

# Trasformatore

## Parte 4

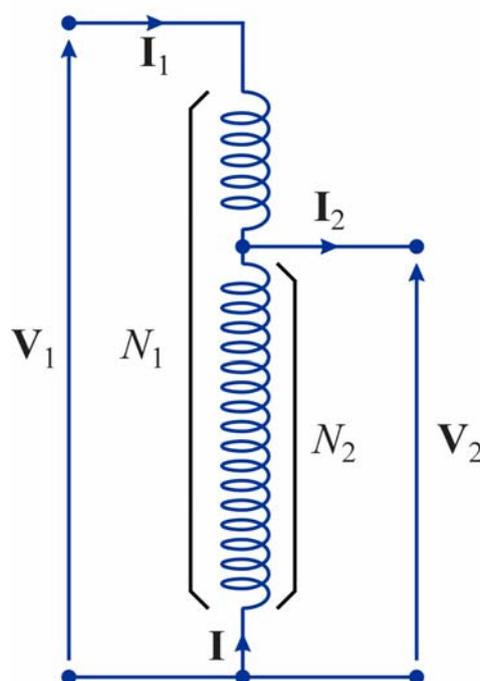
### Trasformatori speciali

[www.die.ing.unibo.it/pers/mastri/didattica.htm](http://www.die.ing.unibo.it/pers/mastri/didattica.htm)

(versione del 10-12-2013)

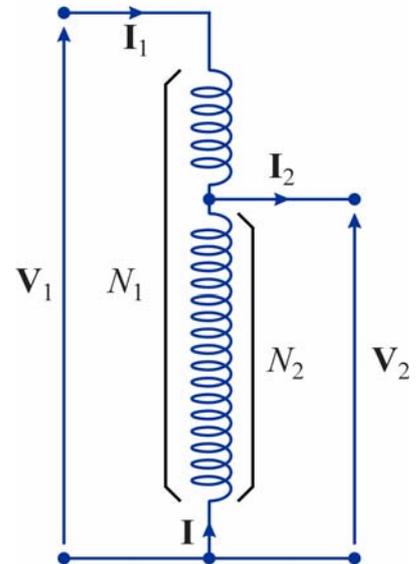
### Autotrasformatore (1)

- L'autotrasformatore è un trasformatore dotato di un solo avvolgimento con una presa intermedia
- Può essere considerato come un trasformatore in cui primario e secondario sono uniti in un unico avvolgimento
  - ◆ Il primario è costituito dall'intero avvolgimento di  $N_1$  spire
  - ◆ Il secondario è costituito da una parte dell'avvolgimento formata da  $N_2$  spire
- In questo caso i circuiti primario e secondario non sono elettricamente separati



## Autotrasformatore (2)

- Per mettere in evidenza gli aspetti essenziali del funzionamento, si considera il caso ideale in cui si possono trascurare
  - ◆ le cadute di tensione interne degli avvolgimenti
  - ◆ le perdite del ferro
  - ◆ la riluttanza del circuito magnetico
- Per questi effetti valgono, comunque, considerazioni simili a quelle fatte nella trattazione dei trasformatori ordinari
- In queste condizioni le equazioni interne sono
  - ◆ circuito primario      ➔  $V_1 = j\omega N_1 \Phi$
  - ◆ circuito secondario   ➔  $V_2 = j\omega N_2 \Phi$
  - ◆ circuito magnetico   ➔  $(N_1 - N_2)I_1 - N_2 I = 0$
  - ◆ legge di Kirchhoff per le correnti   ➔  $I_2 = I_1 + I$



3

## Autotrasformatore (3)

- Quindi si ottiene

$$V_1 = j\omega N_1 \Phi$$

$$V_2 = j\omega N_2 \Phi$$

$$(N_1 - N_2)I_1 - N_2 I = 0$$

$$I_2 = I_1 + I$$

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

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

$$I = \left(1 - \frac{N_2}{N_1}\right) I_2 = \frac{K-1}{K} I_2$$

- ➔ Le relazioni tra le tensioni e le correnti a primario e secondario coincidono con quelle di un trasformatore con due avvolgimenti di  $N_1$  e  $N_2$  spire
- ➔ Il tratto dell'avvolgimento in comune tra primario e secondario è percorso da una corrente il cui valore efficace è minore di  $I_2$  e diminuisce al tendere a 1 del rapporto di trasformazione

4

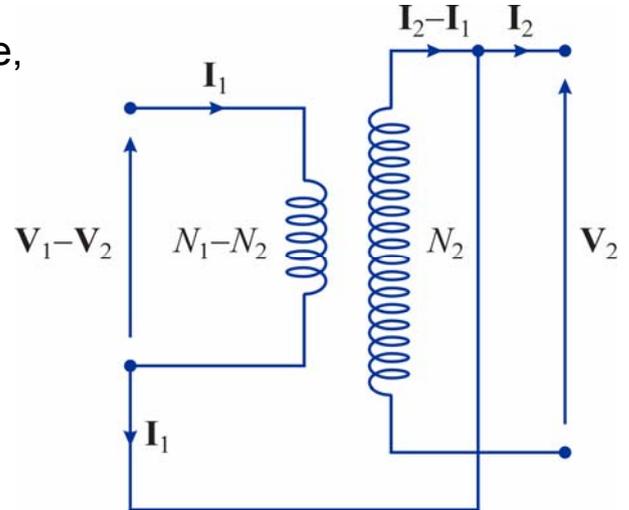
## Autotrasformatore (4)

- Si può immaginare che l'autotrasformatore sia ottenuto collegando come indicato in figura un trasformatore con  $N_1 - N_2$  spire a primario e  $N_2$  spire a secondario

- Dato che, con buona approssimazione, sia  $V_1$  e  $V_2$  sia  $I_1$  e  $I_2$  sono in fase tra loro, le potenze apparenti a primario e secondario sono

$$S_1 = (V_1 - V_2)I_1 = S_2 = V_2(I_2 - I_1) = S_D$$

- Gli avvolgimenti del trasformatore (e quindi anche dell'autotrasformatore) devono essere proporzionati in base a questo valore, detto **potenza di dimensionamento**



5

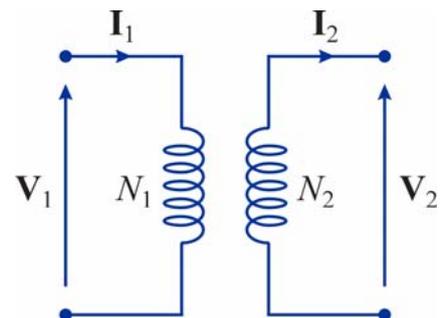
## Autotrasformatore (5)

- D'altra parte, l'autotrasformatore equivale ad un trasformatore con  $N_1$  spire a primario e  $N_2$  a secondario

- La potenza apparente trasferita da primario a secondario (**potenza passante**) di questo trasformatore è

$$S_1 = V_1 I_1 = S_2 = V_2 I_2 = S_P$$

- Questo valore coincide con la potenza apparente trasferita tra i circuiti primario e secondario dell'autotrasformatore



6

## Autotrasformatore (6)

- Mentre per un trasformatore ordinario la potenza passante e la potenza di dimensionamento coincidono, per un autotrasformatore si ha

$$\frac{S_D}{S_P} = \frac{V_1 - V_2}{V_1} = \frac{I_2}{I_2 - I_1} = \frac{K - 1}{K}$$

- A parità di potenza passante, l'autotrasformatore può essere dimensionato per una potenza inferiore di un fattore  $(K-1)/K$
- Questo è dovuto al fatto che, nel caso dell'autotrasformatore, solo parte della potenza passante viene trasferita attraverso l'accoppiamento magnetico, mentre la parte rimanente (la maggior parte per  $K < 2$ ) è trasferita direttamente grazie al collegamento tra i circuiti
- Per  $K = 1$  si ha  $S_D = 0$  (tutta la potenza è trasferita direttamente, senza utilizzare l'autotrasformatore)

7

## Autotrasformatore (7)

- L'autotrasformatore più conveniente rispetto al trasformatore per  $K$  tendente a 1 (dimensioni e costo ridotti)
  - ◆ Il primario viene realizzato con un conduttore dello stesso tipo, ma riducendo il numero di spire di un fattore  $(K-1)/K$
  - ◆ Per il secondario si ha lo stesso numero di spire ma si può ridurre la sezione del conduttore del fattore  $(K-1)/K$
  - ◆ Il minor ingombro degli avvolgimenti consente di ridurre anche le dimensioni del nucleo
  - ◆ Si hanno minori perdite e quindi rendimenti migliori e minori reattanze di dispersione
- I vantaggi diventano meno evidenti all'aumentare di  $K$ 
  - ◆ dato che gli isolamenti devono essere dimensionati in base alla tensione  $V_1$ , in pratica non conviene utilizzare autotrasformatori per  $K > 4$

8

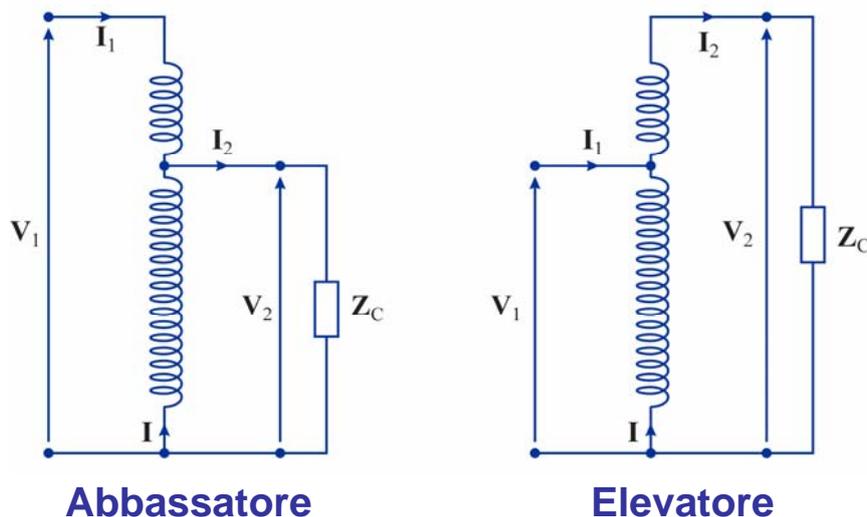
## Autotrasformatore (8)

- Il principale svantaggio dell'autotrasformatore è rappresentato dal fatto che il primario e il secondario non sono elettricamente isolati
  - ◆ L'autotrasformatore non può essere utilizzato se è necessario mantenere i circuiti isolati tra loro per ragioni di sicurezza
  - ◆ In caso di interruzione per guasto del tratto di avvolgimento comune, il carico collegato al secondario risulta sottoposto alla tensione del primario (situazione particolarmente pericolosa se il rapporto di trasformazione è elevato)

9

## Autotrasformatore (9)

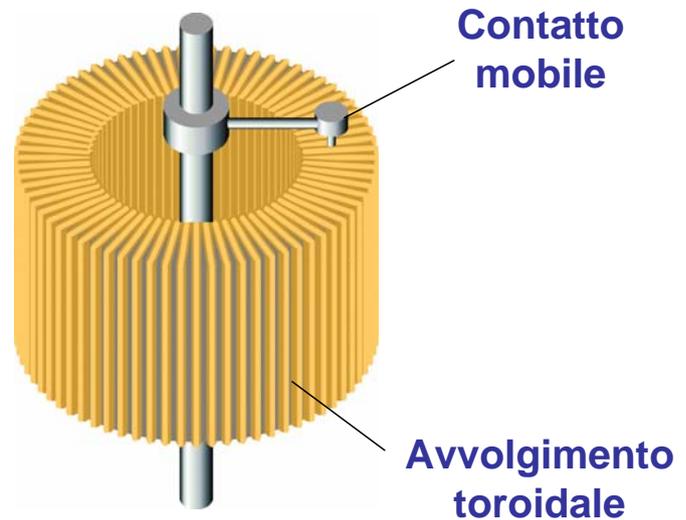
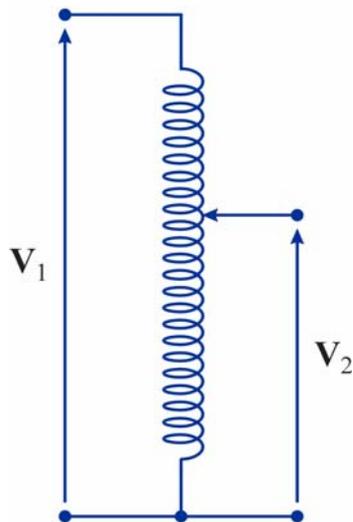
- Finora si è considerato il caso in cui il primario ha un numero maggiore di spire rispetto al secondario (*abbassatore di tensione*)
- L'autotrasformatore, comunque, può essere impiegato anche come *elevatore di tensione* (in questo caso valgono considerazioni analoghe a quelle fatte per l'autotrasformatore abbassatore)



10

# Variac

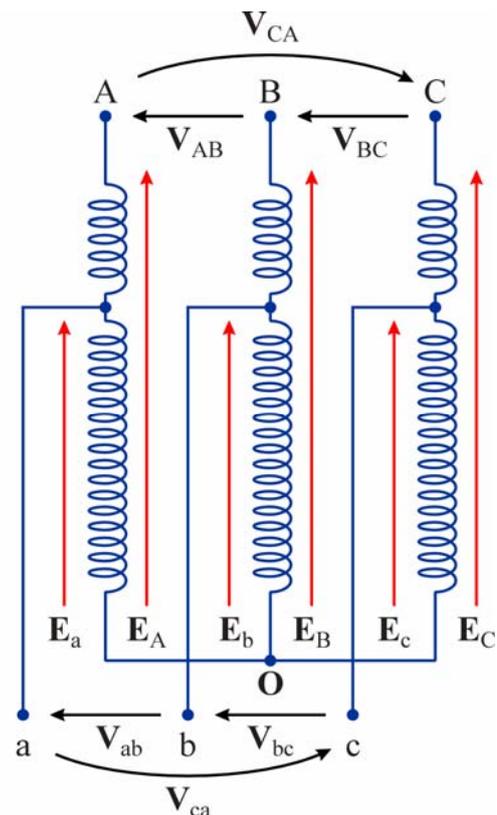
- Realizzando un autotrasformatore con una presa intermedia mobile è possibile ottenere una tensione di uscita variabile
- Questo tipo di autotrasformatore è detto variatore continuo di tensione (**variatic**)



11

# Autotrasformatore trifase

- Gli autotrasformatori possono essere realizzati anche in versione trifase
- Normalmente viene utilizzato il collegamento a stella
- E' possibile impiegare anche il collegamento a triangolo, ma in questo caso il rapporto di trasformazione può assumere solo valori compresi tra 1 e 2 (mentre il collegamento a stella consente di ottenere valori arbitrari)



12

# Trasformatori di misura

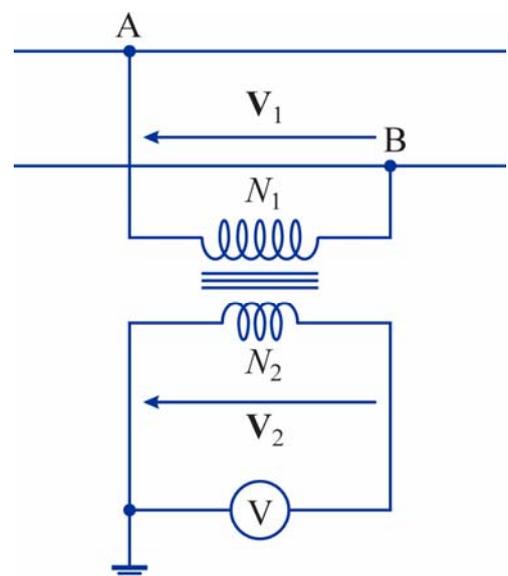
- Nelle misure di tensioni e correnti di valore molto elevato (come, ad esempio, nel caso di linee di trasmissione dell'energia elettrica) vengono comunemente utilizzati trasformatori
  - ◆ per adeguare i livelli di tensione e corrente alle portate degli strumenti
  - ◆ per garantire la sicurezza dell'operatore
- I trasformatori destinati a questo impiego (**trasformatori di misura**) normalmente operano in condizioni diverse dai trasformatori di potenza e, di conseguenza, vengono dimensionati seguendo criteri diversi

13

## Trasformatore di tensione (TV) (1)

- I terminali del primario sono collegati ai punti tra cui si vuole misurare la tensione
- Il secondario è collegato ad un voltmetro
- Il trasformatore viene utilizzato quando la tensione da misurare è superiore alla portata del voltmetro, quindi si ha  $V_1 > V_2$  e di conseguenza  $N_1 > N_2$
- Dato che il voltmetro ha un'impedenza interna molto elevata, il trasformatore funziona praticamente a vuoto
- In queste condizioni vale con buona approssimazione la relazione

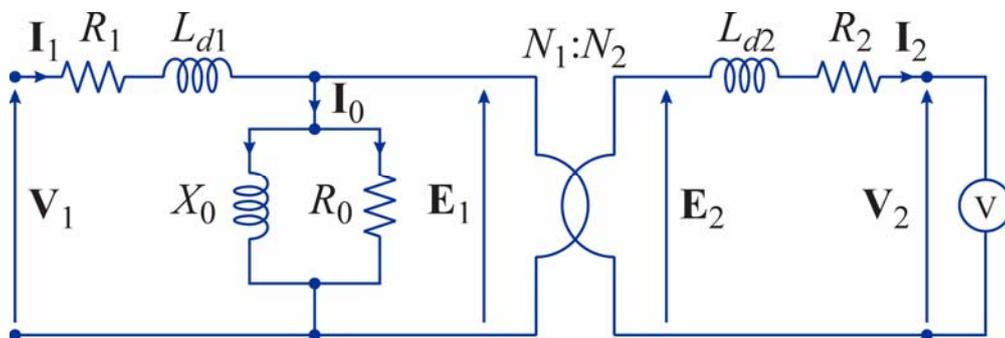
$$V_1 = V_2 \frac{N_1}{N_2}$$



14

## Trasformatore di tensione (TV) (2)

- Per ridurre gli errori di misura occorre che le cadute di tensione sulle impedenze  $R_1+jX_{d1}$  e  $R_2+jX_{d2}$  siano trascurabili
- Questo richiede, in particolare, che sia piccola la corrente  $I_0$
- ➔ Si aumentano le sezioni dei conduttori per ridurre le resistenze
- ➔ Si aumenta la sezione nucleo e si utilizza un materiale con elevata permeabilità per ridurre la riluttanza e quindi  $I_0$
- ➔ Si realizzano gli avvolgimenti in modo da rendere minime le reattanze di dispersione

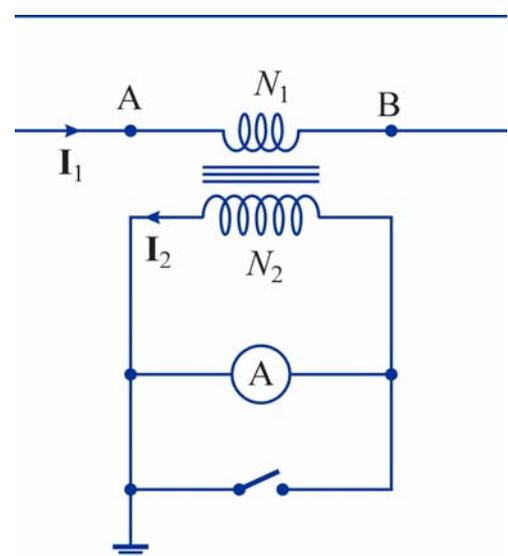


15

## Trasformatore di corrente (TA) (1)

- Il primario è inserito in serie nel circuito di cui si vuole misurare la corrente
- Il secondario è collegato ad un amperometro
- Il trasformatore viene utilizzato quando la corrente da misurare è superiore alla portata dell'amperometro, quindi si ha  $I_1 > I_2$  e di conseguenza  $N_1 < N_2$
- Dato che l'amperometro ha un'impedenza interna molto piccola, il trasformatore funziona praticamente in cortocircuito
- In queste condizioni vale con buona approssimazione la relazione

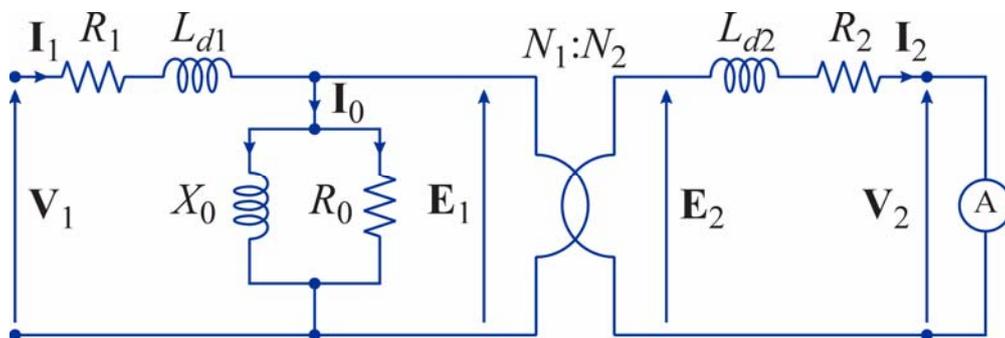
$$I_1 = I_2 \frac{N_2}{N_1}$$



16

## Trasformatore di corrente (TA) (2)

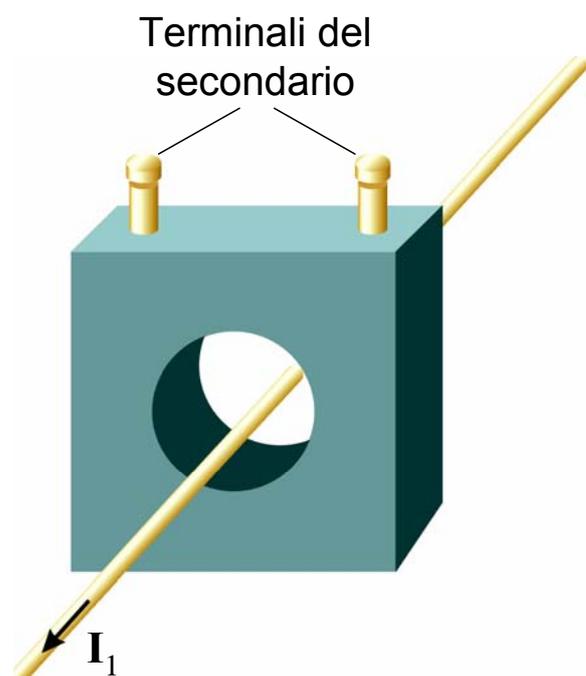
- Per ridurre gli errori di misura occorre che sia trascurabile la corrente  $I_0$
- A tal fine devono essere piccole le f.e.m indotte  $E_1$  e  $E_2$  quindi, in particolare, deve essere piccola l'impedenza  $R_2 + jX_{d2}$
- ➔ Si aumenta la sezione nucleo e si utilizza un materiale con elevata permeabilità per ridurre la riluttanza e quindi  $I_0$
- ➔ Per minimizzare la riluttanza, si utilizzano nuclei toroidali (➔ minore lunghezza media del circuito magnetico)
- ➔ Si aumenta la sezione dei conduttori dell'avvolgimento secondario



17

## Trasformatore di corrente (TA) (3)

- Si può notare che la precisione non dipende dall'impedenza  $R_1 + jX_{d1}$  del primario
- Il numero di spire del primario è sempre molto piccolo rispetto a quello del secondario
- In particolare è possibile ridurre il primario ad un unico conduttore rettilineo passante attraverso il foro del nucleo toroidale

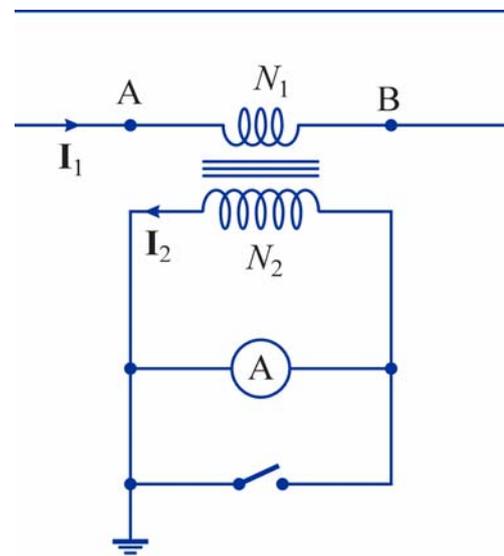


18

## Trasformatore di corrente (TA) (4)

- Dato che normalmente  $N_1 \ll N_2$ , la tensione  $V_2$  a vuoto può assumere valori molto elevati e quindi pericolosi per l'operatore

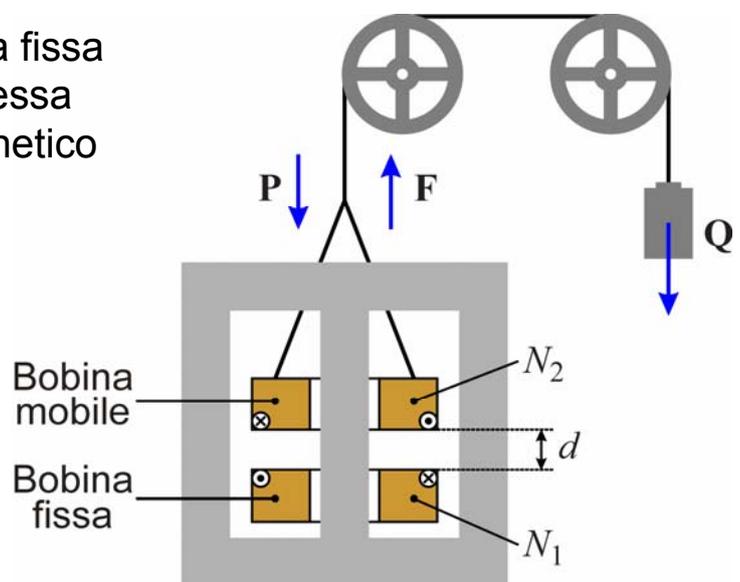
- ➔ Quindi in parallelo al secondario deve sempre essere presente un dispositivo (preferibilmente automatico) che provveda a ripristinare la condizione di cortocircuito se viene scollegato l'amperometro



19

## Trasformatore a corrente costante (1)

- Il trasformatore a corrente costante è un dispositivo che eroga una corrente di valore efficace costante al variare dell'impedenza di carico
- La sua applicazione principale è nelle reti di illuminazione con lampade collegate in serie
- E' costituito da due bobine, una fissa e una mobile, disposte sulla stessa colonna di un nucleo ferromagnetico
- La bobina mobile è collegata ad un contrappeso **Q** non sufficiente a bilanciare il peso **P** della bobina
- Gli avvolgimenti sono realizzati in modo che, quando circola corrente, la forza **F** tra le bobine sia repulsiva

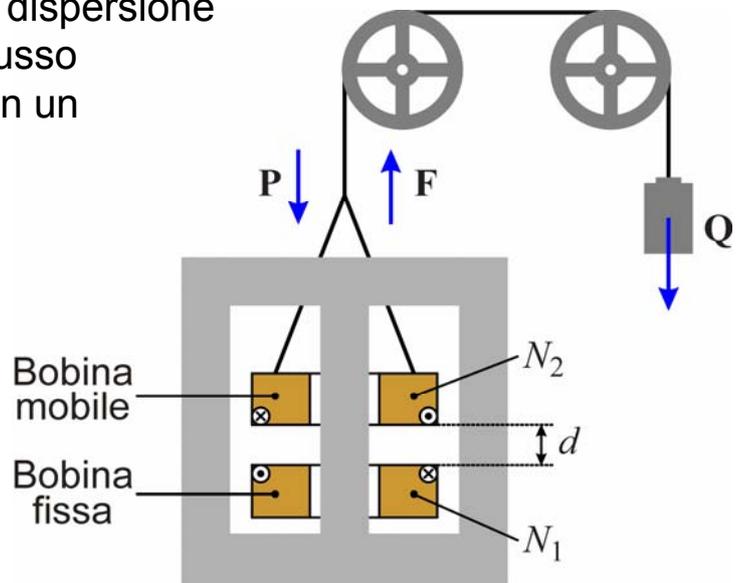


20

## Trasformatore a corrente costante (2)

- La forza  $F$  tra le bobine risulta praticamente indipendente dalla distanza  $d$ , quindi è funzione solo della corrente nelle bobine
- All'aumentare della distanza tra le bobine, aumenta invece la reattanza di dispersione (diviene maggiore l'entità del flusso magnetico che si concatena con un solo avvolgimento)
- Il sistema rimane in equilibrio, con la bobina mobile sollevata, solo quando la corrente nel secondario ha il valore efficace  $I$  per cui risulta

$$F(I) = P - Q$$



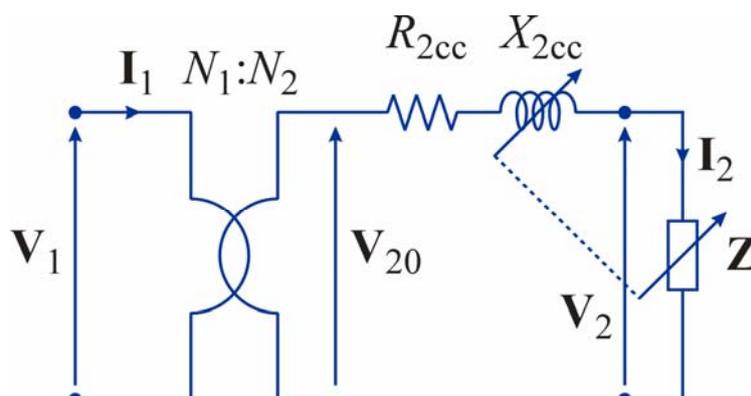
21

## Trasformatore a corrente costante (3)

- Facendo riferimento al circuito equivalente di Kapp, se  $Z = R + jX$  è l'impedenza di carico, il valore efficace della corrente del secondario è

$$I_2 = \frac{V_{20}}{\sqrt{(R_{2cc} + R)^2 + (X_{2cc} + X)^2}}$$

- Si assume che il sistema sia in equilibrio con  $I_2 = I$ , quindi si considera l'effetto di una variazione (ad esempio diminuzione) del modulo di  $Z$



22

## Trasformatore a corrente costante (4)

- Una diminuzione di  $Z$  causa un aumento della corrente  $I_2$
- Aumenta la forza di repulsione tra le bobine
- Aumenta la distanza
- Aumenta la reattanza di dispersione e quindi il modulo dell'impedenza totale  $Z_{2cc} + Z$
- Si riduce la corrente e quindi anche la forza
- ➔ Il sistema tende a riportarsi in condizioni di equilibrio con  $I_2 = I$
- ➔ L'aumento della reattanza di dispersione compensa la diminuzione del modulo dell'impedenza, quindi il valore efficace della corrente rimane costante

$$Z \downarrow \Rightarrow I_2 \uparrow \Rightarrow F \uparrow \Rightarrow d \uparrow \Rightarrow X_{2cc} \uparrow \Rightarrow I_2 \downarrow \Rightarrow F \downarrow$$

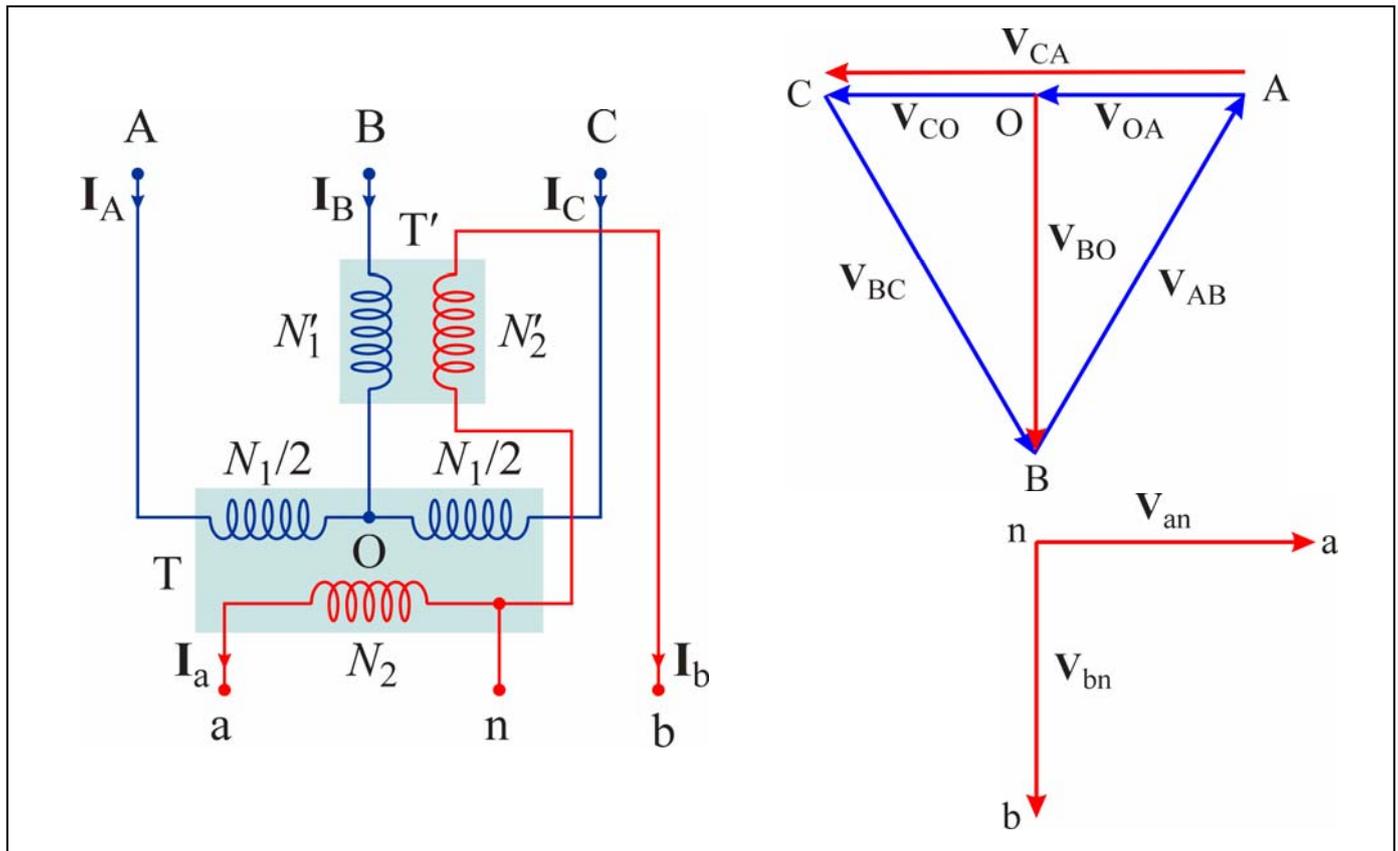
23

## Trasformatori di fase

- Un **trasformatore di fase** è un trasformatore che permette di trasferire potenza tra due sistemi polifase aventi numero di fasi diverso
- Dato che l'energia elettrica viene generata e distribuita sotto forma trifase, il caso più comune è quello in cui uno dei due sistemi è trifase
- In seguito di considereranno due casi particolari
  - ◆ trasformazione tri-bifase (inserzione Scott)
    - di solito utilizzata per trasformare un sistema trifase in un doppio sistema monofase e quindi ottenere un carico tri-fase equilibrato da due carichi monofase uguali
  - ◆ trasformazione tri-esafase
    - generalmente utilizzata per alimentare gruppi raddrizzatori

24

## Inserzione Scott (1)



25

## Inserzione Scott (2)

- La conversione tri-bifase può essere effettuata mediante due trasformatori T e T' collegati come mostrato in figura (**inserzione Scott**)
- Il primario del trasformatore T è dotato di una presa centrale a cui viene collegato il trasformatore T'
- Le tensioni sulle due sezioni del primario di T ( $V_{CO}$  e  $V_{OA}$ ) sono uguali
- Di conseguenza la tensione  $V_{BO}$  è sfasata di  $90^\circ$  rispetto a  $V_{CA}$  e si ha

$$V_{BO} = \frac{\sqrt{3}}{2} V_{CA}$$

- Affinché le tensioni dei secondari costituiscano un sistema bifase simmetrico ( $V_{an} = jV_{bn}$ ) occorre che i rapporti spire dei trasformatori soddisfino la condizione

$$K' = \frac{N_1'}{N_2'} = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{N_1}{N_2} = \frac{\sqrt{3}}{2} K$$

26

## Inserzione Scott (3)

- Se si collegano due impedenze uguali ai terminali a-n e b-n le correnti  $\mathbf{I}_a$  e  $\mathbf{I}_b$  formano un sistema bifase simmetrico

$$\mathbf{I}_a = j\mathbf{I}_b$$

- La corrente del primario di T' è

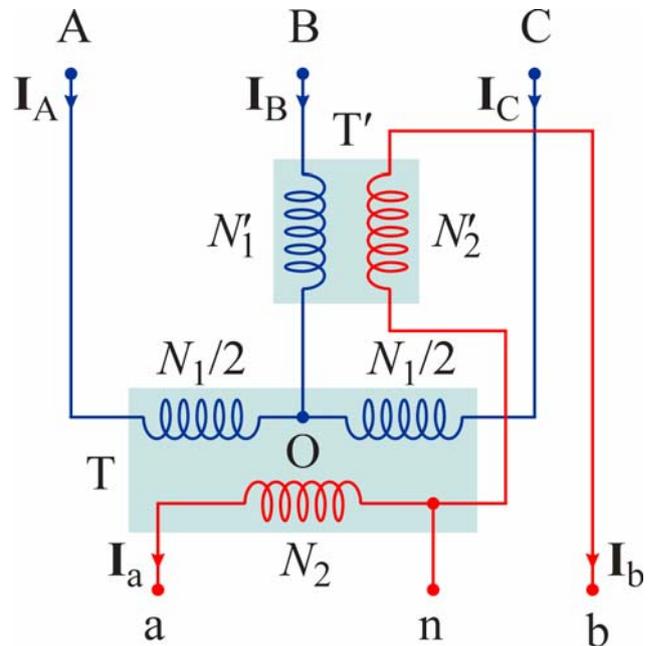
$$\mathbf{I}_B = \frac{\mathbf{I}_b}{K'}$$

- Le correnti degli avvolgimenti di T devono soddisfare la condizione

$$\frac{N_1}{2}\mathbf{I}_A - \frac{N_1}{2}\mathbf{I}_C = N_2\mathbf{I}_a$$

- Inoltre si ha

$$\mathbf{I}_A + \mathbf{I}_B + \mathbf{I}_C = 0$$



27

## Inserzione Scott (4)

- Combinando le relazioni precedenti si ottiene

$$\frac{N_1}{2}\mathbf{I}_A + \frac{N_1}{2}(\mathbf{I}_A + \mathbf{I}_B) = N_2 \cdot jK'\mathbf{I}_B$$

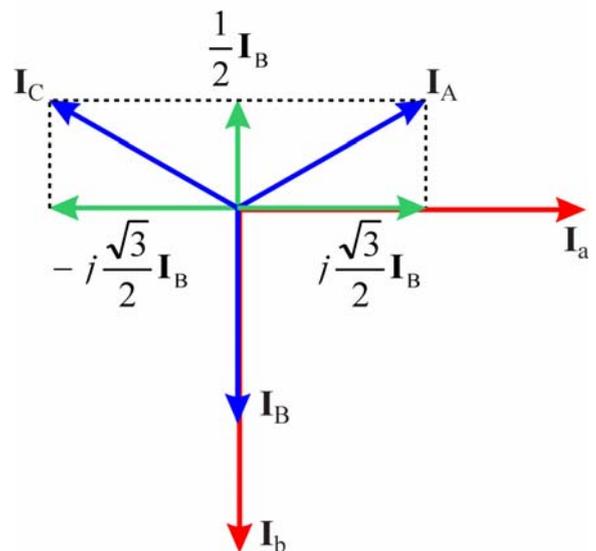
- Quindi

$$\mathbf{I}_A = -\frac{\mathbf{I}_B}{2} + j\frac{K'}{K}\mathbf{I}_B = \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)\mathbf{I}_B$$

- Inoltre risulta

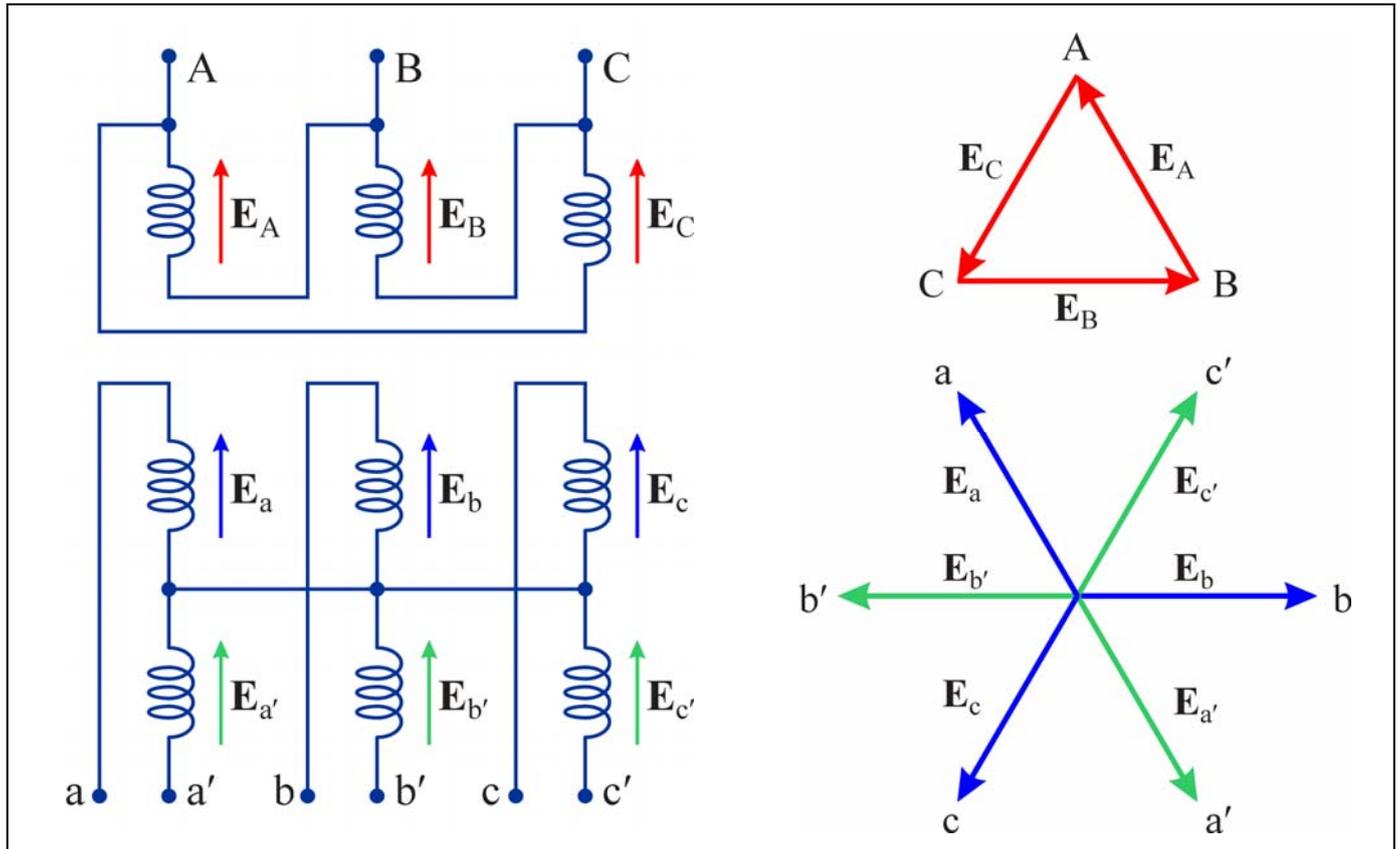
$$\mathbf{I}_C = \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)\mathbf{I}_B$$

- Quindi se le due impedenze di carico sono uguali si ottiene un sistema trifase equilibrato



28

## Trasformazione tri-esafase (1)



29

## Trasformazione tri-esafase (2)

- La trasformazione tri-esafase può essere ottenuta mediante un trasformatore con secondario a doppia stella
- Gli avvolgimenti omologhi delle due stelle sono collegati in modo che le f.e.m. siano in opposizione di fase
- Di solito il primario è collegato a triangolo in modo da ridurre gli effetti dovuti allo squilibrio del carico (che di solito è costituito da un gruppo raddrizzatore)

30