Appendice

Il trasformatore monofase

1 - Principio di funzionamento

Schema generale

Il trasformatore è un dispositivo costituito da un nucleo in materiale ferromagnetico attorno al quale sono posti due avvolgimenti detti primario e secondario, costituiti da N_1 ed N_2 spire.
La macchina riceve potenza in ingresso dal generatore di alimentazione V_1 ed eroga potenza in uscita al carico rappresentato dall'impedenza Z_u.
Assumeremo per le grandezze elettriche primarie (V_1 e I_1) e secondarie (V_2 e I_2) le convenzioni riportate in Fig1.1.

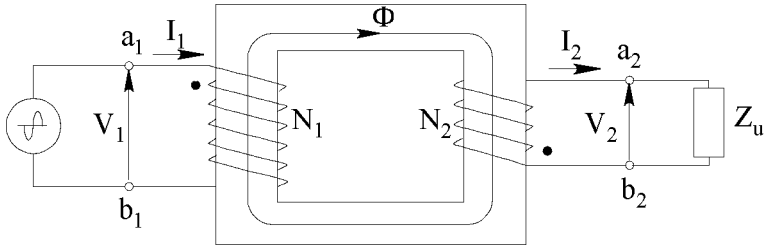

Fig.1.1 - *Schema per il trasformatore monofase.*

Il principio di funzionamento per un trasformatore ideale può essere riassunto come riportato nel seguito, esaminando dapprima il comportamento a vuoto e successivamente quello a carico.

Funzionamento ideale a vuoto

Si alimenti l'avvolgimento primario con una tensione alternativa sinusoidale V_1 di pulsazione ω, lasciando aperto l'avvolgimento secondario (Fig1.2).

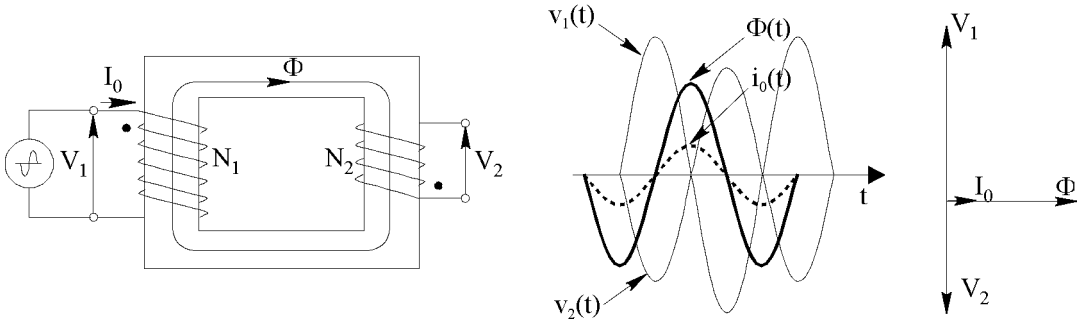

Fig.1.2 - *Schema per il trasformatore ideale a vuoto.*

scarica appunti ingegneria gratis: www.riccardogalletti.com/appunti_gratis

In tali condizioni nessuna corrente fluisce nel circuito secondario ($I_2 = 0$).
D'altra parte la corrente primaria assorbita dalla macchina a vuoto, detta corrente magnetizzante e indicata normalmente con I_0, determina nel nucleo la generazione di un flusso Φ che, tenuto conto del senso di avvolgimento delle spire N_1, è diretto come in Fig1.2.
Per il circuito magnetico vale la seguente relazione vettoriale:

$$N_1 \mathbf{I}_0 = \Re \Phi \tag{1.1}$$

dove $\Re$ è la riluttanza del circuito magnetico.
Il flusso Φ generato dalla corrente magnetizzante I_0 interessa entrambi gli avvolgimenti.
La variazione di flusso nel tempo determina nell'avvolgimento primario una tensione indotta che bilancia la tensione applicata V_1, mentre al secondario rende disponibile una tensione indotta V_2.
Nel caso in esame, le tensioni al primario e al secondario sono date rispettivamente da:

$$\mathbf{V}_1 = j\omega N_1 \Phi \qquad \mathbf{V}_2 = -j\omega N_2 \Phi \tag{1.2}$$

Il vettore della tensione $\mathbf{V}_1$ risulta in quadratura in anticipo rispetto al flusso Φ. Il vettore della tensione $\mathbf{V}_2$ (tenuto conto del senso in cui sono avvolte le spire secondarie N_2 e dei versi convenzionalmente assunti per le grandezze al secondario) risulta in opposizione di fase rispetto alla tensione $\mathbf{V}_1$ (vedi il diagramma dei fasori e gli andamenti temporali di Fig1.2).
Per caratterizzare compiutamente il trasformatore, quando non risulti possibile conoscere il senso degli avvolgimenti, è usuale identificare con un contrassegno (di solito un puntino) il morsetto primario e quello secondario sui quali le tensioni, rispettivamente primaria e secondaria, presentano la stessa polarità.
Tali contrassegni sono stati riportati nelle figure precedenti.
Si definisce infine il rapporto di trasformazione come il rapporto fra i moduli delle tensioni al primario e al secondario, a vuoto:

$$K = \frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} \tag{1.3}$$

Funzionamento ideale a carico
Si chiuda ora il circuito secondario su un'impedenza di carico Z_u (Fig.1.3).

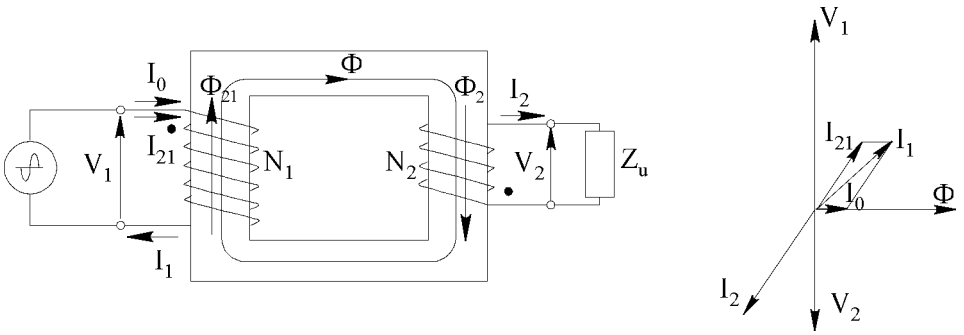

Fig.1.3 - *Schema per il trasformatore ideale a carico.*

La corrente I_2 circolante al secondario produce un flusso Φ_2 che tenderebbe a modificare il flusso principale Φ prodotto dalla corrente magnetizzante I_0.

scarica appunti ingegneria gratis: www.riccardogalletti.com/appunti_gratis

In realtà, poichè la macchina lavora con la tensione di alimentazione V_1 costante (in valore efficace), deve rimanere costante anche il valore efficace del flusso Φ nel nucleo.
Pertanto, nel funzionamento a carico, oltre alla corrente magnetizzante I_0, viene assorbita al primario anche la corrente I_{21} con lo scopo di compensare gli effetti sul flusso prodotti della corrente secondaria I_2. La corrente totale primaria potrà così esprimersi nella forma (Fig.1.3):

$$\mathbf{I}_1 = \mathbf{I}_0 + \mathbf{I}_{21} \tag{1.4}$$

In tal modo è possibile che rimanga costante il flusso, ovvero la forza magnetomotrice complessiva. Il bilancio delle amperspire che interessano il circuito magnetico risulta allora:

$$N_1\mathbf{I}_1 + N_2\mathbf{I}_2 = N_1\mathbf{I}_0 = \Re\Phi \quad \text{da cui} \quad \mathbf{I}_{21} = -\frac{N_2}{N_1}\mathbf{I}_2 \tag{1.5}$$

La relazione precedente stabilisce che, nel caso in esame, i vettori rappresentativi della corrente secondaria $\mathbf{I}_2$ e di quella richiamata al primario $\mathbf{I}_{21}$ sono con fase opposta.

2 - Circuito equivalente

Trasformatore reale
Il modello del trasformatore deve tener conto di alcuni fenomeni fisici, per una rappresentazione più aderente alla realtà.

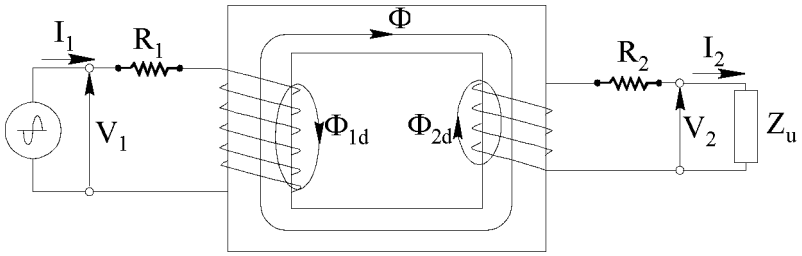

Fig.2.1 - *Modello per il trasformatore reale.*

Innanzitutto è presente la resistenza propria degli avvolgimenti, messa in conto nello schema di Fig.2.1 con le resistenze R_1 ed R_2, responsabili di cadute di tensione ohmiche e di perdite per effetto Joule. Inoltre non tutto il flusso prodotto dalla corrente primaria I_1 si concatena con l'avvolgimento delle N_2 spire secondarie, così come non tutto il flusso determinato dalla corrente secondaria I_2 si concatena con tutte le N_1 spire del primario. Esisteranno quindi dei flussi dispersi, evidenziati in Fig.2.1 con le quantità Φ_{1d} e Φ_{2d}. Tali flussi, che non contribuiscono al flusso principale Φ mutuamente concatenato, sono tuttavia responsabili di cadute di tensione induttive nei rispettivi avvolgimenti. Si tiene conto del fenomeno introducendo le reattanze di dispersione per l'avvolgimento primario e secondario X_1 ed X_2.
Quanto detto suggerisce di considerare in serie al circuito primario e secondario le seguenti impedenze (vedi Fig.2.2):

$$\mathbf{Z}_1 = (R_1 + jX_1) \quad \mathbf{Z}_2 = (R_2 + jX_2) \tag{2.1}$$

Per completare la rappresentazione del circuito equivalente del trasformatore si introduce il ramo magnetizzante, come rappresentato in Fig.2.2, che materializza un percorso per la corrente I_0.

scarica appunti ingegneria gratis: www.riccardogalletti.com/appunti_gratis

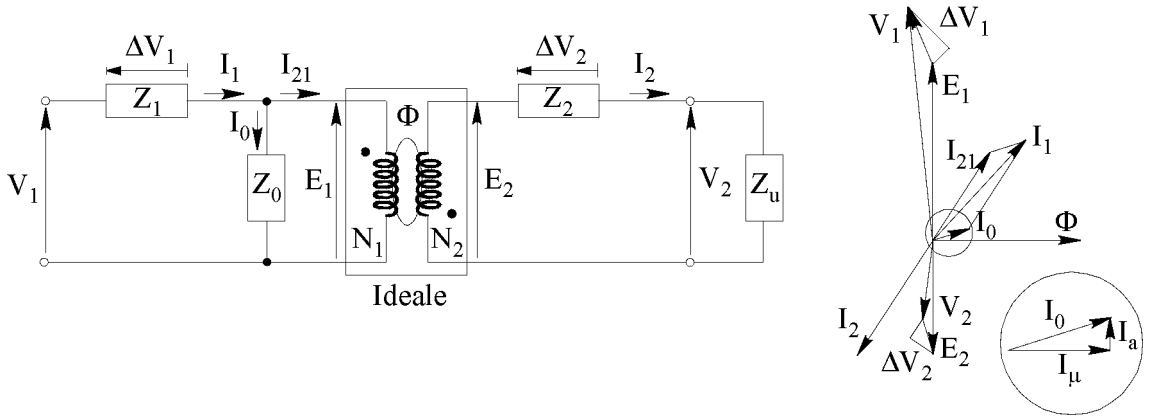

Fig.2.2 - *Circuito equivalente e diagramma vettoriale per il trasformatore reale.*

L'accoppiamento trasformatorico di Fig.2.2 risulta ormai depurato di tutti gli elementi dissipativi e di dispersione ed è stato ricondotto ad un accoppiamento *ideale*, per il quale valgono, sulla base di quanto detto finora, le seguenti relazioni vettoriali:

$$\mathbf{I}_{21} = -\frac{N_2}{N_1}\mathbf{I}_2 \qquad \mathbf{E}_1 = -\frac{N_1}{N_2}\mathbf{E}_2 \tag{2.2}$$

Con riferimento allo schema di Fig.2.2, le equazioni alle maglie per i circuiti primario e secondario risultano:

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_1 &= \mathbf{E}_1 + \Delta\mathbf{V}_1 = \mathbf{E}_1 + \mathbf{Z}_1\mathbf{I}_1 = \mathbf{E}_1 + (R_1 + jX_1)\mathbf{I}_1 \\ \mathbf{V}_2 &= \mathbf{E}_2 - \Delta\mathbf{V}_2 = \mathbf{E}_2 - \mathbf{Z}_2\mathbf{I}_2 = \mathbf{E}_2 - (R_2 + jX_2)\mathbf{I}_2 \end{aligned} \tag{2.3}$$

Nel diagramma vettoriale di Fig.2.2 (relativo a un carico Z_u induttivo) sono evidenziate le cadute di tensione ΔV_1 e ΔV_2 dovute alle impedenze Z_1 e Z_2.
Spesso, in pratica, le reattanze X_1 e X_2 risultano prevalenti rispetto alle resistenze R_1 e R_2.
Per quanto riguarda la corrente magnetizzante I_0, bisogna infine osservare che questa non può risultare rigorosamente in fase con il flusso Φ, nè in quadratura in ritardo rispetto alla tensione E_1. Infatti il materiale magnetico interessato da tale flusso è sede di perdite (per isteresi e correnti parassite) e pertanto la corrente magnetizzante I_0, oltre a una componente puramente reattiva I_μ, in fase con il flusso, deve avere anche una componente attiva I_a, in fase con la tensione E_1, corrispondente appunto alla potenza dissipata nel ferro (vedi l'ingrandimento di Fig.2.2). L'impedenza Z_0 del ramo magnetizzante sarà così costituita da una componente reattiva e da una resistiva (X_0 R_0).

Circuito equivalente riferito al primario

Nella rappresentazione equivalente di Fig.2.2 esistono due circuiti elettricamente separati con un accoppiamento magnetico ideale. Nella pratica si rivela utile disporre di un circuito equivalente dove tutti gli elementi sono riferiti al primario oppure al secondario.
Il circuito equivalente che riporta il secondario al primario, può essere facilmente ottenuto tenendo presente che:

$$\mathbf{Z}_2 + \mathbf{Z}_u = \frac{\mathbf{E}_2}{\mathbf{I}_2} \tag{2.4}$$

scarica appunti ingegneria gratis: www.riccardogalletti.com/appunti_gratis

Moltiplicando per il quadrato del rapporto spire si ottiene:

$$(\mathbf{Z}_2+\mathbf{Z}_u)\left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2=\mathbf{Z}_{21}+\mathbf{Z}_{u1}=\frac{\mathbf{E}_2\dfrac{N_1}{N_2}}{\mathbf{I}_2\dfrac{N_2}{N_1}}=\frac{\mathbf{E}_1}{\mathbf{I}_{21}} \qquad (2.5)$$

La relazione trovata definisce le impedenze secondarie riportate al primario e consente di rappresentare il circuito equivalente riferito al primario nel modo indicato in Fig.2.3.

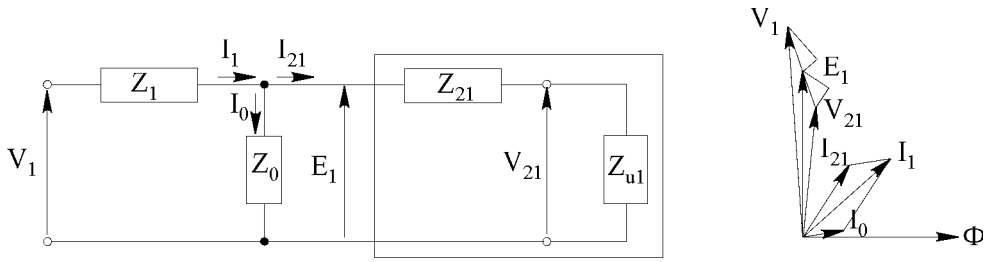

Fig.2.3 - *Circuito equivalente riferito al primario.*

Le impedenze secondarie riportate al primario sono state contraddistinte aggiungendo al pedice originario il pedice "1" per rimarcare l'operazione di riporto al primario tramite il quadrato del rapporto spire. Per quanto riguarda la tensione V_2 sul carico riportata al primario, vale evidentemente la relazione vettoriale:

$$\mathbf{V}_{21}=\mathbf{Z}_{u1}\mathbf{I}_{21}=\mathbf{Z}_u\left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2\cdot\left(-\mathbf{I}_2\frac{N_2}{N_1}\right)=-\mathbf{Z}_u\mathbf{I}_2\frac{N_1}{N_2}=-\mathbf{V}_2\frac{N_1}{N_2} \qquad (2.6)$$

Il circuito equivalente semplificato

Un'approssimazione frequente del circuito equivalente prevede lo spostamento del ramo magnetizzante a monte, direttamente in parallelo sui morsetti di alimentazione (Fig.2.4).

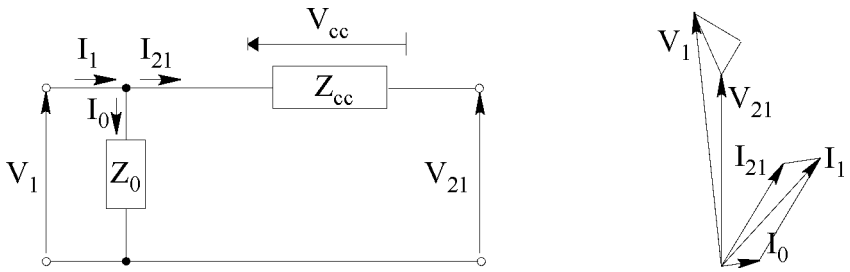

Fig.2.4 - *Circuito equivalente semplificato.*

Si considera inoltre un unico ramo serie con impedenza $\mathbf{Z}_{cc}$ costituito dalla somma delle impedenze $\mathbf{Z}_1+\mathbf{Z}_{21}$. Nel circuito equivalente semplificato, la caduta di tensione complessiva V_{cc} fra i morsetti di ingresso e quelli di uscita, non comprende il contributo della caduta di tensione sull'impedenza del ramo primario dovuto alla corrente magnetizzante I_0.

scarica appunti ingegneria gratis: www.riccardogalletti.com/appunti_gratis

3 - Prove a vuoto e in corto circuito

Determinazione dei parametri del circuito equivalente
L'identificazione dei parametri del circuito equivalente semplificato si effettua tipicamente con le prove di funzionamento a vuoto e in corto circuito (Fig.3.1).

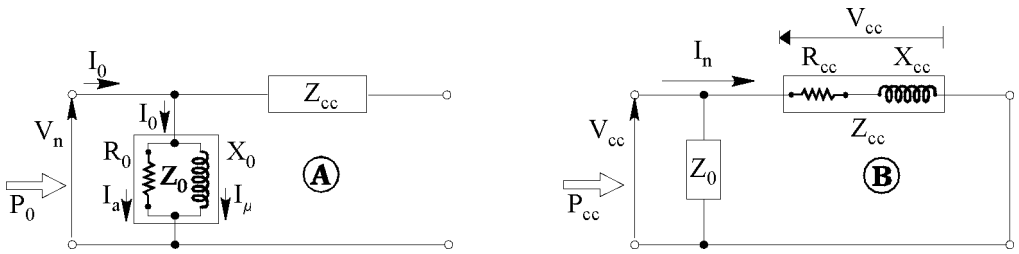

Fig.3.1 - *Circuiti equivalenti per la prova a vuoto (A) e in corto circuito (B).*

Prova a vuoto
La prova a vuoto (A) consente di determinare i parametri del ramo magnetizzante.
Si realizza alimentando la macchina alla tensione e frequenza nominali (V_n e f_n) lasciando l'altro lato aperto. La corrente assorbita in tali condizioni è solo la corrente magnetizzante I_0 e la potenza attiva assorbita sopperisce solo alle perdite nel ferro.
Misurando la potenza attiva P_0 e quella reattiva Q_0 si ottiene:

$$R_0 = \frac{V_n^2}{P_0} \qquad X_0 = \frac{V_n^2}{Q_0} \qquad \Rightarrow \qquad \mathbf{I}_0 = \mathbf{V}_n \mathbf{Y}_0 \qquad \mathbf{Y}_0 = \frac{1}{\mathbf{Z}_0} = \frac{1}{R_0} - j\frac{1}{X_0} \tag{3.1}$$

Prova in corto circuito
La prova in corto circuito (B) consente di determinare i parametri del ramo Z_{cc}.
Si realizza alimentando la macchina alla corrente e frequenza nominali (I_n e f_n) e chiudendo l'altro lato in corto circuito. La tensione occorrente per far circolare nella macchina in corto circuito la corrente nominale I_n risulta assai più piccola della tensione nominale.
La tensione di alimentazione per tale prova prende il nome di tensione di corto circuito V_{cc}.
La potenza attiva assorbita in queste condizioni è prevalentemente dissipata nel rame degli avvolgimenti per effetto Joule, mentre risulta in pratica trascurabile quella persa nel ferro (il flusso è ridotto in proporzione alla tensione di alimentazione V_{cc}).
Misurando la potenza attiva P_{cc} e quella reattiva Q_{cc} si ottiene:

$$R_{cc} = \frac{P_{cc}}{I_n^2} \qquad X_{cc} = \frac{Q_{cc}}{I_n^2} \qquad \Rightarrow \qquad \mathbf{V}_{cc} = \mathbf{I}_n \mathbf{Z}_{cc} \qquad \mathbf{Z}_{cc} = R_{cc} + jX_{cc} \tag{3.2}$$

scarica appunti ingegneria gratis: www.riccardogalletti.com/appunti_gratis

Esercitazione

Prove su un trasformatore

1 - Oggetto

- Prova a vuoto.
- Prova in corto circuito.
- Determinazione dei parametri del circuito equivalente.
- Misura del rapporto di trasformazione e verifica delle polarità.
- Misura delle resistenze degli avvolgimenti.

2 - Apparecchiature e strumentazione impiegata

- Trasformatore monofase 220/380 - 12/24 (V/V), 1000 VA.
- Variac monofase 0-400 V.
- Sonda di tensione LEM CV3-1000.
- Sonda di corrente LEM LH 25-NP.
- Multimetro HP 974A.
- Scheda DAQ National Instruments PCI 6024E.
- Software National Instruments Labview.

3 - La prova a vuoto

Set-up sperimentale

Il trasformatore in prova è di tipo monofase con potenza nominale di 1000 VA.
L'avvolgimento primario ha due prese: la prima con tensione nominale di 380 V e la seconda con tensione nominale di 220 V. Il secondario è formato da due avvolgimenti distinti ciascuno con tensione nominale di 12 V, che possono essere collegati in serie o in parallelo.
Le prove sono state condotte alimentando l'avvolgimento primario sulla presa a V_{1n} = 220 V e collegando i secondari in parallelo (vedi Fig.3.1); la tensione nominale secondaria è dunque V_{2n} = 12 V. L'alimentazione, a 50 Hz, è stata fornita per mezzo di un Variac.
Il Variac è un'apparecchiatura elettromeccanica che consente di erogare una tensione normalmente sinusoidale, con valore efficace variabile con continuità.
Il dispositivo impiegato eroga una tensione V_1 variabile nel campo da 0 V a 400 V.
È stato inoltre predisposto uno schema di misura (vedi Fig.3.1) che prevede il rilievo della tensione V_1 tramite una sonda di tensione (VT) e della corrente I_1 tramite una sonda di corrente (CT). I segnali in tensione, in uscita dalle sonde, vengono inviati ai canali CH1 e CH2 di una scheda di acquisizione dati, montata su PC, e quindi elaborati in forma numerica.

scarica appunti ingegneria gratis: www.riccardogalletti.com/appunti_gratis

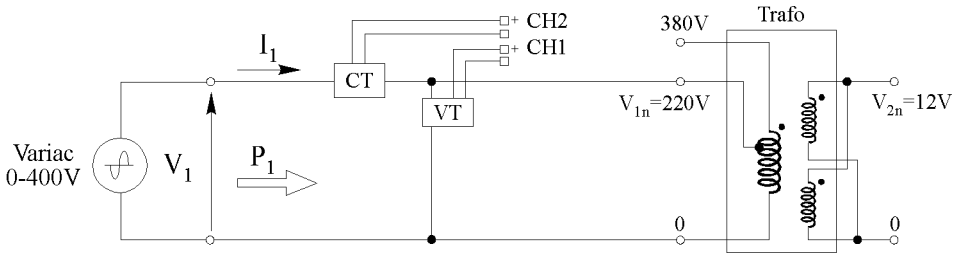

Fig.3.1 - *Trasformatore in prova e set-up sperimentale.*

Con la prova a vuoto si sono voluti determinare i componenti del circuito equivalente del ramo magnetizzante, visto dal lato primario, sulla presa con tensione nominale V_{1n} di 220 V. Lo schema di riferimento è riportato in Fig.3.2. Il rapporti di trasduzione per la prova sono:

- per il VT: 1000V corrisponde a 10V;
- per il CT: 1A corrisponde a 3V.

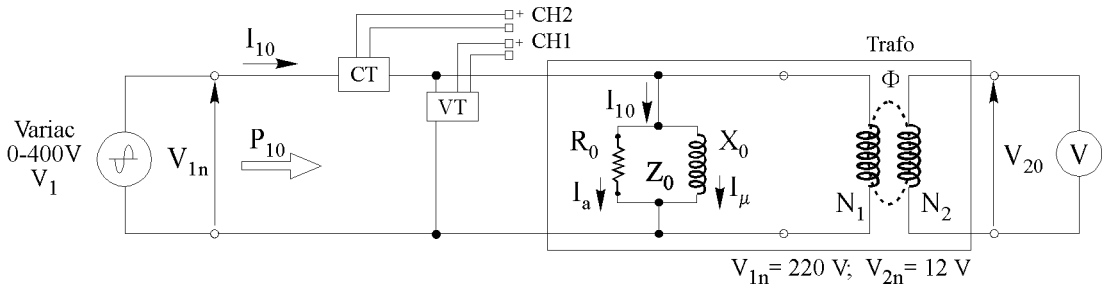

Fig.3.2 - *Schema per la prova a vuoto.*

Una volta portato il Variac fino alla tensione nominale V_{1n} = 220 V, sono state acquisite la tensione di alimentazione primaria V_{10} e la corrente I_{10}. Con uno strumento virtuale è stata valutata la potenza attiva P_{10} assorbita a vuoto. Con un multimetro è stata misurata la tensione V_{20} indotta al secondario. Da queste grandezze sono state dedotte le altre quantità seguenti:

la potenza reattiva $Q_{10} = \sqrt{(V_{10}I_{10})^2 - P_{10}^2}$ e il fattore di potenza $\cos\varphi_{10} = \dfrac{P_{10}}{V_{10}I_{10}}$;

le componenti del circuito equivalente $Z_{10} = \dfrac{V_{10}}{I_{10}}$; $R_{10} = \dfrac{V_{10}^2}{P_{10}}$; $X_{10} = \dfrac{V_{10}^2}{Q_{10}}$.

Le misure di interesse hanno registrato i seguenti valori:

V_{10}	I_{10}	P_{10}	V_{20}	Q_{10}	φ_{10}	Z_{10}	**R_{10}**	**X_{10}**
(V)	(A)	(W)	(V)	(VAR)	(gradi)	(Ω)	**(Ω)**	**(Ω)**
220.39	0.66	36.19	12.50	140.9	75.15	334	**1342**	**345**

Il rapporto di trasformazione effettivo a vuoto è risultato: $n = \dfrac{V_{10}}{V_{20}} = \dfrac{220{,}39}{12{,}50} = 17{,}6$.

scarica appunti ingegneria gratis: www.riccardogalletti.com/appunti_gratis

4 - La prova in corto circuito

Set-up sperimentale

Con la prova in corto circuito si vogliono dedurre i componenti del circuito equivalente del ramo serie, visto dal lato primario, sulla presa con tensione nominale V_{1n} di 220 V.
Per la prova in corto circuito faremo riferimento allo schema di Fig.4.1.

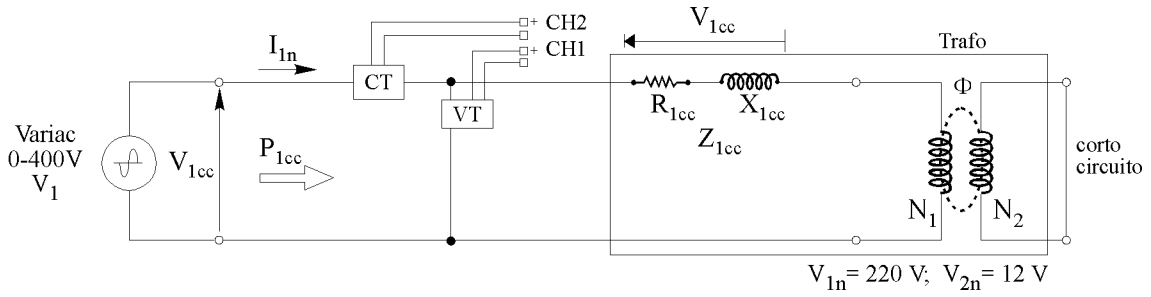

Fig.4.1 - *Schema per la prova in corto circuito.*

La corrente nominale della macchina alimentata al primario è: I_{1n} = 1000VA/220V = 4,55 A.
La tensione di alimentazione viene applicata con il Variac: si parte da zero e si aumenta fintanto che la corrente assorbita raggiunge il valore nominale I_{1n}. La tensione corrispondente V_{1cc} è la tensione di corto circuito. In linea generale, con lo strumento virtuale si acquisisce V_{1cc} e I_{1cc} e si valuta la potenza assorbita P_{1cc}. Si ricavano quindi le seguenti grandezze:

la potenza reattiva $Q_{1cc} = \sqrt{(V_{1cc} I_{1cc})^2 - P_{1cc}^2}$ e il fattore di potenza $\cos\varphi_{1cc} = \dfrac{P_{1cc}}{V_{1cc} I_{1cc}}$;

le componenti del circuito equivalente $Z_{1cc} = \dfrac{V_{1cc}}{I_{1cc}}$; $R_{1cc} = \dfrac{P_{1cc}}{I_{1cc}^2}$; $X_{1cc} = \dfrac{Q_{1cc}}{I_{1cc}^2}$.

Da un punto di vista pratico, poiché la tensione di corto circuito V_{1cc} è molto minore di quella della prova a vuoto V_{1n}, e la corrente I_{1n}, a cui si dovrebbe fare la prova in corto circuito, è molto maggiore di quella a vuoto I_{10}, i rapporti di trasduzione sono stati così modificati:

- per il VT: 10V corrisponde a 10V;
- per il CT: 1A corrisponde a 2V.

Per quanto riguarda la trasduzione della tensione (VT), il rapporto uno a uno è stato realizzato con la connessione diretta alla scheda, sfruttando il l'isolamento galvanico del Variac di alimentazione, che presenta al suo interno un trasformatore di isolamento.
Per quanto riguarda la trasduzione di corrente (CT), si è modificata la costante di traduzione, per evitare la saturazione della scheda di acquisizione. Si è inoltre limitata la corrente I_{1cc} della prova a circa 3,3 A_{RMS} (3,3x1,41x2 = 9,9V_{Picco}<10V = FSR della scheda).
Sono state fatte alcune prove in corto circuito, registrando i seguenti valori:

V_{1cc}	**I_{1cc}**	P_{1cc}	A_{1cc}	Q_{1cc}	φ_{1cc}	Z_{1cc}	**R_{1cc}**	**X_{1cc}**
(V)	**(A)**	(W)	(VA)	(VAR)	(gradi)	(Ω)	**(Ω)**	**(Ω)**
1,42	**1,02**	1,38	1,45	0,44	48,72	1,39	**1,33**	**0,42**
2,89	**2,08**	5,74	6,01	1,79	47,61	1,39	**1,33**	**0,41**
4,29	**3,07**	12,60	13,17	3,83	46,64	1,40	**1,34**	**0,41**
4,58	**3,27**	14,28	14,98	4,51	48,35	1,40	**1,34**	**0,42**

scarica appunti ingegneria gratis: www.riccardogalletti.com/appunti_gratis

Vista la linearità dell'impedenza Z_{1cc} e delle sue componenti con la corrente, si può ritenere che, alla corrente nominale I_{1n} = 4,55A, la tensione di corto circuito (su Z_{1cc} = 1,4 Ω) sia:

$$V_{1cc} = Z_{1cc} \cdot I_{1n} = 1{,}4 \cdot 4{,}55 = 6{,}4 \text{ V} \quad \Rightarrow \quad v_{cc} \cong 3\%$$

e la potenza assorbita (su R_{1cc} = 1,34 Ω) risulti:

$$P_{1cc} = R_{1cc} \cdot (I_{1n})^2 = 1{,}34 \cdot (4{,}55)^2 = 27{,}7 \text{ W}$$

5 - Altre prove e misure

Misura delle resistenze degli avvolgimenti

Per la misura della resistenza degli avvolgimenti, a causa del loro piccolo valore, si impiega il metodo a quattro morsetti.

Per il trasformatore in esame, risulta:

- per l'avvolgimento primario: R_1 = 398 mΩ
- per l'avvolgimento secondario: R_2 = 3 mΩ

La resistenza equivalente degli avvolgimenti, riportata al primario è:

$$R_{1Cu} = R_1 + R_{21} = R_1 + n^2 R_2 = 398 + (17{,}6)^2 \cdot 3 = 1327 \text{ m}\Omega$$

La resistenza che tiene conto delle perdite addizionali è:

$$R_{add} = R_{1cc} - R_{1Cu} = 1340 - 1327 = 13 \text{ m}\Omega$$

La temperatura ambiente al momento della misura, con macchina a freddo, era T_a = 18 °C. Pertanto, se riportiamo le resistenze alla temperatura di riferimento T_{ref} = 75 °C, si ha:

$$R_{1Cu,75} = R_{1Cu,18} \frac{235+75}{235+18} = R_{1Cu,18} \cdot k_T = 1327 \cdot 1{,}23 = 1632 \text{ m}\Omega$$

$$R_{add,75} = \frac{R_{add,75}}{k_T} = \frac{13}{1{,}23} = 11 \text{ m}\Omega$$

La potenza convenzionale persa in corto circuito risulta dunque:

$$P_{1cc,75} = (R_{1Cu,75} + R_{add,75}) \cdot I_{1n}^2 = 1{,}643 \cdot (4{,}55)^2 = 34 \text{ W}$$

Il rendimento convenzionale

La potenza convenzionale totale persa nel funzionamento nominale, cioè alla tensione nominale V_{1n}, alla corrente nominale I_{1n} e alla temperatura di riferimento T_{ref} = 75 °C è:

$$P_{dn} = P_{10} + P_{1cc,75} = 36 + 34 = 70 \text{ W}$$

Il rendimento convenzionale è dunque:

$$\eta_c = \frac{P_{un}}{P_{an}} = \frac{P_{un}}{P_{un} + P_{dn}} = \frac{1000}{1000 + 70} = 93{,}5\%$$

Con macchina a freddo, avremmo avuto: P_d = 36+28 = 64W; η = 94,0%.

scarica appunti ingegneria gratis: www.riccardogalletti.com/appunti_gratis