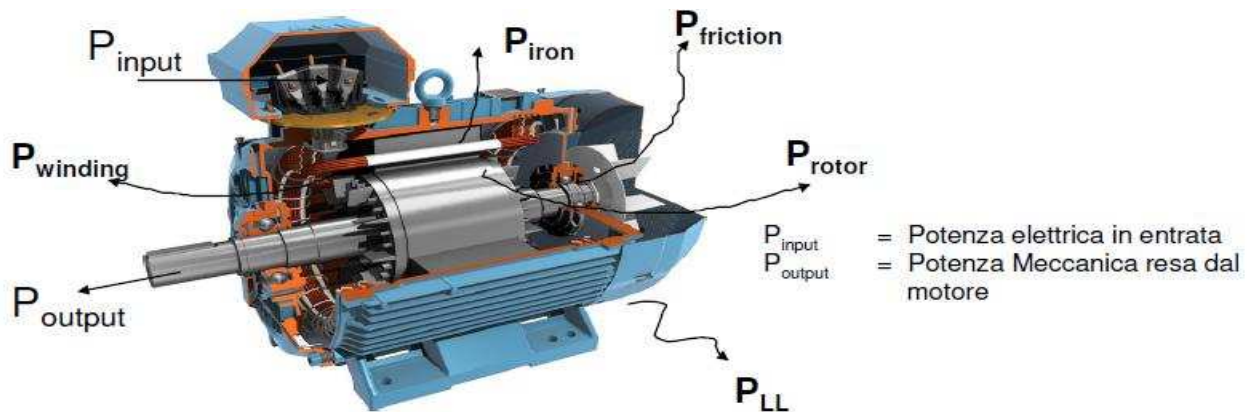
in altri termini, che il costo di un motore è paragonabile a quanto il motore stesso consuma in tre mesi di lavoro, si può ben vedere come sia conveniente prendere in considerazione apparecchi ad alta efficienza. Alta Efficienza significa convertire la potenza elettrica in potenza meccanica con minor perdite possibili, e un motore elettrico ad alta efficienza è un motore studiato appositamente e che richiede materiali pregiati, quindi costa più di un motore standard, ma il costo maggiore si ripaga nel tempo, grazie al minor consumo di energia elettrica, sempre che il motore venga utilizzato secondo le caratteristiche nominali indicate nella targhetta. Inoltre richiedere un motore “ad alta efficienza” significa aderire alla filosofia dello sviluppo sostenibile, del basso impatto ambientale e della riduzione delle emissioni di gas a effetto serra, come indicato nella CE 2005/32, di cui il regolamento **CE 640/2009**, (che è stato trattato nel 4° capitolo della mia tesi), costituisce un’attuazione. Non tutti i motori potranno essere ad alta efficienza a causa delle loro caratteristiche (come ad esempio i motori con raffreddamento diverso da IC0Ax, IC1Ax, IC2Ax, IC3Ax e IC4Ax, i motori di grandezze ridotte, i motori per ambienti esplosivi, i motori per condizioni ambientali speciali, i motori alimentati da reti con alte variazioni di tensione e frequenza, ecc), e in questi casi l’alta efficienza si può ottenere con un grande lavoro di ricerca e progettazione che fa però lievitare considerevolmente i costi del motore.

5.2 Motori elettrici ad alta efficienza

I motori ad alta efficienza sono motori elettrici che, grazie a specifici accorgimenti costruttivi, a parità di potenza offrono rendimenti superiori e più costanti, al variare del carico, rispetto a quelli di motori elettrici standard e quindi sono motori che hanno minori perdite rispetto a quelli tradizionali. Parte dei consumi attribuiti al funzionamento dei motori elettrici sono dovuti alla presenza di perdite di vario tipo. Come già detto in precedenza, le perdite in un motore elettrico si dividono in 5 macro aree:

- *perdite meccaniche, per attrito (nei cuscinetti e alle spazzole) e per ventilazione (P_{friction});*

- *perdite nel ferro a vuoto (proporzionali al quadrato della tensione), costituite da perdite per isteresi (consistenti nell'energia dispersa nei cambi di direzione del flusso), e perdite per correnti parassite (causate dalle correnti circolanti entro il nucleo, indotte dai cambiamenti di flusso), (P_{iron});*
- *perdite per effetto Joule (proporzionali al quadrato della corrente) negli avvolgimenti di statore (P_{winding});*
- *perdite per effetto Joule (proporzionali al quadrato della corrente) negli avvolgimenti di rotore (P_{rotor});*
- *perdite addizionali di carico (P_{LL}); le perdite addizionali di carico sono dovute, per esempio ad imperfezioni nel flusso, imperfezioni meccaniche nel traferro e irregolarità nella densità del flusso del traferro.*

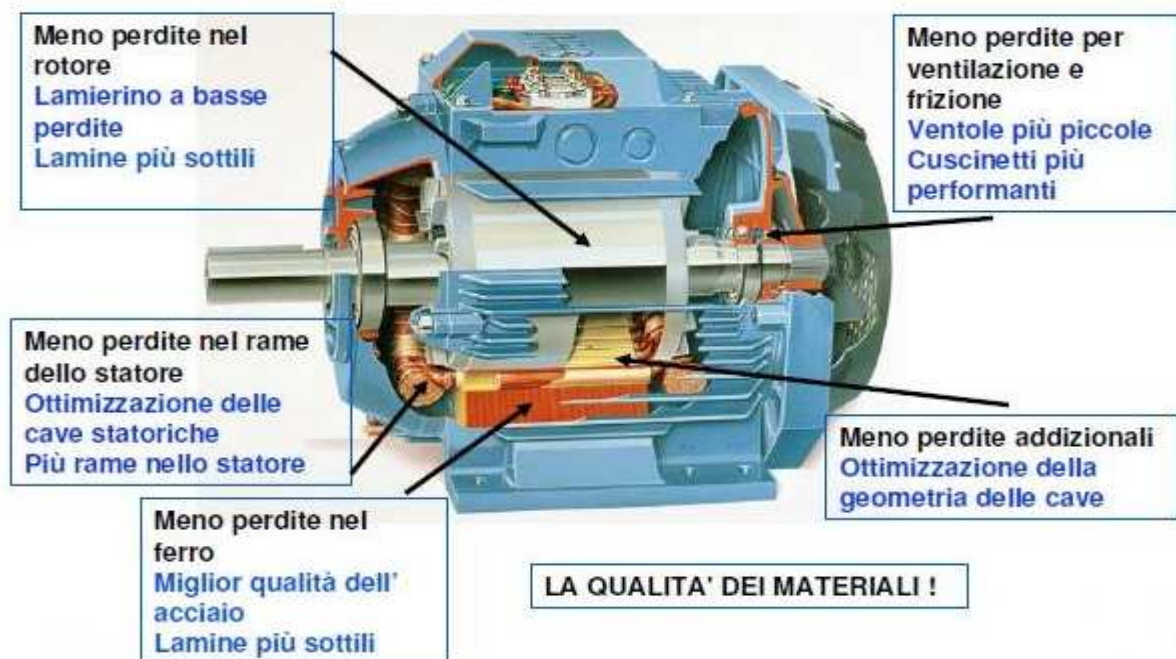


Quindi per rendere un motore elettrico più efficiente, queste perdite appena descritte, sono state ridotte intervenendo sui materiali o modificando alcuni elementi costruttivi quali:

- nucleo, realizzato con lamierini a basse perdite che diminuiscono le perdite a vuoto;

- aumentando la sezione dei conduttori dello statore e del rotore, per ridurre le perdite per effetto Joule;
- Attuando un'attenta scelta del numero e della geometria delle cave;

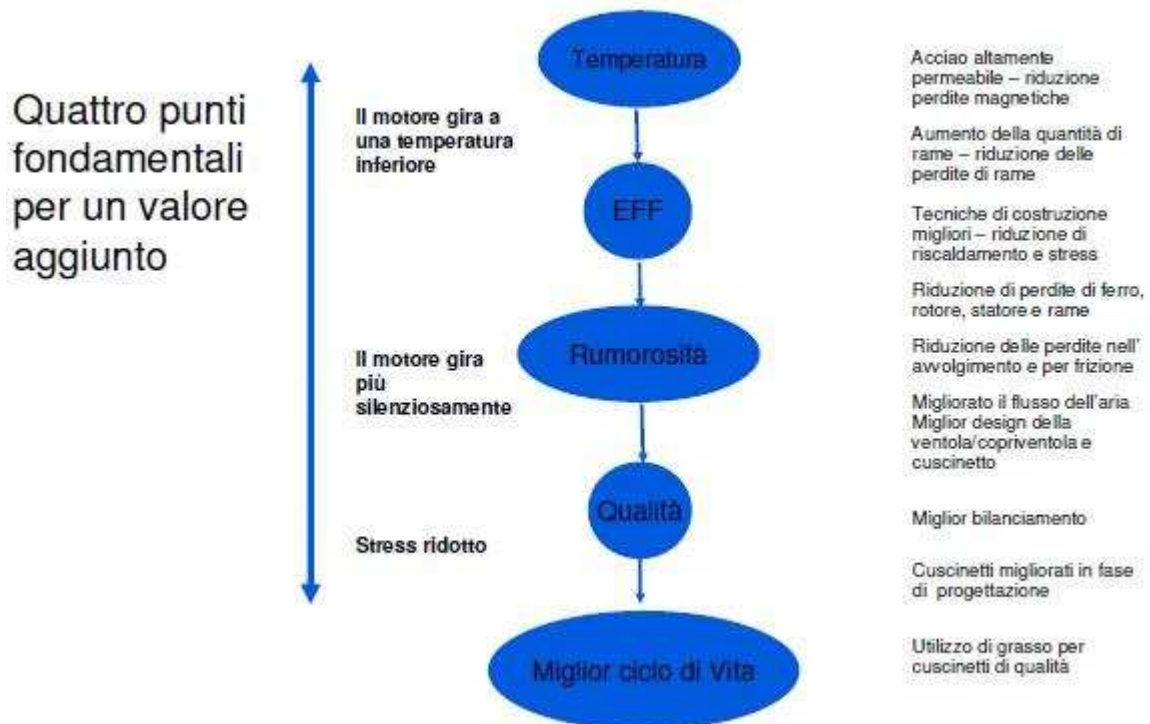
Tali accorgimenti comportano inoltre un minor sviluppo di calore nel motore e rendono pertanto possibile l'impiego di ventole di raffreddamento più piccole e quindi con minori perdite meccaniche e consumi elettrici inferiori. Si sono così ottenuti motori che a parità di potenza hanno un rendimento migliore di quello standard ed una curva del rendimento più piatta, tale cioè da garantire, anche in caso di spostamenti del carico, un rendimento sempre vicino a quello ottimale.



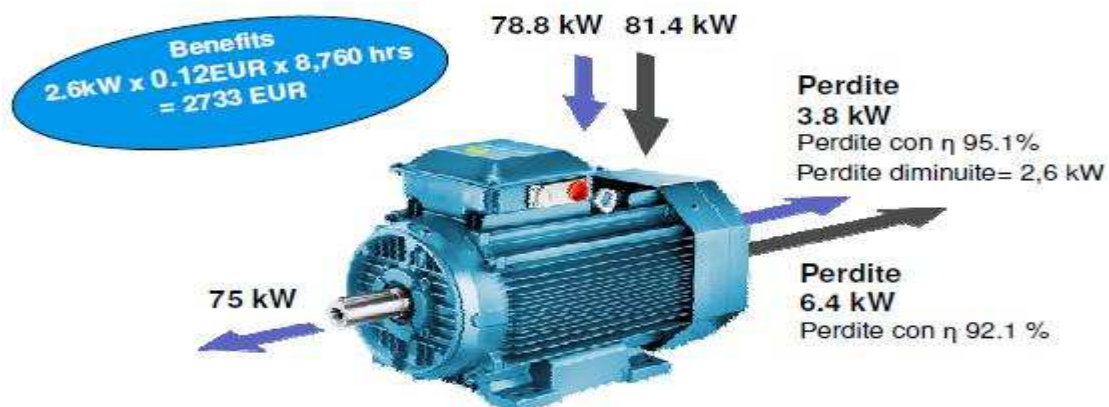
Alta efficienza non vuol dire solo risparmiare nei costi operativi e guadagnare in competitività, vuol dire anche:

- Maggiore durata del motore;
- Maggiore affidabilità;
- Minore manutenzione.

Un alto valore di efficienza significa che il motore gira ad una temperatura inferiore allungando di conseguenza la durata dei cuscinetti e dell'avvolgimento. Una riduzione di 15K nella temperatura dei cuscinetti, raddoppia le ore di intervallo per l'ingrassaggio. Un effetto positivo si può notare quindi sul ciclo di vita del motore stesso:



Nell'esempio seguente si mette in evidenza come un aumento di efficienza del 3% in un motore con caratteristiche evidenziate in figura, mi porti ad avere una riduzione drastica delle perdite (intorno al 40%), un risparmio di euro annui spesi e quindi anche una riduzione di tonnellate di CO₂ emesse:



Se l'efficienza aumenta del 3% la riduzione delle perdite è del 40%

Risparmio 2733 EUR all' anno = 11 tonnellate di CO₂ (0,5kg/kwh)

Altri interventi per realizzare una riduzione dei consumi elettrici, sono gli azionamenti a velocità variabile, consistenti (come detto in precedenza), in **inverter**, i quali modulano la frequenza di alimentazione del motore e quindi la sua velocità in funzione del carico; servono per modificare la velocità di un motore elettrico che di regola è invece fissa e dipende dal numero di poli del motore. Questi dispositivi possono quindi essere utilizzati vantaggiosamente per variare, ad esempio, la portata di una pompa o di un ventilatore, a differenza dei tradizionali sistemi di controllo (come le valvole di strozzamento, serrande, ecc); i regolatori di frequenza agiscono andando a variare, in funzione del bisogno, la velocità del motore e conseguentemente la potenza elettrica da esso assorbita, quindi piccole diminuzioni della velocità del motore comportano significative riduzioni della potenza assorbita e quindi anche del consumo energetico generato.

U'altro tipo di interventi per realizzare una riduzione dei consumi di elettricità legati al funzionamento dei motori elettrici riguardano i **dispositivi di trasmissione**, impiegati per trasmettere il moto dal motore elettrico alla macchina operatrice qualora non vi sia accoppiamento diretto tra i vari alberi; questa situazione è molto frequente in quanto l'accoppiamento diretto è spesso impedito da problematiche di posizionamento e dalla diversità di rotazione tra motore e macchina. I sistemi di trasmissione non sono in grado di trasmettere alla macchina operatrice tutta la potenza fornita dal motore e quindi la scelta dei sistemi a maggior rendimento, si traduce in un contenimento delle perdite e dei consumi di energia. Le cinghie trapezoidali sono uno dei sistemi di trasmissione più utilizzati in funzione della loro praticità e basso costo, ma il loro rendimento di trasmissione, inizialmente piuttosto elevato (attorno al 97%), decade piuttosto rapidamente con il funzionamento a causa dell'usura e della perdita di aderenza delle cinghie, rendendo necessari, pena grosse dispersioni di energia, frequenti interventi di manutenzione e regolazione. L'utilizzo di sistemi di distribuzione con rendimenti elevati e costanti nel tempo, ad esempio le cinghie dentate, (le quali, poiché non slittano, sono da accoppiare ad una frizione se si vuole che la macchina operatrice si blocchi in caso di ingresso di un corpo estraneo), consente di ovviare a tali problematiche e di ridurre i consumi di energia. Nella tabella di pagina seguente sono riportati i rendimenti minimi dei

motori elettrici ad alta efficienza in funzione della loro potenza nominale, per gamma di potenze che va da 1,1 kW a 90 kW con 2 o 4 poli:

Potenza nominale (kW)	Rendimenti motori a 2 poli (%)	Rendimenti motori a 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	95,0

La manutenzione dei motori elettrici ad alta efficienza è comunque analoga a quella dei motori standard.

5.3 Analisi di valutazione di convenienza di un motore elettrico alta efficienza

Come detto in precedenza, circa il 74% di tutti i consumi industriali di elettricità sono dovuti ai motori elettrici, pertanto interventi che portano ad incrementare l'efficienza di tali dispositivi producono una ricaduta di risparmio significativa. Praticamente in tutte le applicazioni ed i processi industriali, nonché nei sistemi di condizionamento e ventilazione e nei circuiti idraulici connessi a ventilatori e pompe, sono presenti motori elettrici che possono essere sostituiti da motori elettrici ad alta efficienza, previa specifica *analisi di valutazione di convenienza*, che deve considerare vari aspetti quali:

- la situazione dei motori elettrici esistenti (in caso di rottura di un motore elettrico è possibile intervenire con specifiche riparazioni come riavvolgimenti, che, pur rimettendo il dispositivo in funzione, comportano una perdita di rendimento che può andare dallo 0,5% al 4%);

- la durata di funzionamento;
- il coefficiente di carico (ovvero la percentuale rispetto al pieno carico alla quale lavora il motore);
- il costo di un motore elettrico ad alta efficienza, il costo di un motore elettrico tradizionale e i costi di riparazione.

La semplice comparazione del costo di acquisto sarebbe fuorviante in quanto, analizzando il costo di un motore elettrico nell'arco della sua intera vita, il costo di acquisto rappresenta meno del 2% mentre la restante parte è rappresentata quasi interamente dal consumo di elettricità (i costi di manutenzione sono infatti poco significativi in quanto i motori elettrici sono dispositivi molto affidabili). Il sovrapprezzo legato alla scelta di un motore elettrico ad alta efficienza viene quindi coperto nel tempo dal risparmio di energia elettrica che questo dispositivo consente di ottenere. Il tempo necessario a rientrare dell'investimento dipende dal valore dell'investimento fatto e dall'entità del risparmio energetico prodotto (valore direttamente collegato alla potenza del macchinario, alla sua efficienza e alle ore di utilizzo). L'adozione dei sistemi di controllo della frequenza (inverter), consentono di ridurre in modo considerevole il consumo energetico soprattutto nel campo delle frequenze elevate. Le applicazioni più convenienti interessano ventilatori e pompe, dove è possibile realizzare risparmi energetici dell'ordine del 35%. Le applicazioni su compressori, nastri trasportatori e altri dispositivi interessati da variazioni di carico, offrono entità di risparmio inferiori, del 17% circa. Pur ribadendo la necessità di procedere a valutazioni accurate di fattibilità dell'investimento, mediante le formule riportate a pagina seguente per calcolare lo specifico tempo di rientro dell'investimento per l'installazione di un motore elettrico ad alta efficienza nei vari casi possibili, possono essere fornite delle utili indicazioni di massima:

1. per motori di piccola taglia (sotto i 10 kW) sono sufficienti poche migliaia di ore di funzionamento per rendere conveniente la

sostituzione di un motore standard fuori uso con un nuovo motore elettrico ad alta efficienza rispetto alla riparazione del motore standard. Il numero di ore di funzionamento oltre il quale si realizzano condizioni di convenienza aumenta all'aumentare della potenza del motore;

2. in molte realtà i motori di piccola potenza possono essere convenientemente sostituiti con motori ad alta efficienza prima di aspettare che arrivino a rottura.

Situazione specifica	Formula per il calcolo del tempo di rientro dell'investimento	Significato dei termini
Sostituzione di un motore elettrico tradizionale in caso di rottura	$T = \frac{(C_{hem} - C_{riav})}{\left(P \cdot Cc \cdot h \cdot c \cdot \left(\frac{1}{eff_{std}} - \frac{1}{eff_{hem}} \right) \right)}$	<p>T = tempo di rientro dell'investimento</p> <p>C_{hem} = costo motore alta eff. (€)</p> <p>C_{std} = costo motore standard (€)</p> <p>C_{riav} = costo del riavvolgimento (€)</p>
Sostituzione di un motore elettrico tradizionale funzionante	$T = \frac{(C_{hem})}{\left(P \cdot Cc \cdot h \cdot c \cdot \left(\frac{1}{eff_{std}} - \frac{1}{eff_{hem}} \right) \right)}$	<p>Cc = coeff. di carico</p> <p>h = durata di funzionamento (ore/anno)</p> <p>c = costo dell'energia elettrica (€/kWh)</p>
Acquisto di un nuovo motore	$T = \frac{(C_{hem} - C_{std})}{\left(P \cdot Cc \cdot h \cdot c \cdot \left(\frac{1}{eff_{std}} - \frac{1}{eff_{hem}} \right) \right)}$	<p>eff_{std} = rendimento nominale motore standard</p> <p>eff_{hem} = rendimento nominale motore alta efficienza</p> <p>eff_{riav} = perdita rendimento per riavvolgimento</p>

Queste considerazioni non tengono conto di altri possibili vantaggi economici realizzabili mediante l'installazione di motori elettrici ad alta efficienza (es. forme di incentivo fiscale o altro) ma considerano solo il risparmio energetico ottenibile. A pagina seguente sono riportati alcuni valori

indicativi di risparmio energetico ottenibili con l'utilizzo di motori elettrici ad alta efficienza in sostituzione di un motore standard, in funzione della potenza del motore e delle ore di funzionamento:

potenza kW	efficienza motore standard	risparmi in Tep/anno			risparmi in kWh/anno			risparmi in €/anno		
		ore annue di funzionamento del motore			ore annue di funzionamento del motore			ore annue di funzionamento del motore		
		2000	4000	7680	2000	4000	7680	2000	4000	7680
1,1	74,2%	0,06	0,11	0,22	255,00	509,00	978,00	45,90	91,62	176,04
1,5	76,5%	0,06	0,13	0,25	294,00	588,00	1129,00	52,92	105,84	203,22
2,2	79,0%	0,08	0,16	0,30	358,00	716,00	1374,00	64,44	128,88	247,32
3	80,6%	0,10	0,19	0,37	434,00	869,00	1668,00	78,12	156,42	300,24
4	82,2%	0,11	0,22	0,43	504,00	1009,00	1936,00	90,72	181,62	348,48
5,5	83,7%	0,13	0,27	0,51	608,00	1216,00	2334,00	109,44	218,88	420,12
7,5	85,0%	0,16	0,33	0,63	749,00	1498,00	2877,00	134,82	269,64	517,86
11	86,9%	0,19	0,38	0,72	855,00	1711,00	3285,00	153,90	307,98	591,30
15	87,9%	0,24	0,48	0,92	1087,00	2175,00	4176,00	195,66	391,50	751,68
18,5	88,5%	0,28	0,55	1,06	1258,00	2517,00	4832,00	226,44	453,06	869,76
22	89,0%	0,32	0,63	1,22	1442,00	2883,00	5535,00	259,56	518,94	996,30
30	90,3%	0,34	0,68	1,31	1551,00	3101,00	5954,00	279,18	558,18	1071,72
37	90,9%	0,39	0,77	1,49	1761,00	3522,00	6763,00	316,98	633,96	1217,34
45	91,4%	0,43	0,87	1,66	1966,00	3932,00	7550,00	353,88	707,76	1359,00
55	92,0%	0,46	0,92	1,77	2094,00	4189,00	8042,00	376,92	754,02	1447,56
75	92,6%	0,59	1,19	2,28	2694,00	5388,00	10345,00	484,92	969,84	1862,10
90	92,9%	0,71	1,41	2,71	3212,00	6425,00	12335,00	578,16	1156,50	2220,30

In questo esempio si è assunto per i calcoli, un coefficiente di carico pari a 0,75 e che il costo dell'energia sia pari a 0,18 €/kWh. Per quanto riguarda le considerazioni ambientali, le apparecchiature descritte, portando ad una riduzione dei consumi di energia elettrica, determinano ricadute ambientali positive in termini di contenimento delle emissioni di gas serra e di riduzione del consumo di fonti non rinnovabili ascrivibili alle centrali termoelettriche che alimentano la rete.

Capitolo 6

Il nuovo pacchetto ad alta efficienza costituito da motori sincroni a riluttanza e inverter

6.1 Macchina sincrona a riluttanza (RSM)

Costruttivamente i motori sincroni a riluttanza presentano delle strutture rotoriche anisotrope e prive di magneti, a laminazione convenzionale (ortogonale all'asse di rotore) o a laminazione assiale, costituite dall'alternanza di segmenti di materiale magnetico e amagnetico. Considerando una coppia d'assi ortogonali d-q in modo tale che l'asse d coincida con la direzione di minima riluttanza, si definisce il "*rapporto di anisotropia*" il valore L_d/L_q . Nel caso di rotore a laminazione assiale, tale rapporto aumenta al crescere del numero di segmenti. La coppia elettromagnetica sviluppata dalla macchina è tanto maggiore quanto più alto è il rapporto di anisotropia. Bisogna tuttavia tener presente che, dal punto di vista tecnologico, non è conveniente realizzare rotori a laminazione assiale con un numero di segmenti troppo grande e pertanto, generalmente, si ottengono valori di L_d/L_q compresi tra dieci e venti. Il motore sincrono a riluttanza può offrire, almeno teoricamente, prestazioni simili a quelle della macchina in corrente continua ad eccitazione indipendente, e cioè:

- funzionamento nella regione "*a coppia costante*", ottenuto regolando la componente " i_q " della corrente di statore lungo l'asse q e mantenendo costante la componente " i_d " lungo l'asse d;
- funzionamento nella regione "*a potenza costante*", realizzato regolando il flusso lungo l'asse d tramite la componente " i_d " della corrente di statore.

Tuttavia il motore sincrono a riluttanza viene di fatto utilizzato prevalentemente per il funzionamento a coppia costante, proponendosi come alternativa ai motori a magneti permanenti (in corrente continua e sincroni) per la movimentazione di tipo “assi”. È poi importante sottolineare che la particolare realizzazione del rotore a laminazione assiale gioca un ruolo essenziale sulle prestazioni del motore, per le seguenti ragioni:

- l'alto valore di L_d consente di ottenere un flusso elevato anche con una corrente “ i_d ” contenuta;
- il basso valore di L_q permette di regolare la corrente “ i_q ” a cui è legata la coppia con rapidi transitori, consentendo buone prestazioni dinamiche.

Il rotore a laminazione assiale inoltre, se costruito con materiali magnetici pregiati, può essere considerato privo di perdite, consentendo ottimi rendimenti e semplificando i problemi di raffreddamento. La sezione di potenza dell'azionamento è costituita, come di consueto, dal raddrizzatore a diodi e da un inverter con tecnica di controllo P.W.M. Anche in questo caso il trasduttore di posizione (resolver o encoder), viene utilizzato per ricostruire il segnale di retroazione della velocità. Per ottenere elevati valori del rapporto L_d/L_q , sono stati ideati rotori ad “anisotropia distribuita”. Questi rotori possono essere usati con differenti tipi di avvolgimenti di statore e per differenti tipi di forma d'onda delle correnti di alimentazione, per applicazioni a velocità variabile e per avviamenti in linea, originando un numero elevato di tipologie di motori e di azionamenti. Conseguentemente, le macchine sincrone a riluttanza ed i relativi azionamenti possono essere classificate in base a:

- configurazione di rotore:
 - I. macchine sincrone a riluttanza con gabbia di rotore per avviamento asincrono;
 - II. macchine sincrone senza gabbia per azionamenti a frequenza variabile.

- tipo di avvolgimento di statore;
- tipologia del sistema di controllo delle correnti di alimentazione di statore.

Per quanto riguarda il rotore, la sua distribuzione anisotropa può ottenersi in due maniere, o orientando i cristalli del metallo ancora fuso, per mezzo di un campo magnetico, oppure mediante una tecnica costruttiva, tale da rendere il rotore, nel suo complesso anisotropo. Più spesso si usano entrambi i metodi per esasperare tali caratteristiche, tutto a vantaggio della coppia di riluttanza. I motori RSM con gabbia rotorica sono usati per tutte le applicazioni ove è richiesta una partenza in linea, con tensione e frequenza di alimentazione costanti. Il rotore può presentare una barriera per il flusso di statore, realizzata con materiali paramagnetici, come l'alluminio, disposta trasversalmente alle linee di flusso in maniera da impedirne la penetrazione all'interno. La forma assunta da queste barriere può variare in base alle caratteristiche desiderate. Questo tipo di rotore può avere una laminazione convenzionale o assiale; solitamente come materiale paramagnetico si utilizza l'alluminio perché assolve alla duplice funzione di barriera per il flusso di statore e di conduttore per la realizzazione della gabbia di rotore, qualora si voglia ottenere un motore, alimentato dalla rete a tensione e frequenza costanti, in grado di auto-avviarsi (avviamento asincrono).

Il rotore a laminazione convenzionale è costituito da lamierini opportunamente isolati fra loro con fogli o, più comunemente, con vernici isolanti, disposti trasversalmente alla lunghezza dell'albero e aventi opportune sagome che permettono l'alloggiamento della barriera di flusso ed eventualmente della gabbia.

Il rotore a laminazione assiale o rotore ALA (Axially Laminated Anisotropic) presenta pacchi di lamierini di materiale ferromagnetico, con interposti fogli di alluminio dello spessore di 1-5 mm, di dimensione e forma opportuna, disposti parallelamente (assialmente) all'albero del rotore, e che assolvono alla duplice funzione di barriera di flusso e di gabbia rotorica. A seconda di come vengono sagomati i lamierini, si ottengono rotor con un numero diverso di coppie polari n_p . Nei motori per azionamenti a frequenza variabile, la gabbia rotorica è inutile e gli schemi si semplificano. Nel caso di laminazione convenzionale la costituzione del rotore è simile a quella dei motori muniti di gabbia, con

la differenza che mancano gli anelli di chiusura laterali della gabbia e le cave occupate dall'alluminio sono lasciate vuote o riempite con materiale isolante. Per ridurre ulteriormente il campo magnetico lungo l'asse in quadratura, possono essere inseriti magneti permanenti in ferrite al posto degli spazi isolanti; in questo modo si riesce ad ottenere un considerevole campo di variazione di velocità a potenza costante. Affinché il flusso emanato dai magneti permanenti lungo l'asse q possa determinare una riduzione del flusso di statore lungo l'asse q , la corrente i_{sq} non deve cambiare segno. Per invertire la velocità della macchina, è di conseguenza necessario, cambiare segno alla componente diretta i_{sd} . Poiché l'induttanza lungo l'asse d è molto maggiore di quella lungo l'asse q , il tempo impiegato dalla i_{sd} a cambiare segno è elevato e di conseguenza la dinamica sarà molto più lenta. La scelta di un motore RSM con rotore anisotropo a laminazione convenzionale o assiale è un compromesso tra costi e prestazioni richieste al motore, che dipendono fortemente dalle applicazioni. I motori con rotore ALA sono preferibili perché hanno un miglior rendimento e un maggior fattore di potenza.

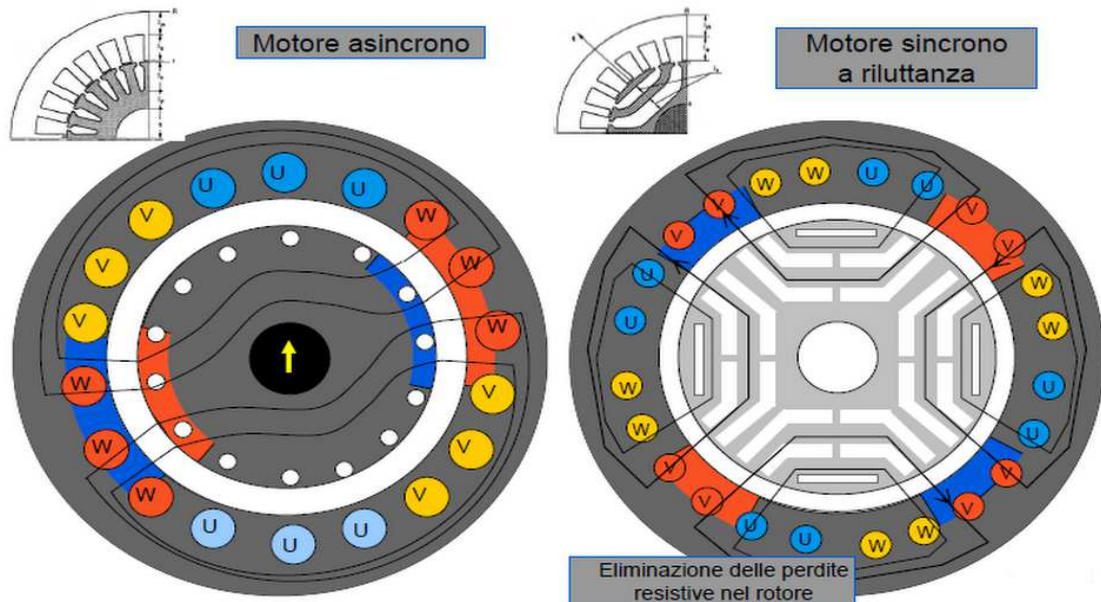
Per quanto riguarda lo statore, è normalmente costituito da un nucleo ferromagnetico laminato, con cave chiuse o semichiusate uniformemente distribuite. La configurazione con cave aperte è utilizzata solitamente per ospitare un avvolgimento polifase concentrato, formato da una matassa per polo e per fase. Le cave aperte permettono facilmente l'inserzione delle matasse e possono essere usate per motori bifase o trifase di piccola potenza, o per motori polifase (5, 7 o 9 fasi) con coppie elevate a bassa velocità. A causa delle cave aperte il flusso al traferro può contenere un numero elevato di armoniche, non tollerabile da alcuni azionamenti a causa delle elevate coppie pulsanti conseguenti. In questi casi si ricorre alle cave chiuse o semichiusate. Per applicazioni in cui sono richieste elevate potenze o coppie, lo statore è realizzato con cave aperte o semichiusate le quali, dopo aver inserito le matasse, vengono chiuse con opportune zeppe.

6.2 Motori sincroni a riluttanza e inverter ad alta efficienza

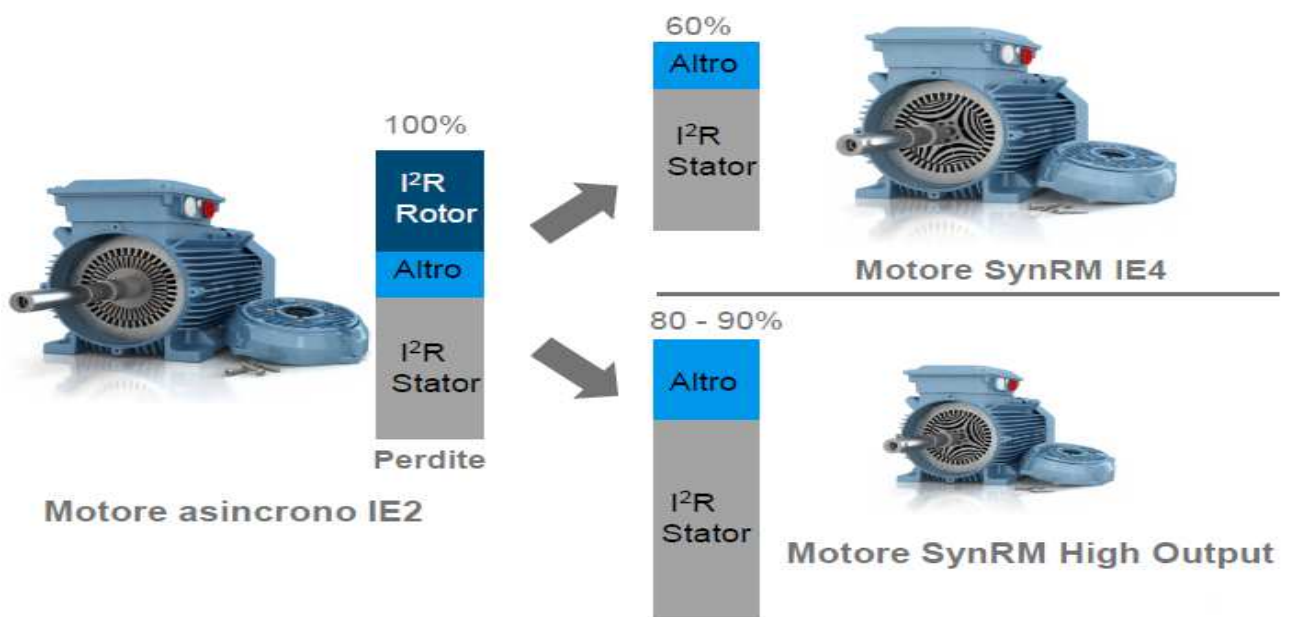
Il nuovo pacchetto ad alta efficienza costituito da motori sincroni a riluttanza e inverter, è una soluzione che rappresenta una novità che combina le migliori componenti ad alta efficienza

energetica e customer value. Il 22 dicembre 2011, **ABB**, gruppo leader nelle tecnologie per l'energia e l'automazione, ha vinto l'Automation Award, (riconoscimento più importante nel settore dell'automazione tedesca), istituito dalla rivista tedesca AUTOMATION, che è divenuta l'Oscar nel settore dell'automazione industriale. Una giuria indipendente costituita da specialisti ha nominato dieci prodotti tra quelli candidati. Tra questi, i visitatori hanno potuto scegliere l'innovazione vincente durante la manifestazione tenutasi a Norimberga a fine novembre 2011. Questo Gruppo, è leader nelle tecnologie per l'energia e l'automazione che consentono alle utility e alle industrie di migliorare le loro performance, riducendo al contempo l'impatto ambientale; le società del Gruppo operano in oltre 100 Paesi e impiegano circa 145.000 dipendenti. ABB ha esposto il rivoluzionario motore sincrono a riluttanza e inverter per la prima volta alla fiera di Hannover 2011, dove ha riscontrato un enorme interesse; le principali caratteristiche del nuovo motore rispondono a innovazione nel design del rotore, che non è avvolto, al contrario del tradizionale design dei motori sincroni. ABB ha quindi lanciato una versione di motori sincroni a riluttanza ad elevata efficienza, basata sulla tecnologia **SynRM**, dei suoi più recenti azionamenti; si tratta delle soluzioni **IE4** (Super Premium Efficiency), che comprendono i motori sincroni a riluttanza (SynRM) e i relativi drive industriali. I nuovi IE4, progettati per ottimizzare le prestazioni in termini di efficienza e affidabilità e definiti da ABB come "Super Premium Efficiency", sono particolarmente adatti per applicazioni con ventole e pompe. I motori e il pacchetto dei drive industriali, sono disponibili per una gamma di potenza che va dagli **11 kW** ai **315 kW**. I primi modelli di motori SynRM erano stati presentati nel 2011 e negli anni successivi, ancora una volta alla fiera SPS/IPC/Drive di Norimberga, sono stati introdotti dei modelli più recenti e innovativi. Questi motori a riluttanza sono caratterizzati da un rotore innovativo accoppiato a uno statore convenzionale; per quanto riguarda il design del rotore del motore sincrono a riluttanza SynRM, si ha che i lamierini di acciaio, sono lavorati in accordo ad una geometria dedicata; il corpo rotore presenta una struttura semplice senza gabbia e senza magneti; e il rotore costituito unicamente da lamierini impilati presenta quindi una carcassa e una costruzione meccanica del tutto analoga a quella di un motore

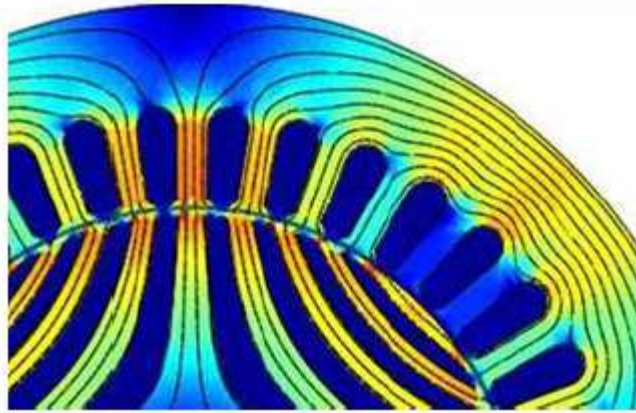
asincrono. Diversamente da quanto accade nei motori sincroni tradizionali, il rotore è quindi privo di avvolgimento e questo implica che le perdite di potenza dovute al rotore siano virtualmente eliminate e questa risulta proprio la chiave di successo di questi motori.



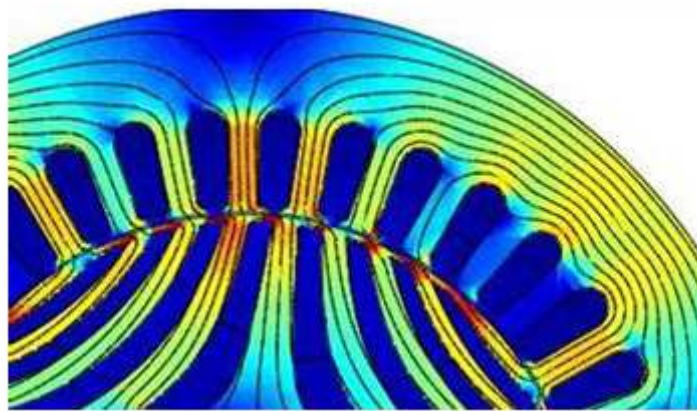
Questo non solo incrementa l'efficienza, ma permette anche al rotore di funzionare dissipando meno calore, mantenendo bassa la temperatura dei cuscinetti ed incrementandone l'affidabilità. Il nuovo rotore quindi riduce sensibilmente le perdite resistive e mantiene una temperatura inferiore rispetto ai modelli convenzionali:



In assenza di carico, le linee di flusso viaggiano dritte attraverso il traferro. Il fenomeno della riluttanza fa sì che il rotore cerchi di rimanere centrato in questa posizione:



Applicando un carico, il rotore si sposta dalla posizione centrata e forza le linee di flusso a muoversi lungo il traferro. Le linee di flusso tra statore e rotore si comportano come un elemento in gomma, generando una coppia:



Grazie alla tecnologia con cui è realizzato il rotore, questi motori senza magneti, possono puntare a ottenere le prestazioni di un motore a magneti permanenti con la facilità di esercizio e i costi ridotti dei motori a induzione. Questi motori seguono le stesse combinazioni di dimensioni e prestazioni in uscita dei motori a induzione, rendendo così più facile la sostituzione di un motore esistente con un prodotto SynRM a più alta efficienza; di conseguenza, gli utilizzatori di questi prodotti potranno aggiornare i loro sistemi, migliorando l'efficienza, senza bisogno di effettuare costose modifiche

meccaniche. I motori SynRM, facendo sempre riferimento al gruppo ABB, sono corredati dei relativi drive industriali ACS850 con caricato il software dedicato:

Motori disponibili



(es. M3BL)

+

Inverter disponibili



(es. ACS 850)

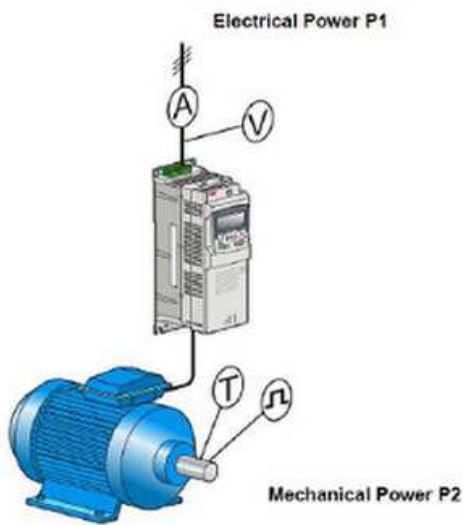
+

Applicazioni supportate

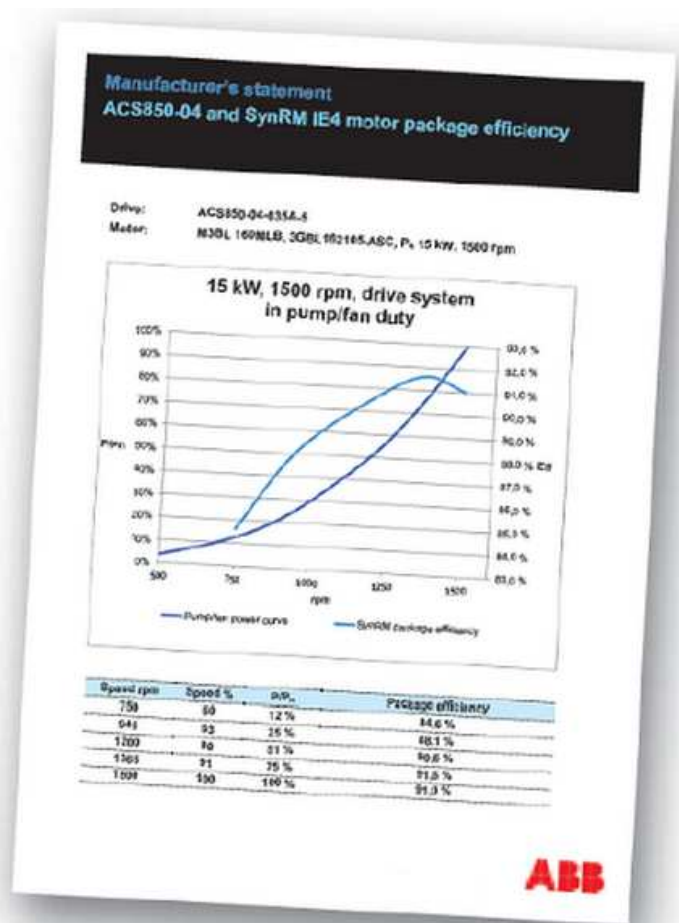


ABB, come tutti gli altri gruppi leader, è in grado di fornire le curve di efficienza verificate di tutto il pacchetto motore ed azionamento, con la copertura completa di tutto l'intervallo di velocità:

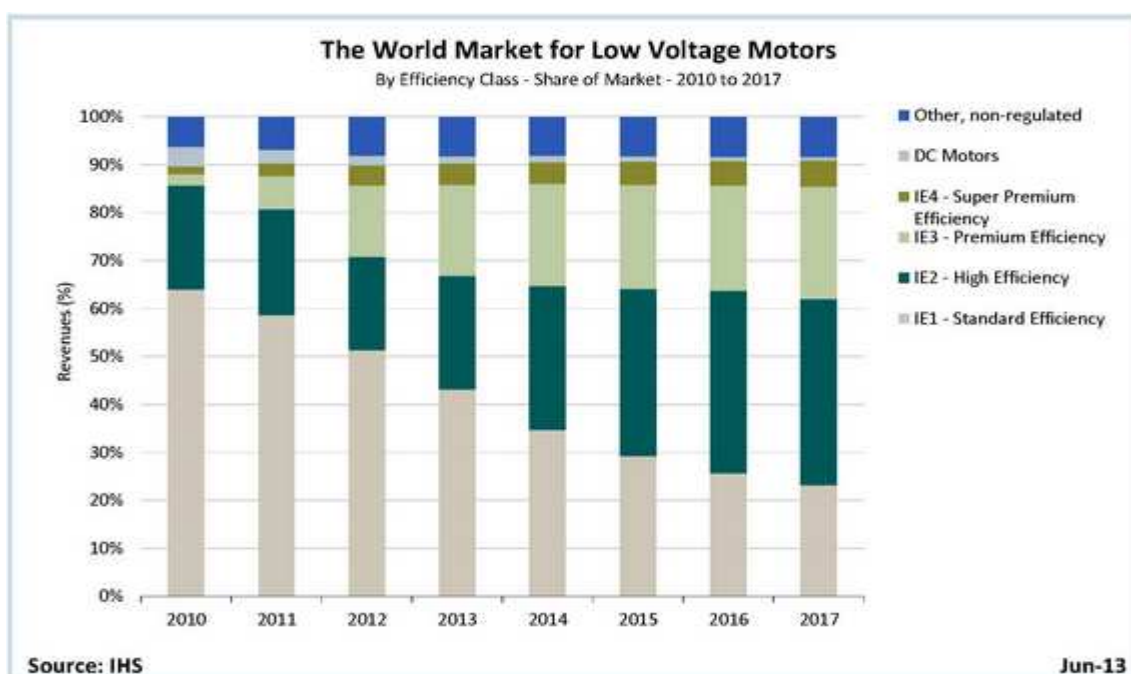
ABB fornisce la curva di efficienza del pacchetto



Efficiency $\eta = P2/P1$

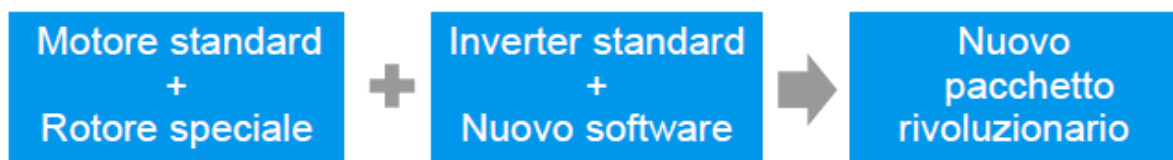


Gli utilizzatori di questi prodotti potranno quindi calcolare il consumo energetico delle loro attrezzature, senza essere limitati da dati relativi a pochi carichi specifici. ABB è riuscita a sfruttare questa tecnologia per raggiungere maggior densità di potenza e ottimi risultati sotto il profilo del risparmio energetico. Il 22 luglio 2013, ABB, ha rafforzato la propria posizione di leader nei motori in bassa tensione e inoltre continua a crescere più velocemente del mercato, come riportato nell'ultimo rapporto della società di analisi IHS, " The World Market for Low Voltage Motors ", Edizione 2013. IHS prevede che, entro il 2017, il mercato dei motori a bassa tensione supererà i 23 miliardi di dollari, trainato dai requisiti normativi che richiedono una maggiore efficienza. Nel 2012, il giro d'affari globale è stato di 14,6 miliardi di dollari, con oltre 48 milioni di unità installate e, secondo IHS, la quota di mercato di ABB è salita di 1 punto percentuale, raggiungendo il 14%. Dopo l'acquisizione di Baldor nel 2011, ABB è diventata leader del settore e da allora ha migliorato il proprio posizionamento nel mercato grazie a costanti investimenti, destinati allo sviluppo di motori ad alta efficienza e al miglioramento dell'assistenza ai clienti. Negli ultimi due anni, ABB ha incrementato di oltre il 26% le proprie vendite di motori in bassa tensione:



Recentemente, ABB ha introdotto, come detto in precedenza, i nuovi motori sincroni ad alta efficienza basati sul principio della riluttanza magnetica; questi motori sono senza avvolgimenti del

rotore e senza le conseguenti perdite energetiche; sono in grado di raggiungere i livelli di efficienza IE4, senza necessità di magneti permanenti e se paragonati ai motori IE2, le perdite di energia si sono ridotte del 40%. Il motore è dotato di un convertitore di frequenza a velocità variabile dedicato e insieme costituiscono un pacchetto con un software che consente di operare sempre nel punto ottimale della curva di potenza per soddisfare l'effettiva domanda. Quindi questo pacchetto offre un controllo di processo efficiente, oltre ad un uso ottimale dell'energia; inoltre è possibile raggiungere le prestazioni di un motore a magneti permanenti senza l'uso dei magneti. Il nuovo motore sincrono a riluttanza ABB offre anche una maggiore densità di potenza, generando la stessa quantità di energia con un telaio fino a due taglie più piccolo. Dal punto di vista del service, ABB ha sviluppato una sofisticata linea di strumenti di monitoraggio per controllare lo stato di corrente e analizzare il ciclo di vita previsto per il motore o il generatore. Questi strumenti consentono di accedere ai dati importanti del motore o del generatore sia in loco che da remoto tramite un server sicuro. Con questa nuova tecnologia per applicazioni industriali, furono resi disponibili due nuovi pacchetti motore e convertitore di frequenza:



1. **Pacchetto SynRM High-Output:** Alta densità di potenza e dimensioni compatte; questo pacchetto, costituito da un motore sincrono ad alta performance combinato con un convertitore di frequenza, è concepito per massimizzare le prestazioni;

- Costruzione a potenza maggiorata, fino a due taglie in meno rispetto ai motori asincroni, senza compromettere il rendimento;
- Motori più compatti e leggeri per macchine a costi competitivi;

- Perdite ridotte fino al 10-20% rispetto alla classe di efficienza IE2.

2. **Pacchetto SynRM IE4 Super Premium Efficiency:** Classe di efficienza IE4 super premium; questo pacchetto, costituito da un motore sincrono a efficienza IE4 combinato con un inverter, è progettato per massimizzare l'efficienza;

- Perdite ridotte fino al 40% rispetto alla classe di efficienza IE2;
- Intercambiabile con motori asincroni IE2 senza necessità di modifiche meccaniche.

Entrambi sono basati sulla tecnologia perfettamente collaudata del motore sincrono senza magneti permanenti. Il pacchetto comprende motore, inverter e software di controllo in una unica soluzione.

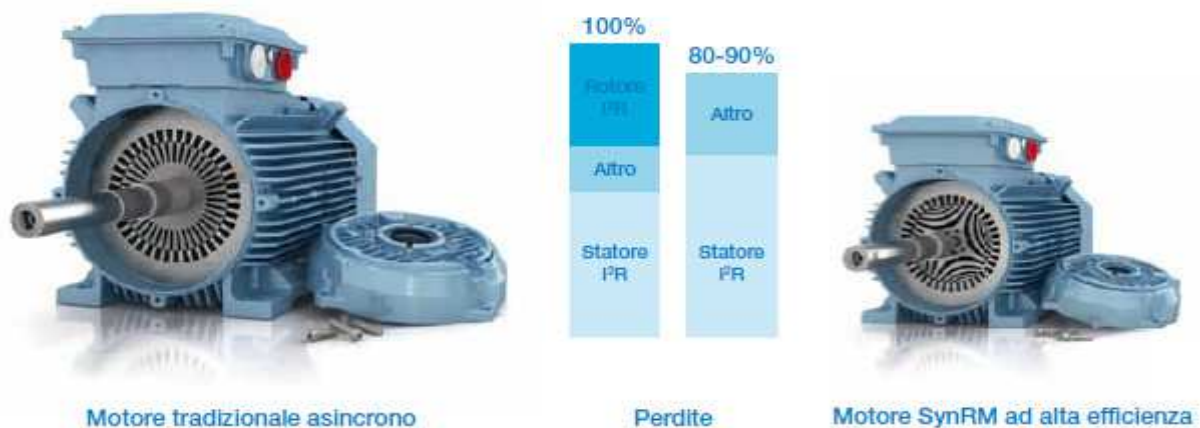
In definitiva il motore sincrono a riluttanza SynRM presenta le seguenti caratteristiche:

- Design senza magneti che combina i vantaggi della tecnologia del motore sincrono con la semplicità di utilizzo del motore asincrono tradizionale;
- Maggiore affidabilità garantita da una minore temperatura dei cuscinetti;
- Adatto per applicazioni industriali come pompe e ventilatori;
- Offerta competitiva rispetto alle tecnologie tradizionali o a nuove tecnologie alternative;
- Software avanzato per il controllo in anello aperto;
- Funzionamento esclusivamente con convertitore di frequenza, non adatto per il funzionamento diretto da rete;

- Supporto ABB disponibile in tutto il mondo.

5.2.1 Pacchetto SynRM High-Output:

I motori sincroni controllati da variatori di velocità stanno portando ad un aumento dell'efficienza energetica in molte applicazioni industriali. La caratteristica che la maggior parte delle applicazioni vorrebbero avere, è la necessità di avere un'efficienza sempre maggiore e allo stesso tempo non andare ad aumentare le richieste di manutenzione. I motori sincroni a riluttanza del gruppo ABB (spesso chiamati SynRM), impiegano il principio della riluttanza magnetica e sono fisicamente di dimensioni più piccole di un normale motore asincrono:



Quindi è possibile ottenere la stessa potenza con un motore fino a due taglie più piccolo di un motore convenzionale. Ciò consente di realizzare installazioni con pompe e ventilatori più leggere, di dimensioni inferiori ed economicamente convenienti. I motori sincroni SynRM quindi, permettono di avere una potenza di uscita raddoppiata a 3000 rpm senza necessità di installare un motore più grande. La maggior potenza del motore consente di aumentare la portata senza richiedere modifiche meccaniche del sistema. Questi nuovi motori sincroni a riluttanza, combinano la tecnologia di un rotore innovativo e di uno statore di tipo convenzionale. Si ottengono così le prestazioni di un motore a magneti permanenti, associate ai vantaggi economici, alla semplicità, alla facilità di manutenzione e all'efficienza di un motore asincrono. I motori SynRM High-Output

soddisfano o superano il rendimento dei motori asincroni in classe IE3 operanti con convertitore di frequenza. Nel comparare l'efficienza del SynRM rispetto a quello di un motore convenzionale occorre considerare il rendimento del pacchetto motore e convertitore. I pacchetti SynRM High-Output, sono già preconfigurati in termini di abbinamento motore e inverter. I pacchetti sono ottimizzati per le applicazioni con pompe e ventilatori e la gamma di potenza arriva fino a 350 kW. Per paragonare l'efficienza di un motore SynRM con altri tipi di motori, è necessario richiedere i valori di rendimento con alimentazione inverter (VSD); quindi tutti i migliori costruttori dovranno essere in grado di fornire questi dati, se non presenti nella documentazione standard. Per la prima volta, non sarà necessario stimare il consumo energetico combinato del motore e del convertitore di frequenza per una data potenza. I pacchetti motore-convertitore di frequenza SynRM vengono testati da ABB per garantire l'efficienza complessiva. Quando si paragonano i rendimenti di varie alternative, bisogna accertarsi di valutare il rendimento dell'intero pacchetto e di tutte le velocità alle quali dovrà operare. L'idea per realizzare questi motori è stata semplice, in quanto è stato sufficiente prendere uno statore convenzionale con tecnologia collaudata e un rotore con un design innovativo e totalmente nuovo; quindi, combinarli con uno dei migliori convertitori di frequenza industriali, su cui è caricato il nuovo software specificamente progettato. Infine, si va ad ottimizzare l'intero pacchetto per le applicazioni per pompe e ventilatori. Il nuovo rotore non prevede la presenza di magneti o avvolgimenti e, pertanto, è praticamente immune da perdite di potenza e non si scalda. ABB ha convertito questo vantaggio termico in una densità di potenza elevata, accoppiata a un alto rendimento. Il risultato è una potenza molto alta, un design compatto e un basso consumo energetico, soprattutto nelle operazioni a velocità variabile con carico parziale. I guasti del cuscinetto sono responsabili di circa il 70% dei fermi non pianificati del motore. Il nuovo motore ABB ha una bassa temperatura operativa del cuscinetto, il che ne estende la vita utile e gli intervalli di manutenzione, con una conseguente riduzione dei costi di manutenzione e un miglioramento dell'affidabilità. Anche nel caso in cui si renda necessaria la sostituzione del cuscinetto, non vi sarà l'interferenza di forze magnetiche, a differenza di quanto accade in un motore a magneti

permanenti, e, pertanto, la sostituzione sarà un'operazione semplice e veloce, come in un motore sincrono. Per quanto riguarda le caratteristiche principali del motore sincrono a riluttanza SynRM High-Output, possiamo dire che:

- Motore potente, ma compatto, di dimensioni ridotte fino a due taglie rispetto a un motore convenzionale, con tutti i vantaggi di un design a ingombro ridotto;
- Codici delle varianti e dati costruttivi meccanici basati sulle prestazioni di processo degli affidabili motori con carcassa in ghisa M3BL 160-315, convenzionali ma innovativi;
- Nessun magnete, nessuna armatura;
- Offerta di prodotti competitivi sia rispetto alle tecnologie tradizionali che alle più recenti;
- Maggior affidabilità determinata da temperature inferiori dei cuscinetti;
- Miglior efficienza rispetto ai motori asincroni convenzionali con alimentazione inverter.

I nuovi inverter ABB supportano il software di controllo per motori sincroni a riluttanza. La prima famiglia ad essere equipaggiata con il nuovo software è la **ACS850**; per quanto riguarda le caratteristiche principali del convertitore ACS850, usato con questi motori sincroni a riluttanza ad alta efficienza, possiamo dire che:

- La tensione di alimentazione trifase va dai 380 V fino ai 500 V, a 50 Hz e 60 Hz;

- Metodo di controllo ABB DTC, Direct Torque Control;
- Nuovo codice variante +N7502 per il firmware di controllo per motori SynRM (da ordinare per ACS850);
- Struttura modulare; si paga solo per le opzioni necessarie. Ampia disponibilità di scelta;
- Controlla qualsiasi motore; lo stesso convertitore di frequenza può gestire motori asincroni, a magneti permanenti e SynRM e, pertanto, quando necessario, lo si potrà utilizzare su altri motori;
- Modulo di memoria; è possibile regolare con precisione tutte le impostazioni del convertitore e memorizzarle nel modulo di memoria. Il modulo di memoria contiene tutte le informazioni necessarie per la programmazione del convertitore di frequenza e può essere installato in loco, da chiunque, in un nuovo convertitore. Il modulo di memoria è più piccolo di una busta:



- Design sottile; il convertitore è stato progettato per occupare uno spazio minimo all'interno dell'armadio apposito;

- Impostazione semplice, come quella per i motori asincroni; sarà sufficiente inserire i parametri riportati sulla targhetta del motore, proprio come si fa per un qualsiasi motore a induzione;
- Nessuna necessità di periferiche di retroazione come encoder o sensori di posizione.

La tecnologia sincrona a riluttanza offre una migliore densità di potenza e una maggiore efficienza energetica rispetto a quelle ottenute con un motore asincrono equivalente. Questo dà due grandi vantaggi:

- I. Ingombro ridotto con un design del motore più piccolo e leggero;
- II. Disponibilità di una maggiore potenza da un motore con la stessa dimensione e lo stesso ingombro.

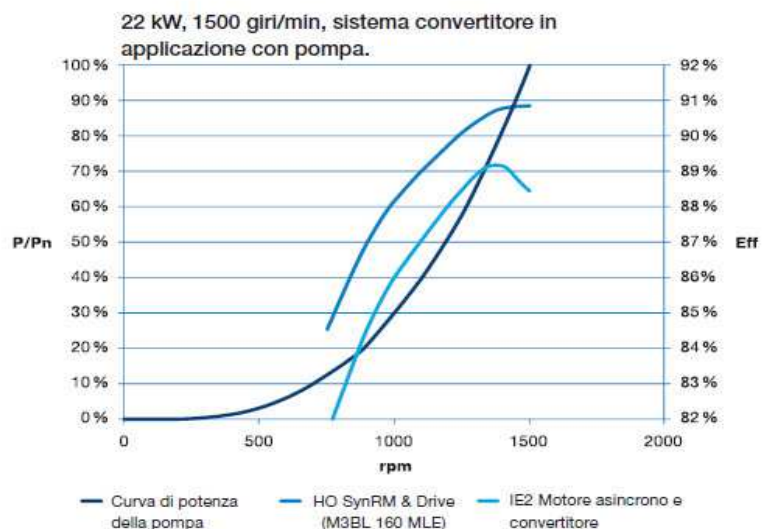
I seguenti esempi di applicazioni per pompe e ventilatori, mostrano come sia possibile sfruttare in modo vantaggioso la nuova tecnologia, sostituendo un motore asincrono ABB (IE2) con il pacchetto motore-convertitore di frequenza SynRM ad alta efficienza:



Caratteristiche del motore

Esempio di applicazione per pompe 22 kW, 1500 giri/min		
	Motore SynRM ad alta efficienza	Motore asincrono ABB IE2
Telaio	160, 174 kg	180, 222 kg
Rendimento motore	DOL: N/D, VSD: 92,8%	DOL: 92,4%, VSD: ~91,0%
		

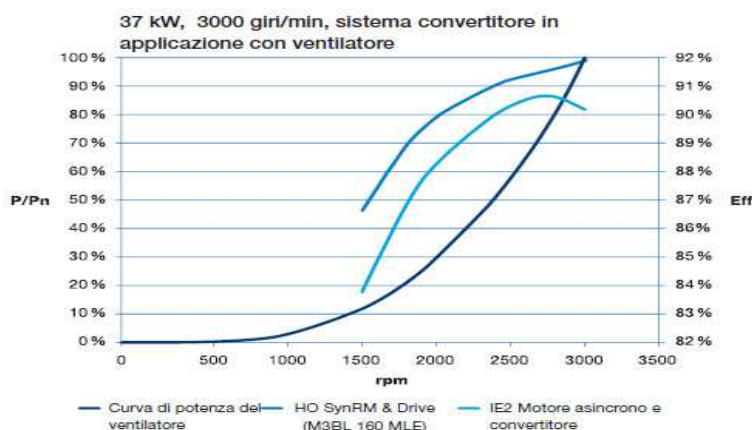
Benefici per il cliente: stessa potenza da dimensioni inferiori, oppure maggior potenza con le stesse dimensioni.

Caratteristiche del pacchetto con motore e convertitore



Esempio applicazione per ventilatori 37 kW, 3000 giri/min		
	Motore SynRM ad alta efficienza	Motore asincrono ABB IE2
Telaio	160, 157 kg	200, 298 kg
Rendimento motore	DOL: N/D, VSD: 93,7 %	DOL: 93,4%, VSD: -92,2%
	 Area libera: 65%	 Area libera: 25%

Benefici per il cliente: Ingombro ridotto del sistema
- Peso inferiore, installazione più facile



Per quanto riguarda la gamma completa di *pacchetti ad alta efficienza con motore e convertitore di frequenza per applicazioni a coppia quadratica:*

Uscita KW Modello motore Cod. prodotto			Prestazioni a velocità nominale					Prestazioni a velocità massima						Tipo di convertitore di frequenza suggerito per uso senza sovraccarico	
			Velocità giri/min	Freq. Hz	Rendim. motore 100%	Corrente A	Coppia Nm	Coppia T _{2n} /T _{1n}	Uscita kW	Velocità giri/min	Coppia Nm	Coppia T ₂ /T ₁	Inerzia J		Peso kg
3000 giri/min			Reto 400 V³												
33	M3BL 160 MLB	3GBL 162 001 _SE	3000	100	93,5	75,7	105	1,5	33	3000	88	1,2	0,05780	130	ACSe50-04-078A.5
40	M3BL 160 MLC	3GBL 162 002 _SE	3000	100	93,9	92,5	127	1,5	40	3000	106	1,2	0,07022	157	ACSe50-04-004A.5
45	M3BL 160 MLE	3GBL 162 003 _SE	3000	100	94,6	103	143	1,5	45	3000	110	1,2	0,08637	174	ACSe50-04-103A.5
62	M3BL 200 MLA	3GBL 202 001 _SE	3000	100	95,1	144	197	1,5	62	3000	154	1,2	0,24247	270	ACSe50-04-144A.5
72	M3BL 200 MLC	3GBL 202 002 _SE	3000	100	95,4	166	229	1,5	72	3000	191	1,2	0,28718	304	ACSe50-04-165A.5
97	M3BL 250 SMA	3GBL 252 001 _SE	3000	100	95,2	224	300	1,5	97	3000	300	1,2	0,40011	306	ACSe50-04-225A.5
112	M3BL 250 SMB	3GBL 252 007 _SE	3000	100	95,3	259	357	1,5	112	3000	357	1,2	0,57534	428	ACSe50-04-250A.5
125	M3BL 250 SMC	3GBL 252 002 _SE	3000	100	95,5	288	398	1,5	125	3000	398	1,2	0,62250	454	ACSe50-04-290A.5
2100 giri/min			Reto 400 V³												
25	M3BL 160 MLB	3GBL 162 007 _SE	2100	70	92,3	58,8	114	1,5	25	2500	95	1,2	0,05780	130	ACSe50-04-061A.5
31	M3BL 160 MLC	3GBL 162 008 _SE	2100	70	93,0	72,4	141	1,5	31	2500	118	1,2	0,07022	157	ACSe50-04-078A.5
39	M3BL 160 MLE	3GBL 162 009 _SE	2100	70	93,7	90,4	177	1,5	39	2500	140	1,2	0,08637	174	ACSe50-04-004A.5
44	M3BL 200 MLA	3GBL 202 005 _SE	2100	70	93,8	102	200	1,5	44	2500	168	1,2	0,24247	270	ACSe50-04-103A.5
62	M3BL 200 MLC	3GBL 202 006 _SE	2100	70	94,0	143	282	1,5	62	2500	237	1,2	0,28718	304	ACSe50-04-144A.5
88	M3BL 250 SMA	3GBL 252 005 _SE	2100	70	95,0	201	400	1,5	88	2500	336	1,2	0,40011	306	ACSe50-04-202A.5
98	M3BL 250 SMB	3GBL 252 008 _SE	2100	70	95,2	224	446	1,5	98	2500	374	1,2	0,57534	428	ACSe50-04-225A.5
115	M3BL 250 SMC	3GBL 252 004 _SE	2100	70	95,5	258	523	1,5	115	2500	439	1,2	0,62250	454	ACSe50-04-250A.5
124	M3BL 280 SMA	3GBL 282 215 _DE	2100	70	95,2	259	564	1,4	124	2400	493	1,1	0,85741	604	ACSe50-04-250A.5
134	M3BL 280 SMB	3GBL 282 225 _DE	2100	70	95,5	279	609	1,5	134	2400	533	1,2	0,90000	639	ACSe50-04-290A.5
160	M3BL 280 SMC	3GBL 282 235 _DE	2100	70	95,8	329	728	1,5	160	2400	637	1,2	1,21354	697	ACSe50-04-387A.5
1500 giri/min			Reto 400 V³												
17	M3BL 160 MLB	3GBL 162 004 _SE	1500	50	91,2	42,5	108	1,5	17	1800	90	1,2	0,05780	130	ACSe50-04-044A.5
20	M3BL 160 MLC	3GBL 162 005 _SE	1500	50	92,0	49,2	127	1,5	20	1800	106	1,2	0,07022	157	ACSe50-04-060A.5
25	M3BL 160 MLE	3GBL 162 006 _SE	1500	50	92,8	58,5	150	1,5	25	1800	133	1,2	0,08637	174	ACSe50-04-061A.5
33	M3BL 200 MLA	3GBL 202 003 _SE	1500	50	93,2	75,9	210	1,5	33	1800	175	1,2	0,24247	270	ACSe50-04-078A.5
40	M3BL 200 MLC	3GBL 202 004 _SE	1500	50	93,5	92,9	255	1,5	40	1800	212	1,2	0,28718	304	ACSe50-04-004A.5
71	M3BL 250 SMA	3GBL 252 003 _SE	1500	50	94,3	166	462	1,5	71	1800	377	1,2	0,40011	306	ACSe50-04-165A.5
86	M3BL 250 SMB	3GBL 252 009 _SE	1500	50	94,5	200	547	1,5	86	1800	456	1,2	0,57534	428	ACSe50-04-202A.5
97	M3BL 250 SMC	3GBL 252 004 _SE	1500	50	95,0	225	618	1,5	97	1800	515	1,2	0,62250	454	ACSe50-04-225A.5
103	M3BL 280 SMA	3GBL 282 213 _DE	1500	50	94,8	221	666	1,4	103	1800	646	1,1	0,85741	604	ACSe50-04-225A.5
118	M3BL 280 SMB	3GBL 282 223 _DE	1500	50	95,3	245	758	1,3	118	1800	625	1,1	0,90000	639	ACSe50-04-250A.5
134	M3BL 280 SMC	3GBL 282 233 _DE	1500	50	95,6	279	853	1,5	134	1800	711	1,2	1,21354	697	ACSe50-04-290A.5
155	M3BL 315 SMA	3GBL 312 213 _DE	1500	50	95,7	321	987	1,3	155	1800	822	1,1	1,64183	873	ACSe50-04-387A.5
180	M3BL 315 SMB	3GBL 312 223 _DE	1500	50	95,0	374	1146	1,4	180	1800	955	1,1	1,88867	925	ACSe50-04-387A.5
205	M3BL 315 SMC	3GBL 312 233 _DE	1500	50	95,1	423	1305	1,3	205	1800	1088	1,1	2,03880	955	ACSe50-04-430A.5
250	M3BL 315 MLA	3GBL 312 413 _DE	1500	50	95,4	516	1592	1,4	250	1800	1326	1,1	2,45071	1115	ACSe50-04-521A.5
275	M3BL 315 MLB	3GBL 312 423 _DE	1500	50	95,5	573	1751	1,5	275	1800	1469	1,2	2,67756	1169	ACSe50-04-602A.5
315	M3BL 315 LKA	3GBL 312 813 _DE	1500	50	95,4	659	2005	1,5	315	1800	1671	1,2	3,00536	1357	ACSe50-04-603A.5
350	M3BL 315 LKC	3GBL 312 833 _DE	1500	50	95,5	712	2228	1,5	350	1800	1857	1,2	3,77259	1533	ACSe50-04-720A.5

In quest'ultima tabella sono riportati i dati delle prestazioni tecniche dei pacchetti ad alta efficienza con motore e convertitore di frequenza attualmente disponibili. I codici delle varianti e i dati costruttivi fanno riferimento al motore M3BP, con Protezione IP55, raffreddamento IC 411, classe di isolamento F, aumento temperatura di classe F. I valori del motore fanno riferimento a un'alimentazione con convertitore di frequenza ACS850. Con questi pacchetti è possibile quindi raggiungere una maggiore efficienza (da 1 a 3 % in più) rispetto ai pacchetti con motore asincrono in classe IE2; inoltre, per carichi parziali (condizioni in cui la pompa o il ventilatore operano con portate al di sotto della nominale), si avrà la massima efficienza.

5.2.2 Pacchetto SynRM IE4 Super Premium Efficiency per pompe e ventilatori

Per quanto riguarda questo pacchetto, il motore in questione è privo di magneti permanenti e soddisfa la classe di efficienza IE4; siamo in presenza di un massimo risparmio energetico grazie all'utilizzo del convertitore ACS850 e all'elevata efficienza della tecnologia del SynRM per carichi parziali. Per quanto riguarda l'esterno di questi motori, il design è come quello di un motore asincrono, all'interno sono dei motori sincroni a riluttanza che combinano un rotore basato su tecnologia innovativa con uno statore di tipo convenzionale; uniscono quindi le prestazioni di un motore a magneti con l'efficienza e la semplicità di utilizzo di un motore asincrono:



- Motori asincroni



- Motori SynRM IE4



La bassa temperatura del rotore garantisce una maggiore durata dei cuscinetti e delle parti meccaniche. SynRM IE4 presenta una sovra-temperatura degli avvolgimenti ben al di sotto di quella della classe B; questo permette di raggiungere un livello di affidabilità senza precedenti. Il pacchetto SynRM e inverter è stato testato da ABB per garantire l'efficienza complessiva; quindi nel confrontare il livello di efficienza tra alternative diverse, si deve considerare la curva di efficienza di pacchetto in funzione della velocità di lavoro. I motori SynRM IE4 sono concepiti per soddisfare le combinazioni dimensioni-potenza previste dagli standard *Cenelec* (comitato europeo per la normalizzazione elettrotecnica) che è responsabile della normalizzazione europea nell'area dell'ingegneria elettrica, ed insieme a l'ETSI (telecomunicazioni) e al CEN (altre zone tecniche), forma il sistema europeo per la normalizzazione; fondato nel 1973, il CENELEC è un'organizzazione senza scopo di lucro secondo legge belga, con sede a Bruxelles e sebbene il CENELEC lavori in stretta collaborazione con l'Unione Europea, esso non è un'istituzione dell'Unione Europea. È quindi possibile migliorare l'efficienza energetica senza bisogno di apportare modifiche meccaniche dovute a motori più ingombranti. I pacchetti SynRM IE4 sono già

preconfigurati in termini di abbinamento motore e inverter e le potenze disponibili partono da 11 kW fino a 315 kW, velocità 3000, 1500 e 1000 rpm:



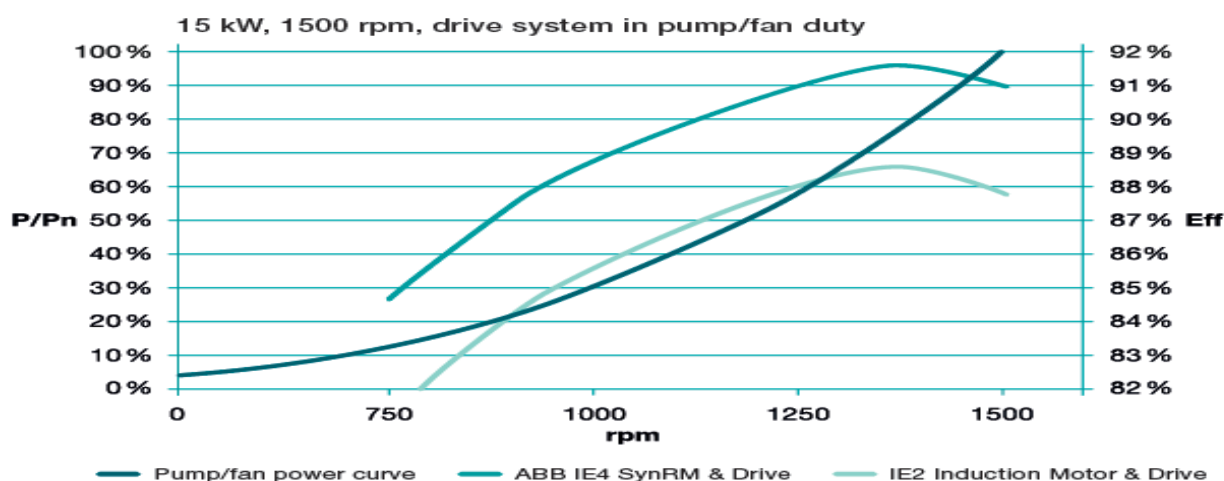
Per quanto riguarda le caratteristiche principali del motore sincrono a riluttanza SynRM IE4, possiamo dire che:

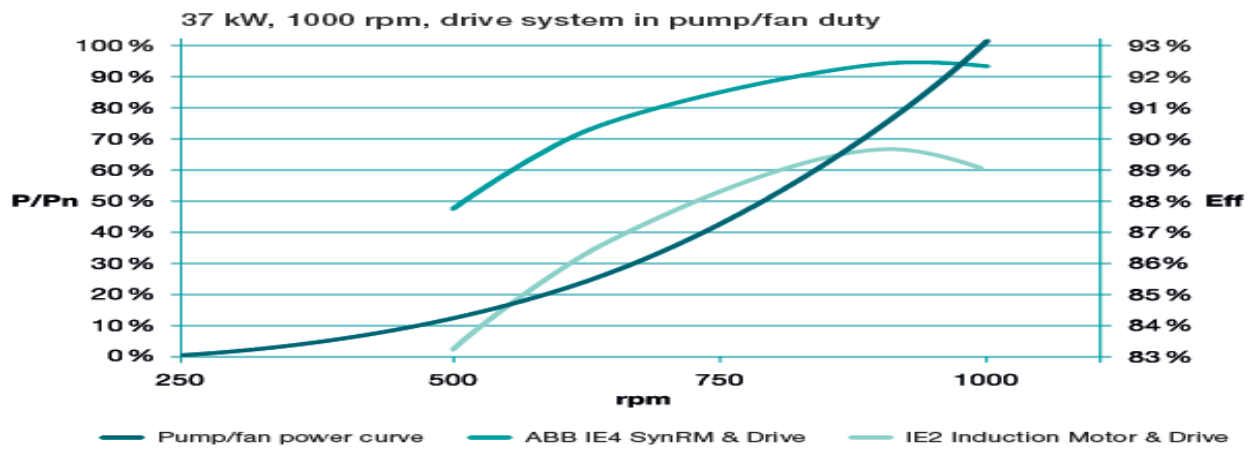
- I motori raggiungono il livello di efficienza IE4 in accordo allo standard IEC 60034-30-1 Ed. 1.0;
- Può sostituire i motori asincroni standard; stessa combinazione potenza/dimensioni;
- Sono motori con carcassa in ghisa M3BL 160-315, con assenza di magneti permanenti e di rotore a gabbia;
- Affidabilità senza precedenti grazie alla bassa temperatura dei cuscinetti e degli avvolgimenti;
- Costruzione meccanica e disponibilità di varianti come per la famiglia Process Performance;
- Procedure di manutenzione paragonabili a quelle dei motori asincroni, quindi una facile manutenzione;

Per quanto riguarda le caratteristiche principali del convertitore ACS850, usato con questi motori sincroni a riluttanza SynRM IE4, possiamo dire, come detto prima per l'altro pacchetto, che:

- Non occorre la retroazione di encoder o altri sensori di posizione;
- Possibilità di impostare correttamente i parametri e memorizzarli nella memoria interna;
- Utilizzabile per alimentare qualsiasi motore (asincrono, a magneti permanenti e motori SynRM);
- Design compatto e quindi progettato per occupare il minimo spazio all'interno del cabinet;
- Direct Torque Control (DTC), ossia un controllo di precisione che migliora la produttività e l'affidabilità anche senza l'utilizzo di encoder o dispositivi di retroazione.

I seguenti esempi di applicazioni per pompe e ventilatori, mostrano come sia possibile sfruttare in modo vantaggioso la nuova tecnologia, sostituendo un motore asincrono IE2 con il nuovo pacchetto SynRM IE4 Super Premium Efficiency:





Per quanto riguarda la gamma completa di *pacchetti con motore SynRM IE4 Super Premium*
Efficiency per applicazioni a coppia quadratica:

			Performance at nominal speed								Suggested frequency converter type for no-overload use
Output kW	Motor type	Product code	Speed n_n r/min	Frequency f_e Hz	Motor Efficiency with VSD supply	Current I_n A	Torque T_n Nm	Torque T_{pc}/T_n	Inertia J kgm ²	Weight m kg	
			3000 r/min								
			400 V network								
11	M3BL 160 MLA 4	3GBL 162 101 -_SC	3000	100	02.6	25.0	35	1.5	0.0570	133	ACS860-04-025A-5
15	M3BL 160 MLB 4	3GBL 162 102 -_SC	3000	100	03.3	34.8	48	1.5	0.0570	133	ACS860-04-035A-5
18.5	M3BL 160 MLC 4	3GBL 162 103 -_SC	3000	100	03.7	42.8	50	1.5	0.0570	133	ACS860-04-044A-5
22	M3BL 180 MLA 4	3GBL 182 101 -_SC	3000	100	04.0	50.0	70	1.5	0.0702	160	ACS860-04-050A-5
30	M3BL 200 MLA 4	3GBL 202 101 -_SC	3000	100	04.5	68.8	95	1.5	0.207	250	ACS860-04-078A-5
37	M3BL 200 MLB 4	3GBL 202 102 -_SC	3000	100	04.8	84.6	118	1.5	0.207	250	ACS860-04-094A-5
45	M3BL 225 SMA 4	3GBL 222 101 -_SC	3000	100	06.0	103	143	1.5	0.242	282	ACS860-04-103A-5
55	M3BL 225 SMF 4	3GBL 222 102 -_SC	3000	100	06.3	122	175	1.5	0.242	282	ACS860-04-144A-5
			1500 r/min								
			400 V network								
11	M3BL 160 MLA 4	3GBL 162 104 -_SC	1500	50	03.3	24.9	70	1.5	0.0702	160	ACS860-04-025A-5
15	M3BL 160 MLB 4	3GBL 162 105 -_SC	1500	50	03.9	33.7	95	1.5	0.0864	177	ACS860-04-035A-5
18.5	M3BL 180 MLA 4	3GBL 182 102 -_SC	1500	50	04.2	42.0	118	1.5	0.0864	177	ACS860-04-044A-5
22	M3BL 200 MLF 4	3GBL 202 106 -_SC	1500	50	04.5	40.1	140	1.5	0.287	304	ACS860-04-050A-5
30	M3BL 200 MLA 4	3GBL 202 103 -_SC	1500	50	04.0	66.7	101	1.5	0.287	304	ACS860-04-078A-5
37	M3BL 250 SMF 4	3GBL 252 104 -_SC	1500	50	05.2	82.0	236	1.5	0.575	428	ACS860-04-094A-5
45	M3BL 250 SMG 4	3GBL 252 105 -_SC	1500	50	05.4	90.5	286	1.5	0.575	428	ACS860-04-103A-5
55	M3BL 250 SMA 4	3GBL 252 102 -_SC	1500	50	05.7	121	350	1.5	0.633	454	ACS860-04-144A-5
75	M3BL 280 SMA 4	3GBL 282 213 -_DC	1500	50	06.0	173	478	1.7	TBA	TBA	ACS860-04-202A-5
90	M3BL 280 SMB 4	3GBL 282 223 -_DC	1500	50	06.1	202	573	1.7	TBA	TBA	ACS860-04-202A-5
110	M3BL 280 SMC 4	3GBL 282 233 -_DC	1500	50	06.3	245	690	1.8	1.21	697	ACS860-04-260A-5
110	M3BL 315 SMA 4	3GBL 312 213 -_DC	1500	50	06.3	244	702	1.8	1.64	873	ACS860-04-260A-5
132	M3BL 315 SMB 4	3GBL 312 223 -_DC	1500	50	06.4	290	842	1.9	1.87	925	ACS860-04-202A-5
160	M3BL 315 SMC 4	3GBL 312 233 -_DC	1500	50	06.6	343	1018	1.7	2.04	965	ACS860-04-387A-5
200	M3BL 315 MLA 4	3GBL 312 413 -_DC	1500	50	06.7	427	1272	1.7	2.45	1116	ACS860-04-500A-5
250	M3BL 315 LKA 4	3GBL 312 813 -_DC	1500	50	06.7	542	1501	1.8	3.04	1357	ACS860-04-580A-5
315	M3BL 315 LKC 4	3GBL 312 833 -_DC	1500	50	06.7	650	2006	1.6	3.77	1533	ACS860-04-650A-5
			1000 r/min								
			400 V network								
7.5	M3BL 160 MLA 4	3GBL 162 106 -_SC	1000	33.3	01.3	17.3	72	1.5	0.0702	160	ACS860-04-018A-5
11	M3BL 160 MLB 4	3GBL 162 107 -_SC	1000	33.3	02.3	25.0	105	1.5	0.0864	177	ACS860-04-025A-5
15	M3BL 200 MLF 4	3GBL 202 107 -_SC	1000	33.3	02.9	34.0	143	1.5	0.242	282	ACS860-04-035A-5
18.5	M3BL 200 MLA 4	3GBL 202 104 -_SC	1000	33.3	03.4	41.8	177	1.5	0.287	304	ACS860-04-044A-5
22	M3BL 200 MLB 4	3GBL 202 105 -_SC	1000	33.3	03.7	40.5	210	1.5	0.287	304	ACS860-04-050A-5
30	M3BL 250 SMF 4	3GBL 252 106 -_SC	1000	33.3	04.2	67.2	286	1.5	0.490	391	ACS860-04-078A-5
37	M3BL 250 SMA 4	3GBL 252 103 -_SC	1000	33.3	04.5	82.6	353	1.5	0.575	428	ACS860-04-094A-5
45	M3BL 280 SMA 4	3GBL 282 212 -_DC	1000	33.3	04.8	103	430	1.9	TBA	TBA	ACS860-04-103A-5
55	M3BL 280 SMB 4	3GBL 282 222 -_DC	1000	33.3	05.1	123	526	1.7	TBA	TBA	ACS860-04-144A-5
75	M3BL 280 SMC 4	3GBL 282 232 -_DC	1000	33.3	05.4	166	715	1.8	1.21	697	ACS860-04-166A-5
75	M3BL 315 SMA 4	3GBL 312 212 -_DC	1000	33.3	05.4	166	717	1.8	1.64	873	ACS860-04-166A-5
90	M3BL 315 SMB 4	3GBL 312 222 -_DC	1000	33.3	05.6	198	850	1.8	1.87	925	ACS860-04-202A-5
110	M3BL 315 SMC 4	3GBL 312 232 -_DC	1000	33.3	05.8	241	1051	1.7	2.04	965	ACS860-04-260A-5
132	M3BL 315 MLA 4	3GBL 312 412 -_DC	1000	33.3	06.0	270	1261	1.6	2.45	1116	ACS860-04-200A-5
160	M3BL 315 LKA 4	3GBL 312 812 -_DC	1000	33.3	06.2	340	1527	1.7	3.04	1357	ACS860-04-387A-5
200	M3BL 315 LKC 4	3GBL 312 832 -_DC	1000	33.3	06.3	418	1010	1.7	3.77	1533	ACS860-04-500A-5

TBA: To be advised later

La scelta quindi è facilitata grazie agli abbinamenti preconfigurati, con potenze ed altezza d'asse Cenelec e velocità 2,4 e 6 poli. Anche in quest'ultima tabella sono riportati i dati delle prestazioni tecniche dei pacchetti ad alta efficienza con motore e convertitore di frequenza attualmente disponibili. I codici delle varianti e i dati costruttivi fanno riferimento al motore M3BL, con Protezione IP55, raffreddamento IC 411, classe di isolamento F, aumento temperatura di classe F. I valori del motore fanno riferimento a un'alimentazione con convertitore di frequenza ACS850.

Capitolo 7

Cenelec © EN: 50598-2

7.1 Struttura della bozza EN: 50598-2

Il presente documento EN: 50598-2 è stato disposto dal Comitato Tecnico *CENELEC TC22X: Elettronica di Potenza*. Il gruppo di lavoro TC22X 6, non è altro che un gruppo di esperti costituito per prendere decisioni di standardizzazione, in base al Mandato M/476 della Commissione europea per la normalizzazione nel settore dei variatori di velocità e/o di prodotti Power Drive System; questo gruppo di lavoro ha impostato una stretta collaborazione con diversi altri comitati tecnici (CLC/TC2; CLC/TC17B; CEN TC 197), avviando un lavoro di standardizzazione, per chiarire tutti gli aspetti in materia di efficienza energetica e di requisiti di progettazione ecocompatibile per l'elettronica di potenza, interruttori, dispositivi di controllo, sistemi di trasmissione di potenza e le loro applicazioni industriali. I punti fondamentali trattati in questo documento sono i seguenti:

- Requisiti per realizzare una macchina ad alta efficienza energetica, mediante un sistema di trasmissione di potenza;
- Requisiti e limiti per classi IE (International Efficiency), per i convertitori elettronici di potenza;
- Requisiti e limiti per classi IES (International Efficiency of Systems), dei sistemi elettrici di azionamento (PDS);
- Determinazione delle perdite del sistema elettrico di azionamento (PDS) e dei requisiti

per il collegamento alla macchina, al fine di determinare la classificazione di efficienza energetica/valutazione del pacchetto motore-sistema elettrico di azionamento;

- Requisiti per come raggiungere uno standard globale per l'efficienza energetica e per la progettazione ecocompatibile per l'elettronica di potenza.

L'idea del seguente gruppo di lavoro, è quella che il loro documento, una volta finalizzato come standard europeo, sia anche ulteriormente elaborato per un consenso internazionale in IEC secondo l'accordo di procedura UAP tra CENELEC e IEC. Il documento EN 50598-2 presenta 3 diverse parti:

- Parte 1: Procedura per determinare gli indicatori di efficienza energetica di applicazioni motorizzate, utilizzando l'approccio del "prodotto esteso" e modelli semi analitici;
- Parte 2: Indicatori di efficienza energetica per i sistemi di trasmissione di potenza e motori di avviamento;
- Parte 3: Aspetti ambientali e la dichiarazione di prodotto per sistemi di trasmissione di potenza e motori di avviamento.

Mandati	Parte 1	Parte 2	Parte 3
M/470 Motors		✓	✓
M/476 PDS		✓	✓
M/495 Horizontal all future Applications	✓	✓	✓
M/488 HVAC comfort fans	✓	✓	(✓)
M/498 Pumps	✓	✓	(✓)
M/500 Compressors	✓	✓	(✓)

L'insieme di queste 3 parti, forniranno l'insieme appropriato di norme che copriranno anche i singoli mandati M/470, M/476, M/498, m/500 già in riferimento nell'ambito del mandato M/495 e gli imminenti mandati di standardizzazione delle altre applicazioni motorizzate. Per quanto riguarda i motoriduttori (motore più riduttore) sono considerati in base alla classe di efficienza, come un Power Drive System e quindi per la determinazione delle perdite di un motoriduttore bisogna andare a vedere la IEC 60034-30-1.

7.2 Indicatori di efficienza energetica - Parte 2

Questa parte della norma per la progettazione ecocompatibile, specifica gli indicatori di efficienza energetica per i sistemi elettrici di azionamento, per gli avviatori motore e per l'elettronica di potenza, utilizzati in applicazioni motorizzate nella gamma di potenza da 0,12 kW fino a 1000 kW. Questa parte della norma specifica la metodologia per la determinazione delle perdite del sistema completo del motore, del sistema elettrico di azionamento (PDS) e del convertitore di frequenza AC/AC che alimenta il motore (CDM). Questa seconda parte della norma mi definisce le classi IE e le classi IES rispettivamente per i convertitori elettronici di potenza e per i sistemi elettrici di azionamento; mi definisce i valori limite e le procedure di prova per la classificazione e le perdite complessive del sistema motorio. Inoltre, questa parte della norma propone una metodologia per la caratterizzazione della soluzione migliore di efficienza energetica da attuare, a seconda dell'architettura del motore, della velocità/profilo di carico e dei profili di lavoro della macchina. La struttura di questa seconda parte della norma è la seguente:

- Le perdite di un PDS di riferimento standardizzato (RPDs) e il modello matematico del loro calcolo, sono dati;
- I requisiti per la determinazione delle perdite di un vero PDS sono dati, per essere poi classificato in confronto alle perdite di un PDS di riferimento

standardizzato (RPDs);

- Requisiti per il test di tipo e il contenuto della documentazione per l'utente;
- Alcune illustrazioni di perdite in un sistema globale a titolo di esempio, sono riportate negli allegati;
- Le informazioni sul sistema sono indicate negli allegati.

I dati specifici sulle perdite e sulle classi IE/IES sono dati per la bassa tensione (100 V - 1000 V) di sistemi di azionamento monoasse AC/AC di potenza, con motori asincroni trifase; per quanto riguarda i motoriduttori sono trattati come motori standard. Questa seconda parte della norma non specifica la metodologia per la progettazione ecocompatibile per l'impatto ambientale; questo punto viene invece definito nella parte 3 di questa serie standard.

7.2.1 Riferimenti normativi

Per la comprensione o l'applicazione del presente documento, sono necessari alcuni documenti di riferimento; per quanto riguarda i riferimenti normativi datati, vale solo l'edizione citata, invece per quanto riguarda i riferimenti normativi non datati, vale l'ultima edizione del documento di riferimento (compresi gli aggiornamenti). Come detto in precedenza, l'idea del gruppo che lavora a tale norma, è quella che il loro documento, una volta finalizzato come standard europeo, sia anche ulteriormente elaborato per un consenso internazionale standard IEC. Alcuni documenti normativi di riferimento, necessari per l'applicazione e la comprensione di questo documento sono i seguenti:

- ✓ IEC EN 60038: tensioni standard IEC;
- ✓ IEC 60050: Vocabolario Elettrotecnico Internazionale (VEI);

- ✓ IEC EN 60034-1: Macchine elettriche rotanti - Parte 1: Valutazione e prestazioni;

- ✓ IEC EN 60034-2-1: Macchine elettriche rotanti - Parte 2-1: Metodi standard di determinazione delle perdite di efficienza e di prove (escluse le macchine per veicoli di trazione);

- ✓ IEC TS 60034-2-3: Macchine elettriche rotanti - Parte 2-3: Metodi di prova specifici per determinare perdite e del rendimento dei motori a corrente alternata con convertitore;

- ✓ IEC EN 60034-30-1: Macchine elettriche rotanti - Parte 30-1: classi di efficienza di singola velocità, trifase, motori a gabbia/induzione (Codice IE);

- ✓ IEC/TS 60034-31: Macchine elettriche rotanti - Parte 31: Guida per la selezione e l'applicazione di motori energeticamente efficienti comprese le applicazioni a velocità variabile;

- ✓ IEC EN 60072-1: Dimensioni e potenze in uscita per macchine elettriche rotanti - Parte 1: Numeri di telaio 56-400 e numeri di flangia 55-1080;

- ✓ IEC EN 60146-1-1: convertitori a semiconduttore - Prescrizioni generali e convertitori commutati dalla linea - Parte 1-1: Specifica dei requisiti di base;

- ✓ CEI EN 60947-4-1: Apparecchiature a bassa tensione - Parte 4-1: Contattori e avviatori;

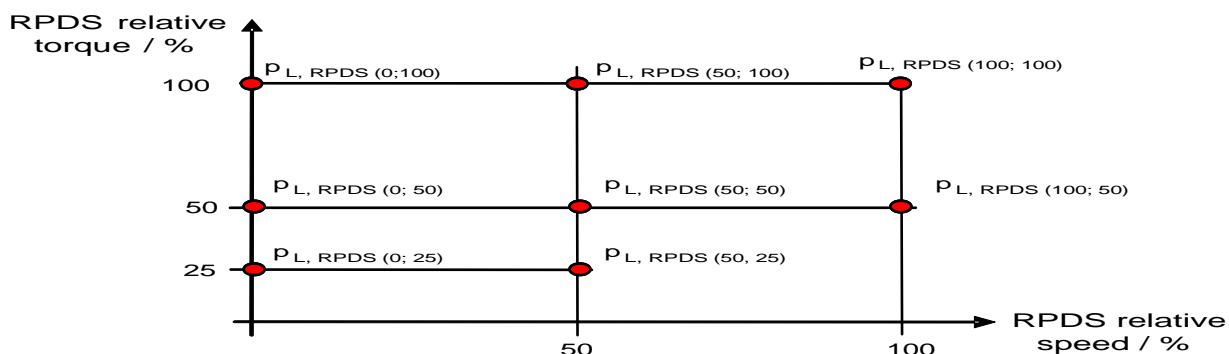
- ✓ IEC EN 60947-4-2: Apparecchiature a bassa tensione - Parte 4-2: Contattori e

avviatori - Regolatori e avviatori a semiconduttori in AC;

- ✓ IEC EN 61800 2: Sistemi elettrici a velocità variabile - Parte 2: specifiche nominali per bassa tensione a frequenza variabile AC di sistemi di trasmissione di potenza;
- ✓ IEC EN 61800 3: sistemi elettrici a velocità variabile - Parte 3: Requisiti di compatibilità elettromagnetica e metodi di prova specifici;
- ✓ IEC/TS 62578: Sistemi di elettronica di potenza e apparecchiature.

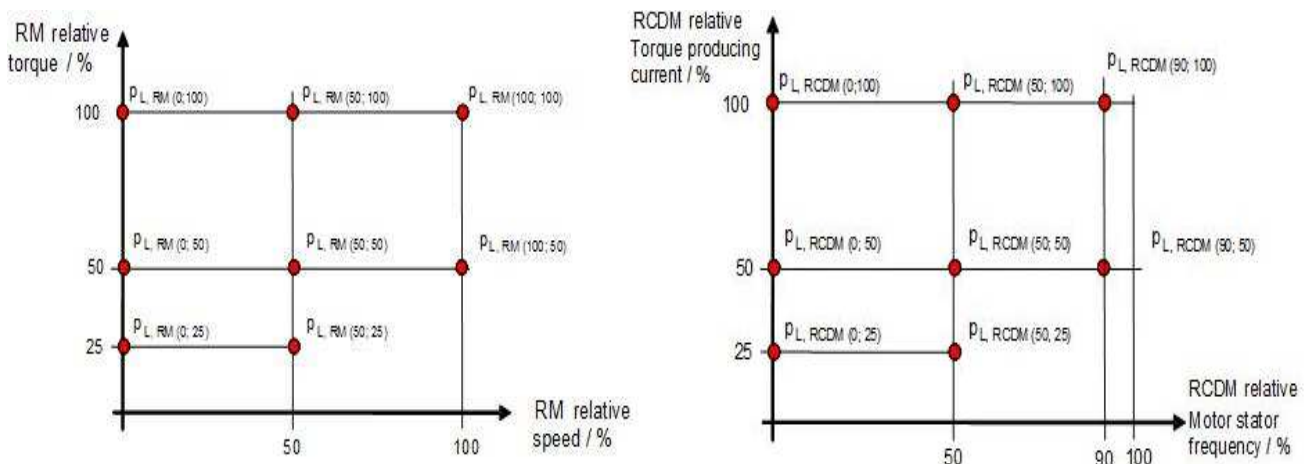
7.3 PDS di riferimento, CDM di riferimento e motore di riferimento - Parte 1

Per una classificazione delle diverse tecnologie di azionamento di una macchina, viene introdotto, per giustificare la soluzione più efficiente, il cosiddetto "approccio esteso". Le perdite di un sistema elettrico di azionamento di riferimento (RPDs), consistente in un CDM di riferimento (RCDM) e in un motore di riferimento (RM), consentono il confronto del consumo di energia di una tecnologia media PDS; questa definizione è indipendente da un prodotto specifico di un produttore specifico. Sappiamo che i requisiti di alimentazione sono, il prodotto di coppia e velocità in qualsiasi punto di lavoro e che in ciascun punto di funzionamento vi è una perdita di potenza associata nel sistema di trasmissione di potenza; se andiamo ad esaminare per esempio la seguente figura:



si può notare che essa conterrebbe un numero infinito di punti operativi, ma per limitarne la quantità per semplificare le cose, andiamo a considerare solo un numero predefinito di punti di funzionamento limitato, (otto punti di colore rosso della figura a pagina precedente). Per i punti con velocità maggiore di zero, le perdite sono date come percentuale della potenza meccanica. In altre descrizioni, le efficienze nominali (η), sono definite come il rapporto in percentuale tra la potenza meccanica nominale di uscita e la potenza elettrica di ingresso desiderata (comprese le perdite). In questo standard invece, anziché considerare l'efficienza, sono considerate le perdite di potenza legate alla potenza nominale del sistema di azionamento (p in %); questo deve essere fatto al fine di garantire la generalità dell'approccio del prodotto esteso. Esistono anche dispositivi comandati in cui è richiesta una coppia specifica, in cui l'efficienza nominale (η) non sarebbe appropriata per un ulteriore uso nell'approccio del prodotto esteso. Come definito, le perdite di un PDS di riferimento (RPDs), corrispondono alla somma delle perdite (RCDM) più le perdite (RM); pertanto tali perdite sono calcolate punto per punto dalla seguente equazione:

$$P_{L,RPDS} = P_{L,RM} + P_{L,RCDM}$$



I punti di perdita del CDM di riferimento (RCDM) non possono essere dati in percentuale della velocità o della coppia dei valori nominali corrispondenti, perché il CDM fornisce solo tensioni e correnti in uscita. Inoltre la tensione di uscita è limitata al 90%, al fine di evitare le tecniche di sovramodulazione per fare il confronto. Per ragioni fisiche, i punti di carico della figura di destra,

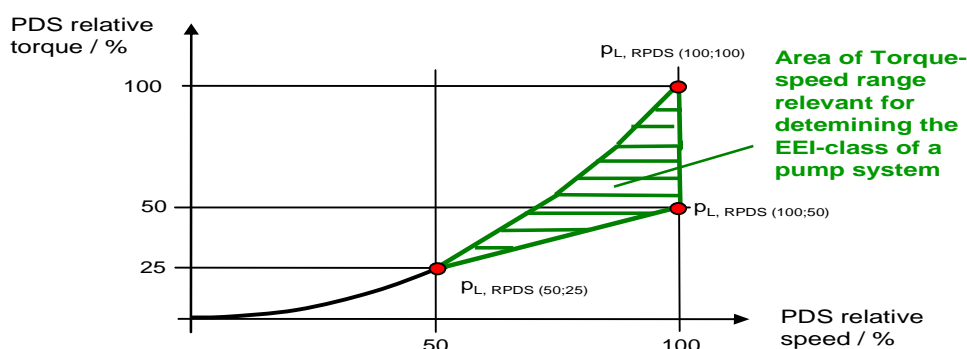
sull'asse y , P_L , RCDM (0, n), richiederanno una frazione della tensione di uscita maggiore di zero per permettere il flusso di corrente attraverso la resistenza degli avvolgimenti del motore. Le perdite per i punti operativi intermedi, se necessario, possono essere determinati in base a uno dei modelli di calcolo presenti nell'allegato A al capitolo H.2.1 del seguente documento normativo. Al fine di determinare le perdite relative di un CDM in un punto di lavoro arbitrario, uno dei seguenti modelli di calcolo si può effettuare nel seguente modo:

- a) Calcolo delle perdite massime in punti di perdita predefiniti (neighbourhood);
- b) Interpolazione lineare bidimensionale tra i punti di perdita neighbourhood;
- c) Calcolo di perdita secondo il modello matematico descritto nella sezione 5.1 del seguente documento.

7.3.1 Modello "SAM" per la determinazione dell'indice di efficienza energetica di un PDS

Il modello di determinazione delle perdite o l'indice di efficienza energetica di un "motor system" (PDS o motore collegato alla rete da un motore di avviamento in accordo con la norma IEC 60947-4-1) o di una macchina comandata, è chiamato modello semi analitico (SAM), e comprende i parametri fisici e matematici e gli algoritmi di calcolo del EP (extended product), cioè del prodotto esteso, ovvero della combinazione di un motore e di un sistema di apparecchiature comandate. Il modello semi analitico del PDS è legato al modello semi analitico della macchina comandata. I legami tra i due modelli semi analitici devono essere, i punti di perdita di carico del PDS e le tolleranze ammesse. Per esempio alcune unità pompa o altro, come i cosiddetti "carichi a coppia quadratica" in genere richiedono le relative perdite o la potenza di ingresso P_1 dei punti di p_1 , PDS (50, 25), p_1 , PDS (100, 50) e p_1 , PDS (100, 100) per calcolare le perdite del sistema motore incorporato e le tolleranze di perdita ammessa sono $\pm 10\%$ delle perdite in ciascun punto di

funzionamento. Per esempio per gli apparecchi di sollevamento o altro, come i cosiddetti "carichi a coppia costante", in genere sono necessari i punti p_l , PDS (0, 25), p_l , PDS (0, 50) e p_l , PDS (0, 100), al fine di ricavare le perdite del sistema motore incorporato. Il modello semi analitico del PDS è predefinito in questo standard, mentre i modelli semi analitici della macchina comandata devono essere redatti dai loro comitati, utilizzando lo stesso approccio. Nel caso di pompe o di altre macchine a portata, normalmente seguiranno una curva parabolica (curva di controllo) simile a quella della coppia richiesta in funzione della velocità della macchina; nella seguente figura sono rappresentati tre punti di perdite correlate e la zona tratteggiata di interesse per i produttori di pompe.



Fornire le perdite elettriche di potenza dei tre punti p_l , PDS (50, 25), p_l , PDS (100, 50) e p_l , PDS (100, 100), così come le perdite di potenza elettrica della zona tratteggiata, deve consentire ai produttori di pompe di ricavare le perdite totali o l'efficienza complessiva di un'arbitraria unità di pompa. Il valore di perdita all'interno della zona tratteggiata può opportunamente essere data con una tolleranza consentita pari a $\pm 10\%$, e questa tolleranza non influirà in modo significativo il valore dell'indice di efficienza energetica (EEI) del gruppo pompa. Le perdite di potenza elettriche del PDS, per esempio alla velocità del 50% contro il 25% del punto di coppia, sono date dalla somma calcolata delle perdite di potenza di tutti i suoi componenti incluso il trasformatore di alimentazione (se è dedicato ad alimentare solo questo PDS) e di tutti i suoi componenti ausiliari, quali filtri o cavi:

$$P_{L,PDS(50,25)} = P_{L,CDM(50,25)} + P_{L,Aux(50,25)} + P_{L,Mot(50,25)}$$

La $(PL_{CDM} + PL_{AUX})$, provoca le perdite di potenza di riferimento del modulo di azionamento completo CDM, insieme ai componenti ausiliari, come il filtraggio, con una tolleranza ammessa concordata del $\pm 10\%$. La (PL_{MOT}) descrive le perdite di una linea di motore di riferimento alimentato, più le sue ulteriori perdite di frequenze armoniche ad $f_{sw} = 4$ kHz (potenza nominale fino a 90 kW) o $f_{sw} = 2$ kHz (potenze nominali superiori a 90 kW), seguendo i metodi di determinazione della IEC 60034 - 2-3. Quindi, avendo i requisiti per la determinazione dell'indice di efficienza energetica di un PDS (i quali sono dati nella parte 1 della seguente bozza di norma), si va poi a classificare l'efficienza energetica di tale PDS, in confronto alle perdite di un PDS di riferimento standardizzato RPDs, (le quali perdite e il modello matematico del loro calcolo, sono date nella parte 2 della seguente bozza di norma).

Conclusioni

Ogni anno il numero di motori elettrici che azionano l'industria nel mondo cresce del 10% e ha superato attualmente la cifra di 300 milioni di macchine. Essendo alla base di ogni attività produttiva, i motori elettrici assorbono oltre $\frac{2}{3}$ della domanda industriale di energia elettrica, che a sua volta costituisce più dei $\frac{2}{5}$ della domanda globale. Incrementandone l'efficienza e vincendo la scommessa da tempo posta dall'Europa con il programma "motor challenge", si potrebbe tagliare questi consumi del 60%. Basta quindi dotare ogni motore di un inverter, risparmiando una rilevante quantità di energia e quindi aumentando il rendimento, questo perché il 90% dei motori esistenti funziona sempre al massimo della velocità, utilizzando dei sistemi meccanici per regolare la potenza quando è necessario. L'adozione di sistemi di controllo della frequenza, consente di ridurre in modo considerevole il consumo energetico, soprattutto nel campo delle potenze elevate. Oltre al semplice ricorso ad inverter, le azioni determinanti per accrescere l'efficienza, intervengono direttamente nel progetto costruttivo dei motori e in tal modo è possibile agire direttamente sul contenimento delle perdite; nel caso dei motori ad alta efficienza, agendo sulla struttura costruttiva del motore e sulla scelta dei materiali, in particolare andando ad intervenire sul nucleo realizzando lamierini a basse perdite che diminuiscono le perdite a vuoto e andando ad adottare una sezione maggiorata dei conduttori dello statore e del rotore per ridurre le perdite per effetto joule, si riesce a ridurre le perdite in modo significativo. Questi interventi assicurano una minore generazione di calore, una necessità di ventole di raffreddamento più piccole e quindi minori perdite meccaniche. Così, a parità di potenza, questi motori hanno un rendimento maggiore di quello standard e una curva del medesimo più piatta, capace di garantire valori sempre più prossimi a quelli ottimali al variare del carico. Per certificare queste prestazioni, era stato concluso un primo accordo sulla costruzione di motori elettrici, definendo le 3 classi di efficienza EFF1, EFF2 e EFF3, questo perché nei grandi motori le possibilità di migliorare l'efficienza sono più favorevoli e le differenze di rendimento tra le classi possono quindi assottigliarsi. In virtù di tale accordo, ogni motore prodotto

dai costruttori aderenti, ha avuto la sua marcatura a dimostrazione della classe di efficienza alla quale apparteneva. Di recente con l'entrata in vigore della CE 640/2009, è stata introdotta per i motori, una nuova classificazione dell'efficienza energetica, espresse con le sigle IE1, IE2, IE3 ed IE4, ma con il progresso tecnologico in futuro si potranno avere anche motori in classe IE5 o superiori. Al momento la norma CEI EN 60034-30 classifica i motori in 3 livelli di efficienza energetica IE e il regolamento 640/2009 ha fissato il divieto di immissione sul mercato di motori non efficienti, stabilendo che, dal 1° gennaio 2015 i motori con una potenza nominale compresa tra 7,5 e 375 kW dovranno avere almeno efficienza IE3, oppure efficienza IE2 con variatore di velocità, e che dal 1° gennaio 2017 dovrà valere sempre la precedente condizione, ma con estensione del campo di potenza minimo fino a 0,75 kW. I primi modelli SynRM di motori sincroni a riluttanza, progettati per ottimizzare le prestazioni in termini di efficienza e affidabilità, definiti come "super premium efficiency", sono stati presentati nel 2011 e sono caratterizzati da un rotore senza gabbia e senza magneti, costituito unicamente da lamierini impilati e accoppiato ad uno statore convenzionale; la carcassa e la costruzione meccanica del rotore risulta del tutto analoga a quella di un motore asincrono. Diversamente dai motori sincroni tradizionali, il rotore adesso è privo di avvolgimento e questo implica che le perdite di potenza dovute al rotore siano virtualmente eliminate e questa risulta proprio la chiave di successo di questi motori. Questo fatto non solo incrementa l'efficienza, ma permette anche al rotore di funzionare dissipando meno calore, mantenendo bassa la temperatura dei cuscinetti ed incrementandone l'affidabilità. Grazie alla tecnologia con cui è realizzato il rotore, i motori senza magneti SynRM possono puntare ad ottenere le prestazioni di un motore a magneti permanenti con la facilità di esercizio e i costi ridotti dei motori a induzione. Il motore in questione, è dotato di un convertitore di frequenza a velocità variabile, e insieme costituiscono un pacchetto con un software che consente di operare sempre nel punto ottimale della curva di potenza per soddisfare l'effettiva domanda; con questo pacchetto si possono raggiungere le prestazioni di un motore a magneti permanenti senza l'uso dei magneti, ed offrire un controllo di processo efficiente oltre che ad un uso ottimale dell'energia.

Bibliografia

- ✓ ABB, *“Tecnologia del SynRM”*.

- ✓ ABB, *“Synchronous reluctance motor drive package”*.

- ✓ Boffa, *“Motori elettrici ad alto rendimento ed inverter”*.

- ✓ CNA Energia, *“Motori ad alta efficienza ed inverter”*.

- ✓ L. Taponecco, *“Motori elettrici”*

- ✓ Electro Adda Group *“Motori asincroni trifasi”*.

- ✓ D.E.E, *“Macchina sincrona a riluttanza”*.

- ✓ ABB, *“ Efficienza e normative. Definizione di norme globali per l'efficienza energetica”*,
Dossier tecnologia.

- ✓ ABB, *“SynRM motor and drive package, Motor Summit 2012”*.

- ✓ Cenelec © *“EN: 50598-2”*.

- ✓ Franck Weinbissinger, *“L'alimentazione dei motori asincroni”*.

- ✓ Marco Dal Prà, *“Inverter per motori asincroni trifasi. Appunti di elettrotecnica”*.

- ✓ Moratto SRL, *“Normative e direttive per il calcolo del rendimento dei motori asincroni”*.

Ringraziamenti

Seduto alla mia scrivania, occupato negli ultimi sviluppi della tesi, ancora non mi rendo conto di essere arrivato quasi alla fine di questo percorso che ha coinvolto tutto me stesso negli ultimi anni.

Guardandomi indietro mi rendo conto che tante cose nella mia vita e dentro di me sono cambiate: il mio modo di pensare, di affrontare le cose e soprattutto il mio modo di relazionarmi agli altri....forse sono cresciuto, ma spero di rimanere sempre quella persona umile che sono sempre stata.

Ripercorrendo la mia strada non posso fare a meno di pensare a quanti mi hanno fatto da ala, come quando un ciclista, che per vincere la vetta che lo separa dal traguardo, trova forza e sostegno dal tifo che le persone gli offrono lungo il percorso.

Il mio primo pensiero ovviamente va ai miei genitori, senza i quali non sarei mai potuto arrivare a questo punto; e non parlo solo del sostegno economico, ma di quel aiuto tacito o esplicito che tante volte è venuto dal loro cuore: mi riferisco a tutte quelle volte in cui mia madre, celando in silenzio l'ansia, mi ha incoraggiato, vedendomi preso dai libri o preoccupato per concetti troppo complicati che proprio non volevano entrarmi in testa; o ai discorsi di mio padre, quando, convinto che non lo stessi ascoltando, parlava di me orgoglioso.

Ripenso a tutte le volte che i miei genitori si sono alzati alle sei del mattino, in pieno inverno, quando fuori era ancora buio e diluviava e le coperte, invece, erano tanto accoglienti, solo per prepararmi la colazione e accompagnarmi alla fermata dell'autobus...potrei descrivere tanti piccoli momenti come questi, ma non c'è n'è bisogno, perchè li porto tutti nel mio cuore e per tutte queste cose posso solo ringraziare la mia mamma ed il mio papà.

Mi sembra doveroso un ringraziamento al Professor Renato Gobbo per avermi seguito in questa mia ultima fatica prima di calarmi finalmente nel mondo del lavoro.

Un grazie particolare va al mio amico Ale, il quale nei momenti più difficili è sempre stato disponibile....senza di lui non so se ce l'avrei fatta ad arrivare fino a questo punto. Particolare

riguardo va ai miei compagni di corso Cresta, Vale, Zara, Henry, Formentin, Zin, Pelly, Bonfante, Rocco, Daniele, Rampado, Scarpa, Stefania e Boris, compagni d'avventura fantastici dai quali ho imparato molto. Un grazie va anche ai miei amici di sempre Azzo, Canton, Marz, Brendy, Stefano, Pinton, Mery, Tizzo e Miotto, amici che mi hanno sempre sostenuto e capito per tutte quelle volte che, invece di uscire con loro, restavo a casa a studiare.

Un grazie va alle tante persone che ho conosciuto in questi ultimi anni, Elisa, Maria, Marilyn, Sara, Mario, Jais, Masiero, Loris pd, Claudia, Federica, Titti, Michela & Giulia, Steno & Marketto, Alberta, Francis, Mattia e Marco, Mery, Jenny, Andrew Dag, Camilla, Giulia Loco, Sara & Mel, Matteo, Veronica, Andrea pd, Marzia, Christian Frl, Debora, Giulia, Piera, Elena, Giulia Coco, Ricky PD e tantissimi altri ancora, persone fantastiche che mi hanno dato tanto e mi hanno fatto capire tante cose della vita. Un grazie va anche ai professori della scuola superiore IPSIA "Bernardi" e in particolare al professore Sabbadin e alla professoressa Lazzarini, insegnanti fantastici che mi hanno fatto capire l'importanza dello studio.

Un grazie va anche ai ragazzi della pizzeria Mister Pomodoro, Jais, Stefano, Cristina, Fabio, Jessica, Beatrice, Matteo, Lucrezia e Sara, persone straordinarie e sempre disponibili, che sono riuscite a sopportarmi per tutti questi anni senza lamentarsi poi più di tanto.

Un ultimo ringraziamento va anche a me stesso, perchè nonostante le tantissime difficoltà che ho incontrato in questo mio cammino universitario, ho sempre creduto nella possibilità di raggiungere questo mio unico grande sogno.

Ognuno di Voi mi ha dato qualcosa.

Andrea