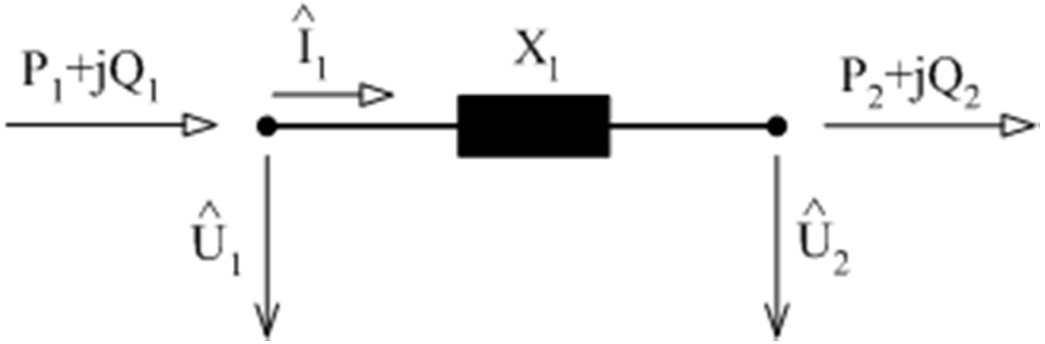
Systémy FACTS a HVDC v elektroenergetice

Přenos výkonu

- Omezení
  - tepelné (proud)
  - dielektrické (napětí)
  - stabilita (statická, dynamická)
- Řízení toků výkonů
  - impedance linky X
  - úhel přenosu δ
  - napětí U, φ
  - injekce P,Q

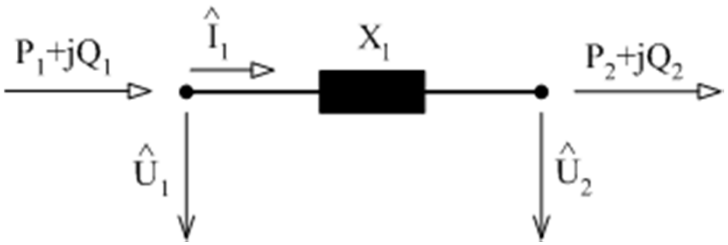


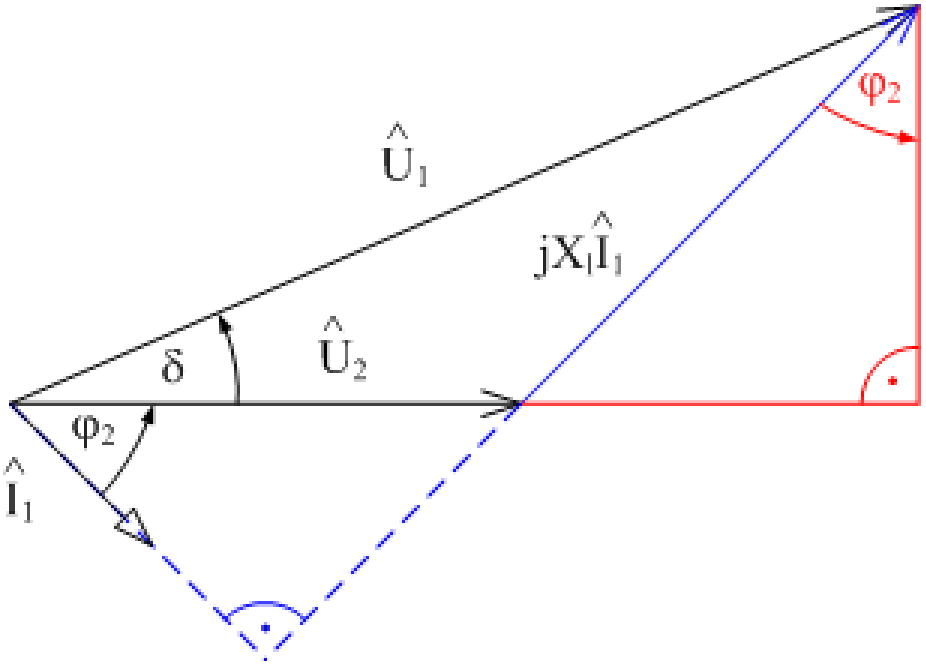
$$\hat{S}_1 = \hat{U}_1 \cdot \hat{I}_1^* = P_1 + jQ_1$$

$$P_1 = \mathrm{Re}\left\{\hat{U}_1 \cdot \left(\frac{\hat{U}_1 - \hat{U}_2}{jX_1}\right)^*\right\}$$

$$Q_1 = \mathrm{Im}\left\{\hat{U}_1 \cdot \left(\frac{\hat{U}_1 - \hat{U}_2}{jX_1}\right)^*\right\}$$

Výkonové toky – činný výkon





$$P_2 = U_2 I_1 \cos\varphi_2$$

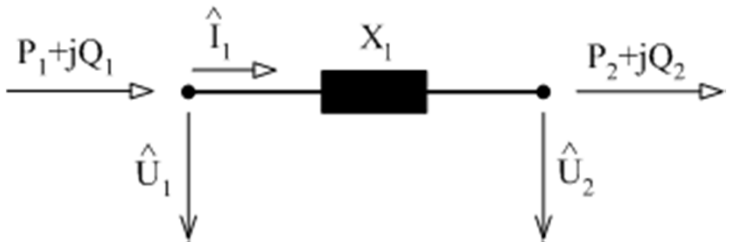
$$X_1 I_1 \cos\varphi_2 = U_1 \sin\delta$$

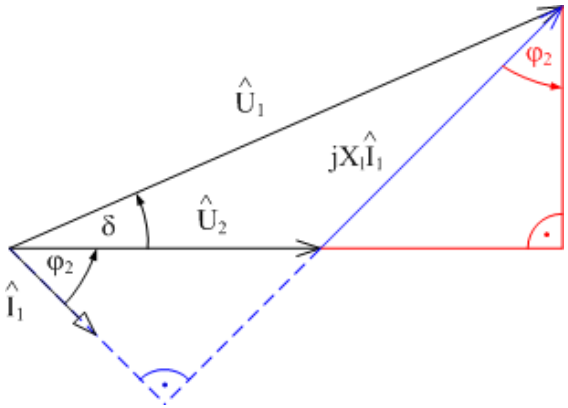
$$I_1 \cos\varphi_2 = \frac{U_1}{X_1}\sin\delta$$

$$P_2 = \frac{U_1 U_2}{X_1}\sin\delta = P_1$$

- **Pro zvýšení přenášeného činného výkonu**
  - **zvýšit amplitudy uzlových napětí na koncích vedení (regulace napětí)**
  - **snížit reaktanci vedení (sériová kompenzace)**
  - **zvýšit úhel přenosu (fázový posun)**

Výkonové toky – jalový výkon





$$Q_2 = U_2 I_1 \sin\varphi_2$$

$$X_1 I_1 \sin\varphi_2 + U_2 = U_1 \cos\delta$$

$$I_1 \sin\varphi_2 = \frac{U_1}{X_1}\cos\delta - \frac{U_2}{X_1}$$

$$Q_2 = \frac{U_1 U_2}{X_1}\cos\delta - \frac{U_2^2}{X_1}$$

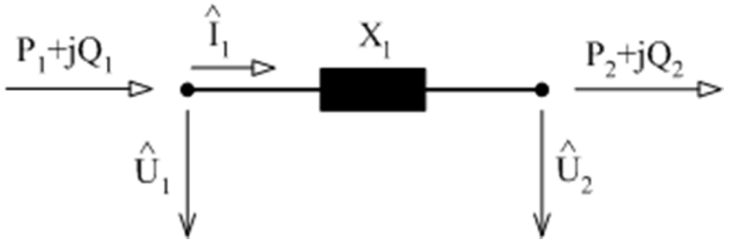
$$Q_1 = Q_2 + X_1 I_1^2$$

$$Q_1 = \frac{U_1 U_2}{X_1}\cos\delta - \frac{U_2^2}{X_1}$$

$$+\frac{1}{X_1}\left(U_1^2 + U_2^2 - 2U_1 U_2 \cos\delta\right)$$

$$Q_1 = \frac{U_1^2}{X_1} - \frac{U_1 U_2}{X_1}\cos\delta$$

P-Q diagram přenosu

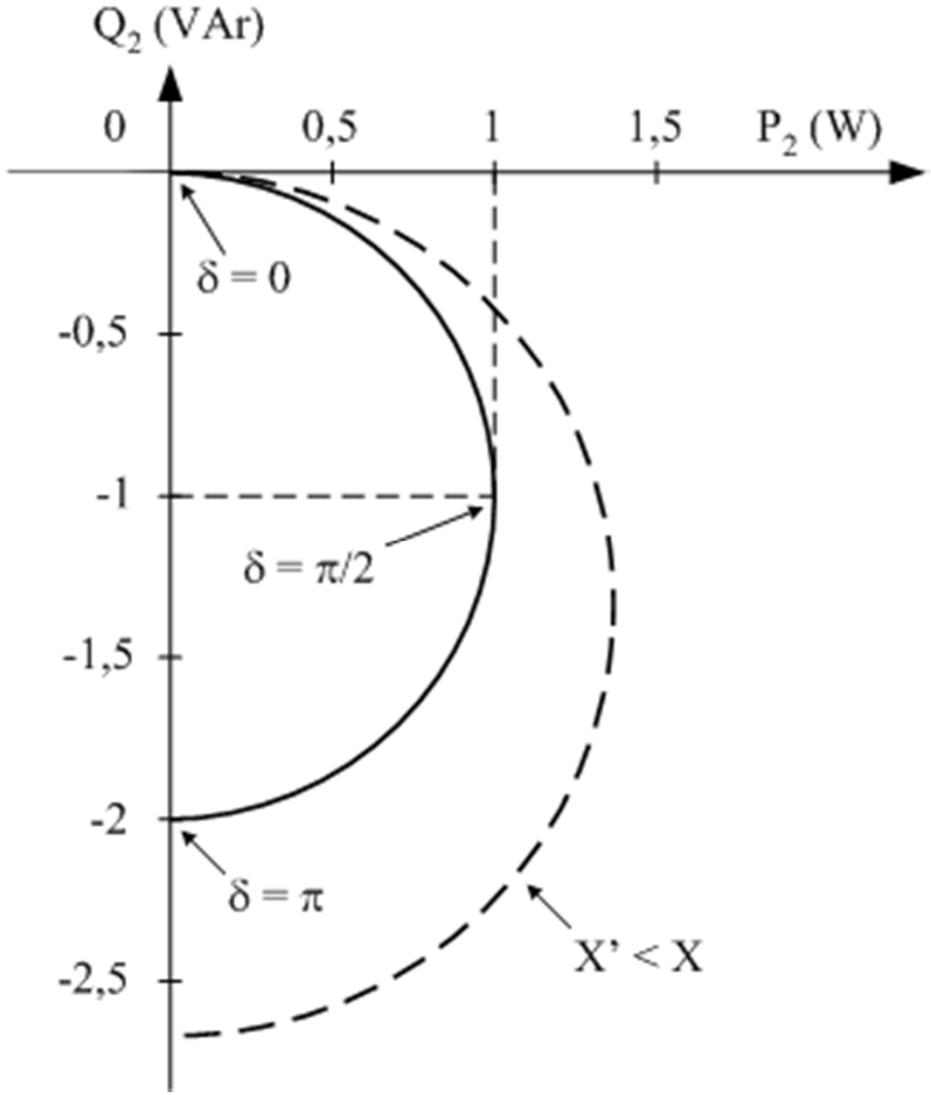


$$P_2 = \frac{U_1 U_2}{X_1} \sin\delta$$

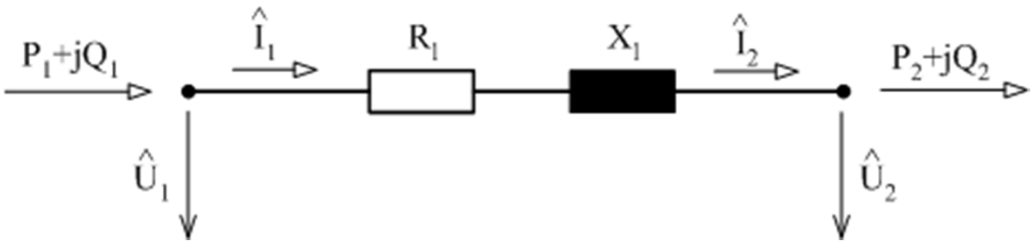
$$Q_2 = \frac{U_1 U_2}{X_1} \cos\delta - \frac{U_2^2}{X_1}$$

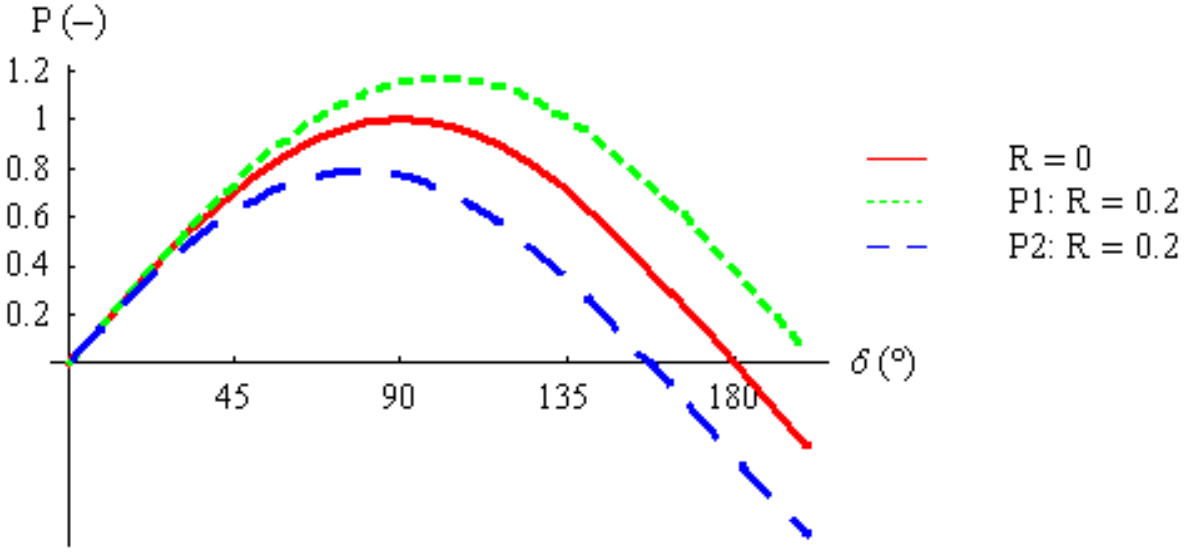
$$\left(P_2(\delta)\right)^2 + \left(Q_2(\delta) + \frac{U_2^2}{X}\right)^2 = \left(\frac{U_1 U_2}{X}\right)^2$$

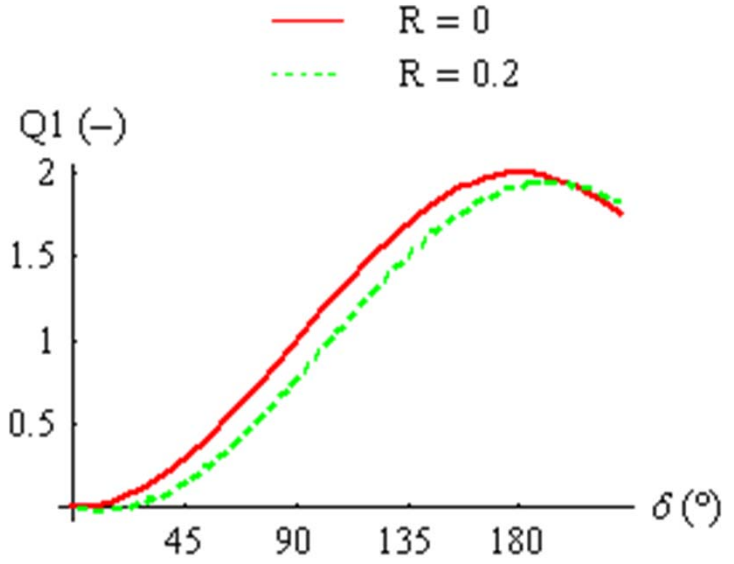
kružnice $S\left(0, -\frac{U_2^2}{X_1}\right)$, $r = \frac{U_1 U_2}{X_1}$

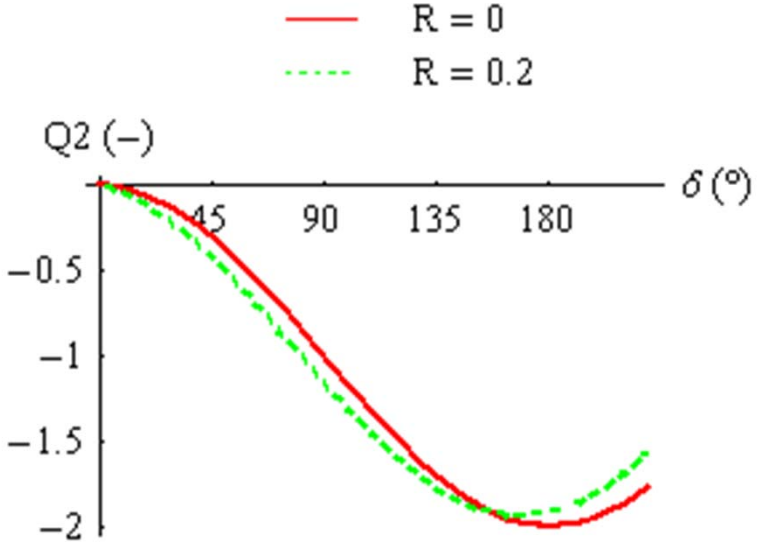


Vliv odporu linky - charakteristiky



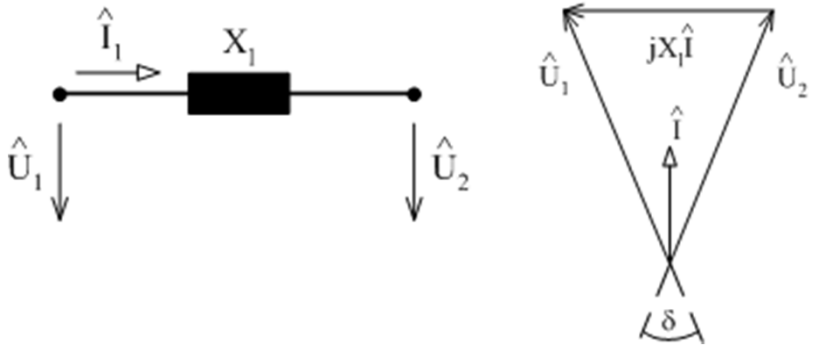




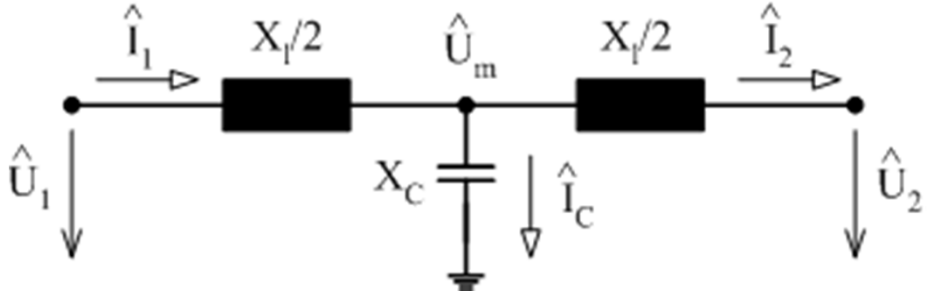


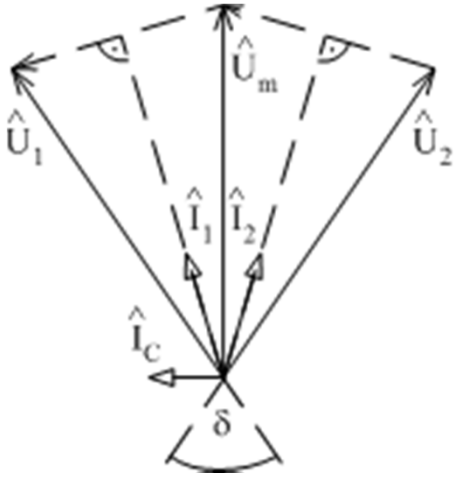
Principy řízení - pasivní

- **Předpoklady**
  - bezeztrátové vedení
  - konstantní U na koncích vedení
  - prvek uprostřed vedení

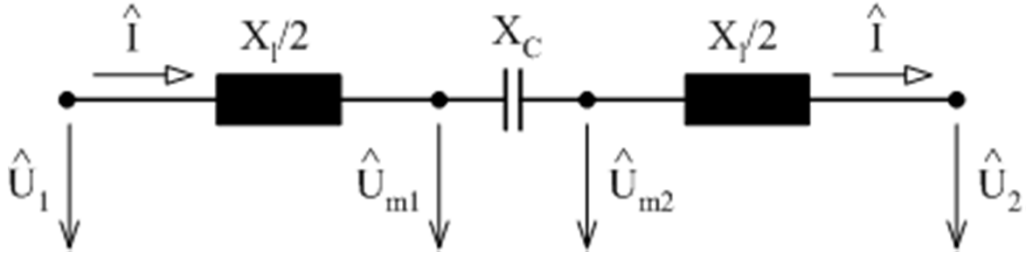


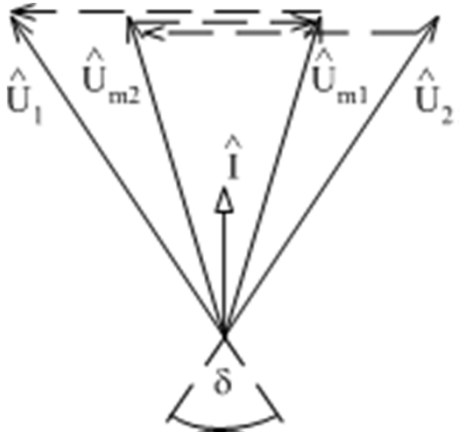
- **Paralelní**





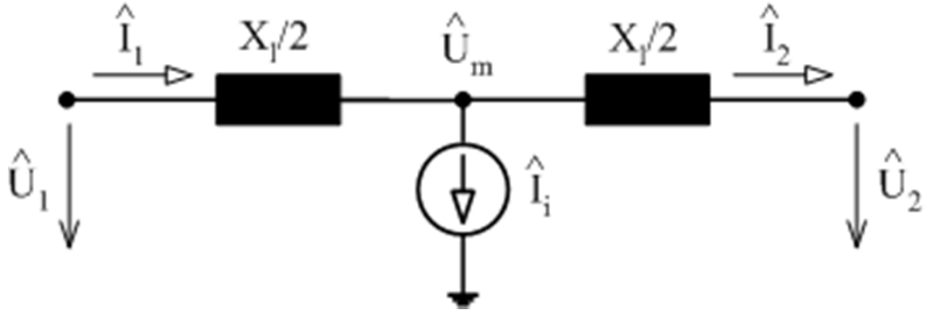
- **Sériové**

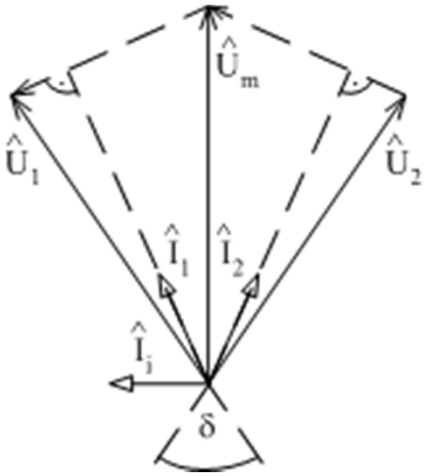




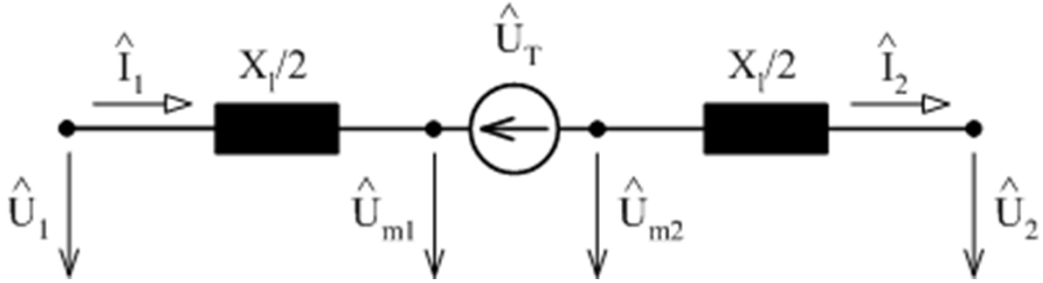
Principy řízení - aktivní

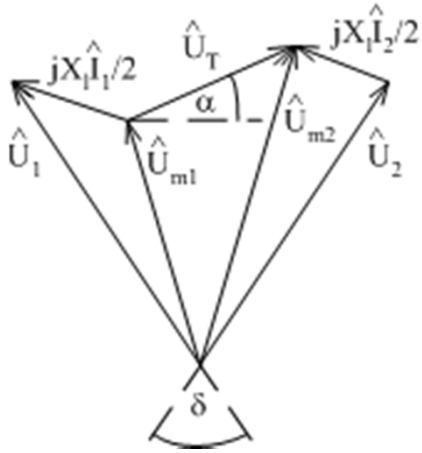
- **Paralelní**





- **Sériové**



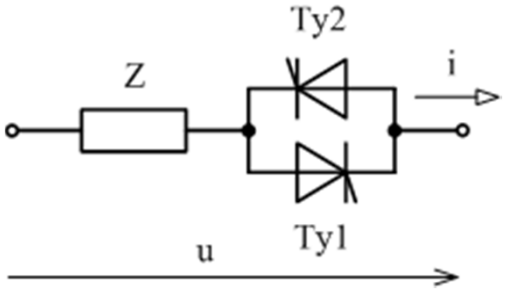


Co jsou FACTS?

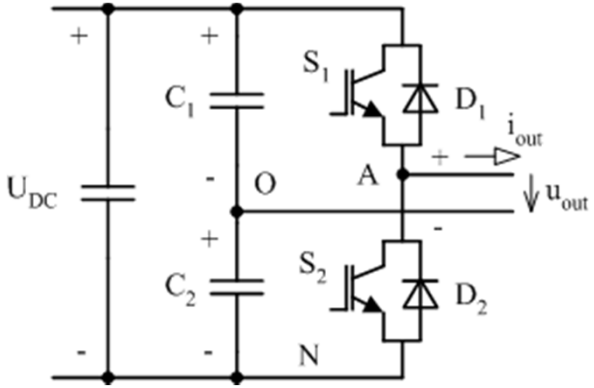
- **FACTS = Flexible AC Transmission Systems**
- **IEEE:**
  - **FACTS: Střídavé přenosové systémy integrující regulátory statické a založené na výkonové elektronice za účelem zlepšit řiditelnost a zvýšit přenosové schopnosti soustav.**
  - **FACTS kontrolér: Zařízení výkonové elektroniky nebo statické, které umožňuje řízení jednoho nebo více parametrů AC přenosového systému.**
- **Výhody**
  - **rychlá odezva na požadavek**
  - **častá změna výstupu**
  - **plynule nastavitelný výstup**
- **Využití**
  - **Řízení výkonových toků (P,Q) – congestion management (propustnost sítě)**
  - **Zvýšení přenosových kapacit linek (k tepelným limitům)**
  - **Zvýšení bezpečnosti (vyšší limity stability, omezení zkratových proudů a přetížení, tlumení oscilací)**
  - **Regulace napětí**
- ***Řízené veličiny (U, I, X, P, Q) provázané, některé dominantní***

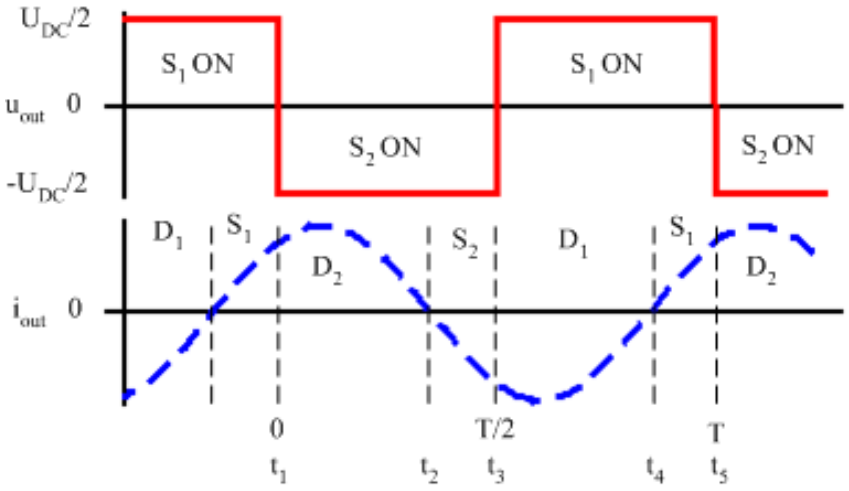
Měniče

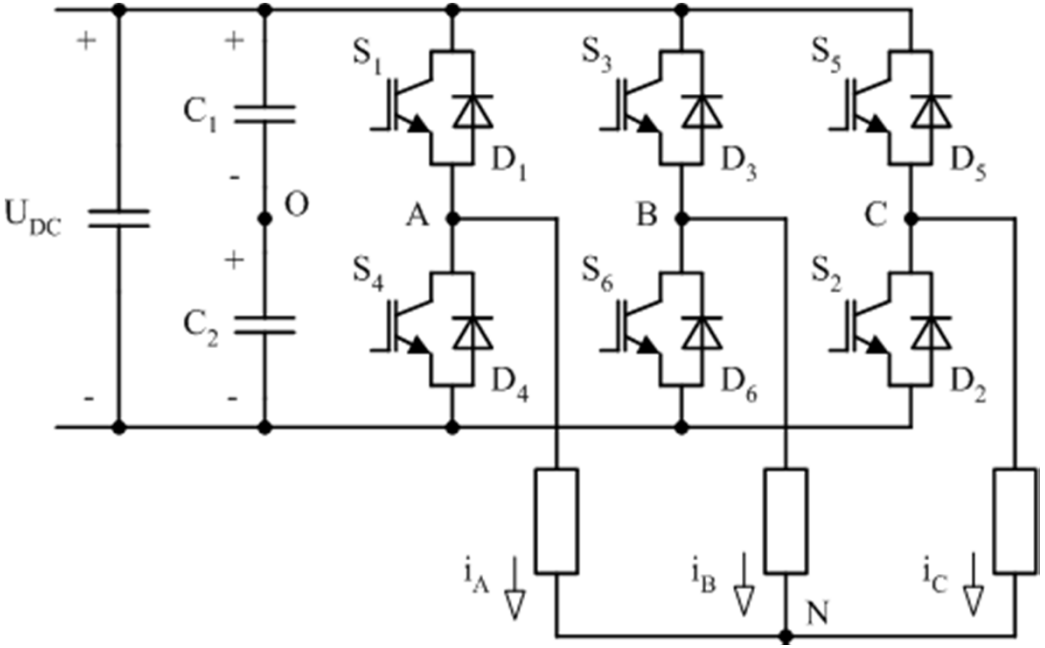
- **Tyristorová jednotka**



- **Trojfázové měniče (VSC)**





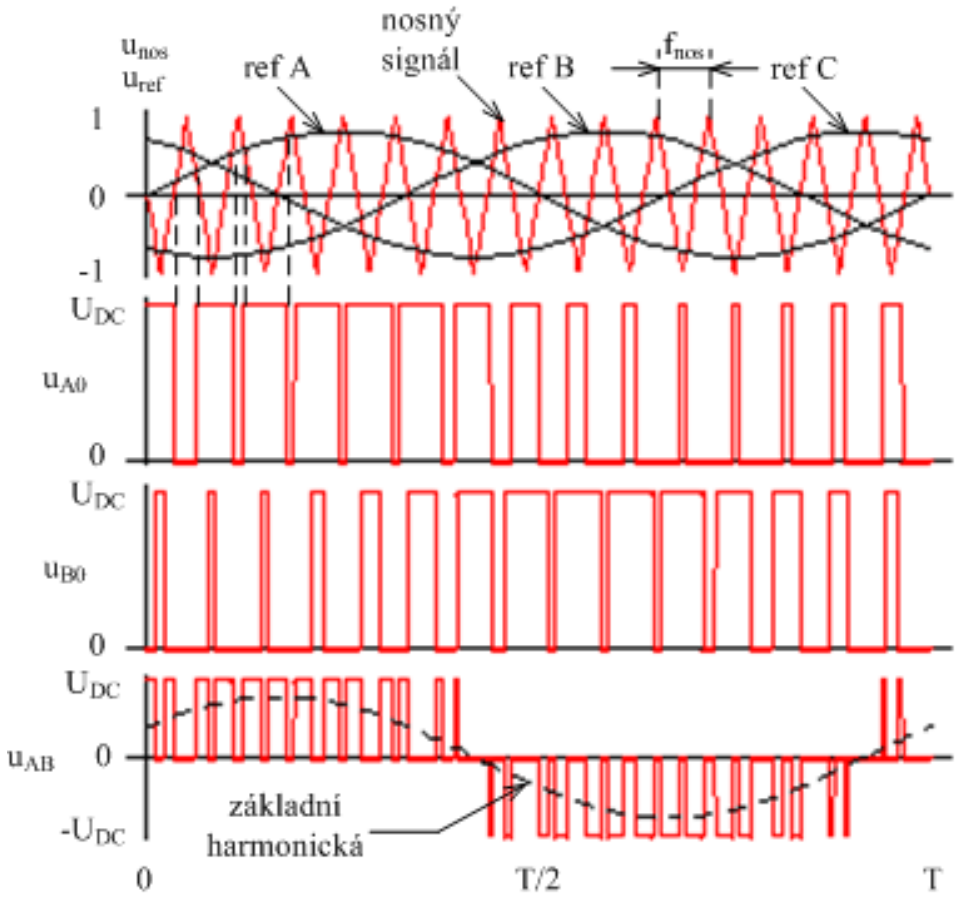


VSC (Voltage Source Converter)

- Vypinatelné součástky (GTO, IGBT, IGCT)
- Výstupní napětí závislé na Udc
  - měnit Udc tokem P přes měnič
  - PWM
- Vyšší harmonické → filtry
- ss obvod – velká kapacita C nebo DC zdroj (ss napětí 1 polarity)
  - C – I kolmo na U → jen Q (řízeno amplitudou výstupního napětí)
  - zdroj – lib. fáze → P,Q (nezávislé řízení amplitudou a fází výstupního U)
- ss proud oběma směry, tj. jako usměrňovač i střídač
  - diody usměrňují, vyp. součástky střídají
  - při cos φ = 1 proud pouze jedním typem součástek
  - AC proud není přerušen při vypnutí vyp. souč., ale je veden jinou součástkou
- Do soustavy přes trafo (převod, reaktance)
  - paralelně – ind., kap. proud → regulace U
  - sériově – injekce napětí → regulace P,Q
- Pro vyšší výkony sériové a paralelní řazení součástek

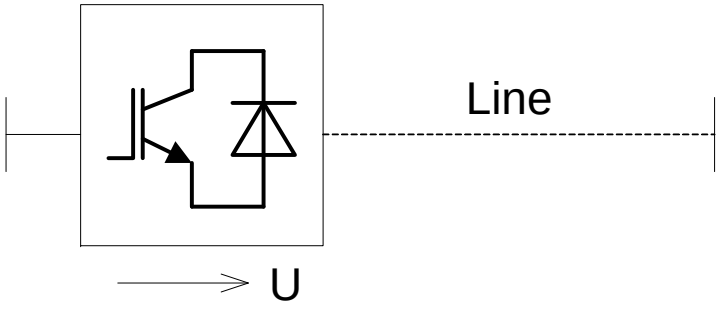
Pulzně šířková modulace

- PWM (Pulse width modulation)
  - volitelné U_{max}, φ, f = 50 Hz
- Porovnání referenčního (50 Hz) a nosného signálu (100x Hz až 1x kHz)
  - generován modulovaný obdélníkový signál, který řídí spínače v jednotlivých větvích
- Vyšší spínací ztráty
- Snížení harmonických napětí nižších řádů
  - obvykle jen liché okolo fc/f0

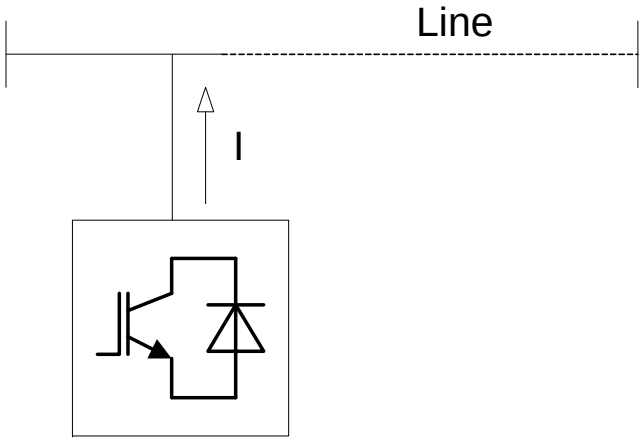


Typy FACTS

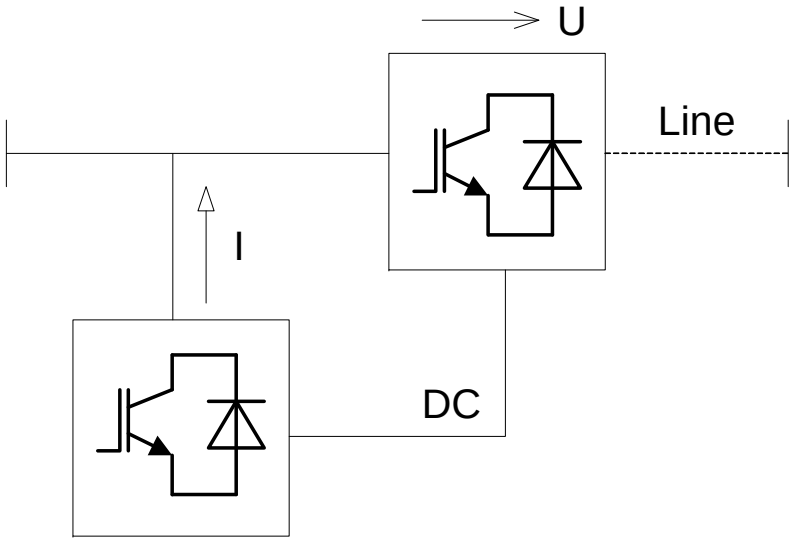
1) sériový



2) paralelní (shunt)



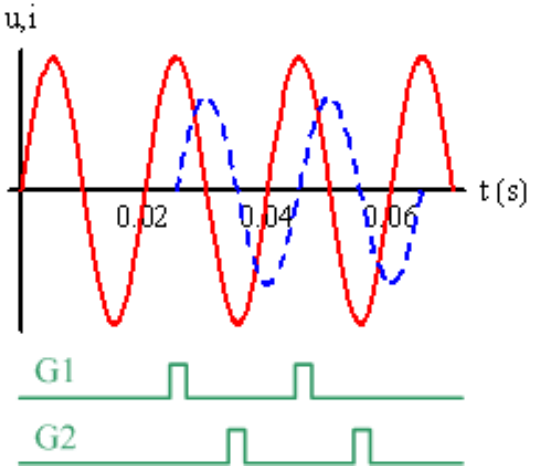
3) kombinovaný (univerzální)

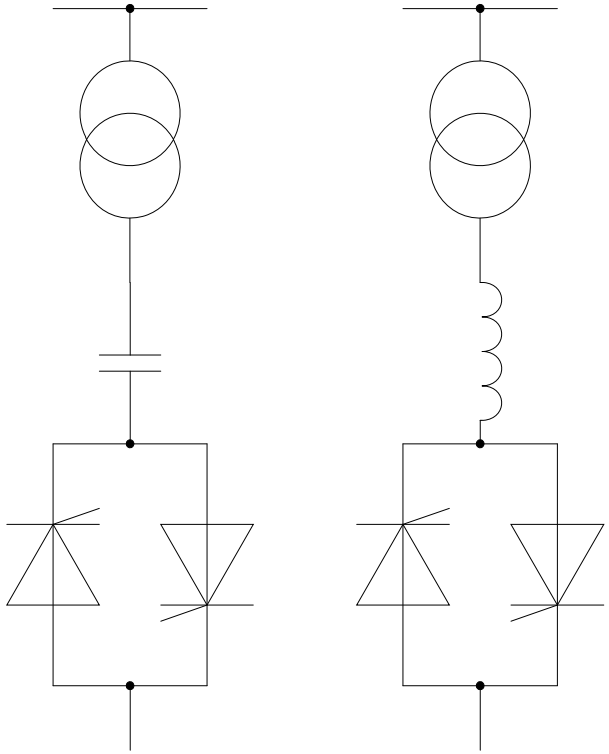


Rozdělení FACTS

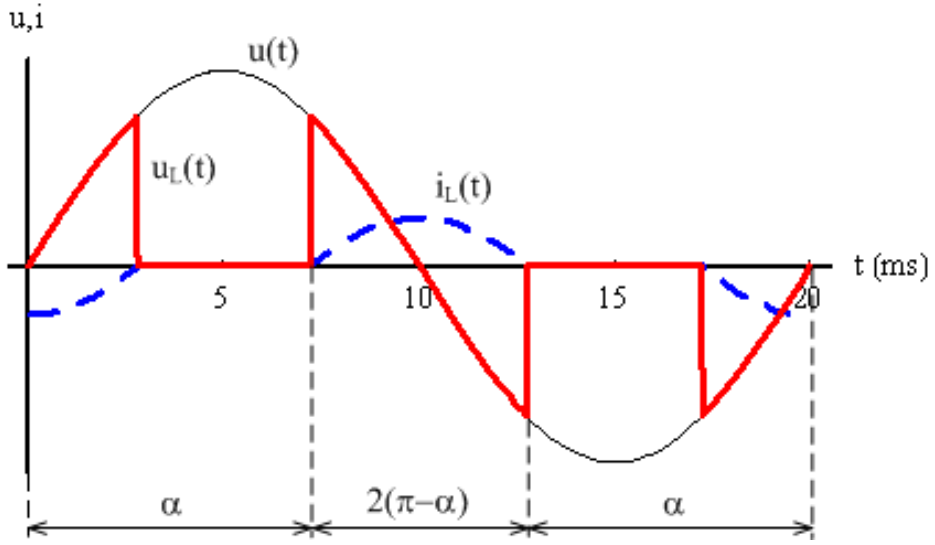
- **Paralelní**
  - **TSC – Thyristor Switched Capacitor**
  - **TCR – Thyristor Controlled Reactor**

TSR





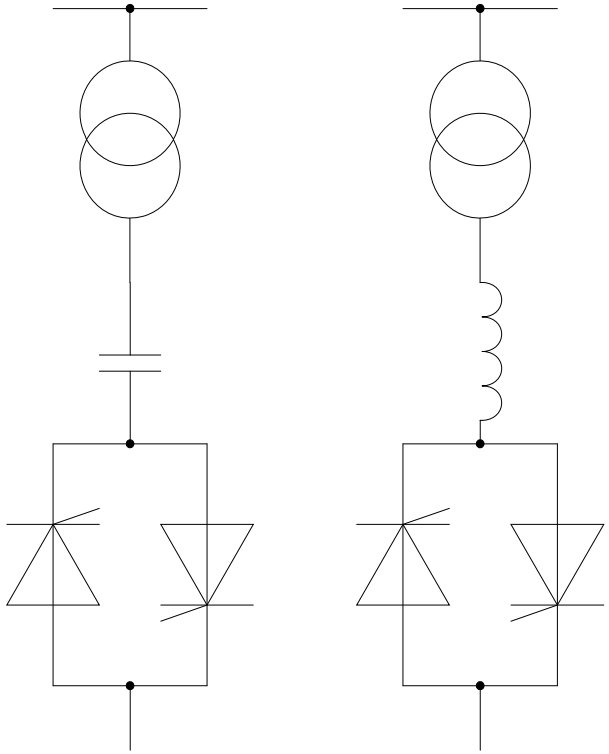
TCR



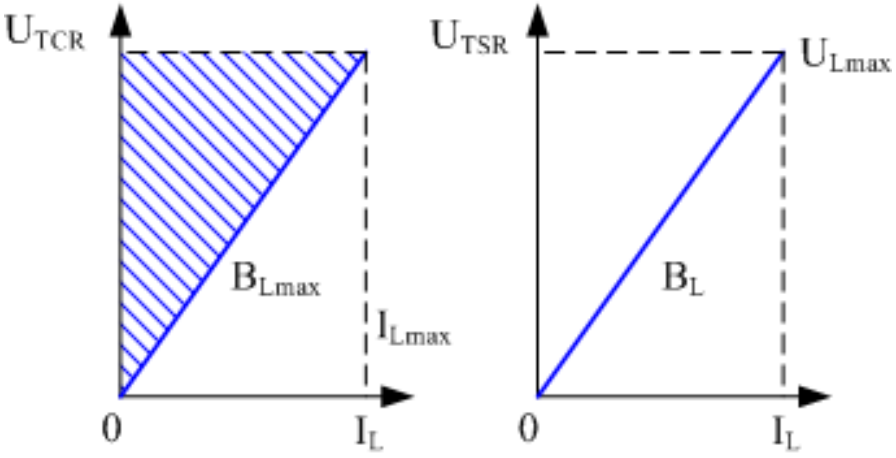
- **Řídicí úhel** $\pi / 2 \leq \alpha \leq \pi$

Rozdělení FACTS

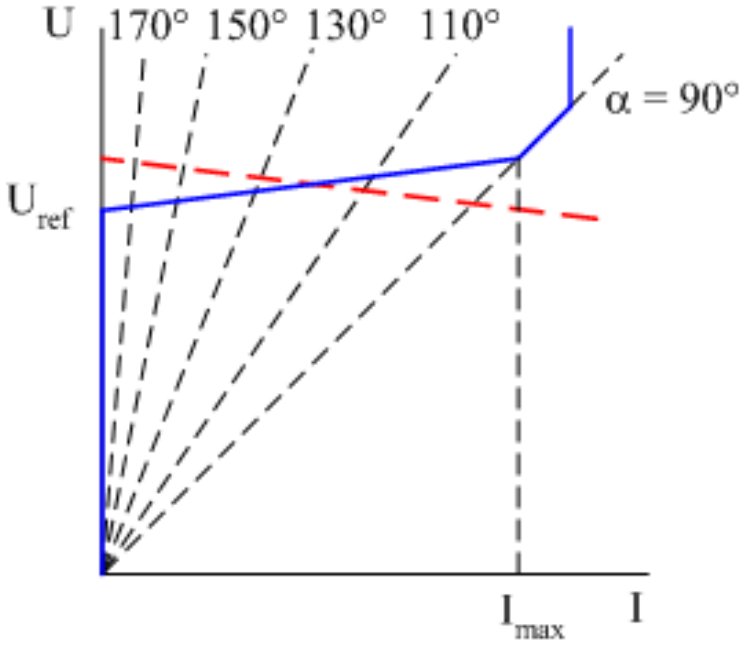
- **Paralelní**
  - **TSC – Thyristor Switched Capacitor**
  - **TCR – Thyristor Controlled Reactor**



Pracovní oblasti

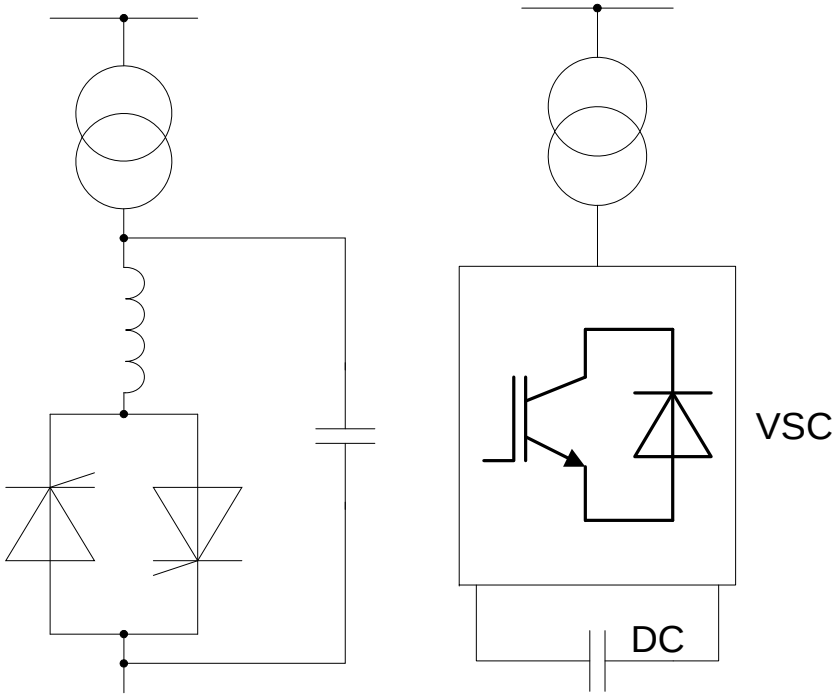


V-A charakteristika TCR

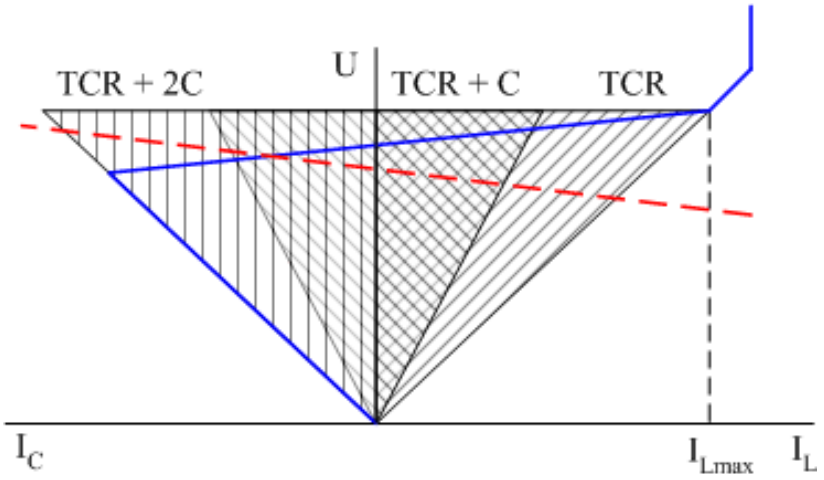


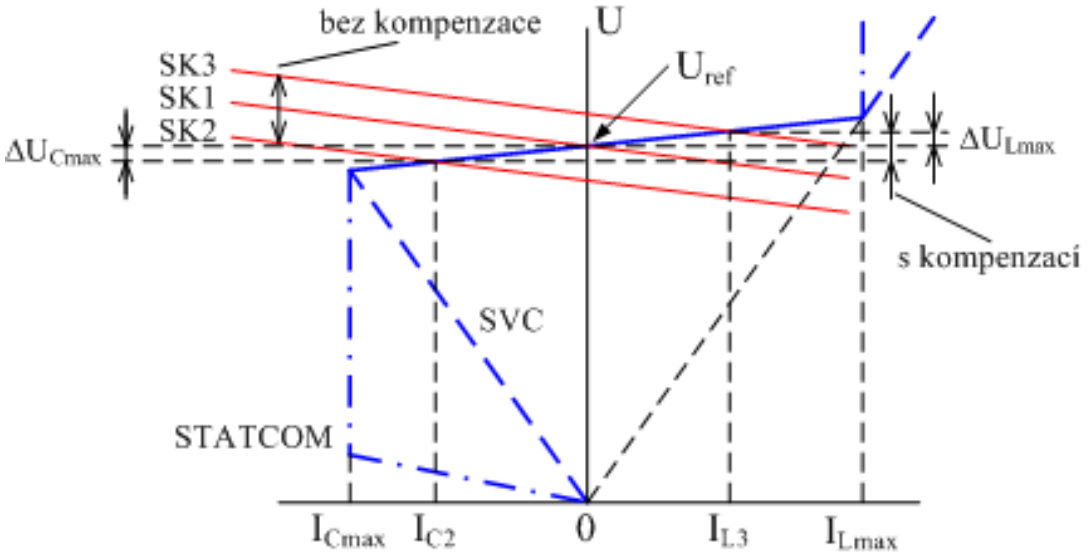
Rozdělení FACTS

- **Paralelní**
  - **SVC – Static Var Compensator**
  - **STATCOM – Static Synchronous Compensator**



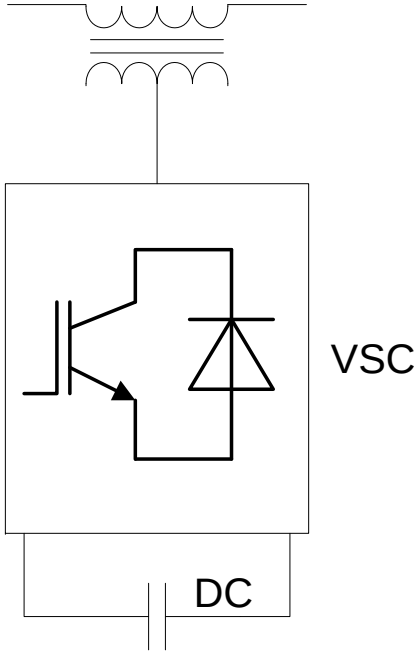
V-A charakteristika SVC

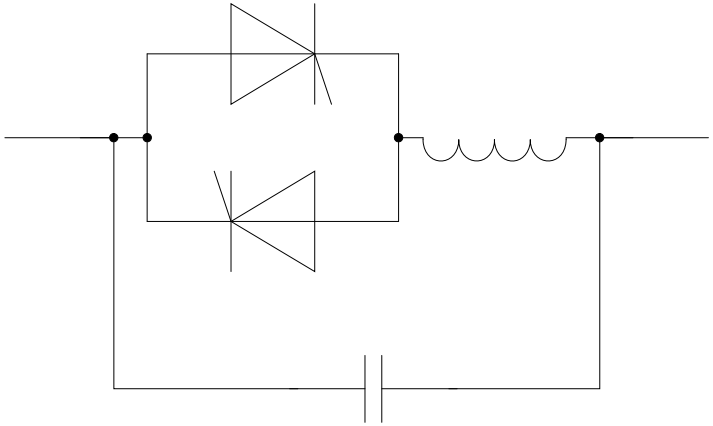




Rozdělení FACTS

- **Sériové**
  - **SSSC – Static Synchronous Series Compensator**
  - **TCSC – Thyristor Controlled Series Capacitor**

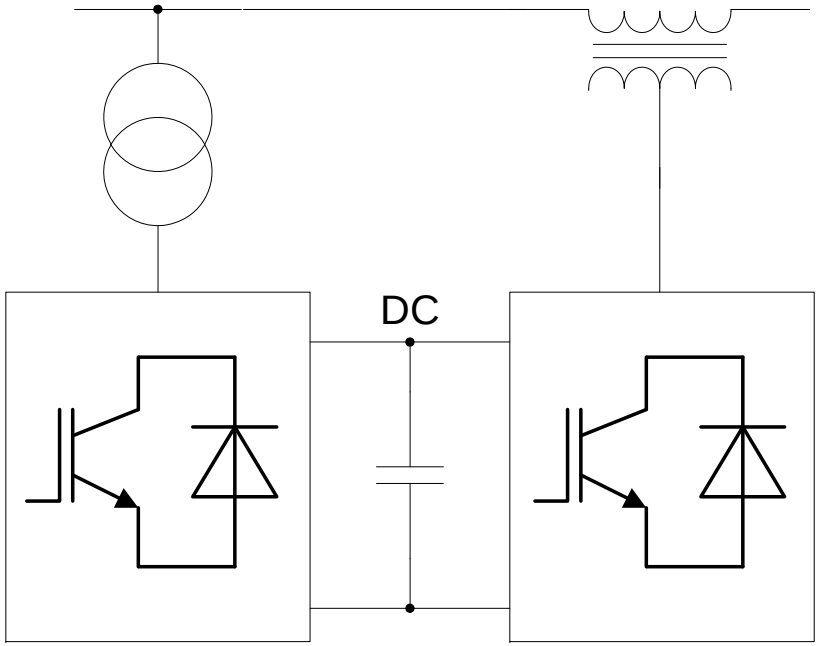




Rozdělení FACTS

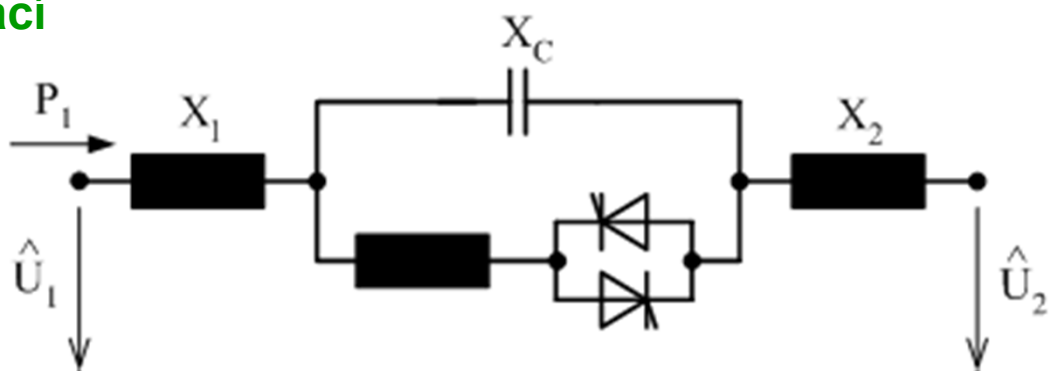
- **Kombinované**

  UPFC – Unified Power Flow Controller

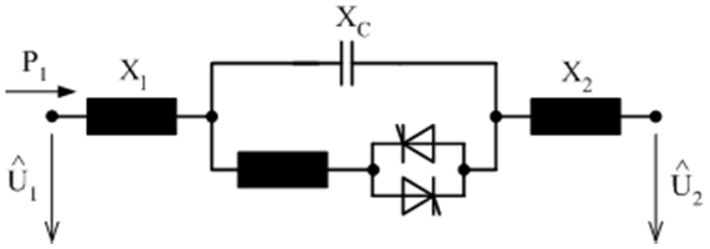


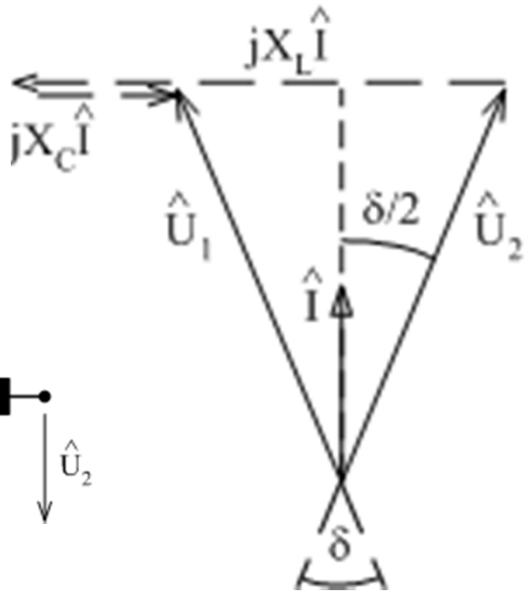
TCSC

- Plynulá regulace kapacitní reaktance řídicím úhlem tyristorů
- Vzduchová tlumivka
- Kondenzátor přemostěn varistorem (při přetížení přepětí)
- Využití
  - řízení výkonových toků
  - tlumení elektromechanických oscilací



Výkonové charakteristiky - TCSC

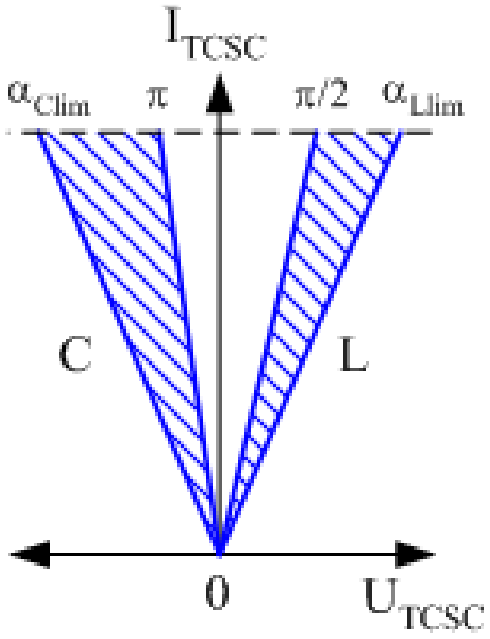


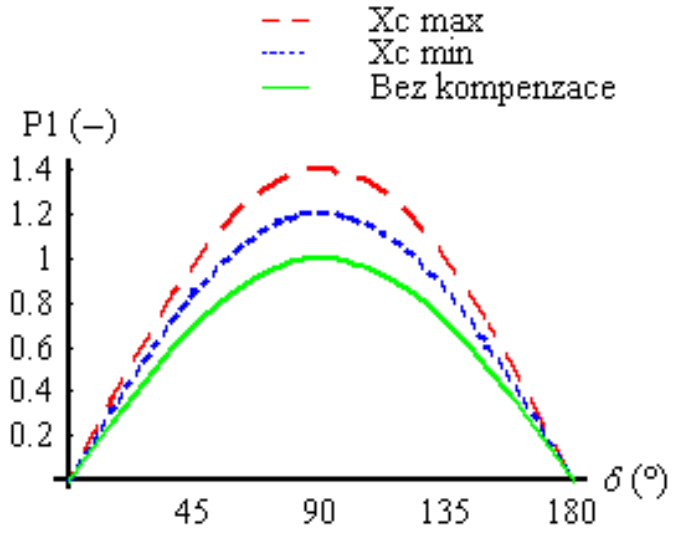


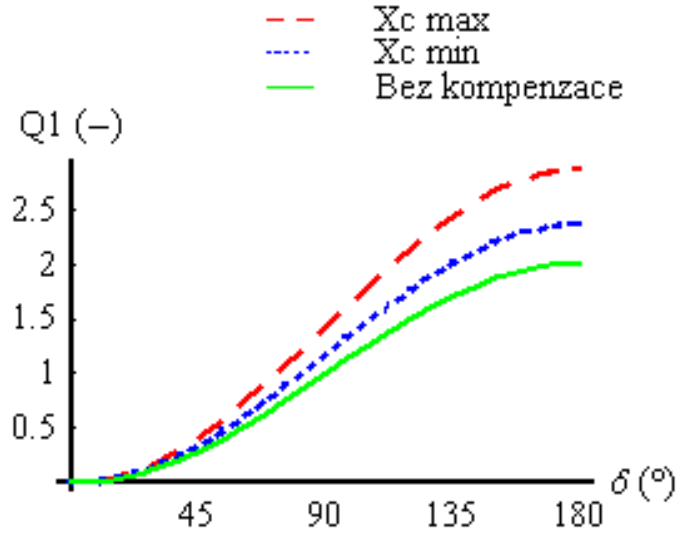
$$X_{ef} = X_L + X_C = (1-k)\cdot X_L$$

$$P = UI\cos\frac{\delta}{2} = \frac{U^2}{(1-k)X_L}\sin\delta$$

$$Q = UI\sin\frac{\delta}{2} = \frac{U^2}{(1-k)X_L}(1-\cos\delta)$$

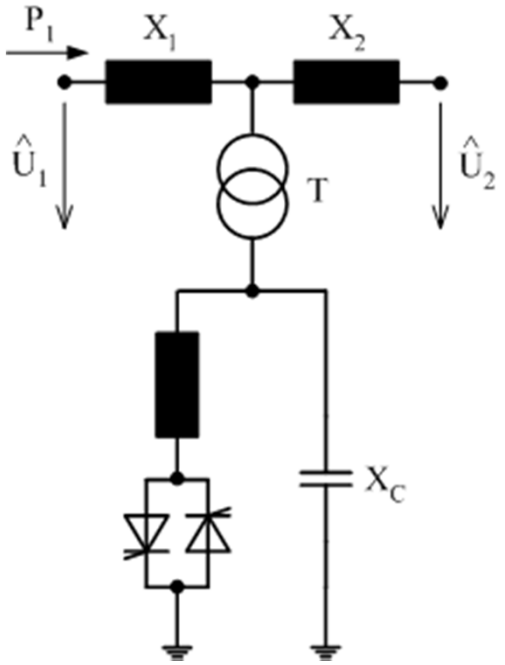


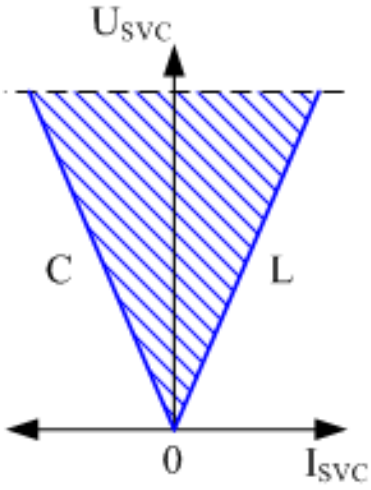


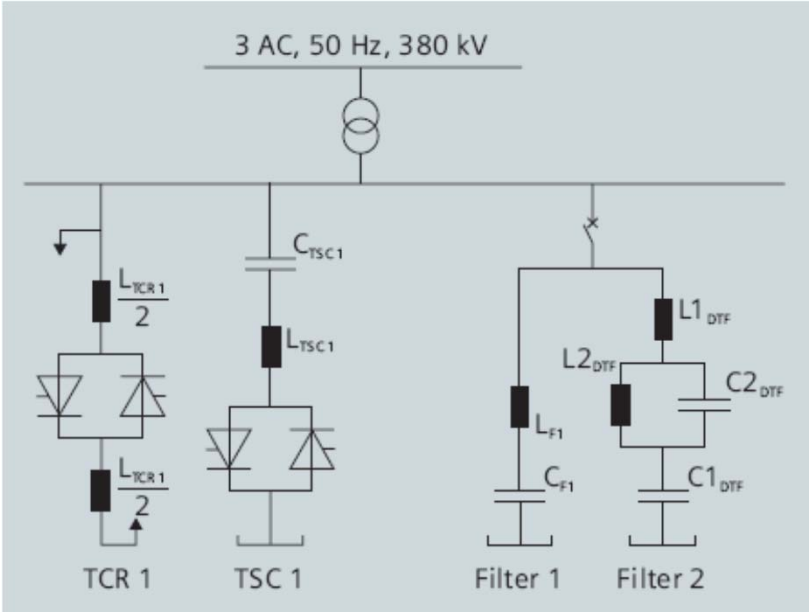


SVC

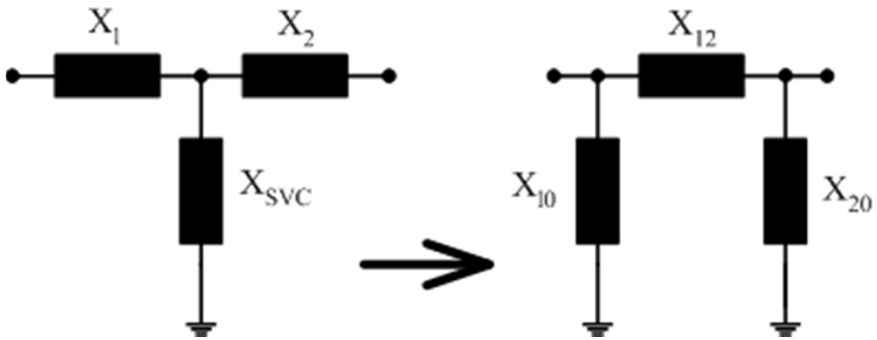
- Kombinace BSC, TSC, TSR, TCR
- Q pomocí pasivních reaktančních prvků (prostor)
- Max I ~ U sítě, Q ~ U^2 sítě
- Využití
  - dynamická stabilizace napětí (zvýšení přenosové schopnosti, omezení kolísání napětí)
  - zlepšení stability systému (zvýšení dynamické stability, zlepšené tlumení při kývání)
  - vyrovnávání dynamického zatížení
  - podpora napětí v ustáleném stavu



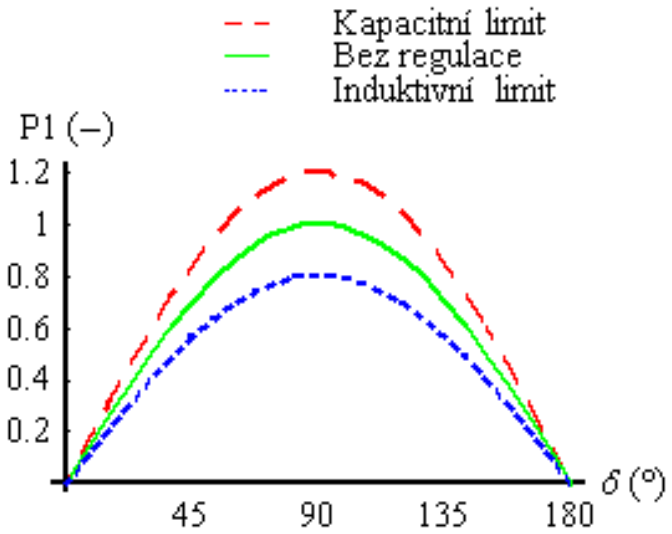


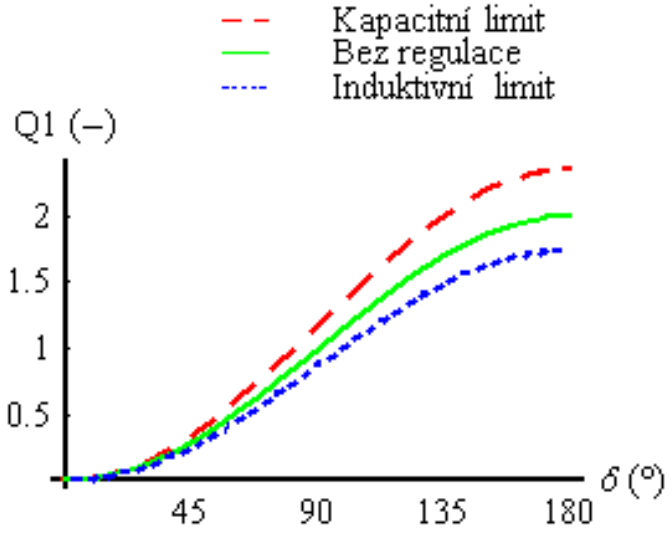


Výkonové charakteristiky - SVC



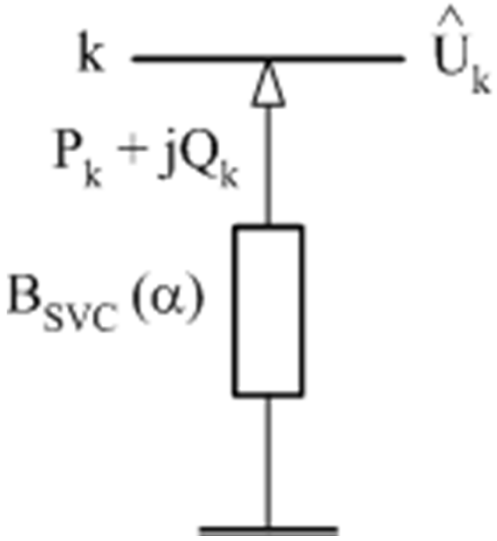
$$X_{12} = X_1 + X_2 + \frac{X_{SVC}}{X_1 \cdot X_2}$$

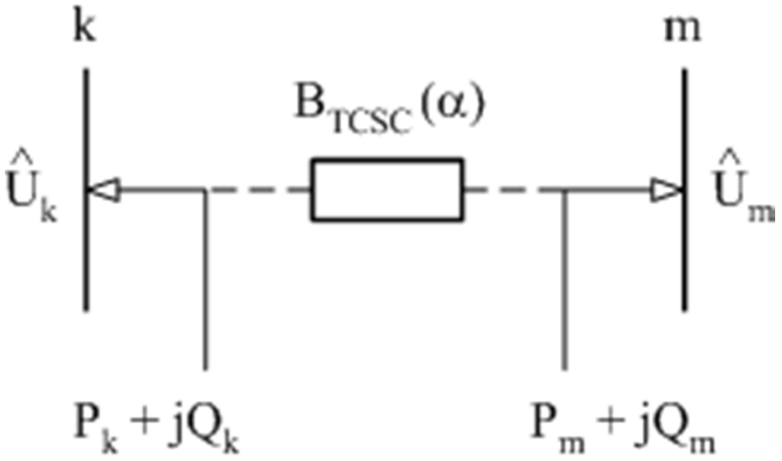




Admitanční modely

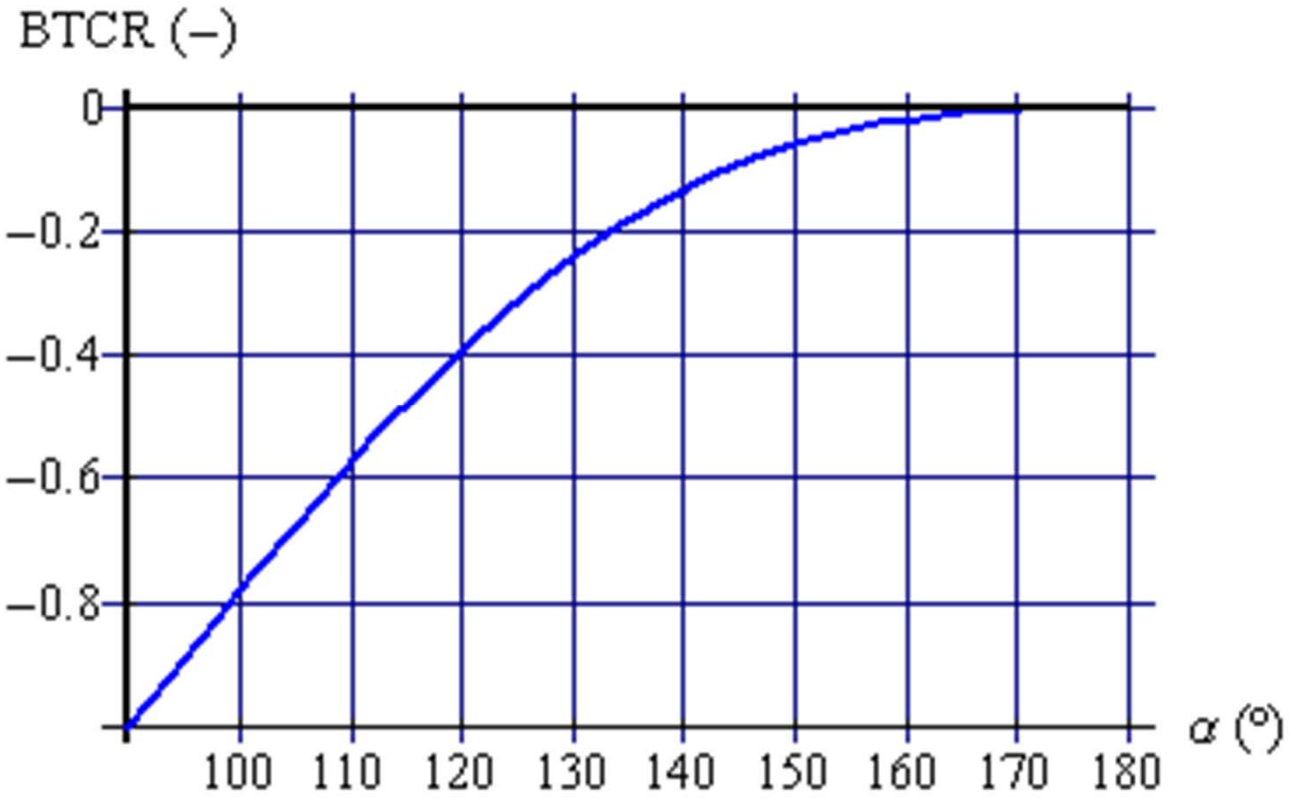
- **Vhodné pro tyristorově řízené měniče**

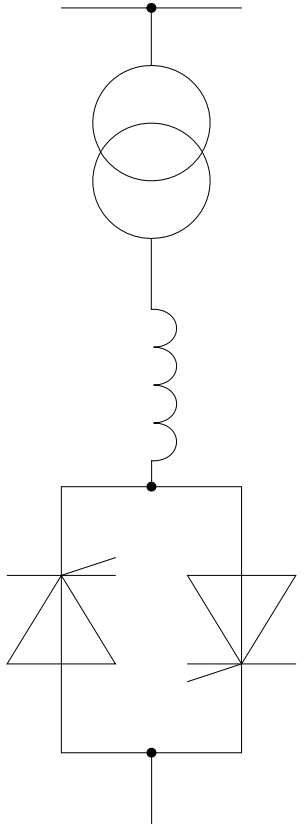




Model TCR

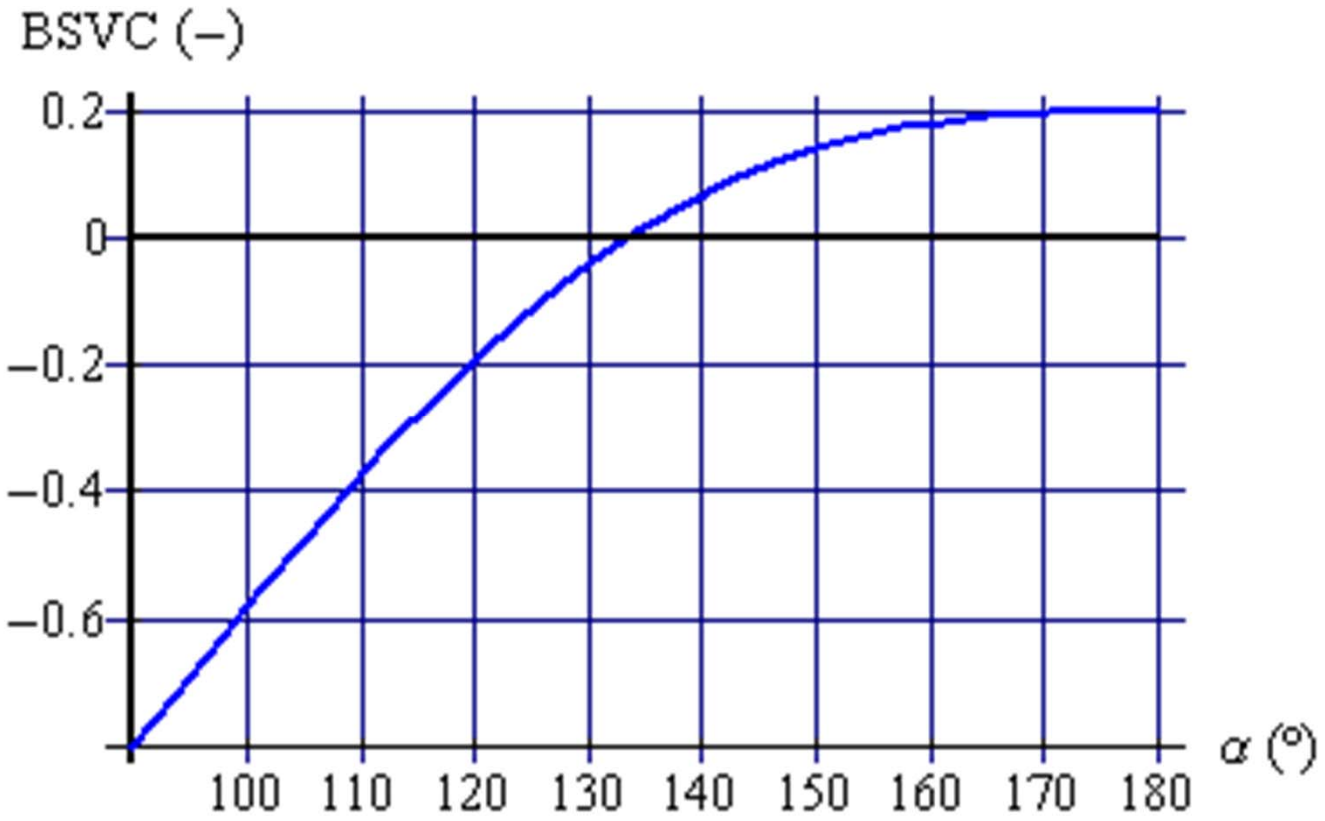
$$B_{TCR}(\alpha) = -\frac{I_{max}\,\frac{2\pi - 2\alpha + \sin 2\alpha}{\pi}}{U_{max}} = B_L\,\frac{2\pi - 2\alpha + \sin 2\alpha}{\pi}$$

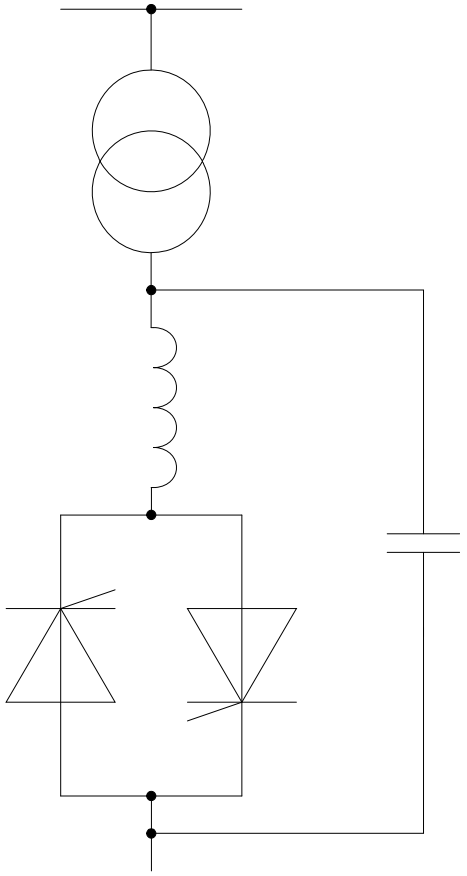




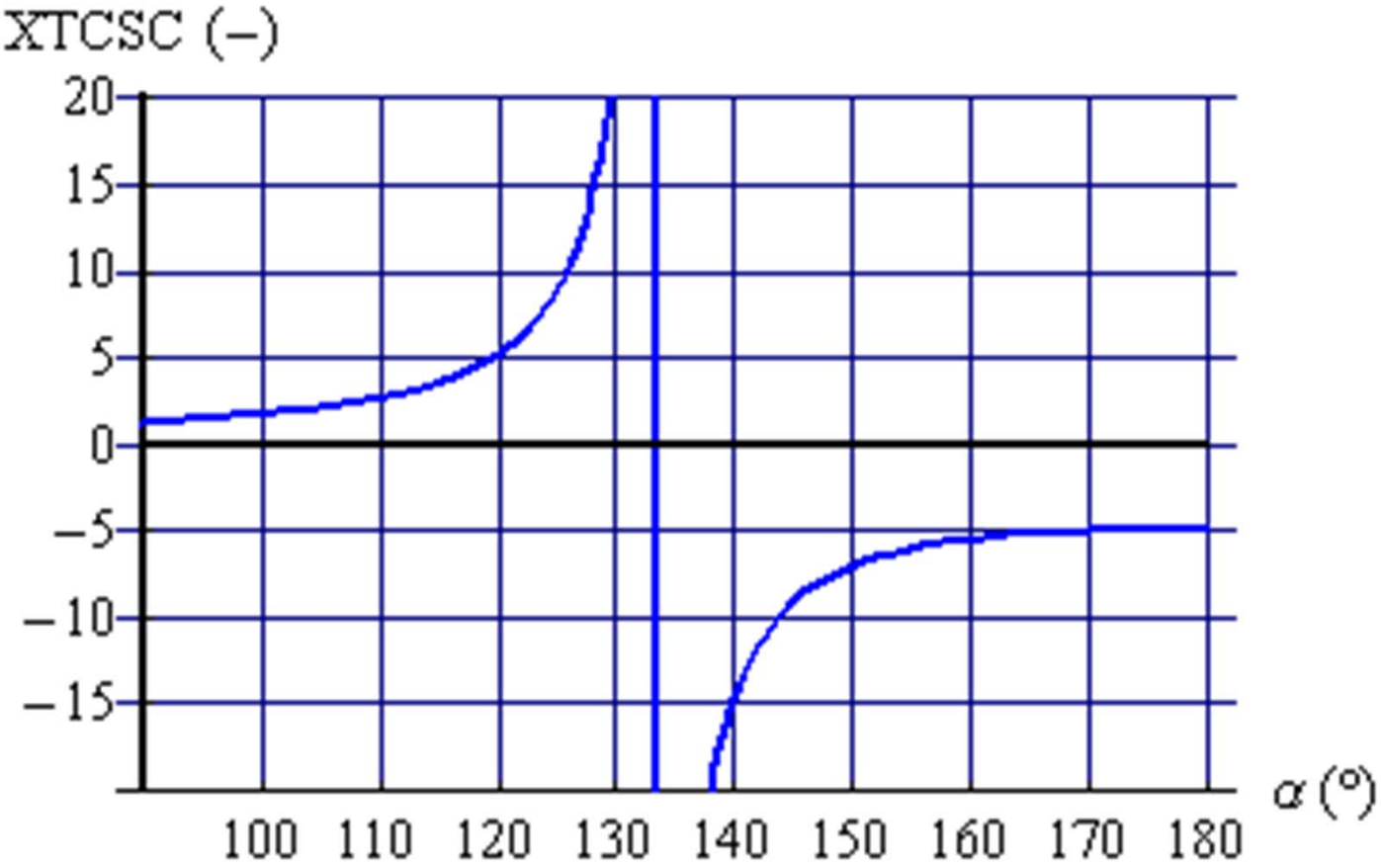
Model SVC, TCSC

$$\omega L < \frac{1}{\omega C} \approx |B_L| > B_C \qquad B_{SVC}(\alpha) = B_L \frac{2\pi - 2\alpha + \sin 2\alpha}{\pi} + B_C$$





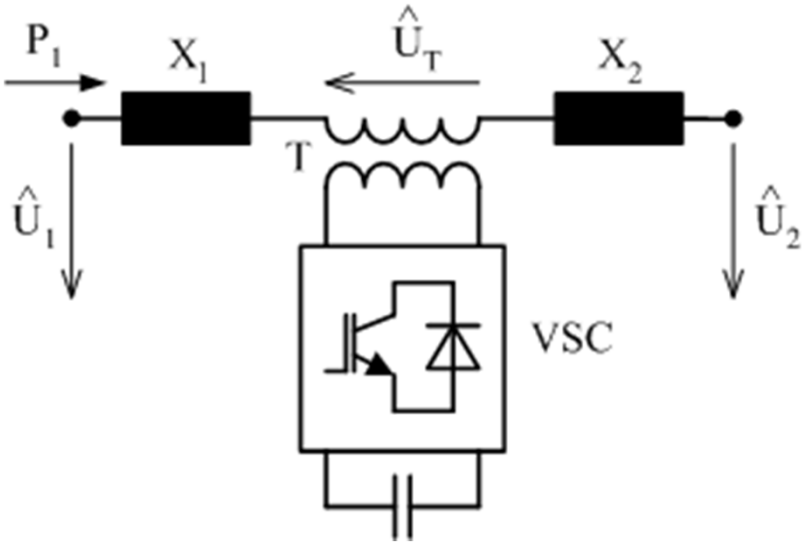
Model SVC, TCSC

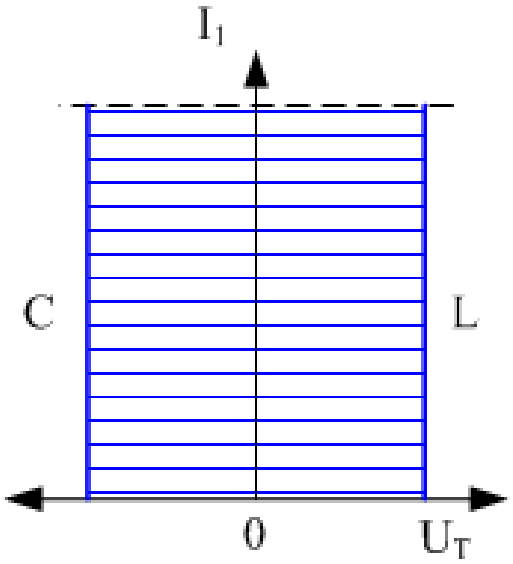


- **Rezonance ⇒** $\alpha_{res} - \Delta\alpha > \alpha > \alpha_{res} + \Delta\alpha$ **(TCSC)**

SSSC

- Vstřikuje sériové napětí U_T
  - bez DC zdroje jen generuje nebo absorbuje Q
- Jako X_L, X_C sériově s linkou
  - ale U_T řiditelné nezávisle na proudu vedením
  - efektivní provoz při nízkém i vysokém zatížení
- Využití
  - dynamické řízení výkonových toků
  - tlumení oscilací
  - zvýšení stability přenosu
  - zvýšení napěťové stability





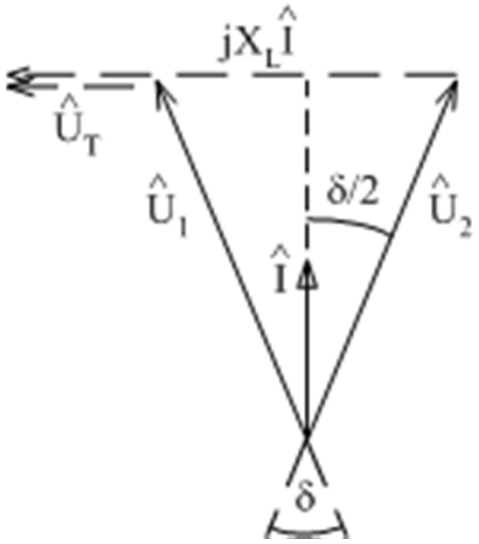
SSSC

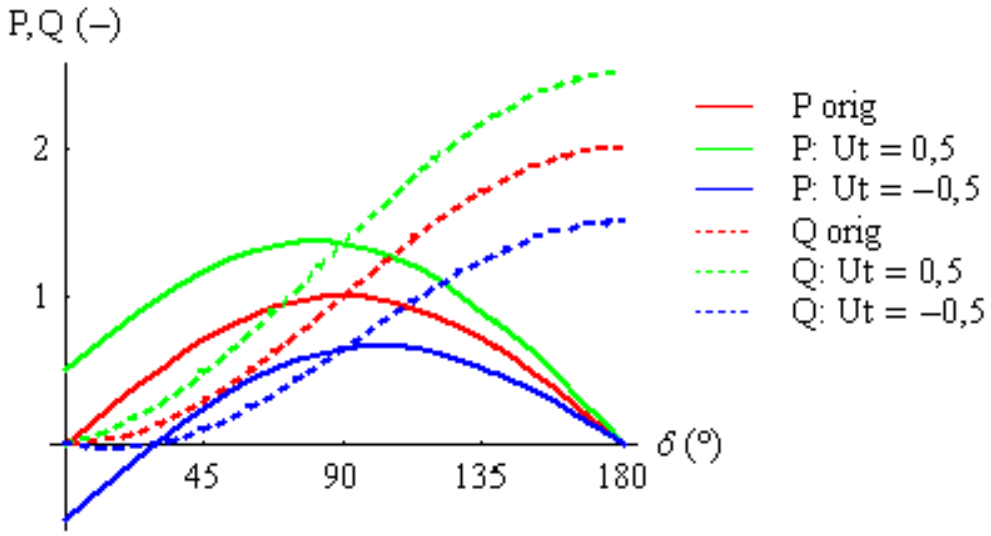
- **Regulace**
  - **toku P pomocí injekce Q měniče (tok Q svázán s tokem P)**
  - **s DC zdrojem kompenzace odporu vedení (nezávislé řízení toku P a Q)**

$$0 \le U_T \le U_{T\max}$$

$$P = UI\cos\frac{\delta}{2} = \frac{U^2}{X_L}\sin\delta + \frac{U\cdot U_T}{X_L}\cos\frac{\delta}{2}$$

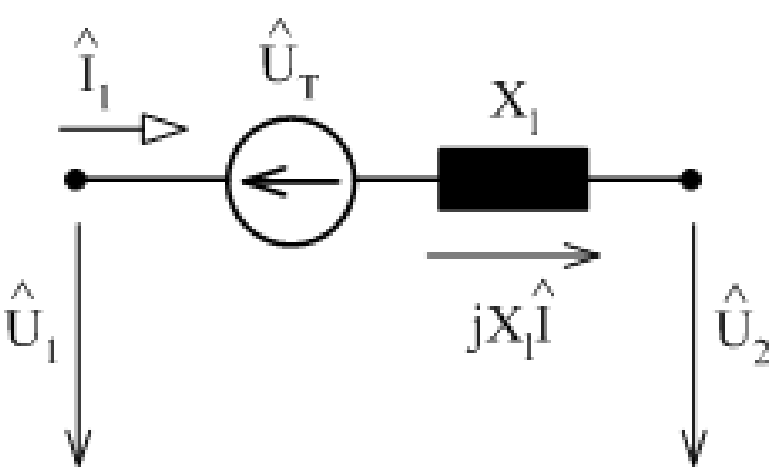
$$Q = UI\sin\frac{\delta}{2} = \frac{U^2}{X_L}\left(1-\cos\delta\right) + \frac{U\cdot U_T}{X_L}\sin\frac{\delta}{2}$$

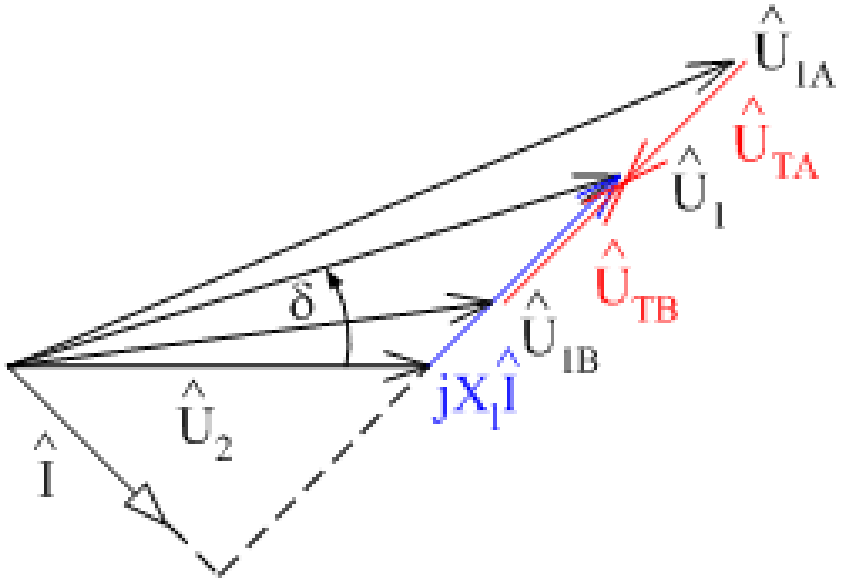




SSSC

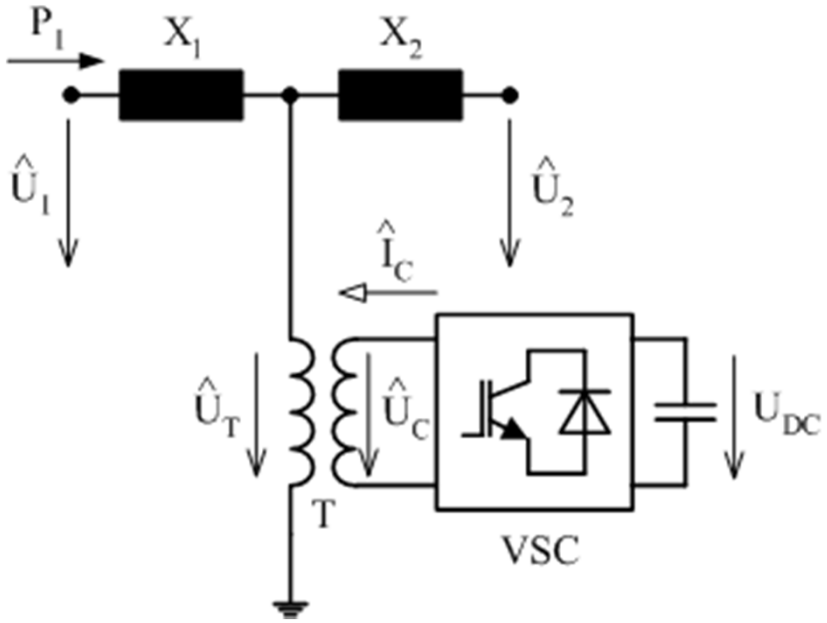
- Induktivní mód
  - zvětšování úhlu přenosu (při I = konst.)
  - $U_T < X_1 I \rightarrow$ jinak zpětný tok výkonu (při U = konst.)
- Kapacitní mód
  - U_T ve fázi s úbytkem $\Delta U_L \rightarrow \uparrow X$
- Index A odpovídá L módu, index B odpovídá C módu

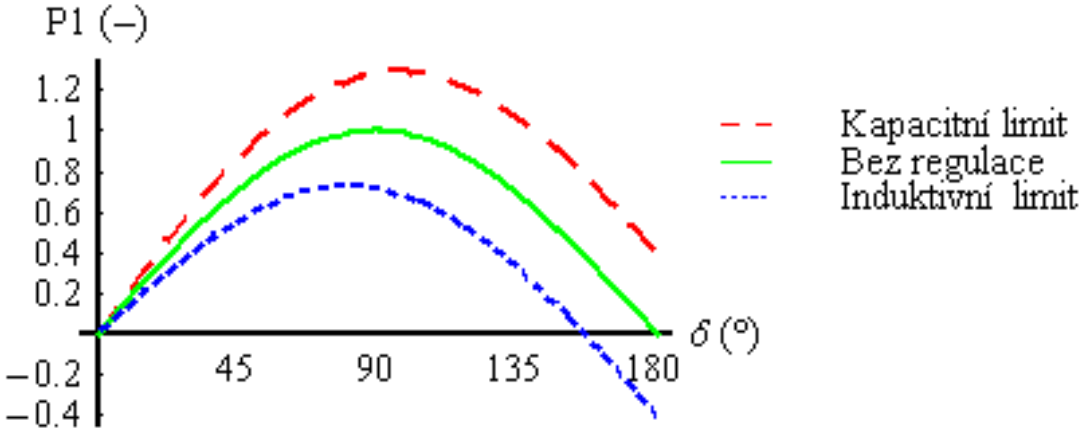


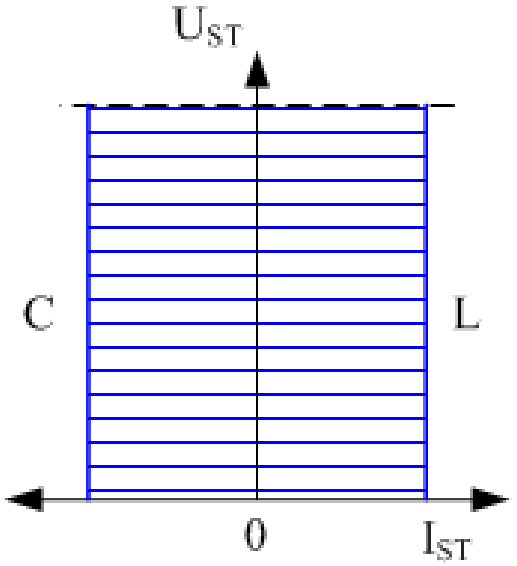


STATCOM

- Jako SVC, ale menší nároky na prostor, Q dodává nezávisle na přípojném napětí
- Využití
  - řízení napětí, napěťového profilu
  - zvýšení limitů stability a přenos. schopnosti
  - tlumení oscilací
  - symetrizace
  - stabilizace a kvalita napětí
  - přenos, distribuce, průmysl

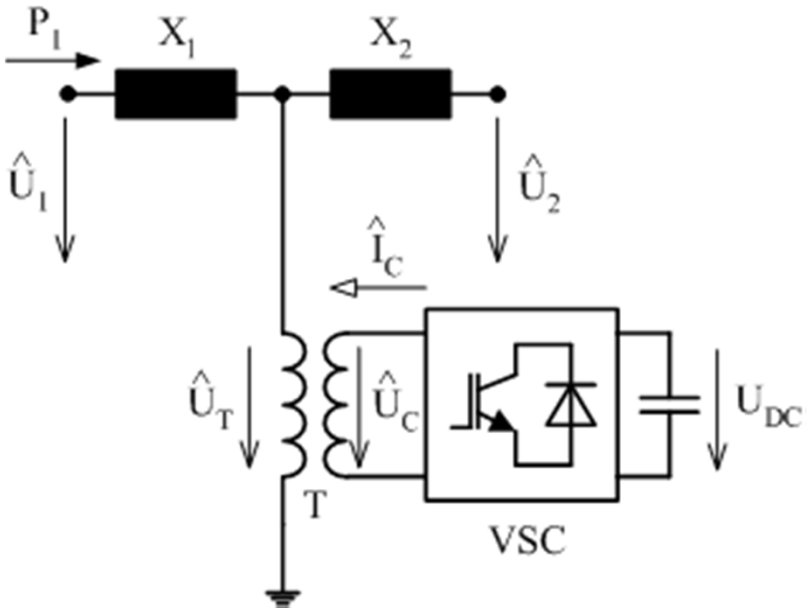




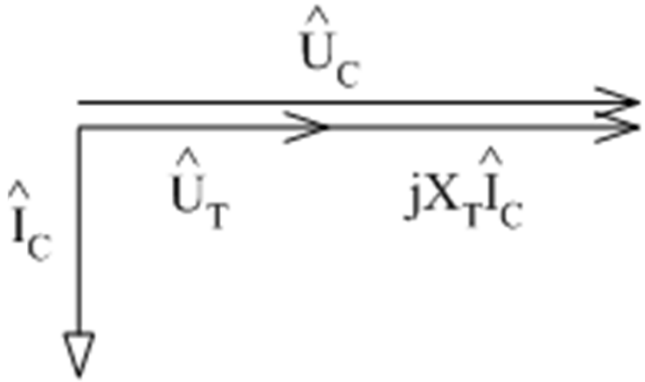


STATCOM

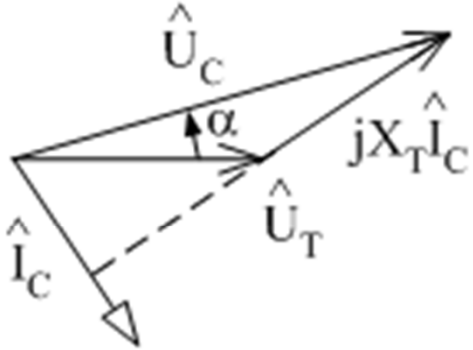
- Kapacita C → P do měniče pro krytí ztrát
  - ΔP malé → I_{AC} ± 90° od U_{AC}
- Regulace Q – amplitudou U_{out}
  - $U_C > U_T$ → dodávka Q do systému (C mód)
  - $U_C < U_T$ → odběr Q ze systému (L mód)
- Regulace P – úhlem mezi U_{out} a U_{AC}



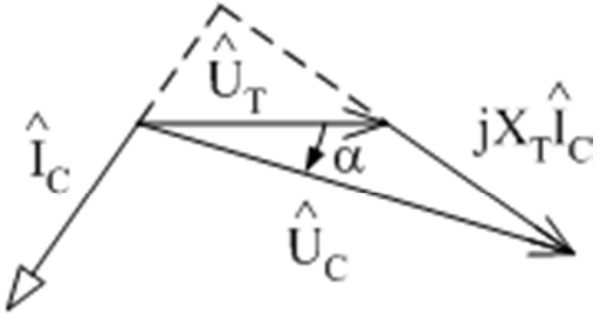
- C mód



P = 0



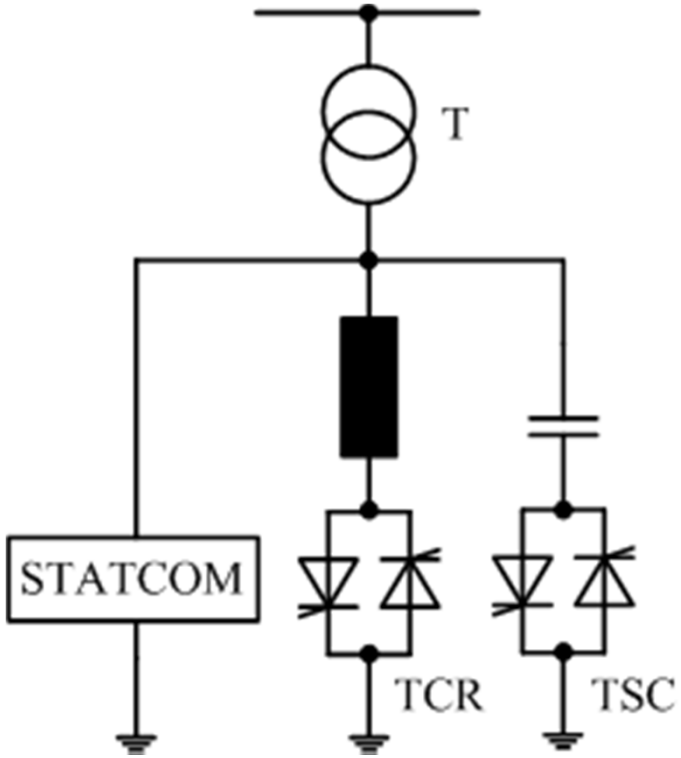
P do sítě

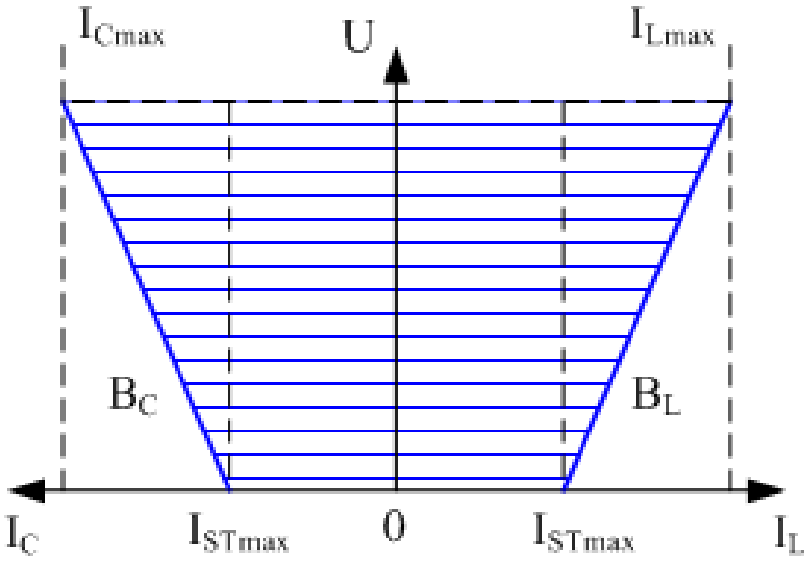


P ze sítě

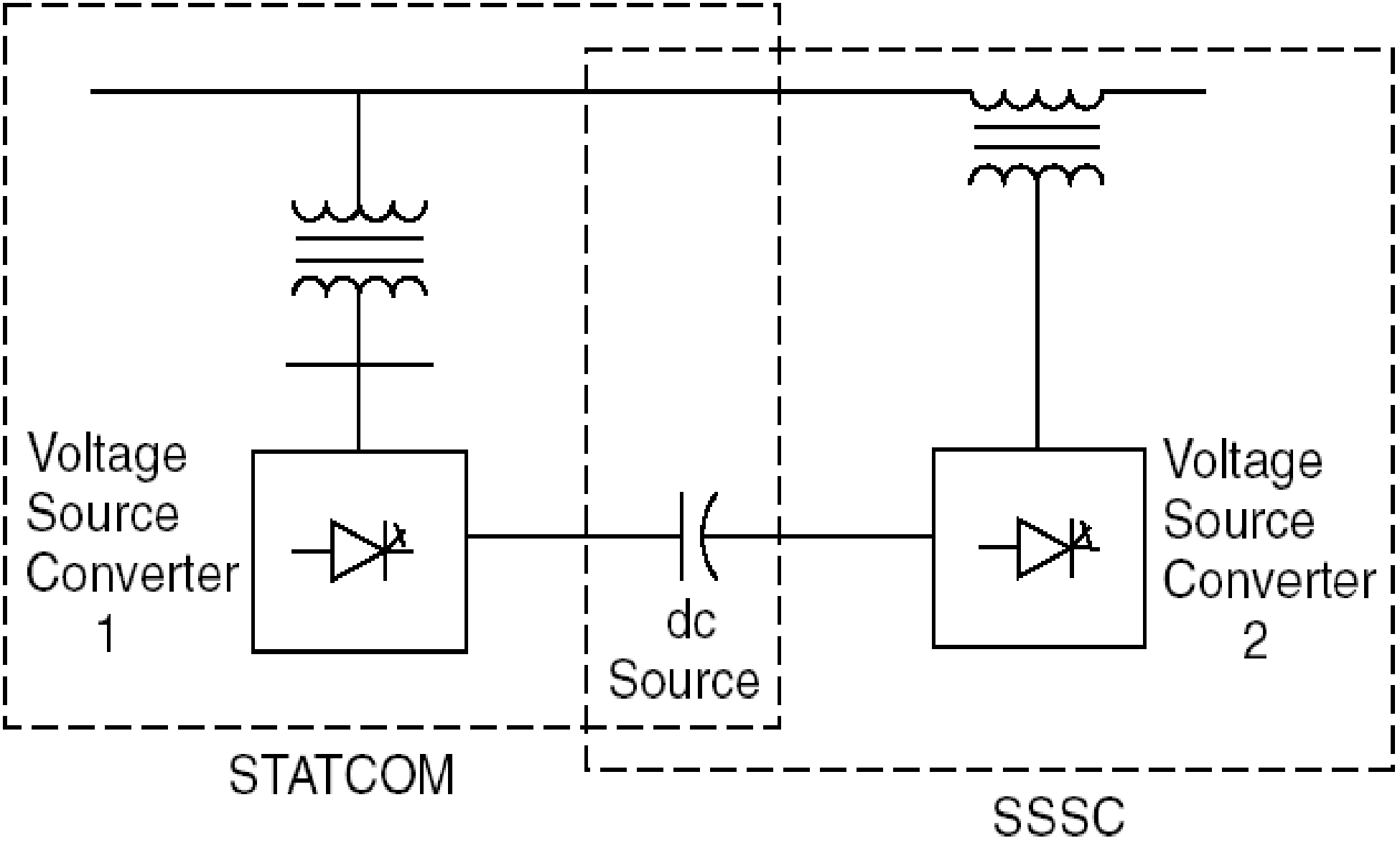
STATCOM + SVC

- **Rozšíření pracovní oblasti**



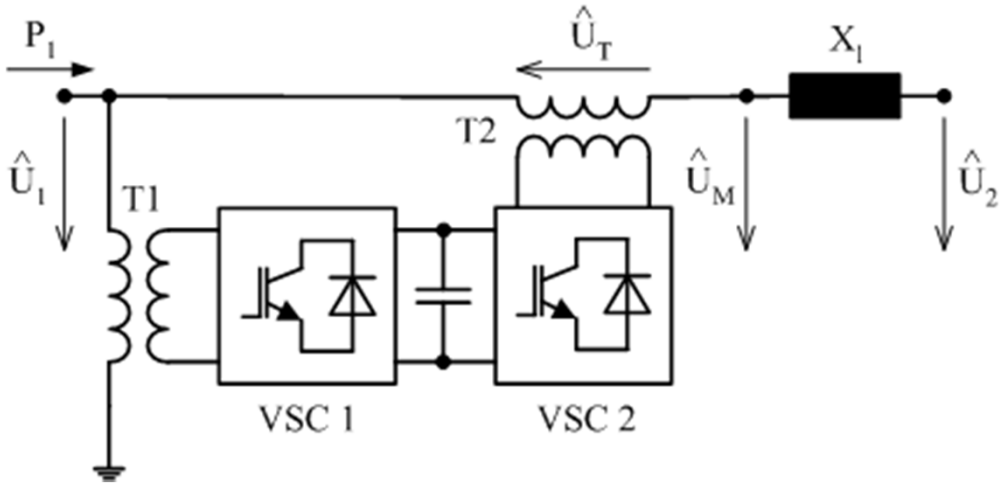


UPFC = STATCOM + SSSC



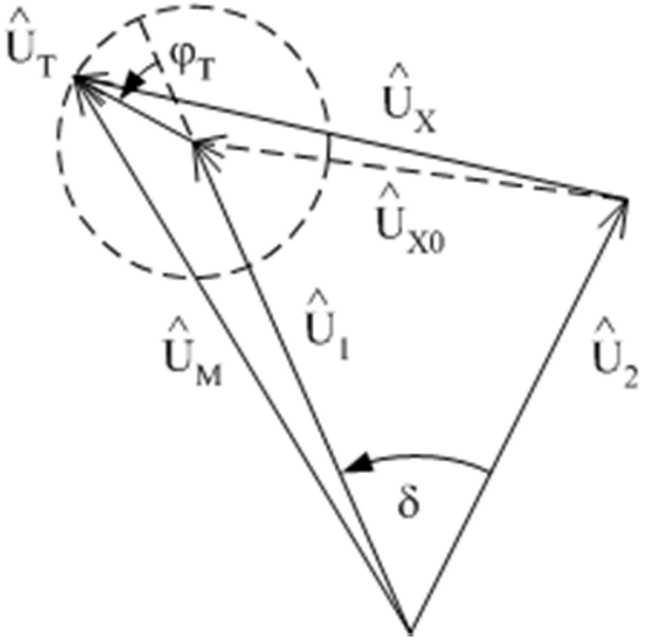
UPFC

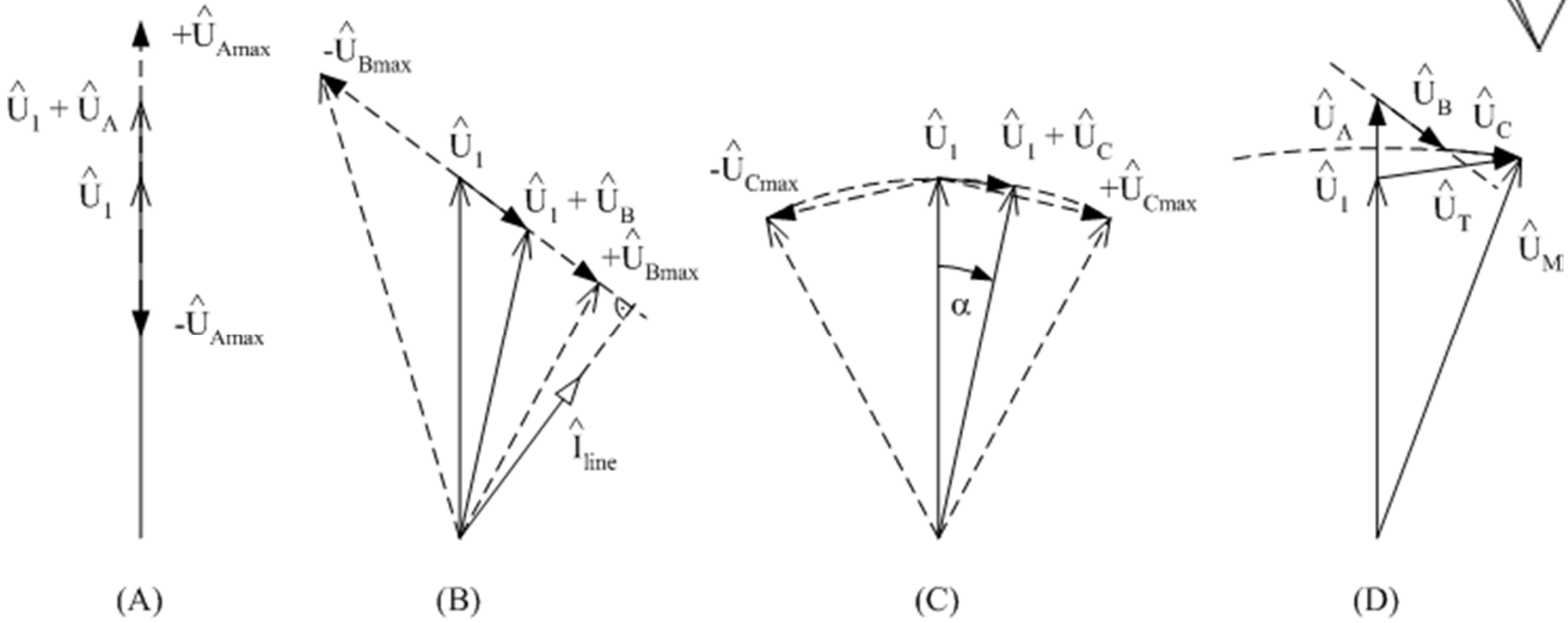
- Komplexní zařízení, nezávislé řízení činného a jalového výkonu
- Regulace U, P, Q
  - Q_{SH}, Q_{SER} řízeny nezávisle
  - P teče z VSC1 do VSC2 (nebo naopak)
  - nezávislé řízení U_1, U_2, X, δ
- VSC2
  - $0 \le U_T \le U_{Tmax}$, $0 \le \varphi_T \le 2\pi$
  - pracovní oblast kruh
  - P, Q oba směry
- VSC1
  - odběr P pro VSC2 + ztráty, Q oba směry
  - $0 \le U_{SH} \le U_{SHmax}$



UPFC – provozní režimy

- **Režimy sériového vstřikování**
  - A) Regulace napětí – U_T ve fázi s U_1
  - B) Sériová kompenzace – U_T kolmo na I_{line}
  - C) Řízení fáze napětí – natočení U_1 o úhel a
  - D) Řízení výkonových toků
    - kombinace dle požadavků na tok P a Q





UPFC – řízení výkonů

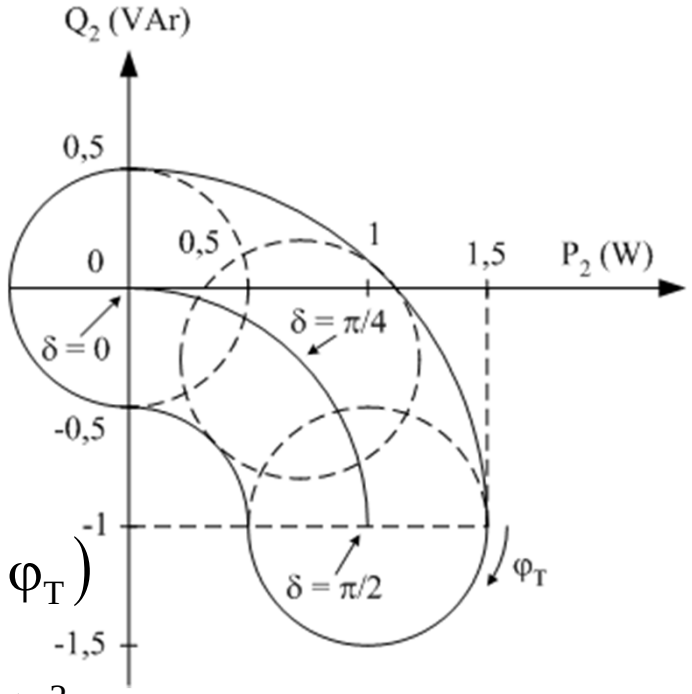
- **Řízení P, Q je nezávislé na úhlu přenosu**

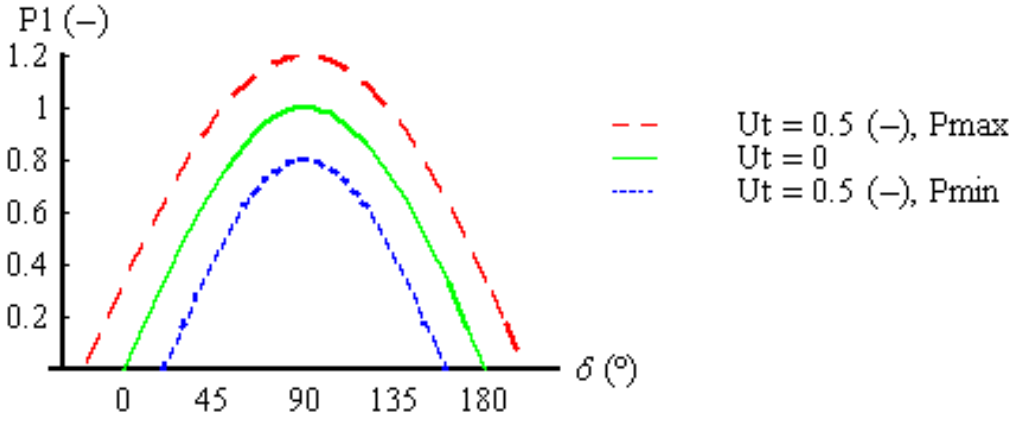
$$\hat{S}_2 = \hat{U}_2 \hat{I}_2^* = \hat{U}_2 \left(\frac{\hat{U}_1 + \hat{U}_T - \hat{U}_2}{jX} \right)^*$$

$$P_2 = \frac{U_1 U_2}{X_l} \sin\delta + \frac{U_2 U_T}{X_l} \sin(\delta + \varphi_T) = P_0(\delta) + P_T(\delta, \varphi_T)$$

$$Q_2 = \frac{U_1 U_2}{X_l} \cos\delta - \frac{U_2^2}{X_l} + \frac{U_2 U_T}{X_l} \cos(\delta + \varphi_T) = Q_0(\delta) + Q_T(\delta, \varphi_T)$$

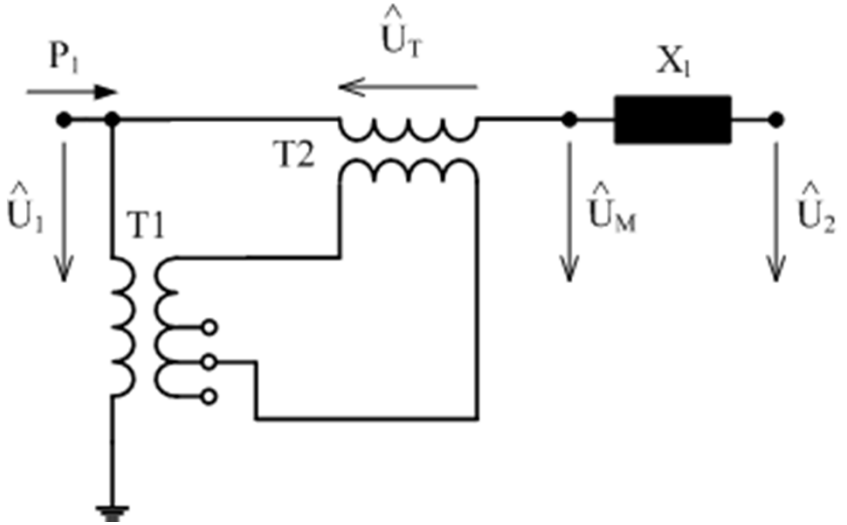
$$\left(P_T(\delta, \varphi_T) - P_0(\delta)\right)^2 + \left(Q_T(\delta, \varphi_T) - Q_0(\delta)\right)^2 = \left(\frac{U_2 U_{T\,max}}{X_l} \right)^2$$





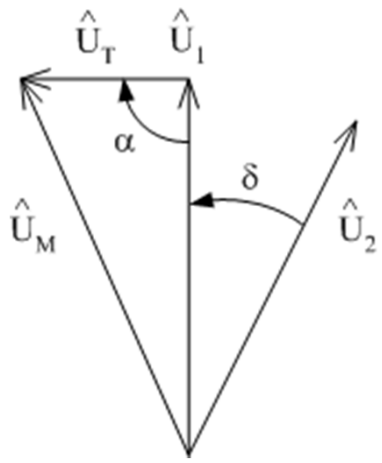
PST

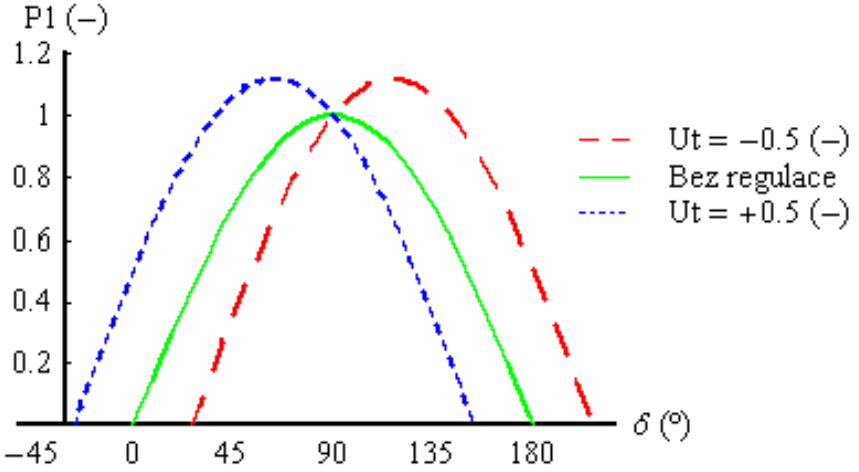
- Phase-shifting transformer, komplexní převod
- Řízení P toků na přenosových vedeních
- Paralelní regulační a sériový přídavný transformátor
- Vstřikování napětí sériovým transformátorem
  - ve fázi s uzlovým napětím – reg. Q
  - kolmo na uzlové napětí – reg. P
- Princip
  - přidání vhodné části uzlového napětí (uzlových napětí) právě k tomuto napětí směrem do přenosové linky
  - fázového (reg. Q), sdruženého (reg. P)
- Odbočky nebo tyristory



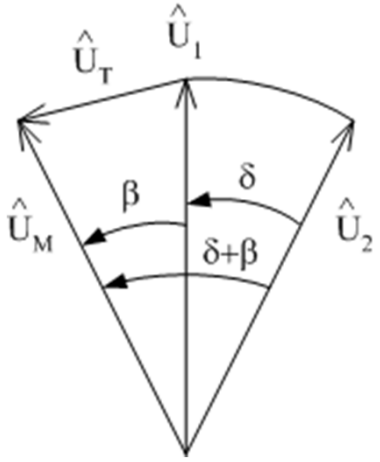
PST

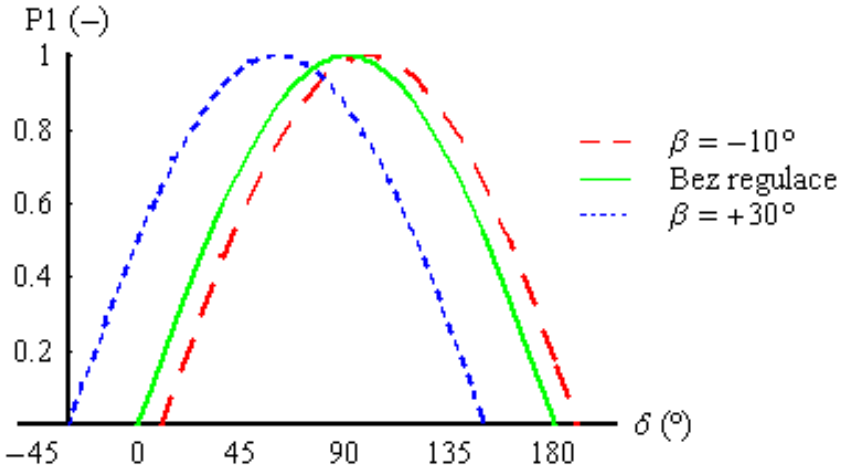
QBT
(Quadrature booster transformer)





PAR
(Phase angle regulator)





Shrnutí

- FACTS = výkonová elektronická zařízení pro řízení napětí a výkonů
- mnoho druhů s různými vlastnostmi a charakteristikami
- zvyšují flexibilitu a spolehlivost přenosového systému
- postupný rozmach x vysoká cena