

RADIO

i trasformatori

**teoria - progetto - pratica costruttiva - prove
e misure - autotrasformatori - minimo costo**



CMR

21

Dr. Ing. E. Baldoni

Editrice "RADIO INDUSTRIA,, Viale Beatrice d'Este, 24

MILANO 322

Dott. Ing. Enrico Baldoni

I TRASFORMATORI TIPO RADIO E SIMILI

**teoria generale
calcolo teorico
progettazione
pratica costruttiva
prove e misure
autotrasformatori
il problema
del minimo costo**

editrice "RADIO INDUSTRIA,,

MILANO (322)

Viale Beatrice d'Este, 24 - tel. 55.41.37 - 58.98.85

Finito di stampare il 5 - 2 - 1955 presso la
"Tipografia Industriale Milanese,, della "RADIO INDUSTRIA,, - MILANO - Via Salasco, 20

Parte I **TEORIA**

- CAP. I - NOZIONI DI ELETTRTECNICA
- CAP. II - TEORIA DEL FUNZIONAMENTO
- CAP. III - PERDITE NELLA TRASFORMAZIONE
- CAP. IV - ELEMENTI BASE DEL CALCOLO

Parte II **CALCOLO**

- CAP. V - DETERMINAZIONE DELLA POTENZA
- CAP. VI - RELAZIONE FRA POTENZA E DIMENSIONI
- CAP. VII - DIMENSIONAMENTO GEOMETRICO
- CAP. VIII - L'AVVOLGIMENTO PRIMARIO
- CAP. IX - LA CADUTA DI TENSIONE
- CAP. X - RISCALDAMENTO E RENDIMENTO

Parte III **PRATICA**

- CAP. XI - PROGETTAZIONE PRATICA
- CAP. XII - CONSIGLI PRATICI AI PROGETTISTI
- CAP. XIII - ESECUZIONE MATERIALE

Parte IV **COLLAUDO**

- CAP. XIV - PROVE DI LABORATORIO
- CAP. XV - COLLAUDO DI PRODUZIONE

Parte V **VARIE**

- CAP. XVI - AUTOTRASFORMATORI
- CAP. XVII - TRASFORMATORI SPECIALI
- Appendice - CALCOLI DI MINIMO COSTO

UNITÀ DI MISURE NORMALMENTE USATE
NELLE FORMULE DEL LIBRO

Grandezza	Simbolo	Unità di misura
Tensione elettrica	V	volt
Forza elettromotrice	E	volt
Corrente elettrica	I	ampère
Corrente elettrica specifica	J	amp./mm ²
Potenza reale	W	watt
Potenza reattiva	VAR	var
Potenza apparente	VA	volt-ampère
Resistenza elettrica	R	ohm
Resistività o resist. specifica	ρ	ohm/m/mm ²
Frequenza	f	hertz
Sfasamento	φ	gradi sessages.
Flusso magnetico	Φ	linee
Induzione magnetica	B	linee/cm ²
Lunghezza	L	cm *
Superficie (circuiti magnetici)	s	cm ²
Superficie (sezione conduttori)	S	mm ² **
Volume	Vl, vl	cm ³
Peso	P	grammi

Nota generale:

Di tutte le grandezze alternative sinusoidali si intende sempre considerato il valore efficace, eccezion fatta per l'induzione magnetica di cui è sempre considerato il valore massimo.

* *In qualche formula per comodità di calcolo, è usato come unità di misura il metro. Questa particolare scelta è però chiaramente segnalata di volta in volta.*

** *Talora, per omogeneità, anche il cm² (vedi osservazione precedente).*

ELENCO DEI SIMBOLI USATI NEL PRESENTE LIBRO E LORO SIGNIFICATO

(in ordine alfabetico)

A	larghezza finestra lamierino	S_{cu}	sez. netta totale di uno o più avvolgimenti
Ar	area in genere	S_t	superficie netta finestra
B	altezza finestra lamierino	T	periodo
B	induzione magnetica	V	tensione elettrica
C	costante in senso generico	V_p	tensione primaria
C_t	costo totale di un trasf.	V_s	tensione secondaria
C_{te}	costo unitario del ferro	V/N	volt per spira
C_{cu}	costo unitario del rame	VA	potenza elettrica appar.
E	forza elettromotrice	VA'	pot. virtuale (geometrica)
E_e	f.m.e unitaria (in 1 spira)	VA_e	pot. app. unit. (in 1 spira)
f	frequenza	VA_p	pot. apparente primaria
H	spessore pacco lamiere	VA_s	pot. apparente secondaria
I	corrente elettrica	VAR	pot. elettrica reattiva
I_m	corrente magnetizzante	VAR_m	pot. reattiva di magnetizz.
I_p	corrente primaria	VAR_s	pot. reatt. secondaria
I_s	corrente secondaria	VI	volume in genere
I_v	corrente a vuoto	vl	volume unit. (di 1 spira)
J	corrente specifica	W	pot. elettrica reale utile
k	coefficiente generico	$W^{\cdot d}$	pot. elettr. reale perduta
k_t	coeff. riempim. finestra	W_p	potenza reale primaria
k_{te}	coeff. stipam. lamierini	W_s	potenza reale secondaria
k_p	coeff. ingombro del primario (per J cost.)	$W^{\cdot te}$	potenza reale perduta nel ferro
k'_p	coeff. ingombro del primario (per W_p cost.)	W_p	potenza reale perduta nel rame primario
L	lunghezza in genere	W_s	potenza reale perduta nel rame secondario
L	larghezza del nucleo	ΔV	cad. di tensione assoluta
L_m	lunghezza spira media	$\Delta V \%$	cad. di tensione percent.
N	numero di spire	$\Delta V' \%$	diff. teorica percentuale tra f.e.m. e tens. a carico
N/V	spire per volt	φ	angolo di sfasam. fra tens. e corrente nel carico
P	peso in genere	φ'	angolo di sfasam. proprio del trasformatore
P_{cu}	peso del rame	Φ	flusso magnetico
P_{te}	peso del ferro	\emptyset	diametro condutt. (netto)
R	resistenza elettrica	Σ	simbolo di sommatoria
s_{te}	sezione netta circuito magnetico		
s'_{te}	sezione lorda circuito magnetico		
S	sezione netta conduttore		

Questo libro si propone di effettuare una saldatura o, come ancora s'usa dire, di colmare una certa lacuna nella letteratura sui trasformatori: lacuna ancora esistente fra le numerosissime pubblicazioni sul calcolo pratico dei trasformatori di alimentazione tipo radio e simili da una parte e le maggiori autorevoli e ponderose trattazioni sui trasformatori industriali dall'altra.

Le prime hanno, come si è detto, un carattere esclusivamente pratico e si basano soprattutto su tabelle, nomogrammi e formule empiriche senza far cenno dello sviluppo teorico dei risultati esposti; le seconde, pur svolgendo ampiamente la parte teorica, sono però poco adatte al calcolo dei trasformatori di minima potenza e si presentano, all'uso corrente, meno agevoli.

Di fatto, la grande differenza nelle dimensioni, oltre a creare una notevole diversità nella pratica costruttiva, porta anche su un altro piano alcuni concetti che pure sono di generale applicazione: taluni elementi che in un caso risultano trascurabili non lo sono affatto nell'altro e viceversa; gli ordini di grandezza di alcuni dei principali elementi del calcolo sono in qualche caso così distanti che le considerazioni accettate per certe scale di valori debbono essere rivedute per altre.

Sono convinto che un manuale che si tenga in una posizione intermedia tra i due tipi di pubblicazioni accennati, completando con considerazioni teoriche la parte esclusivamente pratica già da molti ampiamente trattata, possa essere ben accetto da parte dei costruttori, grandi e piccoli, di trasformatori e possa riuscire di giovamento anche a chi, pur non costruendo personalmente, ha a che fare con essi e desidera conoscerne con una certa completezza i problemi relativi.

Il carattere di questo libro è dunque teorico pratico: la teoria classica

è accennata sommariamente nei suoi punti essenziali (1); mentre talune nozioni pratiche di carattere elementare si presumono già in possesso di chiunque si interessi dell'argomento. Nella successione delle varie parti ho cercato, per quanto possibile, di renderle indipendenti fra loro avvicinandole più al carattere di note particolari che non a quello di capitoli fra loro conseguenti: e ciò perchè ciascuno possa, ove occorra, consultare una parte senza che ciò imponga la necessità della perfetta conoscenza delle precedenti.

Particolare cura è stata posta nell'unificazione delle notazioni e delle unità di misura, ricordando per esperienza che la pratica applicazione di una formula è strettamente legata alla chiara specificazione delle unità di misura dei suoi fattori e del risultato.

Non dimenticando che, in ultima analisi, ciò che si vuole ottenere sono delle norme e dei dati per la effettiva costruzione, ho abbondato, dove necessario, negli esempi pratici in applicazione delle formule teoriche; nè ho trascurato una certa critica dei varii orientamenti nel progetto di un trasformatore.

Una sufficiente estensione ho dato al capitolo relativo agli autotrasformatori, causa la quasi totale assenza di pubblicazioni esaurienti sviluppate sull'argomento.

In appendice, per il calcolo del minimo costo, ho creduto opportuno di riportare per sommi capi il procedimento di due autori stranieri, di recente pubblicazione, e veramente lodevole per la sua accuratezza e generalità: non ho comunque trascurato di aggiungervi le mie personali osservazioni e chiarimenti specie per quanto riguarda il valore delle formule nell'applicazione ai trasformatori radio che sono fra i più piccoli della famiglia ed hanno caratteristiche un po' particolari.

Poichè non pretendo di aver fatto opera perfetta, sarò grato a tutti coloro che vorranno farmi pervenire le loro osservazioni; per intanto mi auguro che questa fatica possa riuscire di aiuto soprattutto a coloro (e sono molti) che, avendo affrontato i problemi costruttivi prima di quelli teorici, desiderano ora crearsi quel minimo bagaglio di cognizioni teoriche che sole possono permettere il perfezionamento tecnico ed economico del prodotto e che la pratica delle costruzioni da sola non può loro fornire.

L'AUTORE

Milano, Novembre 1954.

(1) Si potrà osservare che talvolta la parte teorica è ridotta al minimo o trascurata mentre in altri punti è assai sviluppata. Ciò è stato fatto di proposito: le nozioni teoriche appena accennate riguardano la parte generale ampiamente esposta in altre pubblicazioni; sviluppate a fondo sono invece le teorie originali, non trattate o sommariamente accennate in altri libri. Questo anche per il carattere di questo manuale che non vuol essere un completo trattato sull'argomento ma, come già dissi, un completamento di quelli già esistenti.

Parte I

TEORIA

NOZIONI DI ELETTROTECNICA

Qualche richiamo sulle grandezze alternative.

Prima di iniziare la trattazione vera e propria dei trasformatori occorre fare qualche richiamo o dare qualche nozione sulle grandezze alternative e loro relazioni, dato che la conoscenza, sia pure ridotta agli elementi base, della teoria delle grandezze alternative è essenziale per la comprensione del funzionamento dei trasformatori.

Grandezza alternativa. E' una entità il cui valore non è costante, ma varia nel tempo in un modo qualsiasi, ripetendo il ciclo di variazione a intervalli di tempo eguali.

Periodo di una grandezza alternativa. E' appunto il tempo, espresso in secondi, intercorrente fra l'inizio di un ciclo di variazione e l'inizio di quello immediatamente successivo. E' comunemente indicato con T .

Frequenza di una grandezza alternativa. E' il numero di cicli di variazione contenuti nel tempo di un secondo. Si misura quindi in periodi

al secondo e si indica correntemente con la lettera f .

Grandezze alternative sinusoidali. Sono un caso particolare delle g. a. quando la legge di variazione sia sinusoidale. Tutte le correnti alternate a frequenza industriale (16-100 periodi al secondo) sono grandezze sinusoidali o vengono almeno conside-

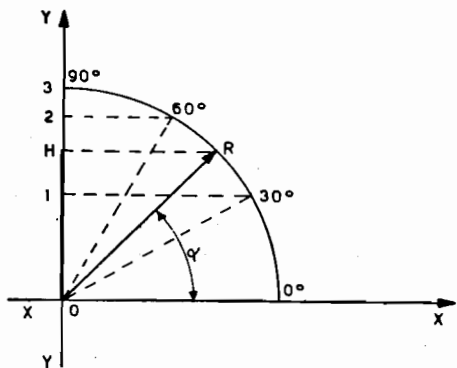


Fig. 1 - Rappresentazione vettoriale di una grandezza alternativa sinusoidale.

rate tali agli effetti del calcolo. Ci occuperemo pertanto solo di g.a.s.

Valore massimo di una grandezza alternativa sinusoidale. E' il più grande dei valori assunti dalla g.a.s. durante il ciclo di variazione.

Rappresentazione geometrica di una g.a.s. Per farci una idea di quello che significa una grandezza alternativa sinusoidale ricorriamo al seguente metodo: immaginiamo (fig. 1) un segmento OR , la cui lunghezza sia

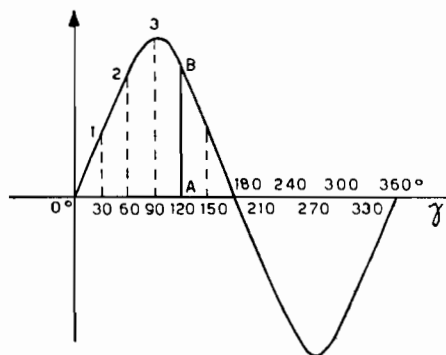


Fig. 2 - Rappresentazione grafica di una sinusoide.

proporzionale, in una scala qualsiasi, al valore massimo della g.a.s. da rappresentare. Si supponga che questo segmento ruoti, con velocità costante, intorno al suo estremo O . La sua velocità di rotazione sia tale che occorra un tempo eguale al periodo della g.a.s. perchè esso compia un giro completo.

Misuriamo gli spostamenti con l'angolo α che in una certa posizione esso forma con la retta XX sulla quale giaceva all'inizio del movimento. Il valore istantaneo che la g.a.s. as-

sume in quel momento è misurato, nella stessa scala assunta per il segmento OR , dal segmento OH , ottenuto abbassando dall'estremo R la perpendicolare sulla retta YY .

Segnamo ora, su una retta qualsiasi γ (fig. 2) un segmento proporzionale a 360° ; suddividiamolo quindi in un certo numero di parti eguali, ad esempio 12: ognuna di queste parti rappresenterà quindi un angolo di $360 : 12 = 30^\circ$. Corrispondentemente agli angoli progressivi così fissati ($0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$, ecc.) determiniamo, servendoci della rappresentazione di fig. 1, i successivi valori 1, 2, 3, ecc. del segmento OH precedentemente citato. Riportiamo la lunghezza di questi segmenti, in corrispondenza agli angoli relativi, a partire dall'asse γ e perpendicolarmente ad esso. Uniamo ora gli estremi di tali segmenti con una linea continua: questa linea è una sinusoide.

Il valore che la g.a.s. assume in un istante qualsiasi, corrispondente ad un generico angolo β (fig. 2), è quindi determinato dalla lunghezza dell'intercetta AB sulla perpendicolare innalzata dall'asse γ in corrispondenza di tale angolo. L'esame della stessa fig. 2 ci conduce alle seguenti considerazioni:

1°) Il ciclo di variazione (o alternanza) di una g.a.s. è composto di due mezze alternanze, eguali fra loro ma di senso opposto.

2°) Conseguentemente, in un periodo la g.a.s. assume due volte il suo valore massimo (uno in senso positivo ed uno in senso negativo) e passa due volte per il valore zero. Il tempo corrispondente ad una mezza alternanza è di mezzo periodo.

Valore efficace di una g.a.s. Quale sarà, dei tanti valori assunti nel tempo da una g.a.s., quello da considerare per individuarne la grandezza? Dato che la legge di variazione è stabilita e fissa, sarà sufficiente prenderne uno qualsiasi riferito ad un angolo opportunamente scelto; in particolare il valore massimo apparirebbe come il più adatto. Nelle applicazioni pratiche riesce però più conveniente scegliere un valore minore di questo, e precisamente $0,708 V_{\max}$, denominato *valore efficace* (1).

Cercherò di chiarire in modo semplice perchè si sia scelto proprio questo valore: tutti sanno che in un circuito di resistenza R percorso da una corrente costante I si dissipa una potenza elettrica, secondo la legge di Joule, pari a RI^2 . Orbene, se la corrente non è costante, ma è una g.a. qualsiasi, la legge di Joule si verifica ancora esattamente se si pone per I il valore efficace di essa.

In altre parole, una g.a., agli effetti generativi o dissipativi di potenza (o in qualunque altra relazione in cui essa compaia elevata al quadrato), può essere considerata come se fosse una grandezza costante di valore eguale a quello efficace.

In tutte le considerazioni che seguiranno, quando noi parleremo di valore di una g.a.s. intenderemo sempre riferirci, anche se non specificatamente indicato, al suo valore efficace.

(1) Si definisce valore efficace di una g.a. la radice della media dei quadrati dei valori istantanei assunti da essa in un semiperiodo. Per le g.a.s. il calcolo ci porta appunto al risultato: $V_{\text{eff}}/V_{\max} = 0,708$ come indicato. Per g.a. diverse dalla sinusoidale il rapporto è naturalmente diverso.

Angolo di sfasamento. Capita molto spesso, nelle applicazioni, di dover mettere in relazione fra loro due o più grandezze alternative sinusoidali. Queste grandezze, oltre ad essere di diversa natura (correnti, tensioni, potenze) potranno avere naturalmente diverso valore e diverso periodo. Noi non considereremo però mai il caso in cui il periodo sia diverso, dato che nelle applicazioni che ci interessano avremo sempre a che fare con grandezze a periodo, e cioè frequenza, eguali.

Dire però che due g.a.s. hanno periodo eguale non vuol necessariamente dire che esse assumano contemporaneamente il loro valore massimo positivo: in fig. 3, ad esempio, sono rappresentate due g.a.s. di eguale periodo, ma i cui valori massimi positivi si verificano a distanza di un angolo φ fra di essi; tale angolo si chiama angolo di sfasamento tra le

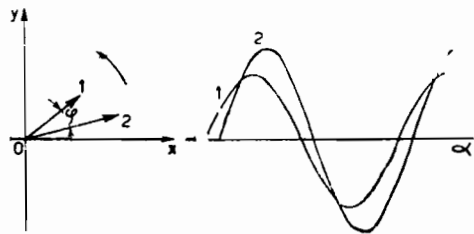


Fig. 3 - Relazioni di fase in rappresentazione vettoriale e grafica.

due g.a.s. La grandezza 1, che raggiunge prima della 2 il valore massimo positivo si dice *sfasata in anticipo* sulla 2; viceversa la 2 si dirà *sfasata in ritardo dell'angolo φ* sulla 1.

I relativi segmenti ruotanti $O1$ e $O2$ che hanno generato le due relative si-

nusoidi, sono naturalmente anch'essi spostati dell'angolo φ ; nella loro rotazione, eguale essendo per ambedue il periodo, e cioè la velocità con cui ruotano, essi conserveranno la loro

reciproca posizione in qualunque momento. Nel caso particolare che l'angolo φ sia 0° le due g.a. si dicono *in fase*: se φ è eguale a 90° , *in quadratura*, se infine è 180° , *in controfase*.

Potenza in un circuito elettrico.

Un circuito elettrico, qualunque esso sia, ai cui capi sia applicata una tensione V e in cui circoli una corrente I , è sede di una potenza di valore VI ; questa grandezza si chiama *potenza apparente* del circuito. Se tensione e corrente non sono in fase, ma sono tra loro sfasate di un angolo φ si possono considerare anche due altre espressioni:

$W = VI \cos \varphi$ *potenza reale* del circuito;

$VAR = VI \sin \varphi$ *potenza reattiva* del circuito (2).

La relazione fra le tre potenze ora elencate è la seguente:

$$VAR^2 + W^2 = VI^2 \quad (I-1)$$

E' molto importante comprendere bene quale sia la vera essenza di queste espressioni e quali i caratteri distintivi di queste tre potenze: cer-

cherò qui appresso di spiegarlo il meglio possibile.

Potenza apparente. Quando in un circuito elettrico circola una corrente I , se la resistenza del circuito è R , la potenza dissipata è RI^2 . Come si vede, in questa espressione la g.a.s. è una sola, I , e non può quindi essere considerato alcun angolo di sfasamento con la tensione che ha prodotto questa corrente: il fenomeno dissipativo prescinde quindi dalle relazioni angolari fra tensione e corrente e dipende solo dal valore di I . Anche nell'espressione VI della potenza apparente non si tien conto dell'angolo di fase fra tensione e corrente, così come nell'espressione RI^2 : pertanto la potenza apparente è quella a cui dovremo fare riferimento quando si tratterà di fenomeni dissipativi.

Potenza reale. Come indica il nome, essa rappresenta la vera potenza, capace di essere trasformata in lavoro utile: essa è tanto più vicina in valore alla potenza apparente quanto più piccolo è l'angolo di sfasamento tra tensione e corrente.

(2) $\cos \varphi$ e $\sin \varphi$ sono rispettivamente le funzioni coseno e seno dell'angolo φ . Per chi non ha nozioni di trigonometria sarebbe troppo lungo spiegarne il significato: del resto qualunque trattato elementare di trigonometria lo insegna. Se il lettore non vuol riferirvisi, si accontenti di sapere che $\cos \varphi$ varia tra 1 e 0 quando φ varia tra 0° e 90° mentre corrispondentemente $\sin \varphi$ varia tra 0 e 1.

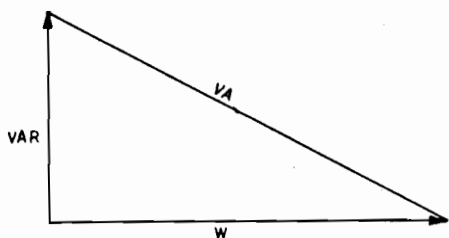


Fig. 4 - Composizione vettoriale della potenza reale con quella reattiva.

Potenza reattiva. Il nome di potenza dato a questa grandezza è giustificato solo dal fatto che in essa, come nelle altre due, compare il prodotto tensione-corrente; nel vero senso della parola non lo meriterebbe, dato che da essa non è possibile ricavare lavoro utile. Con un paragone piuttosto curioso, sarebbe come voler far correre un vagone sulle rotaie spingendolo esattamente di fianco. La potenza reattiva è nulla quando corrente e tensione si trovano in fase.

Rappresentazione geometrica delle potenze alternative. Poichè esse derivano da un prodotto di g.a.s., anche le potenze sono g.a.s. di frequenza eguale a quella comune della tensione e della corrente che le generano: saranno quindi rappresentabili nello stesso modo con cui abbiamo rappresentato una g.a.s. qualsiasi. Quanto agli sfasamenti, potenza reale e potenza reattiva di uno stesso circuito vanno rappresentate con segmenti spostati fra loro di 90° (in quadratura): la potenza apparente risulta allora rappresentata dalla diagonale del rettangolo costruito prendendo gli altri due come lati (fig. 4) il che giustifica la relazione (I-1) già precedentemente esposta.

Unità di misura delle potenze:

Le potenze apparenti si misurano in VA (volt-ampère).

Le potenze reali si misurano in W (watt).

Le potenze reattive si misurano in VAR (Var o volt-ampère reattivi).

Esempio esplicativo. Un esempio chiarirà meglio le idee su questo argomento, che è veramente basilare per gli argomenti che seguiranno. Si supponga che un certo circuito utilizzatore assorba, non importa come, $100 W$ e $50 VAR$. Questo circuito (fig. 5) sia alimentato, a mezzo di una linea di resistenza R , da un alternatore, mosso a sua volta da una turbina idraulica. Si supponga che la turbina abbia rendimento 1 e che le perdite nel circuito alternatore-linea siano esclusivamente quelle dovute alla resistenza dei conduttori, segnata nella fig. 5. Proponiamoci di vedere quale potenza assorba la turbina dalla condotta che la alimenta. Se non esistesse nè la linea nè l'alternatore,

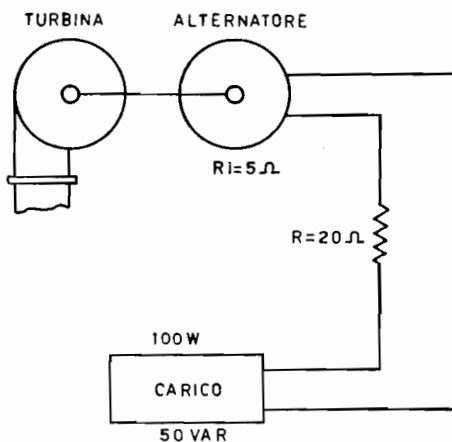


Fig. 5 - Circuito generatore-carico con linea di collegamento resistiva.

questa potenza sarebbe senz'altro di 100 \mathcal{W} (abbiamo supposto 1 il rendimento della turbina) poichè i 50 VAR non corrispondono, abbiamo già detto, ad alcuna potenza effettiva. Ma la presenza della linea e dell'alternatore ci impongono di calcolarne le perdite, che vanno sommate alla potenza reale assorbita dal circuito utilizzatore: e queste perdite saranno evidentemente quelle dovute all'effetto Joule nei conduttori, dato che abbiamo supposto non esserne altre. Dovremo quindi innanzi tutto calcolare la corrente che in questi conduttori circola.

Poichè abbiamo visto che ai fenomeni dissipativi va associata la potenza apparente, calcoliamo quest'ultima. Essa è, secondo la (I-1):

$$\begin{aligned} VI &= \sqrt{W^2 + VAR^2} = \\ &= \sqrt{100^2 + 50^2} = 112 \text{ VA.} \end{aligned}$$

Se, ad esempio, la tensione di linea all'arrivo è di 100 V , la corrente nei fili sarà di $112/100 = 1.12 \text{ A}$ e, dato che la resistenza complessiva dei conduttori dell'alternatore e della linea è di 25 ohm, la perdita di potenza (reale) sarà:

$$1.12^2 \times 25 = 1.25 \times 25 = 31,25 \mathcal{W}.$$

Come si vede, della potenza reattiva assorbita non abbiamo fatto alcun

calcolo, salvo che nel computo della corrente di linea e relativa perdita Joule. Se il circuito non avesse richiesto questa potenza reattiva, la corrente di linea sarebbe stata soltanto di 1 A , la perdita Joule di 25 \mathcal{W} ; la potenza assorbita dalla turbina (nel primo caso di $100 + 31,25 \mathcal{W} = 131,25 \mathcal{W}$) sarebbe stata soltanto di 125 \mathcal{W} con un risparmio di 6,25 \mathcal{W} il che è come dire ca. il 5 %

Come si è visto, la potenza reattiva non è stata prelevata nè dall'acqua della condotta nè restituita dall'utilizzatore sotto forma di energia: questa potenza, o meglio la corrente ad essa relativa, circola nel circuito chiuso generatore-linea-carico provocando naturalmente delle perdite che potrebbero essere evitate se si impedisse a questa corrente di circolare (3).

(3) Le correnti reattive sono deleterie specie per il rendimento delle linee di trasmissione, e ben lo sanno i fornitori di energia elettrica che debbono sopportare delle perdite di energia per una potenza che non lo è e che essi non forniscono. Un sistema per ovviare all'inconveniente è quello di annullare le correnti reattive provocando, all'arrivo della linea, l'assorbimento artificioso di altre correnti eguali ma di senso opposto. Per i piccoli impianti, ad esempio, condensatori di opportuna capacità derivati ai capi del carico, generalmente induttivo, permettono di effettuare questa compensazione impedendo che la linea venga percorsa da altre correnti che non siano quelle corrispondenti alla potenza reale. E' il problema ben noto del rifasamento.

TEORIA DEL FUNZIONAMENTO

Funzionamento a vuoto di un trasformatore.

Il trasformatore è una macchina elettrica statica (cioè senza parti in movimento) capace di attuare una variazione nei valori dei due fattori della potenza elettrica (tensione e corrente) senza alterare notevolmente il loro prodotto.

L'effetto suddetto è ottenuto creando, con la stessa energia da trasformare, un campo magnetico alternativo e concatenando con questo un numero di spire più o meno grande a seconda della tensione desiderata. In queste spire si viene a generare per induzione una f.e.m. Più precisamente il trasformatore assume in pratica l'aspetto schematicamente rappresentato in fig. 6: *CM* è il circuito magnetico sul quale sono avvolte le due spirali: primaria (lato rete di alimentazione) di N_p spire e secondaria (lato del carico) di spire N_s . Applicando una opportuna tensione all'avvolgimento primario (con l'avvolgimento secondario non caricato) si ha in esso la circolazione di una corrente (cor-

rente a vuoto, I_v) di cui una parte (corrente magnetizzante, I_m) percorrendo le N_p spire provoca una forza magnetomotrice proporzionale a $N_p \cdot I_m$. Questa, a sua volta, crea e

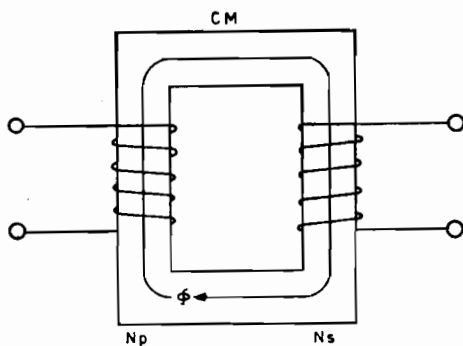


Fig. 6 - Rappresentazione elementare di un trasformatore.

mantiene un flusso magnetico alternativo Φ , della stessa frequenza della corrente magnetizzante e con essa in fase. Nelle N_s spire secondarie

attraversate dal flusso Φ si genererà allora, per induzione, una f.e.m. che risulta proporzionale al valore del flusso, alla sua frequenza e al numero delle spire secondarie secondo la relazione:

$$E = 4,44 \cdot \Phi \cdot f \cdot N_s \cdot 10^{-8} \text{ volt (I-2)}$$

formula base per il calcolo dei trasformatori.

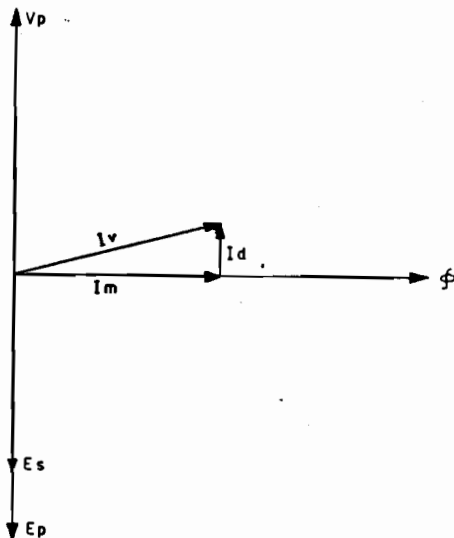


Fig. 7 - Diagramma vettoriale di un trasformatore nel funzionamento a vuoto.

In essa Φ rappresenta il valore massimo del flusso (non si dimentichi che il flusso in un trasformatore è una g.a.) espresso in linee, f la frequenza in Hz e N_s il numero delle spire secondarie. Quanto alla fase, risultando questa f.e.m. per induzione dal flusso Φ , essa è in quadratura con quest'ultimo e di conseguenza anche con la corrente magnetizzante.

Il funzionamento a vuoto del trasformatore, così tracciato in brevi parole, può essere reso più compres-

sibile graficamente, per chi abbia le indispensabili nozioni necessarie, mediante la rappresentazione vettoriale riportata nella fig. 7. La tensione primaria V_p applicata all'avvolgimento primario provoca la circolazione della corrente magnetizzante I_m che, essendo una corrente reattiva, risulta sfasata in ritardo di 90° rispetto alla stessa V_p : la I_m crea il flusso Φ in fase con essa: la circolazione di Φ nel circuito magnetico ed il relativo concatenamento con gli avvolgimenti primario e secondario dà luogo infine alle forze elettromotrici E_p ed E_s nei rispettivi avvolgimenti. Come si vede, E_p risulta in opposizione di fase con V_p e di eguale valore (se si trascura la caduta di tensione nel primario, sempre piccola nel funzionamento a vuoto): viene pertanto considerata come una forza contro-elettromotrice rispetto alla tensione applicata V_p .

E_s risulta essa pure in opposizione di fase con V_p , ossia il fenomeno della trasformazione provoca un rovesciamento di fase tra la f.e.m. secondaria e la tensione primaria: ciò non ha alcuna importanza nelle applicazioni dato che, nel caso che occorra conservare le relazioni di fase, è sufficiente invertire le connessioni dei capi dell'avvolgimento secondario.

Nella fig. 7 è pure rappresentata la corrente I_d , corrispondente alle perdite nel ferro (di cui parleremo più appresso): questa corrente, corrispondendo ad una potenza reale, è in fase con la tensione primaria e la sua composizione con la corrente magnetizzante dà luogo alla corrente a vuoto I_v che, per la piccolezza della I_d , risulta ancora quasi in quadratura con la tensione applicata.

Funzionamento a carico.

Visto che cosa avviene quando ad un trasformatore sia applicata una tensione senza assorbire potenza dal secondario, esaminiamo ora i fenomeni elettrici che intervengono quando si applichi ad esso un carico, ovverossia quando si chieda al secondario di erogare una certa corrente.

Il procedimento logico da seguirsi è quello di risalire da valle a monte, ossia di procedere dal carico verso l'alimentazione e non viceversa: è infatti da tenersi ben presente, ora e in appresso, che, una volta determinato il valore della tensione applicata ad esso, è il carico che determina le condizioni di funzionamento del trasformatore.

Quello che avviene quando al secondario del trasformatore si richiede una certa corrente può essere, in maniera grossolana ma semplice, così spiegato: la corrente che ora circola nel carico percorre anche, naturalmente, l'avvolgimento secondario e crea pertanto a sua volta un flusso magnetico in fase con essa. Questo flusso, componendosi con quello già esistente nel funzionamento a vuoto, turba l'equilibrio delle forze elettromotrici: in particolare la f.c.e.m. primaria non bilancia più esattamente la tensione primaria applicata onde deve necessariamente nascere una corrente nel primario che produca un flusso di intensità eguale ed oppo-

sta a quello creato dalla corrente secondaria: è ovvio quindi che, in primo luogo, corrente secondaria e primaria dovranno essere in controfase, mentre per quanto riguarda il valore noteremo che, essendo i flussi proporzionali alle rispettive forze magnetomotrici e quindi al prodotto corrente-spire, si dovrà verificare:

$$N_p \cdot I_p = N_s \cdot I_s \quad (I-3)$$

e cioè:

$$I_p / I_s = N_s / N_p \quad (I-4)$$

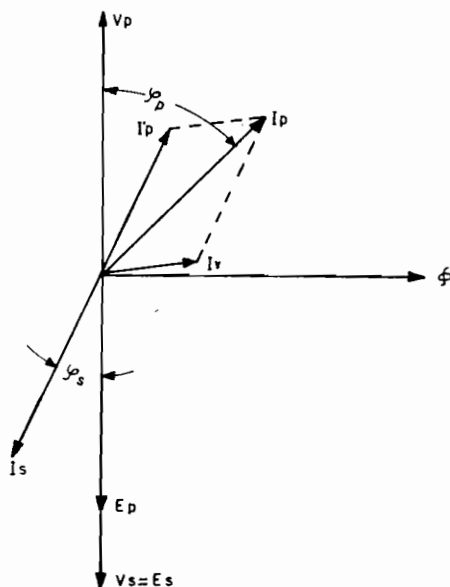


Fig. 8 - Funzionamento a carico di un trasf. con avvolgimenti a impedenza nulla.

il che, in parole povere, può essere espresso dicendo che il rapporto delle correnti primaria e secondaria deve eguagliare il rapporto inverso del rispettivo numero di spire.

Come già abbiamo fatto nel caso del funzionamento a vuoto, segniamo graficamente in fig. 8 la posizione reciproca dei singoli vettori rappresentativi delle grandezze in giuoco nel funzionamento a carico, avvertendo che in questa rappresentazione non si è tenuto conto ancora delle cadute di tensione che si verificano negli avvolgimenti.

La figura, dopo quanto detto precedentemente, non ha bisogno di commento: osserviamo soltanto che in questo come in ogni altro caso si verifica sempre che la tensione primaria è in opposizione con la f.e.m. secondaria, e altrettanto avviene per le due correnti; il vettore flusso ri-

sulta in quadratura con le f.e.m. Il tracciamento del diagramma avviene partendo dalla tensione secondaria e dalla corrente secondaria, separate dall'angolo φ_s , dati questi tutti determinati dalle condizioni del carico su cui il secondario lavora: il valore della corrente primaria I'_p è stabilito dalla (I-4) mentre il valore della f.c.e.m. primaria si determina facilmente pensando che le f.e.m. sono proporzionali al numero delle spire e che quindi dovrà sussistere la relazione:

$$E_p / E_s = N_p / N_s \quad (I-5)$$

La composizione geometrica della corrente I'_p con la corrente I_v , già esistente nel funzionamento a vuoto ci determina la corrente I_p assorbita dalla linea di alimentazione, nonché l'angolo φ_p di cui essa è spostata rispetto alla tensione di alimentazione.

Diagramma vettoriale completo.

La rappresentazione della fig. 8 non corrisponde esattamente alla realtà poichè non tiene conto delle cadute di tensione che si verificano negli avvolgimenti. La caduta sopradetta è dovuta a due cause che potremo considerare indipendenti fra loro: resistenza degli avvolgimenti e loro reattanza. Che cosa sia la resistenza di un conduttore è ben noto a tutti: meno familiare è il concetto di reattanza: essa corrisponde ad una

corrente reattiva che crea nel circuito magnetico un flusso che si concatena soltanto con l'avvolgimento che lo ha creato senza attraversare minimamente l'altro; dispersione di flusso che si verifica sempre, in misura maggiore o minore, in un trasformatore. La reattanza degli avvolgimenti può essere ridotta al minimo incastrando bene l'una nell'altra le spirali primaria e secondaria. Come si presenti il diagramma vettoriale com-