

Řízení elektroenergetických soustav X15RES

přednáška č. 1

Jan Špetlík

spetlij@fel.cvut.cz - v předmětu emailu „RES“

Katedra elektroenergetiky, Fakulta elektrotechniky ČVUT, Technická 2, 166 27 Praha 6

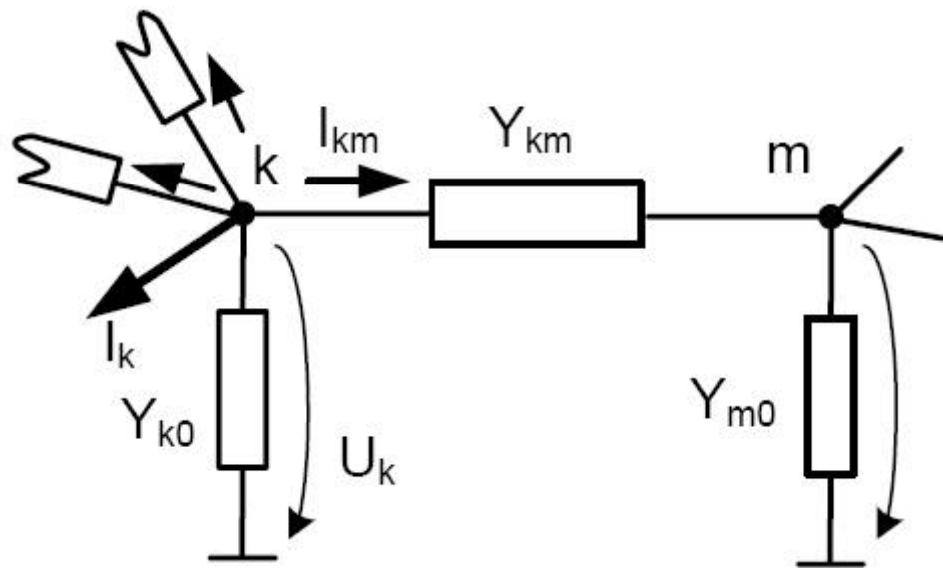
Uzlové sítě v bezporuchovém ustáleném stavu

Elektrické obvody používané v energetice,

Skládají se z:

- vedení
- transformátorů a tlumivek
- zdrojů (generátorů)
- spotřeby (zátěží)

Zobecněná metoda uzlových napětí



$$\hat{I}_k + \sum_{\substack{m=0 \\ m \neq k}}^N \hat{I}_{km} = 0$$

$$\hat{I}_k = -\sum_{\substack{m=0 \\ m \neq k}}^N \hat{I}_{km} = -\sum_{\substack{m=0 \\ m \neq k}}^N \hat{Y}_{km} \cdot (\hat{U}_k - \hat{U}_m)$$

Tvorba matice Y

- Po oddělení nultého prvku:

$$\hat{I}_k = -\sum_{\substack{m=0 \\ m \neq k}}^N \hat{Y}_{km} \cdot \hat{U}_k + \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq k}}^N \hat{Y}_{km} \cdot \hat{U}_m = -\left(\hat{Y}_{k0} + \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq k}}^N \hat{Y}_{km} \right) \cdot \hat{U}_k + \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq k}}^N \hat{Y}_{km} \cdot \hat{U}_m$$

diagonální prvky

prvky mimo
diagonálu

- Maticový zápis celého obvodu:

$$[\hat{I}] = [\hat{Y}] \cdot [\hat{U}]$$

Redukovaná matice Y

- Mějme uzlovou síť o n uzlech a g zdrojích (z pasivní zátěže)
- Pro všechna uzlová napětí a proudy platí (viz. metoda uzl. napětí)

$$\begin{bmatrix} \hat{I} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{Y} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{U} \end{bmatrix}$$

- V blokovém vyjádření

$$\begin{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{I}_g \end{bmatrix} \\ [0] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{Y}_{gg} & \hat{Y}_{gz} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \hat{Y}_{zg} & \hat{Y}_{zz} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{U}_g \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \hat{U}_z \end{bmatrix} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \hat{I}_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{Y}_{gg} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{U}_g \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \hat{Y}_{gz} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{U}_z \end{bmatrix}$$

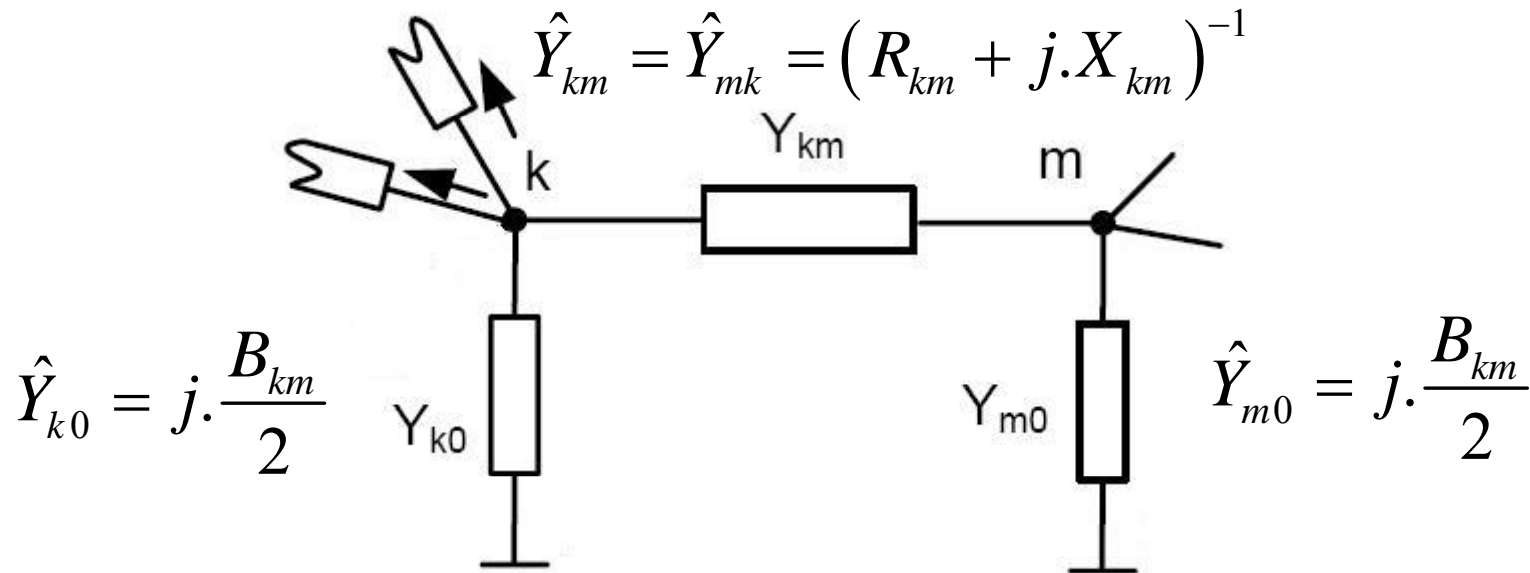
$$[0] = \begin{bmatrix} \hat{Y}_{zg} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{U}_g \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \hat{Y}_{zz} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{U}_z \end{bmatrix}$$

- Výsledná redukovaná matice Y

$$\begin{bmatrix} \hat{I}_g \end{bmatrix} = \left(\begin{bmatrix} \hat{Y}_{gg} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \hat{Y}_{gz} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{Y}_{zz} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \hat{Y}_{zg} \end{bmatrix} \right) \cdot \begin{bmatrix} \hat{U}_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{Y}_{red} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{U}_g \end{bmatrix}$$

Prvky Y matice

- Vedení nahrazujeme Π -článkem a zadáváme pomocí parametrů R , X , B

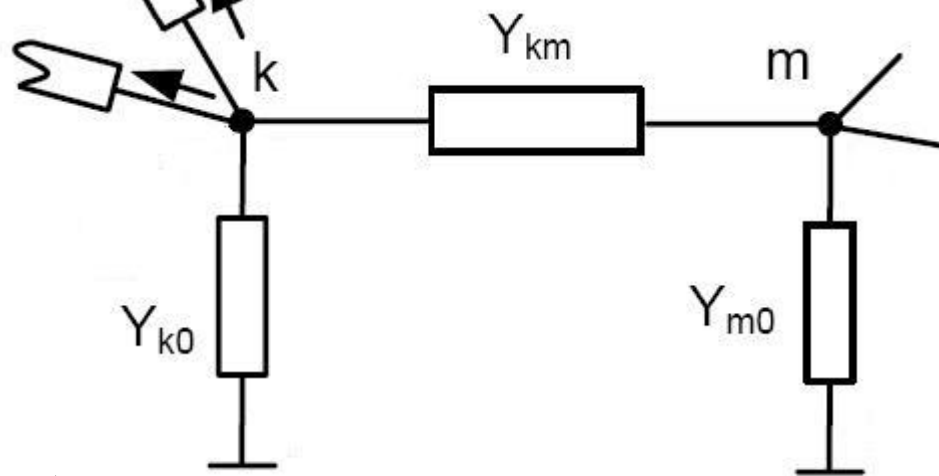


Prvky Y matice

- Transformátor nahrazujeme impedancí a ideálním transformátorem s komplexním převodem, zadáváme pomocí parametrů R , X , p

$$\hat{Y}_{km} = (R_{km} + j.X_{km})^{-1} / \hat{p}_{km}^*$$

$$\hat{Y}_{mk} = (R_{km} + j.X_{km})^{-1} / \hat{p}_{km}$$



$$\hat{Y}_{k0} = \left(\frac{1}{\hat{p}_{km}^*} - 1 \right) \cdot (R_{km} + j.X_{km})^{-1}$$

$$\hat{Y}_{m0} = \frac{\hat{p}_{km} - 1}{\hat{p}_{km} \cdot \hat{p}_{km}^*} \cdot (R_{km} + j.X_{km})^{-1}$$

Prvky Y matice

- generátory nahrazujeme podélnou impedancí a zdrojem napětí

$$\hat{Y}_{km} = \hat{Y}_{mk} = (R_{km} + j \cdot X_{km})^{-1}$$

- Zátěže nahrazujeme svodem

$$\hat{Y}_{k0} = G_k + j \cdot B_k$$

Z matice

- je maticí inverzní k admitanční matici Y

$$[\hat{U}] = [\hat{Y}]^{-1} \cdot [\hat{I}] = [\hat{Z}] \cdot [\hat{I}]$$

- vlastnosti:
- „viděná“ impedance

$$\begin{bmatrix} \hat{U}_1 \\ \dots \\ \hat{U}_k \\ \dots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{Z}_{11} & \dots & & \\ & \dots & & \\ & & \hat{Z}_{kk} & \\ & & & \dots \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \dots \\ \hat{I}_k \\ \dots \end{bmatrix}$$

v uzlu k

$$\hat{Z}_{vk} = \hat{Z}_{kk}$$

Z matice

meziuzlová k/l

$$\begin{bmatrix} \hat{U}_1 \\ \dots \\ \hat{U}_k \\ \hat{U}_l \\ \dots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{Z}_{11} & & & & \\ & \dots & & & \\ & & \hat{Z}_{kk} & \hat{Z}_{kl} & \\ & & \hat{Z}_{lk} & \hat{Z}_{ll} & \\ & & & & \dots \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \dots \\ \hat{I}_k \\ -\hat{I}_k \\ \dots \end{bmatrix}$$

$$\hat{U}_{kl} = \hat{U}_k - \hat{U}_l = \hat{Z}_{kk} \cdot \hat{I}_k - \hat{Z}_{kl} \cdot \hat{I}_k - \hat{Z}_{lk} \cdot \hat{I}_k + \hat{Z}_{ll} \cdot \hat{I}_k$$

$$\hat{Z}_{vkl} = \hat{Z}_{kk} + \hat{Z}_{ll} - \hat{Z}_{kl} - \hat{Z}_{lk}$$

Tvorba a modifikace Z matice

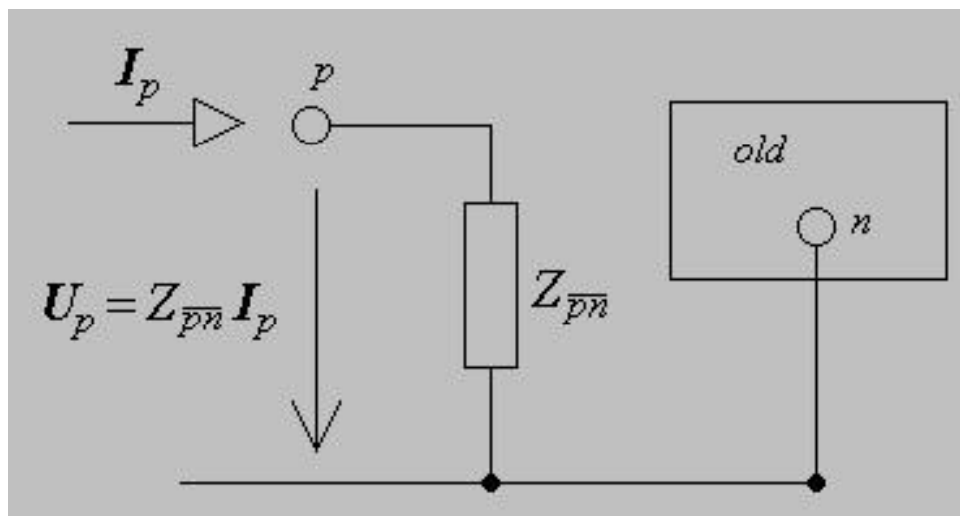
n – uzemněný uzel

i, j, k – stávající uzly

p, q – nové uzly

r – řád stávající matice

1. Připojení nového uzlu p k n , přes \hat{Z}_{pn}

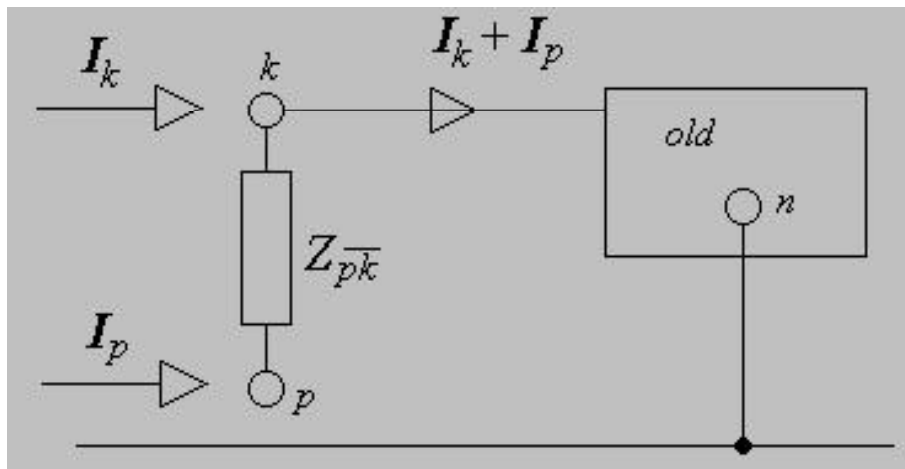


$$\begin{bmatrix} \hat{U}_{old} \\ \hat{U}_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{Z}_{old} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \hat{Z}_{pn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{I}_{old} \\ \hat{I}_p \end{bmatrix}$$

„ostrovní provoz“

Tvorba a modifikace Z matice

2. Připojení \hat{Z}_{pk}



$$\hat{U}_{new(i)} = \hat{U}_{old(i)} + \hat{Z}_{ik} \cdot \hat{I}_p$$

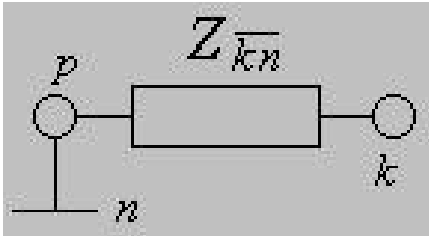
Nové napětí v uzlu p :

$$\hat{U}_{new(p)} = \hat{U}_{old(k)} + \hat{Z}_{pk} \cdot \hat{I}_p$$

$$\begin{bmatrix} \hat{U}_{new} \\ \hat{U}_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{Z}_{old} & \hat{Z}_{1k} & \dots & \hat{Z}_{rk} \\ \hat{Z}_{k1} & \dots & \hat{Z}_{kr} & \hat{Z}_{kk} + \hat{Z}_{pk} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{I}_{old} \\ \hat{I}_p \end{bmatrix}$$

Tvorba a modifikace Z matice

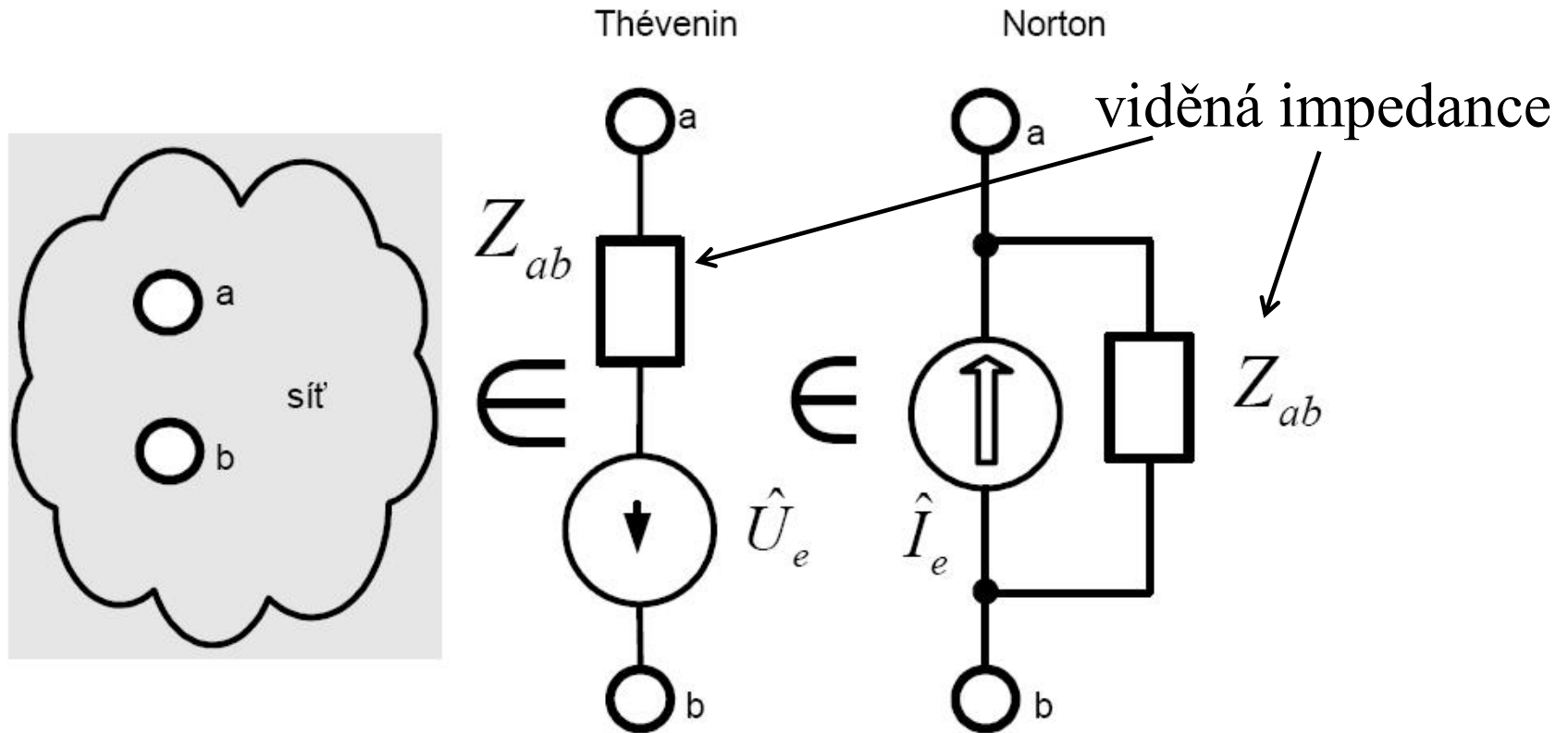
3. Spojení uzlu p se zemí / redukce matice o řád



$$\hat{Z}_{red(ij)} = \hat{Z}_{ij} - \frac{\hat{Z}_{ik} \cdot \hat{Z}_{kj}}{\hat{Z}_{kn} + \hat{Z}_{kk}}$$

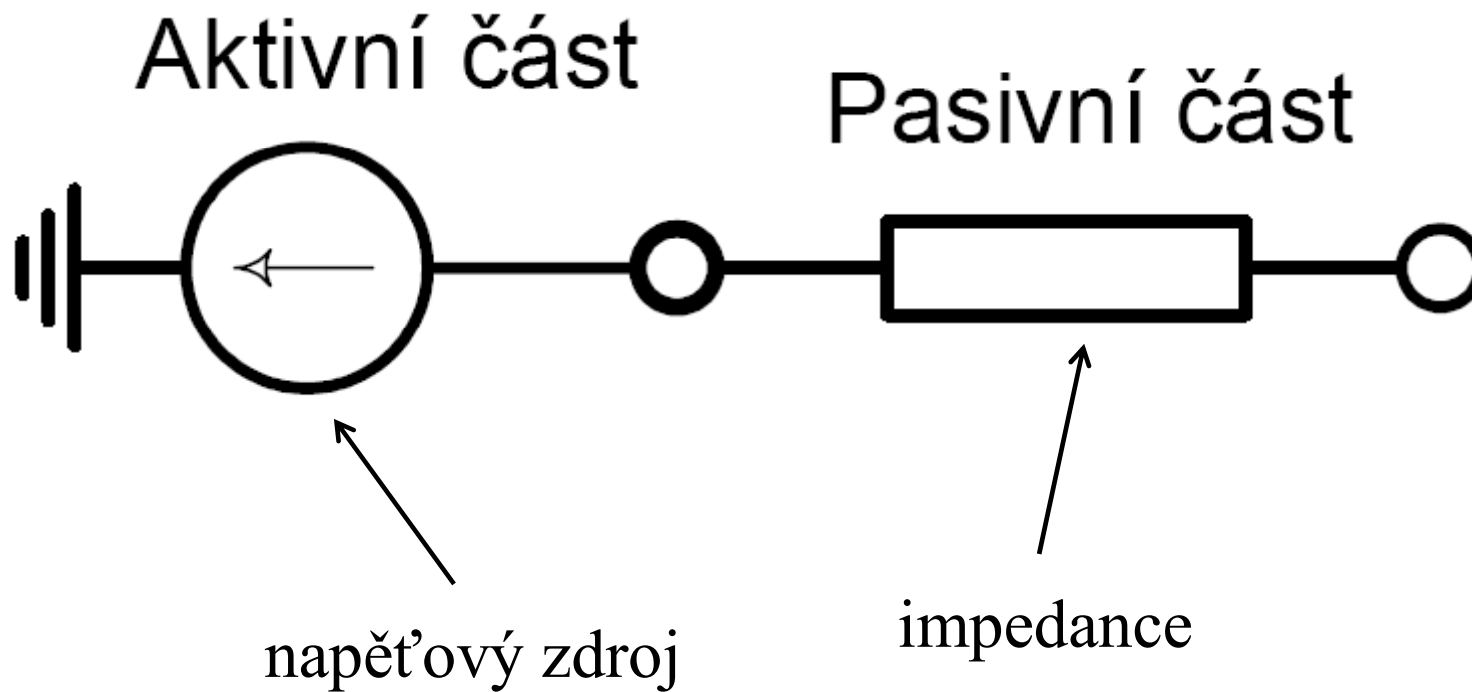
Tvorba poruchy

Každá síť složená z aktivních (proudové nebo napěťové zdroje) a pasivních prvků (impedance) se dá nahradit:



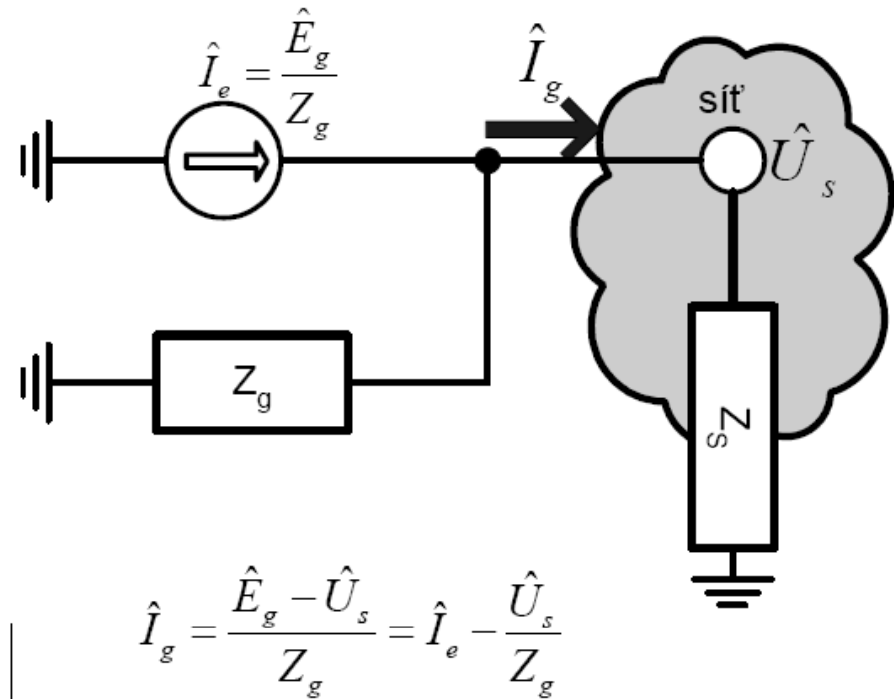
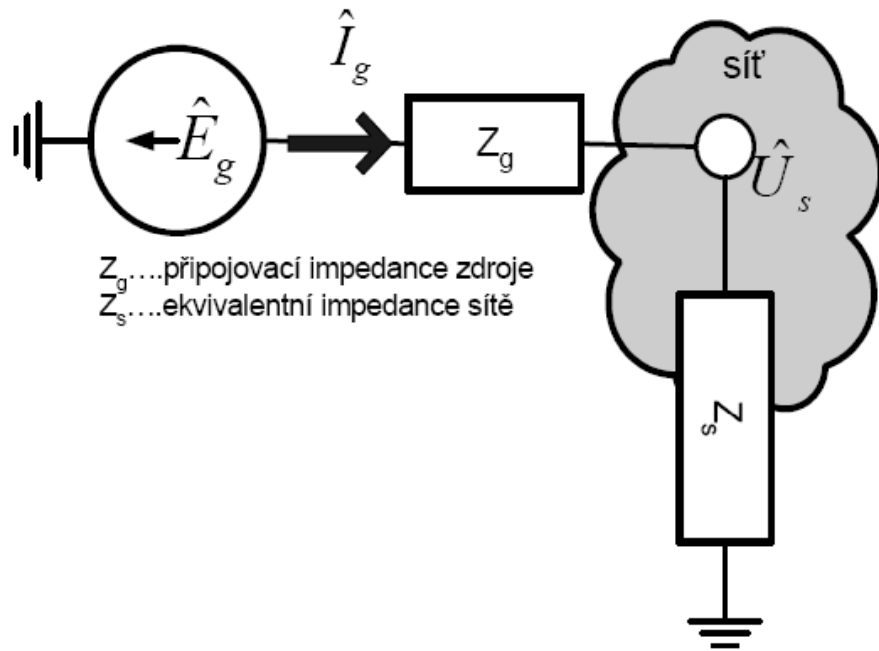
Tvorba poruchy

Model zdroje či zátěže připojený mezi uzly a,b nebo mezi jeden uzel a zem (na obrázku) předpokládejme jako



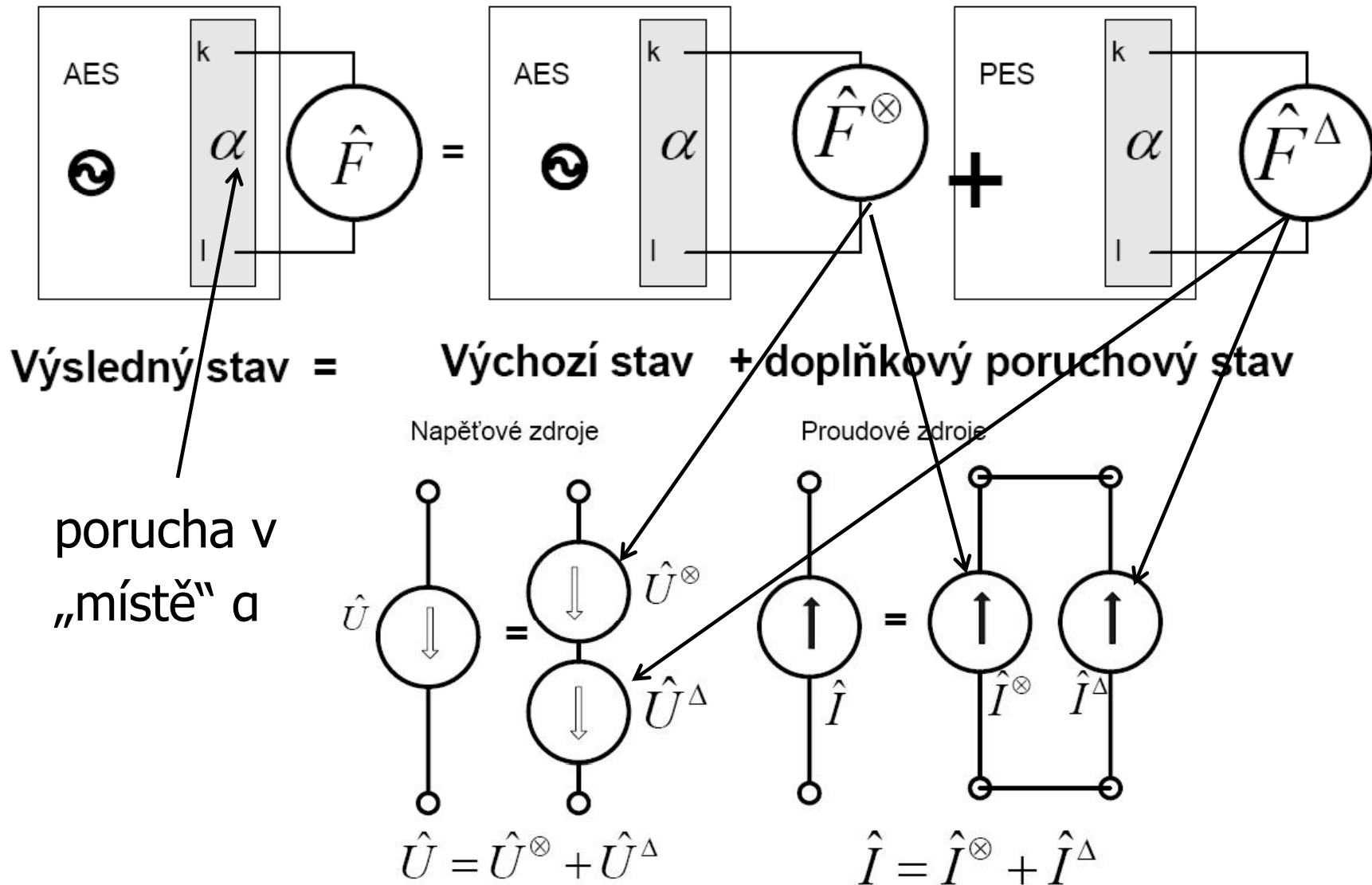
Tvorba poruchy

Mezi napětovým zdrojem s vnitřní impedancí a proudovým zdrojem platí následující ekvivalence

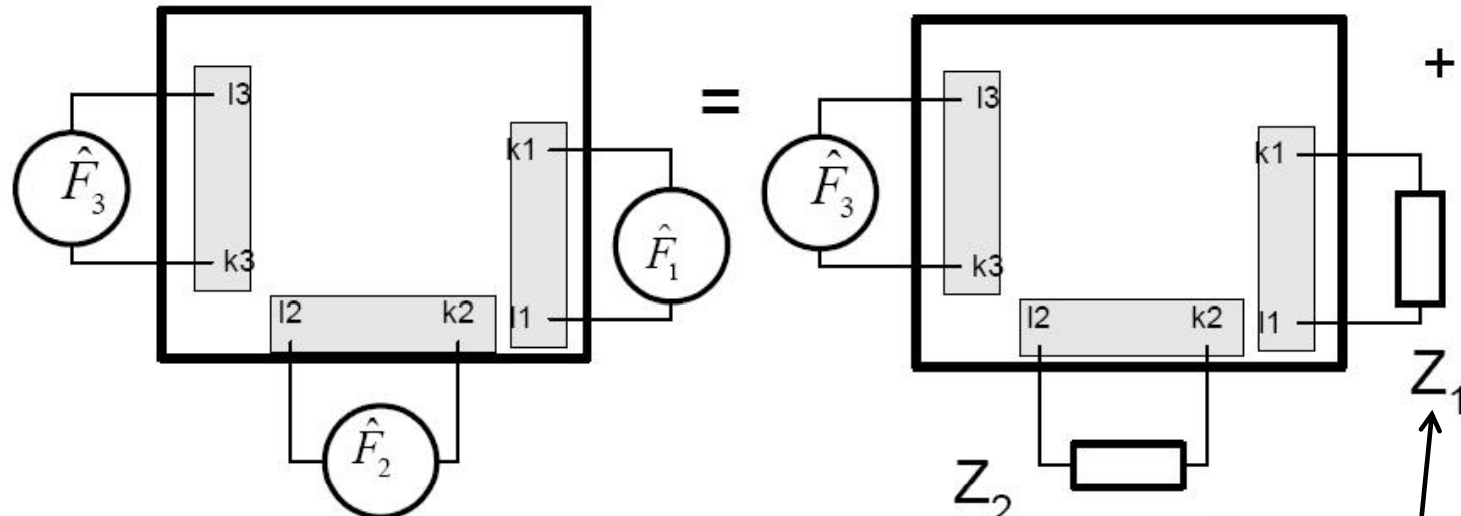


Tvorba poruchy

- Princip superpozice



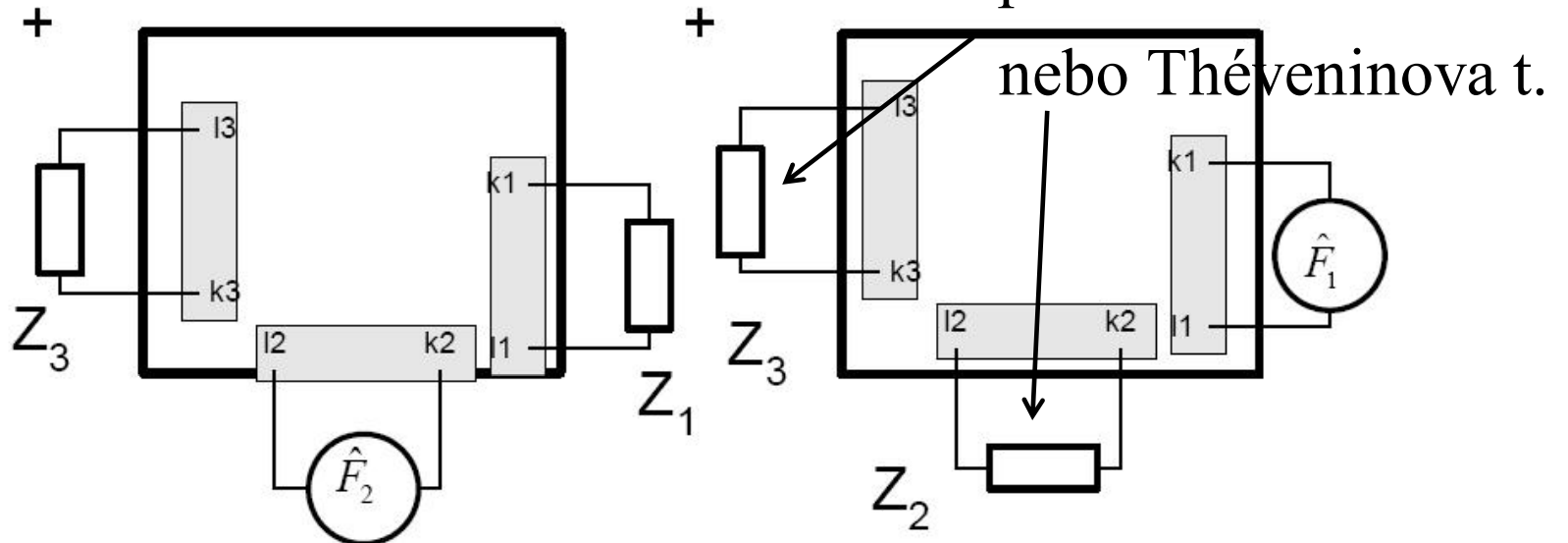
Tvorba více poruch



Z_1, Z_2, Z_3, \dots ekvivalentní impedance zdrojů

$F \dots$ obecný zdroj U/I

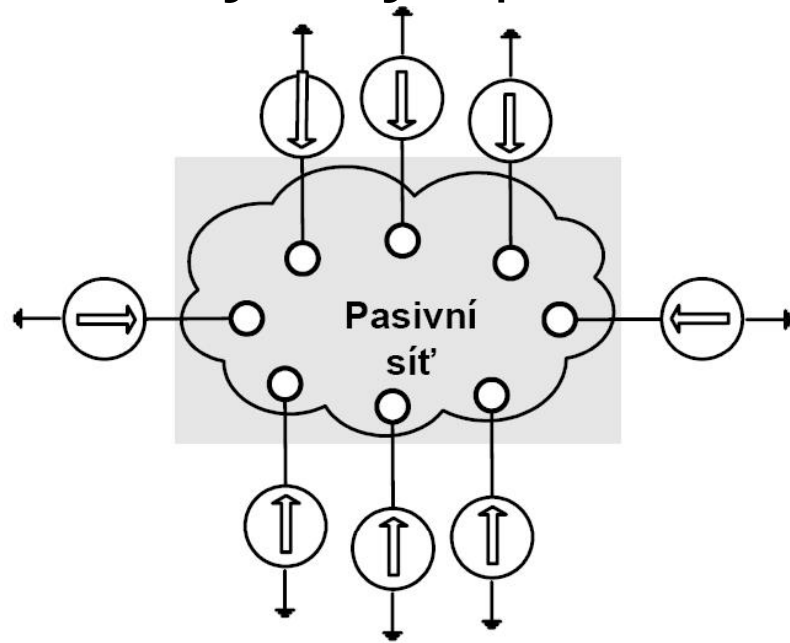
podle Nortnova



nebo Théveninova t.

Tvorba více poruch

- Uvažujeme jen proudové zdroje



$$[\hat{U}] = [Z] \cdot [\hat{I}]$$

$$Z_{ij} = \frac{\hat{U}_i}{\hat{I}_j} \Big|_{\hat{I}_k = 0 \quad \forall k, k \neq j}$$

- Jsou-li v síti i napěťové zdroje, převedeme je na ekv. proudové zdroje podle Nortona

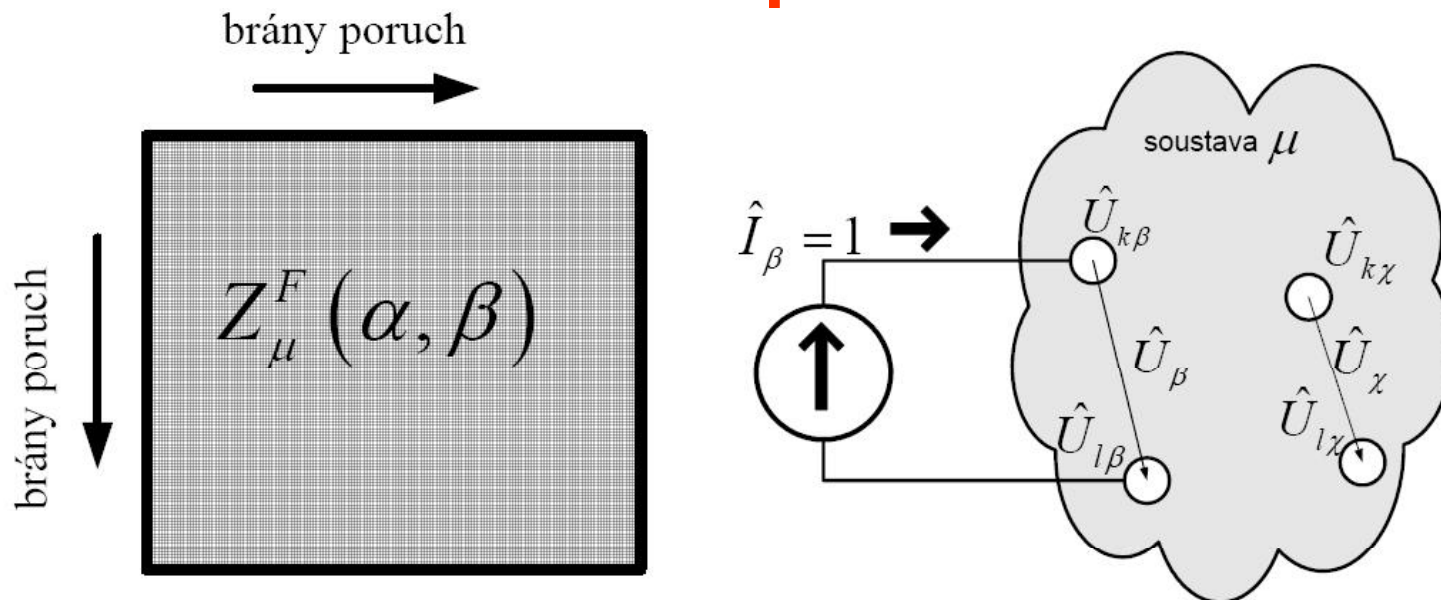
Matice poruch

- Nahradíme-li si poruchy odpovídajícími zdroji napětí, impedanční matice PES se nezmění, musíme ji dopravit v případě poruch s impedancí (viz. před. č. 1)
=> všechny proudové zdroje vtékající do aktivních uzlů ROZPOJUJEME a nemáme žádný napěťový zdroj který naopak ZKRATUJEME
- Sestavíme matici odpovídající vazbám mezi proudy a napětími mezi jednotlivými „místy“ – bránami poruch
- Matice je řádu počet bran x počet bran

$$\left[Z^F \right] = \begin{bmatrix} Z^F(\chi, \chi) & \dots & Z^F(\chi, \beta) \\ \dots & \dots & \dots \\ Z^F(\beta, \chi) & \dots & Z^F(\beta, \beta) \end{bmatrix} \quad \text{- matice poruch}$$

χ, β - brány poruch

Matice poruch



- Vztahy mezi poruchovými veličinami dodatkové proudy

$$\begin{bmatrix} \hat{U}^{\Delta F}(\chi) \\ \dots \\ \hat{U}^{\Delta F}(\beta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z^F(\chi, \chi) & \dots & Z^F(\chi, \beta) \\ \dots & \dots & \dots \\ Z^F(\beta, \chi) & \dots & Z^F(\beta, \beta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{I}^{\Delta F}(\chi) \\ \dots \\ \hat{I}^{\Delta F}(\beta) \end{bmatrix}$$

dodatková napětí poruchová matice viděných impedancí mezi bránami poruch

Matice poruch

- Prvky matice prouch:

$$Z^F(\chi, \chi) = Z(k_\chi, k_\chi) + Z(l_\chi, l_\chi) - Z(k_\chi, l_\chi) - Z(l_\chi, k_\chi)$$

$$Z^F(\chi, \beta) = Z(k_\chi, k_\beta) + Z(l_\chi, l_\beta) - Z(k_\chi, l_\beta) - Z(l_\chi, k_\beta)$$

- je-li jeden uzel / uzeměn:

$$Z^F(\chi, \chi) = Z(k_\chi, k_\chi) \Big|_{l_\chi = n}$$

$$Z^F(\chi, \beta) = Z(k_\chi, k_\beta) - Z(k_\chi, l_\beta) \Big|_{l_\chi = n}$$

- jsou-li oba uzly / uzeměny:

$$Z^F(\chi, \beta) = Z(k_\chi, k_\beta) \Big|_{l_\chi, l_\beta = n}$$

Vyřešení poruch

- Dodatková napětí v místech poruch známe, protože jsou rovna záporně vzatým napětím předporuchového stavu
- Potřebujeme zjistit dodatkové proudy:

$$\begin{bmatrix} \hat{I}^{\Delta F} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z^F \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \hat{U}^{\Delta F} \end{bmatrix}$$

- To jsou ale dodatkové proudy do bran poruch, potřebujeme vytvořit vektor dodatkových proudů vstupující do uzlů

$$\begin{bmatrix} \hat{I}^{\Delta F} \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} \hat{I}^{\Delta} \end{bmatrix}$$

- a vektor dodatkových napětí v uzlech $\begin{bmatrix} \hat{U}^{\Delta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{I}^{\Delta} \end{bmatrix}$

- Výsledná napětí po poruše $\begin{bmatrix} \hat{U} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{U}^{\otimes} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \hat{U}^{\Delta} \end{bmatrix}$

Vyřešení poruch

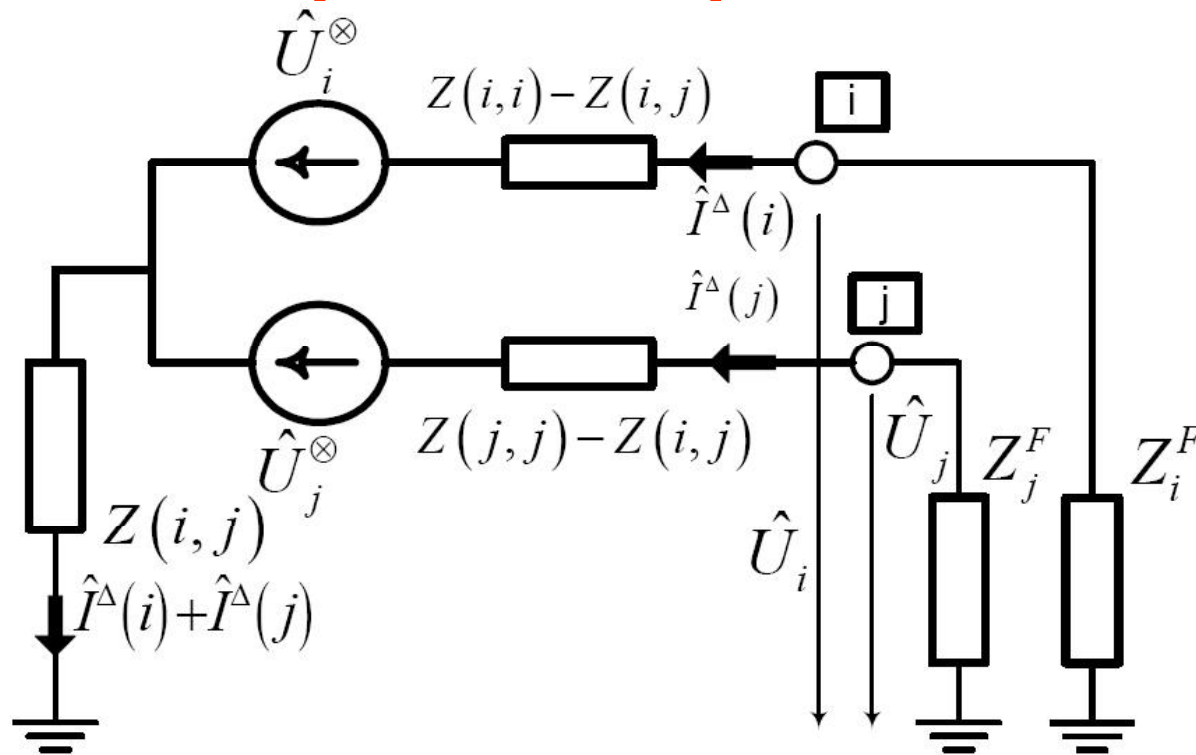
Impedanční změny jako:

- Přidání, odebrání impedance mezi dvěma uzly
- Změna převodu trf
- Zkrat za poruch. impedancí
- Rozběhy motorů

lze řešit:

- Změnou impedanční matice
- Injekcí proudů

Vyřešení poruch



$$\begin{bmatrix} \hat{U}^\otimes(i) \\ \dots \\ \hat{U}^\otimes(j) \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} Z(i,i) + Z_i^F & \dots & Z(i,j) \\ \dots & \dots & \dots \\ Z(j,i) & \dots & Z(j,j) + Z_j^F \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{I}^{\Delta F}(i) \\ \dots \\ \hat{I}^{\Delta F}(j) \end{bmatrix}$$