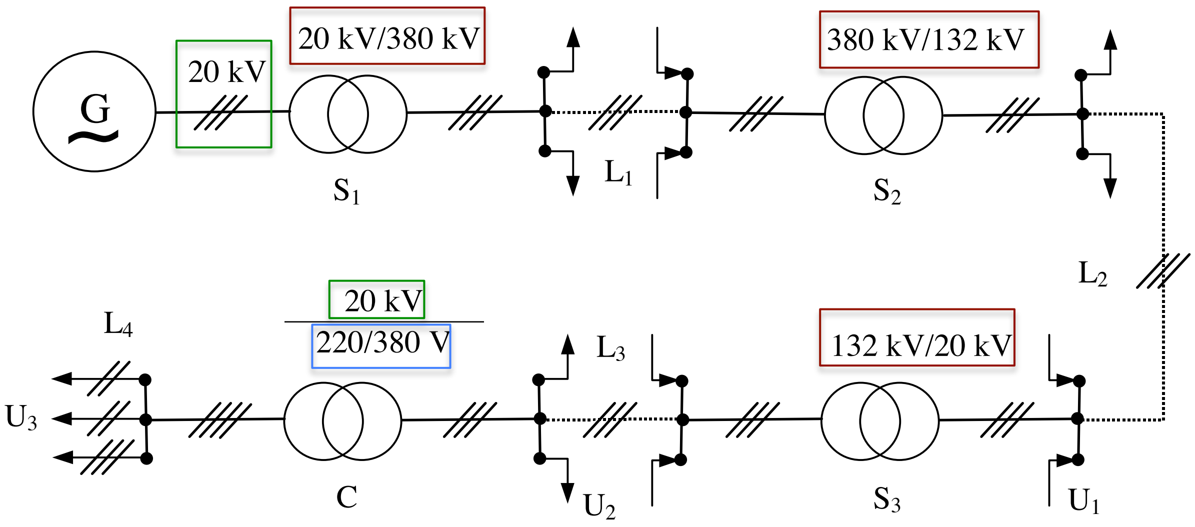
Produzione, trasferimento e distribuzione di energia elettrica

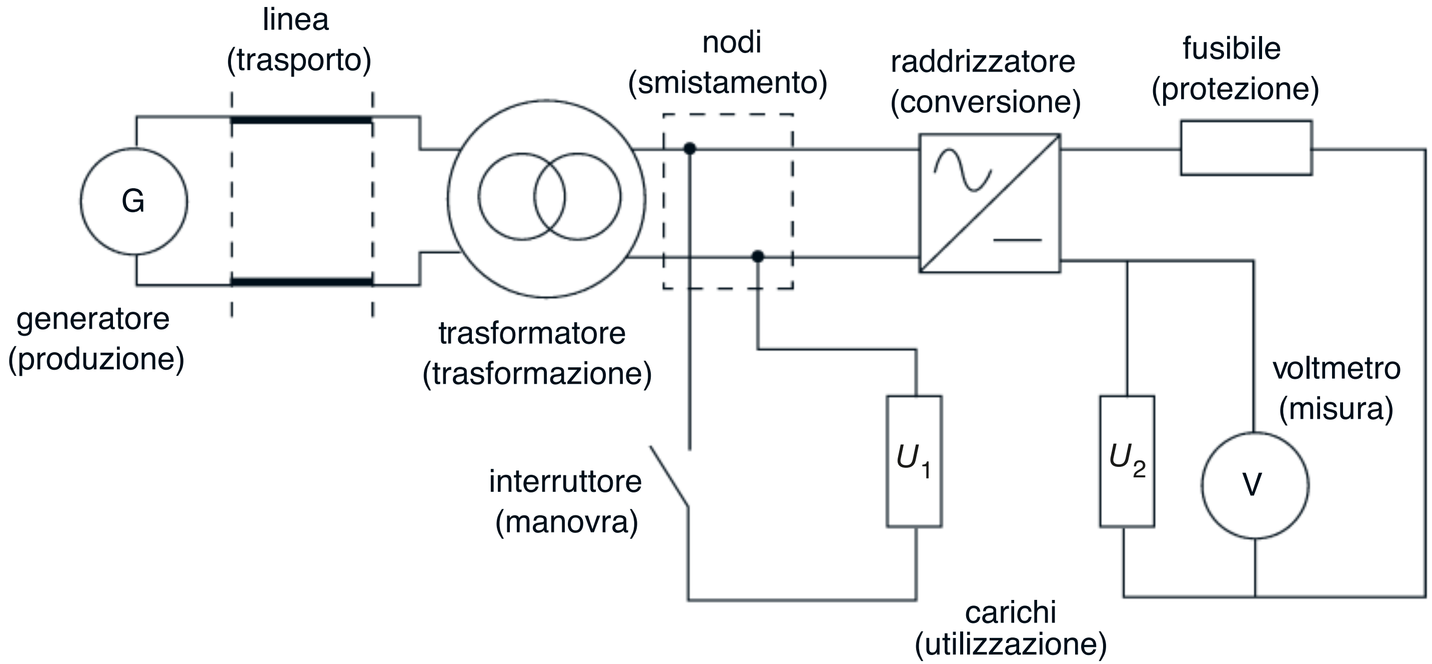
- necessita' di **energia facilmente trasformabile** in calore, lavoro meccanico, energia chimica, luce …
- **energia elettrica** per la sua **facilità di trasformazione**, per la possibilità di **trasmissione** a lunghissime distanze , affidabilita'…
- produzione di energia elettrica: **alternatori**, azionati da:
    - energia cinetica di acqua in caduta: **centrali idroelettriche**
    - energia termica: geotermica, combustione di combustibili fossili solidi, liquidi, gassosi, combustibile nucleare: **centrali termoelettriche** e **nucleari** (calore, vapore che aziona gli alternatori)
    - energia eolica: centrali eoliche
    - energia solare: centrali solari
    - energia da biomasse (metano)

L'insieme delle macchine, apparecchiature e linee destinate alla produzione, trasformazione, trasmissione, distribuzione ed utilizzazione dell'energia elettrica costituisce il sistema elettrico in senso lato



- produzione: tensione non elevata per isolamento alternatori (G)
- trasformazione: della tensione a valori opportuni in stazioni (S1 e S2 primarie, S3 secondarie, C cabine di trasformazione)
- trasmissione: dell'energia con alta tensione e bassa corrente (L1 primaria, L2 secondaria) linee aeree o in cavo
- distribuzione: collegamento cabine-utenze (media tensione L3, bassa tensione L4)
- utilizzo: a varie tensioni (U1, U2, U3) a seconda degli usi (conversione in altre forme di energia)

- bassa tensione BT < 1000 V — 230 V sistemi trifase in BT
- media tensione MT 1000-30000 V — 15-20 kV linee distrib. secondaria (10 km)
- alta tensione AT 30 kV-130 kV — 132, 150, 220, 380 kV linee distrib. primaria (100 km)
- altissima tensione AAT >130 kV


linea
(trasporto)
nodi
(smistamento)
raddrizzatore
(conversione)
fusibile
(protezione)
G
generatore
(produzione)
trasformatore
(trasformazione)
voltmetro
(misura)
interruttore
(manovra)
U_1
U_2
V
carichi
(utilizzazione)

Il trasformatore viene ampiamente usato nelle cabine elettriche di trasformazione della rete elettrica come mezzo di interfacciamento tra le rete di trasmissione elettrica ad alta e altissima tensione e quella di distribuzione a media e bassa tensione che collegano le centrali elettriche di produzione fino alle utenze finali (industriali e domestiche).

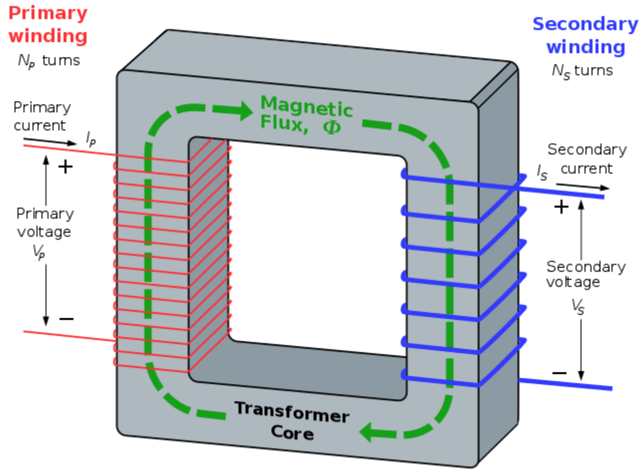
la potenza attiva che le centrali elettriche immettono nella rete di trasmissione deve essere trasportata anche per centinaia di km[7]. La potenza elettrica è legata in maniera diretta ai parametri di tensione V e intensità di corrente I, secondo la formula:

$$P = VI\cos\phi$$

dove $\cos\phi$, detto fattore di potenza, è il correttivo dovuto allo sfasamento fra tensione e corrente.

Ciò significa che a parità di potenza aumentando la tensione V diminuisce l'intensità di corrente I (e si deve mantenere $\cos\phi$ più vicino possibile al valore unitario).[8] Parte della potenza trasportata nei conduttori elettrici è dissipata in forma di calore per effetto Joule, che è proporzionale alla resistenza della linea e al quadrato dell'intensità di corrente, quindi più è intensa la corrente e più calore si genera. Al fine di minimizzare tale effetto si deve quindi diminuire la resistenza o l'intensità di corrente. Per ridurre la resistenza, bisogna aumentare la sezione dei conduttori, ma esiste un limite economico e tecnologico nel dimensionamento delle linee elettriche, legato anche al fenomeno della caduta di tensione delle linee stesse.

Al fine quindi di abbassare l'intensità di corrente I si effettua una trasformazione aumentando la tensione V a parità di potenza P.



Trasformatore ideale

$$V_P = N_P \frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t} \quad V_S = N_S \frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t} \quad \frac{V_p}{V_s} = \frac{N_p}{N_s} = \mathrm{k}_0$$

$$P_{\text{incoming}} = I_P V_P = P_{\text{outgoing}} = I_S V_S$$

$$\frac{V_S}{V_P} = \frac{N_S}{N_P} = \frac{I_P}{I_S}$$

Confronto trasferimento DC-AC

trasferimento di energia elettrica:

- corrente continua
- corrente alternata monofase (50 Hz Europa)
- corrente alternata trifase (frequenza industriale)

  - parità della potenza trasmessa P [W];
  - parità della tensione di trasmissione V [V];
  - parità della lunghezza di linea L [m];
  - parità della potenza dissipata sulla linea Δp [W];
  - parità di conduttore (quindi stesso peso specifico γ e stessa resistività ρ).

- corrente continua: due conduttori, peso $G_{cc} = 4k$
- corrente alternata monofase: due conduttori, peso $G_{cam} = 4k/\cos^2\phi$
- corrente alternata monofase: tre conduttori, peso $G_{cat} = 3k/\cos^2\phi$

- $G_{cat} < G_{cam}$ per qualunque ϕ
- $G_{cc} < G_{cat}$ se $\cos\phi<3/4 \rightarrow \cos\phi>0.866$ il sistema di trasmissione piu'

conveniente e' in corrente alternata trifase.

- La generazione di energia elettrica avviene quasi totalmente sotto forma di corrente alternata trifase, in quanto i relativi generatori (alternatori trifase) sono costruttivamente più semplici e robusti dei generatori in corrente continua; anche l'utilizzazione avviene prevalentemente in corrente alternata. Volendo effettuare la trasmissione in corrente continua occorre una stazione di conversione a monte ed una a valle della linea. Attualmente la conversione avviene mediante raddrizzatori statici (diodi ed SCR);

- La trasmissione in corrente continua presenta il vantaggio, rispetto alle linee trifase, di un minore costo degli isolatori e dei sostegni, sia per il fatto di impiegare due conduttori (o anche uno se il ritorno è effettuato a terra) anziché tre, sia perché, a parità di valore efficace della tensione V, la linea a corrente alternata va costruita con un livello di isolamento proporzionato al valore massimo $V_M = \sqrt{2}\,V$, mentre quella a corrente continua deve essere isolata solo per la tensione V; questi vantaggi risultano particolarmente importanti per le linee lunghe ad altissima tensione;

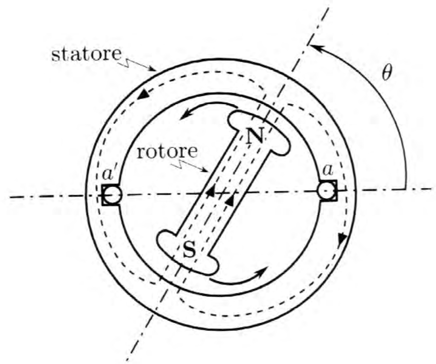
- In corrente continua c'è una minore caduta di tensione di linea perché manca la caduta di tensione dovuta alla reattanza induttiva. Altro vantaggio, particolarmente sensibile nelle linee in cavo, è l'assenza di effetti capacitivi.

Attualmente la trasmissione di energia elettrica a tensione 220kV - 380kV si effettua con linee aeree trifasi; la corrente continua è stata adottata, per esempio, per l'attraversamento di tratti di mare con cavo sottomarino (Toscana - Corsica - Sardegna a 200kV, Inghilterra - Francia, fiordi norvegesi, etc.).

Circuiti trifase

Generatori di tensione alternata

Un generatore di tensione **monofase** (*alternatore*) è costituito da due parti coassiali: una parte fissa, detta *statore*, e una parte rotante, detta *rotore*. Il rotore può essere un magnete permanente oppure un avvolgimento percorso da corrente continua che genera un campo magnetico costante nel tempo. Lo statore è un cilindro cavo sulla cui superficie interna sono ricavate delle scanalature in cui sono alloggiate le spire dell'avvolgimento di statore.



Il rotore ruota con velocità angolare costante ω, quindi il flusso varia nel tempo con legge sinusoidale:

$$\Phi(t) = \Phi_m \operatorname{sen}(\omega t).$$

flusso del campo magnetico **B** attraverso alle spire dell'avvolgimento dello statore

Per la legge di Faraday, ai capi dell'avvolgimento verrà indotta una tensione pari a

$$v_{aa'}(t) = \frac{d\Phi}{dt} = \omega \Phi_m \cos(\omega t) \tag{11.1}$$

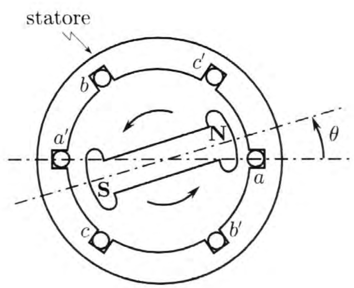
La frequenza della sinusoide, nella maggior parte dei Paesi, è pari a 50 Hz ($\omega = 100\pi$); essa corrisponde ad una velocità di rotazione di 50 giri al secondo cioè 3000 giri al minuto ([1]).

Collegando un carico al generatore, questo eroga una potenza che ha il tipico andamento pulsante descritto nel capitolo precedente, cioè

$$p(t) = \frac{1}{2} V_m I_m \cos(\theta_v - \theta_i) + \frac{1}{2} V_m I_m \cos(2\omega t + \theta_v + \theta_i) \tag{11.2}$$

Ciò è causa di vibrazioni meccaniche che rendono problematica la costruzione di generatori monofase di potenza elevata.

In Figura 11.3 è mostrata la sezione schematica di un **generatore trifase**. Nello statore sono alloggiati tre avvolgimenti distinti, di cui in Figura 11.3 è mostrata solo una spira per ciascuno. Il primo avvolgimento è contrassegnato con $a - a'$, il secondo con $b - b'$ e il terzo con $c - c'$. Il secondo avvolgimento è ruotato rispetto al primo, lungo la periferia dello statore, di un angolo pari a 120°. Lo stesso vale per il terzo avvolgimento rispetto al secondo.

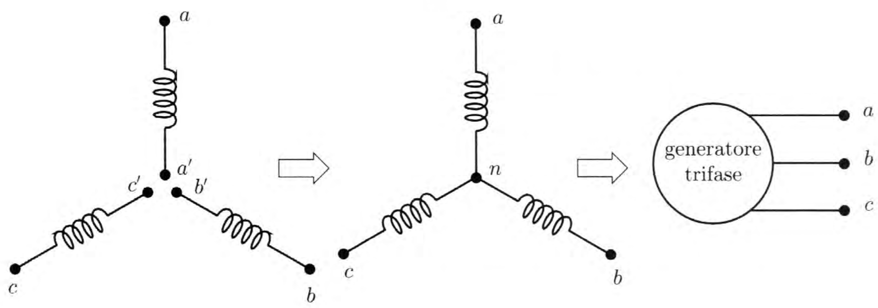


Il principio di funzionamento è simile a quello del generatore monofase. Tuttavia, a causa della rotazione spaziale degli avvolgimenti, **i flussi concatenati sono sfasati, l'uno rispetto all'altro, di 120°**:

Di conseguenza le tre tensioni indotte sono sfasate, l'una rispetto all'altra, di 120°:

$$
\begin{aligned}
v_{aa'}(t) &= \omega\Phi_m \cos(\omega t) \\
v_{bb'}(t) &= \omega\Phi_m \cos(\omega t - 120°) \\
v_{cc'}(t) &= \omega\Phi_m \cos(\omega t - 240°) \\
&= \omega\Phi_m \cos(\omega t + 120°)
\end{aligned}
$$

Le tre tensioni hanno stessa **ampiezza** e **frequenza, ma tre fasi diverse**, da cui il nome di generatore *trifase*.

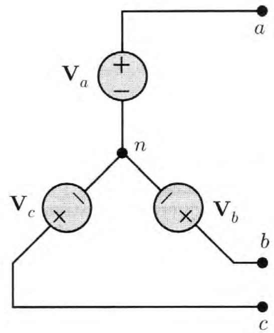


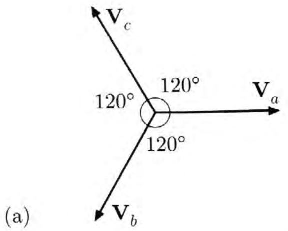
I tre avvolgimenti sono collegati generalmente **a stella**, come mostrato in Figura 11.4: i morsetti a', b' e c' sono cortocircuitati e il nodo comune è detto **centro-stella** (indicato con n in Figura 11.4). Il generatore trifase appare dunque esternamente come un **elemento a tre terminali**; i terminali sono indicati con le lettere a, b e c.

Trascurando l'impedenza propria degli avvolgimenti, possiamo schematizzare il generatore trifase con il modello in Figura 11.5, in cui i tre generatori sinusoidali hanno le seguenti tensioni:

$$\boxed{\begin{aligned} v_a(t) &= V_m \cos(\omega t) \\ v_b(t) &= V_m \cos(\omega t - 120°) \\ v_c(t) &= V_m \cos(\omega t + 120°) \end{aligned}} \tag{11.3}$$

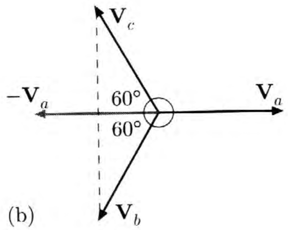
Si noti che si è indicata con v_a la tensione $v_{aa'} = v_{an}$

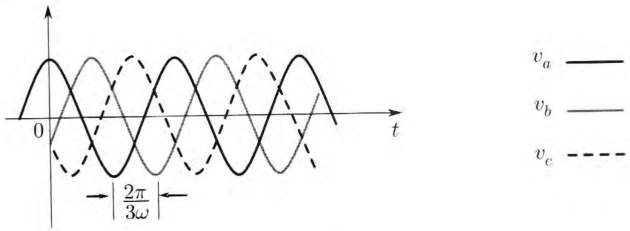




$$\boxed{\mathbf{V}_a + \mathbf{V}_b + \mathbf{V}_c = 0}$$

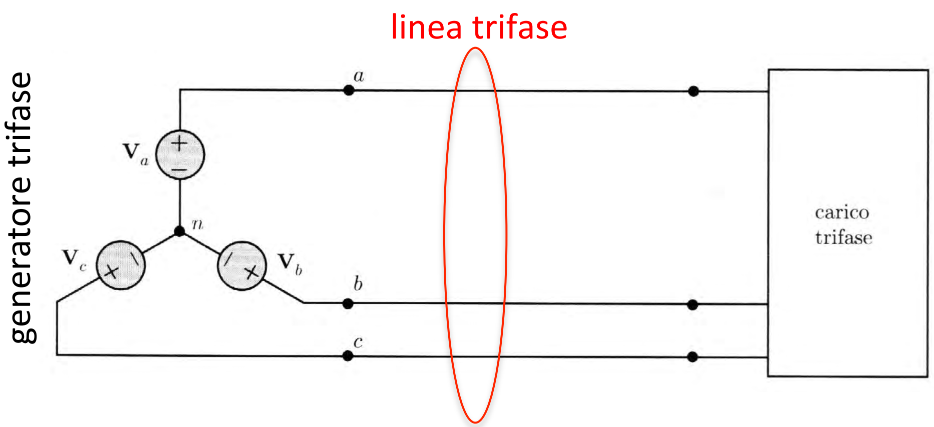
$$v_a(t) + v_b(t) + v_c(t) = 0$$





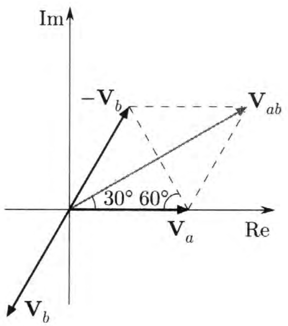
sequenza positiva di tensioni

Circuiti trifase



Le tensioni tra i conduttori della linea sono dette **tensioni di linea** o **tensioni concatenate**. Applicando la LKT si ha,

$$\mathbf{V}_{ab} = \mathbf{V}_a - \mathbf{V}_b \qquad \mathbf{V}_{bc} = \mathbf{V}_b - \mathbf{V}_c \qquad \mathbf{V}_{ca} = \mathbf{V}_c - \mathbf{V}_a \tag{11.7}$$



$$\boxed{\mathbf{V}_{ab} = \sqrt{3}\, V_m \angle 30^\circ}$$

$$\boxed{\begin{aligned} \mathbf{V}_{bc} &= \sqrt{3}\, V_m \angle (30^\circ - 120^\circ) = \sqrt{3}\, V_m \angle -90^\circ \\ \mathbf{V}_{ca} &= \sqrt{3}\, V_m \angle (30^\circ + 120^\circ) = \sqrt{3}\, V_m \angle\, 150^\circ \end{aligned}}$$

Quindi anche le tensioni di linea costituiscono una terna equilibrata di tensioni. Perciò:

$$\mathbf{V}_{ab} + \mathbf{V}_{bc} + \mathbf{V}_{ca} = 0 \tag{11.9}$$

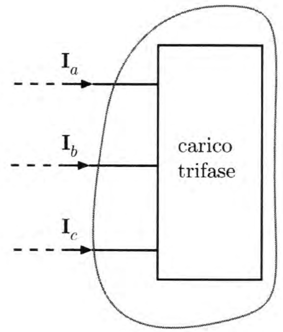
Ciò del resto era prevedibile con la LKT.

L'ampiezza delle tensioni di linea è pari all'ampiezza delle tensioni dei generatori moltiplicata per $\sqrt{3}$. Per esempio in Italia si utilizzano generatori di valore efficace 220 V e tensioni di linea di valore efficace $\sqrt{3} \times 220 \cong 380$ V.

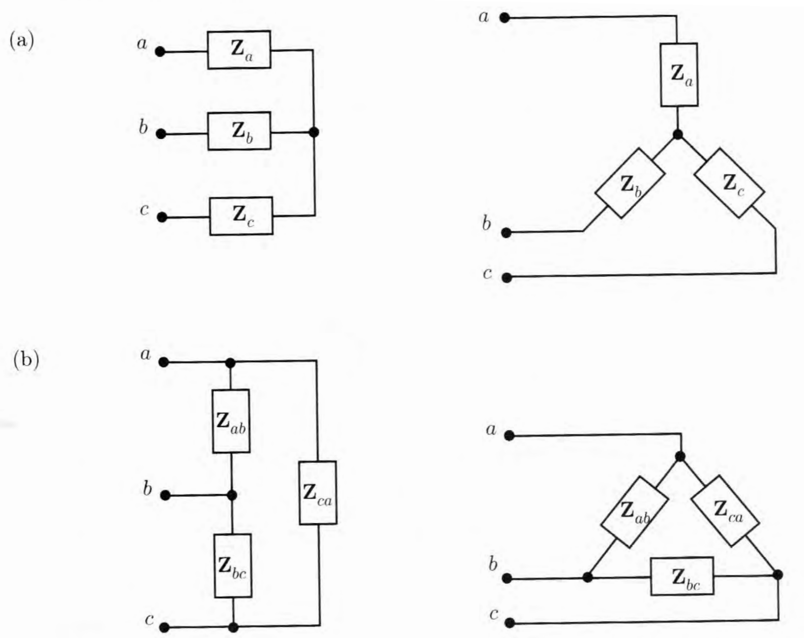
Si chiamano **correnti di linea** le tre correnti assorbite dal carico (v. Figura 11.11). Per la LKC abbiamo in generale:

$$\mathbf{I}_a + \mathbf{I}_b + \mathbf{I}_c = 0 \tag{11.10}$$

Un carico trifase si dice **equilibrato** se *le correnti di linea hanno la stessa ampiezza*. Altrimenti viene detto **squilibrato**. In un carico equilibrato, anche le



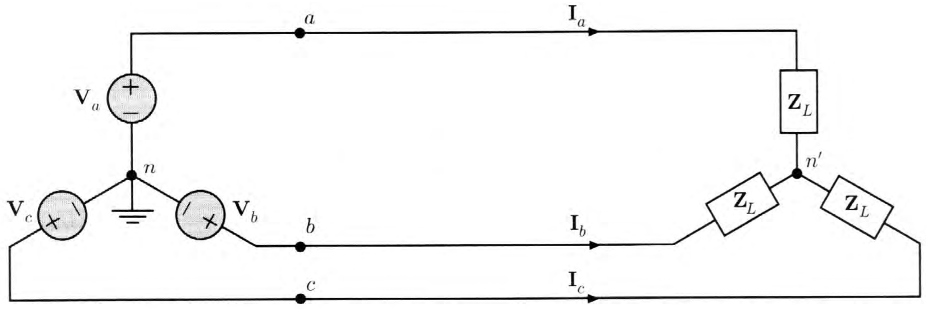
Le configurazioni utilizzate per il carico sono prevalentemente due, il **carico a stella** (Figura 11.12a) e il **carico a triangolo**



tensioni di fase: tensioni ai capi dei bipoli del carico

correnti di fase: correnti nei bipoli del carico

Circuiti trifase con carico equilibrato: carico a stella



LCK al nodo n'

$$\mathbf{I}_a + \mathbf{I}_b + \mathbf{I}_c = 0$$

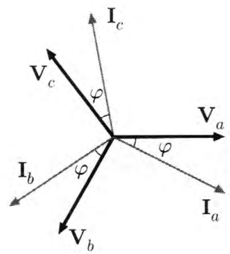
$$\mathbf{V}_{n'} = \frac{\mathbf{V}_a + \mathbf{V}_b + \mathbf{V}_c}{3} = 0$$

Il centro-stella del carico è allo stesso potenziale del centro-stella dei generatori.
Tra n ed n' esiste quindi un *corto circuito virtuale*, evidenziato nella Fi-

Pertanto, **le tensioni di fase coincidono con le tensioni dei tre generatori**, e le **correnti di linea** si ricavano facilmente con la legge di Ohm:

$$\boxed{\begin{aligned} \mathbf{I}_a &= \frac{\mathbf{V}_a - \mathbf{V}_{n'}}{\mathbf{Z}_L} = \frac{\mathbf{V}_a}{\mathbf{Z}_L} = \frac{V_m}{Z_L}\angle -\varphi \\ \mathbf{I}_b &= \frac{\mathbf{V}_b - \mathbf{V}_{n'}}{\mathbf{Z}_L} = \frac{\mathbf{V}_b}{\mathbf{Z}_L} = \frac{V_m}{Z_L}\angle(-120^\circ - \varphi) \\ \mathbf{I}_c &= \frac{\mathbf{V}_c - \mathbf{V}_{n'}}{\mathbf{Z}_L} = \frac{\mathbf{V}_c}{\mathbf{Z}_L} = \frac{V_m}{Z_L}\angle(+120^\circ - \varphi) \end{aligned}} \qquad (11.12)$$

Dalle (11.12) si vede che le correnti di linea hanno tutte la stessa ampiezza e sono sfasate l'una rispetto all'altra di 120°, cioè formano una *terna equilibrata di correnti*. Pertanto il carico in Figura 11.13 è *equilibrato*. La differenza di fase tra ciascuna corrente di linea e la corrispondente tensione di fase è pari alla fase dell'impedenza di carico, col segno cambiato.

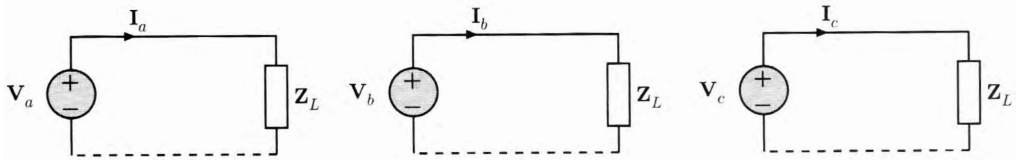


Quindi *la terna delle correnti di linea è ruotata di un angolo* $-\varphi$ *rispetto alla terna delle tensioni di fase* (Figura 11.15).

Poiché,

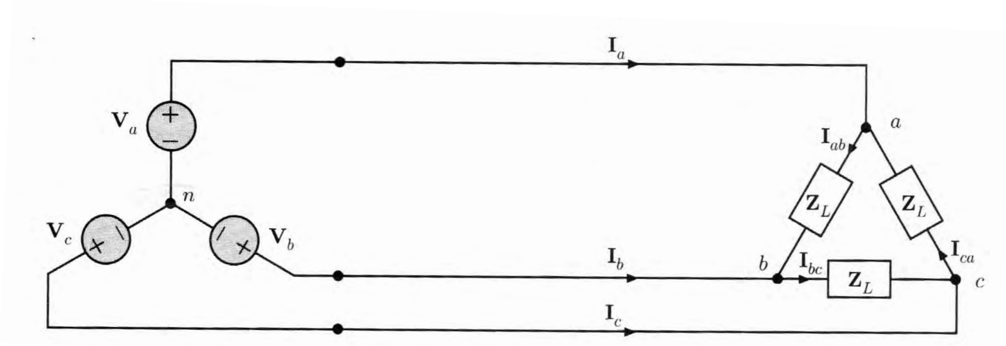
$$\mathbf{I}_a = \frac{\mathbf{V}_a}{\mathbf{Z}_L} \qquad \mathbf{I}_b = \frac{\mathbf{V}_b}{\mathbf{Z}_L} \qquad \mathbf{I}_c = \frac{\mathbf{V}_c}{\mathbf{Z}_L}$$

possiamo affermare che il circuito in Figura 11.13 equivale ai *tre circuiti monofase* indipendenti, mostrati in Figura 11.16.



Per ricavare le tre correnti basta analizzare una sola "fase", cioè uno dei circuiti in Figura 11.16, detti **circuiti equivalenti per fase**. Le altre correnti hanno la medesima ampiezza e sono sfasate di $\pm 120°$. In pratica, il circuito trifase si ottiene eliminando il filo inferiore da ciascun circuito in Figura 11.16. Ciò implica che il circuito trifase permette di alimentare le tre impedenze $\mathbf{Z}_L$ con le stesse correnti, *utilizzando tre fili anziché sei*.

Circuiti trifase con carico equilibrato: carico a triangolo



Nel triangolo, **le tensioni di fase coincidono con le tensioni di linea**. Quindi le **correnti di fase** sono:

$$\boxed{\begin{aligned} \mathbf{I}_{ab} &= \frac{\mathbf{V}_{ab}}{\mathbf{Z}_L} = \sqrt{3}\frac{V_m}{Z_L}\angle(30^\circ - \varphi) \\ \mathbf{I}_{bc} &= \frac{\mathbf{V}_{bc}}{\mathbf{Z}_L} = \sqrt{3}\frac{V_m}{Z_L}\angle(-90^\circ - \varphi) \\ \mathbf{I}_{ca} &= \frac{\mathbf{V}_{ca}}{\mathbf{Z}_L} = \sqrt{3}\frac{V_m}{Z_L}\angle(150^\circ - \varphi) \end{aligned}} \tag{11.14}$$

essendo $\mathbf{Z}_L = Z_L\angle\varphi$.

Pertanto le correnti di fase costituiscono una terna equilibrata.

Per quanto riguarda le **correnti di linea**, queste si possono ricavare applicando la LKC ai tre vertici del triangolo; per esempio al nodo a abbiamo,

$$\mathbf{I}_a = \mathbf{I}_{ab} - \mathbf{I}_{ca}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{I}_a &= 3\frac{\mathbf{V}_a}{\mathbf{Z}_L} = 3\frac{V_m}{Z_L}\angle - \varphi \\ \mathbf{I}_b &= 3\frac{\mathbf{V}_b}{\mathbf{Z}_L} = 3\frac{V_m}{Z_L}\angle(-120^\circ - \varphi) \\ \mathbf{I}_c &= 3\frac{\mathbf{V}_c}{\mathbf{Z}_L} = 3\frac{V_m}{Z_L}\angle(+120^\circ - \varphi) \end{aligned}$$

- Con il carico a triangolo, le correnti di linea sono esattamente il *triplo* di quelle che si avrebbero con un carico equilibrato a stella, a parità di impedenza.
- Confrontando le espressioni (11.15) con le (11.14), si vede che il rapporto tra l'ampiezza delle correnti di linea e quella delle correnti di fase vale $\sqrt{3}$.
- La differenza di fase tra ciascuna corrente di linea e la corrispondente tensione del generatore vale ancora $-\varphi$.

Potenza assorbita da un carico equilibrato

$$\boxed{\begin{array}{lll} \text{carico a stella} & V_\ell = \sqrt{3}\,V_f & I_\ell = I_f \\ \text{carico a triangolo} & V_\ell = V_f & I_\ell = \sqrt{3}\,I_f \end{array}} \qquad \begin{array}{r}(11.16a)\\(11.16b)\end{array}$$

Ricaviamo la potenza assorbita da un **carico equilibrato a stella**. Le tensioni di fase sono:

$$\begin{aligned} v_a(t) &= \sqrt{2}\,V_f\cos(\omega t) \\ v_b(t) &= \sqrt{2}\,V_f\cos(\omega t - 120°) \\ v_c(t) &= \sqrt{2}\,V_f\cos(\omega t + 120°) \end{aligned}$$

Le correnti di fase sono:

$$\begin{aligned} i_a(t) &= \sqrt{2}\,I_f\cos(\omega t - \varphi) \\ i_b(t) &= \sqrt{2}\,I_f\cos(\omega t - 120° - \varphi) \\ i_c(t) &= \sqrt{2}\,I_f\cos(\omega t + 120° - \varphi) \end{aligned}$$

essendo φ l'argomento dell'impedenza $\mathbf{Z}_L$.

La potenza istantanea assorbita dai tre bipoli è

$$\begin{aligned} p_a(t) &= v_a(t)i_a(t) = V_f I_f\cos\varphi + V_f I_f\cos(2\omega t - \varphi) \\ p_b(t) &= v_b(t)i_b(t) = V_f I_f\cos\varphi + V_f I_f\cos(2\omega t - 240° - \varphi) \\ p_c(t) &= v_c(t)i_c(t) = V_f I_f\cos\varphi + V_f I_f\cos(2\omega t + 240° - \varphi). \end{aligned}$$

La potenza assorbita dal carico equilibrato è la somma delle tre potenze:

$$\begin{aligned} p(t) = p_a(t) + p_b(t) + p_c(t) &= 3V_f I_f\cos\varphi + V_f I_f\cos(2\omega t - \varphi) + \\ &+ V_f I_f\cos(2\omega t - 240° - \varphi) + V_f I_f\cos(2\omega t + 240° - \varphi) \end{aligned}$$

Si noti che *la somma delle tre sinusoidi a pulsazione 2ω vale zero*, poiché costituiscono una terna equilibrata! Quindi,

$$\boxed{p(t) = 3V_f I_f\cos\varphi = \text{costante}} \qquad (11.17)$$

Nel caso di carico equilibrato a triangolo vale lo stesso risultato, poiché **un triangolo equilibrato equivale sempre ad una stella equilibrata**.

Quindi abbiamo la seguente importante proprietà:

un generatore trifase che alimenta carichi equilibrati eroga una potenza istantanea costante, anziché pulsante come nel caso monofase.

Nel caso del carico a stella, utilizzando le relazioni (11.16a), abbiamo $V_f = V_\ell/\sqrt{3}$, $I_f = I_\ell$, quindi

$$\boxed{P = \sqrt{3}\, V_\ell I_\ell \cos\varphi} \tag{11.18}$$

Si noti che, nella (11.18) φ non è la differenza di fase tra una tensione di linea ed un corrente di linea, ma è la *differenza di fase tra una tensione di fase e la corrispondente corrente di linea*.

Nel caso del carico a **triangolo**, la tensione su ciascun bipolo ha valore efficace V_ℓ, mentre la corrente è $I_\ell/\sqrt{3}$. Quindi la potenza media assorbita dai tre bipoli è

$$P = 3V_\ell \frac{I_\ell}{\sqrt{3}} \cos\varphi = \sqrt{3}\, V_\ell I_\ell \cos\varphi$$

Dunque, l'espressione (11.18) *vale in generale per la potenza media assorbita da un carico equilibrato*.

La **potenza reattiva** si ricava, analogamente, come somma delle potenze assorbite dai tre bipoli e, in entrambi i casi, si ha l'espressione

$$\boxed{Q = \sqrt{3}\, V_\ell I_\ell \operatorname{sen}\varphi} \tag{11.19}$$

La **potenza complessa** è

$$\mathbf{S} = \sqrt{3}\, V_\ell I_\ell (\cos\varphi + j \operatorname{sen}\varphi) \tag{11.20}$$

la **potenza apparente** è

$$\boxed{S = \sqrt{3}\, V_\ell I_\ell} \tag{11.21}$$

Infine

$$\boxed{\cos\varphi = \frac{P}{S}} \tag{11.22}$$

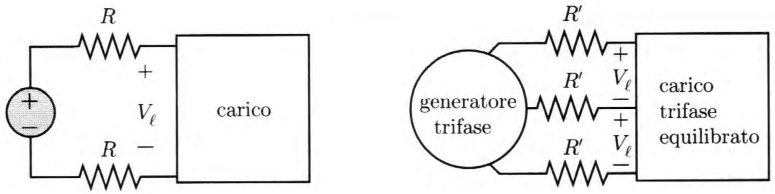
Anche in questo caso chiamiamo **fattore di potenza** del carico, il valore di $\cos\varphi$.

Confronto monofase vs. trifase

I circuiti trifase sono particolarmente vantaggiosi nella distribuzione di energia elettrica. Per rendersi conto della loro convenienza confrontiamo due circuiti, uno monofase ed uno trifase con carico equilibrato.

nei due circuiti siano uguali:

- il materiale con cui sono realizzati i conduttori.
- la potenza media sul carico;
- il fattore di potenza del carico;
- la potenza dissipata nella linea di trasmissione;
- il valore efficace della tensione tra ciascuna coppia di conduttori.



Nel caso del circuito monofase la corrente vale

$$I_\ell = \frac{P}{V_\ell \cos\varphi} \tag{11.23}$$

e le perdite di linea

$$P_d = 2R(I_\ell)^2 = 2R\left(\frac{P}{V_\ell \cos\varphi}\right)^2 \tag{11.24}$$

Per il circuito trifase si ha

$$I'_\ell = \frac{P}{\sqrt{3}\, V_\ell \cos\varphi} \tag{11.25}$$

$$P'_d = 3R'(I'_\ell)^2 = R'\left(\frac{P}{V_\ell \cos\varphi}\right)^2 \tag{11.26}$$

Assumendo le linee di uguale lunghezza ℓ, e ricordando la formula per il calcolo della resistenza di un conduttore cilindrico, possiamo scrivere:

$$R = \rho\frac{\ell}{A} \qquad R' = \rho\frac{\ell}{A'} \tag{11.27}$$

dove A e A' rappresentano l'area della sezione del conduttore, nei due casi. Uguagliando le potenze dissipate si ha:

$$2R = R'$$

ovvero

$$\frac{2}{A} = \frac{1}{A'}$$

ovvero

$$A' = \frac{A}{2} \tag{11.28}$$

Nel caso trifase si hanno conduttori con sezione dimezzata! Occorre però tenere presente che il circuito trifase richiede tre fili anziché due; considerando il **volume dei conduttori** come indice di costo, si ottiene

$$\text{volume trifase} = 3A'\ell$$

$$\text{volume monofase} = 2A\ell$$

cioè

$$\frac{\text{volume trifase}}{\text{volume monofase}} = \frac{3}{4} \tag{11.29}$$

Dunque il circuito trifase richiede il 75% del materiale necessario nel circuito monofase. Ciò non comporta solo una riduzione nei costi dei cavi, ma anche una riduzione del peso della linea, con conseguente risparmio nella realizzazione delle strutture di sostegno.