



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

---

Fakulta elektrotechnická  
Katedra elektroenergetiky

# **Řízení a provoz FACTS zařízení v přenosových a distribučních soustavách**

**Operation and control of FACTS devices in transmission and distribution  
networks**

Diplomová práce

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní odbor: Energetika

Vedoucí práce: Ing. Martin Čerňan

**Nikolai Solenov**

---

**Praha 2017**

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Solenov** Jméno: **Nikolai** Osobní číslo: **406205**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektroenergetiky**  
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**  
Studijní obor: **Elektroenergetika**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Řízení a provoz FACTS zařízení v přenosových a distribučních soustavách**

Název diplomové práce anglicky:

**Operation and control of FACTS devices in transmission and distribution networks**

Pokyny pro vypracování:

1. Zpracujte přehled aplikací využívaných FACTS zařízení v přenosových a distribučních soustavách včetně analýzy vývoje světových referencí jednotlivých technologií.
2. Zpracujte přehled řídicích systému paralelních a sériových FACTS systémů včetně dílčích bloků pro jednotlivé funkce FACTS systémů.
3. Vytvořte matematický model ? dynamickou simulaci jednoho vybraného FACTS systému. Zaměřte se zejména na regulační obvody část modelu.
4. Otestujte využití moderních metod regulace ? například Fuzzy regulátor.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Hingorani, N.G., Gyugyi L.: Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems. New York: IEEE Press, c2000. 432 s. ISBN 0-7803-3455-8.  
[2] ACHA, Enrique. FACTS: modelling and simulation in power networks. Hoboken, NJ: J. Wiley, c2004. ISBN 0470852712.  
[3] SEN, Kalyan K. a Mey Ling. SEN. Introduction to FACTS controllers: theory, modeling, and applications. Piscataway, NJ: IEEE Press, c2009. IEEE Press series on power engineering. ISBN 0470478756.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**Ing. Martin Čerňan, katedra elektroenergetiky FEL**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **14.02.2017**

Termín odevzdání diplomové práce: **26.05.2017**

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2018**

Podpis vedoucí(ho) práce

Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

Podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze, dne 26. května 2017

Podpis

.....

## **Poděkování**

Rád bych zde poděkoval vedoucímu mé diplomové práce Ing. Martinu Čerňanovi, za odborné vedení práce a cenné rady, které mi pomohly tuto práci zkompletovat, za jeho čas, který mi věnoval při řešení dané problematiky, důležité konzultace a blahosklonní přístup.

## Abstrakt

Tato diplomová práce se primárně zabývá problematikou aktuálně používaných FACTS zařízení a zpracováním analýzy celosvětových referencí použití FACTS zařízení v přenosových soustavách, průmyslů a distribučních sítích. V diplomové práci byla postupně vysvětlována problematika FACTS zařízení hlavně se zaměřením na současně používané druhy FACTS zařízení, cíle a přínosy při použití FACTS zařízení různých typů. V dalších kapitolách diplomové práce byla zpracována analýza celosvětových referencí FACTS zařízení v přenosových a distribučních soustavách s zaměřením na evropské referenci a vývoj používaných technologií. Dalším bodem práce bylo navrhování matematického vybraného typu FACTS zařízení – SVC (Static Var Compensator) z popisem jednotlivých bloku a funkcí regulátoru a porovnání dvou typů regulaci. V závěru byly rozepsané výsledky a hlavní výhody navržených řešení při použití moderních regulačních elementu na bázi FACTS zařízení.

**Klíčová slova:** FACTS zařízení, světové reference, distribuční soustava, přenosová soustava, SVC matematický model, fuzzy regulátor.

## Abstract

This diploma thesis deals primarily with the issue of currently used FACTS devices, by analyzing the global reference of the use of FACTS devices in transmission systems, industries and distribution networks. The diploma thesis has gradually elucidated the issue of FACTS equipment mainly with a focus on currently used FACTS devices, aims and benefits of using different kinds of FACTS devices. In the next chapters of this diploma thesis we analyzed the global references of FACTS devices in transmission and distribution systems with a focus on European reference and the development of used technologies. Another point of the thesis was the design of the mathematical model of FACTS devices - SVC (Static Var Compensator) from the block description and the functionality of the controller. In conclusion, there was presented summary of the main advantages proposed solutions using modern regulation elements based on FACTS device.

**Key words:** FACTS devices, world references, distribution system, transmission systems, SVC mathematical model, fuzzy regulator.

## Obsah

<b>Zadání.....</b>	<b>2</b>
<b>Prohlášení.....</b>	<b>3</b>
<b>Poděkování .....</b>	<b>4</b>
<b>Abstrakt.....</b>	<b>5</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>6</b>
<b>Obsah.....</b>	<b>7</b>
<b>Úvod.....</b>	<b>9</b>
<b>1 Přehled a použití systémů FACTS.....</b>	<b>10</b>
1.1 Regulační zařízení kompenzaci jalového výkonu, zapojené do sítě paralelně.....	10
1.2 Regulační zařízení kompenzaci jalového výkonu, zapojené do sítě sériově.....	11
1.3 Regulační zařízení zapojené do sítě sériově - paralelně.....	12
1.4 Výhody při použití systémů FACTS.....	12
1.5 Řešení FACTS od společnosti Siemens .....	16
1.6 Řešení FACTS od společnosti ABB .....	18
<b>2 Světové reference použití FACTS zařízení.....</b>	<b>22</b>
2.1 Metafologie a předpoklady.....	22
2.2 Základní rozbor souboru světových referencí .....	22
2.3 Doplnkové rozboru světových referencí .....	29
2.4 Reference současného použití FACTS technologií .....	31
<b>3 Modelování dynamického chování FACTS zařízení.....</b>	<b>36</b>

3.1	Řízení paralelních FACTS zařízení .....	36
3.2	Statické charakteristiky SVC .....	37
3.3	Fuzzy logika a fuzzy regulace .....	40
3.4	Návrh SVC modelu s použitím Fyzzy regulátora .....	40
<b>4</b>	<b>Praktické ukázky řešení navrhovaného SVC modelu .....</b>	<b>46</b>
4.1	Výsledky testování a použitých řešení .....	46
	<b>Záver.....</b>	<b>51</b>
	<b>Použitá literatura .....</b>	<b>53</b>
	<b>Seznam příloh.....</b>	<b>55</b>
	<b>Príloha A.....</b>	<b>56</b>



## Úvod

Zabezpečení dodržování kvalitativních parametrů, jakými jsou napětí a frekvence, při dodávce elektrické energie, je jednou z hlavních úloh provozovatelů distribučních a přenosových soustav nejen v ČR, ale i po celém světě. Provoz sítí může být ohrožován například neplánovanými přetoky elektrické energie, které většinou mohou být vyvolané neočekávanými změnami buď ve výrobním procesu nebo méně často spotřebě energie.. Jelikož si toky elektrického proudu vybírají cestu nejmenšího odporu, není vždy možné nebo alespoň snadné jejich velikost a rozložení na jednotlivá vedení ovlivnit či zcela řídit. Pro účely optimalizaci toků výkonu a efektivního provozu elektrizačních soustav existuje řada speciálních zařízení, která v této úloze hrají klíčovou roli.

Technologie FACTS (angl. Flexible Alternative Current Transmission Systems) je běžně používané technologii pro řízení toku výkonu. Tato zařízení zvyšují spolehlivost a možnosti řízení distribučních a přenosových sítí, přenosové schopnosti vedení a také snižují cenu přenosu elektrické energie v důsledku omezení ztrát. Do této skupiny elektrických zařízení spadá řada systémů skládajících se především z pasivních prvků jako kondenzátory nebo tlumivky, které bývají řízeny výkonovou elektronikou.

Použití FACTS zařízení z historického pohledu bylo vyvoláno postupným nárůstem požadavků na kvalitu elektrické energie v přenosových a distribučních soustavách, které už nebylo možné odstraňovat pouze dimenzováním a odstraněním zdrojů zbytečně dodávaného do sítě jalového výkonu v průmyslu, hlavně ve slévárnách.

V současné době použití FACTS zařízení v distribučních a přenosových systémech má ještě větší nárůst, který je vyvolán rozvojem použití zdrojů obnovitelné energie, zejména větrných a fotovoltaických elektráren, vyšší kontrolou za kvalitou elektrické energie, nutnosti splňování technických předpisu a norem a koncepci SmartGrids. Rozšíření použití FACTS zařízení v posledních desetiletích je taky spojen s rozvojem řídicích technologií a jednotek na bázi tyristorů a tranzistorů. Přehled a analýza současných trendů rozvoje FACTS technologií je taky součástí této diplomové práce.

# 1 Přehled a použití systémů FACTS

Systémy FACTS slouží ke zvýšení kapacity přenosových linek, s cílem zajistit stabilní provoz elektrizační soustavy při různých odchylkách, zajištění specifikované distribuce elektrické energie v síti v souladu s požadavky dispečeru, zvýšení spolehlivosti úspory energie u spotřebitelů, snižování ztrát v elektrických sítích, řešení problematiky změny elektrické sítě z pasivního distribučního zařízení na aktivní regulační prvek elektrizační soustavy.

Zahájení prací na vytvoření systémů FACTS bylo v 60-tých letech 20. století. Řada zemí začala se zabývat výzkumem rychlých statických zdrojů jalového výkonu. Tato zařízení umožňují stabilizaci napětí v jednotlivých uzlech elektrizační soustavy a tím zvýší kapacitu přenosových linek a stabilitu systémů. Byly zkoumány různé typy těchto zařízení a vyrobeny poloprovozní vzorky některých z nich. Nicméně, rozšířené uplatnění těchto zařízení bylo brzděno nedostatkem dostatečně výkonných tyristorů, hlavně řízených.

Hlavní skupiny FACTS můžeme rozdělit na:

- zařízení regulaci (kompenzaci) jalového výkonu a napětí, zapojené do sítě paralelně;
- zařízení regulaci sítě (odolnosti sítě), zapojených do série v síti;
- zařízení, která kombinují funkce z prvních dvou skupin – podélně-příčné spínací prvky.

Některé typy FACTS zařízení jsou také používány v zařízeních pro omezení zkratových proudů a linek střídavého a stejnosměrného napájení s využitím nových kompozitních materiálů a vysokoteplotních supravodičů.

## 1.1 Regulační zařízení kompenzaci jalového výkonu, zapojené do sítě paralelně

Obecně jak neřízené a řízené (nastavitelné) zařízení pro kompenzaci reaktivního výkonu jsou používány pro úroveň napětí 110 až 750 kV v elektrických sítích, regulaci výkonu mezi energetickými systémy, s dráty elektrického vedení, ke zvýšení prostupné schopnosti vedení, zlepšení statické a dynamické stability energetických systémů. Tato zařízení mohou být rozděleny do statické a elektromechanické.

Ke statickým patří:

- Statické kompenzační baterie (SKB) - určené ke zvýšení napětí (3-4%) v sítích 6-220 kW. Kromě toho, SKB umožňuje korigovat toky energii a regulovat napětí v napájecím systému, změnou jalového výkonu zátěže;
- Reaktorové skupiny, přepínatelné vakuovými jističi (VRS) - slouží ke kompenzaci výkonu přenosového vedení a v uzlech s cílem udržovat napětí v dovolených mezích v ustáleném stavu, umožňují stupňovou regulaci jalového výkonu;
- statické tyristorové kompenzátory (STK) - kompenzují průměrný jalový výkon zatížení;
- statické kompenzátory jalového výkonu, provedené na bázi měničů napětí pomocí moderních výkonných IGBT tranzistorů - STATCOM - jejichž účelem je udržovat požadovanou úroveň a kvalitu napětí, a taky zvýšení přenosových schopností soustavy.

K elektromechanickým patří:

- synchronní kompenzátory (SK);
- asynchronní statické kompenzátory (ASK) – jsou používány v elektrických sítích pro eliminaci deficitu jalového výkonu a regulaci napětí v sítích.

## **1.2 Regulační zařízení kompenzaci jalového výkonu, zapojené do sítě seriově**

Tato zařízení jsou určena pro změnu odporu síťových prvků (kontrola topologie sítě), regulaci dostupné schopnosti vedení, včetně zvýšení, až do omezení oteplování bez poruchy stability, a taky pro přerozdělení toku výkonu v paralelních sítích při změně stavu sítě.

Ke statickým patří:

- Neřízené zařízení podélné kompenzace - určena pro zvýšení kapacity venkovní vedení a představují sebou kondenzátorové baterie zapojené do série s přenosovou soustavou pro kompenzaci podélné části indukční reaktance;

- Řízené zařízení podélné kompenzace - realizují odpor venkovního vedení, zvyšují kapacity venkovního a plynulé přerozdělení výkonu v paralelních sítích, tlumí nízkofrekvenční oscilace;
- Faze obrátové jednotky (FOJ) - použití FOJ umožňuje regulování přenášené energie v přenosové soustavě změnou fázového úhlu mezi napětím na začátku a konci vedení.

### **1.3 Regulační zařízení, zapojené do sítí seriově-paralelně**

Zajišťují předem stanovené regulování velikosti a fáze vektoru napětí v místech jejich připojení na místech jejich připojení (vektorové řízení), optimalizují se pomocí toho kontrola toku výkonu, a to jak ve statických a dynamických režimech. Tato zařízení jsou stanovené buď na základě dvou STATCOM nebo dva ASK zapojených seriově- paralelně.

### **1.4 Výhody při použití systémů FACTS**

FACTS - jsou zařízení, která slouží ke:

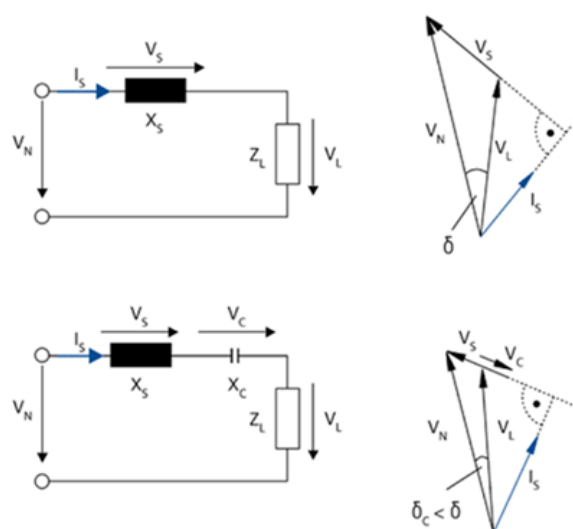
- zvýšení kapacity přenosových linek;
- zajištění stabilního provozu elektrizační soustavy za různých poruch;
- poskytování zadané distribuce výkonu v elektrických elektrizační soustavě v souladu s požadavky dispečera;
- zlepšení spolehlivosti úsporu energie spotřebitelů;
- snížení ztrát v elektrických sítích.

### **1.5 Řešení FACTS od společnosti Siemens**

Společnost Siemens patří ke světovým lídrům v energetice a proto má taky i svoje řešení v energetice pro systémy FACTS. Jako světový lídr v oblasti přenosu a distribuce elektrické energie společnost Siemens vyvinula množství moderních, flexibilních, velkokapacitních FACTS řešení pro efektivní a spolehlivou regulaci napětí, impedanci a fázového úhlu při přenosu elektrické energie na vedeních vysokého napětí. Všechna zařízení můžeme rozdělit na 5 skupin.

Series Compensation (SC - Sériová kompenzace)

Při sériové kompenzaci jsou používány kondenzátory, tlumivky a výkonová elektronika, které nabízejí vysokou flexibilitu. Úkolem sériové kompenzace je snížení indukčnosti přenosového vedení. To znamená, že se délka vedení "se zkracuje" a jako důsledek toho, úhel přenosu se sníží a z toho vyplývá, že může být zvýšen přenášený výkon bez snížení stability systému.



**Obr. 1.1 – Úkol sériových kompenzátoru a jejich přínos**

V závislosti na aplikaci jsou k dispozici tři různé typy sériové kompenzace. Nejběžnější aplikací je Fixed Series Capacitor (FSC - pevný sériový kondenzátor). Mohou být také umístěny Thyristor-Valve Controlled Systems (TCSC – tyristorově řízené sériové kondenzátory) a Thyristor-Valve Protected Systems (TPSC – sériové kondenzátory s tyristorovou ochranou).

V následující tabulce jsou uvedené dopady sériové kompenzace na úrovni zkratu, fázového úhlu přenosu a napětí po výpadku. Taky je uvedena informace o rozsahu použití každého typu zařízení pro sériovou kompenzaci.

Typ	Úroveň zkratu	Úhel přenosu	Napětí po výpadku	Oblasti použití
 SC	zvýšený	silné zmenšení	nízké	Dlouhé přenosové soustavy
 SR	snížený	silné zvětšení	vysoké	Omezení zkratových proudů
 TCSC	regulovaný	regulovatelný	nízké	Regulace toku a kývání výkonu

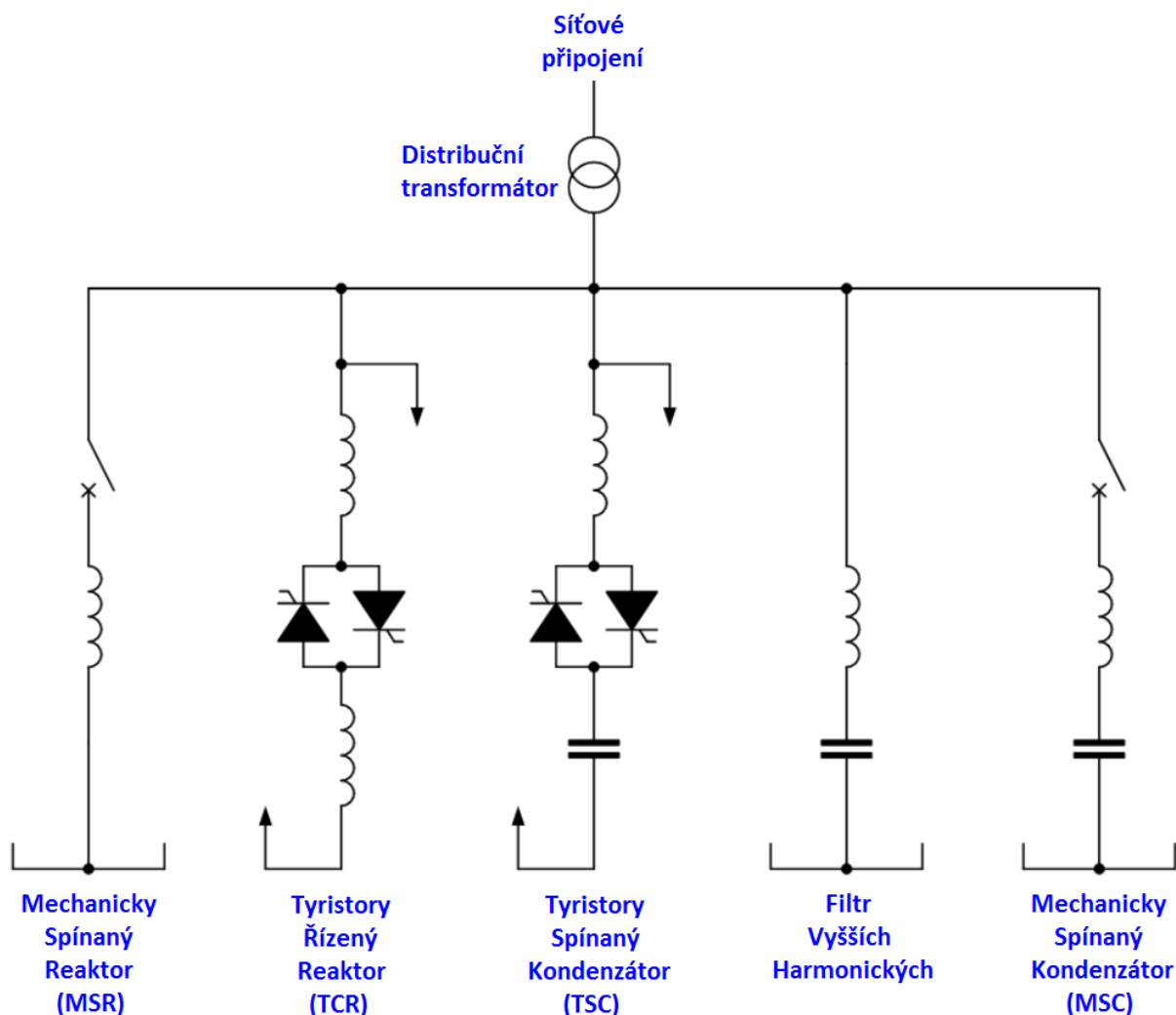
**Tab. 1.1: Dopady sériové kompenzaci na úrovni zkratu, fázového úhlu přenosu a napětí po výpadku**

Static Var Compensation (SVC – statický kompenzátor jalového výkonu)

SVC – je vysokonapěťový systém, který dynamicky reguluje napětí v místě připojení. Jeho hlavním úkolem - neustále udržování předem stanovené hodnoty napětí. K dalším možnostem regulování patří regulování jalového výkonu a asymetrie sítě.

SVC se zapojuje přes VN transformátor. Do sekundárního vinutí jsou zapojené buď dva anebo více paralelních větví. Existují tři hlavní typy větví:

1. TCR – reaktor s tyristorovou regulací pro lineární dodání induktivního jalového výkonu;
2. TSC – kondenzátor s tyristorovou regulací pro lineární dodání kapacitního jalového výkonu;
3. Filtr – kondenzátor pro filtrování instalovaného kapacitního jalového výkonu a harmonických.



**Obr. 1.2 – Obecná schéma zapojení elementů SVC**

Počet a typ vybraných větví závisí na konkrétní aplikaci a návrh je většinou individuální pro každý projekt. Nejjednodušší kombinace je TCR + filtr.

Parametry soustavy pro použití SVC jsou:

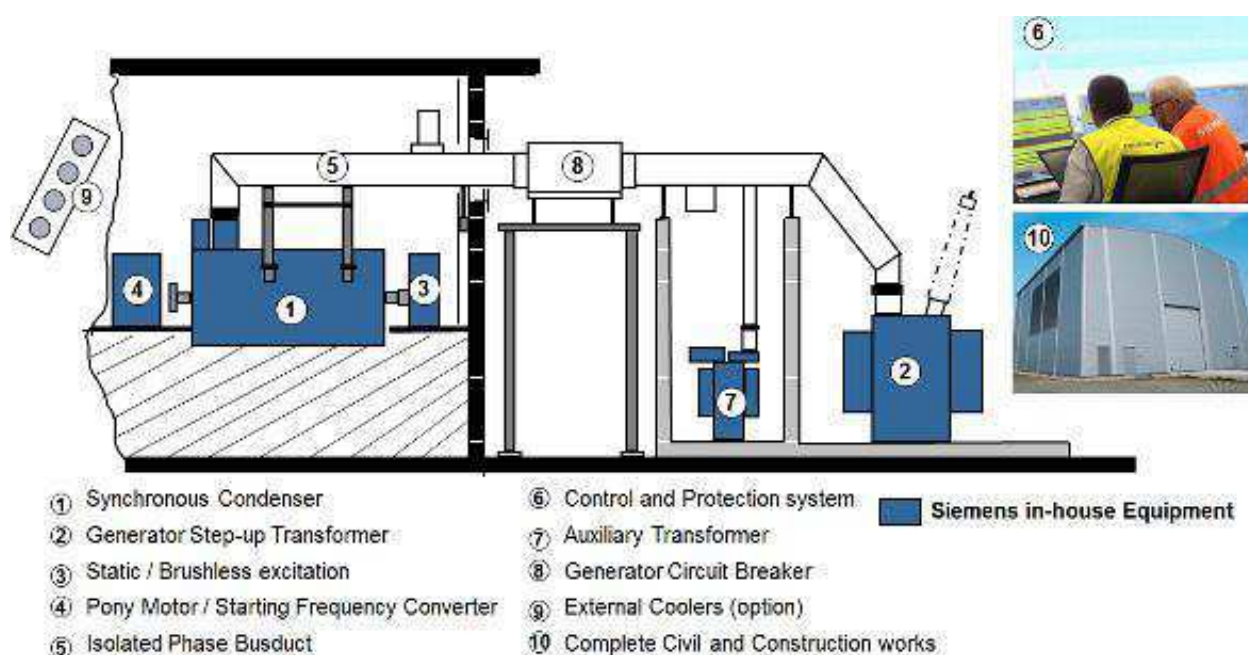
- Nominální napětí:  $30 < U_n < 800 \text{ kV}$
- Nominální jalový výkon:  $40 < Q_n < 800 \text{ kVAr}$

Synchronous Condenser ( SC – Synchronní Kompenzátor)

Použití v současné době v energetice zvyšujícího se množství obnovitelných zdrojů, postupné odstranění tepelných elektráren, použití nových systém pro přenos stejnosměrného

vysokého napětí (HVDC), a rozšiřování distribučních energetických systémů v oblastech vzdálených od centralizovaných sítí - to všechno má vliv na stabilitu elektrického vedení. Ve všech těch případech je vhodné použití synchronních kompenzátorů. Instalace synchronních kondenzátorů má řadu výhod:

- Zvýšení dynamické a statické stability napětí;
- Kompenzace jalového výkonu v dynamických provozních podmínkách;
- Poskytování potřebného výkonu zkratového proudu.



**Obr. 1.3 –Schéma zapojení synchronních kompenzátorů**

### SVC PLUS

SVC PLUS je vylepšená verze STATCOM (statický synchronní kompenzátor). Měnič napětí (VSC) společnosti Siemens na základě modulární víceúrovňové struktury (MMC) poskytuje vysokou ekonomickou a technickou flexibilitu, díky své modulární kontejnerové konstrukci.

Kompaktní a adaptabilní, je to ideální řešení, když je omezený a drahý prostor. Díky technologii modulárního víceúrovňové převodníku (MMC), riziko vzniku harmonických je velmi nízké. Vysokofrekvenční šum je absorbován malým standardizovaným vysokofrekvenční



blokovacím filtrem. V důsledku toho, SVC konstrukce prakticky nezávislý na impedanci konkrétní sítě.

SVC poskytuje provozní výhody, jako je minimální složitost údržbu, stabilizace sítě, vynikající práci při nízkých napětích a vysoká dynamika s ohledem na velmi krátkou dobou odezvy.

Hlavní zařízení SVC PLUS od  $\pm 25$  MVar až  $\pm 50$  MVar. Pro vnitřní instalace k dispozici jsou moduly  $\pm 100$  MVar. Paralelní provoz modulů pro dosažení vyššího výkonu je také možný. Rozměrově přístroje systémy SVC PLUS jsou menší než klasické systémy SVC stejné nominální kapacity přibližně o 50%.

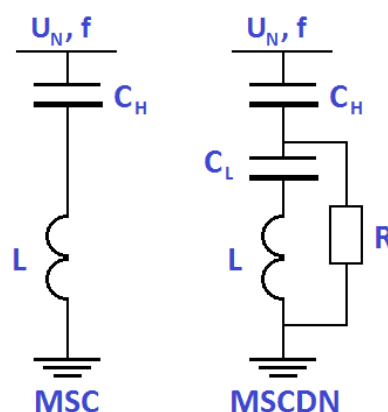


***Obr. 1.4 – Systém SVC PLUS nainstalovaný v Norsku [12]***

#### Mechanicky spínaný kondenzátor (MSC / MSCDN)

Zařízení s mechanickými spínacími přístroji jsou nejméně nákladovými pro kompenzaci jalového výkonu. Toto řešení je jednoduché a levné, ale poskytuje pomalejší regulaci napětí a stabilizaci sítě při vysokém zatížení. Jejich využití nemá téměř žádný vliv na zkratový výkon ale podporuje napětí v místě připojení. Avšak účinnost stabilizace napětí je závislá na vzdálenosti od místa poruchy. MSC nevytváří žádné harmonické, ale může ovlivňovat se systémovými harmonickými.

Pokročilá forma mechanického zapnutého kondenzátoru je MSCDN (Mechanically Switched Capacitor with Damping Network) pro zabránění systémových rezonancí. MSC / MSCDN můžou být ovládané jak vzdáleně, tak i v ručním režimu.



Obr. 1.5 – Přehled zapojení systému MSC/MSCDN [12]

## 1.6 Řešení FACTS od společnosti ABB

Pevná sériová kompenzace – FSC (Fixed Series Compensation)

Pevná sériová kompenzace - je osvědčená technologie, používaná hlavně k snížení přenosové reaktanci, především ve vedeních vysokého napětí. Použití této technologie může významně zlepšit dynamickou stabilitu a optimalizovat napětí ve vedení.

Pevná sériová kompenzace již dlouho je preferovaným řešením pro zlepšení účinnosti velkých energetických vedení a systémů. Sériová kompenzace kapacitní reaktanci v rozšířené (obvykle více než 200 km) přenosové lince snižuje úhlové výchylky, pokles napětí, což zlepšuje kvalitu napětí a zvyšuje stabilitu systému. Kvůli tomu, že změny při přenosu proudu přímo vedou ke produkci kondenzátorem jalového výkonu, vyjádřeného v MVar, taková kompenzace je samoregulační, což dělá sériovou kompenzaci velmi jednoduchým a nákladově efektivním procesem.

V energetické přenosové soustavě maximální činného výkonu přenášený v jednom vedení, je nepřímo úměrná sériové reaktance tohoto vedení. Proto, díky sériové kompenzace reaktanci do určité míry pomoci kondenzátoru podélné kompenzaci je možné realizovat "elektronicky kratší linku" a dosáhnout zvýšení přenosu aktivního výkonu. Vzhledem k tomu, že kondenzátor

sériové kompenzace je samoregulačním zařízením, tj. napětí na tomto kondenzátoru se mění (bez regulace) úměrně proudu ve vedení, a taky umožňuje částečně kompenzovat pokles napětí, vyvolaný přenosovou reaktancí. A z toho plyne zvýšení stability napětí elektrizační soustavy.

#### Tyristory řízená sériová kompenzace (TCSC)

Tyristory řízená sériová kompenzace (TCSC) poskytuje zrychlenou dynamickou modulaci zavedené reaktanci. V připojovacích místech elektrické sítě, taková modulace umožňuje vytvářet silné tlumení na elektromechanické oscilace. Z toho plyne, že instalace kondenzátorů s tyristorovým řízením TCSC s nominálním výkonem cca 100 MVar umožňuje spojit mezi sebou sítě z výrobní kapacity mnoha tisíc megawattů. TCSC kondenzátory jsou často používáni v kombinaci s fixními kondenzátory podélné kompenzace pro zvýšení dynamické stability neekonomičtější způsobem. Technologie TCSC funguje na základě dvou principů:

1. TCSC provádí elektromechanické tlumení přechodových procesů ve velkých energetických systémech pomocí modulací reaktanci jedné nebo více vedení. Jinými slovy, TCSC poskytuje kapacitní kompenzaci reaktanci.
2. TCSC bude měnit svůj odpor (síťového proudu) s ohledem na podsynchronní frekvence, tak, že možnost podsynchronní rezonance je vyloučená.

Díky technologii TCSC řeší se oba problémy pomocí řídicích algoritmů pracujících současně. Tento řídicí systém pracuje v tyristorovém obvodu (paralelně s hlavní kondenzátorovou baterií) tak, že řízené náboje se přidávají do hlavního kondenzátoru, tím transformují ho do kondenzátoru proměnné kapacity a při podsynchronních frekvencích - v "virtuální induktor".



***Obr. 1.6 – TCSC stanice realizovaná v Indii [12]***

## STATCOM – SVC Light

Statický synchronní kompenzátor (STATCOM – SVC Light) – je určen pro ovládání elektrických zátěží pomocí generaci a absorbování jalového výkonu. Často podstatné změny přenášeného výkonu zátěže nastává během několika hodin. Z toho důvodu se mění i jalový výkon v síti. To může vést k nepříjemným změnám amplitudy napětí, včetně ostrého výpadku, nebo dokonce přebytku napětí.

Podobně, jako statická kompenzace jalového výkonu systému SVC, STATCOM schopen okamžitě a dlouhodobě zajistit řízený jalový výkon v souladu s přechodným napětím při zachování stability napětí sítě.

SVC Light lze považovat za zdroj napětí s vnitřním odporem. Fyzicky se jedná o modulární víceúrovňový měnič, pracující s konstantním stejnosměrným proudem (v závislosti na typu topologie měniče VSC). To vytváří nebo spotřebovává jalový výkon, elektronicky zpracovává napěťové a proudové křivky v měniči napětí. Jako výsledek SVC Light nepotřebuje kondenzátorové baterie a kompenzační tlumivky pro tvorbu a spotřebu jalového výkonu, a proto zařízení SVC Light je kompaktního designu a s malým půdorysem. Vysoká celková účinnost frekvence spínání IGBT umožňuje velmi rychlou regulaci výstupního napětí. Tyto vlastnosti jsou zvláště důležité pro takové úkoly, jako potlačení flickeru, vyvolaného elektrickými obloukovými pecemi, vyvažování napětí a filtrace harmonických.



***Obr. 1.7 – Systém SVC Light realizovaný v USA, Texas [11]***

SVC (Static VAr Compensators) - Statické kompenzátory jalového výkonu

Statický kompenzátor jalového výkonu (SVC) - je zařízení schopné regulovat napětí z vysokou rychlostí a spolehlivostí. V normálním případě statický tyristorový kompenzátor SVC bude sledovat a regulovat napětí na požadovanou hodnotu jak za běžných podmínek statické stability, tak i v případě poruchy, provádět operativní dynamické změny jalového výkonu po vzniku poruchy v systému, například v případě zkratu v síti, odpojení napájení elektrického vedení a generátoru. Kompenzátor SVC umožňuje zvyšování přenosové kapacity vedení, snížení ztrát, snížení amplitudy kmitání činného výkonu a je schopen zabránit zvýšení napětí při ztrátě zatížení. Typické SVC obsahují jeden nebo více blok pevných nebo řízených kondenzátorů nebo reaktorů, z nichž alespoň jeden blok musí být spínán tyristory. Základními prvky SVC jsou:

- Tyristory řízená tlumivka (TCR)/Tyristor controlled reactor
- Tyristory řízený kondenzátor (TSC)/ Tyristor switched capacitor
- Harmonický filtr (y)/ Harmonic filter(s)
- Mechanicky přepínatelné kondenzátory nebo tlumivky/ Mechanically switched capacitors or reactors

Nejběžnější topologie SVC - TCR / FC nebo TCR / TSC / FC.

## 2 Světové reference použití FACTS zařízení

Využívání FACTS zařízení v podmínkách přenosových soustav začalo ve světě v období 60. let. FACTS zařízení v tomto období nacházeli využití zejména v případech přenosů velkých výkonů na velké vzdálenosti. Vývoj polovodičové techniky a výpočetní funkční aplikace v distribučních soustavách a průmyslové oblasti přinesl další rozšiřování FACTS technologií v přenosových soustavách. Cílem této kapitoly je zpracování přehledu světových referencí projektu postavených na bázi FACTS technologií a rozbor celého datového souboru referencí.

### 2.1 Metodologie a předpoklady

Pro objektivní pohled na využitelnost FACTS zařízení v české přenosové, distribuční soustavě a průmyslu je potřeba zvolit několik kritérií výběru. Pro vyhledávání světových referencí byla stanovena základní kritéria:

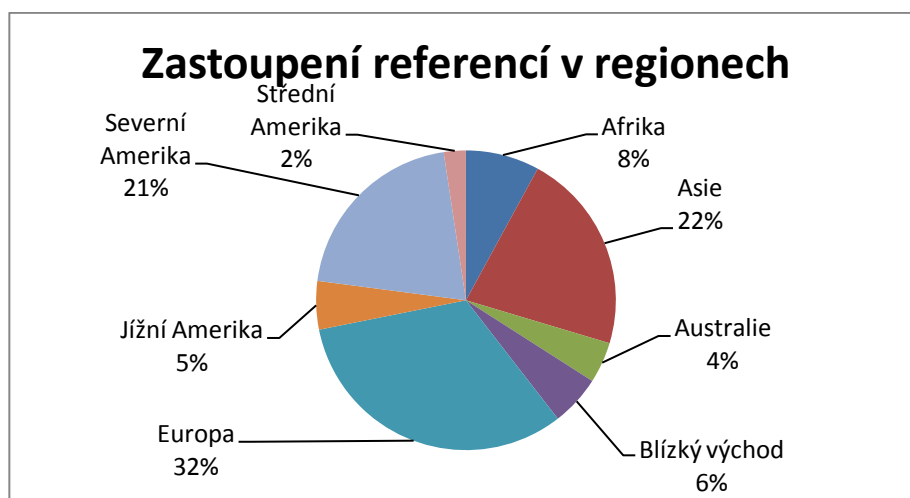
1. Vzhledem k velkému počtu referencí a podstatným odlišnostem používaných technologií referenční soubor dat byl rozdělen na přenosovou soustavu a distribuční soustavu s průmyslem.
2. Projekty největších světových výrobců (SIEMENS, ABB a ALSTOM)
3. Projekty realizované od roku 1970
4. Každé dodatečné rozšíření stávajících zařízení bylo uvažováno jako další reference
5. Reference byly vyhledávány pro technologie SVC, TCSC, STATCOM, TCR, SC a MSCDN.
6. U každé reference figuruje výrobce, typ technologie, region a země instalace, název projektu nebo zákazníka, rok uvedení do provozu, napěťová hladina a jmenovitý výkon, případně jeho rozsah

### 2.2 Základní rozbor souboru světových referencí

Pro rozbor bylo využito celkově 881 světová reference v distribučních soustavách a průmyslových aplikacích a 797 světových referencí v přenosových soustavách. Z celého souboru referencí v distribuční soustavě je nejvýznamnější zastoupení FACTS zařízení v Evropě (32%), v

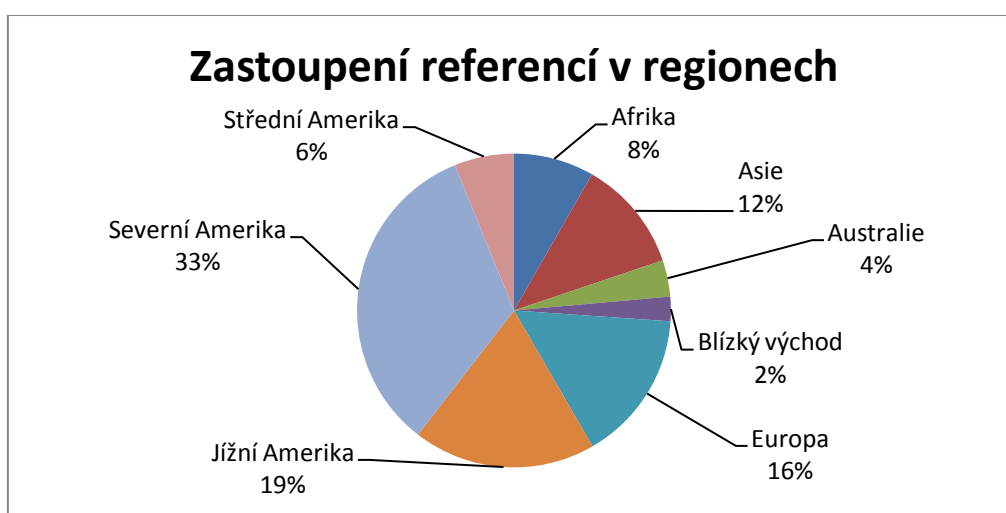


Asii (22 %), v Severní Americe (21 %) a v Africe a na Blízkém Východě dohromady dávají (14 %). Kompletní informace zahrnující i ostatní regiony je ilustrovaná na obrázku 2.1.



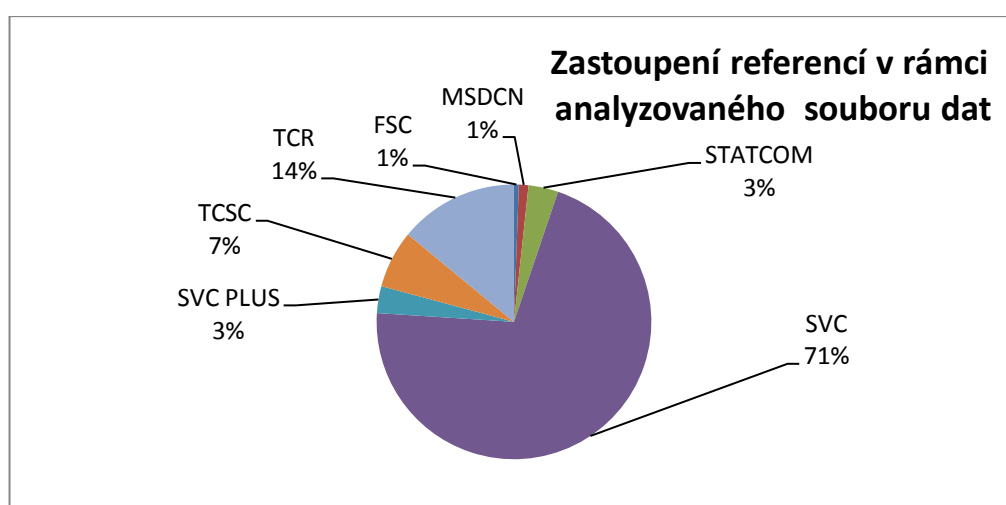
**Obr. 2.1 – Podíl regionů na světových referencích v distribuční soustavě projektů FACTS zařízení**

Opačnou tendenci ilustruje soubor referencí v přenosové soustavě, kde je nejvýznamnější zastoupení FACTS zařízení v Severní Americe (33%), v Jižní Americe (19%), a v Evropě (16%). Důležité je zmínit taky to, že dohromady Severní, Jižní a Střední Amerika mají více než polovinu celosvětových referencí v přenosových soustavách (58 %). Kompletní informace zahrnující i ostatní regiony je ilustrovaná na obrázku 2.2.



**Obr. 2.2 – Podíl regionů na světových referencích v přenosové soustavě projektů FACTS zařízení**

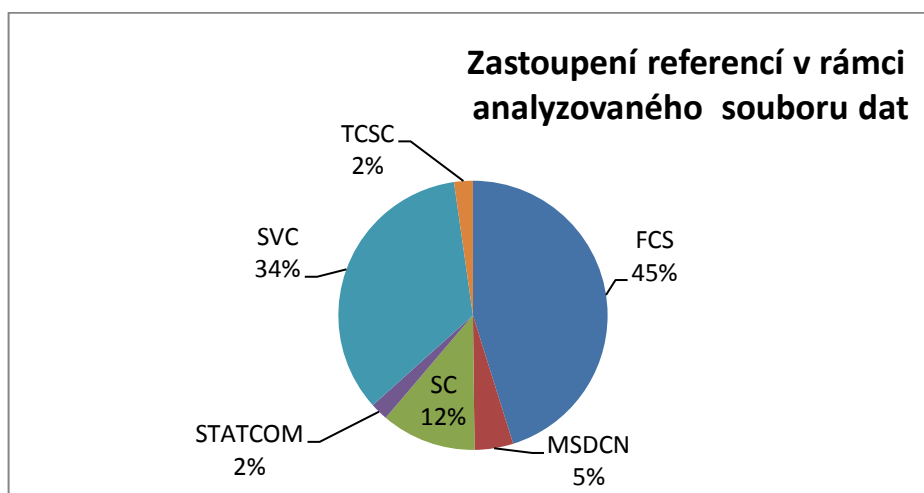
Z hlediska zastoupení jednotlivých technologií v distribučních soustavách mají celkově ve světě největší zastoupení technologie kategorie SVC – Static VAR Compensator (71 %), je soubor elektrických zařízení, která poskytují rychle působící jalový výkon v sítích VVN a VN v přenosových, distribučních soustavách a průmyslu. Další technologií s významným zastoupením je TCR (14 %) a TCSC (7 %). Tato zařízení přispívají zejména k regulaci napětí v distribuční soustavě a v případě SVC i k dalším funkcím. Uplatnění nacházejí i synchronní kompenzátory STATCOM a mechanické spínané kondenzátory MSCDN Zastoupení technologií v souboru světových referencí v distribučních soustavách ilustruje obrázek 2.3



**Obr. 2.3 – Zastoupení referencí použitých technologií v distribučních soustavách v rámci analyzovaného souboru dat**

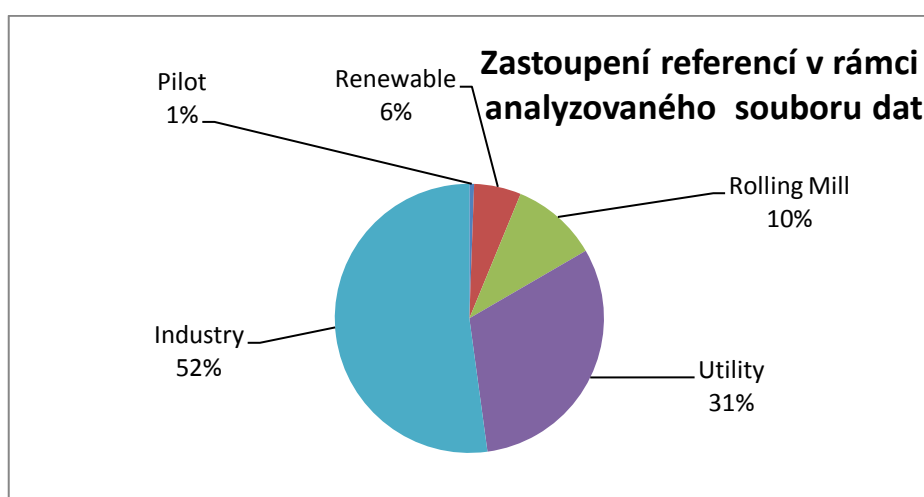
Z hlediska zastoupení jednotlivých technologií v přenosových soustavách mají celkově ve světě největší zastoupení technologie kategorie FSC – Fixed Series Capacitor (45%), je nejjednodušším a nejefektivnějším typem sériové kompenzaci. Další technologie s významným zastoupením je SVC (34 %) a SC (12 %). Tato zařízení přispívají zejména k regulaci napětí v distribuční soustavě a v případě SVC i k dalším funkcím. Uplatnění nacházejí i synchronní kompenzátory STATCOM a mechanické spínané kondenzátory MSCDN Zastoupení technologií v souboru světových referencí v přenosových soustavách ilustruje obrázek 2.4





**Obr. 2.4 – Zastoupení referencí použitých technologií v přenosových soustavách v rámci analyzovaného souboru dat**

Z hlediska použití FACTS technologií pro různé typy aplikací v průmyslu a distribuční soustavě mají ve světě největší zastoupení v průmyslu, hlavně ocelářský průmysl, zejména obloukové pece – Industry (52 %). Další významnou aplikací pro použití je distribuční soustava do 132kV – Utility (31 %). FACTS technologií taky nacházejí uplatnění při válcování kovů – Rolling Mill (10%), u obnovitelných zdrojů energie – Renewable (6%) a taky v letectví – Pilot (1%). Zastoupení použití FACTS technologií v závislosti na typu aplikace ilustruje obrázek 2.5.

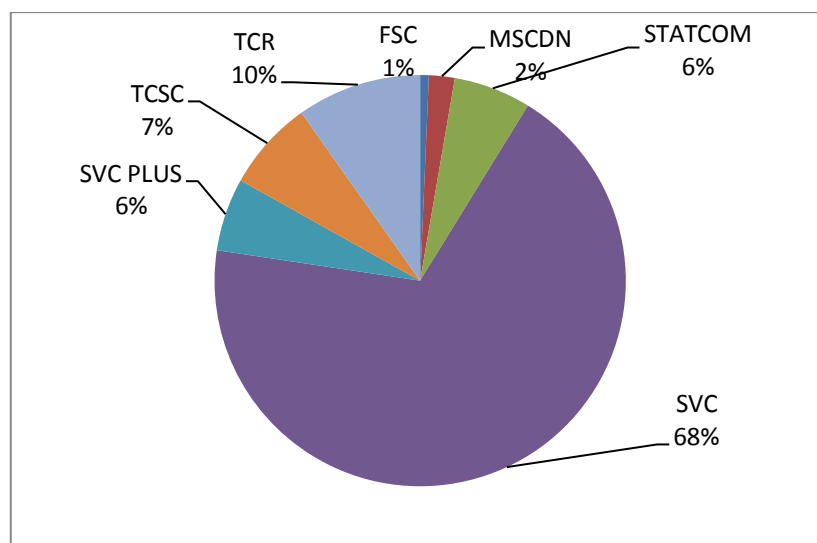


**Obr. 2.5 – Zastoupení referencí použitých technologií FACTS v závislosti na typu aplikace**

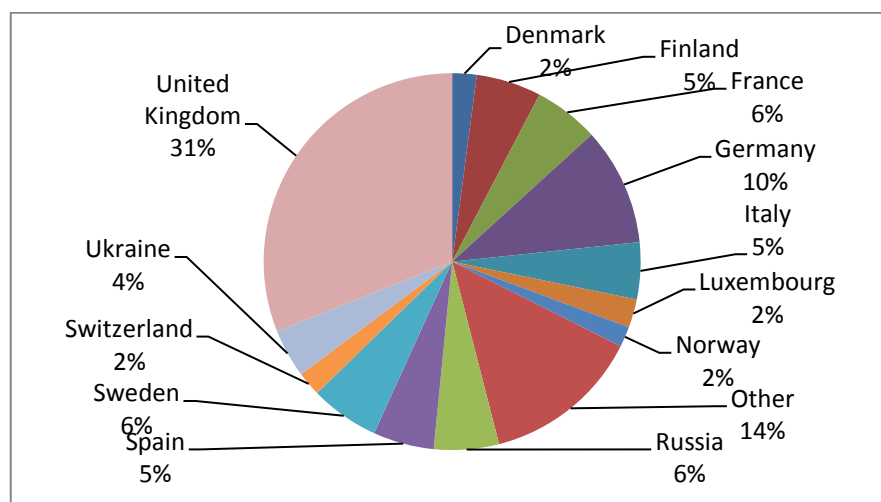
V rámci regionu Evropy aplikace pro distribuční soustavy a průmysl má majoritní zastoupení technologie kategorie SVC – Static VAR Compensator (68 %), avšak je nutno

zdůraznit, že se jedná o Velké Británii, Německu a Finsku. Tato znační rozšíření technologie SVC je vyvoláno odlišnými podmínkami provozování distribučních soustav a průmyslu ve jmenovaných zemích. Dále má v Evropě významné zastoupení technologie tyristrovy řízených tlumivek TCR (10 %), největší zastoupení v Německu (15 instalací), v Luxembourg (4 instalace), v Rusku a Belgii (3 instalace) a po 1 instalaci v Rakousku, Dánsku, Portugalsku a Černé Hoře. Taky významné zastoupení v Evropě má technologie sériových kondenzátorů TCSC (7 %), které umožňují zvyšování přenosových kapacit linek v distribuční soustavě. Ty projekty mají zastoupení v následujících zemích – hlavně Velká Británie (17 instalace), a Islandie, Irsko, Německo, Finsko a Francie (1 instalace).

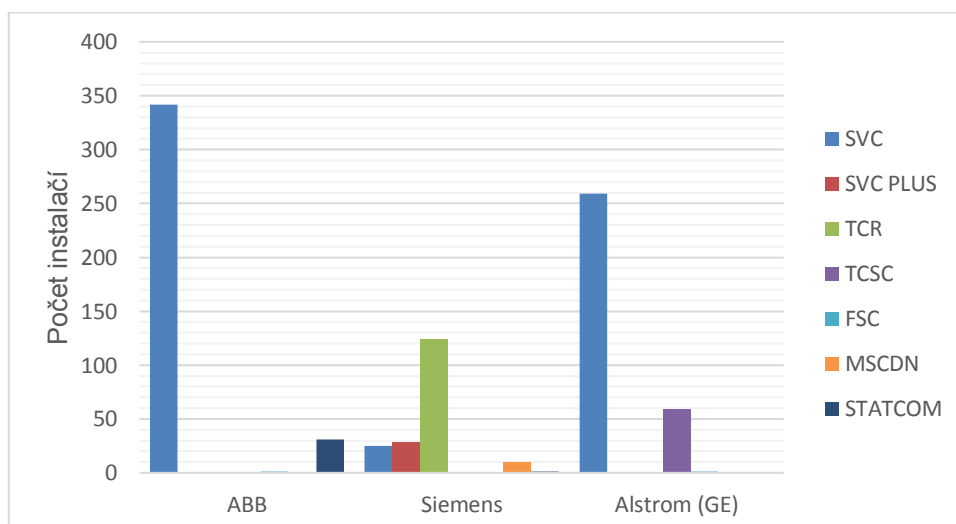
Uvedené reference byly nasazeny na napěťové hladiny do 132 kV. Nejvýkonnější SVC zařízení (Norway - Nyhamna SVC) umožňuje provoz v rozmezí od -265 MVar do 300 MVar. Technologie STATCOM taky má široké použití, a to především ve Velké Británii, kde v současnosti existuje 9 zařízení tohoto typu, které jsou výhradně připojena na napěťové hladině 33 kV. Celkové zastoupení jednotlivých technologií v Evropě ilustruje obrázek 2.6.



**Obr. 2.6 – Zastoupení typů technologií na Evropských referencích projektů FACTS zařízení v distribučních soustavách a průmyslu**



**Obr. 2.7 – Podíl počtu FACTS projektů v rámci Evropy v distribučních soustavách a průmyslu**

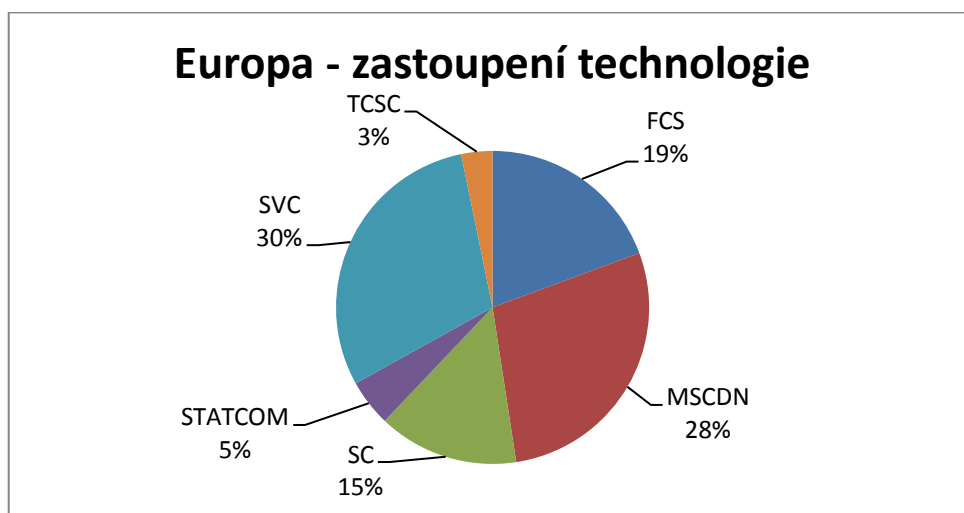


**Obr. 2.8 – Zastoupení výrobců u jednotlivých technologií FACTS zařízení v distribučních soustavách a průmyslu**

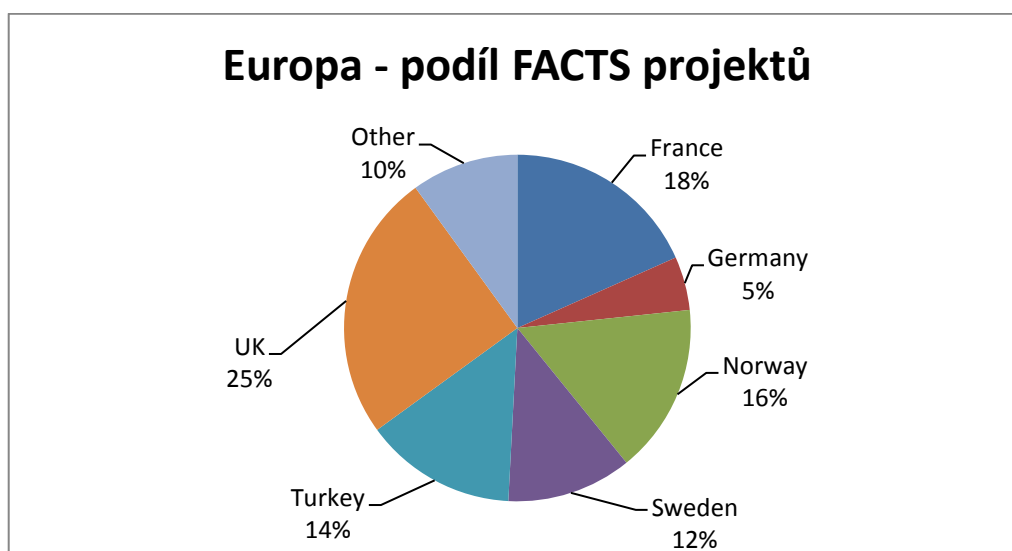
V rámci regionu Evropy aplikace pro přenosovou soustavu používané technologie nemají jednoznačnou preferenci. Nejvíce používanou technologií je SVC – Static VAR Compensator (38%), avšak je nutno zdůraznit, že se jedná o Velké Británii, Francii a Norsku. Tato značná rozšíření technologie SVC je vyvoláno odlišnými podmínkami provozování distribučních soustav a průmyslu ve jmenovaných zemích. Dále má v Evropě významné zastoupení technologie kondenzátorů s mechanickým přepnutím MSCDN (28%), největší zastoupení má v Francii (15 instalací), a v Velké Británii (15 instalací). Taky významné zastoupení v Evropě má technologie fixních sériových kondenzátotů FCS (19%), které umožňují ochranu přenosových

linek před přepětím pomocí MOVů (Metal Oxid Varistor) samočinně spuštěných odpínáčů. Ty projekty mají zastoupení v následujících zemích - hlavně Turecko (12 instalací), a Švédsko (5 instalací).

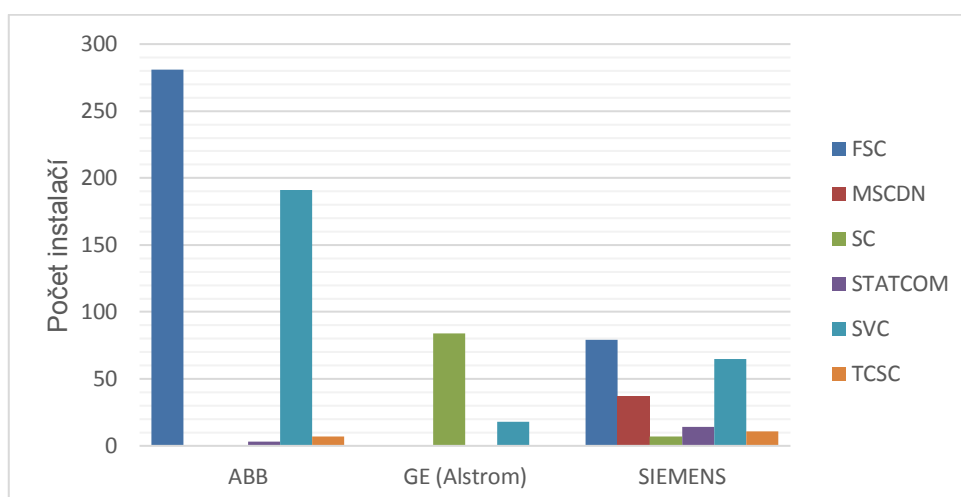
Uvedené reference byly nasazeny na napěťové hladiny od 132 kV. Nejvýkonnějším zařízením bylo TCSC (Švédsko - Stöde) umožňuje provoz v rozmezí od -250 MVar do 500 MVar. Celkové zastoupení jednotlivých technologií v Evropě ilustruje obrázek 2.9.



**Obr. 2.9 – Zastoupení typů technologií na Evropských referencích projektů FACTS zařízení v přenosových soustavách**



**Obr. 2.10 – Podíl počtu FACTS projektů v rámci Evropy v přenosových soustavách**

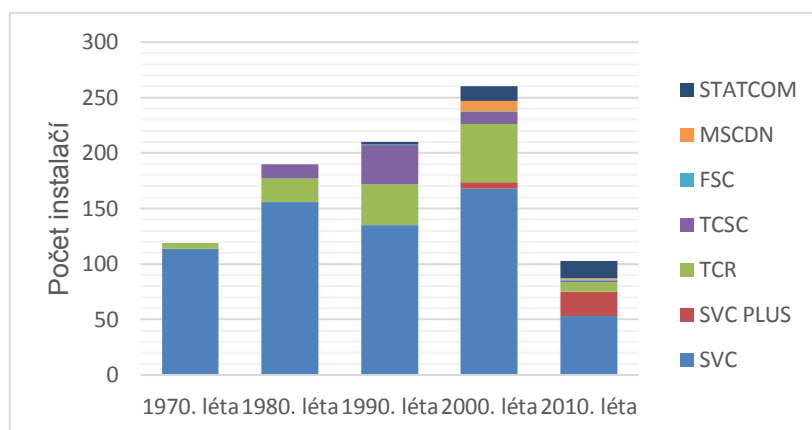


**Obr. 2.11 – Zastoupení výrobců u jednotlivých technologií FACTS zařízení v přenosových soustavách**

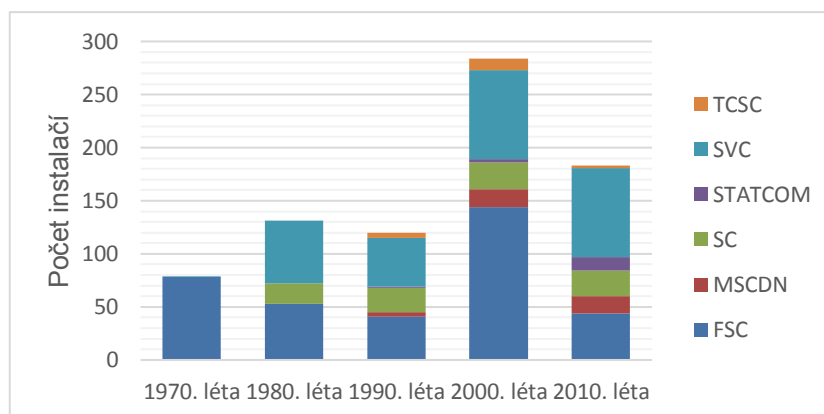
### 2.3 Doplnkové rozbory světových referencí

FACTS zařízení se začali využívat od počátku 70. let. První aplikace v distribuční soustavě byly postaveny na základě tyristorových spínačů, tedy jednalo se převážně o SVC. Tyto technologie tehdy těžili z masivního rozvoje výkonové elektroniky. S tyristorovými prvky bylo už tehdy mnoho zkušeností, z projektů HVDC technologie, která nastoupila v 70. letech. Což naopak první aplikace v přenosové soustavě byly postaveny na základě mechanických spínačů, tedy jednalo se převážně o FSC. Významný nárůst počtu aplikací FACTS zařízení odstartoval v distribučních soustavách v 80. letech a v přenosových soustavách v 2000. letech. Koncem 90. let se začala uplatňovat i další kategorie FACTS zařízení — tranzistorově řízené STATCOM a SVC PLUS, postavena na bázi tranzistorových prvků. Tato zařízení jsou využívána zejména k integraci obnovitelných zdrojů energie do přenosové soustavy (velkých větrných parků), které způsobují výkonové oscilace, flicker efekt a jiné problémy spojené se statickou i dynamickou stabilitou sítě. Obrázky 2.12 až 2.15 ilustrují historický vývoj počtu instalací jednotlivých FACTS technologií.

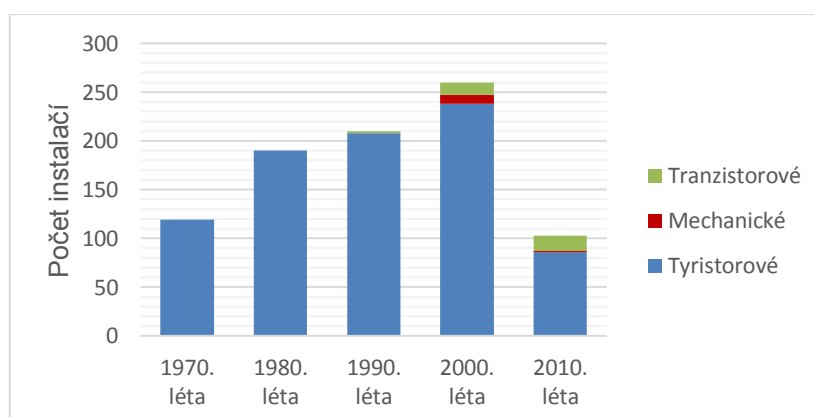
Pozn.: Analýza referencí ilustrovaná na obr. 2.12 až 2.15 vychází pouze z referencí, kde byl zjištěn rok uvedení do provozu. Jedná se o referencí ze základních datových souborů referencí v distribučních a přenosových soustavách od výrobců ABB, Siemens a Alstrom.



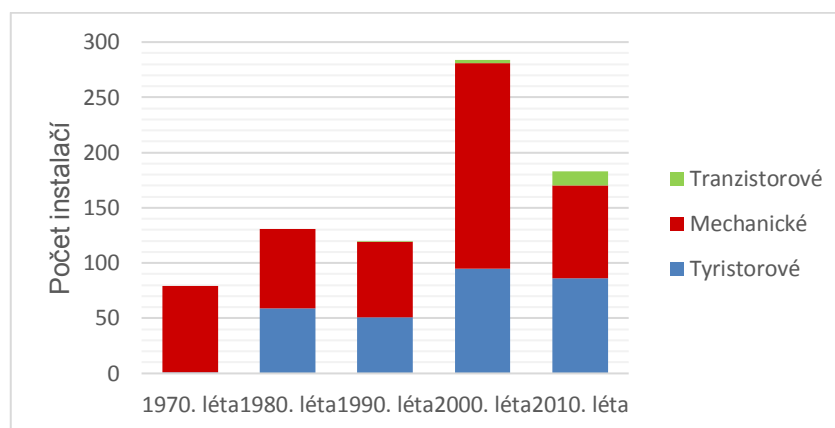
**Obr. 2.12 – Vývoj počtu instalací FACTS zařízení ve světě na základě použité technologií v distribučních soustavách a průmyslu**



**Obr. 2.13 – Vývoj počtu instalací FACTS zařízení ve světě na základě použité technologií v přenosových soustavách**



**Obr. 2.14 – Vývoj počtu instalací FACTS zařízení ve světě na základě použité technologií**



*Obr. 2.15 – Vývoj počtu instalací FACTS zařízení ve světě na základě použité technologie*

## 2.4 Reference současného použití FACTS technologií

FCS - Pevná sériová kompenzace

ABB nainstalovalo dva kondenzátory sériové kompenzaci v sítích společnosti Fingrid 400 kV s cílem zvýšení kapacity sítě na severu Finska, jakož i zajištění bezpečnosti energetického systému. Provozní kondenzátory byly zprovozněny v roce 2009. Cílem investičního projektu bylo zvýšení kapacity sítě ve směru sousedního Švédska o cca 200 MW, a uspokojení rostoucí poptávky na přenos elektřiny mezi severem Finska a Švédska, stejně jako ve Finsku. Kondenzátory sériové kompenzaci může zvýšit kapacitu stávajících přenosových linek a stabilitu elektrické sítě ve Finsku.



*Obr. 2.16 – Pevná sériová kompenzace ABB realizovaná ve Finsku [11]*

Technické parametry	Asmunti	Tuomela
Jmenovité systémové napětí	400kV	400kV
Jmenovitý jalový výkon	369MVA <sub>r</sub>	301MVA <sub>r</sub>
Stupeň kompenzace:	70%	70%
Jmenovitý proud fázi	1800A	1800A

**Tab. 2.1: Technické parametry pevné sériové kompenzaci ABB ve Finsku**

V roce 2003 São João do Piauí Series modernizace kompenzačního systému které se nachází v brazilském Maranhão-Bahia 500 kV AC byla udělena společnosti Siemens. Poptávka výkonu rostoucích brazilských odvětví vyžadovala ekonomické řešení pro zvýšení výkonu přenosové kapacity stávajícími linek. Bylo rozhodnuto, že pevná sériová kompenzace bude vhodnou volbou nejen pro požadované zvýšení výkonu, ale i pro stabilizaci propojených sítí snížením impedance vedení. Spuštění komerčního Zahájení komerčního provozu dvou kondenzátorů dvou sériových linek bylo realizováno v srpnu 2004.



**Obr. 2.17 – Pevná sériová kompenzace Siemens realizovaná v Brazílii [12]**

Technické parametry	Linka 1	Linka 2
Jmenovité systémové napětí	500kV	500kV
Jmenovitý jalový výkon	484MVA <sub>r</sub>	437MVA <sub>r</sub>
Stupeň kompenzace:	70%	70%

**Tab. 2.2: Technické parametry pevné sériové kompenzaci Siemens v Brazílii**

SVC – statický kompensátor jalového výkonu

V přenosové soustavě Kanady 735 kV, společnost Hydro-Québec provozuje celkem osm statické kompenzátory jalového výkonu (SVC). FACTS zařízení bylo dodané firmou ABB. 735 kV síť přenáší celkem 15000 MVA čisté vodní energie. Využívá šest elektrických vedení



táhnoucí se od vodních elektráren na řece La Grande, přítok kraje James Bay do Montrealu 1000 kilometrů na jih. Dvě z osmi SVC stanic byly zahájeny v roce 2011 v rozvodně 735 kV Chénier poblíž Montrealu. Nominální výkon každé jednotky 300 MVar induktivní až 300 MVar kapacitní.



**Obr. 2.18 – Systém SVC od ABB realizovaný v Kanadě, Chénier [11]**

Technické parametry	Chénier	Chibougamau	La Vérendrye
Počet SVC	2	4	2
Kontrolované napětí	735kV	735kV	735kV
Třídy SVC [MVar]	[+300/-300]	[+300/-110]	[+300/-110]
Tyristorové ventily	Vodou chlazený, světelné spouštění	Vodou chlazený, magnetické spouštění	Vodou chlazený, magnetické spouštění

**Tab. 2.3: Technické parametry SVC stanic ABB v Kanadě**

V dubnu 2007 společnost Siemens získala zakázku na klíč pro dvě SVC rozvoden 275 kV v South Pine a South East Queensland (SEQ) Austrálie. Instalaci SVC stanic zákazník Powerlink plánoval poskytovat dostatečnou kompenzaci výkonu a přidat další podporu napětí na větší rozloze Brisbanu pomoci dynamické kompenzaci jalového výkonu.

Tyto SVC mají tři nominální rozsahy výkyvu od 100 MVar induktivní až do 250 MVar kapacitní s přetížením až 350 MVar po dobu jedné hodiny. Každý SVC se skládá z jednoho tyristorově řízeného reaktoru (TCR), dvou tyristorově řízených kondenzátorů (TSC) a třech filtrů vyšších harmonických.



**Obr. 2.19 – Systém SVC od Siemensu realizovaný v Austrálii, South East Queensland [12]**

Technické parametry	Greenbank
Počet SVC	2
Kontrolované napětí	275kV
Třídy SVC [MVar]	[+350/-100]
Tyristorové ventily	Vodou chlazený, s nepřímým světelným spouštěním

**Tab. 2.4: Technické parametry SVC stanic Siemens v Austrálii, South East Queensland**

STATCOM - SVC Light (ABB) a SVC Plus (Siemens)

Od roku 2005 státní energetická společnost Austin Energy, začala používat v své elektrizační soustavě 138 kV STATCOM zařízení dodané společností ABB. STATCOM s parametry 80 MVar induktivních až 110 MVar kapacitních nahrazuje elektrárnu na topném oleji, který se nacházel ve městě Halle nedaleko Austinu a byl postaven v letech 1960-1970. Vzhledem ke stárnutí elektrárny a snížení její využití, dostupnosti nákladově efektivnějších zdrojů výroby elektrické energie a obavy okolních obyvatelů kvůli hluku a dalších faktorů Austin Energy se rozhodla uzavřít elektrárnu. Pro ušetření místa a vyřešení problému hluku okolního prostředí všechny komponenty instalace STATCOM s výjimkou snížovacích transformátory, byly umístěné uvnitř dvoupatrové budovy. Navíc v souvislosti s požadavky na

stínění akustického hluku, fázové reaktory a filtry harmonických byly uzavřeny a snižovací transformátory byly vybaveny dalšími protihlukovými zdmi.



*Obr. 2.20 - Systém STATCOM od ABB, Austin, Texas, USA [11]*

Technické parametry	Greenbank
Kontrolované napětí	138kV
Třídy SVC [MVar]	[+110/-80]
IGBT transistory	Počet pulzů - 21

*Tab. 2.4: Technické parametry STATCOM stanici ABB, Austin, Texas, USA*

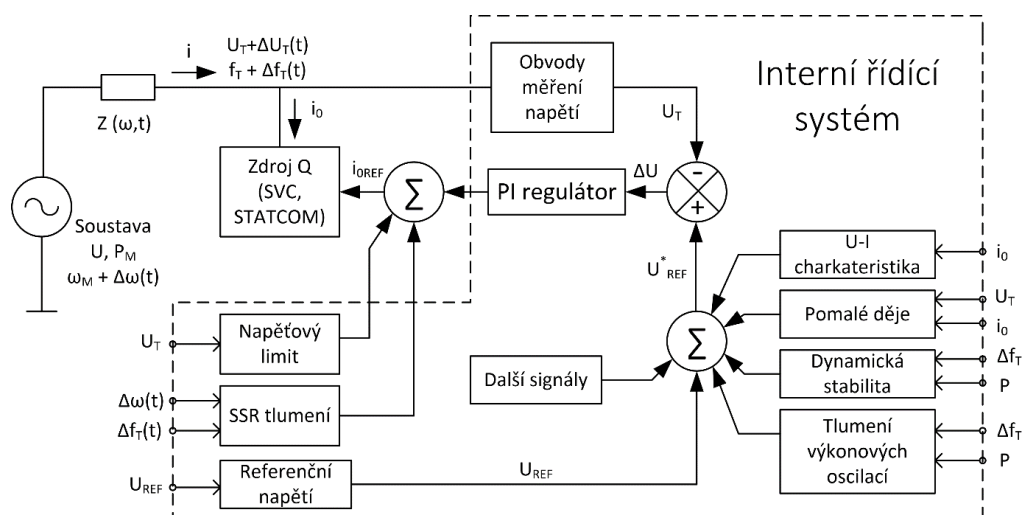


### 3 Modelování dynamického chování FACTS zařízení

Modelování dynamického chování FACTS zařízení je poměrně složitá úloha. Řídicí systémy obsahují množství funkčních bloků upravujících referenční hodnoty a ohraničení zásahu PI regulace. Tvorba dynamického matematického modelu FACTS zařízení v rámci přenosové soustavy vyžaduje zároveň i dynamické modely veškerých dynamických prvků soustavy, zejména řídicí obvody výrobních zdrojů a regulace napětí. V následujícím textu budou popsány struktury regulačních obvodů paralelních a sériových FACTS systémů.

#### 3.1 Řízení paralelních FACTS zařízení

V přenosových a distribučních soustavách systémy na základě FACTS zařízení se chovají jako proměnlivá „řiditelná“ impedance připojená do uzlu s časově měnitelnou kapacitní nebo indukční složkou reaktivního výkonu. V našem případě budeme mluvit o SVC zařízení, které může být složené z technologických jednotek TCR, TSC, MSC a MSR, příp. STATCOM a TCR, TSC, MSC a MSR. Schématické zobrazení takového řídicího systému je uvedené na obrázku 3.1, za osnovu, kterého byl použit obrázek, který sumarizuje popisy ze zdroje [1].

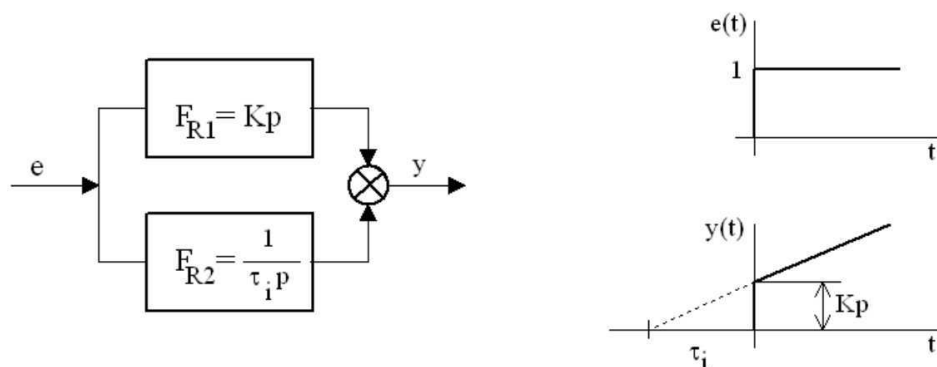


**Obr. 3.1 – Schématické zobrazení řídicího systému paralelních FACTS systémů**

Nejdůležitějším blokem uvedeného řídicího systému je napěťová smyčka zpětnovazebného PI regulátora. Aktuální hodnota napětí  $U_T$  je napětí, které měřeno v uzlu připojení FACTS systému,  $i_0$  je proud kompenzačního zařízení (v našem případě SVC) a proud  $i$  je proud

vstupující do uzlu soustavy. PI regulace řídí jalový výkon FACTS zařízení tak, aby po celou dobu fungování SVC, bylo v daném uzlu nastavené požadované referenční napětí  $U_{REF}$ . Do regulační smyčky ovšem nevstupuje přímo napětí  $U_{REF}$  ale jeho signál sečten se signály dílčích regulačních funkčních bloků. Mezi základní bloky patří zejména regulace napětí podle volt-ampérových charakteristik a regulace rezervy jalového výkonu. Pro další zlepšení řídicího systému může být SVC model rozšířen o modul tlumení výkonových oscilací a modul pro zlepšení dynamické stability systému. Další funkční moduly jsou spíše na bezpečnostního zaměření, které přímo ovlivňují výstup z PI členu. Například omezení přepětí a prevenci před subsynchronními rezonancemi.

PI regulátor patří k nejpoužívanějším typům regulátorů v elektrotechnice a konkrétně v našem modelu SVC regulátoru je pro porovnání regulaci na základě klasického PI regulátoru a modernější verzi Fuzzy regulátoru, který je podrobně popsán v kapitole 3.3. Tento regulátor vznikne paralelním spojením proporcionálního a integračního členu, který je zobrazen na obrázku 3.2:



**Obr. 3.2 – PI regulátor a jeho přechodová charakteristika**

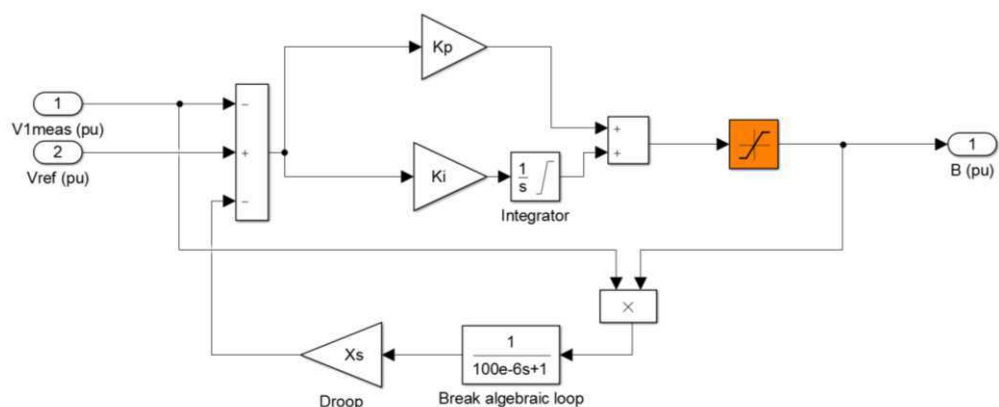
Podle pravidel blokové algebry lze jeho přenos stanovit takto:

$$F_R(p) = F_{R1}(p) + F_{R2}(p) = K_p + \frac{1}{\tau_i p} = K_p * \left(1 + \frac{1}{\tau_i p}\right) \quad (1)$$

Kde  $\tau_R = K_p * \tau_i$  – je časová konstanta regulátoru

$\tau_i$  – je časová konstanta integračního členu

$K_p$  – je koeficient zesílení proporcionálního členu



*Obr. 3.3 – Model napět'ového regulátoru z PI regulátorem*

### 3.2 Statické charakteristiky SVC

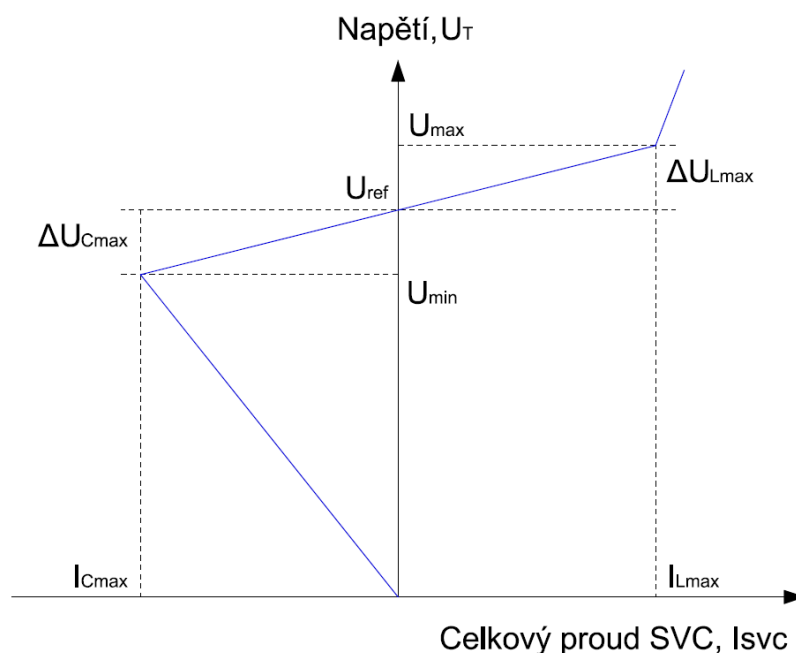
Ve většině aplikací se SVC nepoužívá jako perfektní koncový regulátor napětí, ale spíše je povoleno, aby se napětí svorek lišilo v poměru k vyrovnávacímu proudu. Tento regulační sklon (regulační reaktance) můžeme definovat jako:

$$X_{SL} = \frac{\Delta U_{Cmax}}{I_{Cmax}} = \frac{\Delta U_{Lmax}}{I_{Lmax}} \quad (2)$$

Regulační sklon umožňuje:

- Rozšíření lineárního pracovního rozsahu SVC
- Zlepšení stability regulace napětí
- Zajištění automatického sdílení zatížení mezi SVC a dalšími regulátory napětí

Základním regulačním blokem paralelních zařízení je regulace dle volt-amplitudových charakteristik. Účelem tohoto řídicího bloku je reagovat na rychlé změny napětí. Základní princip tohoto regulačního bloku SVC je znázorněn na volt-ampérové charakteristice na obrázku 3.4.



**Obr. 3.4 – Volt-ampérová charakteristika SVC modulu**

Modré křivky ukazují nastavení konkrétních dovolených pracovních bodů SVC v U-I rovině. Regulace napětím na základě volt-ampérových charakteristik používá se hlavně pro rychlou regulaci dynamických členů FACTS zařízení. Pro účely distribuční a přenosové soustavy ve většině případů, vyplývajících z analýzy aktuálních referencí, se využívají kompenzační systémy na základě SVC systémů, složené se zařízení s různými dynamickými vlastnostmi, například systém tvořený jednotkou TCR, TSC, mechanicky spínanými indukčnostmi a kapacitami. Mechanicky spínané prvky se od tyristorově spínaných však zásadně odlišují v dynamických vlastnostech, taky se liší počtem sepnutí za den, plynulosti regulace a životnosti kompenzačního zařízení.

Napětí, při kterém SVC jak neabsorbuje, tak i nevytváří jalový výkon, je referenčním napětím  $U_{ref}$  (obr. 3.4). V praxi lze toto referenční napětí působit v typickém rozsahu  $\pm 10\%$ . Sklon charakteristiky představuje změnu napětí s proudem SVC modulu, a proto může být považován za sklonovou reaktanci  $X_{SL}$ . SVC reaguje na změnu napětí a pak můžeme změnu napětí definovat jako:

$$U_T = U_{ref} + X_{SL}I_{SVC} \quad (3)$$

Poskytování jalového výkonu navrhovaného SVC modelu může být popsáno volt-ampérovou charakteristikou, která je zároveň základním regulačním blokem paralelních zařízení. Tato křivka ukazuje kapacitní nebo indukční proudy čerpané modelem SVC při nastavení určité hodnoty napětí. Poskytovanou hodnotu jalového výkonu SVC zařízení můžeme definovat z následujícího vzorce:

$$Q_{SVC\ control} = \frac{U_{m\check{e}r}^2 + U_{m\check{e}r} U_{ref}}{X_{SL}} \quad (4)$$

Během práci v kapacitní části volt-ampérové charakteristiky poskytuje model jalový výkon na základě následujícího vzorce:

$$Q_{SVC,cap} = \frac{U_{m\check{e}r}^2}{X_{cap}} \quad (5)$$

Kde  $X_{cap}$  představuje kapacitní reaktanci na levé části volt-ampérové charakteristiky modelu, kde kapacitní část SVC reprezentují TSC jednotky. Poskytování jalového výkonu v indukčním částí volt-ampérové charakteristiky modelu se vypočítá analogicky. Je-li dosažen proud, SVC, limit Q bude:

$$Q_{SVC,lim} = \sqrt{3} U_{m\check{e}r} * I_{SVC} \quad (6)$$

### 3.3 Fuzzy logika a regulace

Fuzzy (z angl. neurčitý, vágní, neostřý) logika je matematická disciplína, se poprvé objevila v roce 1965 v článku, jehož autorem byl profesor Lotfi A. Zadeh. Tehdy byl definován základní pojem fuzzy logiky, a to fuzzy množina. Na rozdíl od ostrých, určitých množin, kde mohou hodnoty nabývat pouze hodnoty 1 (pravda) nebo 0 (nepravda), tak u fuzzy množin hodnoty patří do intervalu [0,1] od hodnoty 0, kdy prvek do množiny zcela jistě nepatří až k hodnotě 1. Tyto pravdivostní hodnoty se nazývají funkce příslušnosti  $\mu$  a množina těchto funkcí příslušnosti se nazývá univerzum (univerzální množina), která se většinou značí symbolem X. Poněvadž fuzzy množiny všeobecně nejde popsat jinak než charakteristickou funkcí (tj. funkcí příslušnosti  $\mu$ ), považují se termíny fuzzy množina a charakteristická funkce za stejné. Matematický zápis funkce příslušnosti  $\mu_A(X)$  množiny A definované na univerzum X vypadá takto:

$$\mu_A: X \rightarrow \{0,1\}$$



Fuzzy množiny umožňují pracovat s daty a znalostmi, které nejsou uváděny v numerických hodnotách, ale v jazykové formě. Základní jednotkou reprezentující znalost je tedy jazyková (lingvistická) proměnná, hodnota této proměnné se projevuje jako expertní neurčitostí, přičemž matematický aparát fuzzy množin umožňuje tuto neurčitost zpracovat. Jazykovou proměnnou lze popsat pomocí čtyř hodnot:

$$\langle X, LX, U, M_x \rangle$$

- $X$  – jméno jazykové proměnné, například: odchylka, napětí, jalový výkon apod.
- $LX$  – množina slovních hodnot (termů) této jazykové proměnné, jako příklad vezmeme odchylku od referenčního napětí: nulová odchylka (ZO), malá (M), střední (S), velká (V), kladná (P), záporná (N) a jejich následující kombinace
- $U$  – univerzum, který odpovídá číselnému rozsahu hodnot, dle kterého mohou být definované jednotlivé termy, například: rozsah odchylek, rozsah jalového výkonu apod.
- $M_x$  – funkce vyjadřující význam slovních hodnot pomocí fuzzy množin.

K základním operacím, které jsme schopni provádět z fuzzy množinami patří:

Fuzzy komplement množiny (Doplňek):

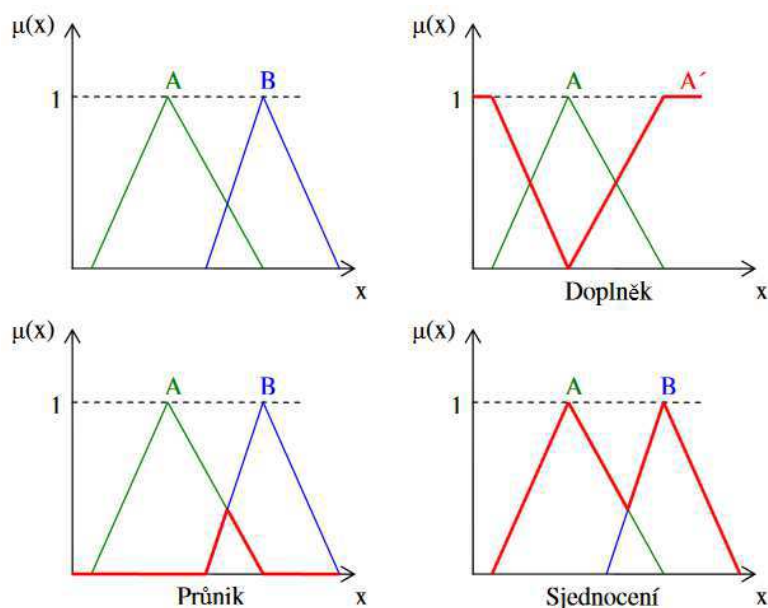
$$\mu_{A'}(X) = 1 - \mu_A(X) \quad (7)$$

Fuzzy průnik množin A a B:

$$\mu_{A \cap B}(X) = \min\{\mu_A(X), \mu_B(X)\} \quad (8)$$

Fuzzy sjednocení množin A a B:

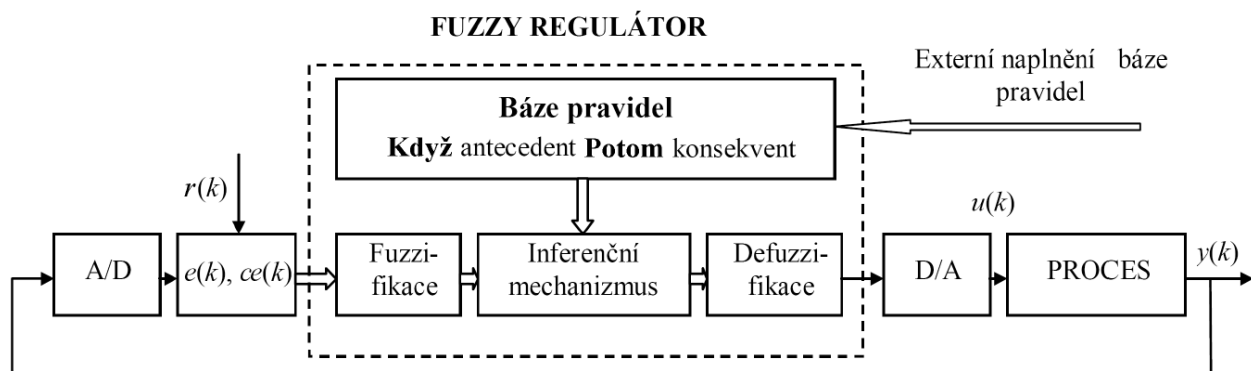
$$\mu_{A \cup B}(X) = \max\{\mu_A(X), \mu_B(X)\} \quad (9)$$



Obr. 3.5 – Základní operace Fuzzy množi [10]

Dalším důležitým pojmem fuzzy regulaci je Fuzzy Inference – je to proces, ve kterém se daným vstupům přiřazuje výstup užitím fuzzy logiky. Tento proces se skládá ze tří kroků a schematicky znázorněn na obrázku 3.6:

- *Fuzzifikace* – je to proces, převedení aktuálních vstupů na míry (stupně pravdivosti)
- *Inference* – je to proces, zpracování množiny pravidel, určení míry pravdivosti předpokladů a určení funkce příslušnosti výstupu
- *Defuzzifikace* – je to proces výpočtu numerické hodnoty výstupu vážením výsledných funkcí příslušnosti jednotlivých pravidel



Obr. 3.6 – Fuzzy PD regulátor ve zpětnovazebném zapojení [5]

Jedna z možných struktur fuzzy regulátoru je na obr.3.8. Struktury fuzzy regulátoru se mohou na první pohled trochu lišit. Je to dáno například tím, že autoři někdy popisují jednotlivé části regulátoru jinými názvy nebo dostatečně jasně nerozlišují mezi bázi pravidel a bázi znalostí. Nejčastěji používaná konvence ale je, že báze pravidel a funkce příslušnosti (tj. báze dat) tvoří dohromady celek, který se nazývá báze znalostí. Systém (tj. proces) je s regulátorem spojen přes A/D a D/A převodník. V celé této práci budeme pracovat pouze s fuzzy PD regulátorem, proto se následující výklad bude týkat pouze tohoto regulátoru. Vstupem do něho je odchylka  $e(k)$  a její diference  $ce(k)$ , které jsou definovány následovně:

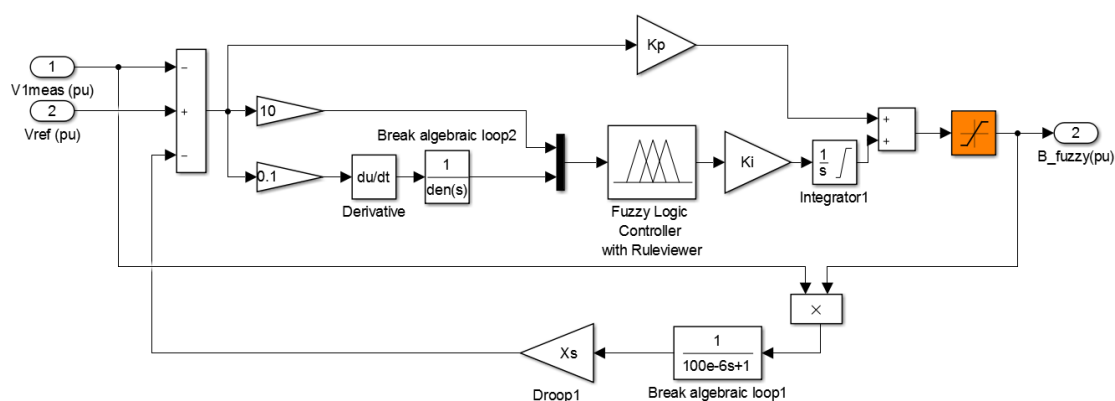
$$e(k) = r(k) - y(k) \quad (20)$$

$$ce(k) = \frac{e(k) - e(k-1)}{T} \quad (20)$$

kde  $r(k)$  – je hodnota, která reprezentuje požadovanou hodnotu napětí,  $y(k)$  – je hodnota, která reprezentuje napětí na výstupu z regulátoru,  $T$  – je perioda vzorkování regulátoru.

### 3.4 Návrh SVC modelu s použitím Fuzzy regulátora

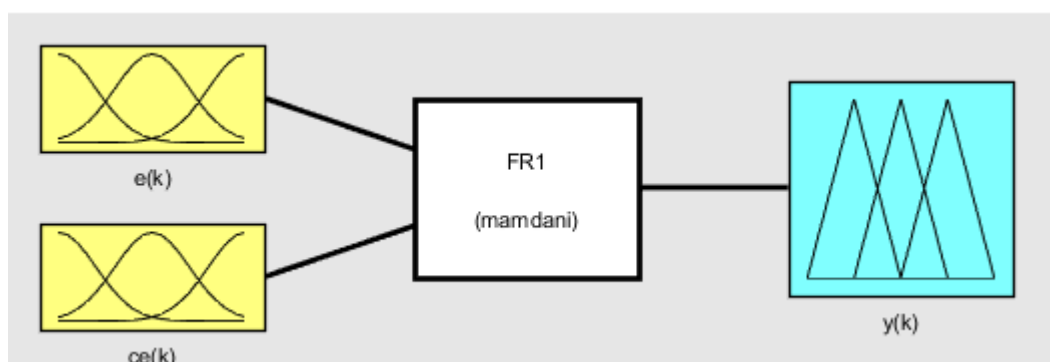
Model SVC regulátoru používá pro regulaci napětí PI regulátor. Problém spojený s použitím PI regulátoru spočívá v tom, že když kontrolovaná hodnota je nelineární a nejistá, jeho účinnost v elektrické síti značně klesat. Proto pro odstranění tohoto problému a zlepšení napěťové regulaci navrhovaného SVC modelu je lepší použít napěťový regulátor, který se skládá z Fuzzy regulátoru, zapojeného do série s integračním členem PI regulátorů, který je zobrazen na obrázku 3.7:



Obr. 3.7 – Základní operace Fuzzy množin

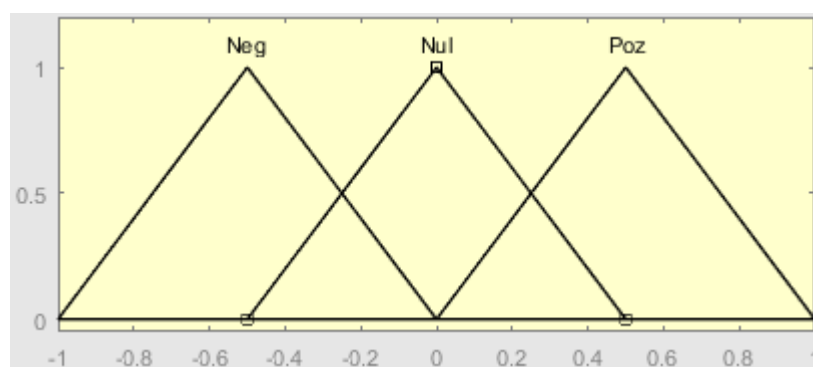
Prvním krokem bylo navrhování SVC modelu s použitím fuzzy regulátor FR1, který na obrázku 3.8 označen jako „Fuzzy Logic Controller with Ruleviewer“ bude ovlivňovat integrační složku PI regulátoru, zatímco proporcionální složka zůstává bez ovlivnění Fuzzy regulátoru.

Dalším důležitým bodem bylo definování procesu fuzzifikace. Pro fuzzy regulátor se používají dva vstupy a jeden výstup, zobrazené na obrázku 3.9. Na vstupech máme definované odchylku (chybu) aktuální hodnoty napětí od požadovaného  $e(k)$  a derivační odchylku  $ce(k)$ , na výstupu je regulovaná hodnota vstupující do integrační složky napěťového regulátoru.



**Obr. 3.8 – Návrh fuzzy logiky**

Funkční množiny vstupů jsou trojúhelníkového typu, a jejich funkce příslušnosti definované na intervalu  $\{-1, 1\}$ , jak je to zobrazuje obr.3.9. Vstupy jsou popsány třemi fuzzy sadami definovanými jako kladné (Poz), nulové (Nul) a negativní (Neg).



**Obr. 3.9 – Funkční množiny Fuzzy regulátoru**

Následujícím krokem je interferenční proces, při kterém vytvoříme mapování výstupů na základě vstupních parametrů, které zformulujeme pomocí fuzzy logiky. Vztahy mezi vstupy a výstupy je definován řadou pravidel. Definování pravidel pro Fuzzy logiku je podobný logickým

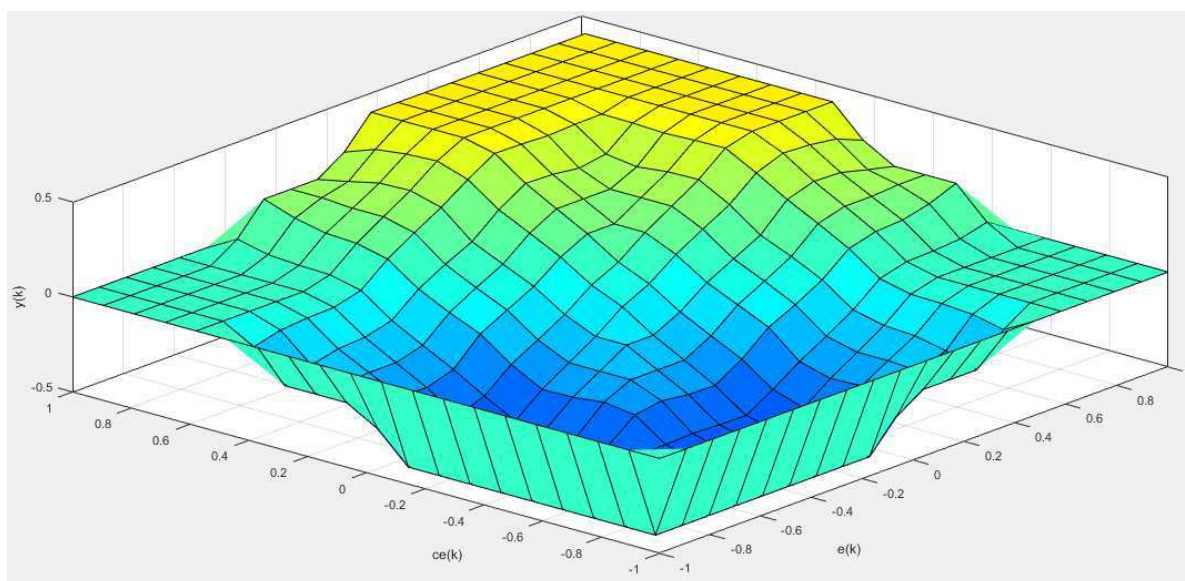
funkcím OR a AND. Vzhledem k tomu, že se jedná o dva vstupy a jeden výstup, získáme devět pravidel, které jsou znázorněné v tabulce 3.1:

$y(k)$		$ce(k)$		
		Neg	Nul	Pos
$e(k)$	Neg	N	N	Z
	Nul	N	Z	P
	Pos	Z	P	P

**Tab. 3.1: Tabulka pravidel Fuzzy regulátoru FR1**

1. Pokud  $e(k)$  bude Neg a  $ce(k)$  bude Neg, pak  $y(k)$  bude N
2. Pokud  $e(k)$  bude Neg a  $ce(k)$  bude Nul, pak  $y(k)$  bude N
3. Pokud  $e(k)$  bude Neg a  $ce(k)$  bude Pos, pak  $y(k)$  bude Z
4. Pokud  $e(k)$  bude Nul a  $ce(k)$  bude Neg, pak  $y(k)$  bude N
5. Pokud  $e(k)$  bude Nul a  $ce(k)$  bude Nul, pak  $y(k)$  bude Z
6. Pokud  $e(k)$  bude Nul a  $ce(k)$  bude Pos, pak  $y(k)$  bude P
7. Pokud  $e(k)$  bude Pos a  $ce(k)$  bude Neg, pak  $y(k)$  bude Z
8. Pokud  $e(k)$  bude Pos a  $ce(k)$  bude Nul, pak  $y(k)$  bude P
9. Pokud  $e(k)$  bude Pos a  $ce(k)$  bude Pos, pak  $y(k)$  bude P

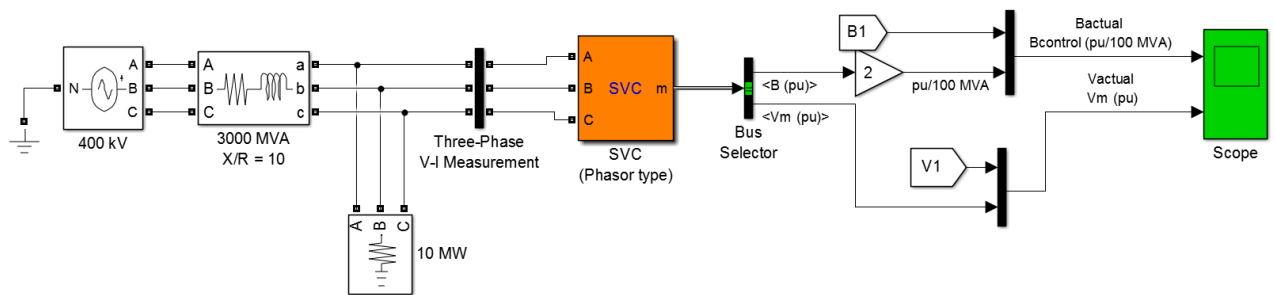
Grafické znázornění v povrchovém tvaru výsledků výstupu z Fuzzy regulátoru s použitím pravidel z tabulky 3.1 je na obrázku 3.10:



**Obr. 3.10 – Povrchová interpretace výsledků použití pravidel Fuzzy Logiky**

## 4 Praktické ukázky řešení navrhovaného SVC modelu

Pro účely práce a simulace vybraného z tohoto modulu byl použit volně dostupný příklad "Static Var Compensator (Phasor Type)" na stránkách mathworks.com, ale je nutné uvést, že byla provedena modifikace tohoto modelu dle napěťové hladiny, frekvenci, hodnot jalového výkonu a byl přidán Fuzzy regulátor nastavený na požadované hodnoty a parametry, aby ten model bylo možné aplikovat na území ČR a Evropy. Modifikovaný model SVC modulu je znázorněn na obrázku 4.1:



Obr. 4.1 – Modifikovaný model SVC regulátoru v MathLabu [6]

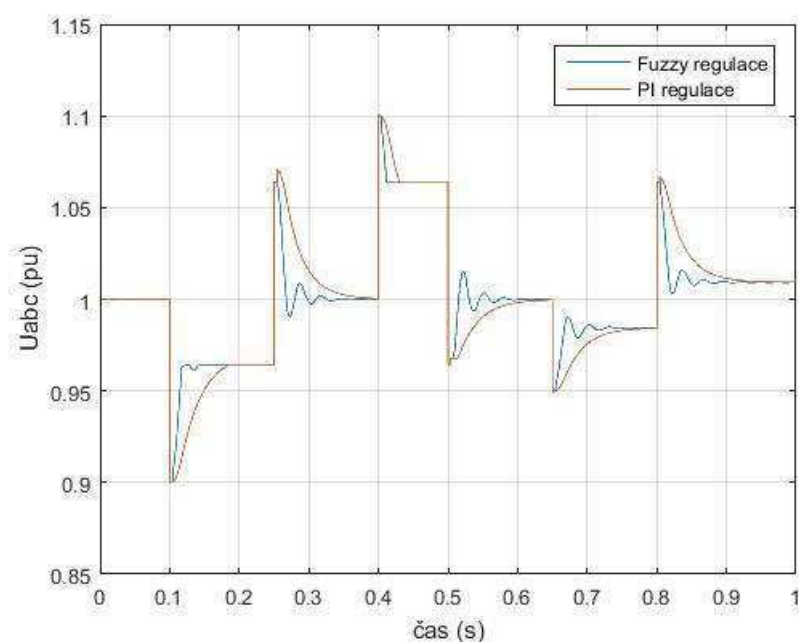
### 4.1 Výsledky testování a použitých řešení

Pro účely testování navrhovaného modelu a řešení bylo používané programové prostředí MatLab verzi 2015b z nadstavbou Fuzzy Logic Toolbox. Prvním důležitým krokem pro použití bloku Fuzzy logiky bylo definice základních pravidel a určení matici vstupů a výstupů tohoto bloku. Ten proces byl podrobně popsán v kapitole 3.4. Po splnění všech kroků popsáných v kapitole 3.4 bylo možné začít realizaci testovacího procesu.

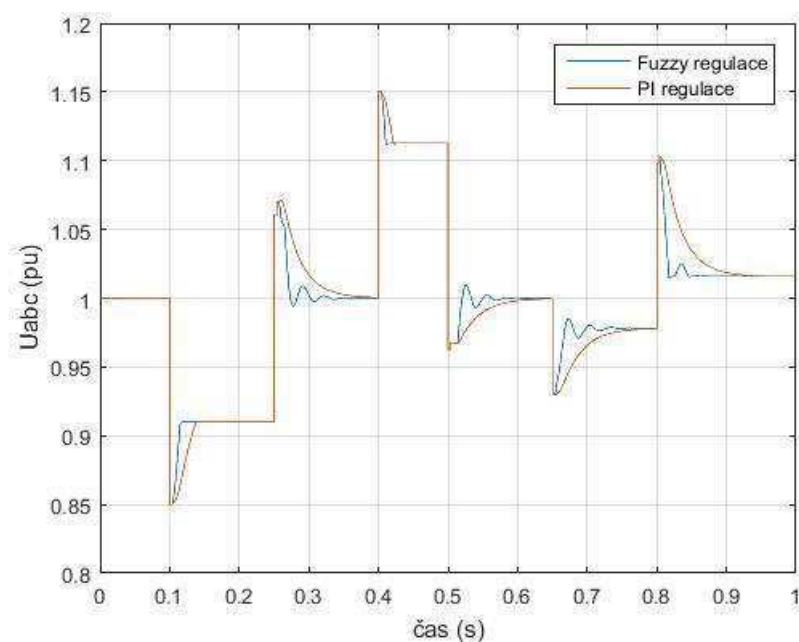
Hlavním cílem použití fuzzy logiky bylo otestovat, objevit a graficky znázornit výhody použití moderních metod regulace, v našem případě napěťové regulaci SVC modelu. Základním předpokladem pro testování bylo to, že pomocí předem definovacných síťových oscilací napětí (v poměrných jednotkách) porovnat tlumení těchto oscilací pomocí klasického PI regulátoru a Fuzzy regulátoru.

Předem definované oscilace síťového napětí představují sebou odchylku od požadované hodnoty síťového napětí na intervalu 0.8 až 1.2  $U_{ref}$ . V praxi této kývání napětí mohou být způsobené poruchovými stavy, spínáním výkonové elektroniky nebo velkých spotřebičů elektrické energie.

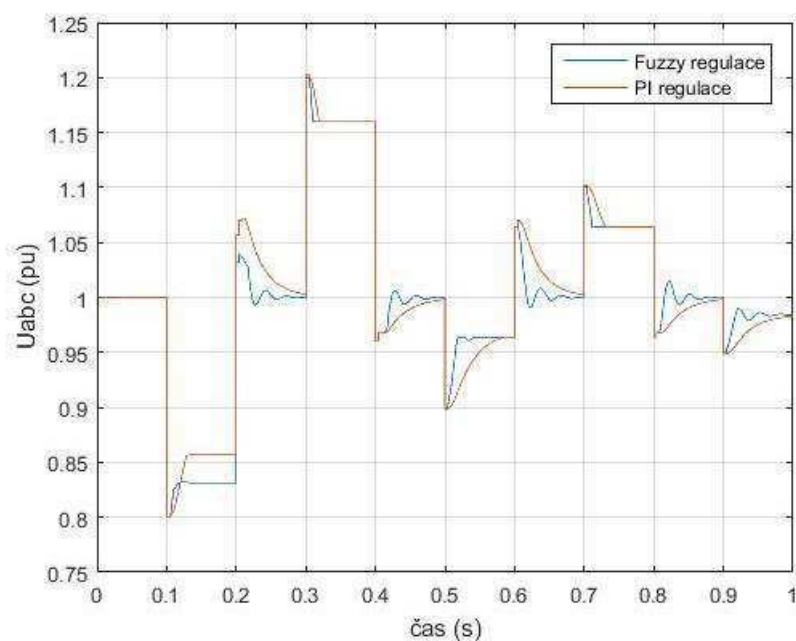
Testování se provádělo postupným navýšením hodnot odchylek od hodnoty 0.9 až 1.1 z postupným navýšením na hodnoty maximální odchylky 0.8 až 1.2. a byly sestavené grafy porovnání tlumení napěťových oscilací pomocí PI regulátoru a Fuzzy regulátoru, které ilustrované na obrázcích 4.2, 4.3 a 4.4:



**Obr. 4.2 – Průběhy tlumění napěťových oscilací s odchylkou 0.9 až 1.1 p.u.**



**Obr. 4.3 – Průběhy tlumění napěťových oscilací s odchylkou 0.85 až 1.15 p.u.**



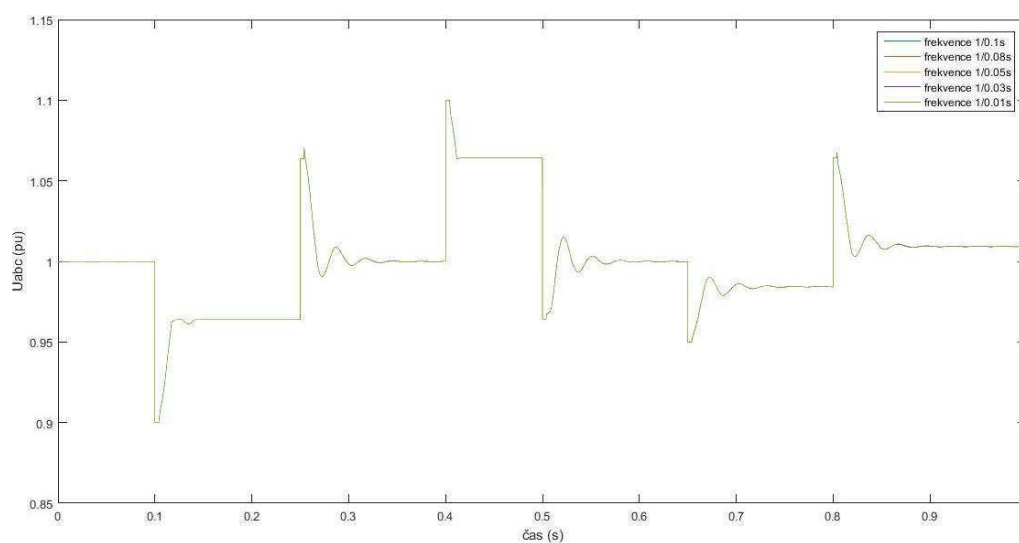
**Obr. 4.4 – Průběhy tlumění napěťových oscilací s odchylkou 0.8 až 1.2 p.u.**

V průběhu testování objevil to, že použitím s použitím Fuzzy regulátoru odchylky napětí se odstraňují rychleji a amplituda tlumení při odstranění je taky menší než při použití PI regulátoru a hodnota napětí se ustali rychleji. Z dosažených výsledků testování může vyplývat to,

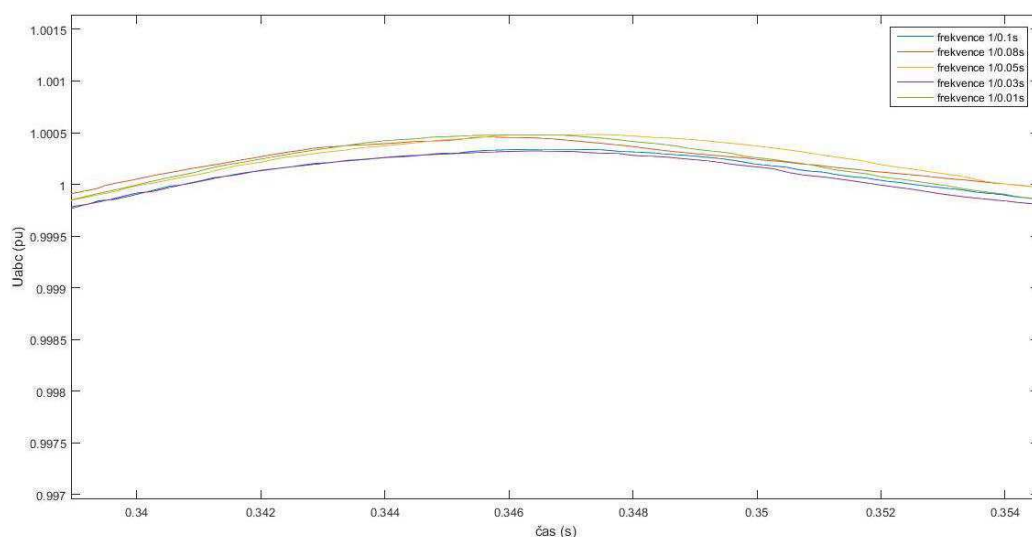


že při použití Fuzzy regulátoru hlavními výhody budou dosažení větší spolehlivosti a rychlejší regulaci SVC modelu a z toho vyplývá zlepšení dynamické stability sítě.

Další test který jsem prováděl na modelu se týkal možné změny v chování fuzzy regulátoru při zmenšení nebo zvětšení intervalu obnovení signálů  $e(k)$  a  $ce(k)$  na vstupu Fuzzy regulátoru. Zkoumané časy intervalů jsou následující: 0,1s, 0.08s, 0.05s, 0.03s a 0.01s. Výsledky testování intervalu obnovení signálů  $e(k)$  a  $ce(k)$  ilustrované na obrázcích 4.5, 4.6:



**Obr. 4.5 – Testování obnovy signálů  $e(k)$  a  $ce(k)$  na různých časových intervalech**



**Obr. 4.6 – Zvětšený graf testování obnovy signálů  $e(k)$  a  $ce(k)$**

Při testování obnovy signálu  $e(k)$  a  $ce(k)$  na různých časových intervalech objevilo se to, že změny časových intervalů obnovy signálů neodpovídá původnímu očekávání a neprojevilo se v té podstatné míře zlepšení chování, přesnější regulace nebo rychlejší odezva Fuzzy regulátoru. Z dosažených výsledků můžeme říct, že se zvětšením frekvence obnovy signálů skoro vůbec nemění průběh regulovaného napětí s použitím Fuzzy regulátoru a je ten rozdíl je vidět pouze při velkém rozlišení grafu.

## Závěr

V úvodní části práci byl zpracován přehled aktuálně používaných FACTS aplikací v přenosových a distribučních soustavách včetně rozdělení na sériové a paralelní FACTS systémy a výhody jejich použití.

Při zpracování přehledu moderně používaných FACTS zařízení bylo použito dohromady více než 1500 celosvětových referencí rozdělených na přenosovou a distribuční soustavu. Cílem zpracování tohoto přehledu bylo ukázat aktuálnost použití FACTS technologií se zaměřením na Evropu a objevit současné trendy v rozvoje FACTS technologií. Hlavním trendem současnosti na základě referencí bych naznačil postupné odstoupení od používání mechanicky spínaných zařízení vzhledem k omezení počtu spínacích cyklů a pomalejší rychlosti reakce a nárůst tranzistorově řízených technologií, což vysvětluje rozvoj výkonové tranzistorové techniky mnohem lepší spínací a rychlostní charakteristiky tranzistorových prvků. Největším problémem při zpracování přehledu a analýzy bylo dostat aktuální reference přímo od výrobců FACTS zařízení.

V úvodní fázi realizaci práce byla snaha využít detailního modelu SVC zařízení v prostředí přenosové soustavy, což se ovšem neosvědčilo z důvodu složitosti a výpočtové náročnosti původně vybraného modelu. Z tohoto důvodu byl pro účely simulací zjednodušený fázorový model SVC [6].

Hlavním cílem experimentů s použitím fuzzy logiky v SVC modelu [6] bylo otestovat, objevit a graficky znázornit výhody použití moderních metod regulace, v našem případě napěťové regulaci SVC modelu, v porovnání s tradičním typem PI regulátoru. V průběhu toho testování objevilo to, že použitím s použitím Fuzzy regulátoru odchylky napětí se odstraňují rychleji, amplituda tlumení je taky menší než při použití PI regulátoru a hodnota napětí se ustali rychleji. Z dosažených výsledků testování může vyplývat to, že při použití Fuzzy regulátoru hlavními výhodami budou dosažení rychlejší regulaci, menší amplituda tlumení SVC modelu a jeho větší spolehlivost. Dalším testem SVC modelu bylo ověření vlivu zmenšení nebo zvětšení intervalu obnovy signálů  $e(k)$  a  $ce(k)$  na vstupu Fuzzy regulátoru na rychlost jeho reakce a případné změny v chování fuzzy regulátoru. Výsledkem tohoto testování objevilo se to, že

změny časových intervalů obnovení signálů neprojeví se v té podstatné míře zlepšení chování, přesnější regulace nebo rychlejší odezvy Fuzzy regulátoru.

Z těchto výsledků vyplývá to, že moderní Fuzzy regulátor má lepší regulační vlastnosti v porovnání s tradičním PI regulátorem. Taky je potřeba uvést, že Fuzzy regulátor má stále velký prostor pro modernizaci a zlepšení pomocí například jiných bází pravidel, vstupních funkcí nebo dalších nastavení.

## Použitá literatura

- [1] Hingorani, N.G., Gyugyi L.: Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems. New York: IEEE Press, c2000. 432 s. ISBN 0-7803-3455-8.
- [2] ACHA, Enrique. FACTS: modelling and simulation in power networks. Hoboken, NJ: J. Wiley, c2004. ISBN 0470852712.
- [3] SEN, Kalyan K. a Mey Ling. SEN. Introduction to FACTS controllers: theory, modeling, and applications. Piscataway, NJ: IEEE Press, c2009. IEEE Press series on power engineering. ISBN 0470478756.
- [4] KESHAVARZ Saber, MOKHTARI Mehdi Bayat, TOSIFIAN Mohamadhasan. Design of fuzzy Controller for SVC to Improve Ability of SCIG Wind Generators in Voltage Drop Conditions Caused by Grid Faults [online]. Dostupné také z: <http://ashm-journal.com/test/vol2-6/51.pdf>.
- [5] CERMAN, Otto. Návrh samoučících se regulátoru. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Praha, 2009.
- [6] Static Var Compensator (Phasor Type), MathWorks - Makers of MATLAB and Simulink [online]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/staticvarcompensatorphasortype.html>
- [7] KARPAGAM N., DEVARAJ D. Fuzzy Logic Control of Static Var Compensator for Power System Damping. World Academy of Science, Engineering and Technology [online]. Dostupné také z: <http://waset.org/publications/6610/fuzzy-logic-control-of-static-var-compensator-for-power-system-damping>.
- [8] OLTEAN Stelian-Emilian, DULĂU Mircea, DUKA Adrian-Vasile. Modeling and simulation of SVC fuzzy control for power system stability enhancement. The 6th edition of the Interdisciplinarity in Engineering International Conference “Petru Maior”

- University of Tîrgu Mureş, Romania, 2012 . Dostupné také z: <https://pdfs.semanticscholar.org/7f4a/811b7e3abf57d2740ff1d882b4b3b493088d.pdf>
- [9] RAJPOOT Sharad Chandra, RAJPOOT Prashant Singh, GUPTA Kishan, YADAV Rewati Raman. Design Modeling and Simulation of Fuzzy Controlled Svc for Long Over Head Transmission Line. IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering (IOSR-JEEE), 2017. Dostupné také z: <http://www.iosrjournals.org/iosr-jeee/Papers/Vol12%20Issue%201/Version-4/A1201040115.pdf>
- [10] ŠTĚPANÉK, Roman. Návrh fuzzy regulátoru. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Brno, 2007.
- [11] ABB FACTS References. ABB Group - Leading digital technologies for industry [online]. Copyright © Copyright 2017 ABB [cit. 26.05.2017]. Dostupné z: <http://new.abb.com/facts/references>
- [12] Flexible AC Transmission Systems (FACTS) - Siemens. [online]. Copyright © Siemens AG 2002 [cit. 26.05.2017]. Dostupné z: <https://www.energy.siemens.com/nl/en/power-transmission/facts/>

## **Seznam příloh**

A. Obsah přiloženého CD

## **Příloha A**

### **Obsah přiloženého CD**

1. **Model SVC s použitím Fuzzy regulátoru**
2. **Text práce – v formátu pdf :**
  - DP\_Solenov.pdf