

## PJS – Přednáška číslo 2

### **Jednoduché elektromagnetické přechodné děje**

#### **Předpoklady:**

- Konstantní rychlost všech točivých strojů (časové konstanty delší než u el.-mg. dějů) a v důsledku toho i frekvence elektrických veličin.
- Popis systému bude proveden pomocí prvků se soustředěnými parametry.
- Lineární charakter všech prvků (zanedbání např. sycení magnetických obvodů).
- Zjednodušené respektování rotorových vinutí.
- Sinusové rozložení magnetického napětí ve vzduchové mezeře točivých strojů.
- Symetrické uspořádání satorů točivých strojů, navíc bez vlivu drážkování (zdroje tedy mají čistě sinusový charakter bez vyšších harmonických).

#### **Vlastnosti vytvořeného modelu ovlivňuje:**

- Volba souřadného systému a koeficientů případných transformačních vztahů.
- Použití a volba systému poměrných souřadnic.
- Volba kladné orientace os a směru otáčení souřadnic.
- Způsob linearizace všech prvků (zanedbání např. sycení, hystereze magnetických obvodů).
- Míra zjednodušeného respektování rotorových vinutí (především tlumících obvodů).

Lze tedy jedno reálné zařízení charakterizovat nepřeberným množstvím různých matematických popisů.

Vzhledem k praktickým časovým konstantám (určeným poměry  $L/R$ ) má obvykle smysl vyšetřovat tyto přechodné děje v rozmezí 0.01 až 0.2 sec.

Řešení spočívá v určení časových průběhů proudů, z nichž lze následně odvodit veškeré další aktivní parametry (napětí, magnetické toky, ...).

Výpočtovou metodiku komplikuje:

- Složitá struktura elektrického schématu.
- Vnitřní napětí a reaktance alternátorů jsou proměnné a řešení jejich hodnot není triviální.

Důvody vyšetřování průběhů proudů vzniklých při el.-mg. přechodných dějích:

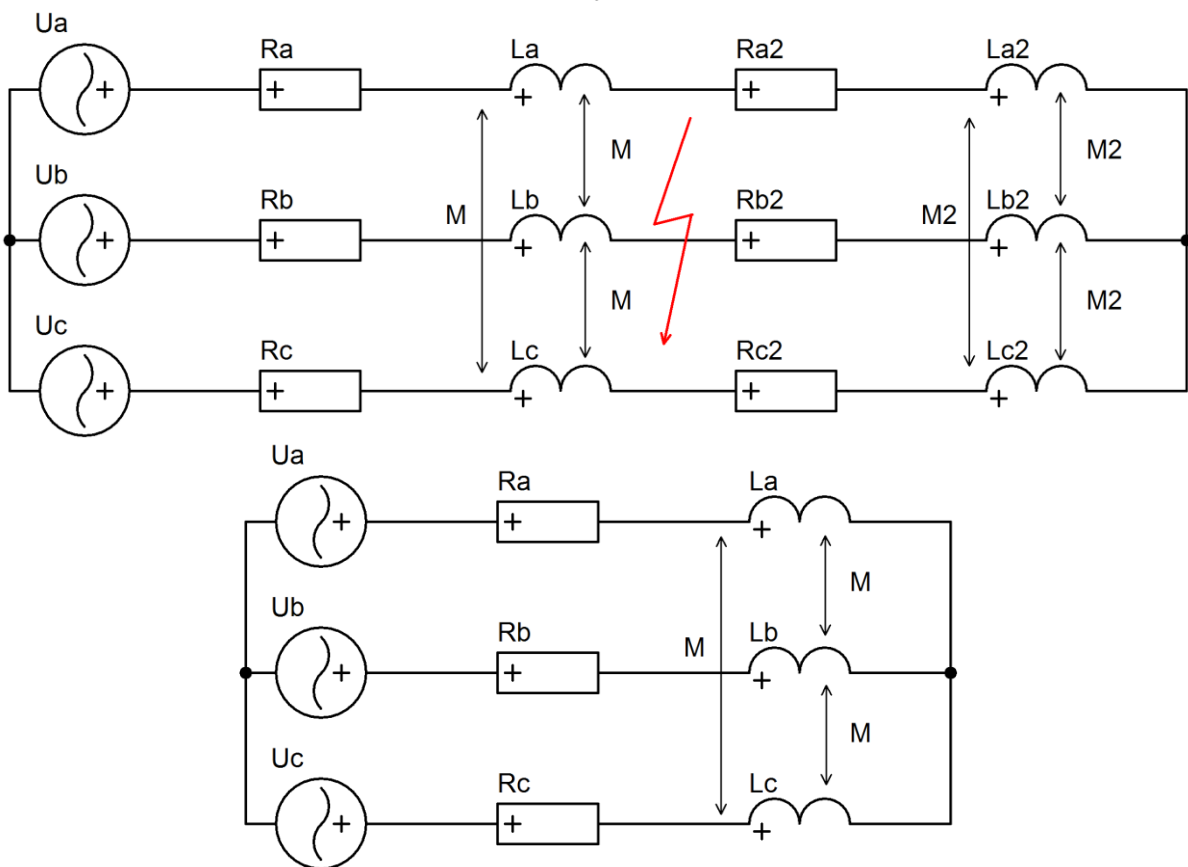
- Určení nadproudů (dynamické a tepelné účinky) a přepětí (narušení izolačních vlastností).
- Dopad na stabilitu lokálních systémů i celé ES.
- Vyhodnocení rušivých a nebezpečných vlivů.
- Dimenzování nových zařízení (např. vypínačů).
- Nastavení jisticích a dalších zabezpečovacích systémů (hladina reakce, vzájemná koordinace, selektivita, zálohování).

## Výpočet zkratového proudu

Uvažujeme zpočátku ideálně tvrdý zdroj a zcela symetrické uspořádání (řešení pouze pro jednu fázi).

Pro určení velikosti ustálené hodnoty se běžně zanedbávají příčné prvky (jejich impedance je obvykle vysoká a příslušné proudy zanedbatelné oproti zkratovému):

- Transformátor:  $z_K = u_K \approx 0.1 \ll \frac{1}{y_0} = \frac{1}{i_0} \approx \frac{1}{0.01} \approx 100$
- Vedení:  $Z_K \approx 0.4 \Omega / km \ll \frac{1}{Y_0} \approx \frac{1}{B_p} \approx \frac{1}{3 \cdot 10^{-6}} \left( \frac{1}{90 \cdot 10^{-6}} \right) \approx 10^4 \Omega / km$



$$u_A(t) = u_M \sin(\omega t + \alpha) = \sqrt{2} \cdot U \sin(\omega t + \alpha)$$

$$\text{Vzhledem k symetrii: } u_A(t) = R i_A(t) + L_V \frac{di_A(t)}{dt} + M \left( \frac{di_B(t)}{dt} + \frac{di_C(t)}{dt} \right)$$

$$\text{Protože } i_A(t) = -[i_B(t) + i_C(t)], \text{ potom } u_A = R i_A + L \frac{di_A}{dt}, \text{ kde } L = L_V - M$$

V předporuchovém stavu:

$$\bar{I}_{PP} = \frac{\bar{U}}{\bar{Z}_{PP}} \quad i_{PP}(t) = \frac{\sqrt{2} \cdot U}{\sqrt{R_{PP}^2 + (\omega L_{PP})^2}} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_{PP})$$

$$R_{PP} = R + R_2 \quad L_{PP} = L + L_2 \quad \varphi_{PP} = \arctg \frac{\omega L_{PP}}{R_{PP}} = \arctg \frac{X_{PP}}{R_{PP}}$$

Zkrat nastal v čase  $t = 0$ :

$$u_A(0) = u(0) = \sqrt{2} \cdot U \sin(\alpha) \quad i_{PP}(0) = \frac{\sqrt{2} \cdot U}{\sqrt{R_{PP}^2 + (\omega L_{PP})^2}} \sin(\alpha - \varphi_{PP})$$

Řešení časového průběhu zkratového proudu:

$$i_A(t) = i(t) = i_U(t) + i_V(t)$$

$i_U(t)$  - řešení partikulární – řešení odpovídající ustálenému stavu (složka ustálená)

$i_V(t)$  - řešení homogenní rovnice – řešení obvodu bez napětového buzení (složka „volná“)

$$\bar{I}_U = \frac{\bar{U}}{Z} \quad i_U(t) = \frac{\sqrt{2} \cdot U}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \sin(\omega t + \alpha - \varphi)$$

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{\omega L}{R} = \operatorname{arctg} \frac{X}{R}$$

$$0 = R i_V(t) + L \frac{di_V(t)}{dt} \quad i_V(t) = C \cdot e^{\lambda t} \quad 0 = R \cdot C \cdot e^{\lambda t} + \lambda \cdot L \cdot C \cdot e^{\lambda t}$$

$$\lambda = -\frac{R}{L} \quad \tau = -\frac{1}{\lambda} \quad i_V(t) = C \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Integrační konstantu  $C$  získáme pro podmínku spojitosti proudu:

$$i_{PP}(0) = i(0) \quad i_{PP}(0) = i_U(0) + i_V(0)$$

$$\frac{\sqrt{2} \cdot U}{\sqrt{R_{PP}^2 + (\omega L_{PP})^2}} \sin(\alpha - \varphi_{PP}) = \frac{\sqrt{2} \cdot U}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \sin(\alpha - \varphi) + C$$

$$C = \sqrt{2} \cdot U \left[ \frac{1}{\sqrt{R_{PP}^2 + (\omega L_{PP})^2}} \sin(\alpha - \varphi_{PP}) - \frac{1}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \sin(\alpha - \varphi) \right]$$

$$i_V(t) = \sqrt{2} \cdot U \left[ \frac{\sin(\alpha - \varphi_{PP})}{\sqrt{R_{PP}^2 + (\omega L_{PP})^2}} - \frac{\sin(\alpha - \varphi)}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \right] e^{-\frac{t}{\tau}}$$

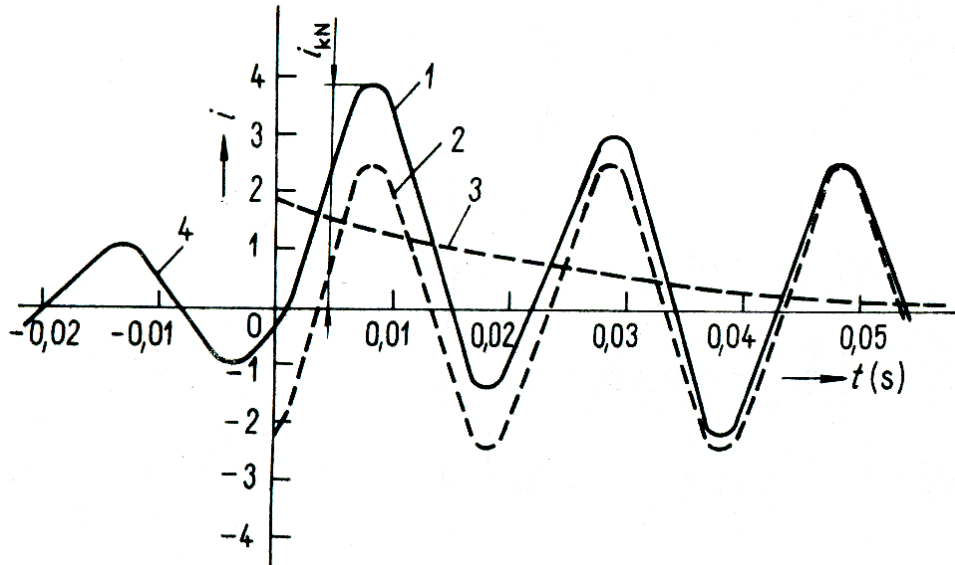
Celkový průběh zkratového proudu:

$$i(t) = \frac{\sqrt{2} \cdot U}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \sin(\omega t + \alpha - \varphi) + \sqrt{2} \cdot U \left[ \frac{\sin(\alpha - \varphi_{PP})}{\sqrt{R_{PP}^2 + (\omega L_{PP})^2}} - \frac{\sin(\alpha - \varphi)}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \right] e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$i(t) = \sqrt{2} \cdot U \left[ \left[ \frac{\sin(\alpha - \varphi_{PP})}{\sqrt{R_{PP}^2 + (\omega L_{PP})^2}} - \frac{\sin(\alpha - \varphi)}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \right] e^{-\frac{t}{\tau}} + \frac{1}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \sin(\omega t + \alpha - \varphi) \right]$$

V průběhu proudu jsou na obrázku:

1. Výsledný zkratový proud  $i(t)$
2. Ustálený zkratový proud  $i_U(t)$
3. Stejnoseměrná (volná) složka zkratového proudu  $i_V(t)$
4. Předporuchový proud  $i_{PP}(t)$



Ustálený zkratový proud v jednotlivých fázích je až na fázový posun stejný.

Počáteční hodnota stejnosměrné složky je závislá na okamžiku vzniku zkratu a nebude tedy stejná pro všechny fáze. Její největší absolutní hodnota je dosažena za podmínky dosažení maxima výrazu:

$$\frac{\sin(\alpha - \varphi_{PP})}{\sqrt{R_{PP}^2 + (\omega L_{PP})^2}} - \frac{\sin(\alpha - \varphi)}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}$$

Pro chod naprázdno a s předpokladem převážně induktivního charakteru impedance, přes

kterou se zkrat uzavírá je maxima dosaženo pro úhel  $\alpha = -\frac{\pi}{2} + \varphi \approx 0$ .

Naopak stejnosměrná složka se zcela nevyvine pokud  $\alpha = \varphi \approx \frac{\pi}{2}$ .

### Parametry průběhu zkratového proudu

Rázový (počáteční) proud  $I''_K$  - efektivní hodnota střídavé složky proudu na počátku:

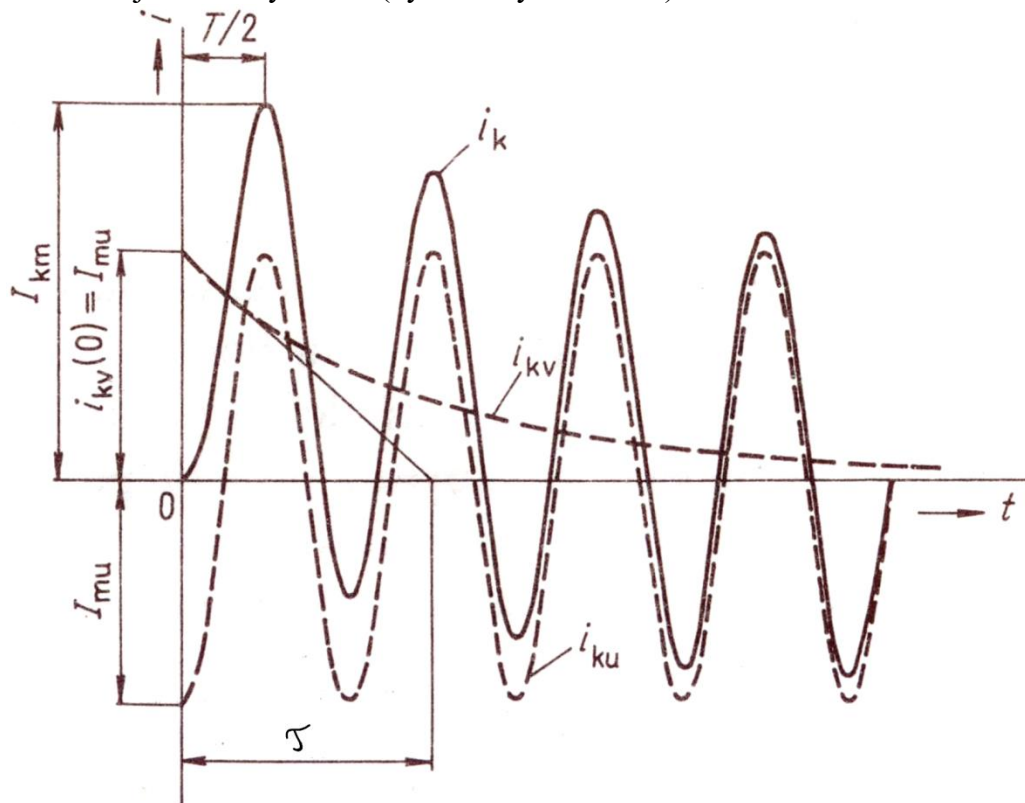
$$I''_K = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (\omega L)''^2}}$$

Nárazový zkratový proud (ekvivalentní dynamický)  $I_{KM}$  - největší okamžitá hodnota

$$\frac{\partial i(t)}{\partial t} = 0 \quad \frac{\partial i(t)}{\partial \alpha} = 0, \quad \text{což nastává přibližně pro } t = 0.01$$

$$I_{KM} = \frac{\sqrt{2} \cdot U}{\sqrt{R^2 + (\omega L)''^2}} \left(1 + e^{-\frac{0.01}{\tau}}\right) = \sqrt{2} \cdot I''_K \left(1 + e^{-\frac{0.01}{\tau}}\right) = \sqrt{2} \cdot I''_K \cdot K$$

$K = 1 + e^{-\frac{0.01}{\tau}}$  je nárazový činitel (dynamický součinitel)



Pro složité sítě by bylo nutné vyhodnocovat časové konstanty pro každý prvek náhradního schématu:

$$i_{VC}(t) = \sum_i i_{Vi}(0) e^{-\frac{t}{\tau_i}},$$

proto zjednodušeně určíme pouze časovou konstantu ekvivalentního zkratového obvodu:

$$i_{VC}(t) = i_V(0) e^{-\frac{t}{\tau_E}}, \text{ kde } \tau_E = \frac{L_E}{R_E}$$

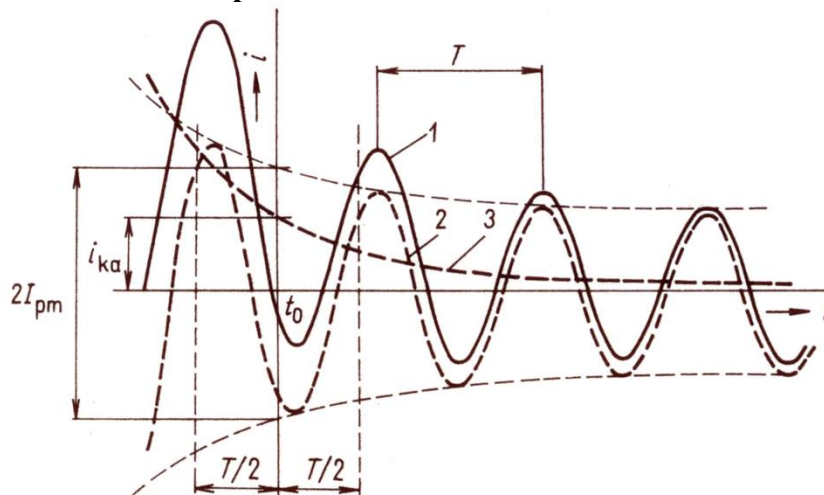
Pro orientační výpočty potom určíme  $\tau_E$  z odhadnutého koeficientu  $K$ :

$$K_E = 1 + e^{-\frac{0.01}{\tau_E}}, \text{ tedy } \tau_E = -\frac{0.01}{\ln(K_E - 1)}$$

Hodnoty nárazového činitele  $K_E$ :

	$K$	$\tau_E$
Za alternátory do 55 MW	1,95	0,194957
V soustavě vvn, zvn	1,7	0,028037
V soustavě vn	1,6	0,019576
V soustavě nn	1,4	0,010914
V kabelovém rozvodu nn	1,3	0,008306
Za transformátory		
vvn/vn nebo vn-nn	1,7	0,028037
vn/nn do 1600 kVA včetně	1,6	0,019576
vn/nn do 630 kVA včetně	1,5	0,014427
vn/nn do 250kVA včetně	1,3	0,008306

**Efektivní hodnota zkratového proudu  $I_K$**



Efektivní hodnota střídavé složky:

$$I_K(t_0) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0-T/2}^{t_0+T/2} i(t)^2 dt} \quad I_{kp}(t_0) = \frac{I_{pm}(t_0)}{\sqrt{2}} \approx I''_K$$

$$I_{ka}(t_0) = i_V(t_0) \quad \text{tedy } I_K(t_0) = \sqrt{I_{kp}(t_0)^2 + I_{ka}(t_0)^2}$$

Příslušnou hodnotu stejnosměrné složky lze odhadnout pro čas 0.01 na základě znalosti koeficientu  $K$ :

$$i_V(0.01) = \sqrt{2} I''_K (K - 1)$$

$$I_K(0.01) \approx \sqrt{I''_K{}^2 + I_{ka}(0.01)^2} = \sqrt{I''_K{}^2 + (i_V(0.01))^2} = I''_K \sqrt{1 + 2(K - 1)^2}$$

**Ekvivalentní oteplovací proud  $I_{KE}$**

$$R \cdot I_{KE}^2 \cdot t_K = R \int_0^{t_K} i(t)^2 dt \quad I_{KE} = \sqrt{\frac{1}{t_K} \int_0^{t_K} i(t)^2 dt}$$

$$I_{KE} = K_E \cdot I''_K$$

$$K_E = f(t_K, \tau)$$

Hodnoty činitele  $K_E$ :

Místo zkratu	$t_K = 0,05$	0,1	0,5	1	3
Na svorkách alternátoru > 55 MW	2,76	2,07	1,29	1,15	1,05
Na svorkách alternátoru < 55 MW	2,05	1,61	1,15	1,08	1,03
Soustava vvn, zvn	1,25	1,13	1,03	1,01	1
vn	1,18	1,09	1,02	1,01	1
nn	1,1	1,05	1,01	1	1
nn (kabelové sítě)	1,08	1,04	1,01	1	1

**Zkratový výkon (fiktivní)  $S''_K$**

$$S''_K = \sqrt{3} \cdot U_{SN} \cdot I''_K$$