

Production, Transport et Consommation d'Electricité

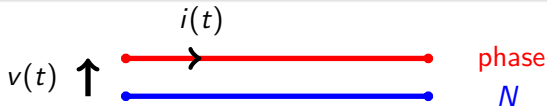
S. Dufour

2A Energie - ENRS8AB

13 mai 2026



Transport par courant alternatif (AC) monophasé



pulsation $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$ $f = 50\text{Hz}$ fréquence. $T = 20\text{ms}$ période

tension de phase : $v(t) = \sqrt{2} V \cos(\omega t) = \sqrt{2} \Re e [\bar{v} e^{j\omega t}]$

courant de phase : $i(t) = \sqrt{2} I \cos(\omega t - \varphi) = \sqrt{2} \Re e [\bar{i} e^{j\omega t}]$



puissance instantanée : $p(t) = v(t)i(t) = VI \cos \varphi + VI \cos(2\omega t - \varphi)$

Puissance active $P = \Re e [\bar{v} \bar{i}^*] = V I \cos \varphi$ [W]

Puissance réactive $Q = \Im m [\bar{v} \bar{i}^*] = V I \sin \varphi$ [Var]

Puissance apparente $\bar{S} = \bar{v} \bar{i}^* = V I e^{j\varphi}$ [VA]

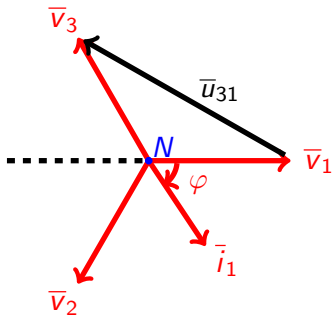
Transport par courant alternatif (AC) triphasé



$$k \in [1, 3]$$

$$v_k(t) = \sqrt{2} V \cos(\omega t - (k-1)\frac{2\pi}{3}) = \sqrt{2} \Re \left[\bar{v} e^{-j(k-1)\frac{2\pi}{3}} e^{j\omega t} \right]$$

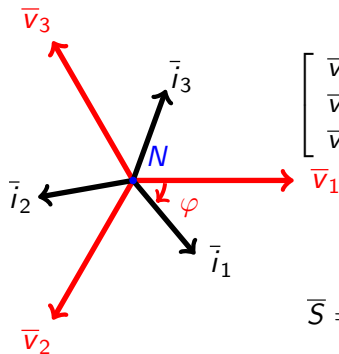
$$\begin{bmatrix} \bar{v}_1 \\ \bar{v}_2 \\ \bar{v}_3 \end{bmatrix} = \bar{v} \begin{bmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \end{bmatrix} = V \begin{bmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \end{bmatrix}$$



$$\bar{u}_{31} = \bar{v}_3 - \bar{v}_1 = -V\sqrt{3}e^{-j\pi/6} = U a e^{j\pi/6}$$

$$\begin{bmatrix} \bar{u}_{12} \\ \bar{u}_{23} \\ \bar{u}_{31} \end{bmatrix} = U e^{j\pi/6} \begin{bmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \end{bmatrix} = \bar{u} \begin{bmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \end{bmatrix}$$

Transport par courant alternatif (AC) triphasé



$$\begin{bmatrix} \bar{v}_1 \\ \bar{v}_2 \\ \bar{v}_3 \end{bmatrix} = \bar{v} \begin{bmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \bar{i}_1 \\ \bar{i}_2 \\ \bar{i}_3 \end{bmatrix} = \bar{i} \begin{bmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \end{bmatrix}$$

$$\bar{v} = V \quad \bar{i} = I e^{-j\varphi}$$

$$\bar{S} = \bar{v}_1 \bar{i}_1^* + \bar{v}_2 \bar{i}_2^* + \bar{v}_3 \bar{i}_3^* = 3 \bar{v} \bar{i}^* = 3 V I e^{j\varphi}$$

Puissance active : $P = 3VI \cos \varphi = \sqrt{3} UI \cos \varphi \text{ [W]}$

Puissance réactive : $Q = \sqrt{3} UI \sin \varphi \text{ [Var]}$

Puissance apparente : $|\bar{S}| = \sqrt{3} UI \text{ [VA]}$

Niveaux de tensions de ligne (alternatif)

(NF C18-510)

Domaines de tension

(IEC 60038)

TBT : 0-50V

ELV : 0-50V

BT : 50V-1000V

LV : 50V-1000V

HTA : 1kV-50kV

MV : 1kV-35kV

HTB : 50kV-

HV : 35kV-230kV

EHV : 230kV-

Tension de ligne et puissance associée

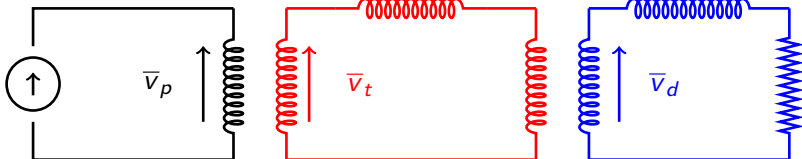
BT	400 V	±6%	< 250 kVA
HTA	3 kV-10 kV		250 kVA - 1500 kVA
HTA	10 kV-20 kV	±5%	1500 kVA - 12 MVA
HTB1	63/90 kV	±6%	12 MVA - 50 MVA
HTB2	150/225 kV	±10%	50 MVA - 250 MVA
HTB3	400 kV	±10%	250 MVA -

Schéma monophasé équivalent d'un réseau (simplifié)

Production
15.5 – 20kV

Transport
225 – 400kV
63 – 90kV

Distribution
20kV – 400V



$$|\bar{s}| = \sqrt{3}|\bar{u}||\bar{i}| \simeq \text{const}$$

$$\text{pertes : } \underbrace{p_j = 3r|\bar{i}|^2 \quad p_d = 3g|\bar{V}|^2}_{\text{lignes : Joule / Effet couronne}} \quad \underbrace{p_{fe} = 3\frac{|\bar{V}|^2}{R_{fe}} \quad p_j = 3r|\bar{i}|^2}_{\text{transformateurs : pertes fer / Joule}}$$

transport : 1.8%

0.18%

0.14%

0.11%



$[\mathcal{L}]$ *matrice inductance*

$$[\mathcal{L}] = \begin{bmatrix} L_0 & M_0 & M_0 \\ M_0 & L_0 & M_0 \\ M_0 & M_0 & L_0 \end{bmatrix}$$

$$-\frac{d}{dx} \begin{bmatrix} \bar{v}_1 \\ \bar{v}_2 \\ \bar{v}_3 \end{bmatrix} = j\omega[\mathcal{L}] \begin{bmatrix} \bar{i}_1 \\ \bar{i}_2 \\ \bar{i}_3 \end{bmatrix}$$

$$\text{avec } \bar{i}_1 + \bar{i}_2 + \bar{i}_3 = 0$$

$$-\frac{d}{dx} \begin{bmatrix} \bar{v}_1 \\ \bar{v}_2 \\ \bar{v}_3 \end{bmatrix} = j\omega L \begin{bmatrix} \bar{i}_1 \\ \bar{i}_2 \\ \bar{i}_3 \end{bmatrix}$$

$$L = L_0 - M_0 \simeq 1\text{mH/km}$$



$[C]$ *matrice capacité*

$$[C] = \begin{bmatrix} C_0 & C'_0 & C'_0 \\ C'_0 & C_0 & C'_0 \\ C'_0 & C'_0 & C_0 \end{bmatrix}$$

$$-\frac{d}{dx} \begin{bmatrix} \bar{i}_1 \\ \bar{i}_2 \\ \bar{i}_3 \end{bmatrix} = j\omega [C] \begin{bmatrix} \bar{v}_1 \\ \bar{v}_2 \\ \bar{v}_3 \end{bmatrix}$$

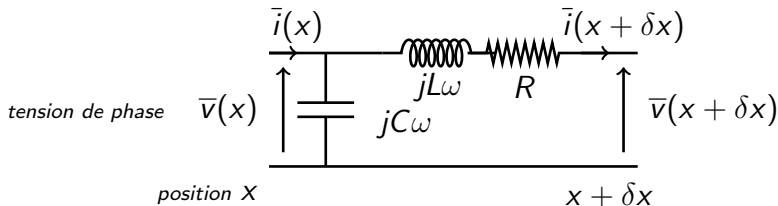
avec $\bar{v}_1 + \bar{v}_2 + \bar{v}_3 = 0$

$$-\frac{d}{dx} \begin{bmatrix} \bar{i}_1 \\ \bar{i}_2 \\ \bar{i}_3 \end{bmatrix} = jC\omega \begin{bmatrix} \bar{v}_1 \\ \bar{v}_2 \\ \bar{v}_3 \end{bmatrix}$$

$$C = C_0 - C'_0 \simeq 10nF/km$$

Schéma monophasé équivalent d'une portion de ligne

Régime établi : $V(x, t) = \sqrt{2} \Re e(\bar{v}(x) e^{j\omega t})$ $I(x, t) = \sqrt{2} \Re e(\bar{i}(x) e^{j\omega t})$



$$-\frac{d\bar{i}}{dx}(x) = jC\omega \bar{v}(x)$$

$$-\frac{d\bar{v}}{dx}(x) = (R + jL\omega) \bar{i}(x)$$

$$R[\Omega/m] \quad L[H/m] \quad C[F/m]$$

constantes réparties

Equations des télégraphistes

$$\frac{d^2\bar{v}}{dx^2}(x) = jC\omega(R + jL\omega) \bar{v}(x)$$

$$\frac{d^2\bar{i}}{dx^2}(x) = jC\omega(R + jL\omega) \bar{i}(x)$$

$$\bar{\gamma}^2 = jC\omega(R + jL\omega)$$

$\bar{\gamma}$ constante de propagation [m^{-1}]

Equations des ondes

$$\bar{\gamma} = \sqrt{jC\omega(R + jL\omega)} = j\omega\sqrt{LC} \sqrt{1 + \frac{R}{jL\omega}}$$

constante de propagation [m^{-1}]

$$\bar{z}_c = \sqrt{\frac{R + jL\omega}{jC\omega}} = \sqrt{\frac{L}{C}} \sqrt{1 + \frac{R}{jL\omega}}$$

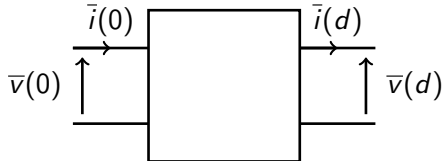
impédance caractéristique [Ω]

onde réfléchie / incidente

$$\bar{v}(x) = \bar{\alpha}e^{\bar{\gamma}x} + \bar{\beta}e^{-\bar{\gamma}x}$$

$$\bar{i}(x) = -\frac{1}{\bar{z}_c} (\bar{\alpha}e^{\bar{\gamma}x} - \bar{\beta}e^{-\bar{\gamma}x})$$

ligne de longueur
d quelconque



quadripôle
équivalent

$$\begin{bmatrix} \bar{v}(d) \\ \bar{i}(d) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\bar{\gamma}d) & -\bar{z}_c \sinh(\bar{\gamma}d) \\ -\frac{1}{\bar{z}_c} \sinh(\bar{\gamma}d) & \cosh(\bar{\gamma}d) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{v}(0) \\ \bar{i}(0) \end{bmatrix}$$

Ligne sans pertes ($R = 0$) de longueur quelconque

$$\bar{\gamma} = j\omega\sqrt{LC} = j\frac{2\pi}{\lambda} \qquad \bar{z}_c = \sqrt{\frac{L}{C}} = Z_c$$

$$\begin{bmatrix} \bar{v}(d) \\ \bar{i}(d) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\sqrt{LC}\omega d) & -jZ_c \sin(\sqrt{LC}\omega d) \\ -\frac{j}{Z_c} \sin(\sqrt{LC}\omega d) & \cos(\sqrt{LC}\omega d) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{v}(0) \\ \bar{i}(0) \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} L &\simeq 10^{-3} \text{H/km} & \lambda &= \frac{1}{f\sqrt{LC}} \simeq 6000 \text{km} & v &= \frac{1}{\sqrt{LC}} \simeq 3 \cdot 10^5 \text{km/s} \\ C &\simeq 10^{-8} \text{F/km} & Z_c &\simeq 400 \Omega \end{aligned}$$

★ ligne à vide : $\bar{i}(d) = 0 \quad \rightsquigarrow \frac{\bar{v}(d)}{\bar{v}(0)} = \frac{1}{\cos(\sqrt{LC}\omega d)} = \frac{1}{\cos(2\pi d/\lambda)}$

$$\frac{\bar{i}(0)}{\bar{v}(0)} = \frac{j}{Z_c} \tan(\sqrt{LC}\omega d) \simeq jC\omega d \quad \text{pour } d \ll \lambda \rightsquigarrow \text{ligne capacitive}$$

★ ligne en court-circuit : $\bar{v}(d) = 0 \quad \rightsquigarrow \frac{\bar{i}(d)}{\bar{v}(0)} = \frac{1}{jZ_c \sin(2\pi d/\lambda)}$

$$\frac{\bar{v}(0)}{\bar{i}(0)} = jZ_c \tan(\sqrt{LC}\omega d) \simeq jL\omega d \quad \text{pour } d \ll \lambda \rightsquigarrow \text{ligne inductive}$$

Ligne de faible longueur

développement limité à l'ordre deux

$$\cosh x \simeq 1 + \frac{x^2}{2} + o(x^2)$$
$$\sinh x \simeq x + o(x^2)$$

$$\begin{bmatrix} \bar{v}(d) \\ \bar{i}(d) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + jC\omega(R + jL\omega)\frac{d^2}{2} & -(R + jL\omega)d \\ -jC\omega d & 1 + jC\omega(R + jL\omega)\frac{d^2}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{v}(0) \\ \bar{i}(0) \end{bmatrix}$$

$\leadsto$ valable jusqu'à 250 km

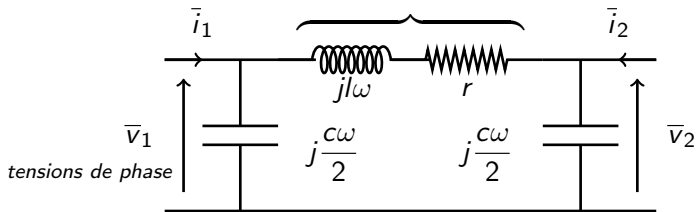
$\leadsto$ possibilité de mise en cascade des quadripôles au delà

$$r = Rd \quad [\Omega] \quad l\omega = L\omega d \quad [\Omega] \quad c\omega = C\omega d \quad [\Omega^{-1}]$$

$$\begin{bmatrix} \bar{v}(d) \\ \bar{i}(d) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + j\frac{c\omega}{2}(r + jl\omega) & -(r + jl\omega) \\ -jc\omega & 1 + j\frac{c\omega}{2}(r + jl\omega) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{v}(0) \\ \bar{i}(0) \end{bmatrix}$$

Schéma équivalent en π d'une ligne de faible longueur

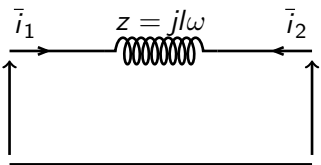
schéma monophasé équivalent $z = r + j\omega l$



$$\begin{bmatrix} \bar{v}_2 \\ \bar{i}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + j\frac{c\omega z}{2} & -z \\ j\omega c \left(1 + j\frac{c\omega z}{4}\right) & -1 - j\frac{c\omega z}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{v}_1 \\ \bar{i}_1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \bar{i}_1 \\ \bar{i}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} j\frac{c\omega}{2} + \frac{1}{z} & -\frac{1}{z} \\ -\frac{1}{z} & j\frac{c\omega}{2} + \frac{1}{z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{v}_1 \\ \bar{v}_2 \end{bmatrix}$$

Ligne inductive courte sans pertes ($r = 0 = c\omega$)

$$\bar{s}_{12} = 3\bar{v}_1 \bar{i}_1^* \Rightarrow \quad \bar{v}_1 = V_1 e^{j\theta_1} \quad \bar{i}_1 \xrightarrow{\quad z = j/l\omega \quad} \bar{i}_2 \quad \bar{v}_2 = V_2 e^{j\theta_2} \quad \Leftarrow 3\bar{v}_2 \bar{i}_2^* = \bar{s}_{21}$$


$$\bar{v}_1 - \bar{v}_2 = z \bar{i}_1 = -z \bar{i}_2 \quad \leadsto \quad \begin{bmatrix} \bar{i}_1 \\ \bar{i}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{jl\omega} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{v}_1 \\ \bar{v}_2 \end{bmatrix}$$

$$\bar{s}_{12} = 3\bar{v}_1 \bar{i}_1^* = 3 \frac{V_1 V_2}{l\omega} \sin(\theta_1 - \theta_2) + j3 \frac{V_1}{l\omega} (V_1 - V_2 \cos(\theta_1 - \theta_2))$$

$$\bar{s}_{21} = 3\bar{v}_2 \bar{i}_2^* = 3 \frac{V_1 V_2}{l\omega} \sin(\theta_2 - \theta_1) + j3 \frac{V_2}{l\omega} (V_2 - V_1 \cos(\theta_2 - \theta_1))$$

$$\text{dans la ligne : } \bar{s}_{12} + \bar{s}_{21} = j3 \frac{|\bar{v}_1 - \bar{v}_2|^2}{l\omega} \quad \leadsto \quad \Re(\bar{s}_{12} + \bar{s}_{21}) = 0$$

Ligne inductive courte sans pertes

★ si $V_1 = V_2$ et $\theta_2 \simeq \theta_1$:

$$\bar{s}_{12} = p_{12} = -p_{21} \simeq 3 \frac{V_1^2}{l\omega} (\theta_1 - \theta_2)$$

$\leadsto$ les phases déterminent le sens d'échange des puissances actives

$$\theta_1 - \theta_2 > 0 \rightarrow \quad \leftarrow \theta_1 - \theta_2 < 0$$

$\leadsto$ même module de tension = pas d'échange de réactif

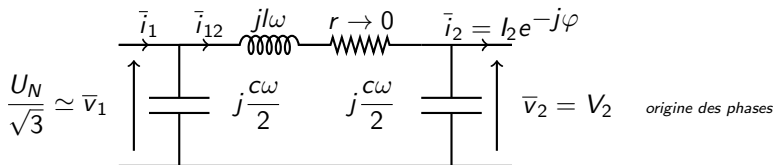
★ si $V_1 \neq V_2$ et $\theta_2 \simeq \theta_1$:

$$p_{12} = -p_{21} \simeq 3 \frac{V_1 V_2}{l\omega} (\theta_1 - \theta_2) \quad q_{12} \simeq 3 \frac{V_1}{l\omega} (V_1 - V_2)$$

$\leadsto$ les modules déterminent le sens d'échange des puissances réactives

$$V_1 - V_2 > 0 \rightarrow \quad \leftarrow V_1 - V_2 < 0$$

Puissance réactive de la ligne en fonction de la charge



$$Q = -3 \frac{c\omega}{2} (|\bar{v}_1|^2 + |\bar{v}_2|^2) + 3l\omega |\bar{i}_{12}|^2 \quad \bar{S} = 3V_2 I_2 e^{j\varphi} = P_{ch} + jQ_{ch}$$

$$|\bar{v}_2|^2 \simeq |\bar{v}_1|^2 \simeq \frac{U_N^2}{3} \quad \bar{i}_{12} = \bar{i}_2 + j \frac{c\omega}{2} V_2 \quad \leadsto \quad |\bar{i}_{12}|^2 = I_2^2 + \left(\frac{c\omega}{2} V_2 \right)^2 - c\omega V_2 I_2 \sin \varphi$$

$$Q \simeq -c\omega U_N^2 - l\omega^2 \sin \varphi S + l\omega \left(\frac{S}{U_N} \right)^2$$

$$Q_{vide} \simeq -c\omega U_N^2 \simeq Q_{min} < 0 \quad \text{pour } S = 0 \quad \leadsto \text{ligne capacitive}$$

$$Q < 0 \quad \text{pour } S < U_N^2 \sqrt{\frac{c\omega}{l\omega}} = \frac{U_N^2}{Z_c} \quad \text{puissance caractéristique de la ligne}$$

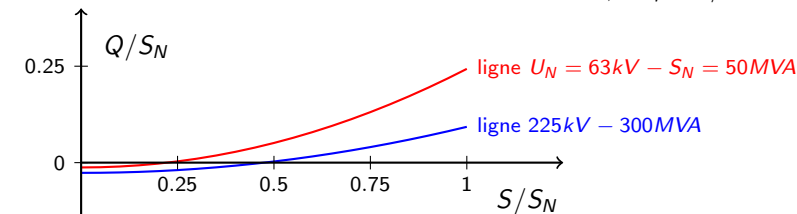
$$Q > 0 \quad > \quad \leadsto \text{ligne inductive}$$

Q : puissance réactive de la ligne

ligne aérienne : $\frac{U_N^2}{Z_c} < S_N$

$l \simeq 1.3 \text{ mH/km}$, $c \simeq 10 \text{ nF/km}$

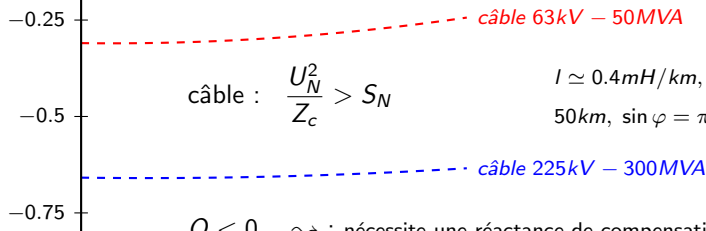
50 km , $\sin \varphi = \pi/6$



câble : $\frac{U_N^2}{Z_c} > S_N$

$l \simeq 0.4 \text{ mH/km}$, $c \simeq 250 \text{ nF/km}$

50 km , $\sin \varphi = \pi/6$

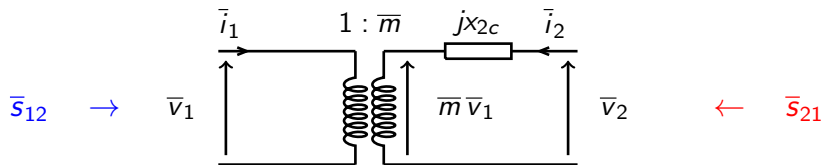


$Q < 0 \leadsto$: nécessite une réactance de compensation

Banc de transformation (225kV/63kV - 100MVA) Reseda



Transformateur de forte puissance



$$\bar{m} \bar{v}_1 = \bar{v}_2 - jx_{2c} \vec{i}_2$$

$$\vec{i}_1 = -\bar{m}^* \vec{i}_2$$

$$\sim \begin{bmatrix} \vec{i}_1 \\ \vec{i}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{jx_{2c}} \begin{bmatrix} |\bar{m}|^2 & -\bar{m}^* \\ -\bar{m} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{v}_1 \\ \bar{v}_2 \end{bmatrix}$$

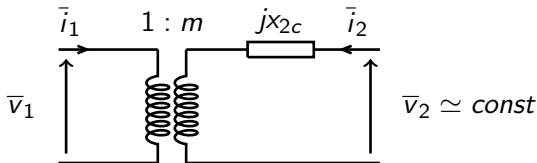
$$\bar{s}_{12} = j3 \frac{\bar{m} \bar{v}_1}{x_{2c}} (\bar{m} \bar{v}_1 - \bar{v}_2)^*$$

$$\bar{s}_{12} + \bar{s}_{21} = j3 \frac{|\bar{m} \bar{v}_1 - \bar{v}_2|^2}{x_{2c}}$$

$$\bar{s}_{21} = j3 \frac{\bar{v}_2}{x_{2c}} (\bar{v}_2 - \bar{m} \bar{v}_1)^*$$

Transformateur régulateur de puissance

rapport de transformation $\bar{m} = m \in \mathcal{R}$ variable (n_1 variable)



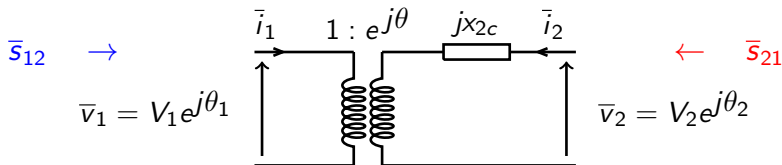
$$\begin{bmatrix} \bar{i}_1 \\ \bar{i}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{jX_{2c}} \begin{bmatrix} m^2 & -m \\ -m & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{v}_1 \\ \bar{v}_2 \end{bmatrix}$$

↪ régulateurs en charge : variation de tension sur circuit 1 de $\pm 15\%$
(*changement en charge sur circuit résistif*)

↪ auto-transformateurs : $m > 0.5$ 3 prises sur circuit 2
(*changement à vide*)

Transformateur déphaseur

rapport de transformation $|\overline{m}| = 1$, $\theta = \arg(\overline{m})$ variable

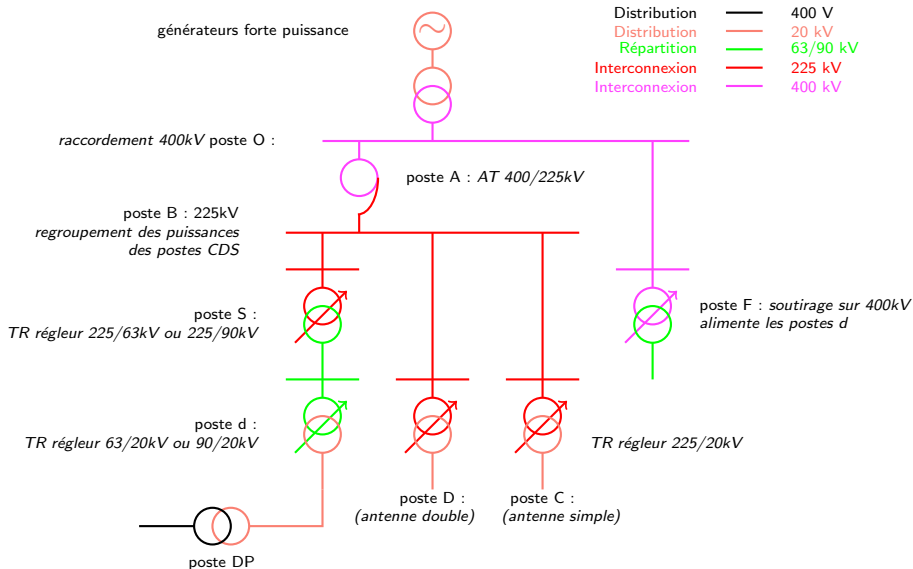


$$\begin{bmatrix} \vec{i}_1 \\ \vec{i}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{jX_{2c}} \begin{bmatrix} 1 & -e^{-j\theta} \\ -e^{j\theta} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{v}_1 \\ \vec{v}_2 \end{bmatrix}$$

variation de θ de $\pm 10^\circ \rightsquigarrow$ échange de puissance active

$$\bar{s}_{12} = \frac{j3\vec{v}_1}{X_{2c}} \left(\vec{v}_1 - \vec{v}_2 e^{-j\theta} \right)^* \rightsquigarrow p_{12} = \frac{V_1 V_2}{X_{12}} \sin(\theta_1 - \theta_2 + \theta)$$

Structure du réseau électrique



Répartition des puissances

dans le cas où les sources imposent la tension (module et argument)

★ nœud = producteur ou consommateur

tension $\bar{v}_k$, courant $\bar{i}_k$, puissance apparente $\bar{s}_k = 3 \bar{v}_k \bar{i}_k^*$

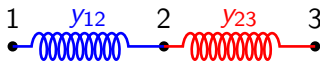
★ branche = élément de liaison (transformateur ou ligne)

$$\text{matrice admittance} \begin{pmatrix} \bar{i}_1 \\ \bar{i}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{21} & y_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{v}_1 \\ \bar{v}_2 \end{pmatrix}$$

réseau (à n nœuds) caractérisé par sa matrice admittance globale $\mathcal{Y}$

$$\begin{pmatrix} \bar{i}_1 \\ \vdots \\ \bar{i}_n \end{pmatrix} = \mathcal{Y} \begin{pmatrix} \bar{v}_1 \\ \vdots \\ \bar{v}_n \end{pmatrix} \quad \rightsquigarrow \bar{s}_k = 3 \bar{v}_k \bar{i}_k^* = 3 \bar{v}_k \sum_{j=1}^n \mathcal{Y}_{kj}^* \bar{v}_j^*$$

Exemple de construction de la matrice admittance



$$\begin{pmatrix} \bar{i}_1 \\ \bar{i}_2 \end{pmatrix} = y_{12} \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{v}_1 \\ \bar{v}_2 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \bar{i}_2 \\ \bar{i}_3 \end{pmatrix} = y_{23} \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{v}_2 \\ \bar{v}_3 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \bar{i}_1 \\ \bar{i}_2 \\ \bar{i}_3 \end{pmatrix} = \mathcal{Y} \begin{pmatrix} \bar{v}_1 \\ \bar{v}_2 \\ \bar{v}_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_{12} & -y_{12} & 0 \\ -y_{12} & y_{12} + y_{23} & -y_{23} \\ 0 & -y_{23} & y_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{v}_1 \\ \bar{v}_2 \\ \bar{v}_3 \end{pmatrix}$$

$$\bar{s}_1 = 3 \bar{v}_1 \bar{i}_1^* = 3 \bar{v}_1 (\mathcal{Y}_{11} \bar{v}_1 + \mathcal{Y}_{12} \bar{v}_2 + \mathcal{Y}_{13} \bar{v}_3)^* = 3 \bar{v}_1 y_{12}^* (\bar{v}_1 - \bar{v}_2)^*$$

Répartition des puissances

nœuds	production	consommation
données	$\bar{v}_k = \bar{e}_k$	$\bar{s}_k = -p_k - jq_k$
inconnues	$\bar{s}_k = p_k + jq_k$	$\bar{v}_k$

- 1) détermination des tensions aux nœuds de consommation connaissant les puissances apparentes soutirées à ces nœuds et les tensions aux nœuds de production
- 2) détermination des puissances fournies aux nœuds de production
- 3) détermination des puissances transitées dans chaque ligne