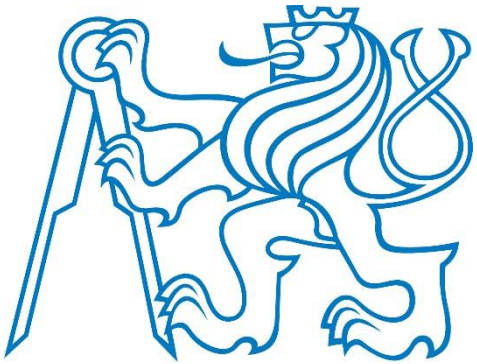
FACTS systémy v elektroenergetice



České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická,
Katedra elektroenergetiky

Praha 2018

Ing. Martin Čerňan

Obsah přednášky

- Přenos výkonu, výkonové toky činného a jalového výkonu
- Základní definice FACTS, rozdělení FACTS
- Přehled referencí, trendy
- Přehled funkcí FACTS zařízení
- Řídící systém FACTS
- Struktura řízení paralelních FACTS systémů
- Struktura řízení sériových FACTS systémů
- Ukázka chování FACTS
- Dynamické vlastnosti FACTS

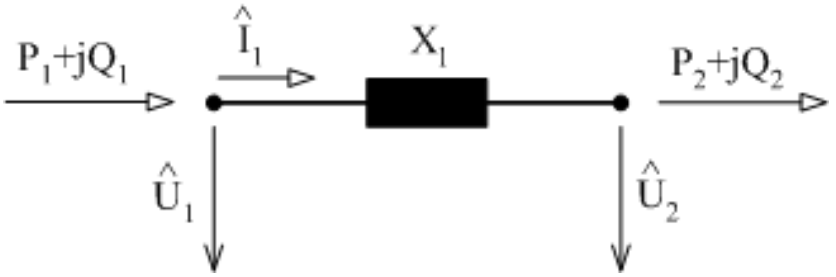
Přenos výkonu

Omezení přenosu výkonu

- tepelné (proud)
- dielektrické (napěťová hladina)
- stabilita (statická, dynamická)

Možnosti řízení výkonových toků

- impedance linky X
- úhel přenosu δ
- napětí U, φ
- injekce P a Q

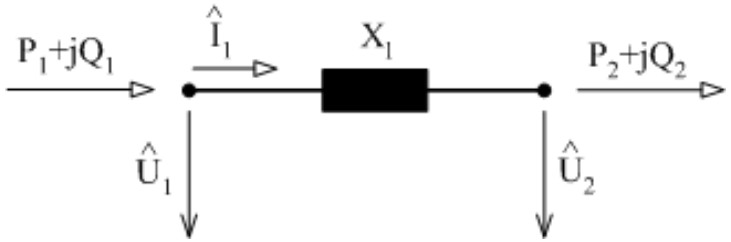


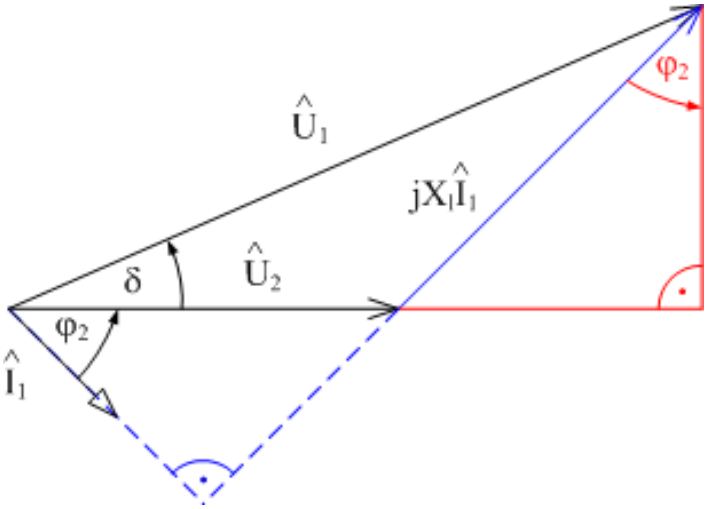
$$\hat{S}_1 = \hat{U}_1 \cdot \hat{I}_1^* = P_1 + jQ_1$$

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

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

Výkonové toky - činný výkon





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

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

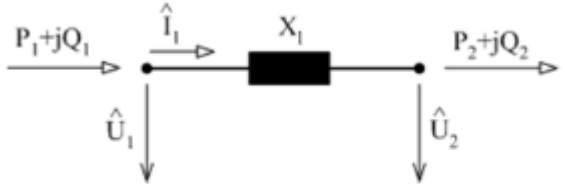
$$I_1 \cos\varphi_2 = \frac{U_1}{X_1}\sin\delta$$

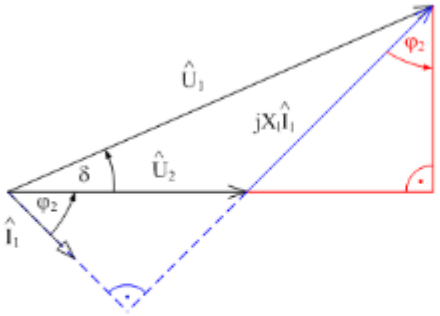
$$P_2 = \frac{U_1 U_2}{X_1}\sin\delta = P_1$$

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





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

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

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

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

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

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

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

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

Základní definice 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

Základní rozdělení FACTS

Dle připojení do systému

- Paralelní
- Sériové
- Kombinované

Dle použité technologie

- Mechanicky spínané
- Polovodičově spínané
- Polovodičově řízené – tyristory
- Polovodičově řízené – tranzistorové

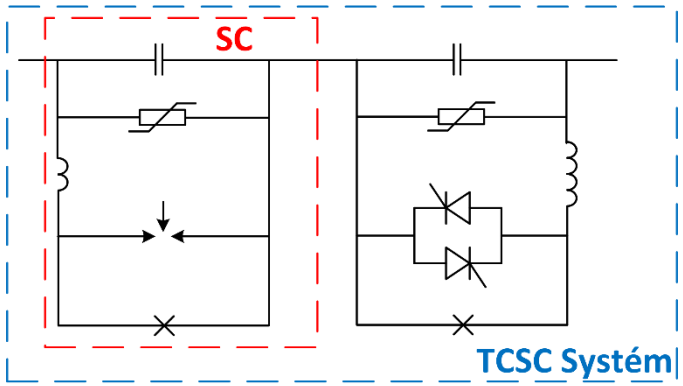
Dle oblasti využití

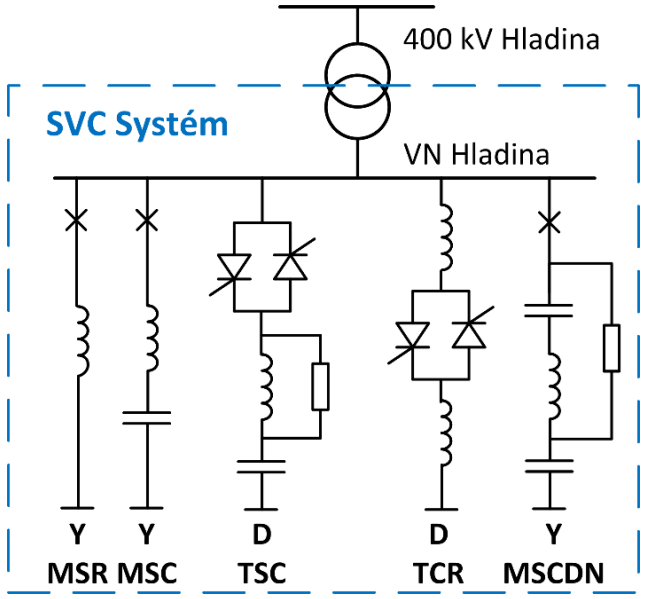
- Přenosové soustavy
- „Industrial“ nebo „Power Quality“

Přehled současně dostupných technologii FACTS

Zařízení na báze tyristorů

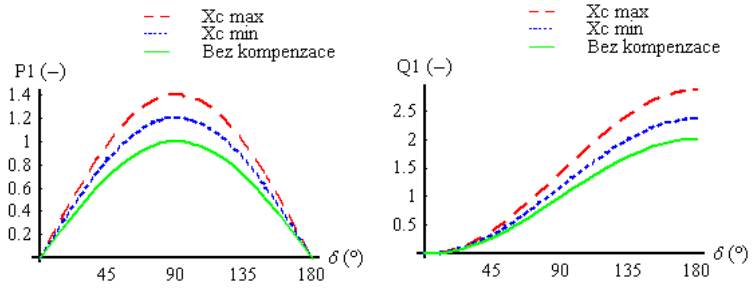
TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor), **Technologické celky SVC** (Static Var Compensator)





Dílčí prvky technologie:

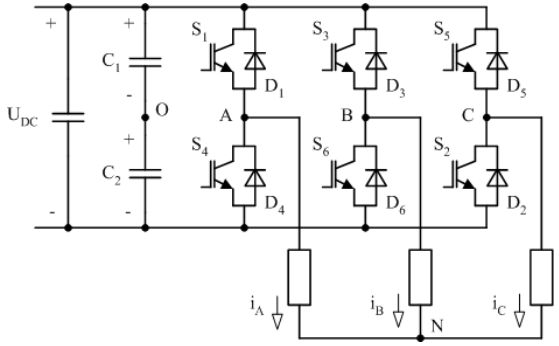
- **TCR** (Thyristor Controlled Reactor)
- **SC** (Series Capacitor)
- **TSC** (Thyristor Switched Capacitor)
- **MSR** (Mechanicaly Switched Reactor)
- **MSC** (Mechanicaly Switched Capacitor)
- **MSCDN** (Mechanicaly Switched Capacitor with Damping Network)



Přehled současně dostupných technologii FACTS

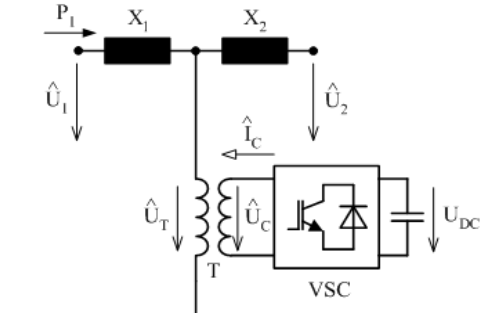
Zařízení na báze tranzistorů – základním prvek je VSC (Voltage Source Converter)

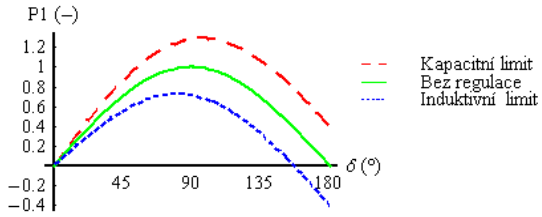
- jedná se o 6-ti pulzní můstek postavěny na základě IGBT tranzistorů
- starší aplikace na báze tyristorů GTO (IGCT)
- stejnosměrný obvod s kondenzátory
- Sériové nebo paralelní připojení do sítě přes transformátor



STATCOM

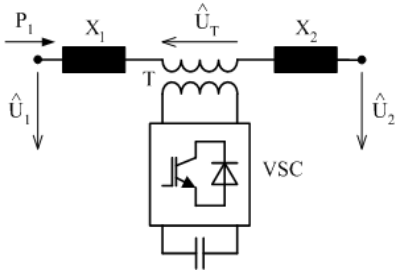
(Static Synchronous Compensator)

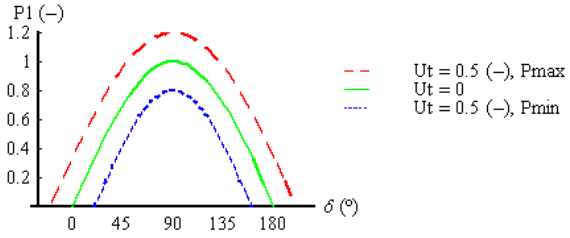




SSSC

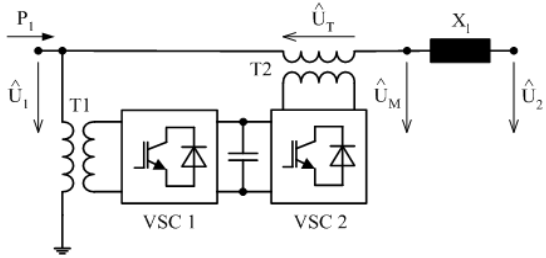
(Static Synchronous Series Compensator)

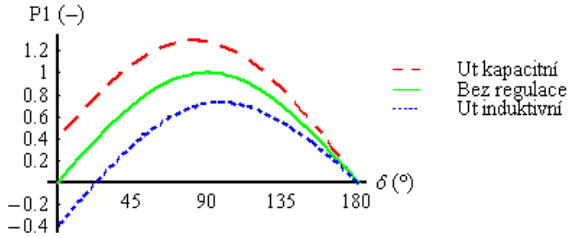




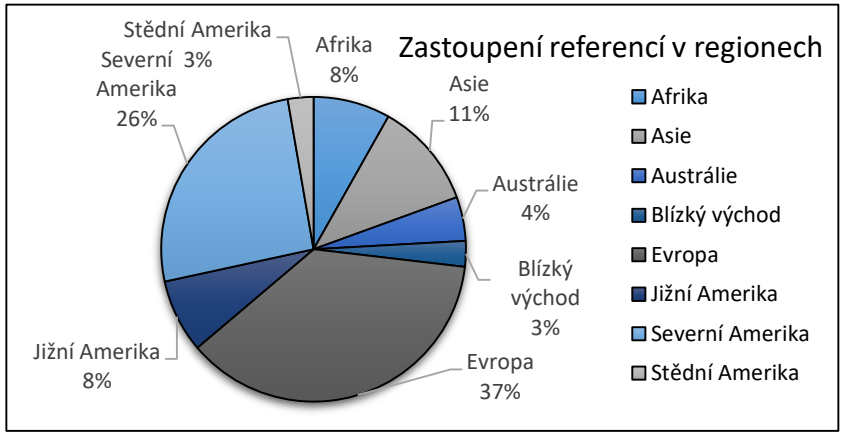
UPFC

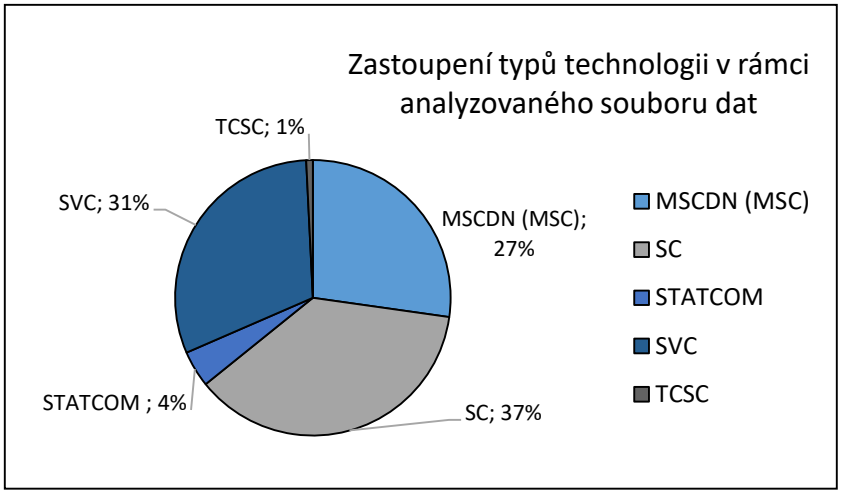
(Unified Power Flow Controller)

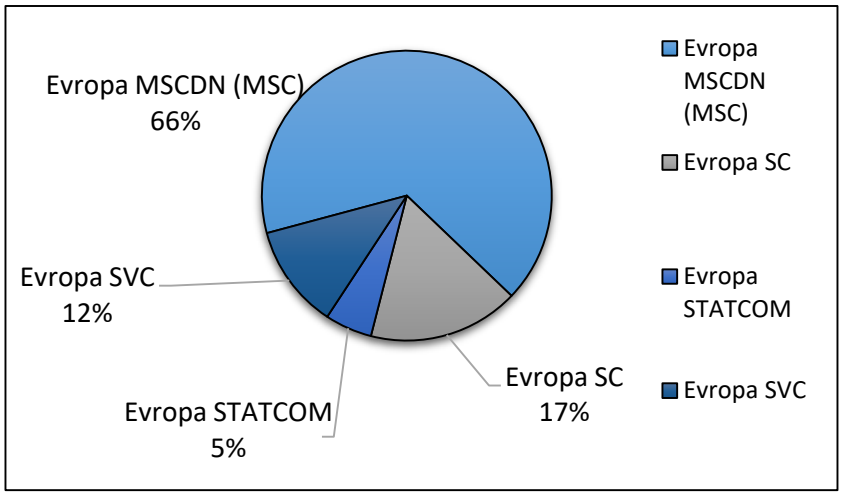




Přehled referencí







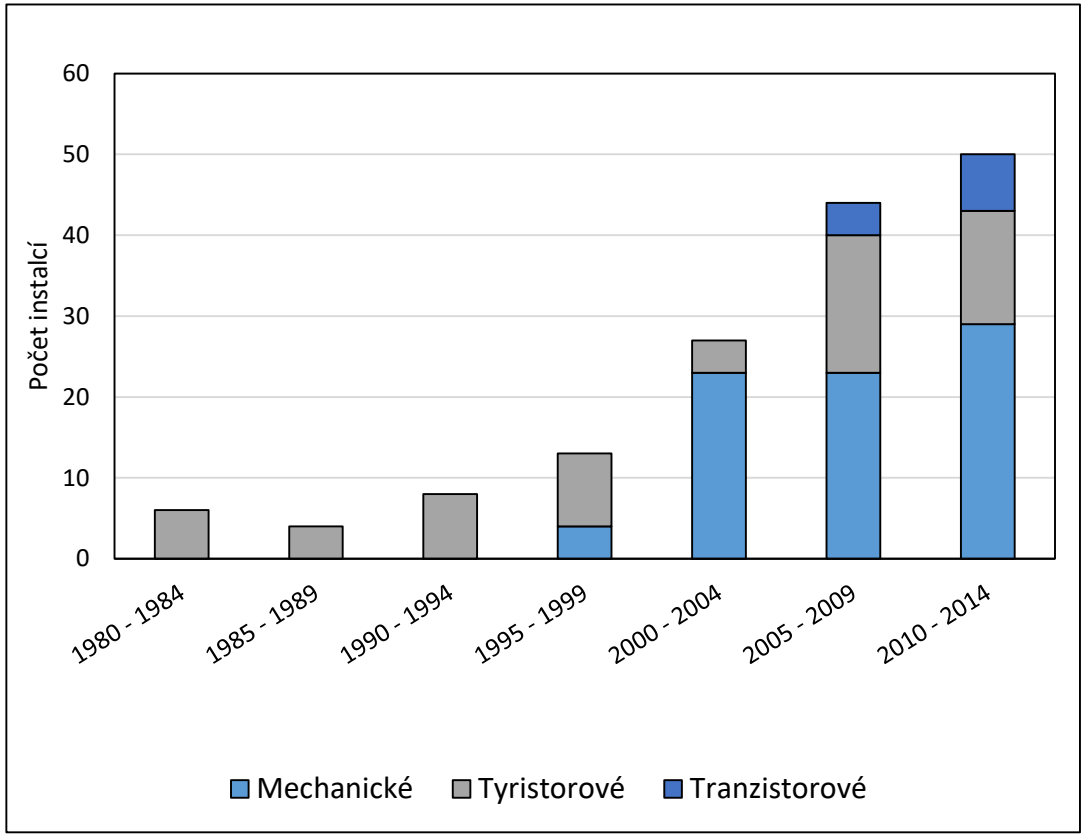
Globální využívání FACTS

- Většina aplikací v Evropě pro posilnění soustavy, regulace napětí, zvýšení spolehlivosti, integrací OZE v hustě osídlených oblastech
- V regionech Severní, Střední a Jižní Ameriky, Blízkého východu, a Austrálie - podpora přenosových schopností velkých výkonů na velké vzdáleností, posílení stability, tlumení výkonových oscilací
- V jiných krajinách podpora stability soustav se slabou a zanedbanou infrastrukturou

Využívání FACTS technologií v Evropě

- Často regulace napětí v uzlech, nahrazování elektrárenských zdrojů jalového výkonu
- Podpora statické i dynamické stability a výkonových oscilací v oblastech s vysokou koncentrací OZE a hustě osídlených oblastech

Trendy ve vývoji



- První vlna byla založena na uplatnění základní myšlenky FACTS zařízení (nástup technologie tyristorů).
- Myšlenka mechanicky spínaných zařízení - úspory investičních nákladů
- Rozvoj „Voltage Source Convertor“ na báza IGBT tranzistorů

Přehled funkcí FACTS zařízení

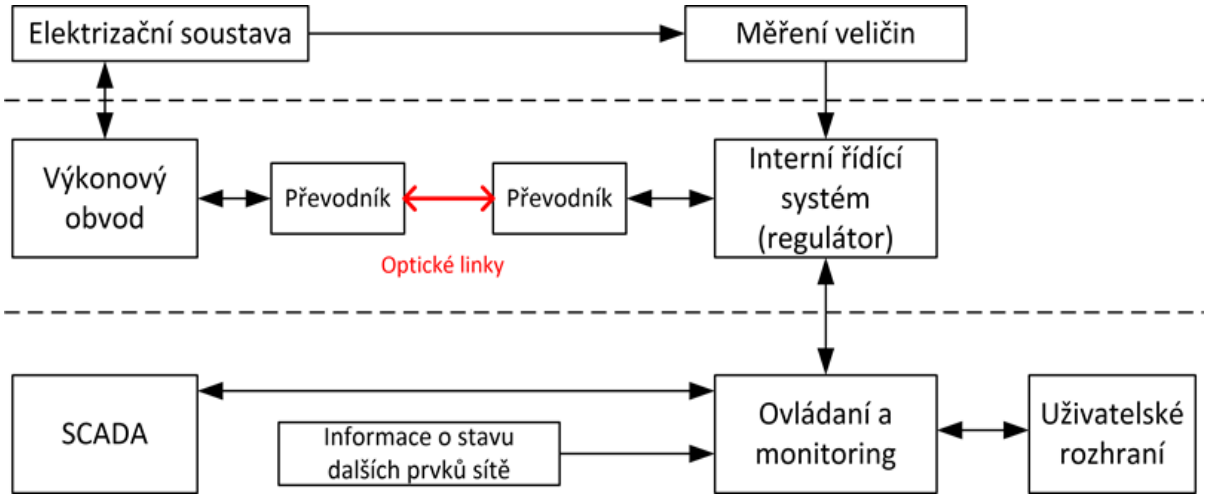
- **Regulace napětí uzlu** – injektováním nebo odběrem jalového výkonu v uzlu připojení,
- **Zvýšení statické i dynamické stability**
- **Tlumení výkonových oscilací** – omezování elektromechanických oscilací pomocí dynamického řízení FACST zařízení
- **Zvýšení přenosové kapacity vedení**
- **Řízení výkonových toků** – pomocí sériových prvků, PST a soustavy řízených uzlových paralelních prvků

Využití/technologie	TCSC	SC	SVC	STATCOM	SSSC	UPFC	PST	MSC(DN)	MSR
Řízení výkonových toků	ano	ano	částečně	částečně	ano	ano	ano	částečně	částečně
Zvýšení přenosové kapacity	ano	ano	ano	ano	ano	ano	????	částečně	ne
Tlumení výkonových oscilací	ano	ne	ano	ano	ano	ano	ne	ne	ne
Regulace uzlového napětí	nepřímo	nepřímo	ano	ano	nepřímo	ano	nepřímo	skokově	skokově
Zlepšení statické stability	ano	ano	ano	ano	ano	ano	nepřímo	nepřímo	ne
Zlepšení dynamické stability	ano	ne	ano	ano	ano	ano	ne	ne	ne

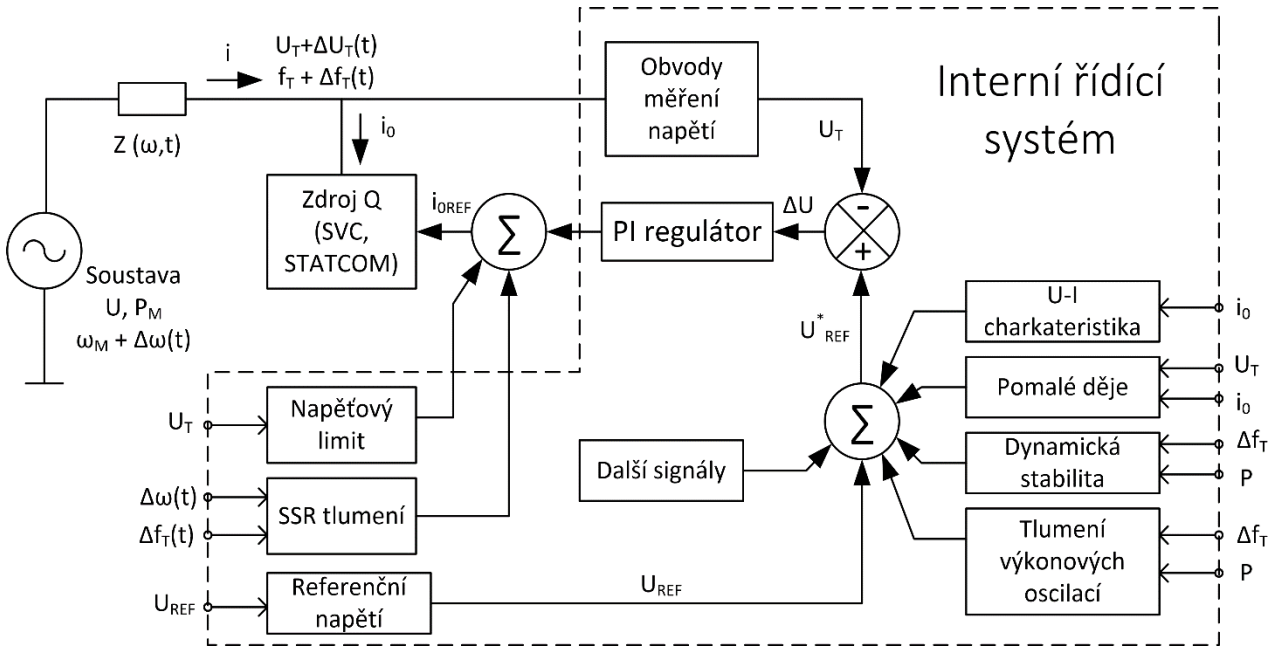
Řídící systém FACTS

Moderní regulační obvody jsou výhradně číslicového provedení, co přináší řadu výhod. Mezi hlavní výhody patří zejména:

- Stabilita nastavení v čase
- Možnost jednoduché volby z vícerých předem definovaných setů nastavení
- Možnost změny nastavení a režimu dálkově
- Možnost obnovy referenčních nastavení
- Uživatelské rozhraní



Struktura řízení paralelních FACTS systémů

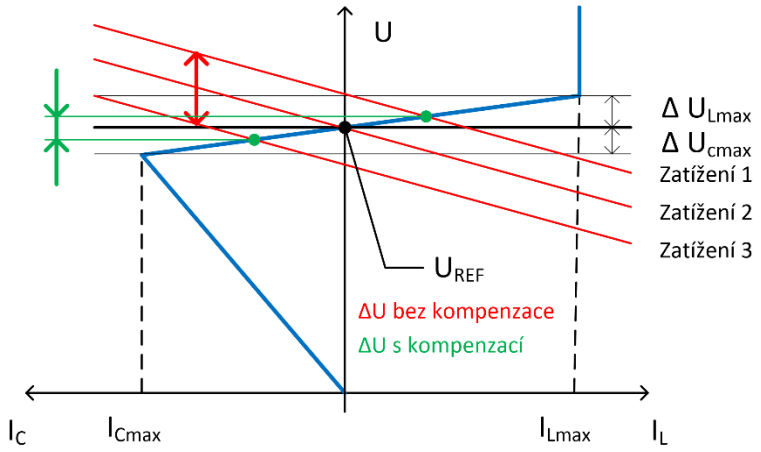


Funkční moduly

- Regulace napětí
- Rezerva jalového výkonu
- Podpora dynamické stability
- Tlumení výkonových oscilací

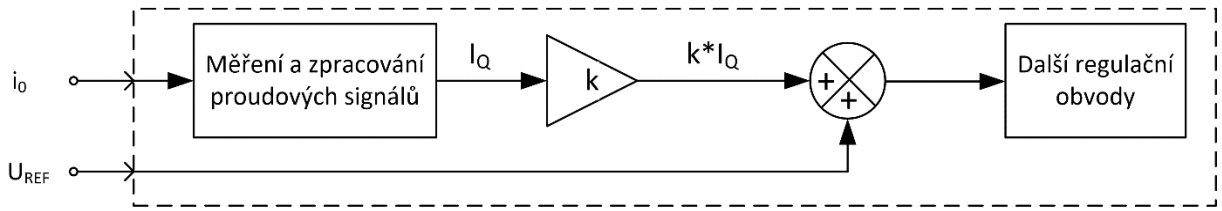
- V rámci jednotlivých bloků jsou obsaženy obvody pro měření, zpracování signálu, regulaci, dále logické ochranné obvody…

Napěťová regulace dle U-I charakteristik



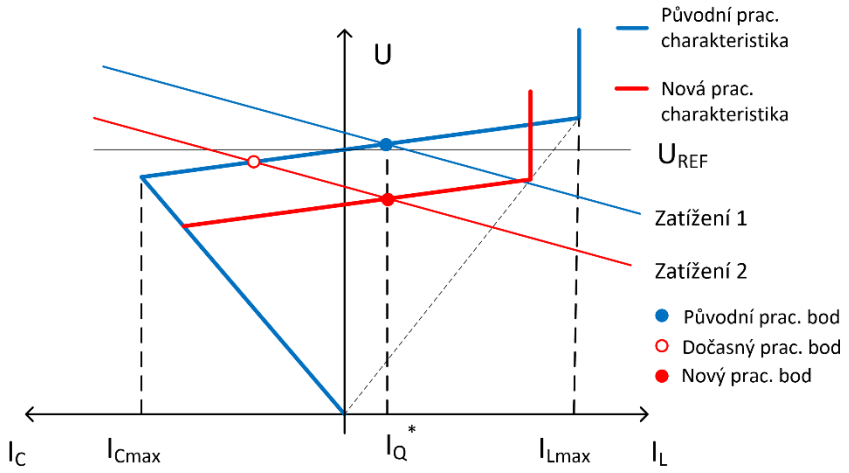
- Modré křivky ukazují nastavení konkrétních dovolených pracovních bodů SVC v U-I rovině
- Červené křivky demonstrují závislost napětí v uzlu na jalovém výkonu, který je z daného uzlu injektován do sítě, nebo je do něj injektován ze sítě.
- S měnícím se zatížením uzlu se mění poloha těchto přímek v posunutí, tedy čím vyšší zatížení, tým je přímka níž.
- Platí „zatížení 1“ < „zatížení 2“ < „zatížení 3“.
- Uvážíme-li systém bez SVC, pokles napětí při přechodě ze „zatížení 1“ do „zatížení 3“, bude pokles napětí mnohem větší než v případě systému s kompenzací, který vlivem poklesu napětí začne do uzlu injektovat jalový výkon.
- IEEE standard 1031 „IEEE Guide for the Functional Specification of Transmission Static Var Compensators“

$$U^{*}_{REF} = U_{REF} + k\ I_Q = U_{REF} + \frac{\Delta U_{C\max}}{I_{C\max}} I_Q = U_{REF} + \frac{\Delta U_{L\max}}{I_{L\max}} I_Q$$

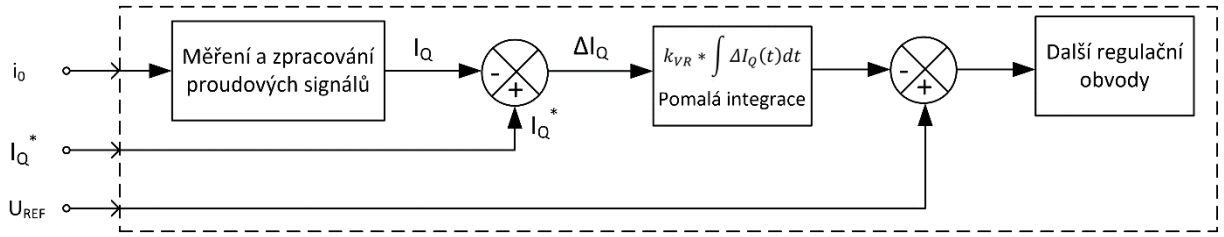


i_0 - proud kompenzačního zařízení
U_{REF} - referenční napětí

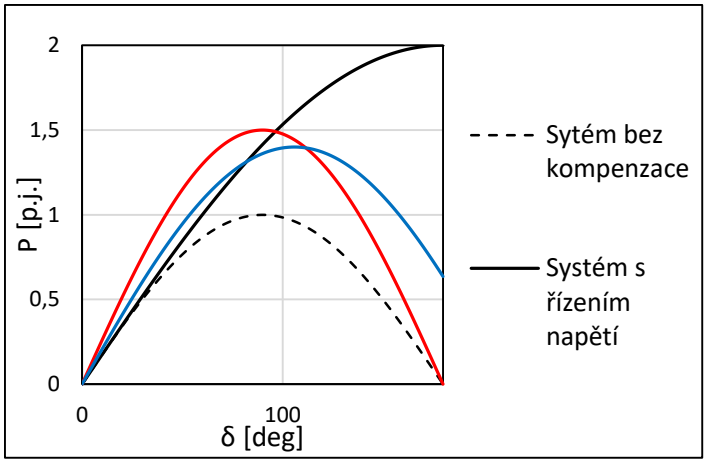
Regulace pro rezervu jalového výkonu

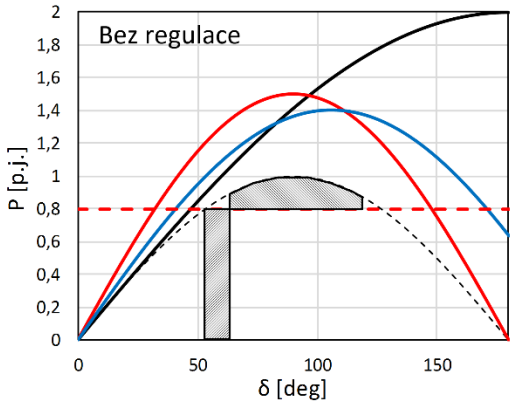


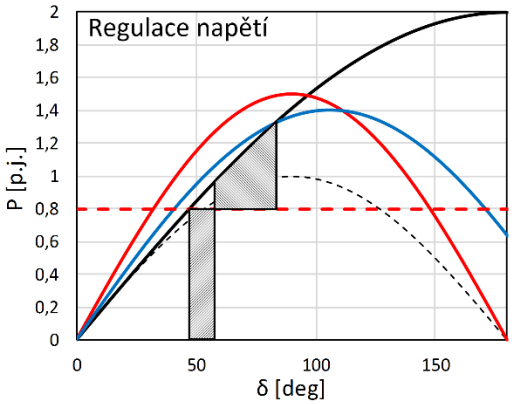
- FACTS systémy jsou obvykle tvořeny kombinací mechanicky spínaných, tyristorově spínaných, tyristorově řízených a PWM řízených sekcí
- U mechanicky spínaných sekcí spínaní trvá delší dobu, počet spínaní je pro určitý časový interval omezen
- Řešením je blok „Var Resevre“
- V první fázi regulace po modré U-I křivce
- Dojde k připojení mechanicky spínané sekce
- Pomalé doregulování

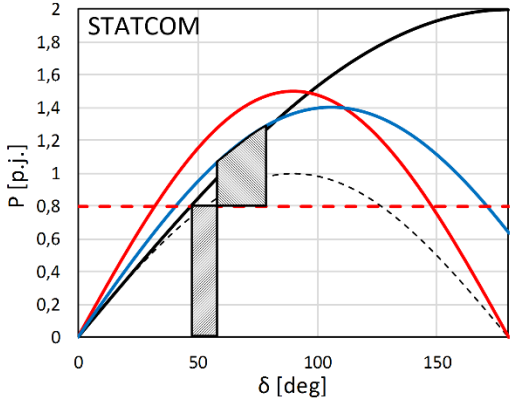


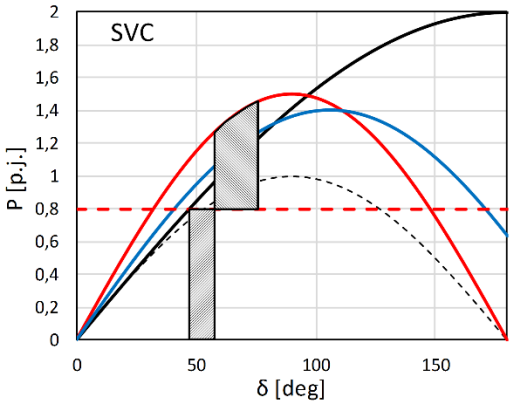
Vliv FACTS na stabilitu systému



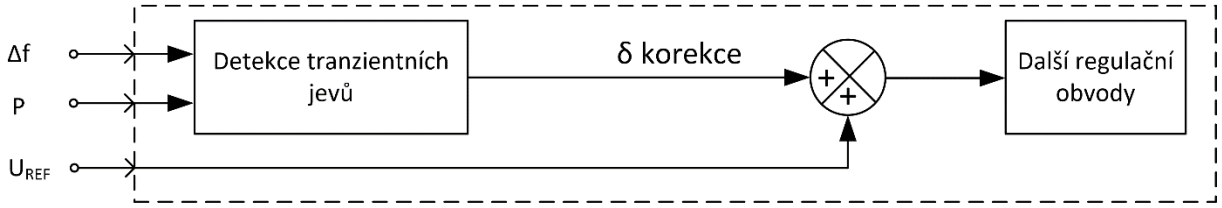




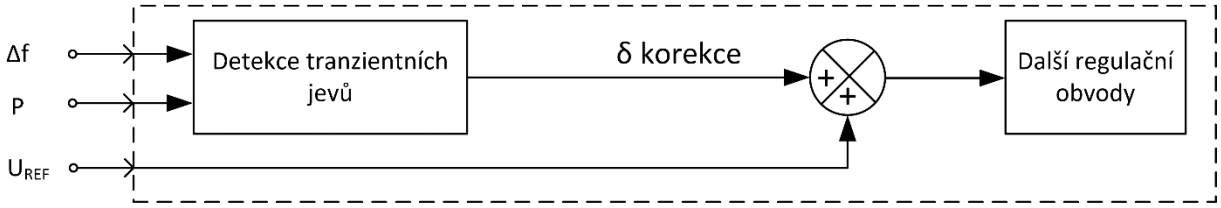




- Na základě změn frekvence a činného výkonu je aplikován modul pro podporu dynamické stability



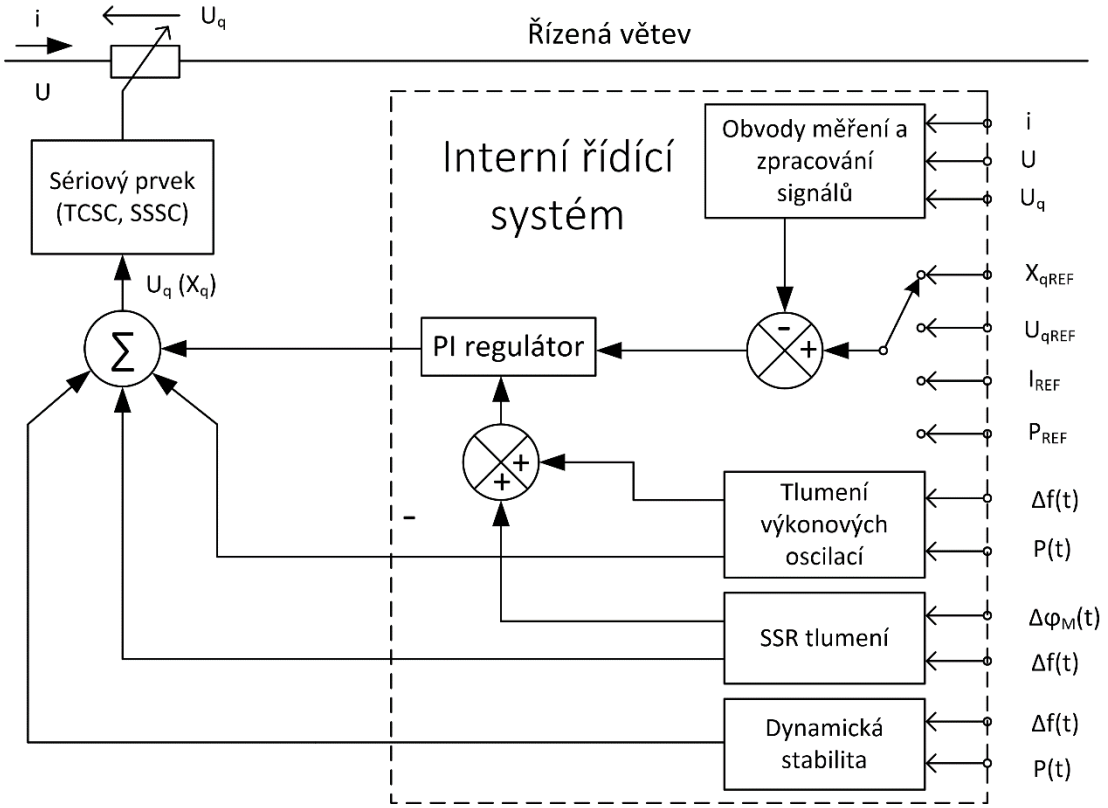
Tlumení výkonových oscilací



Blok pro tlumení výkonových oscilací

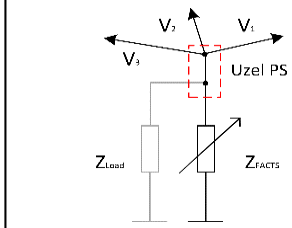
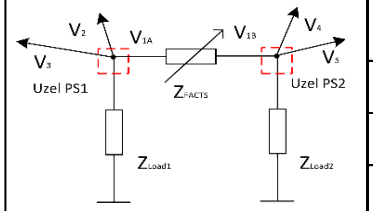
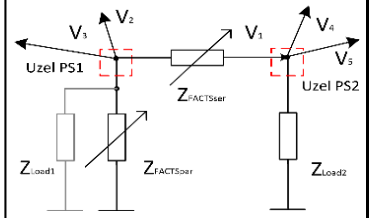
- Při přechodných dějích v přenosové soustavě dochází na straně výroby ke kolísání frekvence rotorového tělesa generátorů (kývání rotoru) na základě energie akumulované v setrvačných hmotách.
- Tyto oscilace ovlivňují stabilitu systému a přispívají k namáhání rotoru. Projevují oscilacemi výkonu s frekvencí desetin a maximálně jednotek Hz.
- Pomocí vhodné řídicí strategie kompenzačního systému je možné tyto oscilace zatlumit.
- Zlepšení se v praxi projeví kratší dobou odeznění výkonových oscilací Řídicí blok tlumení výkonových oscilací detekuje změny přenášeného činného výkonu, změny frekvence a zátěžného úhlu ve vybraném frekvenčním pásmu (například 0,05 Hz až 5 Hz).

Struktura řízení sériových FACTS systémů



- Obdobně jak u řídících systémů paralelních FACTS
- **Možnost volby řídící strategie**
  - podélná reaktance
  - velikost proudu
  - velikost napětí na řízeném prvku
  - zadaný přenášený činný výkon
- **Doplňující funkce**
  - tlumení výkonových oscilací
  - tlumení subsynchronních rezonancí SSR
  - dynamická stabilita

Přehled dynamických vlastností FACTS

Popis		Možnost pracovního režimu		Vlastnosti řízení			
Typ zapojení	Technologie	Induktivní mód	Kapacitní mód	Fixní	Skokově	Spojitě	Dynamika
	MSR	ano	ne	ano	částečně[3]	ne	dle vypínače[1]
	MSCDN	ne	ano	ano	ne	ne	dle vypínače[1]
	SVC	ano	ano	ne	částečně[2]	ano	15 ms
	STATCOM	ano	ano	ne	ne	ano	pod 1 ms
	SC	ne	ano	ano	částečně[3]	ne	dle vypínače[1]
	TCSC	ano	ano	ne	částečně[4]	ano	15 ms
	SSSC	ano	ano	ne	ne	ano	pod 1 ms
	PST	ano	ano	ne	ano	ne	dle přep. odboček
	UPFC	ano	ano	ne	ne	ano	pod 1 ms

1). Samotný vypínací proces vypínače se pohybuje v jednotkách period (50 Hz), ovšem zde je nežádoucí časté opakováni spínacích cyklů, co vede ke značné snížení doby života vypinače

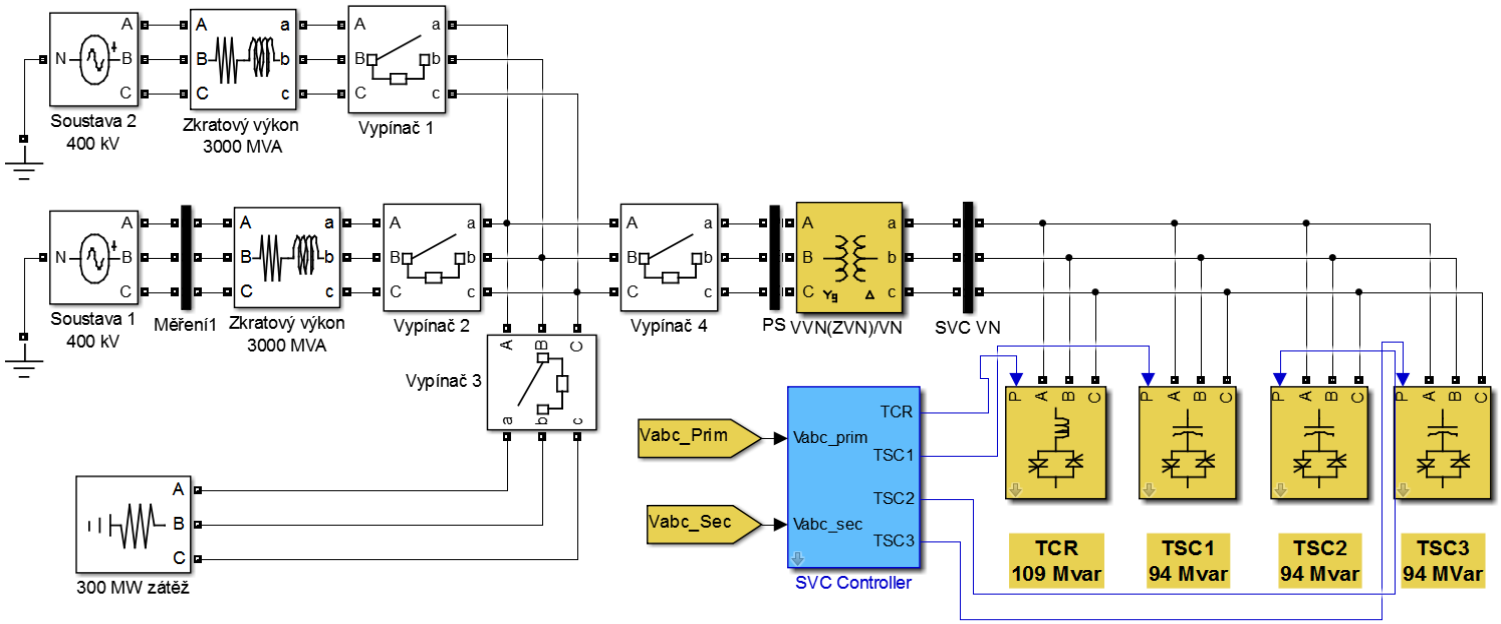
2). SVC může být komplexní systém (kombinace TCR, TSC, MSCDN a MSR), přičemž odezva 15 ms se týka jen výkovému rozsahu jednotky TCR a TSC. U mechanicky spínaných zařízení se opět projevuje omezení vypínače.

3) V případě rozdělení na stupně. Možnost MSR s přepínačem odboček, případně regulovatelná tlumivka.

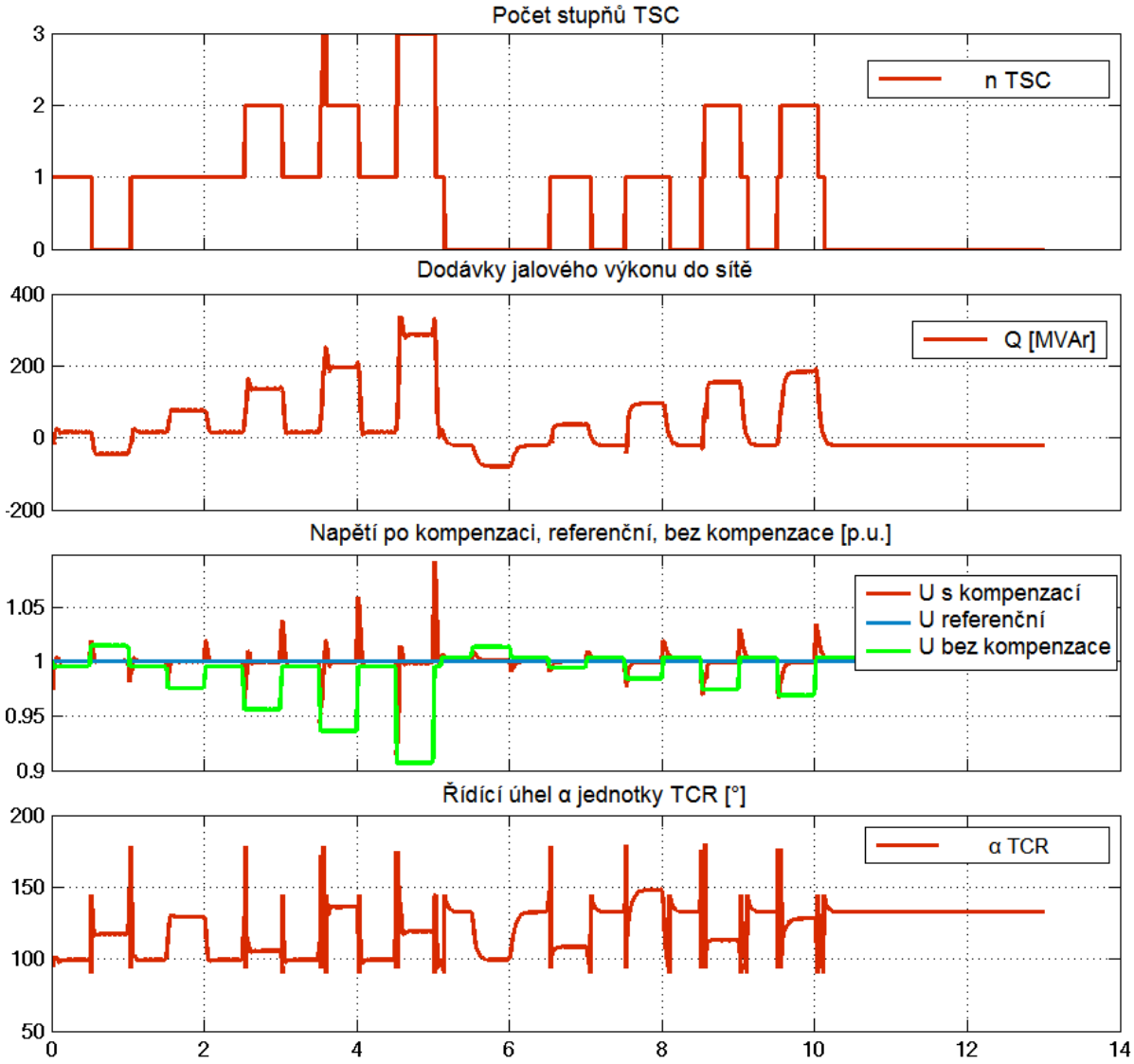
4). V případe zařízení v mechanicky spínatelnými stupněma.

Ukázka dynamického chováni FACST

- uzel v přenosové soustavě 400 kV, který může být napájen dvěma vedeními, přičemž na konci každého vedení je **rázový zkratový výkon 3000 MVA**
- v uzlu je také připojeno zatížení s **výkonem 300 MW. Zjevně jedná o kritický bod systému.**
- řešením = nasazení **SVC zařízení tvořeného TCR + třemi stupni TSC. Výkon jednotky TCR je navržen na hodnotu 109 MVAr a každá jednotka TSC má navržený výkon -94 MVAr.**
- SVC je navrženo pro systém 22 kV, co vyvolá **potřebu transformátoru 400/22 kV.**
- zajištění **stabilitu napětí v kritickém uzlu** vůči vnějším změnám.



Ukázka dynamického chováni FACST



- Po celou dobu simulace bola připojená 300 MW činná zátěž přes vypínač 3.
- SVC zařízení bylo také celou dobu připojeno přes vypínač 4.
- Kritický uzel byl celou dobu napájený přes vypínač 2, přičemž v čase 5.1 s došlo k sepnutí vypínače 1.

- Výsledky simulace ukazují, že v kritickém režimu kdy je uzel napájen jen ze soustavy 1, je SVC účinné.
- Projevují se tady ovšem krátké napěťové špičky a poklesy, které jsou způsobovány připínáním a odepínáním jednotlivých stupňů TSC.

Děkuji Vám za pozornost!