

# Trasmissione dell'energia elettrica

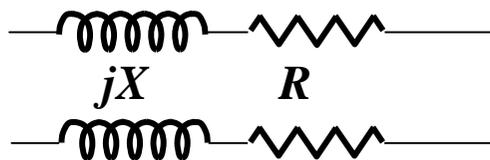
## Schema di principio



## Effetti della linea di trasmissione

1. *dissipazione di energia*
2. *caduta di tensione*

### Schema equivalente della linea



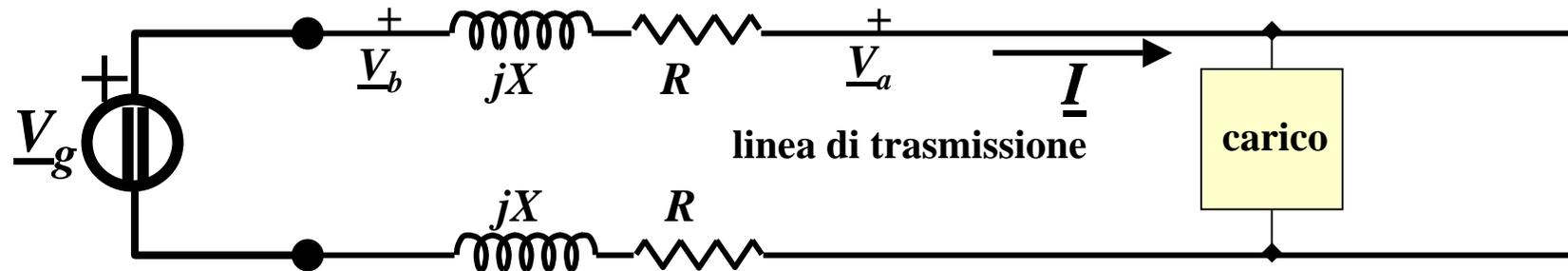
**$R$**   
*resistenza di linea*

*$R$  dipende dalla lunghezza, dalla sezione dei conduttori e dal materiale utilizzato*

**$X$**   
*reattanza di linea*

*$X$  dipende dalla lunghezza e dalla disposizione dei conduttori  
(  $X = \omega L$  )*

### Schema di principio



### Effetti della linea di trasmissione

1. *dissipazione di energia*
2. *caduta di tensione*

#### 1. Dissipazione di energia

**Potenza attiva  
dissipata in linea**

$$P_{aL} = R |\underline{I}|^2 = R I^2 = 2 R I_{eff}^2 \quad [W]$$

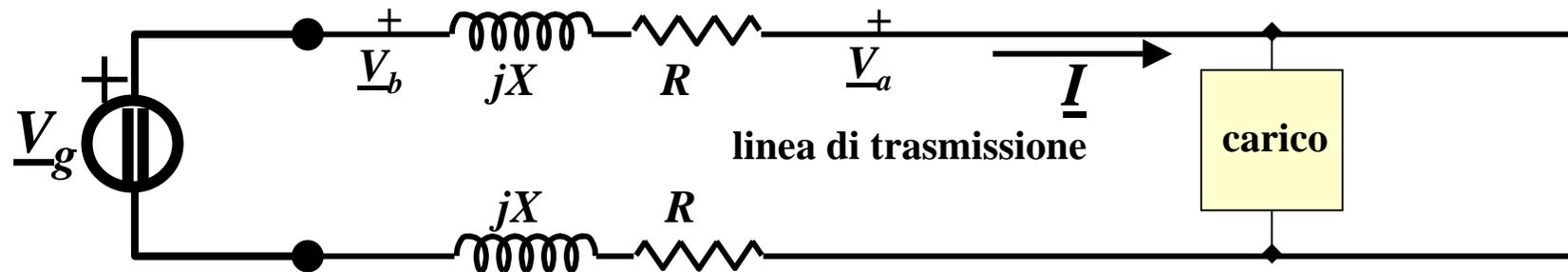
*La potenza dissipata provoca riscaldamento dei conduttori e aggravio nei costi di gestione.*

*La potenza dissipata viene limitata diminuendo  $R$  (conduttori in rame, alluminio, aumento della sezione) e diminuendo l'intensità della corrente di linea.*

*Si ricordi che*

$$|\underline{I}| = I = \sqrt{2} I_{eff}$$

### Schema di principio

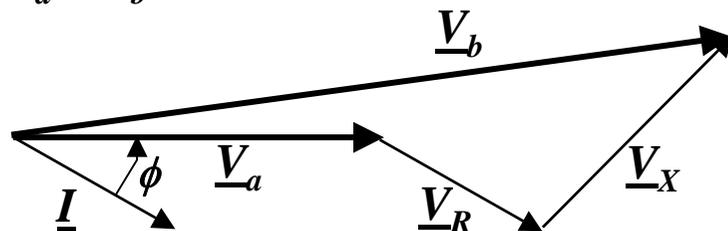


### Effetti della linea di trasmissione

1. dissipazione di energia
2. caduta di tensione

#### 2. Caduta di tensione

$$V_a \cong V_b \cong V$$



$$\Delta V = |\underline{V}_b| - |\underline{V}_a| \cong V_R \cos \phi + V_X \sin \phi = 2R I \cos \phi + 2X I \sin \phi$$

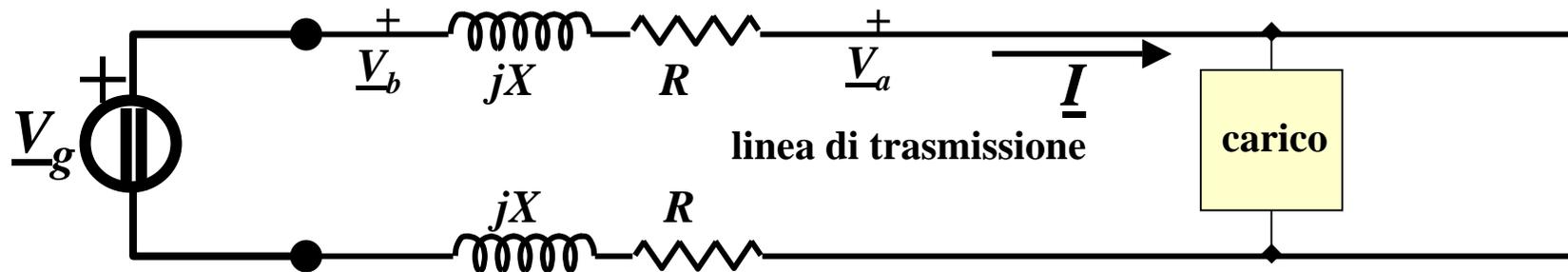
Si ricordi che

$$P_{aC} = V_{eff} I_{eff} \cos \phi \quad \text{potenza attiva sul carico}$$

$$Q_C = V_{eff} I_{eff} \sin \phi \quad \text{potenza reattiva sul carico}$$

$$\begin{aligned} \Delta V / V &= (2R V I \cos \phi + 2X V I \sin \phi) / V^2 \\ &= (2R P_{aC} + 2X Q_C) / V_{eff}^2 \end{aligned}$$

### Schema di principio



### Effetti della linea di trasmissione

1. *dissipazione di energia*
2. *caduta di tensione*

### 2. Caduta percentuale di tensione

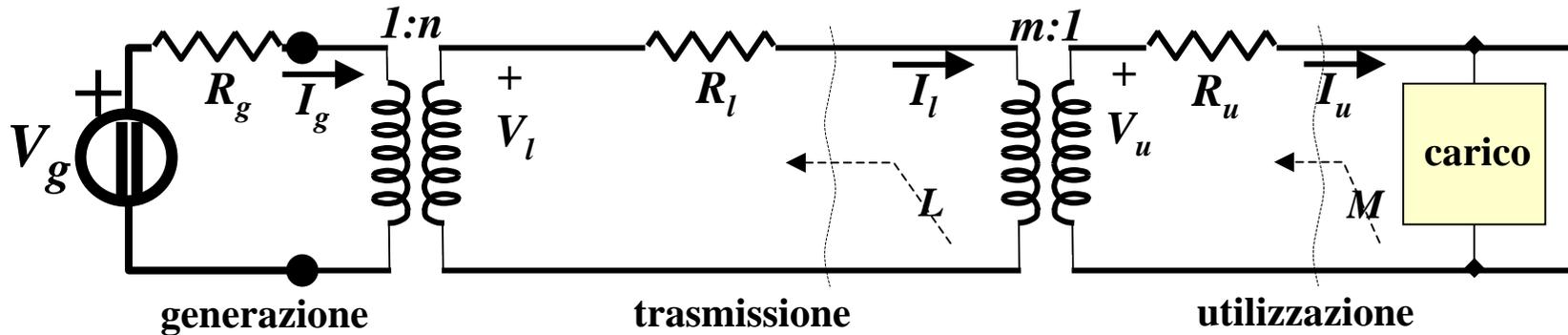
$$\Delta V / V = (2R P_{ac} + 2X Q_C) / V_{eff}^2$$

*Eccessive cadute di tensione possono provocare malfunzionamenti sul carico.*

*La caduta di tensione viene limitata diminuendo  $R$  e  $X$ , e aumentando la tensione di linea.*

*Il termine  $RP_{ac}$  è prevalente rispetto al termine  $XQ_C$  nelle linee in cavo e per alti fattori di potenza.*

### Uso dei trasformatori nella trasmissione dell'energia elettrica



$$n V_g = V_l$$

$$(1/n) I_g = I_l$$

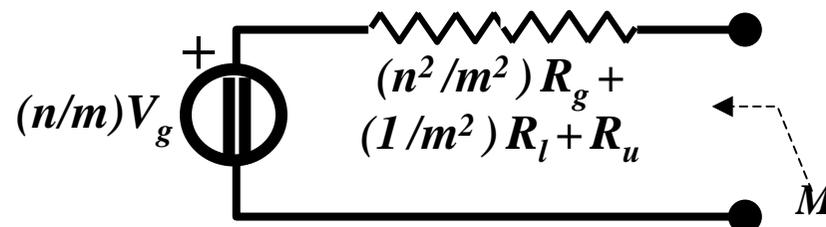
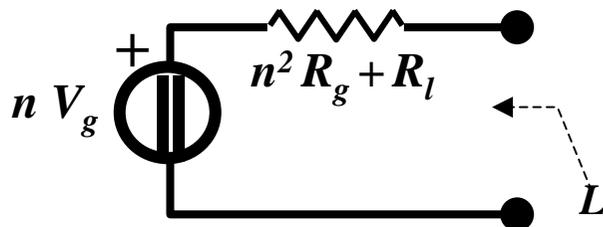
$$(1/m) V_l = V_u$$

$$m I_l = I_u$$

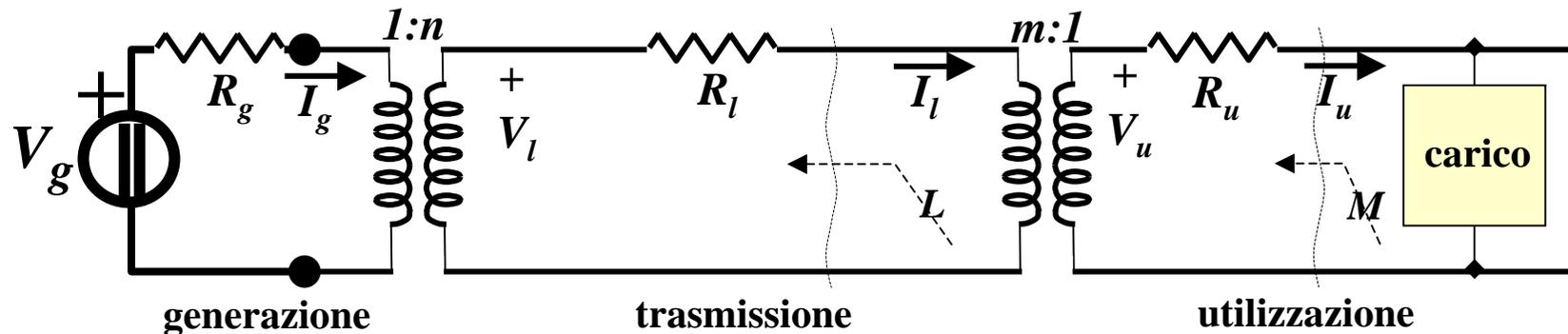
*tensioni e correnti  
in valori efficaci*

*Nelle applicazioni  $V_g$  qualche decina di kV,  $V_l$  qualche centinaio di kV,  $V_u$  qualche centinaio di V*

**Dal teorema di Thévenin**



## Uso dei trasformatori nella trasmissione dell'energia elettrica



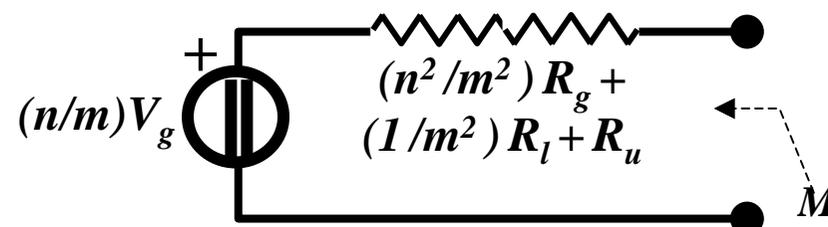
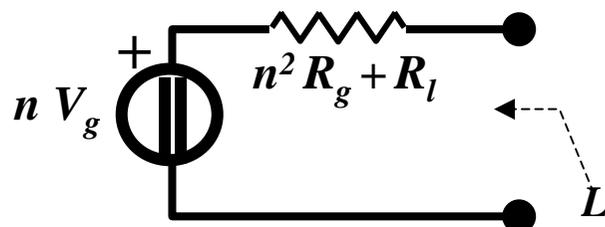
*Le elevate tensioni e le (relativamente) basse correnti in linea permettono la trasmissione di energia elettrica a grande distanza, limitando le perdite di energia e le cadute di tensione*

*Le tensioni del generatore sono fissate da esigenze costruttive*

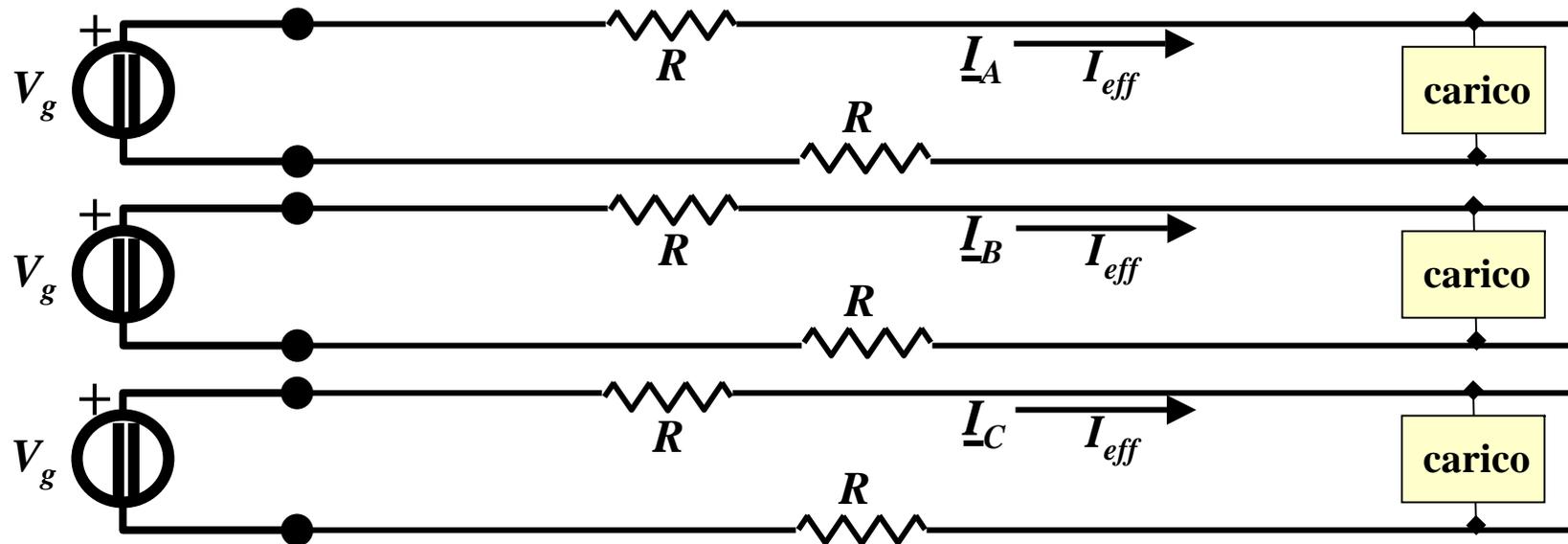
*Le tensioni del carico sono fissate da esigenze d'uso e di sicurezza*

*I trasformatori reali utilizzati sono dispositivi ad altissimo rendimento energetico (> 99 %)*

**Dal teorema di Thévenin**



### Sistema monofase



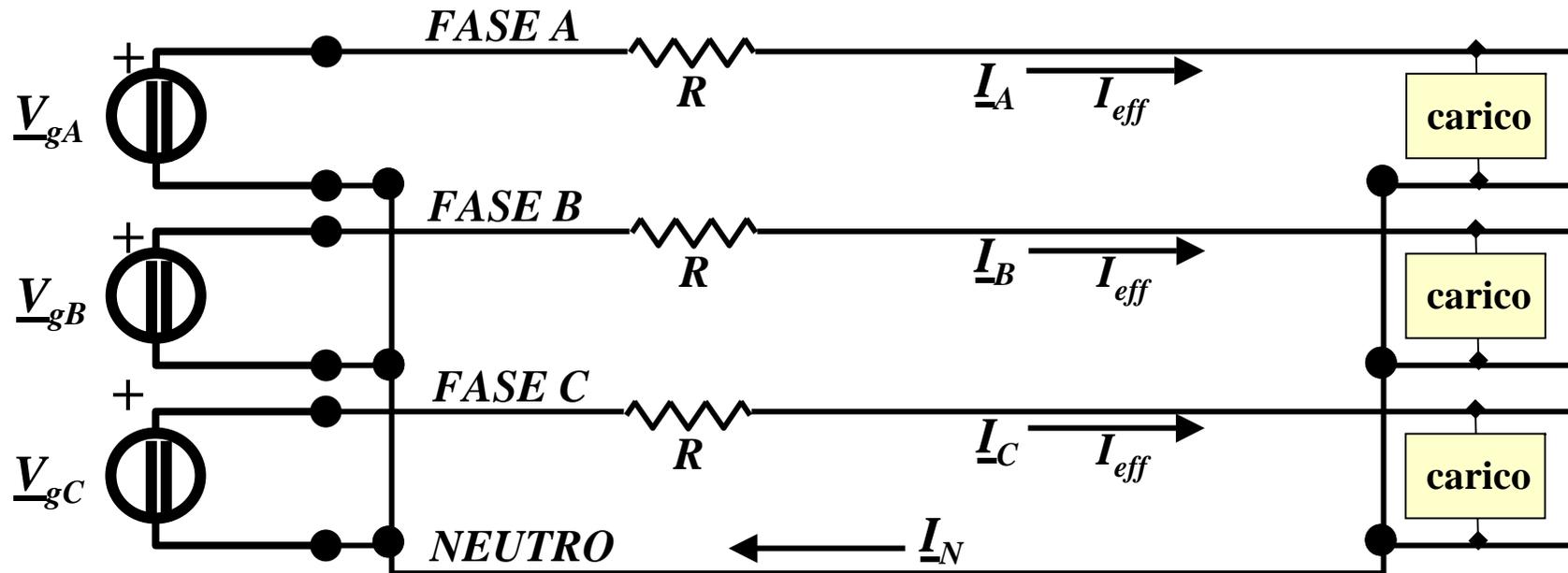
**Potenza attiva totale utile**  
*( $R_C$  resistenza di carico)*

$$P_{aC} = 3 R_C I_{eff}^2$$

**Potenza attiva totale dissipata**  
*( $R$  resistenza di un conduttore di linea)*

$$P_{aL} = 6 R I_{eff}^2$$

### Sistema trifase a quattro fili



#### Conduttore comune ai tre circuiti

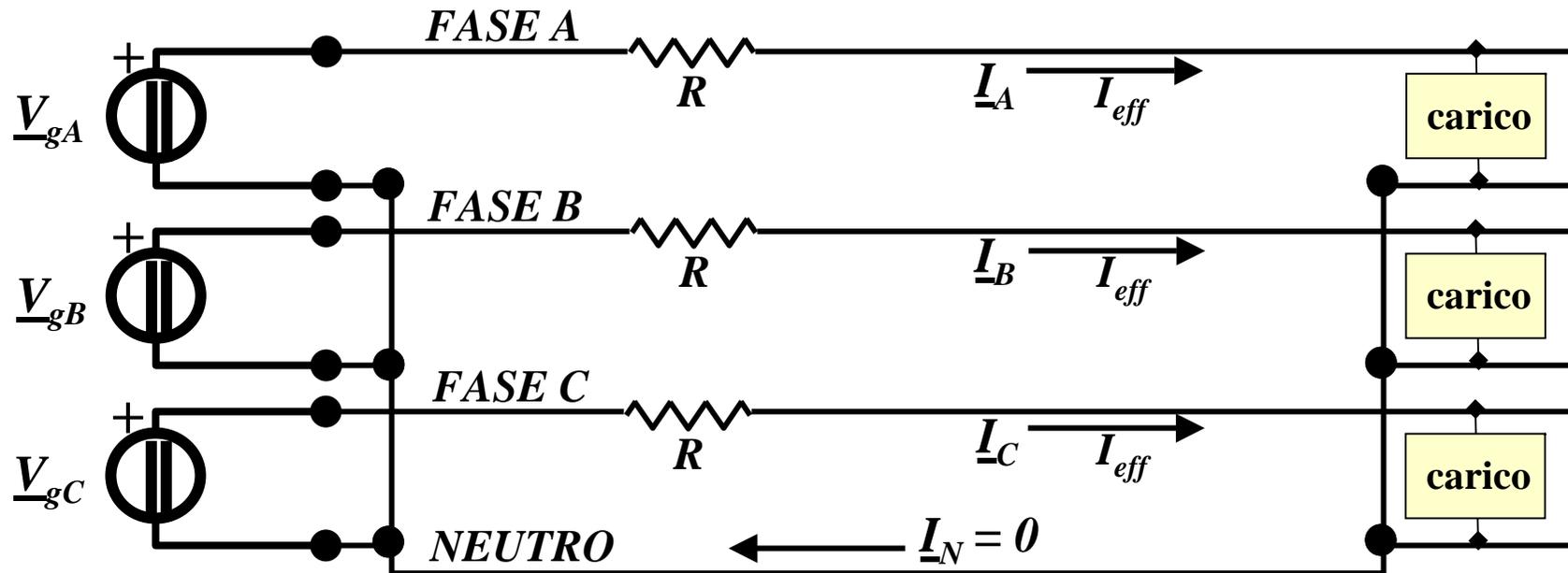
Notazione: *FASE A*  
*FASE B*  
*FASE C*  
*NEUTRO*

#### Correnti e tensioni di fase

Moduli:  $I_A = I_B = I_C (= I)$   
 $[ I_{effA} = I_{effB} = I_{effC} (= I_{eff}) ]$

Corrente di neutro:  $\underline{I}_N = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C$

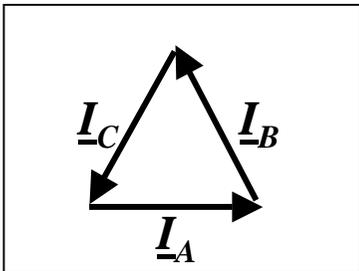
### Sistema trifase a quattro fili



### Circuito trifase equilibrato

$$\underline{I}_N = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 0$$

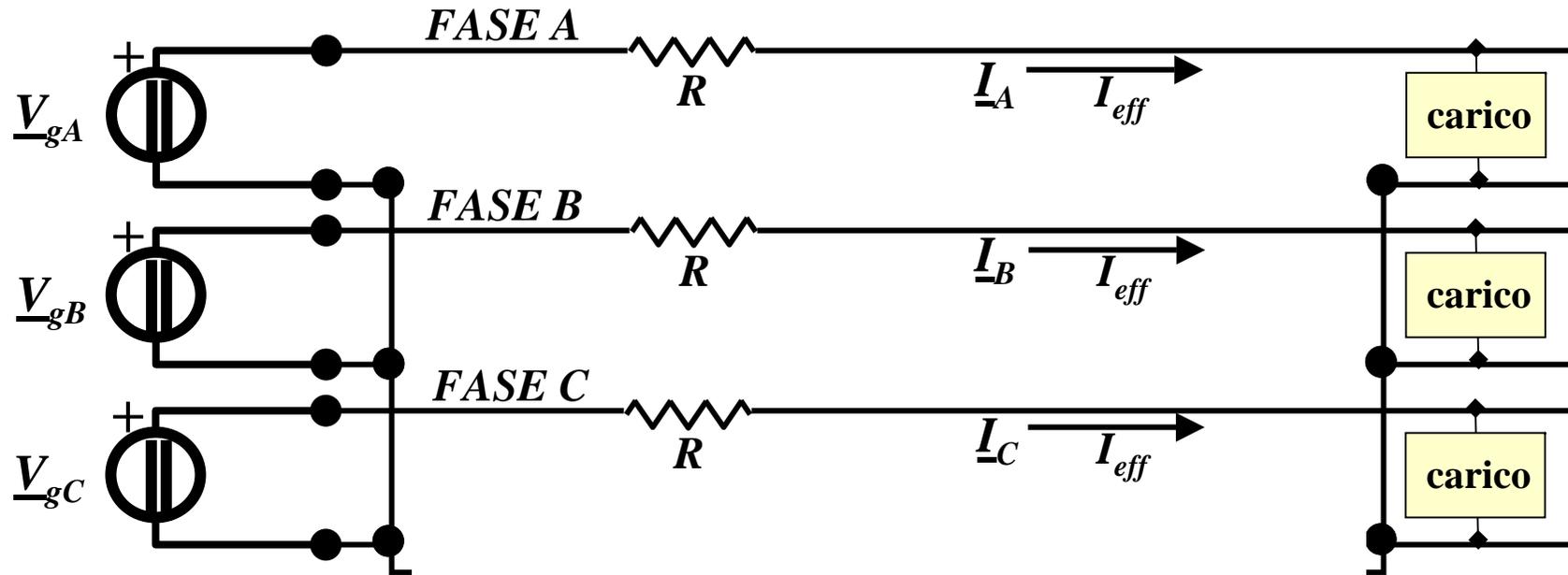
Poiché  $\underline{I}_N = 0$ , il conduttore di neutro in linea può essere eliminato



$$P_{aC} = 3 R_C I_{eff}^2; \quad P_{aL} = 3 R I_{eff}^2$$

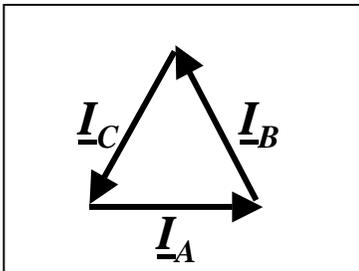
A parità di potenza utile, in un sistema trifase equilibrato è dissipata metà potenza in linea rispetto a un sistema monofase

### Sistema trifase a tre fili



### Circuito trifase equilibrato

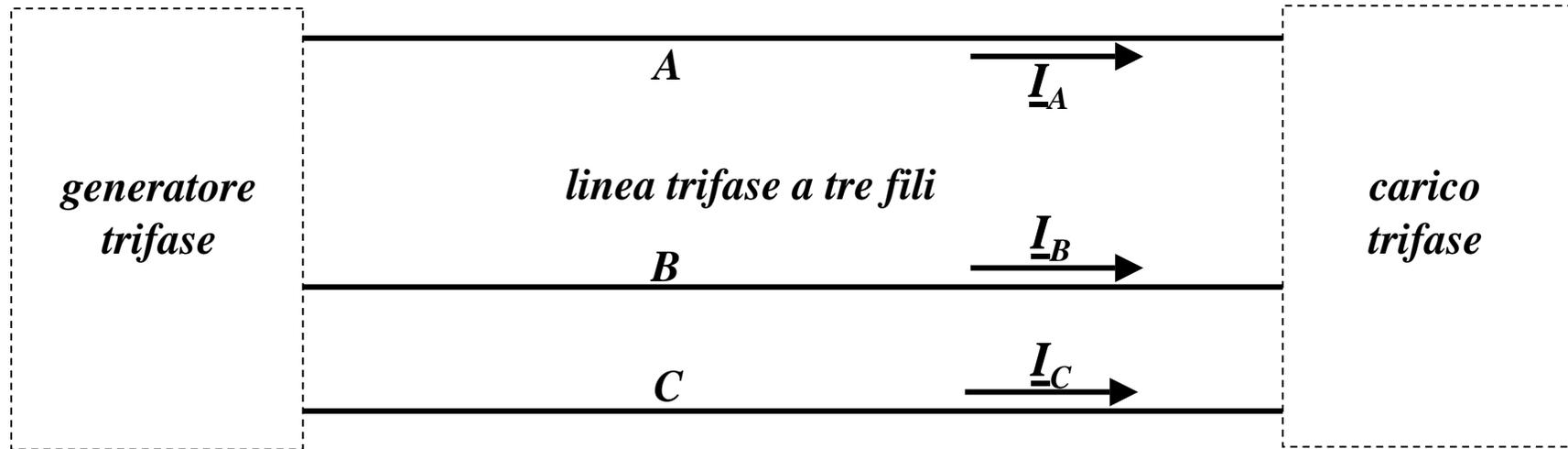
$$\underline{I}_N = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 0$$



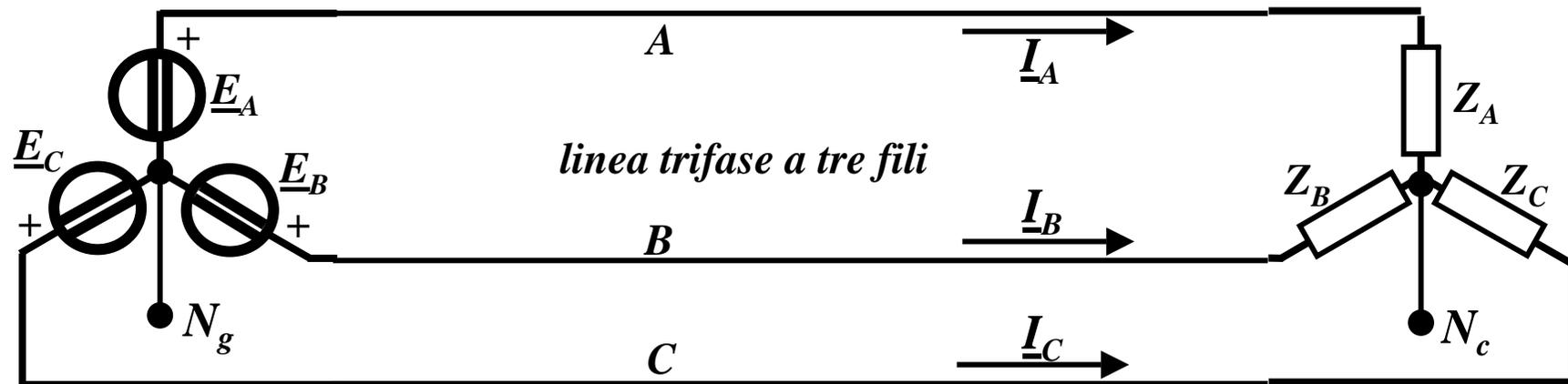
$$P_{aC} = 3 R_C I_{eff}^2; \quad P_{aL} = 3 R I_{eff}^2$$

*A parità di potenza utile, in un sistema trifase equilibrato è dissipata metà potenza in linea rispetto a un sistema monofase*

### Sistema trifase di trasmissione dell'energia elettrica



### Sistema trifase di trasmissione dell'energia elettrica

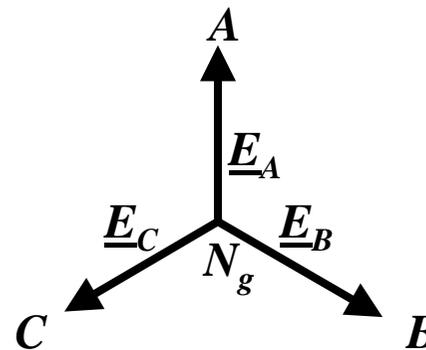


*Generatore in  
connessione a stella*

*$\underline{E}_A, \underline{E}_B, \underline{E}_C$   
tensioni stellate*

*$N_g$  neutro del  
generatore*

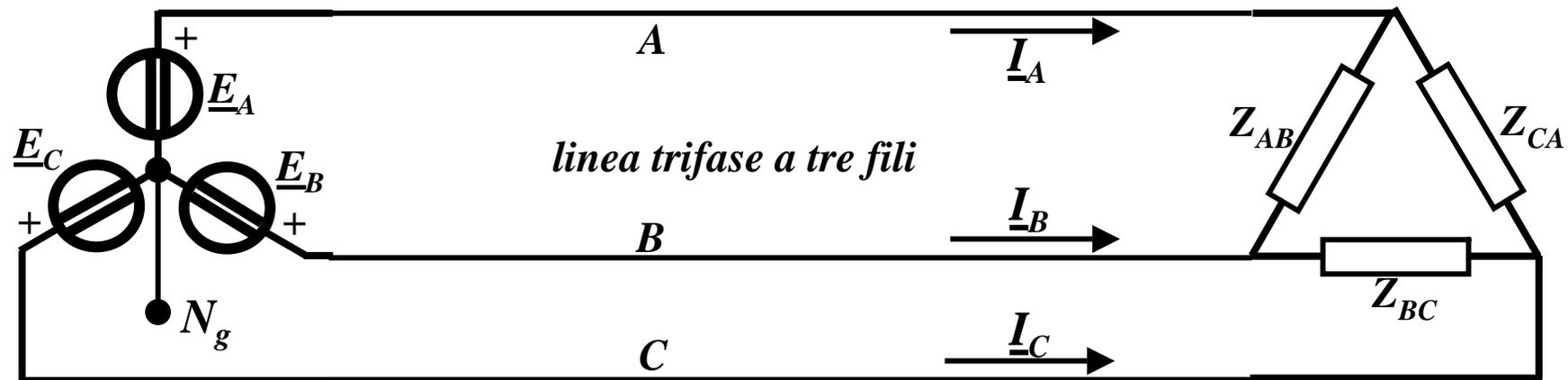
*sistema trifase simmetrico*



*Carico in  
connessione a stella*

*$N_c$  neutro del  
carico*

### Sistema trifase di trasmissione dell'energia elettrica

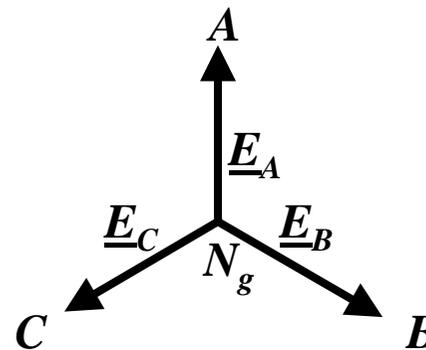


*Generatore in  
connessione a stella*

$\underline{E}_A, \underline{E}_B, \underline{E}_C$   
*tensioni stellate*

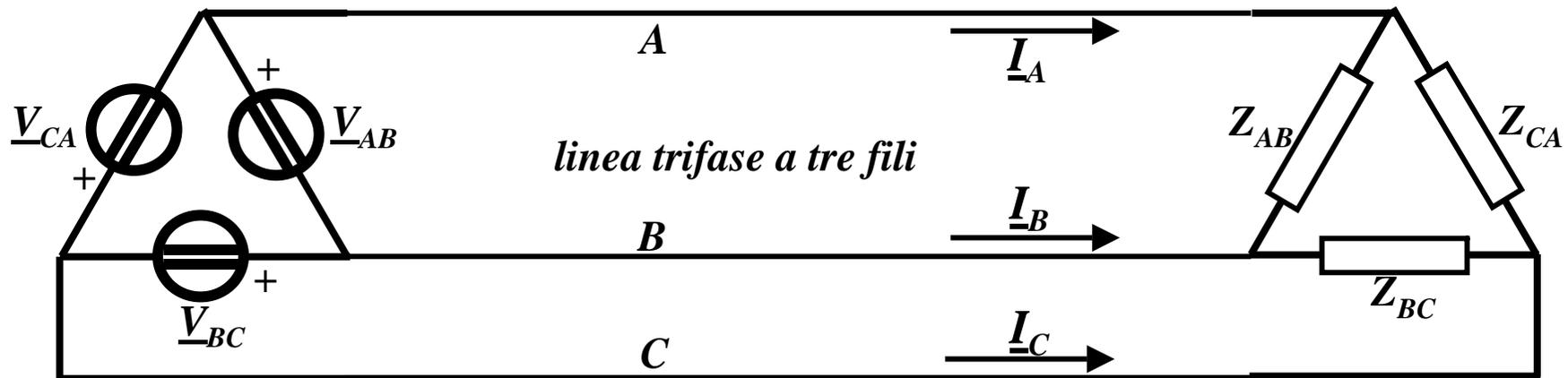
$N_g$  *neutro del  
generatore*

*sistema trifase simmetrico*



*Carico in  
connessione a  
triangolo*

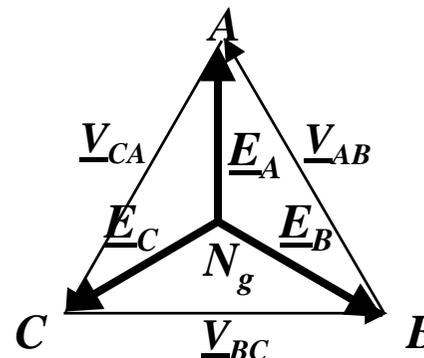
### Sistema trifase di trasmissione dell'energia elettrica



*Generatore in  
connessione a  
triangolo*

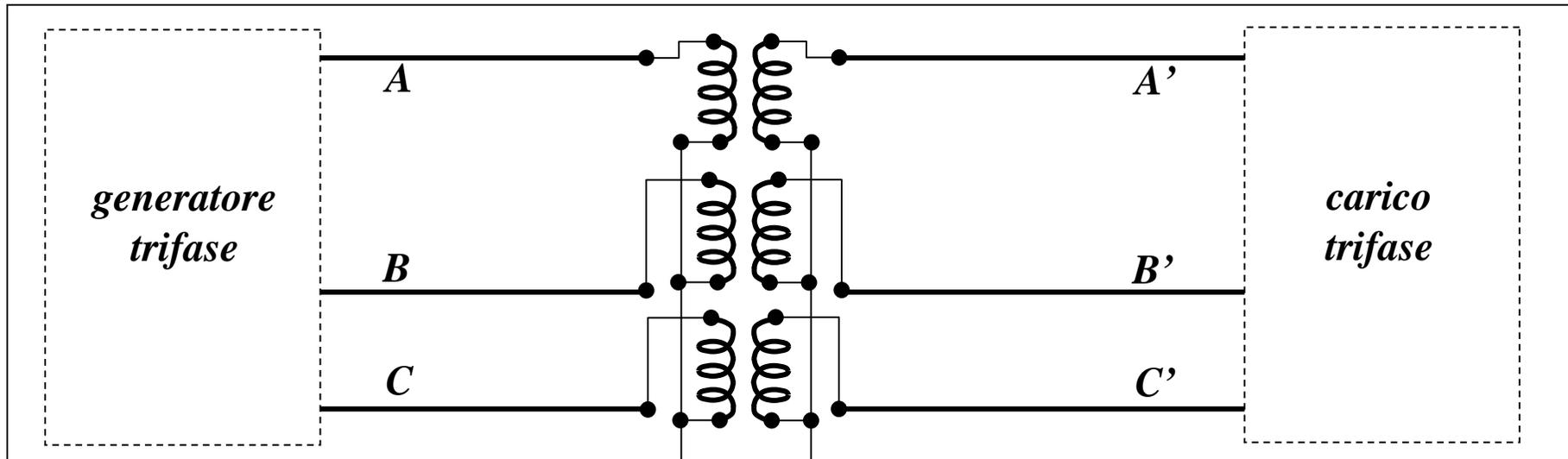
$\underline{V}_{AB}, \underline{V}_{BC}, \underline{V}_{CA}$   
*tensioni  
concatenate*

*sistema trifase simmetrico*

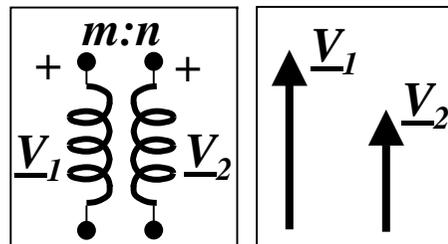


*Carico in  
connessione a  
triangolo*

$$\begin{aligned} V_{AB} &= V_{BC} = V_{CA} = V \\ E_A &= E_B = E_C = E \\ V &= \sqrt{3} E \end{aligned}$$



**Tre trasformatori  
identici di rapporto  
 $m:n$**



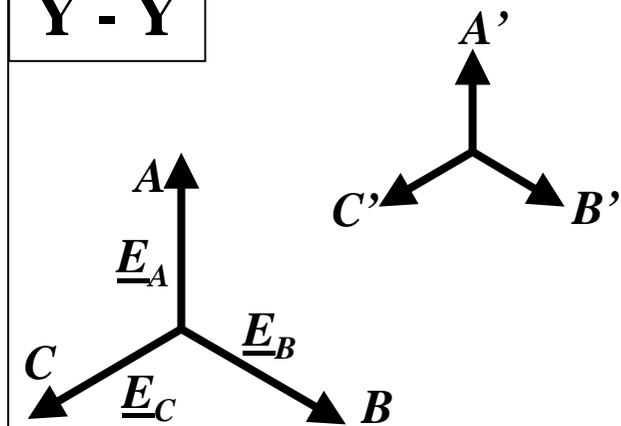
**Connessione  
stella / stella**

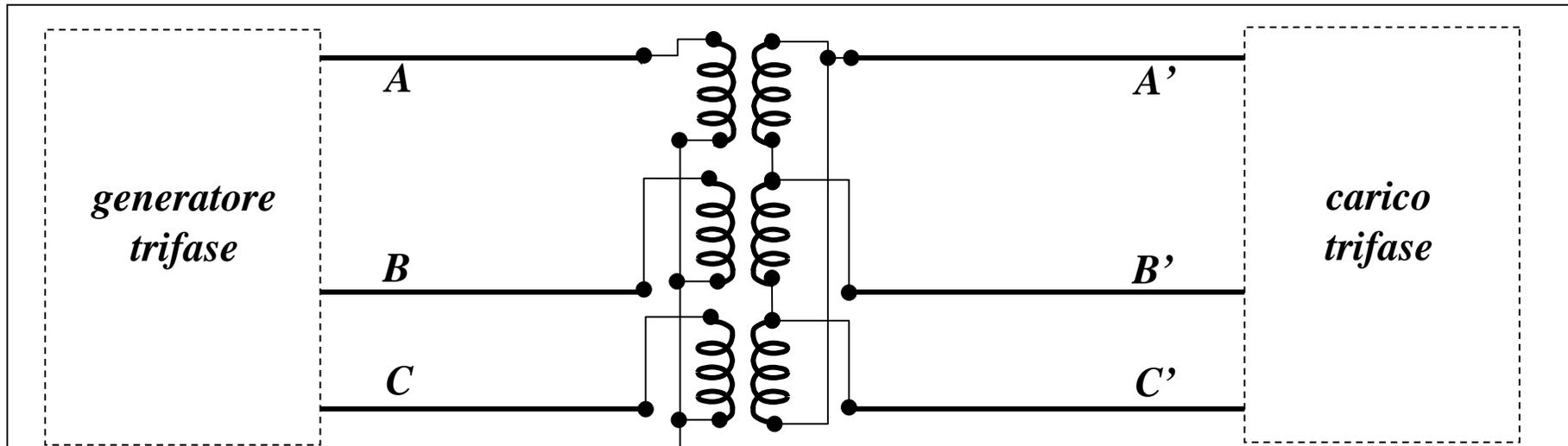
$$E_A = E_B = E_C = E$$

$$E_{A'} = E_{B'} = E_{C'} = E'$$

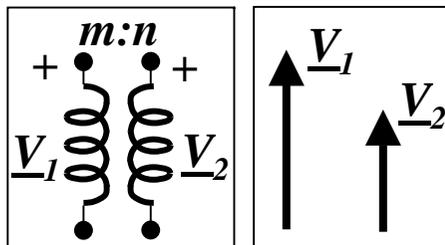
$$E / E' = m / n$$

**Y - Y**





Tre trasformatori  
identici di rapporto  
 $m:n$



Connessione  
stella / triangolo

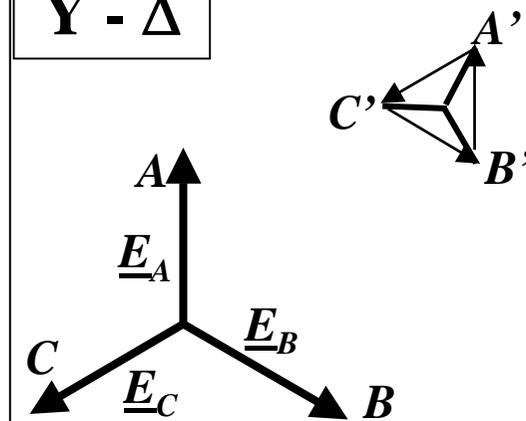
$$E_A = E_B = E_C = E$$

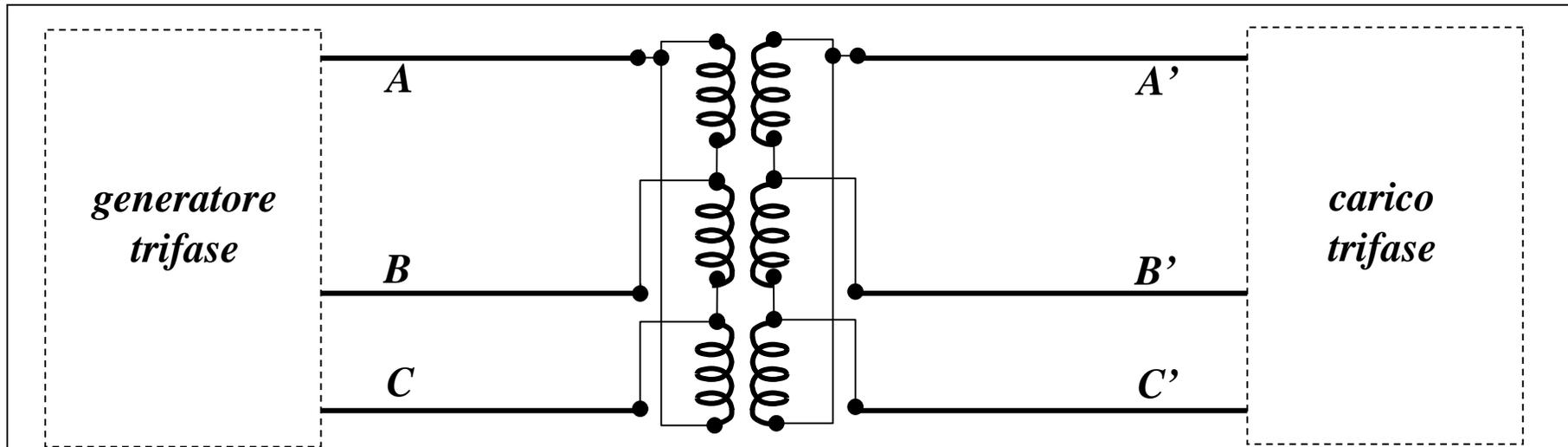
$$V_{A'B'} = V_{B'C'} = V_{C'A'} = V'$$

$$E / V' = m / n$$

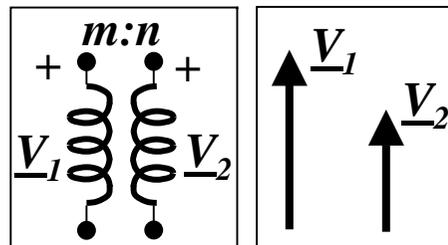
$$E / E' = \sqrt{3} m / n$$

Y - Δ





**Tre trasformatori  
identici di rapporto  
 $m:n$**



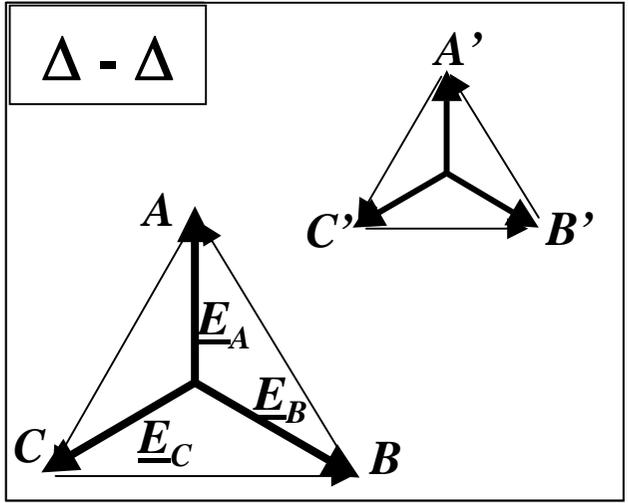
**Connessione  
triangolo / triangolo**

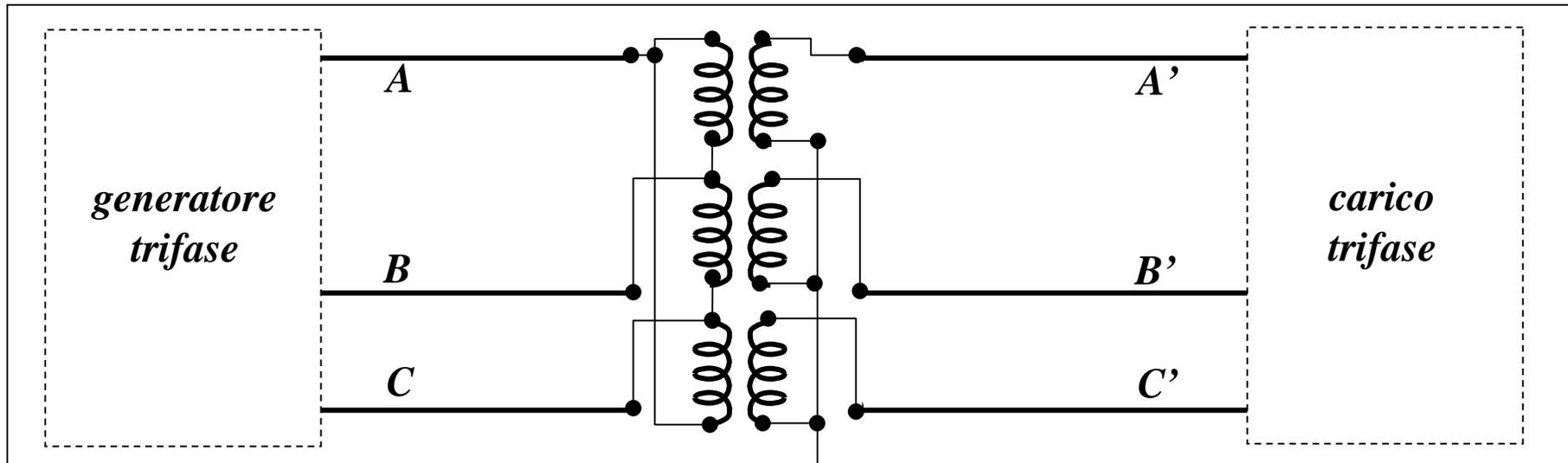
$$V_{AB} = V_{BC} = V_{CA} = V$$

$$V_{A'B'} = V_{B'C'} = V_{C'A'} = V'$$

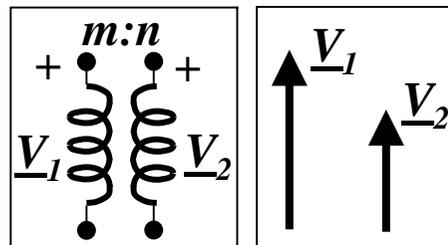
$$V / V' = m / n$$

$$E / E' = m / n$$





Tre trasformatori  
identici di rapporto  
 $m:n$



Connessione  
triangolo / stella

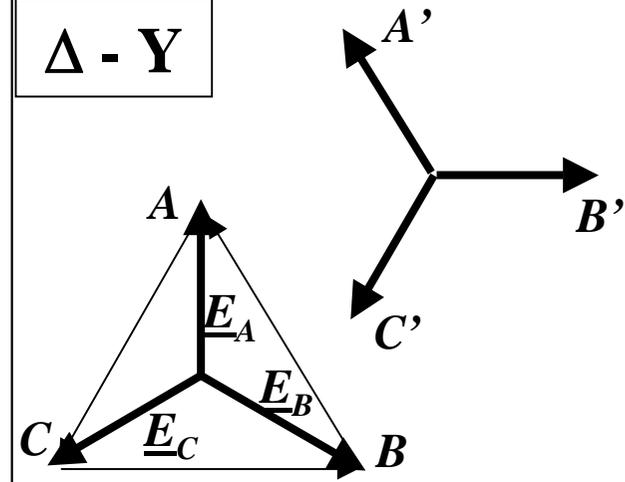
$$V_{AB} = V_{BC} = V_{CA} = V$$

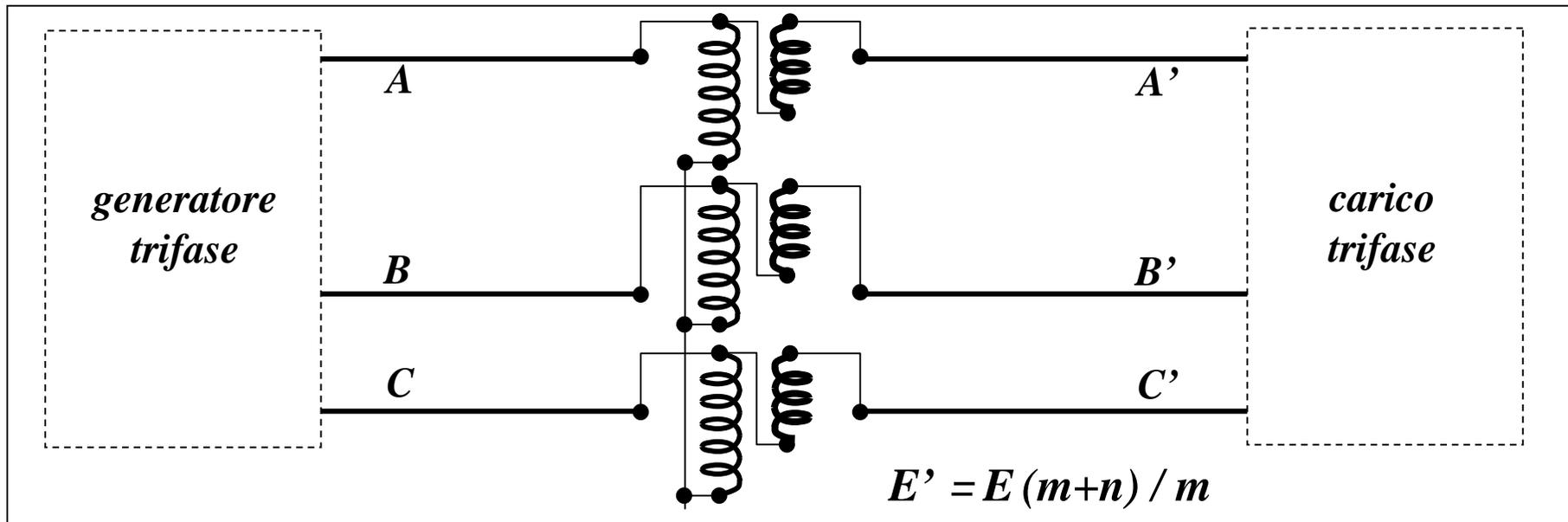
$$E_{A'} = E_{B'} = E_{C'} = E'$$

$$V / E' = m / n$$

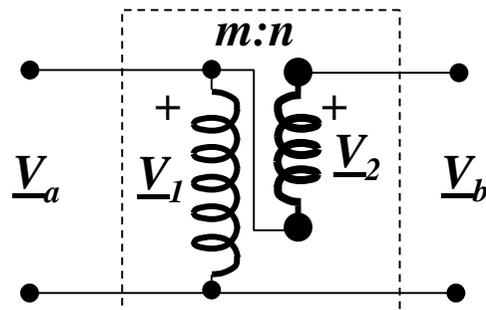
$$E / E' = m / (\sqrt{3} n)$$

$\Delta - Y$

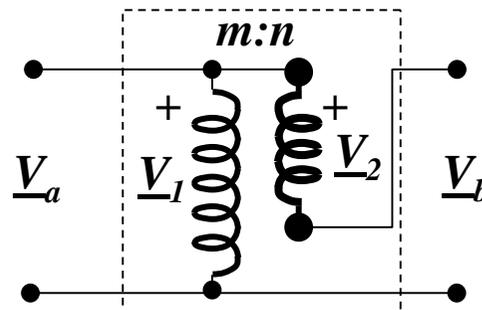




**Autotrasformatore monofase**



$$\underline{V}_b = \underline{V}_a (m+n) / m$$



$$\underline{V}_b = \underline{V}_a (m-n) / m$$

L'autotrasformatore è conveniente per rapporti di trasformazione  $(m \pm n)/m$  non molto diversi da uno ( $m > n$ ).

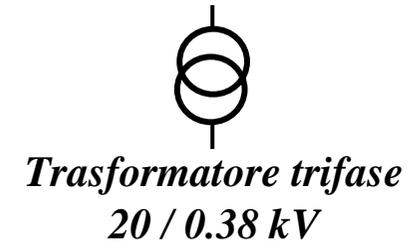
Per contro, i circuiti primario e secondario non sono disaccoppiati, ma hanno un terminale in comune

### Componenti e simbologia

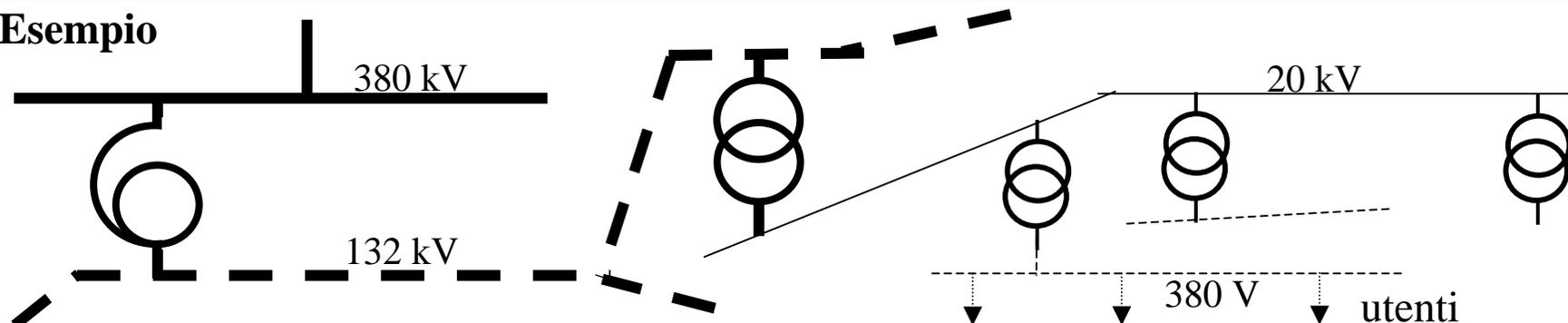
*AT : alta tensione; MT : media tensione; BT : bassa tensione*

	<b>380 kV</b>	<i>trasmissione in AT</i>
	<b>132 kV</b>	<i>distribuzione in AT</i>
	<b>20 kV</b>	<i>distribuzione in MT</i>
	<b>380 V</b>	<i>distribuzione in BT</i>

*linee trifasi:  
tensioni concatenate  
valori efficaci*



### Esempio



La rete di trasmissione in AT è alimentata da un insieme di generatori trifase (*alternatori*), per mezzo di trasformatori elevatori di tensione

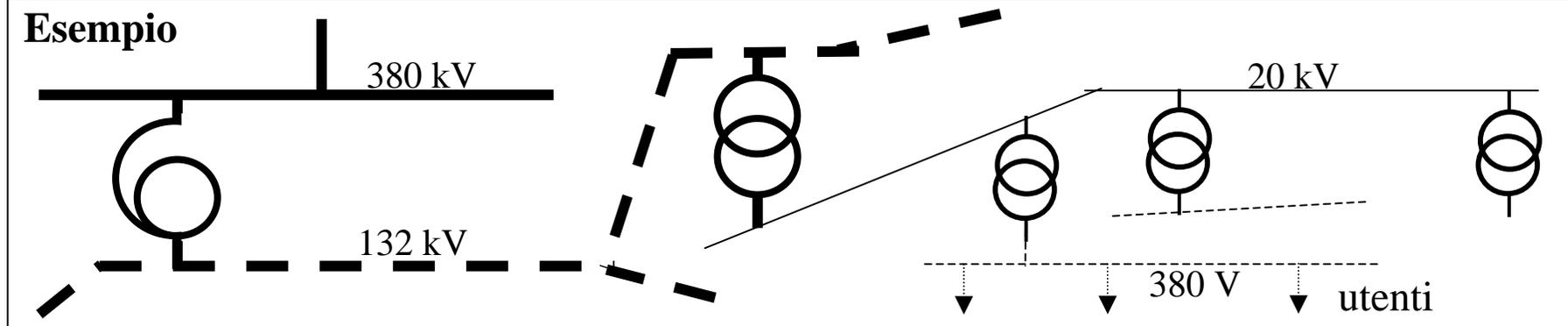
Le reti di trasmissione e distribuzione sono realizzate in modo da permettere connessioni multiple o di emergenza.

Componenti specifici (*interruttori, sezionatori*) permettono di connettere o disconnettere sezioni di rete in AT, MT e BT.

Organi particolari permettono di compensare le cadute di tensione in linea, per garantire la costanza della tensione d'utente entro i margini consentiti.

*Condensatori di rifasamento* sono inseribili in vari punti critici della rete.

La frequenza dell'intero sistema è fissa ( p. es. 50 Hz in Italia, 60 Hz negli U.S.A. )



**La rete di distribuzione in BT è di norma trifase a quattro fili.**

**Le utenze in BT si distinguono in utenze trifase (laboratori, officine, ecc.) e utenze monofase (utenze domestiche)**

**Sono in esercizio due sistemi standard:**

**Sistema  $380 V_{eff}$  concatenata /  $220 V_{eff}$  stellata ( $220 \cong 380 / 1.73$ ) : alle utenze monofase è assegnata la tensione stellata a  $220 V_{eff}$  (fra una fase e il neutro)**

**Sistema  $220 V_{eff}$  concatenata /  $127 V_{eff}$  stellata ( $127 \cong 220 / 1.73$ ) : alle utenze monofase è assegnata la tensione concatenata a  $220 V_{eff}$  (fra due fasi) e (eventualmente) la tensione stellata a  $127 V_{eff}$  (fra una fase e il neutro)**

**Il sistema  $220 / 127$  è in fase di dismissione**

