

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale in ingegneria elettrotecnica



TESI DI LAUREA

**DETERMINAZIONE DELLE GRANDEZZE DEL CIRCUITO
EQUIVALENTE E DEL RENDIMENTO DI UN MOTORE
ASINCRONO TRIFASE CON ROTORE A GABBIA SECONDO LE
NORMATIVE CEI EN 60034-28 E CEI EN 60034-2-1**

Relatore: Ing. Renato Gobbo

Laureando: Garbin Michele

ANNO ACCADEMICO 2009/2010

INDICE

PREMESSA pag.4

DERMINAZIONE DEI PARAMETRI EQUIVALENTI SECONDO CEI EN 60034-28

SCOPO ESPERIENZA pag.5

RIFERIMENTI NORMATIVI pag.5

TERMINI, DEFINIZIONI E SIMBOLI pag.6

REQUISITI DI PROVA pag.8

APPROSIMAZIONI ED INCERTEZZE pag.9

PROVE EFFETTUATE

MIURA RESISTENZA DI STATORE pag.11

PROVA A CARICO pag.12

PROVA A VUOTO pag.13

PROVA IN CORTO CIRCUITO pag.14

METODI PER LA DETERMINAZIONE DEL RENDIMENTO MEDIANTE PROVE SECONDO LA NORMATIVA CEI EN 60034-2-1

SCOPO pag.26

RIFERIMENTI NORMATIVI pag.26

APPROSIMAZIONI ED INCERTEZZE pag.27

REQUISITI DI PROVA pag.27

DETERMINAZIONE PER METODO DIRETTO pag.28

DETERMINAZIONE PER METODO INDIRETTO pag.29

-DALLA PROVA A CARICO pag.31

-DA VOLORI ASSEGNATI DA TABELLA pag.33

-CON IL METODO EH-STAR pag.34

PREMESSA

Negli ultimi anni si è cercato di ridurre i consumi di energia provenienti da fonti fossili (petrolio, carbone, gas) perché esauribili ed inquinanti. Ciò è stato possibile attraverso l'utilizzo di fonti alternative quali pannelli solari, generatori eolici ecc. definite pulite perché a minor impatto ambientale e il risparmio energetico. Quest'ultimo consiste nel "sprecare" la minor energia possibile ottenendo il risultato voluto grazie a materiali e tecnologie di costruzione più efficienti.

Per quanto riguarda la nostra esperienza oltre alla determinazione delle caratteristiche elettriche si è voluto valutare anche il rendimento e in base a questo classificare il motore in una delle tre fasce di efficienza (IE1 IE2 IE3) definite dalla normativa CEI 60034-30

Per un motore come il nostro da 1.1 Kw con rotore a gabbia la fascia IE1 (standard efficiency) arriva fino a un rendimento del 75% quella IE2 (high efficiency) è compresa tra il 75% e 81.4% e quella IE3 (premium efficiency) tra 81.4% e 84.1%

C'è da tenere in considerazione che il nostro motore è di uso commerciale perciò per essere competitivo nel mercato dovrà avere un costo contenuto a discapito delle "qualità" meccaniche ed elettriche del motore e quindi del rendimento. Ciò significa inevitabilmente avere minor rame e ferro possibile.

Minor rame → sezione dei conduttori ridotte → elevata resistenza → perdite per effetto joule elevate.

Minor ferro → sezione ferro ridotta → elevata induzione (B) per

avere flusso nominale → perdite per isteresi e correnti parassite elevate perché all'incirca proporzionali a B^2 → perdite a vuoto elevate. Sono questi due tipi di perdite che incidono fortemente il rendimento di una macchina elettrica

Per valutare il rendimento è necessario avere dei riferimenti e tecniche di misura dati dalle normative.

DETERMINAZIONE DEI PARAMETRI EQUIVALENTI SECONDO CEI EN 60034-28

SCOPO

Questa parte della IEC 60034 fornisce un procedura standar per determinare i parametri elettrici del circuito equivalente monofase di un motore trifase a bassa tensione con rotore a gabbia

RIFERIMENTI NORMATIVI

I seguenti documenti sono indispensabili per l'applicazione di questa normativa

IEC 60034-1 (parte 1) macchine elettriche rotanti; prestazioni

IEC 60044 (tutte le parti) strumenti di trasformatori

IEC 60072-1 (parte 1) dimensioni per macchine elettriche rotanti numeri di telaio 56-400 e numeri di flangia 55-1080

TERMINI, DEFINIZIONI E SIMBOLI

$\cos\varphi$ Fattore di potenza

$\cos\varphi_N$ Fattore di potenza nominale

f_1 è la frequenza fornita allo statore, s^{-1}

f_r è la frequenza della corrente di rotore, s^{-1}

f_N è la frequenza nominale, s^{-1}

h è l'altezza del conduttore di barra di rotore, m

H è l'altezza dell'albero motore, mm

I è la corrente di linea, A

I_s è la corrente di fase di statore, A

I_r è la corrente di rotore, A

I_m è la corrente magnetizzante, A

I_N è la corrente nominale, A

K_i è il coefficiente di effetto pelle per le induttanze

K_s è il reciproco del coefficiente di temperatura di resistenza a 0°C dei materiali conduttori di statore

K_r è il reciproco del coefficiente di temperatura di resistenza a 0°C dei materiali conduttori di rotore

K_σ è il rapporto fra l'induttanza di perdita di statore e rotore

L_m è l'induttanza di magnetizzazione, H

L_s è l'induttanza di perdita di statore, H

L_r è l'induttanza di perdita di rotore, H

L_{σ} è l'induttanza di perdita totale ($L_s+L'_r$), H

$L_{\sigma a}$ è l'induttanza di perdita totale trascurando l'effetto pelle, H

L_{ts} è l'induttanza di statore totale (L_m+L_s), H

L'_{tr} è l'induttanza di rotore totale ($L_m+L'_r$), H

n è il numero di giri, giri/min

n_N è il numero di giri nominale, giri/min

p è il numero di poli

P_1 è la potenza elettrica in ingresso, W

P_k sono le perdite costanti, W

P_{fw} sono le perdite per attrito e ventilazione, W

P_{fe} sono le perdite nel ferro, W

R è la resistenza di linea, Ω

R_{fe} è la resistenza equivalente delle perdite nel ferro, Ω

$R_{ll,m}$ è la resistenza misurata tra due morsetti alla temperatura iniziale, Ω

$R_{s,25}$ è la resistenza di fase di statore corretta alla temp. di 25°C, Ω

R'_r è la resistenza di gabbia del rotore, Ω

$R'_{r,25}$ è la resistenza di gabbia di rotore corretta alla temp. di 25°C, Ω

$R'_{r,m}$ è la resistenza di rotore alla temp. Iniziale, Ω

Z è l'impedenza del motore, Ω

U è la tensione di statore, V

U_s è la tensione di fase, V

U_m è la caduta di tensione sull'induttanza di magnetizzazione, V

U_N è la tensione nominale, V

γ_r è la conduttività del conduttore di rotore, S/m

ξ è il fattore di spostamento del conduttore di rotore

θ_0 è la temperatura del liquido di raffreddamento all'inizio di misura di resistenza, °C

θ_L è la temperatura dell'aria alla fine della prova a carico, °C

θ_{NL} è la temperatura dell'aria alla fine della prova a vuoto, °C

EQUIVALENTE COLLEGAMENTO A Y

I valori che si troveranno in seguito faranno riferimento ad una fase del circuito equivalente del motore collegato a Y anche se fosse collegato a Δ

REQUISITI DI PROVA

-La frequenza di alimentazione durante le prove non dovrà oscillare oltre lo 0.3% dei 50 Hz.

-La forma e la simmetria della tensione di alimentazione dovrà essere conforme alle prescrizioni della IEC 60034-1 paragrafo 8.3.1

-Gli strumenti di misura di grandezze elettriche meccaniche e di velocità devono avere una classe di precisione superiore allo 0.5 o meglio in conformità alla IEC 60051-1

-Lo strumento per misurare la temperatura avrà una precisione di $\pm 1^\circ\text{C}$

APPROSSIMAZIONI ED INCERTEZZE

I circuiti equivalenti sono ampiamente usati per il controllo della velocità dei motori asincroni alimentati da convertitori. La conoscenza di questi schemi è essenziale se i motori e convertitori sono forniti da diversi costruttori.

Il circuito equivalente di per sé è un'approssimazione in più con la seguente procedura si introducono ulteriori approssimazioni.

Queste approssimazioni sono:

- Le perdite nel ferro non sono considerate per ottenere i valori delle induttanze e si trascurano eventuali saturazioni
- gli effetti delle correnti parassite sulle induttanze e resistenze sono trascurate perché l'applicazione del circuito equivalente non è destinato al processo di avvio del motore
- Per calcolare la totale induttanza di dispersione $L\sigma$ si deve stimare l'altezza della barra di rotore a meno che non sia fornita dal costruttore
- La distribuzione della $L\sigma$ nello statore e nel rotore (L_s e L_r) si basa su ipotesi di massima e non si può determinare con precisione con i metodi descritti in questa norma
- La differenza di temperatura tra ambiente e conduttore è trascurata
- Le perdite nel nucleo dello statore sono prese in considerazione mentre quelle del rotore sono trascurate. Tuttavia la rappresentazione all'avvio non è rappresentata correttamente

DATI TARGA MOTORE

$P_N=1100$ w $I_N=2.8$ A $\text{Cosp}_N=0.78$ $N_0=2840$ giri/min

PROVE EFFETTUATE

MISURA RESISTENZA DI STATORE

La resistenza $R_{ll,m}$ sarà presa come la media dei valori delle tre fasi alla temperatura ambiente di inizio prova θ_0

	mA	V	
u,v	99,9	1,234	$R_{u,v}=12.35\Omega$ $\theta_0=24^\circ\text{C}$
v,w	99,8	1,229	$R_{v,w}=12.3\Omega$
u,w	99,9	1,230	$R_{u,w}=12.31\Omega$

$$R_{ll,m}=12.32\Omega$$

PROVA A CARICO

Applicare tensione e frequenza nominale ai morsetti. Aumentare il carico fino a che la corrente di linea è uguale alla corrente nominale I_N . Misura la tensione U , la corrente I , la potenza P_1 , la temperatura θ_1 e il numero di giri n

carico [N*m]	giri/min	lass [A]	U [V]	cos φ	s	Pass[W]	Perog[W]
0,5	2975	1,802	395,61	0,2757	0,0083	340,82	156.0
1	2958	1,840	394,61	0,3955	0,0140	497,94	310.0
2	2923	2,060	394,44	0,5902	0,0257	831,19	612,7
3	2880	2,407	394,56	0,7179	0,0400	1182.00	906,4
4	2833	2,855	394.00	0,7964	0,0557	1553,20	1189.0
5	2776	3,392	393,61	0,8438	0,0747	1953,10	1456.0

PROVA A VUOTO

Effettuare la prova a vuoto subito dopo la prova a carico in modo da garantire una stabilizzazione delle perdite. Misurare U,I,P1 per 10 valori di corrente in modo che la tensione sia compresa tra il 20% e il 110% del valore nominale e che la corrente non superi 1.5 volte I_N

	U[V]	I[A]	P1[W]
1	449,40	2,8990	312,100
2	442,03	2,7188	286,290
3	405,82	1,9909	194,760
4	362,30	1,3993	126,040
5	319,08	1,0773	91,860
6	282,79	0,8734	71,840
7	238,44	0,6904	56,913
8	200,27	0,5527	46,713
9	160,44	0,4360	39,133
10	121,12	0,3434	33,808
11	79,92	0,3051	30,118

PROVA IN CORTO CIRCUITO

Bloccare il rotore in modo tale da avere uno scorrimento $S=1$.

Incrementare la tensione finchè la corrente di linea arrivi a 1.5

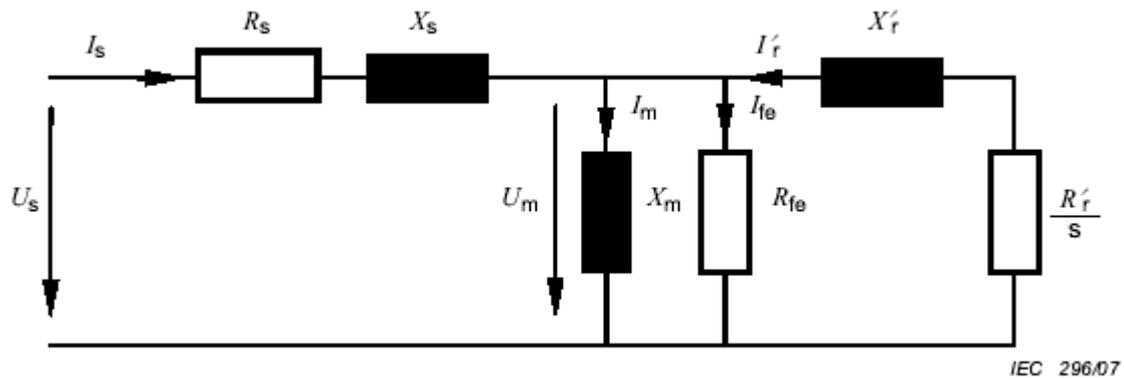
volte I_N . Misurare U, I, P_1 per 10 valori di corrente ben equidistanti

tra il 10% e il 150% della corrente I_N

	U	I	P1	Z	Cosφ
1	14,233	0,3754	5,507	21,889	0,5951
2	17,305	0,4815	8,894	20,749	0,6163
3	31,269	0,9459	31,029	19,013	0,6034
4	47,762	1,5390	92,040	17,917	0,7229
5	64,894	2,1120	173,563	17,399	0,7311
6	76,271	2,5110	245,538	17,537	0,7040
7	87,824	2,9180	332,099	17,736	0,7480
8	103,906	3,4900	475,920	17,182	0,7577
9	117,940	3,9830	623,680	17,096	0,7665
10	135,296	4,6170	838,100	16,918	0,7746

DETERMINAZIONE DEI PARAMETRI DEL MOTORE

Lo schema di principio è il seguente



Resistenza di statore corretta alla temperatura di 25°C

$$R_{s,25} = 0.5 * R_{ll,m} * (K_s + 25) / (K_s + \Theta_0) = 6.28 \Omega \quad K_s = 235 \text{ per Cu}$$

Resistenza equivalente delle perdite nel ferro R_{fe}

$$R_{fe} = 3 * U_s^2 / P_{fe} \quad \text{dove } U_s = U_N^2 / \sqrt{3}$$

$$P_{fe} = P_k - P_{fw}$$

Determinazione di P_k (perdite costanti)

Per ogni valore di tensione misurato nella prova a vuoto trovare le perdite costanti che sono uguali a

$$P_k = P_1 - 3 * I^2 * R_{s,25} * (K_s + \Theta_{nl}) / (K_s + 25)$$

dove Θ_{nl} è la temperatura misurata alla fine della prova a vuoto ed è pari a 24°C

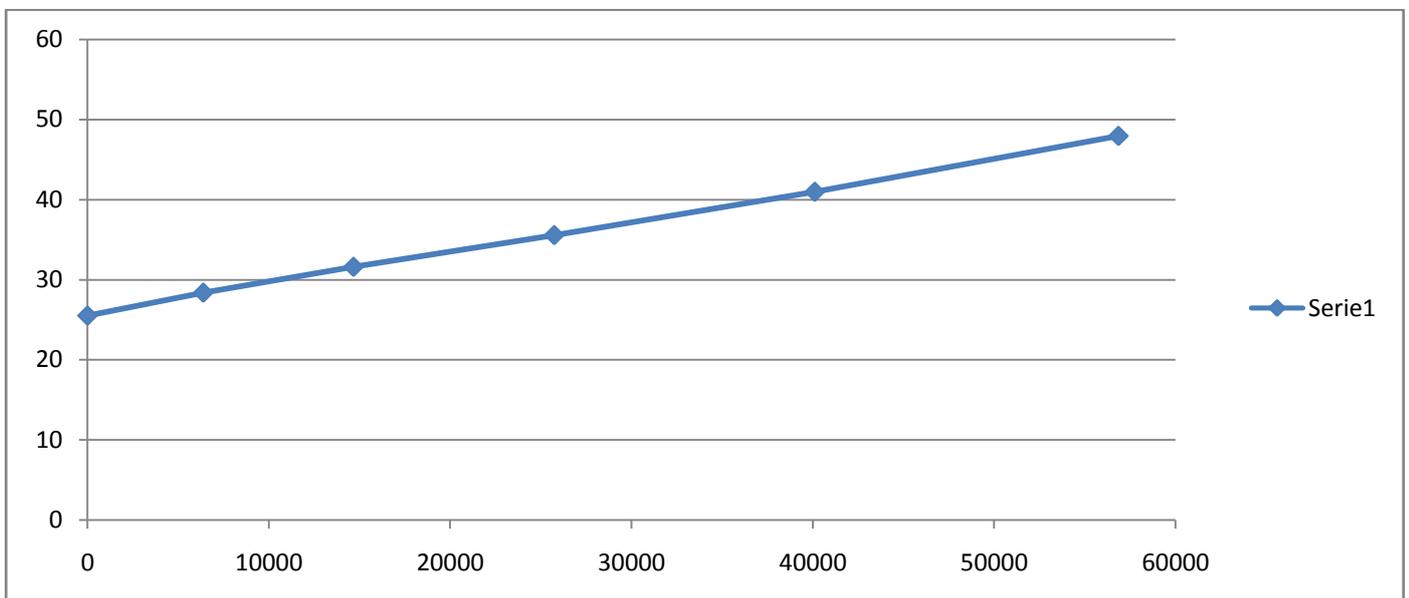
	U[V]	I _m =I[A]	P ₁ [W]	P _k [W]	U ²
1	449,40	2,8990	312,100	153,970	201960
2	442,03	2,7188	286,290	147,209	195390
3	405,82	1,9909	194,760	120,181	164689
4	362,30	1,3993	126,040	89,198	131261
5	319,08	1,0773	91,860	70,023	101812
6	282,79	0,8734	71,840	57,187	79970
7	238,44	0,6904	56,913	47,941	56854
8	200,27	0,5527	46,713	40,965	40108
9	160,44	0,4360	39,133	35,556	25741
10	121,12	0,3434	33,808	31,589	14670
11	79,92	0,3051	30,118	28,366	6387

Interpolando trovo per $U_N = 400V$ $P_k = 116.39W$

Determinazione di Pfw (per attrito e ventilazione)

Per ogni valore di tensione inferiore al 50% della tensione nominale misurato nella prova a vuoto disegnare Pk in funzione della U^2 . La Pfw sarà determinata dall'intersezione delle ordinate con il prolungamento della curva. In questo caso Pfw=25.5 W

$$P_k = f(U^2)$$



Le perdite per attrito e ventilazione sono considerate indipendenti dal carico e nel circuito equivalente non vengono prese in considerazione. Quelle per attrito sono proporzionali al numero di giri n mentre quelle per ventilazione sono proporzionali a n^3

$$R_{fe} = 3 \cdot U_s^2 / P_{fe} = 1760.37 \Omega$$

Induttanza totale di statore $L_{ts}=(L_m+L_s)$

Dalla prova a vuoto per ogni valore della corrente I determinare l'impedenza Z , il fattore di potenza $\cos\varphi$, la resistenza R , la reattanza X_{ts} e l'induttanza L_{ts} e disegnare L_{ts} in funzione di I

$$Z_{s=0} = \frac{U}{I \cdot \sqrt{3}}$$

L_m =induttanza di magnetizzazione
 L_s =induttanza di perdita di statore

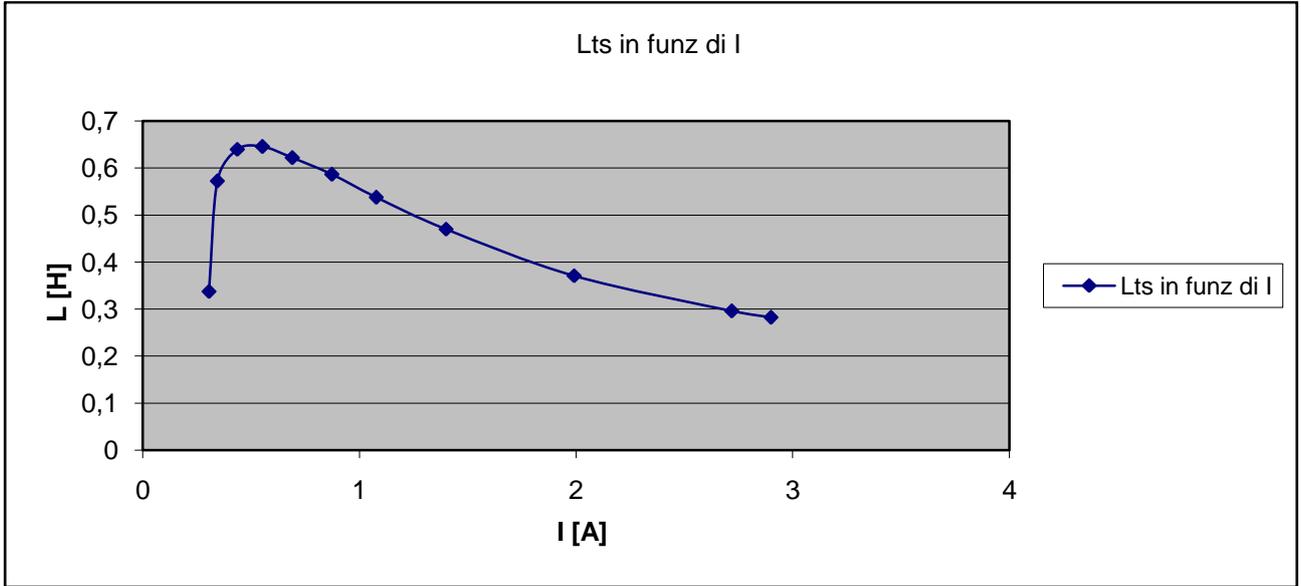
$$\cos \varphi = \frac{P_1}{U \cdot I \cdot \sqrt{3}}$$

$$R_{s=0} = Z_{s=0} \cdot \cos \varphi$$

$$X_{ts} = \sqrt{Z_{s=0}^2 - R_{s=0}^2}$$

$$L_{ts} = \frac{X_{ts}}{2\pi \cdot f_N}$$

	U	P1	Z s=0	cos φ	R s=0	Im=l	Xts	Lts
1	449,40	312,100	89,500	0,1383	12,378	2,899	88,640	0,2822
2	442,03	286,290	93,867	0,1375	12,910	2,718	92,975	0,2959
3	405,82	194,760	117,685	0,1392	16,378	1,990	116,540	0,3710
4	362,30	126,040	149,485	0,1549	23,159	1,399	147,680	0,4701
5	319,08	91,860	171,000	0,1543	26,383	1,077	168,955	0,5378
6	282,79	71,840	186,935	0,1679	31,392	0,873	184,280	0,5866
7	238,44	56,913	199,396	0,1996	39,800	0,690	195,384	0,6219
8	200,27	46,713	209,202	0,2437	50,973	0,552	202,897	0,6458
9	160,44	39,133	212,454	0,3230	68,619	0,436	201,067	0,6400
10	121,12	33,808	203,636	0,4693	95,564	0,343	179,819	0,5724



Induttanza totale di perdita $L_{\sigma}=(L_s+L'r)$

Per valori di scorrimento elevati la resistenza di rotore $R'r/s$ diventa trascurabile rispetto alla reattanza $2\pi f L_m^2/L'tr$ e quindi la parte reattiva della misura di impedenza è principalmente L_{σ}
Per ogni valore della corrente I della prova in corto circuito determinare

$$Z = \frac{U}{I \cdot \sqrt{3}}$$

l'impedenza del motore Z

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{U \cdot I \cdot \sqrt{3}}$$

fattore di potenza $\cos \varphi$

$$R = Z \cdot \cos \varphi$$

resistenza R

$$X_{\sigma a} = \sqrt{Z^2 - R^2}$$

reattanza di dispersione totale $X_{\sigma a}$
trascurando l'effetto pelle

$$L_{\sigma a} = \frac{X_{\sigma a}}{2\pi \cdot f_N}$$

induttanza di dispersione totale $L_{\sigma a}$
trascurando l'effetto pelle

Usando le seguenti formule valide per un motore a gabbia con barre rettangolari si introduce l'effetto pelle. Non avendo dati precisi riguardo la lunghezza H si fa qualche ipotesi ragionevole

$$h = \left(0,21 - \frac{2p}{100} \right) \cdot \frac{H}{1000}$$

H=200mm lunghezza barra

$$\xi = h \cdot \sqrt{\pi \cdot f \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \gamma_r}$$

$\gamma_r = 59 \cdot 10^6$ S/m conduttività rame

$$k_i = \frac{3}{2\xi} \cdot \frac{\sinh(2\xi) - \sin(2\xi)}{\cosh(2\xi) - \cos(2\xi)}$$

$$L_\sigma = L_{\sigma a} \cdot \frac{k_\sigma + 1}{k_\sigma + k_i}$$

$K\sigma = L_s/L'r = 1$ per piccoli motori

	U	I	P1	Z	Cosφ	R	Xσa	Lσa	Lσ
1	14,233	0,3754	5,507	21,8890	0,5951	13,0250	17,5920	0,0560	0,0814
2	17,305	0,4815	8,894	20,7490	0,6163	12,7874	16,3413	0,0520	0,0756
3	31,269	0,9459	31,029	19,0133	0,6034	11,4725	15,1621	0,0483	0,0701
4	47,762	1,5390	92,040	17,9177	0,7229	12,9532	12,3798	0,0394	0,0572
5	64,894	2,1120	173,563	17,3990	0,7311	12,9702	12,1027	0,0385	0,0560
6	76,271	2,5110	245,538	17,5370	0,7040	12,9809	11,7950	0,0375	0,0545
7	87,824	2,9180	332,099	17,7360	0,7480	13,0000	11,5293	0,0367	0,0533
8	103,906	3,4900	475,920	17,1820	0,7577	13,0245	11,2173	0,0357	0,0519
9	117,940	3,9830	623,680	17,0958	0,7665	13,1045	10,9791	0,0349	0,0508
10	135,296	4,6170	838,100	16,9180	0,7746	13,1055	10,6997	0,0341	0,0495

Induttanza di magnetizzazione Lm e tensione Um

Per ogni valore della corrente magnetizzante Im data dalla prova a vuoto trovare Lts calcolare la corrispondente Lσ interpolando linearmente con i valori di Is

Is	Lσ	Im=l	Lσ
0,3754	0,0814	2,8990	0,0534
0,4815	0,0756	2,7188	0,0544
0,9459	0,0701	1,9909	0,0563
1,5390	0,0572	1,3993	0,0602
2,1120	0,0560	1,0773	0,0672
2,5110	0,0545	0,8734	0,0710
2,9180	0,0533	0,6904	0,0731
3,4900	0,0519	0,5527	0,0748
3,9830	0,0508	0,4360	0,0781
4,6170	0,0495	0,3434	0,0831

L'induttanza magnetizzante Lm e la relativa tensione Um sarà

$$L_m = L_{ts} - L_s = L_{ts} - \frac{L_\sigma}{1+1/k_\sigma} \quad U_m = 2\pi \cdot f_N \cdot L_m \cdot I_m$$

e l'induttanza di statore e rotore risultano

$$L_s = L_{ts} - L_m \quad L_r' = L_\sigma - L_s$$

Im=l	Lσ	Lts	Lm	Ls=L'r	Um
2,8990	0,0534	0,2822	0,2555	0,0267	232,6960
2,7188	0,0544	0,2959	0,2687	0,0272	229,5064
1,9909	0,0563	0,3710	0,3428	0,0282	214,4076
1,3993	0,0602	0,4701	0,4400	0,0301	193,4253
1,0773	0,0672	0,5378	0,5042	0,0336	170,6434
0,8734	0,0710	0,5866	0,5511	0,0355	151,2145
0,6904	0,0731	0,6219	0,5854	0,0365	126,9707
0,5527	0,0748	0,6458	0,6066	0,0392	105,3275
0,4360	0,0781	0,6400	0,6009	0,0391	82,3073
0,3434	0,0831	0,5724	0,5309	0,0415	57,2747

Nel nostro caso le induttanze devono essere fornite per il funzionamento nominale; è perciò indispensabile conoscere I_s, I_r, I_m per la condizione di carico nominale

$$I_s = I_N$$

$$I_s = 2.8 \text{ A}$$

Determino l'induttanza L_s interpolando linearmente con la corrente di statore I_s ed ottengo

$$L_s = 0.0276 \text{ H}$$

$$U_s = \frac{U_N}{\sqrt{3}}$$

Determino la tensione di magnetizzazione

$$U_{ma} = U_s - I_s \cdot \left(\cos \varphi_N \cdot R_{s,25} + \sqrt{1 - (\cos \varphi_N)^2} \cdot 2\pi \cdot f_N \cdot L_s \right)$$

$$U_{mb} = I_s \cdot \left(\sqrt{1 - (\cos \varphi_N)^2} \cdot R_{s,25} - \cos \varphi_N \cdot 2\pi \cdot f_N \cdot L_s \right)$$

$$U_m = \sqrt{U_{ma}^2 + U_{mb}^2}$$

E determino l'induttanza di magnetizzazione L_m interpolando linearmente con la tensione di magnetizzazione U_m ed ottengo

$$L_m = 0.4075 \text{ H}$$

Determino la corrente di rotore I_r

$$I_r' = \sqrt{\left(\frac{U_{mb}}{2\pi \cdot f_N \cdot L_m} - I_s \cdot \cos \varphi_N\right)^2 + \left(I_s \cdot \sqrt{1 - (\cos \varphi_N)^2} - \frac{U_{ma}}{2\pi \cdot f_N \cdot L_m}\right)^2}$$

E trovo L'r interpolando linearmente con la corrente I'r

$$L'r = 0.0276 \text{ H}$$

Ultimo dato è la resistenza di rotore riferita allo statore R'r alla temperatura di 25°C

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{U \cdot I \cdot \sqrt{3}}$$

$$Z = \frac{U}{I \cdot \sqrt{3}}$$

$$X = Z \cdot \sqrt{1 - (\cos \varphi)^2}$$

$$X_r' = 2\pi \cdot f_N \cdot L_r'$$

$$X_s = 2\pi \cdot f_N \cdot L_s$$

$$X_m = 2\pi \cdot f_N \cdot L_m$$

$$R_{r,25}' = s \cdot (X_r' + X_m) \cdot \sqrt{\frac{X_m \cdot X_r' - (X - X_s)}{X_m + X_r'}} \cdot \frac{k_r + 25}{k_r + \theta_L}$$

θ_L = temperatura di fine prova a carico 40°C

$$R'_{r,25} = 4.406 \text{ } \Omega$$

RIASSUMENDO I VALORI TROVATI SONO

$$R_{s,25}=6.28 \Omega$$

$$R_{fe}=1760.37 \Omega$$

$$R'_{r,25}=4.406 \Omega$$

$$X_s=8.67 \Omega$$

$$X_m=128.02 \Omega$$

$$X'_{r}=8.67 \Omega$$

METODI PER LA DETERMINAZIONE DEL RENDIMENTO MEDIANTE PROVE SECONDO LA NORMATIVA CEI EN 60034-2-1

SCOPO

Questa parte della IEC 60034 stabilisce i metodi per ottenere rendimento e perdite specifiche mediante prove. Questa norma si applica alle macchine sincrone e asincrone in c.c. e c.a. escluse le macchine per i veicoli di trazione

RIFERIMENTI NORMATIVI

I seguenti documenti sono indispensabili per l'applicazione di questa normativa

IEC 60027-1 (parte1) simboli e lettere da utilizzare nel campo elettrico

IEC 60034-1 (parte1) macchine elettriche rotanti; prestazioni

IEC 60034-2A (parte2) macchine elettriche rotanti;metodi per la determinazione di perdite e rendimento delle macchine elettriche rotanti (escluse macchine per veicoli di trazione)

INCERTEZZE

L'incertezza nel determinare il rendimento dipende fortemente dai metodi e dalle apparecchiature utilizzate. Tuttavia l'incertezza dovrebbe essere espressa come un valore numerico ma questa norma si limita a classificarla in 3 categorie

“BASSA” La determinazione del rendimento è basata solamente sui risultati delle prove

“MEDIA” La determinazione del rendimento è basata su approssimazioni

“ALTA” La determinazione del rendimento è basata su ipotesi

Nel nostro caso l'incertezza è BASSA

REQUISITI DI PROVA

-La frequenza di alimentazione durante le prove non dovrà oscillare oltre lo 0.3% dei 50 Hz.

-La forma e la simmetria della tensione di alimentazione dovrà essere conforme alle prescrizioni della IEC 60034-1 paragrafo 8.3.1

-Gli strumenti di misura di grandezze elettriche meccaniche e di velocità devono avere una classe di precisione superiore allo 0.5 o meglio in conformità alla IEC 60051-1

-Lo strumento per misurare la temperatura avrà una precisione di $\pm 1^{\circ}\text{C}$

DETERMINAZIONE PER METODO DIRETTO

Dalla prova a carico trovare il rendimento dalla classica formula

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}$$

Dove

P2 è la potenza erogata dal motore

P1 è la potenza assorbita dal motore

carico [N*m]	giri/min	I [A]	Pass[W]	Perog[W]	η
0,5	2975	1,802	340,82	156.0	0,4577
1	2958	1,840	497,94	310.0	0,6459
2	2923	2,060	831,19	612,7	0,7371
3	2880	2,407	1182.00	906,4	0,7668
4	2833	2,855	1553,20	1189.0	0,7655
5	2776	3,392	1953,10	1456.0	0,7455

I valori evidenziati corrispondono al funzionamento nominale

DETERMINAZIONE PER METODO INDIRETTO

Sommando le perdite separatamente

$$\eta = \frac{P_1 - P_T}{P_1}$$

Dove

P_1 è la potenza assorbita dal motore

P_T è la perdita totale; somma delle perdite costanti P_k delle perdite di carico P_s+P_r e delle perdite addizionali P_{LL}

DERMINAZIONE DI P_T

$$P_T = P_k + P_s + P_r + P_{LL}$$

Dove

P_k sono le perdite costanti date dalla somma delle $P_{fe}+P_{fw}$ ovvero delle perdite nel ferro + le perdite per attrito e ventilazione già trovata in precedenza ed equivale a 116.39W per $U_n=400V$

P_s+P_r sono le perdite di carico (perdite di statore+rotore) e possono essere determinate

-Dalla prova a carico

-Da una prova a tensione ridotta

Dal circuito equivalente

Dalla prova a carico per ogni valore di carico applicato calcolare

$$P_s = 1,5 \times I^2 \times R$$

dove $R=12.32\Omega$ I =corrente assorbita

$$P_r = (P_1 - P_s - P_{fe}) \times s$$

[N*m]	[W]	[W]
T=0,5	Pr=1,576	Ps=60.00
T=1	Pr=4,822	Ps=62,56
T=2	Pr=17,010	Ps=78,42
T=3	Pr=39,362	Ps=107,06
T=4	Pr=73,060	Ps=150,63
T=5	Pr=123,220	Ps=212,62

P_{LL} sono le perdite addizionali e possono essere determinate

- Dalla prova a carico
- Dalla prova con rotore rimosso
- Da valori già assegnati da tabella
- Con il metodo eh star

Dalla prova a carico

Prima di tutto si devono determinare le P_{Lr} che sono le perdite residue così definite $P_{Lr}=A \cdot T^2+B$ dove A e B sono i coefficienti della regressione lineare; A rappresenta la pendenza della retta e B il valore di P_{Lr} per $T=0$

$$A = \frac{i \times \sum((P_L) \times (T^2)) - \sum P_L \times \sum T^2}{i \times \sum (T^2)^2 - (\sum T^2)^2}$$

$$B = \frac{\sum P_L}{i} - A \times \frac{\sum T^2}{i}$$

E la correlazione γ che deve essere maggiore di 0.95 per ritenere i risultati accettabili

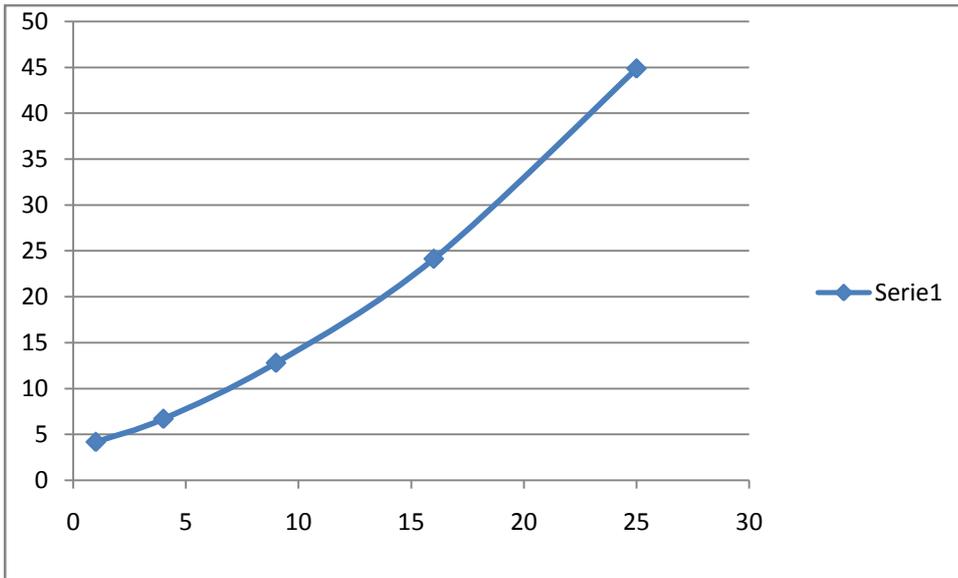
$$\gamma = \frac{i \times \sum(P_L \times T^2) - (\sum P_L) \times (\sum T^2)}{\sqrt{(i \times \sum (T^2)^2 - (\sum T^2)^2) \times (i \times \sum P_L^2 - (\sum P_L)^2)}}$$

Le P_{LL} sono uguali a $A \cdot T^2$

$P_{LL}=A \cdot T^2$	P_{Lr}	P_{LL}
$P_{LL1}=1,572 \cdot 0,25$	6,845	0,393
$P_{LL2}=1,572 \cdot 1$	4,161	1,572
$P_{LL3}=1,572 \cdot 4$	6,680	6,288
$P_{LL4}=1,572 \cdot 9$	12,780	14,148
$P_{LL5}=1,572 \cdot 16$	24,118	25,152
$P_{LL6}=1,572 \cdot 25$	44,861	39,300

$A=1.572$ $B=2.099$ $\gamma=0.976$

$$P_{Lr}=f(T^2)$$



Quindi le $P_T=P_K+P_S+P_r+P_{LL}$ e i rispettivi rendimenti sono

$$P_T \ 0.5=178.36 \ W \quad \eta=0.4766$$

$$P_T \ 1=185.35 \ W \quad \eta=0.6277$$

$$P_T \ 2=218.11 \ W \quad \eta=0.7376$$

$$P_T \ 3=276.96 \ W \quad \eta=0.7657$$

$$P_T \ 4=365.23 \ W \quad \eta=0.7648$$

$$P_T \ 5=491.53 \ W \quad \eta=0.7481$$

Che si avvicinano molto ai rendimenti trovati dalla prova diretta

$$0,4766 \quad 0,4577$$

$$0,6277 \quad 0,6459$$

$$0,7376 \quad 0,7371$$

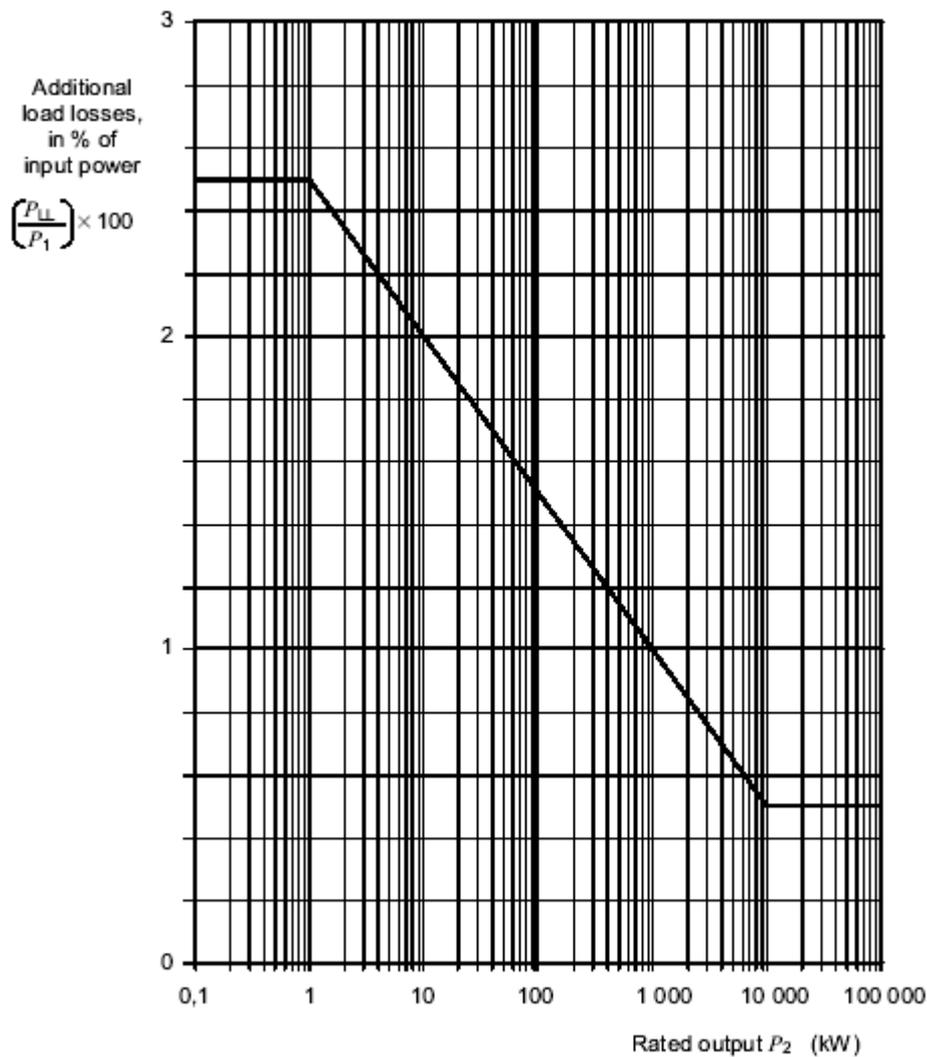
$$0,7657 \quad 0,7668$$

$$0,7648 \quad 0,7655$$

$$0,7481 \quad 0,7455$$

Quello evidenziato è relativo al funzionamento nominale

Da valori già assegnati da tabella



Per

$$P_2 \leq 1 \text{ kW}$$

$$P_{LL} = P_1 \times 0,025$$

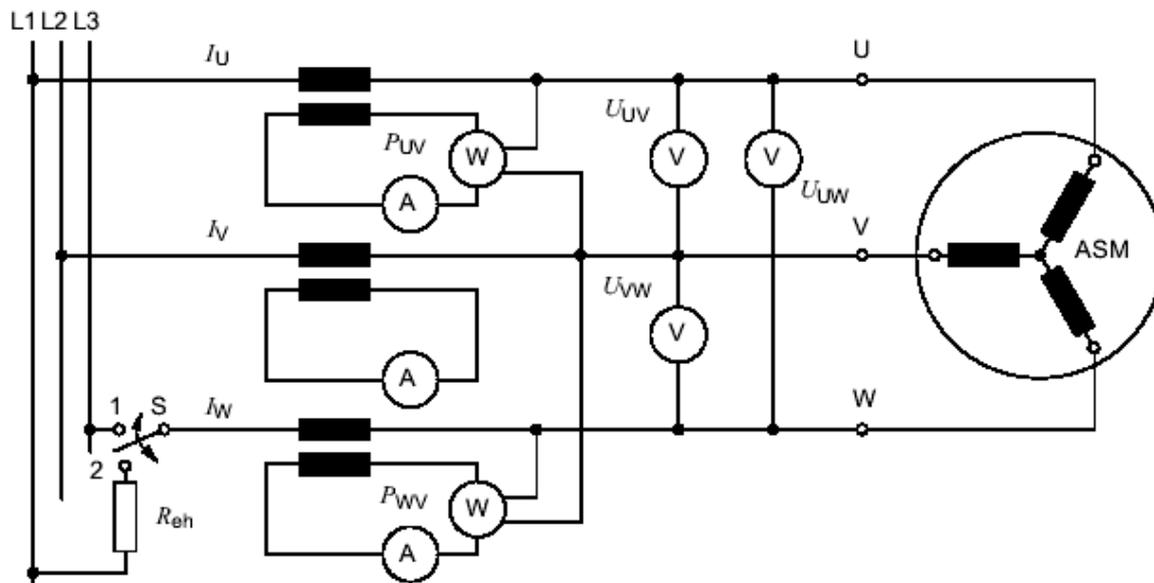
$$1 \text{ kW} < P_2 < 10\,000 \text{ kW} \quad P_{LL} = P_1 \times \left[0,025 - 0,005 \log_{10} \left(\frac{P_2}{1 \text{ kW}} \right) \right]$$

$$P_2 \geq 10\,000 \text{ kW}$$

$$P_{LL} = P_1 \times 0,005$$

Con il metodo eh-star

Lo schema del circuito è il seguente



Dove

R_{eh} sarà scelta in modo tale che la sequenza diretta della corrente I stia al di sotto del 30% della sequenza inversa e la velocità del motore non differisca di molto dal valore nominale. Abbiamo scelto una R_{eh}=30.4Ω e fatto 7 prove variando la corrente di alimentazione dal 75% al 150% del valore nominale

Definiamo inoltre la corrente di riferimento

$$I_t = (I_N^2 - I_0^2)^{0.5} = 1.969 \text{ A}$$

DATI PROVA

n	2869	2863	2855	2844	2829	2806	2764
I1(2)	3,107	2,799	2,577	2,387	2,082	1,873	1,673
I2(13)	4,229	3,788	3,476	3,212	2,791	2,508	2,239
I3(2)	2,713	2,388	2,149	1,939	1,615	1,376	1,119
P1	660,63	533,71	451,99	386,02	290,2	230,73	177,22
P2	-240,04	-188,45	-155,44	-129,02	-93,56	-72,18	-53,67
P3	-105,51	-84,74	-68,8	-54,83	-37,83	-26,06	-14,26
cos ρ 1	0,98712	0,98982	0,99196	0,99421	0,99726	0,99881	0,99717
cos ρ 2	-0,6822	-0,67782	-0,67569	-0,67507	-0,67524	-0,67967	-0,69446
cos ρ 3	-0,1817	-0,18489	-0,18168	-0,17465	-0,16839	-0,15476	-0,12181
U1	215,39	192,65	176,8	162,67	139,79	123,31	106,24
U2	83,22	73,4	66,19	59,51	49,64	42,34	34,51
U3	214,03	191,94	176,18	161,93	139,13	122,4	104,66

Dopo di che si svolgono i seguenti calcoli per ogni prova in modo da determinare le P_{Lr} ovvero le perdite residue

Scomposizione di tensioni e correnti

$$\underline{U}_{UV} = U_{UV}$$

$$U'_{WU} = \frac{U_{VW}^2 - U_{WU}^2 - U_{UV}^2}{2 \cdot U_{UV}}$$

$$U''_{WU} = \sqrt{U_{WU}^2 - U_{WU}'^2}$$

$$U'_{VW} = -U_{UV} - U'_{WU}$$

$$U''_{VW} = -U''_{WU}$$

$$I'_V = -\frac{(P_{UV} - P_{VW}) + U_{WU} \cdot I_W}{U_{UV}}$$

$$I_V'' = \sqrt{I_V^2 - I_V'^2}$$

$$k_1 = \frac{1}{2 \cdot I_V^2} \cdot (I_W^2 - I_U^2 - I_V^2)$$

$$I_U' = k_1 \cdot I_V' + \sqrt{\left(k_1^2 - \frac{I_U^2}{I_V^2}\right)(I_V^2 - I_V'^2)}$$

$$I_U'' = \frac{k_1 I_V^2 - I_U' \cdot I_V'}{I_V''}$$

$$I_W' = -I_U' - I_V'$$

$$I_W'' = -I_U'' - I_V''$$

Tensione fase fase interna

$$\underline{U}_{iUV} = \underline{U}_{UV} + \frac{R_{VW}}{2} \cdot (\underline{I}_V - \underline{I}_U)$$

$$\underline{U}_{iVW} = \underline{U}_{VW} + \frac{R_{VW}}{2} \cdot (\underline{I}_W - \underline{I}_V)$$

$$\underline{U}_{iWU} = \underline{U}_{WU} + \frac{R_{VW}}{2} \cdot (\underline{I}_U - \underline{I}_W)$$

Scomposta in sequenza diretta e inversa

$$\underline{U}_{iLL(1)} = \frac{1}{3} \cdot (\underline{U}_{iUV} + \underline{a} \cdot \underline{U}_{iVW} + \underline{a}^2 \cdot \underline{U}_{iWU})$$

$$\underline{U}_{iLL(2)} = \frac{1}{3} \cdot (\underline{U}_{iUV} + \underline{a}^2 \cdot \underline{U}_{iVW} + \underline{a} \cdot \underline{U}_{iWU})$$

Tensione di fase interna scomposta in sequenza diretta e inversa

$$\underline{U}_{i(1)} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot e^{-j\frac{\pi}{6}} \cdot \underline{U}_{iLL(1)}$$

$$\underline{U}_{i(2)} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot e^{j\frac{\pi}{6}} \cdot \underline{U}_{iLL(2)}$$

$$\underline{U}_{iU} = \underline{U}_{i(1)} + \underline{U}_{i(2)}$$

$$\underline{U}_{iV} = \underline{a}^2 \cdot \underline{U}_{i(1)} + \underline{a} \cdot \underline{U}_{i(2)}$$

$$\underline{U}_{iW} = \underline{a} \cdot \underline{U}_{i(1)} + \underline{a}^2 \cdot \underline{U}_{i(2)}$$

Resistenza equivalente alle perdite nel ferro

$$R_{fe} = \frac{U_l^2}{P_{fe}}$$

$$\underline{I}_{feU} = \frac{\underline{U}_{iU}}{R_{fe}}$$

$$\underline{I}_{feV} = \frac{\underline{U}_{iV}}{R_{fe}}$$

$$\underline{I}_{feW} = \frac{\underline{U}_{iW}}{R_{fe}}$$

Corrente di fase interna

$$\underline{I}_{iU} = \underline{I}_U - \underline{I}_{feU}$$

$$\underline{I}_{iV} = \underline{I}_V - \underline{I}_{feV}$$

$$\underline{I}_{iW} = \underline{I}_W - \underline{I}_{feW}$$

Scomposta in sequenza diretta e inversa

$$\underline{I}_{i(1)} = \frac{1}{3} \cdot (\underline{I}_{iU} + \underline{a} \cdot \underline{I}_{iV} + \underline{a}^2 \cdot \underline{I}_{iW})$$

$$\underline{I}_{i(2)} = \frac{1}{3} \cdot (\underline{I}_{iU} + \underline{a}^2 \cdot \underline{I}_{iV} + \underline{a} \cdot \underline{I}_{iW})$$

Potenza al traferro

$$P_{\delta(1)} = 3 \cdot (U'_{i(1)} \cdot I'_{i(1)} + U''_{i(1)} \cdot I''_{i(1)})$$

$$P_{\delta(2)} = 3 \cdot (U'_{i(2)} \cdot I'_{i(2)} + U''_{i(2)} \cdot I''_{i(2)})$$

Perdite residue

$$P_{Lr} = k \cdot \left[(1-s) \cdot (P_{\delta(1)} - P_{\delta(2)}) - P_{fw} \right]$$

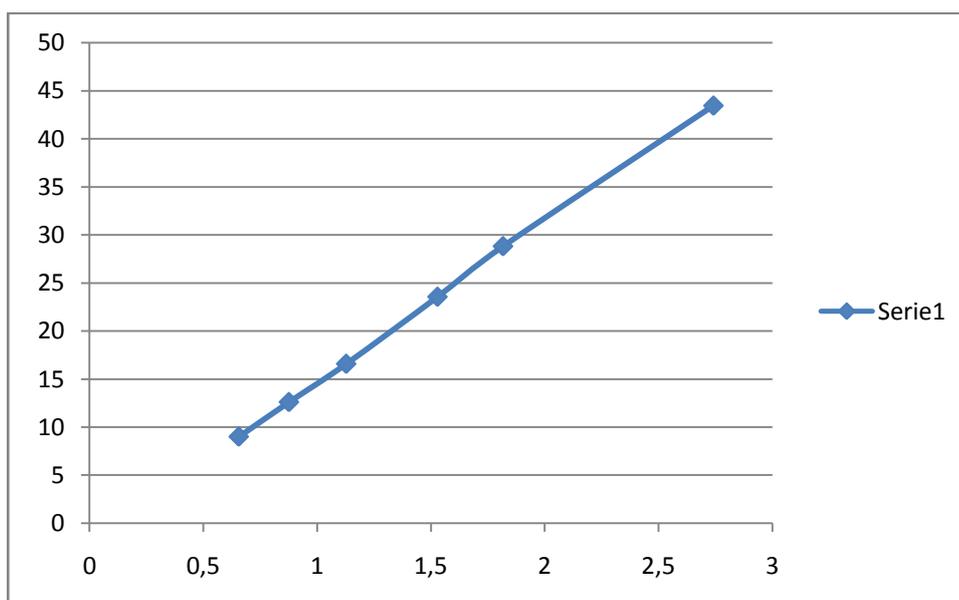
Dove

$$k = \frac{1}{1 + (I_{i(1)} / I_{i(2)})^2}$$

I valori trovati sono e le corrispondenti T^2 sono le $(I_{i(2)} / I_t)^2$

Plr	$(I_{i(2)} / I_t)^2$
9,005	0,656
12,601	0,876
16,583	1,128
23,559	1,529
28,820	1,817
43,451	2,741

e messe una in funzione dell'altra



Facendo la regressione lineare come in precedenza si trovano i coefficienti della retta; La pendenza A, l'altezza B per $(I_{i(2)}/I_t)^2=0$ e il coefficiente di correlazione γ

$$A=16.62 \quad B=1.89 \quad \gamma=0.998$$

Si trovano le rispettive perdite addizionali $P_{LL}=A*(I_{i(2)}/I_t)^2$

P_{lr}	$(I_{i(2)}/I_t)^2$	$P_{LL}=A*(I_{i(2)}/I_t)^2$
9,005	0,656	10,907
12,601	0,876	14,572
16,583	1,128	18,755
23,559	1,529	25,429
28,820	1,817	30,211
43,451	2,741	45,58

Facendo riferimento al funzionamento nominale cioè avendo $(I_{i(2)}/I_t)^2=1$ si ottiene $P_{LL}=16.62$ W che sommato alle perdite contanti P_k e alle perdite di carico (P_s+P_r) si ottiene $P_T=356.7$ W e con $P_1=1553.2$ W si ottiene un $\eta=0.770$ che si avvicina molto al $\eta=0.765$ trovato con il metodo diretto e rientra nella fascia IE2 (high efficiency)

