

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra technologií a měření

DIPLOMOVÁ PRÁCE

STATCOM

vedoucí práce: Ing. Jana Jiříčková, PhDr.
autor: Bc. Michal Novák

2012

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Bc. Michal NOVÁK
Osobní číslo: E09N0041P
Studijní program: N2612 Elektrotechnika a informatika
Studijní obor: Komerční elektrotechnika
Název tématu: STATCOM
Zadávající katedra: Katedra technologií a měření

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Proveďte studii problematiky FACTS.
2. Analyzujte součástkovou základnu pro realizaci FACT.
3. Popište princip zařízení STATCOM.
4. Proveďte studii oblastí nasezení FACTS.
5. Proveďte případovou studii užití FACTS.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího
Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:


Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Jana Jiříčková, Ph.D.
Katedra elektroenergetiky a ekologie

Datum zadání diplomové práce: 17. října 2011
Termín odevzdání diplomové práce: 11. května 2012


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

Anotace

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na přehled problematiky skupiny FACTS kontrolérů. V práci jsou uvedeny základní principy jednotlivých kontrolérů společně s detailním popisem zařízení STATCOM a přehled možností nasazení jednotlivých kontrolérů společně s porovnáním se současnými trendy kompenzace. Práce se dále okrajově zabývá použitelnými výkonovými prvky pro stavbu měničů vhodných pro FACTS a také je v ní možné najít prezentaci zařízení STATCOM a SVC v prostředí Matlab[®] Simulink[®], která představuje STATCOM jako vhodnějšího kandidáta pro potlačení poruch vnesených do sítě rychle se měnící zátěží.

Klíčová slova

FACTS, STATCOM, SVC, HVDC, paralelní kontroléry, sériové kontroléry, kombinované kontroléry, dynamická kompenzace, Matlab[®] Simulink[®] SimPowerSystems

Abstract

The master thesis presents Flexible Alternating Current Transmission System and their ability of use. Most of their representatives are managed by basic principles of IEEE standards. The thesis also presents possible areas of use compared to today's use. The master thesis further focuses on shunt connected Static Synchronous Compensator as a typical representative of second generation of controllers, which is described in detail. The thesis also contains basic description of possible power devices used for voltage sourced converters. Last part of the thesis focuses on a comparison of STATCOM and SVC in simulation environment Matlab[®] Simulink[®], which introduces STATCOM as more suitable controller for mitigation of fast changing loads.

Key words

FACTS, STATCOM, SVC, HVDC, Parallel Controllers, Series Controllers, Combined Controller, transient stability, power flow, Matlab[®], Simulink[®], SimPowerSystems

Prohlášení

Tímto předkládám k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

V Plzni dne 2.5.2012

Michal Novák

.....

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucí diplomové práce Ing. Janě Jiříčkové, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	10
SEZNAM SYMBOLŮ	11
SEZNAM ZKRATEK	12
1 STUDIE PROBLEMATIKY FACTS	13
1.1 ZÁKLADNÍ CHARAKTERISTIKA FACTS ZAŘÍZENÍ	14
1.2 GENERAČNÍ DĚLENÍ	14
1.3 DĚLENÍ DLE TYPU PŘIPOJENÍ K SÍTI	15
1.3.1 <i>Sériový kontrolér</i>	15
1.3.2 <i>Paralelní (derivační) kontrolér</i>	16
1.3.3 <i>Kombinovaný sériově – sériový kontrolér</i>	17
1.3.4 <i>Kombinovaný sériově – paralelní kontrolér</i>	18
1.4 PŘEHLED KONTROLÉRŮ	18
1.4.1 <i>Kontroléry zapojené v sérii</i>	18
1.4.2 <i>Kontroléry zapojené v paralelu</i>	20
1.4.3 <i>Kombinované kontroléry</i>	22
2 MOŽNÉ OBLASTI UŽITÍ FACTS KONTROLÉRŮ	25
2.1 KVALITA ELEKTRICKÉ ENERGIE	25
2.1.1 <i>Stabilita předávky elektrizační soustavy</i>	26
2.1.2 <i>Očekávané přínosy FACTS</i>	27
2.2 OBLASTI OČEKÁVANÉHO ROZVOJE	28
2.2.1 <i>Rozdělení užití dle oblastí uplatnění</i>	28
2.2.2 <i>Rozdělení užití dle typu poruchy</i>	29
2.2.3 <i>Rozdělení užití dle požadovaných atributů sítě</i>	29
2.3 HVDC vs. FACTS	32
2.3.1 <i>Podmořský přenos</i>	32
2.3.2 <i>Páteřní linky dlouhých vzdáleností</i>	33
2.3.3 <i>Přenos energie pod povrchem</i>	33
2.3.4 <i>Propojení linek s rozdílnou frekvencí</i>	33
3 SOUČÁSTKOVÁ ZÁKLADNA PRO FACTS	34
3.1 CHOVÁNÍ NAPĚŤOVÉHO STŘÍDAČE	35
3.2 VÝKONOVÉ PRVKY PRO FACTS	37
3.2.1 <i>GTO vs. IGCT</i>	38
3.2.2 <i>IGCT vs. IGBT pro použití v měničích pro FACTS</i>	40
3.2.3 <i>ETO vs. GTO a IGCT</i>	41
4 STATCOM	45
4.1 PRINCIP KONTROLÉRU	45
4.1.1 <i>Účinnost</i>	50
4.1.2 <i>STATCOM s externím zdrojem energie</i>	50
4.2 KONCEPCE ŘÍZENÍ KONTROLÉRU	51
5 PŘÍPADOVÁ STUDIE SIMULACE STATCOM VS. SVC	56
5.1 POPIS BLOKU STATCOM	56
5.1.1 <i>Vstup</i>	58
5.1.2 <i>Výstup</i>	58

5.2	POPIS BLOKU SVC.....	59
5.2.1	<i>Vstup</i>	60
5.2.2	<i>Výstup</i>	61
5.3	POPIS SIMULACE.....	61
	ZÁVĚR	66
	POUŽITÁ LITERATURA	67
	PŘÍLOHY	1

Úvod

Současný trend neustálého růstu naší společnosti způsobuje i zvyšování nároků na spotřebu elektrické energie. Sítě se stávají stále složitější a stále častěji se setkáváme s požadavkem přenášet větší výkon, než na který byly původně navrženy. V současné době se tedy naše distribuční sítě nacházejí téměř na hranici přenosové stability a je nutné v tomto směru učinit patřičná opatření ke zvýšení jejich bezpečnosti, a to jak u linek stávajících, tak i u linek plánovaných. Cílem této práce je popsat technologii, která se pro tento náročný úkol nabízí. Jedná se o technologii souhrnně označovanou FACTS, což je zkratka pro flexibilní systém přenosu střídavého proudu. Pod tímto názvem se skrývá obsáhlá řada komplikovaných systémů a principů, určených k dosažení vyšší statické a dynamické stability přenosových a distribučních soustav.

Systém FACTS není záležitostí posledních několika let. Zařízení, která by svým konceptem bylo možné zařadit do této skupiny, jsou vyvíjena již několik desetiletí. Nicméně FACTS jako celistvý koncept je znám teprve od konce 80. let minulého století, kdy byl představen EPRI, a až v poslední době jsou na trhu dostupné technologie, které umožňují jejich praktickou realizaci.

Má diplomová práce vychází převážně ze zahraniční literatury a zahraničních informačních zdrojů. V úvodu se zabývá rozdělením skupiny FACTS kontrolérů a jejich základními principy funkce ve vztahu k síti. V další části práce je diskutována jejich možnost nasazení při zlepšování parametrů sítě a jejich potenciál do budoucna.

Druhá část práce je pak zaměřena na popis principu Statického synchronního kompenzátoru. Jelikož zařízení typu FACTS jsou desítky druhů, bylo STATCOM vybráno jakožto nejvýznamnější zástupce, spadající do druhé generace skupiny FACTS zařízení, které bude představeno bližším popisem. Pro zařízení II. generace je zde popsána i součástková základna s důrazem kladeným na budoucí trendy při stavbě střídačů pro tento účel vyhovujících.

V závěru práce bude také uvedena případová studie porovnávající STATCOM s jeho přímým předchůdcem SVC, která je namodelována v programu Matlab[®] Simulink[®] s využitím knihovny SimPowerSystems a fázorové metody modelování.

Seznam symbolů

$L1 L2 L3$	Fázové vodiče napájecí soustavy
N	Střední pracovní vodič napájecí soustavy
$lf, 3f$	Počet fází
nn	Nízké napětí
vn	Vysoké napětí
vvn	Velmi vysoké napětí
$\cos\varphi$	Účinit
P	Činný výkon
Q	Jalový výkon
S	Zdánlivý výkon
<i>mil.</i>	Milión
U_d	Unipolární napětí
i_d	Stejnoseměrný proud kapacitoru
u_a	Napětí na střídavé straně měniče
U_D	Blokovací napětí
θ	Úhel základního synchronizačního signálu
i_o	Výstupní proud střídače
α	Úhel fázového posunu mezi napětí střídače a sítě
I_L	Induktivní jalový proud
I_C	Kapacitní jalový proud
U_{DC}	Napětí na kapacitě
I_b	Proud buzení

Seznam zkratek

BESS	Battery energy storage system
DS	Distribuční soustava
ES	Elektrizační soustava
ETO	Emitter Turn-Off Thyristor
EPRI	Electric Power Research Institute
FACTS	Flexible Alternating Current Transmission System
FC	Fixed shunt capacitor
FR	Fixed shunt reactor
GTO	Gate Turn-Off Thyristor
IEEE	The Institute of Electrical and Electronics Engineers
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
IGCT	Integrated Gate Commutated Thyristor
IPFC	Interline power flow controller
LCC	Line commutated converter compensator
MSC	Mechanical switched shunt capacitor
MSR	Mechanical switched shunt reactor
MTO	Mos Turn-Off Thyristor
SMES	Superconducting magnetic energy storage
SSG	Static synchronous generator
SSSC	Static Synchronous Series compensator
STATCOM	Static synchronous compensator
SVC	Static var compensator
SVS	Static var system
TCBR	Thyristor controlled braking resistors
TCPST	Thyristor controlled phase shifting transformers
TCR	Thyristor controlled reactor
TCSC/TCSR	Thyristor controlled series compensator (capacitors or reactors)
TSC	Thyristor switched capacitor
TSSC/TSSR	Thyristor switched series compensator (capacitor or reactors)
UPFC	Unified power flow controller

1 Studie problematiky FACTS

Fyzikální problém masového nasazení rozptýlených zdrojů, který, ač je zřetelně patrný, si málokdo uvědomuje. Distribuční soustava a její regulace byla původně navržena pro klasickou distribuci elektrické energie, tedy na distribuci od definovaných zdrojů ke spotřebičům. V současné době je tento model jen těžko udržitelný a situace je spíše podobná stavu, kdy se síť skládá z mnoha rozptýlených zdrojů, jejich plynulá regulace v čase je prakticky nemožná, což vede k problémům regulace napětí. Z toho důvodu se tak často hovoří o potřebě přebudování DS na tzv. Smart Grid¹. Tato inteligentní síť by si sama měla poradit s rozptýlenou výrobou, akumulací a spotřebou elektrické energie. Pojem Smart Grid je v současné době pojmem hodně populárním a skloňovaným ve všech možných směrech.

Budoucnost Smart Grid je zatím vzdálená, ale potřebu regulace DS je nutno řešit již dnes. Jednou z možností je užití moderní výkonové zařízení typu FACTS. Podle časopisu IEEE Spektrum² představují FACTS slibný způsob, jak ušetřit energii a přiblížit distribuční soustavu inteligentní síti. Systém přináší nové možnosti jak při plánování nových sítí, tak i při rozšiřování sítí stávajících při zlepšení provozních marží nezbytných pro stabilitu sítě. Možnost kontroly proudu tekoucího skrze linku s přijatelnými náklady umožňuje značným způsobem zvýšit kapacitu stávajících linek. Studie hovoří o technologii FACTS jako o technologii, která umožňuje zvýšit stávající kapacitu vedení až o padesát procent.

Systémy FACTS prokazují velkou dynamiku v řízení zdrojů jalového proudu a díky speciálním řídicím algoritmům je kompenzační jalový výkon dodán ve správný okamžik. Zatížení sítě je menší a tím se změny síťového napětí a deformace snižují na bezpečnou hodnotu.[3]

V průmyslových rozvodech jsou tradičně používány pasivní filtry k pohlcování harmonických kmitů generovaných nelineárními zátěžemi, a to primárně kvůli jejich nízkým nákladům, což je velmi dobrý přístup, pokud je třeba kompenzovat účinník. Nicméně pasivní filtry mají také své nevýhody, a proto je jejich použití omezené. Oproti pasivním filtrům může být FACTS použito i k redukci harmonických, aniž by bylo nutné starat se o problémy přicházející s aplikací pasivních prvků. Systémy FACTS umožňují řídit kompenzaci harmonických a jalových (reaktančních) proudů nezávisle na konfiguraci sítě a bez rizik

¹ Smart Grid (inteligentní síť): silové elektrické a komunikační síť, které umožňují regulovat výrobu a spotřebu elektrické energie v reálném čase, jak v místním, tak v globálním měřítku.

² IEEE Spektrum: odborný časopis, který uvádí poslední technické novinky a vědecké objevy viz. seznam literatury 14

spojených s přetížením kompenzátoru.

O důležitosti FACTS svědčí i fakt, že Institut pro elektrotechnické a elektronické inženýrství zařadil technologii přenosových soustav spolu s například chytrými telefony k jedenácti nejdůležitějším technologiím posledního desetiletí.

1.1 Základní charakteristika FACTS zařízení

FACTS kontrolér – je v literatuře označován rozdílně (regulátor, kompenzátor), pro účely diplomové práce bude použit výraz kontrolér, jelikož se diplomová práce opírá především o zahraniční literaturu, kde je pro tento typ zařízení užíváno právě označení kontrolér.

FACTS je obecně definován jako systém na bázi výkonové elektroniky a jiného statického zařízení, které umožňuje regulaci jednoho nebo více parametrů střídavé sítě. Mezi kontrolované parametry patří např. napětí, proud, impedance a fázový úhel.

Zařízení FACTS lze dělit do několika skupin. Obecně je možné rozřadit kontroléry podle míry vývoje, dle použitých součástek nebo dle typu připojení k síti. Zahraniční literatura třídí zařízení obecně do dvou generací, ale je možné se setkat i s rozdělením do generací tří. Pro úplnost této diplomové práce je vhodné dělit zařízení do dvou generací s uvedením tzv. nulté generace, která obsahuje zařízení s mechanickými spínači. To odpovídá definici FACTS a zároveň zachovává úplnost problematiky.

1.2 Generační dělení

0. Generace: zastupuje systémy s mechanicky spínanými prvky

- Fixed shunt reactor (FR)
- Fixed shunt kapacitor (FC)
- Mechanical switched shunt reactor (MSR)
- Mechanical switched shunt capacitor (MSC)

I. Generace: zastupuje systémy užívající ke spínání tyristory

- Thyristor controlled Reactor (TCR)
- Thyristor switched capacitor (TSC)
- Static Var compensator (SVC)
- Thyristor switched series compensator (Capacitor or reactors) (TSSC/TSSR)
- Thyristor controlled series compensator capacitors or reactors (TCSC/TCSR)
- Thyristor controlled braking resistors (TCBR)

- Thyristor controlled phase shifting transformers (TCPST)
- Line commutated converter compensator (LCC)

II. Generace: zastupuje systémy užívající vypínatelné prvky, zařízení používající střídače

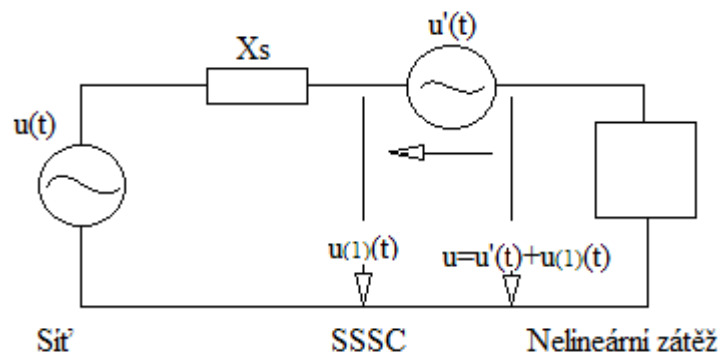
- Static synchronous compensator (STATCOM)
- Static Synchronous Series compensator (SSSC)
- Unified power flow controller (UPFC)
- Interline power flow controller (IPFC)

1.3 Dělení dle typu připojení k síti

- Sériové kontroléry
- Paralelní kontroléry
- Kombinované sériově-sériové kontroléry
- Kombinované sériově-paralelní kontroléry

1.3.1 Sériový kontrolér

Obrázek 1.1 znázorňuje princip zařízení zapojeného v sérii se sítí mezi svorky sítě a nelineárního spotřebiče. Systém je zde uveden jako v sérii zapojený generátor napětí. Zařízení umožňuje upravit přiváděné napětí na sinusový tvar, nicméně nemůže zajistit sinusový průběh odebíraného proudu. Z toho důvodu se sériový způsob zapojení často vyskytuje v kombinaci s derivačně zapojeným systémem [1][5].



Obr. 1.1 Princip sériového zapojení FACTS (SSSC)

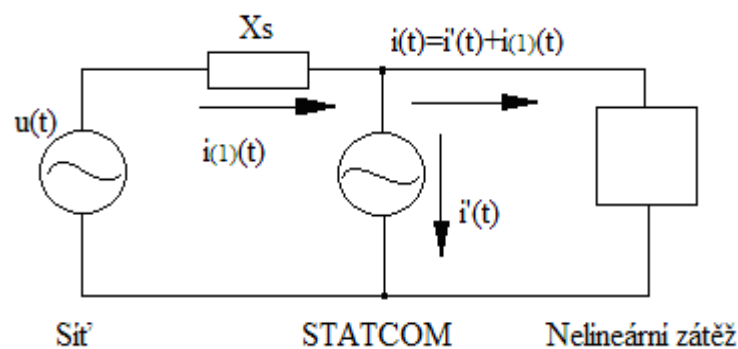
Sériově zapojené zařízení upravuje napětí, to znamená, že FACTS (SSSC) má schopnost stabilizovat amplitudu napětí, kompenzovat krátkodobé poklesy i špičky a zajišťovat symetrické rozložení napětí. Kontrolér může také dodávat energii při výpadku napájecí sítě, ale pouze za předpokladu, že má zařízení nezávisle napájený zdroj.

Pět základních funkcí sériového připojení FACTS

1. Kompenzace úbytku napětí na reaktanci napájecí sítě jX_s , $Z_s=R_s+jX_s$, kde R_s je odpor sítě.
2. Symetrizace a regulace napájecího napětí.
3. Filtrace harmonických napětí na svorkách zátěže.
4. Dodávka energie při výpadku napájecího napětí v případě je-li zařízení vybaveno nezávislým zdrojem.
5. Umožňuje vytvořit fázový posun.

1.3.2 Paralelní (derivační) kontrolér

Zařízení, jak je vyobrazeno na obrázku 1.2, mají schopnost injektovat do místa připojení zbytkovou křivku proudu, tj. rozdíl mezi ideální sinusovou křivkou proudu (soufázovou s křivkou napětí) a křivkou proudu odebíraného kompenzovaným spotřebičem. Systém FACTS je tím schopen odstranit nežádoucí vyšší harmonické proudu $i'(t)$, a při sečtení složek $i(t)$ a $i'(t)$ vznikne sinusový proud $i_1(t)$, který teče ze strany zdroje $u(t)$. Tím dojde k filtraci proudu a úpravě napětí.



Obr. 1.2 Princip zapojení paralelního kontroléru FACTS (STATCOM)

Použitím tohoto způsobu je možné v každém okamžiku docílit efektivní kompenzace podle okamžitého výskytu harmonických složek, aniž by hrozilo nebezpečí nežádoucí rezonance. Zařízení má samozřejmě schopnost kompenzovat i jalový proud. V důsledku to znamená, že upravuje nesymetrickou zátěž na symetrickou a filtruje neperiodické průběhy rušivých signálů [1][5].

Z obou popsáných způsobů zapojení dále vyplývá, že paralelně zapojená zařízení upravují vlastnosti sítě směrem od zátěže ke zdroji (vyrovnávají rušivé účinky zátěže). Sériově zapojená zařízení potom upravují síť směrem od napájecí strany, to jest, dodávají zátěži kvalitnější energii. Oba způsoby je možné zkombinovat v jeden celek, čímž vznikne systém zajišťující jak vhodné napětí v místě připojení, tak i sinusový proud.

Čtyři základní funkce paralelního připojení FACTS

1. Kompenzace jalového proudu – zařízení může dodávat jalový výkon kapacitního/induktivního charakteru, čímž je možné řídit účinník $\cos\varphi$ na požadovanou hodnotu u dynamicky se měnící zátěže.
2. Filtrace harmonických proudů – zařízení nastavuje stejný průběh proudu opačného charakteru.
3. Vyvážení nesymetrické zátěže – pomocí generování sousledných i nesousledných složek proudu do sítě se eliminuje nesousledná složka proudu zátěže způsobená nesymetrickou zátěží.
4. Přenos činného výkonu – na akumulární prvek ve stejnosměrné části měniče lze připojit stejnosměrně napájené zařízení.

1.3.3 Kombinovaný sériově – sériový kontrolér

Sériově – sériový kontrolér se skládá z kombinace koordinovaně řazených oddělených sériových kontrolérů zapojených do vedení. Dalším případem je pak unifikovaný regulátor, ve kterém sériové kontroléry poskytují nezávislou sériovou kompenzaci jalového výkonu v každém vedení a také přenos činného výkonu mezi vedeními přes stejnosměrnou linku spojující kontroléry. Takové schéma umožňuje regulovat činný i jalový výkon tekoucí po vedení, a tím maximalizovat přenosovou schopnost vedení. Hlavním zástupcem je pak

Interline Power Flow Controller dále uvedený v přehledu zařízení [5].

1.3.4 Kombinovaný sériově – paralelní kontrolér

Sériově – paralelní kontrolér je kombinací koordinovaně řízených oddělených sériových a paralelních kontrolérů. Dalším případem je pak unifikovaný regulátor výkonu Unified Power Flow Controller, který se skládá ze sériové kombinace sériových a paralelních kontrolérů spojených stejnosměrnou linkou. Výhodou je, že sériová kompenzace a injekce proudu do soustavy umožňuje také výměnu činného výkonu mezi sériovými a paralelními kontroléry [5].

1.4 Přehled kontrolérů

Tato část práce obsahuje vymezení pojmů všech zařízení FACTS s jejich stručným popisem, tak jak je definuje IEEE. Uvedená zařízení je možné najít v různé literatuře pod rozdílnými názvy. Následující podkapitola se snaží zachytit názvy zařízení v nejrozšířenější formě.

1.4.1 Kontroléry zapojené v sérii

SSSC (Static Synchronous Series Compensator) - Statický synchronní generátor provozovaný jako sériový kompenzátor u kterého výstupní napětí může být regulované nezávisle na proudu v soustavě. Umožňuje řídit tok výkonu oběma směry a tlumit oscilace. Je porovnatelný s řízeným sériovým kompenzátozem, nicméně je výrazně výkonnější a přesnější. Kontrolér SSSC je společně s kontrolérem STATCOM jedním z nejdůležitějších FACTS kontrolérů [5].

V reálných aplikacích se SSSC instaluje především v zahraničí jako korektor celé napájecí soustavy výrobního závodu, nejčastěji na hladině 22kV s příkonem až 22,5MVA. Z energetického hlediska je SSSC založeno na principu náhradního zdroje energie, který pro víceúrovňový střídač připravuje energii do stejnosměrného obvodu (kondenzátoru). Výpočet chybějící křivky napětí pro řízení střídače pak obstarává prediktivní regulátor. Napětí je poté přes transformátor se dvěma vstupy sečteno a dodáno zátěži. Doba dodávky energie pak závisí na charakteru a typu poklesu napětí 1, 2 či 3 fáze. Z hlediska regulačních a výpočetních požadavků je SSSC velmi složité zařízení, především kvůli real-time vyhodnocování sledované napájecí soustavy a následná rychlá reakce regulačních členů. Nicméně účinnost až 95% ho řadí do skupiny velmi účinných zařízení. (Stejně jako u STATCOM může zde být

použit napěťový nebo proudový střídač.)[14]

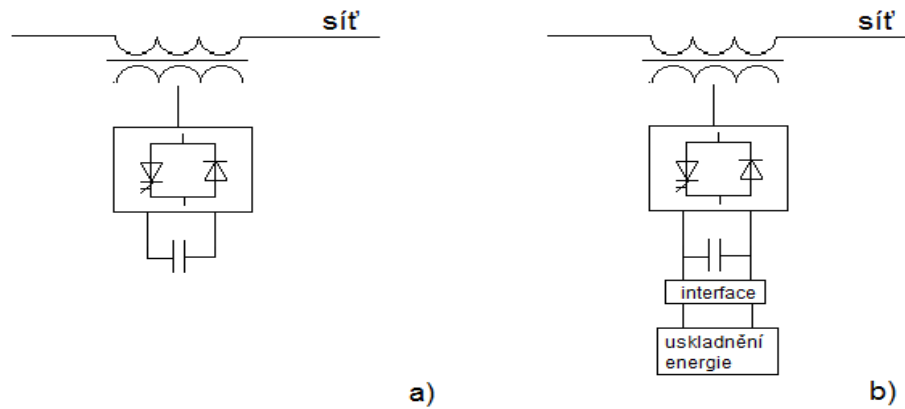
IPFC (Interline Power Flow Controller) - Je nedávno představený typ zařízení, tudíž není ještě definován podle IEEE. Jde o kombinaci dvou nebo více zařízení SSSC, která jsou spojena přes společnou stejnosměrnou vazbu ke sdílení činného výkonu mezi dvěma střídavými terminály všech SSSC [12].

TCSC (Thyristor Series Capacitor)- Kapacitně reaktanční kompenzátor, který se skládá ze sériového kapacitoru paralelně připojeného k tyristorově kontrolované cívce, aby poskytoval plynule měnící se sériové kapacitní reaktanci – je založený na použití tyristorů bez možnosti vypnutí [1]. Tyristorově řízená tlumivka (TCR) připojená podél sériového kapacitoru způsobuje, že při 180° spínacího úhlu se cívka stává nevodivou a sériový kapacitor má svou vlastní impedanci. Pokud se spínací úhel změní na méně než 180° , kapacitní impedance vzroste. Pokud je spínací úhel roven 90° , pak se cívka stává plně vodivou a celková impedance se stává induktivní. Při 90° sepnutí TCSC napomáhá také k omezení poruchového proudu. TCSC je jedním z velmi důležitých FACTS kontrolérů s velkým podílem instalací [12].

TSSC (Thyristor Switched Series Capacitor) - Kompenzátor, který se skládá ze sériového kapacitoru paralelně spojeného s tyristorově spínaným reaktorem, aby prováděl stupňovitou (diskrétní) kontrolu sériové impedance vedení – dochází ke spínání pouze v úhlech 90° a 180° , což umožňuje snížení nákladů na zařízení a jeho ztrát [12].

TCSR (Thyristor Controlled Series Reactor) - Kompenzátor, který se skládá ze sériově zapojené tlumivky paralelně spojené s tyristorově spínaným reaktorem (TCR), aby poskytoval jemnou změnu sériové impedance vedení – při úhlu sepnutí 180° cívka, která není řízena funguje jako omezení proudu. Při úhlu otevření tyristoru nižším než je 180° , indukčnost sítě klesá až k úhlu 90° , kdy je síťová indukčnost paralelní kombinací obou cívek [1][5].

TSSR (Thyristor Switched Series Reactor) - Kompenzátor, který se skládá ze sériově zapojené tlumivky paralelně spojené s tyristorově spínaným reaktorem, aby poskytovala skokovou kontrolu sériové impedance vedení – používá se jako doplněk k systému TCSR



Obr. 1.3 a) Static Synchronous Series Compensator (SSSC), b) SSSC s možností uskladnění energie

1.4.2 Kontroléry zapojené v paralelu

STATCOM (Static Synchronous Compensator) - IEEE definuje STATCOM jako statický synchronní generátor, jehož kapacitní nebo induktivní výstupní proud může být kontrolován nezávisle na napětí sítě. Patří k nejvýznamnějším zařízením skupiny FACTS, a proto je mu věnován prostor ve 4. kapitole.

SSG (Static Synchronous Generator) - Kombinuje možnosti STATCOM a zdroje schopného absorbovat nebo dodávat energii. Termín SSG zobecňuje připojení jakéhokoliv zdroje energie, zahrnující baterii, supervodivý magnet, super kapacitor atd. Definice SSG v sobě zahrnuje také SMES a BESS [5].

SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage) - Supravodivé elektromagnetické uskladnění energie obsahující elektronický měnič, který rychle generuje nebo absorbuje činnou nebo jalovou složku výkonu, a tím dynamicky kontroluje tok výkonů v síti [5].

BESS (Battery Energy Storage System) - Paralelně připojený chemický zdroj užívající napěťový střídač schopný rychlého nastavení toku energie, který ji dodává nebo odebírá z elektrické sítě [5].

SVC (Static Var Compensator) - Instalace SVC se stává z několika bloků. Nejdůležitější část v sobě ukrývá blok ze sériově spojených antiparalelně uspořádaných tyristorů, které provádí kontrolu zařízení. Další části zahrnují indukčnosti a kapacity, které jsou použity společně s tyristorovým řízením. Připojení tohoto zařízení je docíleno prostřednictvím výkonového transformátoru. Obvykle jsou tyristory společně s kontrolním systémem uzavřeny uvnitř

budovy, kdežto indukčnosti se vzduchovým jádrem a kapacity společně s výkonovým transformátorem jsou vně budovy. V principu se SVC stává z TSC (tyristorově spínaných kondenzátorů) a TCR (tyristorově kontrolovaných reaktorů). Systém SVC patří k nejstarším zástupcům FATCS, jeho první realizace byla provedena už v roce 1972. Z toho důvodu je tento systém jedním z nejrozšířenějších [12].

TCR (*Thyristor Controlled Reactor*) - Paralelně připojená, tyristorově řízená tlumivka, jejíž reaktance se mění plynule a rychle v závislosti na spínání tyristorů. Zdrojem kapacitního výkonu je soustava paralelně řazených kompenzačních filtrů; proud tlumivky je regulován fázově řízeným měničem. Plný induktivní proud protéká tlumivkou tehdy, je-li řídicí úhel roven 45° . Naopak nulový proud odpovídá hodnotě 180° . Plný rozsah fázového řízení je možný pro hodnoty řídicího úhlu α $90^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$.

Používá se v sítích nn a vn s použitím speciálního regulátoru pro kompenzování nesymetrických odběrů. (Ve většině případů bývá použita společně s pevnou kondenzátorovou baterií FC.) [1]

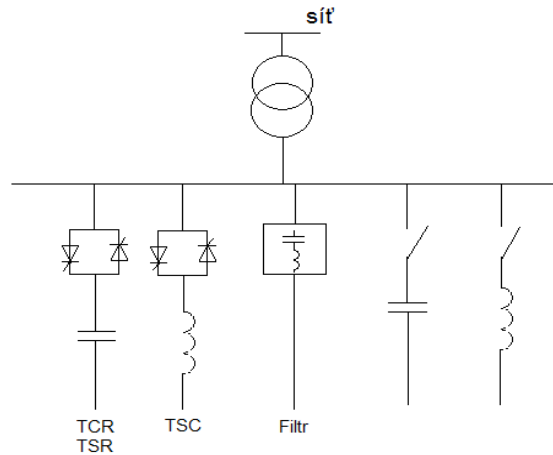
TSR (*Thyristor Switched Reactor*) - Paralelně připojená, tyristorově spínaná tlumivka, jejíž efektivní reaktance se mění skokově (tzv. cívka vede nebo nevede). TSR se často skládá z více zapojených tlumivek paralelně [1].

TCS (*Thyristor Switched Capacitor*) - Paralelně připojený, tyristorově spínaný kondenzátor, jehož efektivní reaktance se mění skokově. TSC se skládá z několika paralelně zapojených kondenzátorů, které jsou podle požadavků připojené nebo odpojené od soustavy. Do série se zařízením se připojí i tlumivka k omezení spínacích přechodových dějů, tlumení nárazových proudů a k zabránění rezonancí s induktivní reaktancí sítě. Vhodným řazením TSC je možné dosáhnout odstranění nepříznivých přechodových dějů způsobených spínáním [5].

SVG (*Static Var Generator nebo Absorber*) - SVG je široce definován IEEE jako statické elektrické zařízení, vybavení nebo systém, který je schopný kontrolovat induktivní nebo kapacitní proud tekoucí z nebo do elektrické sítě, a tím generovat nebo absorbovat jalový výkon. Obecně vzato se skládá z paralelně připojené tyristorem kontrolované cívky a tyristorem kontrolovaného kapacitoru. (Tudíž, jak SVC tak STATCOM se také dají považovat za „static var generator“, jak je definuje IEEE) [5]

SVS (Static Var Systém) - Kombinace různých staticky a mechanicky spínaných kompenzátorů, jejichž výstupy jsou koordinovány [5].

TCBR (Thyristor Controlled Breaking Resistor) - Tyristorově řízený rezistor (obvykle lineární rezistor), který napomáhá řízení stability sítě nebo minimalizaci výkonové akcelerace generujících jednotek během poruchy. Brzdný rezistor napomáhá snižovat akcelerační výkon během přechodných nestabilních podmínek [12].



Obr. 1.4 Static Var Compensator (SVC), Thyristor-Controlled Reactor (TCR), Thyristor-Switched Capacitor (TSC), Thyristor-Switched capacitor (TSC) [5]

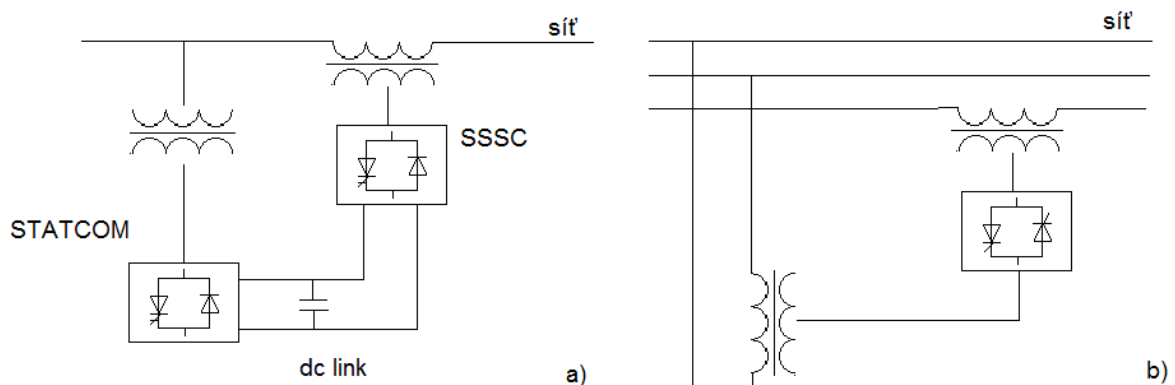
1.4.3 Kombinované kontroléry

UPFC (Unified Power Flow Controller) - Je kombinací statického synchronního kompenzátoru STATCOM a statického sériového kompenzátoru SSSC. Oba dva systémy jsou spojeny skrze společnou stejnosměrnou vazbu, aby bylo dosaženo obousměrného toku činného výkonu mezi výstupními svorkami SSSC a paralelními svorkami STATCOM, které jsou kontrolovány tak, aby poskytovaly souběžně činnou a jalovou kompenzaci linky bez potřeby externího zdroje elektrické energie. UPFC je prostřednictvím úhlově neomezené injekce napětí schopno kontrolovat souběžně nebo selektivně napětí přenosové linky, impedanci a úhel, nebo případně činný a jalový výkon sítě. UPFC může také poskytovat nezávislou paralelní kompenzaci [13].

TCPST (Thyristor-Controlled Phase Shifting Transformer) - Transformátor umožňující úhlovou regulaci řízenou tyristorem. Pracuje principiálně jako podélně a příčně regulovaný

transformátor, avšak mechanický systém je nahrazen vhodným tyristorovým spínáním. Takové řešení umožňuje skokové nebo plynulé obousměrné řízení velikosti napětí [5].

IPC (Interphase Power Controller) - Sériově zapojený kontrolér sloužící ke kontrole činného a jalového výkonu skládající se v každé fázi z induktivní a kapacitní větve pod napětím s rozdílným fázovým posunem. Činný a jalový výkon může být nastaven nezávisle pomocí fázového posunu impedance větve s použitím elektronických spínacích prvků. Nutnými součástmi IPC jsou paralelní větve s transformátory s úhlovou regulací a pasivními elementy: tlumivkou a kondenzátorem, které jsou připojené do každé fáze. Hlavním účelem IPC je pak udržovat konstantní hodnotu toku činného výkonu mezi dvěma uzly soustavy. [12][5]



Obr. 1.5 a) Unified Power Flow Controller, b) Thyristor- Controlled Phase-Shifting Transformer (TCPST) [12]

V následující tabulce č. 1 jsou popsány kontrolované atributy pro rozdílná zařízení.

Tab. 1 Kontrolované atributy pro rozdílná zařízení

FACTS	Kontrolované atributy	Připojení
Static Synchronous Compensator (STATCOM bez externího zdroje energie)	kontrola napětí, kompenzace jalového výkonu, tlumení oscilací, napěťová stabilita	Paralelní
Static Synchronous Compensator (STATCOM s externím zdrojem energie, BESS, SMES, velký dc kapacitor)	kontrola napětí, kompenzace jalového výkonu, potlačení oscilací, přenosová a dynamická stabilita, napěťová stabilita	
Static VAR Compensator (SVC, TCR, TCS, TRS)	kontrola napětí, kompenzace jalového výkonu, tlumení oscilací, přenosová a dynamická stabilita, napěťová stabilita	
Thyristor- Controlled Braking Rezistor (TCBR)	tlumení oscilací, přenosová a dynamická stabilita linky	
Static Synchronous Series Compensator (SSSC bez externího zdroje)	kontrola proudu, tlumení oscilací, přenosová a dynamická stabilita, napěťová stabilita, omezení zkratového proudu	Sériové
Static Synchronous Series Compensator (SSSC s externím zdrojem)	kontrola proudu, tlumení oscilací, přenosová a dynamická stabilita, napěťová stabilita	
Thyristor-Controlled Series Capacitor (TCSC, TSSC)	kontrola proudu, tlumení oscilací, přenosová a dynamická stabilita, napěťová stabilita, omezení zkratového proudu	
Thyristor-Controlled Series Reactor (TCSR, TSSR)	kontrola proudu, tlumení oscilací, přenosová a dynamická stabilita, napěťová stabilita, omezení zkratového proudu	
Thyristor-Controlled Phase-Shifting Transformer (TCPST nebo TCPR)	kontrola činného výkonu, tlumení oscilací, přenosová a dynamická stabilita, napěťová stabilita	Kombinované
Unified Power Flow Controller (UPFC)	kontrola činného výkonu, kontrola napětí, kompenzace jalového výkonu, potlačení	

	oscilací, kontrola přenosové a dynamické stability linky, omezení zkratového proudu
Thyristor- Controlled Voltage Regulátor (TCVR)	kontrola jalového výkonu, kontrola napětí, potlačení oscilací, kontrola přenosové a dynamické stability, zvýšení napěťové stability
Interline Power Controller (IPC)	kontrola jalového výkonu, kontrola napětí, potlačení oscilací, kontrola přenosové a dynamické stability, napěťová stabilita

2 Možné oblasti užití FACTS kontrolérů

V oblasti nasazení je důležité se zmínit o dvou nejčastěji používaných zařízeních, a to STATCOM, kterému je věnována i celá čtvrtá kapitola, a jeho přímému předchůdci SVC, představenému principiálně v první kapitole. Právě tyto dva systémy hrají hlavní roli mezi technologiemi spadajícími do skupiny FACTS. Téměř polovina z SVC a více než polovina ze systémů STATCOM je používána pro průmyslové aplikace a potřeby obnovitelných zdrojů. Ve světě najdeme stanice STATCOM sloužící například pro zvýšení spolehlivosti dodávky větrných farem či eliminaci nesymetrií zátěže průmyslových zařízení. Stanice jsou v provozu ve Velké Británii, Skotsku, Švédsku, Španělsku a Německu. Stejně tak je možné najít aplikovaná zařízení v Austrálii, Japonsku a USA. Po celém světě je v současnosti nachází více než 600 zařízení skupiny FACTS. Valná část těchto zařízení je dodávána společnostmi ABB, Mitsubishi, Siemens a Westinghouse. Existuje zde však i nemalá síť malých firem, které vyrábějí podobná zařízení. Většina těchto zařízení je však připojitelná pouze k síti nízkého napětí. V současné době je nejvyšší připojitelné napětí bez použití zvyšovacího transformátoru 92kV a to firmou ABB, která zařízení prodává pod názvem SVC Light [17]. STATCOM je také známo pod názvy jako jsou AHC (Active Harmonic Compensator), Advance SVC (Static Var Compensator), atd.

Do zařízení typu FACTS spadá SVC jako zástupce první generace a STATCOM představující zástupce generace druhé (dle rozdělení IEEE). Mají za úkol potlačovat flicker efekt³, vlivy vnášené do sítě přítomností nesymetrických zátěží, vylepšovat účinnost a také v některých případech potlačovat krátkodobé přerušení napájecí sítě viz podkapitola Očekávané přínosy FACTS.

2.1 Kvalita elektrické energie

³ Flicker (blikavý jev) je způsobený poklesy amplitudy napájecího napětí s frekvencí okolo 1Hz.

Každý problém, který je spjat s odchylkou napětí, proudu nebo frekvence od jmenovité hodnoty může být považován za poruchu.

K problémům souvisejícím s kvalitou elektrické energie především patří:

1. Znečištění přenosových, distribučních a rozvodných sítí vyššími harmonickými, generovanými nelineární zátěží, používající výkonové polovodičové systémy.
2. Blikání, které je způsobené kolísáním efektivní hodnoty napětí.
3. Harmonické, které jsou generované například cyklokonvertory, či tyristorovými měniči velkých výkonů.
4. Nesymetrie způsobená velkými jednofázovými odběry nebo velkým množstvím jednofázových malých odběrů.
5. Zhoršení účinnosti odběru základní harmonické proudu.
6. Přerušování, poklesy napětí a přepětí.

2.1.1 Stabilita předávky elektrizační soustavy

Pod pojmem stability elektrizační soustavy jsou zařazeny přechodové jevy související se změnami zátěžného úhlu generátoru se změnami frekvence a napětí.

Stabilita elektrizační soustavy může být všeobecně definována jako schopnost elektrizační soustavy zůstat ve stavu předávkové rovnováhy při ustálených předávkových podmínkách a schopností znovu získat akceptovatelný stav rovnováhy po poruše. Během normální předávky je elektrizační soustava ve stavu blízkém rovnovážnému jen s malými odchylkami od ustáleného stavu, které jsou zapříčiněny neustálými změnami zátěže. V případě poruchy je důležité, aby vhodným zásahem byla doba reakce co nejkratší (rozdělením výkonů, buzením) a předejít tak havarijním stavům [12].

Důvodů pro zvýšení pozornosti ES je několik:

1. Klasické řešení rozvoje sítí je založené na posilňování existujících úseků a budování nových vedení. Vzhledem k narůstajícím problémům se získáváním nových koridorů a s přihlédnutím k enviromentálním požadavkům se to pak jeví jako neefektivní a nedostatečné.
2. Největší důležitost se přikládá a bude přikládat kvalitě elektrické energie.
3. Otevření trhu s elektrickou energií je doprovázené nárůstem množství elektrické energie, která je přenášena mezi jednotlivými státy.

4. Jednou ze zásadních změn v rámci liberizace trhu s elektrickou energií je zavedení koncepce „přístupu třetí strany“, která umožňuje odběratelům zvolit si svého dodavatele elektrické energie. Zvyšuje se tím konkurence mezi výrobcí a přenosová vedení budou tím pádem stále častěji vystavována podmínkám, se kterými nebylo počítáno v době jejich výstavby a plánování.

V případě předávky za výše uvedených podmínek a určitých stavů se začínají objevovat úzké profily v sítích, které se můžou stát omezujícími faktory při uvažované obchodní výměně. Tyto situace potom následně mohou vést k výpadkům a přerušení zásobování v určitých oblastech. Výsledkem těchto změn bude z technického hlediska fakt, že elektrizační soustava bude provozována blíže ke svým fyzikálním limitům, přičemž se bude pohybovat i na mezi stability.

Z těchto důvodů se často hledají i způsoby, které by dokázaly alespoň regionálně zvrátit nepříznivé vlivy uvedených záporných trendů a procesů působících na předávku elektrizační soustavy. Jak již bylo řečeno v kapitole první, jedním z těchto způsobů je rozšířit možnosti rychlého regulování vybraných veličin s využitím FACTS zařízení [13].

2.1.2 Očekávané přínosy FACTS

Z výše uvedených oblastí vyplívají i očekávané přínosy FACTS, které obecně zvyšují zatížitelnost sítí jak v krátkodobém tak dlouhodobém horizontu. Toho může být dosaženo rovnoměrným rozptřčením výkonu po celé lince a sdílením výkonu linkám dle jejich přenosových schopností. Zařízení dále umožňují kontrolu výkonu právě tam, kde je to potřeba. Zvyšují bezpečnost přenosové stability linek, omezují zkratové proudy a přetížení, potlačují elektromechanické oscilace sítí a strojů, umožňují řízení kaskádních blackout⁴. FACTS kontroléry umožňují lepší využití linek v letních měsících nebo při krátkodobých stavech přetížení. Přinášejí možnost omezení škodlivých transienčních jevů při spínání kapacit a redukci přenášeného jalového výkonu a tím zvýšení přenosu činného výkonu. Poskytují bezpečné připojení k okolním sítím, tím snížení celkových generovaných rezerv výkonu, čímž v důsledku zvyšují spolehlivost dodávky a poskytují vyšší flexibilitu při usazení zařízení nové generace.

⁴ Blackout: Výrazný výpadek proudu, který přeruší zásobování rozsáhlého území elektrickou energií.

2.2 Oblasti očekávaného rozvoje

Úvodem je důležité zmínit, že ačkoliv v současné době brání významnému využití zařízení FACTS II. generace jejich cena. V budoucnu se dá očekávat jejich hojnější využití a to z následujících několika důvodů. Postupné osvojování technologií výroby polovodičových součástek významně redukuje jejich náklady. V důsledku velkého objemu mědi a ocele použité pro FACTS I. generace má růst její ceny významný dopad spíše než na II. generaci. Kontroléry II. generace je snazší navrhnout dle dané aplikace, neboť jsou nezávislé na impedanci vedení a na rozdíl od I. generace negenerují rezonance.

2.2.1 Rozdělení užití dle oblastí uplatnění

Distribuce výkonu v místech s hustou zástavbou a zásobování energií v odlehlých zemědělských oblastech

- Zlepšení účinnosti a redukce ztrát jalového výkonu.
- Omezení kolísání napětí a flickrů způsobených fluktuací zátěže.
- Stabilizace koncového napětí.
- Zařízení je vhodné pro soustředěnou kompenzaci harmonických způsobených odběrateli.

Elektrifikovaná trať a hromadná doprava v urbanistických celcích

- Kontrola jalového výkonu a úprava harmonických pro napájecí systémy.
- Zlepšení kvality dodávané energie a redukce ztrát.
- Vyrovnávání zpětné složky proudu způsobené projíždějícím vlakem.

Připojení obnovitelných zdrojů

- Kontrola jalového výkonu v místě připojení větrných farem nebo v místě připojení solárních elektráren. viz příloha A
- Stabilizace napětí sítě, redukce kolísání napětí způsobených při generování energie.
- Udržování konstantní hladiny napětí v místě připojení.

Ocelářský a hutnický průmysl

- Zlepšení účinnosti a redukce jalových ztrát.
- Filtrace harmonických způsobených např. obloukovou pecí.
- Omezení kolísání napětí vlivem zátěže, tím zvýšení efektivity produkce.
- Vyrovnávání zpětné složky napětí.

Těžký průmysl jako např. petrochemický, těžba nerostných surovin a obsluha přístavů

- Stabilizace napětí.
- Soustředěná kompenzace pro rozvodny vysokého nebo nízkého napětí.
- Kompenzace jalového výkonu pro krokové motory.
- Centrální kompenzace pro těžké přístavní jeřáby.

2.2.2 Rozdělení užití dle typu poruchy

Tabulka č. 2 ukazuje rozdělení zařízení dle typu poruchy, kterou napomáhají eliminovat, a poskytuje také možnost porovnání s konvenčním způsobem potlačení poruchy. Rozdělení ukazuje poruchy vnesené do sítě vlivem přepětí, nadměrného oteplení a zkratových proudů.

2.2.3 Rozdělení užití dle požadovaných atributů sítě

Tabulka č. 3 ukazuje rozdělení kontrolérů FACTS v závislosti na jednotlivých dějích v elektrizační soustavě. Obě tabulky vzájemně potvrzují fakt, že pro dosažení zlepšení výše zmíněných vlastností elektrizační soustavy, je nutné nasazení více kontrolérů, jak bylo avizováno v úvodu práce.

Tab. 2 využití FACTS zařízení dle typu poruchy [4][5]

Porucha	Náprava	Současné řešení	FACTS
pokles napětí při vyšším zatížení	zvýšení jalového výkonu	zvýšení buzení generátoru, paralelní kondenzátory, sériové kondenzátory	SVC, STATCOM, TCSC
vysoké napětí při nízkém zatížení	odpojení dodávky jalového výkonu	odpojení úseku vedení a/nebo paralelního kondenzátoru	SVC, TCSC, STATCOM
	absorbování jalového výkonu	vypnutí paralelního kondenzátoru nebo připojení tlumivky	SVC, STATCOM
vysoké napětí vlivem výpadku zátěže	absorbování jalového výkonu	připojení tlumivky	SVC, STATCOM
	požití ochran	užití svodiče přepětí	SVC
nízké napětí vlivem výpadku	dodávka jalového výkonu	připojení tlumivky	SVC, STATCOM
	zabránění přetížení	sériová tlumivka, transformátor s úhlovou regulací	TCPST, TCSC
nízké napětí a přetížení	dodávka jalového výkonu a zamezení přetížení	kombinace dvou anebo více zařízení	TCSC, UPFC, STATCOM, SVC
tepelné přetížení vedení nebo transformátorů	redukce zatížení	připojení dalšího vedení nebo transformátoru	TCSC, UPFC, TCPST
		připojení sériové tlumivky	SVC, TCSC
vypnutí paralelních linek vlivem vysoké teploty vzduchu	omezení přetížení vedení	připojení sériové tlumivky, kondenzátoru	UPFC, TCSC
překročení poruchového proudu	omezení zkratových proudů	omezení zkratových proudů	UPFC, TCSC

výkonového vypínače	výměna výkonového vypínače	výměna výkonového vypínače	----
	změna topologie sítě	rozdělení přípojnic	----

Tab. 3 Užití FACTS dle vlastností elektrizační soustavy (ES) [4][5]

Vlastnosti ES	Zlepšení vlastností	Konvenční řešení	FACTS
dynamický stability sítě	absorpce kinetické energie	brzdňý rezistor, okamžitá regulace turbíny	TCBR
	zvýšení krouticího momentu	rychlé buzení, sériový kondenzátor	UPFC
	regulace toku energie	HVDC	TCPST
tlumení oscilací	tlumení oscilací s nižší frekvencí	stabilizační zpětná vazba- PSS (Power System Stabilizer)	SVC, UPFC, STATCOM
	tlumení 1 Hz oscilací (flikr)	budič, stabilizační zpětná vazba	SVC, STATCOM, TCSC
regulace napětí po přechodovém jevu	dynamická regulace napětí	----	SVC, STATCOM, UPFC
	dynamická regulace toku výkonu	----	SVC, UPFC, TCPST
	dynamická regulace napětí a toku výkonu	----	SVC, UPFC, TCPST
	snížení dopadu události	paralelní linky	SVC, STATCOM, TCSC, UPFC
Napěťová stabilita	kompenzační podpora	paralelní kondenzátor	SVC, STATCOM, UPFC
	regulace napětí v síti	změna odbočky na transformátoru	UPFC, STATCOM
	regulace výroby	rychlé buzení	----

	regulace spotřeby	vypínání a snižování spotřeby zátěží	----
--	-------------------	--------------------------------------	------

2.3 HVDC vs. FACTS

V souvislosti se studií možnosti nasazení FACTS je důležité zmínit podobnost FACTS a HVDC (High Voltage Direct Current). FACTS a HVDC jsou dvě technologie, které ačkoliv se principiálně liší, si však mohou vzájemně konkurovat.

Technologie přenosu stejnosměrným proudem velmi vysokého napětí (HVDC), kterou vyvinula společnost ABB před více než 50 lety, umožňuje přenos elektřiny na velké vzdálenosti s použitím méně kabelů a s mnohem menšími ztrátami než konvenční přenos střídavým napětím. Proud je v převodníkových stanicích transformován a přenášen kabely na místo určení, kde je v další převodníkové stanici převeden zpět na střídavé napětí a putuje do střídavé sítě.

V současné době je ve světě více než 60 aplikací podobného typu. Tyto projekty se v zásadě rozdělují na: podmořský přenos, páteřní linky dlouhých vzdáleností, přenos energie pod povrchem a propojení linek s rozdílnou frekvencí.

2.3.1 Podmořský přenos

Kabely pro takové přenosy mají velkou kapacitu a z toho důvodu tyto aplikace vyžadují velké nabíjecí proudy (jalovou energii). Výsledkem pro délky větší než 30 km je nabíjecí proud dodávaný ze břehu, který téměř plně vyplní přenosovou kapacitu kabelů a vlastní přenášený činný výkon je pak velmi nízký. Nabíjecí proud přenášený kabelem může být redukován jedině připojením paralelní indukčnosti v intervalech 15 až 20 km, což vyžaduje přítomnost vhodného místa, např. ostrovu. Na druhé straně při využití HVDC vzdálenost není technickou bariérou, také cena kabelů pro aplikaci HVDC je nižší než při použití kabelů pro klasický střídavý přenos. Nicméně HVDC vyžaduje na obou stranách měnicí stanice, které

jsou velmi nákladné [8]. V této oblasti může FACTS nalézt své uplatnění taktéž a to zejména typ UPFC, který může poskytnout řešení pro konveční přenos zlepšením kontroly amplitudy napětí na jednom konci (konkrétně na straně zátěže), aby bylo stejné vůči opačnému konci. Tímto způsobem může být velikost nabíjecího proudu snížena na polovinu. Využití FACTS je možné zejména pro podmořské kabely středních vzdáleností. Pro vzdálenosti okolo 100 km je technologie HVDC nepřekonatelnou [12].

2.3.2 Páteřní linky dlouhých vzdáleností

Pokud je páteřní síť dlouhá např. více než 1000 km může být snížení nákladů a ztrát použitím stejnosměrného přenosu dostatečné k zaplacení dvou měnicích stanic. Vzdálenost 1000 km je obecně považována za limitní ke zvážení užití HVDC pro přenos energie. I zde je důležité si uvědomit, že zařízení FACTS mohou poskytnout řešení vedoucí ke zvýšení efektivity přenosu při zachování stejné vzdálenosti linky. Tudíž uplatnění FACTS na trhu přenosu energie je i v oblastech, kde přenos pomocí HVDC nemusí být ekonomicky výhodný [5].

2.3.3 Přenos energie pod povrchem

Díky velké ceně přenosu energie podzemí je průlomová délka pro požití HVDC již 100 km oproti 1000 km u linek vedených na povrchu. Ani v této oblasti užití FACTS technologie nemá významný vliv na délku vedení ve smyslu jeho zkrácení a je možné ji zaměnit za systém HVDC. V současné době nejsou podobná vedení často realizována, protože cena vedení v otevřené krajině je mnohem levnější. Nicméně v budoucnu se však dá počítat s výstavbou podzemních linek [5].

2.3.4 Propojení linek s rozdílnou frekvencí

V souvislosti s touto podkapitolou nemůže být zapomenuto na dobré vlastnosti zařízení při propojování dvou sousedních sítí, což umožňuje užívat benefitů plynoucích z propojení sítí v jeden velký celek (rozvojové státy). V konečném důsledku to znamená optimalizaci generovaného výkonu, možnost připojení zařízení s rozdílným profilem zatížení a sdílení rezervní kapacity zdrojů. Navíc zde z historických důvodů existují dvojí frekvence 50 a 60 Hz. Frekvence 60 Hz je použita ve všech zemích severní a jižní Ameriky, vyjma Argentiny a Paraguaye [5]. Podobným případem může být i Japonsko, které je rozděleno na dvě soustavy s odlišnými frekvencemi. V oblasti propojování dvou sítí s rozdílnou frekvencí je sice HVDC

nenahraditelné, nicméně FACTS zde mohou sloužit jako dobrý nástroj k zlepšení vstupních či výstupních parametrů linek [8].

Tab. 4 Porovnání ceny HVDC a FACTS [5]

Výstupní výkon	HVDC 2 terminály	FACTS
200 MW	40-50 mil.	5-10 mil
500 MW	75-100 mil	10-20 mil
1000 MW	120-170 mil.	20-30 mil
2000 MW	200-300 mil	30-50 mil
uvedené ceny jsou v milionech dolarů		

3 Součástková základna pro FACTS

Diskuse zařízení FACTS provedená v první kapitole vede k poznatku, že napěťový střídač poskytuje základní stavební blok pro STATCOM, SSSC, UPFC a IPFC, proto bude v následující kapitole alespoň obecně představena jeho funkce.

K použití napěťových střídačů pro účely FACTS kontrolérů (v této kapitole je označení FACTS chápáno jako označení pro kontroléry II. generace – dále jen FACTS) je důležité užití vypínatelných součástek. U klasických konvenčních tyristorů lze kontrolovat pouze sepnutí. Vypnutí je závislé na průchodu proudu nulou. Součástky GTO (Gate Turn - Off Thyristor), IGBT (Integrated Gate Bipolar Thyristor), MTO (Mos Turn - Off Thyristor) a IGCT (Integrated Gate - Commutated Thyristor), ETO (Emitter Turn - Off Thyristor) či další prvky umožňující vypnutí přivedením záporného impulsu do hradlového obvodu.

Ačkoliv jsou součástky umožňující vypnutí obecně dražší a mají také vyšší ztráty v porovnání s tyristory bez možnosti řízeného vypnutí, umožňují významně zvýšit celkový přenesený výkon a efektivnější provedení zařízení v porovnání se zařízením užívající klasické tyristory (typu SVC). Zmíněné vlastnosti dovolují použití střídačů s vlastní komutací namísto střídačů s vnější komutací. Ve srovnání se střídači s vlastní komutací, střídače s vnější komutací nemusí obsahovat střídavý zdroj napětí připojený ke střídači, který spotřebovává jalový výkon a navíc zde může také dojít k chybám komutace ve střídačovém režimu. Z uvedeného tedy vyplývá, že pro kontroléry FACTS II. generace jsou vhodnější střídače s vlastní komutací.

Rozeznávány jsou dvě základní kategorie střídačů:

Proudové střídače s vlastní komutací - stejnosměrný proud má vždy jednu polaritu a výměna výkonu probíhá během změny napětí na kapacitě.

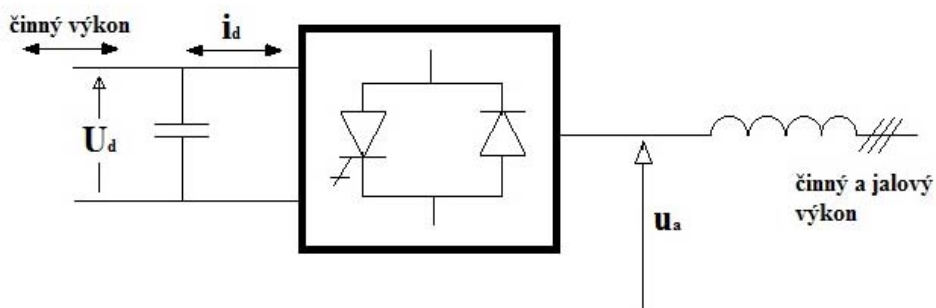
Napět'ové střídače s vlastní komutací - stejnosměrné napětí má vždy jednu polaritu a výměna výkonu probíhá během změny proudu na kapacitě.

Střídače používající tyristory bez možnosti vypnutí mohou být pouze proudové, kdežto střídače používající vypínatelné součástky mohou být obojího typu. Pro účely zařízení FACTS z ekonomických a konstrukčních důvodů jsou upřednostňovány napět'ové střídače namísto proudových [2].

3.1 Chování napět'ového střídače

Je-li dokázáno, že stejnosměrný proud proudí v napět'ovém střídači oběma směry, výkonové prvky střídače musí umožňovat jeho obousměrný průchod, proto je také napětí na stejnosměrné straně střídače neměnné. Z toho plyne, že vypínatelné prvky nemusí umožňovat možnost napětí v závěrném směru, napět'ové střídače tudíž mohou být vybaveny asymetrickými součástkami jako je např. GTO s antiparalelně zapojenou zpětnou diodou. Některé prvky jako například IGBT a IGCT mohou mít zpětnou diodu integrovanou přímo uvnitř modulu. Nicméně pro střídače používané pro vysoké výkony je výhodnější mít tuto zpětnou diodu oddělenou. V praktické aplikaci takový střídač obsahuje několik modulů v sérii pro kontroléry určené k připojení na vysoké napětí.

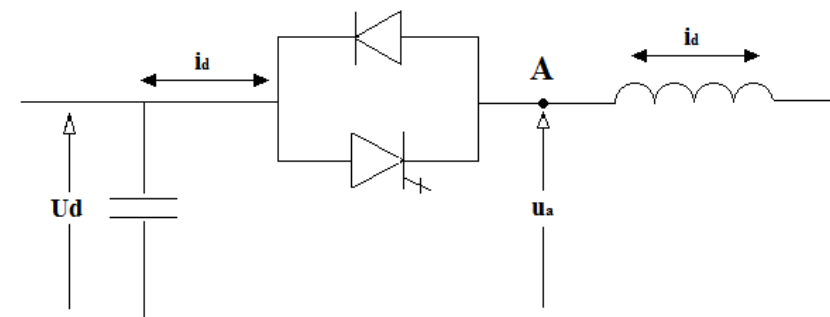
Pro obecné vysvětlení principu slouží obrázek, kde je střídač naznačen jako vypínatelná součástka se zpětnou diodou [5].



Obr. 3.1 Princip funkce napět'ového střídače

Obrázek 3.1 ukazuje základní funkčnost napěťového střídače. Střídač je zde reprezentován jako blok se symbolem ventilu (vypínatelného prvku). Na stejnosměrné straně střídače je unipolární napětí, které je podporováno kapacitou. Kapacita musí být dostatečně velká, aby umožnila potřebné nabití/vybití proudu kapacitoru, který doprovází spínání ventilů střídače bez významné změny napětí na kapacitě. Pro účely této diplomové práce je předpokládáno napětí na kapacitě konstantní. Na obrázku 3.1 je ukázáno, že na stejnosměrné straně obvodu teče stejnosměrný proud oběma směry, což následně umožňuje výměnu výkonu ze střídavé strany na stranu stejnosměrnou a opačně. Střídavá strana je pak připojena k síti skrze tlumivku. Jelikož střídavá strana vykazuje nízkou impedanci, je tlumivka důležitá, aby nedošlo ke skokovému vybití kapacity umístěné na stejnosměrné straně střídače. Obvykle je tato indukčnost reprezentována transformátorem. Na střídavé straně je dále umístěn dolnoproductný filtr (není ukázán na obrázku) k omezení vyšších harmonických vstupujících do sítě.

V zásadě napěťový střídač generuje střídavé napětí ze stejnosměrné strany do střídavé. Prostřednictvím napěťového střídače může být kontrolována velikost, fázový posun a frekvence výstupního napětí.



Obr. 3.2 Činnost operace jednoho ventilu

K bližšímu vysvětlení principu slouží obrázek 3.2 znázorňující operaci jednoho ventilu. Stejnosměrné napětí U_d je předpokládáno konstantní, podporované kapacitorem s orientací kladné polaritě připojené k anodové straně vypínatelné součástky. Pokud je ventil sepnut, kladná svorka stejnosměrné strany je připojena k výstupním svorkám A, tudíž na výstupních svorkách se objeví kladné napětí. Proud protéká z $+U_d$ do bodu A (skrze výkonový prvek). Proud teče ze stejnosměrné strany do střídavé (střídačový chod). Pokud proud teče ze střídavé strany do stejnosměrné, protéká skrze diodu i v případě, že ventil je stále zapnutý, střídač se

nachází ve stavu usměrňovače, přičemž vypínatelná součástka v kombinaci s diodou umí přenést výkon oběma směry s vypínatelným prvkem, který provádí invertující operaci diodou pro usměrňovačový chod [2]. Takové uspořádání střídače a usměrňovače tvoří základní koncept napět'ového měniče např. pro STATCOM, SSSC apod. Zařízení typu FACTS jsou ve skutečnosti sestaveny z několika dvouúrovňových, třífázových napět'ových střídačů nebo několika trojúrovňových, třífázových napět'ových střídačů, aby umožnily potřebné výkonové zatížení. V současnosti se trend ubírá směrem užití individuálního kapacitoru pro každý spínací prvek jednotlivě. To umožňuje spínací frekvence až v řádu desítek kilohertz. Jako jediné zařízení tohoto principu v současnosti využívá poslední generace ABB SVC Light [17].

3.2 Výkonové prvky pro FACTS

Jak již bylo řečeno, vývoj zařízení jde ruku v ruce s vývojem výkonových součástek. Zařízení typu STATCOM, UPFC apod. jsou určena pro přenos desítek až stovek MVA, s nominálním proudem jednotek/desítek kA a napětím desítek kV na zařízení. Jednotlivé výkonové části jsou vytvořeny z několika výkonových součástek zapojených v sérii nebo v paralelu, aby bylo dosaženo optimálního rozložení přenášeného výkonu.

Prvky vhodné pro výstavbu měničů jsou např. MOS Turn-Off Thyristors (MTO), Emitter Turn Off Thyristor (ETO), Integrated Gate Commutated Thyristor (IGCT) a Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT). Bohužel diplomová práce neposkytuje prostor pro popis všech těchto prvků, tudíž je zde věnována pozornost jen některým.

Prvky standardně používané v dnešní době jsou IGBT a IGCT. Oblast použití je odvozena z jejich charakteristických vlastností. Prvky IGCT jsou použity u zařízení pro velmi vysoká napětí a vysoké výkony s dobrou odolností proti nadproudům a přepětí. Jejich nevýhodou je vyšší cena a komplikovanější řídicí jednotka, která je náchylnější k poruchám. Prvky IGBT jsou na trhu déle a jejich vývoj proto došel nejdále, tedy i užití v oblasti FACTS je nejčastější. Jejich aplikace v této oblasti, a to konkrétně pro STATCOM, lze nalézt u zařízení hlavně pro nízká napětí, která jsou nazývaná kontejnerové aplikace⁵ [17].

⁵ Kontejnerové aplikace: STATCOM o velikosti 2300x2800x4600 mm

Nejprve popis prvků, jejichž křemíková tyristorová struktura zobrazená na obrázku 3.3a, se stala technologickým základem několika významných výkonových spínacích polovodičových součástek: „klasických“ tyristorů (nevypínatelné), vypínacích tyristorů (součástky GTO) a později u součástek IGCT, MTO a ETO. Struktura GTO je dnes už technologicky zastaralá a zde slouží pouze k porovnání vlastností s modernějšími prvky IGCT a ETO.

Součástky GTO, IGCT a ETO, seřazené podle období vývoje, se liší v zásadě pouze způsobem, jakým vypínají (přerušují) proud, který jimi protéká. Spínací mechanismus i poměry v zapnutém stavu jsou v základních principech shodné.

3.2.1 GTO vs. IGCT

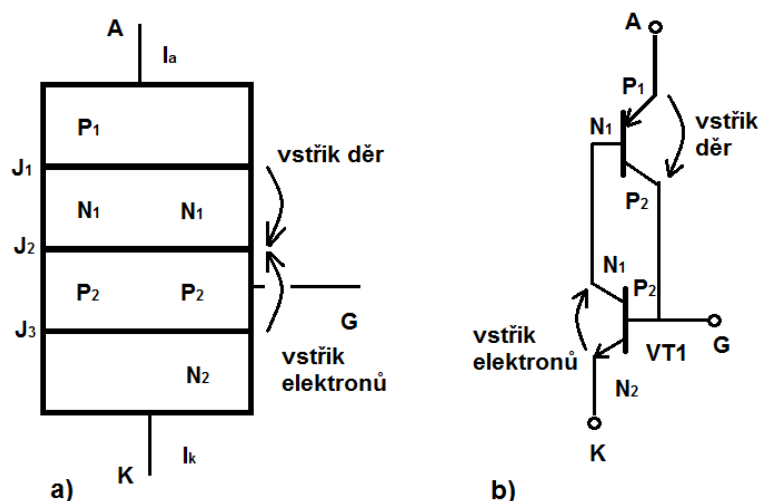
Podobně jako u ostatních součástek, tak i u součástek GTO platí pro sepnutí, že přechod J1 plní funkci závěrného přechodu a přechod J2 funkci blokovacího přechodu. Blokovací schopnost součástky je proto určena průrazným napětím přechodu J2. Tyristorová struktura se zapne řídicím zapínacím proudovým impulsem, který je přivedený do báze náhradního tranzistoru VT1, což zobrazuje obrázek 3.3b. V důsledku zapnutí VT1 se zapne i druhý tranzistor VT2, a tím se mezi nimi uzavře kladná zpětná vazba. Pro tyristorovou strukturu to znamená přechod do stabilního zapnutého stavu. Z hlediska praxe je důležité, že tyristorová struktura v zapnutém stavu vykazuje propustný úbytek odpovídající pouze jednomu přechodu PN. Podmínkou pro vypnutí součástky GTO řídicím elektrickým impulsem je rozčlenění její katody (vrstvy N_2) do velkého množství paralelně zapojených katodových (emitorových) elementů, z nichž každý je obklopen řídicí elektrodou, tj. vrstvou P_2 [15].

Jelikož se součástky liší hlavně v principu vypnutí, není nadále důležité zacházet do detailů způsobu sepnutí, ale spíše se věnovat samotnému vypnutí.

U součástky GTO je vypnutí dosaženo zrušením kladné zpětné vazby mezi VT1 a VT2. To je způsobeno přivedením záporného napětí na řídicí elektrodu G vzhledem ke katodě K. V důsledku toho jsou díry dosud přítomné ve vrstvě P_2 i díry nově přicházející do P_2 z anody odvedeny proudem i_{RG} do elektrody G. Emitorový přechod J3 přechází do vypnutého stavu, a tím vstřík elektronů zaniká. Katodový proud I_K k nule však neklesá skokově, nýbrž postupně během několika mikrosekund. To je způsobeno tím, že katodové elementy, jednotlivé části přechodu P_2N_2 , nevypínají přesně současně, ale postupně, což má nepříznivé důsledky. Každý katodový element totiž vypíná postupně od svého obvodu (styku s P_2) a v důsledku toho je

katodový proud I_K (neboli anodový proud na dráze anoda – katoda) zahušťován do stále užších kanálů či proudových vláken - jev známý jako filamentace. Uzavření proudových vláken znamená zánik vstřiku elektronů $a_n I_K$, tedy proudu I_K . Současně s tím se na přechodu J2 objevuje vzrůstající blokovací napětí součástky U_D . Uvedené zužování průřezu, kterým prochází proud I_K , má za následek nárůst proudové hustoty v proudových vláknech, a to vede k jejich lokálnímu přehřátí. Riziko přehřátí lze odstranit připojením tzv. odlehčovacího obvodu pro vypínání paralelně k součástce. Jedná se v podstatě o nenabitý kondenzátor, který odvede část vypínaného proudu mimo součástku, resp. během vypínání zmenší nárůst blokovacího napětí na součástce, tj. parametr dU_D/dt . Navíc po zániku katodového proudu (I_K) je součástka GTO ohrožena ještě jedním nebezpečím: z anody A protéká do řídicí elektrody G a odtud do katody K proud zprostředkovaný volnými nosiči, které difundovaly z vrstvy N_1 do ochuzené oblasti přechodu J2. Je znám jako proud dozívání i_{tail} více známý jako lavinový průraz [11]. Řešení uvedeného rizika je založeno na technologických úpravách zaměřených na zmenšení počtu volných elektronů ve vrstvě N_1 , resp. na jejich urychleném odvedení do anody A. [5][10]

Tyto problémy součástky GTO vedly k vývoji IGCT, což je v podstatě velmi „tvrdě komutovaný“ neboli extrémně rychle vypínaný, vypínací tyristor GTO, podobně jako ETO, kterému se věnuje následující podkapitola [5]. Je zde třeba uvést, že součástka IGCT je složena ze dvou základních částí: z tyristorové struktury GCT, (ta je umístěna v pastilkovém pouzdrú obdobně jako součástka GTO) a z řídicího obvodu, ke kterému je pastilka GCT integrována. Důvodem je fakt, že pro řádnou funkci GCT musí být strmost nárůstu řídicího vypínacího proudu i_{RG} extrémně vysoká, a proto vlastní (parazitní) indukčnost zdroje řídicích vypínacích impulsů, včetně přívodů, musí být snížena na proveditelné minimum. Tyristorová struktura polovodičových součástek GTO a GCT zůstává v principu stejná, takže lze základní vlastnosti obou součástek vystihnout stejným dvoutranzistorovým náhradním zapojením podle obrázku 3.3 b.



Obr. 3.3 a) principiální uspořádání tyristorové struktury, Obr. 3.3 b) dvoutranzistorové náhradní zapojení součástek GTO a IGCT

U součástky IGCT se však vypínací řídicí proud i_{RG} zvětšuje tak strmě, že dříve než se výrazně změní rozložení nábojů na jednotlivých přechodech tyristorové struktury, je celý anodový proud I_A skokově převeden do řídicí elektrody G, je „komutován řídicí elektrodou“. Tím je spodní tranzistor VT1 ($N_1P_2N_2$) skokově vyřazen a vypínání součástky GCT je převedeno na vypnutí horního tranzistoru VT2 ($P_1N_1P_2$), a to je právě principiální rozdíl oproti způsobu, kterým vypíná součástka GTO [11].

Extrémní strmota nárůstu řídicího vypínacího proudu di_{RG}/dt způsobí, že vypínaná tyristorová struktura GCT je nejdříve převedena na tranzistorovou strukturu ($P_1N_1P_2$) a teprve potom následuje vypnutí tohoto tranzistoru. Struktura GCT má oproti struktuře GTO při vypínání tyto důležité přednosti: Za prvé je vyloučen problém se zhušťováním proudových drah do stále užšího kanálu (filamentace) a za druhé není omezena strmota nárůstu blokovacího napětí (parametr dU_D/dt). Z toho důvodu zde není zapotřebí odlehčovací sítě, čímž jsou zmenšeny vypínací ztráty. Navíc je významně zkrácena vypínací doba. To znamená, že součástka IGCT v sobě slučuje hlavní výhody tyristoru (malý propustný úbytek, malé ztráty propustným proudem) s výhodami tranzistoru, resp. součástky IGBT (výhodný způsob vypínání bez odlehčovací sítě) [11].

3.2.2 IGCT vs. IGBT pro použití v měničích pro FACTS

Pro úplnost kapitoly je nutné uvést i prvek IGBT a jeho porovnání s IGCT pro stavbu moderních polovodičových měničů. K dispozici jsou v současné době obě součástky. Prvky IGBT jsou dnes používané zcela běžně, součástky IGCT se však v poslední době také dostávají ke slovu. Pro účely porovnání diplomové práce je uvažován napěťový střídač se spínacími frekvencemi součástek okolo 1 kHz.

Nespornou výhodou IGBT součástek je jejich inherentní vlastnost, schopnost součástek omezovat zvětšující se poruchový proud (jako je tomu u bipolárních tranzistorů), kdy pracovní bod opustí nasycenou oblast, čímž prudce vzroste napěťový úbytek na součástce.

Tyristorové struktury (ani GCT) tuto výhodnou inherentní vlastnost, spočívající ve vytváření časové rezervy pro příchod vypínacího impulsu, bohužel nemají.

Nicméně pro stavbu střídače vhodného pro FACTS vycházejí výhodněji součástky IGCT. Důvody jsou následující:

1. Součástky IGCT jsou konstrukčně výrazně jednodušší, robustnější, a proto zřejmě i spolehlivější. Přestože v poslední době bylo u IGBT dosaženo významného pokroku tím, že pájené spoje byly nahrazeny přítlakem, zůstává trvalou nevýhodou nutnost sestavovat výkonové součástky IGBT paralelním řazením mnoha čipů.
2. Významnou předností součástek IGCT – jsou jejich vysoké hodnoty parametru I^2t a neopakovatelného špičkového propustného proudu I_{TSM} . Součástky IGBT z principu své tranzistorové struktury nemohou takové parametry vykazovat. Tato skutečnost umožňuje chránit celý střídač se součástkami IGCT běžnou rychlou polovodičovou pojistkou (F).

Pro úplnost je ještě nutné dodat, že jak součástky IGCT, tak i součástky IGBT mohou pracovat bez odlehčovacích obvodů pro vypínání. Jsou-li však tyto obvody použity, zvýší se tím vypínací schopnost obou typů součástek.

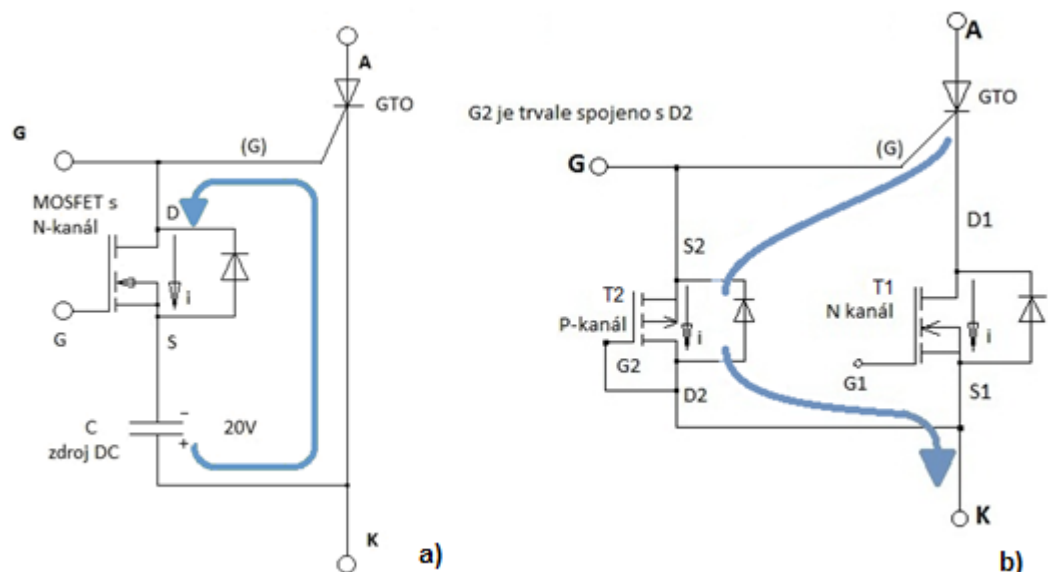
3.2.3 ETO vs. GTO a IGCT

Součástka typu ETO (objevená na Virginia Power Electronics Center) společně s konvenčními prvky používanými pro zařízení STATCOM (FACTS), jako jsou IGBT a IGCT, nabízí zajímavé řešení pro budoucí měniče použitelné pro tento typ zařízení. Není tajemství, že firmy zabývající se výstavbou FACTS zařízení se dnes zabývají její implementací. Stejně jako IGCT, MTO i ETO je založena na prvku GTO a jde tedy o výkonovou vypínatelnou součástku. V současnosti je možné se při vyhledávání specifikací v katalogových listech dočíst mezní hodnoty amplitudy opakovatelného blokovacího napětí $U = 4500 \text{ V}$ (v katalogovém listu U_{DRM}) a opakovatelně vypínatelného proudu $I = 4000 \text{ A}$ (v katalogovém listu I_{TGQM}) [5].

Jak již bylo řečeno, mechanismus spínání je podobný při použití součástek GTO a IGCT, a tak i v této podkapitole je pozornost zaměřena na mechanismus vypínání. Významného vylepšení vypínacího procesu u součástky GTO lze dosáhnout tzv. tvrdou

komutací (viz. IGCT), při níž je celý anodový proud I_A převeden (komutován) do řídicí elektrody G za dobu kratší než $1 \mu\text{s}$. Potom už v součástkách IGCT a ETO neprochází anodový proud I_A přes emitorový přechod, ale odchází z elektrody (G) jako řídicí vypínací proud i_{RG} viz. obrázek 3.4 b [10].

U IGCT a ETO jde o tzv. vypínání s jednotkovým proudovým zesílením, které je určeno podílem proudů $I_A/I_{RG} = 1$. Jak je možné vyčíst z dostupné literatury⁶ a katalogů, u klasicky vypínaných součástek GTO, tento poměr dosahuje čísla 3 až 5. U součástek IGCT a ETO způsobí velmi rychle narůstající řídicí vypínací proud i_{RG} skokové vypnutí tranzistoru T1. Jak je možné vidět na obrázku 3.4a, u tyristoru IGCT je zdrojem řídicího vypínacího proudu i_{RG} kondenzátor C. K průtoku proudu i_{RG} , a tím k vypnutí struktury GTO, dochází v důsledku zapnutí součástky MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor, tranzistor řízený polem s hradlem izolovaným oxidem) s N-kanálem. Oproti tomu u součástky ETO je proud I_A převeden do řídicí elektrody G jako proud i_{RG} působením vlastní indukčnosti silových přívodů v okamžiku vypnutí spínače T1[11].



Obr. 3.4 a) Znáznorňuje zapojení tranzistoru IGCT - modře je znázorněn řídicí vypínací proud i_{RG} při jejich vypínání tvrdou komutací Obr. 3.4 b) Znáznorňuje tranzistor ETO - modře je znázorněn řídicí vypínací proud i_{RG} při jejich vypínání tvrdou komutací [11]

Z požadavku, aby u součástky IGCT způsobil kondenzátor C dostatečně rychlý nárůst i_{RG} , vyplývá nutnost velmi nízké indukčnosti smyčky (mezní hranice je 5nH), v níž se proud

⁶ Zdroj: katalog Dynex viz. seznam literatury bod 15

i_{RG} uzavírá. Naproti tomu u součástky ETO je požadavek na indukčnost smyčky méně přísný. Indukčnost dráhy, kterou proud i_{RG} prochází, nesmí překročit hodnotu 10 nH.

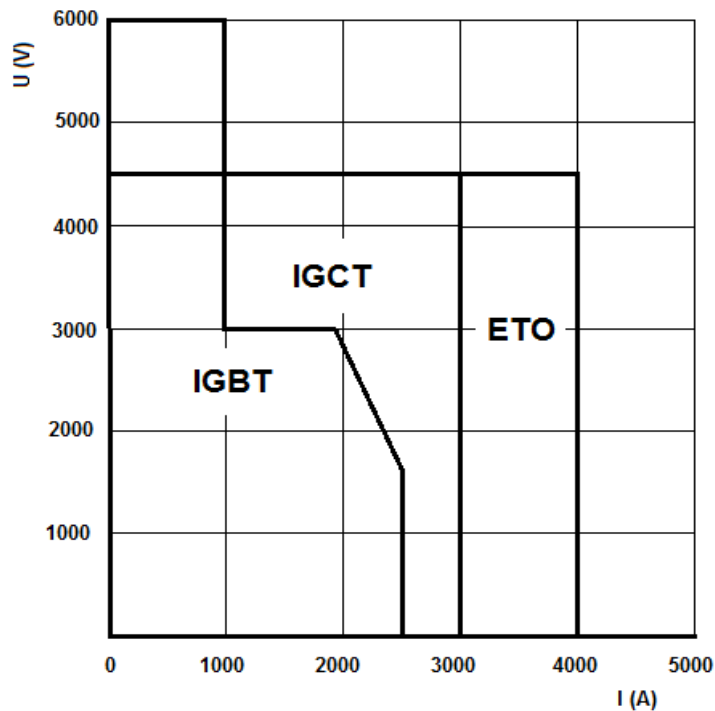
U součástky ETO, jsou spínače T1 (MOSFET s N-kanálem) a T2 (MOSFET s P-kanálem) komplementární; v zapnutém stavu součástky ETO je T1 zapnut a T2 vypnut (pro vypnuté ETO je stav přesně opačný). Vypnutím spínače T1, a tím pádem celé součástky ETO, lze docílit odejmutím kladného řídicího napětí z elektrody G1. Při vypínání součástky ETO, resp. v jejím vypnutém stavu, je součástka T2 zapnuta a napětí na ní je proto omezeno hodnotou jen o málo vyšší, než je její prahové napětí. Transistor T1 je připojen k T2 přes vrstvy P2 a N2 tyristorové struktury v GTO, a proto napětí přiváděné z T2 na T1 nemůže být větší než napětí na T2. Je zřejmé, že napětí na součástkách MOSFET T1, T2 je velmi malé; napětěové zatížení součástky ETO úplně přebírá tyristorová struktura GTO. Součástky MOSFET T1 a T2 jsou ve skutečnosti paralelně řazené skupiny součástek s minimálním propustným úbytkem napětí 0,2 V. Při vypínání tvrdou komutací nedochází uvnitř tyristorové struktury k soustředování proudu do proudových kanálů. Křemíková destička je rovnoměrně zatěžována, takže maximální přípustný proud celé součástky vzrůstá, aniž by při jejím vypínání byly některé oblasti průřezu tepelně přetěžovány. To znamená, že tvrdá komutace zvětšuje plochu tzv. bezpečné pracovní oblasti při vypínání [11].

Výsledkem výše popsaného je, že při použití tvrdé komutace u vypínání ETO, se zkracuje doba zpoždění, doba poklesu proudu i doba doznívání proudu, a tím vzrůstá „rychlost“ součástky, což znamená, že může pracovat s vyšší spínací frekvencí. Rovněž vzrůstá její odolnost k parametru du/dt . Konečným důsledkem je možnost pracovat bez potřeby odlehčovacích obvodů.

Při porovnání součástky ETO a IGCT zjistíme významnou přednost ve schopnosti omezit poruchový proud procházející součástkou. Vznikající teplo omezuje tuto zkratuvzdornost na dobu řádově desítek mikrosekund, což je však postačující pro včasný zásah nadproudových ochran. Pro úplnost je nutné říci, že tuto výhodu doposud měly jen součástky IGBT. Provozní spínací frekvence pro součástky ETO je potom nad 1kHz, což odpovídá požadované frekvenci pro zařízení STATCOM, kde kompenzujeme v řádech ms.

Z výše popsaného také plyne, že polovodičová spínací součástka ETO je vedle IGCT dalším významným krokem ve využití tyristorové struktury pro spínání velkých proudů. Její parametry jsou vhodné pro stavbu měničů o výkonu řádu desítek megawattů, výkonů běžně se

objevujících u zařízení FACTS [5]. Součástka ETO je hybridní součástka, která v sobě slučuje výhody tyristorové struktury (vysoké proudové a napěťové parametry) s výhodným řízením unipolárních tranzistorů typu MOSFET. V současnosti se vývoj zaměřuje na vybavení součástek ETO integrovanými inteligentními funkcemi, jako jsou měření proudu, napětí a teploty, schopnost omezovat poruchový proud atd. - tedy úpravy, které dosud přicházely v úvahu u součástek IGBT, nikoliv však u tyristorů. Důvodem bylo, že součástka IGBT je založena na bázi tranzistorů takže má horší proudové i napěťové parametry, větší ztráty, avšak podstatně vyšší spínací frekvence než tyristorové součástky [10]. Při porovnání technických údajů a ceny, vztažené na jednotku výkonu, součástek IGBT, IGCT a ETO se ukazuje, že s výjimkou vysokých spínacích frekvencí součástek IGBT nejsou hodnoty součástky ETO horší, ale ve většině ukazatelů naopak příznivější než u obou uvedených součástek. Významná je rovněž skutečnost, že se součástka ETO na rozdíl od IGBT a IGCT nachází ještě před vrcholem svého technického provedení, tudíž je možné očekávat další zlepšení vlastností.

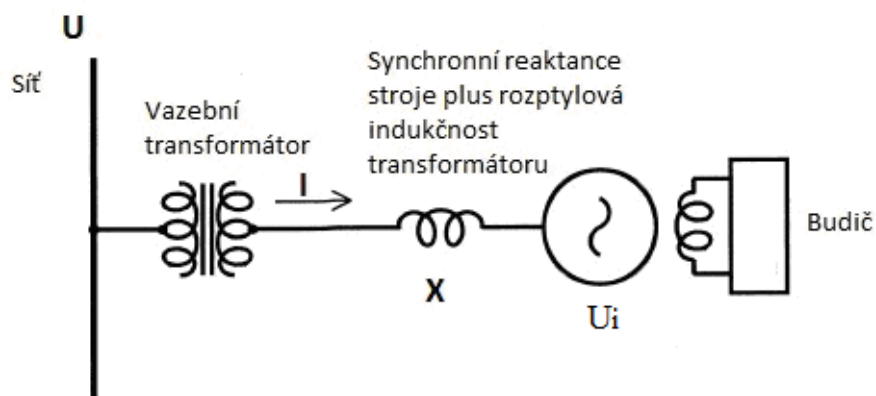


Obr. 3.5 Oblast využití výkonových součástek

4 STATCOM

4.1 Princip kontroléru

Základní princip výroby jalové energie pomocí napěťových střídačů je podobný konvenčnímu rotačnímu synchronnímu stroji. Základní schéma je možné vidět pod odstavcem na obrázku 4.1. Pro čistě jalový tok energie je zde uveden synchronní stroj. Jalový proud I_j produkovaný synchronním kompenzátorem je determinován velikostí napětí sítě U , vnitřním napětím U_i a celkovou obvodovou reaktancí, která se skládá z reaktance stroje, rozptylové reaktance transformátoru a zkratové reaktance sítě X [13].



Obr. 4.1. Generování jalové energie pomocí rotačního stroje [5]

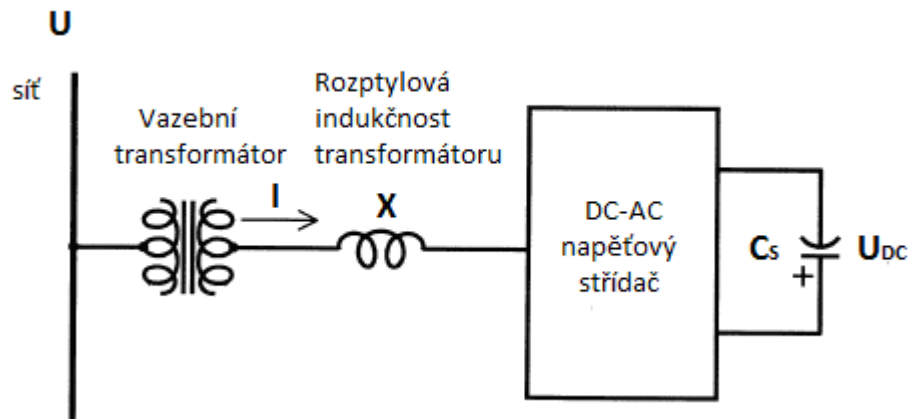
$$I = \frac{U - U_i}{X} \quad (4.2)$$

Související sdílený jalový výkon Q lze tedy vyjádřit pomocí vzorce 4.3

$$Q = \frac{1 - \frac{U_i}{U}}{X} U^2 \quad (4.3)$$

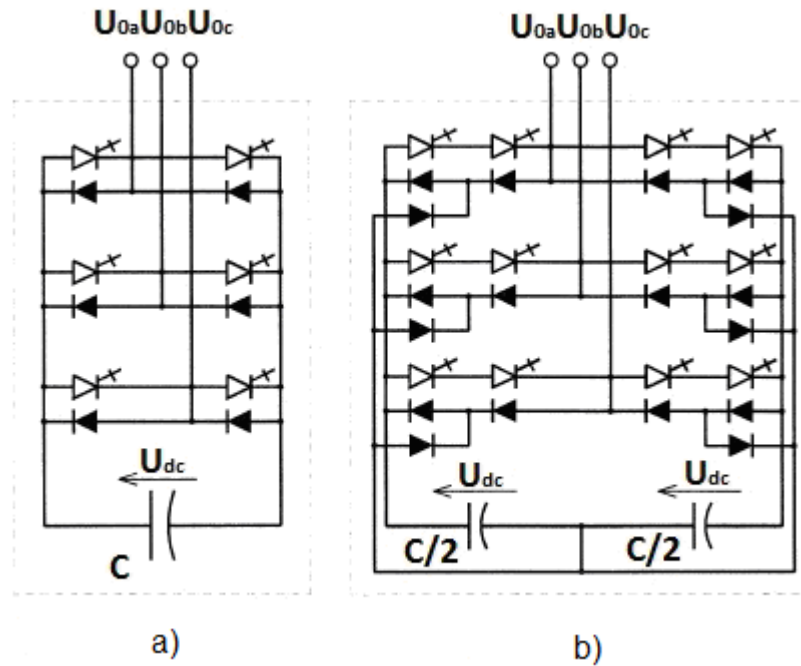
Kontrolou buzení stroje a tím i amplitudy indukovaného napětí U_i vztaženého k napětí sítě U , lze kontrolovat jalový výkon. Začneme-li po přifázování stroje na síť snižovat budící proud, sníží se tím i vnitřní indukované napětí U_i a výsledný rozdíl napětí způsobí průchod proudem. Vzorec 4.2 pak udává vztah mezi napětím a reaktancí stroje, což vyplývá z fázorového diagramu pro synchronní stroj. Fázový posun U a I je 90° , protože se nepřenáší činný výkon tím pádem je činná složka nulová. Stroj se chová vůči síti jako čistá indukčnost, odebírá ze sítě jalový výkon na dobuzení. Při přebuzení stroje vyvolá změna U_i změnu proud satoru, který bude opět lineárně záviset na I_b , fázový posun bude opět 90° , ale stroj se bude chovat vzhledem k síti jako kapacita a bude do sítě dodávat jalový výkon.

Základní myšlenkou STATCOM je zapojení s napěťovým střídačem pro generování jalového výkonu, které je schématicky vyobrazeno na obrázku 4.4 ve formě blokového diagramu. Na stejnosměrném vstupu napěťového střídače je umístěna kapacita C_s , která je udržována na hladině potřebného napětí (např. vyššího než je napětí sítě). Střídač produkuje třífázové výstupní napětí s frekvencí, která odpovídá frekvenci sítě. Každá fáze je spojena se sítí skrze relativně malou vazební reaktanci, která je v praxi tvořena rozptylovou reaktancí vazebního transformátoru. K výměně jalové energie dochází mezi sítí a střídačem, principiálně to odpovídá provozu výše zmiňovaného synchronního generátoru. To znamená, že pokud je amplituda výstupního napětí zvýšena nad velikost napětí sítě, proud teče skrze vazební reaktanci ze střídače do sítě a střídač generuje jalový (kapacitní) výkon do sítě. Jestliže je amplituda výstupního napětí snížena pod úroveň sítě, potom jalový proud teče ze sítě do střídače. Střídač absorbuje jalový (induktivní) výkon. Pokud je amplituda výstupního napětí rovna napětí sítě, potom tekoucí jalový výkon je roven nule [5].



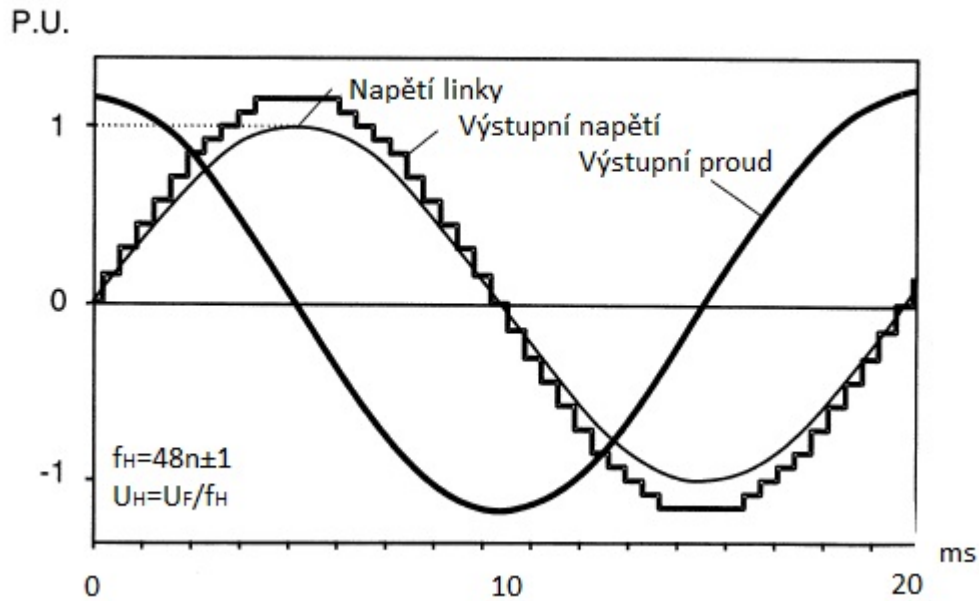
Obr. 4.4. Blokové schéma zařízení STATCOM [5]

Třífázové výstupní napětí je generováno pomocí kapacity umístěné na stejnosměrné straně napěťového střídače s vlastní komutací. Všechny doposud užívané střídače zapojené do přenosových aplikací jsou složeny z několika elementárních střídačů v jednofázovém můstkovém zapojení nebo jsou zapojeny do třífázového, dvouúrovňového můstku, který je složen ze šesti vypínatelných prvků. Zapojení může být také tvořeno třífázovým, tříúrovňovým střídačem v můstkovém zapojení, který je složený z dvanácti vypínatelných prvků. Základní zapojení jsou znázorněna na obrázku 4.5 pod odstavcem. Spínací součástky v elementárních střídačích jsou obvykle tvořeny z několika (tři až deseti) sériově zapojených ventilů (z GTO nebo jiných prvků umožňujících vypnutí) se zpětnou diodou. Jako celek tvoří diody tzv. zpětný usměrňovač, který umožňuje usměrňovací chod a odběr jalového výkonu zátěží. Každý jednotlivý střídač produkuje buď obdélníkovou, kvazi obdélníkovou nebo pulsně-modulovanou křivku napětí na výstupu. Tyto křivky jsou od sebe vzájemně posunuty (nebo se navzájem doplňují) a sloučeny, obvykle s použitím správného magnetického prvku tak, aby vytvořily požadované výstupní napětí střídače. Křivka je vytvořena dostatečně přesně, aby aproximovala sinusový průběh napětí bez použití (nebo jen s malým počtem) dodatečných filtrů. Příkladem může být vytvoření napětí kombinováním výstupních napětí z osmi dvouúrovňových nebo ze čtyř trojúrovňových napěťových střídačů viz. obrázek 4.6. Výsledkem je průběh s nízkým obsahem vyšších harmonických napětí.



Obr. 4.5. Základní schéma střídačů použitých pro generování jalového výkonu a) třífázový, dvojúrovňový můstek b) třífázový, trojúrovňový můstek [5]

Základní popis činnosti napěťového střídače užitého pro STATCOM může být vysvětlen bez uvážení detailní funkce polovodičových součástek střídače a pouze s uvážením základních fyzikálních pravidel mezi vstupním a výstupním výkonem. Klíč k vysvětlení spočívá ve fyzikálním faktu, že jako u všech výkonových střídačů je okamžitý síťový výkon na výstupních svorkách vždy roven síťovému výkonu na vstupních stejnosměrných svorkách (při zanedbání ztrát v polovodičových součástkách). Vzhledem k faktu, že střídač poskytuje pouze jalový výkon (napětí jsou kontrolována, aby byla ve fázi s napětími sítě). Činný výkon produkovaný stejnosměrným zdrojem (nabitou kapacitou) musí být nulový, jelikož okamžitý výkon na střídavé straně je také nulový. Jalový výkon o nulové frekvenci (na kapacitoru) je podle definice také nulový, tudíž stejnosměrný kapacitor nehraje žádnou roli při generaci jalové energie. Jinými slovy, střídač propojuje tři střídavé svorky takovým způsobem, že jalový výstupní proud může téci volně mezi nimi. Z pohledu sítě by se mohlo zdát, že střídač určuje vyrovnávací proud mezi fázemi s nulovým okamžitým výkonem.



Obr 4.6 Výstupního napětí a proudu paralelního zapojení čtyř trojúrovňových střídačů [5]

Potřeba stejnosměrného kapacitoru je teoreticky zásluhou již zmíněnou rovností okamžitého výkonu na vstupu a výstupu. Výstupní napětí ze stejnosměrné strany do střídavé strany střídače není ideální sinusová křivka. Z tohoto důvodu má okamžitý výstupní výkon sítě (VA) kolísavou složku. Dokonce i v případě, že výstupní proudy střídače byly čistě sinusové. Aby nebyla porušena rovnost okamžitého vstupního a výstupního výkonu, musí být střídač schopen vykreslit i kolísající proud ze stejnosměrné strany střídače.

Jak je vysvětleno výše, nemohl by STATCOM s užitím jednoho dvouúrovňového nebo tříúrovňového střídače dosáhnout požadovaného výstupního napětí nebo vstupního proudu do kapacitoru. Je tedy nutné vytvořit kombinaci několika základních střídačů v multi-fázové struktuře, s použitím vhodné PWM modulace, pro potlačení zkreslení výstupního napětí a zvlnění proudu kapacitoru. Tím to způsobem může být dosaženo redukce zkreslení a zvlnění proudu na únosnou hodnotu. STATCOM pracující s dokonalým napěťovým střídačem může teoreticky produkovat i dokonalé sinusové napětí a vykreslovat sinusový jalový proud a nulový vstupní proud pro kapacitu. Ve skutečnosti však zásluhou systémové nerovnováhy a dalších nedokonalostí, které mohou také zvýšit kolísání střídavého výkonu, společně s ekonomickými omezeními, není možné dosáhnout ideálních podmínek na výstupní straně zařízení. Naštěstí je možné aproximovat sinusové napětí dostatečně uspokojivě při použití správné struktury střídače a vhodného výstupního filtru. Z toho důvodu je velikost kapacity v normálních přenosových aplikacích relativně malá.

Ve skutečnosti nejsou spínací prvky v reálných střídačích bezztrátové a v důsledku toho je energie uskladněná v kapacitoru spotřebována vnitřními ztrátami střídače. Tyto ztráty mohou být hrazeny například ze sítě, a to přinucením výstupního napětí střídače, aby se zpozdňovalo za napětím systému o malý úhel. V tomto případě střídač absorbuje malé množství činného výkonu ze sítě k pokrytí vlastních ztrát a udržení napětí na kapacitoru na požadované úrovni. Během stavu, kdy střídač pracuje v plně kapacitním nebo induktivním režimu, mohou být tyto ztráty pokrývány z obou stran a to operací střídače v lehce střídavém režimu či v lehce usměrňovacím režimu. Mechanismus nastavení fázového úhlu může být také použit ke kontrole generování nebo absorbování jalového výkonu zvýšením nebo snížením napětí na kapacitoru a tím i amplitudy výstupního napětí střídače. Rozdíl amplitud mezi výstupním napětím střídače a sítě udává velikost a směr toku proudu, a tudíž produkci či absorpci jalové energie. Při uvažování ztrát je také důležité říci, že kapacitor má v systému nepostradatelnou funkci. To je důležité pro stanovení potřebné činné energie mezi vstupem a výstupem během výměny jalové energie. Ztráty na kapacitoru vznikají v důsledku svodových proudů, degradací dielektrika vlivem částečných výbojů atd. [5]

4.1.1 Účinnost

U každého zařízení je snaha vyjádřit jeho účinnost. Obecně je však účinnost zařízení vyjádřena jen tam, kde se přeměňuje energie z jedné formy na jinou. U STATCOM je všechna energie spotřebována na ztráty, a proto neleze hovořit o účinnosti v běžném smyslu. Proto je u takového zařízení označována jako poměr užitečného zdánlivého výkonu k celkovému výkonu.

$$\eta = \frac{S_{\text{STATCOM}} - P_{\text{STATCOM}}}{S_{\text{STATCOM}}} \cdot 100 [\%] \quad 4.7$$

STATCOM dosahuje účinnosti v rozmezí 93 až 97%, v závislosti na celkovém výkonu, použitých prvcích a spínací frekvenci polovodičových spínačů [1].

4.1.2 STATCOM s externím zdrojem energie

STATCOM je také možné vybavit externím zdrojem energie např. baterii respektive sadou baterií – zařízení v současné době realizuje společnost ABB (cena podobného zařízení

se pak pohybuje v jednotkách miliard korun)⁷ nebo s jiným zařízením pro uskladnění energie s enormní kapacitou (např. velký dc kapacitor nebo supravodivý magnet). V tomto případě střídač kontroluje oboje, jak jalovou, tak činnou složku výkonu. Generování činného i jalového výkonu je významná výhoda při potlačování výkonových oscilací, pokrývání výkonových špiček a poskytování výkonu pro nepřerušovaný provoz kritických zátěží.

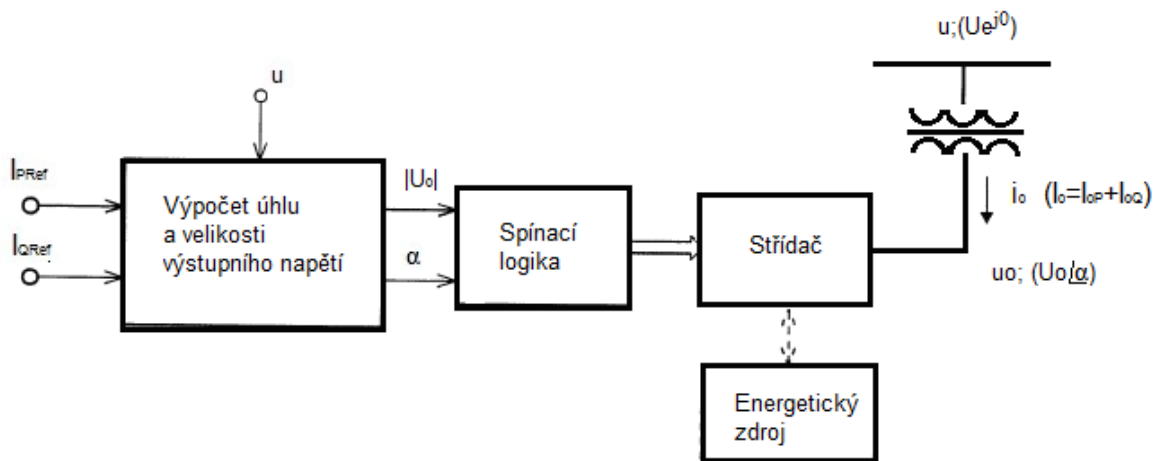
4.2 Koncepce řízení kontroléru

Jak již bylo řečeno, statické var generátory (SVG viz definice IEEE první kapitola) obsahují velké množství hradlem řízených výkonových součástek (např. IGCT tyristory). Řídící signály pro tyto součástky jsou generovány tzv. vnitřním okruhem, který je součástí vlastního var generátoru. Jako odpověď na požadovaný jalový a/nebo činný výkon, který je udáván referenčním signálem. Referenční signály jsou poskytovány vnější nebo systémovou kontrolou, která určí operační funkci STATCOM.

Vnitřní kontrola je nedílnou součástí střídače. Její hlavní funkcí je obsluhovat výkonové součástky tak, aby generovaly základní harmonickou napětí s požadovanou amplitudou a fázovým posunem vůči síti. V této úrovni může být zařízení viděno jako sinusový zdroj napětí, jehož amplituda a fázový úhel jsou řízeny prostřednictvím vnější kontroly skrze příslušný referenční signál. Vnitřní regulace mimo řízení spínání součástek také zajišťuje např. udržení součástek uvnitř jejich napěťových a proudových limit, aby nedošlo k jejich poškození.

Principiální znázornění vnitřní regulace je naznačeno na obrázku 4.8. Jak je vidět, regulace dosahuje vhodné spínací frekvence pomocí výpočtu velikosti a fázového úhlu požadovaného výstupního napětí, které je počítáno z veličin I_{QRef} (případně I_{PRef}), zajištěného vnější regulací. Výstupní napětí je vytvořeno vhodným řídicím algoritmem, který určuje dobu zapnutí a vypnutí každého ventilu měniče. Mezi těmito časovými průběhy je specifikován fázový poměr, který je určen počtem impulsů měniče. Tato metoda je používána ke konstrukci křivky výstupního napětí pod požadovaným úhlem mezi všemi třemi výstupy (obvykle 120 °).

⁷ Zdroj: obchodní oddělení společnosti ABB



Obr. 4.8 Hlavní funkce vnitřní kontroly měniče [5][9]

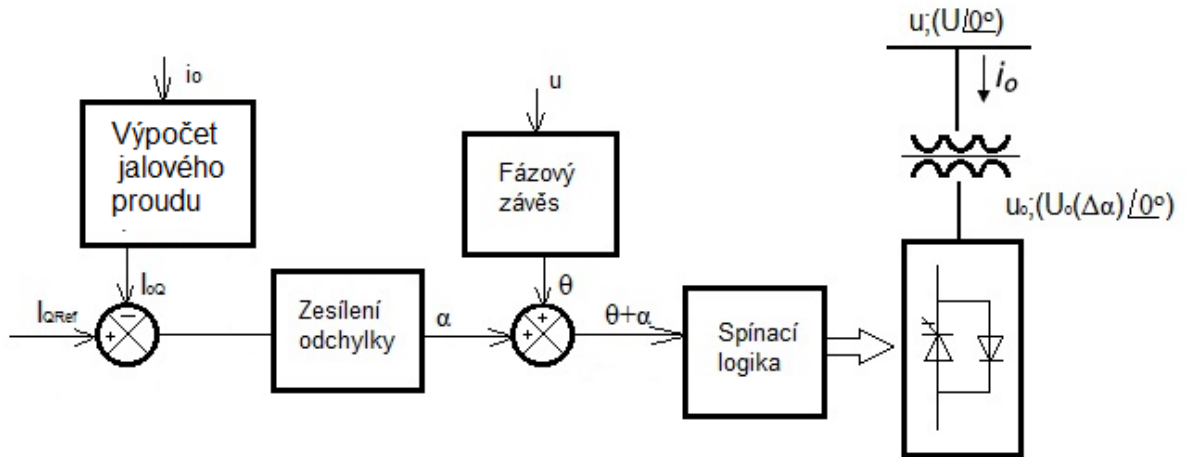
Velikost a úhel výstupního napětí jsou vnitřními parametry, které determinují činný a jalový proud. Pokud je střídač určen pouze pro výměnu jalového výkonu, tedy striktně operuje jako statický var generátor, je referenčním vstupem pro vnitřní regulaci požadovaný jalový proud. Z této vnitřní regulace pak STATCOM odvozuje potřebnou velikost a úhel výstupního napětí, které je přímo úměrné napětí na kapacitoru. Díky této úměře může být výstupní jalový proud kontrolován nepřímou, prostřednictvím kontroly napětí na kapacitoru, který je naopak kontrolován úhlem výstupního napětí.

Změna napětí na výstupu může být řízena i druhým způsobem, a to pomocí vnitřní regulace napětí (např. PWM). V tomto případě je napětí na kapacitoru drženo na konstantní úrovni pomocí vnitřní kontroly úhlu střídače čímž dochází ke změně vnitřního napětí. Zde je důležité upozornit, že pokud je zařízení vybaveno kromě kapacity také zdrojem činného výkonu, musí pak vnitřní regulace měřit dodatečnou úroveň činného proudu, která kontroluje úhel výstupního napětí tak, aby vznikla reálná složka proudu na výstupu [12].

Na obrázku 4.9 je pak vidět zjednodušený diagram vnitřní kontroly pro čistě jalovou kompenzaci, který odpovídá nepřímému řízení měniče. Vstupy do vnitřní kontroly jsou: napětí na sběrnici u , výstupní proud střídače i_o a referenční jalový proud I_{QRef} . Synchronizace se vstupním napětím na sběrnici je zabezpečena pomocí fázového závěsu, který dává základní synchronizační signál o úhlu θ . Výstupní proud i_o je rozložen na činnou a jalovou složku proudu, kde jalová složka proudu je porovnávána s referenčním jalovým proudem I_{QRef} . Získaná odchylka po vhodném zesílení udává úhel α , který definuje nutný fázový posun mezi výstupním napětím střídače a střídavým napětím sítě, potřebného pro nabití (vybití)

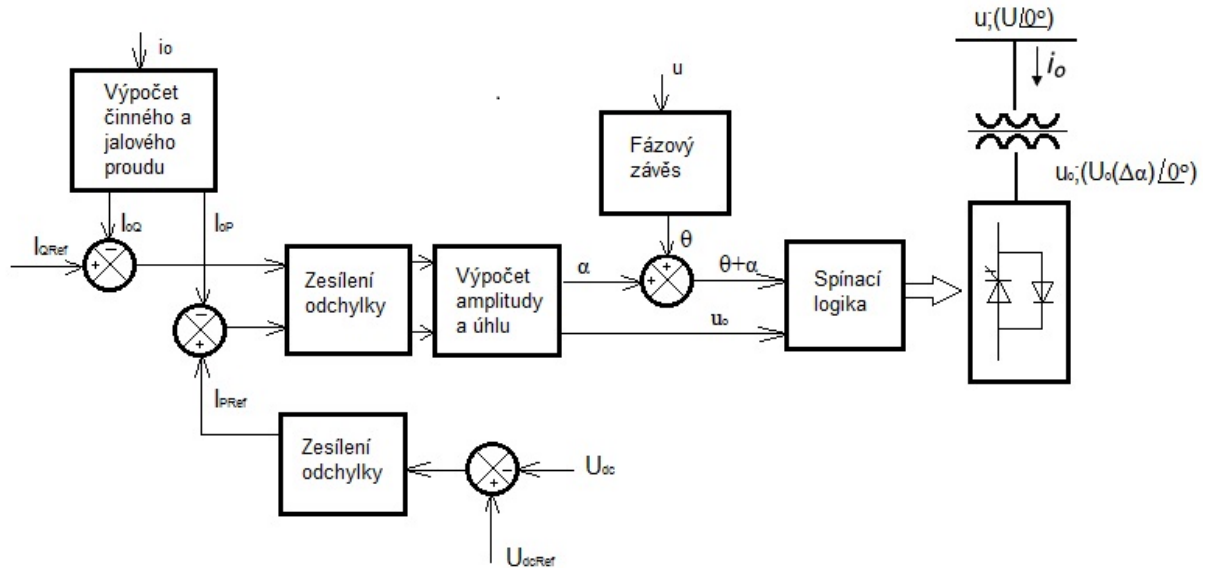
kapacitoru.

Úhel α je pak přičten k θ , aby poskytl úhel $\theta+\alpha$, který představuje požadovaný synchronizační signál pro spínací logiku, která udává jednotlivé řídicí signály výkonovým součástkám střídače.



Obr. 4.9 Základní schéma řízení STATCOM, kde dochází k řízení výstupního napětí pomocí kontroly napětí na kapacitě [5][9]

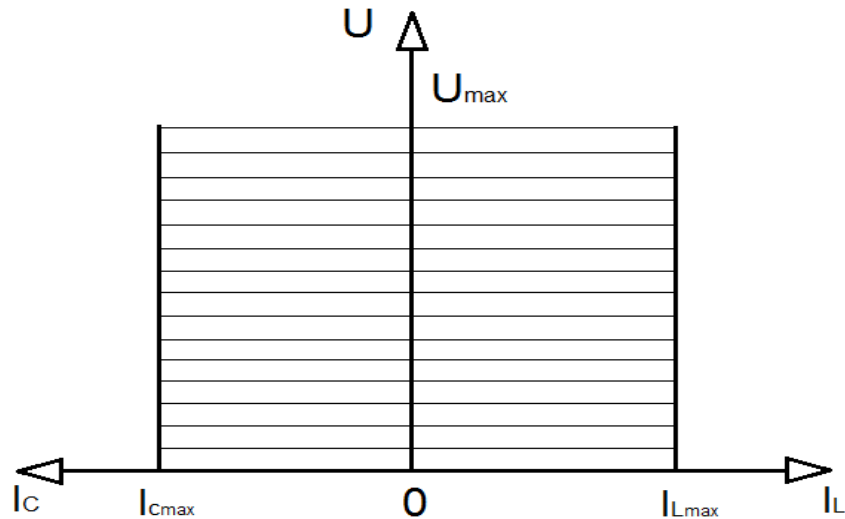
Na obrázku 4.10 je možné vidět blokový diagram pro přímou kontrolu výstupního napětí měniče pomocí kontroly vnitřního napětí. Vstupní signály jsou opět napětí na sběrnici u , výstupní proud měniče i_o , referenční jalový proud I_{QRef} a napětí na kapacitě U_{dc} . Hodnota napětí na kondenzátoru udává činný výkon, který měnič musí odebrat ze sítě, aby pokryl vnitřní ztráty kontroléru. Jak je vidět na blokovém diagramu, výstupní proud měniče je rozložen na jalovou a činnou složku proudu. Obě složky jsou s požadavkem jalového výkonu (daného kompenzačními požadavky) a vnitřního činného výkonu odvozeny z regulační smyčky výkonu potřebného pro kapacitor. Po vhodném zesílení odchylek jsou signály konvertovány na velikost a úhel požadovaného výstupního napětí měniče, od kterého se odvíjí vhodná řídicí sekvence signálů pro měnič. Takovéto operační schéma může posloužit pro řízení STATCOM s kapacitou nebo jiným energetickým zdrojem na stejnosměrné straně střídače. V tomto případě může být vnitřní proud považován za vnější požadavek činného proudu, který indikuje požadovaný činný výkon sítě (jak kladný tak záporný). Kombinací vnitřního a vnějšího požadavku činného proudu, společně s běžným požadavkem na jalový proud, dostaneme výslednou velikost a úhel výstupního napětí, tudíž i výslednou velikost výměny činného a jalového výkonu se sítí [12].



Obr. 4.10 Základní kontrolní schéma STATCOM užívající napěťová střídač, kde je řízení výstupního napětí prováděno pomocí změny amplitudy a úhlu vnitřního napětí, při fixní hodnotě napětí. [5][9]

Pokud bychom se podívali na celé zařízení jako na tzv. *černou skříňku*⁸, napěťový střídač fungující pro var kompenzaci může být považován za synchronní zdroj napětí, tvořící jalový proud, který je nezávislý na napětí sítě. Je omezen pouze výkonovým zatížením střídače. Voltampérová charakteristika odpovídající tomuto popisu je znázorněna na obrázku 4.11. Z charakteristiky vyplývá, že i v případě značného poklesu sítě, kontrolér na rozdíl od SVC stále schopen pracovat, a to až do té míry, dokud bude střídač schopen pokrývat své vnitřní ztráty činným výkonem [9].

⁸ Černá skříňka: termín černá skříňka (z angl. *black box*) se užívá ve více významech: zde je užita pro systém s obecně známými vstupy a výstupy, ale s neznámou vnitřní strukturou.



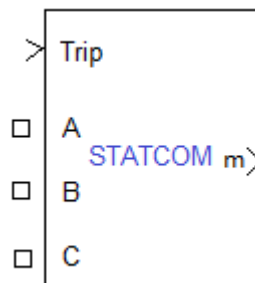
Obr. 4.11 Voltampérová charakteristiky STATCOM [9]

Dobrá dynamická odezva tohoto typu zařízení je zásluhou téměř zanedbatelného přenosového zpoždění, obecně je toto zpoždění až o řád nižší než v případě použití proměnné impedance (FC-TCR a TSC-TCR). Je zde k tomu několik důvodů: Hlavním důvodem je, že oba jak spínací tak rozpínací stavy výkonových součástek (IGBT, IGCT, GTO atd.) mohou být řízeny, kdežto u klasických TCR a TSC lze řídit jen spínací režimy (k vypnutí součástky dojde při průchodu nulou). V případě TSC je spínání dokonce omezeno na jedno sepnutí v každém cyklu. Spínací a rozpínací schopnost výkonových prvků napomáhá užití řízení střídače například pomocí PWM, kterou není možné použít u systému s vnější komutací, jako jsou TCR a TSC. Dalším významným důvodem je možnost 100% průchodu jalového proudu již při 15% změně výstupního napětí střídače). Aby toho byly TCR a TSC schopny docílit, musí být uvedeny do stavu plného sepnutí do plného vypnutí a naopak [5].

5 Případová studie simulace STATCOM vs. SVC

Případová studie uvádí porovnání kontroléru STATCOM a jeho předchůdce SVC. Jako simulační prostředí byl zvolen program Simulink[®] s užitím knihovny SimPowerSystems. Knihovna SimPowerSystems umožňuje užití čtyř typů simulace (*Continuous method, Ideal Switching, Discretization of the electrical system for a solution at fixed time steps a Phasor solution Method*). Pro model prezentovaný v rámci práce byla vybrána simulace typu „Phasor solution Method“. Důvodem bylo využití knihovny *Flexible AC Transmission System (FACTS) Library*, která v sobě má předefinované matematické modely pro statický synchronní kompenzátor, statický synchronní sériový kompenzátor, statický var kompenzátor a unifikovaný kontrolér toku výkonu. Navíc se model skládá z poměrně velkého počtu prvků a není zde kladen důraz na oscilace vznikající mezi prvky RLC, které jsou většinou vztaženy k frekvenci větší než je 50Hz. Dalším důvodem, i když již méně podstatným, je případný vzrůst časů simulačního procesu v případě výběru jiného typu simulace. Vlastnosti fázorové simulace jsou dány redukcí stavového modelu, čímž je dosaženo již zmíněného snížení simulačního času.

5.1 Popis bloku STATCOM



Obr. 5.1 Simulační blok STATCOM [9]

Blok STATCOM slouží k simulaci „Phasor model“, která nezahrnuje detailní reprezentaci výkonových součástí, tudíž je zapotřebí společně s „phasor simulation metod“ užit „Powerqui block“. Powerqui blok je nezbytný k simulování jakéhokoliv modelu v Simulink[®], SimPowerSystems. Umožňuje zapamatování ekvivalentního obvodu v programu, který reprezentuje stavové veličiny simulovaného modelu, a tedy použití fázorové simulační metody [9].

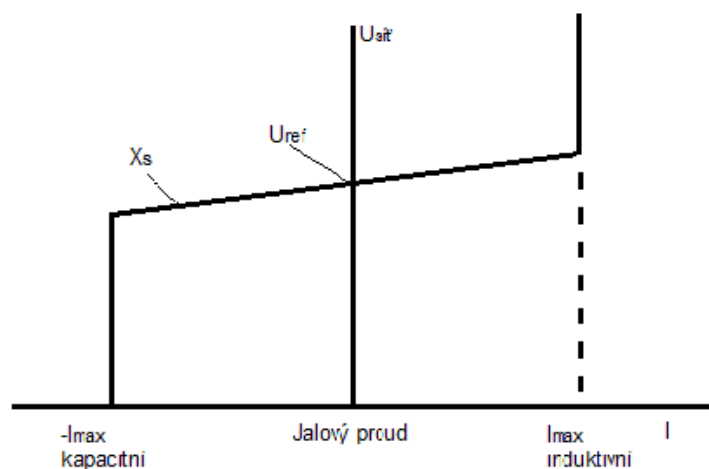
V programu Simulink[®] mohou být simulovány obě metody pro řízení STATCOM:

- Měníče užívající výkonové součástky GTO, řízené obdélníkovou vlnou s užitím speciálního propojovacího transformátoru, typicky s propojením několika (např. čtyř) trojúhelníkových napěťových střídačů s celkovým počtem spínacích prvků 48. Speciální simulační transformátory s posunem fáze jsou použity k neutralizaci harmonických obsažených v obdélníkové vlně generované jednotlivými střídači. V tomto uspořádání střídače je základní harmonické napětí U_2 úměrné velikosti napětí na kapacitě U_{dc} .
- Měníče užívající výkonové součástky IGBT řízené pomocí PWM (Pulse Width Modulation). Tento typ zařízení je simulován již zmíněným blokem STATCOM. Blok za pomoci Powerqui simuluje spínání výkonových součástek. Spínací frekvence je několik kHz a u tohoto typu střídače je udržováno fixní napětí na kapacitě U_{dc} . Nicméně detailní chování střídače a harmonické složky nejsou při použití fázorové simulační metody přesně dodrženy. To však dává možnost uvažovat blok STATCOM i jako zařízení užívající pro funkci střídače prvky GTO [9].

Užitý blok STATCOM může být provozován ve dvou odlišných režimech:

- V režimu regulace napětí (napětí je regulováno uvnitř limitu, jak je vysvětleno na obrázku 5.2)
- V režimu kontroly jalového výkonu (STATCOM jalový výstup je udržován konstantní)

Pokud je STATCOM řízen v režimu napěťové regulace, je implementována následující voltampérová charakteristika, viz. obrázek 5.2.



Obr. 5.2 STATCOM voltampérová charakteristika, kde X_s je vnitřní reaktance [9]

Pokud je jalový proud uvnitř regulačního rozsahu zařízení ($-I_{\max}$, I_{\max}), určeného jmenovitým výkonem STATCOM, je napětí regulováno na referenční napětí U_{ref} . Za těchto podmínek je napěťový pokles obvykle mezi 1% až 4% na maximální generovaný výkon. Tudíž výsledná křivka voltampérové charakteristiky dostává sklon viditelný na obrázku 5.2 [16].

5.1.1 Vstup

A B C terminály: Reprezentují výstupní svorky zařízení.

Trip: Umožňuje zařízení dočasně odstavit z provozu pomocí vstupního logického signálu 0 nebo 1. V případě simulace je vstup trvale uzemněn, čímž byl nahrazen logický signál 0.

U_{ref} (V_{ref}): Představuje externí referenční napětí pro STATCOM. (Parametr není nutné zadávat. Je aktivní pouze v případě, že je požadována externí kontrola referenčního napětí, jak je tomu i v případě prezentované simulace.) [9]

5.1.2 Výstup

m: Výstupní vektor STATCOM, ve kterém je obsaženo všech šestnáct výstupních signálů. Tyto signály jsou fázory proudu a napětí nebo řízení. Všechny tyto signály jsou popsány v tabulce č. 5, tak jak je umožňuje zobrazit Bus Selektor blok [9].

Tab. 5 Popis výstupních hodnot STATCOM [9]

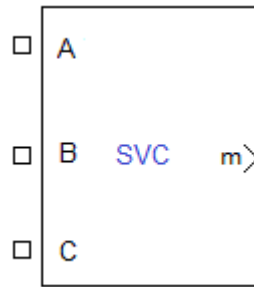
Signál	Název signálu	Popis
1-3	V_{a_prim} (pu); V_{b_prim} (pu); V_{c_prim} (pu)	fáze napětí U_a ; U_b ; U_c na primárních svorkách STATCOM
4-6	I_{a_prim} (pu); I_{b_prim} (pu); I_{c_prim} (pu)	fáze proudu I_a ; I_b ; I_c tekoucího do STATCOM
7	V_{dc} (V)	napětí na kapacitoru
8	V_m (pu)	sousledná složka měřeného napětí
9	V_{ref} (pu)	referenční napětí
10	Q_m (pu)	jalový výkon produkovaný či absorbovaný STATCOM. Kladná hodnota indikuje induktivní mód
11	Q_{ref} (pu)	referenční jalový výkon

12	I_d (pu)	podélná hodnota složky proudu (činný proud) tekoucího do STATCOM, kladná hodnota indikuje činný proud tekoucí do STATCOM
13	I_q (pu)	příčná složka proudu (jalový proud) tekoucího do STATCOM (pu), kladná hodnota indikuje kapacitní operaci
14	I_{dref} (pu)	referenční hodnota podélné složky proudu "d" tekoucího do STATCOM
15	I_{qref} (pu)	referenční hodnota příčné složky proudu "q" tekoucího do STATCOM
16	modindex	modulační index m PWM modulátoru, kladná hodnota, která se pohybuje v rozmezí $0 < m < 1$, $m=1$ koresponduje s maximálním napětím V_2 , které může být generováno napěťovým střídačem bez přemodulování

5.2 Popis bloku SVC

Jde o FACTS kontrolér, který je svými výstupními parametry velmi podobný kontroléru STATCOM. SVC mění napětí na svém výstupu pomocí kontroly jalové energie injektované, anebo absorbované ze sítě. Pokud je napětí sítě nižší než napětí SVC, pak zařízení dodává jalový výkon do sítě (kapacitní mód). Pokud je napětí sítě vyšší než napětí kontroléru SVC, pak kontrolér absorbuje jalový výkon a nachází se v induktivním režimu. Změna jalového výkonu je dosažena prostřednictvím spínaných kapacit a indukčnosti spojených ve třífázových bankách připojených k síti za vazebním transformátorem. Každá banka kapacit je spínána pomocí tyristorů (TSC – viz první kapitola). Indukčnosti jsou rovněž řízeny pomocí spínání tyristoru (TSR – viz. první kapitola) nebo fázově kontrolovaných (TCR – viz. první kapitola)

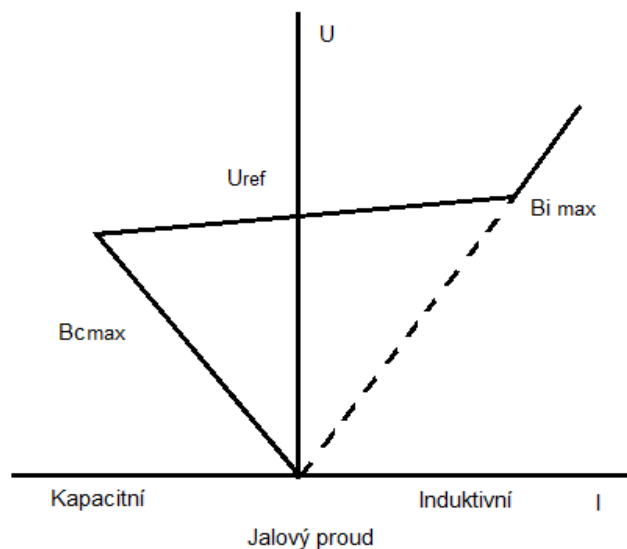
Blok SVC viditelný na obrázku 5.3 je stejně jako blok STATCOM určen pro fázorovou simulační metodu, společně s ním musí být užít i „Powerqui block“. Z toho vyplývají všechny výhody a omezení uvedené v úvodu kapitoly.



Obr. 5.3 Simulační blok SVC [9]

Blok SVC může být provozován ve dvou odlišných režimech:

- V módu regulace napětí (napětí je regulováno v mezích ukázaných na obrázku 5.4)
- V módu regulace jalového výkonu (susceptance SVC je udržována konstantní)

Obr 5.4 SVC voltampérová charakteristika, kde X_s je vnitřní reaktance [9]

Pokud je susceptance SVC uvnitř maximální a minimální hodnoty určena celkovým jalovým výkonem bank kapacit a indukčnosti, napětí je regulováno na hodnotu referenčního napětí U_{ref} . Za těchto podmínek je napěťový pokles obvykle mezi 1% až 4% na maximální generovaný výkon. Tudiž výsledná křivka voltampérové charakteristiky dostává sklon viditelný na obrázku 5.4 [16].

5.2.1 Vstup

A B C terminály: Reprezentují výstupní svorky zařízení.

U_{ref} (V_{ref}): Představuje externí referenční napětí pro SVC. (Parametr je aktivní pouze v případě, že je požadována externí kontrola referenčního napětí, jak je tomu i v případě

prezentované simulace.) [9]

5.2.2 Výstup

m: Výstupní vektor SVC, ve kterém je obsaženo všech šest výstupních signálů. Tyto signály jsou fázory proudu a napětí nebo řízení. Všechny tyto signály jsou popsány v tabulce č. 6, tak jak je umožňuje zobrazit Bus Selektor blok [9].

Tab. 6 Popis výstupních hodnot SVC[9]

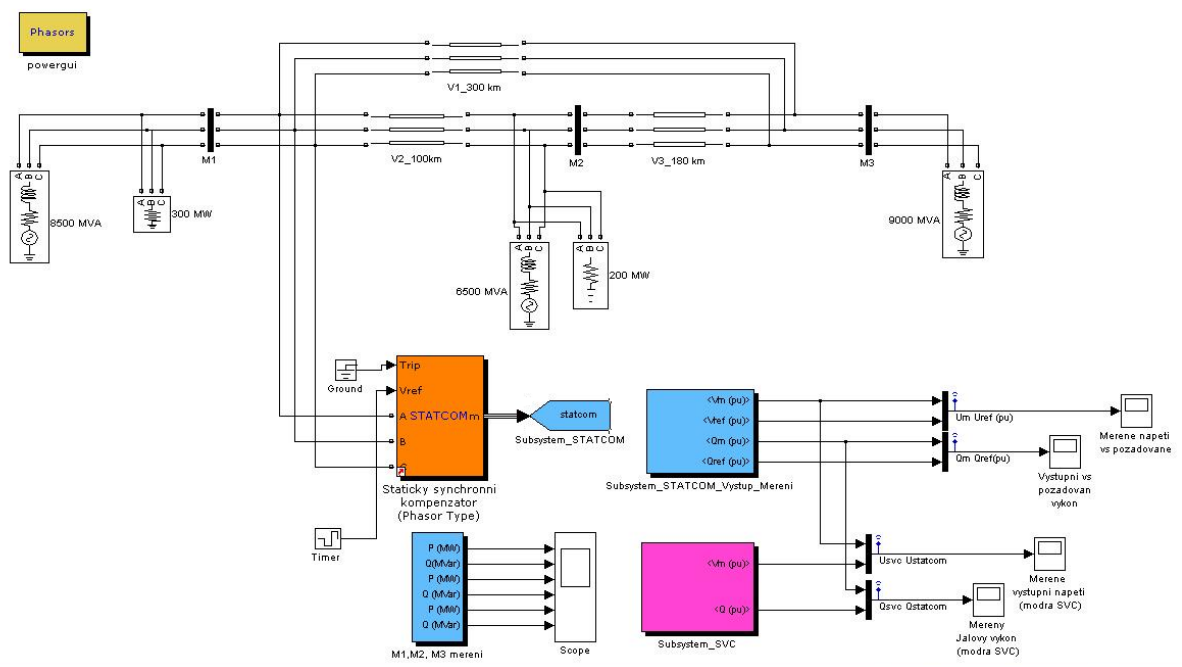
Signál	Název signálu (pu)	Popis
1-3	Ia, Ib, Ic	fázory proudů Ia, Ib, Ic tekoucí do SVC
4	V_m	sousledná složka trojfázové soustavy mařených napětí
5	B	výstupní susceptance napěťového regulátoru SVC, kladná hodnota značí, že SVC je v kapacitním módu
6	Q	SVC výstupní jalový výkon, kladná hodnota znamená induktivní charakter

5.3 Popis simulace

Pro účely této práce bylo porovnáno SVC (Static VAR Compensator) s modernějším STATCOM. STATCOM bylo porovnáno právě s SVC, protože plní stejnou funkci při zlepšování kvality elektrické energie. Nicméně STATCOM je při nižším napětí sítě schopné regulovat jalový proud v širším regulačním rozsahu oproti již zmíněnému SVC. To se děje díky tomu, že maximální rozsah regulace SVC je dán jeho pasivními prvky, kdežto u STATCOM je dán nominálním výkonem napěťového střídače. Rovněž odezva zařízení SVC je delší než odezva STATCOM, protože u STATCOM nedochází ke zpoždění plynoucího ze zapínání tyristorů použitých v případě SVC (4 ms u SVC)

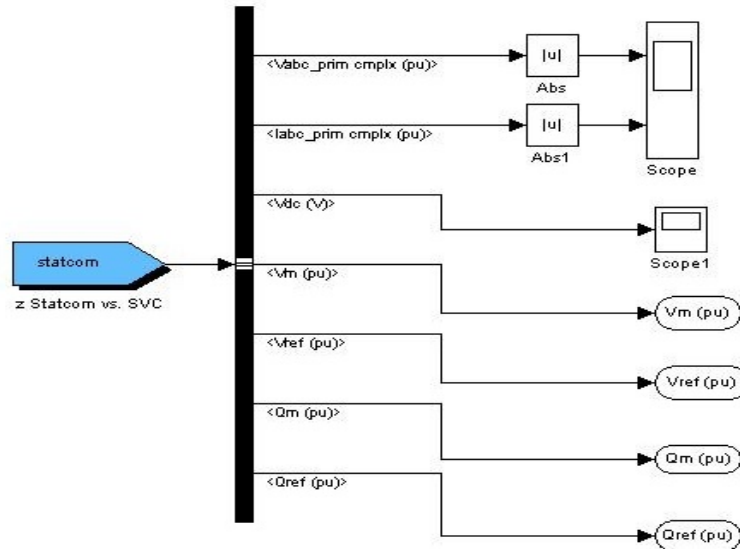
STATCOM a SVC bylo testováno na modelu sítě s velikostí napětí 500kV a frekvenci 50Hz. Napětí bylo zvoleno 500 kV s ohledem na nastavení RLC prvků vedení pomocí Powerqui, kde toto umožňuje aplikace Compute RLC Line Parameters. Vlastní síť se skládá ze tří bloků vedení o délkách 300, 100 a 180 km. Blok vedení umožňuje simulovat dvou, tří, anebo šestifázové symetrické vedení (zdvojené vedení) s možností zadání parametrů vedení

pomocí matice ($N \times N$) nebo pomocí vektoru sousledné a nulové složky transponovaného vedení. Vedení je napájeno ze tří třífázových zdrojů napětí s vnitřní impedancí R a L . Tři zdroje napětí jsou spojeny do hvězdy s vyvedeným středem, který může být uzemněn nebo případně zpřístupněn. U bloku může být specifikován vnitřní odpor a indukčnost zdroje přímým zadáním jejich hodnot. Jednotlivé zdroje mají výkon 8500, 6500 a 9000 MVA při nominálním napětí 500 kV. Na obrázku 5.5 je možné vidět jednotlivé rozložení bloků sítě STATCOM, dva vnořené subsystemy a řadu bloků umožňujících zobrazení měřených hodnot. Vstupní data k simulaci viz. Příloha B.



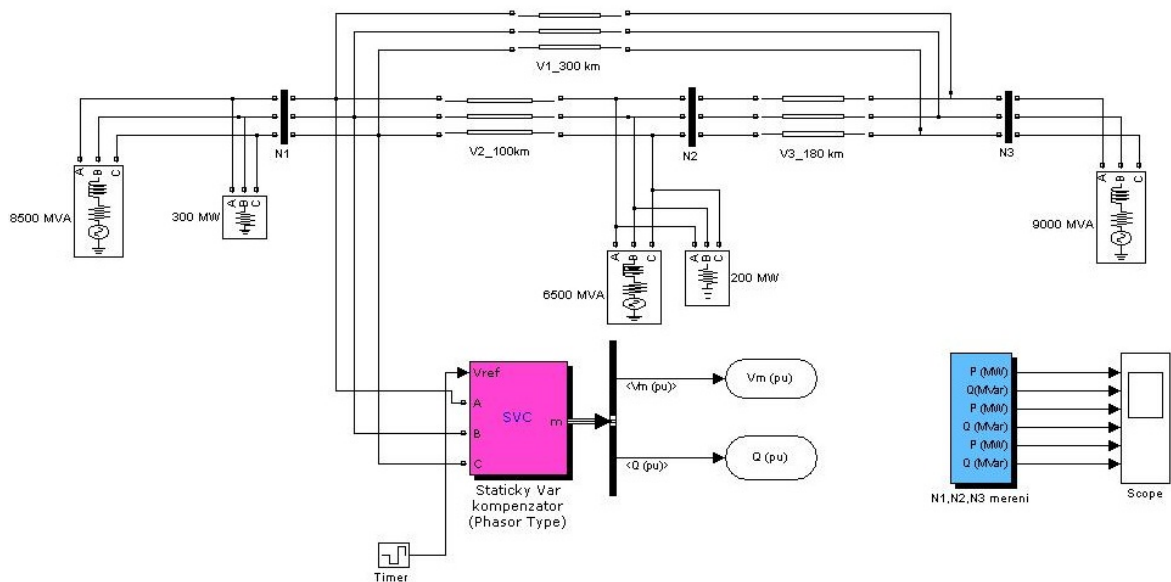
Obr. 5.5 Model sítě s připojeným STATCOM (Simulink®)

Žluté okno Powergui indikuje použití fázorové simulace. Do modelu jsou dále vnořeny tři subsystemy. První subsystem `Subsystem_STATCOM_Vystup_Mereni` je v simulaci zaveden kvůli zvýšení přehlednosti. Obsahuje výstupní vektor STATCOM, který zobrazuje signály 1 až 11, viz tabulka č. 5 popis výstupních hodnot STATCOM, které jsou zobrazeny na obrázku 5.6. Zavedení tohoto subsystemu je umožněno pomocí prvků `GoTo` a `FromTo`.



Obr. 5.6 Výstupní hodnoty STATCOM (Simulink®)

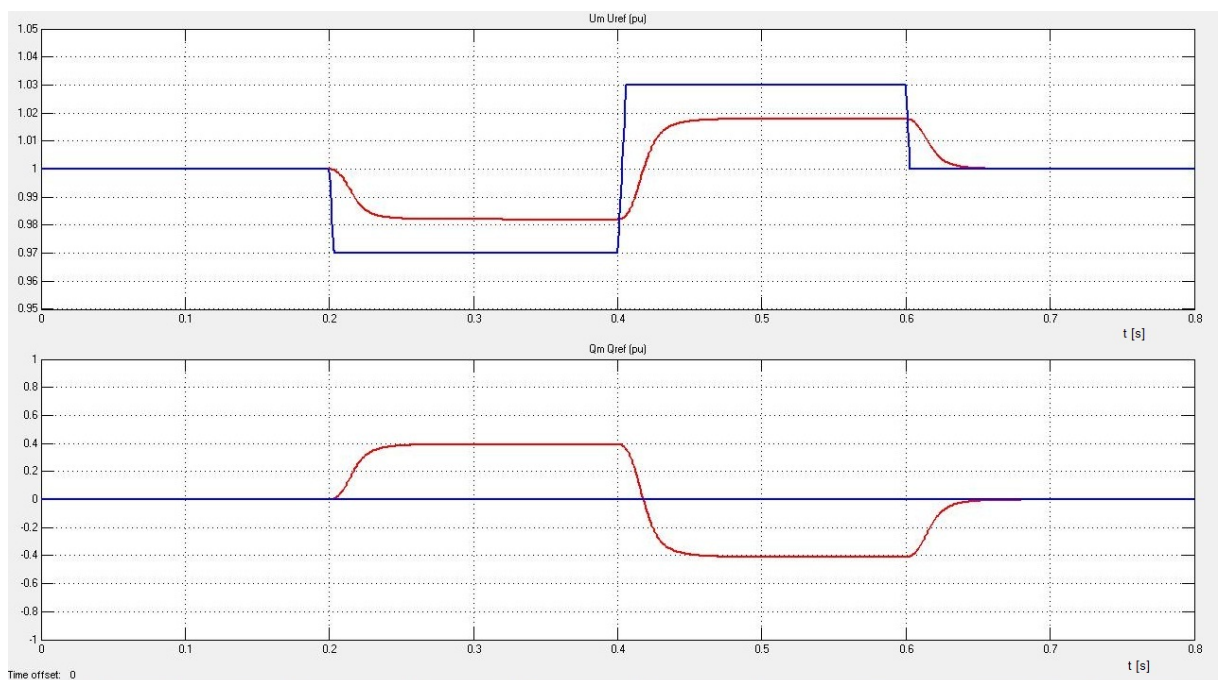
Druhý subsystém označený fialovou barvou propojuje simulaci s druhou sítí, ke které je připojeno zařízení SVC. V simulaci zavedení tohoto bloku umožňuje získat výstupní parametry SVC k následnému porovnání s výstupními parametry STATCOM. Sít' je vidět na obrázku 5.7.



Obr.5.7 Model sítě se zapojeným SVC (Simulink®)

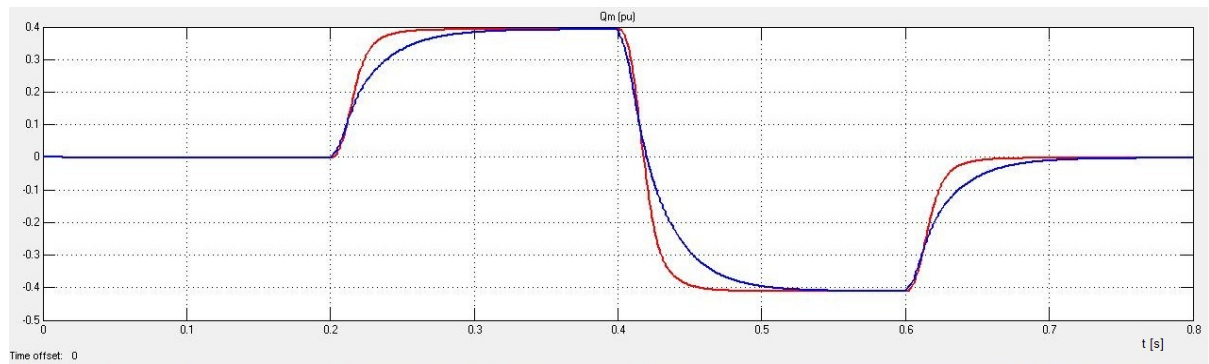
Obrázek 5.8 zobrazuje souslednou složku měřeného napětí STATCOM U_m zobrazené červenou barvou a požadovaného referenční napětí STATCOM U_{ref} vyobrazené modrou

křivkou. Referenční napětí je určeno blokem Timer, kdy v čase $t=0.2\text{s}$ dojde ke snížení U_{ref} na úroveň 0.97 pu , v důsledku toho dojde k poklesu sousledné složky měřeného napětí U_m . Na to STATCOM reaguje generováním jalového výkonu ($+40\text{Mvar}$). Zařízení se v tuto dobu nachází v kapacitním módu. V tomto bodě simulace je důležité si uvědomit, že referenční napětí je zde vloženo externě, a proto se v čase mění nejprve U_{ref} a pak U_m . Následně v čase $t=0.4\text{s}$ dojde ke zvýšení referenčního napětí na hodnotu 1.03 . Následkem toho dojde ke zvýšení sousledné složky napětí U_m , na což STATCOM reaguje absorbováním jalového výkonu (-40Mvar) a nachází se tedy v induktivním módu, v čase $t=0.6\text{s}$ se systém vrací do stabilního stavu.



Obr. 5.8 Výstupní napětí a generovaný jalový výkon (Simulink®)

Na obrázku 5.9 je možné porovnat reakci STATCOM a SVC na stejnou změnu referenčního napětí U_{ref} . Z obrázku je patrné, že STATCOM, znázorněné červenou barvou reaguje o 60ms rychleji na požadovanou změnu než SVC, znázorněné barvou modrou.



Obr. 5.9 Křivka jalového výkonu STATCOM a SVC (Simulink®)

Závěr

Jedním z cílů mé diplomové práce bylo vytvořit popis problematiky FACTS kontrolérů, který doposud nabízela pouze zahraniční literatura a přiblížit její rozdělení, základní vlastnosti a možnosti nasazení. Dalším cílem práce bylo zpracovat podrobný popis kontroléru STATCOM a představit jeho porovnání s SVC v případové studii.

V první části práce je uveden rozbor jednotlivých kontrolérů společně s jejich základními principy, které jsou zde doplněny o popis tak, jak je definuje IEEE. Dále jsou zde popsány možnosti užití jednotlivých kontrolérů v distribuci a přenosu elektrické energie společně s přehledným porovnáním kontrolérů a konvenčních způsobů kompenzace v současné době. Práce neopomíná ani součástkovou základnu pro jednotlivé kontroléry, kde je možné nalézt vzájemné porovnání jednotlivých prvků vhodných pro stavbu střídačů.

Druhá část práce pak předkládá bližší pohled na nejvýznamnějšího a nejznámějšího představitele kontrolérů II. generace, tedy zařízení STATCOM, které je přímým nástupcem kontroléru SVC. K demonstraci obou zařízení byla vytvořena simulace v programu Matlab[®] Simulink[®] za pomoci knihovny SimPowerSystems. Obě zařízení jsou zde připojena k jednoduché síti a je jim ve stejný čas měněno referenční napětí. Sleduje se zde jejich odezva na provedenou změnu. Z výsledného grafu zřetelně vyplývá, že STATCOM reaguje o 60ms rychleji než SVC. Simulace jasně prokázala, že díky výhodám plynoucím z použití součástek s možností řízeného vypnutí zapojených v můstkové struktuře měniče, je reakční doba zařízení STATCOM kratší než u SVC. Výsledky simulace tedy potvrzují, že STATCOM je pro kompenzaci rychle se měnící zátěže vhodnější než SVC.

Dle mého názoru z výsledných hodnot vyplývá, že je STATCOM účinným nástrojem ke kompenzaci vyšších harmonických, zlepšení účinníku a vyrovnávání nesymetrií způsobených jednofázovými odběry. V současné době však brzdí nasazení podobných zařízení ve světě jejich vysoká cena a v České republice ještě navíc legislativní poměry. Nicméně se zdá, že doba je podobným zařízením příznivě nakloněna, a to z četných důvodů, které jsou v diplomové práci uvedeny. Je velice pravděpodobné, že s kontroléry skupiny FACTS se budeme setkávat stále častěji, a to jak v zapojeních sériových, paralelních a sériově-sériových, tak i v zapojeních sériově-paralelních.

Použitá literatura

- [1] KOREC, Vladimír a Jiří HOLOUBEK. *Kompenzace jalového výkonu v praxi*. Praha: IN-EL, 1999. ISBN 80-86230-07-4. *Kompenzace jalového výkonu v praxi*. Praha: IN-EL, 1999. ISBN 80-86230-07-4.
- [2] VONDRÁŠEK, František. *Výkonová elektronika: Měníče s vlastní komutací a bez komutace*. 1. vydání. Plzeň, Katedra aplikované elektroniky : Tiskové středisko ZČU, 1998. 252 s. ISBN 8070824859
- [3] Systém pro energetiku: ABB. NFORMACE POSKYTOVATELE/IMPRESSUM © COPYRIGHT 2012 ABB. *ABB v České republice* [online]. 2011-03-02 [cit. 2012-04-18]. Dostupné z: <http://www.abb.cz/cawp/czabb014/a995b2e7605fea3ec125710300404c96.aspx>
- [4] LE DU, A.; TOTINO, G.; WINFIELD, M. Which FACTS Equipment for Which Need? : Identification of the Technology developments to Meet the Needs of Electricite de France (EDF). In *Technology and Benefits of Flexible AC Transmission Systemy*. Paris : Joint Session, 1992. s. 38
- [5] HINGORANI, Narain G.; GYUGYI, Laszlo. *Understanding FACTS : Concepts and technology of flexible ac transmission systems*. New York : IEEE Press Marketing, 2000. 448 s. Dostupné z WWW: <www.ieee.org/press>
- [6] The Moselstahlwerk SVC Light: ABB. *Reference - Trier Germany ABB* [online]. 2007, 4 [cit. 2012-02-01]. Dostupné z: www.abb.com/FACTS
- [7] XU, Lie a Liangzhong YAO. Comparison of Using SVC and STATCOM for Wind Farm Integration. *International Conference on Power System Technology: IEEE*. 2006(1-4244-0111), 7.
- [8] HABUR, K. a D. O'LEARY. FACTS For Cost and Reliable Trasmission of Electrical Energy. [online]. 2005, 11 [cit. 2012-02-02]. Dostupné z: http://www.worldbank.org/html/fpd/em/transmission/facts_siemens.pdf

- [9] SimPowerSystems. MATHWORKS. *MathWorks Procut and Sevices* [online]. 1994-2012, 2012 [cit. 2012-02-03]. Dostupné z: www.mathworks.com
- [10] Elektro: Hybridní polovodičové součástky. *Elektro: odborný časopis pro elektroniku* [online]. 2010 [cit. 2012-02-03]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=26998
- [11] Elektro: Součástky IGCT zjednoduší a zdokonalí výkonové polovodičové měniče. *Elektro: odborný časopis pro elektroniku* [online]. 2010 [cit. 2012-02-03]. Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=23818
- [12] ACHA, Enrique, Hugo AMBRIZ-PE´REZ, Claudio R. FUERTE-ESQUIVEL a Ce´sar ANGELES-CAMACHO. *FACTS: Modelling and Simulation in Power Networks*. 2004. England: John Wiley & Sons Ltd, 2004. ISBN 0-470-85271-2.
- [13] BEBIC, Jovan. HPFC. *He Symmetrical Hybrid Power Flow Controller: A new technology for Flexible AC Transmission (FACTS)* [online]. 1.0. 12/2008, 12/2008 [cit. 2012-02-07]. Dostupné z: <http://www.hpfc.ca/facts.html>
- [14] WALKE, Bernhard H, Stefan MANGOLD a Lars BERLEMANN. *IEEE Spectrum: Transmission: The FACTS Machine*. Chichestr: Peter Fairley, 2006. ISSN 9788073630904. Dostupné z: <http://spectrum.ieee.org/energy/the-smarter-grid/flexible-ac-transmission-the-facts-machine>
- [15] Dynex: Gate Turn-off (GTO) Thyristors - 1300V. DYNEX. *Power Solution* [online]. Copyright © 2012 Dynex Semiconductor [cit. 2012-04-16]. Dostupné z: <http://www.dynexsemi.com/products/gto/index.htm>
- [16] MASOOD, Tariq, R.K. AGGARWAL, S.A. QURESHI. STATCOM Model against SVC Control Model Performance Analyses Technique by Matlab. *International Conference on Renewable Energies and Power Quality*. 2010, s. 8.
- [17] ABB FACTS- Přenos a rozvod elektřiny: Overview about FACTS. *ABB* [online]. [cit. 2012-04-17]. Dostupné z: <http://www.abb.com/industries/us/9aac30100023.aspx>

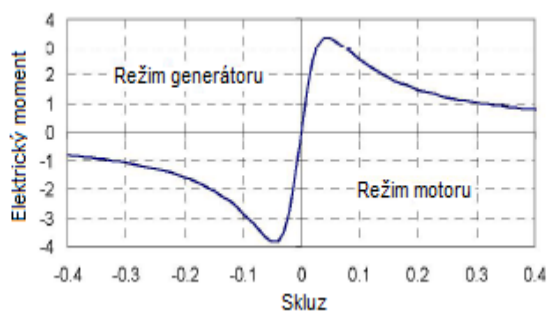
Přílohy

Příloha A – Konkrétní příklady nasazení

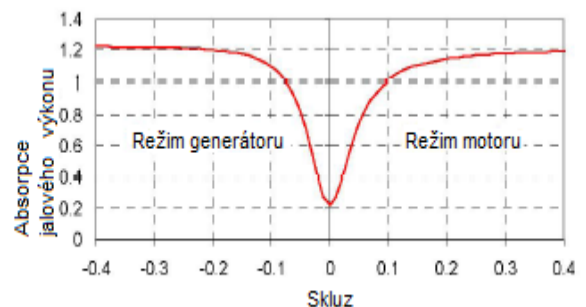
STATCOM užitý pro větrné farmy

U většiny v současné době používaných větrných elektráren je použit indukční generátor. Ten při jakémkoliv poruchovém stavu absorbuje poměrně značné množství jalové energie, což je dáno velkým skluzem rotoru získaném při poruše. V návaznosti na to je dobré v práci uvést příklad použití STATCOM užitého k vyrovnání jalového výkonu absorbovaného indukčním generátorem.

Většina podobných farem je umístěna daleko od bodu připojení do sítě a je zde nedostatečné pokrytí jalovým výkonem během situací, kdy dojde k poruše. V ustáleném stavu stroj operuje s malým skluzem a s malou proměnlivostí otáček (s malým kolísáním otáček). Obrázek 1.2 ukazuje absorpci jalové energie při bezporuchovém provozu stroje, je zde také jasně vidět, že ve stavu, kdy je skluz rotoru 0, má generátor nejnižší spotřebu jalového výkonu. S růstem skluzu motoru roste i spotřeba jalového výkonu, to je zřetelně patrné z obrázku 1.1 a 1.2. Při dosažení skluzu 0,15 se stane spotřeba jalové energie nepodstatnou.



Obr. 1.1 momentová char. stroje

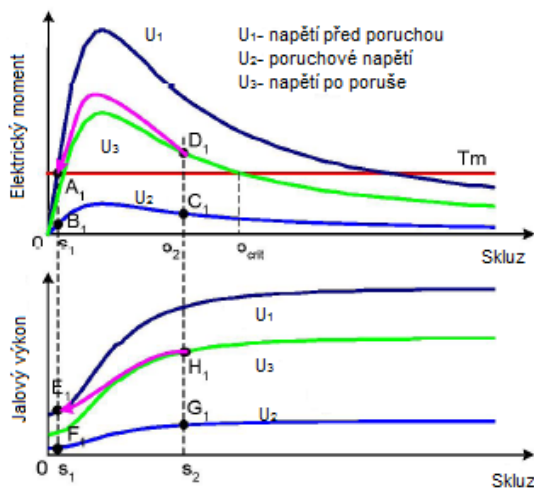


Obr. 1.2 absorpce jal. výkonu

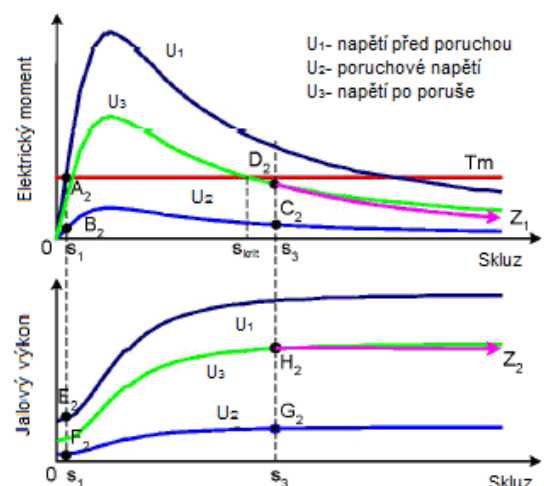
Pro lepší ilustraci možných poruch jsou zde uvedeny další dva grafy. Obrázek Obr. 1.3 prezentuje ustálený stav, který je vyznačen body A_1 a E_1 společně se střídavým napětím U_1 a skluzem s_1 . V tomto případě je elektrický moment roven mechanickému momentu a indukční generátor pracuje v ustáleném stavu. V případě poruch dojde k poklesu napětí z hodnoty U_1 na hodnotu U_2 a elektrický moment klesne z bodu A_1 do bodu B_1 a jalový výkon klesne z bodu E_1 na F_1 , protože je mechanický moment mnohem větší než elektrický. Generátor začne zrychlovat a tím zvyšovat skluz s_2 . Tato situace vyústí v posunutí elektrického momentu a jalového výkonu až do bodu C_1 a G_1 . Pokud je porucha ojedinělá, střídavé napětí

se začne zotavovat a indukční generátor operující stále se skluzem s_2 při spotřebě velkého množství jalového výkonu se v těchto případech vrátí na hodnotu napětí U_3 . Operační režim se přesunul do bodu D_1 a H_1 , protože elektrický moment je nyní větší než mechanický. Rotor přestane akcelarovat a sníží se skluz. To má za následek snížení absorbovaného jalového výkonu. Následkem výše uvedeného se napětí U_1 a U_3 vrátí do svého původního stavu. Do původní polohy se vrátí také křivka jalového výkonu a momentu (body A_1 a E_1), zpět do stabilního režimu se tedy vrátí i celý systém. To se stane ale pouze v případě, je-li porucha odstraněna dřív než se skluz dostane za bod s_2 , respektive do bodu s_3 .

Situace, kdy generátor pracuje se skluzem s_3 , je ukázána na obrázku 1.4 stav pro který platí operační body D_2 , C_2 , H_2 , G_2 . V tomto případě je elektrický moment menší než mechanický a skluz nadále roste. Pokud by motor stále zrychloval, hodnoty by rostly až na úroveň Z_1 a Z_2 . Systém by se dostal do nestabilního režimu a větrná turbína by musela být odpojována od sítě.



Obr. 1.3 stabilní situace

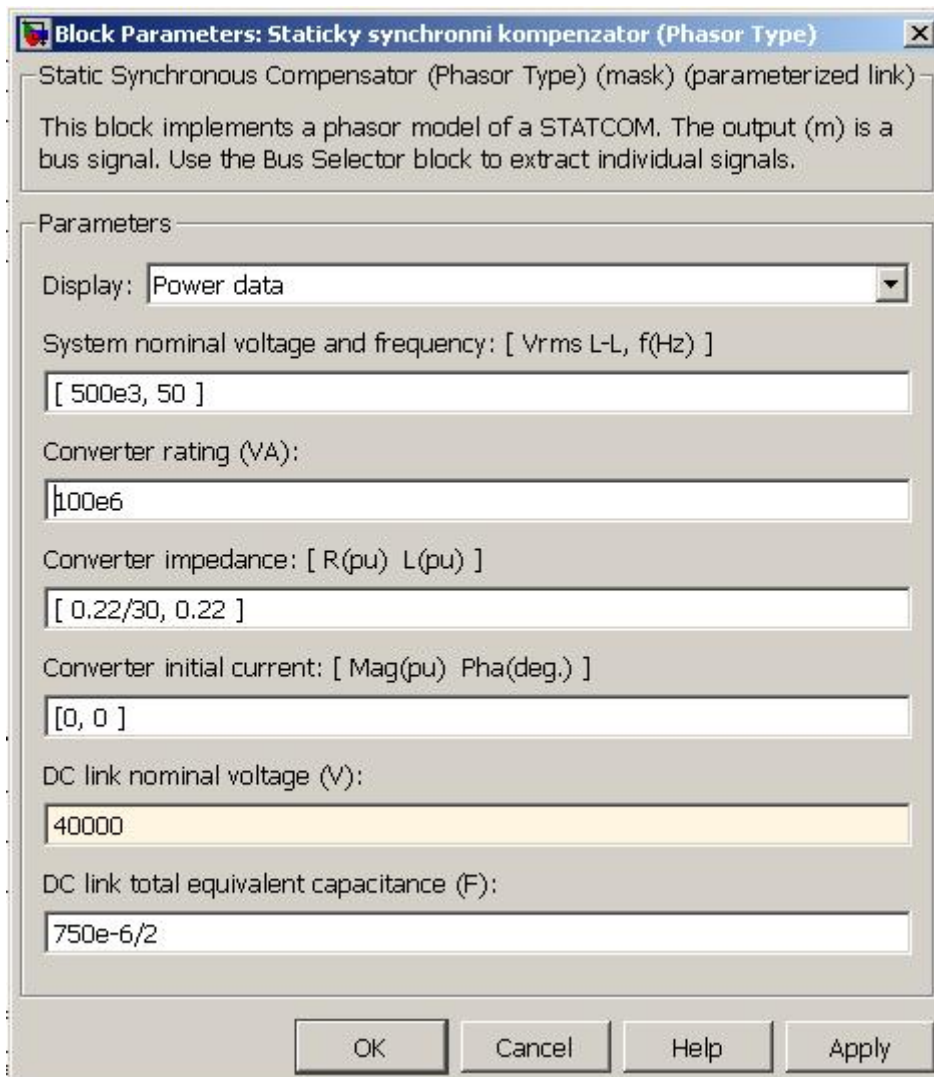


Obr. 1.4 nestabilní situace

STATCOM se v tomto případě chová tak, že nechá vzrůst napětí sítě během a po poruchovém stavu. Tím ve skutečnosti vzroste elektrický moment a klesnou otáčky rotoru, čímž vzroste stabilita systému [7].

Příloha B – Vstupní data

STATCOM blok Power data



Block Parameters: Statický synchronní kompenzátor (Phasor Type)

Static Synchronous Compensator (Phasor Type) (mask) (parameterized link)

This block implements a phasor model of a STATCOM. The output (m) is a bus signal. Use the Bus Selector block to extract individual signals.

Parameters

Display:

System nominal voltage and frequency: [Vrms L-L, f(Hz)]

Converter rating (VA):

Converter impedance: [R(pu) L(pu)]

Converter initial current: [Mag(pu) Pha(deg.)]

DC link nominal voltage (V):

DC link total equivalent capacitance (F):

OK Cancel Help Apply

STATCOM blok Control parameters

Block Parameters: Statický synchronní kompenzátor (Phasor Type) [X]

Static Synchronous Compensator (Phasor Type) (mask) (parameterized link)

This block implements a phasor model of a STATCOM. The output (m) is a bus signal. Use the Bus Selector block to extract individual signals.

Parameters

Display: **Control parameters**

Mode of operation: Voltage regulation

External control of reference voltage V_{ref} (pu):

Maximum rate of change of reference voltage V_{ref} (pu/s):

10

Droop (pu):

0.03

Vac Regulator Gains: [Kp Ki]

[50 1100]

Vdc Regulator Gains: [Kp Ki]

[0.5e-3 43e-3]

Current Regulators Gain: [Kp Ki Kf]

[0.4 20 0.32]

OK Cancel Help Apply

SVC blok Control parameters

Block Parameters: Statický Var kompenzator (Phasor Type)

Static Var Compensator (Phasor Type) (mask) (link)

Implements a phasor model of a three-phase, three-wire Static Var Compensator (SVC). The output (m) is a bus signal. Use the Bus Selector block to extract individual signals. If positive-sequence modeling is selected, the block uses only positive-sequence entities, and the negative-sequence component is ignored).

Parameters

Display: **Control parameters**

Mode of operation: **Voltage regulation**

External control of reference voltage V_{ref} (pu):

Droop X_s (pu/Pbase):

0.03

Voltage regulator [K_p (puB/puV) K_i (puB/puV/s)]:

[3 500]

OK Cancel Help Apply

SVC blok Power data

Block Parameters: Staticky Var kompenzator (Phasor Type)

Static Var Compensator (Phasor Type) (mask) (link)

Implements a phasor model of a three-phase, three-wire Static Var Compensator (SVC). The output (m) is a bus signal. Use the Bus Selector block to extract individual signals. If positive-sequence modeling is selected, the block uses only positive-sequence entities, and the negative-sequence component is ignored).

Parameters

Display: **Power data**

SVC modeled using positive-sequence component only

System nominal voltage and frequency: [Vrms L-L fn(Hz)]

[500e3 50]

Three-phase base power Pbase (VA):

100e6

Reactive power limits: [Qc(var>0) Ql(var<0)]

[100e6 -100e6]

Average time delay due to thyristor valves firing Td (s):

4e-3

OK Cancel Help Apply

M1 blok třífázového měření

Block Parameters: M1

Three-Phase VI Measurement (mask) (parameterized link)

Ideal three-phase voltage and current measurements.

The block can output the voltages and currents in per unit values or in volts and amperes.

Parameters

Voltage measurement

Use a label

Signal label (use a From block to collect this signal)

Voltages in pu, based on peak value of nominal phase-to-ground voltage

Current measurement

Use a label

Signal label (use a From block to collect this signal)

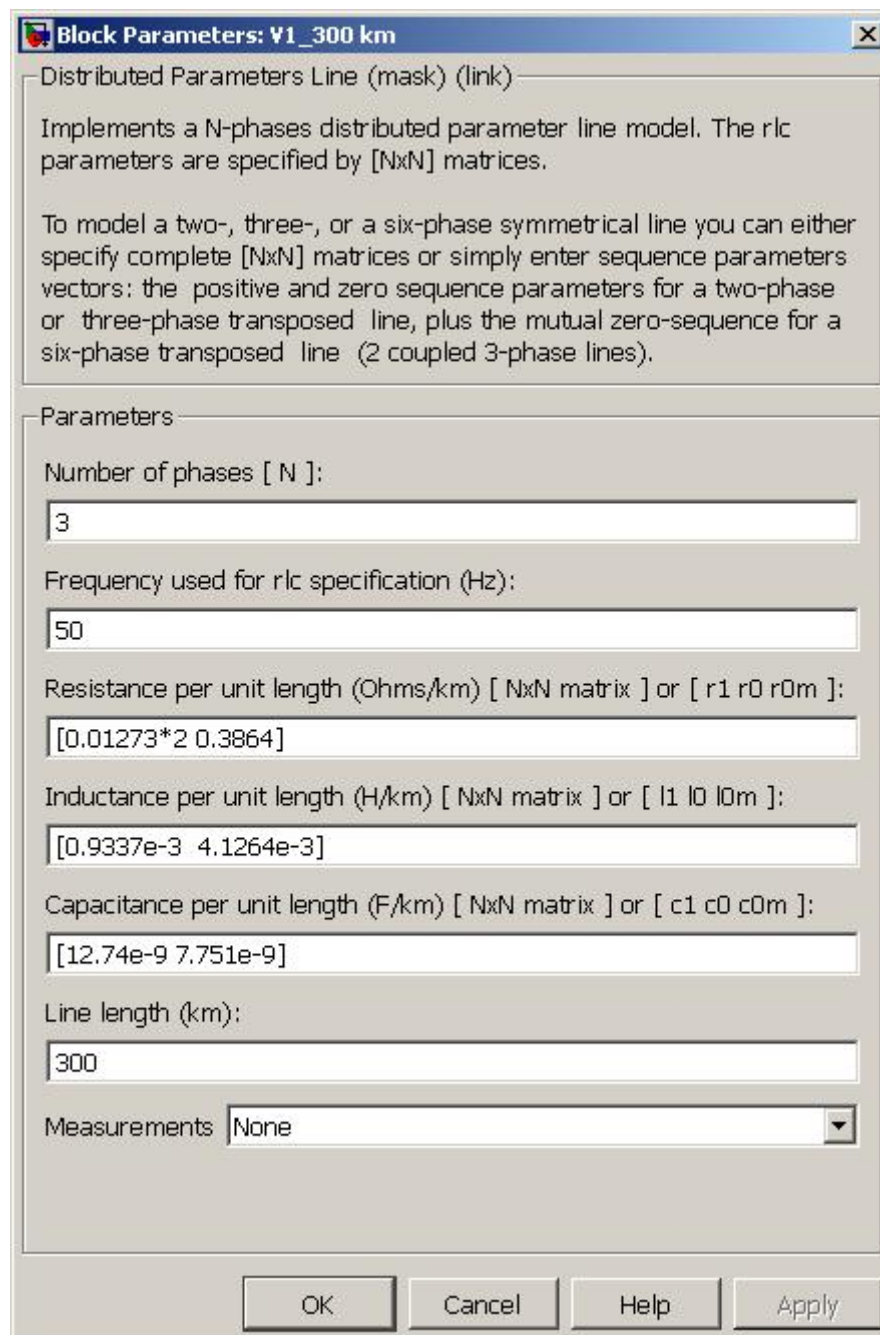
Currents in pu

Base power (VA 3 phase)

Nominal voltage used for pu measurement (Vrms phase-phase) :

Output signals in:

OK Cancel Help Apply

V1_300 km blok distribuční sítě

Block Parameters: V1_300 km

Distributed Parameters Line (mask) (link)

Implements a N-phases distributed parameter line model. The rlc parameters are specified by [NxN] matrices.

To model a two-, three-, or a six-phase symmetrical line you can either specify complete [NxN] matrices or simply enter sequence parameters vectors: the positive and zero sequence parameters for a two-phase or three-phase transposed line, plus the mutual zero-sequence for a six-phase transposed line (2 coupled 3-phase lines).

Parameters

Number of phases [N]:

Frequency used for rlc specification (Hz):

Resistance per unit length (Ohms/km) [NxN matrix] or [r1 r0 r0m]:

Inductance per unit length (H/km) [NxN matrix] or [l1 l0 l0m]:

Capacitance per unit length (F/km) [NxN matrix] or [c1 c0 c0m]:

Line length (km):

Measurements

OK Cancel Help Apply

Zadávané hodnoty RLC prvků pro parametry vedení

Display RLC Values

RLC line parameters:

Frequency (Hz):
50

Ground resistivity (ohm.m):
100

Resistance matrix R matrix (ohm/km):

0.076389	0.066671	0.067459
0.066671	0.074753	0.066671
0.067459	0.066671	0.076389

Inductance matrix L matrix (H/km):

0.0011879	0.00075294	0.00073523
0.00075294	0.0011879	0.00075294
0.00073523	0.00075294	0.0011879

Capacitance matrix C matrix (F/km):

2.122e-008	-5.1195e-009	-4.0087e-009
-5.1195e-009	2.0922e-008	-5.1195e-009
-4.0087e-009	-5.1195e-009	2.122e-008

Positive- & zero- sequence resistance.
R10 = [R1 Ro] (ohm/km):

0.0089104	0.20971
-----------	---------

Send RLC parameters to block:

Selected block

Download: or

300 MW blok umělé zátěže

Block Parameters: 300 MW [X]

Three-Phase Parallel RLC Load (mask) (link)
Implements a three-phase parallel RLC load.

parameters | Load Flow

Configuration Y (grounded)

Nominal phase-to-phase voltage V_n (Vrms)
500e3

Nominal frequency f_n (Hz):
50

Active power P (W):
300e6

Inductive reactive Power Q_L (positive var):
0

Capacitive reactive power Q_C (negative var):
0

Measurements None

OK Cancel Help Apply

9000 MVA blok třífázového zdroje připojeného na síť

Block Parameters: 9000 MVA

Three-Phase Source (mask) (link)

Three-phase voltage source in series with RL branch.

Parameters | Load Flow

Phase-to-phase rms voltage (V):
500e3*0.98

Phase angle of phase A (degrees):
9.2-40

Frequency (Hz):
50

Internal connection: Yg

Specify impedance using short-circuit level

3-phase short-circuit level at base voltage(VA):
9000e6

Base voltage (Vrms ph-ph):
500e3

X/R ratio:
10

OK Cancel Help Apply