

RIPASSIAMO LE BASI DELL'ELETTROTECNICA

L'articolo offre un quadro completo ed aggiornato delle leggi che regolano l'elettrotecnica, leggi che anche un tecnico pratico, quale può essere un installatore, non può esimersi dal conoscere per svolgere razionalmente il proprio lavoro.

Parte tre: CARATTERISTICHE FUNZIONALI DEL TRASFORMATORE

A cura della Redazione

3.1 - Il trasformatore ideale

Il trasformatore si basa sui fenomeni dell'induzione elettromagnetica.

È costituito da due avvolgimenti isolati tra loro ma abbracciati dallo stesso flusso magnetico variabile.

Gli avvolgimenti sono montati su un nucleo chiuso di materiale magnetico.

Nella forma più semplice, il trasformatore è costituito da un nucleo di materiale magnetico chiuso, sulle cui colonne sono avvolti due avvolgimenti: uno, il primario, che riceve l'energia, l'altro, il secondario, che la eroga.

Per studiare il funzionamento del trasformatore conviene fare inizialmente qualche semplificazione.

Si consideri il trasformatore monofase, ossia la macchina per un sistema funzionante con corrente alternata monofase (Figura 3.1a) e si supponga poi che i due avvolgimenti siano avvolti in modo che tutto il flusso magnetico prodotto dalla corrente nell'avvolgimento primario si concateni con l'avvolgimento secondario e viceversa (in altri termini, che non vi siano dispersioni di flusso magnetico).

Si ammetta infine che gli avvolgimenti siano privi di resistenza e che il nucleo magnetico sia privo di perdite.

Una macchina che rispondesse a questi requisiti potrebbe essere considerata un trasformatore ideale.

Si consideri ora il trasformatore funzionante a vuoto, cioè con il secondario aperto (non chiuso sul circuito utilizzatore).

Per effetto dell'applicazione della tensione sinusoidale al primario, circolerà in questo avvolgimento una corrente I_q , che per le ipotesi fatte è sinusoidale puramente induttiva e quindi sfasata di 90° in ritardo rispetto alla tensione applicata.

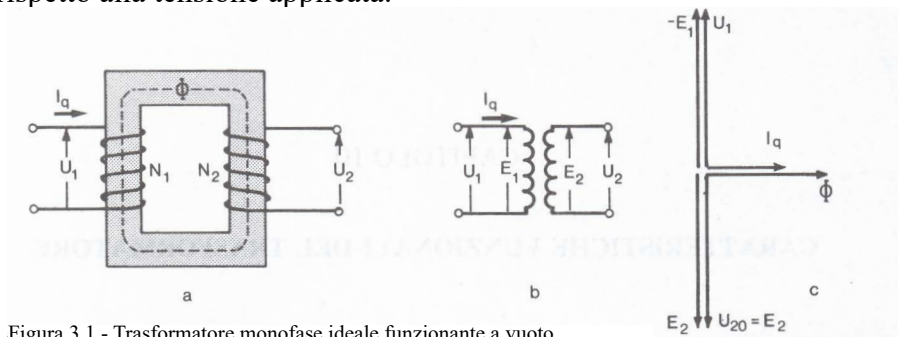


Figura 3.1 - Trasformatore monofase ideale funzionante a vuoto
a - disposizione degli avvolgimenti;
b - segno grafico con i segni delle tensioni e correnti;
c - diagramma vettoriale.

Questa corrente produce un flusso magnetico ϕ che si stabilisce nel circuito magnetico. Il flusso è pure alternato, varia di intensità con il tempo e perciò genera nelle spire dell'avvolgimento secondario, con il quale è concatenato, una f.e.m. indotta (E_2). Questa f.e.m., per le leggi dell'induzione elettromagnetica, è sinusoidale in ritardo di 90° rispetto al flusso e risulta quindi in opposizione di fase rispetto alla tensione applicata.

Contemporaneamente, una f.e.m. si genera per autoinduzione anche nel primario (E_1), in opposizione di fase rispetto alla tensione primaria U_1 (convenzione degli avvolgimenti).

La corrente assorbita in questa condizione per produrre il flusso assume il valore necessario per creare la f.e.m. di autoinduzione uguale e contraria alla tensione applicata (Figura 3.1 c).

Poiché il circuito magnetico si svolge totalmente nel ferro, il suo valore è relativamente piccolo.

Si osserva che il trasformatore si basa sui fenomeni dell'induzione elettromagnetica e che per indurre una f.e.m. negli avvolgimenti, essendo gli avvolgimenti fissi, è necessario che il flusso sia variabile (si veda anche quanto esposto al Capitolo 1).

Per questo motivo il trasformatore è una macchina che può funzionare solo in corrente alternata.

Il valore della f.e.m. indotta negli avvolgimenti dipende dalla frequenza e dal numero delle spire.

Il valore efficace della f.e.m. indotta (E) in una spira (sia del secondario che del primario) è data (in volt) dalla relazione:

$$E = 4,44 \cdot f \cdot \phi$$

dove:

f = frequenza in hertz;

ϕ = valore massimo del flusso in weber.

Questa formula si giustifica ricordando che il valore medio della f.e.m. indotta (E_m), dovuta a una variazione di flusso, è dato dalla relazione:

$$E_m = \frac{\Phi_2 - \Phi_1}{t}$$

dove:

Φ_2 e Φ_1 = valori massimo e minimo del flusso e t il tempo nel quale tale variazione avviene (Figura 3.2).

Nel caso di flusso alternato di valore massimo Φ , il flusso varia da $+\Phi$ a $-\Phi$ durante un mezzo periodo $T/2$, come si può rilevare dalla figura 3.2.

$$E = \frac{\Phi - (-\Phi)}{T/2} = \frac{2 \cdot \Phi}{T/2} = \frac{4 \cdot \Phi}{T}$$

Poiché $1/T = f$, è la frequenza, si può anche scrivere:

$$E_m = 4 \cdot f \cdot \Phi$$

Ma il rapporto fra il valore efficace e il valore medio di una grandezza alternata sinusoidale è di 1,11, per cui, come si voleva dimostrare, il valore efficace della f.e.m. indotta risulta allora:

$$E = 1,11 \cdot E_m = 1,11 \cdot 4 f \cdot \Phi = 4,44 \cdot \Phi \cdot f$$

Poiché le spire di ciascun avvolgimento sono in serie, le singole f.e.m. si sommano, cosicché agli estremi del primario la f.e.m. di autoinduzione (E_1) vale:

$$E_1 = N_1 \cdot E = 4,44 \cdot f \cdot \Phi \cdot N_1$$

mentre agli estremi del secondario vi è una tensione indotta pari a:

$$E_2 = N_2 \cdot E = 4,44 \cdot f \cdot \Phi \cdot N_2$$

Le tensioni indotte, primaria e secondaria sono dunque proporzionali ai rispettivi numeri di spire. È chiaro quindi che, variando il numero delle spire, si può ottenere al

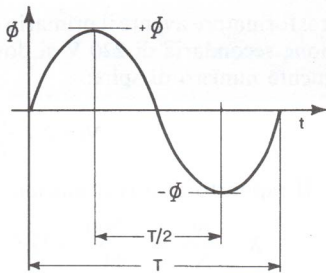


Figura 3.2 - Andamento del flusso concatenato e indicazioni per la deduzione dell'espressione della f.e.m. indotta.

secondario una tensione diversa dalla primaria. Potremo pertanto scrivere:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = K$$

come si può ottenere dividendo membro a membro le due espressioni di E_1 e E_2 sopra riportate.

Il rapporto (K) fra le f.e.m. indotte, che in pratica corrisponde al rapporto fra il numero di spire, viene definito rapporto di trasformazione.

Nel trasformatore ideale a vuoto, per le ipotesi fatte, la f.e.m. autoindotta nel primario è uguale e contraria alla tensione applicata U_1 e la tensione ai morsetti del secondario U_{20} è uguale alla tensione indotta nel secondario.

Si può quindi anche scrivere:

$$\frac{U_1}{U_{20}} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} = K$$

Si immagini, ad esempio, di avere una linea a 6 000 V e di inserire su di essa un trasformatore avente il primario costituito da 1 200 spire. Volendo ottenere una tensione secondaria di 220 V si dovrà realizzare l'avvolgimento secondario con il seguente numero di spire:

$$N_2 = N_1 \frac{E_2}{E_1} = 1\,200 \frac{220}{6\,000} = 44 \text{ spire}$$

Il rapporto di trasformazione del trasformatore sarà pertanto:

$$K = \frac{N_1}{N_2} = \frac{1\,200}{44} = 27,27; \quad \text{oppure:} \quad K = \frac{U_1}{U_{20}} = \frac{6\,000}{220} = 27,27$$

3.2 - Il trasformatore ideale a carico

Nel trasformatore ideale a carico, il prodotto tra tensione e corrente di un avvolgimento eguaglia quello delle stesse grandezze relative al secondo avvolgimento.

Si supponga ora di chiudere il secondario del trasformatore ideale su un circuito esterno rappresentato da una impedenza (ad esempio, induttiva).

La corrente secondaria assume un valore dato da $I_2 = U_{20} / Z$ essendo Z la impedenza del circuito esterno. Se quest'ultima è costituita da una resistenza R e da una reattanza X in serie essa è anche data da: $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$;

La corrente secondaria I_2 sarà sfasata rispetto alla tensione U_{20} di un angolo φ_2 ($\cos\varphi_2 = R / Z$). Questa corrente tende a smagnetizzare il nucleo e l'avvolgimento primario richiama allora dalla rete di alimentazione una corrente di reazione I_2' contraria alla corrente I_2 (Figura 3.3).

Il rapporto fra la corrente primaria di reazione e la corrente secondaria è tale che risulti uguale sui due avvolgimenti il valore della forza magnetomotrice:

$$N_1 I_2' = N_2 \cdot I_2$$

Questa espressione può anche essere scritta nel seguente modo:

$$\frac{I_2'}{I_2} = \frac{N_1}{N_2} = K$$

Si vede quindi che le correnti di reazione negli avvolgimenti stanno in ragione inversa del numero di spire.

Sul primario la corrente di reazione si compone vettorialmente con la corrente magnetizzante I_q

per dare luogo alla corrente primaria risultante I_1 .

Nel trasformatore ideale, dato il piccolo valore della corrente magnetizzante, si può ritenere:

$$\frac{I_1'}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{K}$$

Si può quindi ammettere che le correnti primaria e secondaria stiano loro nel rapporto inverso delle spire.

Tenendo conto di quanto detto al punto 3.1, per il trasformatore ideale si può scrivere:

$$K = \frac{U_1}{U_{20}} \approx -\frac{I_2}{I_1}$$

Da cui:

$$U_1 \cdot I_1 = U_{20} \cdot I_2$$

Questa ultima espressione conferma quanto già detto precedentemente. La potenza in gioco nei due avvolgimenti è quindi la stessa, come viene logico pensare anche in base al principio di conservazione dell'energia.

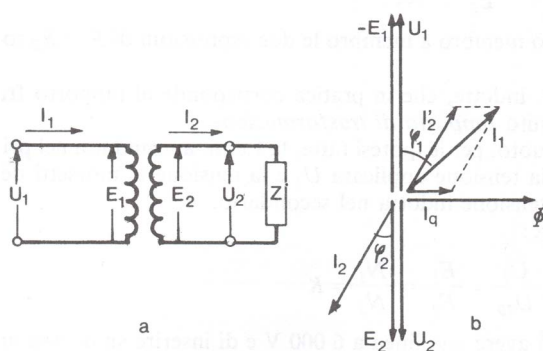


Figura 3.3 - Trasformatore monofase ideale funzionante a carico:
a - schema del circuito;
b - diagramma vettoriale.

3.3 - Il trasformatore reale

Nel trasformatore reale alimentato a tensione costante, la tensione a carico del secondario differisce da quella a vuoto a causa delle cadute di tensione interne.

Il trasformatore reale differisce dal trasformatore ideale principalmente per tre motivi:

1) Il concatenamento fra i due avvolgimenti non può essere perfetto, ossia non tutto il flusso magnetico prodotto dalla corrente primaria si concatena con l'avvolgimento secondario, e viceversa, non tutto il flusso magnetico prodotto dalla corrente secondaria si concatena con l'avvolgimento primario.

Ad ogni corrente deve quindi essere associata una piccola quantità di flusso disperso, per effetto del quale si può attribuire agli avvolgimenti una reattanza induttiva di dispersione X_1 e X_2 rispettivamente per il primario e per il secondario.

Quando il trasformatore è a carico, le reattanze percorse dalle rispettive correnti provocano cadute di tensione induttive.

2) Gli avvolgimenti non sono perfettamente conduttori e ad ognuno di essi deve essere attribuita una resistenza (R_1 e R_2). In essi si verificano perciò cadute di tensione ohmiche e perdite per effetto Joule.

3) Nel nucleo magnetico si manifestano, per effetto della magnetizzazione alternata, perdite per isteresi e per correnti parassite, chiamate globalmente perdite nel ferro. Per sopperire a queste perdite, la macchina assorbe perciò dalla linea una corrente a vuoto I_0 , formato da una componente in fase con la tensione I_f e da una componente sfasata di 90° I_q ; la corrente pertanto non è più sfasata di 90° in ritardo, ma di un angolo leggermente inferiore a 90° (Figura 3.4).

Tanto le perdite quanto i flussi dispersi sono generalmente modesti, ma i loro effetti non possono essere trascurati.

Per effetto delle resistenze ohmiche degli avvolgimenti primario e secondario, si hanno delle cadute di tensione ohmiche $R_1 \cdot I_1$ e $R_2 \cdot I_2$, in fase con le correnti.

Per effetto delle reattanze induttive di dispersione degli avvolgimenti, si hanno delle cadute di tensione induttive $X_1 \cdot I_1$ e $X_2 \cdot I_2$ in anticipo di 90° rispetto alle correnti. Ne consegue che la tensione secondaria a carico è diversa (generalmente minore) di quella a vuoto, di una quantità chiamata caduta di tensione o, più esattamente, variazione di tensione da vuoto a carico.

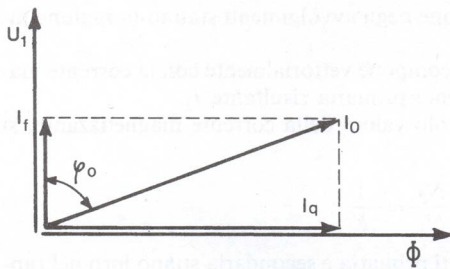


Figura 3.4 - Diagrammi vettoriali di un trasformatore monofase reale funzionante a vuoto:

I_q - componente magnetizzante;
 I_f - componente attiva;
 I_0 - corrente a vuoto.

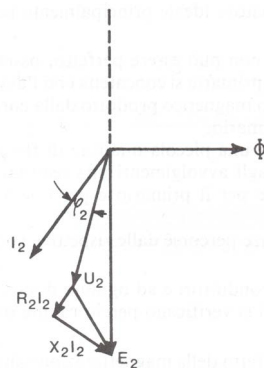


Figura 3.5 - Diagramma vettoriale delle grandezze secondarie del trasformatore reale funzionante a carico.

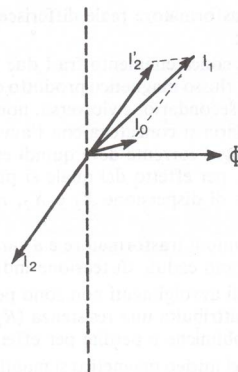


Figura 3.6 - Diagramma vettoriale delle correnti secondarie e primarie nel trasformatore reale a carico.

Infatti, chiudendo il circuito secondario su un'impedenza esterna, circola una corrente I_2 sfasata sulla tensione U_2 ai morsetti di un angolo φ_2 , essendo $\tan \varphi_2 = X/R$, dove X e R sono la reattanza e la resistenza del circuito esterno.

Per effetto del passaggio di I_2 nel secondario, si hanno una caduta di tensione ohmica $R_2 \cdot I_2$ in fase con la corrente stessa, e una caduta induttiva $X_2 \cdot I_2$ in anticipo di 90° sulla corrente.

La tensione ai morsetti U_2 differisce perciò in grandezza e fase dalla f.e.m. indotta E_2 per i due effetti sopra considerati (Figura 3.5).

La corrente secondaria I_2 richiama una corrente primaria di reazione I'_2 in opposizione di fase con la I_2 di valore tale che sia sempre $N_1 \cdot I'_2 = N_2 \cdot I_2$. Questa corrente si compone con la corrente a vuoto I_0 e dà luogo alla corrente primaria I_1 (Figura 3.6).

Per effetto della circolazione della corrente primaria I_1 si ha una caduta $R_1 \cdot I_1$, in fase con la corrente e una caduta $X_1 \cdot I_1$ sfasata di 90° in anticipo.

Perciò la tensione indotta E_1 sarà minore della tensione applicata U_1 della risultante delle suddette cadute di tensione e non sarà in fase con la stessa (Figura 3.7).

Dalla composizione di tutte le grandezze considerate si può tracciare il diagramma vettoriale completo del trasformatore reale (Figura 3.8).

Per l'avvolgimento secondario si può osservare che in forma vettoriale:

$$E_2 = U_2 + Z_2 \cdot I_2$$

nelle quali f.e.m. e tensioni sono intese in senso vettoriale, avendo posto:

$$Z_2 = \sqrt{R_2^2 + X_2^2}$$

Analogamente, per il primario si può scrivere:

$$U_1 = E_1 + Z_1 \cdot I_1$$

$$\text{in cui: } Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_1^2}$$

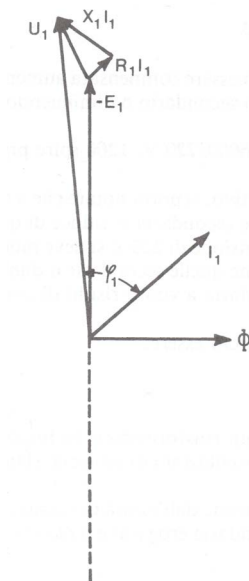


Figura 3.7 - Diagramma vettoriale della corrente e delle tensioni sul primario del trasformatore reale a carico.

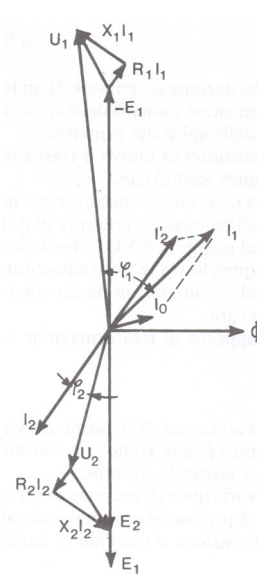


Figura 3.8 - Diagramma vettoriale completo di un trasformatore reale a carico.

Ricordando che è sempre $E_1 = K \cdot E_2$, si può sostituire nell'ultima relazione la seconda ottenendo:

$$U_1 = K \cdot E_2 + Z_1 \cdot I_1 = K \cdot U_2 + K \cdot Z_2 \cdot I_2 + Z_1 \cdot I_1$$

dalla quale si vede che il rapporto tra le tensioni ai morsetti non è uguale (come nel trasformatore ideale) al rapporto di trasformazione K .

3.4 - Variazione di tensione e sua compensazione

Si dice variazione di tensione la differenza algebrica tra i moduli delle tensioni a vuoto e a carico del secondario, senza considerare la differenza di fase tra le tensioni stesse.

La variazione di tensione può essere in parte compensata agendo sul numero delle spire degli avvolgimenti.

Indicando con U_2 la tensione secondaria a carico e con U_{20} la tensione secondaria a vuoto, la variazione di tensione u , tra vuoto e carico, risulta:

$$u = U_{20} - U_2$$

che può anche essere espressa in forma relativa percentuale:

$$u \% = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} \cdot 100$$

La variazione di tensione di un trasformatore può essere compensata aumentando leggermente il numero delle spire dell'avvolgimento secondario o diminuendo il numero delle spire del primario.

Si consideri di nuovo il trasformatore rapporto 6 000/220 V, 1 200 spire primarie e 44 spire secondarie.

Se la macchina viene allacciata ad un carico induttivo, si potrà notare che a tensione di alimentazione costante di 6 000 V tensione secondaria si riduce di qualche volt (ad esempio, 5 V). Volendo avere a carico la tensione di 220 V si deve modificare il rapporto tra le spire aumentando in proporzione quelle secondarie o diminuendo quelle primarie, in modo che la tensione secondaria a vuoto risulti di circa 5 V più elevata.

Il rapporto di trasformazione a vuoto dovrà perciò essere:

$$K = \frac{6000}{220 + 5}$$

La variazione di tensione da vuoto a carico di un trasformatore ha importanza in quanto è opportuno che, variando il carico, le oscillazioni di tensione siano, per quanto possibile, ridotte.

La variazione di tensione di un trasformatore dipende dall'entità del carico secondario (è pressoché proporzionale alla corrente secondaria erogata) e dallo sfasamento fra tensione e corrente di carico.

3.5 - Gli schemi equivalenti

Il trasformatore può essere rappresentato, ai fini del suo comportamento in rete, mediante circuiti equivalenti.

Per studiare il funzionamento del trasformatore è utile rappresentare la macchina con un suo circuito equivalente. Poiché il circuito equivalente è una rappresentazione convenzionale, esistono in pratica diverse possibili varianti. Nella sua forma più completa esso può essere disegnato come in Figura 3.9.

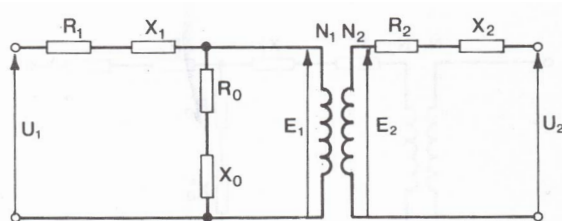


Figura 3.9 - Schema equivalente completo del trasformatore reale.

Si consideri un trasformatore ideale con N_1 e N_2 spire connesso come in figura alle resistenze R_0 , R_1 e R_2 ed alle reattanze X_0 , X_1 e X_2 .

La resistenza R_0 rappresenta gli effetti dissipativi dovuti alle perdite a vuoto, R_1 e R_2 quelli dovuti alle perdite causate dalla circolazione delle correnti primaria e secondaria (valori di poco superiori ai valori delle resistenze ohmiche).

Analogamente, la reattanza X_0 è proporzionata per rappresentare l'assorbimento della corrente magnetizzante, mentre le X_1 e le X_2 rappresentano le reattanze induttive corrispondenti alle dispersioni di flusso primario e secondario.

Negli schemi equivalenti si fa generalmente riferimento alle tensioni e alle correnti riportate ad un lato del trasformatore, ad esempio al primario; il circuito può allora essere rappresentato come in Figura 3.10 (lo schema viene detto a T per la sua somiglianza grafica con la lettera dell'alfabeto).

La resistenza e reattanza secondarie vengono riportate al primario con le relazioni:

$$R'_2 = R_2 \cdot K_2 \quad X'_2 = X_2 \cdot K_2$$

dove, come al solito:

K = rapporto di trasformazione.

Analogamente, la resistenza e la reattanza primarie possono essere riferite al secondario con le relazioni:

$$R'_1 = \frac{R_1}{K^2} \quad X'_1 = \frac{X_1}{K^2}$$

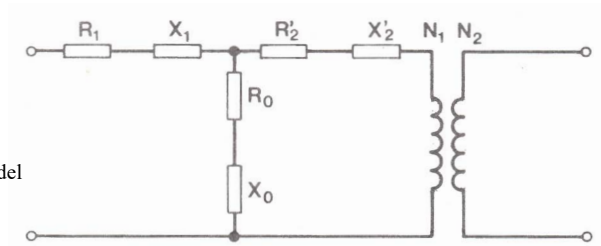


Figura 3.10 - Schema equivalente del trasformatore reale con i parametri riportati al primario.

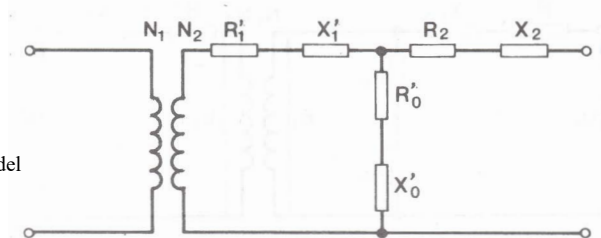


Figura 3.11 - Schema equivalente del trasformatore reale con i parametri riportati al secondario.

Si ottiene così lo schema equivalente di Figura 3.11 (va tenuto presente che in questo caso anche R_0 ed X_0 devono ovviamente essere riferite al lato secondario).

Lo schema equivalente può essere ulteriormente semplificato come rappresentato nella Figura 3.12. Nella resistenza R sono sommate le resistenze R_1 e R_2 , mentre nelle reattanze X sono sommate le reattanze X_1 e X_2 .

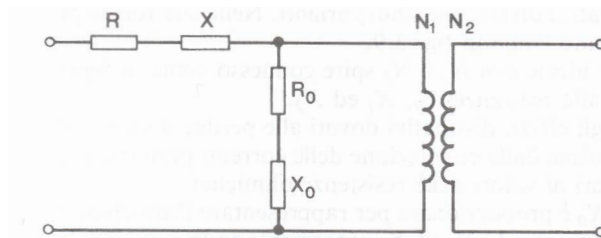


Figura 3.12 - Schema equivalente semplificato del trasformatore reale.

Questo schema, non rispecchia esattamente il funzionamento del trasformatore. Esso è però accettabile per la maggior parte dei problemi che interessano in quanto i valori dei parametri in derivazione sono molto elevati rispetto a quelli in serie (corrente a vuoto molto piccola rispetto a quella di carico).

Per il calcolo delle cadute di tensione e delle correnti di guasto è addirittura possibile trascurare completamente la presenza e gli effetti della corrente a vuoto; in questi casi la rappresentazione del trasformatore si riduce ad una semplice impedenza in serie (Z_{cc}) agli altri elementi della rete (Figura 3.13).

L'impedenza Z_{cc} è detta di corto circuito per le ragioni illustrate al punto seguente.