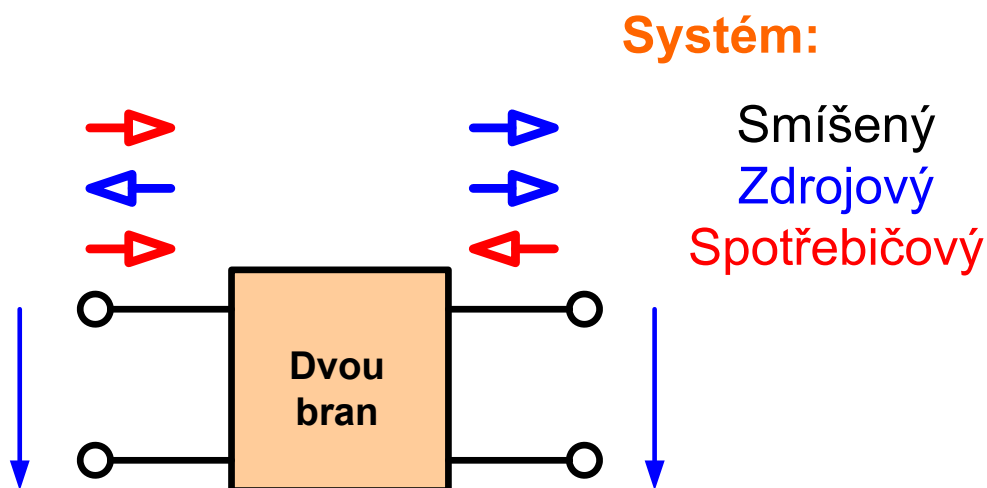
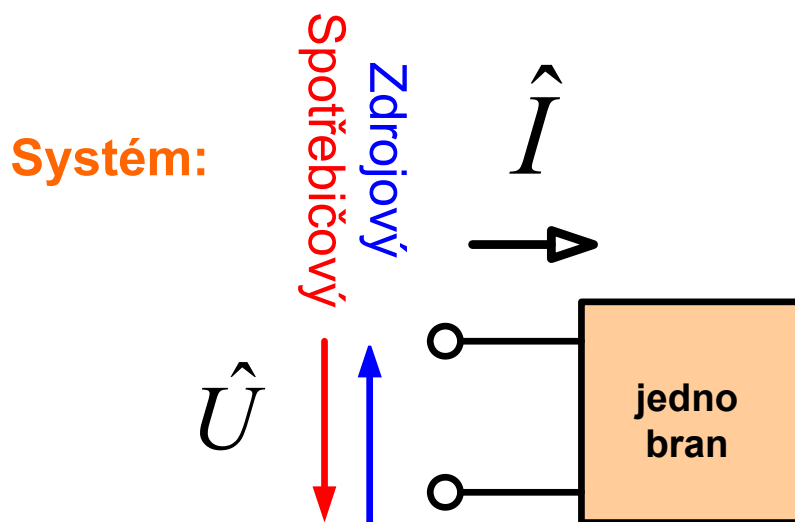
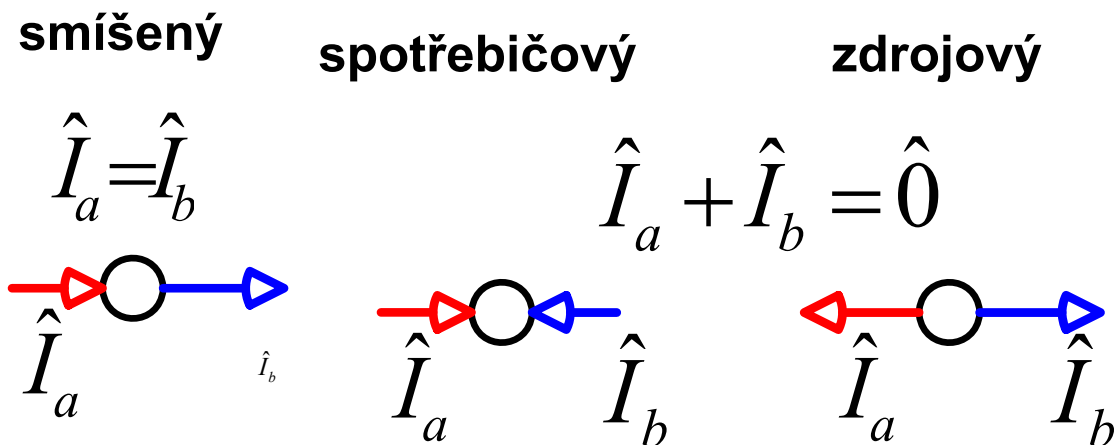
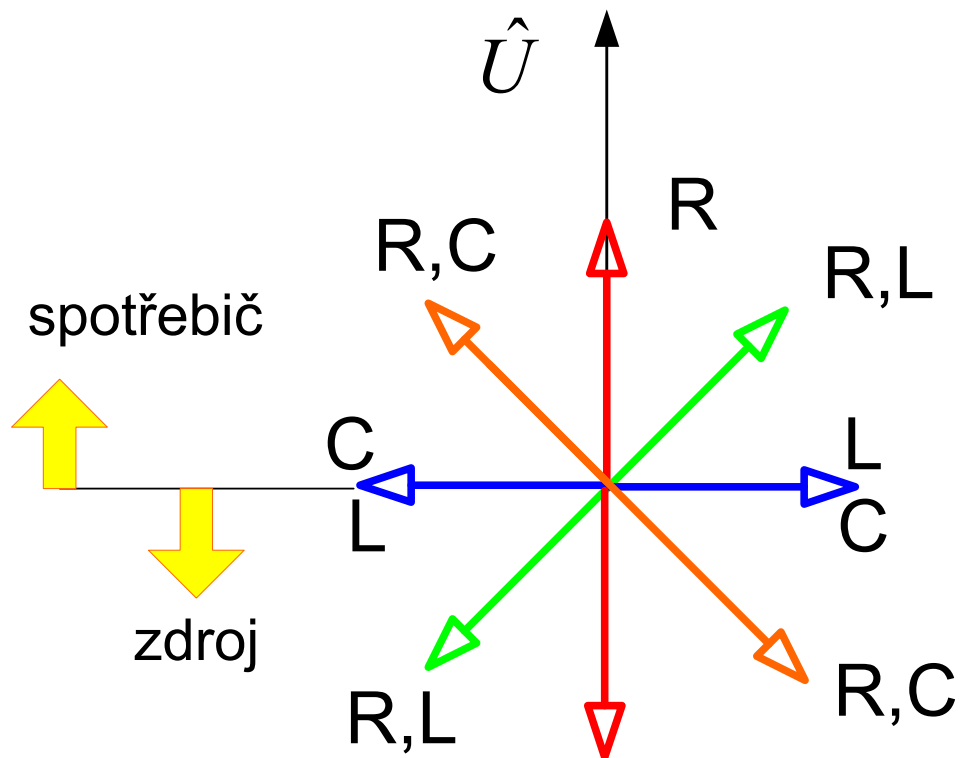


## Volba kladných směrů.

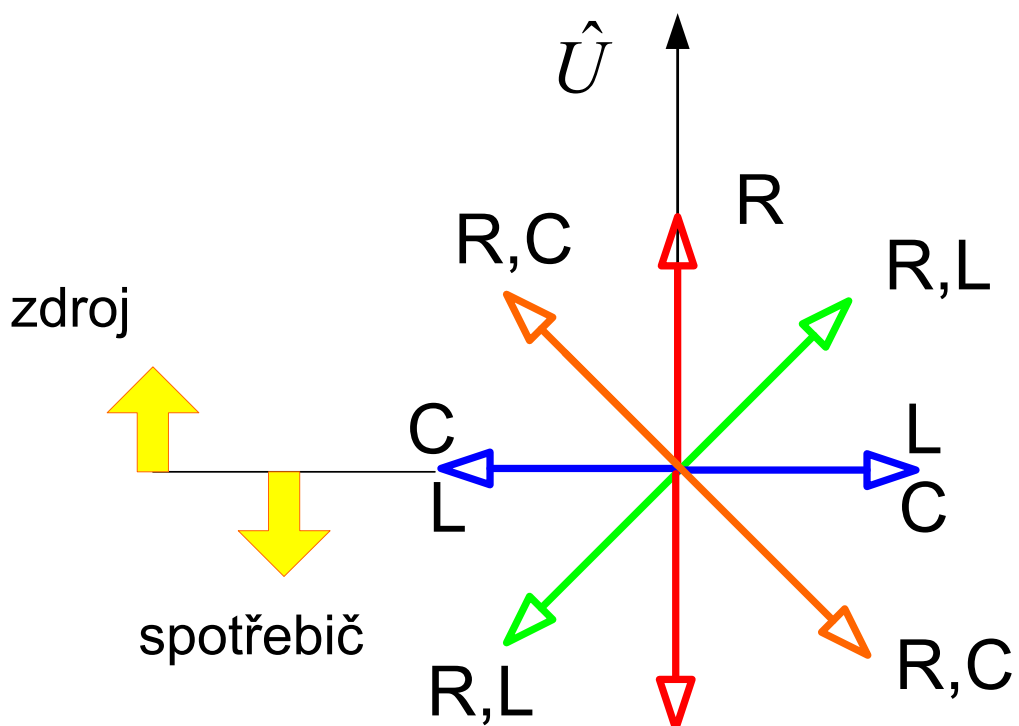
systemy: generátorický, spotřebičový, smíšený



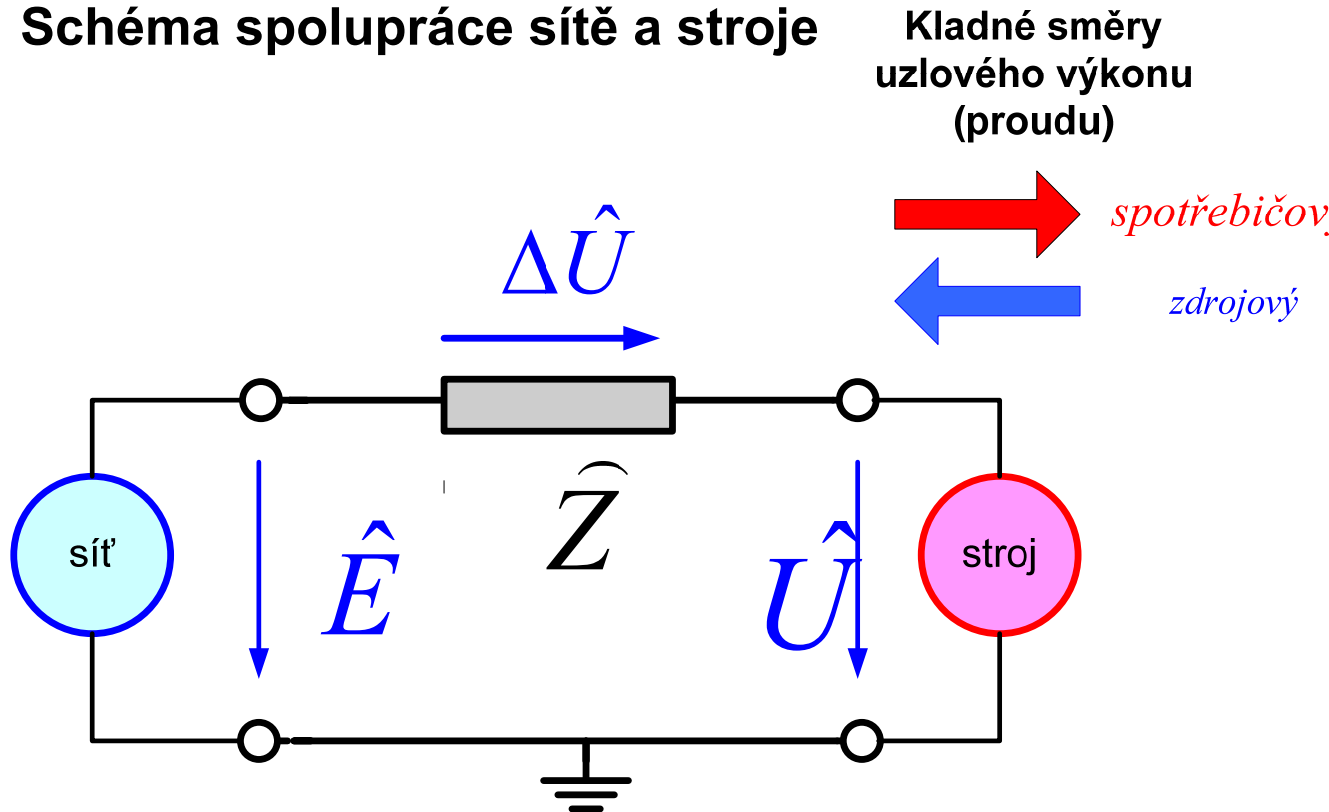
## System spotřebičový



## System zdrojový



## Schéma spolupráce sítě a stroje



*Systémy komplexního výkonu, předp.:  $\hat{U} = U$ .*

$$\hat{I} = \underbrace{S / (3U_f)}_I e^{j\phi} = \underbrace{I \cdot \cos \phi}_{I_p} + j \underbrace{I \sin \phi}_{I_q}$$

$$\hat{S} = 3U_f I e^{j\mu\phi} = \underbrace{3U_f I \cos \mu\phi}_P + j \underbrace{3U_f I \sin \mu\phi}_Q$$

$$\sin \mu\phi = \mu \sin \phi \Rightarrow I_q = \mu (Q / 3U_f)$$

$$\hat{S} = S \cdot e^{j\theta}, \hat{Z} = Z \cdot e^{j\psi}, \hat{I} = I e^{j\phi}$$

$\psi = \arctg(X / R)$ ...*impedanční úhel*

$\phi = \dots$ *úhel fázoru proudu*

$$\theta = \mu\phi \dots \text{úhel výkonu} \left\{ \begin{array}{l} \mu = 1, / \hat{S} = 3 \cdot U_f^* \hat{I} \\ \mu = -1, / \hat{S} = 3 \cdot U_f \hat{I}^* \end{array} \right.$$

uzlový zkratový výkon :

$$\begin{aligned}\hat{S}_k &= 3.\hat{U}_f \left( \frac{\hat{U}_f}{\hat{Z}} \right)^* = \frac{3.\hat{U}_f^2}{\hat{Z}^*} = \frac{3.U_f^2}{Z} e^{j\psi} \\ &= S_k e^{j\psi} \Rightarrow Z = \frac{3.U_f^2}{S_k} \text{ modul impedance vedení}\end{aligned}$$

změna napětí :  $\Delta\hat{U} = k.\hat{Z}\hat{I}$ ,  $k = \begin{cases} 1, \text{ spotřebitelský} \\ -1, \text{ zdrojový} \end{cases}$

$$\Delta\hat{U} = k \underbrace{\frac{3U_f^2}{S_k}}_{\hat{Z}} e^{j\psi} \underbrace{\frac{S}{3U_f}}_{\hat{I}} e^{j\phi}, \hat{\varepsilon} = k \frac{\Delta\hat{U}}{U_f} = k \frac{S}{S_k} e^{j(\psi+\phi)}$$

$$\Rightarrow \varepsilon_{re} = k \frac{S}{S_k} \cos(\psi + \phi) \Rightarrow S = \frac{\varepsilon_{re} \cdot S_k}{k \cdot \cos(\psi + \phi)}$$

$$\Delta\hat{U} = k.\hat{Z}.\hat{I} = k.(R + jX)(I_p + jI_q)$$

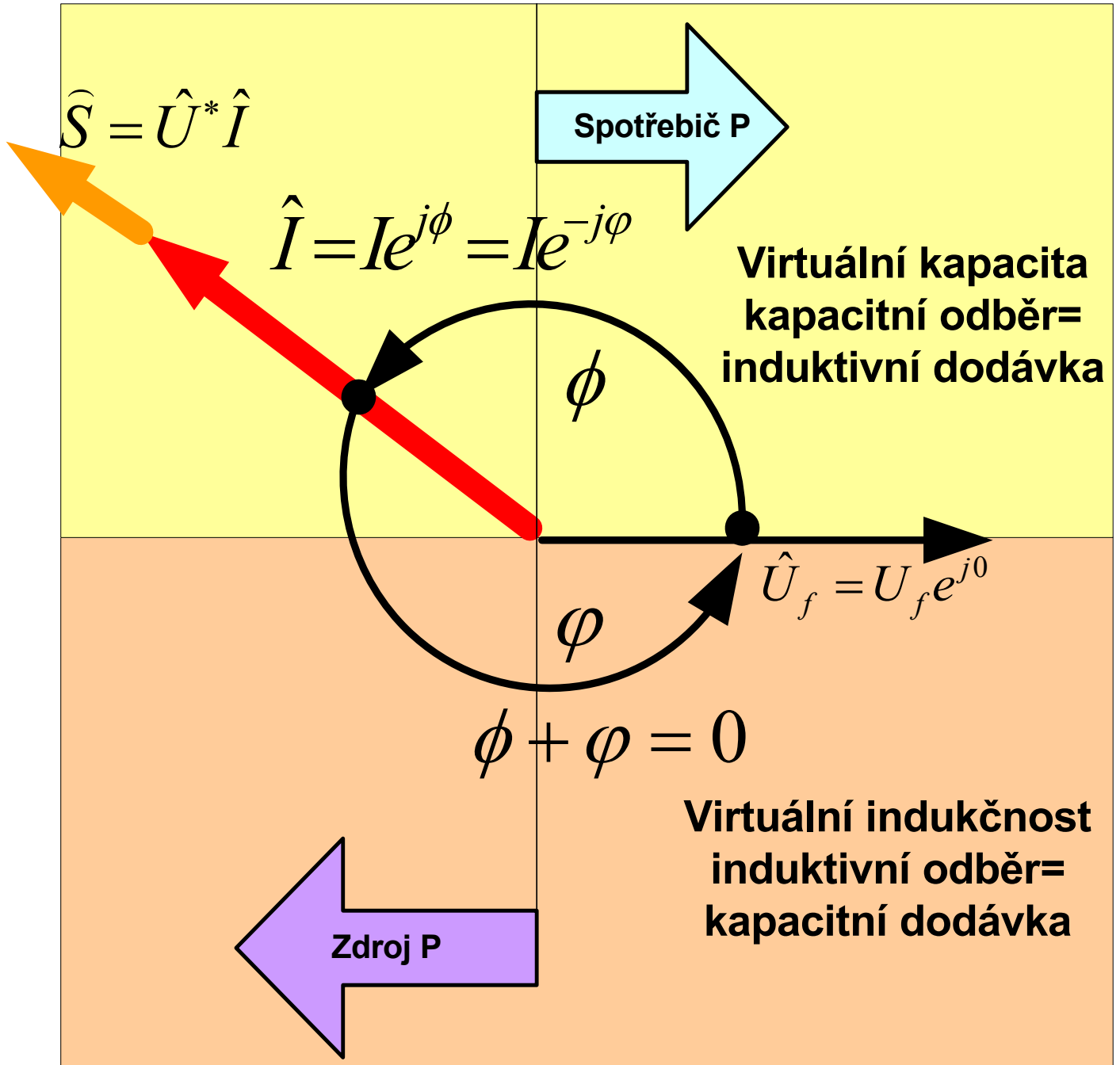
$$\Delta U_{re} = k.(RI_p - XI_q) = k.\left( R \frac{P}{3U_f} - \mu X \frac{Q}{3U_f} \right)$$

$$\Delta U_{re} = \frac{kZS}{3U_f} (\cos \psi \cos \theta + \sin \psi \sin \mu \phi)$$

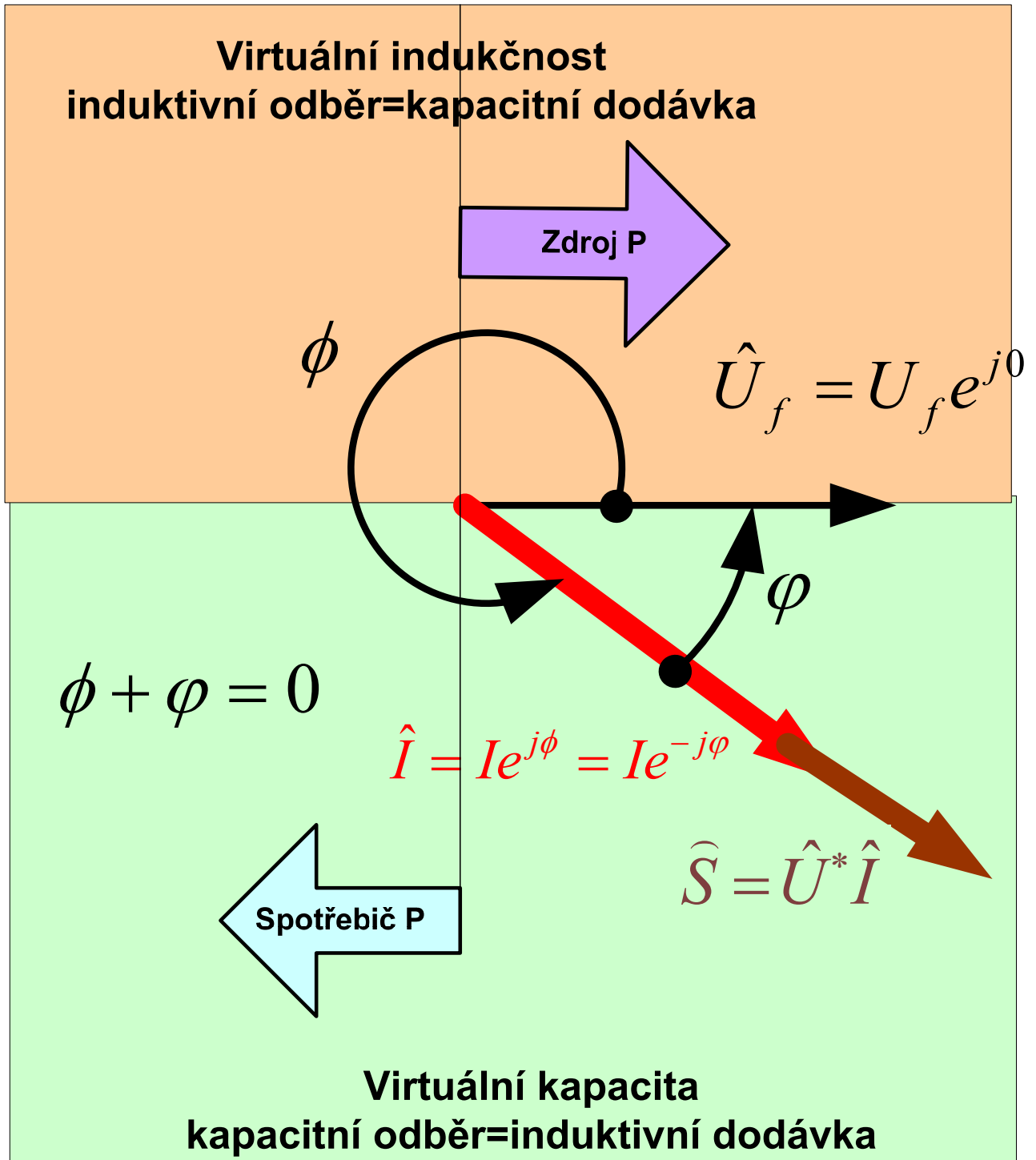
# Provozní režimy stroje.

Poloha $\hat{i}$		virt. zátěž	P Ip	Q,Iq		systém
$\phi$	$\varphi$			$\hat{U}^* \hat{i}$ $\mu=1$	$\hat{U} \hat{i}^*$ $\mu=-1$	
0-	2π-	<b>C</b> spotř. Qc zdroj QL	>0 spotř.			spotřebitelský k=1
0.5π	1.5π		<0 zdroj	>0	<0	
0.5π-	1.5π-					
π	π	<b>L</b> spotř. QL zdroj Qc	<0 zdroj	<0	>0	k=-1 zdrojový
π-	π-		>0 spotř.			
1.5π	0.5π					
1.5π-	0.5π-	<b>C</b> spotř. Qc zdroj QL	>0 zdroj	>0	<0	zdrojový
2π	0		<0 spotř.			
0-	2π-					
0.5π	1.5π					
0.5π-	1.5π-					
π	π					
π-	π-					
1.5π	0.5π					
1.5π-	0.5π-					
2π	0					

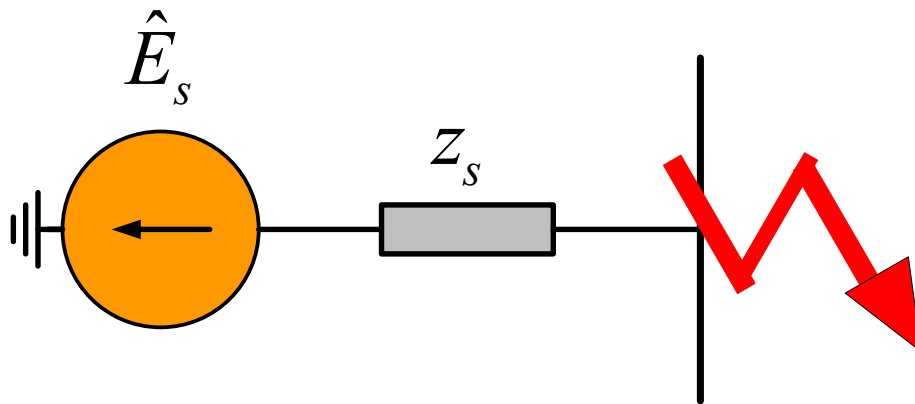
## Fázorový diagram - spotřebičový systém



## Fázorový diagram -zdrojový systému.



## Zkratový výkon.



$U_b, S_b$  ....nezávislé vztažné veličiny

$$I_b = \frac{S_b}{\sqrt{3} \cdot U_b}, \quad Z_b = \frac{U_b^2}{S_b} \dots \text{závislé vztažné veličiny}$$

$\tilde{x}_s = \frac{x_s}{Z_b}$  .....poměrná hodnota reaktance sítě

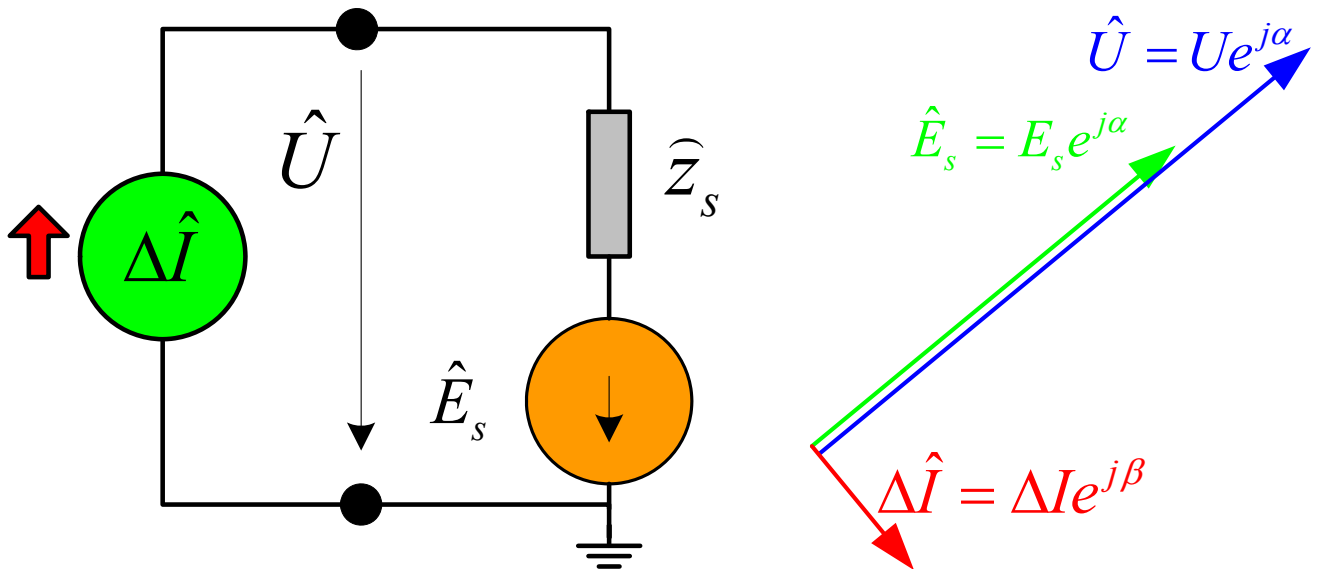
$$\hat{I}_k = \frac{\hat{E}_s}{\sqrt{3} \cdot j \cdot x_s} \dots \text{zkratový proud (A)}$$

$$S_k = \sqrt{3} \hat{E}_s \hat{I}_k^* = \sqrt{3} \hat{E}_s \frac{\hat{E}_s^*}{\sqrt{3} \cdot j \cdot x_s} = \frac{E_s^2}{j \cdot x_s}$$

$$S_k = \frac{E_s^2}{j \cdot \tilde{x}_s \cdot Z_b} = \frac{E_s^2}{j \cdot \tilde{x}_s \cdot \frac{U_b^2}{S_b}} = \left( \frac{E_s}{U_b} \right)^2 \frac{S_b}{j \cdot \tilde{x}_s}$$



## Injekce proudu:



předpoklad :  $\hat{Z}_s = jx_s = x_s e^{j(\pi/2)}$ ,

cíl : stanovit  $\Delta \hat{I}$  tak, aby se injekcí zvýšil

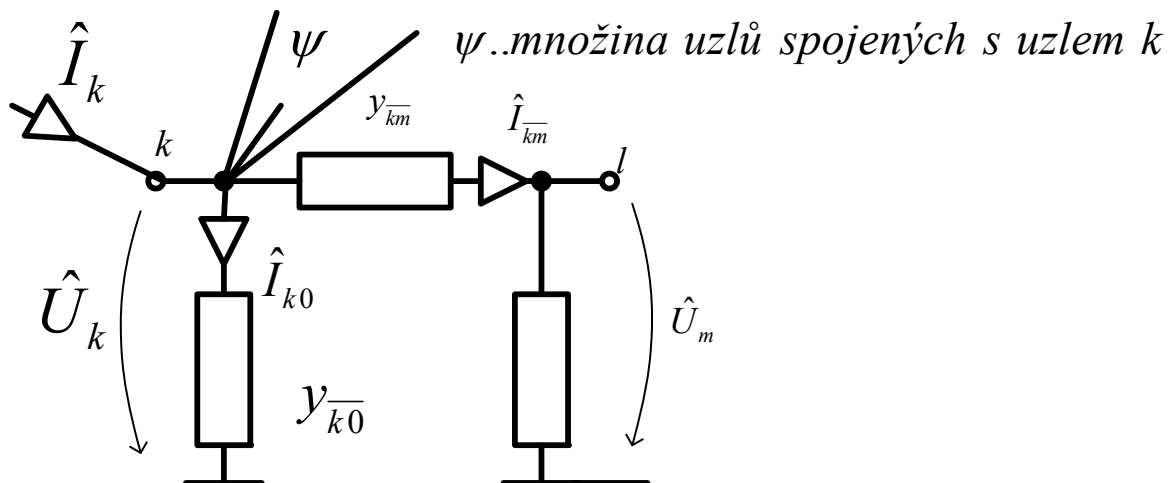
pouze modul t.j.:  $\Delta \hat{U} = \Delta U e^{j\alpha}$

$$\hat{U} - \hat{E}_s = jx_s \Delta \hat{I} \Rightarrow \Delta \hat{I} = \underbrace{\frac{U - E_s}{x_s}}_{\Delta U} e^{j\alpha} e^{-j\pi/2} = \Delta \hat{U} \cdot e^{-j\pi/2}$$

**Je-li  $\hat{Z}_s$  induktivního charakteru je nutné pro zvýšení napětí injektovat jalový proud také induktivního charakteru.**

## BPF- Basic Power Flow.

### Základní výpočet ustáleného chodu



$$\hat{I}_k = \hat{U}_k \cdot y_{k0} + \sum_{m \in \psi} (\hat{U}_k - \hat{U}_m) y_{km}$$

$$\hat{I}_k = \hat{U}_k \underbrace{\left( y_{k0} + \sum_{m \in \psi} y_{km} \right)}_{G_{(k,k)} + jB_{(k,k)}} + \sum_{m \in \psi} \hat{U}_m \underbrace{\left( -y_{km} \right)}_{G_{(k,m)} + jB_{(k,m)}}$$

$$\hat{Y}_{(k,k)} = Y(k,k) \cdot e^{j\gamma_{kk}} \quad \hat{Y}_{(k,m)} = Y(k,l) \cdot e^{j\gamma_{kl}}$$

$[Y]$ ... admitanční matice  
(komplexní, čtvercová, symetrická, řidká)

$\bar{U}, \bar{\delta}$ ...vektor modulů a úhlů uzlových napětí

$\bar{I} = [Y] \cdot \bar{U}$ ..vektor uzlových proudů

## Uzlové proudy a výkony:

$$\bar{S} = \overbrace{\bar{U}_{\%}}^{=diag\bar{U}} [Y^*] \bar{U}^* = \bar{P} + j\bar{Q} \dots \text{uzlové výkony}$$

$$\hat{S}_k = \hat{U}_k \cdot \hat{I}_k^* = U_k^2 \cdot \hat{Y}_{(k,k)}^* + \sum_{m \in \psi} \hat{U}_k \hat{U}_m^* \hat{Y}_{(k,m)}^*$$

$$\hat{S}_k = U_k^2 \left( G_{(k,k)} - jB_{(k,k)} \right) + \\ + \sum_{m \in \psi} U_k U_m e^{j(\delta_k - \delta_m)} \left( G_{(k,m)} - jB_{(k,m)} \right)$$

$$\hat{S}_k = U_k \cdot \sum_{m \in \psi} U_m \cdot Y(m, k) \cdot e^{j(\delta_{km} - \gamma_{km})},$$

$$(\delta_k - \delta_m) = \delta_{km} \dots \text{rozdílový úhel}$$

*omezovací podmínka typu rovnosti :*

$$\mathbf{R} = \bar{S} - \bar{U}_{\%} [Y^*] \bar{U}^* = \bar{\mathbf{0}}$$

## tabulka klasifikace uzlů

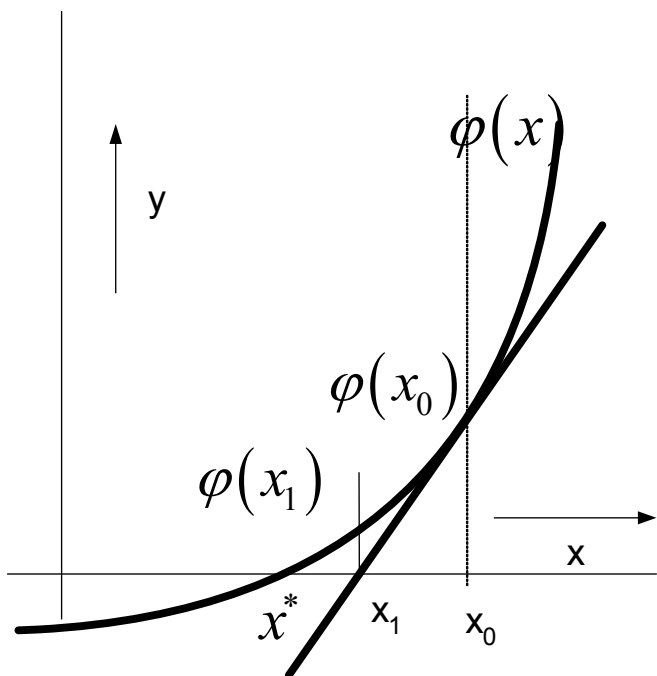
typ uzlu index	realizace uzlu	modul abs( U)	$\delta$ arg (U)	P real (S)	Q imag (S)
<b>U<math>\delta</math></b> <b>-0-</b>	bilanční uzel-slack velký zdroj/ekv. soustavy	známý	<b>0</b>	?	?
<b>PU</b> <b>-i-</b>	Generátorické uzly s funkční regulací napětí	známý	?	známý	?
<b>PQ</b> <b>-k-</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zátěžné uzly,</li> <li>• Gen. uzly na mezi</li> </ul>	?	?	známý	známý

$$\bar{\sigma} = \begin{bmatrix} \bar{U}_k \\ \bar{\delta}_a \end{bmatrix} \quad \text{vektor} \\ \text{závislých proměnných}$$

$k$ ...indexy uzlů typu  $\overline{PQ}$

$a$ ...indexy uzlů typu  $\overline{PQPU}$

## Newtonovský přístup



$$\varphi(x_0) + \frac{\partial \varphi(x)_0}{\partial x} \underbrace{(x_1 - x_0)}_{\Delta x} = 0$$

$$\Delta x = -\frac{\partial \varphi(x)_0^{-1}}{\partial x} \varphi(x_0)$$

$$x_1 = x_0 + \Delta x$$

$$\bar{x} = [x_1, \dots, x_{\partial x}]^T$$

$$\bar{y} = [\varphi_1, \dots, \varphi_{\partial y}]^T$$

$$, [J] = \begin{bmatrix} \left[ \frac{\partial \varphi_1}{\partial x_1}, \dots, \frac{\partial \varphi_1}{\partial x_{\partial x}} \right] \\ \bullet \bullet \bullet \\ \left[ \frac{\partial \varphi_{\partial y}}{\partial x_1}, \dots, \frac{\partial \varphi_{\partial y}}{\partial x_{\partial x}} \right] \end{bmatrix}$$

$$\bar{\varphi}(\bar{x}_0) + [J_0] \Delta \bar{x} = \bar{0} \Rightarrow \Delta \bar{x} = -[J_0]^{-1} \bar{\varphi}(\bar{x}_0),$$

$$\bar{x}_1 = \bar{x}_0 + \Delta \bar{x}$$

BPF	OPF
Zadané bilance	Grad. Lagrangiánu

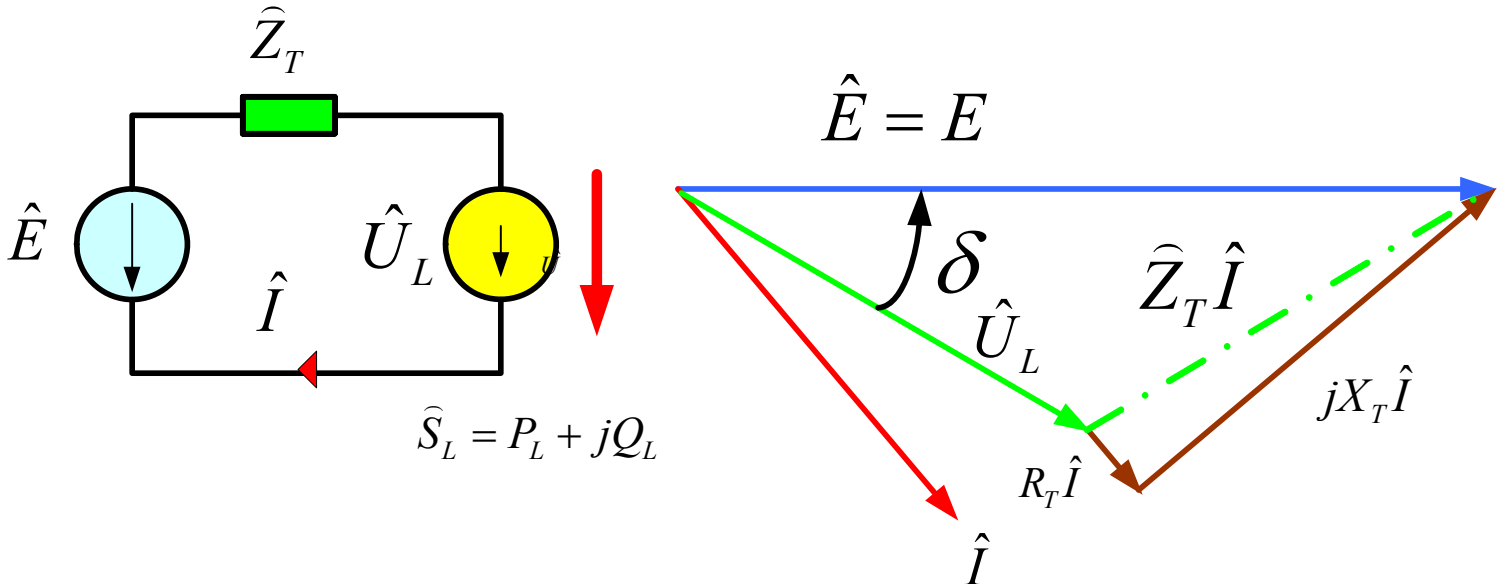
$$[J] = \begin{bmatrix} \frac{\partial \bar{P}_a}{\partial \bar{U}_k} & \frac{\partial \bar{P}_a}{\partial \bar{\delta}_a} \\ \frac{\partial \bar{Q}_k}{\partial \bar{U}_k} & \frac{\partial \bar{Q}_k}{\partial \bar{\delta}_a} \end{bmatrix} \quad \begin{array}{l} \text{Jakobiova} \\ \text{funkcionální} \\ \text{matice} \end{array}$$

## Základní algoritmus ustáleného chodu -BPF

1. čtení vstupu , iniciace poč.hodnot  $\bar{\sigma}$
2. výpočet defektu  $\Delta \bar{S} = \begin{bmatrix} \Delta \bar{P}_a \\ \Delta \bar{Q}_k \end{bmatrix}$  ,
3. je-li konvergence pak konec jinak
4. tvorba Jakobiovy matice  $[J]$
5. výpočet korekcí  $\Delta \bar{\sigma} = [J]^{-1} \cdot \Delta \bar{S}$
6. aktualizace  $\bar{\sigma}$
7. obsluha omezení
8. návrat na bod 2.

<b>operace</b>	<b>S<sub>k</sub></b>	<b>P<sub>k</sub></b>	<b>Q<sub>k</sub></b>
$\partial/\partial U_k$	$S_k/U_k + U_k Y_{kk} e^{j\alpha_{kk}}$	$U_k Y_{kk} \cos \alpha_{kk} + P_k/U_k$	$U_k Y_{kk} \sin \alpha_{kk} + Q_k/U_k$
$\partial/\partial U_m$	$U_k Y_{km} e^{j\alpha_{km}}$	$U_k Y_{km} \cos \alpha_{km}$	$U_k Y_{km} \sin \alpha_{km}$
$\partial/\partial \delta_k$	$j(S_k - U_k^2 Y_{kk} e^{j\alpha_{kk}})$	$U_k^2 Y_{kk} \sin \alpha_{kk} - Q_k$	$P_k - U_k^2 Y_{kk} \cos \alpha_{kk}$
$\partial/\partial \delta_m$	$-jU_k U_m Y_{km} e^{j\alpha_{km}}$	$U_k U_m Y_{km} \sin \alpha_{km}$	$-U_k U_m Y_{km} \cos \alpha_{km}$
$\partial^2/\partial U_k^2$	$2Y_{kk} e^{j\alpha_{kk}}$	$2Y_{kk} \cos \alpha_{kk}$	$2Y_{kk} \sin \alpha_{kk}$
$\partial^2/\partial U_k \partial U_m$	$Y_{km} e^{j\alpha_{km}}$	$Y_{km} \cos \alpha_{km}$	$Y_{km} \sin \alpha_{km}$
$\partial^2/\partial U_k \partial \delta_k$	$j\left(\frac{S_k}{U_k} - U_k Y_{kk} e^{j\alpha_{kk}}\right)$	$-\frac{Q_k}{U_k} + U_k Y_{kk} \sin \alpha_{kk}$	$\frac{P_k}{U_k} - U_k Y_{kk} \cos \alpha_{kk}$
$\partial^2/\partial U_k \partial \delta_m$	$-jU_m Y_{km} e^{j\alpha_{km}}$	$U_m Y_{km} \sin \alpha_{km}$	$-U_m Y_{km} \cos \alpha_{km}$
$\partial^2/\partial U_m^2$	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
$\partial^2/\partial U_m \partial \delta_k$	$jU_k Y_{km} e^{j\alpha_{km}}$	$-U_k Y_{km} \sin \alpha_{km}$	$U_k Y_{km} \cos \alpha_{km}$
$\partial^2/\partial U_m \partial \delta_m$	$-jU_k Y_{km} e^{j\alpha_{km}}$	$U_k Y_{km} \sin \alpha_{km}$	$-U_k Y_{km} \cos \alpha_{km}$
$\partial^2/\partial \delta_k^2$	$-S_k + U_k^2 Y_{kk} e^{j\alpha_{kk}}$	$-P_k + U_k^2 Y_{kk} \cos \alpha_{kk}$	$-Q_k + U_k^2 Y_{kk} \sin \alpha_{kk}$
$\partial^2/\partial \delta_k \partial \delta_m$	$U_k U_m Y_{km} e^{j\alpha_{km}}$	$U_k U_m Y_{km} \cos \alpha_{km}$	$U_k U_m Y_{km} \sin \alpha_{km}$
$\partial^2/\partial \delta_m^2$	$-U_k U_m Y_{km} e^{j\alpha_{km}}$	$-U_k U_m Y_{km} \cos \alpha_{km}$	$-U_k U_m Y_{km} \sin \alpha_{km}$

## Jednoduchá síť.



$$\hat{I} = \frac{\hat{E} - \hat{U}_L}{\hat{Z}_T} = \frac{E - U_L e^{-j\delta}}{Z_T e^{j\varepsilon_T}},$$

$\varepsilon_T$  ..impedanční úhel

$\varphi$ .....úhel zátěže

$\delta$ .....zátěžný úhel

$$\hat{S}_T = U_L e^{-j\delta} \cdot \underbrace{\frac{E - U_L e^{j\delta}}{Z_T e^{-j\varepsilon_T}}}_{\hat{I}^*} = \frac{U_L E \cdot e^{j(\varepsilon_T - \delta)}}{Z_T} - \frac{U_L^2 e^{j\varepsilon_T}}{Z_T} \quad \begin{array}{l} \text{přenášený} \\ \text{výkon} \end{array}$$

pro  $\varepsilon_T = \pi/2$

$$\hat{S}_T = \frac{U_L E \cdot e^{j\left(\frac{\pi}{2} - \delta\right)}}{X_T} - \frac{U_L^2 e^{j\frac{\pi}{2}}}{X_T} = \frac{U_L E}{X_T} \left\{ \cos\left(\frac{\pi}{2} - \delta\right) + j \sin\left(\frac{\pi}{2} - \delta\right) \right\} - \frac{U_L^2}{X_T} \left( \underbrace{\cos \frac{\pi}{2}}_0 + j \underbrace{\sin \frac{\pi}{2}}_1 \right)$$



$$\widehat{S}_T = \overbrace{\frac{U_L E}{X_T} \sin \delta}^{P_L} + j \overbrace{\left\{ \frac{U_L E}{X_T} \cos \delta - \frac{U_L^2}{X_T} \right\}}^{Q_L} \dots \text{přenesený výkon}$$

$$\widehat{S}_L = U_L^2 (G_L + j \cdot \text{tg} \varphi) = P_L (1 + j \cdot \text{tg} \varphi) \dots \text{odebíraný výkon}$$

$G_L$  ..reálná část vodivosti zátěže

$$\left( Q_L + \frac{U_L^2}{X_T} \right)^2 + P_L^2 = \left( \frac{E \cdot U_L}{X_T} \right)^2$$

$$Q^2 + 2Q \left\{ \frac{U_L^2}{X_T} \right\} + \left\{ \frac{U_L^2}{X_T} \right\}^2 + P^2 = \left( \frac{E \cdot U_L}{X_T} \right)^2 \quad /* X_T^2$$

$$\{Q^2 + P^2\} X_T^2 + 2Q X_T \{U_L^2\} + \{U_L^2\}^2 = E^2 \cdot \{U_L^2\}$$

$$\{U_L^2\}^2 + (2Q X_T - E^2) \{U_L^2\} + \{Q^2 + P^2\} X_T^2 = 0$$

$$\{U_L^2\}_{1,2} = \frac{E^2}{2} - Q X_T \pm \sqrt{\frac{(2Q X_T - E^2)^2}{4} - \{Q^2 + P^2\} X_T^2}$$

$$\{U_L^2\}_{1,2} = \frac{E^2}{2} - Q X_T \pm \sqrt{\frac{[4Q^2 X_T^2 - 4Q X_T E^2 + E^4]}{4} - \{Q^2 + P^2\} X_T^2}$$

$$\{U_L^2\}_{1,2} = \frac{E^2}{2} - Q X_T \pm X_T \sqrt{\frac{E^4}{4X_T^2} - \left\{ P^2 + \frac{Q E^2}{X_T} \right\}}$$

$$\text{zkratový výkon: } S_K'' = \frac{E^2}{X_T}$$

$$\text{řešení pro } U_L^2: \quad U_L^2 = \frac{E^2}{2} - Q \cdot X_T \pm \sqrt{\left( \frac{S_k''}{2} \right)^2 - (P^2 + Q S_k'')}$$

$$\{U_L^2\}_{1,2} = \frac{1}{2} - \frac{QX_T}{E^2} \pm \frac{X_T}{E^2} \sqrt{\left\{\frac{S_K''}{2}\right\}^2 - \{P^2 + Q \cdot S_K''\}}$$

$$\{U_L^2\}_{1,2} = \frac{1}{2} - \frac{Q}{S_K''} \pm \frac{1}{S_K''} \sqrt{\left\{\frac{S_K''}{2}\right\}^2 - \{P^2 + Q \cdot S_K''\}}$$

$$(P^2 + QS_k'') \leq \left(\frac{S_k''}{2}\right)^2 \text{ podmínka pro reálné řešení}$$

$$P_{\max} = \left(\frac{S_k''}{2}\right) \text{ při } Q = 0$$

maximální hodnoty

$$Q_{\max} = \left(\frac{S_k''}{4}\right) \text{ při } P = 0$$

$$\text{vztažné hodnoty: } S_b = S_k'', \quad U_b = E, \quad Z_b = \frac{U_b^2}{S_b} = X_T, \quad G_b = \frac{1}{Z_b} = \left(\frac{1}{X_T}\right)$$

$$\text{poměrné hodnoty: } p_L = \frac{P_L}{S_b}, \quad q_L = \frac{Q_L}{S_b}, \quad u_L = \frac{U_L}{E}, \quad g_L = \frac{G_L}{\left(\frac{1}{X_T}\right)}$$

$$\{u_L^2\} = \frac{1}{2} - q_L \pm \sqrt{\frac{1}{4} - \{p_L^2 + q_L\}}$$

$$p_L = u_L^2 g, \quad q_L = u_L^2 g \cdot \text{tg} \varphi$$

$$u_L^2 = \frac{1}{2} - u_L^2 g \cdot \text{tg} \varphi \pm \sqrt{\frac{1}{4} - \{(u_L^2 g)^2 + u_L^2 g \cdot \text{tg} \varphi\}}$$

$$u_L^2 (1 + g \cdot \text{tg} \varphi) = \frac{1}{2} \pm \sqrt{\frac{1}{4} - \{(u_L^2 g)^2 + u_L^2 g \cdot \text{tg} \varphi\}} = \frac{1 \pm \sqrt{1 - 4 \{(u_L^2 g)^2 + u_L^2 g \cdot \text{tg} \varphi\}}}{2}$$

$$\text{hledané napětí: } u_L = \frac{1}{\sqrt{g_L^2 + (1 + g_L \cdot \text{tg} \varphi)^2}}$$

## Program

```
clc;clear all
% vypocet pv krivek
tgfi=[ 20 7 2 1 0.5 0.25 0 -0.25 -0.5 ];
g=(0:0.01:200)';
jjj=ones(1,size(tgfi,2));
ww=1./sqrt(g.^2*jjj+(1+g*tgfi).^2);% napětí
pp=ww.^2.*(g*jjj); % činný výkon
for s=1:size(tgfi,2)
    qq(:,s)=pp(:,s)*tgfi(s);% jalový výkon
end
plot3(pp,qq,ww,'LineWidth',2); grid
title('normované p-q-v charakteristiky ')
legend('20', '7', '2', '1', '0.5', '0.25', '0', '-0.25', '-0.5')
xlabel('==> p{p.u}');ylabel('==> q{p.u}');
zlabel ('==>u(p.u)')
```

**Normovane charakteristiky**

