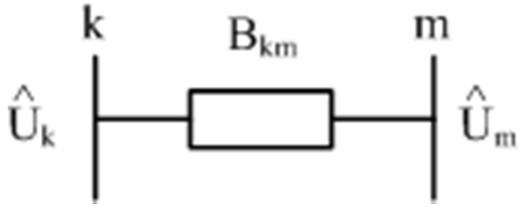
Systémy FACTS a HVDC v elektroenergetice (2)

Modely FACTS

- **Admitanční (impedanční) modely**
  - **SVC, TCSC**
  - **B (α)**
- **Napěťové (proudové) zdroje**
  - **SSSC, STATCOM, UPFC**
- **Admitanční matice**
  - **PST**
- **Vstřikovací modely**
  - **uzly PQ, PU**
  - **univerzální model**

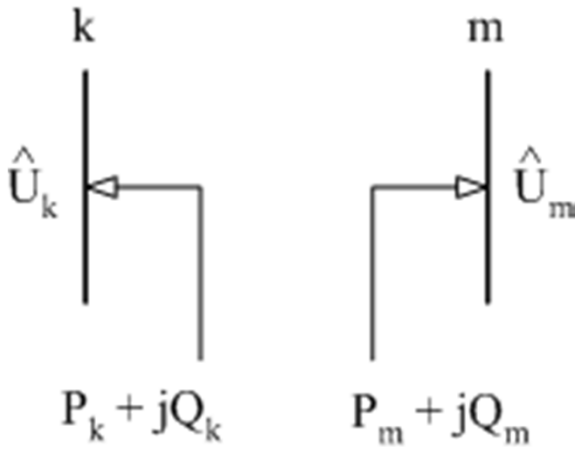


$$P_k = U_k U_m B_{km} \sin\delta_{km}$$

$$P_m = -P_k$$

$$Q_k = U_k^2 B_{km} - U_k U_m B_{km} \cos\delta_{km}$$

$$Q_m = U_m^2 B_{km} - U_k U_m B_{km} \cos\delta_{mk}$$

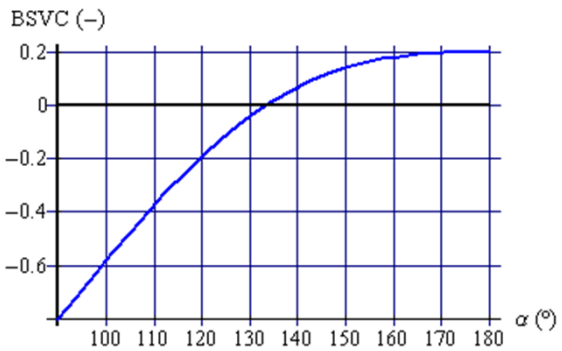


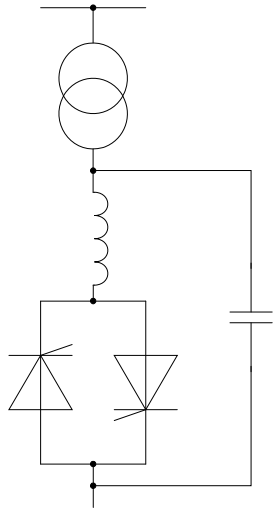
Model SVC

- **Řídicí veličina B (a)**
- **Admitanční modely**

$$\omega L < \frac{1}{\omega C} \approx |B_L| > B_C$$

$$B_{SVC}(\alpha) = B_L \frac{2\pi - 2\alpha + \sin 2\alpha}{\pi} + B_C$$



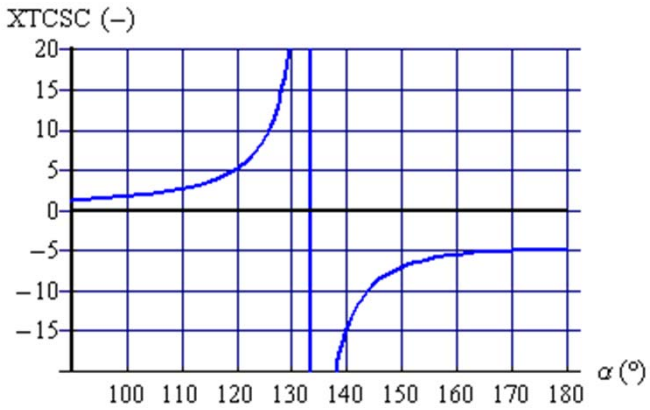


$$Q_k = U_k^2 \cdot B_{SVC}(\alpha) = U_k^2 \cdot \left(B_L \frac{2\pi - 2\alpha + \sin 2\alpha}{\pi} + B_C \right)$$

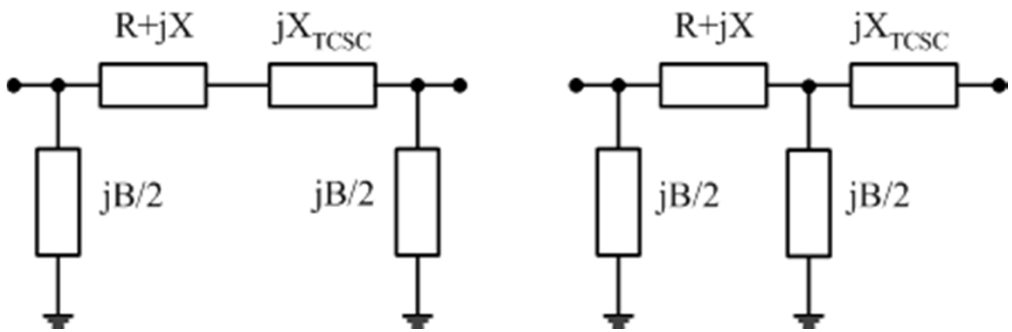
$$P_k = 0$$

- **Vstřikovací modely**
  - **regulace Q → PQ uzel, U z řešení → B → a**
  - **regulace U → PU uzel, Q z řešení → B → a**
    - **omezeno rozsahem B**

Model TCSC

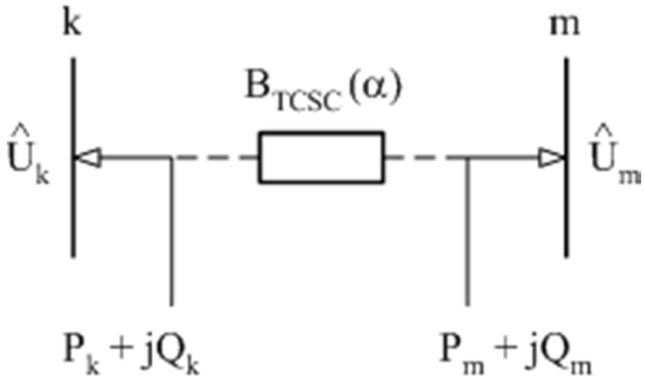


- **Řídicí veličina B (a)**
- **Admitanční modely**
  - **2 možnosti umístění (jednodušší x přesnější)**



$$\alpha_{res} - \Delta\alpha > \alpha > \alpha_{res} + \Delta\alpha$$

- **Vstřikovací modely**



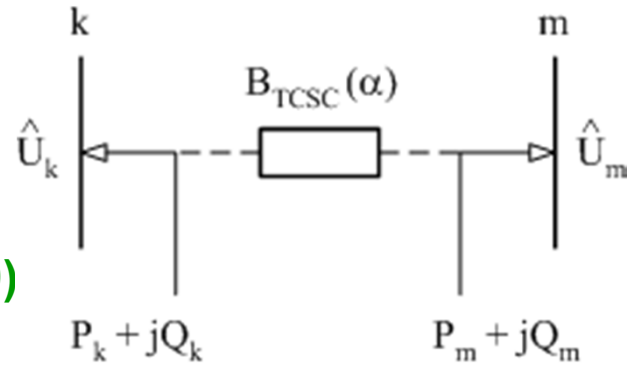
$$P_k = U_k U_m \left(B_L \frac{2\pi - 2\alpha + \sin 2\alpha}{\pi} + B_C \right) \sin \delta_{km}$$

$$P_m = -P_k$$

$$Q_k = \left(B_L \frac{2\pi - 2\alpha + \sin 2\alpha}{\pi} + B_C \right) \left(U_k^2 - U_k U_m \cos \delta_{km} \right)$$

$$Q_m = \left(B_L \frac{2\pi - 2\alpha + \sin 2\alpha}{\pi} + B_C \right) \left(U_m^2 - U_k U_m \cos \delta_{mk} \right)$$

Model TCSC

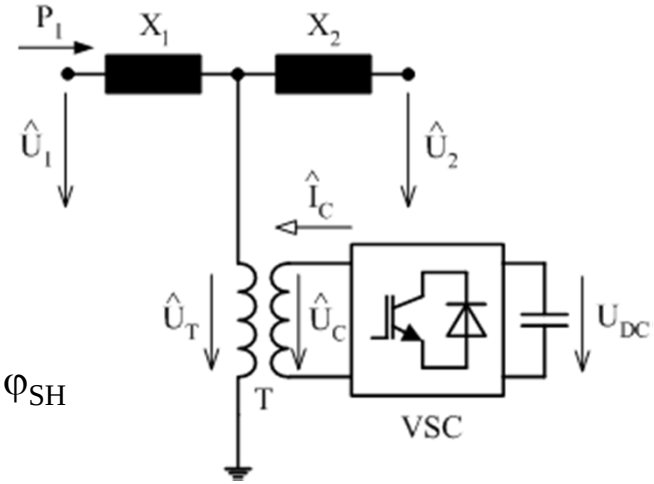


- **Newton-Raphson load flow**
  - **X_{TCSC} známá → přibude 1 větev a 1 uzel PQ (P = 0, Q = 0)**
  - **regulace toku P**
    - **přibude jedna neznámá (X_{TCSC}) a jedna požadovaná (P_{km}) veličina**
    - **rozšíření řádu Jakobiho matice o 1**

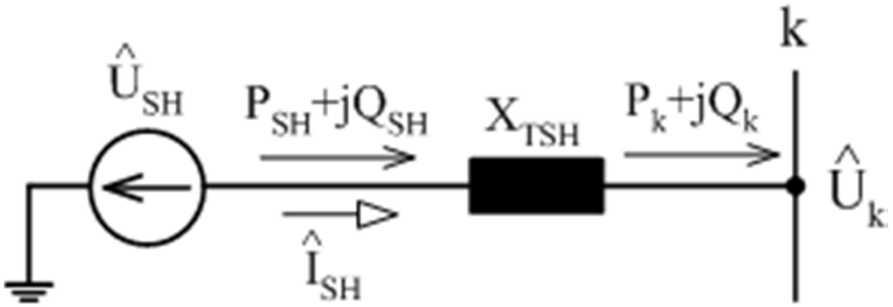
$$P_{km} = \frac{U_k U_m \sin(\varphi_k - \varphi_m)}{X_{TCSC}}$$

$$\begin{pmatrix} \Delta P_k \\ \Delta P_m \\ \Delta Q_k \\ \Delta Q_m \\ \Delta P_{km} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial P_k}{\partial \varphi_k} & \frac{\partial P_k}{\partial \varphi_m} & \frac{\partial P_k}{\partial U_k} & \frac{\partial P_k}{\partial U_m} & \frac{\partial P_k}{\partial X_{TCSC}} \\ \frac{\partial P_m}{\partial \varphi_k} & \frac{\partial P_m}{\partial \varphi_m} & \frac{\partial P_m}{\partial U_k} & \frac{\partial P_m}{\partial U_m} & \frac{\partial P_m}{\partial X_{TCSC}} \\ \frac{\partial Q_k}{\partial \varphi_k} & \frac{\partial Q_k}{\partial \varphi_m} & \frac{\partial Q_k}{\partial U_k} & \frac{\partial Q_k}{\partial U_m} & \frac{\partial Q_k}{\partial X_{TCSC}} \\ \frac{\partial Q_m}{\partial \varphi_k} & \frac{\partial Q_m}{\partial \varphi_m} & \frac{\partial Q_m}{\partial U_k} & \frac{\partial Q_m}{\partial U_m} & \frac{\partial Q_m}{\partial X_{TCSC}} \\ \frac{\partial P_{km}}{\partial \varphi_k} & \frac{\partial P_{km}}{\partial \varphi_m} & \frac{\partial P_{km}}{\partial U_k} & \frac{\partial P_{km}}{\partial U_m} & \frac{\partial P_{km}}{\partial X_{TCSC}} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \Delta \varphi_k \\ \Delta \varphi_m \\ \Delta U_k \\ \Delta U_m \\ \Delta X_{TCSC} \end{pmatrix}$$

Model STATCOM



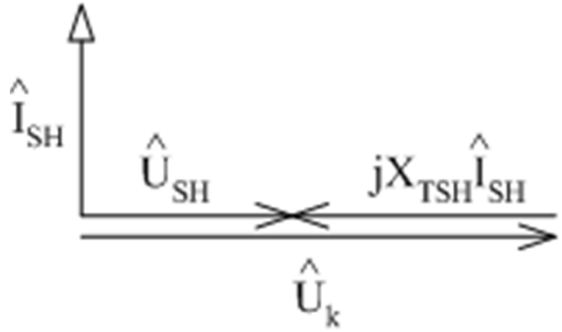
- **Napěťový zdroj přes reaktanci TRF**



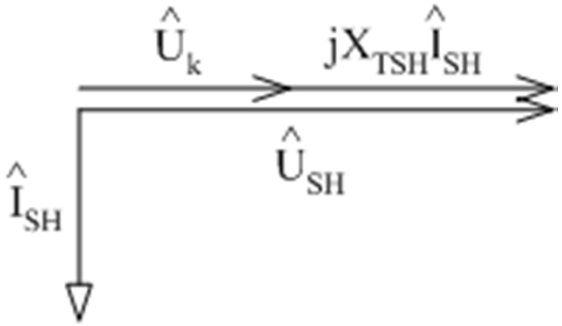
$$\hat{U}_{SH} = U_{SH} \cdot e^{j\varphi_{SH}}$$

$$Q_k = \frac{U_k U_{SH}}{X_{TSH}} \cos\delta_{km} - \frac{U_k^2}{X_{TSH}}$$

- **Jen dodávka (odběr) Q přes X_{TRF}**
  - **d_{km} = 0, cos d_{km} = 1**
  - **při $U_{SH} > U_k$ je $Q_k > 0$ (C mód)**
  - **maximum U_{SH} dáno dimenzováním**
  - **1 stupeň volnosti (U_{SH})**
  - **j_{SH} svázán s j_k**

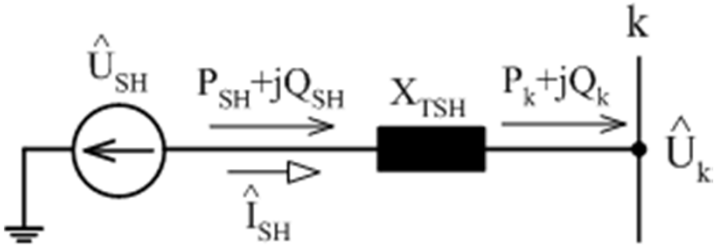


Q ze sítě ($Q_k < 0$), P = 0
STATCOM v L módu



Q do sítě ($Q_k > 0$), P = 0
STATCOM v C módu

Model STATCOM



- **Newton-Raphson load flow**
  - **uzlový výkon**

$$\hat{S}_k = \hat{U}_k \hat{I}_{SH}^* = \hat{U}_k \left(G_{TSH} - jB_{TSH}\right)\left(\hat{U}_{SH}^* - \hat{U}_k^*\right)$$

$$P_k = -U_k^2 G_{TSH} + U_k U_{SH}[G_{TSH}\cos(\varphi_k - \varphi_{SH}) + B_{TSH}\sin(\varphi_k - \varphi_{SH})]$$

$$Q_k = U_k^2 B_{TSH} + U_k U_{SH}[G_{TSH}\sin(\varphi_k - \varphi_{SH}) - B_{TSH}\cos(\varphi_k - \varphi_{SH})]$$

  - **TRF jen X, P = 0 ($j_{SH} = j_k$)**

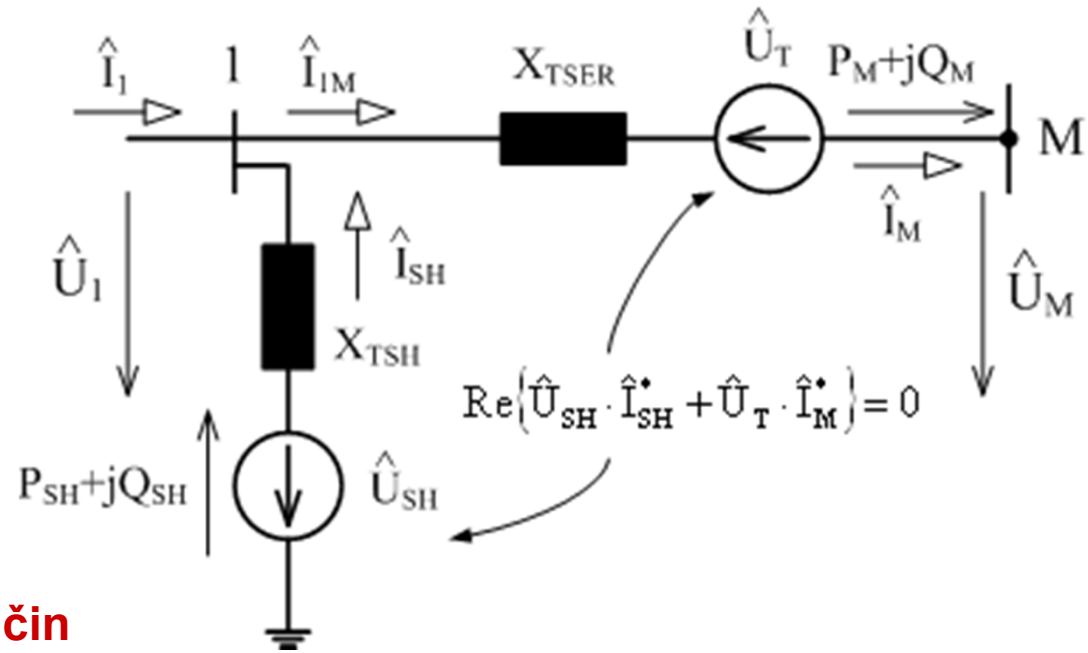
$$P_k = 0$$

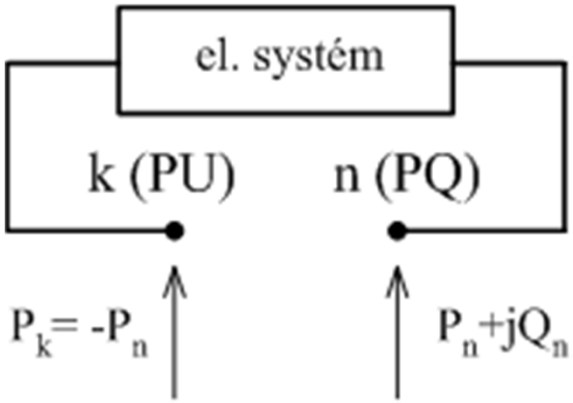
$$Q_k = U_k^2 B_{TSH} - U_k U_{SH} B_{TSH}$$

  - **regulace Q → PQ uzel, U z řešení → U_{SH}**
  - **regulace U → PU uzel, Q z řešení → U_{SH}**

Model UPFC

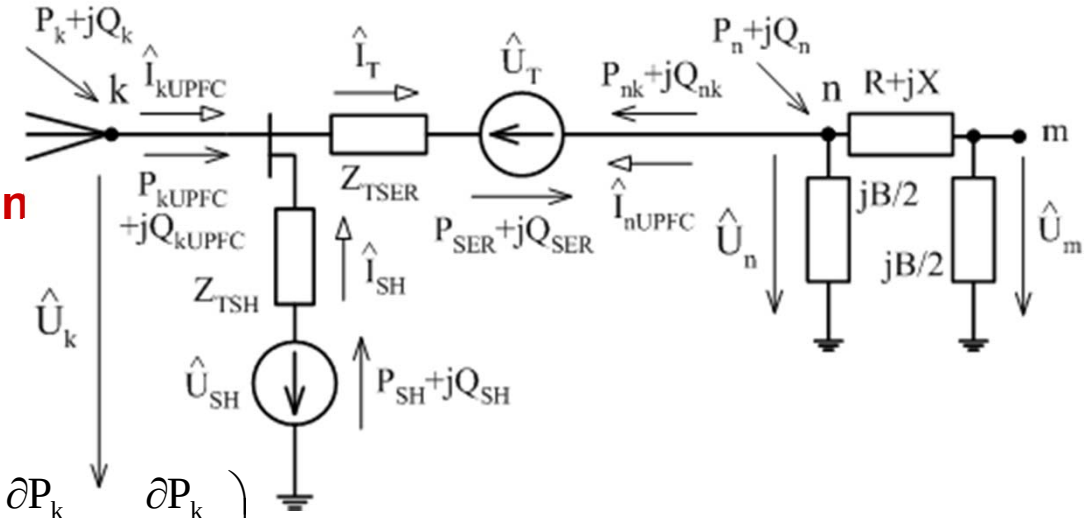
- 2 napěťové zdroje
  - nezávislé řízení
    - toku P_M, Q_M a napětí U_I
  - 3 stupně volnosti
    - U_{SH}, U_T, j_{SH} (j_T)
    - úhly svázany ztrátami
- Newton-Raphson load flow
  - jednoduchý model
    - pouze při regulaci všech 3 veličin





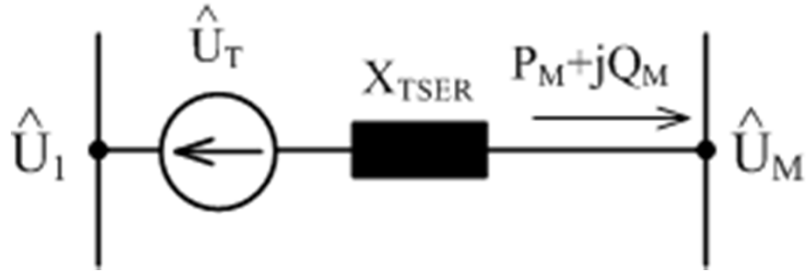
Model UPFC

- **Newton-Raphson load flow**
  - **komplexní model**
    - **pro libovolnou regulaci 3 veličin**



$$
\begin{pmatrix} \Delta P_k \\ \Delta Q_k \\ \Delta P_n \\ \Delta Q_n \\ \Delta P_{nk} \\ \Delta Q_{nk} \\ \Delta P_z \end{pmatrix}
=
\begin{pmatrix}
\frac{\partial P_k}{\partial U_n} & \frac{\partial P_k}{\partial \varphi_n} & \frac{\partial P_k}{\partial U_{SH}} & \frac{\partial P_k}{\partial \varphi_{SH}} & \frac{\partial P_k}{\partial U_T} & \frac{\partial P_k}{\partial \varphi_T} & \frac{\partial P_k}{\partial \varphi_k} \\
\frac{\partial Q_k}{\partial U_n} & \frac{\partial Q_k}{\partial \varphi_n} & \frac{\partial Q_k}{\partial U_{SH}} & \frac{\partial Q_k}{\partial \varphi_{SH}} & \frac{\partial Q_k}{\partial U_T} & \frac{\partial Q_k}{\partial \varphi_T} & \frac{\partial Q_k}{\partial \varphi_k} \\
\frac{\partial P_n}{\partial U_n} & \frac{\partial P_n}{\partial \varphi_n} & 0 & 0 & \frac{\partial P_n}{\partial U_T} & \frac{\partial P_n}{\partial \varphi_T} & \frac{\partial P_n}{\partial \varphi_k} \\
\frac{\partial Q_n}{\partial U_n} & \frac{\partial Q_n}{\partial \varphi_n} & 0 & 0 & \frac{\partial Q_n}{\partial U_T} & \frac{\partial Q_n}{\partial \varphi_T} & \frac{\partial Q_n}{\partial \varphi_k} \\
\frac{\partial P_{nk}}{\partial U_n} & \frac{\partial P_{nk}}{\partial \varphi_n} & 0 & 0 & \frac{\partial P_{nk}}{\partial U_T} & \frac{\partial P_{nk}}{\partial \varphi_T} & \frac{\partial P_{nk}}{\partial \varphi_k} \\
\frac{\partial Q_{nk}}{\partial U_n} & \frac{\partial Q_{nk}}{\partial \varphi_n} & 0 & 0 & \frac{\partial Q_{nk}}{\partial U_T} & \frac{\partial Q_{nk}}{\partial \varphi_T} & \frac{\partial Q_{nk}}{\partial \varphi_k} \\
\frac{\partial P_z}{\partial U_n} & \frac{\partial P_z}{\partial \varphi_n} & \frac{\partial P_z}{\partial U_{SH}} & \frac{\partial P_z}{\partial \varphi_{SH}} & \frac{\partial P_z}{\partial U_T} & \frac{\partial P_z}{\partial \varphi_T} & \frac{\partial P_z}{\partial \varphi_k}
\end{pmatrix}
\cdot
\begin{pmatrix} \Delta U_n \\ \Delta \varphi_n \\ \Delta U_{SH} \\ \Delta \varphi_{SH} \\ \Delta U_T \\ \Delta \varphi_T \\ \Delta \varphi_k \end{pmatrix}
$$

Model SSSC



- **Newton-Raphson load flow**
  - **jako UPFC, jen $U_{SH} = 0$**
  - **zdroj P**
    - **2 stupně volnosti (U_T, j_T), řízení P_M, Q_M**
  - **bez zdroje P**
    - **j_T dané proudem, řízení buď P_M, nebo Q_M**

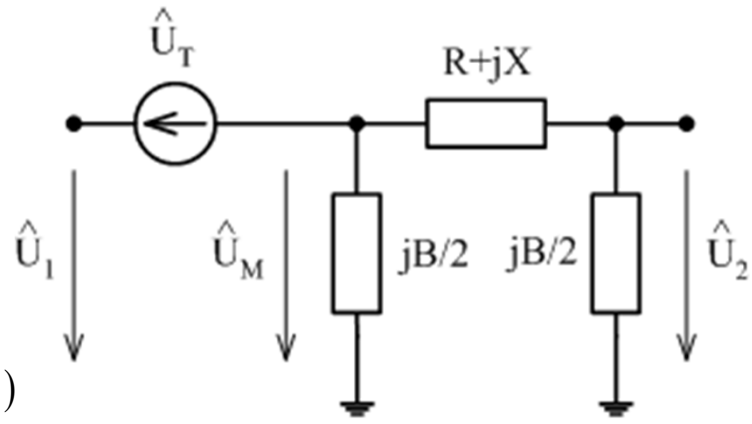
$$\begin{pmatrix} \Delta P_k \\ \Delta Q_k \\ \Delta P_n \\ \Delta Q_n \\ \Delta P_{nk} \\ \Delta Q_{nk} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial P_k}{\partial U_k} & \frac{\partial P_k}{\partial \varphi_k} & \frac{\partial P_k}{\partial U_n} & \frac{\partial P_k}{\partial \varphi_n} & \frac{\partial P_k}{\partial U_T} & \frac{\partial P_k}{\partial \varphi_T} \\ \frac{\partial Q_k}{\partial U_k} & \frac{\partial Q_k}{\partial \varphi_k} & \frac{\partial Q_k}{\partial U_n} & \frac{\partial Q_k}{\partial \varphi_n} & \frac{\partial Q_k}{\partial U_T} & \frac{\partial Q_k}{\partial \varphi_T} \\ \frac{\partial P_n}{\partial U_k} & \frac{\partial P_n}{\partial \varphi_k} & \frac{\partial P_n}{\partial U_n} & \frac{\partial P_n}{\partial \varphi_n} & \frac{\partial P_n}{\partial U_T} & \frac{\partial P_n}{\partial \varphi_T} \\ \frac{\partial Q_n}{\partial U_k} & \frac{\partial Q_n}{\partial \varphi_k} & \frac{\partial Q_n}{\partial U_n} & \frac{\partial Q_n}{\partial \varphi_n} & \frac{\partial Q_n}{\partial U_T} & \frac{\partial Q_n}{\partial \varphi_T} \\ \frac{\partial P_{nk}}{\partial U_k} & \frac{\partial P_{nk}}{\partial \varphi_k} & \frac{\partial P_{nk}}{\partial U_n} & \frac{\partial P_{nk}}{\partial \varphi_n} & \frac{\partial P_{nk}}{\partial U_T} & \frac{\partial P_{nk}}{\partial \varphi_T} \\ \frac{\partial Q_{nk}}{\partial U_k} & \frac{\partial Q_{nk}}{\partial \varphi_k} & \frac{\partial Q_{nk}}{\partial U_n} & \frac{\partial Q_{nk}}{\partial \varphi_n} & \frac{\partial Q_{nk}}{\partial U_T} & \frac{\partial Q_{nk}}{\partial \varphi_T} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \Delta U_k \\ \Delta \varphi_k \\ \Delta U_n \\ \Delta \varphi_n \\ \Delta U_T \\ \Delta \varphi_T \end{pmatrix}$$

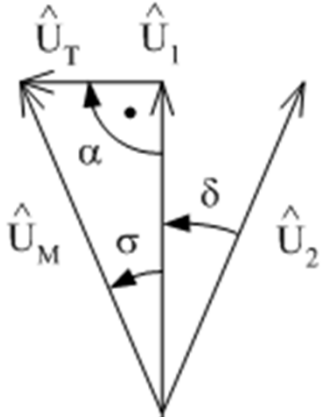
Model PST

- **Napěťový zdroj**
  - **čisté natočení**
  - **typ QBT**

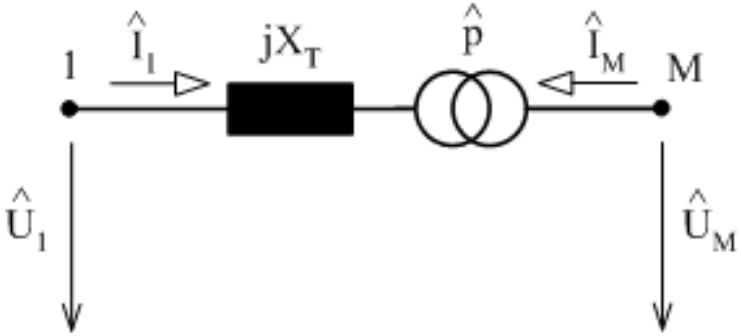
$$\hat{U}_M = \hat{U}_1 + \hat{U}_T$$

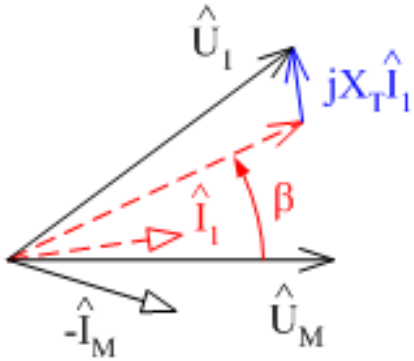
$$U_M \cdot e^{j\varphi_M} = U_1 \cdot e^{j\varphi_1} + U_T \cdot e^{j(\varphi_1 + 90°)}$$





- **Admitanční matice**
  - **vliv reaktance TRF – sériová část jako jX_T a ideální převod** $\hat{p} = e^{j\beta}$
  - **typ PAR**





$$\begin{pmatrix} \hat{I}_1 \\ \hat{I}_M \end{pmatrix} = \frac{1}{jX_T} \begin{pmatrix} 1 & -e^{j\beta} \\ -e^{-j\beta} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{U}_1 \\ \hat{U}_M \end{pmatrix}$$

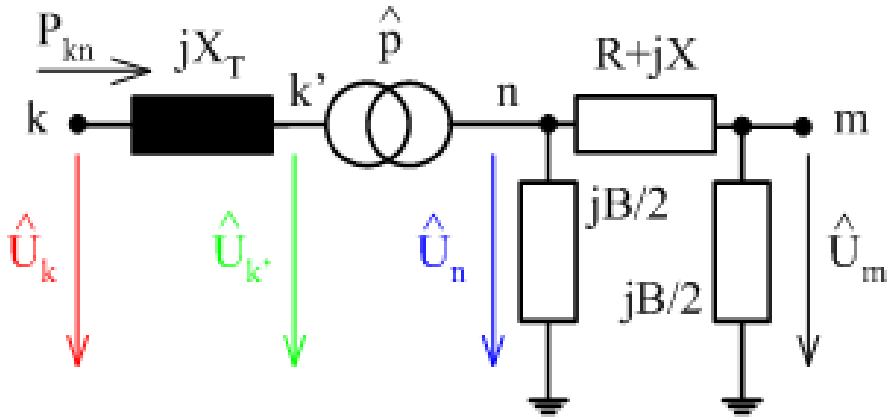
Model PST

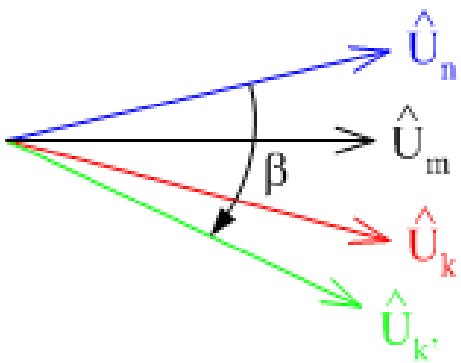
- **Newton-Raphson load flow**
  - **řízení toku P natočením b**

$$P_{kn} = \frac{U_k U_n \sin(\varphi_k - \varphi_n - \beta)}{X_T}$$

  - **uzel n PQ = 0**

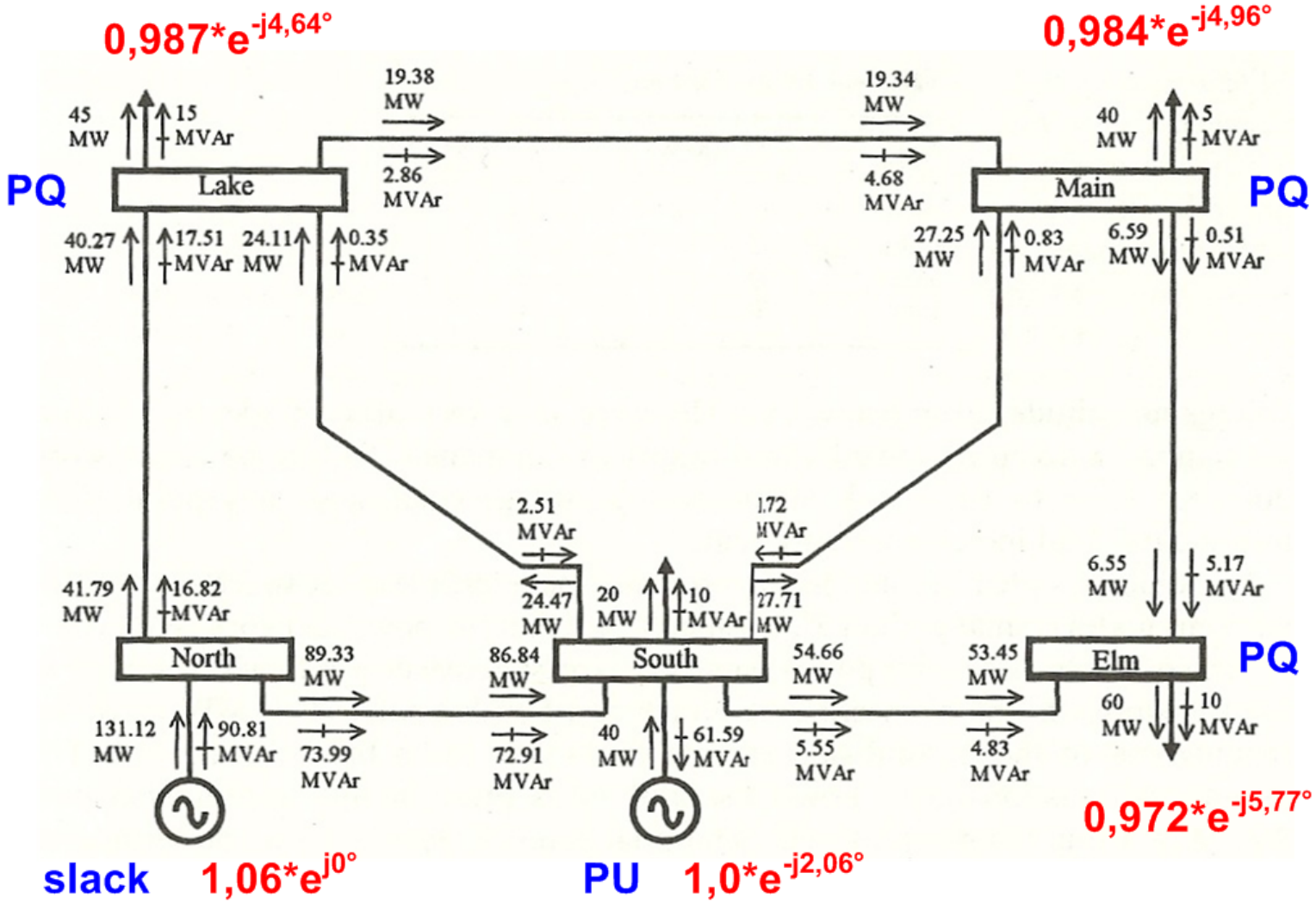
$$\begin{pmatrix} \Delta P_k \\ \Delta P_n \\ \Delta Q_k \\ \Delta Q_n \\ \Delta P_{kn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial P_k}{\partial \varphi_k} & \frac{\partial P_k}{\partial \varphi_n} & \frac{\partial P_k}{\partial U_k} & \frac{\partial P_k}{\partial U_n} & \frac{\partial P_k}{\partial \beta} \\ \frac{\partial P_n}{\partial \varphi_k} & \frac{\partial P_n}{\partial \varphi_n} & \frac{\partial P_n}{\partial U_k} & \frac{\partial P_n}{\partial U_n} & \frac{\partial P_n}{\partial \beta} \\ \frac{\partial Q_k}{\partial \varphi_k} & \frac{\partial Q_k}{\partial \varphi_n} & \frac{\partial Q_k}{\partial U_k} & \frac{\partial Q_k}{\partial U_n} & \frac{\partial Q_k}{\partial \beta} \\ \frac{\partial Q_n}{\partial \varphi_k} & \frac{\partial Q_n}{\partial \varphi_n} & \frac{\partial Q_n}{\partial U_k} & \frac{\partial Q_n}{\partial U_n} & \frac{\partial Q_n}{\partial \beta} \\ \frac{\partial P_{kn}}{\partial \varphi_k} & \frac{\partial P_{kn}}{\partial \varphi_n} & \frac{\partial P_{kn}}{\partial U_k} & \frac{\partial P_{kn}}{\partial U_n} & \frac{\partial P_{kn}}{\partial \beta} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \Delta \varphi_k \\ \Delta \varphi_n \\ \Delta U_k \\ \Delta U_n \\ \Delta \beta \end{pmatrix}$$





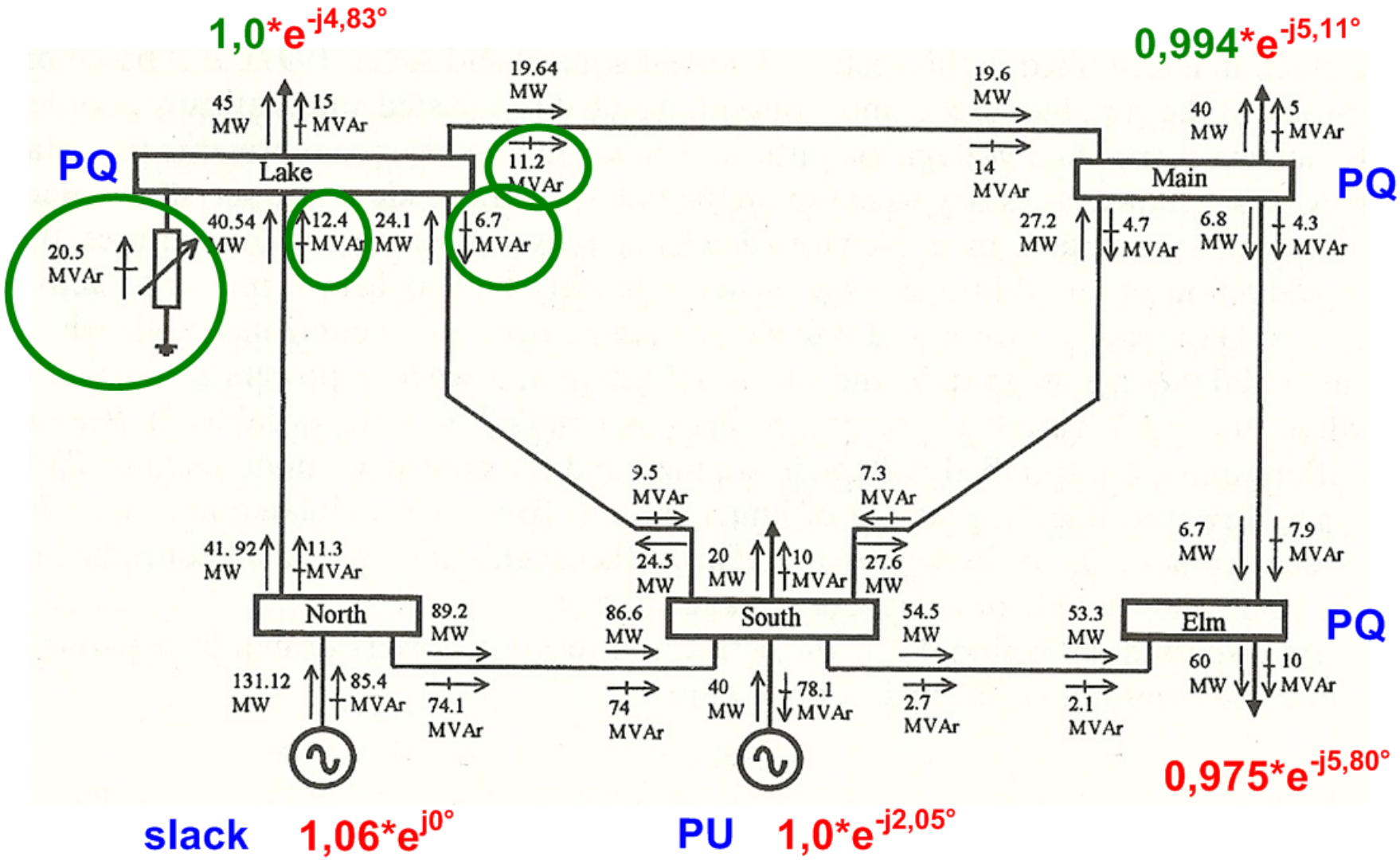
Case study – základní stav

- **Newton-Raphson load flow**
  - Acha, E., Agelidis, V.G., Anaya-Lara, O., Miller, T.J.E.: *Power Electronic Control in Electrical Systems*. Oxford: Newnes Press, c2002. 443 s. ISBN 0-7506-5126-1



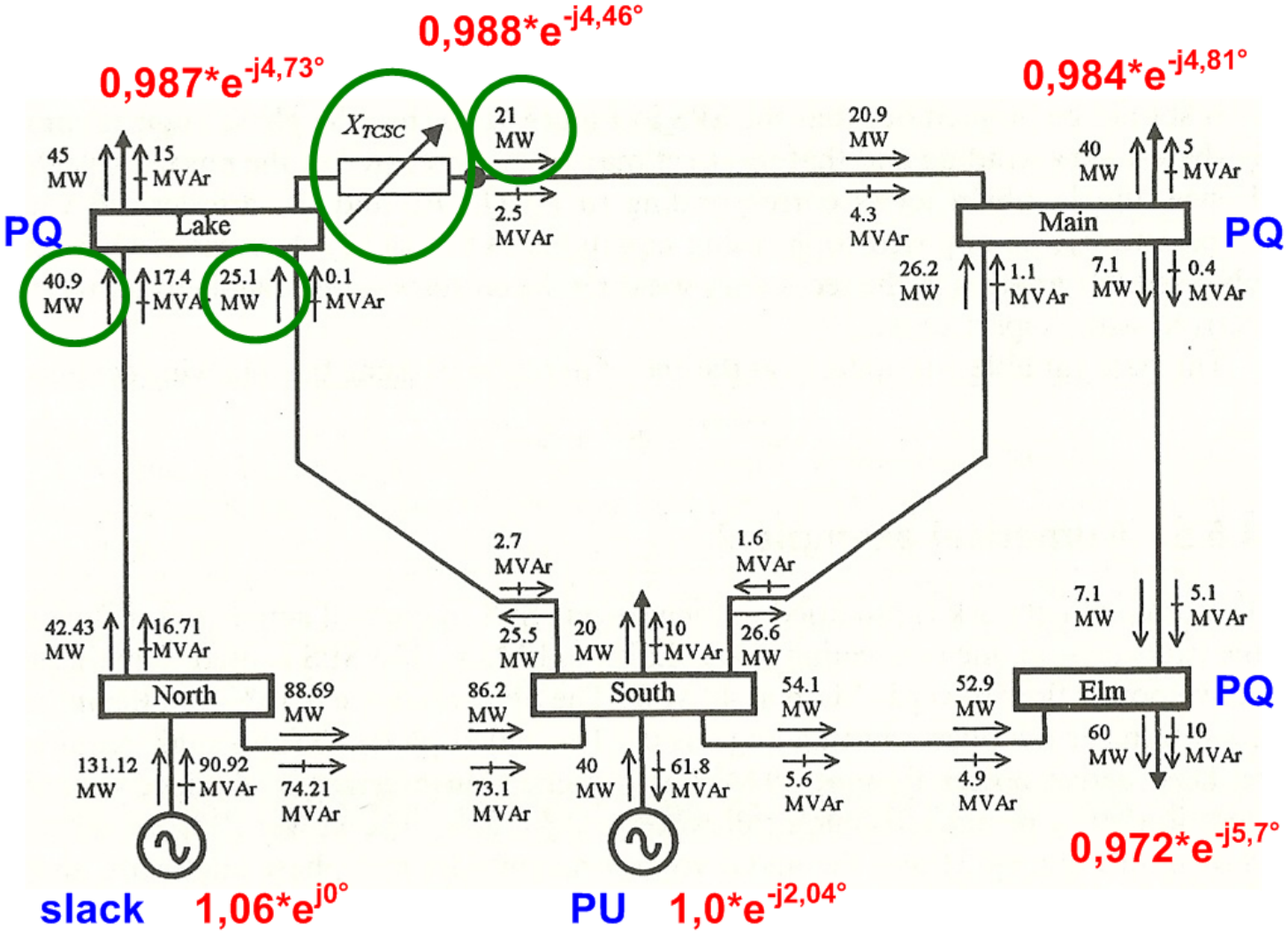
Case study – SVC (STATCOM)

- Cíl: v uzlu Lake u = 1
- Lokální změny napětí a toků Q



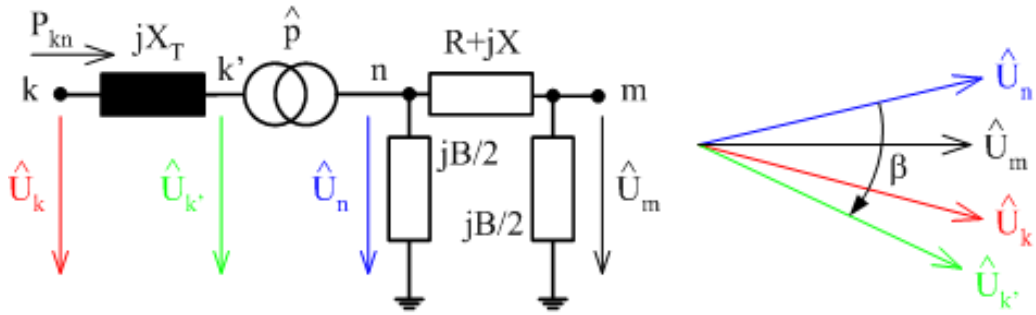
Case study – TCSC

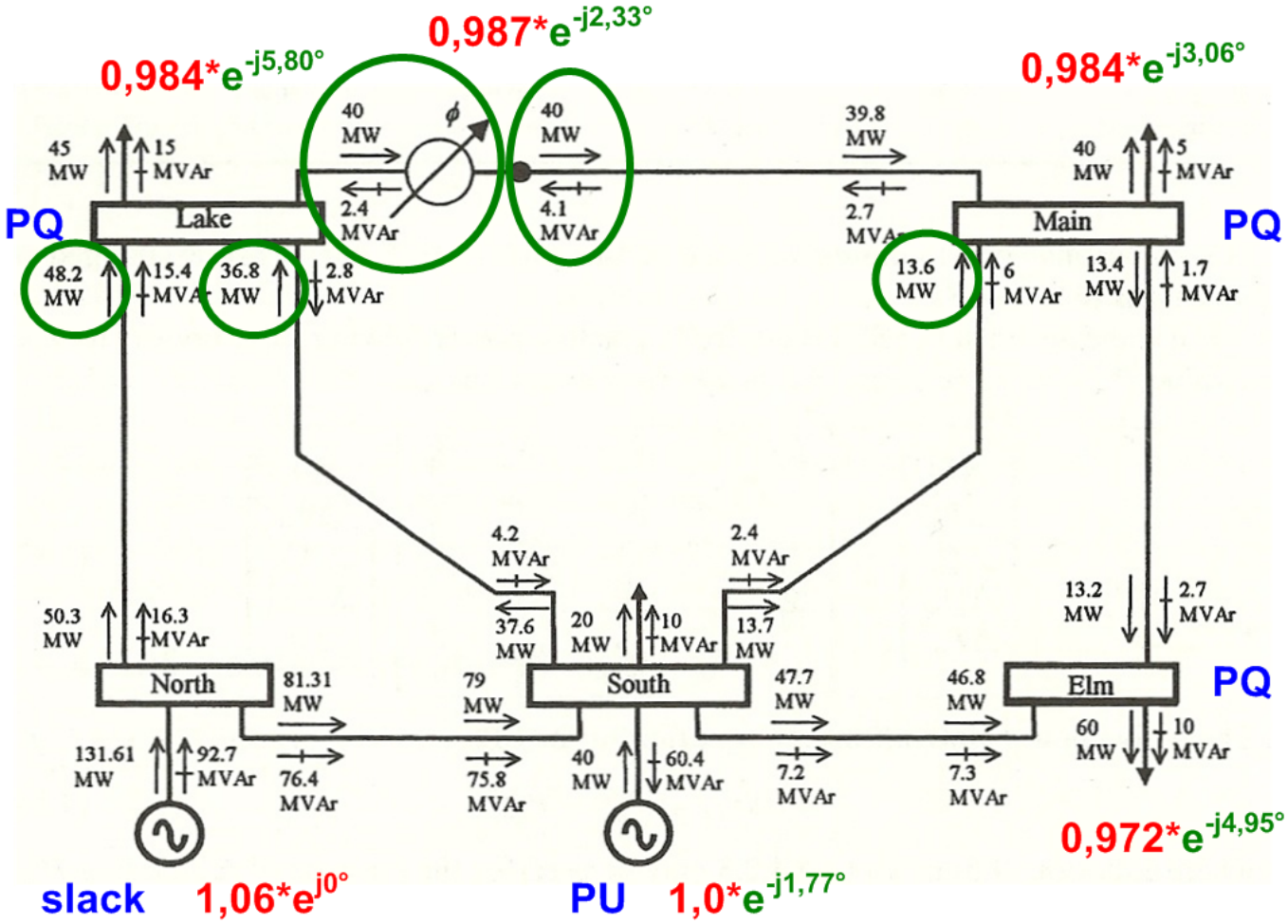
- Cíl: ve větvi Lake → Main P = 21 MW
- Lokální změny toku P, malý vliv na napětí
- X_{TCSC} = -72 % X_{ved} (zde malý vliv)



Case study – PST

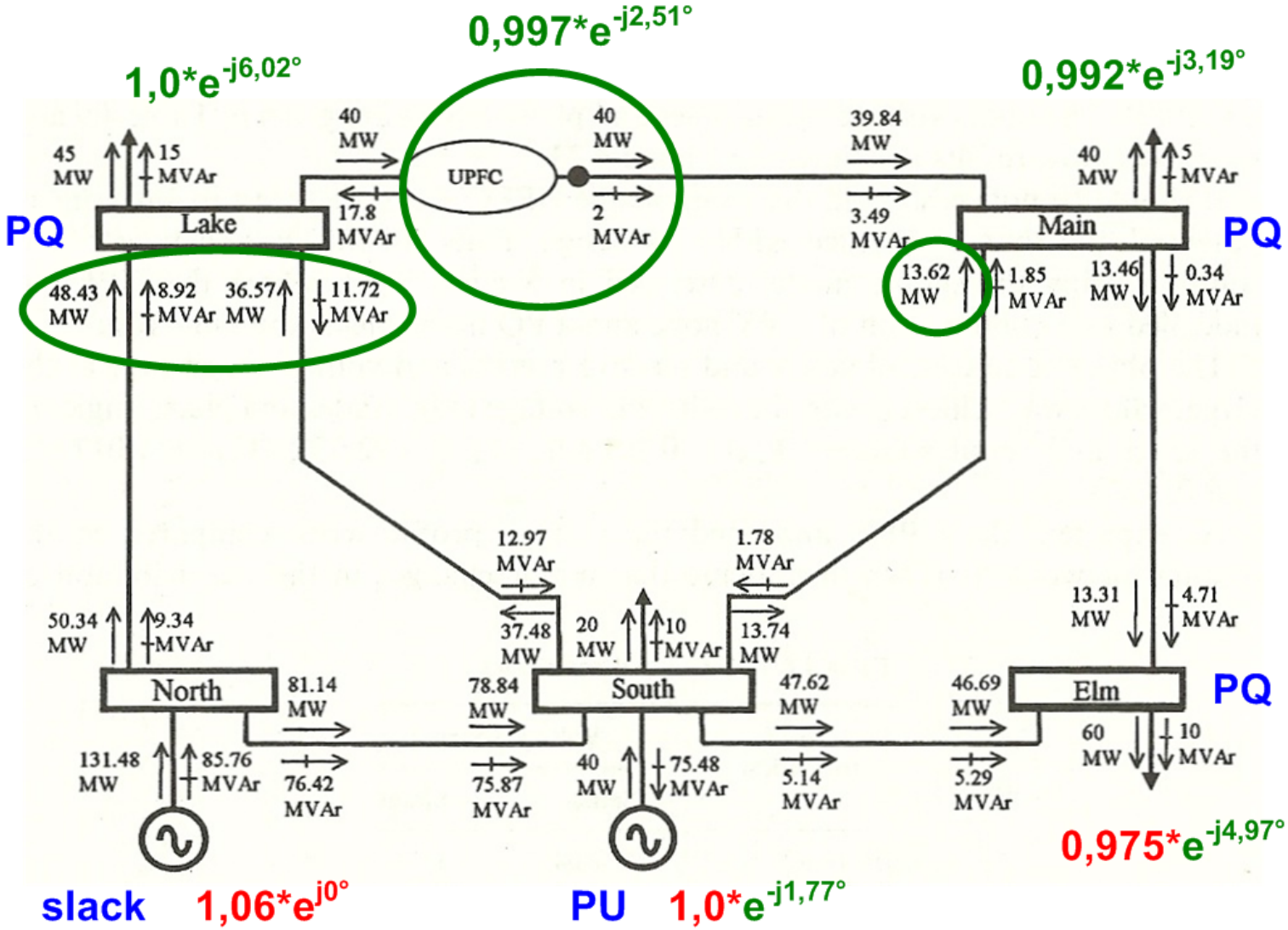
- Cíl: ve větvi Lake → Main P = 40 MW
- Lokální změny toku P
- Malý vliv na napětí, větší na úhly
- $X_{PST} = 3\ X_{ved}$, b = -5,83°





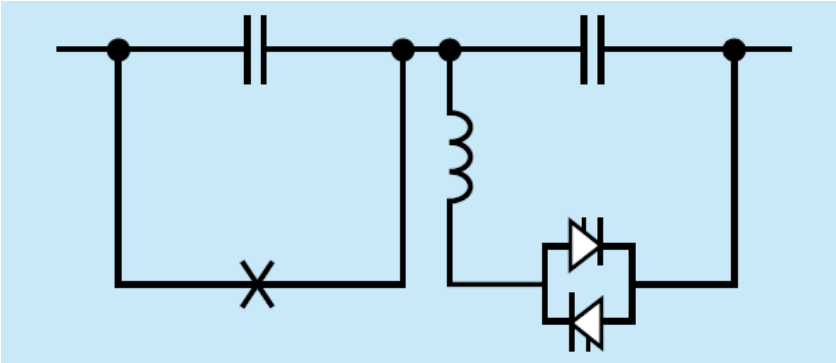
Case study – UPFC

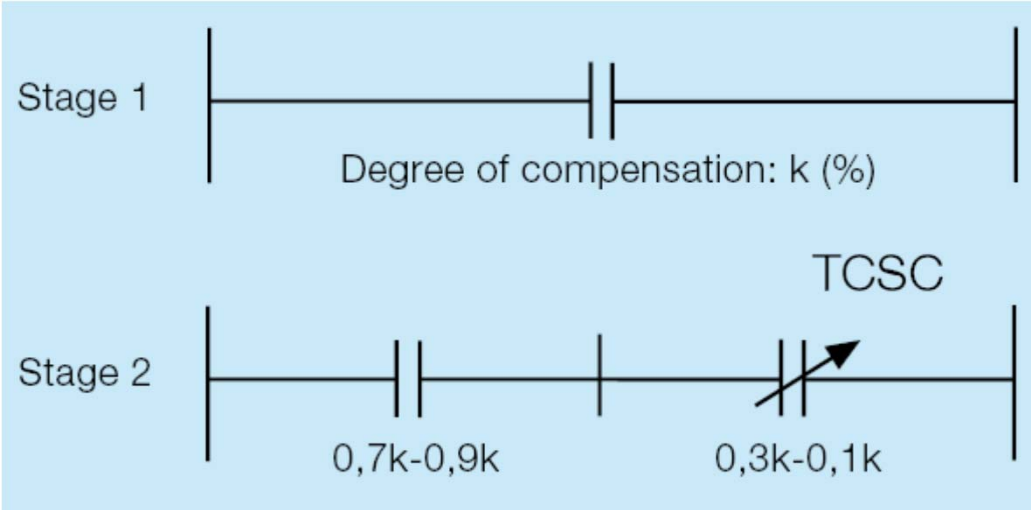
- Cíl: ve větvi Lake → Main P = 40 MW, Q = 2 MVAr, napětí v uzlu Lake u = 1
- Lokální změny toku P, Q i napětí



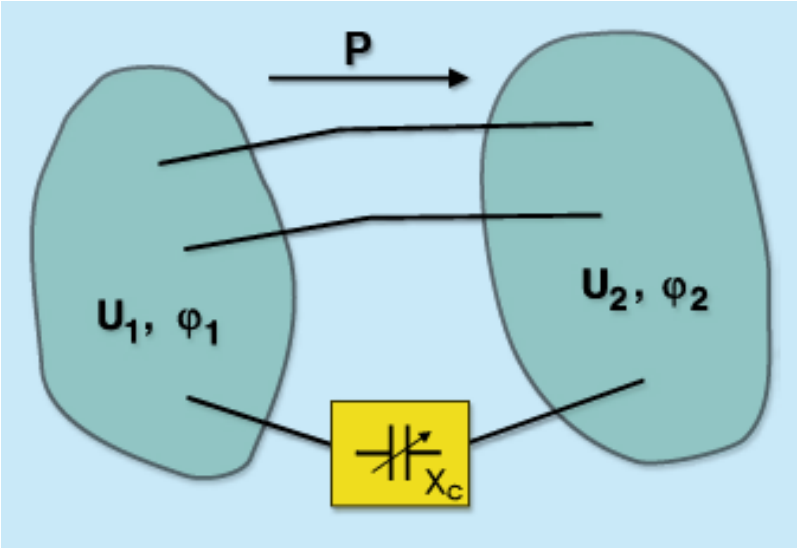
Aplikace – TCSC

- **Bloky sériové kompenzace na vedení**

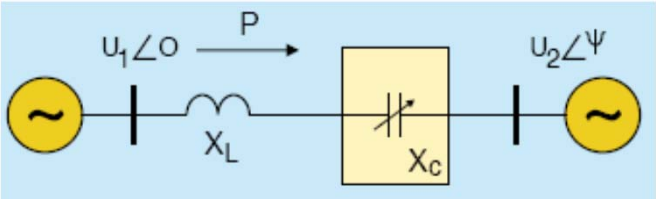




- **Optimalizace výkonových toků mezi oblastmi**
  - minimalizace ztrát
  - omezení kruhových toků
  - eliminace přetížení
  - rozdělení výkonů mezi paralelní cesty

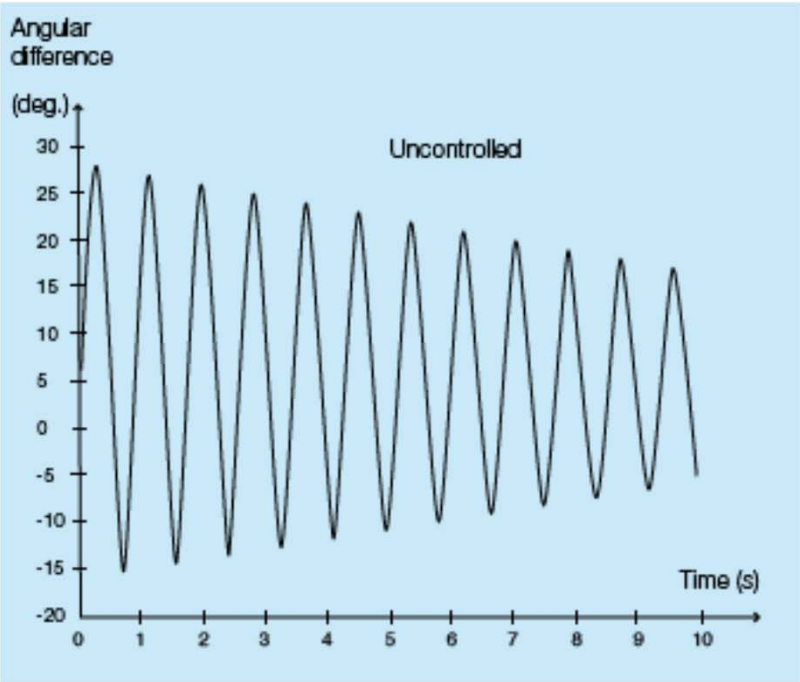


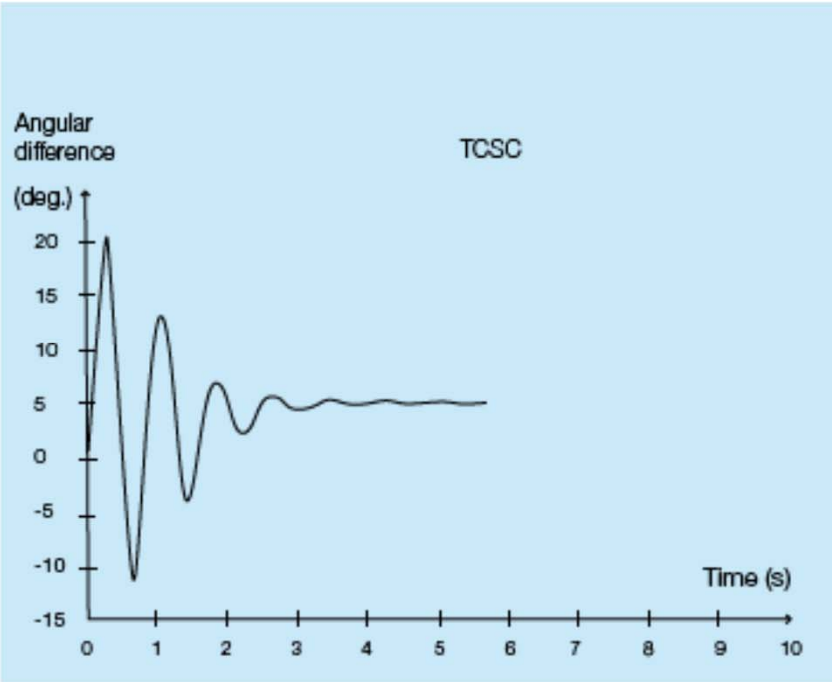
Aplikace – TCSC



- **Tlumení výkonových oscilací**
  - **u propojení s malým tlumením a velkými přenosy**
  - **oscilace vyvolané poruchami, spínáním vedení, změnou výkonu výroby**
  - **omezují přenosové kapacity vedení**
  - **oscilace mezi oblastmi 0,2 ÷ 0,7 Hz**
  - **TCSC levnější než posílení vedení, účinné v jakémkoliv místě instalace**
- **Oscilace na 500 kV vedení, přenos 2000 MW**

$$P(t)=\frac{U_1 U_2 \sin\Psi}{X_L - X_C(t)}$$

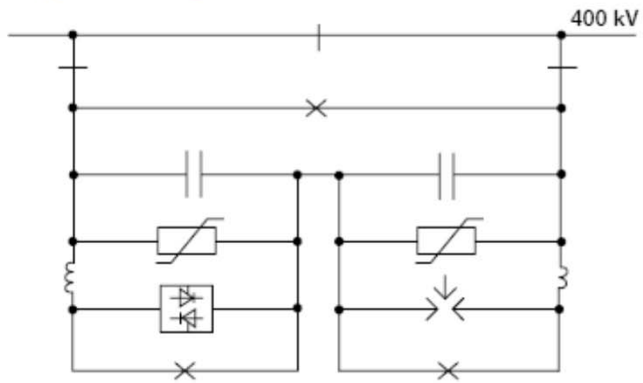


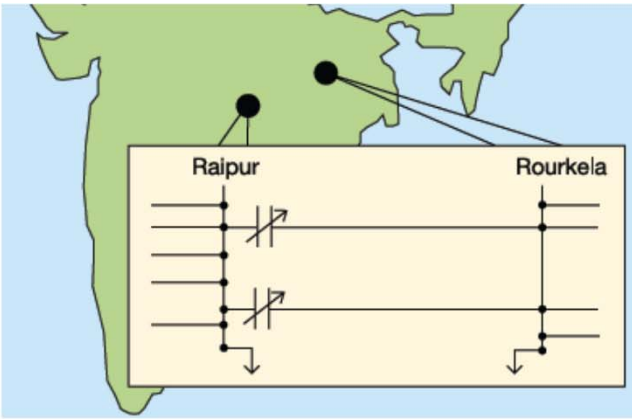


Aplikace – TCSC

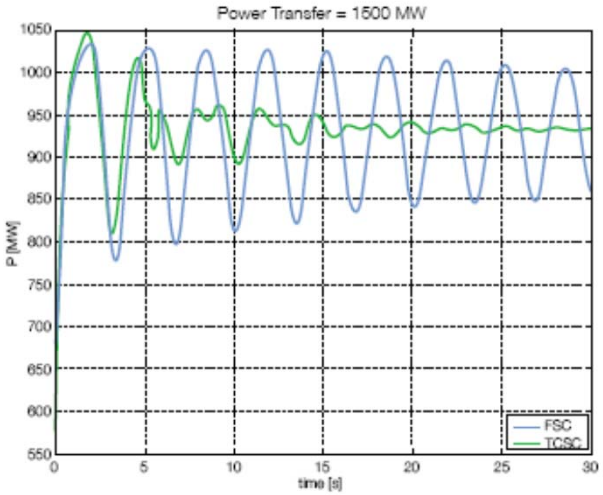
- **Tlumení výkonových oscilací**
  - **Indie 400 kV, 412 km**
  - **po 1f zkratu**

Single-line diagram

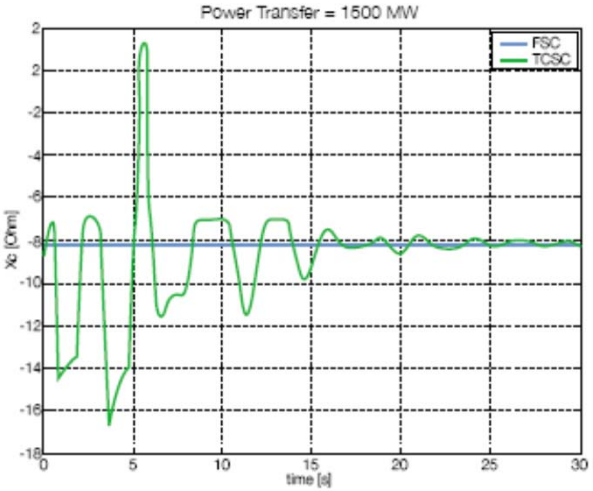




Power oscillation damping



TCSC reactance response

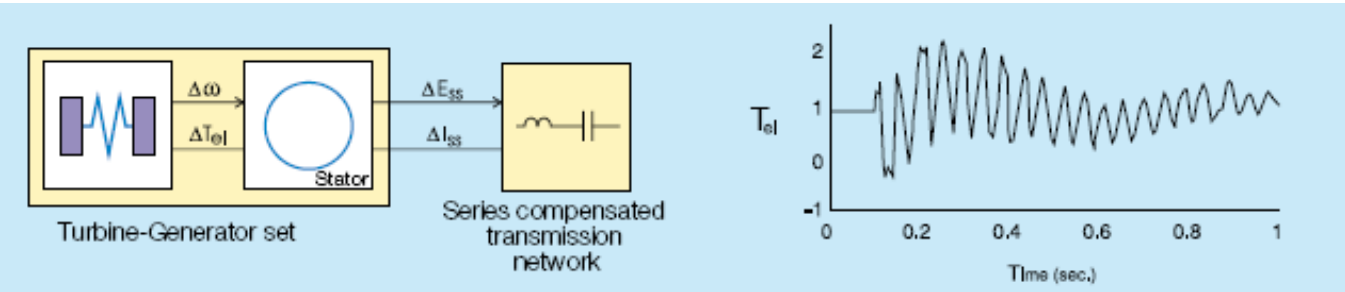


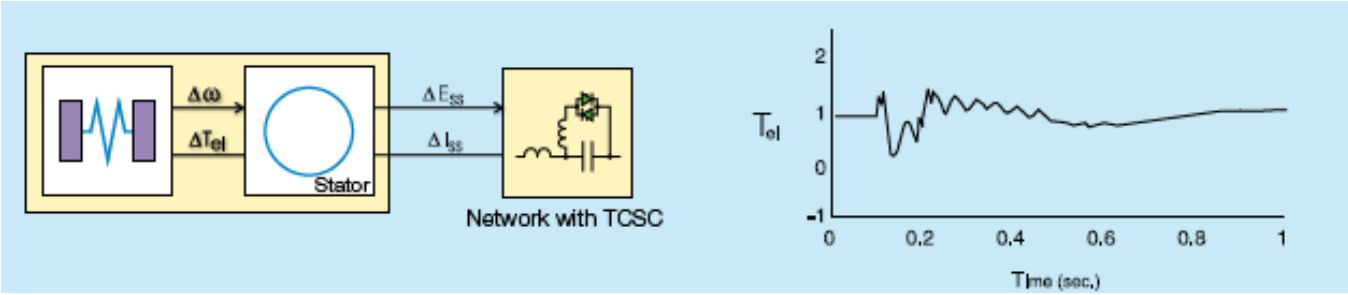
Main technical data (per one TCSC)

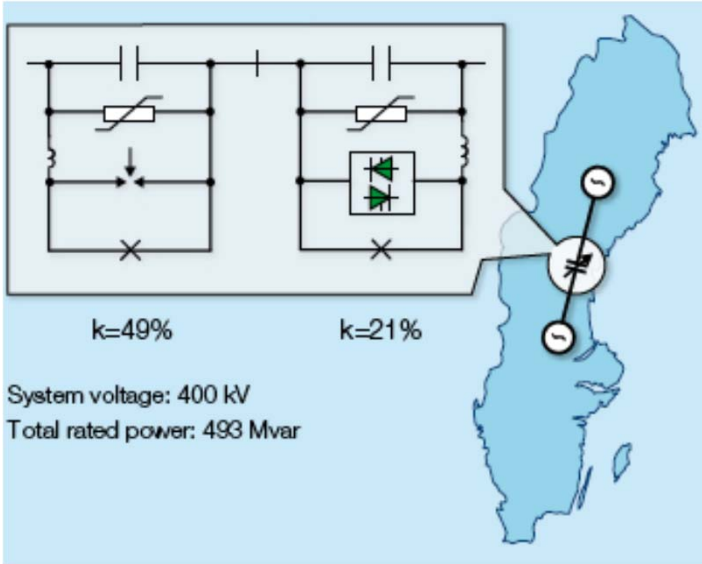
Parameter	Fixed Segment	TCSC Segment
Nominal system voltage	400 kV	400 kV
Rated line current	1550 A	1550 A
Line current overload, 30 minutes	2093 A	2093 A
Line current overload, 10 minutes	2325 A	2325 A
Physical capacitor reactance	54.7 Ω	6.83 Ω
Nominal capacitive boost factor	1.0	1.2
Boost factor range	–	1.0–3.0
Rated capacitor reactive power	394 Mvar	71 Mvar
Rated capacitor bank voltage	84.8 kV	12.7 kV
Degree of compensation	40%	5% (@ 1.0 boost factor)
ZnO rating (incl. redundancy)	56 MJ	15 MJ

Aplikace – TCSC

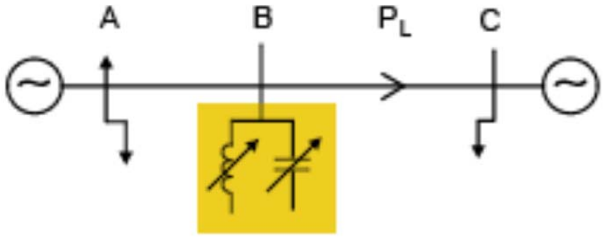
- **Tlumení subsynchronní rezonance**
  - **SSR – u vyšších stupňů kompenzace může rezonance sériového LC obvodu odpovídat torzním kmitům hřídele turbogenerátorů → mechanické namáhání**
  - **TCR rozruší kmitavé módy**
  - **např. Švédsko**
    - **JE Forsmark (blok 1300 MW – nevypínat kvůli SSR)**
    - **30 % SC nahrazeno TCSC**



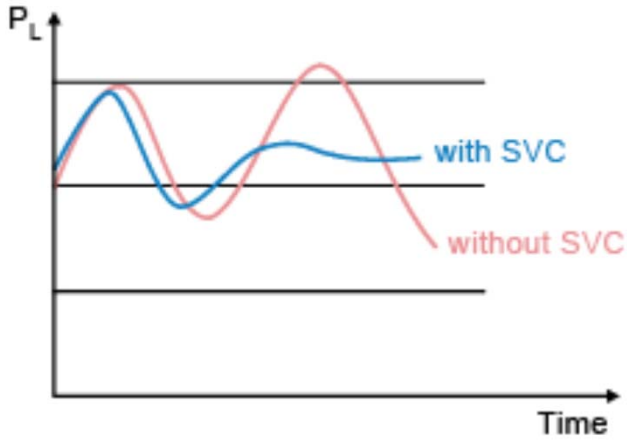




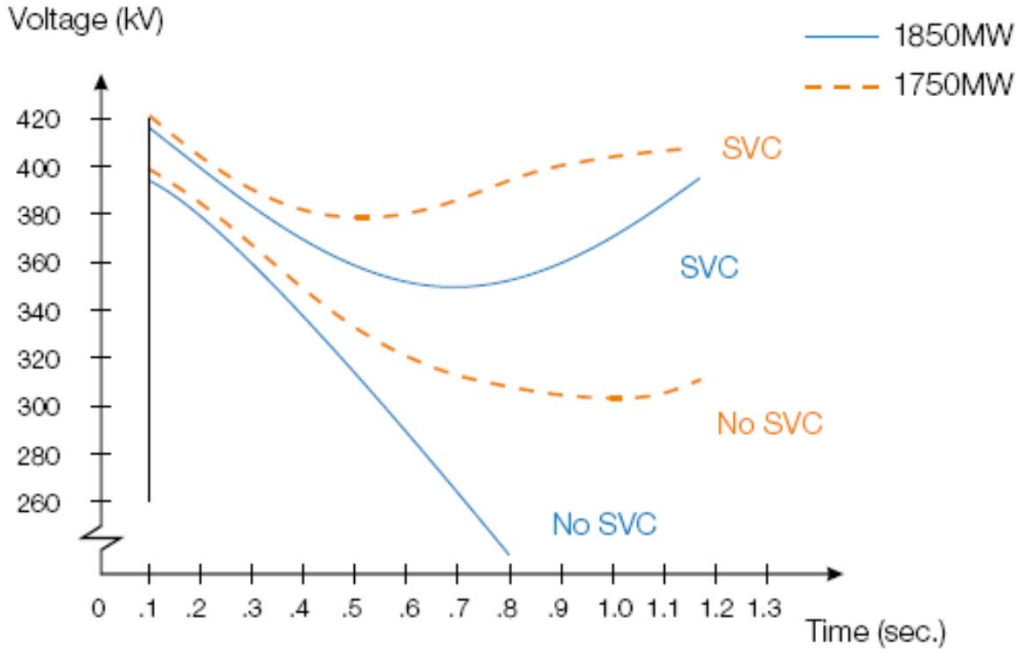
Aplikace – SVC



- **Přenosové soustavy**
  - stabilizace napětí ve slabých sítích, po poruše
  - snížení přenosových ztrát
  - zvýšení přenosových schopností
  - zvýšení dynamické stability
  - regulace napětí
  - tlumení výkonových oscilací
- **Distribuční soustavy**
  - stabilizace napětí v místech odběru
  - snížení jalového odběru, nižší ztráty
  - symetrizace odběrů, nižší ztráty
  - snížení kolsání napětí a flicker
  - snížení harmonického zkreslení

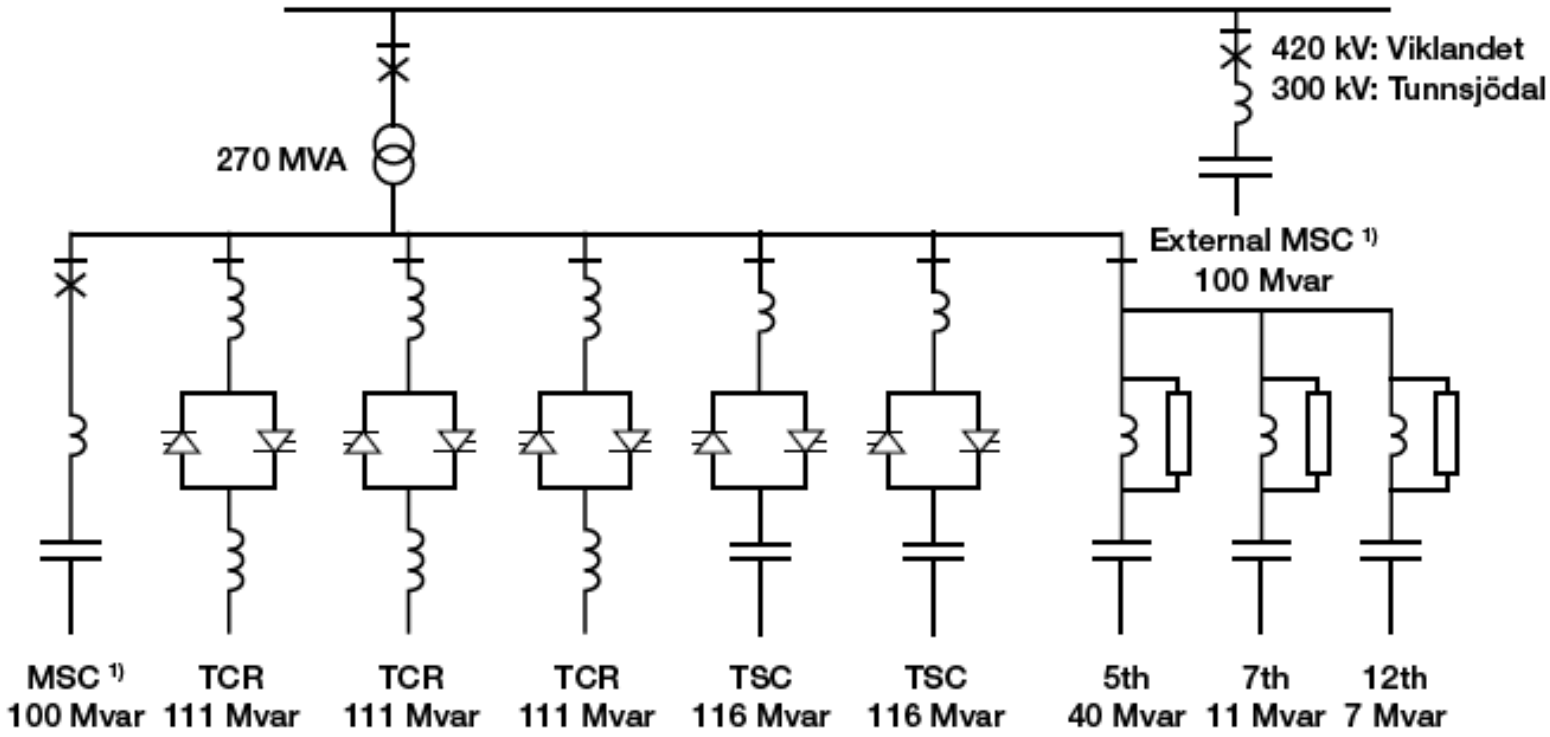


Damping of power oscillations



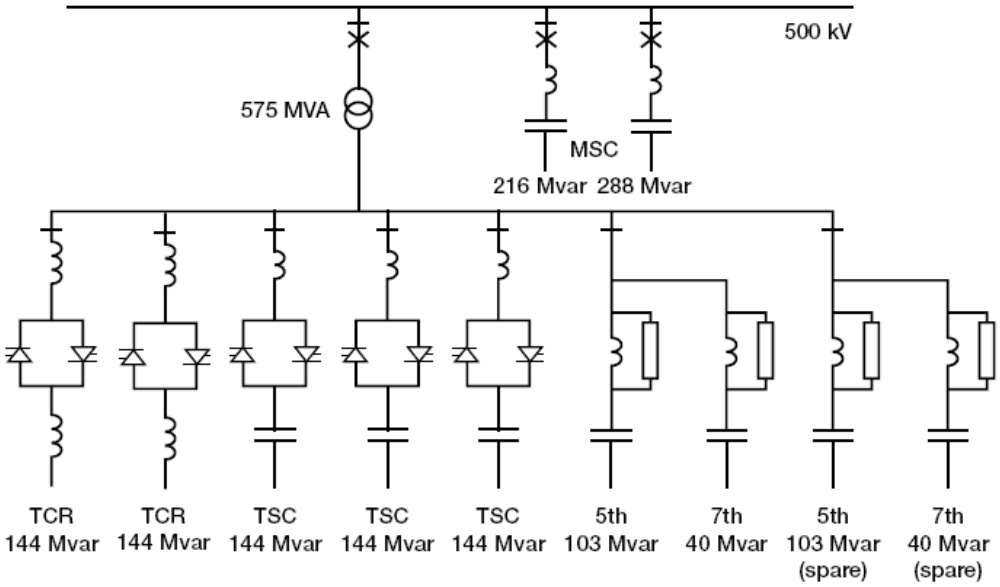
Aplikace – SVC

- **Norsko**
  - posílení sítí v oblasti s rostoucí spotřebou
  - SVC +/- 250 MVAr na 400/320 kV
    - regulace napětí
    - tlumení oscilací (0,45 Hz NOR-FIN, 0,65 Hz NOR-SWE, 0,85 Hz v Norsku)
    - rozsah rozšířen ovládáním několika MSC (Mechanically Switched Capacitor)



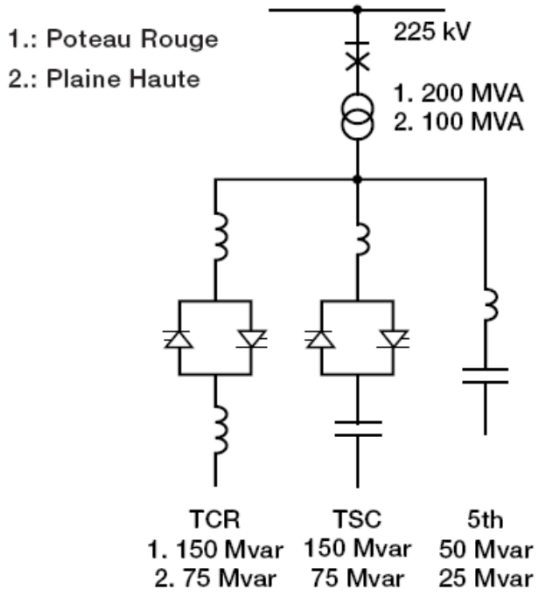
Aplikace – SVC

- **Maryland, USA**
  - **SVC -145/+575 MVAr (-L/+C) na 500 kV**
    - **zvýšení přenosové schopnosti (podpora U na konci vedení, při výpadku paralelního)**
    - **obnova napětí po poruše**



Aplikace – SVC

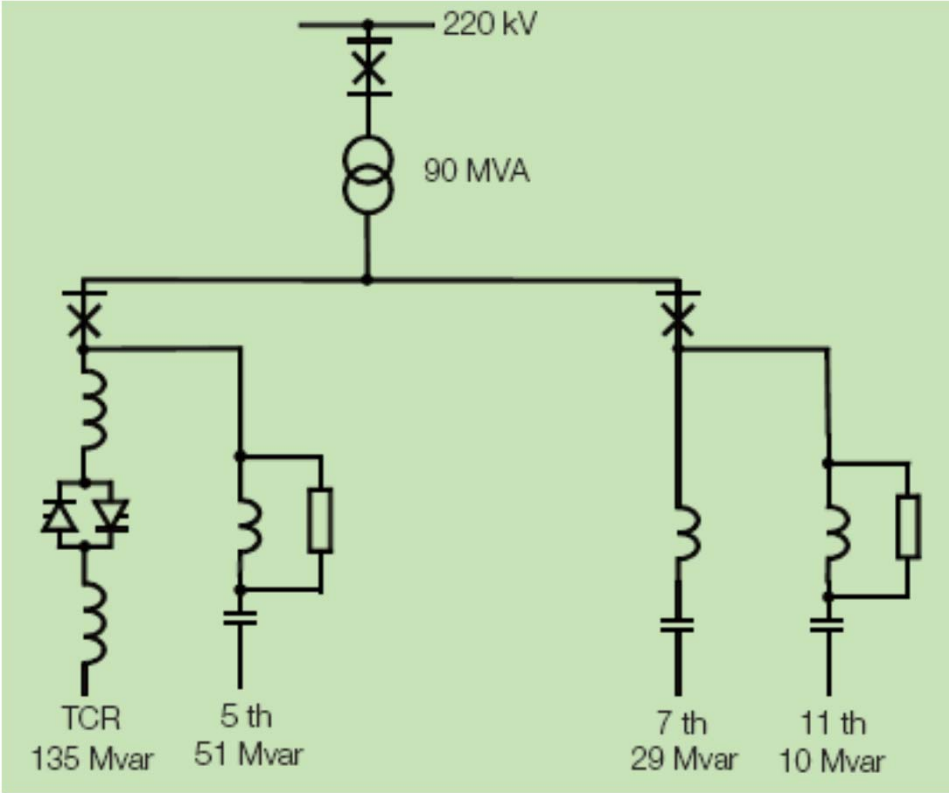
- **Saudská Arábie**
  - **až 80% zátěže klimatizace – pomalé zotavení napětí po poruše, zastavení motorů**
  - **SVC -60/+600 MVAr (-L/+C) na 110 kV**
    - **rychlá obnova napětí po poruše v městské oblasti**
- **Bretaň, Francie**
  - **SVC -50/+100 MVAr a -100/+200 MVAr (-L/+C) na 225 kV**
    - **daleké zdroje → zvýšení přenos. kapacit vedení**
    - **podpora napětí po poruše**
    - **odběr Q při malém zatížení nebo výrobě z OZE**
    - **zamezí odpojení VTE v regionu**
    - **flexibilita a plynulost řízení napětí**

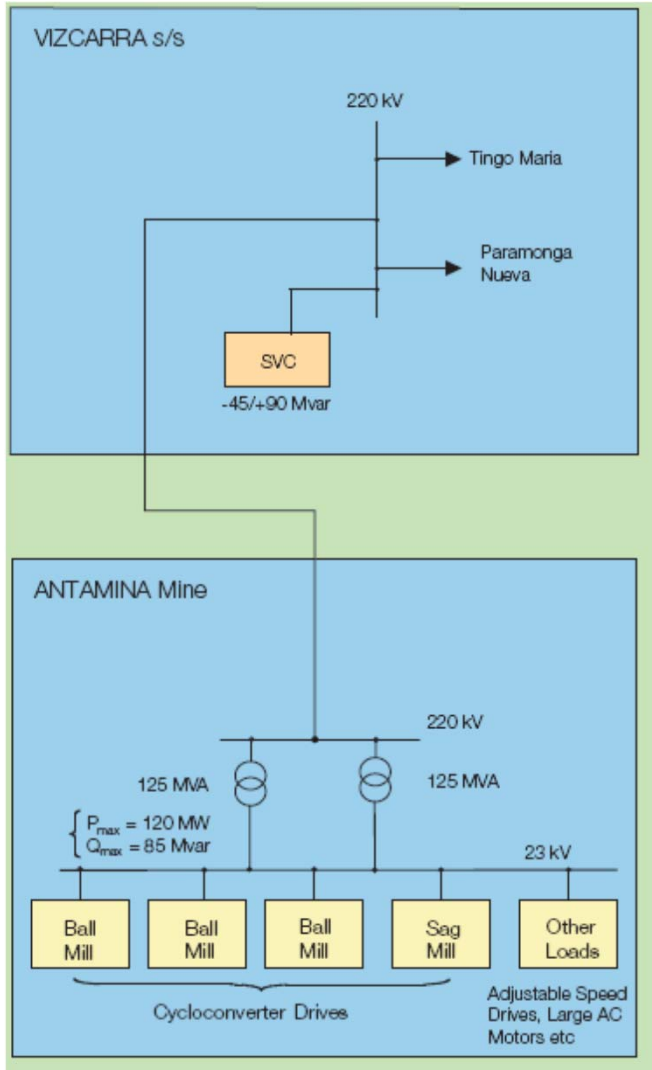


Detail, PCT valve stack

Aplikace – SVC

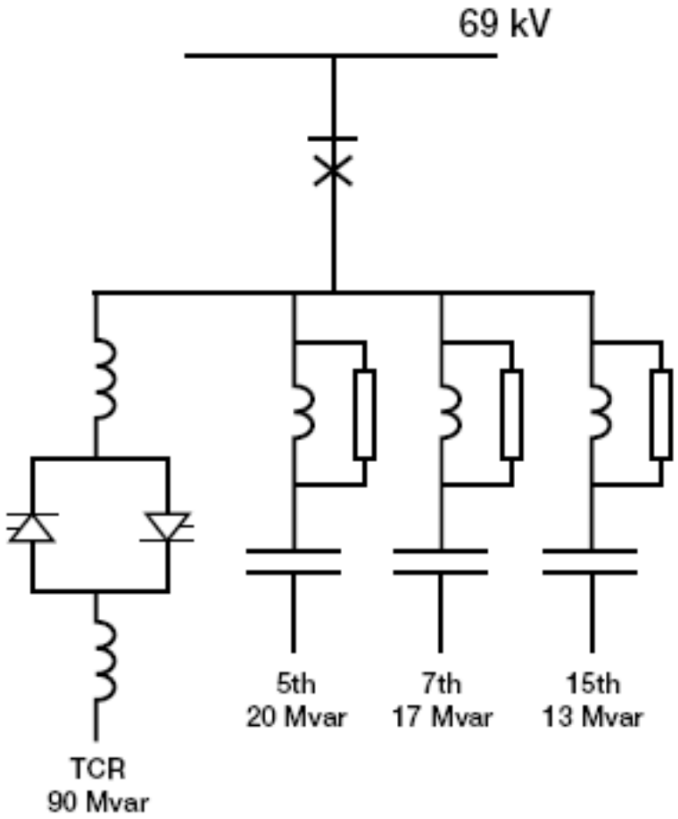
- **Peru**
  - **důl na Cu a Zn ve výšce přes 4000 m.n.m., vedení 220 kV dlouhé 50 km**
  - **SVC -45/+90 MVAr (-L/+C) na 220 kV**
    - **zabránit odpojování pohonů při poklesu napětí (poruchy, blesky)**
    - **ve vzdálené rozvodně (3600 m.n.m)**





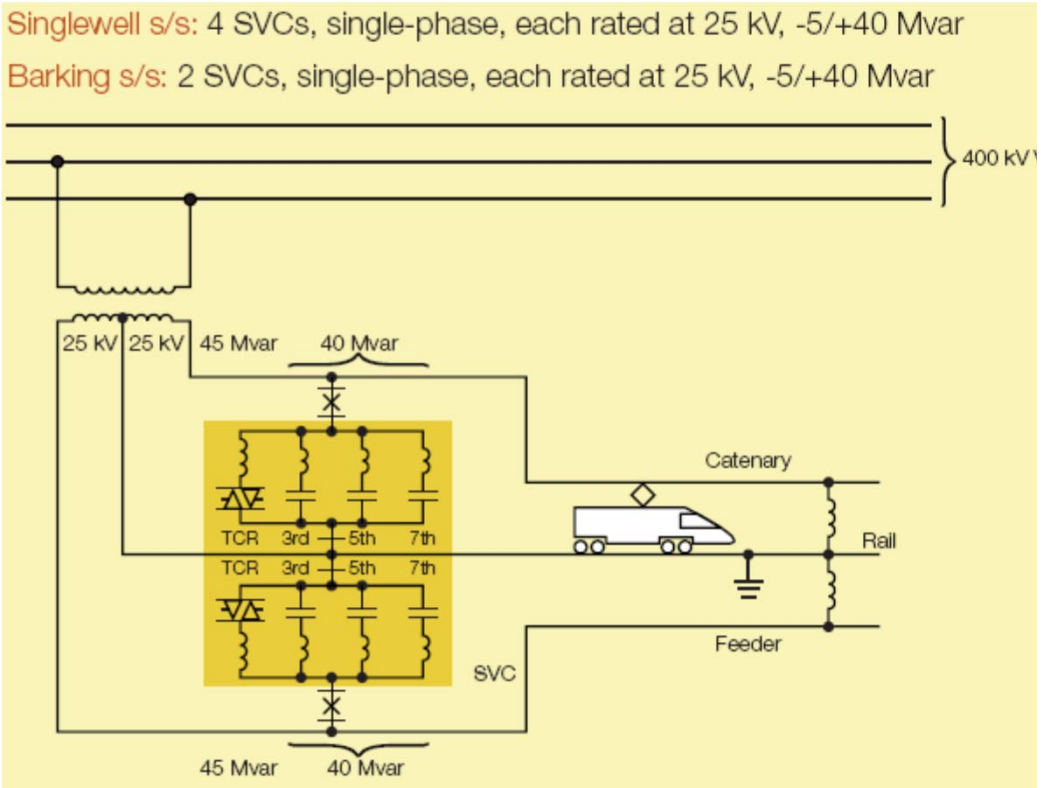
Aplikace – SVC

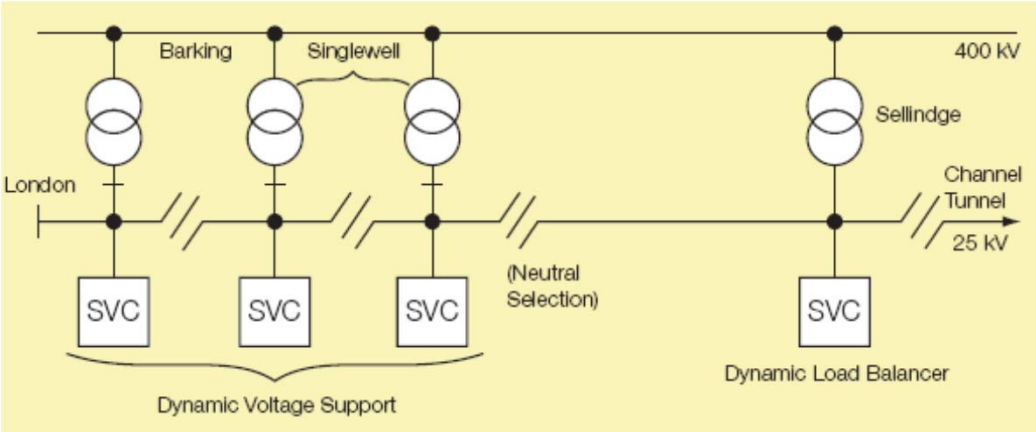
- Texas, USA
  - VTE přes 1000 MW v oblasti
  - SVC -40/+50 MVAr (-L/+C) přímo na 69 kV
    - napěťová stabilita
  - bez TRF
    - jednodušší, levnější, menší, bez údržby TRF, rozšiřitelnost (neomezeno S_T), rychlejší odezva (bez X_T), účinnější filtry
  - BCT (Bi-directionally Controlled Thyristors)
    - 2 tyristory v 1 pouzdře, chladič,…



Aplikace – SVC

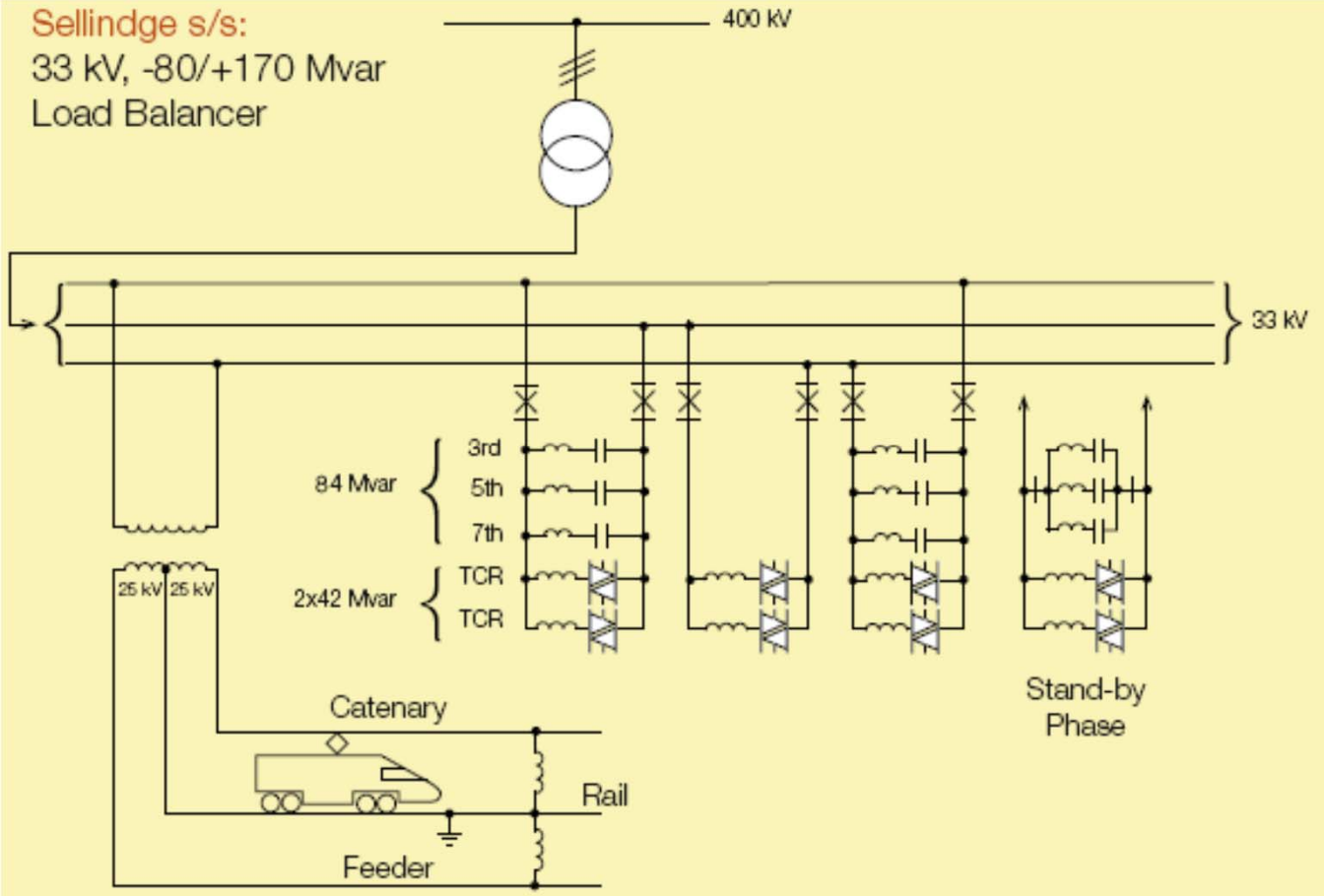
- **Anglie (Londýn – Dover)**
  - **108 km vysokorychlostní železnice**
  - **kolísavé zatížení až 10 MW na 2 x 25 kV síti, 3 napájecí body**
  - **4+2 x SVC -5/+40 MVAr (-L/+C) přímo na 25 kV, jednofázové**
    - **podpora napětí (při výpadku 1 napájecího bodu)**
    - **řízení účiníku**
    - **filtrace harmonických (od SVC i od vlaků)**





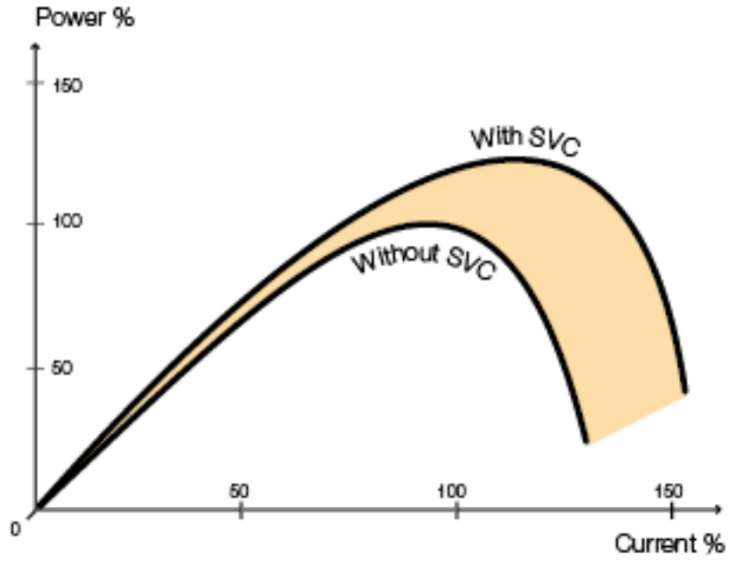
Aplikace – SVC

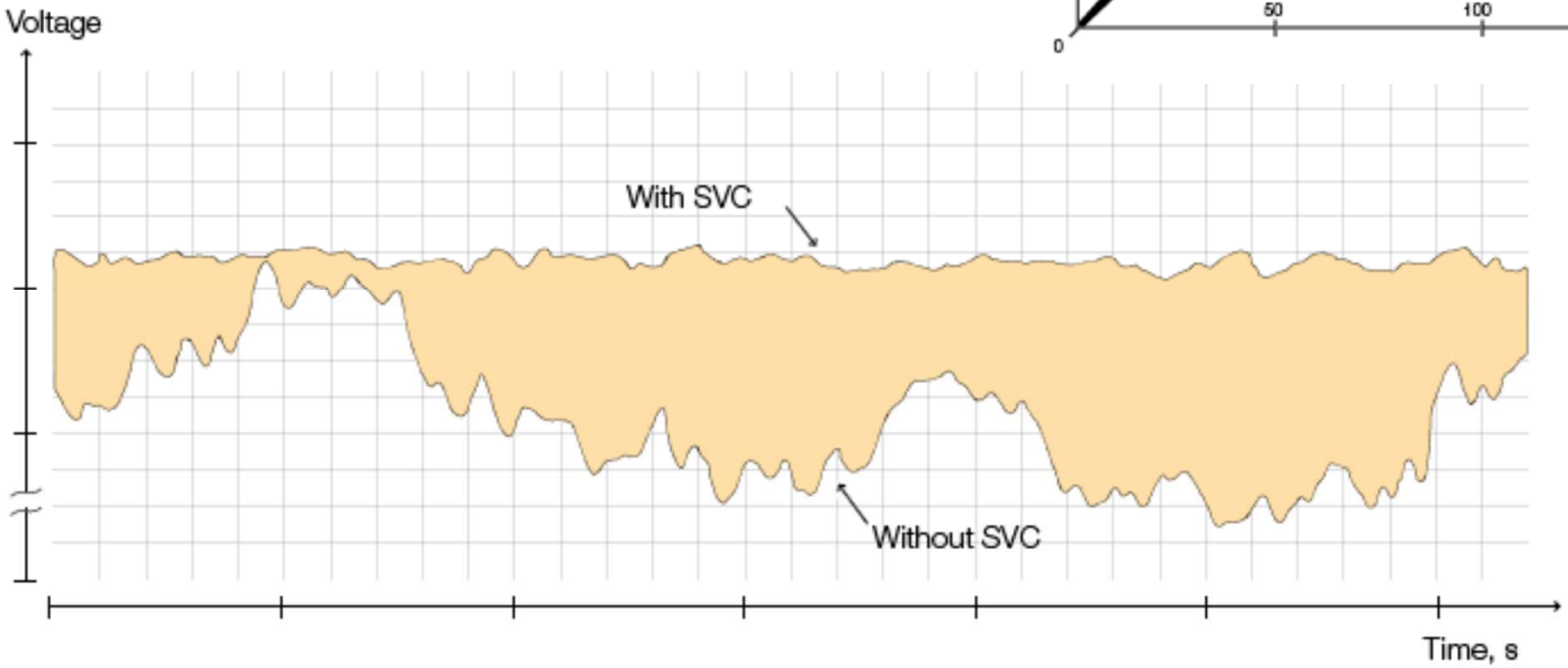
- **Anglie (Londýn – Dover)**
  - **1 x SVC -80/+170 MVAr (-L/+C) na 33 kV**
    - **symetrizace napětí na 400 kV (až 140 MVA mezifázově, u_2 = 2 %)**
    - **nesymetrické řízení SVC → u_2 = 0,1 %**
    - **zároveň kompenzace účiníku na 1**



Aplikace – SVC

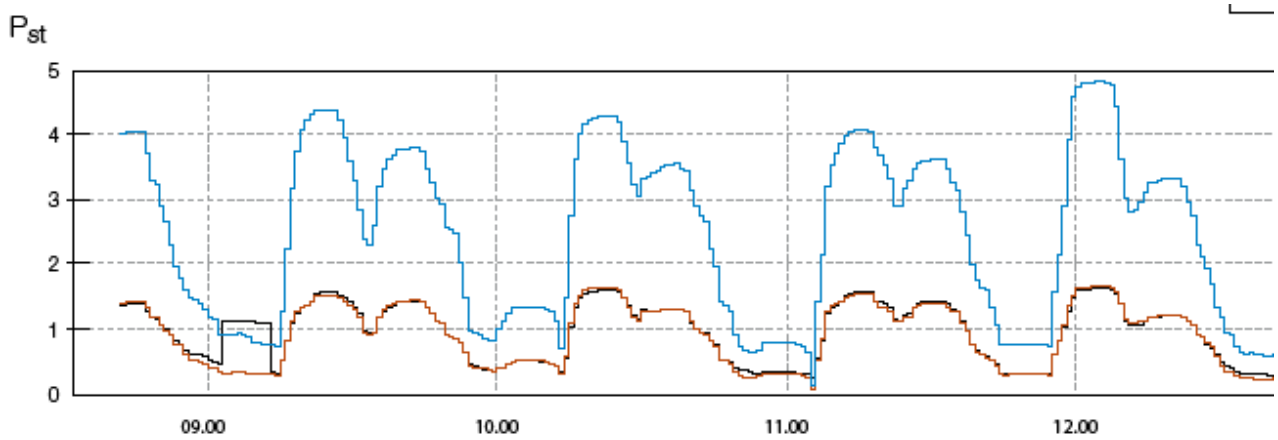
- **Průmysl – stabilizace provozu EAF, rychlá kompenzace náhodných změn Q**
  - stabilizace napětí
    - kratší doba tavení
    - nižší ztráty
    - menší opotřebení elektrod
  - kompenzace účiníku
  - symetrizace, redukce harmonických
    - vlivy na DS





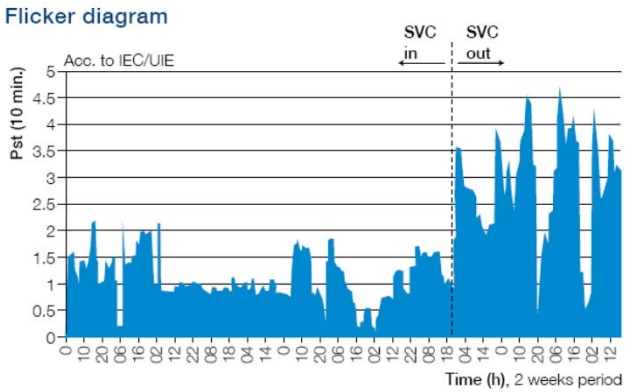
Aplikace – SVC

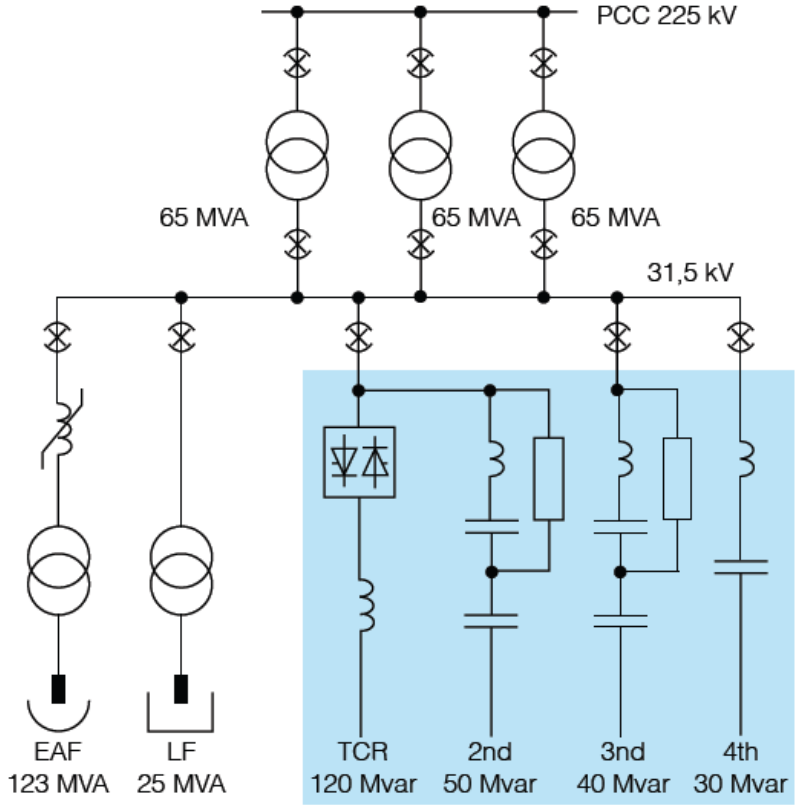
- **Průmysl – stabilizace provozu EAF, rychlá kompenzace náhodných změn Q**
  - **omezení flickeru (až 2,5x)**



- **Francie**
  - **SVC 0-120 MVAr kap, 225 kV, P_{ST} = 4**

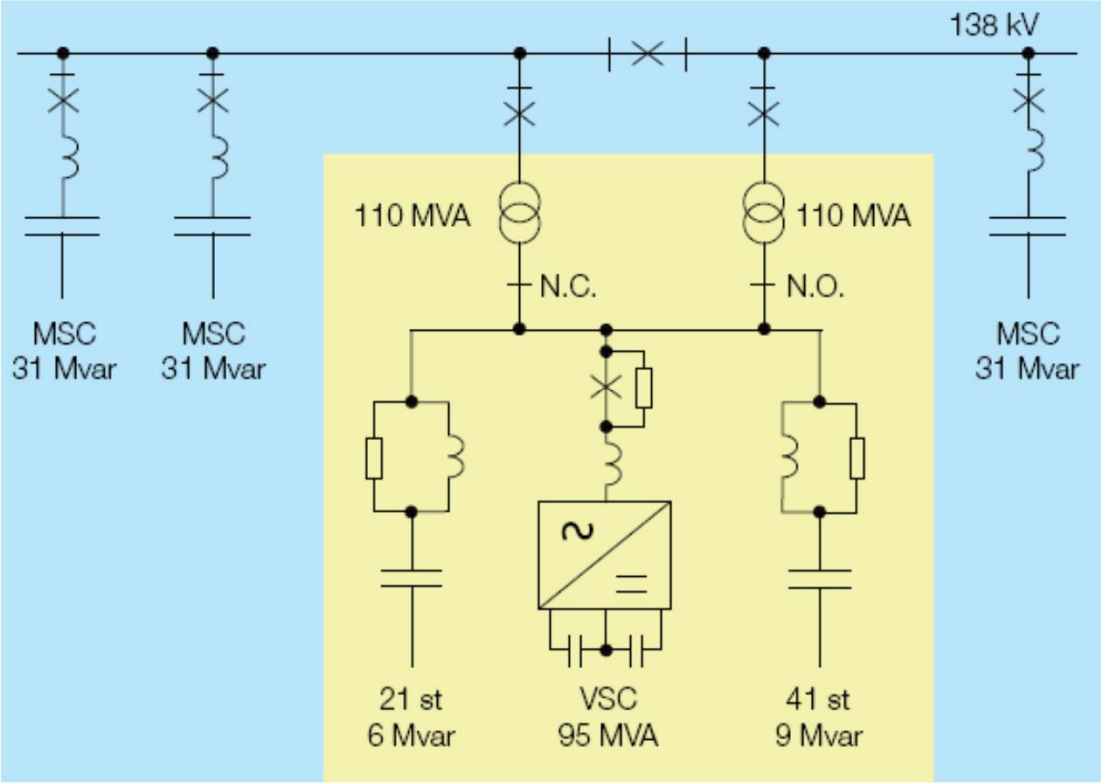
Technical data, SVC	
Controlled voltage	31,5 kV
Dynamic range	0-120 Mvar capacitive
Flicker reduction factor at the P.C.C.	> 2
Power factor correction at the P.C.C.	P.F. ≥ 0,93
Total harmonic distortion at the P.C.C.	≤ 4,5%

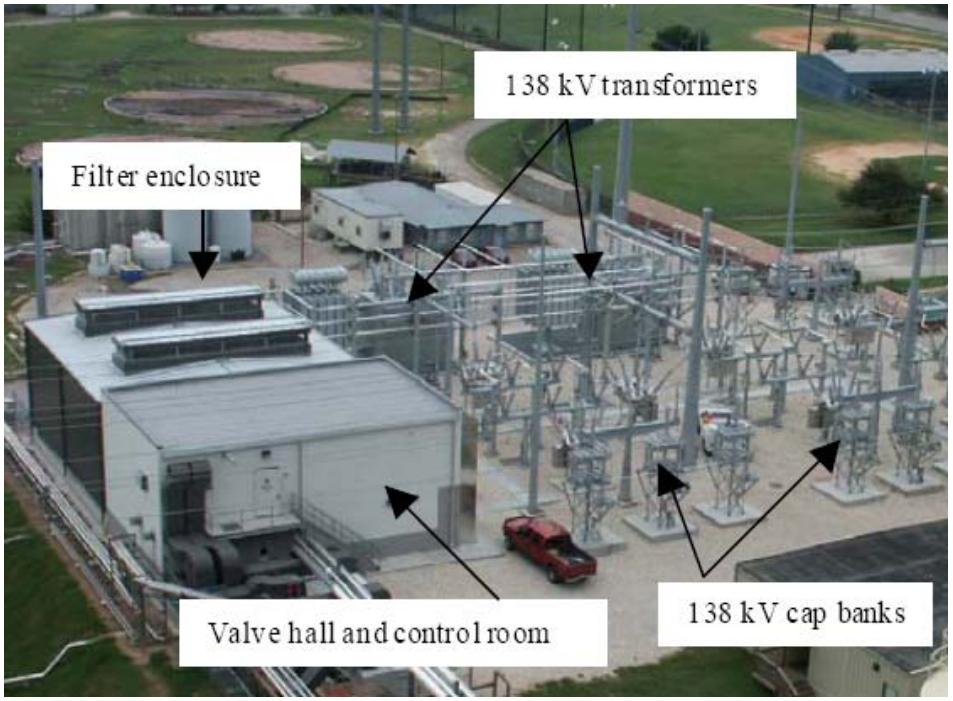




Aplikace – STATCOM

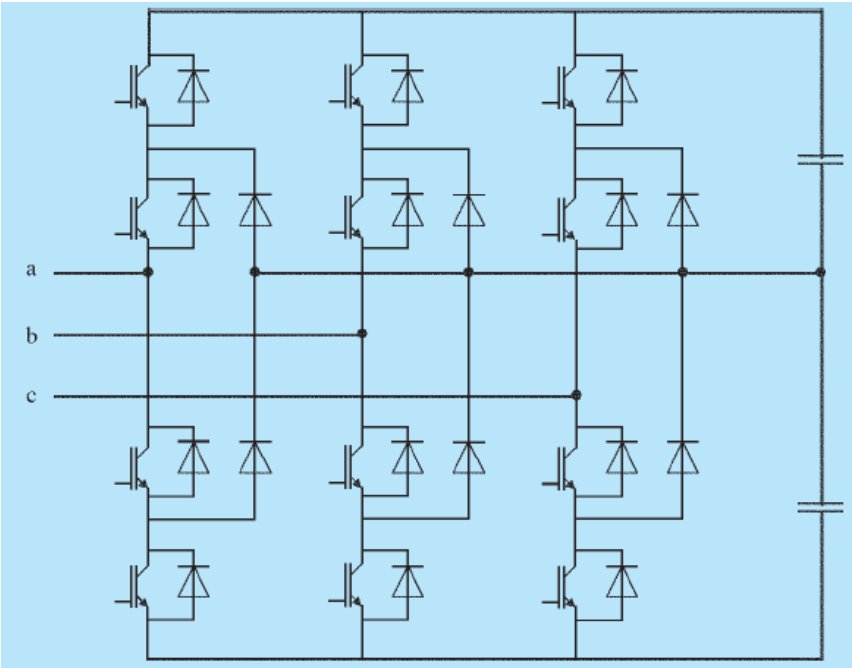
- **Texas, USA**
  - **odstavena lokální elektrárna, potřeba mít podporu napětí**
  - **STATCOM zvolen kvůli prostoru a hluku (možnost uzavření filtrů)**
    - **-80/+110 MVAr na 138 kV**
    - **VSC symetricky +/- 95 MVAr**
    - **IGBT řetězce na 32 kV**
    - **PWM na 21. harmonické**

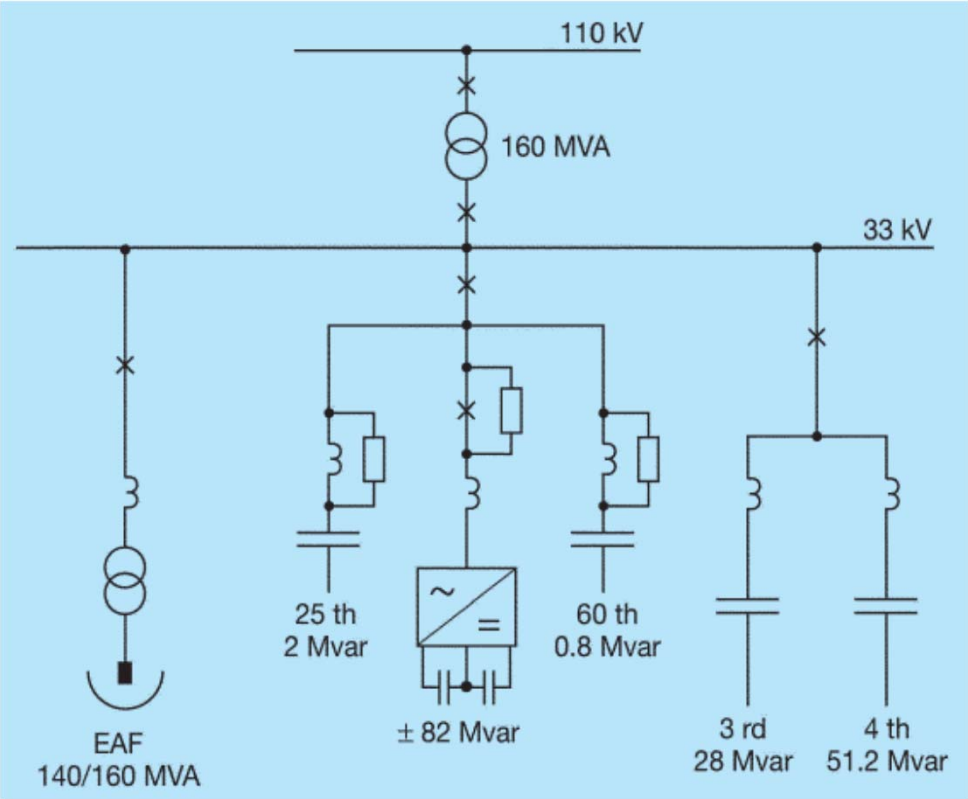




Aplikace – STATCOM

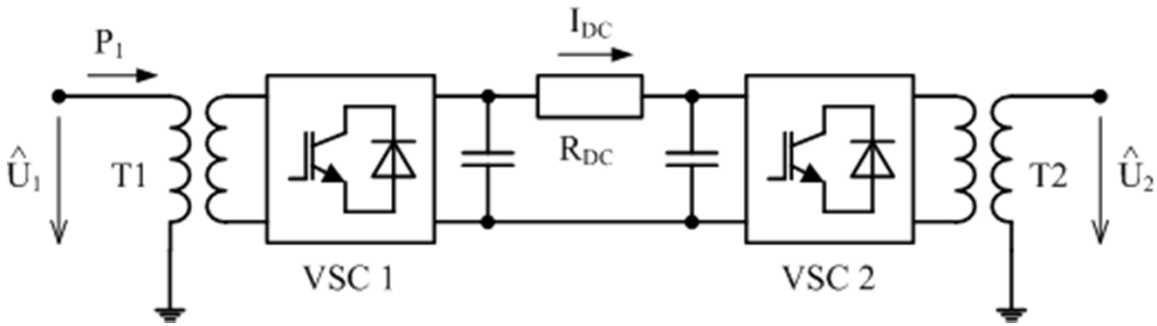
- Outokumpu, Finsko
  - zlepšení kvality el. energie od EAF v DS i v železárnách
  - STATCOM
    - 0-164 MVAr na 33 kV
    - VSC symetricky +/- 82 MVAr, 3-úrovňový
    - PWM na 33. harmonické
    - snížení flickeru až 4,5x
  - omezení flickeru, harmonických, nesymetrie, jalového odběru





HVDC

- vzdálené přenosy
- propojování soustav
- podmořské kabely
- připojení odlehlých zdrojů
- zásobování měst a ostrovů
- tyristory x IGBT

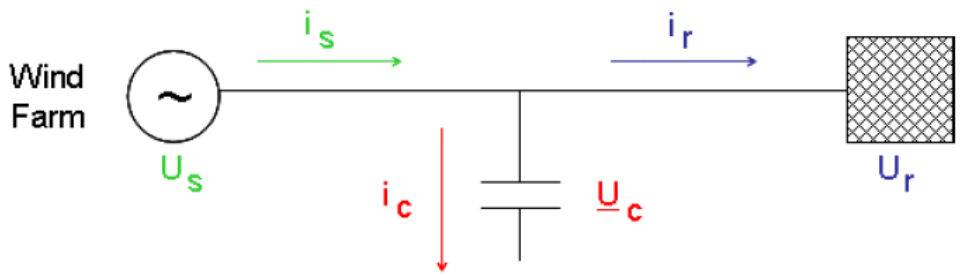


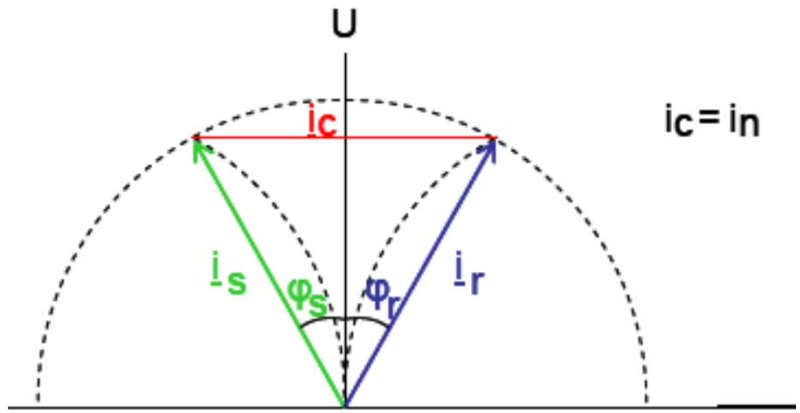
Kritická délka vedení

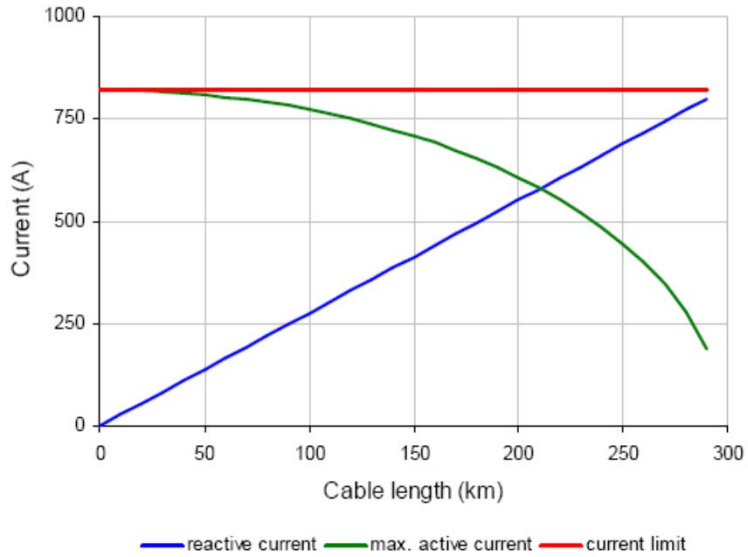
- vedení – $Q_C \sim U^2$, $Q_L \sim I^2$
- $Q_{Ckab} \sim 20 \div 50\ Q_{Cven}$
- kritická délka: $I_{nabíjecí} = I_{n(max)}$

$$I_\Sigma = \sqrt{I_P^2 + I_Q^2}$$

- d_{krit}: $P_{max} = U_C I_n \cos 30° = 87\%\ S_n$
- $d_{krit}/2$: $P_{max} = U_C I_n \cos 15° = 97\%\ S_n$
- $2*d_{krit}$: $P_{max} = 0$
- „dlouhá vedení“
  - kabel d > 100 km
  - venkovní d > 400 km
- řešení
  - kompenzace (SVC, STATCOM) podél vedení
  - HVDC

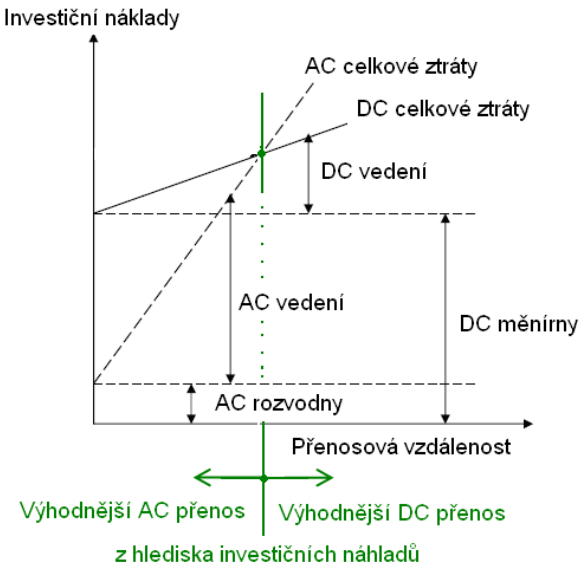


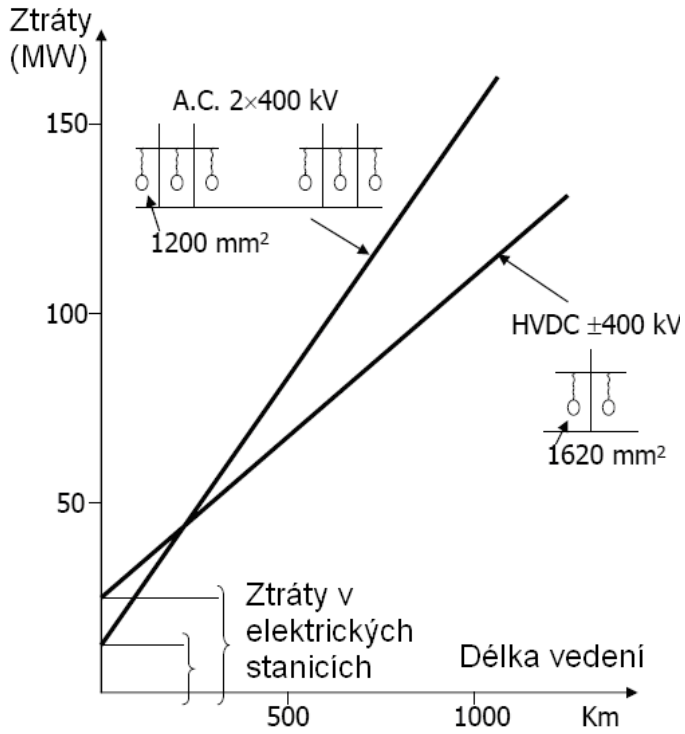




HVDC - důvody použití

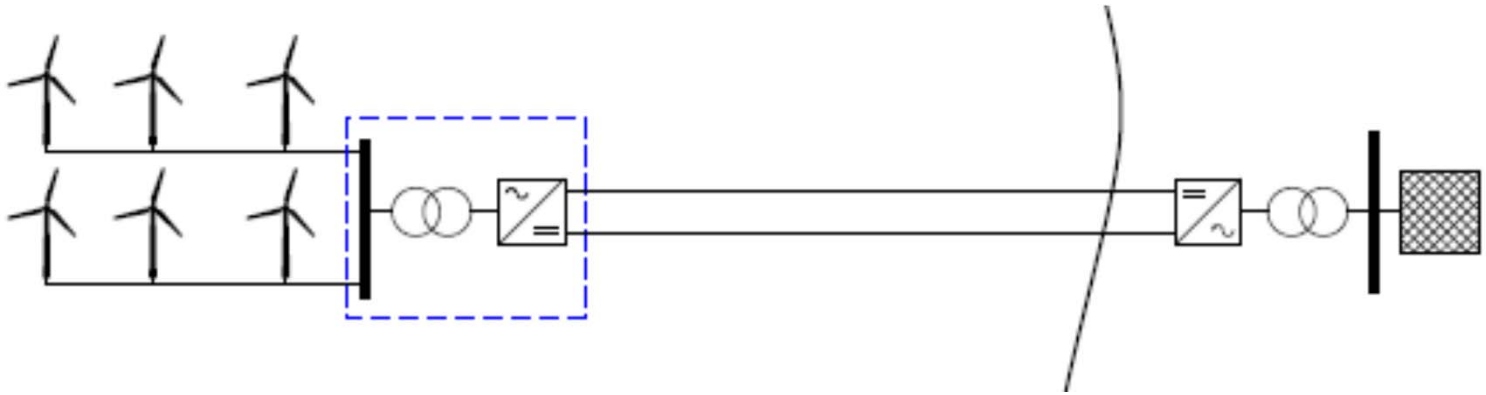
- **ekonomické**
  - DC vedení i kabely levnější než AC při stejné přenos. kapacitě
    x DC rozvodny dražší, tj. existuje ekonomický zlom (venkovní 500 – 1000 km, kabel 50 – 125 km)
  - neteče Q – nižší ztráty, přenos. kapacita neklesá s délkou
- **technické**
  - možné propojení nesynchronních částí sítě
  - DC kabel nemá kritickou délku, netřeba příčná kompenzace podél vedení
- **environmentální**
  - menší venkovní vedení, možnosti kabelů
  - větší přenosová kapacita v daném koridoru





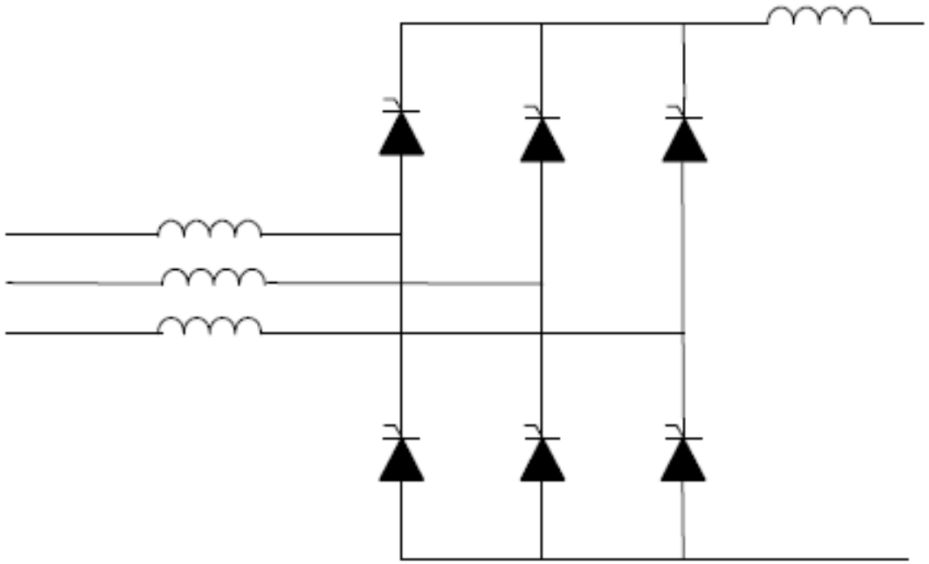
HVDC - výhody

- nezávislý provoz propojených systémů
- plná řiditelnost toku P
- nepřenáší se poruchy a rychlé poklesy napětí



LCC HVDC (Line Commutated Converters)

- tyristorový můstkový měnič (6, 12 pulzní)
- potřeba AC napětí (stimulace proudu, komutace)
- proud teče ventily pouze jedním směrem
- vždy absorbuje Q (usměrňovač i střídač)
- nutné AC filtry (harm., Q)
- poruchy komutace zejména na invertoru při poklesu U_{AC}



LCC HVDC - komponenty

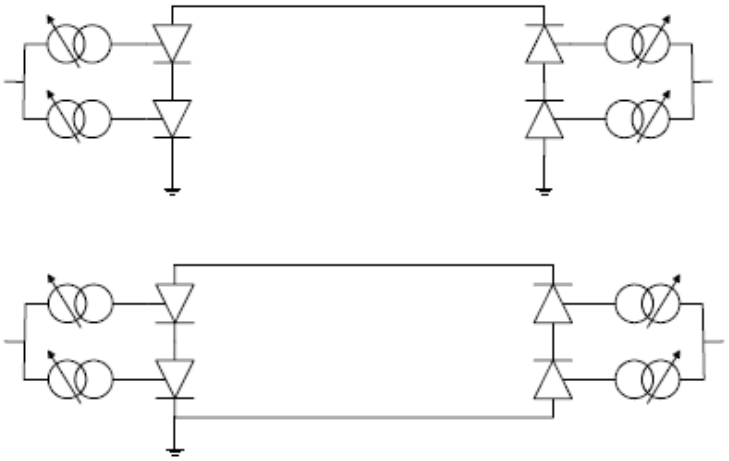
- transformátor
  - odolat mixu AC a DC namáhání
  - pracovat při vyšším harmonickém namáhání
  - obvykle s přepínačem odboček
- kompenzace Q – filtry, bloky C, SVC, STATCOM,…
- AC filtry
- vyhlazovací L na DC straně – tlumí harmonické na DC
- řízení a telekomunikace mezi DC konci
- DC kabely – vydržet změnu polarity napětí při reverzaci P toku

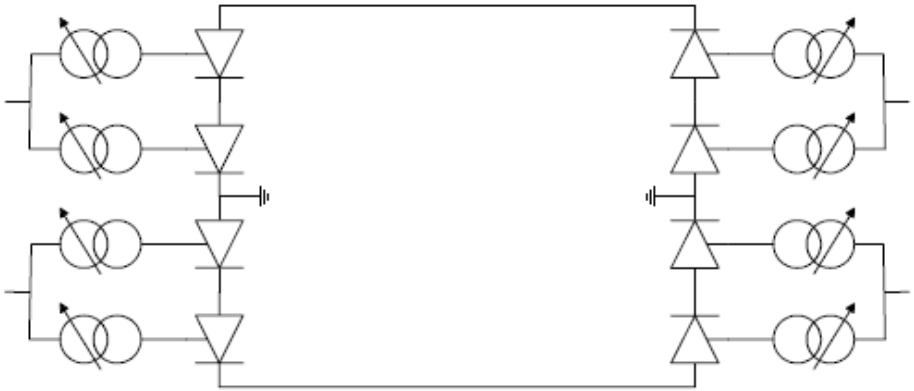
LCC HVDC - provoz

- zkratový výkon soustavy Sks min. cca 2,5 Sn, jinak napěťová nestabilita, poruchy komutace
  - Sks zvýšit synchr. kompenzátorem, U pomocí SVC (STATCOM)
- nepřispívá do zkratu
  - (+) silné sítě, (-) slabé sítě (proud pro ochrany)
- jeden směr DC proudu kvůli tyristorům
  - reverzace P změnou polarity U_{DC} (2 kvadranty)
- nemůže pracovat při P < 5-10% Pn
  - DC harmonické by vypínaly tyristory
- oba konce spotřebovávají Q ~ 0,5P
- ztráty měniče cca 0,8% P

LCC HVDC - systémy

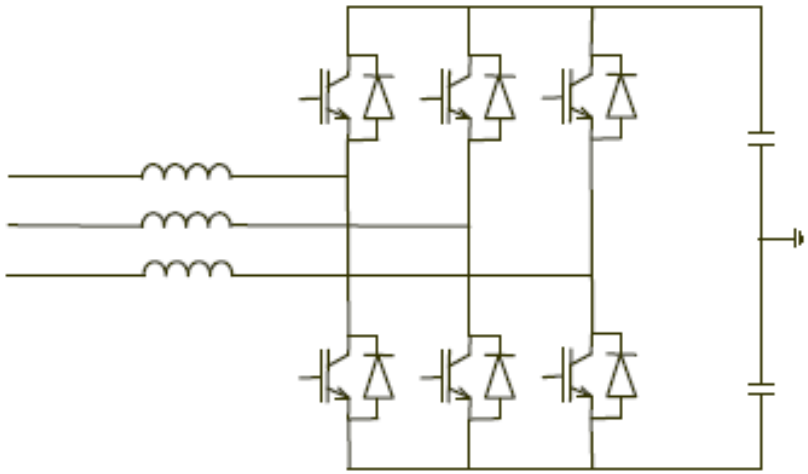
- back-to-back
- monopolární
  - jednoduché, ztráty v zemi < v kabelu (x koroze, pole)
  - nověji zpětný vodič
- bipolární
  - 2 nezávislé póly, bez 1 pólu se zemí 50% P
- dim. (jen na souši – prostor na filtry, L)
  - 150-3000 MW, 180-500 kV (vývoj 800 kV, 6000 MW)

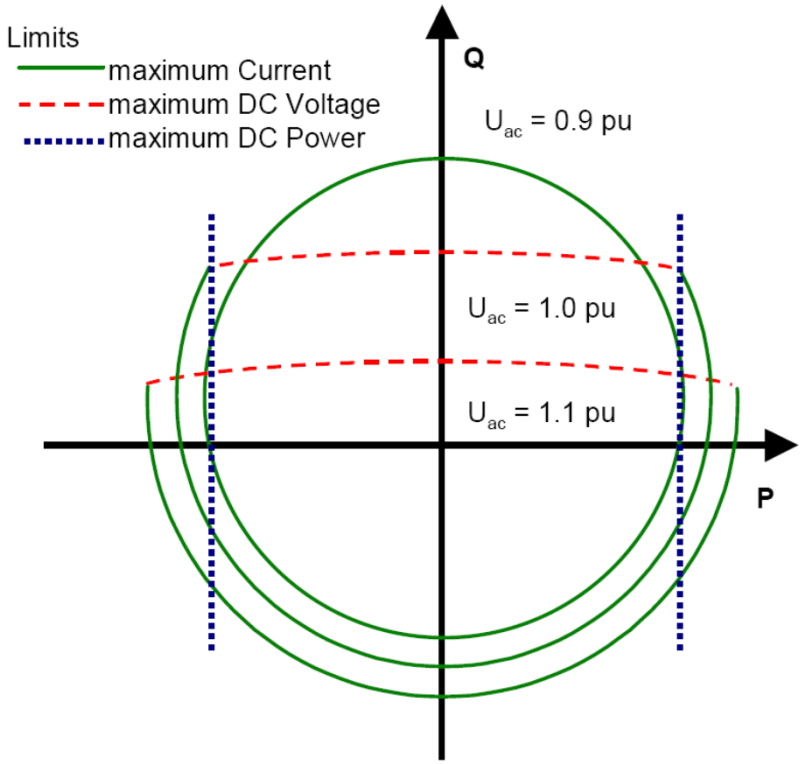




VSC HVDC (Voltage Sourced Converters)

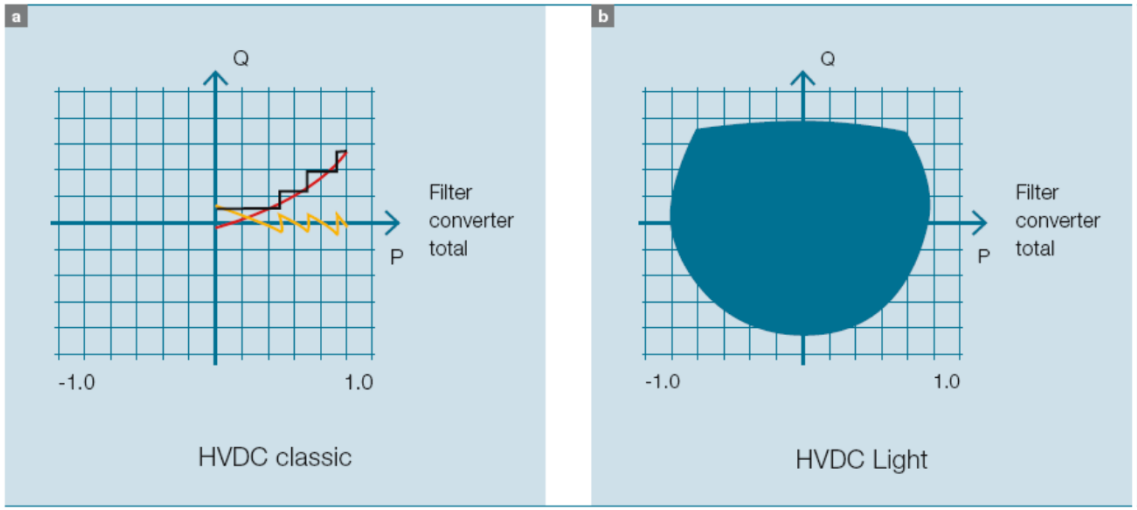
- můstkový měnič s vypinatelnými součástkami
  - nejvíce IGBT (PWM 1-2 kHz)
  - 3f AC napětí určuje nezávislou reg. P, Q
  - netřeba C kompenzace
- filtry
  - díky PWM na vyšší f – menší
  - ne pro Q kompenzaci (nespínané)
  - multilevel – méně filtrů, lepší sin
- AC tlumivka
  - tlumí transienty, stabilní provoz VSC
- DC kapacita





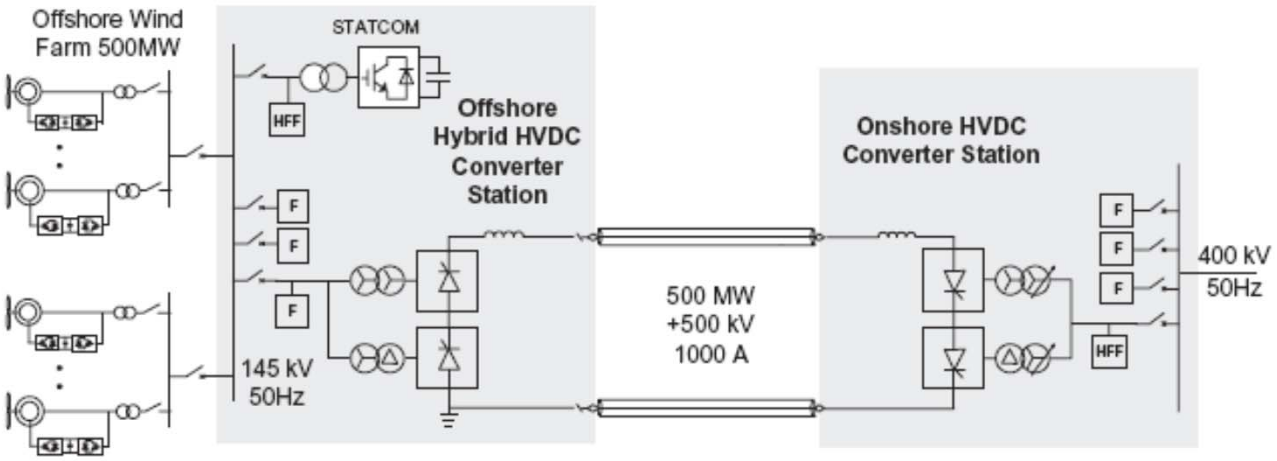
VSC HVDC

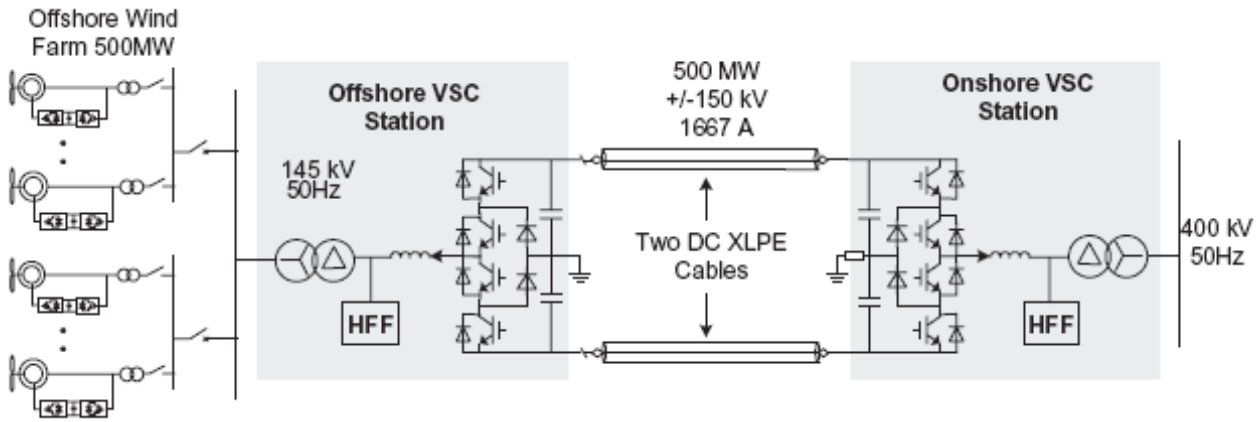
- řídicí systém
  - napětí měničů ovlivňuje: 1 – U, 2 – P, oba – Q
- DC kabely
  - stálá polarita U_{DC}
  - možné polymer. kabely (levnější)
- provoz
  - 4 kvadranty (P, Q nezávislé)
  - příspěvek do zkratu až do In
  - nepotřebuje AC napětí – i pro pasivní síť
- ztráty
  - vyšší než u LCC (IGBT > tyristory, PWM, více součástek)
  - měnič cca 2% P x minimum Q



HVDC (VSC x LCC)

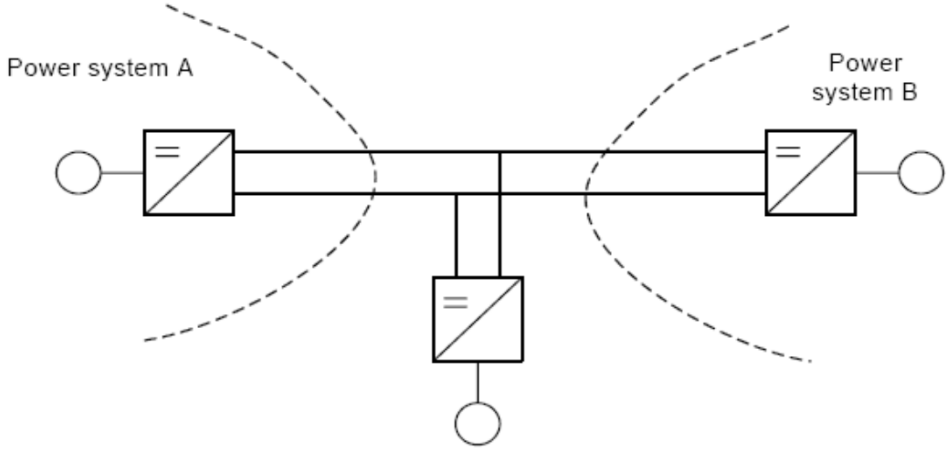
- **2 kabely**
  - **LCC až 1400 MW při ±500 kV**
  - **VSC až 500 MW při ±150 kV (bud. 1000 MW při ±300 kV)**





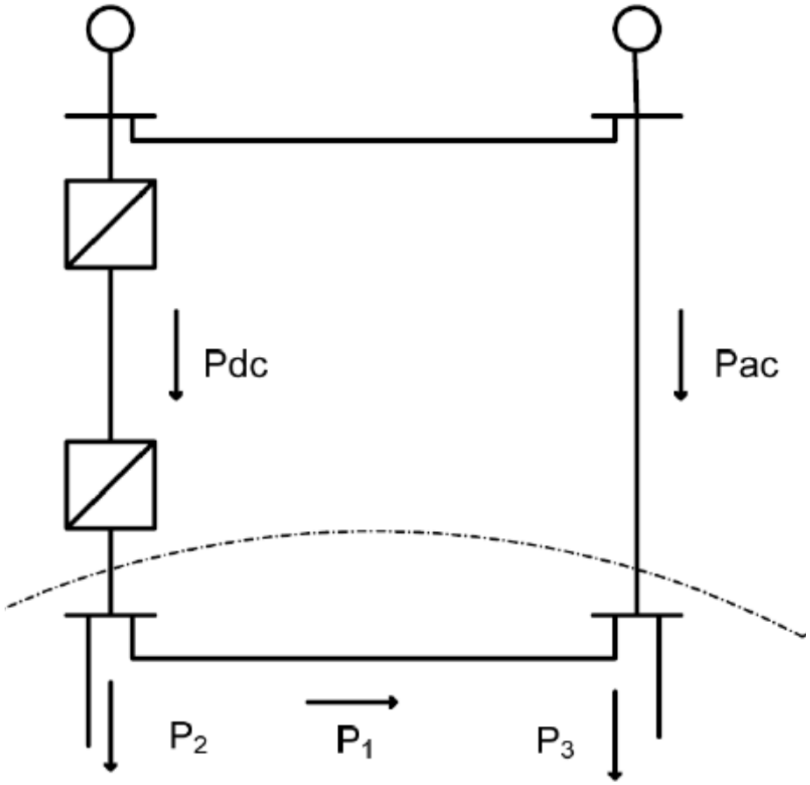
Multi-terminal HVDC

- klasicky 2 měniče s jedním DC spojením
- lze i více měničů – jeden reg. U, ostatní tok P
- možné LCC i VSC (ve světě 2xLCC, 1xVSC ve výstavbě)
- výhody VSC
  - bez chyb komutace a nutného restartu celého systému
  - provoz nezávisí na Sks
  - reverzace bez změny polarity U_{DC} (u LCC speciální design)
  - bez nutné telekomunikace



Paralelní HVDC a AC

- rozdělení výk. toků řízením HVDC
- s VSC navíc i reg. U
- např. při rozšiřování VTE
  - HVDC plně řídí P – bez kruhových toků
- AC posílí offshore síť
  - i pro LCC



Výhody HVDC pro VTE

- možnost asynchronního chodu (AG)
- porucha sítě se nepřenese k VTE
  - lepší překonání poruch bez odpojení
  - během poruchy nárůst f u VTE, AC síť nepřijme P
  - speciální řídicí opatření na měničích nebo přídavný odporník
- tlumí výkonové oscilace – normální provoz VTE
- výhody VSC
  - nevyžaduje komutační napětí
  - pracuje plynule při jakémkoliv toku P
  - bez poruch komutace
  - menší (kompaktnější) stanice než u LCC
  - pro AC síť jako gen. bez J, malý příspěvek do zkratu