

Trasformatore

Parte 2

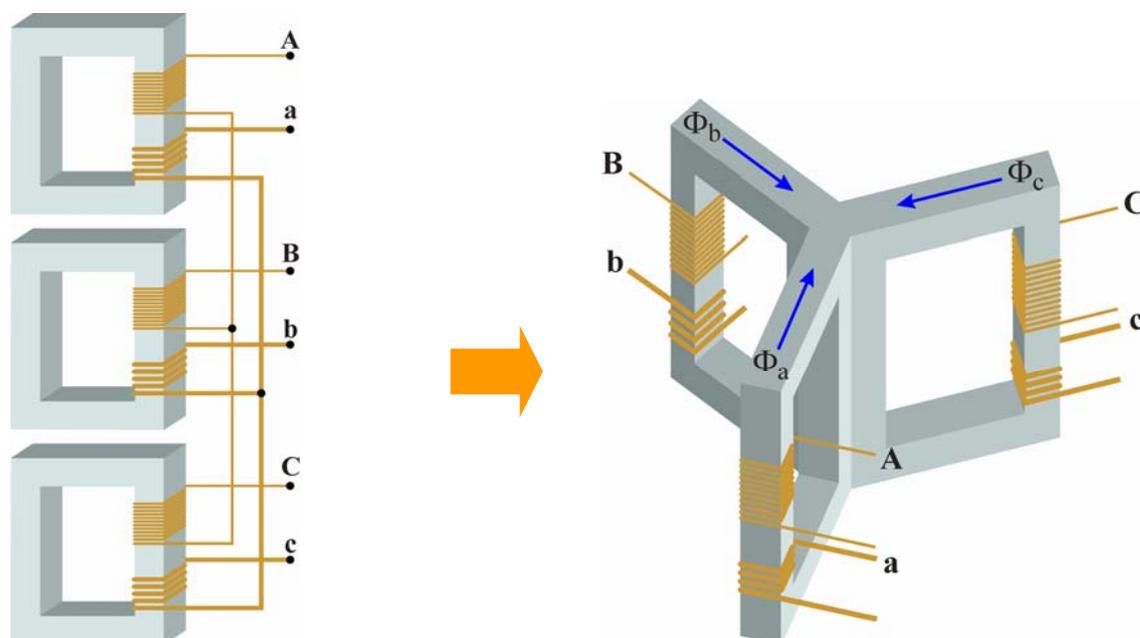
Trasformatori trifase

www.die.ing.unibo.it/pers/mastri/didattica.htm

(versione del 10-12-2013)

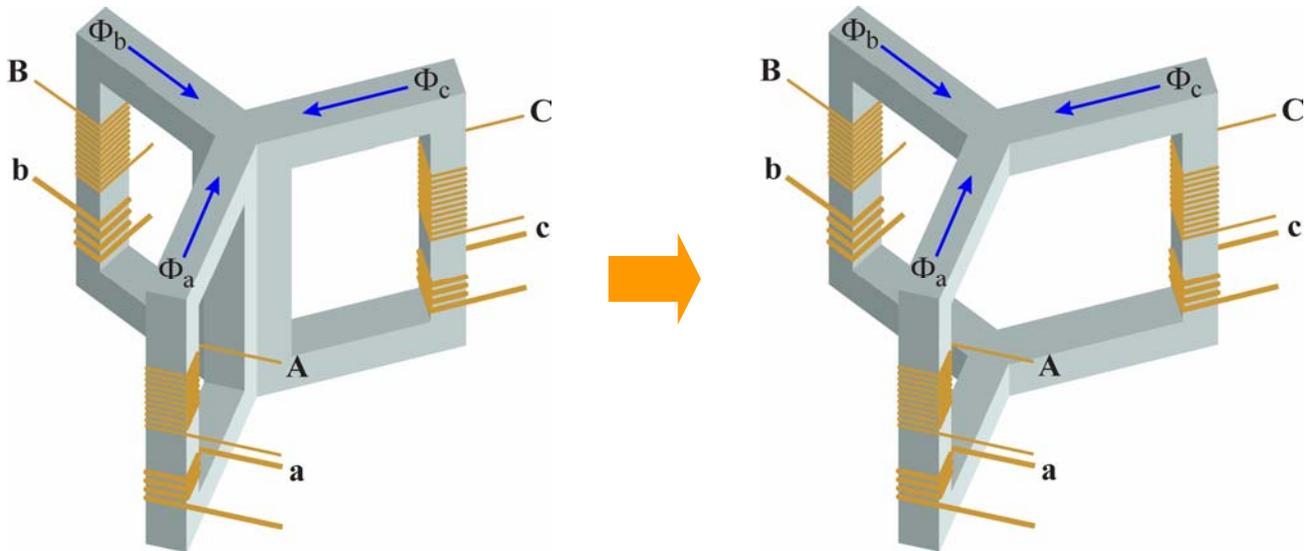
Trasformatore trifase (1)

- Per trasferire energia elettrica tra due reti trifase si possono utilizzare tre trasformatori monofase, uguali tra loro, opportunamente collegati
- Unendo i nuclei, si può ottenere un unico trasformatore trifase



Trasformatore trifase (2)

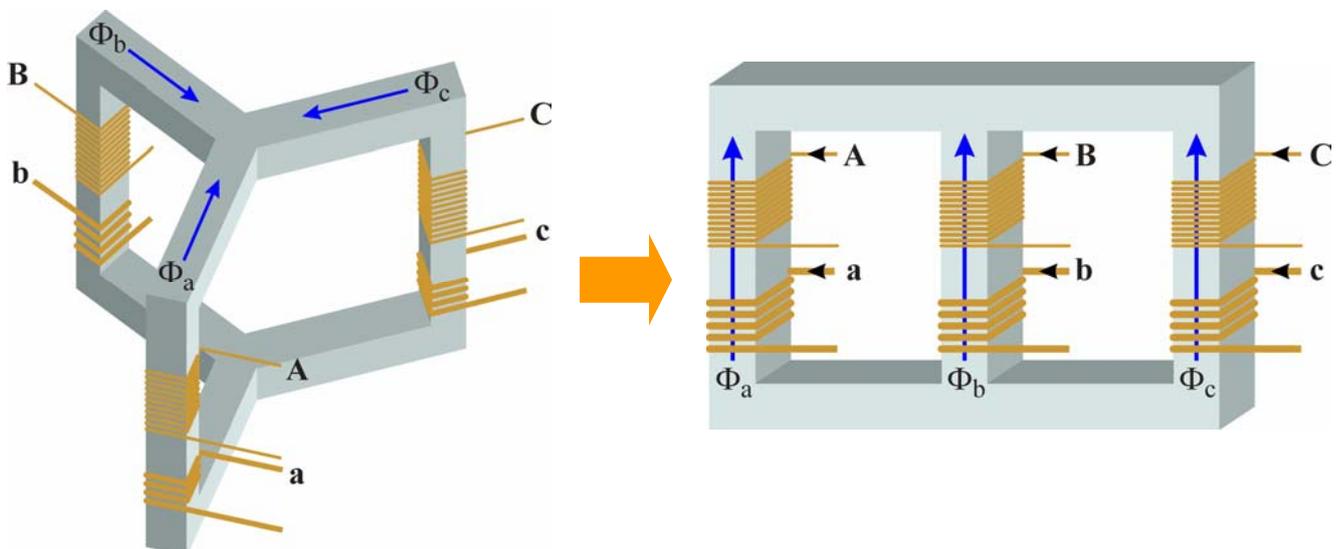
- Se gli avvolgimenti sono alimentati da una terna di tensioni simmetrica anche i flussi Φ_a , Φ_b , Φ_c formano una terna simmetrica
 - ➔ Il flusso nella colonna centrale è nullo
 - ➔ La colonna centrale può essere eliminata



3

Trasformatore trifase (3)

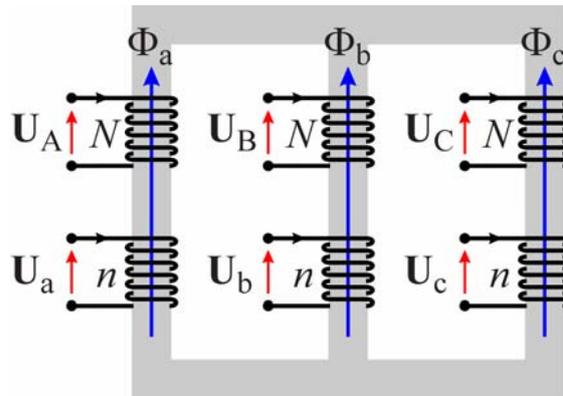
- La configurazione tridimensionale presenta difficoltà costruttive
 - ➔ Nella pratica viene utilizzata una configurazione planare
 - ◆ In questo modo si introduce un'asimmetria nel circuito magnetico, che, comunque, ha effetti trascurabili



4

Trasformatore trifase (4)

- Numero di spire degli avvolgimenti primari: N
- Numero di spire degli avvolgimenti secondari: n
- f.e.m. indotte negli avvolgimenti primari: U_A, U_B, U_C
- f.e.m. indotte negli avvolgimenti secondari: U_a, U_b, U_c



$$U_A = j\omega N\Phi_a \quad \frac{U_A}{U_a} = \frac{N}{n}$$
$$U_a = j\omega n\Phi_a$$

(lo stesso risultato si ottiene per le altre coppie di f.e.m.)

- ➔ I rapporti fra le f.e.m. indotte coincidono con il rapporto spire

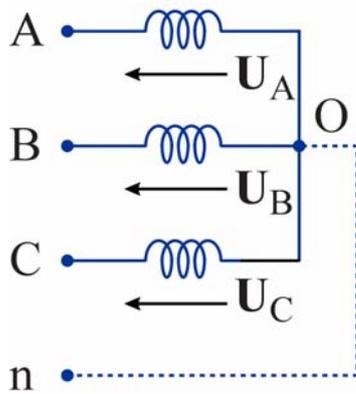
5

Collegamento delle fasi

- Le fasi del primario e del secondario possono essere collegate tra loro in vari modi
 - ◆ stella
 - ◆ triangolo
 - ◆ zig-zag
- Di seguito sono presi in esame i vari tipi di collegamento e per ciascuno sono ricavate le relazioni tra le f.e.m. indotte negli avvolgimenti e le tensioni concatenate
- Le f.e.m. indotte sono indicate con la lettera U , le tensioni concatenate con la lettera V e le tensioni stellate con la lettera E
- In ogni caso si assumerà che il primario sia alimentato con una terna simmetrica diretta di tensioni concatenate e che, quindi, anche le f.e.m. indotte costituiscano terne simmetriche dirette

6

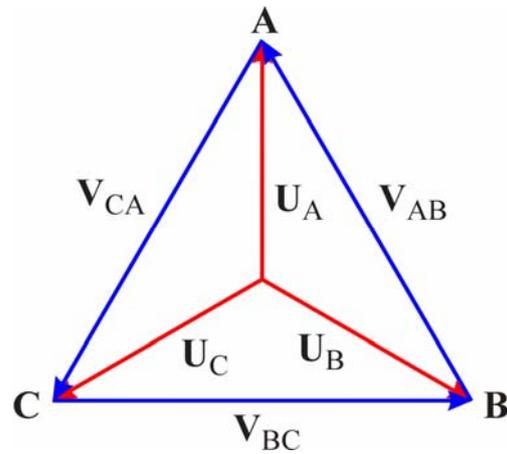
Collegamento a stella



$$\mathbf{E}_A = \mathbf{U}_A$$

$$\mathbf{E}_B = \mathbf{U}_B$$

$$\mathbf{E}_C = \mathbf{U}_C$$



$$\mathbf{V}_{AB} = \mathbf{U}_A - \mathbf{U}_B = \sqrt{3}\mathbf{U}_A e^{j\frac{\pi}{6}}$$

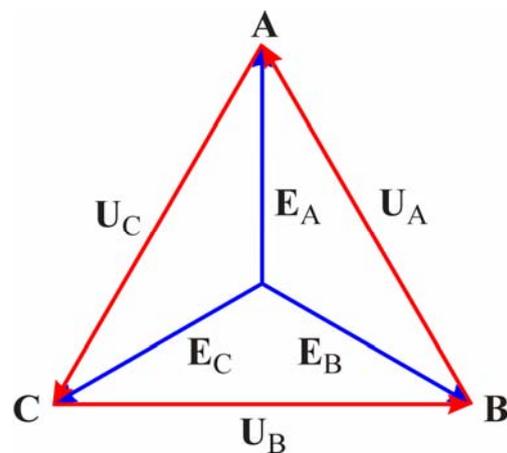
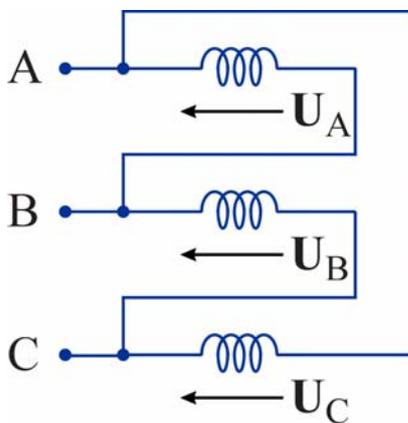
$$\mathbf{V}_{AC} = \mathbf{U}_B - \mathbf{U}_C = \sqrt{3}\mathbf{U}_B e^{j\frac{\pi}{6}}$$

$$\mathbf{V}_{CA} = \mathbf{U}_C - \mathbf{U}_A = \sqrt{3}\mathbf{U}_C e^{j\frac{\pi}{6}}$$

7

Collegamento a triangolo (1)

Tipo 1



$$\mathbf{V}_{AB} = \mathbf{U}_A$$

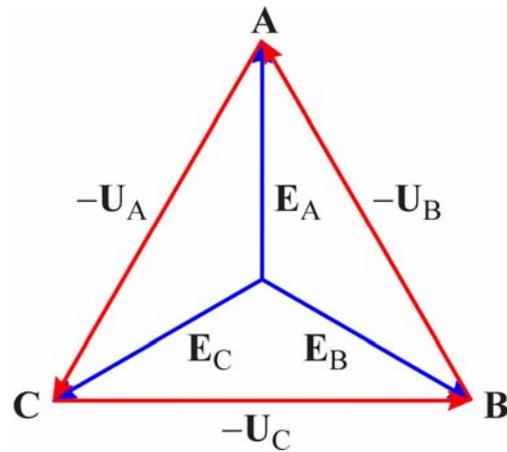
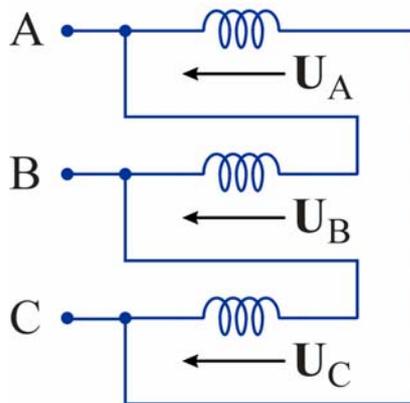
$$\mathbf{V}_{BC} = \mathbf{U}_B$$

$$\mathbf{V}_{CA} = \mathbf{U}_C$$

8

Collegamento a triangolo (2)

Tipo 2



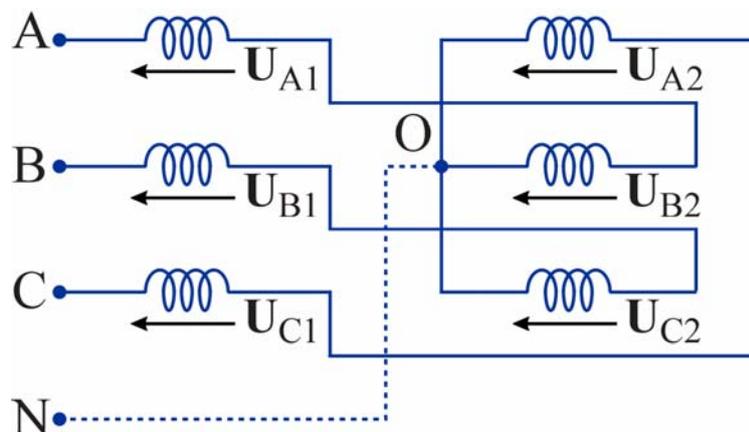
$$V_{AB} = -U_B = U_A e^{j\frac{\pi}{3}}$$

$$V_{BC} = -U_C = U_B e^{j\frac{\pi}{3}}$$

$$V_{CA} = -U_A = U_C e^{j\frac{\pi}{3}}$$

9

Collegamento a zig-zag (1)



- Gli avvolgimenti sono divisi in due parti uguali
- La prima sezione di ciascun avvolgimento è collegata in serie discorde con la seconda sezione dell'avvolgimento posto sulla colonna successiva
- Gli avvolgimenti risultanti sono collegati a stella

10

Collegamento a zig-zag (2)

Tensioni stellate

$$U_{A1} = U_{A2} = U_A / 2$$

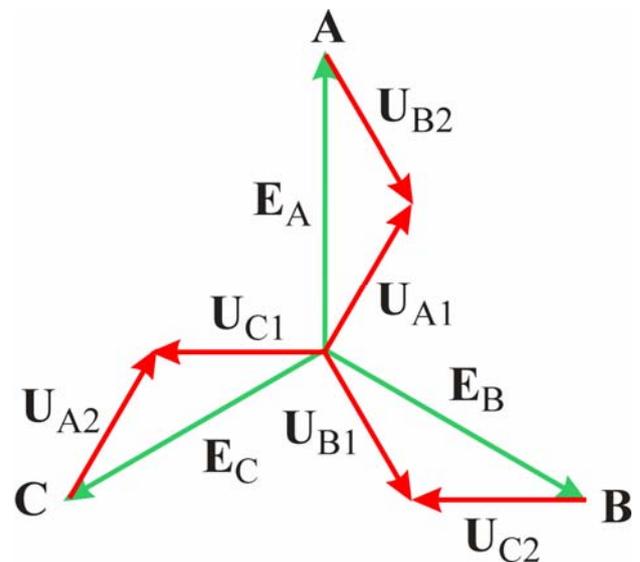
$$U_{B1} = U_{B2} = U_B / 2$$

$$U_{C1} = U_{C2} = U_C / 2$$

$$E_A = U_{A1} - U_{B2} = \frac{\sqrt{3}}{2} U_A e^{j\frac{\pi}{6}}$$

$$E_B = U_{B1} - U_{C2} = \frac{\sqrt{3}}{2} U_B e^{j\frac{\pi}{6}}$$

$$E_C = U_{C1} - U_{A2} = \frac{\sqrt{3}}{2} U_C e^{j\frac{\pi}{6}}$$



11

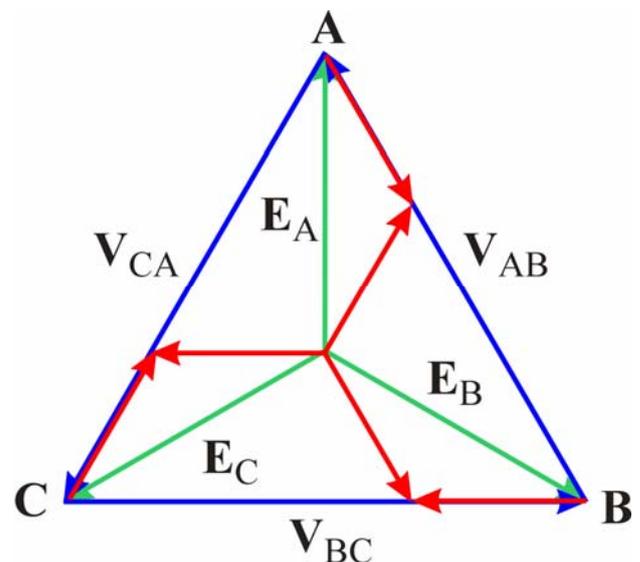
Collegamento a zig-zag (3)

Tensioni concatenate

$$V_{AB} = \sqrt{3} E_A e^{j\frac{\pi}{6}} = \frac{3}{2} U_A e^{j\frac{\pi}{3}}$$

$$V_{BC} = \sqrt{3} E_B e^{j\frac{\pi}{6}} = \frac{3}{2} U_B e^{j\frac{\pi}{3}}$$

$$V_{CA} = \sqrt{3} E_C e^{j\frac{\pi}{6}} = \frac{3}{2} U_C e^{j\frac{\pi}{3}}$$



12

Rapporto di trasformazione

- **Rapporto di trasformazione:** rapporto tra il valore efficace di una tensione concatenata o stellata primaria e il valore efficace della tensione secondaria omologa valutato nella condizione di funzionamento a vuoto
(➔ si trascurano le cadute di tensione interne del trasformatore)

$$K = \frac{V_{AB}}{V_{ab}} = \frac{E_A}{E_a}$$

- ◆ il suo valore può essere diverso dal rapporto spire e dipende dal tipo di collegamento adottato per le fasi del primario e del secondario

13

Spostamento angolare

- **Spostamento angolare:** angolo (in gradi) di sfasamento tra una tensione concatenata o stellata primaria e la tensione secondaria omologa

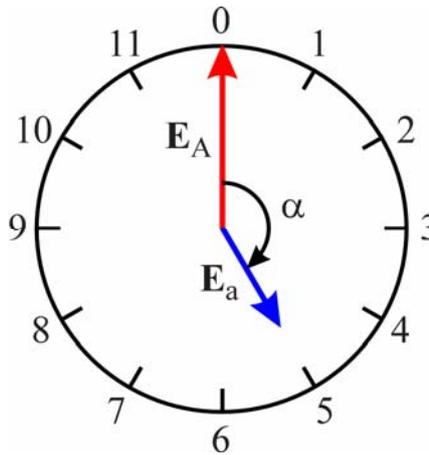
$$\alpha = \arg\left(\frac{\mathbf{V}_{AB}}{\mathbf{V}_{ab}}\right)^\circ = \arg\left(\frac{\mathbf{E}_A}{\mathbf{E}_a}\right)^\circ \quad (0^\circ \leq \alpha < 360^\circ)$$

- ◆ dipende dal tipo di collegamento adottato
- ◆ il suo valore è sempre un multiplo di 30°

14

Gruppo (indice orario)

- **Gruppo** (o **indice orario**): rapporto tra lo spostamento angolare e 30°
 - ◆ può assumere valori da 0 a 11
 - ◆ in pratica i gruppi più frequentemente utilizzati sono
 - 0 ➔ $\alpha = 0^\circ$
 - 5 ➔ $\alpha = 150^\circ$
 - 6 ➔ $\alpha = 180^\circ$
 - 11 ➔ $\alpha = 330^\circ$



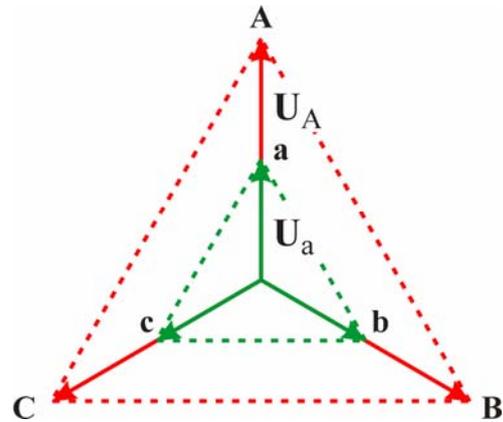
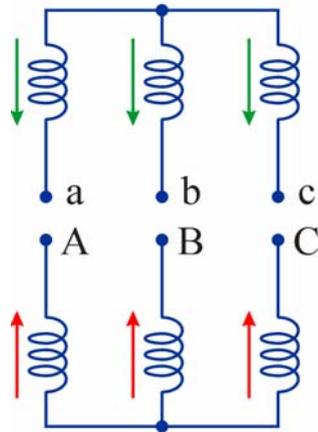
15

Esempi di collegamenti

- Di seguito sono presi in esame alcuni dei collegamenti di uso più comune e sono determinati i valori del rapporto di trasformazione, dello spostamento angolare e dell'indice orario
- Nei diagrammi vettoriali
 - ◆ il triangolo delle tensioni primarie è disegnato sempre con il vertice **A** in alto (➔ fase di $V_{BC} = 0^\circ$, fase di $E_A = 90^\circ$)
 - ◆ sono evidenziate con tratto continuo le f.e.m. primarie e secondarie
 - ◆ lo spostamento angolare è indicato come sfasamento tra E_a ed E_A

16

Collegamento stella - stella (Yy0)

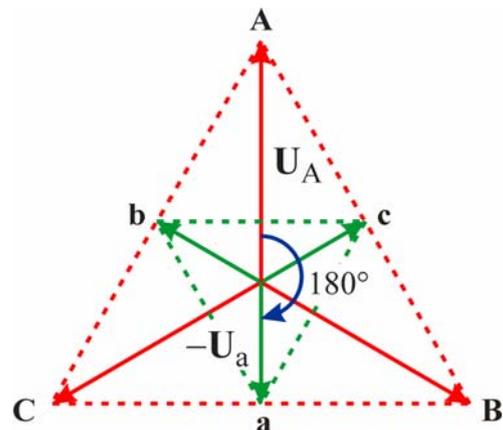
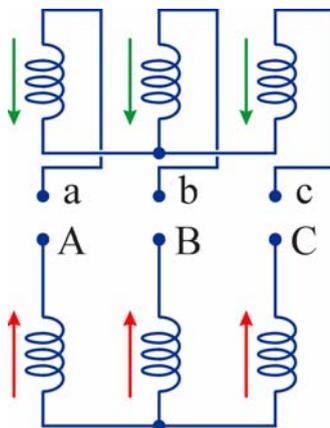


$$\frac{V_{AB}}{V_{ab}} = \frac{E_A}{E_a} = \frac{U_A}{U_a} = \frac{N}{n} \quad \Rightarrow \quad K = \frac{N}{n} \quad \alpha = 0^\circ \quad \Rightarrow \quad \text{gruppo 0}$$

17

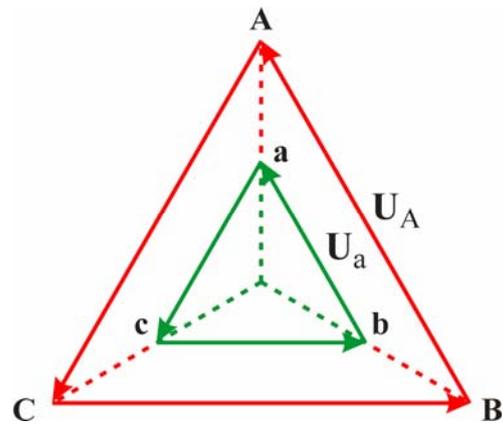
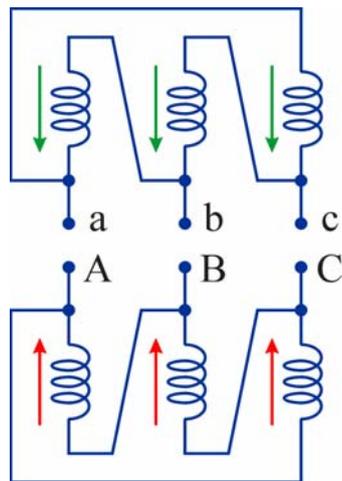
Collegamento stella - stella (Yy6)

- Se si invertono le polarità degli avvolgimenti del secondario si ottiene $\alpha = 180^\circ$ \Rightarrow gruppo 6



18

Collegamento triangolo - triangolo (Dd0)



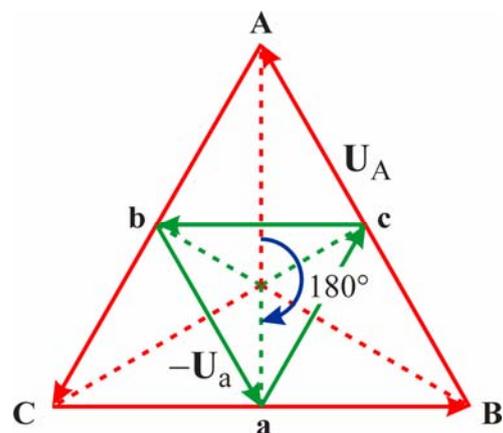
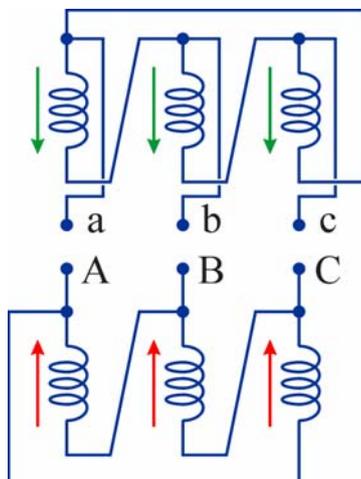
- Si utilizza il primo tipo di collegamento a triangolo

$$\frac{V_{AB}}{V_{ab}} = \frac{U_A}{U_a} = \frac{N}{n} \quad \Rightarrow \quad K = \frac{N}{n} \quad \alpha = 0^\circ \quad \Rightarrow \quad \text{gruppo 0}$$

19

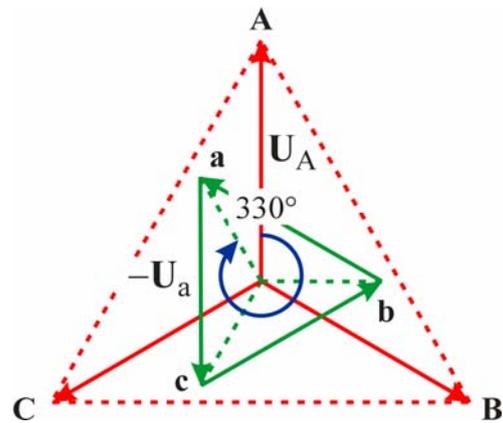
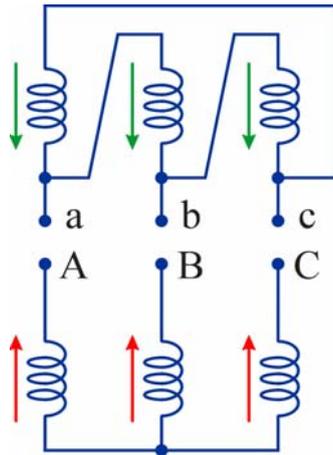
Collegamento triangolo - triangolo (Dd6)

- Se si invertono le polarità degli avvolgimenti del secondario si ottiene $\alpha = 180^\circ$ \Rightarrow gruppo 6



20

Collegamento stella - triangolo (Yd11)



- Si utilizza il secondo tipo di collegamento a triangolo

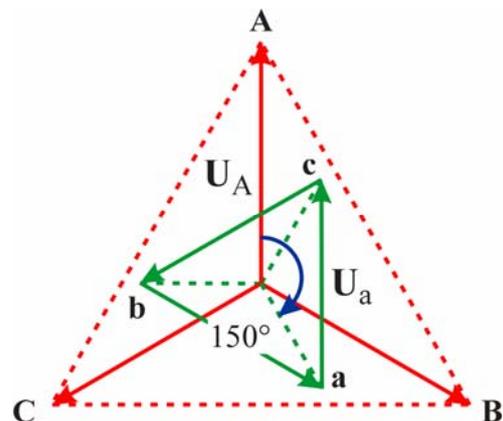
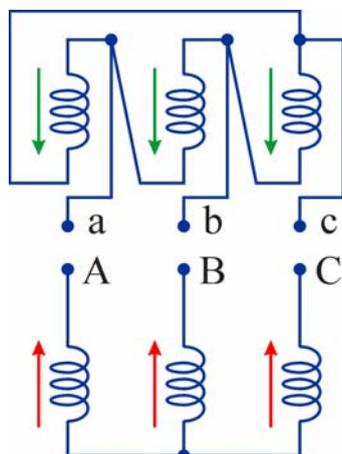
$$\frac{V_{AB}}{V_{ab}} = \frac{\sqrt{3}U_A e^{j\frac{\pi}{6}}}{-U_b} = \frac{\sqrt{3}U_A e^{j\frac{\pi}{6}}}{U_a e^{j\frac{\pi}{3}}} = \sqrt{3} \frac{N}{n} e^{j\frac{5\pi}{6}} \quad \Rightarrow \quad K = \sqrt{3} \frac{N}{n} \quad \alpha = 330^\circ$$

↓
gruppo 11

21

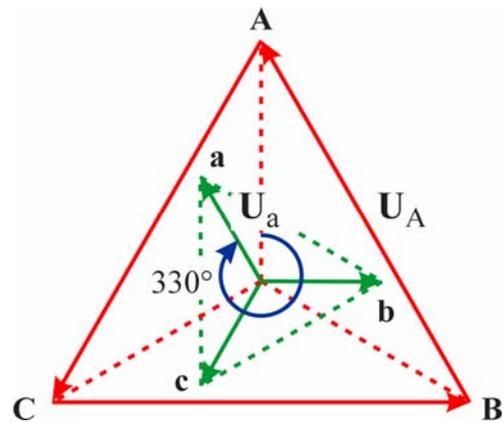
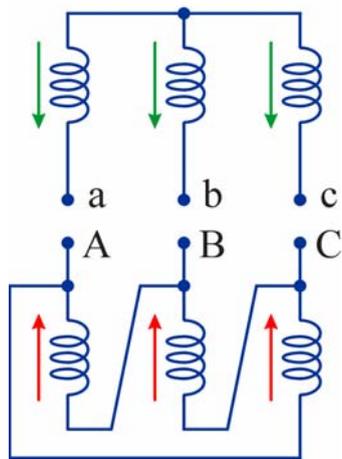
Collegamento stella - triangolo (Yd5)

- Se si invertono le polarità degli avvolgimenti del secondario si ottiene $\alpha = 150^\circ$ → gruppo 5



22

Collegamento triangolo - stella (Dy11)



- Si utilizza il primo tipo di collegamento a triangolo

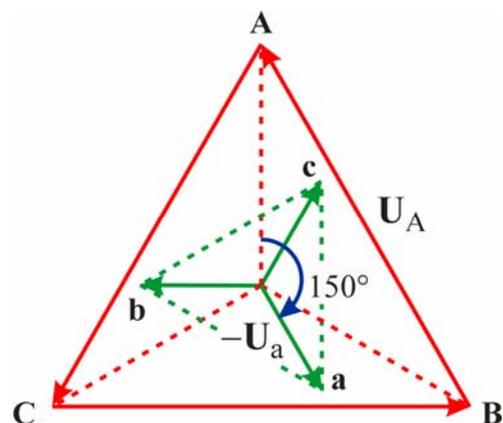
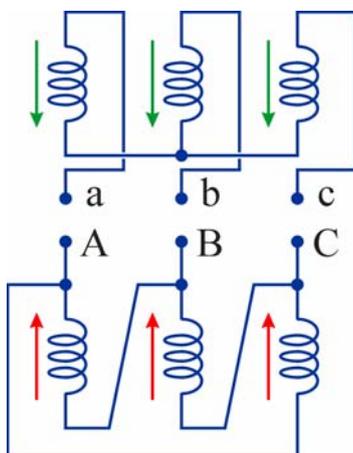
$$\frac{V_{AB}}{V_{ab}} = \frac{U_A}{\sqrt{3}U_a e^{j\frac{\pi}{6}}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{N}{n} e^{j\frac{5\pi}{6}} \quad \Rightarrow \quad K = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{N}{n} \quad \alpha = 330^\circ$$

↓
gruppo 11

23

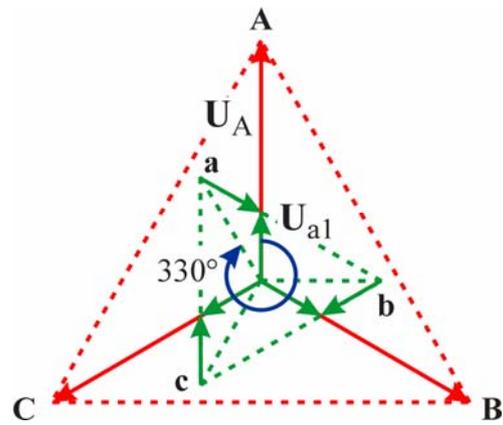
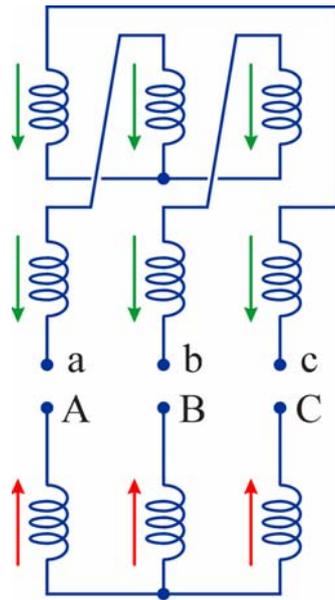
Collegamento triangolo - stella (Dy5)

- Se si invertono le polarità degli avvolgimenti del secondario si ottiene $\alpha = 150^\circ$ → gruppo 5



24

Collegamento stella - zig-zag (Yz11)



$$\frac{V_{AB}}{V_{ab}} = \frac{\sqrt{3}U_A e^{j\frac{\pi}{6}}}{\frac{3}{2}U_a e^{j\frac{\pi}{3}}} = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{N}{n} e^{j\frac{5\pi}{6}}$$



$$K = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{N}{n} \quad \alpha = 330^\circ$$

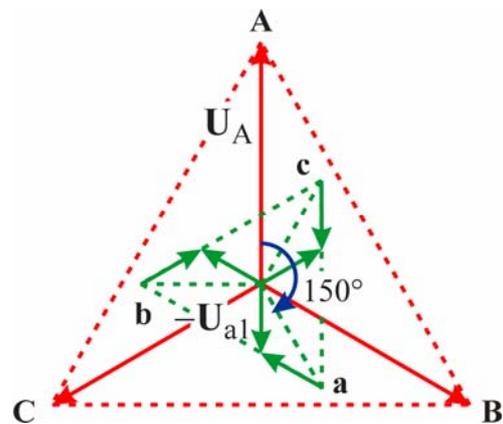
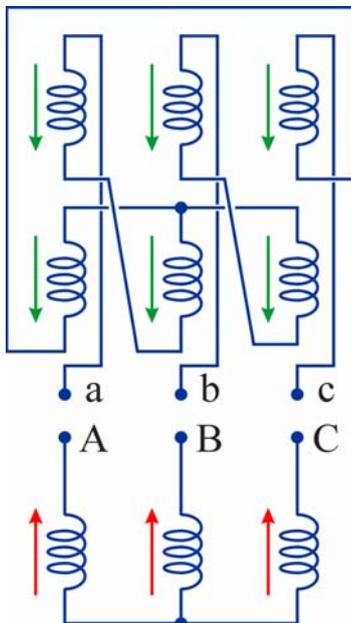


gruppo 11

25

Collegamento stella - zig-zag (Yz5)

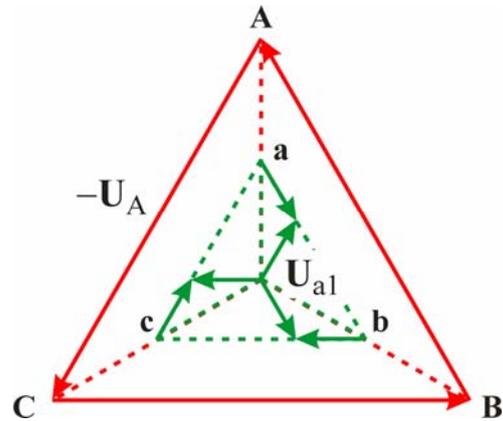
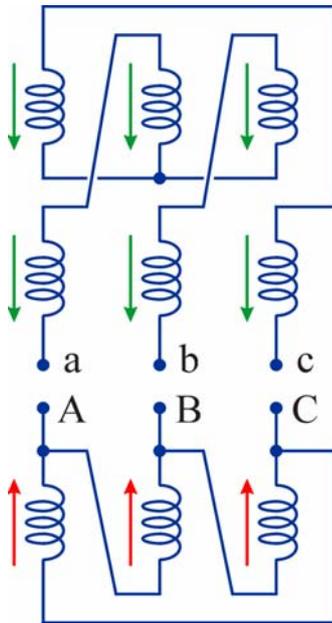
- Se si invertono le polarità degli avvolgimenti del secondario si ottiene $\alpha = 150^\circ$ → gruppo 5



26

Collegamento triangolo - zig-zag (Dz0)

- Si utilizza il secondo tipo di collegamento a triangolo



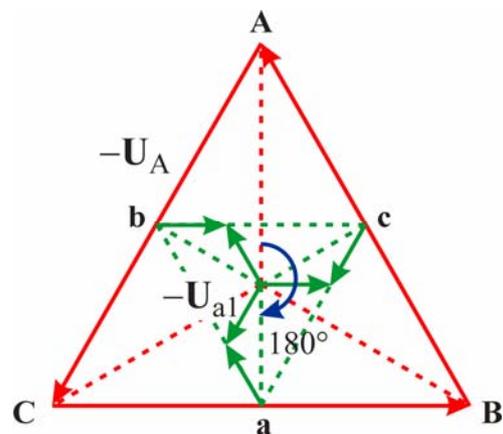
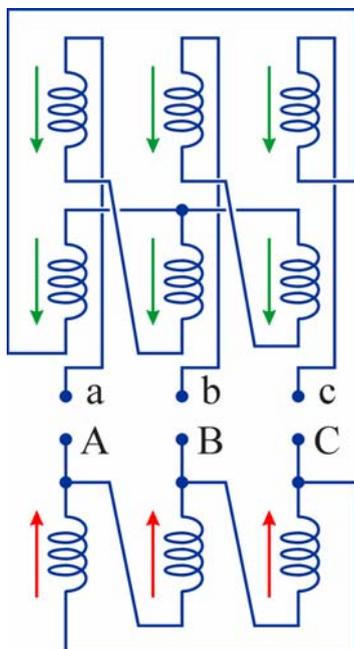
$$\frac{V_{AB}}{V_{ab}} = \frac{U_A e^{j\frac{\pi}{3}}}{\frac{3}{2} U_a e^{j\frac{\pi}{3}}} = \frac{2N}{3n} \Rightarrow K = \frac{2N}{3n} \quad \alpha = 0^\circ$$

↓
gruppo 0

27

Collegamento triangolo - zig-zag (Dz6)

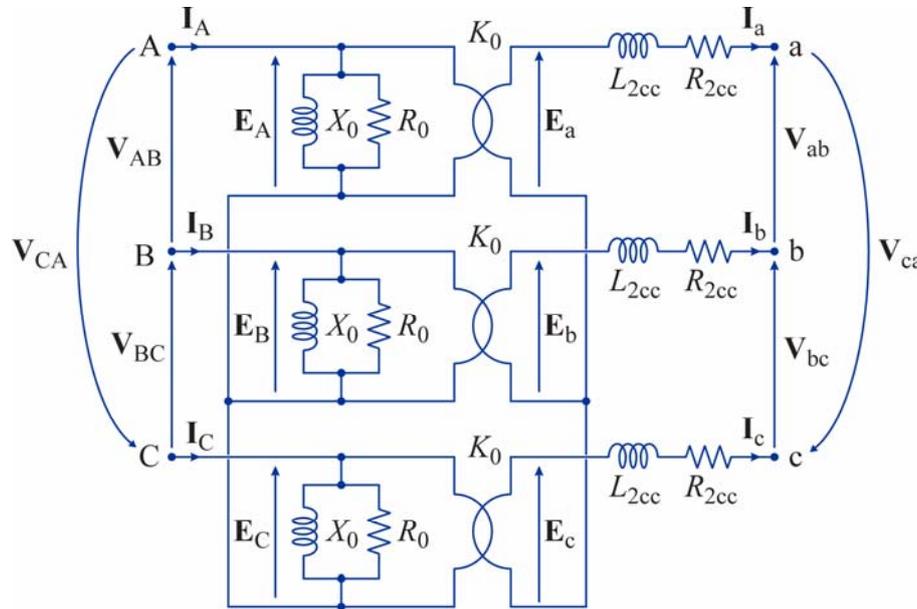
- Se si invertono le polarità degli avvolgimenti del secondario si ottiene $\alpha = 180^\circ$ → gruppo 6



28

Circuito equivalente

- Indipendentemente dal tipo di collegamento, è possibile studiare il comportamento di un trasformatore mediante un circuito equivalente ottenuto collegando a stella tre circuiti identici a quello utilizzato per rappresentare un trasformatore monofase



29

Circuito equivalente

- Se il trasformatore è alimentato da una terna simmetrica di tensioni concatenate e il carico è equilibrato si può fare uso della rete ridotta monofase
- In questo modo il trasformatore è rappresentato mediante un trasformatore equivalente monofase che ha
 - ◆ valori efficaci delle tensioni primaria e secondaria uguali a quelli delle tensioni stellate del trasformatore trifase
 - ◆ valori efficaci delle correnti primaria e secondaria uguali a quelli delle correnti del trasformatore trifase
 - ◆ potenza nominale, potenza erogata, perdite nel rame e nel ferro uguali a un terzo delle potenze corrispondenti del trasformatore trifase
- ➔ Si possono estendere al trasformatore trifase vari risultati ottenuti per il trasformatore monofase

30

Principali formule relative ai trasformatori trifase

- La **potenza nominale** di un trasformatore trifase è

$$S_n = 3E_{1n}I_{1n} = \sqrt{3}V_{1n}I_{1n} = \sqrt{3}V_{20}I_{2n}$$

- Nel **funzionamento a vuoto** si ha ancora

$$i_0 \% = \frac{I_{10}}{I_{1n}} \cdot 100 \quad P_0 \% = \frac{3E_{1n}I_{10} \cos \varphi_0}{3E_{1n}I_{1n}} \cdot 100 = \frac{P_0}{S_n} \cdot 100 \quad P_0 \% = i_0 \% \cdot \cos \varphi_0$$

- e nel **funzionamento in cortocircuito** valgono ancora le relazioni

$$v_{cc} \% = \frac{E_{1cc}}{E_{1n}} \cdot 100 = \frac{V_{1cc}}{V_{1n}} \cdot 100 \quad P_0 \% = \frac{3E_{1cc}I_{1n} \cos \varphi_{cc}}{3E_{1n}I_{1n}} \cdot 100 = \frac{P_{cc}}{S_n} \cdot 100$$

$$P_0 \% = V_{1cc} \% \cdot \cos \varphi_{cc}$$

- ➔ I parametri del circuito equivalente possono essere determinati in modo analogo a quello visto per i trasformatori monofase

31

Principali formule relative ai trasformatori trifase

- Il **rendimento convenzionale** può essere espresso come

$$\eta_c = \frac{P_2}{P_2 + P_{Cu} + P_{Fe}} = \frac{\sqrt{3}V_2 I_2 \cos \varphi_2}{\sqrt{3}V_2 I_2 \cos \varphi_2 + 3R_{2cc} I_2^2 + P_{Fe}}$$

- Per quanto riguarda la **caduta di tensione**, per la tensione del trasformatore monofase equivalente si ha

$$\Delta E = R_{2cc} I_2 \cos \varphi + X_{2cc} I_2 \sin \varphi$$

quindi risulta

$$\Delta V = \sqrt{3}I_2 (R_{2cc} \cos \varphi + X_{2cc} \sin \varphi)$$

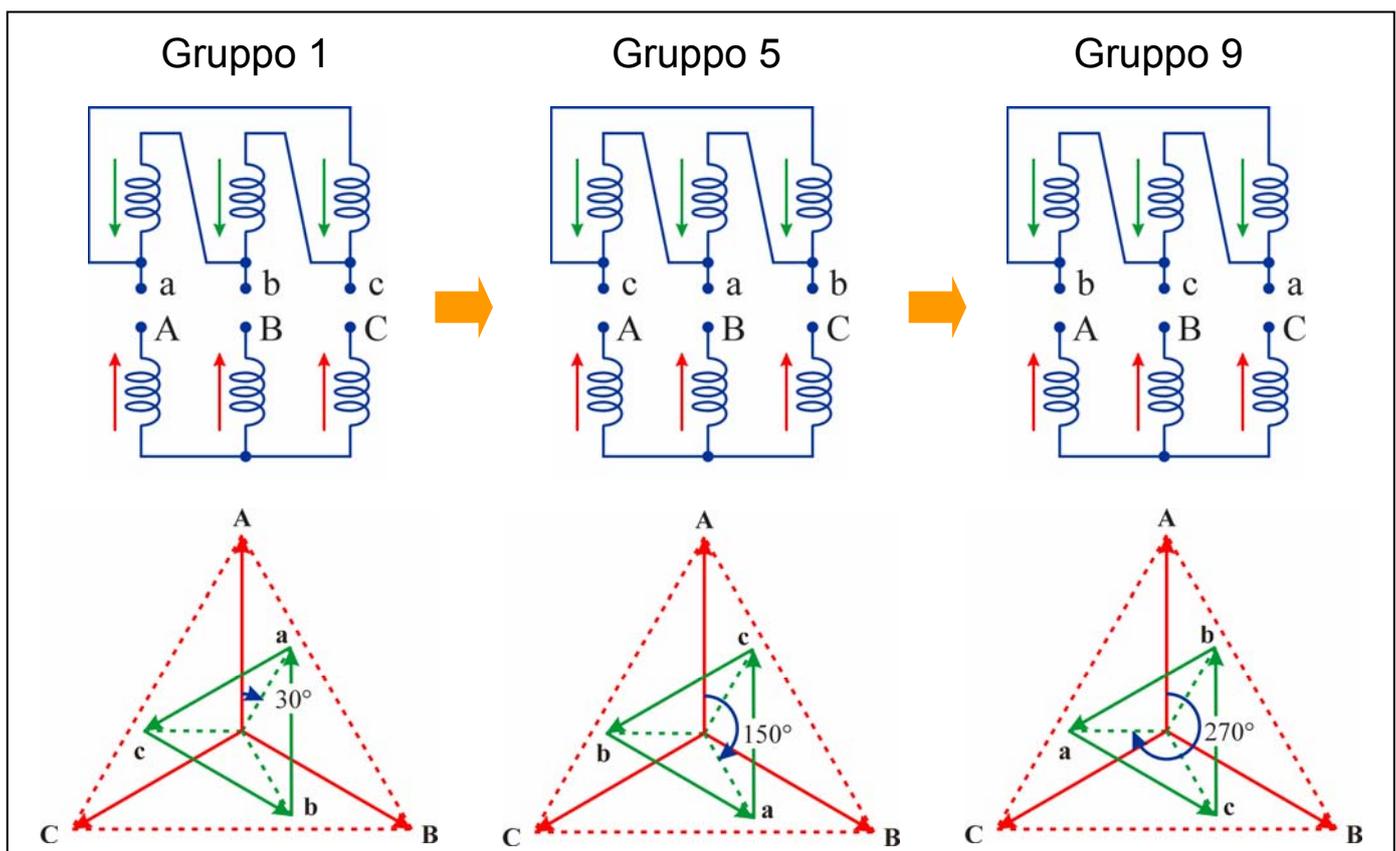
32

Categorie di trasformatori trifase

- Se si esegue una permutazione ciclica dei terminali del primario o del secondario di un trasformatore (es: $a \rightarrow b$, $b \rightarrow c$, $a \rightarrow c$) si ottiene una variazione di $\pm 120^\circ$ dello spostamento angolare e quindi una variazione di ± 4 del gruppo orario
- ➔ I trasformatori trifase possono essere raggruppati in quattro categorie:
 - ◆ Categoria I: gruppi 1, 5, 9
 - ◆ Categoria II: gruppi 2, 6, 10
 - ◆ Categoria III: gruppi 3, 7, 11
 - ◆ Categoria IV: gruppi 0, 4, 8
- Da un trasformatore appartenente ad una data categoria si può ottenere un trasformatore di un altro gruppo della stessa categoria mediante permutazione ciclica dei terminali

33

Esempio



34

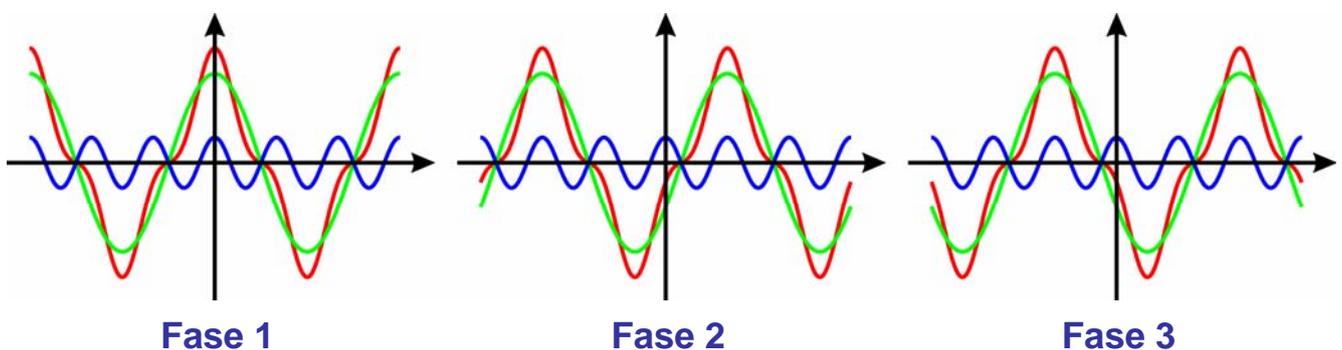
Parallelo di trasformatori trifase

- Come nel caso monofase, per ottenere il funzionamento ottimale occorre che i trasformatori
 - ◆ abbiano lo stesso rapporto di trasformazione
 - ◆ siano collegati in modo che le loro f.e.m. agiscano in opposizione nelle maglie formate dai secondari
 - ◆ abbiano lo stesso triangolo di cortocircuito
- Inoltre nel caso trifase i trasformatori devono appartenere alla stessa categoria, altrimenti non è possibile fare in modo che le f.e.m. nelle maglie formate dai secondari si bilancino
 - ◆ Se i trasformatori sono dello stesso gruppo si collegano tra loro i terminali omonimi
 - ◆ Se sono di gruppi diversi, occorre permutare opportunamente i terminali
 - ◆ Come unica eccezione, si può dimostrare che mediante opportuni scambi di terminali è possibile collegare in parallelo un trasformatore di categoria I con uno di categoria III

35

Effetti non lineari – primario a triangolo (1)

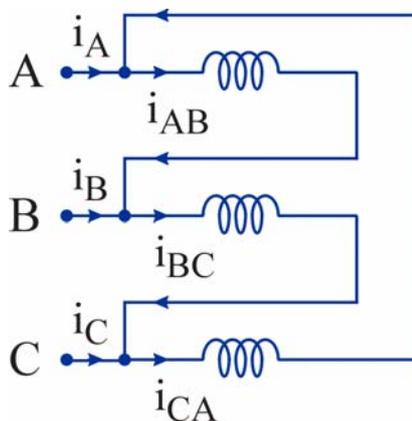
- Se le tensioni di alimentazione sono sinusoidali, anche i flussi sono sinusoidali
- ➔ Le f.e.m. indotte a secondario sono sinusoidali
- ➔ Per effetto della non linearità del nucleo, le correnti magnetizzanti e quindi le correnti di fase sono distorte (in particolare contengono componenti alla terza armonica in opposizione con la fondamentale)
- Se le correnti di fase sono sfasate tra loro di $\pm 2/3\pi$ le terze armoniche risultano in fase tra loro



36

Effetti non lineari – primario a triangolo (2)

- Le correnti di linea sono date da differenze tra due correnti di fase
 - Le terze armoniche delle correnti si annullano
 - Le correnti di linea sono sinusoidali



$$\left. \begin{aligned} i_{AB} &= i_{AB}^{(1)} + i_{AB}^{(3)} \\ i_{BC} &= i_{BC}^{(1)} + i_{BC}^{(3)} \\ i_{CA} &= i_{CA}^{(1)} + i_{CA}^{(3)} \\ i_{AB}^{(3)} &= i_{BC}^{(3)} = i_{CA}^{(3)} \end{aligned} \right\} \Rightarrow$$

$$\begin{aligned} i_A &= i_{AB} - i_{CA} = i_{AB}^{(1)} - i_{CA}^{(1)} \\ i_B &= i_{BC} - i_{AB} = i_{BC}^{(1)} - i_{AB}^{(1)} \\ i_C &= i_{CA} - i_{BC} = i_{CA}^{(1)} - i_{BC}^{(1)} \end{aligned}$$

- (1) fondamentali
- (3) terze armoniche

37

Effetti non lineari – primario a stella con neutro (1)

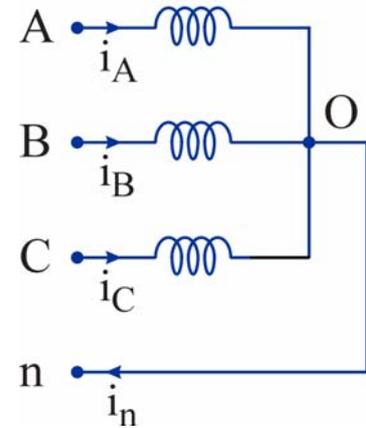
- Se le tensioni concatenate sono sinusoidali anche le tensioni di fase e i flussi sono sinusoidali
 - Le f.e.m indotte a secondario sono sinusoidali
 - Le correnti magnetizzanti e quindi anche le correnti di linea sono distorte (e in particolare contengono terze armoniche)
- Se le correnti di linea sono sfasate tra loro di $\pm 2/3\pi$ le terze armoniche risultano in fase tra loro
- Se le correnti di linea sono equilibrate, la corrente nel neutro è data dalla somma delle sole componenti alla terza armonica
 - Il neutro è sempre percorso da una corrente alla terza armonica (150 Hz) che può causare inconvenienti (es. disturbi a linee telefoniche)

38

Effetti non lineari – primario a stella con neutro (2)

$$\left. \begin{aligned}
 i_A &= i_A^{(1)} + i_A^{(3)} \\
 i_B &= i_B^{(1)} + i_B^{(3)} \\
 i_C &= i_C^{(1)} + i_C^{(3)}
 \end{aligned} \right\} \Rightarrow i_n = i_A^{(3)} + i_B^{(3)} + i_C^{(3)} = 3i_A^{(3)}$$

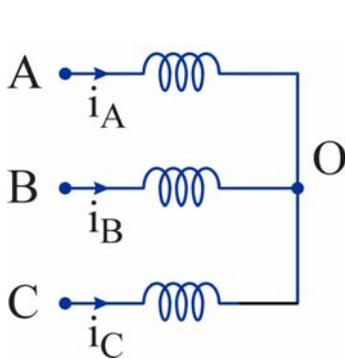
$$\left. \begin{aligned}
 i_n &= i_A + i_B + i_C \\
 i_A^{(1)} + i_B^{(1)} + i_C^{(1)} &= 0 \\
 i_A^{(3)} &= i_B^{(3)} = i_C^{(3)}
 \end{aligned} \right\}$$



39

Effetti non lineari – primario a stella senza neutro (1)

- In questo caso la somma delle correnti di linea deve essere nulla
- ➔ Le terza armoniche, in fase tra loro, non possono circolare nelle linee e quindi devono annullarsi



$$\left. \begin{aligned}
 i_A &= i_A^{(1)} + i_A^{(3)} \\
 i_B &= i_B^{(1)} + i_B^{(3)} \\
 i_C &= i_C^{(1)} + i_C^{(3)}
 \end{aligned} \right\} \Rightarrow i_A^{(3)} = i_B^{(3)} = i_C^{(3)} = 0$$

$$\left. \begin{aligned}
 i_A + i_B + i_C &= 0 \\
 i_A^{(3)} &= i_B^{(3)} = i_C^{(3)}
 \end{aligned} \right\}$$

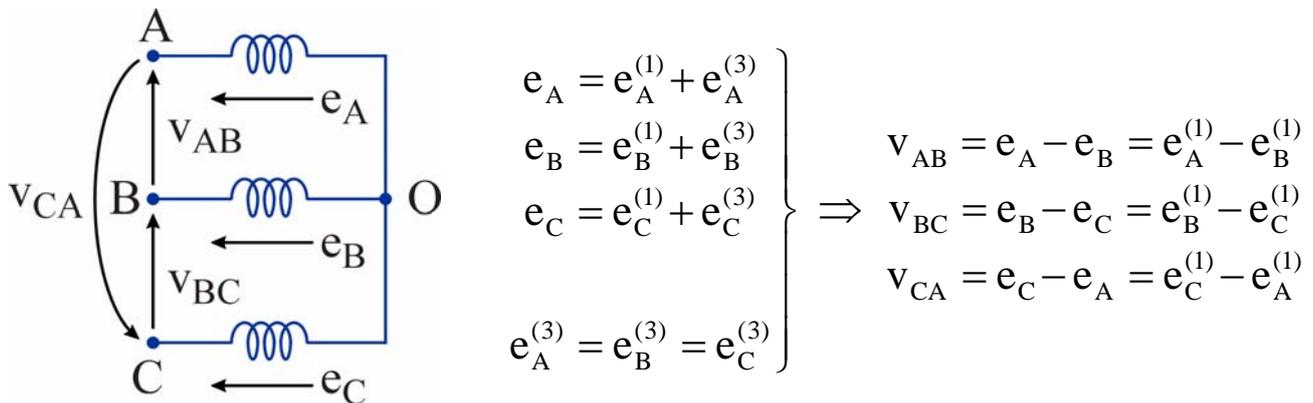
$$\begin{aligned}
 &\Downarrow \\
 i_A &= i_A^{(1)} \\
 i_B &= i_B^{(1)} \\
 i_C &= i_C^{(1)}
 \end{aligned}$$

- ➔ In queste condizioni devono essere distorti i flussi e quindi anche le tensioni di fase e le f.e.m. indotte a secondario

40

Effetti non lineari – primario a stella senza neutro (2)

- Se le tensioni di fase sono sfasate tra loro di $\pm 2/3\pi$ le terze armoniche risultano in fase tra loro
- ➔ Le tensioni concatenate sono sinusoidali
- ➔ Il fatto che le tensioni di fase siano distorte non è in contraddizione con l'ipotesi che il trasformatore sia alimentato con tensioni sinusoidali



41

Effetti non lineari – primario a stella senza neutro (3)

Secondario a stella

- Le tensioni di fase sono distorte
- Le tensioni concatenate sono sinusoidali

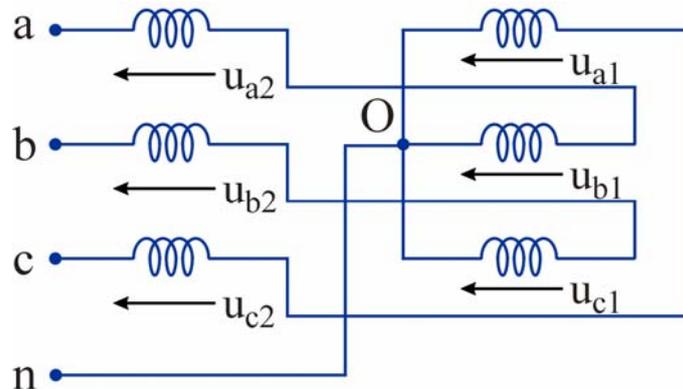
Secondario a zig-zag

- Se è necessario accedere alle tensioni di fase, e quindi utilizzare un secondario con neutro, è possibile ottenere tensioni di fase sinusoidali mediante il collegamento a zig-zag
- Anche in questo caso, se i flussi sono distorti tutte le tensioni indotte contengono terze armoniche in fase tra loro
- Le tensioni di fase sono date dalla differenza tra tensioni indotte su due avvolgimenti disposti su colonne diverse
- ➔ Le tensioni di fase contengono solo le componenti fondamentali, mentre le terze armoniche, si annullano

42

Effetti non lineari – primario a stella senza neutro (4)

Secondario a zig-zag



$$\left. \begin{aligned} e_a = u_{a2} - u_{b1} &= u_{a2}^{(1)} + u_{a2}^{(3)} - u_{b1}^{(1)} - u_{b1}^{(3)} \\ u_{a2}^{(3)} &= u_{b1}^{(3)} \end{aligned} \right\} \Rightarrow e_a = u_{a2}^{(1)} - u_{b1}^{(1)}$$

(Relazioni analoghe si ottengono anche per le altre fasi)

43

Effetti non lineari – primario a stella senza neutro (5)

Secondario a triangolo

- Le tensioni concatenate sono distorte
- Risultano distorte anche le correnti di fase, mentre le correnti di linea sono sinusoidali
- ➔ Si ha una corrente alla terza armonica che circola nella maglia formata dai tre avvolgimenti
- Per la legge di Lenz, questa corrente si oppone alla causa che la ha generata (cioè alla presenza di terze armoniche nel flusso) e quindi produce un flusso che tende a compensare le distorsioni
- ➔ La distorsione risulta di entità inferiore rispetto al collegamento a stella

44

Scelta dei collegamenti

- Per la scelta dei collegamenti da adottare, oltre alle precedenti considerazioni sulle armoniche, si deve considerare che:
 - ◆ A parità di tensioni concatenate, nel caso del collegamento a stella le tensioni di fase sono minori

$$E = \frac{V}{\sqrt{3}}$$

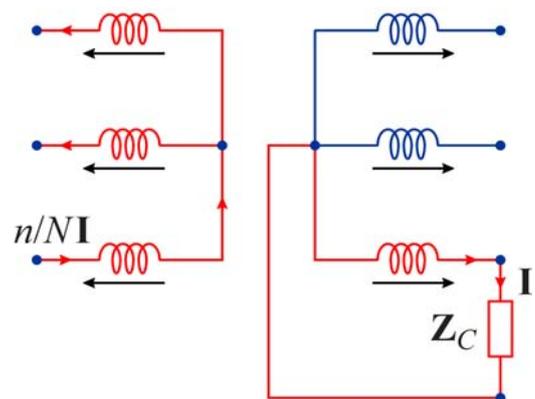
- ➔ gli avvolgimenti devono sostenere tensioni inferiori
- ➔ il collegamento a stella è conveniente per le alte tensioni
- ◆ Il collegamento a triangolo non rende disponibile il neutro
- ◆ Se le correnti dovute al carico collegato al secondario sono squilibrate, è conveniente che il primario sia collegato a triangolo
 - ➔ il collegamento triangolo-stella (con neutro) viene utilizzato nei trasformatori di distribuzione

45

Trasformatore con carico squilibrato (1)

Primario a stella

- Si collega un'impedenza di carico che assorbe una corrente \mathbf{I} tra il terminale di una fase del secondario e il neutro
- ➔ La fase corrispondente del primario è percorsa dalla corrente $n/N \mathbf{I}$
- Questa corrente deve richiudersi attraverso le altre fasi



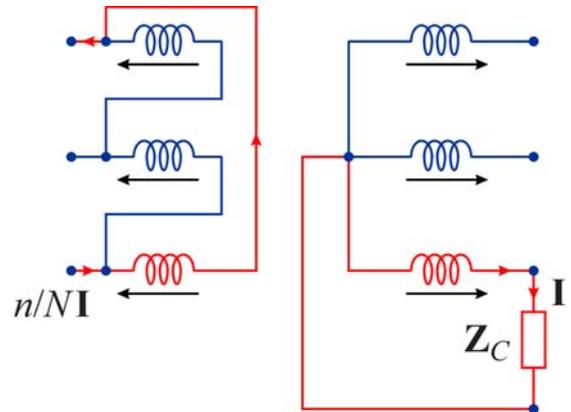
- ➔ Le correnti nelle altre fasi del primario, non essendo bilanciate da correnti a secondario, causano una variazione dei flussi e quindi delle forze elettromotrici indotte
- ➔ La terna delle tensioni di fase diviene asimmetrica (spostamento del centro di fase)

46

Trasformatore con carico squilibrato (2)

Primario a triangolo

- In questo caso la corrente al primario si richiude sui conduttori della linea e non attraversa le altre due fasi
- ➔ In presenza del carico non le tensioni di fase non sono perturbate

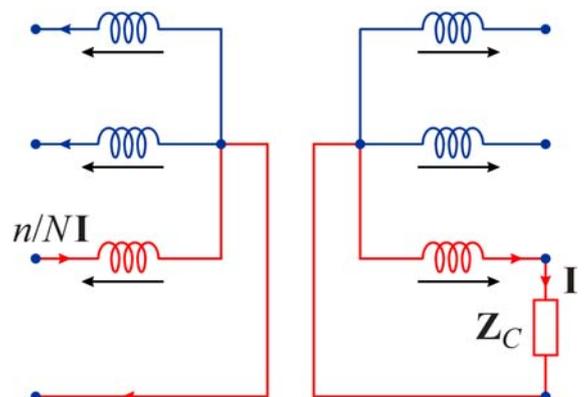


47

Trasformatore con carico squilibrato (3)

Primario a stella con neutro

- Lo stesso risultato può essere ottenuto impiegando un primario a stella con neutro
- In questo caso la corrente si richiude attraverso il neutro



48