

APPUNTI DI ELETTROTECNICA

MANUALE
di
Macchine Elettriche

Accesso rapido a calcoli, dimensionamenti, perdite e rendimenti di
macchine elettriche in corrente alternata

A cura di Marco Dal Prà

www.marcodalpra.it

Versione n. 4.0 - Aprile 2013

Prefazione

Questo manualetto vuole essere di aiuto a tutti coloro che studiano, lavorano o hanno a che fare con l'elettrotecnica e con le macchine elettriche.

E' uno scritto come opera di volontariato e non ha la pretesa di sostituirsi ai testi ufficiali.

Mi scuso già da ora se lungo il testo si troveranno errori; ringrazio già da ora chi vorrà indicarmeli per migliorare il testo (mail dalpra.marco@gmail.com), così come ringrazio chi mi ha aiutato a correggere errori trovati nelle precedenti edizioni.

Buona lettura.

Bibliografia :

- Mario Pezzi Macchine Elettriche 2a. Ediz. - Zanichelli
- Bassi / Bossi Elettrotecnica Pratica Editoriale Delfino Marzo 2000
- Principi base dei Motori Trifase a induzione Rockwell Automation Ott.1997

Indice

1. Elettrotecnica Generale
2. Corrente Alternata (potenze ed altre espressioni)
3. Trasformatore
4. Elementi di Meccanica
5. Motori in Corrente Alternata
6. Motori Asincroni Trifasi

Parte 1° - Elettrotecnica Generale

Leggi Fondamentali

Definizione	Espressione	Unità di Misura
Prima Legge di Ohm	$R = \frac{V}{I}$	ohm - Ω
Seconda Legge di Ohm	$R = \rho (l/s)$	ohm - Ω
Resistività del Rame	$\rho = 0,0178$	$\Omega \text{ mm}^2 / \text{m}$
Potenza su carico resistivo. Anche indicata con Pj per indicare che si tratta di perdite per effetto Joule	$P = R I^2$	watt - W
Potenza in Corrente Continua	$P = V I$	watt - W

Riporto in Temperatura

Per riportare il valore di una resistenza presa a 20°C ad una temperatura “ θ ” :

$$R_{\theta} = R_{20} \frac{234,5 + \theta}{234,5 + 20}$$

Ad esempio per riportare il valore di una resistenza su un motore presa a 20°C e riportata alla temperatura di lavoro 70°C.

Parte 2° - Corrente Alternata

Espressione di una f.e.m. sinusoidale

Valore all'istante "t"	$v(t) = \sqrt{2} V_{\max} \text{sen}(\omega t)$
Valore Efficace di una tensione (quello che si misura con gli strumenti tradizionali)	$V = \frac{V_{\max}}{\sqrt{2}}$

CONVENZIONI : ANGOLO di SFASAMENTO

Per convenzione l'angolo di sfasamento tra tensione (di alimentazione) e corrente (assorbita dal carico) è calcolato nel modo che segue :

$$\varphi = \Phi_V - \Phi_I$$

angolo φ	Tipo di carico
tra 0 e 90°	Induttivo (RL)
tra 0 e -90°	Capacitivo (RC)

LEGGE di Ohm – Circuiti Trifasi

Descrizione	Espressione	U.m.
Potenza Apparente	$S = 3 Z I^2$	VA
Potenza Attiva	$P = 3 R I^2$	W
Potenza Reattiva	$Q = 3 X I^2$	var
Angolo di sfasamento	$\varphi = \text{arctang} \frac{X}{R}$	

POTENZA - Formule

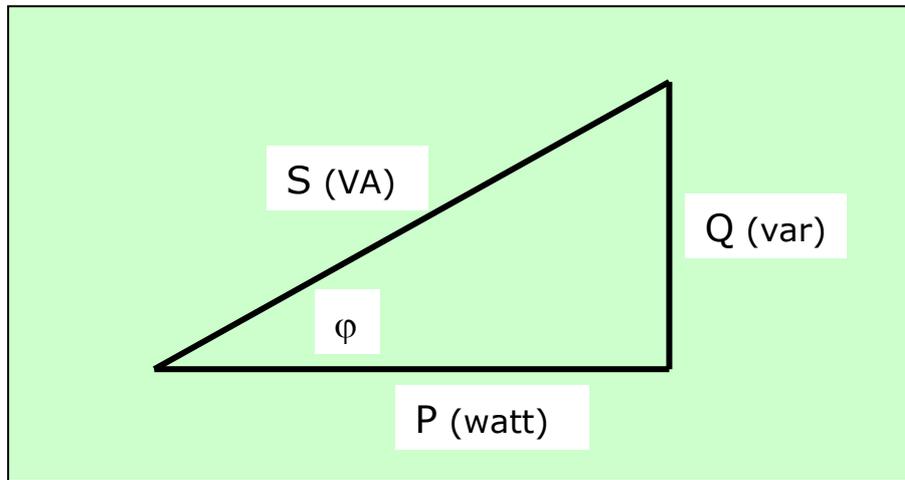
Definizione	Espressione Trifase	Espressione Monofase	Unità di Misura
Potenza Apparente	$S = \sqrt{3} V I$	$S = V I$	VA
Potenza Attiva	$P = \sqrt{3} V I \cos \varphi$	$P = V I \cos \varphi$	W
Potenza Reattiva	$Q = \sqrt{3} V I \sin \varphi$	$Q = V I \sin \varphi$	var
Corrente	$I = \frac{P}{\sqrt{3} V \cos \varphi}$	$I = \frac{P}{V \cos \varphi}$	A
Fattore di potenza (f.p.)*	$\cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{3} V I}$		-
Angolo (dal fattore di potenza)	$\varphi = \arccos (\text{f.p.})$		gradi

* Attenzione : questa definizione è valida solo per gli impianti privi di distorsione armonica alla forma d'onda di tensione e corrente; altrimenti il fattore di potenza è diverso dal $\cos \varphi$.

CONVENZIONI : TENSIONI

Tensione unificata per l'Europa *	230 / 400 V - 50Hz
<p>Intesa come tensione degli impianti di distribuzione e degli utilizzatori in Bassa Tensione:</p> <ul style="list-style-type: none"> • il primo valore è la tensione Stellata (per l'alimentazione delle utenze monofase), che tipicamente è anche la tensione verso terra; • il secondo valore è la tensione Concatenata (per l'alimentazione delle utenze trifasi o fase-fase). 	
<p>Nell'Unione Europea la sicurezza degli utilizzatori in bassa tensione è sancita dalla Direttiva Bassa Tensione (Low Voltage Directive).</p>	

TRIANGOLO delle POTENZE



Formule “Geometriche”

Definizione	Espressione	U. M.
Potenza Apparente	$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$	VA
Potenza Attiva	$P = S \cos \varphi$	W
Potenza Reattiva	$Q = S \sin \varphi$ $Q = P \tan \varphi$	var
Tangente	$\tan \varphi = \frac{Q}{P}$	-
Angolo	$\varphi = \arctang \frac{Q}{P}$	gradi

RIFASAMENTO

Definizione	Espressione	U. M.
Fattore di potenza consigliabile per impianti rifasati	$\cos \varphi \geq 0,95$	
Angolo di sfasamento ammesso per considerare un impianto rifasato	$\varphi \leq 25^\circ$	
Potenza Reattiva massima ammessa per impianti rifasati	$Q_{\max} = P \tan 25^\circ$	<i>var</i>
Potenza Rifasante	$Q_c = Q - Q_{\max}$	<i>var</i>
Reattanza capacitiva di rifasamento (Trifase)	$X_c = 3 \frac{V^2}{Q_c}$	<i>ohm</i>
Condensatore di rifasamento	$C = \frac{1}{2\pi f X_c}$	<i>F</i>
Corrente sul condensatore	$I = \frac{Q_c}{\sqrt{3} V}$	<i>A</i>

Perché Rifasare

Gli impianti utilizzatori tipicamente vengono “sanzionati” quanto il fattore di potenza medio mensile dell’energia assorbita scende al di sotto di 0,90.

La penale per che si trova nella fattura di fornitura dell’energia elettrica, e riguarda gli utilizzatori trifasi con potenza contrattuale superiore a 16,5 kW.

In fase progettuale di un impianto elettrico è quindi utile configurare l’impianto in modo che questo tenda al valore a 0,95.

Questo valore, seppure cautelativo, è utile :

- per l’utente in quanto diminuisce le perdite nei propri impianti, soprattutto se il rifasamento è distribuito;
- per gli utenti in genere allacciati alla rete, perché diminuiscono le correnti circolanti a vantaggio per la qualità e la stabilità della tensione.

Parte 3° - Trasformatore Trifase

Caratteristiche Fondamentali

Descrizione	Espressione	U.m.
Potenza Nominale	$S_n = \sqrt{3} V_{1n} I_1 = \sqrt{3} V_{20} I_2$	VA
Tensione al primario	V_1	V
Tensione al secondario	V_2	V
Tensione al secondario <u>a vuoto</u>	V_{20}	V
Potenza Assorbita	$P_1 = P_2 + Perdite$	W
Potenza Resa	$P_2 = \sqrt{3} V_2 I_2 \cos \varphi_2$	W
Rendimento (vedere anche in seguito)	$\eta = \frac{P_2}{P_1}$	
Corrente Nominale al Primario	$I_{1n} = \frac{S_n}{\sqrt{3} V_{1n}}$	A
Corrente Nominale al secondario	$I_{2n} = \frac{S_n}{\sqrt{3} V_{20}}$	A
Massima corrente di cortocircuito al secondario (*)	$I_{2k} = \frac{I_{2n}}{V_{cc}\%} \times 100$	A

(*) Calcolo indicativo generalmente utilizzato per dimensionare il Quadro BT posto subito a valle del trasformatore; è un valore favore della sicurezza, perché non tiene conto dell'impedenza della rete a monte.

Trasformatore : **BILANCIO ENERGETICO**

Descrizione	Espressione	U.m.
Potenza Assorbita	$P_1 = P_2 + P_{fe} + P_{cu}$	W
Perdite nel Ferro (*)	$P_{fe} = \left(\frac{V_1}{V_{1n}} \right)^2 P_0$	W
Grado di Carico Esprime quanto si sta "sfruttando" un trasformatore; Si calcola rapportando la corrente che circola sul secondario alla corrente nominale del secondario.	$\alpha = \frac{I_2}{I_{2n}}$	0 ... 1
Perdite a vuoto	$P_0 = \sqrt{3} V_{1N} I_0 \cos \varphi_0$	W
Perdite nel Rame	$P_{cu} = \alpha^2 P_{cc}$	
Bilancio complessivo delle potenze	$P_1 = P_2 + P_0 + \alpha^2 P_{cc}$	
Rendimento Convenzionale	$\eta = \frac{P_2}{P_2 + P_0 + \alpha^2 P_{cc}}$	
(dalle Norme CEI)	$P_2 = \sqrt{3} V_2 I_2 \cos \varphi_2$	
Grado di carico al rendimento massimo	$\alpha_{max} = \sqrt{\frac{P_0\%}{P_{cc}\%}}$	

***NOTA** : Tipicamente si assume $V_1 = V_{1n}$, quindi $P_{fe} = P_0$.

Trasformatore : **PERDITE a VUOTO**

Descrizione	Espressione	U.m.
Perdite nel Ferro	$P_{fe} = P_i + P_{cp}$	W
Perdite per Isteresi	P_i	W
Perdite per Correnti Parassite	P_{cp}	W
Perdite a vuoto	$P_0 = \sqrt{3} V_{1N} I_0 \cos \varphi_0$	W
Corrente attiva a vuoto	$I_a = I_0 \cos \varphi_0$	A
Corrente Magnetizzante	$I_\mu = I_0 \sin \varphi_0$	A
Rapporto tra le correnti	$I_\mu \gg I_a$	
Fattore di potenza a vuoto	$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3} V I_0}$	
Resistenza equivalente delle perdite nel ferro	$R_o = \frac{V_{1n}}{\sqrt{3} I_a}$	Ω
Perdite a vuoto (conoscendo il rendimento)	$P_0 = \frac{P_2}{\eta} - P_2 - \alpha^2 P_{cc}$	W

Trasformatore : **PERDITE in CORTO CIRCUITO**

Descrizione	Espressione	U.m.
Perdite in corto circuito da Pcc percentuale	$P_{cc} = S_n \frac{P_{cc}\%}{100}$	W
Perdite nel Ferro	$P_{fe} \cong 0$ (in quanto la $V_1 \cong 0$)	W
Perdite in corto circuito	$P_{cc} = \sqrt{3} V_{1cc} I_{1n} \cos \varphi_{cc}$	W
Perdite equivalenti al primario	$P_{cc} = 3 R_{1cc} I_{1n}^2$	W
Perdite equivalenti al secondario	$P_{cc} = 3 R_{2cc} I_{2n}^2$	W
Fattore di potenza in cortocircuito	$\cos \varphi_{cc} = \frac{P_{cc}\%}{V_{cc}\%} = \frac{100 P_{cu}}{V_{cc}\% S_n}$	
	$\cos \varphi_{cc} = \frac{R_{1cc}}{Z_{1cc}} = \frac{R_{2cc}}{Z_{2cc}}$	
	$\cos \varphi_{cc} = \frac{P_{cc}}{\sqrt{3} V_{1cc} I_{1n}} = \frac{P_{cc}}{\sqrt{3} V_{2cc} I_{1n}}$	
Tensione di c.c. al Primario	$V_{1cc} = V_{1N} \frac{V_{cc}\%}{100}$	V
Tensione di c.c. al Secondario	$V_{2cc} = V_{20} \frac{V_{cc}\%}{100}$	V

Trasformatore : **Caratteristiche Interne**

	Descrizione	Espressione
Caratteristiche Interne al Primario	Resistenza Equivalente al primario	$R_{1cc} = R_1 + R_2 m^2$
	Impedenza al Primario	$Z_{1cc} = \frac{V_{1cc}}{\sqrt{3} I_{1N}}$
Caratteristiche Interne al Secondario	Impedenza al Secondario	$Z_{2cc} = \frac{V_{2cc}}{\sqrt{3} I_{2N}} = \frac{V_{cc} \% V_{20}^2}{100 S_n}$
	Resistenza equivalente al secondario	$R_{2cc} = \frac{P_{cc}}{3 I_{2n}^2}$
		$R_{2cc} = \frac{P_{cc} \% V_{20}^2}{100 S_n}$

Trasformatore : **CADUTA di TENSIONE**

Le seguenti formule valgono nella condizione in cui il trasformatore alimenta un carico induttivo.

Assoluta	$\Delta V = V_{20} - V_2$ $\Delta V = \sqrt{3} I_2 (R_{2cc} \cos \varphi_2 + X_{2cc} \sin \varphi_2)$
Percentuale	$\Delta V \% = \alpha V_{cc} \% (\cos \varphi_{cc} \cos \varphi_2 + \sin \varphi_{cc} \sin \varphi_2)$
Formula semplificata	$\Delta V \% \cong \alpha V_{cc} \% (\cos^2 \varphi_2 + \sin^2 \varphi_2)$

Tenere conto che $\cos \varphi_2 = \cos \varphi$ del carico.

Trasformatore : ASPETTI COSTRUTTIVI e PERDITE

Descrizione	Espressione
Dipendenza delle perdite dalla tensione al primario	$P_{fe} = k V_1^2$
Espressione generalizzata delle perdite	$P_{fe} \cong \frac{V_1^2}{(4,44 N_1 A_{fe})^2} \left[\frac{a}{f} + b \delta^2 \right] Vol_{fe}$
Dipendenza dal peso del nucleo	$P_{fe} = c B_M^2 \text{ Peso ferro}$
Flusso Massimo determinato dalla tensione al primario	$\Phi_M = \frac{V_1}{4,44 f N_1}$
Perdite per isteresi	$P_i = a f B_M^2 Vol_{fe}$
Perdite per correnti parassite (di Foucault)	$P_{cp} = b (\delta f B_M)^2$
Note	f = frequenza δ = spessore lamierini

Rapporti Primario / Secondario

Rapporto Spire	$m = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1}$
Rapporto di Trasformazione (*)	$K = \frac{V_1}{V_2}$

* Ad esempio il rapporto di trasformazione nei trasformatori delle cabine di utente MT/BT in Italia è tipicamente pari a 50 (in quanto il rapporto tra le tensioni standard è 20.000/400).

TAGLIE NORMALIZZATE DEI TRASFORMATORI MT/BT

S (kVA)	Po (W)	Pcc (W)	Vcc%	Io%
100	480	1955	4-6	2,3
160	650	2850	4-6	2
250	880	3800	4-6	1,8
315	1030	4600	4-6	1,7
400	1200	5500	4-6	1,5
500	1400	6780	6	1,4
630	1650	7800	6	1,3
800	2000	9200	6	1,1
1000	2300	10800	6	1
1250	2700	13100	6	0,9
1600	3100	15800	6	0,9
2000	4000	18000	6	0,8
2500	5000	21850	6	0,7
3150	5600	24150	8	0,6

La tabella riporta i valori normalizzati dei trasformatori di distribuzione Media/Bassa Tensione, tipicamente costruiti secondo il gruppo vettoriale Dyn11, ovvero :

- primario MT a triangolo,
- secondario BT a stella con neutro accessibile

Costruttivamente i trasformatori in Media Tensione possono essere di tre tipi :

- con isolamento in Olio Minerale sigla ONAN
- con isolamento in resina epossidica sigla AN
- con isolamento in aria sigla AN (tipicamente non usati)

Le tensioni normalizzate in Italia per le reti di distribuzione in Media Tensione sono : **20kV** oppure 15 kV (per alcune regioni del Nord-ovest).

Trasformatori : **RIFASAMENTO A VUOTO ED A CARICO**

Dato che il trasformatore per funzionare ha bisogno di una corrente per la sua magnetizzazione, invece che “richiamarla” dalla rete tale corrente è possibile generarla in loco con dei condensatori di rifasamento (soluzione preferibile per evitare le penali).

Tale unità di rifasamento dovrà avere una potenza fissa per rifasare la corrente a vuoto I_0 (che è prevalentemente reattiva) ed una potenza variabile a seconda del carico che alimenta il trasformatore.

Potenza per il rifasamento a vuoto	Potenza per il rifasamento a carico
$Q_{Trv} = S \frac{I_0 \%}{100} \text{ (kvar)}$	$Q_{Trc} = S \frac{\alpha^2 V_{CC} \%}{100} \text{ (kvar)}$

La potenza totale per il rifasamento del trasformatore, è data dalla somma di tali due potenze. Tipicamente, mentre il rifasamento a vuoto è ottenuto tramite una batteria di condensatori fissi installata subito a valle del trasformatore, il rifasamento a carico è effettuato dal sistema di rifasamento delle utenze dell’impianto di Bassa Tensione .

Potenza trasformatore Power transformer KVA	Trasformatori in olio Oil transformer kvar	Trasformatori in resina Resin transformer kvar
10	1	1,5
20	2	1,7
50	4	2
75	5	2,5
100	5	2,5
160	7	4
200	7,5	5
250	8	7,5
315	10	7,5
400	12,5	8
500	15	10
630	17,5	12,5
800	20	15
1000	25	17,5
1250	30	20
1600	35	22
2000	40	25
2500	50	35
3150	60	50

Potenza di rifasamento a vuoto dei trasformatori normalizzati (Fonte ICAR)

Trasformatore :

CONDIZIONI di FUNZIONAMENTO PARTICOLARI

1. Tensione di alimentazione Superiore a quella nominale

- il flusso aumenta in proporzione con l'aumento della tensione
- l'induzione aumenta in proporzione
- le perdite nel ferro aumentano in proporzione quadratica
- la corrente magnetizzante aumenta, dato che il trasformatore dissipa più energia nel ferro, ed aumenta la sua distorsione
- la f.e.m. al secondario aumenta proporzionalmente, e quindi ciò comporta un aumento della potenza erogata al carico.

2. Tensione di alimentazione Inferiore a quella nominale :

- il flusso diminuisce in proporzione alla tensione
- l'induzione diminuisce in proporzione
- le perdite nel ferro diminuiscono in proporzione quadratica con la tensione
- la corrente magnetizzante diminuisce, dato che il trasformatore dissipa meno energia nel ferro
- la f.e.m. al secondario diminuisce.

Tensione al primario	Variazione di P_{fe}	Variazione di I_0
$V_1 > V_{1n}$	aumenta	aumenta
$V_1 < V_{1n}$	diminuisce	diminuisce

3. Frequenza Superiore a quella nominale

- il flusso diminuisce in quanto è inversamente proporzionale alla frequenza
- in egual modo diminuisce l'induzione
- le perdite nel ferro diminuiscono leggermente, in quanto :
 - Le perdite per isteresi diminuiscono
 - Le perdite per correnti parassite restano costanti
- la corrente magnetizzante diminuisce, e diminuisce la distorsione della sua forma d'onda.
- le Reattanze di dispersione aumentano, facendo aumentare le cadute di tensione all'interno del trasformatore, soprattutto se il carico è molto induttivo.

4. Frequenza Inferiore a quella nominale

- il flusso magnetico aumenta in quanto inversamente proporzionale alla frequenza, ed aumenta l'induzione ;
- le perdite nel ferro diminuiscono leggermente, in quanto :
 - Le perdite per isteresi aumentano
 - Le perdite per correnti parassite restano costanti
- aumenta la corrente di magnetizzazione, e le sue componenti armoniche (la 3° e la 5°);
- le Reattanze di dispersione diminuiscono, facendo diminuire le cadute interne.

Frequenza al primario	Variatione di P_{fe}	Variatione di I_0
$f > f_n$	leggera diminuzione	diminuisce
$f < f_n$	leggero aumento	aumenta

Parte 4° - Elementi di Meccanica delle Macchine Elettriche

Definizione	Espressione	U. M.
Potenza Nominale	P_n	kW
Velocità effettiva del rotore	n	$Giri/min$
Velocità Angolare (effettiva)	$\omega = \frac{2\pi n}{60}$	Rad/sec
Coppia Nominale resa all'asse (valida per qualunque tipo di motore)	$C_n = \frac{P_n}{\omega}$	$N m$
Velocità nominale o sincrona	n_1	$Giri/min$
Velocità Angolare sincrona (del c.m.r.)	$\omega_1 = \frac{2\pi n_1}{60}$	Rad/sec
Coppia Trasmessa (dallo statore al rotore)*	$C_t = \frac{P_t}{\omega_1}$	$N m$

(*) P_t è la Potenza Trasmessa dal c.m.r. (vedere oltre)

Coppia Persa per Attrito e Ventilazione

$C_n = C_t - C_m$ $C_m = \frac{P_m}{\omega}$	<p>P_m = Perdite meccaniche per attrito e Ventilazione</p> <p>C_m = Coppia persa a causa delle perdite meccaniche</p> <p>C_n = Coppia Nominale (o coppia resa)</p> <p>C_t = Coppia Trasmessa (dal c.m.r.), anche detta Coppia Lorda</p>
--	---

NOTA : Le Pompe idrauliche

Dalla portata e dalla prevalenza (altezza) di una pompa idraulica si trova la potenza necessaria per muovere il fluido (acqua) :

$P = Q g h$ $P_n = 1,25 P (*)$	<p>Q = Portata in Litri /secondo</p> <p>$g = 9,8 \text{ m/s}^2$</p> <p>h = altezza in metri</p>
--------------------------------	--

(*) Si considera una maggiorazione del 25% per tenere conto delle perdite di carico e del rendimento effettivo della pompa.

Il calcolo è valido anche per calcolare la potenza resa da una turbina idraulica di una centrale idroelettrica.

Parte 5° - Motori in Corrente Alternata

Campo Magnetico Rotante (c.m.r.)

La velocità di rotazione del campo magnetico rotante, detta anche velocità Sincrona, si calcola con la seguente espressione :

$n_1 = \frac{60 f}{cp} = \frac{120 f}{p} \text{ (giri/min)}$	<p><i>cp</i> : numero di coppie polari</p> <p><i>p</i> : numero di poli</p> <p><i>f</i> : frequenza (ad es. 50 Hz)</p>
--	--

Tabella fondamentale delle velocità dei motori trifasi a 50 Hz

Numero di Poli	Coppie Polari	Velocità (giri/min.)
2	1	3000
4	2	1500
6	3	1000
8	4	750
10 *	5	600
12 *	6	500
ecc..

* Oltre gli 8 poli non sono motori standard in commercio.

Potenza dei Motori

Definizione	Espressione	U. M.
Potenza Nominale (resa all'asse, meccanica) : è la potenza indicata sulla targa del motore	P_n	kW
Potenza Assorbita (dalla rete elettrica)	$P_a = \frac{P_n}{\eta}$	kW
	$P_a = \sqrt{3} V_n I_n \cos \varphi$	kW

Rendimento	$\eta = \frac{P_n}{P_a}$
Esempio	$\eta = 0,915 \equiv 91,5\%$

Parte 6° - Motori Asincroni Trifasi

Scorrimento

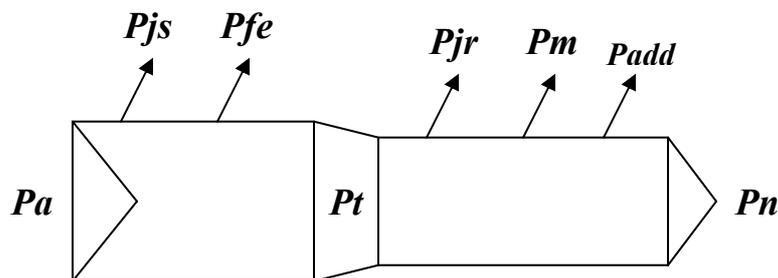
Indicando con n_1 la velocità di rotazione del campo magnetico rotante, e con n quella effettiva del rotore si ha che :

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} \qquad n = n_1 - s n_1$$

Frequenza Rotorica

Rapporto tra le frequenze $f_2 = s f_1$

BILANCIO ENERGETICO A CARICO



$$P_a = P_{fe} + P_{js} + P_{jr} + P_m + P_{add} + P_n$$

POTENZA TRASMESSA

Potenza Trasmessa [vista da lato alimentazione]	$P_t = P_{ass} - P_{fe} - P_{js}$
Potenza Trasmessa [vista da lato asse]	$P_t = P_{jr} + P_m + P_{add} + P_n$

Motore Asincrono : PERDITE a CARICO

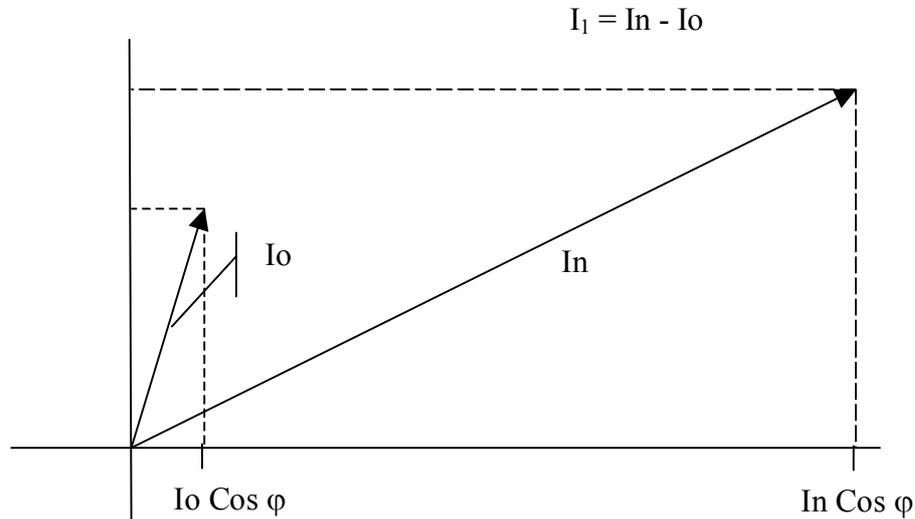
Descrizione	Espressione
Perdite nel Ferro	P_{fe} <i>P_{fe} = P isteresi + P correnti parassite</i>
Dipendenza delle Perdite nel ferro dalla tensione e frequenza di statore	P_{fe} = V² K = V² ($\frac{K_1}{f} + K_2$)
Perdite nel rame, o Joule, di statore (Rs = resistenza a stella)	P_{js} = 3 R_s I_n²
Perdite nel rame di rotore	P_{jr} = s P_t
Perdite Meccaniche	P_m <i>P_m = P attrito + P ventilazione</i>
Perdite Addizionali	P_{add} = 0,5% di P_n o P_t

Motore Asincrono : BILANCIO ENERGETICO a VUOTO

Descrizione	Espressione
Perdite in base alla corrente assorbita	P₀ = √3 V I₀ Cos φ₀
Causa delle perdite a vuoto	P₀ = P_{jso} + P_{fe} + P_m
Perdite nel rame di statore	P_{jso} = 3 R_s I_o²
Perdite nel rame di rotore	P_{jro} = 0 (trascurabili)

Corrente di Statore

La corrente dello statore è composta da 2 correnti, quella utile per erogare potenza meccanica e quella dovuta alle perdite a vuoto, quindi per trovare la I_1 è necessario fare una sottrazione vettoriale :



<i>Componenti Attive</i>	<i>Componenti Reattive</i>
$I_{1a} = I_n \cos \varphi$ $I_{0a} = I_0 \cos \varphi_0$	$I_{1r} = I_n \sin \varphi$ $I_{0r} = I_0 \sin \varphi_0$
$I_{1a} = I_{na} - I_{0a}$	$I_{1r} = I_{nr} - I_{0r}$
$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1r}^2}$	

Corrente al Rotore

La corrente che circola nello rotore dipende dalla corrente che lo statore gli “trasmette”, da calcolarsi mediante il rapporto di trasformazione, qui indicato con k :

$$I_2 = k I_1$$

Motore Asincrono

CONDIZIONI di FUNZIONAMENTO PARTICOLARI

1. Tensione di alimentazione ridotta

Dato che la coppia è direttamente proporzionale al quadrato della tensione, si avrà una conseguente riduzione anche della potenza, applicando la seguente proporzione :

$$P_a : V_n^2 = P_{rid} : V_{rid}^2$$

2. Resistenza Statorica

Formula per calcolare la potenza dissipata dallo statore (perdite nel rame o perdite Joule) misurando la resistenza statorica :

$$P_{js} = 3/2 R_s I^2$$

La R_s si intende la resistenza statorica misurata su due morsetti del motore con tutti gli avvolgimenti collegati (valida indifferentemente sia a stella che a triangolo).

Motore Asincrono : TAGLIE NORMALIZZATE

Output kW	Motor type	Product code	Speed r/min	Efficiency		Power factor cos φ	Current		Torque			
				Full load 100%	3/4 load 75%		I_N A	I_s I_N	T_N Nm	T_s T_N	T_{max} T_N	
3000 r/min = 2-poles			400 V 50 Hz				Basic design					
0.09	M2VA 56 A	3GVA 051 001-***A	2820	59.8	53.3	0.69	0.32	3.9	0.31	2.9	2.7	
0.12	M2VA 56 B	3GVA 051 002-***A	2840	67.2	63.8	0.64	0.41	4.1	0.4	3.2	2.8	
0.18	M2VA 63 A	3GVA 061 001-***A	2820	73.7	70.6	0.64	0.56	4.2	0.6	3.5	3.1	
0.25	M2VA 63 B	3GVA 061 002-***A	2810	77.5	75.8	0.71	0.66	4.5	0.9	3.6	3.3	
0.37	M2VA 71 A	3GVA 071 001-***C	2840	77.1	76.5	0.72	1.00	5.5	1.3	3.8	3.9	
0.55	M2VA 71 B	3GVA 071 002-***C	2830	79.2	78.2	0.76	1.35	5.7	1.9	3.6	3.7	
0.75	M2VA 80 A	3GVA 081 001-***B	2870	81.2	79.3	0.75	1.80	6.2	2.5	2.9	3.6	
1.1	M2VA 80 B	3GVA 081 002-***B	2850	81.4	79.5	0.78	2.50	6.1	3.7	2.3	3.5	
1.5	M2AA 90 S	3GAA 091 001-***E	2870	80.1	76.2	0.82	3.35	5.5	5.0	2.4	3.0	
2.2	M2AA 90 L	3GAA 091 002-***E	2880	83.6	83.9	0.87	4.37	7.0	7.5	2.7	3.0	
3	M2AA 100 L	3GAA 101 001-***E	2900	86.0	84.1	0.88	5.95	7.5	10.0	2.7	3.6	
4	M2AA 112 M	3GAA 111 101-***E	2895	85.7	86.1	0.90	7.60	7.2	13.2	2.7	3.3	
4	M2AA 112 M	3GAA 111 001-***A	2850	86.0	86.0	0.91	7.40	7.5	13.4	2.8	3.0	
5.5	M2AA 132 SA	3GAA 131 001-***A	2855	86.0	86.0	0.88	10.50	6.8	18.3	2.7	3.6	
7.5	M2AA 132 SB	3GAA 131 002-***A	2855	87.0	87.0	0.90	13.90	7.2	25.0	3.2	3.8	
11	¹⁾ M2AA 160 MA	3GAA 161 111-***A	2915	88.4	88.9	0.89	20.50	6.1	36.0	2.1	2.5	
15	¹⁾ M2AA 160 M	3GAA 161 112-***A	2900	89.5	89.9	0.90	27.00	6.1	49.4	2.4	2.6	
18.5	¹⁾ M2AA 160 L	3GAA 161 113-***A	2915	90.2	90.5	0.91	32.50	6.8	61.0	2.6	3.0	
22	¹⁾ M2AA 180 M	3GAA 181 111-***A	2925	91.2	91.3	0.89	39.00	7.9	72.0	2.7	3.4	
30	¹⁾ M2AA 200 LA	3GAA 201 011-***A	2945	92.0	92.0	0.88	53.00	7.9	97.0	3.0	3.7	
37	¹⁾²⁾ M2AA 200 L	3GAA 201 012-***A	2945	92.8	92.9	0.89	65.00	8.2	120.0	3.1	3.6	
45	M2AA 225 M	3GAA 221 011-***A	2940	93.0	93.0	0.88	80.00	7.7	146.0	2.8	3.0	
55	¹⁾ M2AA 250 M	3GAA 251 011-***A	2960	93.5	93.8	0.90	95.00	7.3	177.0	2.8	3.0	

Tabella dei motori normalizzati 2 poli "EFF2" con corpo in alluminio IP55 (Fonte ABB)