

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Řízení výkonových toků v elektroenergetické soustavě

Miroslav Vrábík

2016

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2015/2016

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Miroslav VRÁBÍK**
Osobní číslo: **E12B0123K**
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Řízení výkonových toků v elektroenergetické soustavě**
Zadávající 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 :

Předmětem bakalářské práce je rešerše způsobů řízení toků činného a jalového výkonu v přenosových či distribučních sítích. Práce se zaměřuje zejména na transformátory s regulací fáze (PST), univerzální regulátory výkonů, FACTS, apod.

1. Popište princip způsobu řízení toků činného a jalového výkonu v energetické soustavě.
2. Popište princip transformátorů s regulací fáze (PST) a proveďte rešerži.
3. Popište princip univerzálních regulátorů výkonů a proveďte rešerži.
4. Popište princip FACTS a proveďte rešerži.

Abstrakt

Tato bakalářská práce je rešerší způsobů řízení toků činného a jalového výkonu v přenosových soustavách. Práce nastiňuje, jak je možné ovlivňovat činný a jalový výkon v energetické soustavě. Dále podává přehled o základních typech zařízení FACTS. Pozornost je věnována především principům fungování jednotlivých zařízení FACTS, především transformátorům s regulací fáze a univerzálním regulátorům výkonů.

Klíčová slova

řízení výkonových toků, činný a jalový výkon, transformátor s regulací fáze (PST), univerzální regulátor výkonů (UPFC), FACTS

Abstract

This bachelor thesis is mainly literature search on ways of managing flows of active and reactive power in transmission systems. This thesis outlines how it is possible to influence the active and reactive power in the power system. Furthermore, it presents an overview of the basic types of FACTS devices. Attention is paid to the principles of individual FACTS devices, especially Phase-shifting Transformer (PST) and Unified Power Flow Controller (UPFC).

Keywords

Power flow control, active and reactive power, Phase-shifting transformer (PST) , Unified Power Flow Controller (UPFC), FACTS

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

Miroslav Vrábík

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu a konzultantovi své práce Ing. Martinu Jandovi, Ph.D. a Ing. Tomáši Komrskovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

Seznam zkratk	8
1 Úvod	9
2 Řízení toků činného a jalového výkonu v energetické soustavě	10
2.1 Výkonové toky na vedení	10
2.1.1 Vliv odporu přenosové linky	12
2.2 Principy řízení výkonových toků	14
2.2.1 Řízení jalového výkonu	16
2.2.2 Řízení činného výkonu	17
2.3 Charakteristiky kompenzačních prostředků	17
2.3.1 Paralelní regulace napětí	17
2.3.2 Sériová kapacitní kompenzace	19
2.3.3 Statická synchronní sériová kompenzace	21
2.4 Vliv výkonových toků na napěťovou úroveň	22
3 Typy zařízení FACTS	24
3.1 TSC a TCR	25
3.2 TCSC	25
3.3 GCSC a TSSC	26
3.5 SSSC	26
3.6 SVC	27
3.7 STATCOM	28
3.8 IPFC	29
3.9 UPFC	32
3.10 PST	36
3.10.1 Transformátor s regulací fáze pod zatížením	37
3.10.2 Rozdělení typů transformátorů s regulací fáze	38
4 Závěr	42
Literatura	Chyba! Záložka není definována.

Seznam zkratk

ES	Elektrizační soustava
FACTS	Flexible Alternating Current Transmission
FC	Fixed shunt capacitor
FR	Fixed shunt reactor
MSC	Mechanical switched shunt capacitor
MSR	Mechanical switched shunt reactor
PST	Phase-shifting Transformer
SSSC	Static synchronous series capacitor
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 Úvod

Trh s elektřinou se neustále rozrůstá, což vyvíjí tlak na spolehlivost dodávky elektrické energie. Provozovatelé přenosových sítí jsou nuceni propojovat přenosové soustavy mezi jednotlivými státy. V Evropě existuje tzv. ENSTO-E (European network of Transmission System Operators for Electricity), jedná se o vzájemně propojený komplex elektrizačních soustav jednotlivých evropských států. Toto vzájemné propojení s sebou nese výhody, za jaké lze považovat především zvýšení spolehlivosti dodávky elektrické energie a propojení obchodu a trhu s elektrickou energií mezi státy.

Právě volný obchod s elektrickou energií a připojení obnovitelných zdrojů do soustavy má za následek vznik tzv. tranzitních toků, kromě těchto tranzitních toků se evropské přenosové soustavy potýkají i tzv. kruhovými toky, zjednodušeně lze říci, že část výkonu teče z místa výroby do místa spotřeby přes přenosová vedení okolních států. Jedním ze způsobů jak odlehčit přetíženým sítím se jeví využití zařízení FACTS, což jsou systémy, které zajišťují vyšší statickou a dynamickou stabilitu přenosových soustav. Systémy FACTS umožňují lepší využití stávajících vedení, zajišťují optimální rozložení výkonů po vedení, čímž je možné dosáhnout snížení ztrát na celém komplexu propojených soustav.

Tato práce je rešerší způsobů řízení toků činného a jalového výkonu v přenosových sítích. Práce se zaměřuje především na jednotlivá zařízení FACTS, popis jejich principů, především je pozornost věnována transformátoru s regulací fáze PST a univerzálním regulátorů výkonů (UPFC).

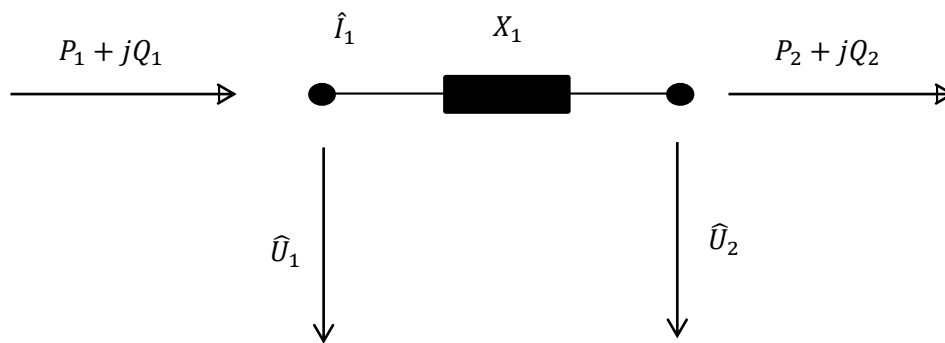
V práci jsou nastíněny způsoby řízení toků, dále se práce věnuje jednotlivým typům zařízení FACTS, z výše uvedeného vyplývají následující cíle rešerše:

- Způsoby řízení toků činného a jalového výkonu v energetické soustavě.
- Transformátory s regulací fáze (PST).
- Univerzální regulátory výkonů.
- FACTS.

2 Řízení toků činného a jalového výkonu v energetické soustavě

2.1 Výkonové toky na vedení

Výkonové toky na linkách elektrizační soustavy je možné ovlivnit změnou základních elektrických parametrů, a to především impedancí vedení a uzlovými napětími, jak je možné vidět z *obr. 2.1*. V případě, že je uvažována pouze jedna linka vedení odděleně od zbytku soustavy a je modelována jako sériová reaktance, která je mnohem vyšší než činný odpor [4], [10], [19].



Obr. 2.1: Model přenosové linky s podélnou reaktancí [2]

Komplexní výkon \hat{S}_1 (VA) dodávaný po vedení z uzlu 1 do uzlu 2 je dán vztahem:

$$\hat{S}_1 = \hat{U}_1 \cdot \hat{I}_1^* = P_1 + jQ_1, \quad (1)$$

$$P_1 = \operatorname{Re} \left\{ \hat{U}_1 \cdot \left(\frac{\hat{U}_1 - \hat{U}_2}{jX_1} \right)^* \right\}, \quad (2)$$

$$Q_1 = \operatorname{Im} \left\{ \hat{U}_1 \cdot \left(\frac{\hat{U}_1 - \hat{U}_2}{jX_1} \right)^* \right\}, \quad (3)$$

kde

P_1činný výkon v uzlu 1 [W],

Q_1jalový výkon v uzlu 1 [VAr],

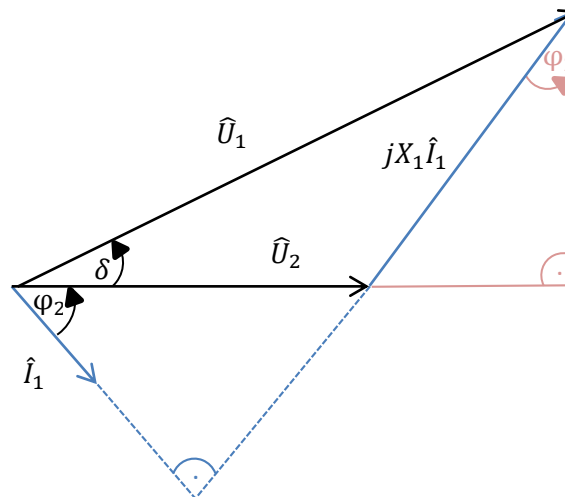
\hat{U}_1napětí v uzlu 1 [V], $\hat{U}_1 = U_1 \cdot e^{j\delta t_1}$,

\hat{U}_2napětí v uzlu 2 [V], $\hat{U}_2 = U_2 \cdot e^{j\delta t_2}$,

X_1 reaktance vedení [Ω],

\hat{I}_1 proud po vedení [A].

Na základě fázorového diagramu na obr. 2.2 lze odvodit výkonové rovnice popisující toky činného a jalového výkonu na obou koncích vedení.



Obr. 2.2: Fázorový diagram vedení [2]

Vedení je uvažováno jako bezztrátové, pro činné výkony platí:

$$P_2 = U_2 I_1 \cos \varphi_2, \quad (4)$$

$$X_1 I_1 \cos \varphi_2 = U_1 \sin \delta, \quad (5)$$

$$I_1 \cos \varphi_2 = \frac{U_1}{X_1} \sin \delta, \quad (6)$$

$$P_2 = \frac{U_1 U_2}{X_1} \sin \delta = P_1. \quad (7)$$

Z rovnice (7) vyplývá, že velikost přenášeného činného výkonu po vedení lze řídit změnou velikosti U_1 , U_2 , úhlem natočení těchto vektorů δ a velikostí podélné reaktance X_1 .

Pro jalové výkony platí:

$$Q_2 = U_2 I_1 \sin \varphi_2 \quad (8)$$

$$X_1 I_1 \sin \varphi_2 + U_2 = U_1 \cos \delta \quad (9)$$

$$I_1 \sin \varphi_2 = \frac{U_1}{X_1} \cos \delta - \frac{U_2}{X_1} \quad (10)$$

$$Q_2 = \frac{U_1 U_2}{X_1} \cos \delta - \frac{U_2^2}{X_1} \quad (11)$$

$$Q_1 = Q_2 + X_1 I_1^2 \quad (12)$$

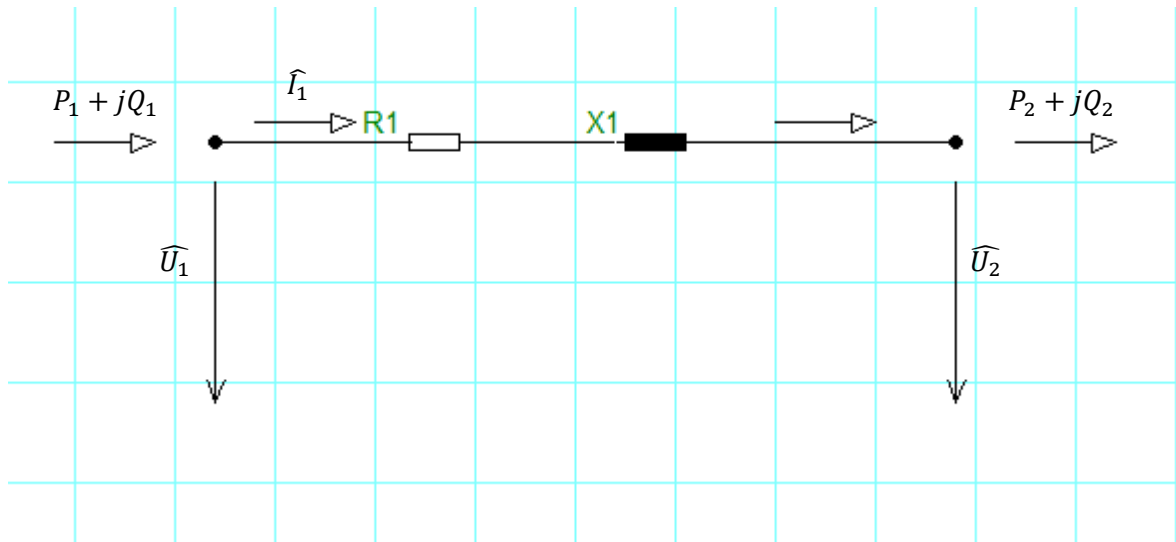
$$Q_1 = \frac{U_1 U_2}{X_1} \cos \delta - \frac{U_2^2}{X_1} + \frac{1}{X_1} (U_1^2 + U_2^2 - 2U_1 U_2 \cos \delta) \quad (13)$$

$$Q_1 = \frac{U_1^2}{X_1} - \frac{U_1 U_2}{X_1} \cos \delta \quad (14)$$

Z rovnice (14) vyplývá, že velikost přenášeného jalového výkonu po vedení lze řídit změnou velikosti U_1 , U_2 , úhlem natočení těchto vektorů δ a velikostí podélné reaktance X_1 .

2.1.1 Vliv odporu přenosové linky

Dosud byla uvažována konfigurace pouze s podélnou reaktancí vedení. Na přenosových linkách je podélný odpor vedení zanedbáván, na nižších napěťových hladinách je potřeba s tímto odporem počítat.



Obr. 2.3: Přenosová linka s nenulovým odporem [2]

Pro výkonové vztahy při uvažování nenulového podélného odporu vedení (viz obr. 2.3) platí:

Komplexní výkon na začátku vedení

$$\widehat{S}_1 = P_1 + jQ_1 = \widehat{U}_1 \cdot \widehat{I}_1^* = \left(\frac{\widehat{U}_1 - \widehat{U}_2}{R + jX} \right)^* , \quad (15)$$

odtud

$$P_1 = \frac{U_1^2 R + U_1 U_2 R \cos \delta + U_1 U_2 X \sin \delta}{R^2 + X^2} , \quad (16)$$

$$Q_1 = \frac{U_1^2 X - U_1 U_2 X \cos \delta - U_1 U_2 R \sin \delta}{R^2 + X^2} . \quad (17)$$

Pro komplexní výkon na konci vedení platí:

$$\widehat{S}_2 = P_2 + jQ_2 = \widehat{U}_2 \cdot \widehat{I}_1^* = \widehat{U}_2 \left(\frac{\widehat{U}_1 - \widehat{U}_2}{R + jX} \right)^* , \quad (18)$$

odtud

$$P_2 = \frac{U_1 U_2 R \cos \delta + U_1 U_2 X \sin \delta - U_2^2 R}{R^2 + X^2} , \quad (19)$$

$$Q_2 = \frac{U_1 U_2 X \cos \delta - U_1 U_2 R \sin \delta - U_2^2 X}{R^2 + X^2} . \quad (20)$$

Je-li uvažováno s bezeztrátovým vedením, je činný výkon stejný na začátku i na konci vedení. Je-li respektován odpor, dojde vzhledem ke ztrátám na vedení k navýšení P_1 a ke snížení P_2 , výrazněji pro vyšší úhly přenosu. V případě, že obě koncová napětí mají shodné amplitudy, je v případě bezeztrátového vedení absorbovaný jalový výkon dodáván rovnoměrně z obou konců vedení. Pokud je respektován odpor a kladný tok činného výkonu z uzlu 1 do uzlu 2 dochází v běžném rozsahu úhlů přenosu ke snížení výkonu Q_1 a zvýšení výkonu Q_2 .

2.2 Principy řízení výkonových toků

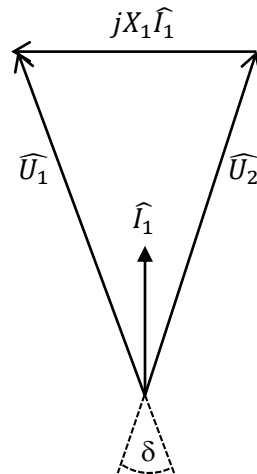
Za účelem řízení toku činného a jalového výkonu je možné ovlivňovat jeden nebo více parametrů pomocí různých výkonových prvků a zařízení. Za základní možnosti lze považovat instalaci některého z uvedených systémů:

- paralelní pasivní prvek,
- sériový pasivní prvek,
- paralelní injektáž proudu,
- sériová injektáž napětí,
- kombinace více prostředků.

Pro objasnění základních myšlenek je nutné vyjít z následujících předpokladů:

- vedení je bezeztrátové,
- oba konce vedení mají konstantní amplitudu napětí,
- regulační prostředek je umístěn uprostřed linky vedení.

Následující varianty zařazení paralelních a sériových zařízení vycházejí z nekompensovaného symetrického vedení, které je v přenosové soustavě modelováno jeho podélnou reaktancí. Jestliže budou splněny předpoklady bezeztrátovosti a pevných amplitud napětí na obou koncích, objeví se poměry odpovídající *obr. 2.3*, avšak v tomto případě je R zanedbán.



Obr. 2.4: Fázorový diagram pro nekompenzované vedení [2]

Změnou základních elektrických parametrů je možné ovlivnit výkon přenášený po jednotlivých linkách vedení. To přispívá ke zvýšení přenosové schopnosti soustavy jako celku. Jednotlivé regulační prostředky se na zlepšení provozních charakteristik soustavy podílejí různou měrou na základě veličin, které ovlivňují nejvíce [4], [10], [19].

Cílem **paralelních zařízení** je udržovat napětí při změnách přenášeného výkonu. Paralelní tlumivky jsou využívány ke kompenzaci přebytku jalového výkonu v případech malých odběrů nebo vedení naprázdno. U dlouhých vedení mohou být tyto tlumivky trvale připojeny k soustavě za účelem eliminace nebezpečí přepětí při náhlém odlehčení nebo odpojení vedení. Standardní paralelní kondenzátory slouží k efektivní kompenzaci jalového výkonu, případně i jako zdroj jalového výkonu nastane-li požadavek na zvýšení napětí.

Systémy paralelní injektáže jalového proudu zlepšují udržování uzlových napětí v limitech při proměnlivém přenosu činného výkonu, čímž zlepšují výkonovou přenosovou schopnost systému. Kromě regulace napětí mohou sloužit také k řízení výkonových toků po vedení pomocí dodávky nebo odběru jalového výkonu v místě svého připojení.

Klasická **sériová kompenzace** je realizována sériovými kondenzátory, jejichž úkolem je snižovat celkovou efektivní reaktanci přenosové linky a tím i úbytek napětí na vedení.

Zmírňují poklesy napětí zejména pro velká zatížení a rozšiřují oblast napěťové stability. Podílejí se na zlepšení dynamické stability a mění toky výkonů pomocí změn P- δ charakteristik.

Systémy sériové injektáže napětí zajišťují kromě zvýšení přenosové kapacity i celkové zlepšení provozních parametrů soustavy. Přenášený činný výkon lze ovlivnit změnou amplitudy i fáze napětí na začátku či konce vedení, viz (15). Čím větší je amplituda generovaného sériového napětí, tím je také větší regulační rozsah výkonů. Se změnou fáze injektovaného napětí v celém rozsahu 0° až 360° , pak je možné regulovat činný výkon tekoucí po přenosové lince v maximálním možném rozsahu. U systémů sériové injektáže je možné uvažovat dvě základní možnosti generování sériového napětí. Činný a jalový výkon P_1 a Q injektované v souvislosti se sériovým napětím \hat{U}_1 mohou být buď oba odebírané ze sítě, nebo je ze sítě odebírán pouze činný výkon a jalový výkon se generuje lokálně. Jestliže je možné, aby se úhel α pohyboval v rozsahu 0 až 360° , pak činný výkon, který protéká přenosovým vedením, může kolísat v maximálním možném rozsahu. V případě varianty s lokálně generovaným jalovým výkonem má při změnách α větší vliv na změnu P_1 než při odebírání Q ze sítě a také vykazuje širší regulační pásmo P_1 i pro větší úhly přenosu.

Paralelní kompenzace se využívá především pro zajištění požadovaného napětí na přenosových linkách a jako podpora napětí na konci radiálních linek při rostoucích požadavcích na odebíraný výkon. Zvyšuje přenosovou schopnost vedení v určitých případech až k tepelným mezím vedení, je však méně účinná při řízení okamžitého toku činného výkonu, který je limitován zejména podélnou reaktancí linky a úhlem přenosu mezi koncovými napětími. Ke zvýšení přenášeného činného výkonu je tedy vhodná **sériová kompenzace**, jejíž princip je založen na kapacitní kompenzaci podélné reaktance nebo na sériové injektáži napětí do přenosové linky [2], [10].

2.2.1 Řízení jalového výkonu

Změny zatížení a topologie soustavy výrazně ovlivňují napětí v uzlech energetické soustavy. Je-li zatížení sítě vysoké, může dojít k výraznému poklesu napětí, v některých případech dokonce i k napěťovému kolapsu. To vše má za následek působení podpěťových ochran, dochází také k odpojování zátěží, což negativně ovlivňuje odběratele. Pokud je však zatížení naopak nízké, může se objevit tzv. Ferrantioho jev, který má za následek přepětí, jenž zapříčiní poškození izolace nebo

produkcí vyšších harmonických danou magnetickou saturací transformátorů. Z výše uvedených důvodů je tedy důležité, aby bylo napětí v ES udrženo blízko jmenovitých hodnot. K tomu, aby byly zachovány jmenovité hodnoty, se nejčastěji využívá paralelních tlumivek, jejichž úkolem je odebrat jalový výkon a tím snížit napěťovou hladinu v místě, kde jsou připojeny. Naopak pokud je nutné zvýšit napětí v uzlu, zařazují se paralelní kondenzátory, které jalový výkon dodávají. Pokud jsou požadavky proměnlivé, využívá se synchronních kompenzátorů, které, buď dodávají, nebo odebírají jalový výkon, v závislosti na tom, zda je provoz v přebuzeném nebo podbuzeném stavu. Synchronní kompenzátory jsou však v dnešní době nahrazovány tzv. SVC, zařízeními se spínanými tlumivkami a kapacitami. Dalším zařízením, kterým byly nahrazeny střídavé tlumivky a kondenzátory, je STATCOM, který je založen na principu trojfázového můstkového měniče [2], [4].

2.2.2 Řízení činného výkonu

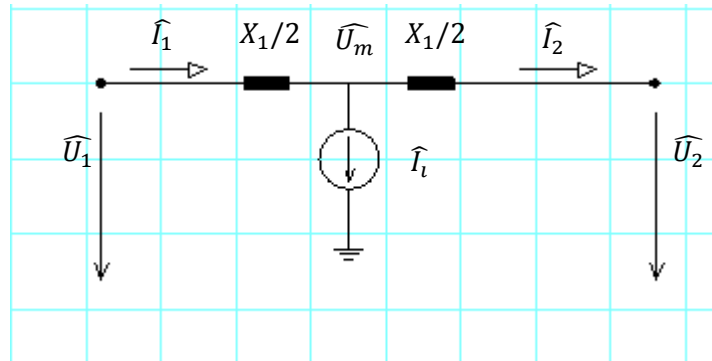
Přenosovou schopnost vedení je možné zvýšit instalací sériové kompenzace, která má za následek snížení podélné impedance. V tomto směru se osvědčila např. sériově zapojená zařízení TCSC, která mohou pracovat, jak v induktivním, tak i kapacitním režimu a díky tomu efektivně řídit tok činného výkonu. Pokud pracují v kapacitním režimu, je zkrácena elektrická délka vedení, čímž je zvýšen přenášený činný výkon. Další možností, jak je možné řídit činný výkon, je změna rozdílu napětí mezi koncovými uzly vedení (změna amplitudy nebo fáze). Toho je docíleno injektáží vhodného sériového napětí, což lze uskutečnit pomocí mechanicky nebo elektronicky regulovatelných transformátorů s natáčením fáze (PST) nebo elektronickým měničem tzv. SSSC systémy. Výhodou elektronického způsobu je bezpochyby rychlost odezvy. Napětí se obvykle injektuje kolmo na uzlové napětí nebo na protékající proud. Komplexní zařízení FACTS umožňují současné řízení činného i jalového výkonu [2], [10].

2.3 Charakteristiky kompenzačních prostředků

2.3.1 Paralelní regulace napětí

Paralelní zapojení kompenzačního zdroje uprostřed přenosové linky dle *obr. 2.5* s ideálním napěťovým zdrojem dodávajícím (odebírajícím) pouze jalový výkon, tj. $P =$

0, který v místě připojení udržuje konstantní velikost napětí U_m rovnou koncovým napětím U_1 a U_2 (rovnou U), rozděluje přenosovou linku (normovaná reaktance $x_1 = 1$) na dvě nezávislé části.



Obr. 2.5: Paralelní zapojení kompenzačního zdroje uprostřed přenosové linky

[2]

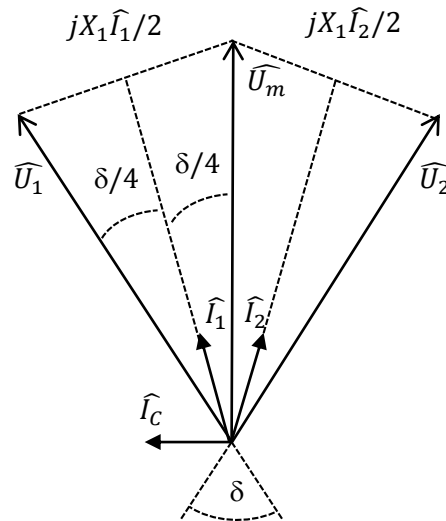
V případě, že koncová napětí obou částí vedení mají stejné amplitudy, rozdělí proudy ($I_1 = I_2 = I$) a napětí a celkový úhel přenosu δ na 4 shodné části (viz fázorový diagram na obr. 2.6). Pro přenášený činný a jalový výkon bezeztrátového vedení lze následně odvodit:

$$P = U_1 I_1 \cos \frac{\delta}{4} = U_2 I_2 \cos \frac{\delta}{4} = U_m I_1 \cos \frac{\delta}{4} = U_m I_2 \cos \frac{\delta}{4}, \text{ platí-li, že } I_1 = I_2 = I, \quad (21)$$

$$\frac{X}{2} I = 2 \cdot U \sin \frac{\delta}{4} \Rightarrow I = 4 \cdot \frac{U}{X} \sin \frac{\delta}{4}, \quad (22)$$

$$P = UI \cos \frac{\delta}{4} = U \cos \frac{\delta}{4} \cdot 4 \cdot \frac{U}{X} \sin \frac{\delta}{4} = 2 \frac{U^2}{X} \sin \frac{\delta}{4}, \quad (23)$$

$$Q = UI \sin \frac{\delta}{4} = 4 \frac{U^2}{X} \left(1 - \cos \frac{\delta}{2}\right). \quad (24)$$

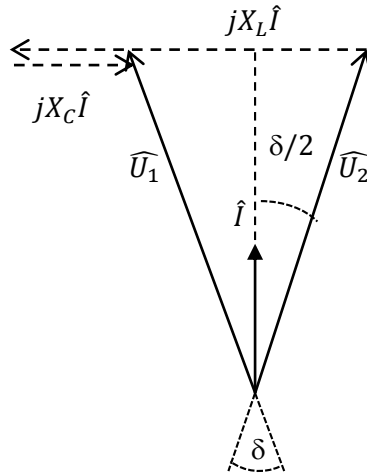


Obr. 2.6: Fázorový diagram paralelní kompenzace [2]

Lze pozorovat, že paralelní kompenzací je možné zvýšit přenášený činný výkon, ovšem za cenu nárůstu jalového výkonu. To platí pouze pro ideální kompenzační zdroj bez omezení jalového výkonu. Reálné kompenzační zdroje (SVC, STATCOM) mají zejména z ekonomických důvodů nižší výkonové dimenzování, což znamená, že nejsou často schopny v celém provozním rozsahu udržet konstantní velikost napětí U_m a jejich charakteristiky mají své limity [10], [20].

2.3.2 Sériová kapacitní kompenzace

V případě přenosové linky s konstantními koncovými napětími ($U_1 = U_2 = U$), na níž je pro snížení normované podélné reaktance ($x_L = 1$) instalována sériová kapacita, nezáleží vzhledem k sériovému zapojení prvků L a C na umístění kapacity pro účely odvození výkonových charakteristik. Je-li kapacita umístěna na začátku linky, platí fázorový diagram na obr. 2.7.



Obr. 2.7: Fázorový diagram [2]

Sériovou kombinací dvou reaktančních prvků je dosaženo výsledné efektivní reaktance linky ($X_L = \omega L$, $X_C = -1/\omega C$):

$$X_{ef} = X_L + X_C = (1 - k) \cdot X_L, \quad (25)$$

kde k je stupeň sériové kompenzace $k = \left| \frac{X_C}{X_L} \right|$, $0 \leq k < 1$.

Pro činný a jalový výkon dále platí:

$$\frac{X_{ef}}{2} I = U \sin \frac{\delta}{2} \Rightarrow I = 2 \cdot \frac{U}{(1-k)X_L} \sin \frac{\delta}{2}, \quad (26)$$

$$P = UI \cos \frac{\delta}{2} = \frac{U^2}{(1-k)X_L} \sin \delta, \quad (27)$$

$$Q = UI \sin \frac{\delta}{2} = \frac{U^2}{(1-k)X_L} (1 - \cos \delta), \quad (28)$$

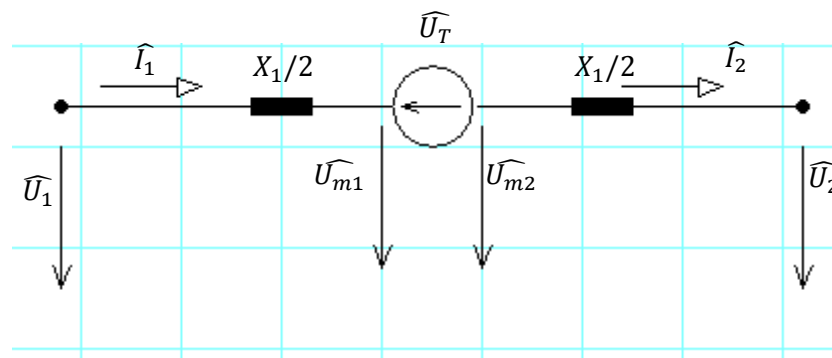
$$Q_c = X_C I^2 = \frac{2U^2}{X_L} \frac{k}{(1-k)^2} (1 - \cos \delta). \quad (29)$$

Přenášený činný výkon roste s vyšším stupněm sériové kompenzace k , stejně tak jako jalový výkon Q_c , který rovněž roste s úhlem přenosu δ . Nárůst přenášeného výkonu je způsoben zvýšením celkového napětí přiloženého na sériovou reaktanci, což vyvolá nárůst proudu a tedy i výkonu. Z fázorového diagramu na obr. 2.7 je zřejmé, že toto zvýšení napětí je umožněno výskytem tzv. protinapětí kapacity přičteného

k síťovým napětím s opačnou polaritou, než jaký je u induktivního úbytku na vedení. Kromě kapacity je možné toto tzv. protinapětí realizovat i obecným napěťovým zdrojem, především pomocí elektronických měničů [2], [10], [20].

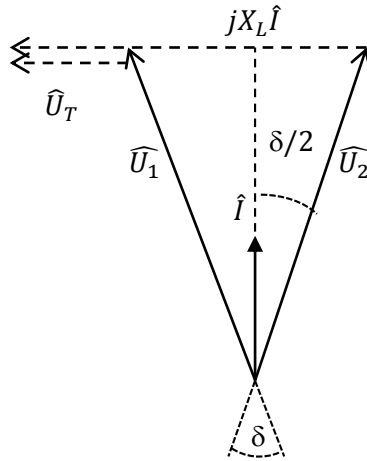
2.3.3 Statická synchronní sériová kompenzace

Sériová kompenzace realizovaná trojfázovým můstkovým měničem s vypínatelnými součástkami odpovídá sériové injektáži napětí příslušným zdrojem dle *obr. 2.8*.



Obr. 2.8: Sériová kompenzace [2]

Jedná se o přiložení tzv. protinapětí, které má za následek zvýšení celkového napětí na podélné reaktanci vedení. Takovýto zdroj lze umístit na začátek přenosové linky bez ovlivnění výkonových charakteristik. Je-li přiložené napětí zdroje kolmé na protékající proud, platí pro kapacitní režim zdroje fázorový diagram na *obr. 2.9*. Pro čistě jalový zdroj je napětí omezeno dimenzováním měniče a může nabývat obou polarit v závislosti na volbě L, C módu.

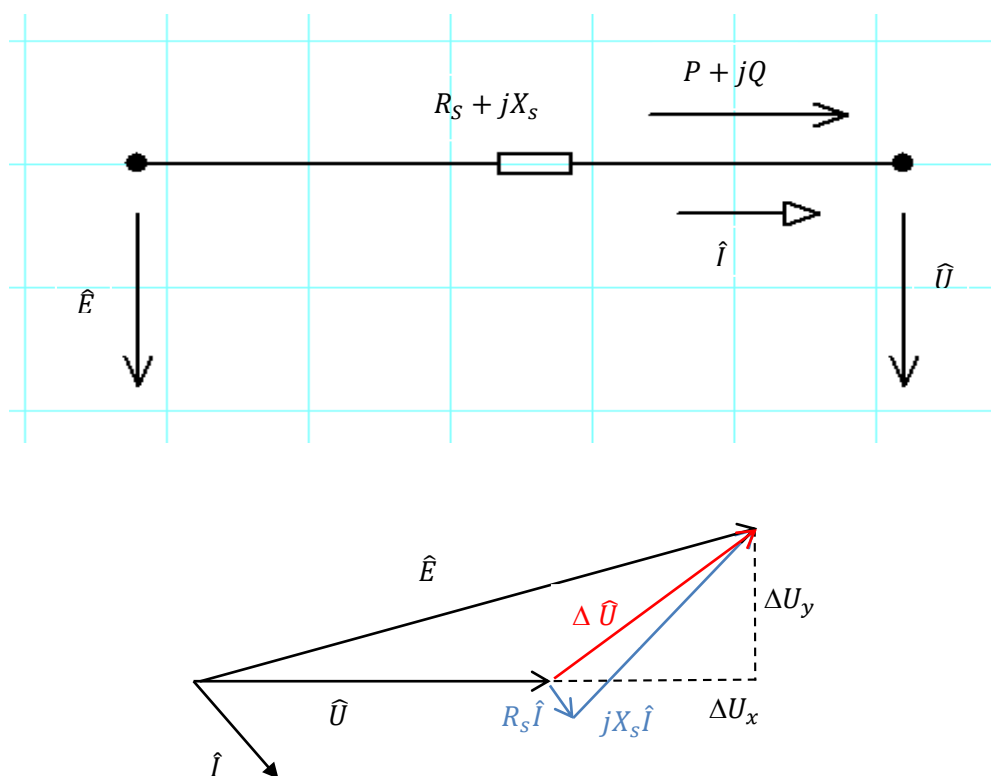


Obr. 2.9: Fázorový diagram sériové kompenzace [2]

Lze konstatovat, že sériový zdroj napětí umožňuje změnit přenášený činný výkon o konstantní hodnotu nezávisle na úhlu přenosu a úměrně sériově vstříkovanému napětí v rozsahu $0 \leq \delta \leq \pi/2$. Jalové výkony se v běžném rozsahu úhlů přenosu pro různé úrovně kompenzace moc neliší a jejich rozdíl roste s větším úhlem přenosu. Z tohoto důvodu je tento typ sériové kompenzace vhodný právě pro řízení toků činného výkonu. Při vyšší induktivní kompenzaci může dojít ke změně polaritě napětí přiloženého na podélnou indukčnost vedení, což způsobí obrácený tok proudu i činného výkonu po lince. Toto je další možnost, jak využít SSSC pro kompenzaci [2], [10], [20].

2.4 Vliv výkonových toků na napěťovou úroveň

Toky, odběry a dodávky činného i jalového výkonu mají velký vliv na úroveň napětí v uzlech soustavy, které se musí podle technických standardů udržovat v předepsaném pásmu, aby byla zajištěna bezpečná a spolehlivá funkce konečných spotřebičů. Je-li v uzlu na konci radiální linky připojen odběr činného a jalového výkonu $P + jQ$, je možné zbytek soustavy nahradit ekvivalentním zdrojem s vnitřním napětím \hat{E} a impedancí $\hat{Z}_S = R_S + jX_S$. V místě odběru je pak dosaženo uzlového napětí U (předpokládejme polohu fázoru $\hat{U} = U$ v reálné ose a jednofázovou soustavu), to je znázorněno na obr. 2.10.



Obr. 2.10: Úbytek napětí v místě spotřeby [2]

Platí základní předpoklad, že induktivní odběr napětí snižuje a kapacitní odběr napětí zvyšuje. Hodnoty napětí U rovného vnitřnímu napětí ekvivalentního zdroje soustavy E (ideálně jmenovitého napětí) je možné dosáhnout při mírně kapacitním zatížení. Při orientačních výpočtech se často zanedbává odpor soustavy a je uvažována jen reaktance X_s a také jen reálná část úbytku $\Delta \hat{U}$. Na základě toho zjednodušeně platí:

$$U = E - \frac{X_s Q}{U} \quad (30)$$

3 Typy zařízení FACTS

Díky pokroku výkonové elektroniky je možné využít moderní přístup pro řízení elektrizační soustavy, a to pomocí systému FACTS (Flexible AC Transmission Systems). Zařízení typu FACTS je možné definovat jako systém, který reguluje jeden nebo více parametrů sítě na bázi výkonové elektroniky společně s dalšími statickými zařízeními. Systémy FACTS je možné dělit na základě dvou hlavních hledisek. Prvním hlediskem je připojení zařízení k soustavě, kdy lze rozlišit FACTS sériové (TCSC a SSSC), paralelní (SVC a STATCOM) a kombinované (PST a UPFC). Druhé z hledisek je na základě historického vývoje, kde lze rozlišit tři generace [3], [7], [19].

0. Generace: Systémy s mechanicky spínanými prvky

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

1. Generace: Systémy spínané tyristory

- TCR (Thyristor controlled reactor)
- TSC (Thyristor switched capacitor)
- SVC (Static var compensator)
- TSSC (Thyristor switched series compensator – capacitor)
- TSSR (Thyristor switched series compensator – reactor)
- TCSC (Thyristor controlled series compensator – capacitor)
- TCSC (Thyristor controlled series compensator – reactor)
- TCBR (Thyristor controlled braking resistor)

2. Generace: Systémy s vypínatelnými prvky a zařízení používající střídače

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

3.1 TSC a TCR

TSC a TCR – nejedná se přímo o zařízení FACTS, ale o součásti připojující se paralelně k vedení, z nichž jsou některá zařízení FACTS složena. Zařízení TCR tvoří tlumivka, velice často se vzduchovým jádrem, která je řízena obousměrným tyristorovým ventilem. Její reaktance je plynule měněna podle sepnutí (řídícího úhlu) tyristorového ventilu. Zařízení TSC tvoří kondenzátor, který je zapojen v sérii s obousměrným tyristorovým ventilem. Kondenzátor je spínán a vypínán skokově. Kombinací TSC a TCR lze získat FACTS kontrolér SVC, kterému bude věnována pozornost níže [4], [15].

3.2 TCSC

TCSC neboli tyristorově řízený sériový kondenzátor (Thyristor controlled series capacitor), je nejčastěji využíván pro dlouhá přenosová vedení. Princip funkce TCSC spočívá v plynulém řízení kapacitní reaktance, čehož je dosaženo díky paralelnímu zapojení pevného kondenzátoru a tyristorově řízené tlumivky TCR. TCSC je přidáno do série s vedením, čímž se změní jeho podélná reaktance. Tlumivka se používá nejčastěji vzduchová. Aby se zamezilo přepětí na kondenzátoru, bývá k němu často paralelně připojován varistor [5], [1], [8]. TCSC dokáže řídit tok činného výkonu po vedení a rychle tlumit elektromechanické oscilace, a to díky rychlému řízení tyristorových ventilů. TCSC se využívá k regulaci napětí v ustáleném stavu, kompenzaci poklesu napětí v přenosové lince a tlumení elektromechanických oscilací [5], [1], [8].

3.3 GCSC a TSSC

Zařízení GCSC tvoří sériově připínaný kondenzátor, který je řízen GTO tyristory. Princip funkce se téměř shoduje s principem TCSC, kdy kompenzace je také prováděna změnou impedance vedení. Rozdíl však spočívá v použití GTO tyristorů zapojených paralelně ke kondenzátoru. Není zde využito spínané tlumivky pro změnu kapacitní reaktance. Za výhodou GTO tyristorů je možné považovat spínání i vypínání řídicím pulzem.

Základní konfigurace TSSC (tyristorem spínaný sériový kondenzátor) je stejná jako u GCSC, avšak namísto GTO tyristorů jsou použity klasické tyristory. Typické je pro TSSC zapojení více kondenzátorů, které jsou zapojeny společně s paralelními obousměrnými tyristory v sérii, čímž je docíleno odstupňování kapacitní reaktance. Řízení kapacitní reaktance spočívá v tom, že se spíná či vypíná příslušný počet kondenzátorů. Za nevýhodu TSSC lze považovat, že nejsou schopné rychle reagovat na velkou změnu reaktance, což je způsobeno relativně dlouhou časovou prodlevou. Z tohoto důvodu TSSC není vhodný v aplikacích s vysokými nároky na dynamiku [3].

3.5 SSSC

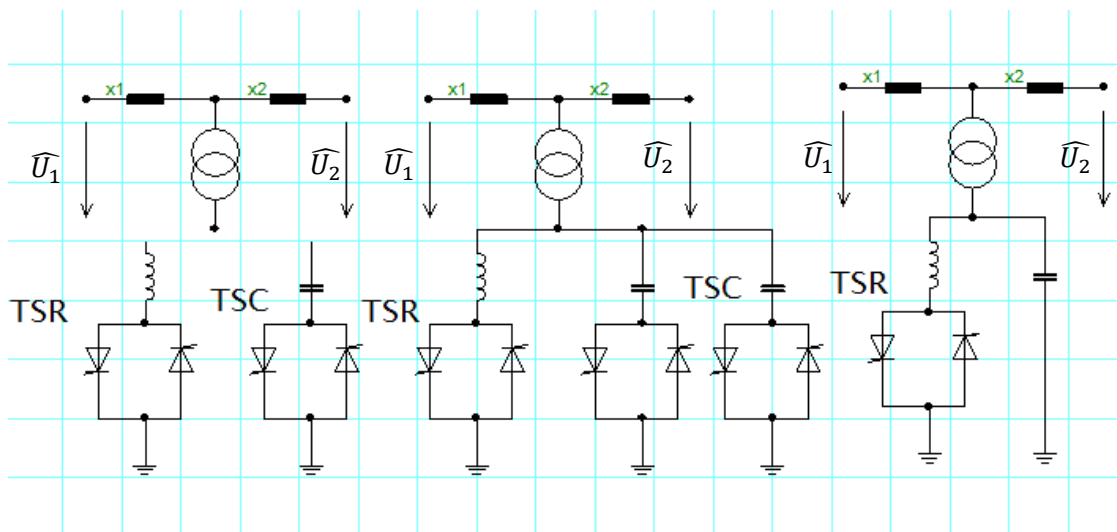
SSSC (synchronní sériový kompenzátor) se principiálně liší od ostatních sériových kompenzátorů. Základ SSSC tvoří třífázový šesti pulzní měnič VSC (Voltage Source Converter) s vypínatelnými součástkami, který umožňuje, aby SSSC byl schopen dodávat i absorbovat jalový výkon. Díky použití VSC není nutná instalace velkých pasivních prvků (kondenzátorů a tlumivek), dokáže pracovat symetricky v kapacitním i v induktivním režimu a umožňuje doplnění o stejnosměrný zdroj napětí [5], [2], [1].

Injektované napětí je řídicím parametrem SSSC a do vedení je dodávané přes transformátor. Bez stejnosměrného zdroje napětí je možné kompenzovat pouze jalový výkon. Regulovatelná je pouze amplituda injektovaného napětí. Podmínkou je, aby fázor injektovaného napětí byl kolmý na proud vedením, čímž se injektované napětí bude předbíhat nebo zpoždovat za proudem o 90° podle toho, zda SSSC pracuje v kapacitním nebo induktivním módu. V případě přidání zdroje stejnosměrného napětí je SSSC schopen dodávat a absorbovat i činný výkon. Lze tedy regulovat jak amplitudu, tak i fázi vstřikovaného napětí U_T . Lze kompenzovat i podélný odpor přenosové linky,

avšak úhel mezi napětím U_T a proudem je jiný než 90° . Část činných ztrát na odporu je hrazena ze zdroje napětí, což umožňuje na přenosové lince řídit nezávisle činný i jalový výkon současně. U SSSC nezávisí injektované napětí na proudu vedením a je možné jej řídit nezávisle. SSSC může být efektivně provozováno při nízkém i vysokém zatížení systému. SSSC je využíván při dynamickém řízení výkonových bloků, tlumení elektromechanických oscilací, zlepšení napěťové a úhlové stability.

3.6 SVC

Statický VAR kompenzátor SVC je prvek paralelní kompenzace, který po připojení k lince využívá zvyšovací transformátor nebo je zapojován přímo na terciární vinutí výkonového transformátoru. To má za následek, že součástky výkonových měničů mohou pracovat na nižším napětí, než je napětí sítě. Základní možnosti konfigurace SVC jsou znázorněny na *obrázku 3.1*. SVC bývá často sestaven z několika paralelně spojených komponentů, jakými jsou pevné kondenzátory BSC, tyristorově spínané kondenzátory TSC, tyristorově spínané tlumivky TSR a tyristorově řízené tlumivky TCR [1], [2], [4].



Obr. 3.1: Základní konfigurace SVC [1]

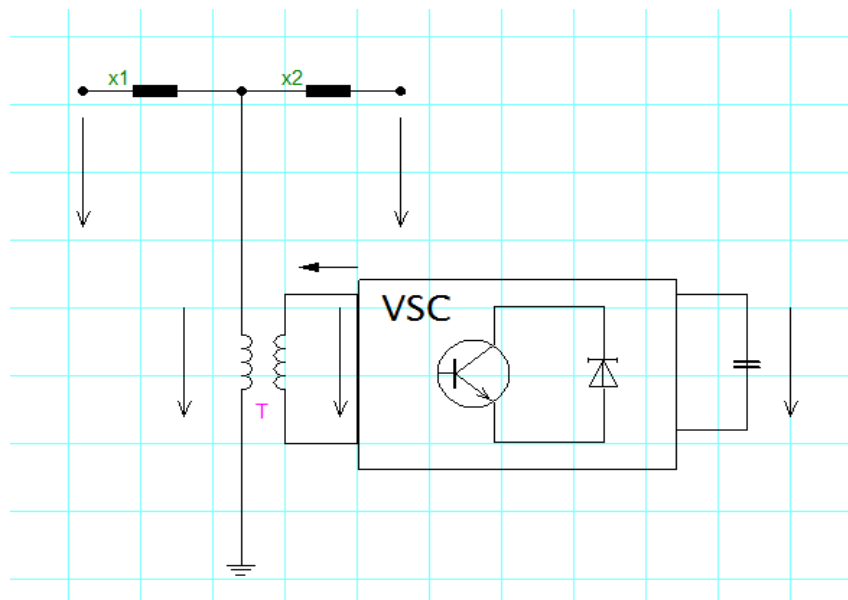
SVC buď dodává, anebo odebírá ze sítě jalový výkon, který je buď produkován, nebo absorbován v pasivních reaktančních prvcích. Řídicím parametrem je buď kapacitní, nebo induktivní reaktance, tu je možné spojitě nastavit až do okamžiku dosažení kapacitního respektive induktivního limitu. Poté se SVC chová jako paralelní tlumivka nebo kondenzátor.

SVC se používá k dynamické stabilizaci napětí neboli zvýšení přenosové schopnosti a omezení kolísání napětí, také ke zlepšení stability systému jako například zlepšení tlumení při kývání, vyrovnávání dynamických zatížení, podpora napětí v ustáleném stavu. Nejčastěji jsou zařízení SVC instalována ve velkých centrech spotřeby, kde je jejich úkolem kompenzovat výkyvy napětí způsobené poruchami v síti a proměnlivým zatížením při výkonových špičkách (například velká města, v místech napájení velkých průmyslových závodů) [1], [2], [12].

3.7 STATCOM

STATCOM (statický synchronní kompenzátor), jehož základní konfigurace je znázorněna na *obrázku 3.2*, podobně jako SSSC využívá třífázový měnič ve stejnosměrné větvi připojený paralelně k vedení přes vazební transformátor. Lze říci, že pracuje na principu zařízení SVC, avšak díky trojfázovému měniči VSC a stejnosměrné větvi vykazuje lepší provozní charakteristiky a neklade nároky na velké indukční nebo kapacitní prvky, čímž se výrazně zmenší jeho velikost. Dodávaný či odebíraný jalový výkon je závislý na spínacím režimu měniče, reaktanční prvky zapojené ve stejnosměrné větvi slouží pouze k akumulaci energie [2], [5].

Hlavními výhodami systému STATCOM oproti SVC jsou rychlejší odezva, menší rozměry, také umožňuje rozebrání a přemístění na jiné místo, může pracovat se zdroji napětí, také je schopný dodávat konstantní jalový proud téměř v celém regulačním rozsahu nezávisle na napětí v místě jeho připojení.



Obr. 3.2: Základní konfigurace STATCOM [1]

Řídicím parametrem je jalový proud. V případě, že se ve stejnosměrné větvi objevuje pouze kapacita, je absorbován nebo dodáván pouze jalový výkon. Pokud jsou zanedbány ztráty, svírá výstupní proud měniče s napětím měniče 90° . V případě, že je amplituda napětí měniče větší než amplituda napětí systému, systém STATCOM dodává do sítě jalový výkon, v opačném případě je jalový výkon ze sítě odebírán. Je-li systém rozšířen o zdroj napětí ve stejnosměrné větvi, je STATCOM podobně jako SSSC schopen dodávat či absorbovat i činný výkon. Systémy STATCOM jsou využívány zejména k dynamické stabilizaci napětí, omezení kolísání, vyrovnávání dynamických zatížení, zlepšení stability systému, zlepšení tlumení při kývání, podporu napětí v ustáleném stavu a zlepšení kvality elektrické energie [1], [3], [13].

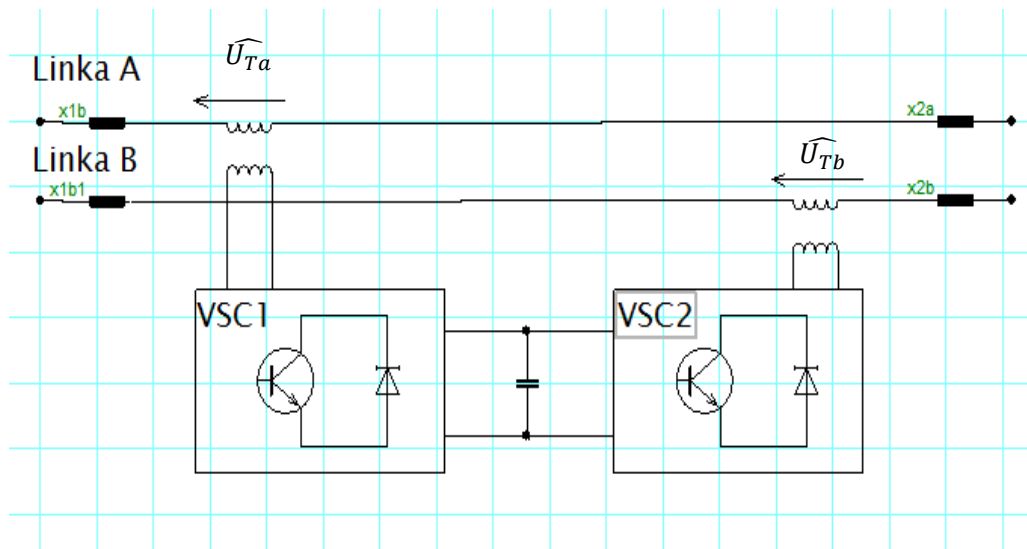
3.8 IPFC

Se zařízením IPFC (Interline Power Flow Controller) je umožněna kompenzace více přenosových linek najednou zapojených ve společné rozvodně. V případě zapojení IPFC do rozvodny je dosaženo snížení zatížení linek činným výkonem, řízení toku jalového i činného výkonu mezi vedeními a zvýšení odolnosti proti dynamickým změnám při poruchách. IPFC je zvláště výhodné, v případě, že se uvažuje o řízené kompenzaci nebo jiném řízení výkonových toků (například fázového posunu). IPFC kombinuje nezávislé kompenzátory SSSC a zajišťuje zvýšení jejich funkčních schopností

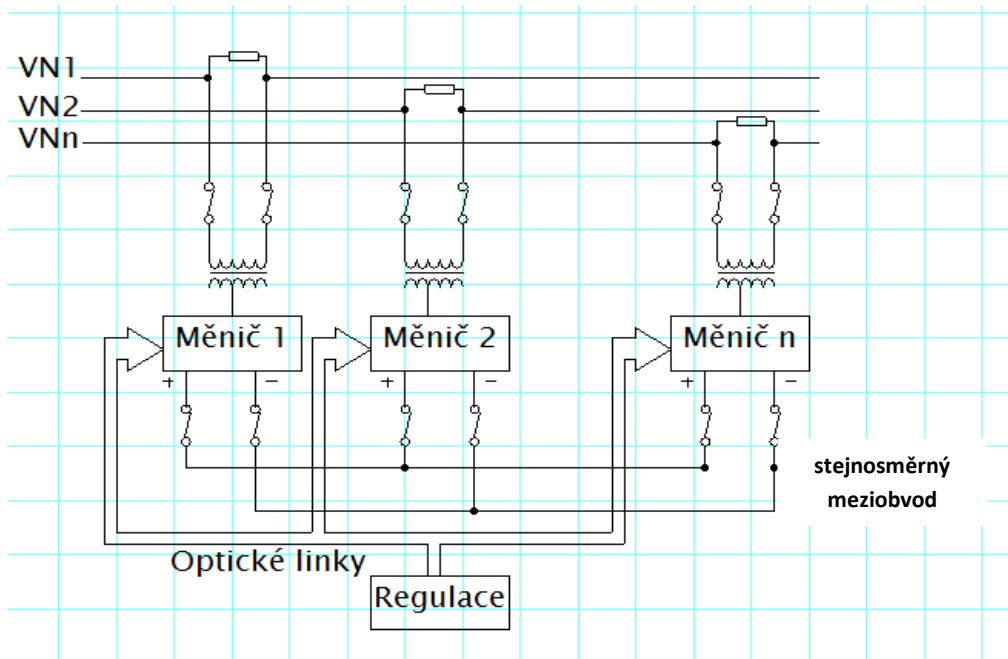
IPFC (viz obr. 3.3 a, b) je konfigurováno tak, že ke každému vedení je sériově připojen VSC měnič přes transformátor stejně jako u SSSC. Jednotlivé VS měniče jsou vzájemně propojeny přes stejnosměrný meziobvod, což každému měniči umožňuje dodávat jalový výkon do vedení, ale také odebírat činný výkon z jednoho vedení a přes společný stejnosměrný meziobvod tento činný výkon dodávat druhému měniči pro kompenzaci jiného vedení. To umožňuje přelévání toků činného výkonu z jednoho vedení do druhého a dynamické řízení zatížení jednotlivých linek. Pracovní bod měniče 1 lze považovat za pracovní bod odpovídající napěťové kompenzační linky. Obecně platí, že zvolený pracovní bod měniče 1 zajišťuje výměnu jak jalového, tak i činného výkonu na lince 1. Měnič generuje činný výkon, který mu musí být na stejnosměrné straně dodáván nebo činný výkon odebírá a do stejnosměrné strany ho dodává. Měnič je

také schopen vyměňovat jalový výkon na své střídavé straně bez potřeby napájení ze stejnosměrné strany. Avšak měnič může generovat pouze jalový výkon, tudíž činným výkon je nutné mu dodat. Požadavek na činný výkon zůstává konstantní, zatímco generovaný jalový výkon se mění s tím, jak je pracovní bod na konkrétní napěťové lince posouván. Aby byl splněn požadavek na činný výkon měniče 1, musí být měnič 2 provozován společně s druhou napěťovou linkou, což zajišťuje dodání potřebného činného do linky 1 výkon od linky 2 prostřednictvím stejnosměrného meziobvodu.

Vzhledem k použití zvyšovacích transformátorů a VSC měničů není nutné, aby kompenzovaná vedení byla na stejné napěťové úrovni. Navíc je u IPFC možnost rozpojení společného meziobvodu, následně tedy vzniknou samostatně kompenzovaná vedení. Princip zapojení IPFC pro dvě vedení je znázorněno na obrázku 3.3 a, b [3].



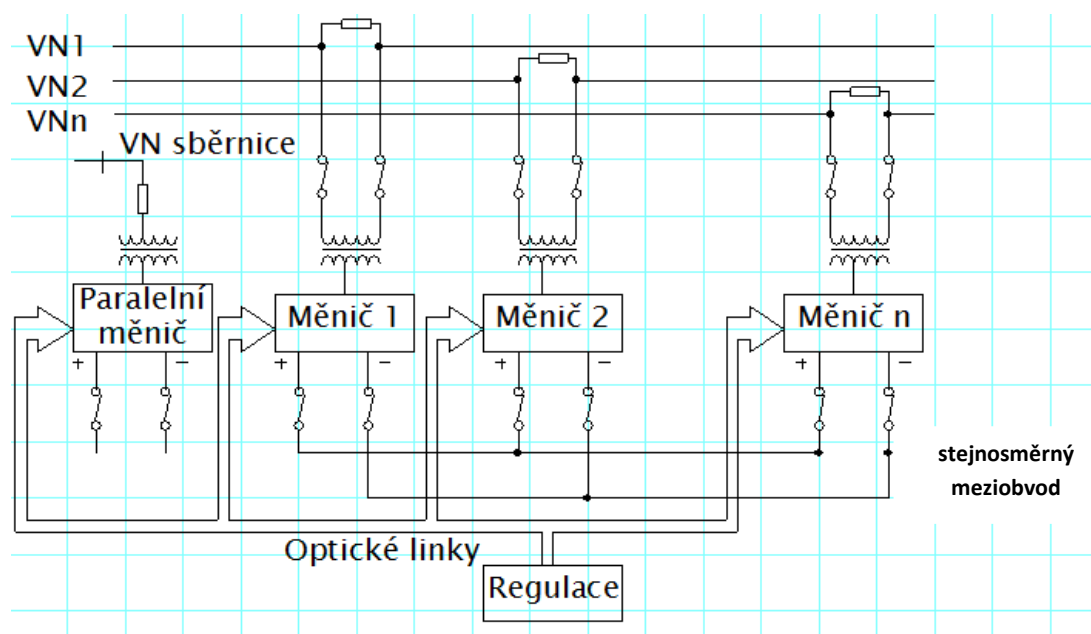
a)



b)

Obr. 3.3 a, b: Zapojení IPFC pro dvě vedení a více vedení [3] [21]

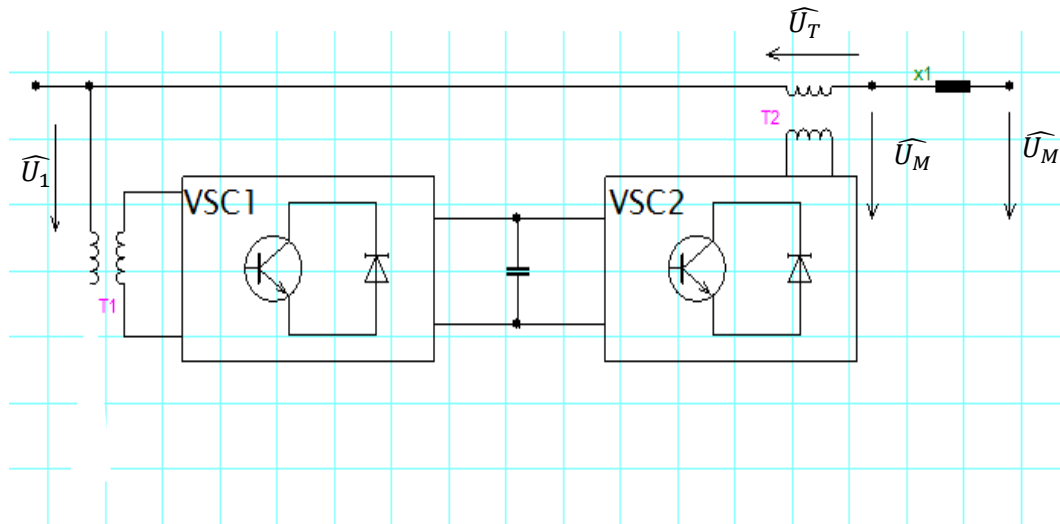
Provozní oblasti jednotlivých měničů IPFC se mohou významně lišit v závislosti na napětí a výkonech jednotlivých linek a v množství požadované kompenzace. Linka vyšší napěťové úrovně může zásobit nižší napěťovou linku, aby optimalizovala její přenos, aniž by ovlivnila vlastní přenos. IPFC je ideálním řešením k vyvážení, jak činného, tak i jalového výkonu více linkového systému. V případě zvýšené potřeby činného výkonu lze soustavu doplnit paralelně připojeným výkonovým měničem (obr. 3.4). Toto uspořádání může být ekonomicky atraktivní, a to zejména proto, že měnič musí být dimenzován pouze na očekávaný maximální činný výkon [21].



Obr. 3.4: Zapojení IPFC pro více vedení s paralelním měničem [21]

3.9 UPFC

Univerzální regulátor výkonových toků UPFC, jehož základní schéma lze vidět na obrázku 3.5, lze považovat za nejkomplexnější zařízení FACTS, jehož úkolem je řízení výkonových toků, regulace napětí a zlepšení stability. Toto zařízení je schopné ovládat současně i odděleně všechny parametry, které ovlivňují toky výkonů v soustavě (napětí, impedanci i fázový posun). UPFC může navíc pracovat jako aktivní filtr a kompenzovat harmonické zkreslení odebíraného proudu [2], [1].



Obr. 3.5: Základní konfigurace UPFC

UPFC je složeno ze dvou měničů VSC, které jsou spojeny přes stejnosměrný meziobvod, jenž je tvořen kondenzátorem. K síti jsou tyto měniče připojeny pomocí dvou transformátorů, a to paralelního a sériového. Hlavní role paralelní části je, že umožňuje injektovat libovolný proud, odebírat činný a jalový výkon. Sériově připojený měnič upravuje celkový fázor napětí dle potřeby. Dá se říci, že se jedná o spojení systémů STATCOM a SSSC, tudíž je možné využít jednotlivé výhody obou těchto zařízení, například řízení jalového výkonu paralelní větve, jenž lze řídit nezávisle na poměrech v uzlu připojení. Přitom paralelní měnič může generovat jalový proud, aniž by se vstupní napětí uzlu \widehat{U}_1 odchýlilo od požadované hodnoty. To však platí pouze pro režim řízení napětí. V případě režimu řízení výkonu platí, že paralelní jalový proud může odpovídat požadovanému induktivnímu nebo kapacitnímu jalovému výkonu. Činný výkon je injektován do sítě pomocí sériové větve, je odebírán paralelní větví a přes stejnosměrný obvod přenášen do sériové větve [1], [2], [6].

Díky sériově připojenému měniči je možné pracovat ve všech čtyřech kvadrantech a řídit nezávisle činný i jalový výkon soustavy, a to díky injektáži napětí $\widehat{U}_T = U_T \cdot e^{j(\delta_1 + \varphi_T)}$, jenž může mít libovolnou fázi vzhledem k vstupnímu napětí \widehat{U}_1 (tedy $0 \leq \varphi_T \leq 2\pi$) a libovolnou amplitudu v rozsahu $0 \leq U_T \leq U_{Tmax}$, kde hodnota U_{Tmax} odpovídá mezní hodnotě měničů, úhel δ je úhel mezi fázory napětí uzlů 1 a 2 a úhel φ_T reprezentuje úhel mezi injektovaným sériovým napětím U_T a napětím v uzlu 1.

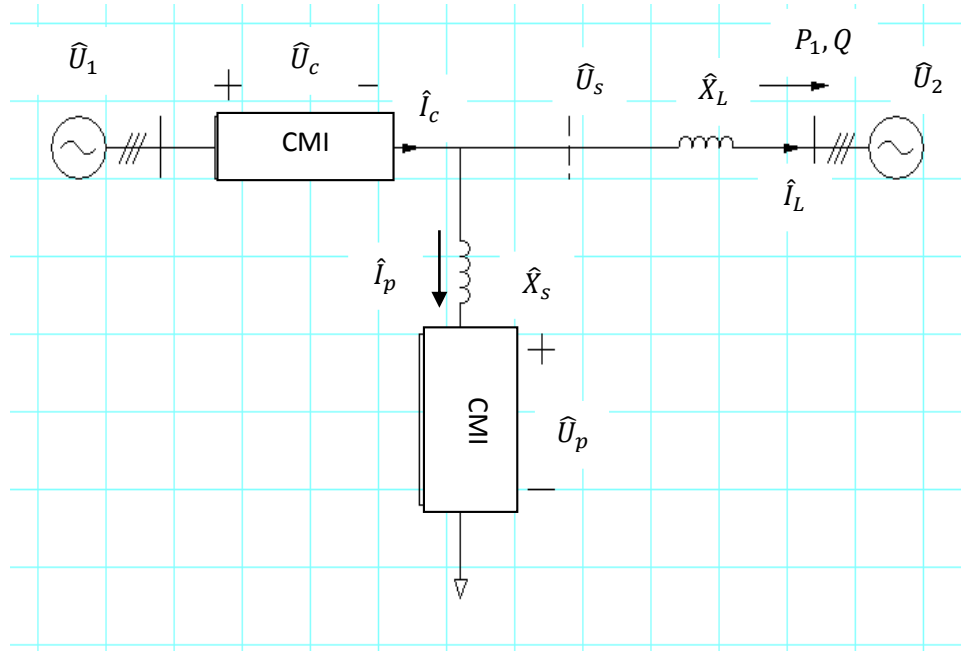
Zařízení UPFC umožňuje řídit všechny čtyři parametry ovlivňující tok výkonu a jeho sériový měnič je schopen pracovat v následujících čtyřech režimech:

- Režim regulace napětí – v případě, že injektované napětí je ve fázi s napětím \hat{U}_1 , tedy $\varphi_T = 0$, pak se amplituda napětí \hat{U}_1 zvýší. Je-li tomu naopak a injektované napětí je v protifázi, pak se amplituda sníží.
- Režim sériové kompenzace – v případě, že je vstříkované napětí kolmé na proud protékající vedením, úbytek napětí se na podélné reaktanci vedení mezi uzly 1 a 2 zvýší či sníží. Zpožďuje-li se napětí o 90° za proudem, úbytek napětí se zvětší (podélná reaktance vzroste). Naopak pokud napětí předbíhá proud o 90° , úbytek napětí se zmenší (podélná reaktance klesne).
- Režim fázového řízení - fázového natočení napětí \hat{U}_1 je docíleno tehdy, pokud injektované napětí má za následek změnu úhlu napětí \hat{U}_1 , ale nezmění jeho amplitudu.
- Režim řízení výkonových toků – u zařízení UPFC je možné nastavit amplitudu a fázi injektovaného napětí současně tak, aby celkový proud vedením splňoval požadavky na tok činného i jalového výkonu. Výkony je možné zvýšit či snížit o konstantní hodnotu nezávisle na úhlu δ a díky libovolnému natočení φ_T je možné měnit jalový či činný výkon nezávisle na druhém [1], [2], [14].

V současné době probíhá výzkum nových topologií UPFC, např. 1) UPFC na bázi maticového měniče a 2) distribuovaný regulátor výkonových toků (DPFC), který je odvozen od konvenčního zařízení UPFC. Obě tato UPFC zařízení však ještě musejí využívat transformátory, s čímž souvisejí problémy s nimi spojené, jakými jsou jejich veliký objem, ztráty, vysoké náklady, a pomalé reakce [22]

V současné době jsou nasazovány víceúrovňové měniče, které na své střídavé straně pracují s mnohonásobně vyšší hladinou napětí a mohou být navrženy pro přímé připojení k vedení, tj. bez oddělovacího transformátoru. Kaskádní víceúrovňový měnič (CMI) je technologie, která vede k dosažení vysoké úrovně napětí bez použití transformátorů a bez velkého množství polovodičových zařízení (diod) nebo velkého počtu kondenzátorů. Aby se zcela eliminovaly transformátory, byla navržena nová konfigurace UPFC, a to beztransformátorová, založená na uspořádání dvou CMI. Jeden CMI je zapojen v sérii s přenosovou linkou, druhý je zapojen paralelně (*obr. 3.6*). Oba tyto CMI se skládají ze série kaskádních H-můstků. Beztransformátorový UPFC je

oproti tradičnímu uspořádání výhodnější zejména z důvodu vysoce modulární konstrukce, nízké hmotnosti, vysoké účinnosti, vysoké spolehlivosti, nízkých nákladů a rychlé dynamické odezvy. Nicméně, stále existují problémy, které je nutné vyřešit, především modulaci a regulaci napětí, impedance, fázového posunu a zároveň je nutné zajistit jejich simultánní ovládání, aby bylo dosaženo regulace, jak činného, tak i jalového výkonu.

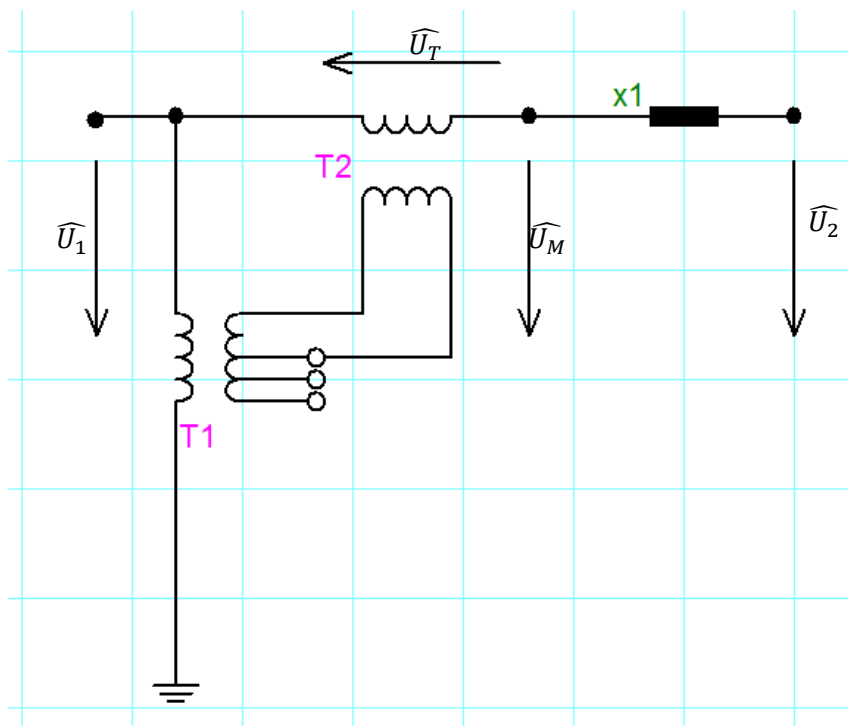


Obr. 3.6: Konfigurace beztransformátorového UPFC [22]

Beztransformátorový UPFC má některé nové vlastnosti, například paralelní měnič je zapojen až za sériovým, neprobíhá zde žádná výměna činného výkonu mezi CMI, jsou využívána modulární CMI a jejich inherentní redundance poskytuje větší pružnost a vyšší spolehlivost. Princip beztransformátorového UPFC je zcela odlišný od konvenčního UPFC. Sériový CMI je řízen tak, aby generoval požadované napětí \hat{U}_c , na vysílající straně je tak získáno napětí \hat{U}_s , které reguluje činný a jalový výkon na přenosové lince. Mezitím paralelní CMI injektuje proud \hat{I}_p , aby byl zajištěn nulový činný výkon na obou CMI. V důsledku toho, jak sériový, tak i paralelní CMI poskytují pouze jalový výkon [22].

3.10 PST

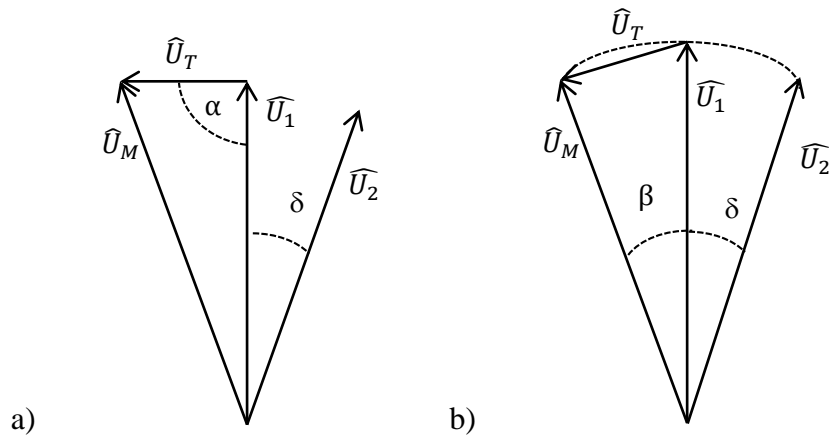
Transformátor s regulací fáze (PST) řídí toky činného a jalového výkonu v přenosové síti, čehož dosahuje změnou fázového posuvu mezi napětími na začátku a konci vedení. PST je schopen řídit velikost i směr výkonových toků. Zařízení PST je složeno ze dvou transformátorů, a to paralelně zapojeného k přenosovému vedení regulačního transformátoru, ze kterého se získává fázové napětí, a přidavného transformátoru umístěného v sérii s přenosovým vedením (obrázek 3.7). Požadovaný fázový posun vzniká injektováním regulačního napětí \widehat{U}_T do sériového transformátoru. Získané regulační napětí je přidáváno do fáze tak, aby bylo dosaženo posuvu výsledného napětí \widehat{U}_M [18], [20].



Obr. 3.7: Základní uspořádání PST [2]

Je-li injektované regulační napětí ve fázi s fázovým napětím sítě, dojde ke změně amplitudy napětí. Změnou amplitudy je řízen tok jalového výkonu a napětí. Činný výkon lze řídit změnou fáze napětí. V případě, že je vstříkované regulační napětí kolmé na fázové napětí, jedná se o transformátor Quadrature booster transformer – QBT. Dalším typem transformátoru PST je tzv. Phase angle regulator – PAR, který je

schopen dodat takové regulační napětí, při němž nedojde ke změně amplitudy napětí. Tyto dva základní typy transformátorů jsou znázorněny na *obrázku 3.8* [11], [20].



Obr. 3.8 a, b: Fázorový diagram QBT a PAR [16]

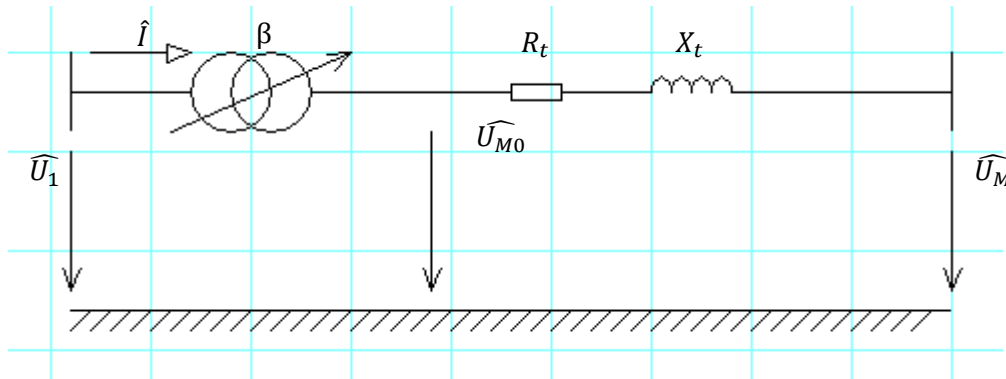
U transformátoru QBT dochází k injektáži regulačního napětí, jež je kolmé ($\alpha = 90^\circ$) k fázovému napětí sítě (např. k napětí na fázi U_a je přidáno napětí odpovídající napětí U_{bc}). Změnou regulačního úhlu β se u transformátoru PAR mění pouze fázový posuv mezi napětími bez změny amplitudy $|U_1|=|U_M|=|U|$. Činný a jalový výkon lze určit jako:

$$P = \frac{U^2}{X} \cdot \sin(\delta + \beta) \quad (30)$$

$$Q = \frac{U^2}{X} [\cos(\delta + \beta) - 1] \quad (31)$$

3.10.1 Transformátor s regulací fáze pod zatížením

Schéma transformátoru PST je možné vidět na *obr. 3.9*. Prozatím byl uvažován pouze regulační úhel na zařízení PST bez zatížení. Průchod proudu má za následek vznik úbytku napětí a změnu regulačního úhlu. Na základě nastavení regulace může PST regulovat vpřed (advance) nebo zpět (retard). Fázový posuv na transformátoru PST pod zatížením není stejný jako fázový posuv naprázdno. Při regulaci vpřed dochází ke zmenšení výsledného fázového posuvu a při regulaci zpět naopak k nárůstu [10], [20].



Obr. 3.9: PST pod zatížením [16]

3.10.2 Rozdělení typů transformátorů s regulací fáze

Transformátory s regulací fáze jsou zařízení, která se konstrukčně liší. Při každé jednotlivé instalaci je nutné zvážit, který typ transformátoru PST je nejvýhodnější.

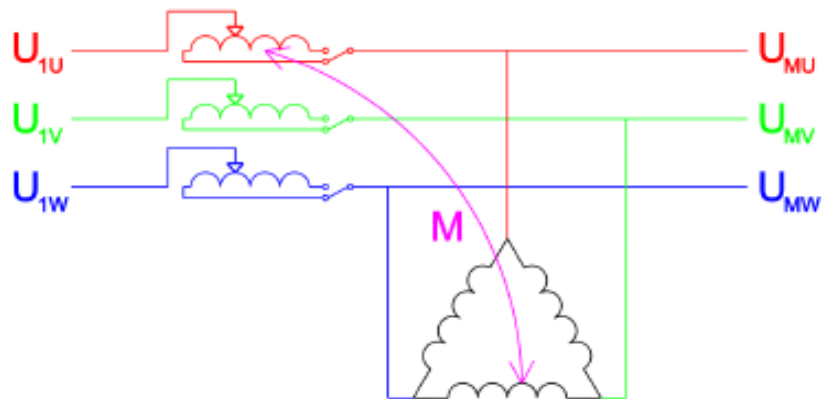
Transformátory PST lze rozdělit následujícím způsobem:

- Přímá regulace PST – jedno třífázové jádro, vhodným způsobem zapojení vinutí je možné dosáhnout požadovaného regulačního úhlu β . Bývají užity nejčastěji do napěťových hladin do 138 kV.
- Nepřímá regulace PST – složen ze dvou oddělených transformátorů (regulační budící transformátor regulující velikost napětí U_T a sériový transformátor vstříkující regulační napětí do vhodné fáze). Tento typ bývá využit na všech napěťových hladinách.
- Symetrická regulace PST – výstupní napětí U_M je fázově pootočeno, amplituda je však stejná jako u vstupního napětí U_1 .
- Nesymetrická regulace – výstupní napětí U_M je oproti vstupnímu napětí U_1 fázově posunuto a dochází i ke změně amplitud.

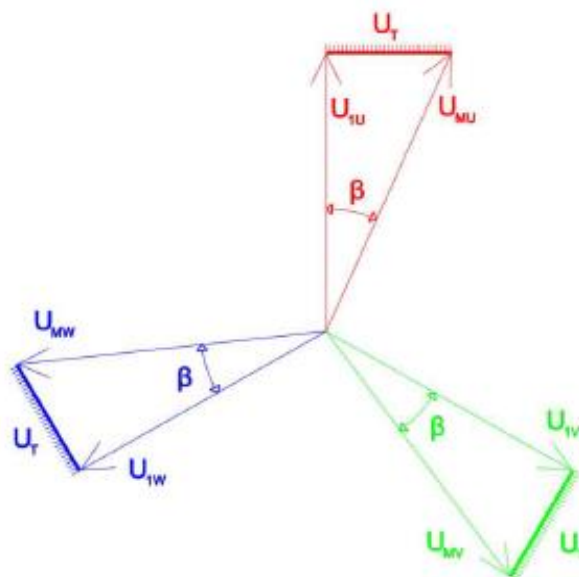
Základní typy transformátorů PST jsou kombinacemi výše uvedených charakteristik:

- Přímá, nesymetrická regulace PST (obr. 3.10, fázorový diagram obr. 3.11) – je zde magnetická vazba pro fázi U, vstříkované regulační napětí U_T je kolmé na

fázové napětí, dochází k fázovému posuvu a nárůstu amplitudy výstupního napětí U_{MU} . V případě potřeby změny toku výkonu je použit přepínač.

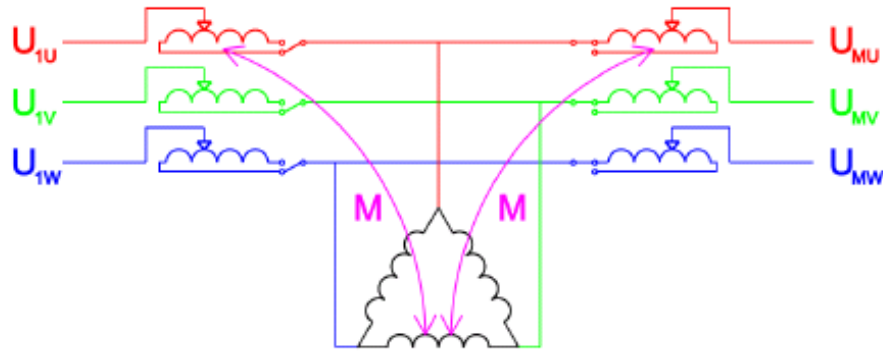


Obr. 3.10: Schéma zapojení PST s přímou, nesymetrickou regulací [16]

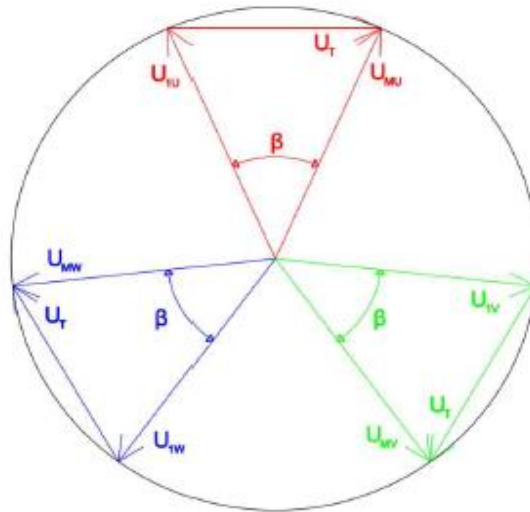


Obr. 3.11: Fázorový diagram PST s přímou, nesymetrickou regulací [16]

- Přímá, symetrická regulace PST (obr. 3.12, fázorový diagram obr. 3.13) – je nutné spolu s ním instalovat další přepínač odboček, což má za následek zvýšení ceny zařízení. Celkový regulační úhel β je však větší a amplituda výstupního napětí se nemění.

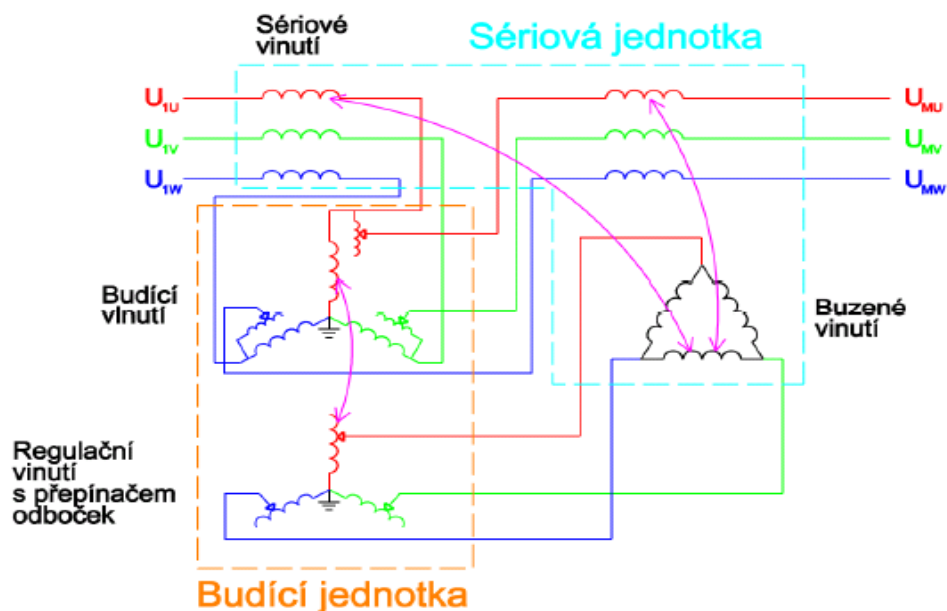


Obr. 3.12: Schéma zapojení PST s přímou, symetrickou regulací [16]



Obr. 3.13: Fázorový diagram PST s přímou, symetrickou regulací [16]

- Nepřímá, symetrická regulace PST (obr. 3.14)- transformátor je složen ze dvou jednotek- sériového a budícího transformátoru. K dosažení symetrické regulace, je zapotřebí, aby bylo vinutí sériové jednotky rozděleno na dvě poloviny. Ze sériové jednotky je napájeno budící vinutí, které je magnetickou vazbou spojeno s vinutím regulačním, které obsahuje přepínač odboček. Regulační vinutí dále napájí buzené vinutí zapojené do Δ , z něho je pak vstřikováváno regulační napětí U_T do vedení. Výsledkem je fázový posuv napětí bez změny amplitudy napětí. Fázorový diagram PST je stejný jako na obr. 3.13.



Obr. 3.14: Schéma zapojení PST s nepřímou, symetrickou regulací [16]

- Nepřímá, nesymetrická regulace PST- konstrukce PST s nepřímou a nesymetrickou regulací je obdobná jako na obr. 3.14, s tím rozdílem, že vinutí sériové jednotky není rozděleno na dvě poloviny. Fázorový diagram PST je stejný jako na obr. 3.11 [10], [20].

4 Závěr

V této bakalářské práci byly rozebrány principy způsobů řízení činného a jalového výkonu v energetické soustavě popsána zařízení FACTS.

První část práce byla věnována teoretickému popisu způsobů řízení činného a jalového výkonu v energetické soustavě. Dále zde byly nastíněny principy řízení výkonových toků a uvedeny charakteristiky možných kompenzačních prostředků. Poslední část této kapitoly byla věnována vlivu výkonových toků na napěťovou úroveň.

Druhá část práce se zaměřovala na typy zařízení FACTS. V této kapitole byla popsána jednotlivá zařízení spadající do této kategorie systémů, a to TSC a TCR, TCSC, GCSC, TSSC, SSSC, SVC, STATCOM, více pozornosti bylo věnováno zařízením IPFC, UPFC a PST.

Vzhledem k tomu, že neustále rostou nároky na již přetížená přenosová i distribuční vedení a zároveň dochází k prudkému rozvoji výkonových polovodičových měničů, lze tedy v příštích letech očekávat rozvoj a rozšíření zařízení založených na výkonových měničích, jakými jsou například IPFC a UPFC. Zařízení IPFC umožňují kompenzaci více přenosových linek najednou zapojených ve společné rozvodně. Univerzální regulátor výkonových toků UPFC lze považovat za nejkomplexnější zařízení FACTS, jehož úkolem je řízení výkonových toků, regulace napětí a zlepšení stability. Tato zařízení se vyznačují lepší dynamikou a dokáží více, než systémy založené na PST, které jsou naopak robustnější a spolehlivější, tedy méně náchylné na poruchy a odstávky.

Všechny cíle práce, které byly v úvodu vytýčeny, byly splněny.

Literatura

- [1] Grünbaum, R., Noroozian, M., Thorvaldsson, ABB.: *FACTS – powerful systems for flexible power transmission*, [online] ABB 2013-09-04 [cit. Březen 2016], Dostupné z: <[http://www05.abb.com/global/scot/scot221.nsf/veritydisplay/b0f2c8c94b48a6bcc1256fda003b4d42/\\$file/FACTS_%20eng.%20ABB%20Review.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot221.nsf/veritydisplay/b0f2c8c94b48a6bcc1256fda003b4d42/$file/FACTS_%20eng.%20ABB%20Review.pdf)>
- [2] Tlustý, J., a kolektiv: *Monitorování, řízení a chránění elektrizačních soustav*, ČVUT v Praze, Praha 2011, ISBN 978-80-01-04940-2.
- [3] Hingorani, N.G., Gyugyi L.: *Understanding FACTS*, New York: IEEE Press, c2000. 432 s. ISBN 0-7803-3455-8.
- [4] Acha, E. Agelidis, V.G., Anaya-Lara, O., Miller, T.J.E.: *Power Electronic Control in Electrical Systems*. Oxford: Newnes Press, c2002. 443 s. ISBN 0-7506-5126-1.
- [5] Padiyar, K. R.: *FACTS controllers in power transmission and distribution*. New age international publishers, 2007, ISBN 978-81-224-2541-3
- [6] Komoni, V., Krasniqi, I., Avni Alidemaj, G. K.: *Control Active and Reactive Power Flow with UPFC connected in Transmission Line*. MEDPOWER 2012. ISBN 978-1-84919-715-1
- [7] *FACTS – Flexible AC Transmission Systems*. [online]: SIEMENS [cit. březen 2016]. Dostupné z <www.energy.siemens.com/hq/en/power-transmission/facts/>
- [8] *TCSC for stable transmission of surplus power from Eastern to Western India*. [online]: ABB [cit. Březen 2016]. Dostupné z <http://new.abb.com/facts/references/reference_rourkela_raipur>
- [9] *FACTS for grid voltage stabilization and increased power transmission capability in Chile*. [online]: ABB [cit. Březen 2016]. Dostupné z http://new.abb.com/facts/references/reference_cerro_navia
- [10] Švec, J.: *Řízení výkonových toků v elektrizačních soustavách s využitím systémů FACTS*. Praha, duben 2009. 156 s. ČVUT v Praze. Disertační práce
- [11] Verboomen, J., Van Hertem, D., Schavemaker, P.H., Kling, W.L., Belmans, R.: *Phase Shifting Transformers: Principles and Applications*. IEEE, Amsterdam, November 2005
- [12] ABB FLEXIBLE AC TRANSMISSION SYSTEMS.: SVC and SVC Light projects Worldwide [online]. 2008. <http://www.abb.cz/industries/us/9AAC30100023.aspx?country=CZ>
- [13] ABB FLEXIBLE AC TRANSMISSION SYSTEMS.: STATCOM replaces critical urban generation for voltage control and stability [online]. 2010. <http://www.abb.cz/industries/us/9AAC30100023.aspx?country=CZ>
- [14] Gyugyii, L.; et al. *The Unified Power Flow Controller: A new Approach to Power Transmission Control*. Transition on Power Delivery IEEE 1995.

- [15] Sadikovic, R.: *Use of FACTS Devices for Power Flow Control and Damping of Oscillations in Power Systems*. Dissertation, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, 2006.
- [16] Korejčík, M.: *Návrh transformátoru s regulací fáze pro laboratorní výuku*. Diplomová práce, VUT Brno, 2012.
- [17] Rozsypal, D.: *Vliv zařízení FACTS na ztráty v elektrizačních soustavách*. Diplomová práce, CVUT Praha, 2015.
- [18] Preininger, G.: Electric power transformer engineering – chapter Phase-Shifting Transformers. *Taylor & Francis Group, LLC*, 2006
- [19] Larsen, E. V.: *A Classical Approach to Constructing a Power Flow Controller*. Power System Energy Consulting, NY: IEEE Press, 1999, p.1192–1195.
- [20] Ptáček, J.: *Regulace toků výkonů v propojených elektrizačních soustavách*. Brno, 2004. 174 s. FEKT VUT v Brně. Disertační práce.
- [21] Shuitao, Y. Et al: *Modulation and Control of Transformerless*, NY: IEEE Press, 2016, p.1050–1063.
- [22] Laszio, G. Et al: *The Interline Power Flow Controller Concept: A New Approach to Power Flow Management in Transmission Systems*. NY: IEEE Press, 1999, p.1115–1123.