

# Trasmissione dell'energia elettrica

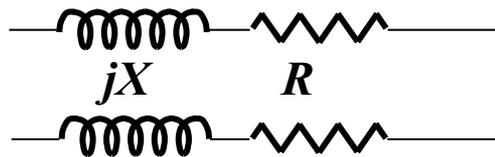
## Schema di principio



## Effetti della linea di trasmissione

1. dissipazione di energia
2. caduta di tensione

### Schema equivalente della linea



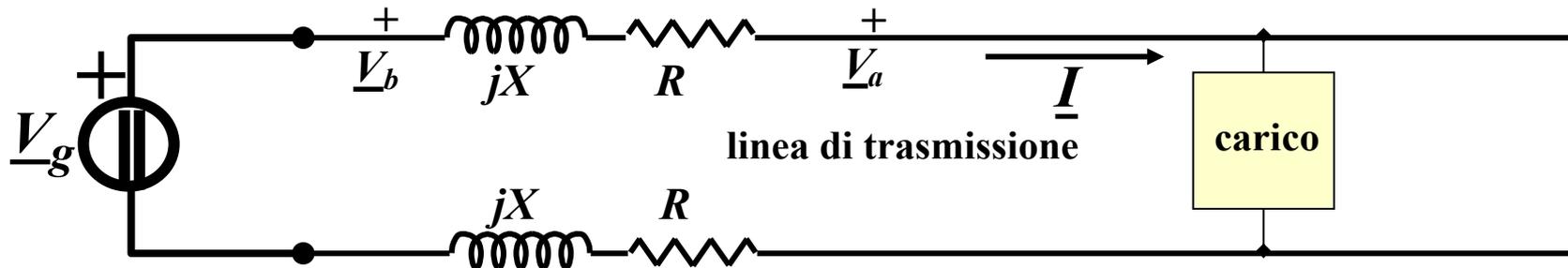
**$R$**   
*resistenza di linea*

*$R$  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

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

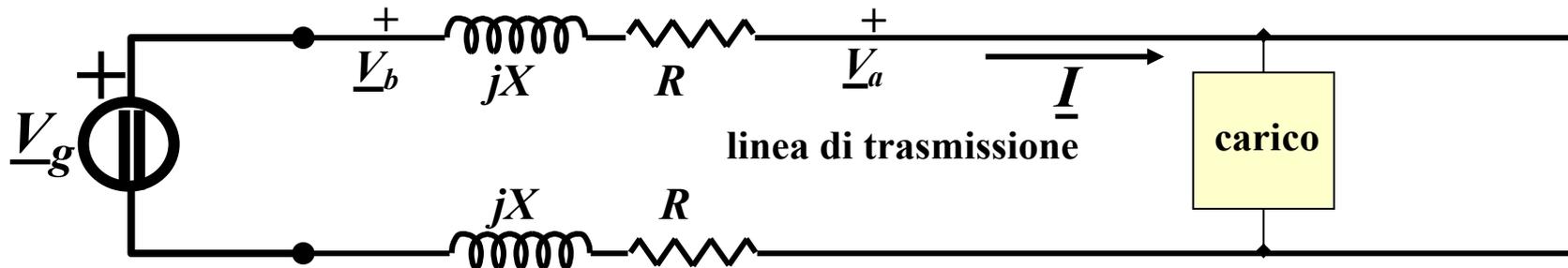
*La potenza dissipata provoca riscaldamento dei conduttori e aggravio nei costi di gestione.*

*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

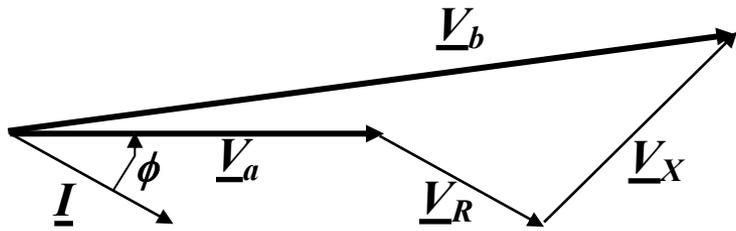


## Effetti della linea di trasmissione

1. dissipazione di energia
2. caduta di tensione

### 2. Caduta di tensione

$$V_a \cong V_b \cong V$$



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

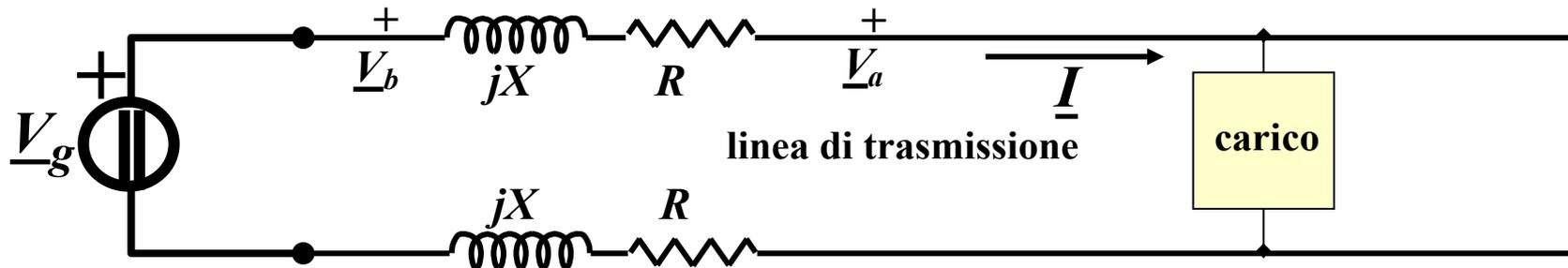
Si ricordi che

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

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

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

## Schema di principio



## Effetti della linea di trasmissione

1. dissipazione di energia
2. caduta di tensione

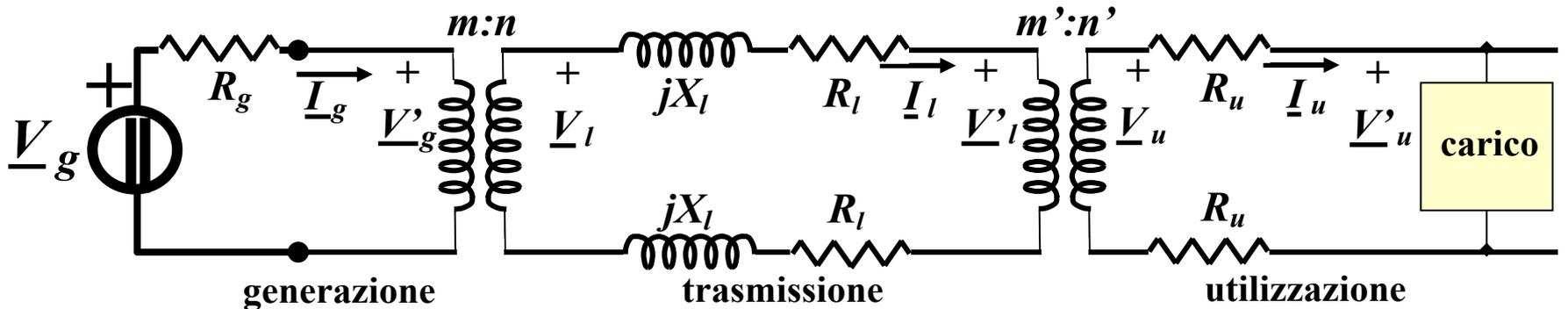
### 2. Caduta percentuale di tensione

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

*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.*



$$\begin{cases} \underline{V}_l \approx (n/m) \underline{V}_g \\ \underline{I}_l = (m/n) \underline{I}_g \end{cases}$$

$$\begin{cases} \underline{V}_g \approx \underline{V}'_g \\ n > m \\ \text{trasformatore in salita} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \underline{V}_u \approx (n'/m') \underline{V}_l \\ \underline{I}_u = (m'/n') \underline{I}_l \end{cases}$$

$$\begin{cases} \underline{V}_l \approx \underline{V}'_l \\ n' < m' \\ \text{trasformatore in discesa} \end{cases}$$

Equazioni di definizione del trasformatore ideale nel dominio dei fasori

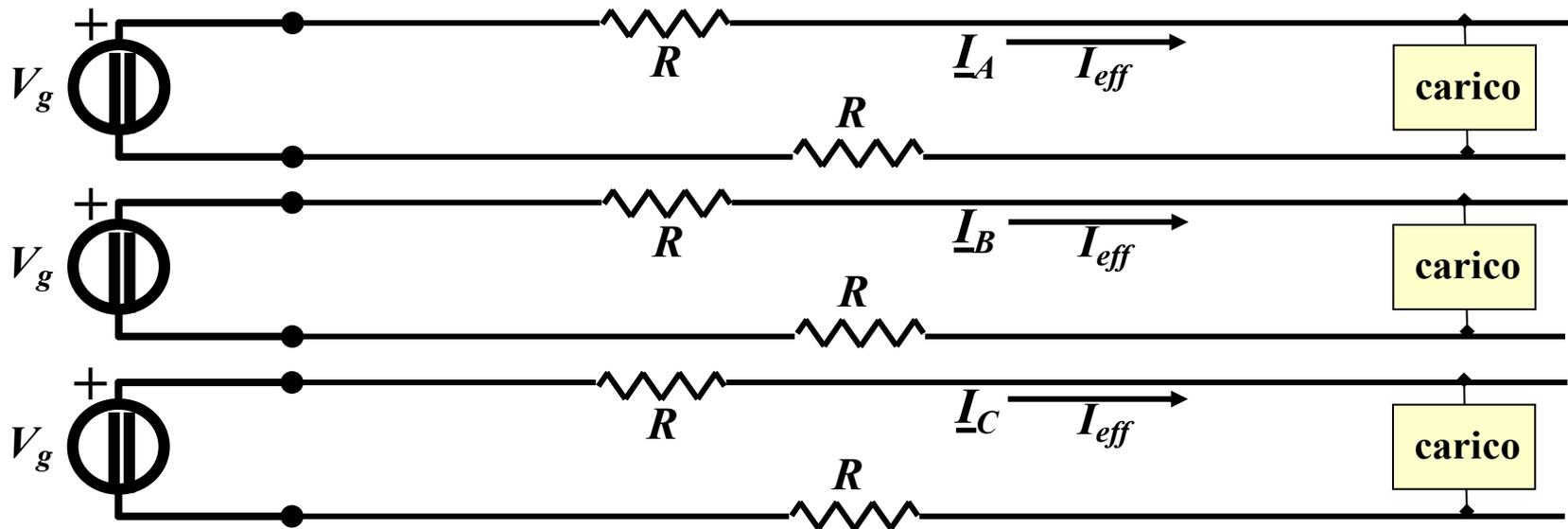
*Nelle applicazioni:  $V_g$  qualche decina di kV,  $V_l$  qualche centinaio di kV,  $V_u$  qualche centinaio di V.*

*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 ( $> 99\%$ ). Essi consentono l'utilizzo di elevate tensioni e (relativamente) basse correnti in linea: è così possibile la trasmissione di energia elettrica a grande distanza, limitando sia le perdite di energia che le cadute di tensione.  $\underline{V}_l$  è quindi circa lo stesso all'ingresso e all'uscita della linea di trasmissione.*

### Sistema monofase



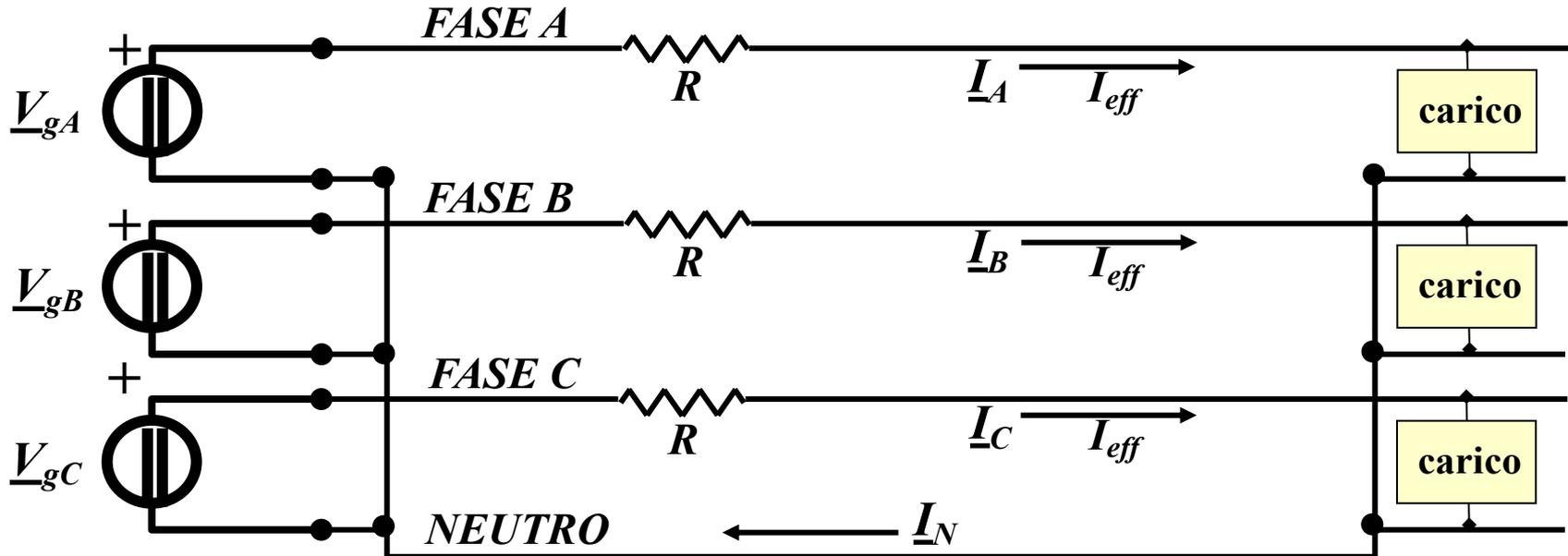
**Potenza attiva totale utile**  
*( $R_C$  resistenza di carico)*

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

**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

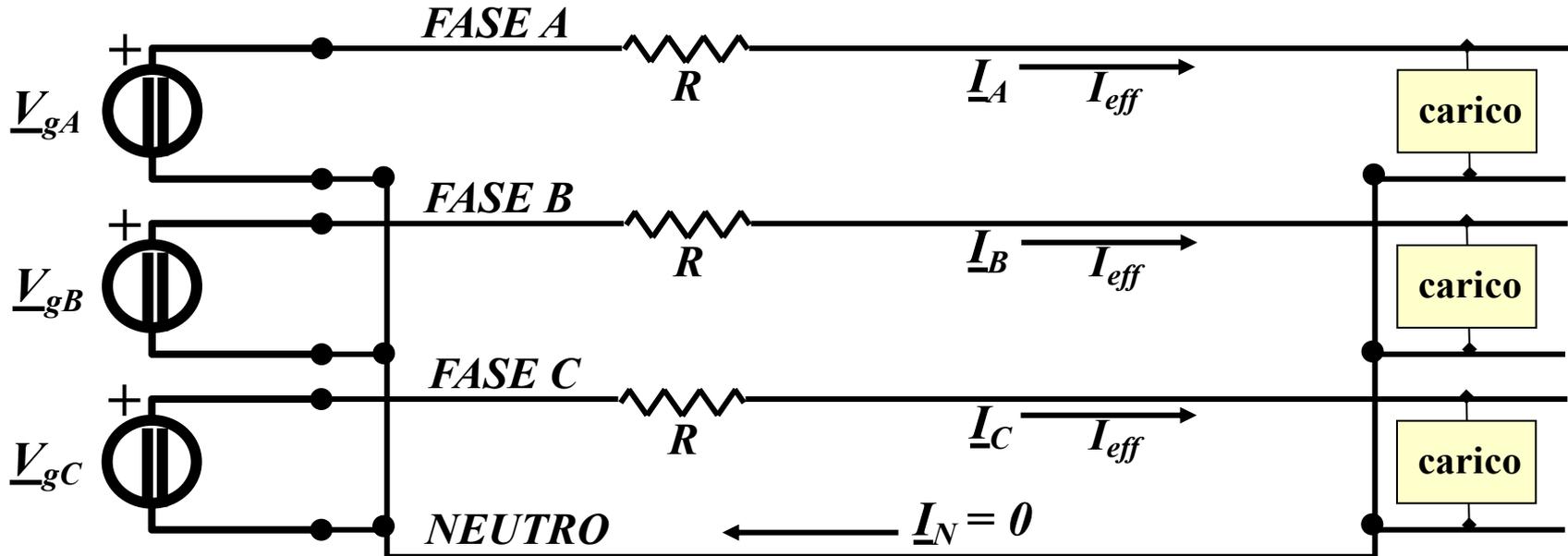
Notazione: *FASE A*  
*FASE B*  
*FASE C*  
*NEUTRO*

#### Correnti e tensioni di fase

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

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

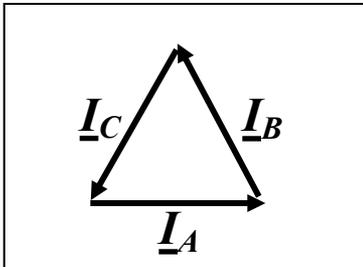
### Sistema trifase a quattro fili



Circuito trifase equilibrato

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

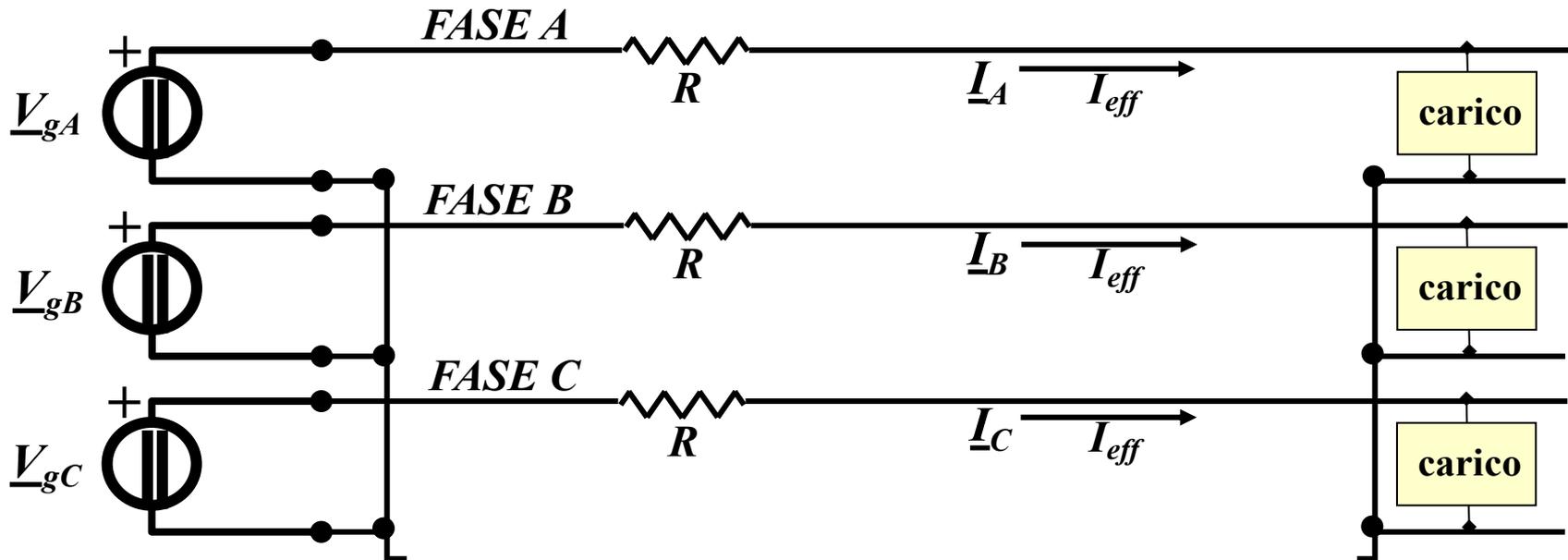
Poiché  $\underline{I}_N = 0$ , il conduttore di neutro in linea può essere eliminato



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

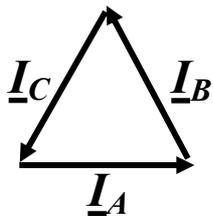
A parità di potenza utile, in un sistema trifase equilibrato è dissipata metà potenza in linea rispetto a un sistema monofase

### Sistema trifase a tre fili



### Circuito trifase equilibrato

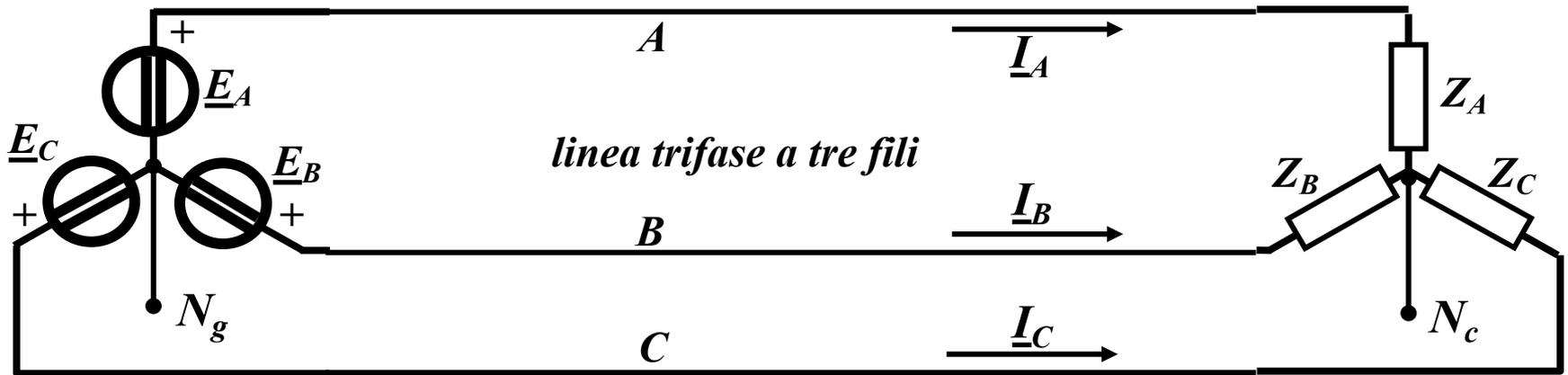
$$\underline{I}_N = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 0$$



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

*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

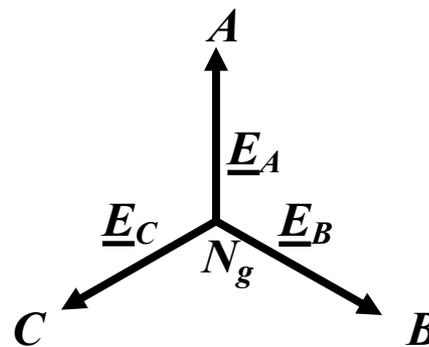


*Generatore in  
connessione a stella*

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

*$N_g$  neutro del  
generatore*

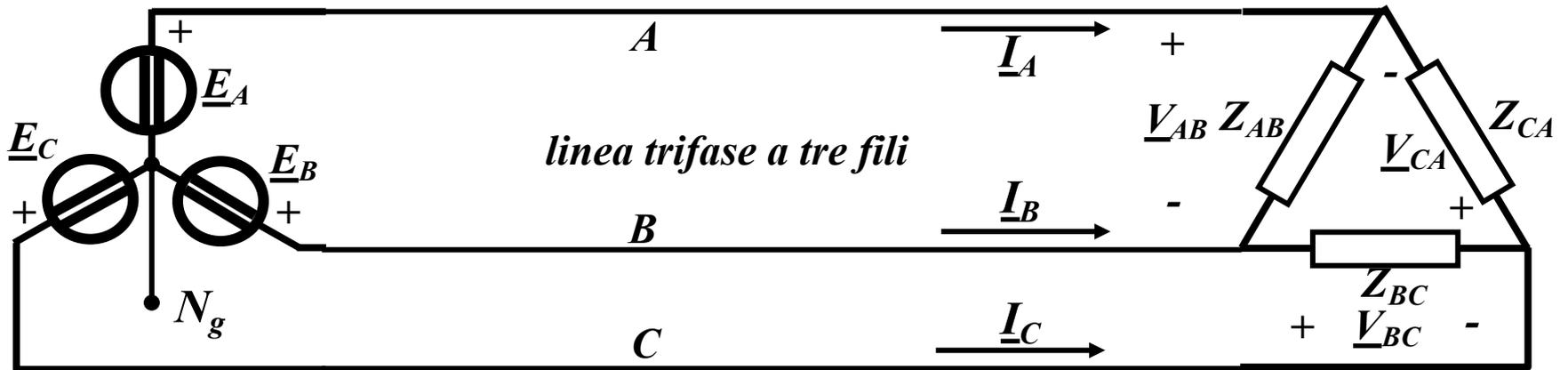
*sistema trifase simmetrico*



*Carico in  
connessione a stella*

*$N_c$  neutro del  
carico*

### Sistema trifase di trasmissione dell'energia elettrica

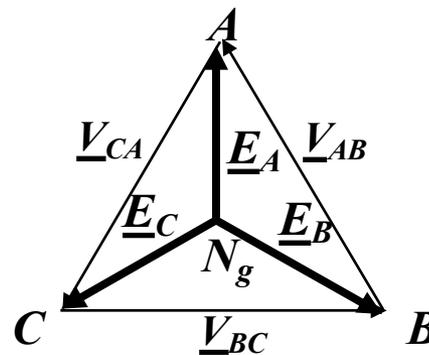


*Generatore in  
connessione a stella*

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

$N_g$  *neutro del  
generatore*

*sistema trifase simmetrico*



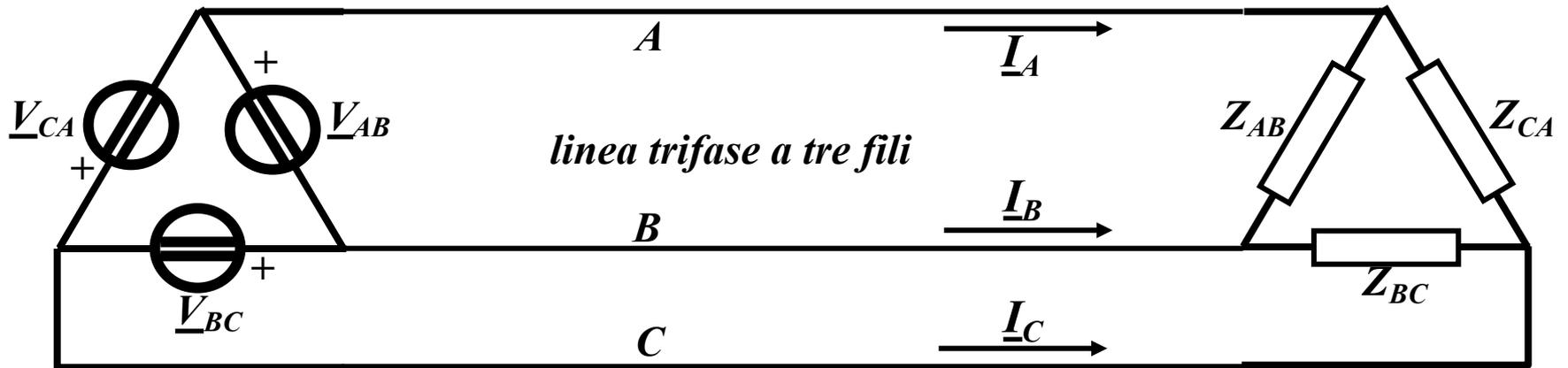
*Carico in  
connessione a  
triangolo*

$$\underline{V}_{AB} = \underline{V}_{BC} = \underline{V}_{CA} = V$$

$$\underline{E}_A = \underline{E}_B = \underline{E}_C = E$$

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

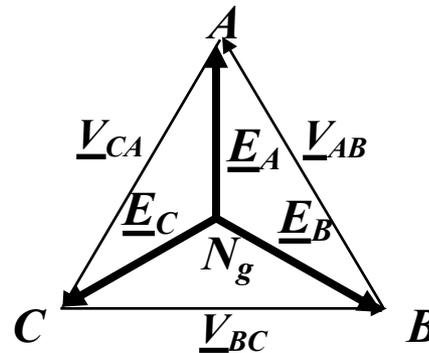
### Sistema trifase di trasmissione dell'energia elettrica



*Generatore in  
connessione a  
triangolo*

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

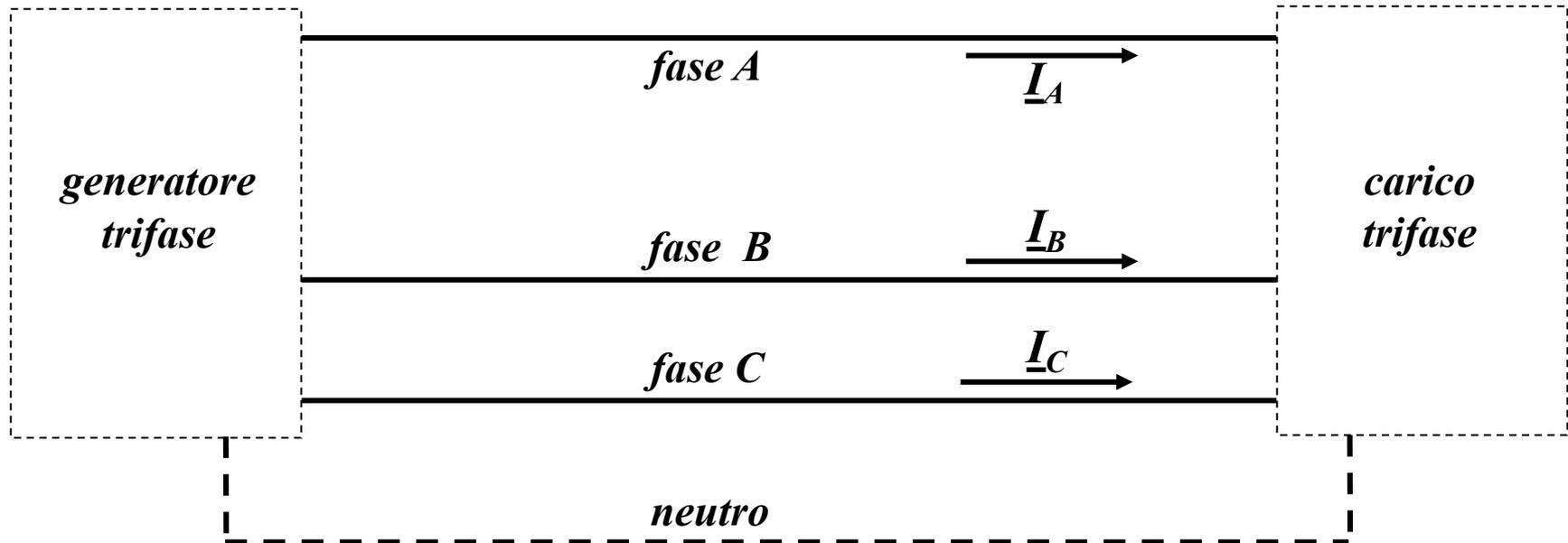
*sistema trifase simmetrico*



*Carico in  
connessione a  
triangolo*

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

## Sistema trifase di trasmissione dell'energia elettrica



*linea trifase a tre o quattro fili*

## Componenti e simbologia

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

	380 kV	trasmissione in AT
	132 kV	distribuzione in AT
	20 kV	distribuzione in MT
	380 V	distribuzione in BT

*linee trifasi:  
tensioni concatenate  
valori efficaci*



*Autotrasformatore  
trifase 380 / 132 kV*

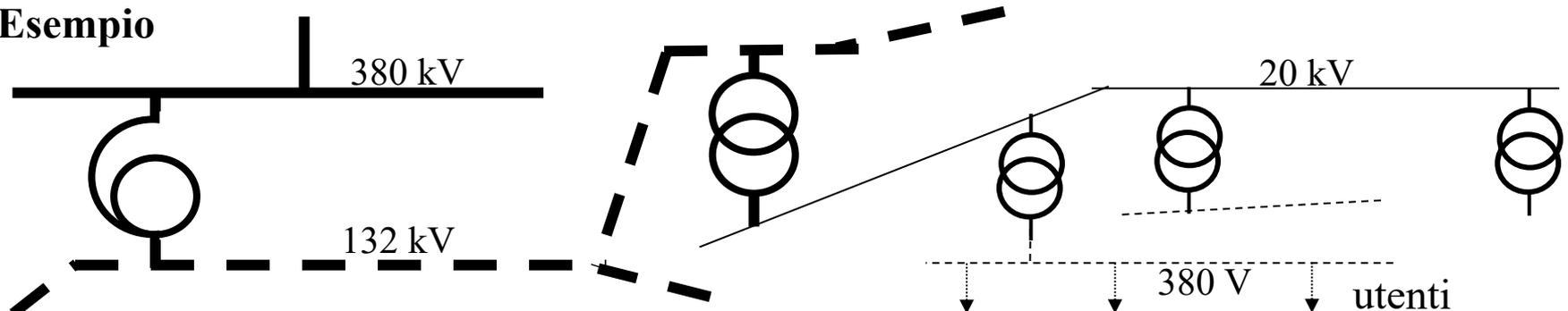


*Trasformatore  
trifase 132 / 20 kV*



*Trasformatore trifase  
20 / 0.38 kV*

## 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.**

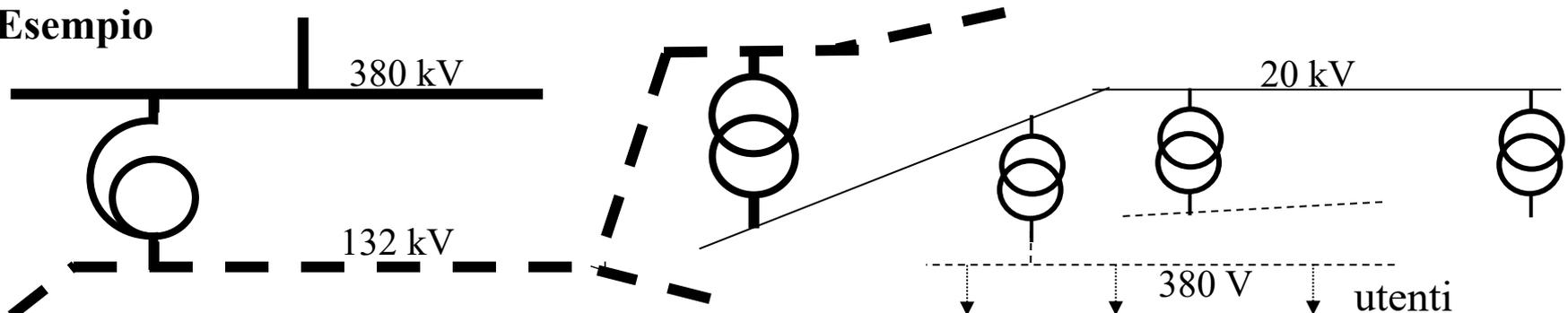
**Componenti specifici (*interruttori, sezionatori*) permettono di connettere o disconnettere sezioni di rete in AT, MT e BT.**

**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. )**

**Esempio**



**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**

**Esempio**

