

## Stabilita jednoduchých přenosů

Propojené soustavy v synchronním chodu (stejná frekvence), když činný výkon  $<$  mezní hodnota, jinak vypadnutí ze synchronismu (narušení stabilního paralelního chodu).

Statická stabilita – schopnost soustavy udržet se v synchronním chodu při pomalých změnách.

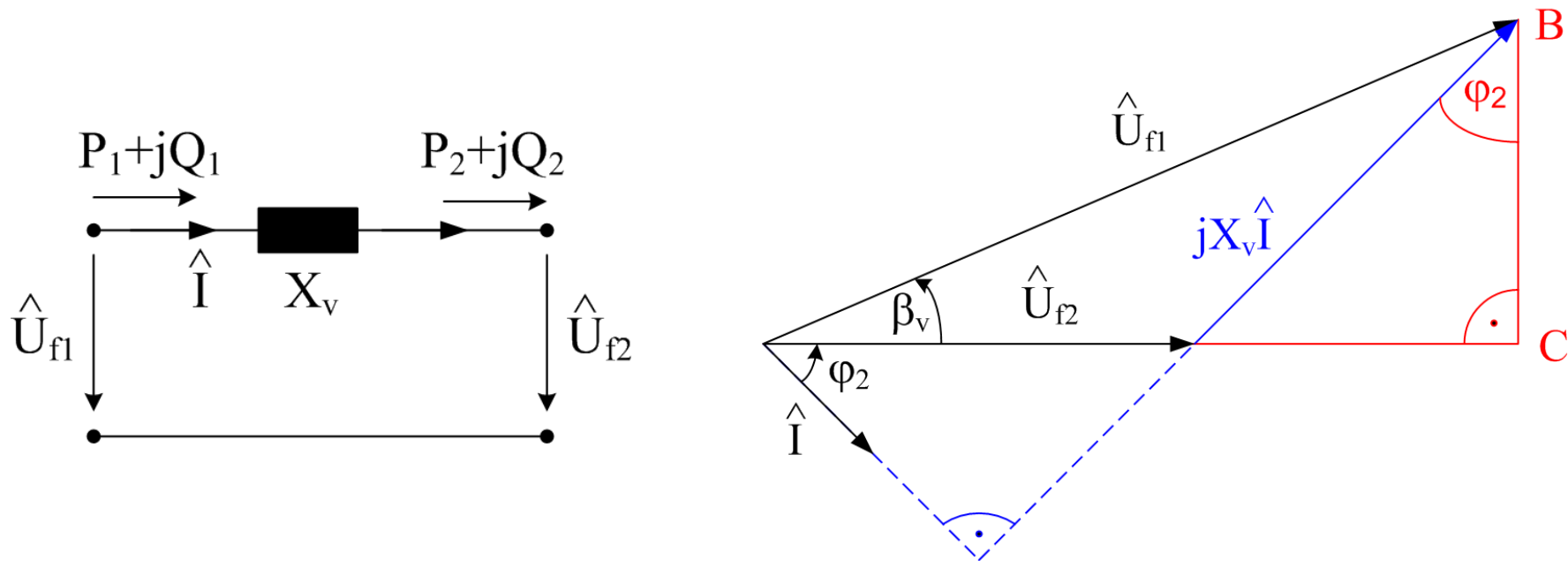
Dynamická stabilita – schopnost udržet se v synchronním chodu i při náhlých velkých změnách (zatížení, parametrů ES). Elektromechanické přechodné děje  $\rightarrow$  mít dostatečnou rezervu výkonu při statickém chodu.

Význam: udržení spolupráce zdrojů a soustav, omezuje délku AC vedení

## Základní vztahy

Předpoklad: uvažovány jen podélné reaktance

Úhel přenosu (zátěžný úhel)  $\beta_v$  – mezi fázory napětí na obou koncích přenosu



Odebíraný činný a jalový výkon (jednofázově)

$$P_f = U_{f2} I \cos \varphi_2$$

$$Q_f = U_{f2} I \sin \varphi_2$$

$$\overline{BC} \sim X_v I \cos \varphi_2 = U_{f1} \sin \beta_v$$

$$I \cos \varphi_2 = \frac{U_{f1}}{X_v} \sin \beta_v$$

Výkonová rovnice přenosu

$$P_f = \frac{U_{f1} U_{f2}}{X_v} \sin \beta_v$$


---

$0^\circ \div 90^\circ$  stabilní oblast

$90^\circ \div 180^\circ$  nestabilní oblast

$\beta_v = 90^\circ$  mez statické stability

$$P_{f \max} = \frac{U_{f1} U_{f2}}{X_v}$$

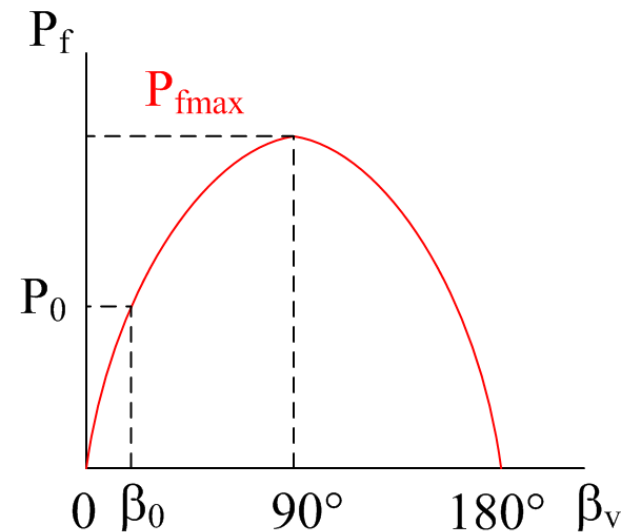
Kromě vedení i reaktance generátorů, transformátorů,.. → větší zátěžný úhel. Největší vliv (X) mají generátory.

$$X_v I \sin \varphi_2 + U_{f2} = U_{f1} \cos \beta_v$$

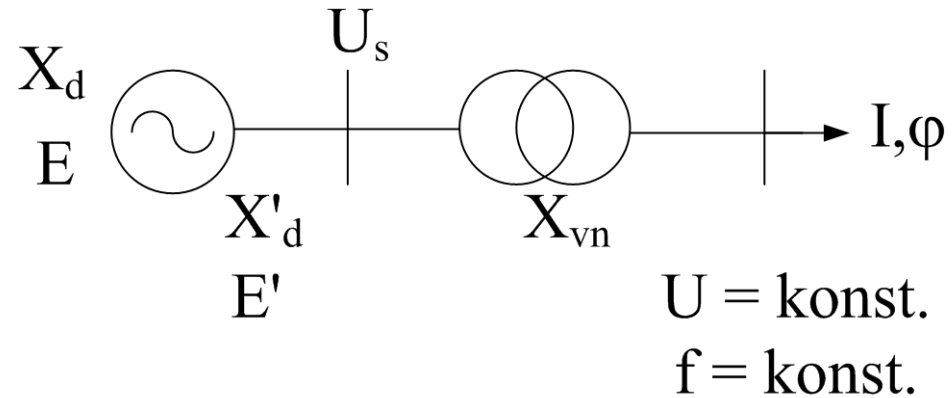
$$I \sin \varphi_2 = \frac{U_{f1} \cos \beta_v}{X_v} - \frac{U_{f2}}{X_v}$$

$$Q_f = \frac{U_{f1} U_{f2} \cos \beta_v}{X_v} - \frac{U_{f2}^2}{X_v}$$


---



## Turboalternátor pracující do „tvrdé“ sítě



$$X_{dc} = X_d + X_{vn}$$

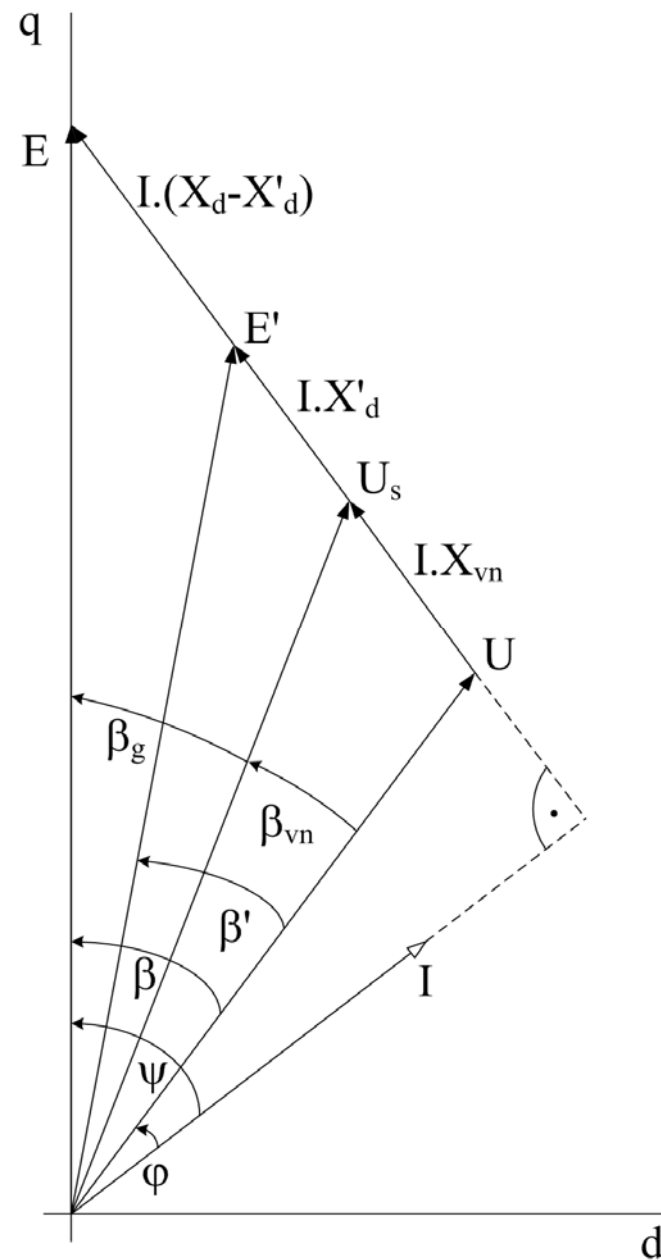
### Vnitřní výkon alternátoru

$$P = \frac{E \cdot U}{X_{dc}} \sin \beta$$

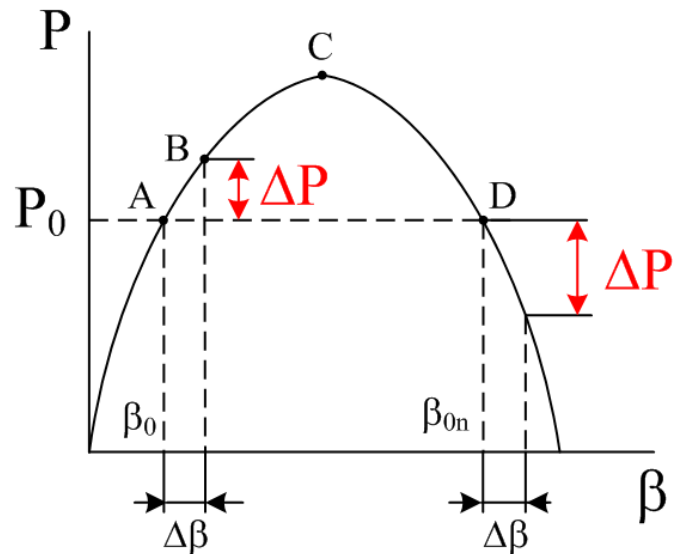
$$Q_i = \frac{E^2}{X_{dc}} - \frac{E \cdot U}{X_{dc}} \cos \beta$$

Platí pro tvrdou síť ( $f$ ,  $U = \text{konst.}$ ,  $X = 0$ ),  
konstantní buzení ( $E$ ), hladký rotor  
(turboalternátor).

Stabilitu ovlivňuje přenášený výkon ( $P$ ), buzení  
( $E$ ), konfigurace přenosu ( $X$ ).  
→ podélná kompenzace ( $C$ ), přibuzování



## Statická stabilita soustavy



### Stabilní stav

$$P_0 = P_m$$

(elektrický stroje = mechanický turbíny, beze ztrát)

$\omega_0 = \text{konst.}$  (sít' i stroj)

Mech. výkon turbíny konstantní – nezávisí na  $\beta$ , ale na  $\omega$  (regulace P-f).

Bod A: urychlení rotoru  $\rightarrow \Delta\beta \rightarrow (P_0 + \Delta P) \rightarrow P_{el} > P_{mech} \rightarrow$  zpomalení rotoru  $\rightarrow$  ustálení  $\rightarrow$  bod A staticky stabilní

Bod D: urychlení rotoru  $\rightarrow \Delta\beta \rightarrow (P_0 - \Delta P) \rightarrow P_{el} < P_{mech} \rightarrow$  urychlení rotoru  $\rightarrow$  ztráta synchronismu  $\rightarrow$  bod D staticky nestabilní

Synchronizační výkon

$$P_c = \frac{dP}{d\beta} = \frac{E \cdot U}{X_{dc}} \cos \beta$$

Stabilní oblast

$$P_c > 0$$

Mez statické stability

$$P_c = 0$$

Činitel rezervy výkonu (běžně nad 20%)

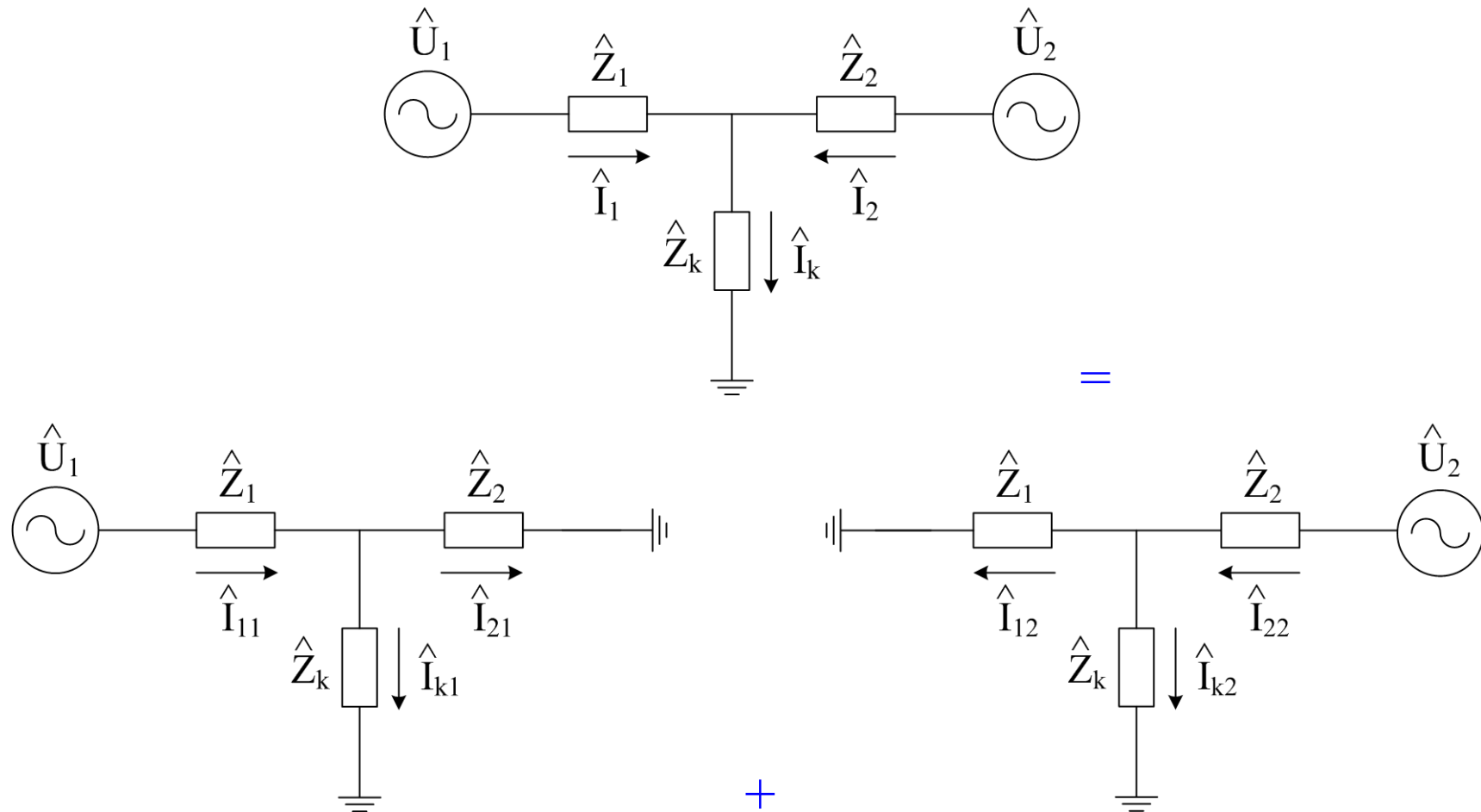
$$k_P = \frac{P_m - P_0}{P_0}$$

Pozn.: Více strojů → sledovat P křivku každého stroje



# Dvojitrojový problém s meziodběrem (poruchou)

## Superpozice



$$\hat{\mathbf{I}}_1 = \hat{\mathbf{I}}_{11} - \hat{\mathbf{I}}_{12} \quad \hat{\mathbf{I}}_2 = \hat{\mathbf{I}}_{22} - \hat{\mathbf{I}}_{21} \quad \hat{\mathbf{I}}_k = \hat{\mathbf{I}}_{k1} + \hat{\mathbf{I}}_{k2}$$

$$\hat{\mathbf{I}}_{11} = \frac{\hat{\mathbf{U}}_1}{\hat{\mathbf{Z}}_{11}} \quad \hat{\mathbf{I}}_{22} = \frac{\hat{\mathbf{U}}_2}{\hat{\mathbf{Z}}_{22}} \quad \hat{\mathbf{I}}_{12} = \frac{\hat{\mathbf{U}}_2}{\hat{\mathbf{Z}}_{12}} \quad \hat{\mathbf{I}}_{21} = \frac{\hat{\mathbf{U}}_1}{\hat{\mathbf{Z}}_{21}}$$

$$\hat{\mathbf{Z}}_{11} = \hat{\mathbf{Z}}_1 + \frac{\hat{\mathbf{Z}}_2 \hat{\mathbf{Z}}_k}{\hat{\mathbf{Z}}_2 + \hat{\mathbf{Z}}_k}$$

$$\hat{\mathbf{Z}}_{22} = \hat{\mathbf{Z}}_2 + \frac{\hat{\mathbf{Z}}_1 \hat{\mathbf{Z}}_k}{\hat{\mathbf{Z}}_1 + \hat{\mathbf{Z}}_k}$$

$$\hat{\mathbf{Z}}_{12} = \hat{\mathbf{Z}}_{21} = \hat{\mathbf{Z}}_1 + \hat{\mathbf{Z}}_2 + \frac{\hat{\mathbf{Z}}_1 \hat{\mathbf{Z}}_2}{\hat{\mathbf{Z}}_k}$$

$$\hat{S}_1 = \hat{U}_1 \hat{I}_1^* = \frac{U_1^2}{\hat{Z}_{11}^*} - \frac{\hat{U}_1 \hat{U}_2^*}{\hat{Z}_{12}^*}$$

$$\hat{S}_1 = \frac{U_1^2}{\hat{Z}_{11}^*} - \frac{U_1 U_2}{\hat{Z}_{12}^*} e^{j\beta}$$

$$P_1 = \text{Re}\{\hat{S}_1\} \quad Q_1 = \text{Im}\{\hat{S}_1\}$$

Pro R=0:

$$\hat{S}_1 = \frac{U_1^2}{-jX_{11}} - \frac{U_1 U_2}{-jX_{12}} (\cos \beta + j \sin \beta)$$

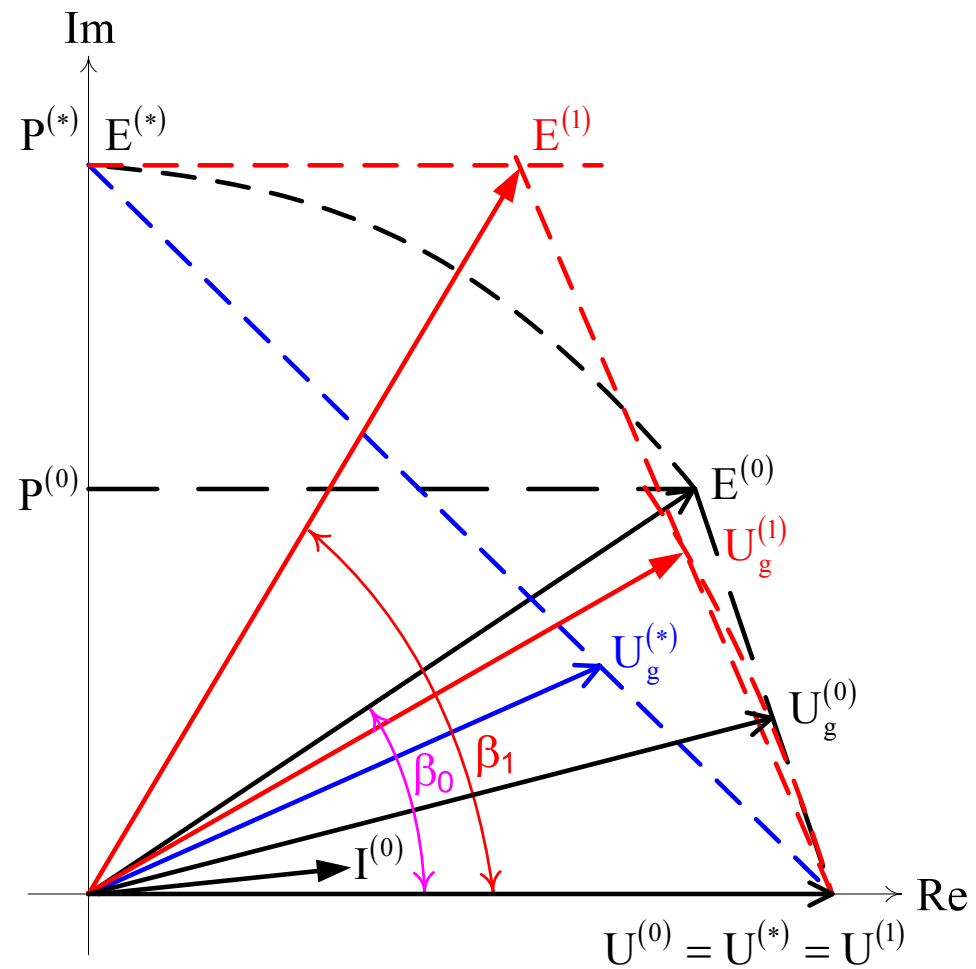
$$P_1 = \frac{U_1 U_2}{X_{12}} \sin \beta$$

---

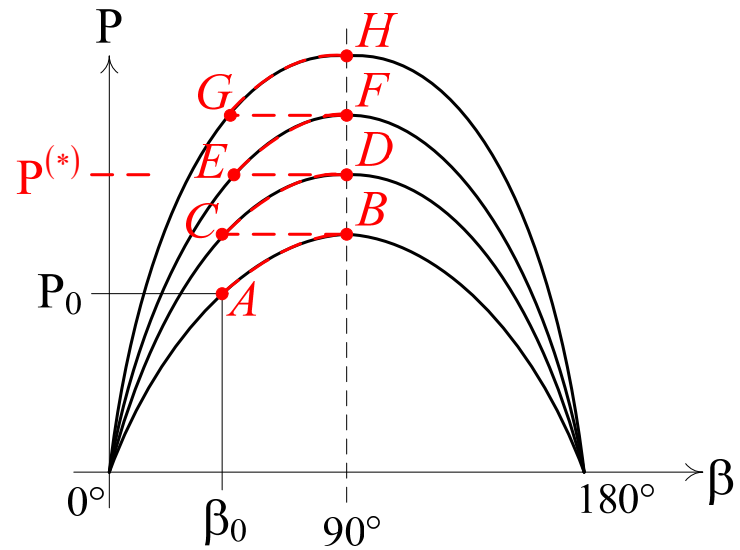

$$Q_1 = \frac{U_1^2}{X_{11}} - \frac{U_1 U_2}{X_{12}} \cos \beta$$

## Regulace buzení

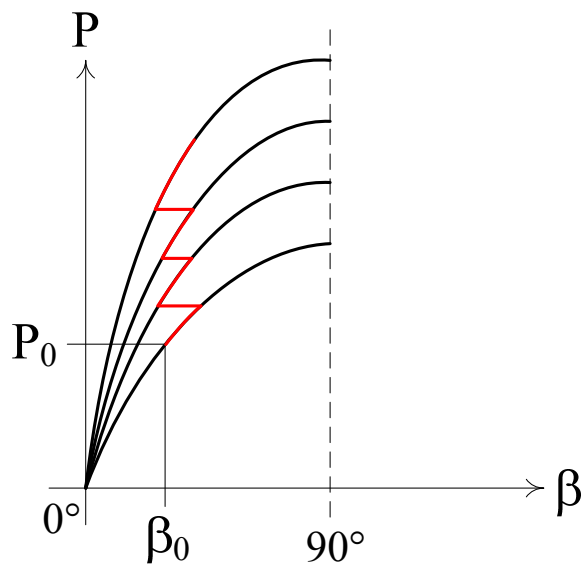
$$P = \frac{E \cdot U}{X_{dc}} \sin \beta = k \cdot E \cdot \sin \beta$$



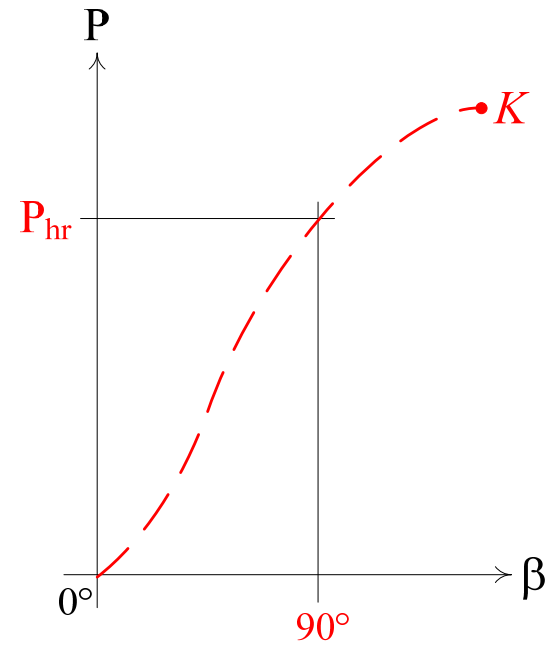
vnější char. ( $U_g = \text{konst.}$ ) →



→



→



## Stroj s vyniklými póly

$$I \cdot X_q \cdot \cos \varphi = E_q \cdot \sin \beta$$

$$E_q = E - I_d \cdot (X_d - X_q)$$

$$I_d \cdot X_d = E - U_g \cos \beta$$

### Úpravy

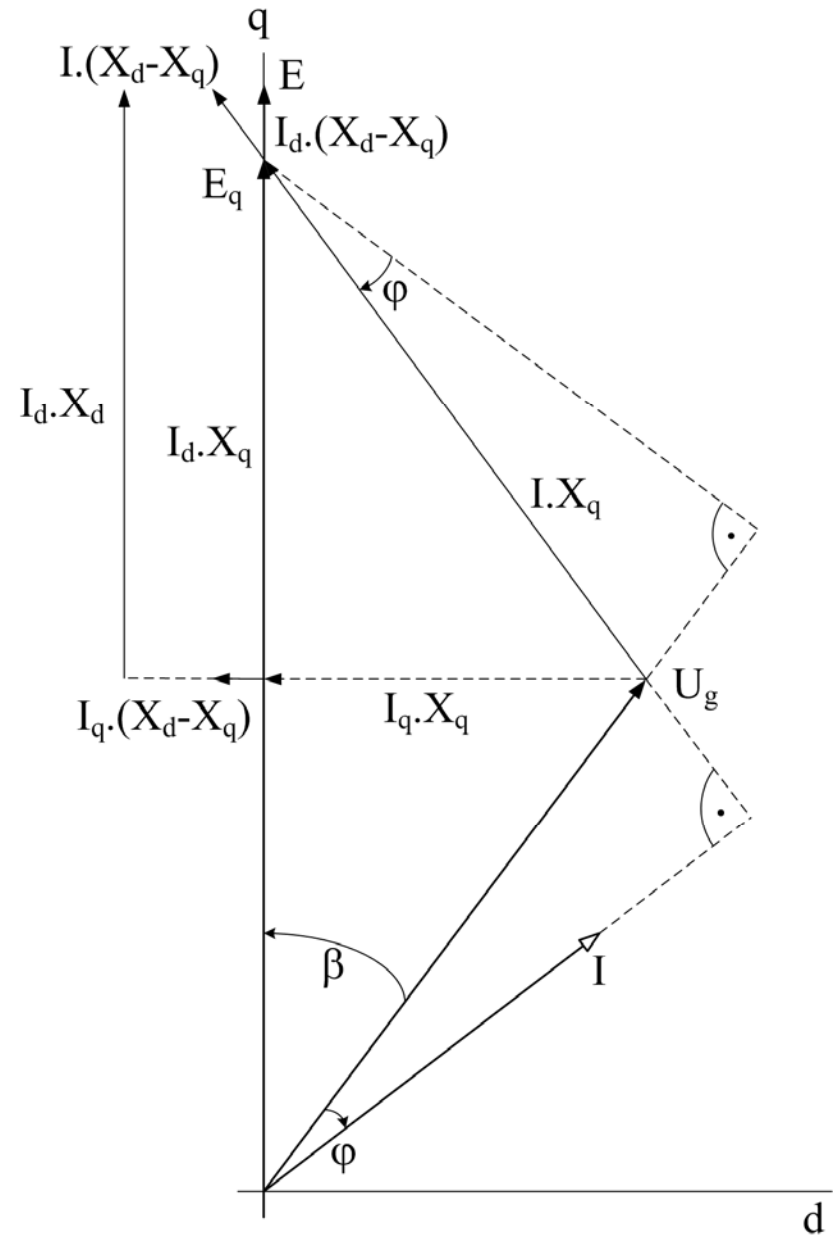
$$I_d = \frac{E}{X_d} - \frac{U_g}{X_d} \cos \beta$$

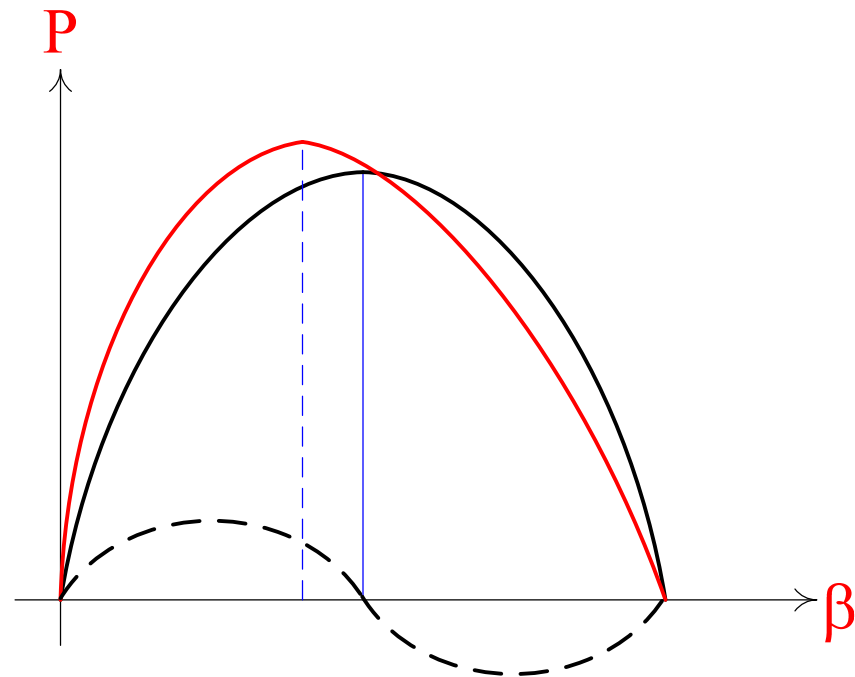
$$E_q = E \cdot \frac{X_q}{X_d} + U_g \cos \beta \cdot \frac{X_d - X_q}{X_d}$$

### Výkon generátoru

$$P = U_g \cdot I \cdot \cos \varphi$$

$$P = \frac{E \cdot U_g}{X_d} \sin \beta + \frac{U_g^2}{2} \cdot \frac{X_d - X_q}{X_d X_q} \sin 2\beta$$





Stroj do sítě přes sériové impedance

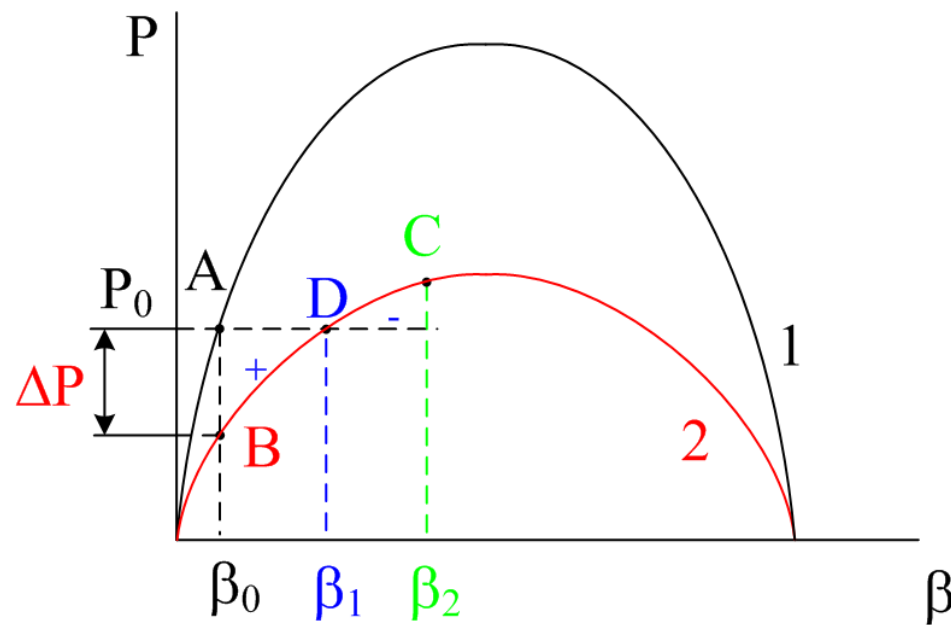
$$P = \frac{E \cdot U_g}{X_d + X_{vn}} \sin \beta + \frac{U_g^2}{2} \cdot \frac{X_d - X_q}{(X_d + X_{vn})(X_q + X_{vn})} \sin 2\beta$$

## Dynamická stabilita soustavy

Změny parametrů v soustavě → nárazové změny výkonu → možnost ztráty stability.

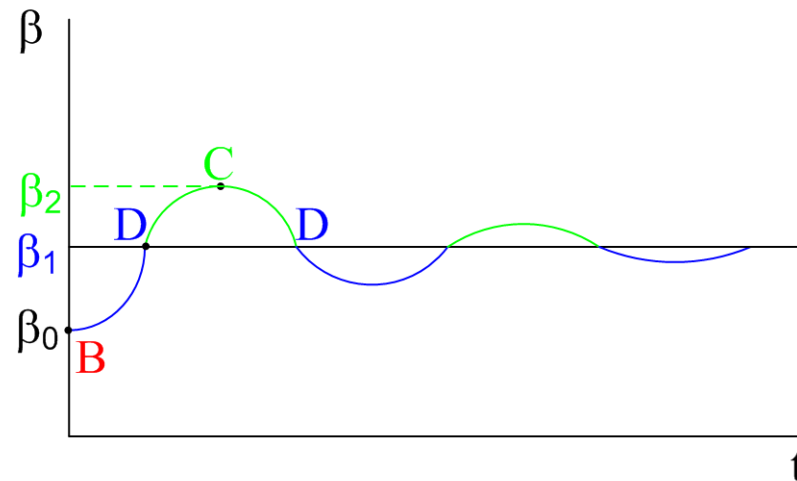


$$X_2 > X_1$$





- před změnou bod A
- setrvačnost  $\rightarrow \beta_0$  se nemění skokem  $\rightarrow$  výkon generátoru poklesne o  $\Delta P$
- $P_m - P_{el} =$  urychlující výkon
- v bodě D  $\omega > \omega_0 \rightarrow \beta$  roste až do bodu C, postupné brždění
- ustálení po několika kyvech v bodě D (perioda několik sekund)



Kdyby bod C příliš daleko ( $\Delta P$  urychlující)  $\rightarrow$  ztráta synchronismu.

Stanovení průběhu  $\beta = f(t)$

Pohybová rovnice

$$W_k = \frac{1}{2} J \omega^2$$

$$P_a = P_m - P_e = \frac{dW_k}{dt} = \frac{1}{2} J 2\omega \frac{d\omega}{dt}$$

$P_a > 0$  - urychlující výkon

$P_a < 0$  - brzdňný výkon

Rovnice kývání

$$P_m - \frac{E \cdot U}{X_{dc}} \sin \beta(t) = J \omega(t) \frac{d\omega(t)}{dt}$$

$$\omega(t) = \omega_0 + \frac{d\beta(t)}{dt}$$

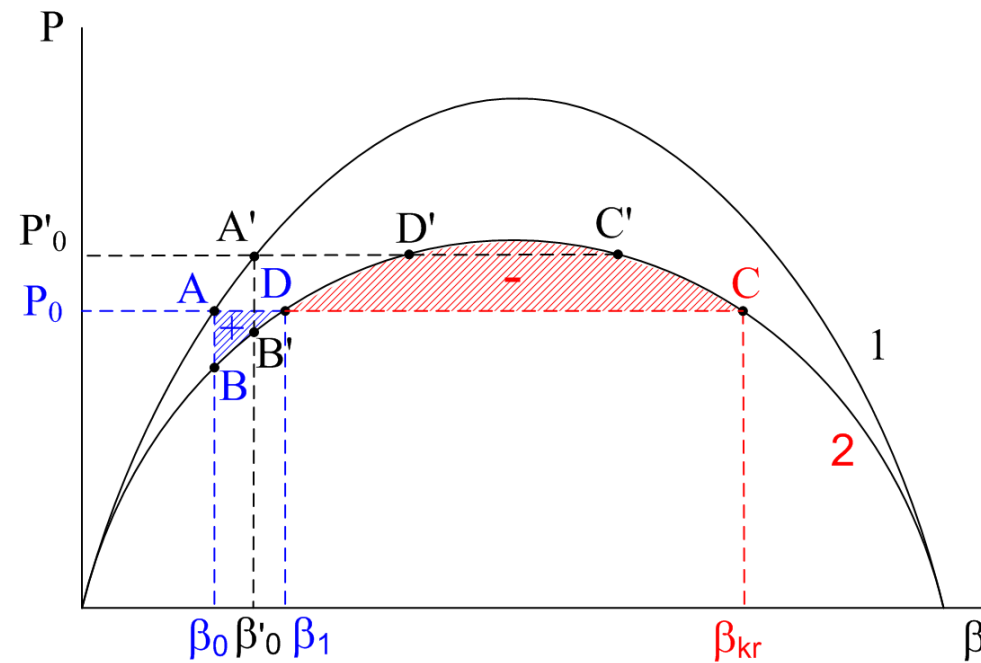
$$\beta(0) = \beta_0 ; \omega(0) = \omega_0$$

## Moment setrvačnosti z doby rozběhu

$$P = M\omega = J\varepsilon\omega \cong J \frac{\Delta\omega}{\Delta t} \omega = \frac{J\omega^2}{T}$$

$$J = \frac{T_m P_n}{\omega_0^2}$$

## Metoda stejných ploch



Urychlující práce (plocha +)

$$A_a = \int_{\beta_0}^{\beta_1} (P_0 - P_{el}) d\beta$$

Brzdná práce (plocha -)

$$A_r = \int_{\beta_1}^{\beta_{kr}} (P_{el} - P_0) d\beta$$

Pro udržení v synchronismu

$$A_a \leq A_r$$

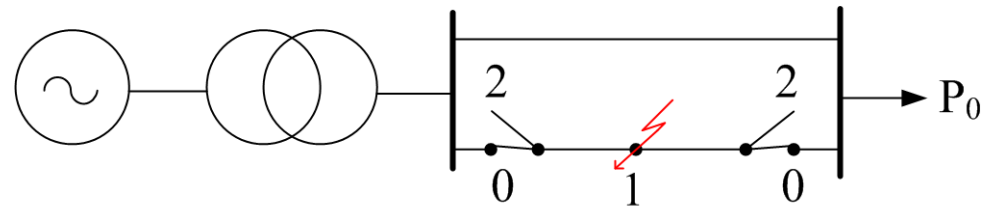
Dynamická stabilita

- mez při  $A_a = A_r$ , není pevná mez úhlu
- při kývnutí může být i  $\beta > 90^\circ$

## Opětné zapínání (OZ)

Při poruše krátké vypnutí a po chvíli opětne zapnutí postiženého úseku.

- zmizela přechodná porucha → provoz
- porucha trvá → definitivní odpojení



$A_0$  počáteční stav  
 $A_1 - B_1$  zkrat  
 $B_1$  odepnutí zkratu  
 $B_2 - C_2$  odpojené vedení  
 $C_2$  OZ (úspěšné)  
 $C_3 - D_3$  dokývnutí na původní charakteristice

Čas vypnutí OZ  $\sim$  mezi úhly  $\beta_1$  a  $\beta_2$   
 (kompromis mezi stabilitou a  
 hořením oblouku).

