

# **MACCHINE ELETTRICHE**

## PREMESSA

Tutte le macchine elettriche hanno alcune caratteristiche strutturali comuni: sono sostanzialmente costituite da un nucleo di materiale ferromagnetico (eventualmente dotato di uno o più traferri) sul quale sono avvolti due o più avvolgimenti (generalmente di rame o di alluminio).

Come suggerisce la relazione fondamentale per i circuiti magnetici

$$\mathfrak{R}\Phi = NI$$

(ove  $\mathfrak{R} = \frac{L}{\mu S}$  è la riluttanza di un tratto di tubo di flusso lungo  $L$  e di sezione  $S$  in un materiale di permeabilità relativa  $\mu$ ), l'adozione del nucleo ferromagnetico (a bassa o bassissima riluttanza, grazie alla elevatissima permeabilità magnetica) è inteso a produrre un elevato flusso di induzione magnetica con una corrente di eccitazione magnetica piuttosto contenuta.

Quale materiale ferromagnetico si utilizza in maniera pressoché esclusiva una lega a base di ferro a basso tenore di carbonio (indicata semplicisticamente come “ferro”), con l'eventuale aggiunta di percentuali frazionarie di altri elementi, quali il silicio (non oltre 1 – 1.5%).

### CORRENTI PARASSITE

Il cosiddetto “ferro” non è caratterizzato solo da una elevata permeabilità: esso è anche un buon conduttore: come qualunque altro conduttore, quando viene investito da un flusso di induzione variabile nel tempo, diventa sede di un campo densità di corrente che finisce per essere causa di ulteriori perdite.

Si consideri, infatti, il nucleo ferromagnetico di figura, investito da un campo di induzione magnetica supposto, per semplicità, diretto ortogonalmente alla sezione retta del nucleo, e variabile nel tempo, ad esempio con legge sinusoidale, come avviene, d'altronde, nella maggior parte dei casi concreti.

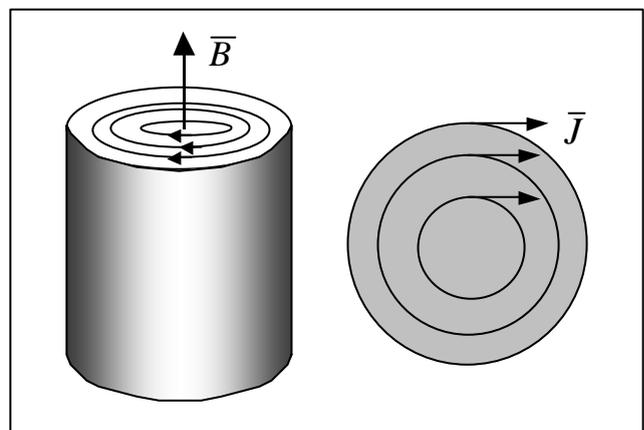
Il nucleo può essere immaginato come costituito da un complesso di “gusci” concentrici, ciascuno assimilabile ad una spira, di spessore infinitesimo, concatenata con le linee di flusso del vettore induzione.

La legge di Lenz assicura che lungo ciascuna spira (guscio) si manifesta, per induzione, una f.e.m. indotta che farà circolare una corrente: l'intero volume del nucleo sarà, allora, sede di un campo densità di corrente indotta, causa di fenomeni dissipativi che finiranno per riscaldare il nucleo.

A queste correnti, non desiderabili, si dà il nome di *correnti parassite* (dette anche correnti di Foucault) e il calore perduto viene indicato come perdite nel ferro per correnti parassite indotte dalla magnetizzazione alternativa.

Si può mostrare che le perdite per correnti parassite per unità di volume,  $p_F$ , presentano una dipendenza dai parametri geometrici ed operativi del tipo:

$$p_F \propto \frac{B_M^2 f^2 d^2}{\rho}$$



avendo indicato con

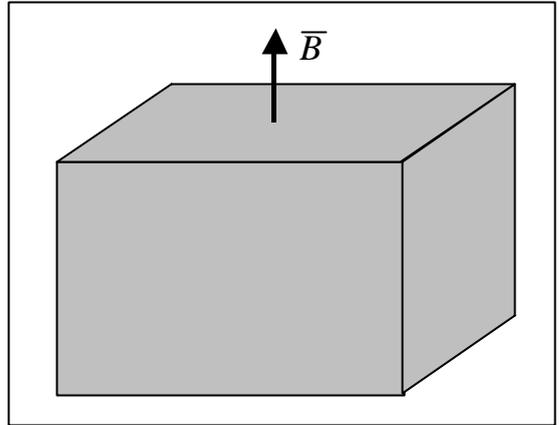
$B_M$  il valore massimo dell'induzione, supposta sinusoidale

$f$  la frequenza

$d$  la dimensione tipica della sezione trasversale del nucleo: il diametro nel caso di una sezione circolare, o lo spessore nel caso di una sezione rettangolare

Allo scopo di ridurre queste perdite si:

- aumenta la resistività del ferro, mediante l'aggiunta di silicio (intorno a 1%)
- evitano i nuclei massicci: la sezione richiesta del nucleo si realizza mediante giustapposizione di sottili lamierini isolati fra loro; la dipendenza delle perdite dal quadrato dello spessore  $d$  consente di conseguire un notevolissimo beneficio dalla adozione della struttura a lamierini. I singoli lamierini vengono isolati fra loro mediante l'interposizione di un idoneo isolante, che può essere, ad esempio, un sottile foglio di carta; in molti casi, però, viene ritenuto adeguato lo strato di ossido che si forma spontaneamente sulla superficie di un materiale ferroso lasciato sotto l'azione dell'aria e dell'umidità.



Il nucleo in ferro interessato da una magnetizzazione alternativa è, dunque, sede di perdite

- per isteresi magnetica
- per correnti parassite

Un dato nucleo ferromagnetico, in assegnate condizioni operative, può venire caratterizzato dalla cosiddetta cifra di perdita (espressa in W/kg), coincidente con l'insieme delle perdite specifiche. Per i moderni nuclei si riesce a limitare la cifra di perdita a circa 1 – 1,2 W/kg: le perdite totali vanno, però, riferite alla massa, spesso molto grande, delle macchine elettriche più grandi, pesanti anche centinaia di tonnellate, entro la quale si dissipano, perciò, centinaia di kW!

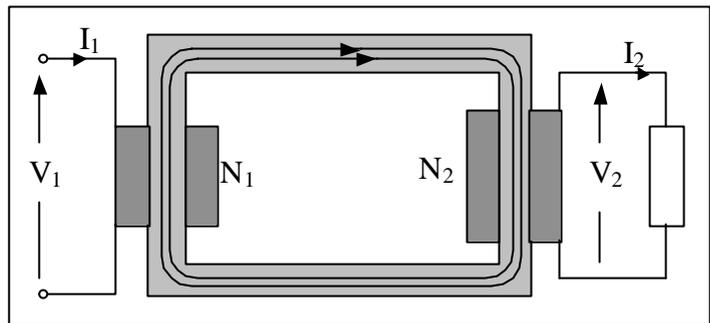
# IL TRASFORMATORE

# IL TRASFORMATORE

## 1.1. CONSIDERAZIONI GENERALI

Il trasformatore è una macchina elettrica “statica” che trasferisce energia da un circuito ad un altro per il tramite dell’induzione elettromagnetica: è per questo che un trasformatore può funzionare solo in regime *non stazionario*. Nella stragrande maggioranza dei casi i trasformatori vengono impiegati in regime sinusoidale, alla cosiddetta frequenza industriale (o di rete), che in Europa (e nella maggior parte del mondo) è di 50 Hz, mentre negli U.S.A. è di 60 Hz.

In linea di principio un trasformatore è costituito da un nucleo in materiale ferromagnetico sul quale sono avvolti almeno due avvolgimenti, detti *primario* e *secondario*, rispettivamente: in tal modo le linee di flusso di induzione prodotto da ciascuno dei due, e “confinato” nel nucleo dalla sua bassa riluttanza, si concatenano con l’altro.



Si noti che, data la assoluta “reversibilità” della macchina, ciascuno dei due avvolgimenti può essere assunto come primario (o secondario), a seconda che si privilegi l’una coppia di morsetti (detta anche *porta*) o l’altra.

Come si vedrà meglio nel seguito, la funzione di gran lunga più rilevante del trasformatore è quella di consentire la trasmissione dell’energia elettrica a distanze anche molto grandi.

Studiato già nel 1848 dal fisico tedesco **H. Ruhmkorff**, fu realizzato dal francese **L. Gaulard** in un versione presentata all’esposizione universale di Torino del 1884. La macchina di Gaulard era alquanto imperfetta e, soprattutto, non era supportata da una piena comprensione teorica. La teoria completa del trasformatore, in una versione sostanzialmente identica a quella attuale, è dovuta, però, allo scienziato italiano **Galileo Ferraris**.

È importante notare come l’impiego del trasformatore acquistasse rilievo particolare dal momento in cui era stato inventato dallo stesso Galileo Ferraris e si stava diffondendo il motore a corrente alternata, detto asincrono o a induzione, che rendeva possibile trasformare in energia meccanica l’energia elettrica, trasmessa a distanze fino ad allora impensabili: nel 1891 l’impianto da Tivoli a Roma arrivava a 35 km mentre quello da Lauffen a Francoforte sul Meno si estendeva su 75 km.

## 1.2. PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO

Se si fanno le seguenti ipotesi semplificative:

- permeabilità magnetica del nucleo grandissima ( $\mu \rightarrow \infty \Rightarrow \mathcal{R} \rightarrow 0$ ): il nucleo ferromagnetico può essere considerato un tubo di flusso perfetto: tutte le linee di flusso del vettore induzione generato da un circuito si concatenano con l’altro
- potenza dissipata nel nucleo nulla
- resistività dei conduttori degli avvolgimenti nulla

l’insieme dei due avvolgimenti può considerarsi coincidente con il cosiddetto *trasformatore ideale*, caratterizzato completamente dalle semplici relazioni fra le grandezze alle due porte:

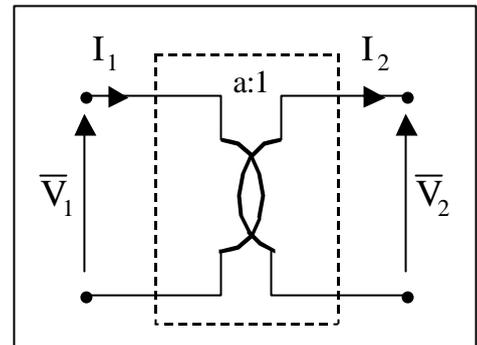
$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = a$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{a};$$

alla grandezza “a” si dà il nome di *rapporto spire* o *rapporto di trasformazione*.

Il simbolo del trasformatore ideale è quello di fianco riportato, ove si sono fatte due diverse convenzioni alle due porte:

- dell’*utilizzatore* alla porta primaria: il complesso del trasformatore e del suo carico vengono “visti” dalla rete di alimentazione come un carico complessivo
- del *generatore* a quella secondaria: visto dal carico, il trasformatore viene identificato con l’ente erogatore.



Se indichiamo con  $V_1 I_1$  la potenza apparente impegnata alla porta primaria e con  $V_2 I_2$  quella alla porta secondaria, utilizzando le relazioni appena scritte per esprimere le grandezze primarie in funzione di quelle secondarie:

$$V_1 I_1 = (a V_2) \cdot \left( \frac{I_2}{a} \right) = V_2 I_2$$

la relazione scritta giustifica anche l’affermazione secondo la quale *il trasformatore ideale è trasparente per le potenze*: non trattiene, cioè, alcuna aliquota di potenza, che si trasmette, pertanto, completamente da una porta all’altra, giustificando, così, un valore unitario del rendimento..

### 1.3. ELEMENTI COSTRUTTIVI

In perfetta analogia con tutte le macchine elettriche, anche il trasformatore è costituito da due elementi strutturali fondamentali: il *nucleo ferromagnetico* (detto anche *ossatura*) e gli *avvolgimenti*, generalmente in rame o in alluminio.

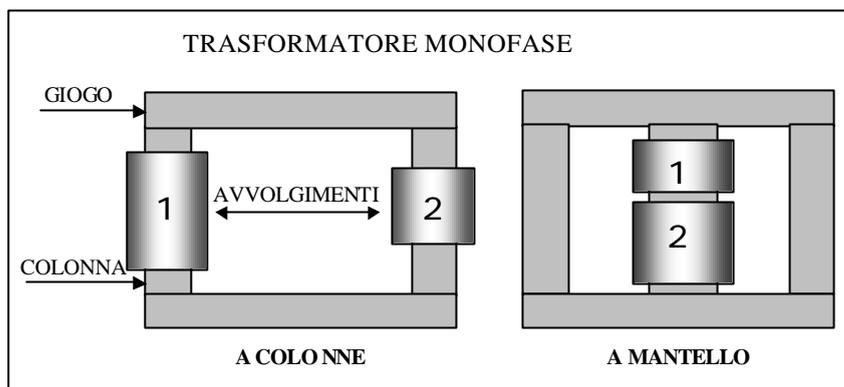
Come si è accennato in precedenza, gli avvolgimenti, due o più, risultano meglio accoppiati se disposti su una struttura di materiale ferromagnetico, che costituisce la rete magnetica a bassissima riluttanza entro la quale si sviluppano in misura prevalente le linee di flusso di induzione magnetica.

Forme costruttive, materiali impiegati e particolari soluzioni tecnologiche dipendono dalle specifiche esigenze, dal campo di impiego di ciascuna categoria di trasformatori. Le considerazioni che si possono fare (e che qui si fanno) hanno carattere di assoluta generalità, allo scopo di evidenziare i soli elementi essenziali.

A completare il quadro delle caratteristiche costruttive occorre poi considerare che il trasformatore, sede di calore che va comunque smaltito, deve essere corredato di un idoneo sistema di raffreddamento.

### 1.3.1. IL NUCLEO

Le due forme costruttive più comuni sono quelle usualmente indicate come nucleo *a colonne* (con gli avvolgimenti disposti intorno a ciascuna delle colonne) e nucleo *a mantello* o *corazzato* (con entrambi gli avvolgimenti disposti sulla colonna centrale e parzialmente “circondati” dal nucleo), come illustrato dalla figura.

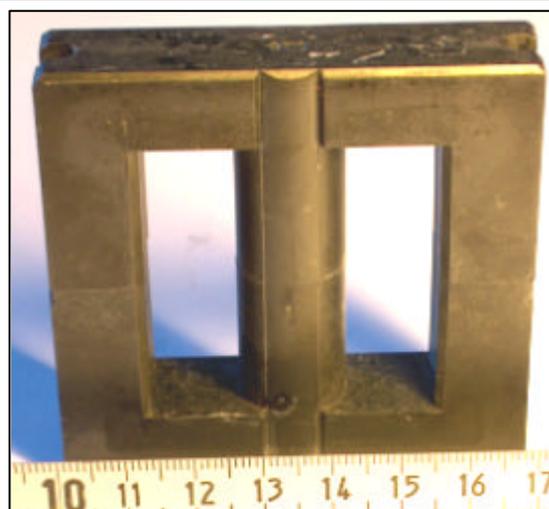
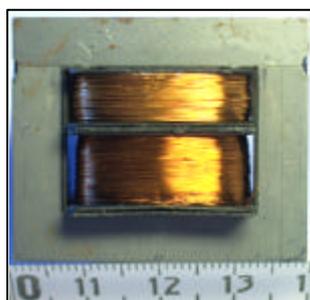
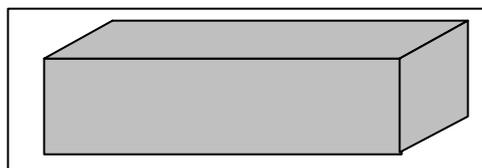


Una struttura “chiusa” (ovvero continua) varrebbe certamente a eliminare i traferri (facendo diminuire la riluttanza) ma renderebbe molto difficile, se non impossibile, l’inserimento degli avvolgimenti: il nucleo viene, perciò, costruito per assemblaggio di parti, con le due colonne vere e proprie che vengono serrate fra due elementi orizzontali, detti *giochi*.

L’inconveniente di questa struttura è costituito dalla presenza (ineliminabile) di pur ridottissimi traferri (dell’ordine di 0,05 mm o meno nei migliori trasformatori), che finiscono per penalizzare la riluttanza complessiva, che, come si è detto ripetutamente, si vorrebbe la più bassa possibile.

L’unica eccezione è rappresentata dai cosiddetti trasformatori *a nucleo avvolto* (o *bobinato*), costituiti da un lamierino ferromagnetico avvolto a spirale in più strati, fino a costituire la struttura, priva di discontinuità, intorno alla quale sistemare gli avvolgimenti.

Allo scopo di ridurre le perdite per correnti parassite i nuclei dei trasformatori (e i loro componenti strutturali, colonne e gioghi) non sono massicci: le sezioni richieste vengono ottenute assemblando per giustapposizione un certo numero di *lamierini* piuttosto sottili, da poco più di un millimetro, nei trasformatori di più modesta potenza, a frazioni di millimetro (0,35 – 0,5 mm) nei trasformatori maggiori.



Nelle immagini (in scala reale) due esempi di nuclei corazzati: sopra, un piccolo trasformatore di alimentazione, a destra il nucleo in ferrite di un trasformatore speciale

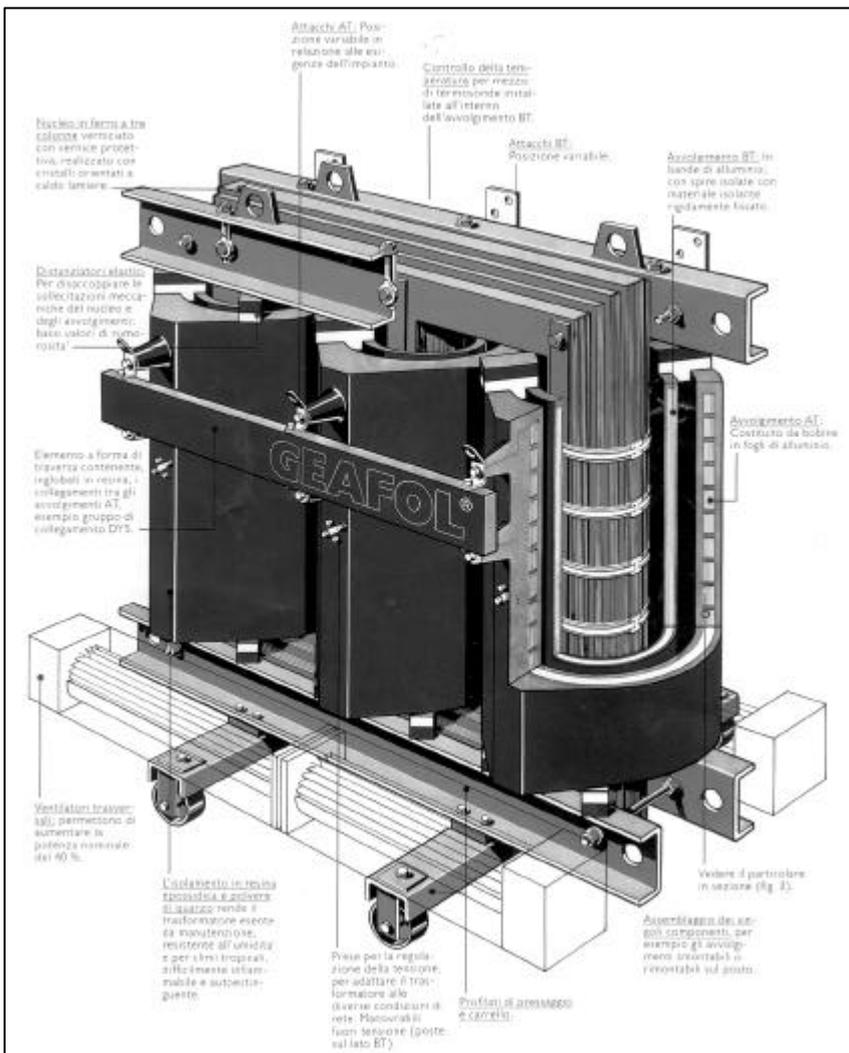
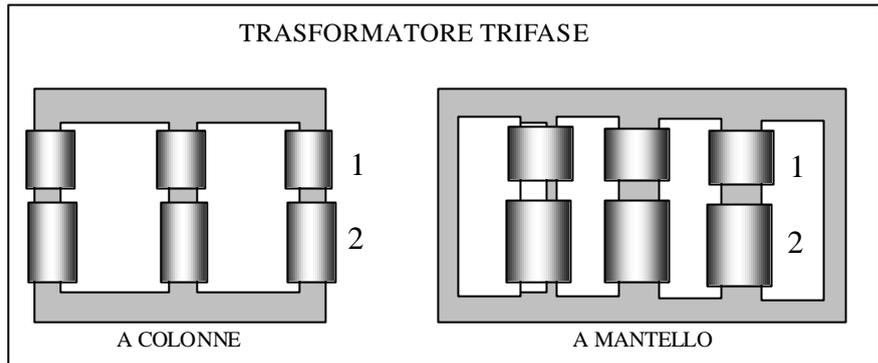
### 1.3.2. TRASFORMATORI TRIFASI

Anche se, per ragioni di semplicità, si è fatto fin qui riferimento al solo trasformatore “monofase”, la quasi assoluta totalità dei casi reali è costituita da trasformatori trifasi, che presentano tre coppie di avvolgimenti, una coppia per ogni fase.

Per ogni coppia di avvolgimenti continuano a valere le relazioni prima esposte per il rapporto fra le tensioni e le correnti primarie e secondarie.

In linea di principio un trasformatore trifase potrebbe essere realizzato facendo ricorso a tre trasformatori monofasi, uno per ciascuna delle tre fasi.

Ragioni di convenienza economica e di ingombro inducono a preferire, però, una struttura compatta: su un unico nucleo sono sistemati le tre coppie di avvolgimenti, dando luogo a tipologie che riprendono quelle già presentate per il caso monofase, rispettivamente a colonne o a mantello.



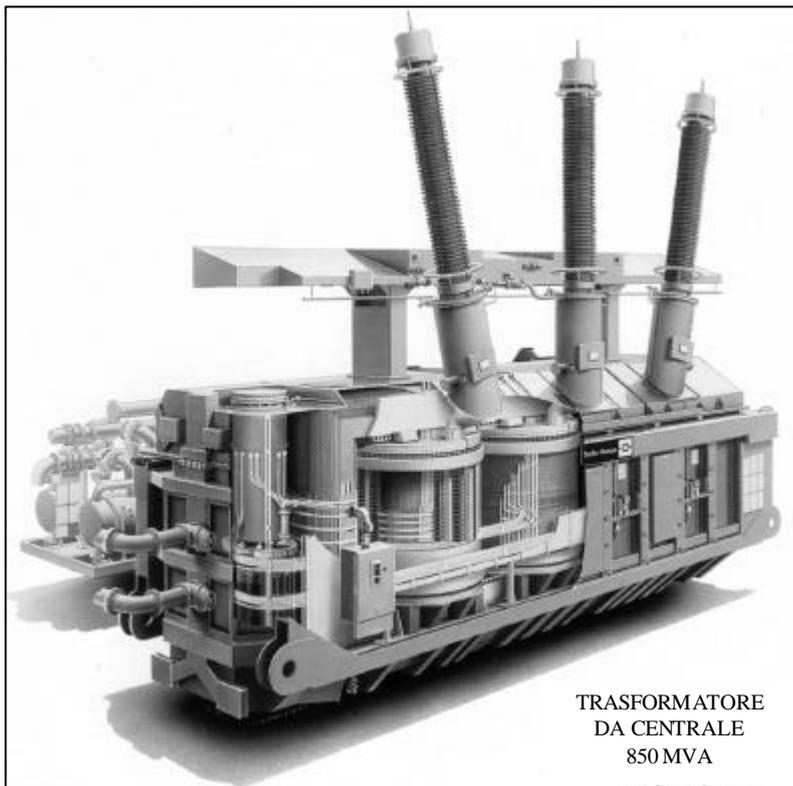
#### NUCLEO A 3 COLONNE

Si noti che gli avvolgimenti sono realizzati :

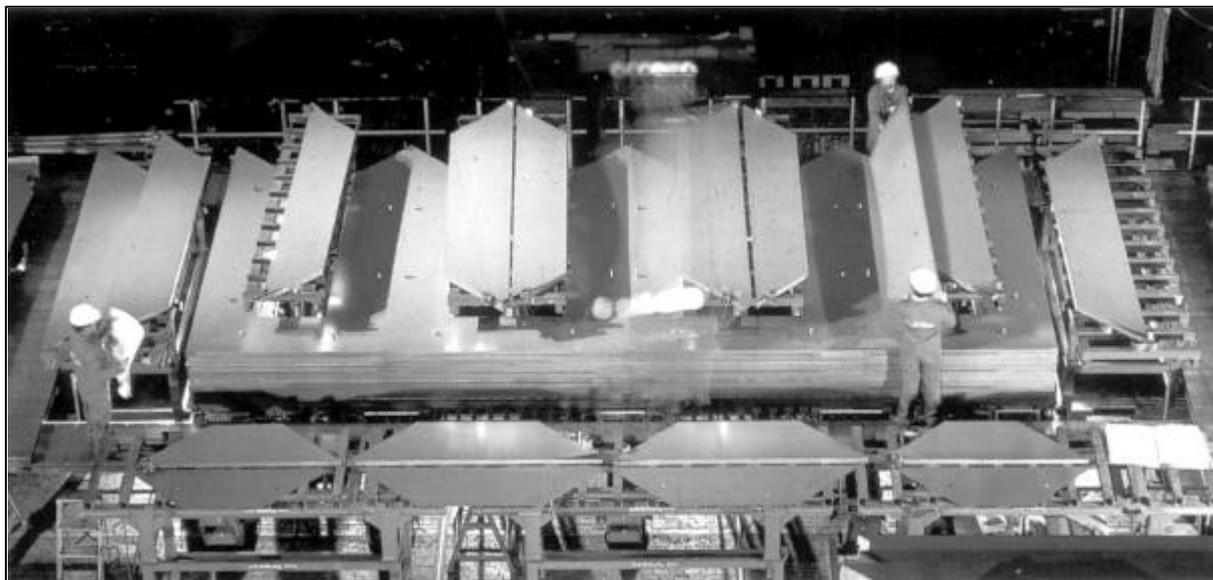
- la bassa tensione a fogli
- l'alta tensione a piastrina

**TRASFORMATORI IN RESINA  
TRAFO - UNION**  
POTENZE NOMINALI: 0.2 – 18 MVA  
TENSIONI NOMINALI: 20 – 180 kV

NUCLEO A 5 COLONNE



TRASFORMATORE  
DA CENTRALE  
850 MVA

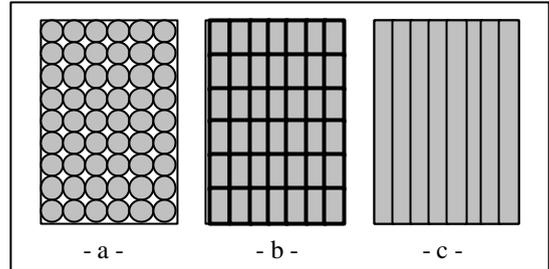


Un momento della costruzione del nucleo di un trasformatore a 5 colonne

### 1.3.3. GLI AVVOLGIMENTI

Gli avvolgimenti sono realizzati in rame o, abbastanza spesso, in alluminio, che, come al solito, offre i vantaggi di costi e pesi inferiori al solo prezzo di una conducibilità appena minore di quella del rame.

Le sezioni dei conduttori sono circolari (fig. a) ma, quando si vuole ottenere il riempimento ottimale degli spazi disponibili, si dà la preferenza a sezioni rettangolari, dette a “piattina” (fig. b), che consentono di eliminare in maniera completa gli spazi inutilizzati. In un certo numero di casi, infine, quando l’avvolgimento è fatto di poche spire di grande sezione, il conduttore presenta una struttura “a rastro” (fig. c)



Nella quasi assoluta totalità dei casi il necessario isolamento dei conduttori è affidato a un opportuno materiale “organico” (una resina sintetica).

Gli isolanti sono perciò piuttosto sensibili alla temperatura, dalla quale dipende apprezzabilmente la sua cosiddetta “vita media”.

Occorre, perciò, prevenire il riscaldamento eccessivo degli avvolgimenti, mediante idoneo raffreddamento. Allo scopo di poter contare su una vita media analoga per i diversi avvolgimenti del trasformatore, occorre che, a parità di trasmissione del calore, l’apporto di calore agli avvolgimenti sia sostanzialmente identico; ciò comporta, nel caso, ad esempio, del trasformatore monofase, l’identità:

$$R_1 I_1^2 = R_2 I_2^2 \quad \Rightarrow \quad \frac{R_1}{R_2} = \left( \frac{I_2}{I_1} \right)^2 = \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^2 = a^2$$

il mantenimento di un identico regime termico (temperatura) comporta, così, che le due resistenze siano fra loro in un ben preciso rapporto, coincidente con il quadrato del rapporto di trasformazione.

L’avvolgimento viene realizzato con l’ausilio di speciali macchine (bobinatrici) che avvolgono il conduttore su un idoneo supporto (molto spesso in legno) a forma di cilindro cavo, che verrà, poi, infilato su una delle colonne del trasformatore.

Qualunque sia la struttura del nucleo, allo scopo di garantire un migliore “accoppiamento” fra primario e secondario, gli avvolgimenti di primario e secondario vengono suddivisi in sezioni che vengono disposte, in maniera concentrica, su ciascuna colonna del nucleo.

Considerazioni di diversa natura (come la sicurezza o la praticità di montaggio e/o manutenzione) conducono a disposizioni piuttosto diversificate, come gli avvolgimenti a “dischi” alternati, ove corte sezioni di primario e secondario si alternano sulla stessa colonna.



Costruzione dell’avvolgimento sul suo supporto

### 1.3.4. RAFFREDDAMENTO

Come si è accennato, a un efficace smaltimento del calore prodotto (dalle perdite nel nucleo e da quelle nei conduttori, per effetto joule) è legata la sopravvivenza stessa del trasformatore: un sistema di raffreddamento è adeguato se riesce a contenere la temperatura entro livelli che non compromettano la consistenza (e la tenuta) degli isolanti organici.

Nei casi più semplici (macchine di potenza contenuta, entro qualche centinaio di kVA), il raffreddamento non prevede accorgimenti particolari: è affidato ai moti convettivi naturali che si stabiliscono nell'aria che lambisce il trasformatore. Un saggio criterio costruttivo è quello di lasciare piccole intercapedini fra i due avvolgimenti e fra questi e il nucleo, in modo da favorire la convezione naturale.

Quando condizioni ambientali sfavorevoli (temperature molto alte o ambienti chiusi di relativamente piccole dimensioni) lo richiedano, anche i trasformatori più piccoli possono essere dotati di un raffreddamento forzato, mediante ventole (generalmente tangenziali); in tal caso il sistema di raffreddamento deve prevedere un idoneo filtraggio dell'aria, per evitare che il flusso d'aria forzata imbratti la macchina proiettando su di essa particelle di diversa consistenza o quant'altro.

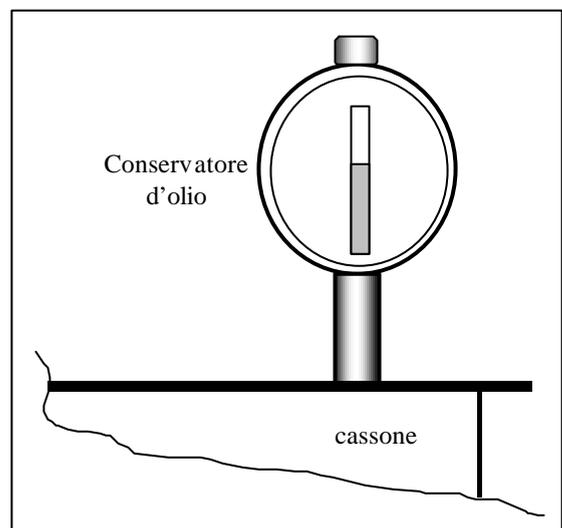
Allo scopo di indirizzare più efficientemente il flusso dell'aria (oltre che per ridurre l'immissione di rumore in ambiente) il trasformatore viene confinato entro apposito armadio, dotato di idonee feritoie.

I trasformatori di maggior potenza vengono invece raffreddati mediante immersione completa in un bagno d'olio minerale speciale, caratterizzato da una elevatissima resistività. Olio e trasformatore vengono contenuti in un cassone la cui superficie laterale presenta caratteristiche specifiche dipendenti dalla quantità di calore che occorre scambiare con l'ambiente.

Nei casi più semplici il cassone presenta parti del tutto lisce; altrimenti si fa ricorso a pareti corrugate da nervature, tanto più profonde quanto più energica si richiede che sia l'azione di raffreddamento.

Nelle macchine più importanti l'olio viene raffreddato con un sistema a *circolazione forzata* entro un sistema di fasci tuberi che offrono una elevata superficie di contatto con l'aria, capace di assicurare il richiesto coefficiente di scambio termico (espresso in  $\text{Watt/m}^2/^\circ\text{C}$ ).

Le macchine destinate all'esterno vengono protette sigillando completamente il cassone: la piastra superiore, dotata di apposita guarnizione, viene serrata al cassone con una buona quantità di bulloni. Allo scopo di consentire la normale dilatazione dell'olio, la piastra di chiusura del cassone riporta un serbatoio, detto conservatore d'olio, che funge da vaso di espansione dell'olio ed è dotato anche di un indicatore di livello



Non sarà superfluo segnalare che le spesso grandi quantità di olio nei cassoni presentano un elevato rischio di incendio: i locali che ospitano trasformatori in olio sono, perciò, soggetti a prescrizioni specifiche intese a limitare il rischio incendio e a circoscrivere l'impatto ambientale in caso di perdita d'olio.

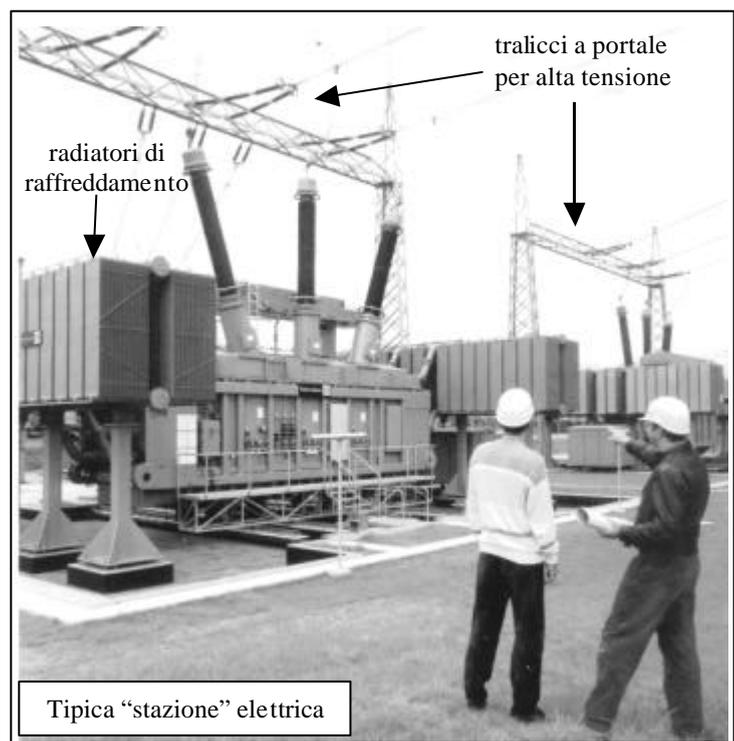
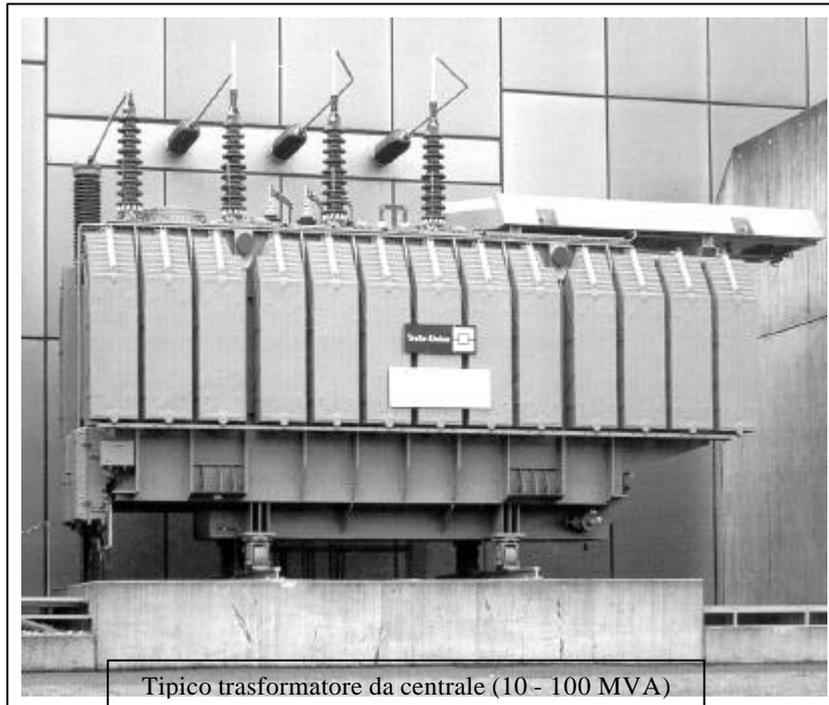
Le caratteristiche di elevata resistività dello speciale olio per trasformatori possono essere anche severamente degradate dalla presenza di pur piccole quantità di acqua: è per questo che entro il cassone viene sempre posta una sufficiente quantità di sali igroscopici (capaci di assorbire l'umidità), eventualmente rigenerabili.

## 1.4. IMPIEGHI DEL TRASFORMATORE

### 1.4.1. TRASFORMATORI DI POTENZA

La quasi assoluta totalità dei trasformatori di un certo rilievo è destinato a gestire la trasmissione e la distribuzione della potenza elettrica, dalle centrali elettriche di produzione fino al punto di consegna all'utente.

Le immagini sotto riportate illustrano efficacemente il tipo di applicazione.

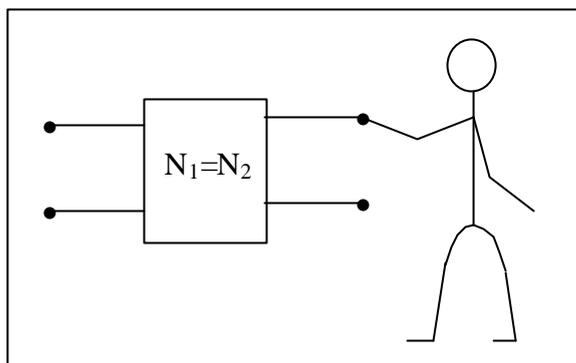


## 1.4.2. TRASFORMATORE SEPARATORE (O DI ISOLAMENTO)

A scopo di sicurezza si può interporre un trasformatore a rapporto unitario fra la linea di distribuzione e il carico.

Come lo schema evidenzia, infatti, a differenza di quanto accade nel caso di contatto diretto con il conduttore di fase di una comune linea di distribuzione (costituita da fase e neutro), il contatto diretto con un solo morsetto di un trasformatore non comporta pericolo di elettrocuzione: la differenza di potenziale fra i morsetti fa circolare la corrente nel corpo umano (o in un qualunque carico) solo in caso di contatto/collegamento a entrambi i morsetti.

Considerazioni di natura esclusivamente economica sono alla base della scarsissima diffusione di questo trasformatore particolarmente utile, il cui impiego è limitato a casi o ambienti speciali, come sale chirurgiche o apparecchiature elettromedicali in genere.



## 1.5. CENNI ALL'AUTOTRASFORMATORE

Si tratta di un tipo particolare di trasformatore, costituito da un solo avvolgimento di  $N_1$  spire,  $N_2$  delle quali sono utilizzate come spire del secondario.

Si può mostrare che, fatte alcune ipotesi semplificative, non dissimili da quelle già formulate per il caso del trasformatore ordinario, anche l'autotrasformatore è completamente descritto dalle stesse due relazioni, che legano le tensioni e le correnti alle due porte

La ragione di impiego dell'autotrasformatore è, però, essenzialmente di convenienza economica.

Si può mostrare, infatti, che la potenza per la quale deve essere dimensionato,  $P_d$ , (e che ne determina l'ingombro, il peso e ... il costo) è solo un'aliquota di quella cosiddetta "passante",  $P_p$ , destinata, cioè, ad essere trasferita al carico:

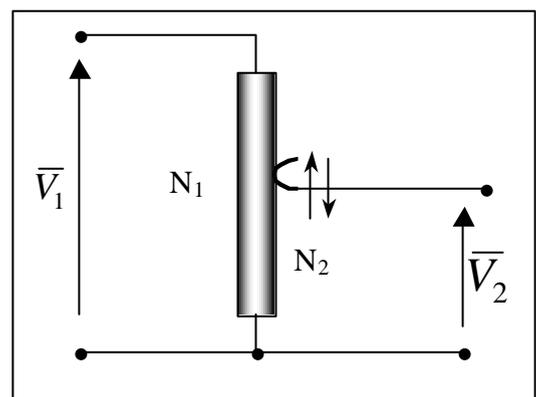
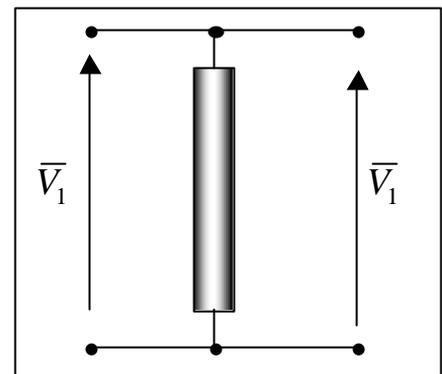
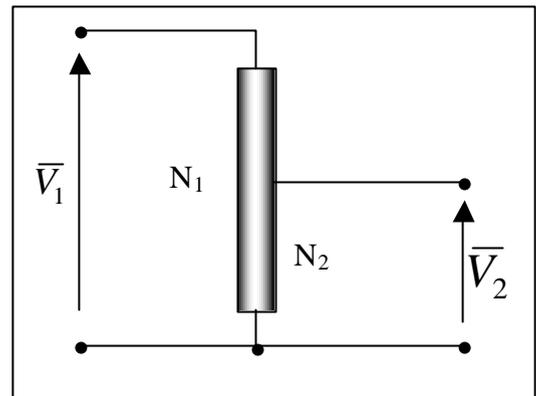
$$P_d = P_p \left( 1 - \frac{1}{a} \right)$$

Si vede che, al tendere a 1 del rapporto di trasformazione  $a$ , la potenza di dimensionamento tende a zero; la cosa ha una spiegazione fisica piuttosto semplice ed intuitiva: nel caso, infatti, di rapporto unitario, la potenza viene trasferita da una porta esclusivamente per via "ohmica": la presenza del trasformatore è del tutto superflua; vale la pena, perciò, di ridurlo a dimensioni trascurabili o, meglio, eliminarlo del tutto, per evitare le perdite nel ferro che comunque si verificherebbero in un nucleo per quanto piccolo.

All'aumentare del rapporto di trasformazione viene via via a ridursi la convenienza economica dell'autotrasformatore, che viene impiegato, infatti, per rapporti di trasformazione che difficilmente vanno oltre il valore 2.

Un caso particolare è rappresentato dagli autotrasformatori a rapporto variabile, nei quali il numero di spire di secondario è reso variabile mediante l'impiego di un contatto strisciante.

Realizzati sia secondo una struttura "lineare" che toroidale, questi autotrasformatori a rapporto variabile, accomunati dalla denominazione di "variac", trovano il loro impiego soprattutto in laboratorio, quando si abbia necessità di ottenere in maniera semplice un ben preciso valore di tensione in corrente alternata, anche se non mancano alcune applicazioni "di potenza", sia monofase che trifase.



☠ Va segnalata la intrinseca pericolosità dell'autotrasformatore: a differenza del trasformatore ordinario, tra le due porte non esiste solo un accoppiamento elettromagnetico, ma anche un collegamento di tipo ohmico, che comporta il rischio di elettrocuzione per chi si trovasse a toccare uno dei morsetti secondari.

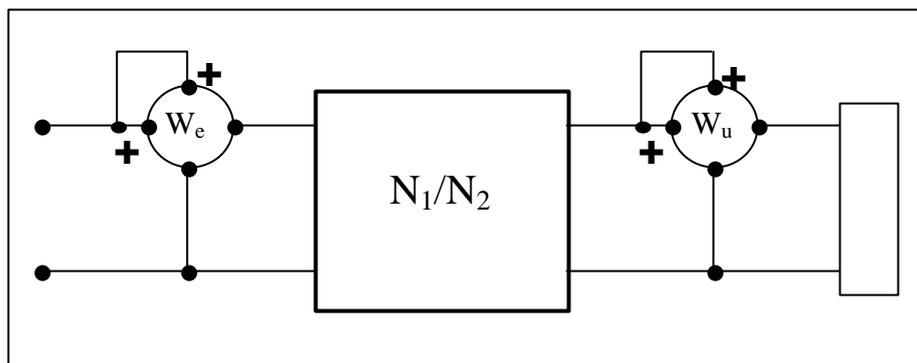
## 1.6. RENDIMENTO

Come per tutte le macchine, elettriche e non, anche per il trasformatore si può definire il rendimento come il rapporto fra la potenza *in uscita*  $P_u$  e la potenza *in entrata*  $P_e$ :

$$\eta = \frac{P_u}{P_e}.$$

La valutazione effettiva del rendimento rende palesi i pesanti limiti “operativi” della definizione appena fornita.

Si supponga, infatti, di volerne effettuare la misura mediante l’impiego di due wattmetri, uno per ognuna delle due porte.



I trasformatori, soprattutto quelli di potenza maggiore, presentano, tuttavia, rendimenti molto prossimi al faticoso valore unitario (spesso non troppo lontano da 0,99!): la somma degli errori dei due wattmetri (richiesta per tener conto del cosiddetto “errore di rapporto”) potrebbe condurre alla lampante assurdit  fisica di un valore ... maggiore dell’unit !

Anche supponendo nulli (o almeno trascurabili) gli errori di misura, occorre anche considerare che per la ipotetica misura del rendimento di un grande trasformatore di centrale (con potenza nominale di decine o centinaia di MVA) occorre poter disporre:

- della enorme potenza richiesta, sottraendola (per il tempo della misura) ai normali destinatari – utenti, certamente poco gratificati della interruzione del servizio;
- di un carico idoneo, capace di assorbire questa enorme potenza.

Sulla base delle considerazioni fin qui svolte si preferisce dare del rendimento una definizione *indiretta*, operativamente pi  praticabile e proficua.

La potenza assorbita in entrata dal trasformatore viene considerata quale somma delle potenze perse (nel rame degli avvolgimenti,  $P_{Cu}$ , e nel ferro del nucleo,  $P_{Fe}$ ) e della *potenza convenzionale*  $V_2 I_2 \cos \phi_2$  trasferito ad un carico “convenzionale” assolutamente generico applicato alla porta secondaria; si definisce, cos , un rendimento convenzionale:

$$\eta_c = \frac{V_2 I_2 \cos \phi_2}{V_2 I_2 \cos \phi_2 + P_{Cu} + P_{Fe}}$$

che pu  essere determinato dalla misura delle sole potenze perse mediante apposite prove.

Il rendimento varia con la condizione di carico: in particolare   zero se si annulla la potenza trasferita al carico.

Con semplici calcoli si pu  mostrare che il rendimento del trasformatore   massimo quando le perdite nel ferro uguagliano quelle nel rame.

## 1.7. PARALLELO DEI TRASFORMATORI

In molti casi il trasformatore eroga potenza a carichi fortemente variabili nel corso della giornata. Si pensi ad insediamento urbano che veda la compresenza di edifici abitativi e piccole aziende: ad un assorbimento piuttosto rilevante di potenza durante il giorno, connesso alle molteplici attività lavorative, fa riscontro un assorbimento molto più ridotto nelle ore serali e notturne.

Nel periodo corrispondente al carico ridotto, il trasformatore sarà penalizzato da un rendimento certamente lontano dal massimo: le perdite energetiche nel rame saranno ridotte mentre quelle nel ferro, legate al livello di magnetizzazione e, quindi, alla tensione di alimentazione, saranno costanti.

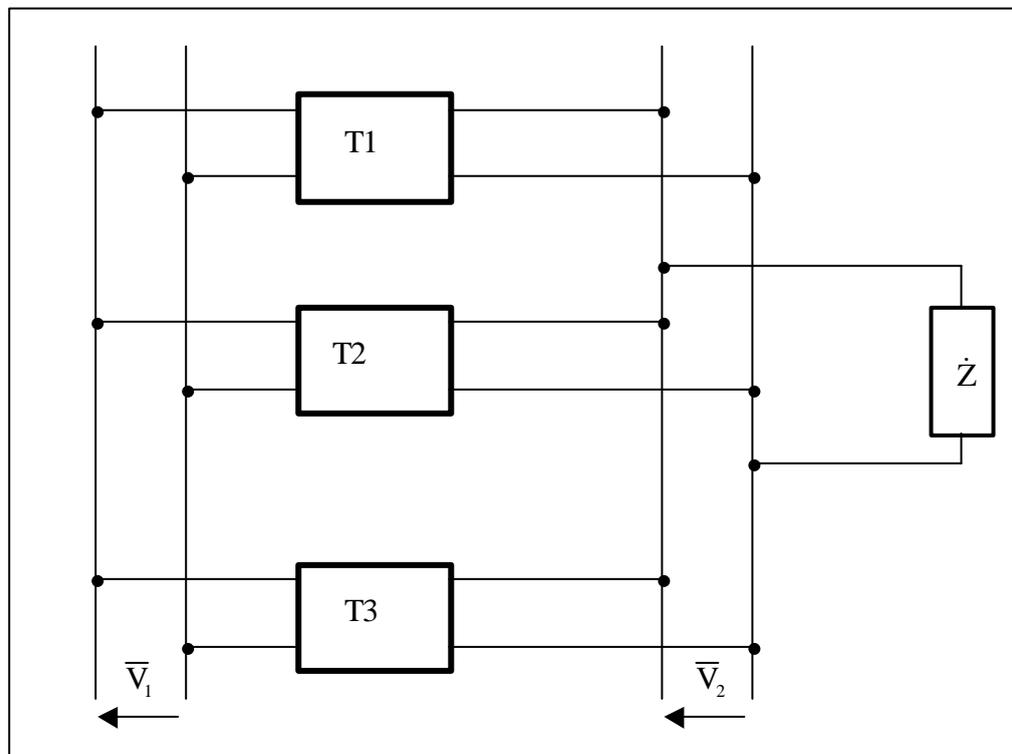
Per ripristinare un rendimento accettabile accorrebbe ridurre le perdite nel ferro in modo da rispettare, anche a carico ridotto, l'uguaglianza fra l'energia perduta nel rame e quella perduta nel ferro.

Tale condizione può, tuttavia, trovare un obiettivo impedimento in precisi limiti tecnologici.

È allora che occorre prendere in considerazione l'opportunità di affidare il servizio non più ad un solo trasformatore, destinato, come si è visto, a rendimenti variabili nel corso della giornata, ma al parallelo di due o più trasformatori, che concorrano a fornire la richiesta potenza intervenendo ciascuno in relazione alle precise esigenze dell'utenza: un carico pari a 100 verrà suddiviso, ad esempio, fra 3 trasformatori, proporzionati, rispettivamente per 20, 30 e 50. Funzioneranno insieme solo nelle ore di punta: man mano che le attività vanno scemando si spegneranno via via i due più potenti fino a lasciare attivo il più piccolo a far fronte le richieste più modeste del periodo notturno.

In tal modo tutti i tre trasformatori lavoreranno in condizioni prossime a quelle di massimo rendimento: su un arco di tempo più o meno lungo, il vantaggio economico ottenuto varrà a compensare i maggiori oneri derivanti da acquisto, installazione e manutenzione di tre distinte unità.

L'utilizzazione di due o più trasformatori in parallelo offre l'ulteriore vantaggio di garantire una migliore continuità di esercizio rispetto al servizio offerto da un unico trasformatore.



## 1.8. DATI DI TARGA

Con l'esclusione delle macchine più piccole, tutti i trasformatori sono dotati di una targhetta che ne riassume i dati caratteristici. Fra questi vanno citati:

- Nome del costruttore
- Anno di costruzione
- Potenza nominale, in VA
- Tensioni nominali, primaria e secondaria
- Correnti nominali, primaria e secondaria
- Rapporto di trasformazione
- Frequenza

Vale la pena di fare qualche precisazione.

Le tensioni nominali sono riferite al livello di isolamento garantita (con un assegnato coefficiente di sicurezza) dai dielettrici utilizzati: il superamento di queste tensioni comporta il rischio di guasto da perforazione dei dielettrici.

Le correnti nominali vengono, invece, riferite (con un assegnato coefficiente di sicurezza) agli effetti termici che queste determinano nei conduttori con un innalzamento della temperatura che, come si è detto prima, va contenuto per non compromettere l'integrità dei dielettrici organici.

La potenza nominale risulta dal prodotto fra tensione e corrente nominali; è facile convincersi che, in mancanza di qualunque indicazione sul carico specifico, non può che essere fornita in VA.