

PARTE II – TRASFORMATORE TRIFASE

3.13 – TRASFORMATORI TRIFASE (CONSIDERAZIONI INTRODUTTIVE)

Le linee di trasmissione e di distribuzione primaria e secondaria dell'energia elettrica sono prevalentemente trifase; trifase sono anche i motori elettrici in alternata e numerosi carichi elettrici (specie quelli di potenza elevata, ≥ 10 kVA). E', quindi, evidente che i trasformatori utilizzati sulle linee di trasmissione e distribuzione e quelli nelle cabine di alimentazione di stabilimenti industriali e/o di utenze civili sono generalmente trifase. Per lo studio di tali **trasformatori trifase** ci si avvarrà delle considerazioni introdotte nello studio dei trasformatori monofase, sottolineando gli aspetti specifici maggiormente significativi.

3.14 – CONFIGURAZIONI MAGNETICHE DEI TRASFORMATORI TRIFASE

Una prima configurazione consiste nell'impiego di tre trasformatori monofase uguali T_A , T_B , T_C , costituenti il cosiddetto **banco tri-monofase**. In fig.3.27 sono rappresentati schematicamente i tre nuclei, su ciascuno dei quali sono avvolti un primario di N_1 spire e un

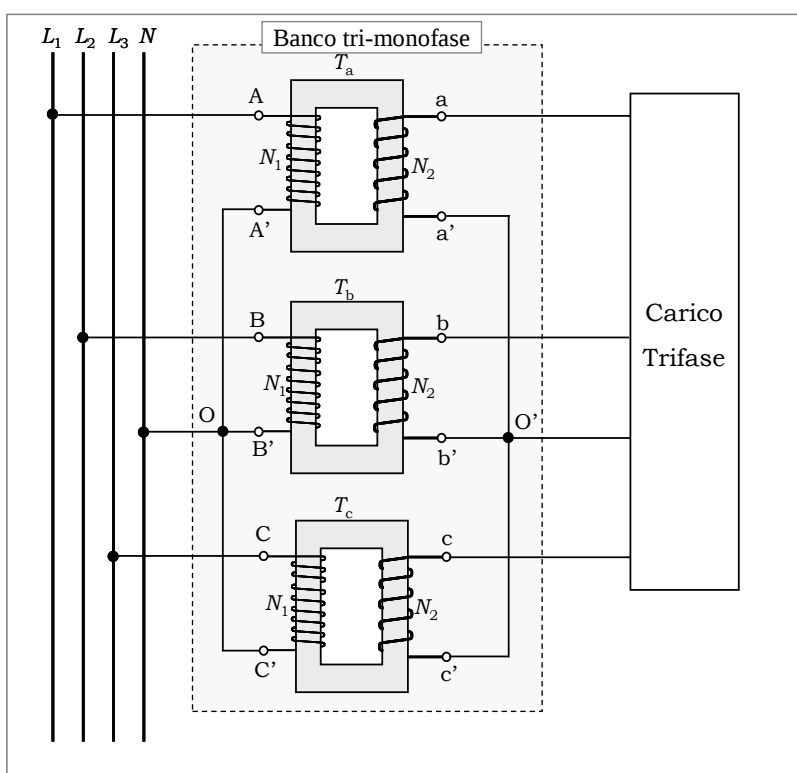


Fig.3.27 – Banco di tre trasformatori monofase con connessione a stella con neutro sia al primario sia al secondario.

secondario di N_2 spire. Mentre i circuiti magnetici sono separati, per cui il flusso Φ_A presente nel nucleo magnetico del trasformatore T_A , è indipendente dai flussi Φ_B e Φ_C degli altri due trasformatori (e viceversa), i circuiti elettrici sono interconnessi e collegati alla linea trifase di alimentazione e al carico trifase. In figura gli avvolgimenti sono collegati a “stella con neutro” sul primario e a “stella con neutro” al secondario (tali definizioni verranno spiegate nel

seguito del presente paragrafo); i tre terminali omologhi (A, B, C) delle tre fasi primarie sono collegati ai tre conduttori di linea L_1, L_2, L_3 ; gli altri tre terminali (A', B', C') sono connessi tra loro (punto O) e collegati al conduttore neutro N della linea di alimentazione. I secondari in figura sono collegati in maniera analoga al primario. Sia il primario, sia il secondario possono essere collegati in modi diversi da quello proposto in fig.3.27.

Oltre a realizzare un trasformatore trifase utilizzando tre unità monofase indipendenti, si può ricorrere ad una struttura unica, detta **trasformatore a stella complanare**, che rappresenta la più diffusa struttura di trasformatore trifase. Tale struttura magnetica scaturisce dai passaggi logici sinteticamente descritti in fig.3.28. Immaginiamo inizialmente di avvicinare i tre trasformatori monofase in maniera da disporli spazialmente a 120° l'uno rispetto all'altro (fig. a) e con le tre colonne di ritorno disposte nella zona centrale; si nota che, se i flussi magnetici che interessano le tre colonne costituiscono una terna simmetrica di fasori (Φ_a, Φ_b e Φ_c sinusoidali, con la stessa ampiezza e reciprocamente sfasati nel tempo di $2\pi/3$), il flusso risultante nella colonna centrale è 0 e, pertanto, la colonna centrale si può eliminare senza influenzare i flussi magnetici stessi (fig. b). Siccome quest'ultima configurazione è difficile da realizzare, in quanto vi sarebbero dei giunti tridimensionali tra i tre gioghi (nella parte superiore ed inferiore del nucleo), ed è inoltre ingombrante, si preferisce ricorrere alla configurazione di fig.3.28c, ottenuta proiettando le tre colonne in maniera che risultino allineate. Proprio la planarità di questa struttura giustifica il nome di *stella complanare*.

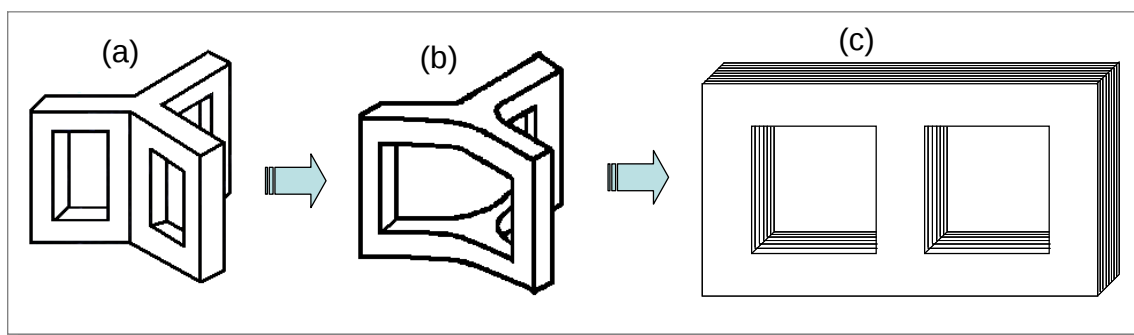


Fig.3.28 – Nucleo magnetico di trasformatore trifase: a) a stella spaziale con colonna centrale di ritorno; b) a stella spaziale senza colonna di ritorno; c) a stella complanare.

In fig.3.29a è riportata una sezione verticale passante per gli assi delle tre colonne della parte di potenza di un trasformatore trifase a stella complanare; su ciascuna colonna sono avvolte le bobine del primario (avvolgimento 1) e del secondario (avvolgimento 2); in fig.3.29b è riportata in pianta la stessa parte di potenza (per semplicità la colonna è stata disegnata di sezione circolare, mentre in realtà ha una sezione con più gradini, come indicato al cap.2, con riferimento ai circuiti magnetici. Dalla fig.3.29a si deduce anche che i circuiti magnetici delle tre fasi non sono identici, in quanto per la fase centrale (b) il circuito magnetico è costituito dalla sola colonna, mentre per ciascuna delle due fasi laterali (a e c) è costituito da una colonna e da due gioghi.

Dal confronto tra le configurazioni magnetiche tri-monofase e trifase a stella complanare, vi è da osservare che nel primo caso (fig.3.27) si parla di configurazione “a flusso libero” in

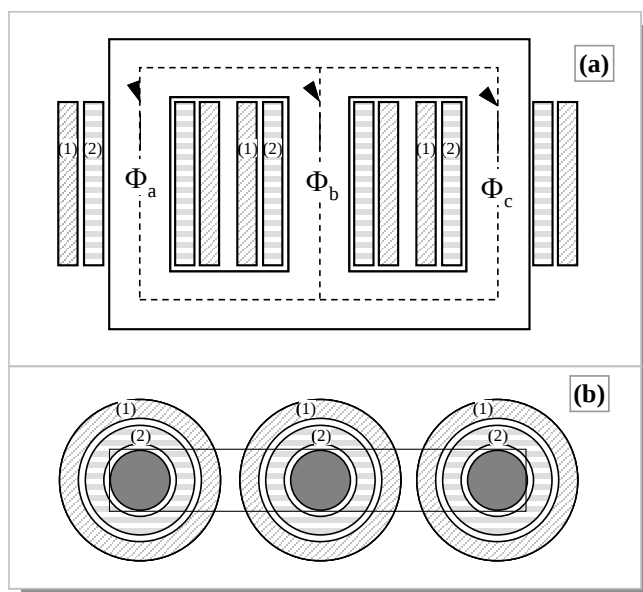


Fig. 3.29 – Trasformatore trifase a stella complanare;
(a) sezione verticale passante per gli assi delle tre colonne
(b) vista in pianta di colonna e avvolgimenti.

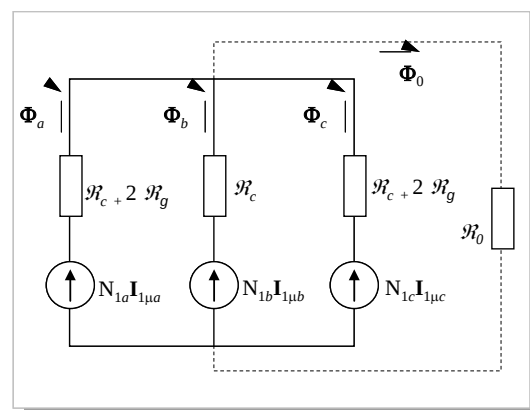


Fig. 3.30 – Equivalenza tra il circuito magnetico di un trasformatore trifase a stella complanare ed un circuito elettrico

quanto il flusso di ciascuna fase può liberamente circolare nel nucleo magnetico corrispondente, senza essere in alcun modo influenzato (né influenzare) il flusso delle altre due fasi; la struttura di fig. 3.29, invece, è detta “a flusso vincolato” in quanto i tre flussi Φ_a , Φ_b e Φ_c confluiscono in un solo punto e si influenzano reciprocamente. Se si considera la rete elettrica di fig. 3.30, equivalente al circuito magnetico del trasformatore trifase a stella complanare con $\mathcal{R}_c$ e $\mathcal{R}_g$ pari rispettivamente alla riluttanza della colonna e del giogo, si nota che, se i tre flussi sono simmetrici, la loro risultante è nulla, mentre se i tre flussi non rappresentano una terna simmetrica, la loro risultante è Φ_0 , che deve “richiudersi” attraverso la riluttanza $\mathcal{R}_0$, offerta dall’aria circostante il nucleo magnetico. Siccome $\mathcal{R}_0$ è di valore elevato, si può ritenere Φ_0 di ampiezza bassa, tale da potersi considerare nullo. A meno, quindi, di grossi squilibri delle correnti e, di conseguenza, dei flussi delle diverse fasi e, a meno della presenza di parti significative in ferro nello spazio circostante il nucleo magnetico, si può ritenere:

$$\Phi_a + \Phi_b + \Phi_c = \Phi_0 \approx 0$$

[Si ricorda che un generico sistema trifase di fasori è scomponibile in una terna simmetrica diretta, una terna simmetrica inversa e una terna omopolare di fasori; nel caso di flussi dissimmetrici, si ha che nella configurazione tri-monofase possono essere presenti tutte le tre componenti simmetriche (diretta, inversa, omopolare), mentre nel caso della stella complanare i flussi omopolari sono praticamente nulli e, quindi, sono presenti solo le componenti diretta e inversa.

Si ricorda, anche, che nel caso di distorsione della forma d’onda temporale dei flussi, la terza armonica e i suoi multipli

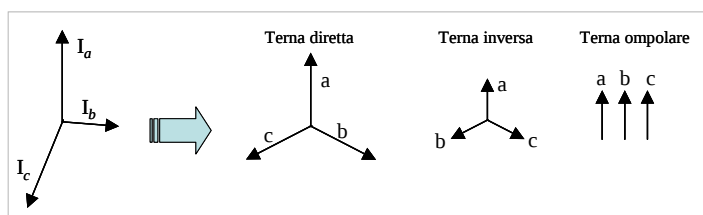


Fig. 3.31

non pari sono omopolari e, pertanto, possono essere o meno presenti a seconda del circuito magnetico adottato].

I trasformatori trifase sono prevalentemente realizzati con lamierini a cristalli orientati; per fare in modo che le linee di forza dell'induzione magnetica si sviluppino il più possibile nella direzione di laminazione è opportuno suddividere in più pezzi i lamierini; in fig.3.32 sono rappresentati schematicamente i pezzi di lamierino che giacciono su un piano.

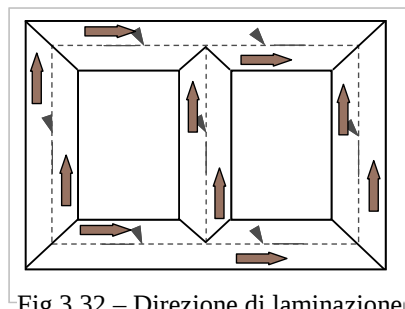


Fig.3.32 – Direzione di laminazione nei diversi tratti di lamierini

3.15 – AVVOLGIMENTI ELETTRICI

Gli avvolgimenti sono costituiti da bobine solenoidali intere (con altezza pari quasi a quella di colonna), in genere a più strati coassiali in senso radiale, specie per il lato “alta tensione”, o da bobine parziali (o “gallette”) a più strati, coassiali e sovrapposte in senso assiale con eventuali canali di raffreddamento (cfr. fig.3.33). Sono realizzati a filo tondo o a piattina, anche con più fili o con più piattine in parallelo. Su ciascuna colonna del circuito magnetico è avvolta la bobina del primario e quella del secondario; in genere l'avvolgimento a bassa tensione è quello più interno, cioè più vicino alla colonna, per ridurre i problemi di isolamento degli avvolgimenti verso massa (cfr. fig.3.29). La bobina primaria e quella secondaria della generica fase k sono magneticamente accoppiate e concatenano lo stesso flusso di mutua Φ_k . Si assume che non vi sia accoppiamento magnetico tra le diverse fasi (ipotesi ragionevole).

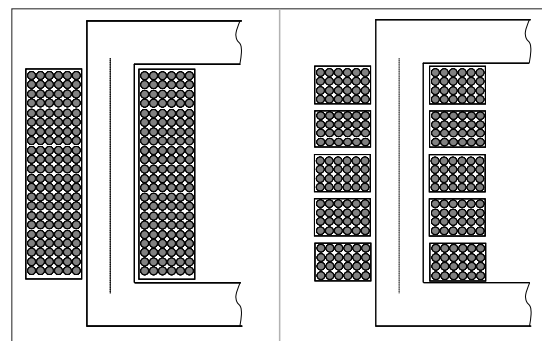


Fig. 3.33 – Avvolgimento multistrato a bobina intera e a gallette.

L'**avvolgimento primario** (insieme delle bobine primarie delle tre fasi) può essere collegato **a triangolo** o **a stella**; in quest'ultimo caso può essere anche a “**stella con neutro**”, nel caso in cui la linea di alimentazione sia a 4 fili, cioè trifase con neutro (cfr. fig.3.34). Il

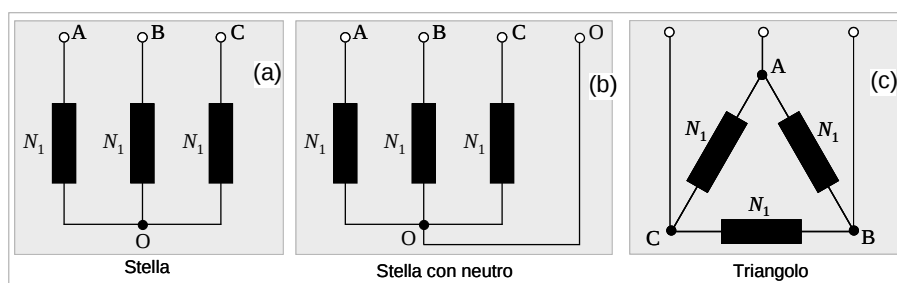


Fig.3.34 – Connessione a stella, a stella con neutro, a triangolo

collegamento a triangolo viene individuato dalla lettera D per il lato alta tensione o dalla lettera d per il lato bT. Per il collegamento a stella si utilizzano corrispondentemente le lettere Y o y. Si usano, poi, i simboli Y_n o y_n per il collegamento a stella con neutro.

Per l'**avvolgimento secondario** si possono avere gli stessi collegamenti di fig.3.34, con N_2 al posto di N_1 .

La rappresentazione circuitale di entrambi gli avvolgimenti trifase è riportata in fig. 3.35 nel caso del collegamento Dy_n e di quello Yy . Gli altri collegamenti si possono facilmente dedurre da quelli rappresentati (le diverse possibilità sono: Dd , Dy , Dy_n , Yd , Yy , Yy_n , $Y_n d$, $Y_n y$, $Y_n y_n$). In fig.3.35 l'allineamento verticale di una bobina del primario e di una del secondario sta ad indicare che entrambe le bobine sono avvolte sulla stessa colonna e, quindi, mutuamente accoppiate dal punto di vista magnetico.

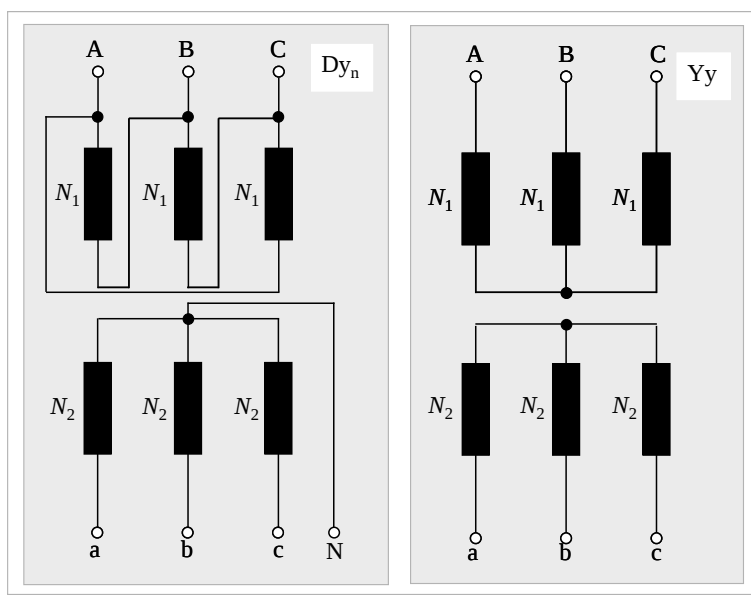


Fig.3.35 –
Collegamento DY_n e Yy degli
avvolgimenti di un
trasformatore trifase.

Quando un avvolgimento trifase simmetrico ($\equiv$ costituito da tre bobine uguali) è collegato a stella senza neutro (fig.3.34a), in esso non possono circolare “correnti omopolari” (cioè 3 correnti sinusoidali aventi fasi uguali); nel punto O di fig.3.34a, infatti, concorrerebbero tre correnti a somma non nulla, e non verrebbe rispettata la 1^a legge di Kirchhoff.

Se il neutro è connesso, come ad es. nel collegamento a stella con neutro (fig.3.34b), le correnti omopolari possono, invece, essere presenti in quanto si richiudono nel neutro; la corrente nel neutro viene, quindi, ad essere pari alla somma delle tre correnti omopolari di fase e la sua ampiezza è pari alla somma algebrica delle tre ampiezze. Le correnti omopolari potrebbero essere generate nel caso di dissimmetria delle correnti (cfr. fig.3.31) o potrebbero essere presenti quando le correnti sono distorte (cioè non sinusoidali). In quest'ultimo caso si ha che, scomponendo in serie di Fourier le correnti periodiche non sinusoidali e considerando solo le armoniche di ordine dispari come avviene nei casi pratici, se le fondamentali sono tra loro sfasate di $2\pi/3$, lo saranno anche tutte le armoniche di ordine 5, 7, 11, 13, 17, 19, (cioè $6k \pm 1$, con $k=1, 2, \dots, \infty$), mentre risulteranno in fase e, quindi, omopolari, la terza armonica e le armoniche multiple di 3, esprimibili come $(2k-1)3$, con $k=1, 2, \dots, \infty$. Una rappresentazione sintetica di quanto detto è in fig.3.36, dove sono rappresentate le fondamentali delle tre correnti di fase e le rispettive terze armoniche (pedice 1,2,3 per indicare la fase; apice 1,3 per indicare l'ordine delle armoniche).

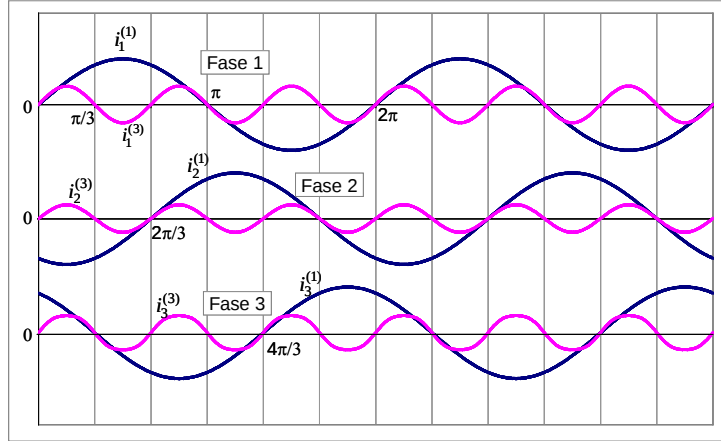


Fig.3.36: Andamento temporale delle prime e delle terze armoniche delle tre correnti di fase supposte simmetriche e distorte.

Nel caso di collegamento a triangolo, la linea risulta a tre fili e, quindi, non può essere sede di correnti omopolari come già nel precedente caso a stella semplice, mentre all'interno del triangolo (maglia ABC in fig.3.34c) le correnti omopolari possono circolare senza vincoli.

3.16 – RIFERIMENTI DI FASE TRA TENSIONI PRIMARIE E SECONDARIE – GRUPPI DI TRASFORMATORI.

Per quanto detto ai paragrafi precedenti (cfr. ad es. fig.3.29) la bobina del primario e quella del secondario della generica fase k sono avvolte coassialmente sulla stessa colonna e, quindi, concatenano lo stesso flusso Φ_k . Si ha, quindi, che la f.e.m. indotta nel primario di una generica fase è *in fase* con la f.e.m. indotta nel corrispondente secondario, se le due bobine sono avvolte nello stesso senso, o *in opposizione di fase* se il verso di avvolgimento delle due bobine è opposto. Nel caso di primario e secondario avvolti nello stesso senso riesce, infatti:

$$\mathbf{E}_{1,k} = -j\omega N_1 \Phi_k \quad ; \quad \mathbf{E}_{2,k} = -j\omega N_2 \Phi_k \quad \text{per } k = a, b, c$$

e:

$$\mathbf{E}_{1,a} = \frac{N_1}{N_2} \mathbf{E}_{2,a} \quad ; \quad \mathbf{E}_{1,b} = \frac{N_1}{N_2} \mathbf{E}_{2,b} \quad ; \quad \mathbf{E}_{1,c} = \frac{N_1}{N_2} \mathbf{E}_{2,c}$$

Le relazioni precedenti valgono indipendentemente dal tipo di collegamento tra le fasi.

Per ciascuna fase, inoltre, la differenza tra la tensione indotta e la tensione ai terminali della fase (tensione di fase) è piccola, in quanto dovuta alla caduta sulla resistenza e sulla reattanza di dispersione di fase, sia per il primario, sia per il secondario. Indicando con $\mathbf{V}_{f,k}$ la tensione di fase della fase k -esima, si può scrivere:

$$\mathbf{V}_{f1,k} \simeq \mathbf{E}_{1,k} \quad (\text{fase primaria}); \quad \mathbf{V}_{f2,k} \simeq \mathbf{E}_{2,k} \quad (\text{fase secondaria}) \quad \text{per } k = a, b, c \quad (3.53)$$

Di conseguenza, la terna di tensioni di fase del secondario risulta sempre “praticamente” in fase (o in opposizione) con quella del primario (cfr. fig.3.37, in cui l'ampiezza dei fasori delle due terne è arbitraria), indipendentemente dal collegamento tra le fasi.

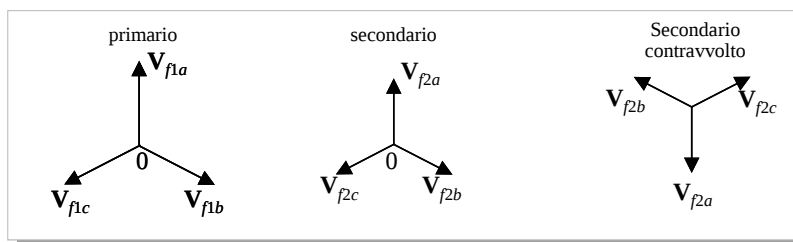


Fig.3.37 – Terna delle tensioni di fase primarie e delle tensioni di fase del secondario, avvolto nello stesso senso o in verso opposto al primario.

Per quanto riguarda le tensioni concatenate, invece, il collegamento è determinante: esse, infatti, coincidono con le tensioni di fase nel caso del collegamento a triangolo; hanno, invece, ampiezza e fase diverse dalla tensioni di fase nel caso di collegamento a stella (con o senza neutro). Se si prende in considerazione il ritardo della tensione concatenata secondaria rispetto alla primaria, si può verificare che esso (in gradi) è un multiplo di 30° per i diversi collegamenti utilizzabili per gli avvolgimenti. Il valore di questo multiplo è detto “**gruppo**” del trasformatore, ed è un numero intero compreso tra 0 e 11 (ad esempio gruppo 11 significa che la tensione concatenata secondaria è in ritardo rispetto a quella primaria di un angolo pari a $11 \cdot 30^\circ = 330^\circ$).

I gruppi consigliati dalle norme sono i gruppi 0, 5, 6, 11. Un collegamento Yy oppure Dd può costituire un gruppo 0 oppure un gruppo 6, e si scrive Yy0, Dd0, Yy6 oppure Dd6. Un collegamento Dy può rappresentare un gruppo 5 oppure 11. In fig. 3.38 sono rappresentate alcune possibilità di realizzazione dei gruppi 0, 6, 11.

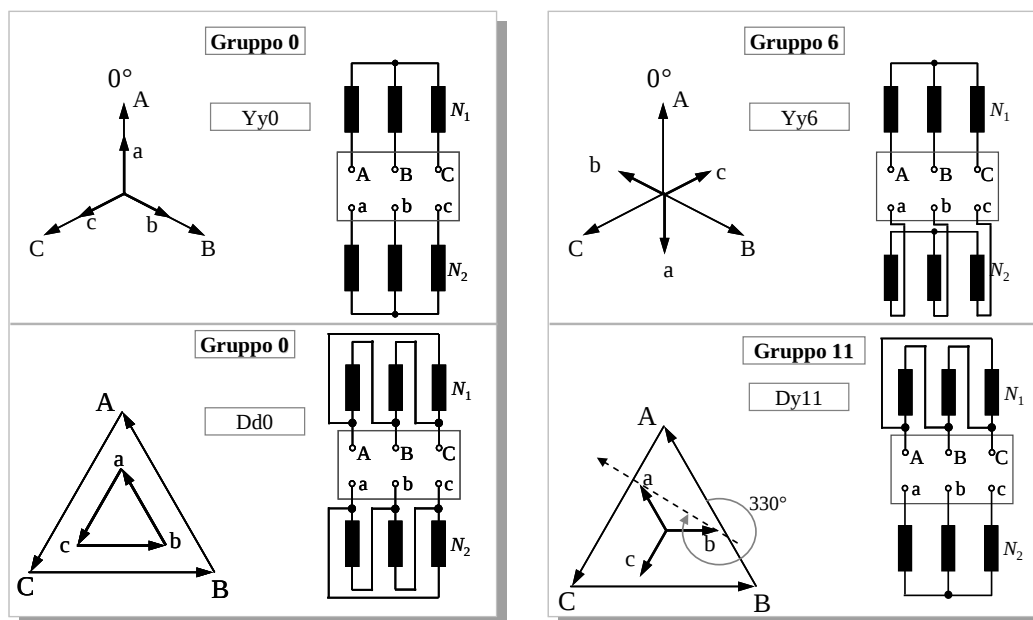


Fig.3.38 – Alcuni “gruppi” di trasformatori

In fig.3.39 sono riassunte le diverse possibilità di ottenimento dei gruppi 0, 5, 6 e 11. In questa figura si fa riferimento anche alla connessione a “zig-zag”, che non è stata trattata in questi appunti.

[nota: i trasformatori di distribuzione secondaria 20.000/400V sono realizzati con gruppo Dy_n11].

CODICE	CONNESSIONE	SIMBOLI		CONNESSIONI	
		avvolgimento primario	avvolgimento secondario	avvolgimento primario	avvolgimento secondario
0	Dd0				
	Yy0				
	Dz0				
5	Dy5				
	Yd5				
	Yz5				
6	Dd6				
	Yy6				
	Dz6				
11	Dy11				
	Yd11				
	Yz11				

Fig. 3.39

3.17 – SIMBOLI RAPPRESENTATIVI DEI TRASFORMATORI TRIFASE

Oltre a rappresentare i trasformatori come in fig.3.35, si possono usare i simboli in fig.3.40, in cui è fatto riferimento ad una rappresentazione con effettivo numero di fili (*a*) ed alla cosiddetta *rappresentazione unifilare* (*b*). Si nota la presenza dei simboli di stella e di triangolo all'interno dei cerchi; se richiesto dal contesto in cui il simbolo è inserito, è anche indicato il gruppo di appartenenza. Il simbolo (c) rappresenta un trasformatore a tre avvolgimenti, con i collegamenti dei due secondari diversi, uno a stella e uno a triangolo.

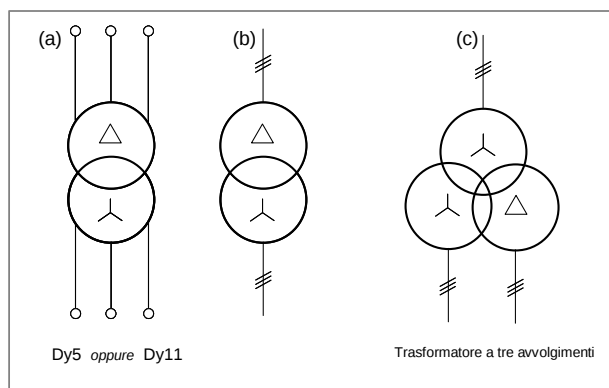
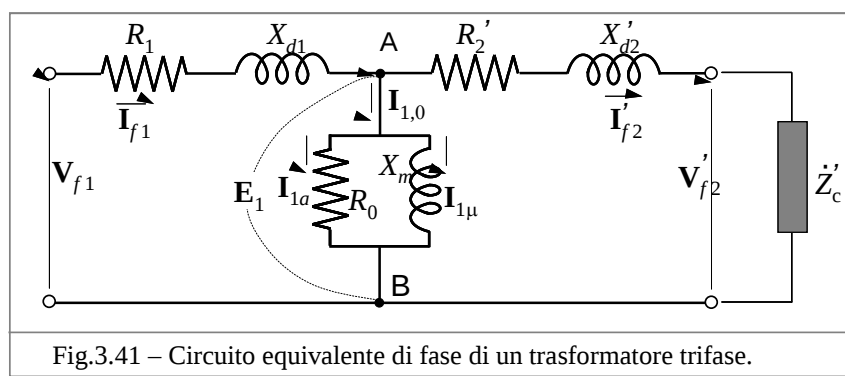


Fig. 3.40 - Simboli del trasformatore trifase a due e a tre avvolgimenti

3.18 – CIRCUITO EQUIVALENTE DEL TRASFORMATORE TRIFASE

Il circuito equivalente in grado di interpretare il funzionamento a regime permanente sinusoidale dei trasformatori trifase è riportato in fig.3.41.



Si tratta di un **circuito equivalente di fase**, in cui tutte le grandezze sono riferite ad una fase, ed è identico a quello di un trasformatore monofase mostrato in fig.3.5 (anche per i trasformatori trifase può essere effettuata la semplificazione del circuito equivalente, introducendo il circuito ad “L” di fig.3.8; anzi, essendo i trasformatori trifase di potenza in genere maggiore di quelli monofase, le ipotesi semplificative che giustificano il circuito ad “L” sono maggiormente valide).

In fig.3.41 tutti i parametri elettrici (resistenze, reattanze di dispersione, reattanza di mutua e resistenza per le perdite nel ferro) sono riferiti ad una fase e le grandezze elettriche (tensioni e correnti) sono anch’esse riferite ad una fase, indipendentemente dal collegamento degli avvolgimenti primario o secondario. Per ottenere le potenze e le perdite è necessario moltiplicare per 3. Ad esempio la potenza attiva assorbita è: $P_a = 3 V_{f1} \times I_{f1}$ e le perdite nel ferro sono pari a: $P_{Fe} = 3 R_0 I_{1,a}^2$.

3.19 – PARALLELO DI TRASFORMATORI TRIFASE

Come anticipato al paragrafo sul parallelo di trasformatori monofase, per effettuare il parallelo di due trasformatori è necessario che le tensioni ai morsetti secondari siano uguali in modulo e fase. Per i trasformatori trifase è, quindi, necessario che essi appartengano allo stesso gruppo, oltre ad avere lo stesso rapporto di trasformazione, al fine di evitare correnti di circolazione nei secondari. Rimangono valide le considerazioni sull’uguaglianza della tensione di cortocircuito e del fattore di potenza in cortocircuito per ottimizzare il funzionamento del parallelo.