

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA MECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Řízení toku výkonu v síti

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Ondřej PTÁČEK**
Osobní číslo: **E13B0334P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Název tématu: **Řízení toku výkonu v síti**
Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

K řízení toku výkonu v síti slouží tzv. FACTS systémy (Flexible AC (Alternating Current) Transmission System).

1. Popište základní způsoby kompenzace.
2. Uveďte základní typy zařízení FACTS pro jednotlivé způsoby kompenzace.
3. Najděte a popište moderní systémy FACTS založené na výkonových měničích.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **30 - 40 stran**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

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

Vedoucí bakalářské práce:

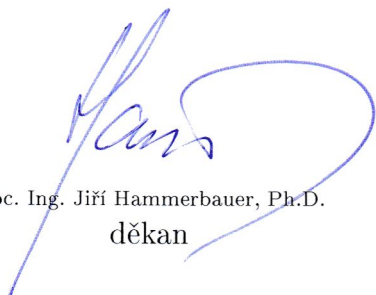
Ing. Štěpán Bláha

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

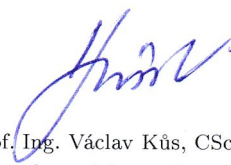
Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2015**

Termín odevzdání bakalářské práce: **2. června 2016**

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



Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry



V Plzni dne 15. října 2015

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce se v první části zabývá problematikou kompenzace. Řeší základní způsoby a zařízení, které jsou užity ke kompenzaci. V další části je přehled několika vybraných zařízení FACTS. Je zde představen základní popis principu, konfigurace a použití. V poslední části jsou popsány a porovnány moderní zařízení FACTS, které jsou založeny na výkonových měničích. V závěru jsou pak tyto vybrané systémy porovnány.

Klíčová slova

kompenzace, řízení výkonu, FACTS, účinník, aktivní filtry, sériová kompenzace, paralelní kompenzace

Abstract

First part of this thesis is focused on compensation. It deals with basic principals and devices which are used for compensation. In the next part of this thesis, some of the basic types of FACTS devices are introduced. Basic principle, configuration and applications are discussed. In the last segment, we describe and compare modern FACTS systems, which are based on power converters such as UPFC device and its variations .

Key words

Compensation, Flexible AC Transmission System, Circuit power flow, series compensation, shunt compensation, active power filters

Prohlášení

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

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



.....
podpis

V Plzni dne 29.5.2016

Jméno příjmení

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval mému vedoucímu Ing. Štěpánu Bláhovi za veškerou pomoc a věcné připomínky, které mi při zpracovávání této bakalářské práce poskytl a své rodině za jejich neochvějnou podporu po celou dobu mého studia.

Obsah

OBSAH	7
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
ÚVOD	10
1 KOMPENZACE	11
1.1 ZÁKLADNÍ PRINCIP KOMPENZACE V PŘENOSOVÉM SYSTÉMU.....	11
1.2 ZÁKLADNÍ ZPŮSOBY KOMPENZACE	14
1.2.1 Jednotlivá (Individuální) kompenzace	14
1.2.2 Skupinová kompenzace	15
1.2.3 Centrální kompenzace	16
1.2.4 Kombinovaná kompenzace	17
1.2.5 Sériová kompenzace	17
1.2.6 Paralelní kompenzace.....	19
1.3 ZÁKLADNÍ KOMPENZAČNÍ ZAŘÍZENÍ.....	20
1.3.1 Zařízení využívající kondenzátory	20
1.3.2 Rotační kompenzátory	23
1.3.3 Aktivní filtry	23
2 PŘEHLED ZAŘÍZENÍ FACTS	26
2.1 STATICKÝ VAR KOMPENZÁTOR (SVC)	26
2.1.1 Princip	27
2.1.2 Konfigurace	27
2.1.3 Použití.....	28
2.2 TYRISTOROVĚ ŘÍZENÝ SÉRIOVÝ KOMPENZÁTOR (TCSC)	28
2.2.1 Princip	28
2.2.2 Konfigurace	29
2.2.3 Použití.....	30
2.3 STATICKÝ SYNCHRONNÍ KOMPENZÁTOR (STATCOM).....	30
2.3.1 Princip	30
2.3.2 Konfigurace	31
2.3.3 Použití.....	32
2.4 STATICKÝ SYNCHRONNÍ SÉRIOVÝ KOMPENZÁTOR (SSSC)	32
2.4.1 Princip	32
2.4.2 Konfigurace	32
2.4.3 Použití.....	33
2.5 TRANSFORMÁTOR S REGULACÍ FÁZE (PST).....	33
2.5.1 Princip	33
2.5.2 Konfigurace	34
2.5.3 Použití.....	35
3 MODERNÍ ZAŘÍZENÍ FACTS	36
3.1 UNIFIED POWER FLOW CONTROLLER (UPFC)	36
3.1.1 Princip	36
3.1.2 Konfigurace	36
3.1.2 Použití.....	37
3.2 DISTRIBUTED POWER FLOW CONTROLLER (DPFC)	37
3.2.1 Princip	37
3.2.2 Konfigurace	38
3.2.3 Použití.....	38
3.3 INTERLINE POWER FLOW CONTROLLER (IPFC)	39
3.3.1 Princip	39
3.3.2 Konfigurace	39
3.3.3 Použití.....	41

4 ZÁVĚR.....	42
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....	44

Seznam symbolů a zkratk

FACTS	Flexible AC Transmission Systems
SVC	Static Var Compensator
TCSC	Thyristor-controlled Series Capacitor
STATCOM	Static Synchronous Compensator
SSSC	Static Synchronous Series Compensator
PST	Phase-shifting Transformer
UPFC	Unified Power Flow Controller
DPFC	Distributed Power Flow Controller
IPFC	Interline Power Flow Controller

Úvod

Předkládaná práce je koncipována formou rešerše se zaměřením na popis řízení toku výkonu v síti.

Práce je rozdělena do tří částí; první se zabývá základními principy a způsoby kompenzace, druhá uvádí popis vybraných zařízení FACTS, jejich základní vlastnosti a použití. Poslední část popisuje moderní systémy FACTS, které jsou založeny na výkonových měničích. V závěru jsou tyto systémy zhodnoceny a porovnány.

Rostoucí cena elektrické energie a stále obtížnější ekonomické podmínky motivují management firem k zaměření pozornosti na energetické hospodářství. Povinnost na jedné straně kompenzovat jalový výkon odebíraný z rozvodných sítí a na straně druhé zamezovat jeho zpětné dodávce je vynucena penalizacemi.

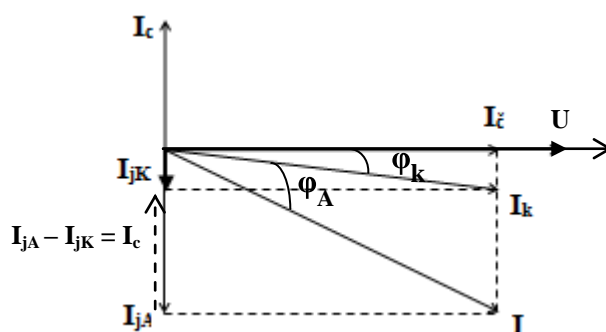
Ve světě se nedávno stalo několik výpadků, které naznačují, že konvenční přenosové systémy nejsou schopny řídit požadavky komplikovaných propojení a toků energie. Tudíž je nezbytné investovat do studií pro zlepšení bezpečnosti a stability rozvodné sítě jakož i pro zlepšení kontrolních systémů přenosové soustavy. Tato problematika je velmi aktuální zejména v souvislosti s řízením toku výkonu mezi regiony či jednotlivými státy. K tomuto účelu byl vytvořen soubor tzv. flexibilních přenosových systémů (FACTS), které mají za úkol řídit tok jalového výkonu a stabilizovat napěťové výkyvy. O těchto přístrojích bude právě pojednávat tato práce.

1 Kompenzace

1.1 Základní princip kompenzace v přenosovém systému

Každý prvek připojený do elektrizační soustavy lze popsat pomocí jeho impedance. Impedance je rozdělena na činnou a jalovou složku, přičemž jalová složka může mít kapacitní nebo induktivní charakter. energii, která je vložena do jalové složky, nelze nijak využít, ale je ji třeba vyrobit a přenést od zdroje ke spotřebiči. Kvůli tomuto problému vznikají na jednotlivých prvcích ztráty, které jsou ve formě tepla uvolňovány do okolí. Právě proto se vyrábějí zařízení, které dokážou změnit výslednou impedanci tak, aby měla ve výsledku pouze ohmický charakter. U většiny spotřebičů má jalová složka impedance induktivní charakter, tudíž se ke kompenzaci používá kapacitní složka impedance [1].

Základním prvkem pro kompenzaci je tedy obvykle kondenzátor. Na obrázku (1.1) je fázorový diagram znázorňující základní princip kompenzace.



Obrázek 1.1 Fázorový diagram kompenzace

Na spotřebiči je odebrán proud I , který je fázově posunutý o úhel φ_A . Tím pádem je odebrán i proud induktivního charakteru I_j , kde napětí U předbíhá proud o 90° .

Jelikož je účinník dán normou v rozmezí $0.95 - 1$, je po kompenzaci ze soustavy odebrán proud I_k , který má stejnou velikost činné složky I_ξ a velmi malou hodnotu I_{jK} . Velikost tohoto proudu je dána povoleným účinníkem. Pro kompenzaci tímto účinníkem připojíme do soustavy kondenzátor C_k , jehož hodnota proudu bude o velikosti I_c [1].

Pro účinník $\cos \varphi$ z obrázku 1.1 platí:

$$\cos \varphi_A = \frac{I_c}{I} = \frac{P}{S} \quad (1.1)$$

Velikost činné složky pak určuje vztah

$$I_c = I \cdot \cos \varphi \quad (1.2)$$

a pro velikost jalové složky tedy platí:

$$I_j = I \cdot \sin \varphi \quad (1.3)$$

Z obrázku (1.1) pro proud I_c tedy vyplývá že:

$$I_c = I \cdot \cos \varphi_A (tg \varphi_A - tg \varphi_k) \quad (1.4)$$

V praxi se udává hodnota kompenzačního výkonu, proto můžeme vztah 1.1 upravit do tvaru:

$$Q_c = S_{SP} \cdot \cos \varphi_A (tg \varphi_A - tg \varphi_k) = P_{SP} \cdot (tg \varphi_A - tg \varphi_k) \quad (1.5)$$

Potřebný kompenzační výkon je zde veličina Q_c . Veličiny P_{SP} a S_{SP} , reprezentují činný a zdánlivý výkon instalovaných spotřebičů. Vztah 1.2 funguje, pokud je účinník a činný příkon konstantní. Jelikož tomu tak v praxi nebývá, ukážeme si vztah pro střední hodnotu kompenzačního výkonu $Q_{stř}$ [1]:

$$Q_{stř} = \frac{\beta(Q_{\Sigma} - P_{\Sigma} \cdot \operatorname{tg}(\arccos\varphi_{stř}))}{\gamma} = \frac{\beta}{\gamma} \cdot Q_k \quad (1.6)$$

Kde β je součinitel soudobnosti a γ je poměr mezi výpočtovým a středním měsíčním zatížením. P_{Σ} a Q_{Σ} jsou celkový činný a jalový výkon a $\varphi_{stř}$ je střední průměrný, neboli požadovaný, fázový posuv[1].

V praxi se také setkáme s pojmem stupeň kompenzace k_p . Jeho výpočet je dán vztahem:

$$k_p = (1 - k) = \frac{I_j - I_{jK}}{I_j} = \frac{\operatorname{tg}\varphi_A - \operatorname{tg}\varphi_k}{\operatorname{tg}\varphi_A} \quad (1.7)$$

$$k = \frac{I_{jK}}{I_j} = \frac{\operatorname{tg}\varphi_k}{\operatorname{tg}\varphi_A} \quad (1.8)$$

Pro výpočet ztrát, které jsou ušetřeny kompenzací, tedy platí:

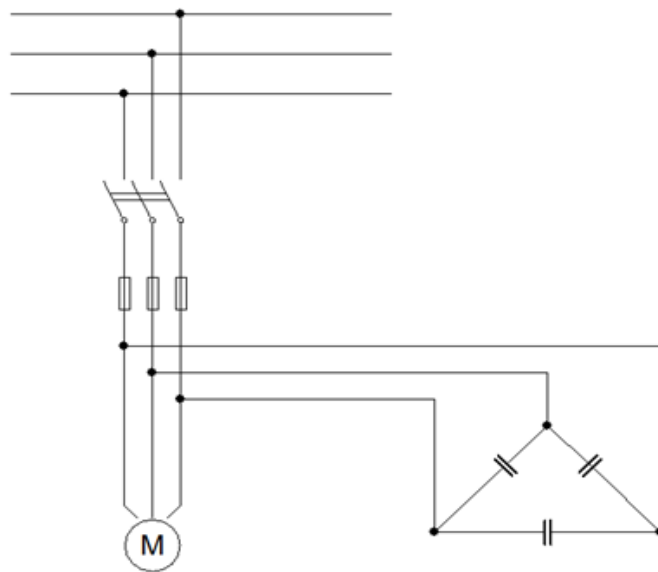
$$\Delta P_{uš} = (\Delta P_A - \Delta P_k) \frac{100}{\Delta P_A} = 100 \left(1 - \frac{\cos^2 \varphi_A}{\cos^2 \varphi_k} \right) \quad (1.9)$$

1.2 Základní způsoby kompenzace

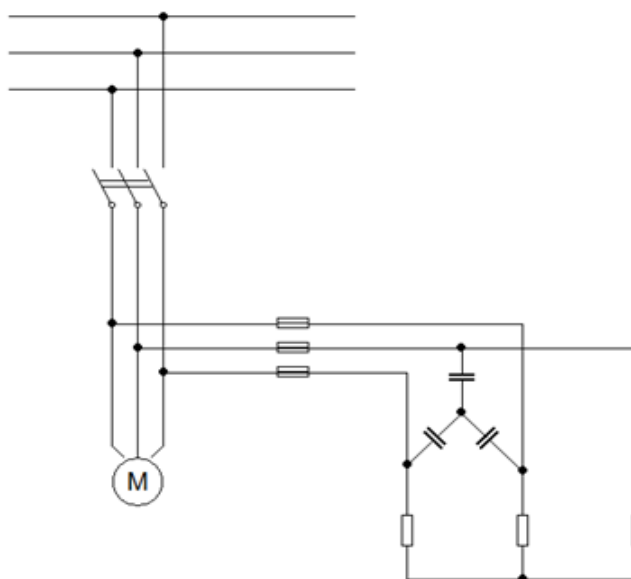
1.2.1 Jednotlivá (Individuální) kompenzace

Zařízení pro kompenzaci je připojeno přímo na svorky spotřebiče nebo v jeho těsné blízkosti. Od jalového výkonu je pak odlehčena celá soustava od zdroje až po spotřebič. Jsou zde největší úspory ztrát, ale využití kompenzačního prostředku je závislé na provozu kompenzovaného zařízení [1][5].

Norma ČSN 33 3080 uvádí, že se individuální kompenzaci musí dávat přednost [5].



Obr. 1.2 Individuální kompenzace pro síť nn



Obr. 1.3 Individuální kompenzace pro síť vn s vybíjecími odpory

Výhodou této kompenzace je odlehčení vedení až ke spotřebiči, tudíž i snížení úbytku napětí. Není zde potřeba automatická regulace jalového výkonu, jelikož výkon kondenzátoru je navržen podle výkonu spotřebiče. Nevýhodou je možnost překompenzování u spotřebiče s měnícím se zatížením, navíc vzhledem k rozptýlenému umístění kondenzátorů je kontrola a údržba obtížnější [5].

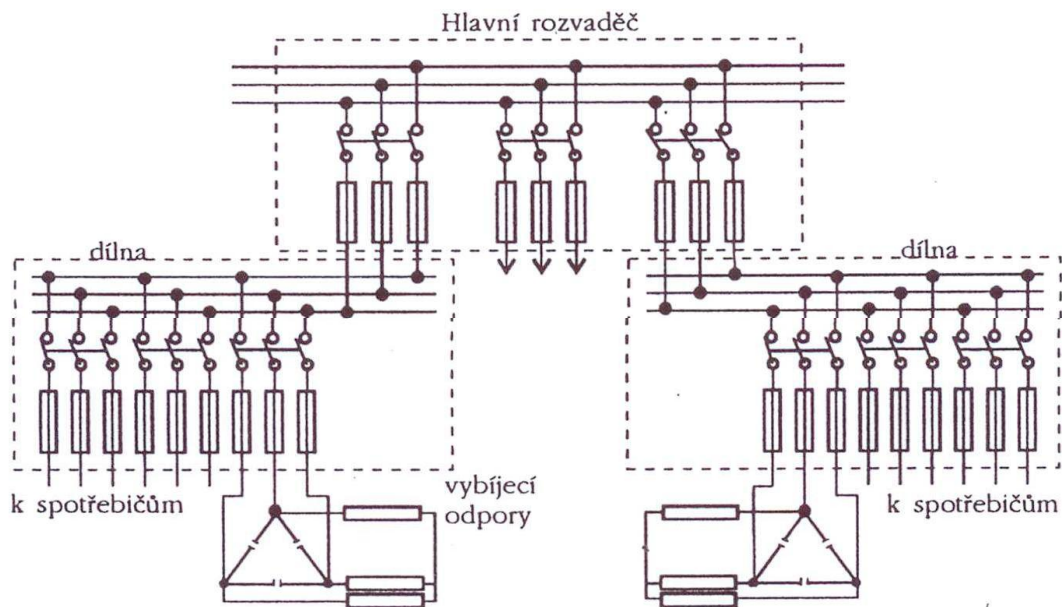
Používá se pro motory nad 5kW s vysokým časovým využitím [5].

1.2.2 Skupinová kompenzace

Kompenzační baterie se připojují na přípojnice skupinového napájecího rozvaděče několik spotřebičů. Velikost baterie je navržena na kompenzaci soudobého odebíraného výkonu (ne součtu instalovaného výkonu spotřebičů). Baterie je většinou rozdělena na více samostatně ovladatelných skupin kondenzátorů, tzv. stupňů. Je zde odlehčen úsek vedení od rozvaděče ke zdroji a oproti individuální kompenzaci je zde lepší využití instalovaných kondenzátorů. Nicméně nevýhodou je, že není kompenzováno vedení od skupinového rozvaděče ke spotřebiči a je zde nutnost automatické regulace jalového výkonu [1][5].

Tento typ kompenzace se používá nejčastěji v rozvodech nízkého napětí a skupiny

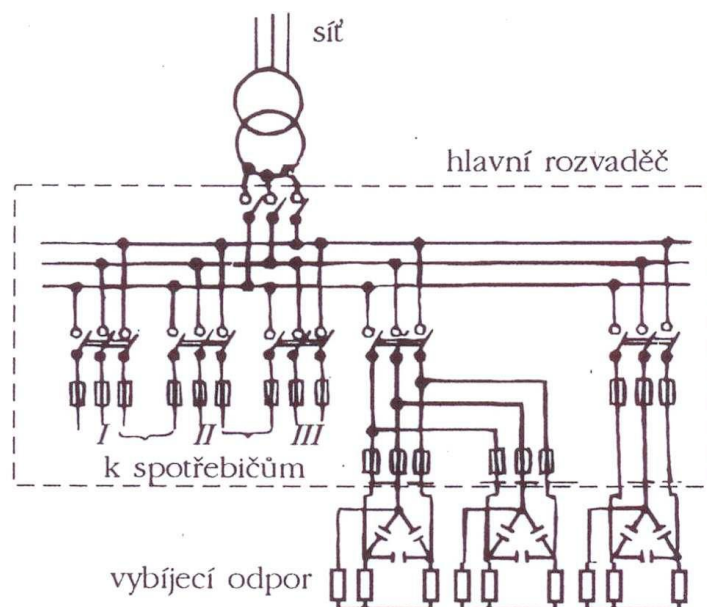
motorů s výkonem pod 5 kW, s nízkým časovým využitím [5].



Obr. 1.4 Skupinová kompenzace [5]

1.2.3 Centrální kompenzace

Kompenzační zařízení je přímo připojeno na přípojnicích vstupní trafostanice. Obvykle řešeno na straně vysokého napětí, což představuje vyšší náklady. Velikost dodávaného jalového výkonu se reguluje automaticky pomocí regulátorů jalového výkonu [1][5].



Obr. 1.5 Centrální kompenzace [5]

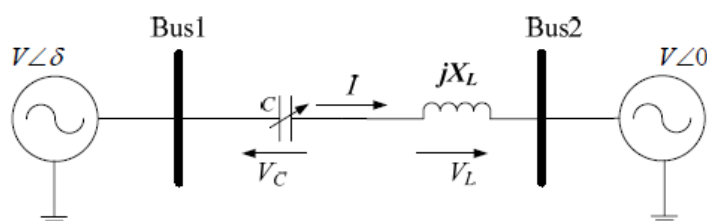
1.2.4 Kombinovaná kompenzace

Kombinovaná kompenzace je nejčastějším řešením kompenzace účinníku v průmyslových závodech. Například v průmyslovém závodě se u velkých motorů s trvalým chodem použije individuální kompenzace, u skupin malých motorů s kratší dobou chodu se použije skupinová kompenzace a v hlavní transformovně se postupně kompenzuje na požadovanou hodnotu účinníku centrální kondenzátorovou baterií [1].

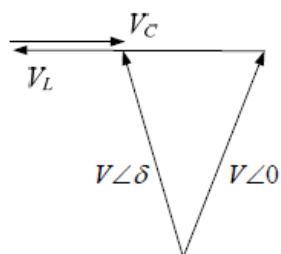
1.2.5 Sériová kompenzace

Tento typ kompenzace se realizuje sériovým připojením kondenzorů na přenosovou síť, kde ovlivňuje celkovou impedanci sítě a tím omezuje přenos výkonu. Instalace kapacitní reaktance v sérii v dlouhé (obvykle více než 200 km) přenosové lince sníží úhlovou odchylku a pokles napětí, což zvyšuje zatížitelnost a stabilitu linky. Nevýhodou při nasazení sériové kompenzace je zmenšení podélné impedance vedení, tím možnost omezení zkratových proudů a při nadproudech, zvláště při zkratech, na nich vzniká přepětí. Proto je nutné kondenzátor dimenzovat na procházející proud a chránit ho před přepětím.

Na obrázku (1.6) je zjednodušený model přenosové linky se sériovou kompenzací. Amplitudy v obou uzlech jsou si rovny a jsou reprezentovány veličinou V . Fázový posun mezi nimi je reprezentován veličinou δ . Reaktance X_L reprezentuje přenosové vedení, u kterého je předpoklad, že je bezztrátové. Veličiny V_C a V_L označují napětí na kondenzátoru a indukčnosti [4][9].



Obrázek 1.6 Schéma sériové kompenzace[4]



Obrázek 1.7 Fázový diagram sériové kompenzace[4]

Jak je možno vidět na obrázku (1.7) napětí na kondenzátoru má opačný směr, oproti úbytku napětí na přenosovém vedení. Z toho vyplývá, že dojde ke snížení úbytku napětí na vedení.

Vztah (1.10) udává vztah mezi reaktancí vedení X_L a reaktancí kompenzačního kondenzátoru X_C .

$$X_C = kX_L$$

$$X = X_L - X_C = (1 - k)X_L \quad (1.10)$$

Vztah pro činný výkon přenesený vedením je definován v rovnici (1.11). Část jalového výkonu dodána kondenzátorem je definována vztahem (1.12).

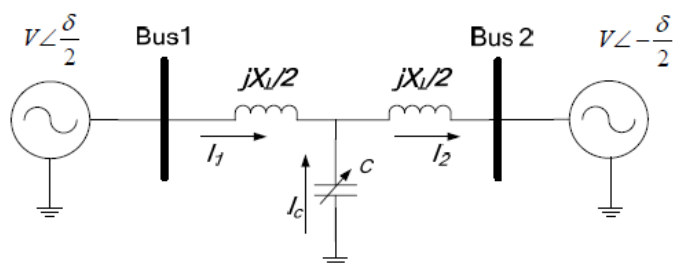
$$P = \frac{V^2}{(1 - k)X_L} \sin \delta \quad (1.11)$$

$$Q_c = 2 \frac{V^2}{X_L} \frac{k}{(1-k)^2} (1 - \cos \delta) \quad (1.12)$$

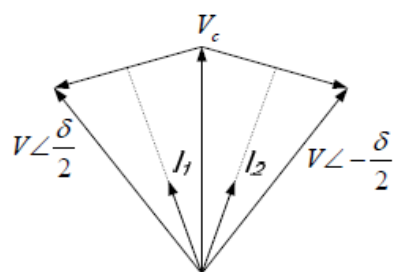
1.2.6 Paralelní kompenzace

Tato kompenzace se provádí pouze v části mezi zdrojem a připojení kompenzačního zařízení. Je určena ke zlepšení přívodních parametrů provozu, zlepšení kvality napětí a stability systému. Paralelně zapojené indukčnosti se používají pro snížení přepětí na vedení tím, že spotřebovává jalový výkon, zatímco paralelně připojené kondenzátory se používají k udržení úrovně napětí pomocí kompenzace jalového výkonu na vedení. Používá se pro vysokonapěťové přenosové sítě [4].

Na obrázku (1.8) je zjednodušený model přenosové sítě s paralelní kompenzací. Základní předpoklad je, že přenosové vedení je bezztrátové a amplitudy o velikosti V se v obou uzlech se rovnají. Fázový uhel posunutí mezi napětími je vyjádřen veličinou δ . Přenosové vedení je reprezentováno reaktancí X_L . Doprostřed přenosového vedení je paralelně připojen říditelný kompenzační kondenzátor C , kde jeho amplituda napětí v bodě V_C , dosahuje velikosti napětí V [9].



Obrázek 1.8 Schéma paralelní kompenzace [4]



Obrázek 1.9 Fázový diagram paralelní kompenzace [4]

Jak již bylo zmíněno výše, amplitudy napětí v obou uzlech se rovnají. Z toho plyne vztah (1.13) pro činný výkon v uzlu.

$$P_1 = P_2 = 2 \frac{V^2}{X_L} \sin \frac{\delta}{2} \quad (1.13)$$

Jalový výkon dodávaný do středu vedení prostřednictvím kondenzátoru je dán vztahem (1.14).

$$Q_c = 4 \frac{V^2}{X_L} (1 - \cos \frac{\delta}{2}) \quad (1.14)$$

1.3 Základní kompenzační zařízení

Nejčastěji používaným prostředkem ke kompenzaci účinníku jsou kondenzátory, resp. kondenzátorové baterie. Ke kompenzaci se používají i jiné prostředky, např. synchronní kompenzátory nebo aktivní filtry [1].

1.3.1 Zařízení využívající kondenzátory

Pro kompenzaci účinníku se v síti využívají kompenzační rozvaděče. Ty obsahují kompenzační kondenzátory, baterie kondenzátorů, jistící, spínací prvky, regulátory jalového výkonu, popřípadě i filtrační tlumivky nebo hradící členy. Pomocí stykačů nebo vypínačů jsou ke kompenzovanému zařízení připojeny jednotlivé či celé baterie kondenzátorů. Stykače a vypínače jsou řízeny regulátorem jalového výkonu, který se řídí podle okamžité hodnoty jalového výkonu. Pokud je v síti vyšší obsah rušení, jsou kompenzační zařízení doplněna o filtry vyšších harmonických [5].

- **Kompenzační kondenzátory**

Kompenzační kondenzátory pro síť nn využívají 3f nebo 1f jednotky, které jsou zapojeny na sdružené napětí, tedy do trojúhelníka. U kompenzování v síti vn se využívají zapojení do hvězdy, které mají menší napěťové nároky.

U těchto zařízení je důležité sledovat hlavně teplotu, proud a napětí. Pokud by

zařízení mělo vyšší hodnotu provozního napětí, mohlo by dojít k přetížení kondenzátorů. Toto může nastat například při umístění tohoto zařízení v blízkosti transformátoru nebo při výskytu vyšších harmonických v síti. Velikost proudu, je také nutné kontrolovat z důvodu přetížení, jelikož nesmí trvale překročit hodnotu 143% jmenovitého proudu, které by mohli mít pro přístroj trvalé následky. Pokud by naopak proud klesl pod hodnotu jmenovitého proudu, je možné, že by poklesla kapacita kondenzátoru v důsledku poruchy nebo stárnutí [1][5].

- ***Regulátory jalového výkonu***

V minulosti se ve starších kompenzátorech používaly elektromechanické regulátory, pracující na principu běžných elektroměrů. Dnes již jsou modernější elektronické regulátory, ale nicméně i ty jsou postupně nahrazovány mikroprocesorovými regulátory. Nevýhodou většiny elektronických regulátorů je, že měří pouze časový rozdíl mezi průchody proudu a napětí, tedy fázový posun.

Dříve bylo využíváno tzv. váhové spínání, kdy byly jednotlivé kompenzační stupně spínány v řadě za sebou, ale dnes se od toho upouští. Moderní regulátory používají tzv. kruhové spínání, kde jsou kompenzační stupně voleny přibližně stejně velké. V některých případech mají první dva stupně, které jsou nejčastěji spínány, poloviční výkon. Při kruhovém spínání se zásadně vypíná stupeň nejdéle zapnutý a zapíná se stupeň nejdéle vypnutý. Výhodou tohoto spínání je snížení průměrného počtu spínacích operací a zvýšení životnosti spínacích prvků [5].

- ***Individuálně připojené kondenzátory***

V současné době se používají pouze ke kompenzaci jalového výkonu naprázdno silových transformátorů, nebo velkých motorů na hladině vn (kompenzační výkon odpovídá většinou jalovému výkonu motoru naprázdno). Kompenzace pomocí nechráněných kondenzátorů není možné použít v průmyslových sítích s vyššími úrovněmi energetického rušení, zejména se zvýšeným obsahem vyšších harmonických. Stabilně připojené nechráněné kondenzátory odsávají ze sítě vyšší harmonické proudy, tím se nadměrně zahřívají a jsou potom častým zdrojem poruch. V dnešní době se v

průmyslových sítích upřednostňují chráněné kondenzátory (kondenzátory doplněné ochrannými tlumivkami nebo hradicími členy) [5].

- ***Stupňovitě spínané kompenzátory s prostými kondenzátory***

V současné době se tento způsob kompenzace nejčastěji používá pro průmyslovou síť nízkého napětí. Jedná se o několik spínaných kompenzačních stupňů, které se postupně připojují pomocí regulátoru jalového výkonu. Po každé, když se připojí další stupeň, nastane přechodový děj, kde frekvence a amplituda jsou dány počátečním napětím připínaného kondenzátoru. Při tomto jevu je také důležitá impedance mezi zapnutým a připínaným kondenzátorem a okamžik sepnutí. Problém této impedance je v tom, že je poměrně mála a tudíž při každém připojení dalšího stupně vzroste nabíjecí proud na stonásobek jmenovité hodnoty [5].

Řešení spočívá v zařazení vhodné impedance do série společně s kondenzátorem nebo v pomoci speciálně stavěných stykačů, které mají odporové spínání, což je vhodnější [5].

- ***Plynule řízené kompenzační filtry***

Mezi technicky nejdokonalejší kompenzační prostředky dnes patří plynule řízené kompenzační filtry. Zařízení se skládá z kombinace několika kompenzačních filtrů a tzv. dekompenzačního členu, který je realizován řízenou tlumivkou. Velikost kompenzačního výkonu filtrů nelze měnit zvyšováním nebo snižováním kapacity kondenzátoru, neboť by došlo k rozladění LC obvodu. Regulace výsledného kompenzačního výkonu je realizována fázově řízeným spínačem napětí, na který je připojena dekompenzační tlumivka. Pomocí tlumivky lze kompenzační výkon filtrů pouze snížit [5].

Toto zařízení se používá nejčastěji pro dynamickou kompenzaci jalového výkonu a filtraci vyšších harmonických [5].

1.3.2 Rotační kompenzátory

V praxi se jedná o synchronní motor pracující naprázdno. Dodávku jalové energie je možné měnit změnou jeho buzení. Pokud se nachází v přebuzeném stavu, představuje synchronní motor zdroj indukční jalové energie.

Rotační kompenzátory jsou především používány v rozvodných a přenosových sítích vn a vvn pro kompenzování jalových výkonů, regulaci napětí a pro udržování stability sítě. Do sítě jsou zapojeny přes transformátor se třemi vinutími. Oproti kondenzátorům se u synchronních kompenzátorů při poklesu napětí zvyšuje odebíraný kapacitní jalový výkon, tím se zmenšuje úbytek napětí v síti a napětí se udržuje. V rozsáhlejších průmyslových sítích rotační kompenzátory plní funkci centrální kompenzace na hlavní vstupní rozvodně.

Jelikož synchronní kompenzátory obsahují pohyblivé části, jsou více náchylné k poruchám a je potřeba vyšší míra údržby. Zároveň nepotlačují ani nezvýrazňují harmonické zkreslení, nemohou tedy filtrovat vyšší harmonické složky. Z těchto důvodů jsou postupně nahrazovány statickými kompenzačními prostředky [5].

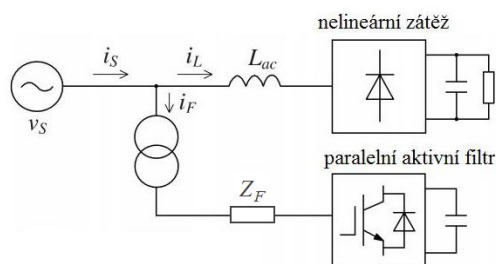
1.3.3 Aktivní filtry

Aktivní filtry jsou v poslední době nejčastěji diskutovaným technickým prostředkem pro zajištění kompatibility ve výkonových systémech. Kromě kompenzace jalového výkonu plní i jiné funkce, např. odstranění kolísání napětí, potlačení zkreslení napětí vyššími harmonickými, potlačení vyšších harmonických v síti, symetrizaci napětí [5].

Základní druhy filtrů jsou:

- ***Paralelní filtr (derivační)***

Hlavní součástí paralelního filtru je ve většině případů výkonový měnič, který je paralelně připojen ke kompenzované soustavě. Připojení ke kompenzované soustavě je provedeno pomocí kombinace oddělovacího transformátoru a pasivního filtru typu L, LC nebo LCL. Základní zapojení je na obrázku (1.10) [9].

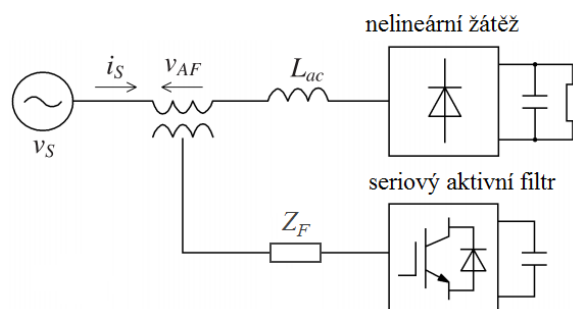


Obrázek 1.10 Struktura paralelního filtru [9]

Základní funkce paralelního filtru spočívá v odečtení 1. harmonické složky proudu od neharmonické části. Tak se získají zbytkové složky proudu, které jsou potřeba kompenzovat [9].

- **Sériový filtr**

Sériový filtr je nejčastěji používán pro kompenzování napěťových špiček, poklesů napětí a symetrizování napětí. Na rozdíl od paralelního filtru neumožňuje práci s veličinou proudu ale pouze s napětím. Zapojení je podobné jako u paralelního filtru s tím rozdílem, že transformátor je zapojen sériově do série (viz. obrázek 1.11). Pasivní filtr typu L, LC nebo LCL, který eliminuje pulzní průběh napětí způsobený měničem je na obrázku označen jako Z_f [9].

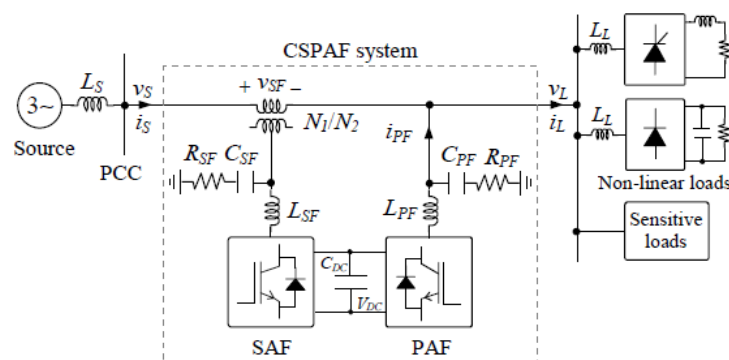


Obrázek 1.11 Struktura sériového filtru [8]

Základní funkcí tohoto filtru je generování požadovaného napětí, které je přičteno k napětí sítě. Výsledný součet napětí je pak napětí na zátěži.

- **Kombinovaný filtr**

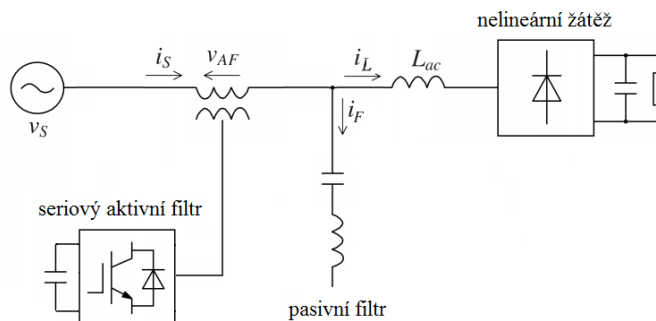
Kombinovaný filtr je kombinací sériového a paralelního filtru (viz. obrázek 1.12). Výhodou tohoto spojení je, že umožňuje kompenzaci vyšších harmonických složek napětí i proudu [9].



Obrázek 1.12 Struktura kombinovaného filtru [9]

- **Hybridní filtr**

Hybridní filtr je kombinací sériového aktivního filtru a pasivního filtru. Výhodou tohoto spojení je, že pasivní filtr eliminuje určité dominantní harmonické složky a snižuje tak nároky na část spojení s aktivním filtrem. Na obrázku (1.13) je vidět zjednodušená struktura tohoto zařízení [9].



Obrázek 1.13 Struktura hybridního filtru [9]

2 Přehled zařízení FACTS

Termín FACTS označuje veškeré systémy na bázi výkonové techniky ve střídavé síti. Do této kategorie spadá velké množství zařízení, které zvyšují přenosovou schopnost vedení a zlepšují říditelnost a stabilitu přenosové soustavy. FACTS se skládají z prvků statických, jako jsou například tlumivky nebo kondenzátory a z prvků výkonové elektroniky [3].

Výhodou těchto zařízení je jejich rychlá odezva. Jsou vhodné tam, kde je zapotřebí často měnit a plynule regulovat výstup [2].

Základními zařízeními FACTS jsou:

- *Static VAR Compensator (SVC)*
- *Thyristor-controlled Series Capacitor (TCSC)*
- *Static Synchronous Compensator (STATCOM)*
- *Static Synchronous Series Compensator (SSSC)*
- *Phase-shifting Transformer (PST)*

2.1 Statický VAR kompenzátor (SVC)

Statické kompenzátory jsou hojně využívány pro řízení jalového toku v přenosových sítích, především za účelem regulace napětí. Oproti dříve používaným rotačním kondenzátorům je zde absence pohyblivých částí a z tohoto důvodu jsou méně náročné na údržbu. Vyznačují se také rychlou odezvou a flexibilní regulací díky jeho tyristorovému řízení [2].

Během let bylo vyrobeno velké množství a druhů těchto zařízení. Nicméně většina z nich je sestavena z kombinací těchto prvků:

- *Tyristorově řízená tlumivka (Thyristor-controlled Reactor - TCR)*
- *Tyristorově spínané tlumivky (Thyristor-switched Reactor - TSR) nebo kondenzátory (Thyristor-switched Capacitor - TSC)*
- *Mechanicky spínané kondenzátory (Mechanically switched capacitor – MSC)*

2.1.1 Princip

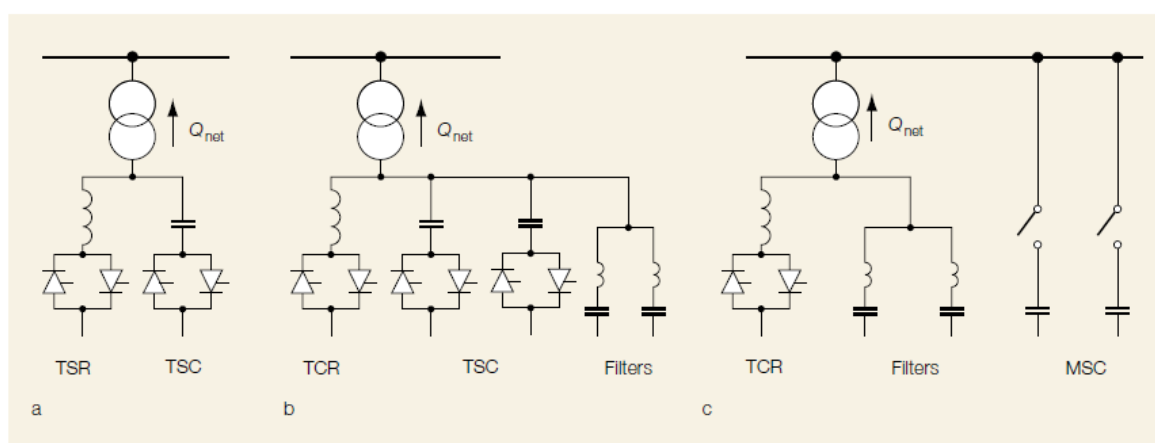
V případě TCR se jedná o tyristorové řízenou tlumivku, typicky se vzduchovým jádrem, která je sériově připojena k obousměrné tyristorové propusti. Základní kmitočet proudu se mění fázovým řízením tyristorů. Rozdíl mezi tyristorem řízenou a tyristorem spínanou tlumivkou je právě ve fázovém řízení kmitočtu, kde TSR, na rozdíl od TCR, nemá žádné vyšší harmonické proudy.

Tyristorově spínané kondenzátory TSC jsou také sériově připojeny k obousměrné tyristorové propusti. Funkce tyristorového přepínače je zde pouze k připojení nebo odpojení kondenzátoru. Frekvenci a amplitudu proudu zde můžeme ladit právě kondenzátorem TSC [6].

Mechanicky spínané kondenzátory MSC, se skládají z laděné větve obsahující kondenzátorovou a indukční jednotku. Jsou navrženy tak, aby nebyly zapnuty více než několikrát denně, přepínání je realizováno jističi. Účelem MSC je uspokojení poptávky po ustáleném jalovém výkonu [2][6].

2.1.2 Konfigurace

U systému SVC můžeme mít několik konfigurací kombinujících základní prvků zmíněných výše a harmonických filtrů pro odladění vyšších harmonických. Na obrázku (2.1) je ukázka několika příkladů.



SVC configurations used to control reactive power compensation in electric power systems



- a TSR-TSC configuration
- b TCR-TSC configuration
- c TCR-MS configuration

Q_{net} Net reactive power flow to network

Obrázek 2.1 Výkonové schéma zařízení SVC v různých konfiguracích [2]

2.1.3 Použití

Významnými vlastnostmi SVC jsou například omezení rušivých vlivů na síť, zvýšení přenosové schopnosti, dynamická stabilizace napětí a omezení jeho kolísání. Dále pak zlepšení celkové stability systému a podpora napětí v ustáleném stavu.

Typicky jsou SVC dimenzovány tak, že jsou schopny měnit napětí systému alespoň $\pm 5\%$. To znamená, že dynamický provozní rozsah je obvykle asi od 10% do 20% zkratového výkonu v místě společného připojení (point of common connection - PCC).

Pro instalaci SVC jsou 3 vhodné lokace. První z nich jsou v blízkosti hlavních center spotřeby, jako například ve velkých městských aglomeracích, další mohou být poblíž kritických rozvodů, obvykle v odlehlých místech rozvodné sítě a třetí mohou být na přívodu napájení u velkého průmyslového nebo trakčního spotřebiče.

Jako příklad použití si můžeme uvést instalaci SVC v rozvodně Sylling poblíž města Osla v jižním Norsku. Tato rozvodna je dimenzována na ± 160 MVar a je připojena k 420 kV rozvodně na jihozápadní části města. Pokud se v síti vyskytne zkrat, SVC zde detekuje pokles ve výsledném napětí a okamžitě změní svoji impedanci tak, aby ve městě obnovil napětí. Výsledkem této chyby ostatní generátory začnou vyrábět jalový výkon, aby obnovily napětí v místě zdroje. SVC zde zajišťuje oddělení města od vlivů chyby, která se udála, ve vnější části rozvodné sítě [2][3].

2.2 Tyristorově řízený sériový kompenzátor (TCSC)

Další ze zařízení ze skupiny FACTS označovaného jako TCSC se používá ve spojení se sériovou kompenzací. Sériové kondenzátory se úspěšně používají již mnoho let k tomu, aby zlepšily stabilitu a přenosovou schopnost vysokonapěťových sítí. Pomáhá také řídit toky výkonů a zlepšuje rozdělení přenášených výkonů u paralelních vedení. S rozvojem výkonové elektroniky došlo také k možnosti řídit tuto sériovou kompenzaci vysokonapěťovými tyristory [2][16].

2.2.1 Princip

Základní princip sériového kompenzátoru je, v přidání kondenzátoru do sítě, jenž má charakter kapacitního napětí, které kompenzuje induktivní napěťové poklesy. To zajistí, že se sníží efektivní reaktance přenosové sítě [2].

System TCSC může pracovat v několika modech:

- ***Bypass mód***

Pokud je tyristorová propust spuštěna nepřetržitě, TCSC se tedy bude chovat jako, paralelní spojení sériové kombinace kapacity a tlumivky s tyristorovou propustí.

V tomto módu je kapacitní napětí mnohem menší než v modu blokovacím, je tedy využíván hlavně ke snížení kapacitní zátěže během poruch [16].

- ***Mód kapacitního zesílení***

Na tyristor je aplikován spouštěcí impuls chvilku, předtím než projde napětí na kapacitě nulou. To nám dovolí, aby proud tekla přes indukční větev a přidal se ke kapacitnímu proudu. Toto způsobí zvýšení reaktance na kapacitě, bez toho aniž by byla přidána další přídavná kapacita [16].

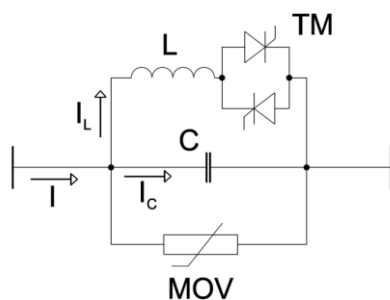
- ***Blokovací mód***

Pokud tyristorová propust není spuštěna, nedochází k vedení proudu a TCSC tedy operuje v blokovacím režimu. Proud na vedení bude procházet pouze kapacitorem.

V tomto módu se TCSC chová stejně jako sériový kondenzátor se zesílením rovnému 1 [2] [16].

2.2.2 Konfigurace

Tento druh kompenzačního systému se skládá z paralelního zapojení tlumivky, která je řízena tyristory, ke kondenzátoru, který je připojen sériově do regulovaného obvodu. Toto zapojení umožňuje rychlou změnu reaktance a tím ovlivnit i přenášený výkon. Kromě regulace přenášeného výkonu se tento regulátor osvědčil i v omezování poruchových proudů. Součástí zařízení je i varistor, který zde slouží jako ochrana před přepětím [2][3].



Obrázek 2.2 Schéma zařízení TCSC (L-tlumivka, TM-tyristorový můstek, C-kondenzátor, MOVvaristor) [3]

2.2.3 Použití

Poprvé bylo toto zařízení použito v roce 1991, když Americká firma ABB Power Systems použila tyristory pro řízení jedné fáze sériové kapacitní banky, která byla instalována na 345 kV vedení poblíž města Charleston v západní Virginii [15].

Další zařízení 107 MVAR, bylo nainstalováno v Brazílii v roce 1999 při propojování severní a jižní elektrizační soustavy. Konkrétně se jednalo o rozvodnu Imperatriz, kde bylo zapotřebí tlumit nízkofrekvenční oscilace, které destabilizovali celou elektrizační soustavu [3].

2.3 Statický synchronní kompenzátor (STATCOM)

Statický synchronní kompenzátor neboli STATCOM, je regulační zařízení používané ve střídavých přenosových soustavách pro řízení jalového výkonu a stabilizaci napětí. Oproti podobnému regulačnímu zařízení SVC má rychlejší časovou odezvu (<10 ms) a lepší provozní charakteristiky. Z tohoto důvodu dokáže efektivně kompenzovat v reálném čase [2][7].

2.3.1 Princip

Zařízení STATCOM může do sítě dodávat či odebírat jalový výkon. Velikost dodávaného či odebíraného výkonu závisí na velikosti amplitudy napětí dodávaného z měniče a velikosti amplitudy napětí soustavy. Pokud je amplituda napětí měniče větší než

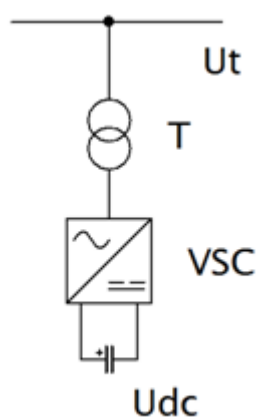
napětí soustavy, zařízení dodává do soustavy jalový výkon. Pokud by byla amplituda napětí soustavy větší než měniče, je jalový výkon ze soustavy odebírán. V tomto zařízení, je zajištěno, že je výstupní proud z měniče fázově posunut o 90° oproti napětí, proto je možné výstupní jalový výkon řídit [7].

2.3.2 Konfigurace

Zařízení STATCOM se skládá z trojfázového měniče napětí VSC, napájeného ze stejnosměrného zdroje a vazebního transformátoru. V některých případech může být stejnosměrný zdroj nahrazen stejnosměrným kondenzátorem. Filtry zde nejsou potřeba z důvodu nízkých hodnot vyšších harmonických [2].

- **Měnič VSC**

Důležitou součástí tohoto systému je měnič VSC (Voltage source converter). Obvod měniče se skládá z 12 tranzistorů IGBT(nahradily dříve požívané GTO tyristory), 12 zpětných diod a 2 kondenzátorů. Jedná se tedy o 12-pulzní trojfázový střídač. Zpětné diody umožňují usměrňovací chod, ten je důležitý právě proto, když je jalový výkon ze soustavy vrácen zpět do zdroje. Řízení je zde realizováno pomocí pulzní šířkové modulace (PWM). Výhodou tohoto zařízení je možnost řídit frekvenci, amplitudu i fázi výstupního napětí. Je možné tento měnič nahradit i proudovým měničem CSC, který je více rozveden v [7].



Obrázek 2.3 Základní schéma zařízení STATCOM (U_t -napětí soustavy, T-transformátor, VSC-Napěťový střídač, U_{dc} -stejnsměrný zdroj, MOV-varistor)

2.3.3 Použití

Toto zařízení je využito podobně jako SVC například pro zlepšení přenosové schopnosti sítě, omezení kolísání napětí, dynamickou stabilizaci ve slabých místech, podporu napětí v ustáleném stavu nebo zlepšení tlumení výkonových oscilací. V praxi je možné setkat se s kombinací SVC a STATCOMU, kde SVC dodá skokově hodnotu jalového výkonu a STATCOM doladí postupně výkon do požadované hodnoty [7].

Ve světě bylo toto zařízení instalováno například v roce 2001 do rozvodny v Essexu na východě Anglie firmou Vermont Power Electric (VELCO). Přístroj byl dimenzován na +133/44 MVA výkonu a 115 kV napětí. Instalace byla provedena z důvodu nutnosti kompenzace jalového výkonu a dynamické stabilizace napětí [15].

2.4 Statický synchronní sériový kompenzátor (SSSC)

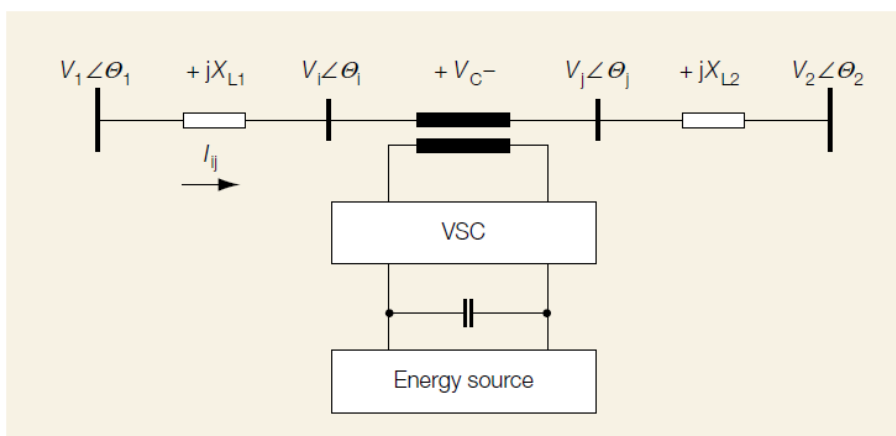
Zařízení SSSC, podobně jako STATCOM, využívá výkonový měnič VSC. Nicméně v tomto případě je měnič připojen pomocí přídavného transformátoru sériově k vedení (viz. obrázek 2.4).

2.4.1 Princip

Za předpokladu, že je připojen přídavný zdroj je zařízení schopno řídit činný i jalový výkon. Vstřikovaný jalový výkon může mít kapacitní nebo induktivní charakter, to je zajištěno napěťovým měničem. Nicméně pokud je nutné kompenzovat pouze jalový výkon, není přídavného zdroje potřeba. V tomto případě lze řídit pouze amplitudu protékajícího napětí, jelikož je fázový posuv proudu kolmí na napětí. Pokud je přídavný zdroj dostatečně velký, je možné, aby u dodávaného napětí možno řídit velikost amplitudy i fáze[2] [3].

2.4.2 Konfigurace

Na obrázku (2.4) je zjednodušené schéma tohoto zařízení s paralelně připojeným přídavným zdrojem napětí. Vstřikované napětí měničem je označeno jako V_c . Vedení má charakter zdroje napětí v zapojení se sériovou impedancí.



Obrázek 2.4 Konfigurace zařízení SSSC [2]

2.4.3 Použití

Typicky se toto zařízení využívá například k regulaci a stabilizaci napětí, k řízení toků činného výkonu nebo omezení vlivů vyšších harmonických pomocí filtrace. Tento typ systému se často využívá v zapojení se zařízením STATCOM, společně tak tvoří další typ zařízení s názvem UPFC, o kterém více v kapitole moderních zařízení FACTS [2].

2.5 Transformátor s regulací fáze (PST)

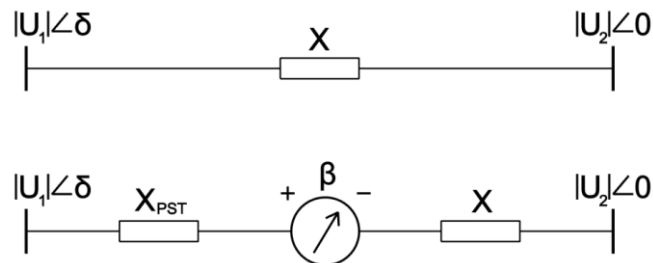
Další zařízení sloužící k řízení toku výkonů je transformátor s regulací fáze. Toto zařízení dokáže řídit velikost i směr výsledných výkonových toků pomocí fázových posunu v sériovém transformátoru.

Zařízení je připojeno přímo na vývody vedení v rozvodnách velmi vysokého napětí a výše [6].

2.5.1 Princip

Jak napovídá název, řízení výkonů je zde dosaženo pomocí změny fázového posuvu mezi napětím na začátku a na konci vedení. Fázového posuvu je docíleno sériovým převedením části napětí jedné fáze na fázi druhou. To je splněno paralelním zapojením regulačního a sériovým zapojením sériového transformátoru [6].

Na obrázku (2.5.1) je zjednodušené náhradní schéma tohoto zařízení na přenosovém vedení, kde je transformátor PST nahrazen reaktancí X_{pst} s přidavným regulačním úhlem β [3].



Obrázek 2.5.1 Náhradní schéma PST v přenosové lince [3]

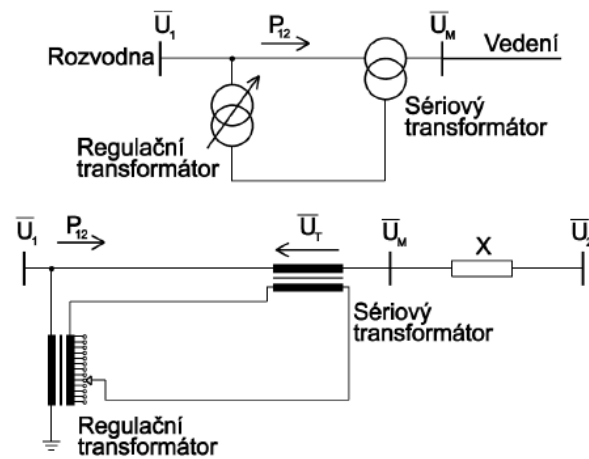
Výsledný výkon se tedy dá odvodit jako:

$$P = \frac{U_1 \cdot U_2}{X - X_{PST}} \cdot \sin(\delta + \beta) \quad (2.1)$$

Změnou regulačního úhlu, je tedy možné ovlivňovat toky výkonů.

2.5.2 Konfigurace

Na obrázku (2.5.2) je zjednodušené základní schéma zařízení PST. Zařízení se skládá z regulačního a sériového transformátoru. Regulační transformátor je zapojen paralelně k vedení, kde získává fázové napětí U_I . Fázový posun výstupního napětí je zde zajištěn zavedením regulačního napětí U_T do sériového transformátoru [3].



Obrázek 2.5.2 Konfigurace transformátoru s regulací fáze [3]

2.5.3 Použití

Hlavní využití těchto transformátorů je převážně v přerozdělování toku činných výkonů, čímž je docílena větší stabilita a přenosová schopnost vedení. Jejich instalace je v současnosti nejvíce využívána na mezistátních vedeních, v Evropě například na linkách mezi Francií a Španělskem, kde docházelo k přetěžování vedení. V Americe se s tímto přístrojem můžeme setkat například v Portlandu, Oregonu, kde mají fázový posun 30° nebo Saco Valley, New Hampshire, kde je fázový posun 40° [2][3].

3 Moderní zařízení FACTS

Tato kapitola bude pojednávat o moderních zařízeních, ze skupiny přístrojů FACTS. Těchto zařízení je nepřeberné množství, v této kapitole jsou vybrána jen zařízení pracující na principu výkonových měničů:

- *Unified Power Flow Controller (UPFC)*
- *Interline Power Flow Controller (IPFC)*
- *Distributed Power Flow Controller (DPFC)*

3.1 Unified Power Flow Controller (UPFC)

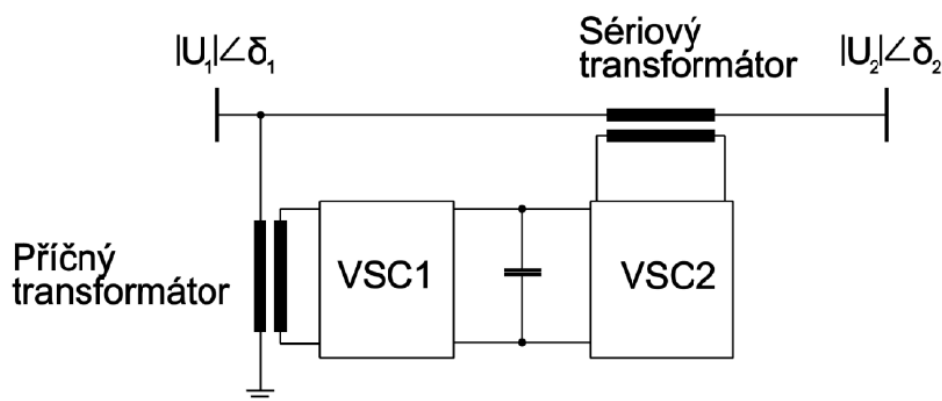
V současné době je jedním z nejvýkonnějších zařízení typu FACTS, zařízení UPFC. Zařízení se skládá z kombinace zařízení STATCOM a zařízení SSSC. Díky tomuto zapojení je možno provádět jak kompenzací paralelní, tak i kompenzací sériovou. Jedná se o jedno z nejuniverzálnějších zařízení tohoto druhu a z jeho principu vycházejí další zařízení IPFC a DPFC [13].

3.1.1 Princip

Jak bylo zmíněno v předchozí kapitole zařízení STATCOM i SSSC v sobě obsahují napěťový resp. proudový měnič. V tomto případě hlavní funkci přebírá měnič v zařízení SSSC (VSC2), tím že přes transformátor přivádí na vedení střídavé napětí s regulovatelnou amplitudou a fází, které se prostřednictvím sériového transformátoru přičítá ke zdroji napětí sítě. Funkcí měniče (VSC1) je, že absorbuje reálný výkon ze sítě nebo dodává výkon do měniče VSC2 [9][13].

3.1.2 Konfigurace

Zařízení se skládá z dvou výkonových měničů, kde je první měnič veden přes příčný transformátor a druhý přes sériový transformátor. Stejnoseměrný meziobvod, který propojuje oba měniče, je tvořen kondenzátorem. Výkonové měniče jsou více popsány v předešlé kapitole (viz. zařízení STATCOM) [14].



Obrázek 3.1 Konfigurace zařízení UPFC [3]

3.1.2 Použití

Použití tohoto zařízení různá, dokáže provádět kompenzaci účinníku, regulaci odběru výkonu ze zdroje, či pracovat jako aktivní filtr. V praxi se používá nejčastěji k regulaci napětí v rozvodnách a řízení činného i jalového výkonu nezávisle na sobě. První praktické využití UPFC bylo uskutečněno v americké rozvodně Inez na východě Kentucky. Zařízení se skládalo ze dvou měničů, pracujících na principu GTO tyristoru, o výkonu 160 MVA. Toto nebyla pouze první praktická ukázka tohoto zařízení, ale také to bylo jedno z nejvýkonnějších zařízení pracujících na principu GTO tyristorů. Tento projekt vznikl za spolupráce firem American Electric Power (AEP), Westinghouse Electric Corporation a Electric Power Research Institute (EPRI) [14][8].

3.2 Distributed Power Flow Controler (DPFC)

Poslední ze zařízení typu FACTS je zařízení DPFC. Toto zařízení je modifikací zařízení UPFC. Modifikace byly aplikovány z důvodu zvýšení spolehlivosti a zároveň snížení ceny. Hlavní změny oproti zařízení UPFC spočívají v rozdělení sériového měniče a odstranění společného meziobvodu [12].

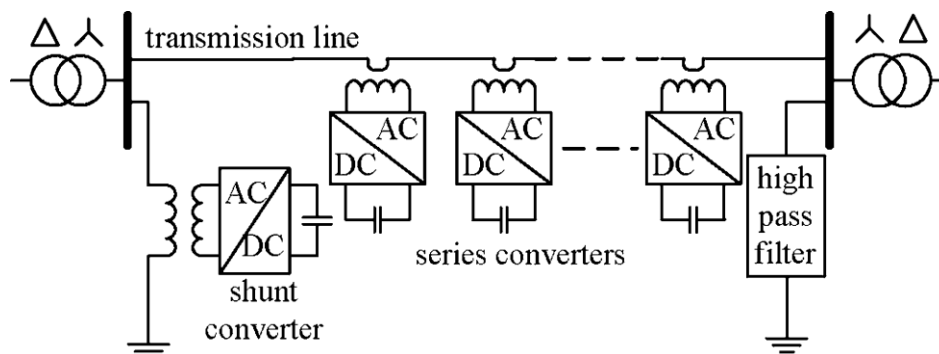
3.2.1 Princip

Důležitým faktorem pro efektivní řízení výkonu zařízení UPFC je přenos výkonu mezi měniči. Jelikož jednou z modifikací zařízení DPFC je eliminace společného meziobvodu, je zde potřeba jiná metoda pro přenos výkonu mezi měniči. To bylo

realizováno přes přenosové vedení pomocí 3. harmonické složky. Jedná se tedy o metodu přenosu výkonu pomocí vyšších harmonických. V třífázovém systému tvoří 3. harmonická tzv. nulovou složku, u které je její přenos blokován zapojením transformátoru $Y - \Delta$. Oproti dalším harmonickým složkám, které by bylo možno použít (6., 9., 12. a vyšší) má 3. harmonická složka výhodu v dosažení nejnižší úrovně impedance vedení [9].

3.2.2 Konfigurace

Zařízení se skládá z paralelního a několika sériových měničů. Měnič v paralelní větvi zůstává stejný jako u zařízení UPFC. Měnič v sériové větvi využívá tzv. D-FACTS (Distributed FACTS) koncept, který spočívá v rozdělení sériového měniče o velkém výkonu na několik jednofázových měničů o menším výkonu. Jednotlivé měniče mají svůj vlastní zdroj stejnosměrného napětí a jsou na sobě vzájemně nezávislé. Další součástí tohoto zařízení jsou dvojice transformátorů s převodem $Y - \Delta$ na koncích vedení, které slouží pro blokování 3. harmonické složky. Dále toto zařízení obsahuje filtr horní propust, který slouží k odfiltrování základní harmonické a propouštění vyšších harmonických.[9]



Obrázek 3.2.1 Konfigurace DPFC [12]

3.2.3 Použití

O zařízení DPFC může být uvažováno jako o zařízení UPFC, využívající koncept D-FACTS s přenosem výkonu pomocí harmonických složek. Z toho plyne, že toto zařízení převzalo všechny výhody, které poskytuje zařízení UPFC, navíc využitím konceptu D-FACTS získáme zvýšenou spolehlivost a výrazně nižší cenu. To je docíleno vzájemnou nezávislostí jednotlivých měničů, u kterých není potřeba drahé vysokonapěťové izolace díky jejich nižším výkonům[12].

3.3 Interline Power Flow Controler (IPFC)

Zařízení IPFC je přímo odvozené ze zařízení UPFC, s tím rozdílem, že zařízení IPFC dokáže pomocí sériové kompenzace řídit toky výkonů na dvou či více vedení.

3.3.1 Princip

Obecně je zde řízení výkonu realizováno jednotlivými sériovými kompenzátory, mezi kterými se realizuje přenos činného výkonu přes stejnosměrný meziobvod (viz. obrázek 3.2.3). Na obrázku (3.2.2) je ekvivalentní schéma, kde $V_{se_{ij}}$ a $V_{se_{ik}}$ představují výstupní napětí z měničů do obvodu a veličina $Z_{se_{ij}}$ a $Z_{se_{ik}}$ vyjadřují impedanci sérových transformátoru. Veličiny $P_{cal,ji}, Q_{cal,ji}$ a $P_{cal,ki}, Q_{cal,ki}$ reprezentují činný a jalový výkon přenesený přes vedení j a k . Pro výpočet jednotlivých přenesených výkonů je odvozena soustava rovnic (3.1) [11].

$$\begin{aligned}
 P_{cal,i} &= V_i^2 g_{ii} - \sum_{n=j,k} V_i V_n [g_m \cos(\theta_i - \theta_n) + b_m \sin(\theta_i - \theta_n)] - \sum_{n=j,k} V_i V_{se_m} [g_m \cos(\theta_i - \theta_{se_m}) + b_m \sin(\theta_i - \theta_{se_m})] \\
 Q_{cal,i} &= -V_i^2 b_{ii} - \sum_{n=j,k} V_i V_n [g_m \sin(\theta_i - \theta_n) - b_m \cos(\theta_i - \theta_n)] - \sum_{n=j,k} V_i V_{se_m} [g_m \sin(\theta_i - \theta_{se_m}) - b_m \cos(\theta_i - \theta_{se_m})] \\
 P_{cal,m} &= V_n^2 g_{mm} - V_i V_n [g_m \cos(\theta_n - \theta_i) + b_m \sin(\theta_n - \theta_i)] + V_n V_{se_m} [g_m \cos(\theta_n - \theta_{se_m}) + b_m \sin(\theta_n - \theta_{se_m})] \\
 Q_{cal,m} &= -V_n^2 b_{mm} - V_i V_n [g_m \sin(\theta_n - \theta_i) - b_m \cos(\theta_n - \theta_i)] + V_n V_{se_m} [g_m \sin(\theta_n - \theta_{se_m}) - b_m \cos(\theta_n - \theta_{se_m})] \\
 g_{ii} &= \sum_{n=j,k} g_{in}, \quad b_{ii} = \sum_{n=j,k} b_{in}, \quad g_m + jb_m = 1/z_{se_m} = y_{se_m}, \quad g_m + jb_m = 1/z_{se_m} = y_{se_m}, \quad n=j, k
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

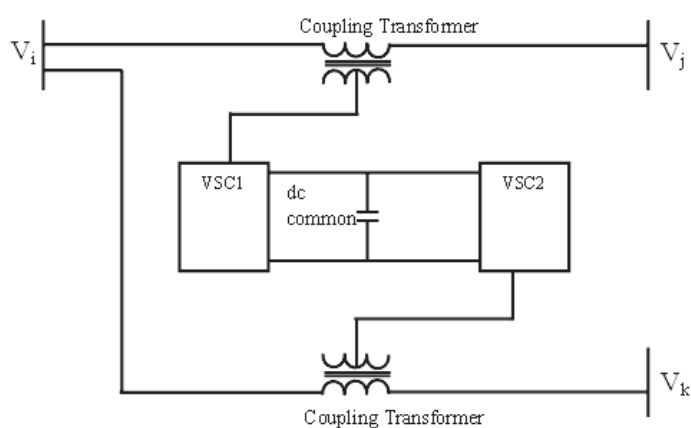
Pokud jsou jednotlivé měniče bezztrátové, dá se předpokládat, že jsou si jednotlivé výkony rovny. To je splněno, pokud v síti není žádný akumulací prvek. [10]

Podrobnější rozbor výpočtů a porovnání výkonů před a po kompenzaci je možno nalézt v [9], [10] a [11].

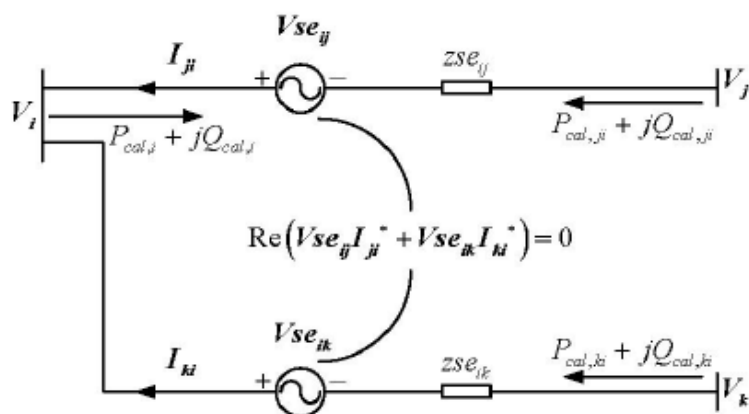
3.3.2 Konfigurace

Zařízení je složeno z několika jednotek zařízení SSSC, které jsou připojeny na jednotlivé větve vedení. Podobně jako u předešlého případu jsou jednotlivé měniče

propojeny pomocí stejnosměrného meziobvodu, který je realizován kondenzátorem. Na obrázku (3.3.1) je nejjednodušší z těchto zařízení, které obsahuje pouze dva měniče. Ty jsou sériově připojeny přes vazební transformátor na vedení. Veličina V_n ($n = i, j, k$) znázorňuje komplexní napětí na vstupu a výstupu napěťové hladiny. Na obrázku (3.2.2) je znázorněno ekvivalentní schéma, kde je výstupní napětí z měničů nahrazeno zdrojem $V_{se_{ij}}$ a zdrojem $V_{se_{ik}}$ a veličiny $Z_{se_{ij}}$ a $Z_{se_{ik}}$ vyjadřují impedanci sérových transformátorů.



Obrázek 3.3.1 Konfigurace IPFC [10]



Obrázek 3.3.2 Ekvivalentní schéma IPFC [11]

3.3.3 Použití

Základní funkcí zařízení IPFC je zlepšení profilu napěťového průběhu, tedy zlepšení napěťové stability. Používá se také pro regulování toku výkonu mezi dvěma či více linkami, lze tak tedy účinně zlepšit přenosovou schopnost a kapacitu celé soustavy [11].

4 Závěr

Cílem této rešerše bylo popsat základní princip a způsoby kompenzace. Mezi základní způsoby kompenzace, patří z pohledu konfigurace kompenzace individuální, skupinová, centrální, kombinovaná, sériová a paralelní, které jsou popsány v první kapitole spolu se schémata zapojení. Dále byl proveden rozbor základních zařízení využívaných pro kompenzaci. V této kapitole byla popsána funkce a použití jednotlivých zařízení.

V další části této práce byl proveden rozbor skupiny zařízení pro řízení toku výkonu, souhrnně označovaných jako FACTS (Flexible AC Transmission System). Pro rozbor bylo vybráno jen několik zařízení z této skupiny a popsány jejich základní vlastnosti. Vybraná zařízení slouží k řízení toku výkonu, zlepšení stability soustavy a ke zlepšení přenosové schopnosti vedení. Instalace těchto zařízení se většinou provádí do tzv. úzkých míst v soustavě, kde mohou omezit kolísání napětí a zlepšit dynamickou stabilitu.

Posledním cílem této práce byl rozbor, porovnání a zhodnocení moderních zařízení ze skupiny FACTS, které pracují na principu výkonových měničů. Do této skupiny patří zařízení UPFC, IPFC a DPFC. V současné době je systém UPFC jedním z nejvýkonnějších zařízení ve svém oboru. Je složen ze dvou měničů, kde je jeden připojen přes vazební transformátor sériově a druhý paralelně na síť. Společně jsou tyto měniče propojeny stejnosměrným meziobvodem, který zajišťuje vzájemnou výměnu výkonu. Právě díky tomuto výhodnému zapojení je možná sériová a paralelní kompenzace. Toto zařízení je nejčastěji využito pro kompenzaci účinníku a regulování napětí ze zdroje. Může také sloužit pro řízení toku výkonu nebo jako aktivní filtr. Jistou variací UPFC je zařízení DPFC. Pro snížení ceny a zvýšení spolehlivosti byly u zařízení UPFC uskutečněny jisté modifikace. První z těchto modifikací bylo zavedení tzv. konceptu D-FACTS (Distributed FACTS) pro sériový měnič, který je založen na rozmístění několika jednofázových měničů podél vedení, kde každý z těchto měničů má vlastní stejnosměrný zdroj a je navzájem nezávislý. Toto zajistí nejen větší spolehlivost, ale i nižší cenu celkového zařízení, jelikož není u těchto měničů potřeba drahé vysokonapěťové izolace. Další modifikace spočívá v eliminaci stejnosměrného obvodu. Jelikož není možné přenášet výkon mezi měniči přes společný stejnosměrný obvod, je zde realizován přenos výkonu prostřednictvím přenosového vedení pomocí 3. harmonické složky. Na rozdíl od zařízení DPFC a UPFC, které pracují pouze na jednom vedení, zařízení IPFC je možno instalovat na dvou a více

vedeních. Nejjednodušší zařízení, které propojuje pouze dvě vedení, je složeno ze dvou napěťových měničů, které propojuje společný stejnosměrný meziobvod. Tento meziobvod podobně jako u zařízení UPFC umožňuje vzájemnou výměnu výkonu mezi měniči. Hlavní využití tohoto zařízení spočívá ve stabilizování napětí a zvětšení kapacity přenosové soustavy.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] KŮS, Václav. *Nízkofrekvenční rušení*. 1. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2003, 195 s. ISBN 8070829761.
- [2] Grünbaum R., Noroozian M., B. Thorvaldsson. FACTS - *Powerful systems for exible power transmission*, ABB Review 5/1999, s.4-17.
- [3] KOREJČÍK, Michal. *Návrh transformátoru s regulací fáze pro laboratorní výuku*. Brno, 2012. Diplomová práce. VUT Brno.
- [4] Yongan Deng, *Reactive Power Compensation of Transmission Lines*, Concordia University [online].
<http://users.encs.concordia.ca/~lalopes/Courses/IGEE401-F07/TLCompensation.pdf>
- [5] Tesařová M., *Průmyslová elektroenergetika*, ZČU v Plzni 2000.
<http://home.zcu.cz/~tesarova/PE/Soubory/Kap7.pdf> .
- [6] MAJLING. E, *Způsoby řízení výkonových toků v přenosových soustavách*, 2015.
<http://oenergetice.cz/technologie/elektroenergetika/zpusoby-rizeni-vykonovych-toku-v-prenosovych-soustavach/>
- [7] Sandeep Gupta, Student Member, IEEE, Prof. R. K. Tripathi, Member, *IEEE*, *FACTS Modelling and Control > Application of CSC based STATCOM in Transmission LINE*.
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=6199121>
- [8] SCHAUDER, C., E. STACEY, M. LUND, L. GYUGYI, L. KOVALSKY, A. KERI, A. MEHRABAN a A. EDRIS. AEP UPFC project: installation, commissioning and operation of the ± 160 MVA STATCOM (phase I). *IEEE Transactions on Power Delivery*. DOI: 10.1109/61.714855.
- [9] BLÁHA Š, KOMRSKA T, *Aktivní prostředky pro kompenzaci a řízení toku výkonu v síti, Výzkumná zpráva č.: 22190 - 004 – 2015*, ZČU v Plzni 2015.
- [10] SREEJITH, S., S.P. SIMON a M.P. SELVAN. Investigations on power flow solutions using Interline Power Flow Controller (IPFC). *International Conference on Sustainable Energy and Intelligent Systems (SEISCON 2011)*. IET, 2011, s. 63-68. DOI: 10.1049/cp.2011.0336.
- [11] ZHANG, Jun a Akihiko YOKOYAMA. Optimal Power Flow Control for Congestion Management by Interline Power Flow Controller (IPFC). *2006 International Conference on Power System Technology*. IEEE, 2006, s. 1-6. DOI: 10.1109/ICPST.2006.321421.
- [12] YUAN, Zhihui, Sjoerd W. H. de HAAN, Jan Braham FERREIRA a Dalibor CVORIC. A FACTS Device: Distributed Power-Flow Controller (DPFC). *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2010, vol. 25, issue 10, s. 2564-2572. DOI: 10.1109/TPEL.2010.2050494.

- [13] MEHRABAN, A.S., A. EDRIS, C.D. SCHAUDER a J.H. PROVANZANA. Installation, commissioning, and operation of the world's first UPFC on the AEP system. In: *POWERCON '98. 1998 International Conference on Power System Technology. Proceedings (Cat. No.98EX151)* [online]. IEEE, 1998, s. 323-327. DOI: 10.1109/ICPST.1998.728979. ISBN 0-7803-4754-4
- [14] KANNAN, S., S. JAYARAM a M.M.A. SALAMA., Real and Reactive Power Coordination for a Unified Power Flow Controller. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2004, vol. 19, issue 3, s. 1454-1461. DOI: 10.1109/TPWRS.2004.831690.
- [15] REED, G., J. PASERBA, T. CROASDAILE, et al. The VELCO STATCOM based transmission system project. In: *2001 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.01CH37194)* [online]. IEEE, 2001, s. 1109-1114. DOI: 10.1109/PESW.2001.917226. ISBN 0-7803-6672-7
- [16] YU J., FACTS: *Thyristor- Controlled Series Compensation*, Jawnsy's Journal on Life, Software and Engineering. 28. March 2011 <<https://jawnsy.wordpress.com>>

