

# Průmyslová energetika X15PEN

## **přednáška č. 3**

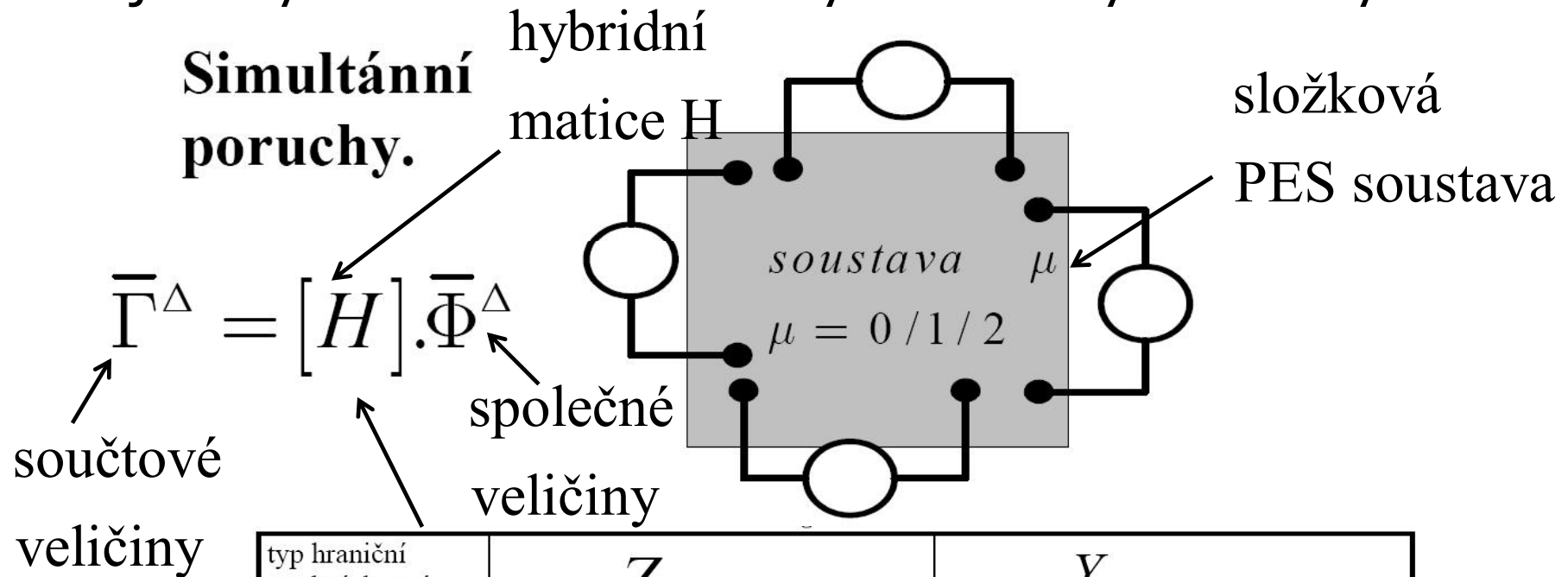
*Jan Špetlík*

[spetlij@fel.cvut.cz](mailto:spetlij@fel.cvut.cz) - v předmětu emailu „PEN“

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

# Simultánní poruchy

V síti, kde můžeme transformací do složek nahradit trojfázový obvod třemi nezávislými složkovými obvody:



typ hraniční podmínky místa $\alpha / \beta$	$Z_\beta$	$Y_\beta$
$Z_\alpha$	$\frac{U_\alpha}{I_\beta}$ vzájemná impedance	$\frac{U_\alpha}{U_\beta}$ napěťový poměr
$Y_\alpha$	$\frac{I_\alpha}{I_\beta}$ proudový poměr	$\frac{I_\alpha}{U_\beta}$ vzájemná vodivost

# Simultánní poruchy

Přehled poruch a odpovídajících veličin

Tabulka zápisů rovnic vazebních podmínek			
Součtové veličiny	Společné veličiny	Typ poruchy	zápis
$\hat{U}_{1\alpha} + \varepsilon_{2\alpha} \cdot \hat{U}_{2\alpha} + \varepsilon_{0\alpha} \cdot \hat{U}_{0\alpha} = \hat{\rho}_{\alpha}$	$\hat{I}_{1\alpha} = \varepsilon_{2\alpha} \cdot \hat{I}_{2\alpha} = \varepsilon_{0\alpha} \cdot \hat{I}_{0\alpha} = \hat{\rho}_{\alpha}$	$\Rightarrow$ jednofáz. příčná $\Rightarrow$ dvoufáz. podélná	<b>Z</b>
$\hat{I}_{1\alpha} + \varepsilon_{2\alpha} \cdot \hat{I}_{2\alpha} + \varepsilon_{0\alpha} \cdot \hat{I}_{0\alpha} = \hat{\rho}_{\alpha}$	$\hat{U}_{1\alpha} = \varepsilon_{2\alpha} \cdot \hat{U}_{2\alpha} = \varepsilon_{0\alpha} \cdot \hat{U}_{0\alpha} = \hat{\rho}_{\alpha}$	$\Rightarrow$ dvoufáz. příčná $\Rightarrow$ jednofáz. podélná	<b>Y</b>
$\hat{\Gamma}_{1\alpha} + \varepsilon_{2\alpha} \cdot \hat{\Gamma}_{2\alpha} + \varepsilon_{0\alpha} \cdot \hat{\Gamma}_{0\alpha} = \hat{\rho}_{\alpha}$	$\hat{\Phi}_{1\alpha} = \varepsilon_{2\alpha} \cdot \hat{\Phi}_{2\alpha} = \varepsilon_{0\alpha} \cdot \hat{\Phi}_{0\alpha} = \rho_{\alpha}$	$\Rightarrow$ všechny	<b>H</b>

komplexní konstanta provádějící přepočítání poruchy v odpovídající fázi do 1. složkové soustavy (tak aby byl převod pom. trf 1:1)

# Simultánní poruchy

- Chceme získat vztah dodatkových veličin pro  
1. složkovou soustavu pomocí veličin předchozího stavu

**Pro více míst lze zapsat v maticovém tvaru:**

$$\overbrace{\overline{\Phi}_1}^{\overline{\Phi}_1} + \overline{\Phi}_1^\Delta = \overline{\varepsilon}_{2\%} \overbrace{(\overline{\Phi}_2^\oplus + \overline{\Phi}_2^\Delta)}^{\overline{\Phi}_2} = \overline{\varepsilon}_{0\%} \overbrace{(\overline{\Phi}_0^\oplus + \overline{\Phi}_0^\Delta)}^{\overline{\Phi}_0} \Rightarrow \text{při známém } \overline{\Phi}_1^\Delta$$

$$\overline{\Phi}_2^\Delta = \overline{\varepsilon}_{2\%}^{-1} \cdot \overline{\Phi}_1^\oplus - \overline{\Phi}_2^\oplus + \overline{\varepsilon}_{2\%}^{-1} \cdot \overline{\Phi}_1^\Delta$$

$$\overline{\Phi}_0^\Delta = \overline{\varepsilon}_{0\%}^{-1} \cdot \overline{\Phi}_1^\oplus - \overline{\Phi}_0^\oplus + \overline{\varepsilon}_{0\%}^{-1} \cdot \overline{\Phi}_1^\Delta$$

**system maticových rovnic:**

$$\overline{\Gamma}_1^\Delta = \overline{\Gamma}_1 - \overline{\Gamma}_1^\oplus = [H_1] \cdot \overline{\Phi}_1^\Delta$$

$$\overline{\varepsilon}_{2\%} \overline{\Gamma}_2^\Delta = \overline{\varepsilon}_{2\%} (\overline{\Gamma}_2 - \overline{\Gamma}_2^\oplus) = \overline{\varepsilon}_{2\%} [H_2] \left\{ \overline{\varepsilon}_{2\%}^{-1} \cdot \overline{\Phi}_1^\oplus - \overline{\Phi}_2^\oplus + \overline{\varepsilon}_{2\%}^{-1} \cdot \overline{\Phi}_1^\Delta \right\}$$

$$\overline{\varepsilon}_{0\%} \overline{\Gamma}_0^\Delta = \overline{\varepsilon}_{0\%} (\overline{\Gamma}_0 - \overline{\Gamma}_0^\oplus) = \overline{\varepsilon}_{0\%} [H_0] \left\{ \overline{\varepsilon}_{2\%}^{-1} \cdot \overline{\Phi}_0^\oplus - \overline{\Phi}_0^\oplus + \overline{\varepsilon}_{0\%}^{-1} \cdot \overline{\Phi}_1^\Delta \right\}$$

# Simultánní poruchy

Sečtením tří rovnic vzniknou dílčí výrazy :

$$\bar{\rho}_{\Sigma} = \bar{\Gamma}_1 + \bar{\varepsilon}_{2\%} \bar{\Gamma}_2 + \bar{\varepsilon}_{0\%} \bar{\Gamma}_0$$

rezultující hybridní matice:

$$[H_{\Sigma}] = [H_1] + \bar{\varepsilon}_{2\%} [H_2] \bar{\varepsilon}_{2\%}^{-1} + \bar{\varepsilon}_{0\%} [H_0] \bar{\varepsilon}_{0\%}^{-1}$$

rezultující excitační veličina:

$$\begin{aligned} \bar{\Gamma}_{\Sigma} = & \bar{\varepsilon}_{2\%} [H_2] \cdot \bar{\Phi}_2^{\oplus} + \bar{\varepsilon}_{0\%} [H_0] \cdot \bar{\Phi}_0^{\oplus} - \left\{ \bar{\Gamma}_1^{\oplus} + \bar{\varepsilon}_{2\%} \bar{\Gamma}_2^{\oplus} + \bar{\varepsilon}_{0\%} \bar{\Gamma}_0^{\oplus} \right\} - \\ & - \left\{ \bar{\varepsilon}_{2\%} [H_2] \bar{\varepsilon}_{2\%}^{-1} + \bar{\varepsilon}_{0\%} [H_0] \bar{\varepsilon}_{0\%}^{-1} \right\} \bar{\Phi}_1^{\oplus} \end{aligned}$$

Výsledná rovnice pro stanovení dodatkových veličin:

$$\bar{\rho}_{\Sigma} + \bar{\Gamma}_{\Sigma} = [H_{\Sigma}] \cdot \bar{\Phi}_1^{\Delta}$$

↑ dodatkové veličiny, které chceme spočítat  
rezultující veličina, složená pouze ze známých veličin předp. stavu

# Simultánní poruchy

- Dodatky ost. složek:

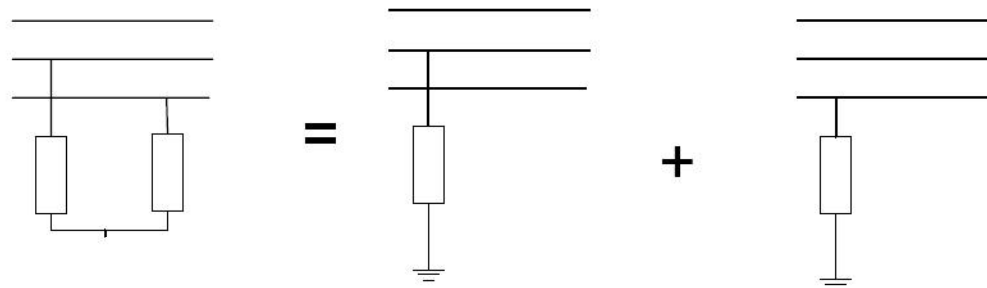
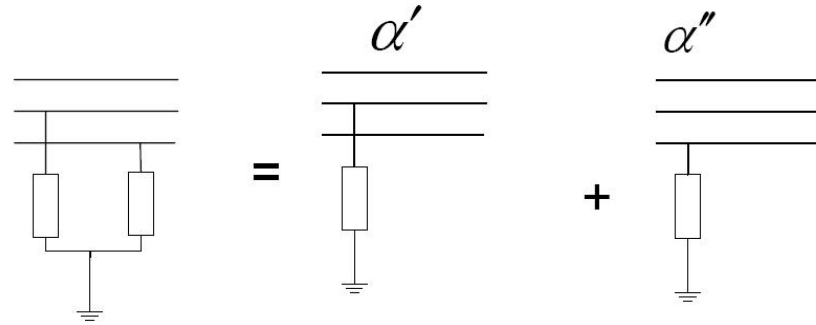
$$\begin{aligned} \bar{\Phi}_2^\Delta &= \bar{\varepsilon}_{2\%}^{-1} \cdot \bar{\Phi}_1^\oplus - \bar{\Phi}_2^\oplus + \bar{\varepsilon}_{2\%}^{-1} \cdot \bar{\Phi}_1^\Delta \\ \bar{\Phi}_0^\Delta &= \bar{\varepsilon}_{0\%}^{-1} \cdot \bar{\Phi}_1^\oplus - \bar{\Phi}_0^\oplus + \bar{\varepsilon}_{0\%}^{-1} \cdot \bar{\Phi}_1^\Delta \end{aligned} \quad \begin{matrix} \Rightarrow \\ \Rightarrow \\ \Rightarrow \end{matrix} \quad \begin{bmatrix} \bar{\Gamma}_1^\Delta \\ \bar{\Gamma}_2^\Delta \\ \bar{\Gamma}_0^\Delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [H_1] \cdot \bar{\Phi}_1^\Delta \\ [H_2] \cdot \bar{\Phi}_2^\Delta \\ [H_0] \cdot \bar{\Phi}_0^\Delta \end{bmatrix}$$

- Jsou známy všechny veličiny nového stavu
- Omezíme-li se na poskládání VŠECH poruch pouze z 1-f příčné a 2-f podélné, pak:

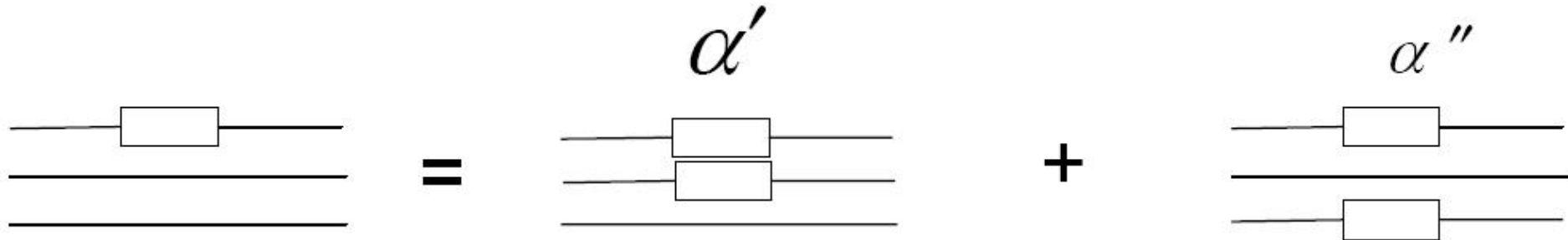
<b>Sériové spojení</b> [H] ⇒ [Z]	$\hat{\Phi} \Rightarrow \hat{I}$ společné veličiny
	$\hat{\Gamma} \Rightarrow \hat{U}$ součtové veličiny

- Jak to uděláme?

# Štěpení poruch



+ velké  $Z_N$  v nulové složce



# Simultánní poruchy

$$\hat{I}_{1,\chi} = \varepsilon_{2,\chi} \hat{I}_{2,\chi} = \varepsilon_{0,\chi} \hat{I}_{0,\chi} \quad \text{rovnice místa } \chi$$

$$\hat{I}_{1,\chi}^{\oplus} + \hat{I}_{1,\chi}^{\Delta} = \varepsilon_{2,\chi} (\hat{I}_{2,\chi}^{\oplus} + \hat{I}_{2,\chi}^{\Delta}) = \varepsilon_{0,\chi} (\hat{I}_{0,\chi}^{\oplus} + \hat{I}_{0,\chi}^{\Delta})$$

**budeme-li znát  $\hat{I}_{1,\chi}^{\Delta}$  určíme další**

$$\hat{I}_{0,\chi}^{\Delta} = \varepsilon_{0,\chi}^{-1} \hat{I}_{1,\chi}^{\oplus} - \hat{I}_{0,\chi}^{\oplus} + \varepsilon_{0,\chi}^{-1} \hat{I}_{1,\chi}^{\Delta}$$

$$\hat{I}_{2,\chi}^{\Delta} = \varepsilon_{2,\chi}^{-1} \hat{I}_{1,\chi}^{\oplus} - \hat{I}_{2,\chi}^{\oplus} + \varepsilon_{2,\chi}^{-1} \hat{I}_{1,\chi}^{\Delta}$$

**Pro více míst poruch  $\Rightarrow$  maticový tvar:**

$$\bar{I}_1 = \bar{\varepsilon}_{2\%} \bar{I}_2 = \bar{\varepsilon}_{0\%} \bar{I}_0$$

$$(\bar{I}_1^{\oplus} + \bar{I}_1^{\Delta}) = \bar{\varepsilon}_{2\%} (\bar{I}_2^{\oplus} + \bar{I}_2^{\Delta}) = \bar{\varepsilon}_{0\%} (\bar{I}_0^{\oplus} + \bar{I}_0^{\Delta})$$

$$\bar{I}_2^{\Delta} = \bar{\varepsilon}_{2\%}^{-1} \bar{I}_1^{\oplus} - \bar{I}_2^{\oplus} + \bar{\varepsilon}_{2\%}^{-1} \bar{I}_1^{\Delta}$$

$$\bar{I}_0^{\Delta} = \bar{\varepsilon}_{0\%}^{-1} \bar{I}_1^{\oplus} - \bar{I}_0^{\oplus} + \bar{\varepsilon}_{0\%}^{-1} \bar{I}_1^{\Delta}$$



# Simultánní poruchy

**system maticových rovnic:**

$$\underbrace{\bar{U}_1 - \bar{U}_1^\otimes}_{\bar{U}_1^\Delta} = [Z_1^p] \cdot \bar{I}_1^\Delta \quad [Z_\mu^p] \dots \begin{array}{l} \text{poruchová matice} \\ \mu - \text{té slož. soustavy} \end{array}$$

$$\bar{\varepsilon}_{2\%} \underbrace{(\bar{U}_2 - \bar{U}_2^\otimes)}_{\bar{U}_2^\Delta} = \bar{\varepsilon}_{2\%} [Z_2^p] \underbrace{(\bar{\varepsilon}_{2\%}^{-1} \bar{I}_1^\otimes - \bar{I}_2^\otimes + \bar{\varepsilon}_{2\%}^{-1} \bar{I}_1^\Delta)}_{\bar{I}_2^\Delta}$$

$$\bar{\varepsilon}_{0\%} \underbrace{(\bar{U}_0 - \bar{U}_0^\otimes)}_{\bar{U}_0^\Delta} = \bar{\varepsilon}_{0\%} [Z_0^p] \underbrace{(\bar{\varepsilon}_{0\%}^{-1} \bar{I}_1^\otimes - \bar{I}_0^\otimes + \bar{\varepsilon}_{0\%}^{-1} \bar{I}_1^\Delta)}_{\bar{I}_0^\Delta}$$

# Simultánní poruchy

**maticе hraničních podmínek:**

$$\bar{\rho}_{\Sigma} = \bar{U}^F = \bar{U}_1 + \bar{\varepsilon}_{2\%} \bar{U}_2 + \bar{\varepsilon}_{0\%} \bar{U}_0 = \bar{Z}_{\%}^F \cdot \underbrace{\left\{ \bar{I}_1 + \bar{\varepsilon}_{2\%} \bar{I}_2 + \bar{\varepsilon}_{0\%} \bar{I}_0 \right\}}_{\bar{I}^F}$$

**rezultující poruchová impedanční maticе sítě**

$$[Z_{\Sigma}] = [Z_1^p] + \bar{\varepsilon}_{2\%} [Z_2^p] \bar{\varepsilon}_{2\%}^{-1} + \bar{\varepsilon}_{0\%} [Z_0^p] \bar{\varepsilon}_{0\%}^{-1}$$

**rezultující excitační veličina:**

$$\begin{aligned} \bar{U}_{\Sigma} = & \bar{\varepsilon}_{2\%} [Z_2^p] \bar{I}_2^{\oplus} + \bar{\varepsilon}_{0\%} [Z_0^p] \bar{I}_0^{\oplus} - \\ & - \left\{ \bar{U}_1^{\oplus} + \bar{\varepsilon}_{2\%} \bar{U}_2^{\oplus} + \bar{\varepsilon}_{0\%} \bar{U}_0^{\oplus} \right\} - \\ & - \left\{ \bar{\varepsilon}_{2\%} [Z_2^p] \bar{\varepsilon}_{2\%}^{-1} + \bar{\varepsilon}_{0\%} [Z_0^p] \bar{\varepsilon}_{0\%}^{-1} \right\} \bar{I}_1^{\otimes}. \end{aligned}$$

# Simultánní poruchy

výpočet poruchy:

$$\bar{U}^F + [Z_{\Sigma}^P] \cdot \bar{I}_1^{\Delta} = \bar{U}_{\Sigma}$$
$$\bar{Z}_{\%}^F \cdot \underbrace{\left\{ (\bar{I}_1^{\otimes} + \bar{I}_1^{\Delta}) + \bar{\varepsilon}_{2\%} (\bar{I}_2^{\otimes} + \bar{I}_2^{\Delta}) + \bar{\varepsilon}_{0\%} (\bar{I}_0^{\otimes} + \bar{I}_0^{\Delta}) \right\}}_{\bar{I}^F} + [Z_{\Sigma}^P] \cdot \bar{I}_1^{\Delta} = \bar{U}_{\Sigma}$$

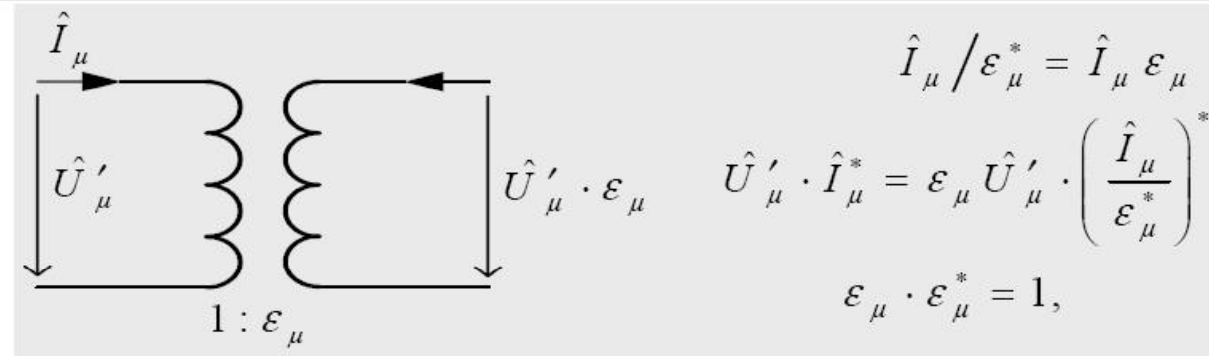
$$3 \cdot \bar{Z}_{\%}^F \cdot (\bar{I}_1^{\otimes} + \bar{I}_1^{\Delta}) + [Z_{\Sigma}^P] \cdot \bar{I}_1^{\Delta} = \bar{U}_{\Sigma}$$

$$3 \cdot \bar{Z}_{\%}^F \cdot \bar{I}_1^{\otimes} + \left\{ 3 \cdot \bar{Z}_{\%}^F + [Z_{\Sigma}^P] \right\} \cdot \bar{I}_1^{\Delta} = \bar{U}_{\Sigma}$$

$$\bar{I}_1^{\Delta} = \left\{ 3 \cdot \bar{Z}_{\%}^F + [Z_{\Sigma}^P] \right\}^{-1} \cdot (\bar{U}_{\Sigma} - 3 \cdot \bar{Z}_{\%}^F \cdot \bar{I}_1^{\otimes})$$

- Tím jsme dosáhli výpočet dodatkového proudu  $I_1$  pro obecný počet poruch s vloženou impedancí

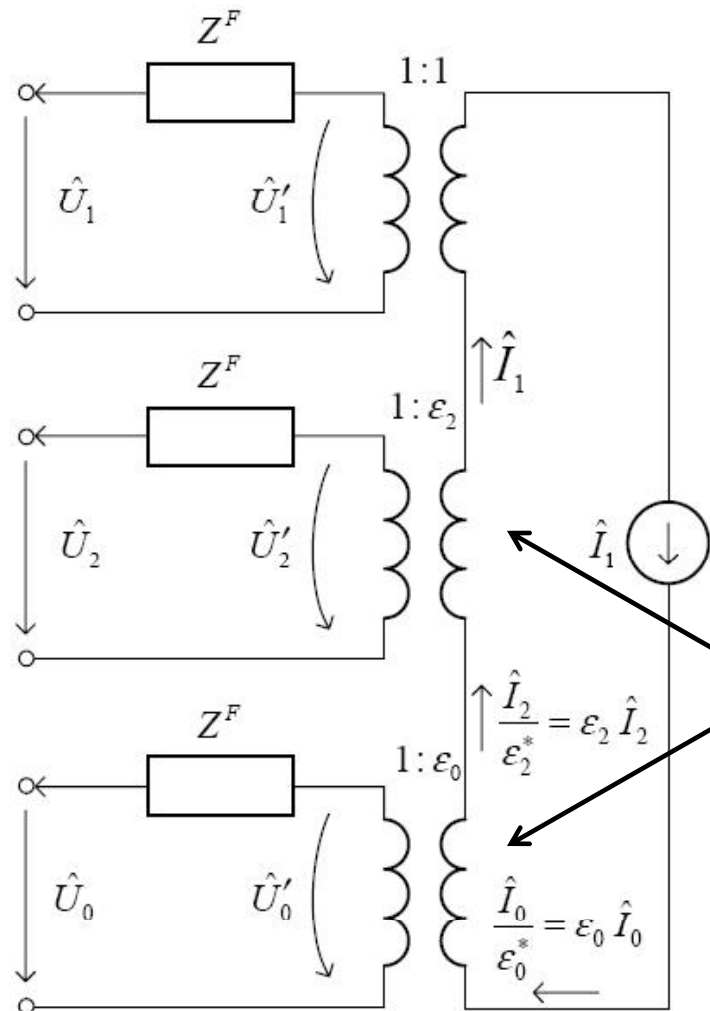
# Pomocný transformátor



**Tabulka komplexních převodů:**

	<b>a</b>	<b>b</b>	<b>c</b>
$n_1$	1	$a^*$	$a$
$n_2$	1	$a$	$a^*$
$n_0$	1	1	1
$\varepsilon_1 = n_1/n_1$	1	1	1
$\varepsilon_2 = n_2/n_1$	$1/1 = 1$	$a/a^* = a^*$	$a^*/a = a$
$\varepsilon_0 = n_0/n_1$	$1/1 = 1$	$1/a^* = a$	$1/a = a^*$

# Pomocný transformátor



Složkové schéma  
jednopolové  
poruchy

pomocné transformátory s převodem  $\epsilon_\mu$  vztažené k první složkové soustavě,  
kde  $\epsilon_1 = 1$

# Korekce viděné impedance

## **Realizace výpočtu.**

Procedura **KOREKCE**: Vztahy pro výpočet viděných impedancí platí obecně. Je-li však některý z uzlů totožný se zemí je impedance obsahující tento uzel **nulová**.

**Formulace a řešení problému SP může probíhat buď v:**

- **originální souřadnicový systém abc.** .
- **systemu transformovaném (012, 0dq, 0 $\alpha\beta$ ).** .

# Přehled výpočtu poruch

## Elementární operace

1. **Třífázové rozpojení** .Změny veličin způsobené třífázovým rozpojením lze počítat:

1.1 **Korekcí Z matice** a následným výpočtem uzlových napětí a dalších závislých veličin při **konstantních uzlových proudech**.

1.2 **Korekcí uzlových proudů** ( aby vedením které je fiktivně rozpojené netekl proud) a následným výpočtem veličin při **konstantní Z matici**.

2. **Spojení rozpojené dvojice svorek schématu (brány) poruchovou impedancí**.

Porucha v systému abc	Složení z poruch $n \leq 3$
n.. fázová příčná n..fázová podélná	n x jednofázové propojení brány fáze $\Rightarrow$ zem Třífázové rozpojení + nx jednofázové propojení brány fáze $\Rightarrow$ fáze poruchovou impedancí a 3-nx propojení původní impedancí
mezifázová	Kombinace dvou jednofázových příčných s velkým odporem k zemi v nulové složkové soustavě

# Vývojový diagram

## 1. Nastavení počátečních hodnot

$\bar{U}_1^{\circ} \leftarrow$       výsledek ustáleného chodu

$\bar{I}_1^{\circ} \leftarrow$       náhrada generátorů a aktivních zátěží

2. sestavení  $[Y_{\mu}], [Z_{\mu}]$

3. výpočet poruch

3.1 tvorba matice poruch  $[Z_{\mu}^p]$  pro  $\mu=0,1,2, \forall \chi, \beta$

$$Z_{\mu}^p(\chi, \beta) = Z_{\mu}(k_{\chi} k_{\beta}) + Z_{\mu}(l_{\chi} l_{\beta}) - Z_{\mu}(k_{\chi} l_{\beta}) - Z_{\mu}(k_{\beta} l_{\chi})$$

$$Z_{\mu}^p(\chi, \chi) = Z_{\mu}(k_{\chi} k_{\chi}) + Z_{\mu}(l_{\chi} l_{\chi}) - 2 \cdot Z_{\mu}(k_{\chi} l_{\chi})$$

procedura KOREKCE;

3.2. tvorba rezultující matice poruch

$$[Z_{\Sigma}^p] = [Z_1^p] + \bar{\varepsilon}_{2\%} [Z_2^p] \bar{\varepsilon}_{2\%}^{-1} + \bar{\varepsilon}_{0\%} [Z_0^p] \bar{\varepsilon}_{0\%}^{-1}$$

3.3 tvorba rezultujícího excitujícího napětí

$$\bar{U}_{\Sigma} = \bar{\varepsilon}_{2\%} [Z_2^p] \bar{I}_2^{\oplus} + \bar{\varepsilon}_{0\%} [Z_0^p] \bar{I}_0^{\oplus} - \{ \bar{U}_1^{\oplus} + \bar{\varepsilon}_{2\%} \bar{U}_2^{\oplus} + \bar{\varepsilon}_{0\%} \bar{U}_0^{\oplus} \} -$$



# Vývojový diagram

## 3.4 výpočet injektovaných proudů [ $\mathbf{I}_1^\Delta$ ]

$$\bar{I}_1^\Delta = \left\{ 3 \cdot \bar{Z}_{\%}^F + \left[ Z_{\Sigma}^P \right] \right\}^{-1} \cdot (\bar{U}_{\Sigma} - 3 \cdot \bar{Z}_{\%}^F \cdot \bar{I}_1^{\oplus})$$

## 3.5 výpočet [ $\mathbf{I}_2^\Delta$ ], [ $\mathbf{I}_0^\Delta$ ]

$$\bar{I}_2^\Delta = \bar{\mathcal{E}}_{2\%}^{-1} \bar{I}_1^{\oplus} - \bar{I}_2^{\oplus} + \bar{\mathcal{E}}_{2\%}^{-1} \bar{I}_1^\Delta \qquad \bar{I}_0^\Delta = \bar{\mathcal{E}}_{0\%}^{-1} \bar{I}_1^{\oplus} - \bar{I}_0^{\oplus} + \bar{\mathcal{E}}_{0\%}^{-1} \bar{I}_1^\Delta$$

## korekce uzlových proudů v místech poruchy

$$\hat{I}_\mu(k_\chi) = \hat{I}_\mu^{\oplus}(k_\chi) + \hat{I}_\mu^\Delta(\chi) \quad \text{pro } \forall \chi, \forall \mu$$

$$\hat{I}_\mu(l_\chi) = \hat{I}_\mu^{\oplus}(l_\chi) - \hat{I}_\mu^\Delta(\chi)$$

## 3.6 výpočet přírůstků a hodnot napětí uzlů

$$\bar{U}_\mu^\Delta = \left[ Z_\mu \right] \cdot (\bar{I}_\mu - \bar{I}_\mu^{\oplus}) \quad \mu = 0, 1, 2$$

$$\bar{U}_\mu = \bar{U}_\mu^{\oplus} + \bar{U}_\mu^\Delta$$

## 3.7 výpočet složkových proudů vedení

## 3.8 uložení výsledných napětí a proudů do nových referenčních hodnot

## 4. Transformace veličin 012 $\Rightarrow$ abc