



UNIVERSITÀ DI PISA

Corso di Laurea in Ingegneria Elettrica

Laboratorio: **DSEA**

Dipartimento: **Sistemi elettrici e automazione**

Professore: **Mauro Lemmi Gigli**

Insegnamento: **Prove su macchine elettriche**

Anno Accademico: **2005 / 2006**

Allievo: **Gaspari Francesco**

Matricola: **243408**

Relazioni delle prove



UNIVERSITÀ DI PISA

Corso di Laurea in Ingegneria Elettrica

Insegnamento: **Prove su macchine**

Anno Accademico: **2005 / 2006**

Allievo: **Gaspari Francesco**

Matricola: **243408**

Laboratorio: **DSEA**

Dipartimento: **Sistemi elettrici e automazione**

Data prova: **11/10/2005**

Professore: **Mauro Lemmi Gigli**

Titolo: ***Determinazione della caratteristica meccanica e il luogo polare della macchina asincrona.***

Obiettivo

- Rilevare l'andamento della caratteristica meccanica e il luogo polare della macchina asincrona facendola funzionare a rotore bloccato, a vuoto e a diverse condizioni di carico.
- Rilievo del valore della resistenza di statore a freddo e a caldo.

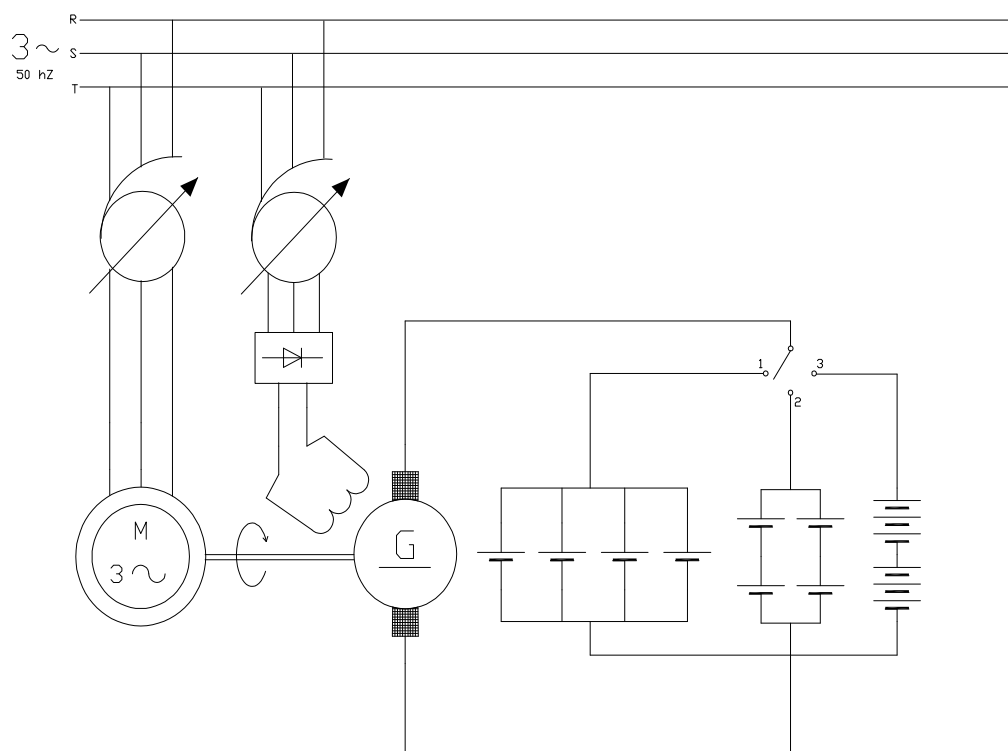
Dati di targa della macchina in oggetto

$P = 11 \text{ kW}$
 $V_n = 400 \text{ V} ; I_n = 22,5 \text{ A}$
Collegamento Δ
 $n = 1460 \text{ giri/min}$
 $\cos\varphi = 0.8$

....Da cui si ottiene per via analitica:

$S_n = (1500 - 1460) / 1460 = 2,7\%$ (scorrimento nominale)
 $C_n = P_n / \omega = 11000 / 153 = 71,9 \text{ Nm}$ (coppia nominale)

SCHEMA DI MONTAGGIO

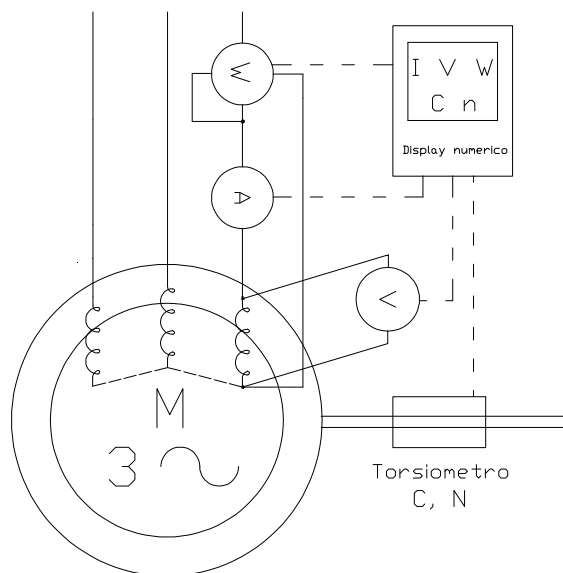


Schema di misura

Strumenti di misura impiegati

- 1 Amperometro
- 1 Wattmetro
- 1 Voltmetro
- 1 Display numerico
- 1 Torsiometro

Le letture di I, V, W, C, n, vengono riportate su un display numerico per la misura digitale delle stesse



Montaggio e regolazione

Il motore asincrono, alimentato attraverso un VARIAC, viene collegato assialmente con un generatore in corrente continua. Questo fa sì che, una volta trascinato in rotazione il generatore in c.c. e variando la sua eccitazione, vari il numero di giri all'asse al fine di regolare lo scorrimento del motore. Il generatore ci permette altresì, come ulteriore vantaggio, di poter esplorare la parte instabile della caratteristica della coppia in funzione del numero di giri del motore che altrimenti non sarebbe raggiungibile con una coppia resistente costante.

In serie al circuito d'armatura del generatore sono inserite gruppi di batterie scariche collegabili attraverso un tasto commutatore, che durante la prova si ricaricano. Il collegamento delle batterie fornisce una certa tensione man mano che queste vengono ricaricate, permettendo un secondo tipo di regolazione a livello "grossolano" della velocità.

Il sistema di misura permette di ricavare i parametri relativi ad una sola fase, anche se non è un metodo molto accurato. Avremo quindi l'indicazione di tensione, corrente, potenza attiva e reattiva e inoltre potremo, attraverso il torsimetro, misurare numero di giri e coppia. L'accuratezza della misura di quest'ultima grandezza è fortemente compromessa a causa degli inevitabili attriti sui giunti, per tanto lo strumento di misura rileverà semplicemente il suo valor medio.

Modalità di esecuzione della prova

La prova viene condotta a tensione ridotta poiché la macchina, dove funzionare a scorrimenti sempre più elevati con una corrente assorbita crescente. Per tanto, escluso per le rilevazioni effettuate a bassi scorrimenti, nella quale l'applicazione della tensione nominale non comporterebbe danni alla macchina, è bene effettuare la prova ad una tensione circa $\frac{1}{4}$ della nominale.

Come prima misura blocchiamo il rotore del motore causando quindi scorrimento pari ad 1 e annotiamo le relative grandezze elettriche. Procediamo quindi con la prova a rotore libero di ruotare, cioè a vuoto senza il generatore. Procediamo quindi dopo aver disalimentato momentaneamente il motore ad accoppiare il generatore e quindi riportare entrambi al numero di giri prossimo al sincronismo.

Le successive rilevazioni vengano effettuate variando la corrente di eccitazione del generatore così da poter ridurre gradualmente lo scorrimento del motore ad esso accoppiato.

Arrivati al limite dell'eccitazione del generatore, occorre disalimentare nuovamente il motore e procedere al cambio dell'inserzione delle batterie per poi poter continuare dal punto precedente. La tensione di alimentazione della macchina asincrona non resterà costante ad ogni variazione di velocità, ma varierà anche in modo consistente a causa delle inevitabili cadute di tensione che si hanno sull'autotrasformatore a monte del motore.

Proprio per la diversità dei valori di tensione rilevati durante la prova risulterà opportuno rendere omogenee le grandezze ricavate in ogni condizione di funzionamento analizzata, ossia:

$$I = I_m (V_n/V_m)$$

$$P = P_m (V_n/V_m)^2$$

$$Q = Q_m (V_n/V_m)^2$$

$$C = C_m (V_n/V_m)^2$$

Tabelle relative alla prova

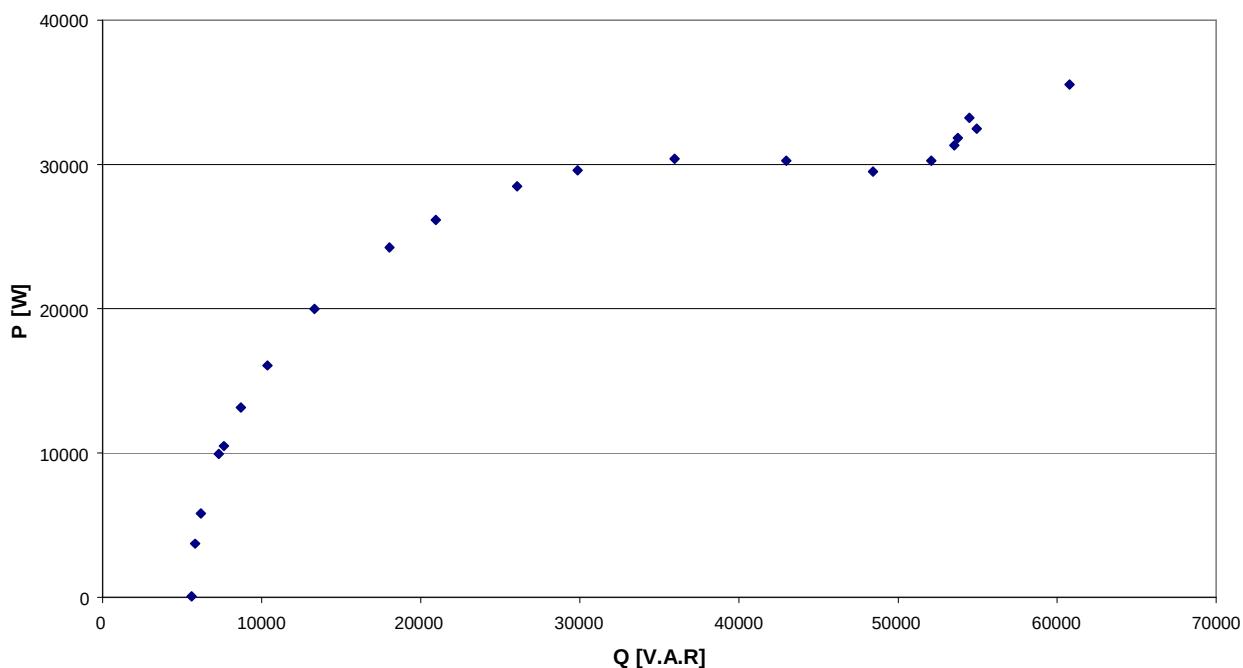
	n[rpm]	C[mV]	C[Nm]	V[V]	I[A]	P[W]	
1 ^a lettura	0	431,3	8,626	109,1	16	881	corto
2 ^a lettura	1477	189,2	3,784	109,7	2,96	262,8	vuoto
3 ^a lettura	1500	-34,8	-0,696	111,5	1,3	2	sincronismo
4 ^a lettura	1493	47	0,94	111,2	1,6	96	carico aum.
5 ^a lettura	1489	85,5	1,71	110,8	1,96	149	carico aum.
6 ^a lettura	1480	173,5	3,47	110,1	2,83	251	
7 ^a lettura	1471	248	4,96	109,6	3,6	329,4	
8 ^a lettura	1463	305,7	6,114	109,2	4,35	399,2	
9 ^a lettura	1448	363,5	7,27	108,5	5,43	490,3	
10 ^a lettura	1429	424,5	8,49	107,4	6,76	582,6	
11 ^a lettura	1412	442,2	8,844	106,7	7,45	620,5	
12 ^a lettura	1384	448,3	8,966	106,2	8,54	669,3	
13 ^a lettura	1362	441	8,82	105,4	9,23	684,8	fase instabile
14 ^a lettura	1308	423,5	8,47	104,9	10,29	696,9	[Cmax]
15 ^a lettura	1207	368	7,36	104,2	11,41	684,6	Cambio
16 ^a lettura	1050	307,3	6,146	100,9	11,92	625,6	batterie
17 ^a lettura	797	286,5	5,73	100,4	12,6	635,5	
18 ^a lettura	603	291,2	5,824	100,6	13	660,5	
19 ^a lettura	507	293	5,86	100,4	13,07	668,7	Cambio
20 ^a lettura	349	293,7	5,874	99,49	13,23	669,8	batterie
21 ^a lettura	270	296,5	5,93	99,8	13,27	689,7	

	C						
	vera[Nm]	I linea[A]	P rip[W]	cosφ	Q[VAR]	Pmecc[W]	η
1 ^a lettura	115,95	101,61	35527,7	0,50	60771,0	0,0	0,00
2 ^a lettura	50,31	18,69	10482,2	0,81	7607,2	7781,6	0,74
3 ^a lettura	-8,96	8,08	77,2	0,01	5595,9	-1407,0	/
4 ^a lettura	12,16	9,97	3726,5	0,54	5814,8	1901,6	0,51
5 ^a lettura	22,29	12,26	5825,7	0,69	6177,2	3475,0	0,60
6 ^a lettura	45,80	17,81	9938,9	0,81	7310,3	7098,5	0,71
7 ^a lettura	66,07	22,76	13162,7	0,83	8679,0	10177,0	0,77
8 ^a lettura	82,04	27,60	16068,9	0,84	10363,3	12568,2	0,78
9 ^a lettura	98,81	34,67	19991,4	0,83	13319,4	14982,8	0,75
10 ^a lettura	117,77	43,61	24243,9	0,80	18028,1	17623,0	0,73
11 ^a lettura	124,29	48,37	26161,0	0,78	20948,2	18378,2	0,70
12 ^a lettura	127,19	55,71	28484,8	0,74	26047,8	18434,6	0,65
13 ^a lettura	127,03	60,67	29588,6	0,70	29856,1	18118,1	0,61
14 ^a lettura	123,16	67,96	30399,1	0,65	35956,6	16869,0	0,55
15 ^a lettura	108,46	75,86	30265,1	0,58	42972,4	13708,8	0,45
16 ^a lettura	96,59	81,85	29495,5	0,52	48430,8	10620,6	0,36
17 ^a lettura	90,95	86,95	30261,4	0,50	52086,4	7590,9	0,25
18 ^a lettura	92,08	89,53	31326,9	0,51	53535,7	5814,2	0,19
19 ^a lettura	93,01	90,19	31842,4	0,51	53764,0	4938,4	0,16
20 ^a lettura	94,95	92,13	32480,9	0,51	54947,3	3470,2	0,11
21 ^a lettura	95,26	92,12	33238,4	0,52	54485,5	2693,4	0,08

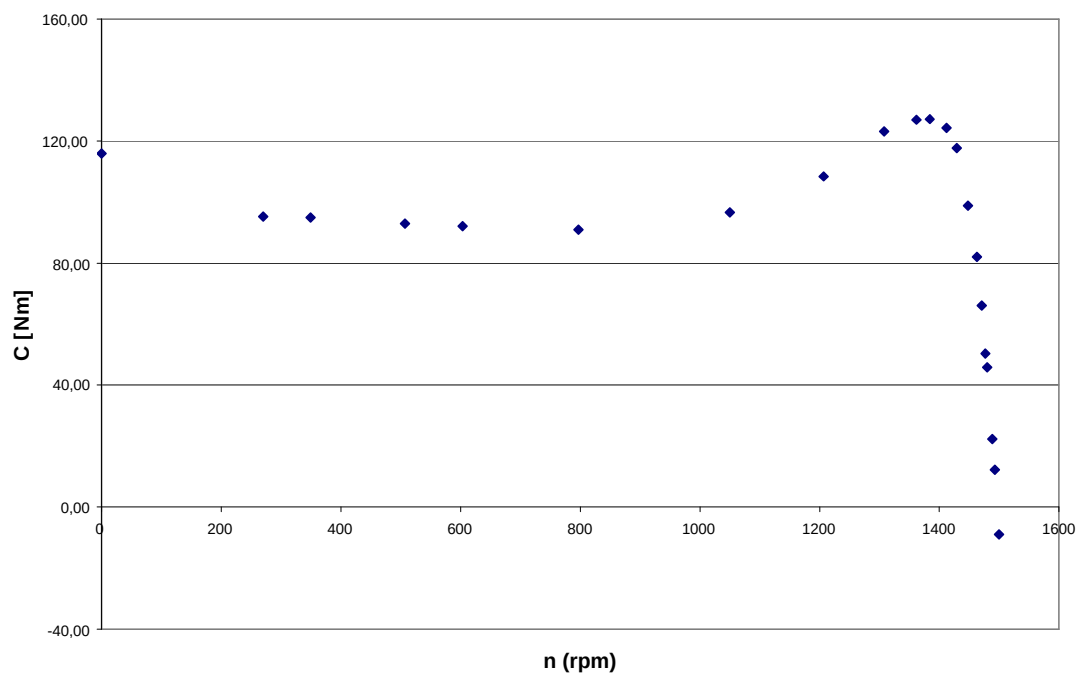
Diagramma del luogo polare e caratteristica meccanica del M.A.T.

Il primo ha un andamento all'incirca curvilineo fino a scorrimenti anche molto elevati, come se descrivesse una circonferenza. Questo è plausibile in quanto la curva descrive il diagramma circolare del motore stesso, cioè un arco di circonferenza. La disuniformità della curva per alti valori di scorrimento è da imputarsi alle caratteristiche fisiche del motore cioè al fatto di avere il rotore a doppia gabbia. Ciò è visibile anche attraverso la caratteristica meccanica (2° diagramma), il quale presenta il tipico insellamento.

Luogo polare



Caratteristica meccanica



 UNIVERSITÀ DI PISA	Corso di Laurea in Ingegneria Elettrica		
Insegnamento: Prove su macchine		Anno Accademico: 2005 / 2006	
Allievo: Gaspari Francesco		Matricola: 243408	
Laboratorio: DSEA	Dipartimento: Sistemi elettrici e automazione		
Data prova: 08/11/2005		Professore: Mauro Lemmi Gigli	
Titolo: TRANSITORI TERMICI DEL TRASFORMATORE			

Obiettivo

Lo scopo di questa esperienza è quello di rilevare sperimentalmente le curve di riscaldamento e raffreddamento di una macchina elettrica (nella prova in questione di un trasformatore trifase), nei diversi tipi di funzionamento che essa è chiamata ad espletare; nel caso in esame, quelli relativi al funzionamento in servizio continuo (S1), servizio di durata limitata (SDL) e servizio intermittente (SI). Inoltre andremo a determinare la costante di tempo termica della macchina.

Dati di targa della macchina in oggetto

Trasformatore trifase di marca TRASFOSTATIK, dati di targa:

- $S_n = 2500 \text{ VA}$;
- $V_{10}/V_{20} = 380/220\text{-}380 \text{ [V]}$;
- $f = 50 \text{ Hz}$;
- Isolamento: Classe E;
- Collegamento: Y/Y;
- Servizio: S1.

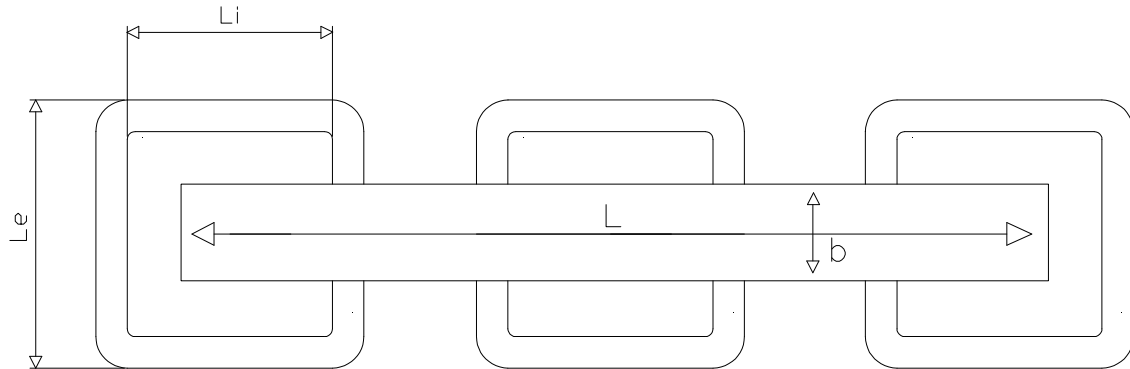
....Da cui si ottiene per via analitica:

$$I_{1n} = S_n / (V_{1n} * \sqrt{3}) = 2500 / (380 * \sqrt{3}) = \mathbf{3,8 \text{ A}} \quad (\text{Corrente nominale primaria})$$

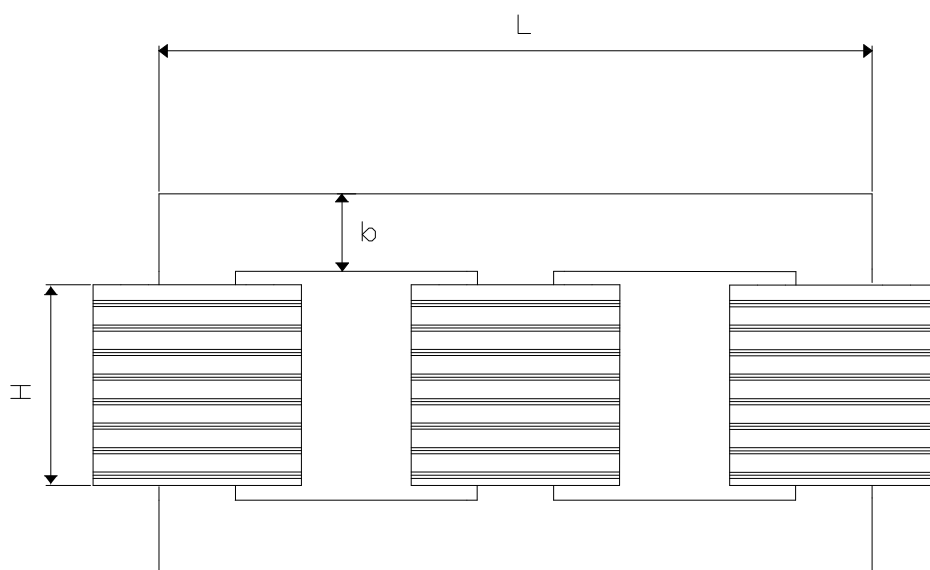
$$I_{2n} = S_n / (V_{2n} * \sqrt{3}) = 2500 / (220 * \sqrt{3}) = \mathbf{6,56 \text{ A}} \quad (\text{Corrente nominale secondaria})$$

Il trasformatore che abbiamo utilizzato è un trasformatore a colonna quadrata le cui dimensioni geometriche sono indicate in figura :

Vista dall'alto



Vista frontale



La sezione dei gioghi è uguale a quella delle colonne.

$H = 14 \text{ cm}$ $b = 6 \text{ cm}$ $L = 25 \text{ cm}$

Lato interno bobina $Li = 6 \text{ cm}$ Lato esterno bobina $Le = 9 \text{ cm}$ Spessore = $1,5 \text{ cm}$

Per la determinazione della costante termica T_t eseguiamo un calcolo approssimato della capacità termica e della resistenza termica.

Per calcolare $C_t = c_s * m$ abbiamo ricavato da un manuale il calore specifico del rame e del ferro a 25°C e a pressione atmosferica [J/kg °C]

$$\text{Fe} \rightarrow C_s = 448$$

$$\text{Cu} \rightarrow C_s = 387$$

Calcolo volume del ferro :

$$\text{Volume del giogo} = 2 * b^2 * L = 2 * 0,06^2 * 0,25 = 0,0018 \text{ m}^3$$

$$\text{Volume colonna} = 3 * b^2 * H = 3 * 0,06^2 * 0,14 = 0,001512 \text{ m}^3$$

$$\text{In totale il volume del ferro} \quad V_{\text{ferro}} = V_{\text{giogo}} + V_{\text{colonna}} = 0,003312 \text{ m}^3$$

Calcolo volume del rame:

$$V_{\text{rame ideale}} = 3 * H * (L_e^2 - L_i^2) = 3 * 0,14 * (0,09^2 - 0,06^2) = 0,00189 \text{ m}^3$$

Considerando che la bobina non è un volume completamente pieno di rame ma, caratterizzato da interstizi fra una spira e l'altra nonché dall'isolante, possiamo considerare un volume effettivo di rame all'incirca 0,5 volte di quello calcolato.

$$V_{\text{rame}} = V_{\text{rame ideale}} * 0,5 = 0,000945 \text{ m}^3$$

Considerando che la densità del rame vale: $\rho_{\text{Cu}} = 8930 \text{ kg/m}^3$

e del ferro vale : $\rho_{\text{Fe}} = 7860 \text{ kg/m}^3$

Possiamo determinare la capacità termica come :

$$C_t = C_s(\text{Fe}) * \rho_{\text{Fe}} * V_{\text{Fe}} + C_s(\text{Cu}) * \rho_{\text{Cu}} * V_{\text{Cu}} = 448 * 7860 * 0,003312 + 387 * 8930 * 0,000945 = 11663 + 3266 = 14929 \text{ J/}^\circ\text{C}$$

Per calcolare la resistenza termica R_t occorre determinare la potenza persa trasformatasi in calore

$$P_p = (3 * R_{avv1} * I_{1n}^2 + 3 * R_{avv2} * I_{2n}^2) * 1,2 = (3 * 1,712 * 3,8^2 + 3 * 0,825 * 6,56^2) * 1,2 = 216,8 \text{ W}$$

Il coefficiente 1,2 per tener conto delle perdite nel ferro e le R_{avv} sono le resistenze misurate a caldo

Ipotizzando un salto termico di 70 °C allora:

$$R_t = \Delta\theta / P_p = 70 / 216,8 = 0,323 \text{ }^\circ\text{C/W}$$

$$\text{La costante di tempo termica } T_t = C_t * R_t = 14929 * 0,323 = 4820 \text{ sec} = \mathbf{1h \text{ e } 20min}$$

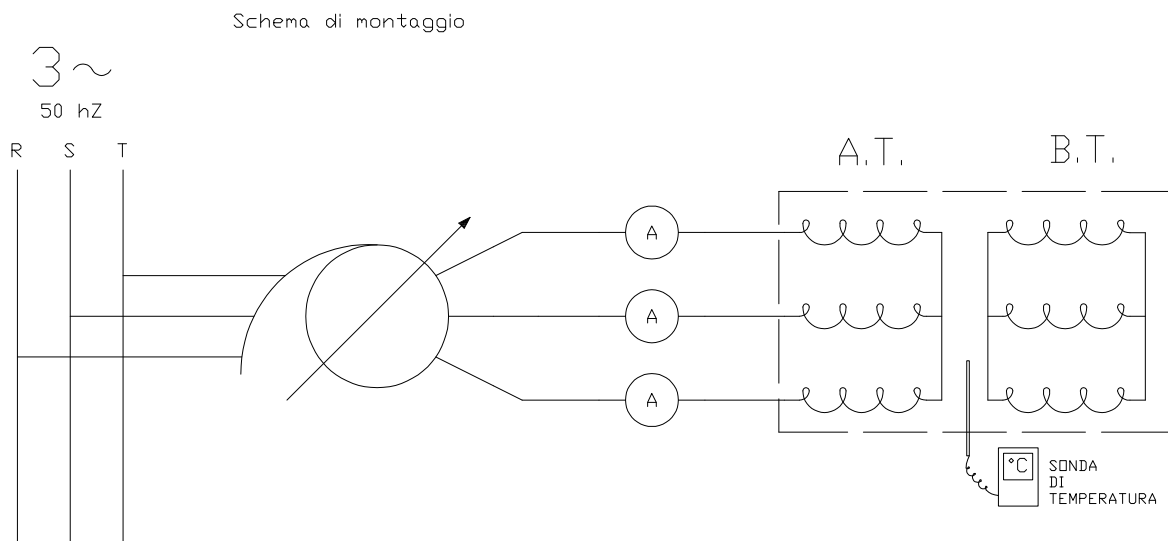
Modalità di esecuzione della prova

Lo schema di montaggio con le relative inserzioni degli strumenti per le misure viene adottato per due trasformatori gemelli aventi dati di targa annotati in precedenza. Il motivo è ovviamente il tempo che richiede lo svolgimento della prova e non basterà in ogni caso visto che il riscaldamento completo della macchina richiede svariate ore.

L'esercitazione consiste nel caricare i due trasformatori aventi secondario in cortocircuito con opportuni valori di corrente a tensione ridotta e di annotare la temperatura raggiunta dal punto più caldo della macchina ad intervalli regolari di tempo.

A tal fine, come illustrato nello schema qui sotto, ci serviamo di:

- Un VARIAC per regolare la tensione di alimentazione al fine di far scorrere negli avvolgimenti del trasformatore la corrente opportuna e mantenerla costante durante il riscaldamento.
- Gli amperometri per conoscere la corrente circolante negli avvolgimenti e controllarla
- Una sonda termica digitale inserita nell'avvolgimento del trasformatore in modo da rilevarne la temperatura istante per istante. Da precisare che tale misura non corrisponderà a quella effettiva massima visto che non è possibile in pratica inserire la sonda troppo internamente all'avvolgimento. Inoltre l'aver scoperchiato il trasformatore dal suo involucro permette un maggior smaltimento del calore nell'ambiente e per tanto un transitorio termico di riscaldamento più graduale.



La prova prevede anche la misura della resistenza degli avvolgimenti del trasformatore sia a freddo sia a caldo ossia prima e dopo il riscaldamento. Questi due rilievi ci servono come verifica del salto termico effettuato dalla macchina e quindi dell'attendibilità delle misure effettuate dalla sonda di temperatura.

Durante la fase di riscaldamento delle prove è necessario, al fine di mantenere costante l'intensità di corrente da noi voluta, incrementare costantemente il modulo della tensione applicata al crescere della temperatura visto che con essa aumenta anche la resistenza degli avvolgimenti.

Suddivisione della prova fra i due trasformatori gemelli.

1° Trasformatore

Servizio continuo (S1)

Il primo trasformatore viene sottoposto alla potenza nominale (viene fatta circolare nei suoi avvolgimenti la corrente nominale I_n), dopo di che ad intervalli regolari di tempo (1 minuto) viene annotato il valore della temperatura fornitaci dalla sonda fino ad arrivare a regime termico. Questo ovviamente non è possibile in quanto, come abbiamo visto in precedenza, la costante di tempo calcolata è all'incirca un ora e venti minuti per tanto il raggiungimento del regime termico si avrebbe solo dopo alcune ore.

Concluso dopo un ora circa il riscaldamento disalimentiamo il trasformatore annotando sempre con la solita frequenza la temperatura.

2° Trasformatore

- Servizio di durata limitata (SDL)

Il secondo trasformatore viene sottoposto ad una potenza superiore della nominale tale da far circolare una corrente nominale di $2 I_n$ e viene effettuato come al solito, ad intervalli regolari di 30 secondi, le temperature. Questo procedimento permette di raggiungere il regime termico teorico del servizio S1 in un tempo assai più breve ma oltre il quale è obbligatorio disalimentare la macchina onde evitare un eccessivo surriscaldamento.

Il trasformatore è per tanto una macchina che, seppur per un intervallo di tempo limitato di tempo, riesce a sopportare potenze assai maggiori di quella nominale.

La macchina non viene raffreddata ma si utilizza subito per la prova successiva ossia quella intermittente.

- Servizio intermittente (SI)

Il trasformatore precedente verrà sottoposto a cicli di carico intermittenti in un caso al 50% e nell'altro al 25%. Per tanto, tramite un temporizzatore, si tiene il trasformatore disalimentato per 5 minuti (partendo dalla temperatura raggiunta dalla prova precedente) e si rialimenta per altri 5 min. Dopo aver ripetuto due o tre volte il ciclo procediamo allo stesso modo per l'intermittenza a 25 % disalimentando per 7,5 minuti e rialimentando per 2,5 minuti.

Attraverso il Variac regoliamo la corrente in modo tale da uguagliare la perdita di potenza media di un ciclo a quella in condizioni di servizio continuo (S1). Nel caso di intermittenza 25 % la corrente circolante è $2 I_n$ e per il 50 % è $\sqrt{2} I_n$.

Concluse le prove su entrambi i trasformatori e ottenuti i punti inerenti al salto termico dovuto a riscaldamento e il raffreddamento della macchina li riportiamo ognuno su di un apposito grafico in funzione del tempo. Dalle curve di raffreddamento ricaveremo per estrapolazione grafica la retta tangente ai primi punti della curva che intersecandosi con l'asse dei tempi determinerà la costante di tempo sperimentale.

Servizio Continuo (SI)

Il riscaldamento della macchina è durato per circa un'ora con una temperatura d'ambiente iniziale di circa 22°C. Non è stato possibile ovviamente per mancanza di tempo procedere ulteriormente nell'alimentazione e quindi arrivare a regime termico per tanto arrivati ad una settantina di gradi la macchina è stata disalimentata e quindi raffreddata.

Riscaldamento						Raffreddamento	
Tempo [min]	θ. [°C]		Tempo [min]	θ. [°C]		Tempo [min]	θ [°C]
0	22		26	51		1	71
1	23		27	52		2	70
2	25		28	53		3	68
3	26		29	54		4	67
4	28		30	55		5	65
5	29		31	56		6	64
6	31		32	56		7	63
7	32		33	57		8	62
8	33		34	58		9	61
9	35		35	58		10	61
10	36		36	59		11	59,5
11	37		37	60		12	59
12	38		38	60		13	58
13	39		39	61		14	57
14	40		40	62		15	57
15	42		41	62		16	56
16	43		42	63		17	55
17	44		43	63		18	54
18	45		44	64		19	54
19	45		45	64		20	53
20	46		46	65		21	52,5
21	47		47	66		22	52
22	48		48	66		23	51
23	49		49	67		24	51
24	50		50	67		25	50
25	51		51	68			

Misura della resistenza di 1 fase

	Resistenza a freddo	Resistenza a caldo
Lato AT	1,425 Ω	1,712 Ω
Lato BT	0,668 Ω	0,825 Ω

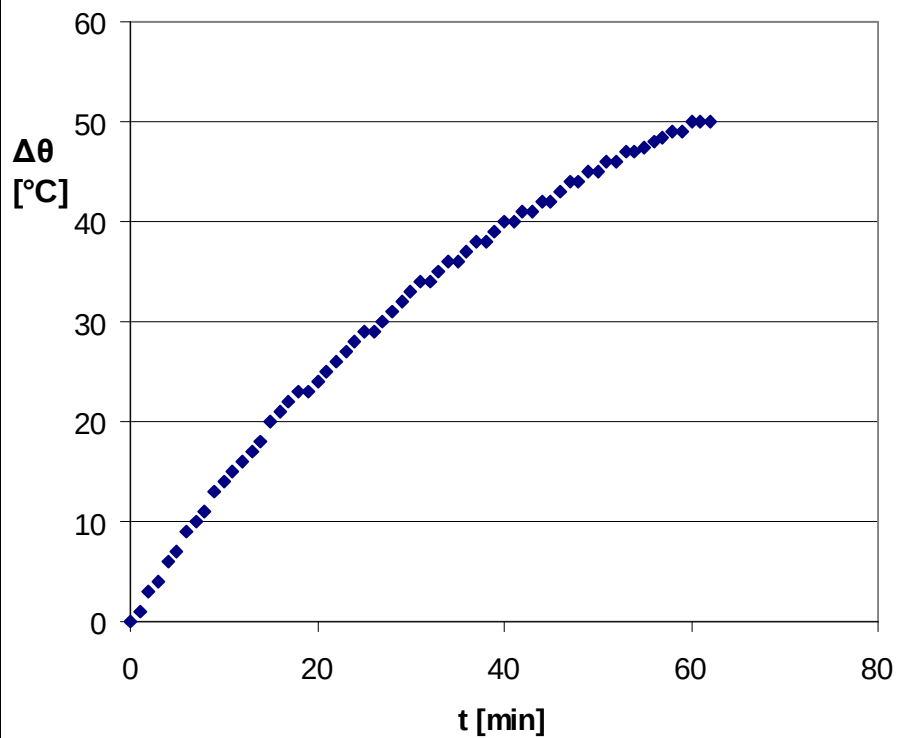
Poiché il salto termico è dato per formula inversa da:

$$\Delta\theta = \Delta R / (R_{20^{\circ}\text{C}} * 0,0039) = 60^{\circ}\text{C B.T.}$$

$$= 51^{\circ}\text{C A.T.} \leftarrow \text{Risultato + che accettabile}$$

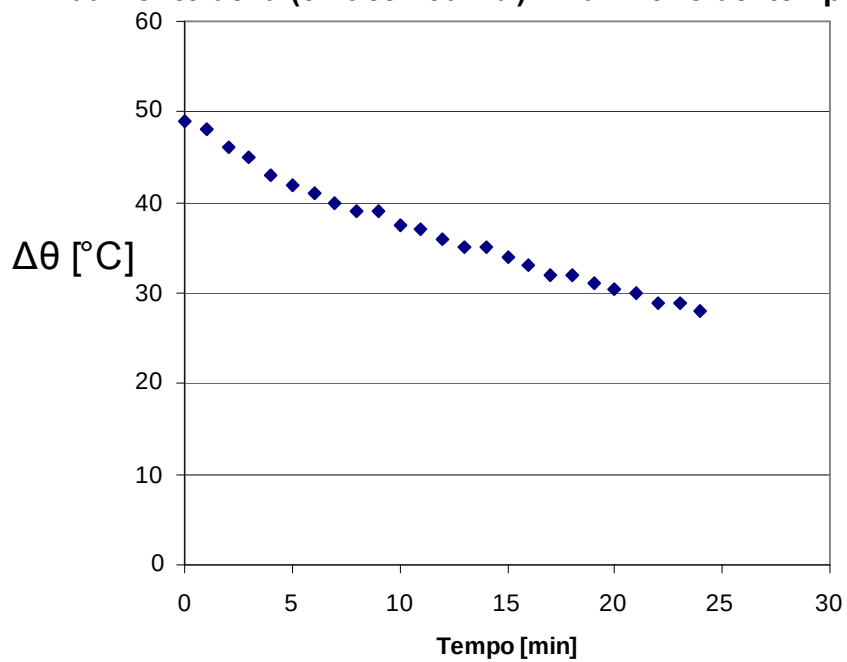
Curva di riscaldamento

Andamento della ($\theta_{\text{macc}} - \theta_{\text{amb.}}$) in funzione del tempo



Curva di raffreddamento

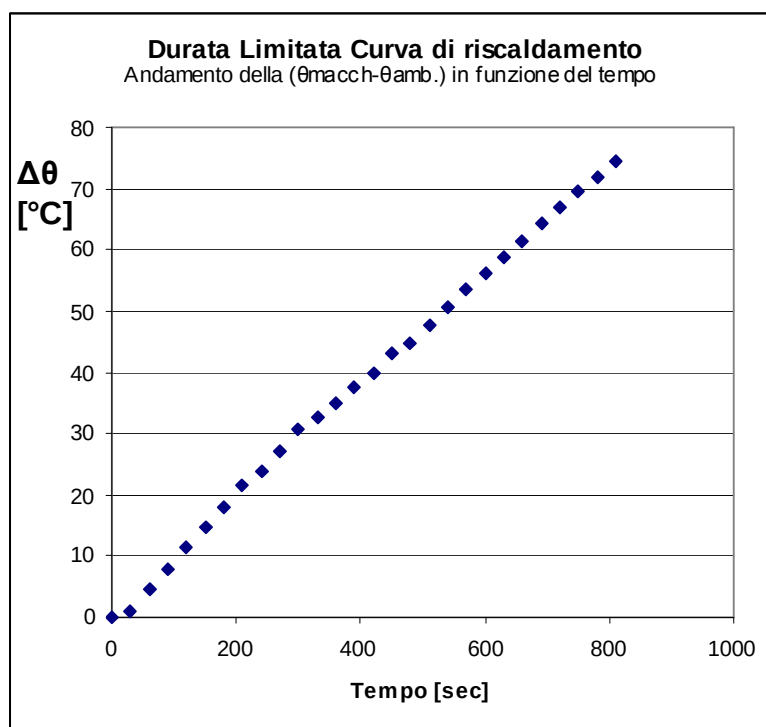
Andamento della ($\theta_{\text{macc}} - \theta_{\text{amb.}}$) in funzione del tempo



Servizio di durata limitata

Questa prova come abbiamo detto ci permette di riscaldare il trasformatore in un tempo assai ridotto rispetto al servizio continuo ciò nonostante l'aumento di temperatura riguarda più che altro l'avvolgimento di rame in quando il ferro non può scaldarsi in un tempo così breve. In questo caso la curva di raffreddamento più significativa sarà quella finale e non quella da noi rilevata dopo questo servizio. Per tanto non analizziamo i punti del raffreddamento presi.

	t	θ
	[Sec]	[°C]
1	0	21
2	30	22
3	60	25,5
4	90	28,8
5	120	32,4
6	150	35,7
7	180	38,9
8	210	42,4
9	240	44,8
10	270	48,1
11	300	51,6
12	330	53,5
13	360	56,1
14	390	58,6
15	420	61
16	450	64
17	480	65,8
18	510	68,7
19	540	71,6
20	570	74,7
21	600	77,1
22	630	79,8
23	660	82,5
24	690	85,4
25	720	88
26	750	90,7
27	780	93
28	810	95,5



Misura della resistenza delle fasi

Misura resistenza avvolgimenti inizio prova

Temperatura 21°C			
	Resistenza [Ω]		
	Fase1	Fase2	Fase3
Lato AT	1,475	1,444	1,429
Lato BT	0,272		

Misura resistenza avvolgimenti a 95.5°C

Temperatura 95,5°C			
	Resistenza [Ω]		
	Fase1	Fase2	Fase3
Lato AT	1,71	1,7	1,7
Lato BT	2,9	3	3

C'è un evidente errore di misura sul lato BT il che pregiudica l'affidabilità delle letture delle altre fasi. La verifica del salto termico non è possibile si riprova alla fine della prova successiva

Servizio Intermittente

Poiché è stato erroneamente raffreddato in trasformatore dopo la prova precedente si è rialimentato a 2 In fino a portarlo nuovamente alla temperatura di regime di S1 all'incirca di 96,1 °C. Da questo momento in poi si è effettuato la prova intermittente.

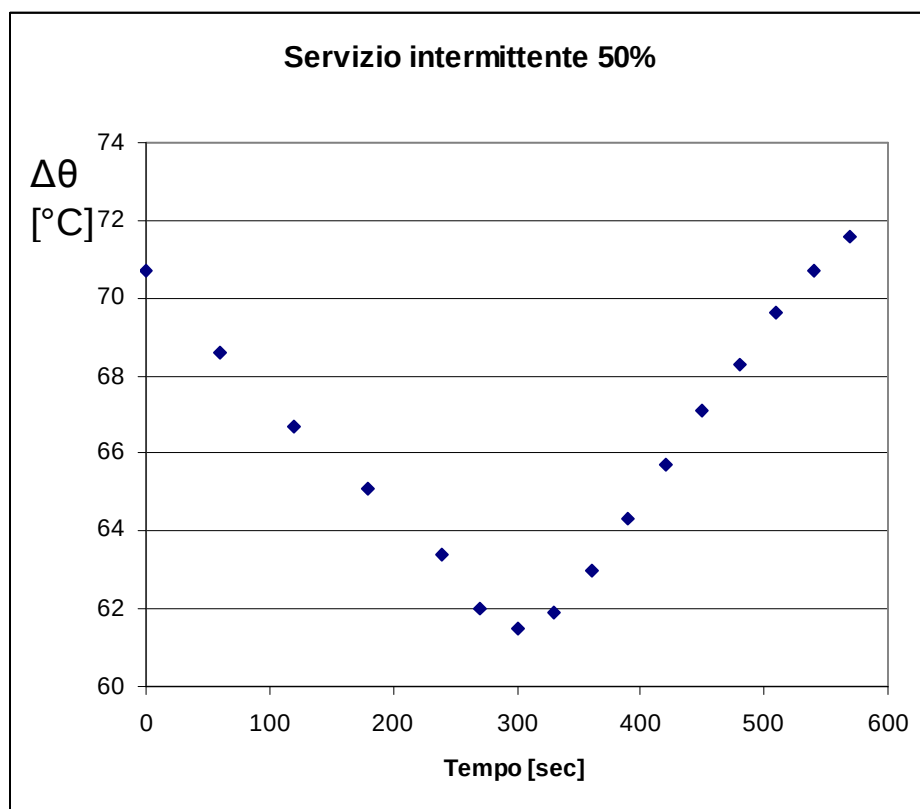
La preparazione del circuito per la nuova prova ha comportato la diminuzione della temperatura iniziale di qualche grado.

Le due prove sono state interrotte entrambi alla fine di un solo ciclo per questioni di sicurezza per tanto non è possibile interpretare la curva come un andamento periodico ma formato esclusivamente dai due tratti raffreddamento-riscaldamento.

Prova intermittente al 50 %

Corrente di alimentazione $\sqrt{2}I_n$

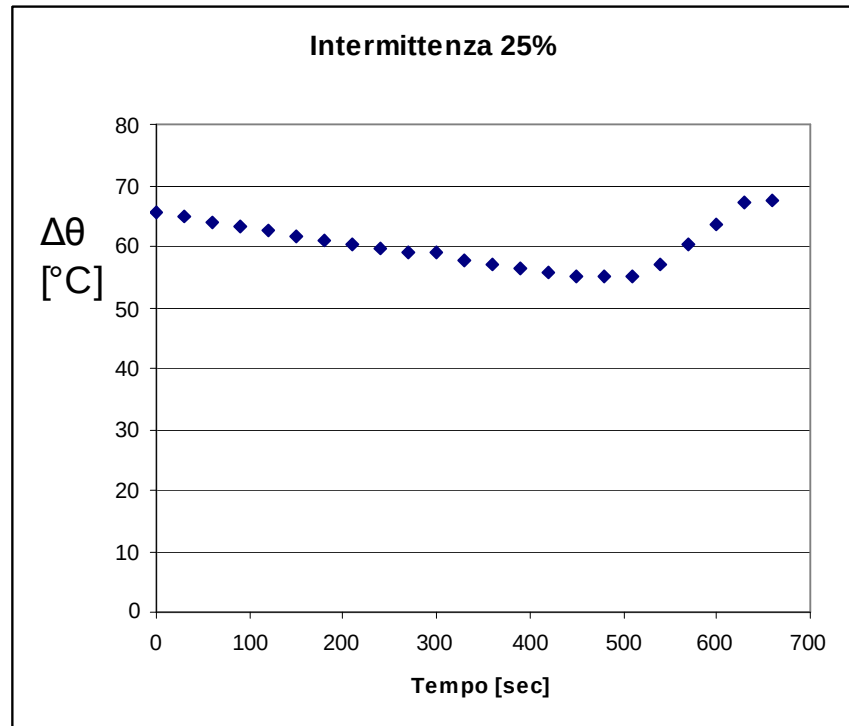
	t	T
	[Sec]	[°C]
OFF	0	91,7
	60	89,6
	120	87,7
	180	86,1
	240	84,4
Commutazione		
ON	0	83
	30	82,5
	60	82,9
	90	84
	120	85,3
	150	86,7
	180	88,1
	210	89,3
	240	90,6
	270	91,7
	300	92,6



Intermittenza 25%

Corrente di alimentazione 2In

	t	T
	[Sec]	[°C]
OFF	0	86,6
	30	85,8
	60	85
	90	84,3
	120	83,5
	150	82,7
	180	82
	210	81,4
	240	80,7
	270	80
	300	79,9
	330	78,7
	360	78,1
	390	77,4
	420	76,8
	450	76,2
Commutazione		
ON	0	76,2
	30	76,2
	60	78
	90	81,2
	120	84,5
	150	88,1
	180	88,6



Misura della resistenza delle fasi

Temperatura 21°C			
	Resistenza [Ω]		
	Fase1	Fase2	Fase3
Lato AT	1,475	1,444	1,429
Lato BT	0,272		

Temperatura 84°C			
	Resistenza [Ω]		
	Fase1	Fase2	Fase3
Lato AT	1,68	1,73	1,682
Lato BT	0,873	0,862	0,86

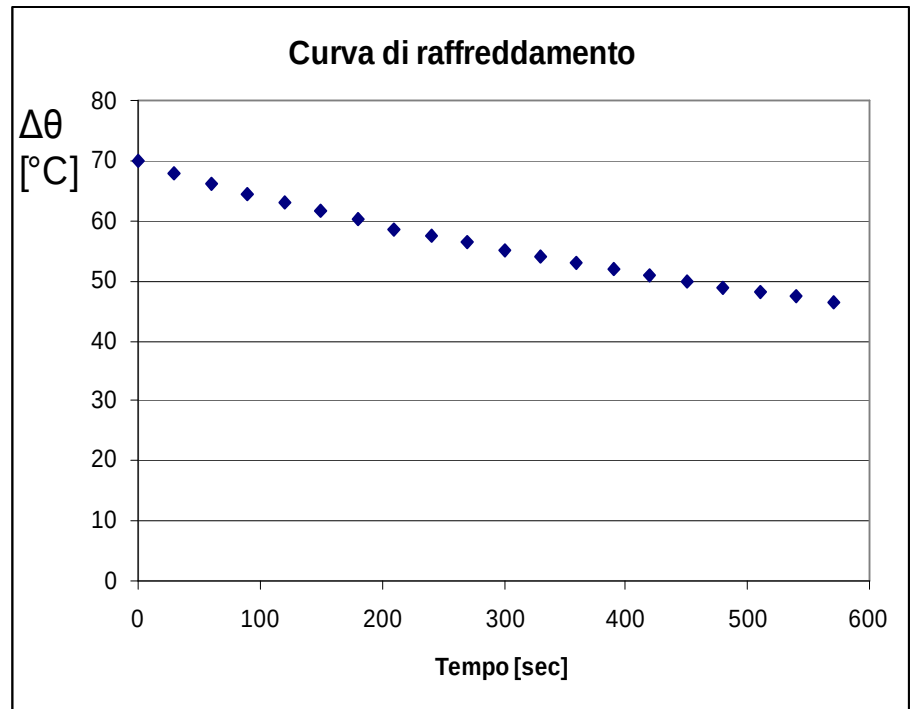
$$\Delta\theta = \Delta R / (R_{20^\circ\text{C}} * 0,0039) = 44^\circ\text{C AT} \leftarrow \text{Valore inaccettabile}$$

$$= 559^\circ\text{C B.T. ?????} \leftarrow \text{Valore assolutamente inaccettabile}$$

Errore di misura

Curva di Raffreddamento

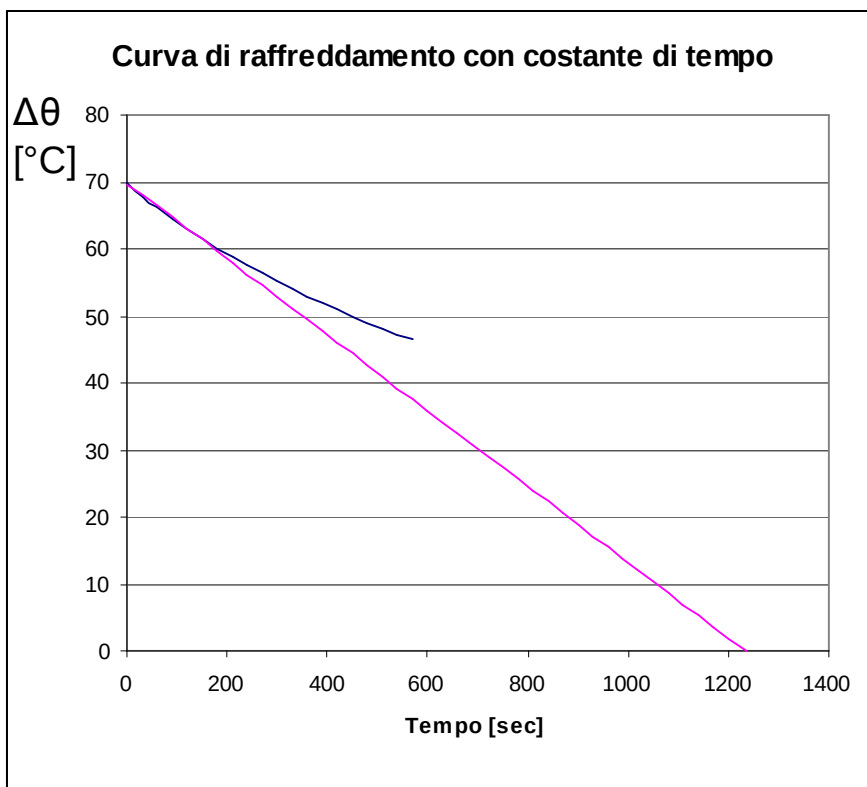
	t	T
	[Sec]	[°C]
1	0	90,8
2	30	88,9
3	60	87,2
4	90	85,5
5	120	84
6	150	82,5
7	180	81,1
8	210	79,7
9	240	78,5
10	270	77,3
11	300	76,1
12	330	74,9
13	360	73,9
14	390	72,9
15	420	71,9
16	450	70,9
17	480	70
18	510	69,1
19	540	68,3
20	570	67,5



Determinazione della costante di tempo per estrapolazione grafica (SDL e SI)

La costante di tempo risulta assai diversa da quella calcolata in precedenza con supposizioni teoriche. Questo dipende da molteplici fattori tra cui le approssimazioni analitiche ma ancora più significativo è l'aver considerato il corpo omogeneo, il che ovviamente non è vero visto che il rame e il ferro si scaldano in maniera diversa. La notevole differenza è altresì dovuta al breve

riscaldamento apportato alla macchina e alle intermittenze fra riscaldamento e raffreddamento.

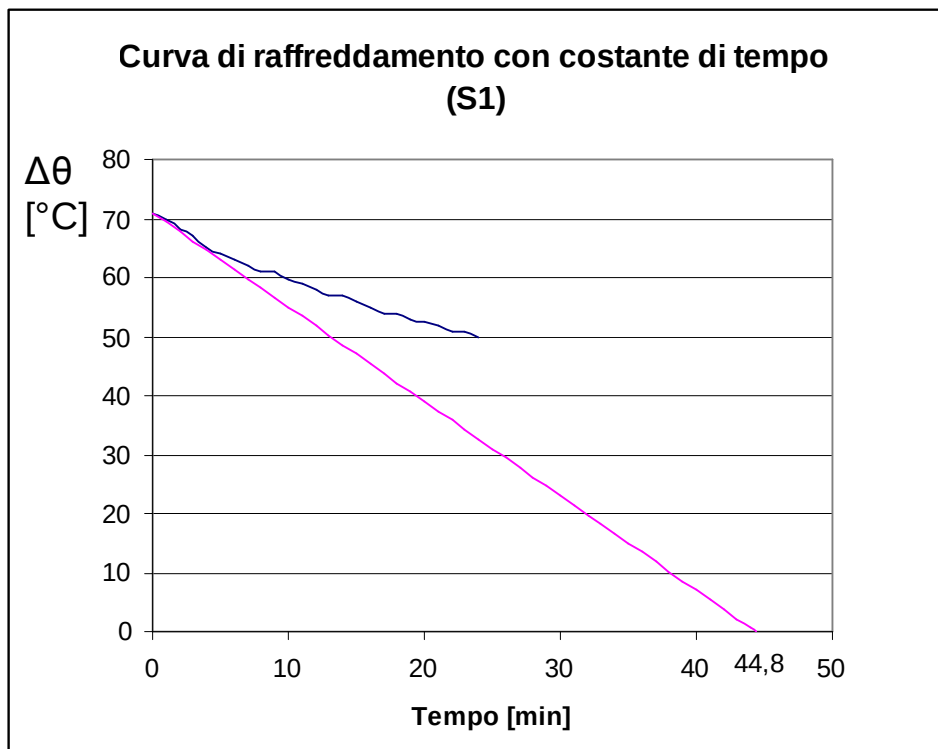


La costante di tempo risulta all'incirca **1235.4sec** ossia circa 20,5min molto diversa da quella calcolata in precedenza.

Determinazione della costante di tempo per estrapolazione grafica (S1)

Anche per il primo trasformatore è possibile ricavare graficamente, tramite interpolazione grafica, la costante di tempo termica della macchina che risulta anche qui, seppur in maniera meno accentuata, molto diversa da quella calcolata con considerazioni analitiche.

Una considerazione va fatta anche sull'attendibilità di questa rilevazione grafica: l'extrapolazione ci permette intersecando i primi punti della curva di ricavare una retta tangente a questi ultimi. Poiché ogni punto è determinato con un errore di misura molto rilevante, la retta tangente varia in base all'errore anche di molto la sua inclinazione. In conclusione sia il calcolo analitico sia quello sperimentale da noi condotto risulta molto approssimato e riduttivo.



Costante di tempo estrapolata all'incirca 44,8 minuti: circa la metà di quella calcolata per via analitica.



UNIVERSITÀ DI PISA

Corso di Laurea in Ingegneria Elettrica

Insegnamento: **Prove su macchine**

Anno Accademico: **2005 / 2006**

Allievo: **Gaspari Francesco**

Matricola: **243408**

Laboratorio: **DSEA**

Dipartimento: **Sistemi elettrici e automazione**

Data prova: **22/11/2005**

Professore: **Mauro Lemmi Gigli**

Titolo: ***Transitorio di cortocircuito e falso parallelo della macchina sincrona***

Obiettivo

- Tracciamento dell'oscillogramma di corrente durante le prove di cortocircuito e di messa in parallelo dell'alternatore su rete prevalente
- Determinazione grafica attraverso l'oscillogramma ottenuto dalla prova di cortocircuito, della corrente di corto circuito permanente, la reattanza sincrona, la reattanza transitoria e la costante di tempo transitoria
- Prova di buon parallelo dell'alternatore sulla rete e di cattivo parallelo nei seguenti casi: errore di ampiezza, di fase e di frequenza.

Dati di targa della macchina in oggetto

Alternatore a poli salienti PELLIZZARI

$S_n = 10 \text{ kVA}$

$I_n = 15,2 \text{ A}$

$V_n = 380 \text{ V}$ con coll. Y e 220 V con coll. Δ

$V_{ecc} = 50 \text{ V}$

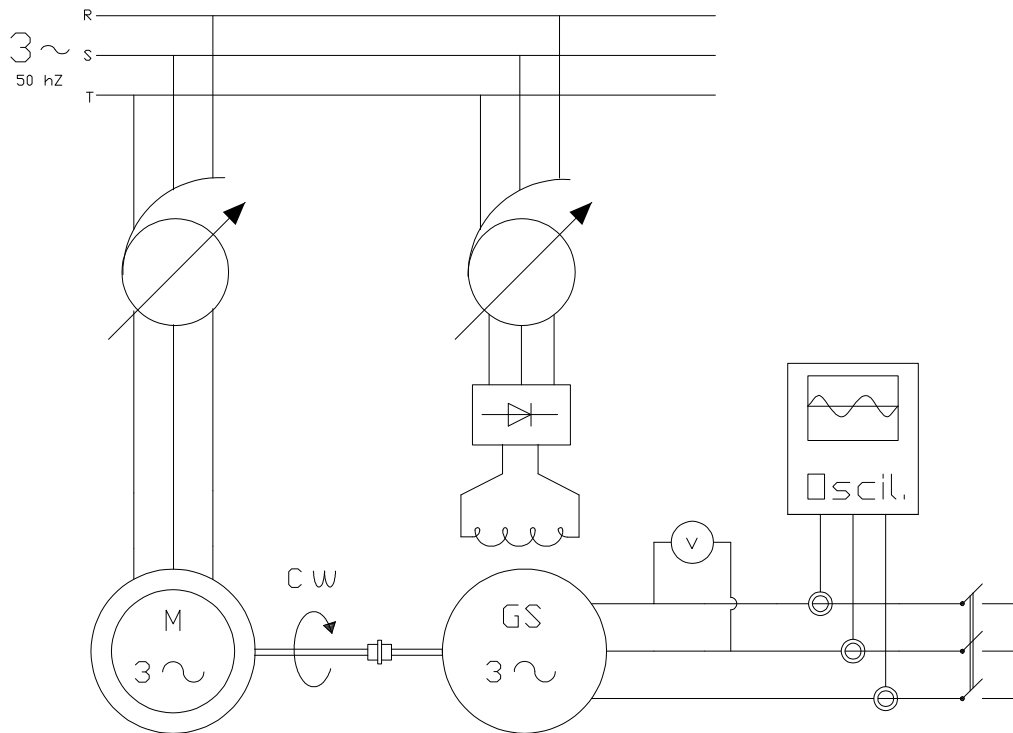
$I_{ecc} = 4 \text{ A}$

$n = 1500 \text{ giri / minuto}$ $f = 50 \text{ Hz}$

Esecuzione della prova

1ª Parte

Cortocircuito trifase dell'alternatore e tracciamento oscillogrammi relativi con determinazione dei parametri di transitorio



La prova è stata condotta trascinando in rotazione un alternatore trifase a poli salienti alla velocità di circa 1503 [giri/min]. Successivamente si è fornita l'eccitazione alla macchina per raggiungere una tensione a vuoto ridotta di circa 92V stellata, ridotta in quanto andando ad eseguire il cortocircuito a tensione nominale il valor massimo di corrente sarebbe talmente elevato da far intervenire le protezioni di massima corrente.

Lo scopo di tale prova è andare a determinare, attraverso l'elaborazione grafica degli oscillogrammi delle correnti di fase di seguito riportati, i seguenti parametri:

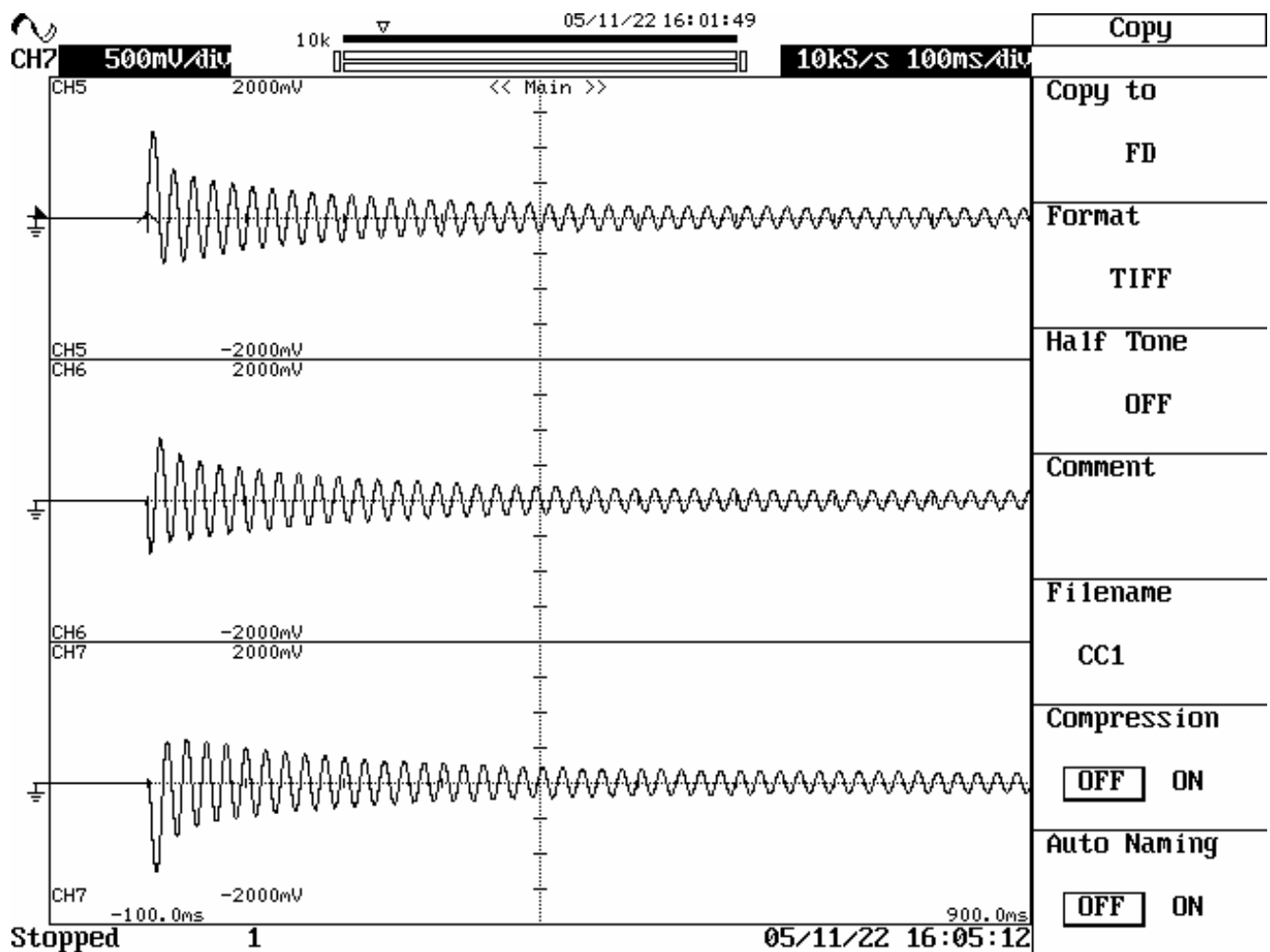
Reattanza sincrona X_s

Reattanza transitoria X'

Costante di tempo transitoria T'

La fase sub-transitoria è di breve durata ma è anche la più pericolosa, purtroppo questo fenomeno dura solo pochi cicli e nella nostra piccola macchina di prova se ne costata la presenza ma valutarla in modo quantitativo è problematico e spesso non attendibile.

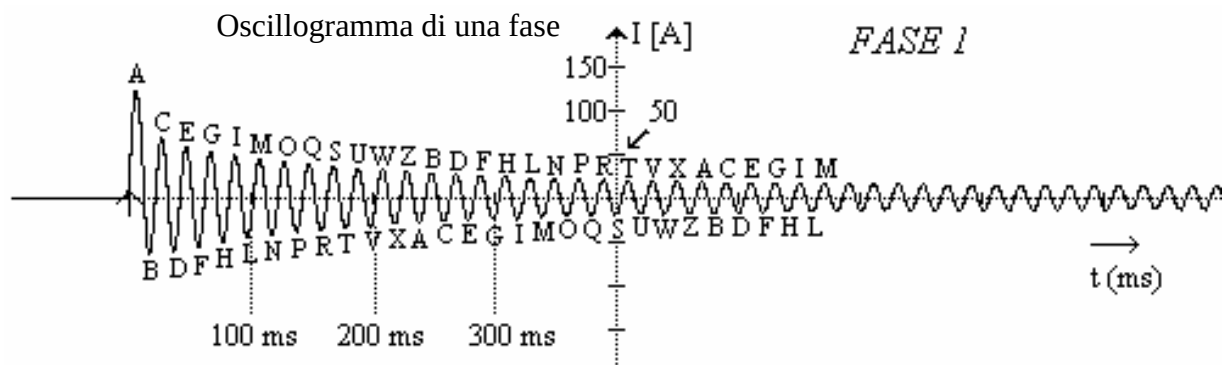
Oscillogramma delle correnti di fase della prova di cortocircuito



Dati gli oscillogrammi di corrente sulle tre fasi possiamo determinare la costante di tempo transitoria, il valor massimo di corrente transitoria, la reattanza sincrona e la reattanza transitoria. Sarebbe possibile andare a determinare anche il valor massimo della corrente subtransitoria ma nella nostra prova i punti a disposizione saranno insufficienti. Il calcolo della corrente di cortocircuito permanente non viene invece eseguito in quanto il suo valore risulta in ogni caso aleatorio, in quanto dipendente dall'istante in cui viene eseguito il corto circuito.

Verrà ora di seguito eseguito il calcolo delle componenti di cortocircuito e della costante di tempo attraverso l'extrapolazione grafica di un solo oscillogramma relativo ad una delle fasi. Il procedimento di risoluzione è in ogni caso identico per le altre due fasi...

Calcolo dei parametri di cortocircuito di una fase



Rilevamenti effettuati

Tempo [ms]	Misure picco -picco mm	tratto	I picco-picco [A]	Ipp-Ireg. [A]	ln (Ipp-Ireg)
0	28,5	A-B	203,57	188,27	5,24
25	19	C-D	135,71	120,41	4,79
50	17	E-F	121,43	106,13	4,66
70	15	G-H	107,14	91,84	4,52
90	13	I-L	92,86	77,56	4,35
110	12	M-N	85,71	70,41	4,25
130	11	O-P	78,57	63,27	4,15
150	10,5	Q-R	75,00	59,70	4,09
170	10	S-T	71,43	56,13	4,03
190	9,2	U-V	65,71	50,41	3,92
210	8,7	W-X	62,14	46,84	3,85
230	8,3	Z-A1	59,29	43,99	3,78
250	7,9	B1-C1	56,43	41,13	3,72
270	7,42	D1-E1	53,00	37,70	3,63
290	7,1	F1-G1	50,71	35,41	3,57
310	7	H1-I1	50,00	34,70	3,55
330	6,5	L1-M1	46,43	31,13	3,44
350	6,2	N1-O1	44,29	28,99	3,37
370	6	P1-Q1	42,86	27,56	3,32
390	5,8	R1-S1	41,43	26,13	3,26
410	5,5	T1-U1	39,29	23,99	3,18
430	5,5	V1-W1	39,29	23,99	3,18
450	5	X1-Z1	35,71	20,41	3,02
470	5	Z1-A2	35,71	20,41	3,02
490	4,7	B2-C2	33,57	18,27	2,91
510	4,5	D2-E2	32,14	16,84	2,82
530	4,5	F2-G2	32,14	16,84	2,82
550	4,3	H2-I2	30,71	15,41	2,74
570	4,1	L2-M2	29,29	13,99	2,64

La corrente di cortocircuito ha la seguente forma analitica:

$$icc(t) = [K_s e^{-t/T''} + K_t e^{-t/T'} + I_{reg}] \times \sin(\omega t + \phi) + K_u e^{-t/T_u}$$

dove...

$$I_{reg} = V/X_s \quad \text{componente a regime}$$

$$K_t = (1/X' - 1/X_s)V \quad \text{componente transitoria}$$

$$K_s = (1/X'' - 1/X')V \quad \text{componente subtransitoria}$$

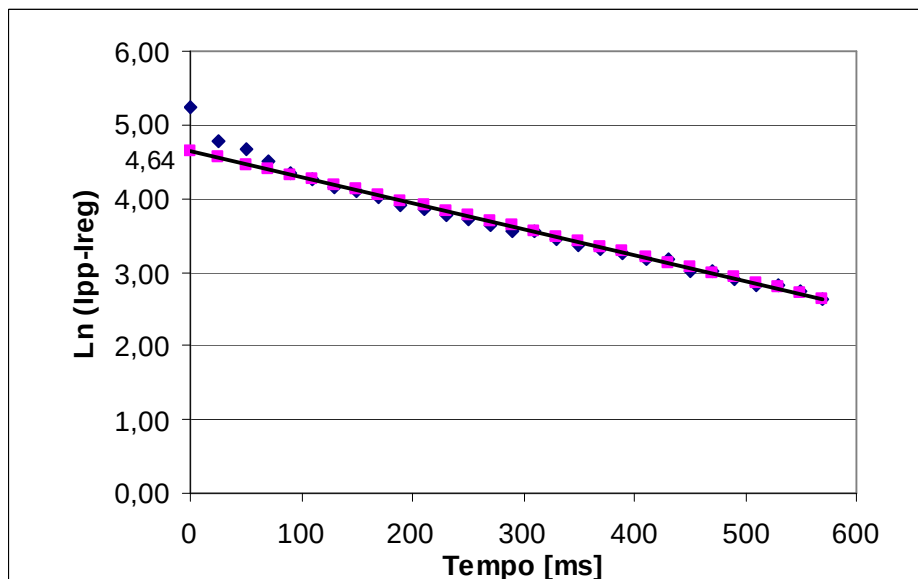
e inoltre X_s è la reattanza sincrona, X' è la reattanza transitoria e X'' la reattanza subtransitoria che non andremo a calcolare.

T' è la costante di tempo transitoria, T'' e T_u sono rispettivamente la costante di tempo subtransitoria e unidirezionale che non calcoleremo.

La componente a regime è presto determinata dall'andamento grafico dell'oscillogramma. Possiamo infatti notare che dopo un tempo pari a circa 570ms rimane soltanto la componente suddetta.

La componente di regime vale in misura fra un picco positivo e uno negativo 4,3 mm e poiché 7mm corrispondono a 50 A allora il valor massimo della corrente di regime vale 15,3 A.

Per il calcolo della componente transitoria, cioè il suo valor massimo rileviamo gli andamenti picco-picco dell'oscillogramma al fine di eliminare la componente unidirezionale. Fatto questo riportiamo su scala semilogaritmica gli andamenti del logaritmo naturale dei valori picco-picco in funzione del tempo. Questo trucco ci permette di trasformare un esponenziale, qual è la componente transitoria, in una retta. La componente subtransitoria dopo un tempo circa pari a 150ms si ritiene conclusa per tanto i punti che sono compresi fra 0 e 150ms vengono esclusi dagli altri. I restanti avranno all'incirca un andamento lineare e forniranno per tanto l'equazione di una retta. Tramite questa equazione è possibile risalire al valore iniziale della componente massima transitoria di cortocircuito.



Il valore della componente transitoria $Kt = e^{4,64} = 103,5 \text{ A} = 2 E_Y \sqrt{2} (1/X' - 1/X_s)$

La tensione stellata E_Y è pari a 92 V e la reattanza sincrona $X_s = E_Y / I_{ccperm}$.

La $I_{ccperm} = I_{reg}/2\sqrt{2} = 15,3/2\sqrt{2} = 5,41 \text{ A}$ per tanto $X_s = 92/5,41 = 16,8 \Omega$

Per tanto dalla prima equazione ricaviamo $1/X' = 0,4 + 1/16,8$; $X' = 2,17 \Omega$

Per calcolare la costante di tempo transitoria ricorriamo all'equazione che regola il fenomeno transitorio:

quando passa un tempo pari alla costante di tempo transitoria il logaritmo della differenza è sceso di una unità:

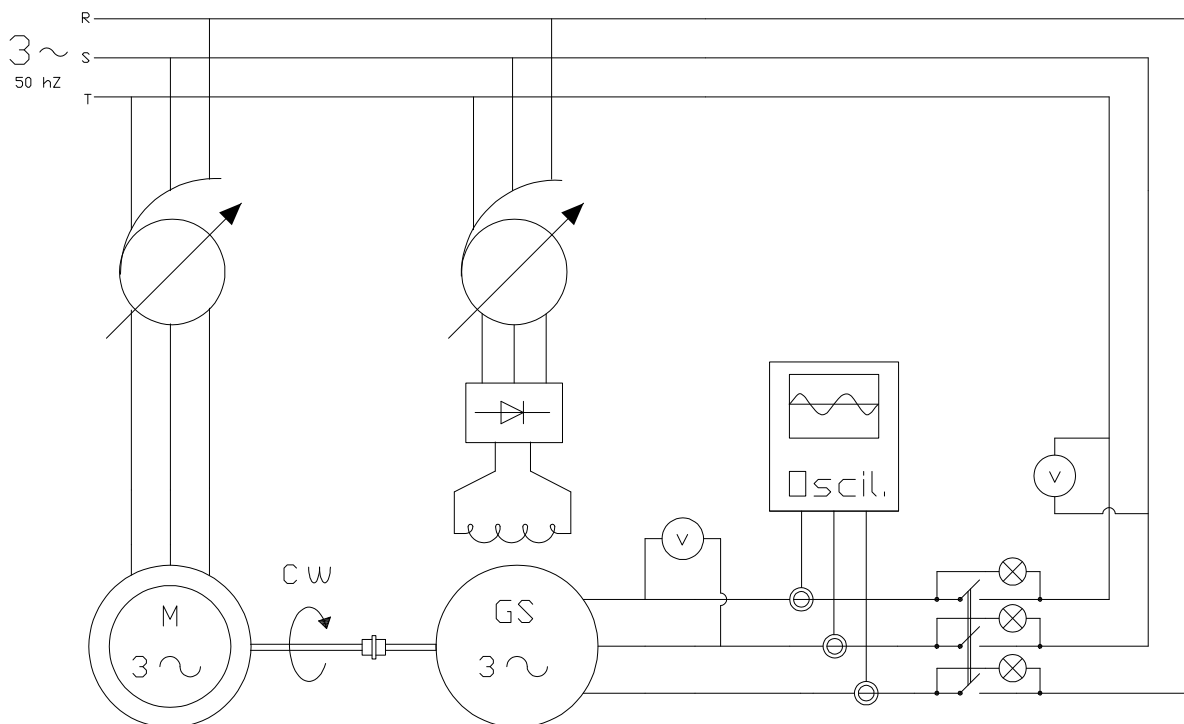
$$\ln(I_{pp} - I_{reg}) = \ln(Kt) - t / T'$$

Ossia essendo l'equazione della retta $Y = 4,64 - 0,0035 X$ per $Y=3,64$ allora $X = 285,7 \text{ ms}$

La costante di tempo transitoria $T' = 285,7 \text{ ms}$

2ª Parte

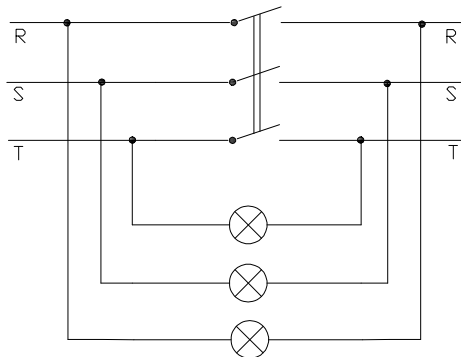
Esecuzione di un buon parallelo dell'alternatore sulla rete e di paralleli con errori di ampiezza, fase e frequenza.



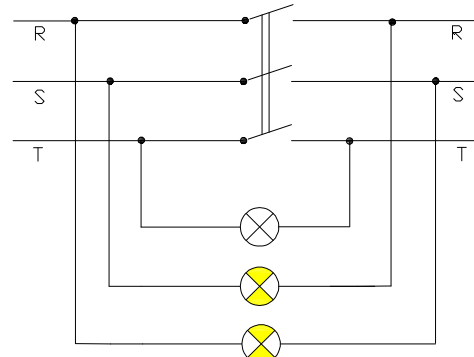
Schema di montaggio per l'esecuzione del parallelo dell'alternatore

Al fine di effettuare **un buon parallelo** è possibile utilizzare due criteri: a lampade spente oppure a una lampada spenta e due accese. Qui di seguito sono riportati i due metodi.

Parallelo a lampade spente



Parallelo a due lampade accese ed una spenta



L'esecuzione del parallelo a lampade spente è sicuramente di più facile realizzazione ma può portare, date le caratteristiche delle lampade ad incandescenza, a commettere un piccolo errore di fase. L'esecuzione di parallelo con due lampade accese alla stessa intensità e una spenta può invece garantire una precisione più elevata (praticamente pari alla realizzazione del parallelo visualizzando le forme d'onda delle tensioni su un oscilloscopio).

Procedura di esatto parallelo

Il parallelo deve essere eseguito rispettando determinate condizioni per non provocare violenti transitori che vengono studiati nell'operazioni di falso parallelo.

E' quindi necessario effettuare:

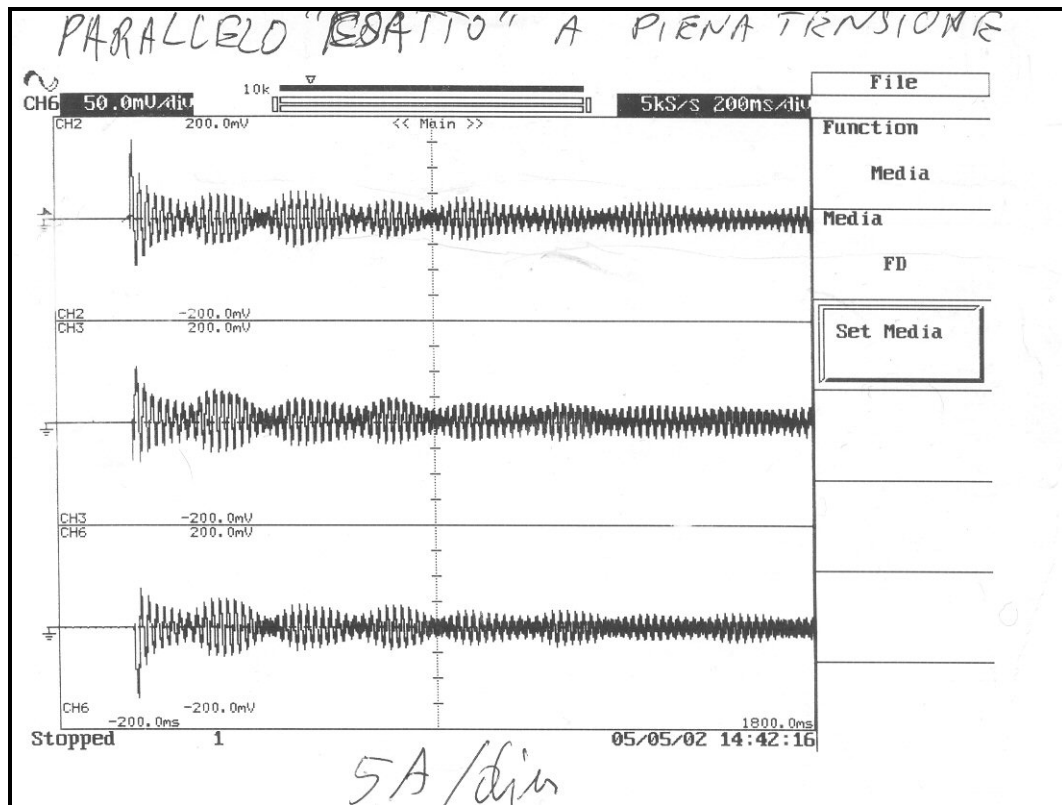
Controllo di frequenza: le tensioni della macchina sincrona devono avere una frequenza il più possibile prossima alla frequenza di rete, ciò si ottiene agendo sul motore primo in modo da trascinare il rotore ad un'opportuna velocità data dalla relazione $n=60 f/p$ e misurata da uno strumento.

Controllo di ampiezza: l'ampiezza delle tensioni della macchina sincrona deve essere uguale a quella delle tensioni di rete, ciò si ottiene regolando la corrente sul circuito di eccitazione perché variando il Φ avremo una variazione data dalla formula $E_o = 4,44 f N K_{avv} \Phi$. Le due tensioni vengono poi misurate da due voltmetri posti uno a monte e uno a valle dell'interruttore di parallelo.

Controllo di sequenza: la sequenza delle fasi deve essere la stessa, dovrà essere controllata la sequenza sull'interruttore.

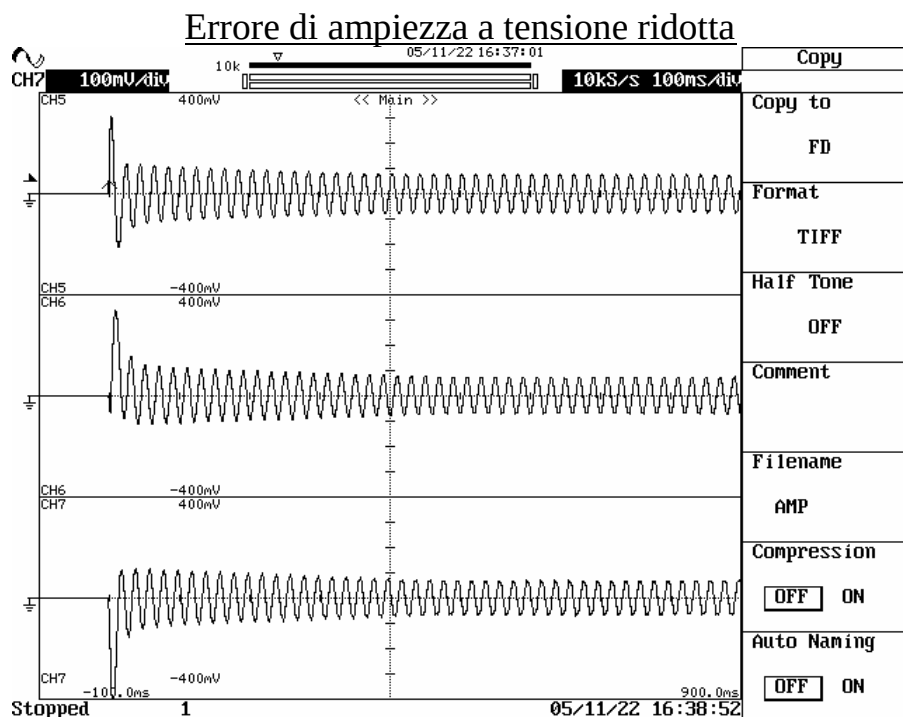
Controllo di fase: le tensioni della macchina (E_o) devono essere in fase con le corrispondenti tensioni della linea (V). Per riuscire a controllare l'errore sulla fase si inseriscono tre lampade a cavallo dell'interruttore, sincronoscopio a luce rotante, così siamo in grado di distinguere due casi: Ipersincronismo, le luci ruotano in senso orario, la $f_{macchina}$ è maggiore di quella della rete; Subsincronismo, le luci ruotano in senso antiorario, la $f_{macchina}$ è minore di quella della rete.

Andamento delle tre correnti nelle tre fasi del motore nell'istante di esecuzione del buon parallelo

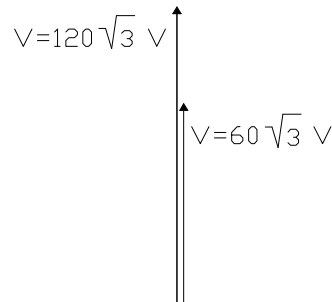


Se il parallelo risultasse perfetto le tre correnti dovrebbero risultare insignificanti. Tuttavia anche in questo caso è possibile notare un picco di corrente di intensità pari alla corrente nominale e un certo numero di pendolazioni (il rotore aveva allungato il passo) dovute ad un piccolissimo errore di frequenza al momento della chiusura dell'interruttore per la messa in parallelo.

Esecuzione dei paralleli errati dell'alternatore sulla rete



Oscillogrammi delle correnti nella macchina inserita con errore di ampiezza

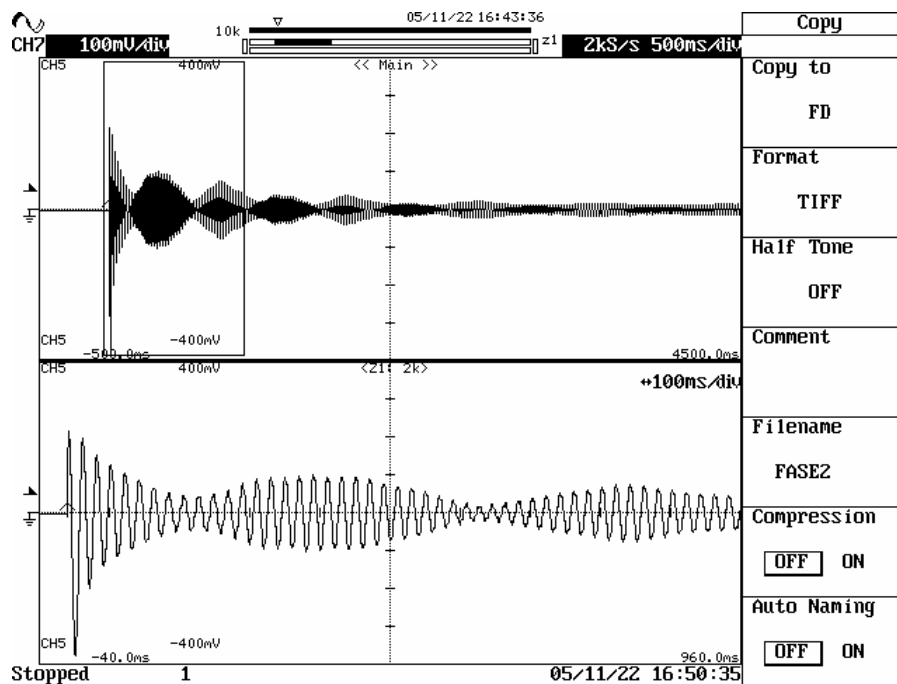


Il transitorio è del tutto simile al transitorio di corto circuito trifase. Tuttavia al momento della chiusura dell'interruttore la variazione di tensione tra i morsetti di macchina e i morsetti di rete risulta inferiore a quella in caso di cortocircuito. Il salto di tensione è di 60 V e non produce una corrente troppo elevata, questo grazie anche alla tensione ridotta rispetto a quella nominale. In queste condizioni la macchina è vista dalla rete come un condensatore (eroga potenza reattiva).

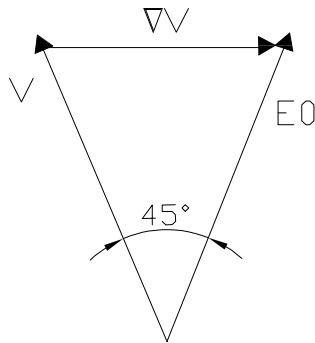
La tensione ai morsetti di macchina è pari 60 V stellata

La tensione ai morsetti di rete è pari a 120 V stellata

Errore di fase intorno ai 45° a tensione ridotta



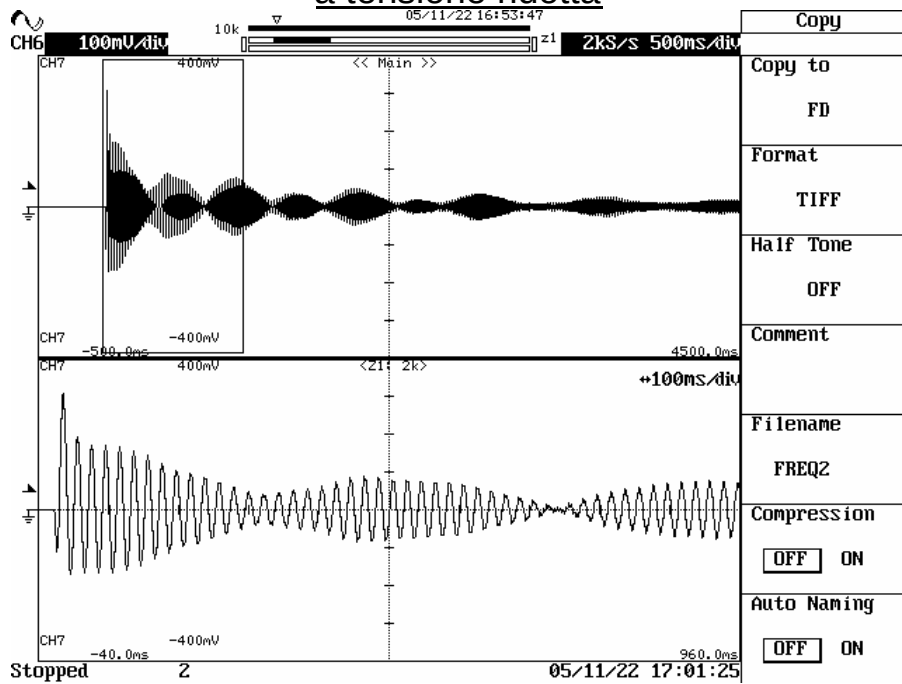
Oscillogramma di corrente in una fase statorica della macchina all'atto del parallelo



La differenza di fase tra le tensioni E_0 e V si traduce in un angolo tra il vettore flusso statorico ed il vettore associato alla terna trifase di rete che determina una coppia all'albero che tende a portare in fase tramite oscillazioni smorzate dell'angolo di coppia (pendolazioni) attorno al valore di sfasamento nullo.

Ad ogni nodo dell'oscillogramma l'angolo di coppia è zero e poi riprende la pendolazione fino a portarsi, dopo un lungo transitorio, ad un angolo di coppia stabilmente a zero.

Errore di frequenza di circa 0,5 Hz, 50Hz di rete e 49,5Hz di macchina a tensione ridotta



Simile a quello visto con errore di fase, il fenomeno transitorio si estingue in una ventina di cicli, da 1485 giri arriva a 1500 giri in circa mezzo secondo. Il campo rotante statorico porta in sincronismo il rotore, oscillando attorno alla velocità di sincronismo fino a smorzarsi alla fine del transitorio.



UNIVERSITÀ DI PISA

Corso di Laurea in Ingegneria Elettrica

Insegnamento: **Prove su macchine**

Anno Accademico: **2005 / 2006**

Allievo: **Gaspari Francesco**

Matricola: **243408**

Laboratorio: **DSEA**

Dipartimento: **Sistemi elettrici e automazione**

Data prova: **06/12/2005**

Professore: **Mauro Lemmi Gigli**

Titolo: ***Parallelo del trasformatore trifase con la rete e determinazione del principio e fine degli avvolgimenti***

Obiettivo

- Realizzazione degli oscillogrammi di corrente dovuti all'inserzione del trasformatore sulla rete
- Determinazione dell'induzione di esercizio al variare della tensione
- Riconoscimento della natura dei morsetti del trasformatore, nel caso in cui non siano contraddistinti.

Dati di targa della macchina in oggetto

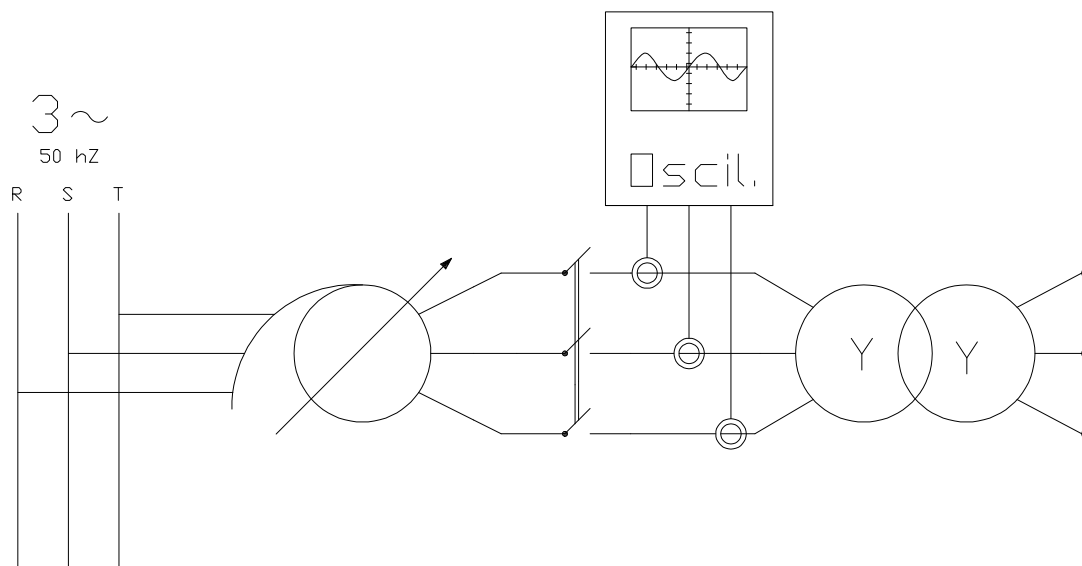
Trasformatore trifase di marca TRASFOSTATIK, dati di targa:

- $S_n = 2500 \text{ VA}$;
- $V_{10}/V_{20} = 380/220-380 \text{ [V]}$;
- $f = 50 \text{ Hz}$;
- Isolamento: Classe E;
- Collegamento: Y/Y;
- Servizio: S1.

Messa in parallelo del trasformatore sulla rete

La seguente prova avrà come obiettivo l'analisi dei fenomeni che si manifestano nell'istante in cui un trasformatore trifase viene alimentato con una terna di tensioni simmetrica diretta.

La terna di tensioni desiderata viene fornita da un VARIAC interposto fra la rete e il trasformatore con il secondario aperto. A monte del trasformatore sono posti degli interruttori comandati congiuntamente e un oscilloscopio che fornisce l'andamento temporale di tensioni e correnti di fase.



Lo studio del transitorio di inserzione dei trasformatori è molto complesso, essendo influenzato dalle non linearità (saturazione ed isteresi) del circuito magnetico.

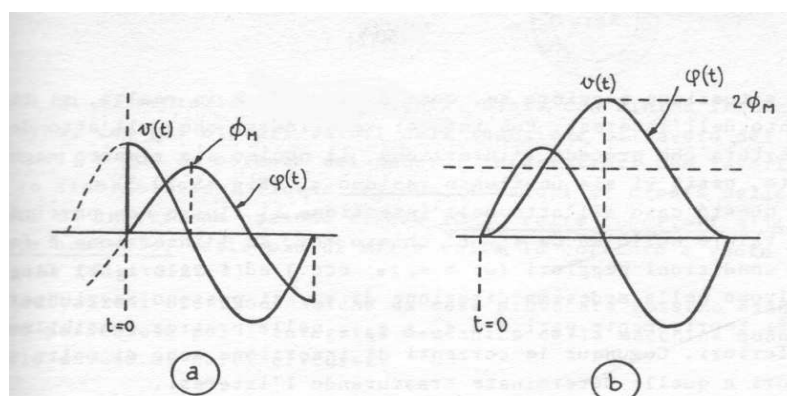
Chiudendo ad un certo istante l'interruttore, la macchina viene bruscamente alimentata dalla tensione:

$$v(t) = V_M \sin(\omega t)$$

Se la chiusura avviene per $\omega t = \pi/2, 3\pi/2 \dots$ ossia quando la tensione è al suo valor massimo positivo o negativo, il flusso $\Phi(t) = -\Phi_M \cos(\omega t)$ si stabilirà assumendo immediatamente l'andamento di regime, così come la corrente magnetizzante.

Se invece la chiusura avviene per $\omega t = \pi, 2\pi, \dots$ il flusso si porterà dopo $\frac{1}{2}$ periodo ad un valore di circa $2\Phi_M$; di conseguenza il nucleo risulta violentemente saturato e la corrente magnetizzante può assumere valori di cresta assai elevati.

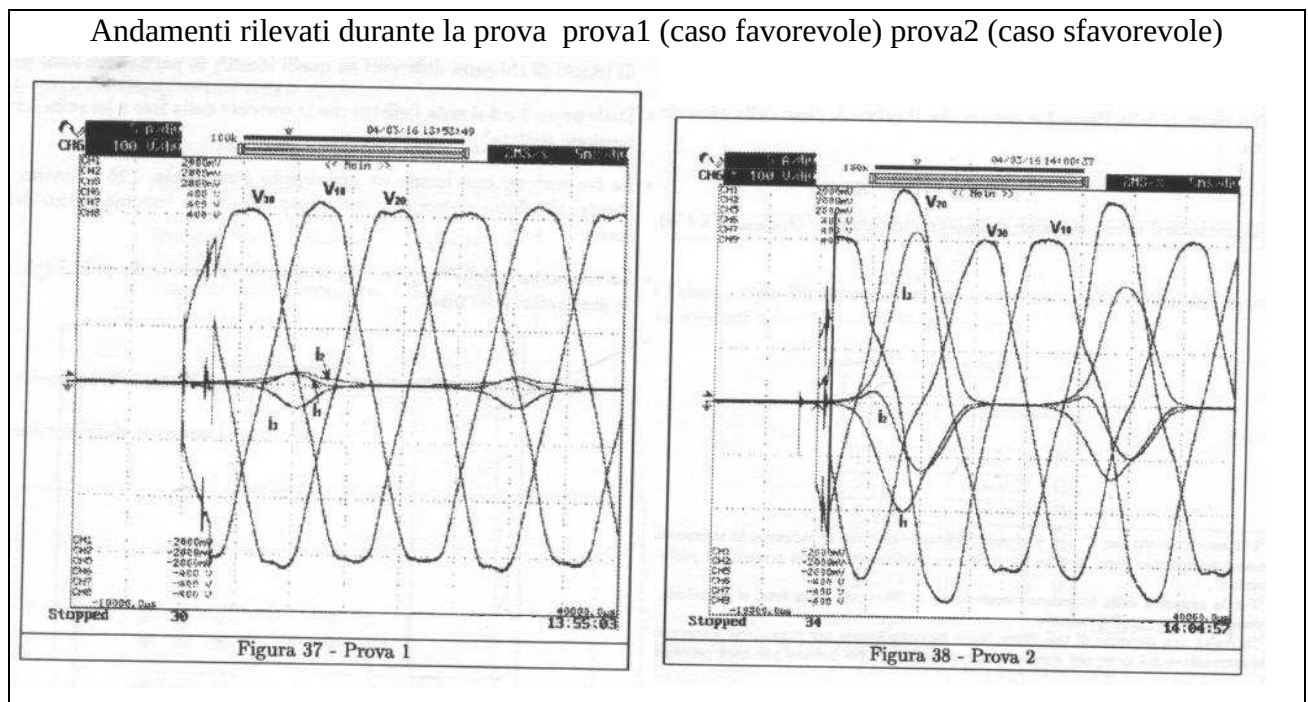
Il transitorio si smorza poi lentamente a causa di tutti i fenomeni dissipativi in alcune centinaia di periodi.



La situazione peggiora se, come d'altronde è in realtà, si tiene conto dell'isteresi. Può infatti verificarsi che, all'atto della apertura che precede l'inserzione, il nucleo sia rimasto magnetizzato, ossia vi sia un flusso residuo Φ_r .

In questo caso all'atto dell'inserzione il flusso non partirà più da valore nullo ma da Φ_r . E' chiaro che se l'inserzione viene fatto nelle condizioni peggiori ed il flusso evolve nella stessa direzione di Φ_r , si possono raggiungere teoricamente pari a $2 \Phi_M + \Phi_r$ con correnti di inserzione molto superiori a quelle determinate trascurando l'isteresi.

Attualmente per reti di alimentazione molto potenti, con gli elevati valori di induzione di lavoro dei trasformatori e con la potenza dei moderni interruttori i valori di cresta possono assumere valori 10-20 volte superiori alla I_n ossia più di mille volte la corrente a vuoto di regime.



Il primo oscillogramma non presenta elevate correnti di transitorio dovute alla messa in parallelo, nel secondo abbiamo delle sovracorrenti quasi 3 volte al di sopra della nominale

Da quanto emerge dagli oscillogrammi:

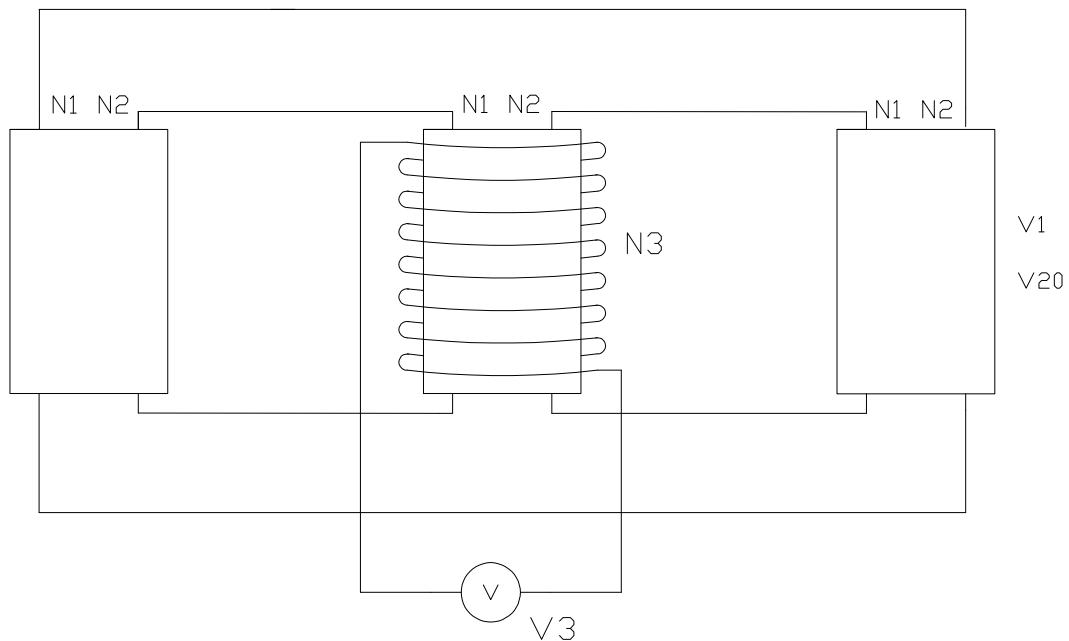
Gli istanti più favorevoli per la messa in tensione di un trasformatore trifase, sono quelli in cui le tensioni concatenate passano per lo zero

$$v_{12}(t) = v_{10}(t) - v_{20}(t) ; v_{23}(t) = v_{20}(t) - v_{30}(t) ; v_{31}(t) = v_{30}(t) - v_{10}(t)$$

$$\text{Cioè quando } v_{10}(t_0) = v_{20}(t_0) ; v_{10}(t_0) = v_{30}(t_0) ; v_{20}(t_0) = v_{30}(t_0)$$

Determinazione dell'induzione di servizio del trasformatore

Nello schema è possibile notare che vengono avvolte nel ramo centrale al di sopra dei due avvolgimenti N3 spire pari a 15 e viene misurata la tensione ai capi delle stesse. Questo metodo ci condurrà alla determinazione del flusso e quindi dell'induzione nella colonna nonché del numero di spire primarie e secondarie.

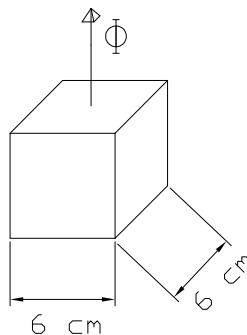


Il trasformatore viene alimentato, come nello schema della prova precedente, sul lato bassa tensione e con il secondario aperto. Il flusso creato dalla terna sinusoidale indurrà nell'avvolgimento con N3 spire una f.e.m. che sarà misurata dal voltmetro inserito ai suoi capi.

La f.e.m misurata dal voltmetro V3 è data in modulo dalla relazione:

$$V_3 = 4,44 f N_3 \Phi_M$$

Da cui ricavo il valore di Φ_M



Sapendo che il flusso massimo $\Phi_M = B_M S$ e che la sezione è quadrata di lato 6 cm determino l'induzione massima che si ha nel nucleo magnetico:

$$B_M = \Phi_M / S = \Phi_M / 0,0036$$

Conoscendo inoltre l'espressione delle due forze elettromotrici primaria e secondaria e sapendo quando valgono in modulo perché misurate anch'esse da un opportuno voltmetro:

$$V_1 = 4,44 f N_1 \Phi_M$$

$$V_{20} = 4,44 f N_2 \Phi_M$$

Si ricava per formula inversa il valore di N_1 e N_2

V_1 [V]	V_{20} [V]	S_n [VA]	V_3 [V]	I_{n1} [A]	I_{n2} [A]	Φ_M [mWb]	B_M [T]	I_{01} [mA]	$I_{01}\%$ /
220	380	2500	8,1	6,56	3,80	2,43	0,68	80	1,22
330	570	3750	12,1	9,84	5,70	3,63	1,01	225	2,29
380	660	4300	13,9	11,28	6,53	4,17	1,16	420	3,72

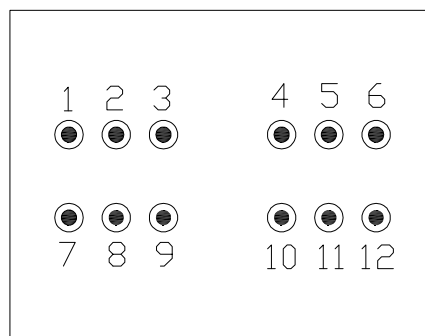
Il numero di spire di primario e secondario sarà dato dalle seguenti formule:

$$N_1 = V_1 / (4,44 f \Phi_M) = 220 / (4,44 * 50 * 2,43 * 10^{-3}) = 408 \text{ spire}$$

$$N_2 = V_{20} / (4,44 f \Phi_M) = 380 / (4,44 * 50 * 2,43 * 10^{-3}) = 704 \text{ spire}$$

Riconoscimento della natura dei morsetti del trasformatore, nel caso in cui non siano contraddistinti.

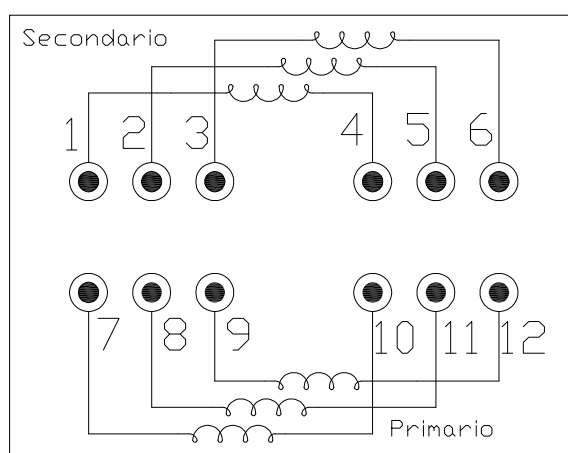
La prova in esame ci permette, qualora ce ne fosse bisogno, di riconoscere e contraddistinguere i morsetti del trasformatore trifase che in totale sono 12. La figura seguente mostra i dodici morsetti che sono stati in tanto numerati da 1 a 12 ma di questi non si conosce nulla. Ne a quale avvolgimento appartengono ne se sono principio o fine e neanche di quale colonna si tratta.



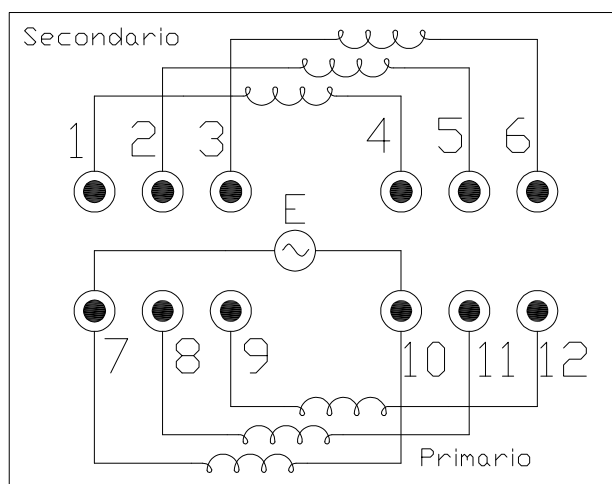
Con l'ausilio di un ohmetro si determina quali morsetti hanno continuità elettrica fra di loro e quindi si stabilisce quali siano le fasi o meglio fra quali morsetti abbiamo un collegamento tramite bobina. E' evidente che solo dove c'è la fase misureremo una certa resistenza:

Morsetti	Resistenza media
1-4 ; 2-5 ; 3-6	0,71 Ω
7-10 ; 8-11 ; 9-12	1,48 Ω

La resistenza lato primario che è A.T. è maggiore di quella lato B.T. per tanto lo schema precedente diventa questo:



Si alimenta una bobina primaria con un generatore di tensione sinusoidale e di valore opportuno. Si misurano con un multimetro digitale le tensioni ai capi delle altre due bobine; se le tensioni sono uguali tra loro allora significa che si sta alimentando la bobina della colonna centrale.



Le tensioni rilevate ai morsetti sono le seguenti. Abbiamo alimentato una colonna laterale

$V_{7-10} = 12,1 \text{ V}$	$V_{1-4} = 7,2 \text{ V}$	fase 1
$V_{8-11} = 9,8 \text{ V}$	$V_{2-5} = 5,8 \text{ V}$	fase 2
$V_{9-12} = 1,8 \text{ V}$	$V_{3-6} = 1,1 \text{ V}$	fase 3

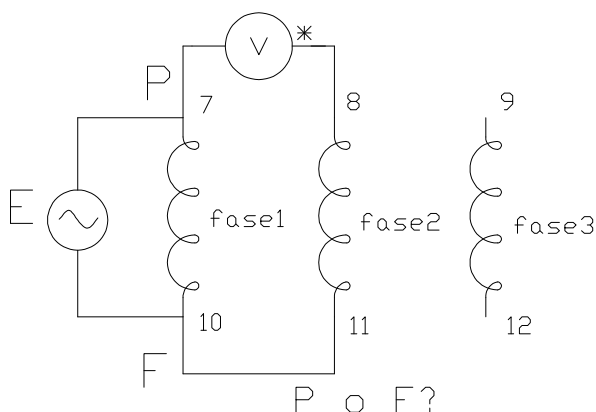
Inoltre dalle precedenti letture si riesce ad abbinare fra di loro le fasi con la consapevolezza del fatto che, a parità di rapporto spire, la fase con tensione più alta nel primario è abbinata a quella più alta del secondario e viceversa quella più bassa del primario a quella più bassa del secondario.

Adesso passiamo alla rilevazione del principio e fine degli avvolgimenti.

Il procedimento è il seguente:

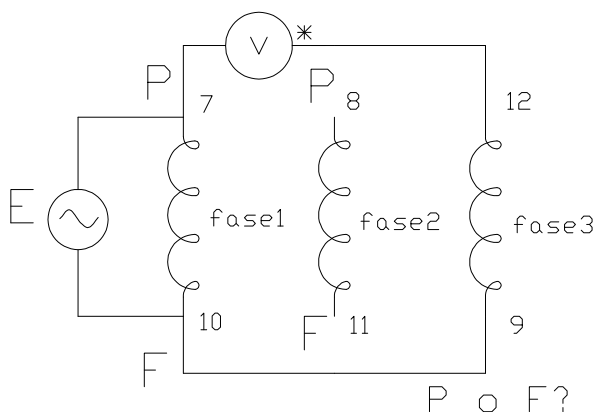
- Si fissano arbitrariamente il principio e la fine della fase 1.
- Si alimenta il trasformatore attraverso una bobina laterale, si monta il circuito e si legge il valore di tensione letto dal voltmetro

Se tale tensione è maggiore di quella di alimentazione allora il terminale a cui fa capo il riferimento del voltmetro corrisponde al principio della fase, altrimenti corrisponde alla fine.



La tensione indicata dal voltmetro è pari a $V_{7-8} = 21,8 \text{ V}$ poiché essa è maggiore della E applicata se ne deduce che il morsetto 8 è un principio e l'11 una fine.

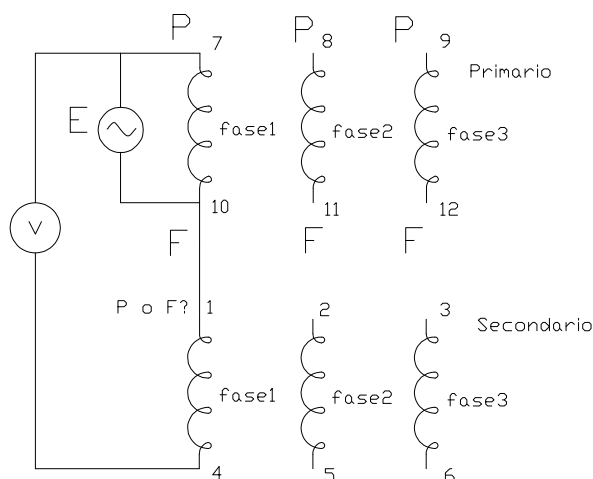
Alla stessa maniera per la fase tre si procede provando ad attaccare il morsetto 10 con il morsetto 9



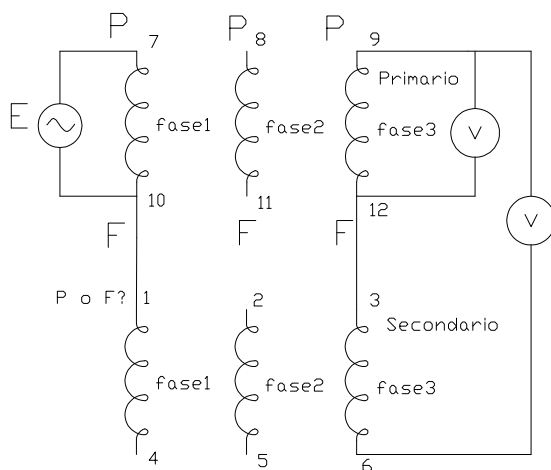
tensione indicata dal voltmetro è pari a $V_{7-12} = 10,9 \text{ V}$ inferiore alla E , data dalla differenza fra E e V_{9-12} , per tanto questa volta il 12 è la fine e il 9 è il principio

Per finire si determina principio e fine degli avvolgimenti secondari...

Collegiamo la fine della fase sul primario con un morsetto della fase corrispondente secondaria e inseriamo fra i morsetti a loro opposti un voltmetro. Un voltmetro va inserito anche sulla fase primaria presa in considerazione.



Unendo la fine della fase1 primaria cioè il morsetto 10 con il morsetto 1 si rileva una tensione $V_{7-4} = 19,3 \text{ V}$ pari alla somma delle tensioni sui due avvolgimenti. Si rileva pertanto che il morsetto 1 è un principio e il morsetto 4 è una fine



Unendo la fine della fase3 primaria cioè il morsetto 12 con il morsetto 3 si rileva una tensione $V_{9-6} = 2,9 \text{ V}$ pari alla somma delle tensioni sui due avvolgimenti.

Si rileva pertanto che il morsetto 3 è un principio e il morsetto 6 è una fine

Procedendo analogamente sulla fase due si determina che il morsetto 2 è un principio e il morsetto 5 una fine

Osservazione: Il trasformatore così contraddistinto appartiene ad un gruppo 0 per poter scegliere un altro gruppo occorre ragionare in maniera diversa.