



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická
Katedra elektroenergetiky

Vliv zařízení FACTS na ztráty v elektrizačních soustavách

FACTS Devices Influence on Electrical System Losses

Diplomová práce

Studijní program: Elektrotechnika, elektronika a management

Studijní obor: Aplikovaná elektrotechnika

Vedoucí práce: Ing. Jan Švec, Ph.D.

Bc. Daniel Rozsypal

Praha 2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. Daniel Rozsypal**

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management
Obor: Elektroenergetika

Název tématu: **Vliv zařízení FACTS na ztráty v elektrizačních soustavách**

Pokyny pro vypracování:

1. Popište možnosti kompenzací v přenosových soustavách pomocí zařízení FACTS.
2. Zpracujte přehled významných druhů aplikací zařízení FACTS v ES.
3. Zhotovte výpočetní model pro analýzu vlivů kompenzačních zařízení na provoz soustav.
4. Pomocí případové studie vypracujte analýzu vlivu zařízení FACTS na ztráty v ES.

Seznam odborné literatury:

- [1] Hingorani, N.G., Gyugyi L.: Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems. New York: IEEE Press, 2000
- [2] Das, J.C.: Power System Analysis. Marcel Dekker, New York, 2002
- [3] Acha, E., et al.: Power Electronic Control in Electrical Systems. Newnes Press, Oxford, 2002

Vedoucí: Ing. Jan Švec, Ph.D.

Platnost zadání: do konce letního semestru 2014/2015

prof. Ing. Josef Tlustý CSc.
vedoucí katedry



prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma „Vliv zařízení FACTS na ztráty v elektrizačních soustavách“ vypracoval samostatně pod vedením vedoucího práce a uvedl v ní všechny použité literární a jiné odborné zdroje.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu §60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském a o právech souvisejících s právem autorským, ve smyslu pozdějších znění tohoto zákona.

V Praze dne: 5. ledna 2015

Podpis:

Rád bych poděkoval všem, kteří se podíleli na této diplomové práci zejména pak vedoucímu diplomové práce Ing. Janu Švecovi, Ph.D. za poskytnutí užitečných studijních materiálů.

Abstrakt

Tato diplomová práce je zaměřena na problematiku skupiny kontrolérů FACTS. Podává přehled o základních principech jednotlivých kontrolérů a významných aplikací FACTS ve světě. Pozornost je věnována především vlivu FACTS na ztráty v elektrizačních soustavách a výpočtu ustáleného chodu soustavy pomocí Newton-Raphsonovy metody.

Klíčová slova

FACTS, TCSC, STATCOM, SVC, ustálený chod, Newton-Raphsonova metoda, Gauss-Seidlova metoda, Ztráty, Přenosová schopnost, Sériová kompenzace, Paralelní kompenzace

Abstract

This diploma thesis is focused on group of FACTS devices. It provides an overview of basic principles of controllers FACTS and their worldwide applications. This thesis mainly focuses on the influence FACTS on losses in electrical power systems and computation of the steady state system using the Newton-Raphson method.

Keywords

FACTS, TCSC, STATCOM, SVC, Steady state system, Newton-Raphson method, Gauss-Seidel method, Losses, Transfer capability, Series compensation, Parallel compensation

Obsah

Seznam zkratk	8
Úvod	9
1 Cíl práce	10
2 Možnosti kompenzace v přenosových soustavách pomocí zařízení FACTS	11
2.1 Příklad výkonových toků na vedení.....	11
2.2 Typy zařízení FACTS.....	13
2.2.1 TSC a TCR.....	14
2.2.2 TCSC.....	14
2.2.3 GCSC	16
2.2.4 TSSC.....	17
2.2.5 SSSC.....	18
2.2.6 SVC.....	20
2.2.7 STATCOM.....	23
2.2.8 UPFC.....	26
2.2.9 IPFC	28
2.2.10 PST	29
3 Přehled významných druhů aplikací zařízení FACTS v ES	33
3.1 Ztráty na vedení	33
3.2 Napěťová stabilita	34
3.3 Řízení a regulace toku činných výkonů	35
3.4 Řízení a regulace toku jalových výkonů	36
3.5 Tlumení kývání.....	37
3.6 Přehled aplikací systémů FACTS ve světě	37
4 Popis výpočetního modelu pro analýzu vlivů kompenzačních zařízení na provoz soustav	43
4.1 Ustálený chod soustavy	43
4.1.1 Kvalifikace veličin a uzlů sítě	44
4.2 Výpočet ustáleného chodu jako nelineární úloha.....	45
4.3 Gauss-Seidlova metoda.....	47

4.4	Newton-Raphsonova metoda.....	49
5	Případová studie pro analýzu vlivu zařízení FACTS na ztráty v ES	57
5.1	Analýza ztrát modelované elektrizační soustavy.....	60
5.2	Závislost ztrát na kompenzaci pomocí sériového FACTS kontroléru	64
5.3	Optimální řešení sériové kompenzace pomocí FACTS pro snížení činných ztrát soustavy	67
5.4	Závislost ztrát na kompenzaci pomocí paralelního FACTS kontroléru	68
5.5	Optimální řešení paralelní kompenzace pomocí FACTS pro snížení činných ztrát soustavy	71
	Závěr	73
	Literatura.....	75
	Seznam obrázků.....	77
	Seznam tabulek.....	79

Seznam zkratek

- ENSTO-E (European Network of Transmission System Operators for Electricity)
- ES Elektrizační soustava
- FACTS Flexible Alternating Current Transmission System
- FC Fixed shunt capacitor
- FR Fixed shunt reactor
- MSC Mechanical switched shunt capacitor
- MSR Mechanical switched shunt reactor
- 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

Úvod

Přirozený rozrůstající se trh s elektřinou i tlak na spolehlivost dodávky elektrické energie nutí provozovatele přenosových sítí po celém světě propojovat mezi sebou přenosové soustavy jednotlivých států. Zůstaneme-li v Evropě, elektrizační soustavy jednotlivých evropských států tvoří vzájemně propojený komplex soustavy ENSTO-E. ENSTO-E (European Network of Transmission System Operators for Electricity) je evropská síť provozovatelů přenosových soustav, která zahrnuje 41 provozovatelů z 34 zemí Evropy. Cílem této propojené sítě je liberalizace trhu s plynem a elektřinou v Evropské unii a integrace obnovitelných zdrojů. Toto propojení má nespočet výhod jako například zvýšení spolehlivosti dodávky elektrické energie, propojení trhu a obchodu s elektrickou energií mezi státy a mnoho dalších. Kvůli tomu jsou ale kladeny velké nároky na přenosové soustavy. Díky volnému obchodu s elektrickou energií a připojení velkého množství obnovitelných zdrojů do soustavy vznikají takzvané „tranzitní toky“. Toky výkonů se totiž vždy řídí fyzikálními zákony a nerespektují hranice nebo uzavřené obchodní dohody. Mimo to se evropské přenosové soustavy potýkají i s takzvanými kruhovými toky, kdy teče část výkonu z místa výroby do místa spotřeby přes přenosová vedení okolních států. To je problém i České republiky.

Teoretických možností k odstranění tohoto problému je mnoho. Nejjednodušší by bylo vybudovat nová přenosová vedení a posílit tak přenosovou soustavu. To je ale v krátkém časovém horizontu nereálné ať už z důvodů majetkoprávních, legislativních nebo ekologických. Jednou z cest jak ulehčit přetíženým přenosovým sítím je využití FACTS kontrolérů. Pod tímto názvem se skrývá řada systémů, které jsou určeny k vyšší statické a dynamické stabilitě přenosových soustav. Tyto systémy přispívají k lepšímu využití stávajících vedení. Díky optimálnímu rozložení toků výkonů po vedení lze dosáhnout i snížení ztrát celého propojeného systému.

Systémy FACTS jako celistvý koncept jsou známi již od 80. let minulého století, ale až v poslední době jsou na trhu dostupné technologie, díky kterým je možné je hospodárně využít. Hlavním důvodem, který zpřístupnil systémy FACTS je zvládnutá technologie výroby polovodičových součástek a jejich cenová dostupnost v posledních letech.

1 Cíl práce

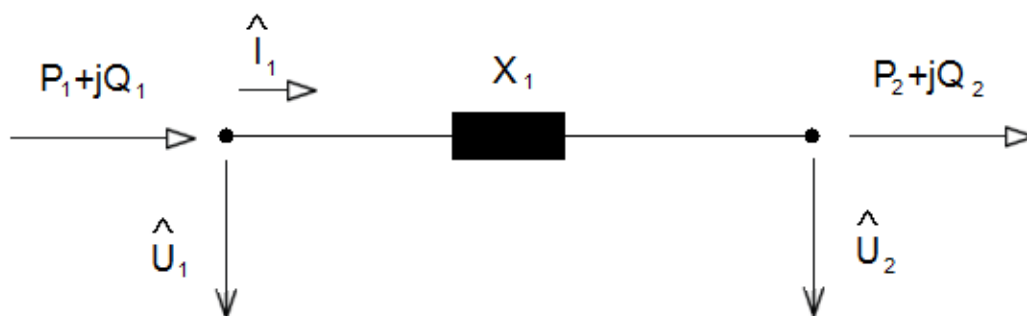
Cílem této diplomové práce je sestavit přehled nejčastěji využívaných zařízení patřících do skupiny systémů FACTS a ukázat některé možnosti použití těchto systémů a přehled již instalovaných zařízení FACTS ve světě.

Cílem praktické části je ukázat metodiku výpočtu ustáleného chodu uzlových sítí a vliv kompenzace zařízení FACTS na modelovou uzlovou síť. Zvláštní důraz je kladen na snížení ztrát v této soustavě.

2 Možnosti kompenzace v přenosových soustavách pomocí zařízení FACTS

2.1 Příklad výkonových toků na vedení

Pro správné pochopení funkce zařízení FACTS a jejich účinků je nejprve nutné vysvětlit výkonové rovnice přenosu. Výkonové toky mohou být ovlivněny změnou základních elektrických parametrů a to hlavně impedancí vedení a uzlovými napětími. Pro zjednodušení budu uvažovat jednu linku oddělenou od zbytku soustavy modelovanou jako její sériovou reaktanci. Toto zjednodušení je možné provést, protože pro podélné parametry přenosových linek platí, že reaktance je mnohem vyšší než činný odpor. Na obrázku 2.1 je jednopólové schéma přenosové linky. [2]



Obr. 2.1: Jednopólové schéma přenosové linky (modifikováno dle: [2])

Pro zdánlivý výkon S_1 , který teče od uzlu 1 k uzlu 2 platí:

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

Kde \hat{I}_1^* je komplexně sdružený proud, pro který platí:

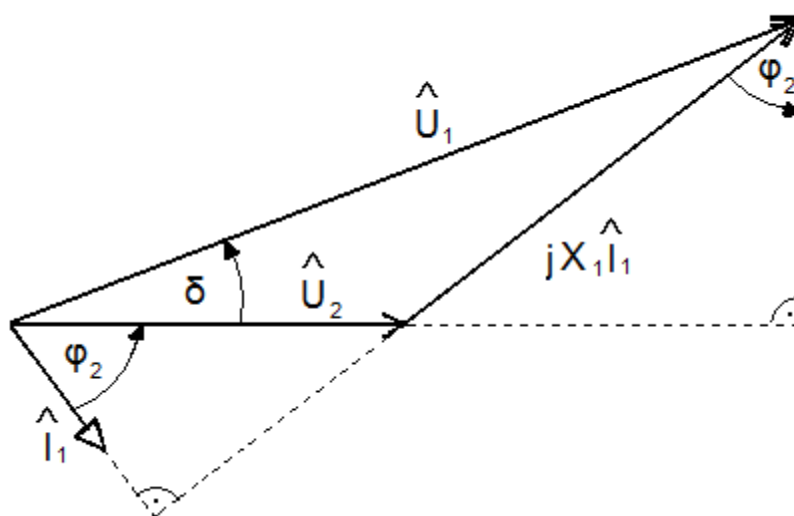
$$\hat{I}_1^* = \frac{\hat{U}_1 - \hat{U}_2}{jX_1} \quad (2)$$

Potom pro činný a jalový výkon můžeme psát:

$$P_1 = \operatorname{Re} \left\{ \hat{U}_1 \cdot \frac{\hat{U}_1 - \hat{U}_2}{jX_1} \right\} \quad (3)$$

$$Q_1 = \operatorname{Im} \left\{ \hat{U}_1 \cdot \frac{\hat{U}_1 - \hat{U}_2}{jX_1} \right\} \quad (4)$$

Pro pochopení řízení výkonových toků je nutné ještě odvodit rovnice popisující právě tyto toky na obou koncích vedení. Tyto rovnice vycházejí z fázorového diagramu na obr. 2.2 a za předpokladu, že uvažujeme bezztrátové vedení. [2]



Obr. 2.2: Fázorový diagram (modifikováno dle: [2])

Pro činné výkony platí:

$$P_2 = U_2 \cdot I_1 \cdot \cos\varphi_2 \quad (5)$$

$$X_1 \cdot I_1 \cdot \cos\varphi_2 = U_1 \cdot \sin\delta \quad (6)$$

$$I_1 \cdot \cos\varphi_2 = \frac{U_1}{X_1} \cdot \sin\delta \quad (7)$$

$$P_2 = \frac{U_1 \cdot U_2}{X_1} \cdot \sin\delta = P_1 \quad (8)$$

Obdobné vztahy platí i pro jalové výkony:

$$Q_2 = U_2 \cdot I_1 \cdot \sin\varphi_2 \quad (9)$$

$$X_1 \cdot I_1 \cdot \sin\varphi_2 + U_2 = U_1 \cdot \cos\delta \quad (10)$$

$$I_1 \cdot \sin\varphi_2 = \frac{U_1}{X_1} \cdot \cos\delta - \frac{U_2}{X_1} \quad (11)$$

$$Q_2 = \frac{U_1 \cdot U_2}{X_1} \cdot \cos\delta - \frac{U_2^2}{X_1} \quad (12)$$

$$Q_1 = Q_2 + X_1 \cdot I_1^2 \quad (13)$$

2.2 Typy zařízení FACTS

Díky vývoji výkonové elektroniky lze použít pro řízení elektrizační soustavy moderní přístup a to pomocí systému FACTS. Zařízení FACTS lze definovat jako systém pro regulaci jednoho nebo více parametrů sítě na bázi výkonové elektroniky spolu s dalšími statickými zařízeními. Rozdělit je můžeme podle dvou základních hledisek. První je připojení zařízení k soustavě, kde rozlišujeme FACTS sériové (TCSC a SSSC), paralelní (SVC a STATCOM) a kombinované (PST a UPFC). Druhé je podle historického vývoje, kde rozlišujeme tři generace. [3]

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]

Dále budou podrobněji probrána nejčastěji používaná zařízení FACTS.

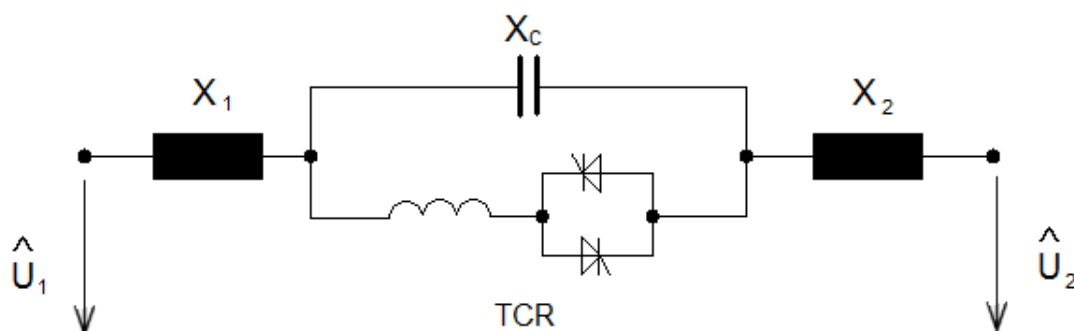
2.2.1 TSC a TCR

TSC a TCR nejsou přímo zařízení FACTS, jedná se o součásti připojící se paralelně k vedení, z nichž se některá zařízení FACTS skládají. TCR je tlumivka, nejčastěji se vzduchovým jádrem, řízena obousměrným tyristorovým ventilem. Její reaktance se plynule mění podle sepnutí (řídícího úhlu) tyristorového ventilu. TSC je kondenzátor zapojený v sérii s obousměrným tyristorovým ventilem. Kondenzátor není fázově řízen plynule jako tlumivka v případě TCR, ale je pouze skokově spínán a vypínán. Kombinací TSC a TCR získáme například FACTS kontrolér SVC, který bude vysvětlen níže. [1][4]

2.2.2 TCSC

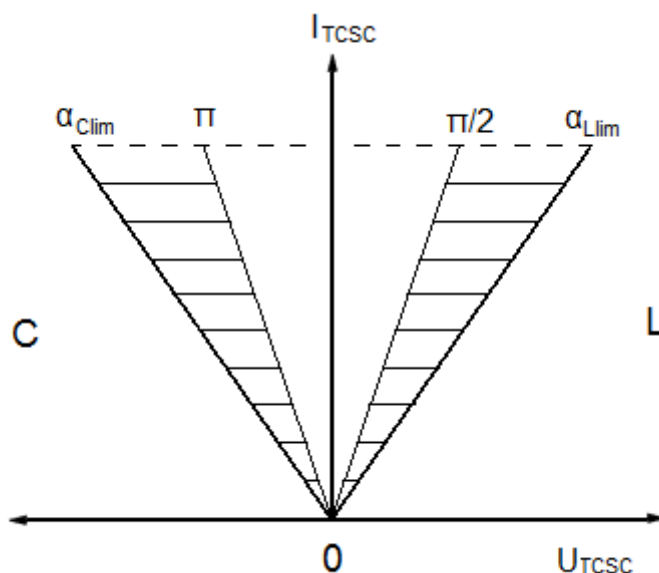
TCSC je tyristorově řízený sériový kondenzátor (Thyristor controlled series capacitor). Kompenzace pomocí sériového kondenzátoru se často využívá pro dlouhá přenosová vedení díky dobrému poměru ekonomické náročnosti a zvýšení přenosové schopnosti vedení. Princip funkce TCSC je velice jednoduchý. Kapacitní reaktance je plynule říditelná díky paralelnímu zapojení pevného kondenzátoru a tyristorově řízené tlumivky TCR. Přidáním TCSC do série s vedením se tedy změní jeho podélná reaktance. Základní konfigurace je na obrázku 2.3. Použitá tlumivka je nejčastěji

vzduchová. Z důvodu omezení přepětí na kondenzátoru se k němu často paralelně připojuje varistor. [5][1]



Obr. 2.3: Základní konfigurace TCSC (modifikováno dle: [2])

Omezení V-A pracovní oblasti je dáno především maximálním dovoleným proudem tyristorů a jejich řídicím úhlem. V-A charakteristika je na obrázku 2.4.



Obr. 2.4: V-A pracovní oblast TCSC (modifikováno dle: [2])

Díky rychlému řízení tyristorových ventilů dokáže TCSC řídit tok činného výkonu po vedení a rychle tlumit elektromechanické oscilace. TCSC pracuje ve třech základních režimech:

a) Bypass režim

Bypass režim nastane při řídicím úhlu tyristorů 180° , tedy při plném otevření ventilu. Proud tlumivkou je spojitý a sinusový. Protože je reaktance tlumivky větší než kondenzátoru, je i celková reaktance induktivního charakteru. Kondenzátorem prochází nejmenší možný proud a zbytek proudu tekoucího vedením prochází přes tlumivku a tyristorové ventily, tím je kondenzátor chráněn proti přetížení například při poruchách.

b) Blokovací režim

Řídicí úhly tyristorů jsou 0° . Jsou tedy blokovány a v ideálním případě jimi neprochází žádný proud. TCSC má kapacitní reaktanci rovnou reaktanci samotného kondenzátoru.

c) Provozní režim

V tomto režimu jsou tyristory řízeny v rozmezí úhlů α_{\min} až 90° . Kde hodnota α_{\min} je větší než α_R , což je hodnota odpovídající rezonanci kondenzátoru a tlumivky při frekvenci 50 Hz. S rostoucím řídicím úhlem klesá celková kapacitní reaktance TCSC až do hodnoty, kdy reaktance tlumivky převyšuje reaktanci kondenzátoru. Při dalším zvyšování řídicího úhlu roste celková induktivní reaktance TCSC. Je tedy možné ventily řídit až do hodnoty 180° , ale obecně se řízení používá jen v kapacitní oblasti. [5][2]

Využití TCSC je tedy pro regulaci napětí v ustáleném stavu, kompenzaci poklesu napětí v přenosové lince a tlumení elektromechanických oscilací. [1]

2.2.3 GCSC

GCSC je GTO tyristory řízený sériový kondenzátor. Princip funkce je podobný jako u TCSC. Kompenzace se také provádí změnou impedance vedení. Rozdíl je ale v použití GTO tyristorů zapojených paralelně ke kondenzátoru. Nevyužívá se zde spínaná tlumivka pro změnu kapacitní reaktance. Výhodou GTO tyristorů je možnost spínání i vypínání řídicím pulzem. Základní uspořádání je na obrázku 2.5. Pro každou fázi je GTO tyristor vypnut řídicím úhlem γ , ten se uvažuje od maximální hodnoty

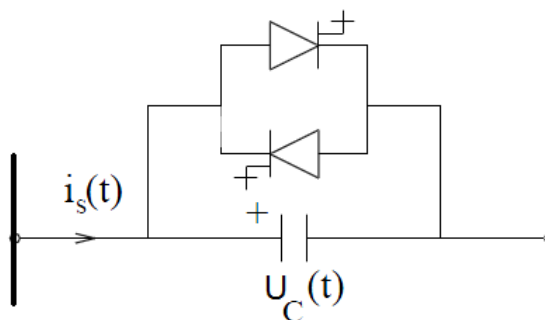
sinusového proudu vedení. Je-li GTO tyristor ve vypnutém stavu, na kondenzátoru se objeví napětí u_C .

$$u_C(t) = \frac{1}{C} \int_{\gamma}^{\omega t} i_s(t) * d(\omega t) \quad (14)$$

GTO tyristor vypne v okamžiku, kdy bude $u_C(t) = 0$. To nastane v okamžiku $\omega t = \pi - \gamma$. Tyristor zůstane vypnutý po dobu δ definovanou jako:

$$\delta = \pi - 2\gamma = 2\left(\frac{\pi}{2} - \gamma\right) = 2\beta \quad (15)$$

Úhly γ a β se liší v rozmezí 0° až 90° . Pro $\gamma = 0^\circ$ jsou GTO tyristory trvale vypnuty a na kondenzátoru je plné napětí. Úhel $\delta = 180^\circ$ ($\beta = 90^\circ$). Pro $\gamma = 90^\circ$ je kondenzátor trvale vyřazen a proud teče přes GTO tyristory. Úhel $\delta = 0^\circ$. [3][5]



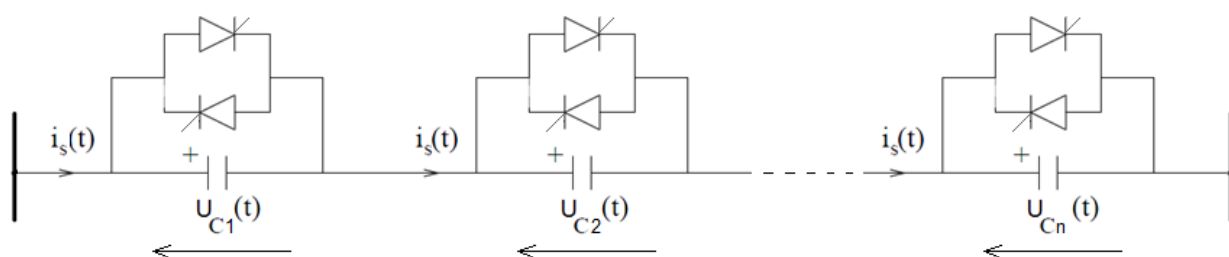
Obr.2.5: Základní konfigurace TCSC (modifikováno dle: [5])

2.2.4 TSSC

Základní konfigurace TSSC, což je tyristorem spínaný sériový kondenzátor, je stejná jako u GCSC, jen místo GTO tyristorů jsou použity klasické tyristory. Pro TSSC je typické zapojení více kondenzátorů zapojených společně s paralelními obousměrnými tyristory v sérii, jak je vidět na obrázku 2.6. Tím se docílí odstupňování kapacitní reaktance. Řízení kapacitní reaktance tedy probíhá tak, že se spíná či vypíná příslušný počet kondenzátorů. Při přemostění některého z kondenzátorů tyristory dojde k jeho opětovnému sepnutí, díky přirozené komutaci tyristorů, až při průchodu proudu tyristorem zapojeným v příslušné půlčlenně nulou. Sepnutí tyristorů (přemostění kondenzátoru) musí být provedeno v okamžiku, kdy je na kondenzátoru nulové napětí.

Při sepnutí v jiný časový okamžik je kondenzátor nabit na stejnosměrné napětí rovné amplitudě střídavého napětí na tomto kondenzátoru, tím by se na ventilu objevil nežádoucí rázový proud. Díky těmto skutečnostem vzniká při spínání jistá časová prodleva. [3]

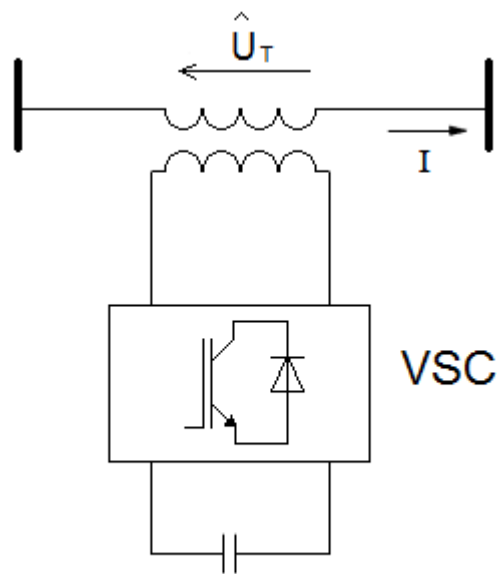
Nevýhodou TSSC je nemožnost rychle reagovat na velkou změnu reaktance. To je způsobeno právě relativně dlouhou časovou prodlevou. V opačném případě by systém TSSC vytvářel subsynchronní oscilace. Proto TSSC není vhodné v aplikacích, kdy je požadován velký stupeň kompenzace za krátký časový okamžik. [3]



Obr. 2.6: Základní konfigurace TSSC (modifikováno dle: [3])

2.2.5 SSSC

SSSC je synchronní sériový kompenzátor, který je principiálně odlišný od ostatních sériových kompenzátorů. Základem SSSC je třífázový šestipulzní měnič VSC (Voltage Source Converter) s vypínatelnými součástkami, díky němu je SSSC schopen dodávat i absorbovat jalový výkon. S použitím VSC odpadá nutnost instalace velkých pasivních prvků (kondenzátorů a tlumivek), dokáže pracovat symetricky jak v kapacitním tak v indukčním režimu a umožňuje doplnění o stejnosměrný zdroj napětí. Schematické uspořádání včetně stejnosměrného zdroje je na obrázku 2.7. [5]



a) Schématické uspořádání SSSC

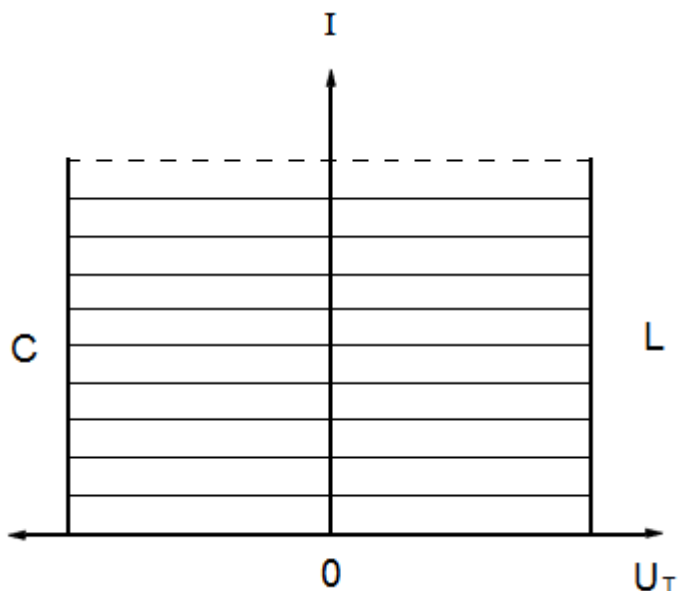
Obr. 2.7: Základní konfigurace SSSC (modifikováno dle: [5])

Řídicím parametrem SSSC je vstříkované napětí U_T dodávané do vedení přes transformátor. [1] [2]

Bez stejnosměrného zdroje napětí lze kompenzovat pouze jalový výkon. V tomto případě je regulovatelná pouze amplituda vstříkovaného napětí U_T . Fázor vstříkovaného napětí musí být kolmý na proud vedením a tím se vstříkované napětí bude předbíhat nebo zpoždovat za proudem o 90° podle toho, zda SSSC pracuje v kapacitním nebo induktivním módu. Přidáním zdroje stejnosměrného napětí je TSSC schopen dodávat a absorbovat i činný výkon. Může být tedy regulována jak amplituda, tak i fáze vstříkovaného napětí U_T . Je také možné kompenzovat podélný odpor přenosové linky. Tím je úhel mezi napětím U_T a proudem jiný než 90° . Část činných ztrát na odporu vedení bude hrazena ze zdroje napětí, čímž je možné na přenosové lince řídit nezávisle činný i jalový výkon současně. [2][5]

U SSSC nezávisí vstříkované napětí na proudu vedením a je říditelné nezávisle. Výhodou SSSC tedy je, že může být efektivně provozováno jak při nízkém, tak při vysokém zatížení systému. Nevýhodou oproti TCSC je, že transformátor snižuje účinnost systému, protože do vedení zavádí svojí reaktanci. Na obrázku 2.8 je V-A

pracovní oblast SSSC. Je zde vidět, že SSSC může pracovat symetricky jak v kapacitním, tak v induktivním módu. [2]

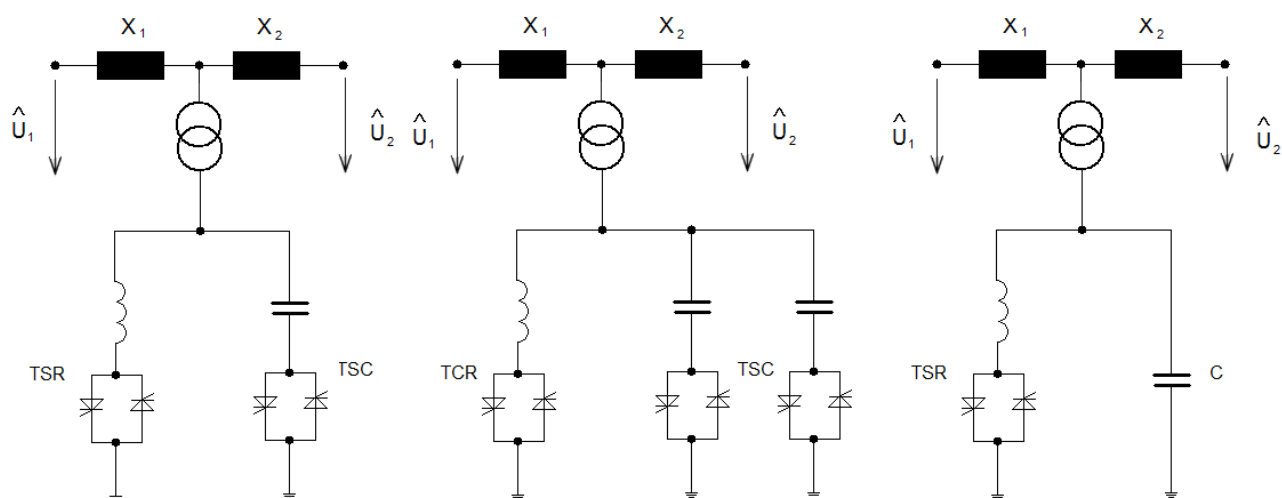


Obr. 2.8: V-A pracovní oblast SSSC (modifikováno dle: [2])

SSSC se využívá při dynamickém řízení výkonových bloků, tlumení elektromechanických oscilací, zlepšení napěťové stability, zlepšení úhlové stability. [1]

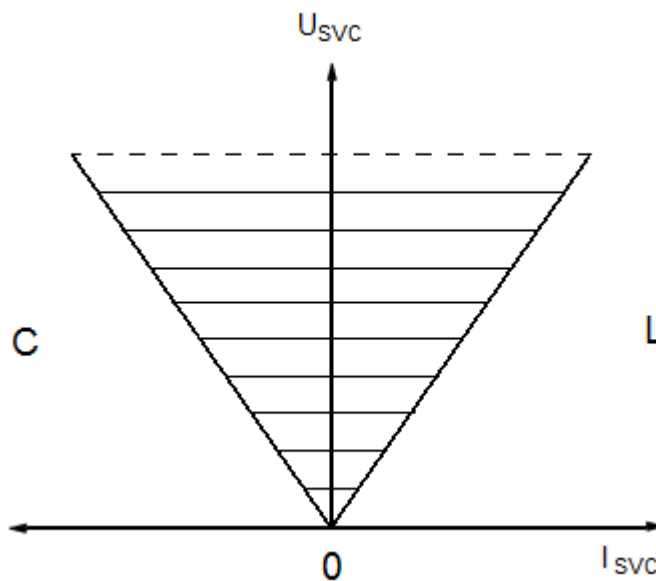
2.2.6 SVC

Statický VAr kompenzátor SVC je prvek paralelní kompenzace. SVC používá pro připojení k lince zvyšovací transformátor nebo se zapojuje přímo na terciární vinutí výkonového transformátoru. Díky tomu mohou součástky výkonových měničů pracovat na nižším napětí, než je napětí sítě. Základní možnosti konfigurace SVC jsou na obrázku 2.9. SVC bývá často zkomponováno z několika paralelně spojených komponentů jako jsou pevné kondenzátory BSC, tyristorově spínané kondenzátory TSC, tyristorově spínané tlumivky TSR a tyristorově řízené tlumivky TCR. [1][4]



Obr. 2.9: Základní konfigurace SVC (modifikováno dle: [1])

Jako paralelní kompenzační prvek SVC dodává či odebírá ze sítě jalový výkon, který je produkován nebo absorbován v pasivních reaktančních prvcích. Řídícím parametrem je kapacitní případně induktivní reaktance, kterou lze spojitě nastavit až do okamžiku dosažení kapacitního respektive induktivního limitu. Dále se SVC chová jako paralelní tlumivka nebo kondenzátor. Pracovní oblast je určena reaktancí tlumivek, kondenzátorů a zvyšovacích transformátorů. Maximální kompenzační proud je přímo úměrný napětí sítě a dodávaný či absorbovaný jalový výkon je úměrný kvadrátu napětí sítě. Přesnost regulace napětí je daná sklonem charakteristiky uvnitř řídicího rozsahu. Vně tohoto rozsahu je charakteristika daná charakteristikou čisté kapacity pro nízká napětí a čisté indukčnosti pro vysoká napětí. V-A pracovní oblast je zobrazena na obrázku 2.10. [2] [4]



Obr. 2.10 V-A pracovní oblast SVC (modifikováno dle: [2])

Provozní charakteristiky je možné odvodit ze vztahů (8) a (13), kde je nejprve výhodné si převést základní zapojení do hvězdy na odpovídající zapojení do trojúhelníku. Poté budeme ve vztazích (8) a (13) pro výpočet činného a jalového výkonu uvažovat ekvivalentní reaktanci X_{12} , pro kterou platí:

$$X_{12} = X_1 + X_2 + \frac{X_{SVC}}{X_1 \cdot X_2} \quad (16)$$

V případě, že reaktance X_{SVC} bude induktivní, to je $X_{SVC} > 0$, potom dojde k nárůstu reaktance vedení a činný výkon klesne. Pro X_{SVC} kapacitní tomu bude naopak. [2]

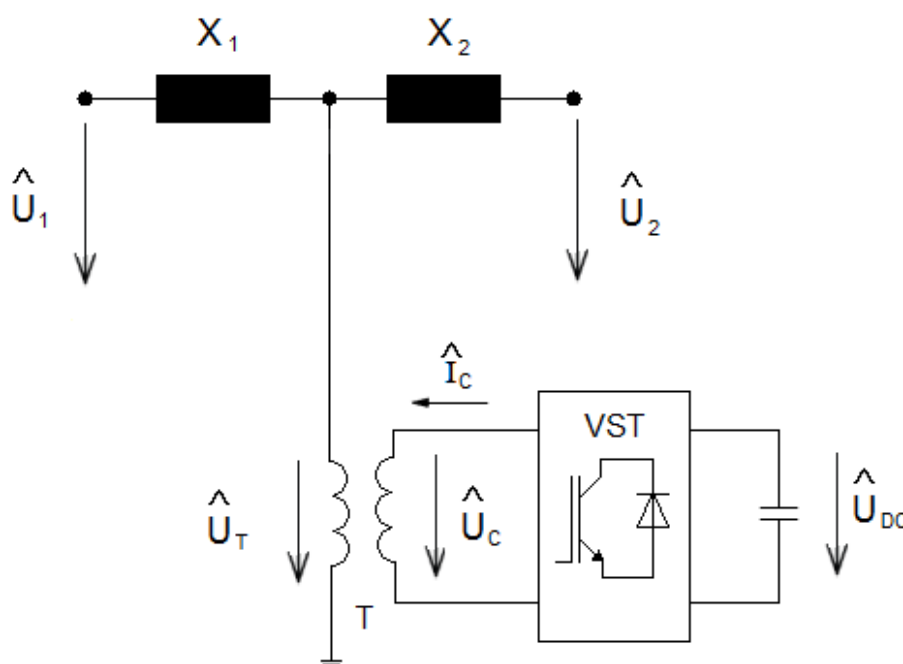
Použití SVC je pro dynamickou stabilizaci napětí čili zvýšení přenosové schopnosti a omezení kolísání napětí. Dále pak pro zlepšení stability systému jako například zlepšení tlumení při kývání, vyrovnávání dynamických zatížení, podpora napětí v ustáleném stavu. [1]

Nejčastěji se SVC instalují ve velkých centrech spotřeby, kde kompenzují výkyvy napětí způsobené poruchami v síti a proměnlivým zatížením při výkonových špičkách. Typickým příkladem jsou velká města. Případně se SVC dají použít v kritických uzlech, které mají velkou napěťovou citlivost, a v místech napájení velkých průmyslových

závodů, jako jsou například ocelárny díky jejich možnosti rychlé změny kompenzované veličiny. [1] [2]

2.2.7 STATCOM

STATCOM, neboli statický synchronní kompenzátor, jehož základní konfigurace je na obrázku 2.11, využívá podobně jako SSSC třífázový měnič ve stejnosměrné větvi připojený paralelně k vedení přes vazební transformátor.



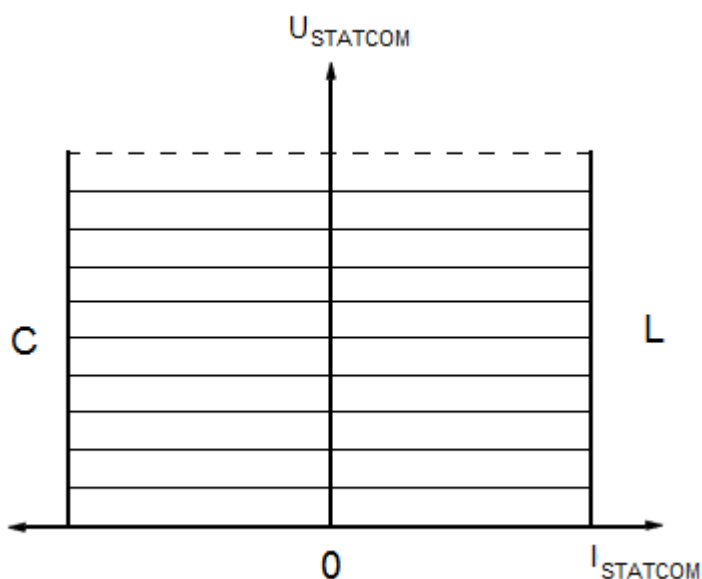
Obr. 2.11: Základní konfigurace STATCOM (modifikováno dle: [1])

Pracuje na podobném principu jako SVC, ale díky trojfázovému měniči VSC a stejnosměrné větvi má lepší provozní charakteristiky a nevyžaduje velké indukční nebo kapacitní prvky. Tím se výrazně zmenší jeho velikost. Dodávaný či odebraný jalový výkon závisí na spínacím režimu měniče, tím reaktanční prvky zapojené ve stejnosměrné větvi slouží jen k akumulaci energie. [2]

Výhodou systému STATCOM oproti SVC je rychlejší odezva, daleko menší rozměry, jak již bylo zmíněno, poskládání z jednotlivých modulů teoreticky umožňuje rozebrání a přemístění na jiné místo, dále může pracovat se zdroji napětí, jako jsou

kondenzátory, dokáže dodávat konstantní jalový proud téměř v celém regulačním rozsahu a to nezávisle na napětí v místě jeho připojení. [5]

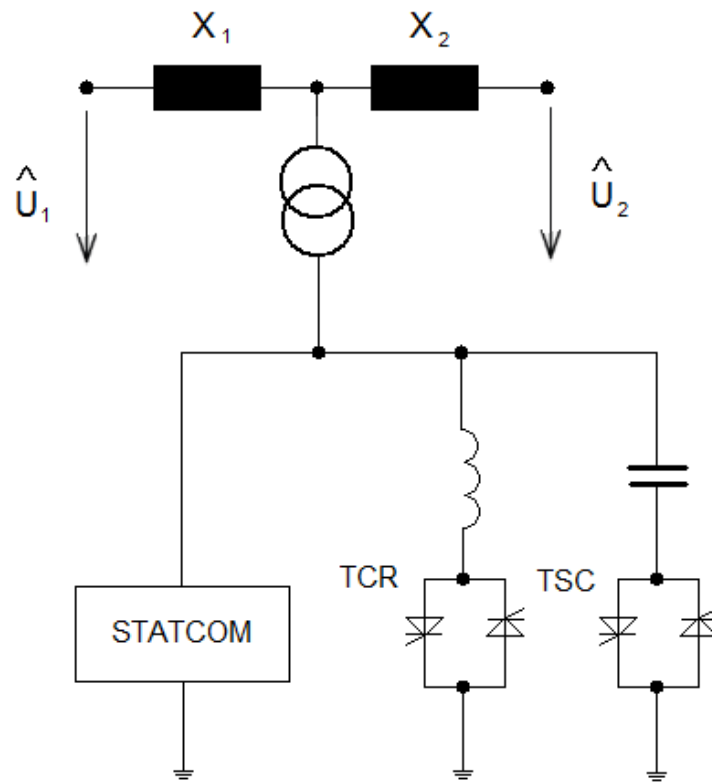
Řídicím parametrem je jalový proud systému STATCOM. V-A pracovní oblast, která je na obrázku 2.12 je tedy omezena pouze maximálním dovoleným proudem a napětím výkonových prvků. [1] [2]



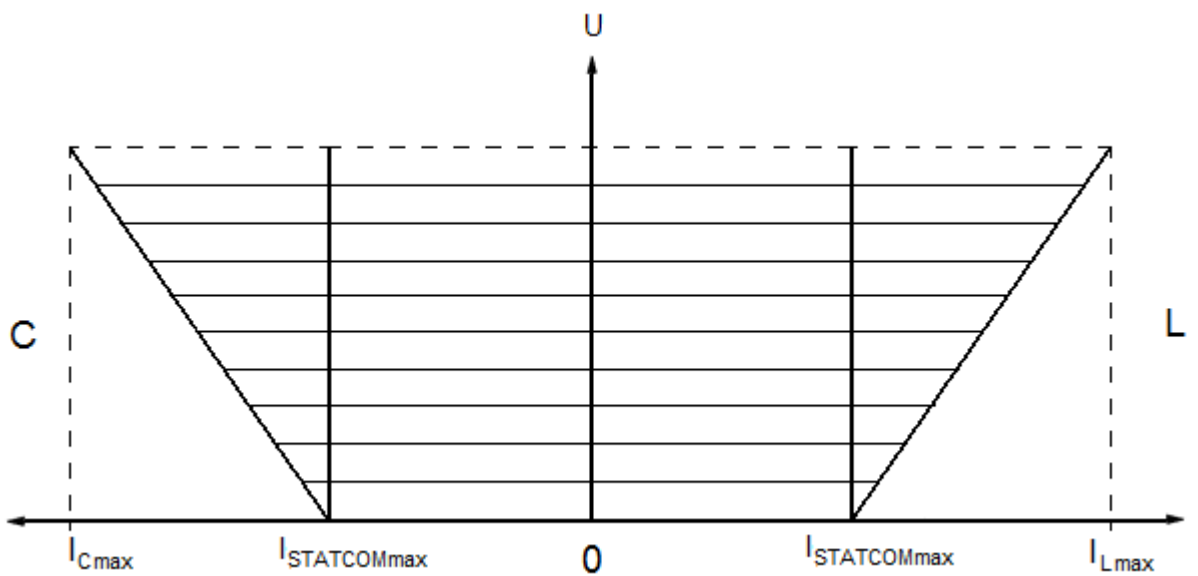
Obr. 2.12: V-A pracovní oblast systému STATCOM (modifikováno dle: [3])

V případě, že je ve stejnosměrné větvi pouze kapacita, je absorbován nebo dodáván pouze jalový výkon. Za předpokladu zanedbání ztrát svírá výstupní proud měniče s napětím měniče 90° . Jeli amplituda napětí měniče \hat{U}_C větší než amplituda napětí systému \hat{U}_T , pak systém STATCOM dodává do sítě jalový výkon. Pokud je amplituda měniče menší než amplituda systému, jalový výkon je ze sítě odebírán. Při rozšíření systému o zdroj napětí ve stejnosměrné větvi je STATCOM podobně jako SSSC schopen dodávat či absorbovat i činný výkon. [2][4]

V-A pracovní oblast lze plynule rozšířit spojením systému STATCOM a SVC. Čili ke kontroléru STATCOM se paralelně připojí tyristorově řízené tlumivky TCR a tyristorově spínané kondenzátory TSC. Díky TSC se skokově posune pracovní oblast a TCR plynule rozšíří její pracovní rozsah. Schematické zapojení a pracovní oblast jsou na obrázcích 2.13 a 2.14. [2][3]



Obr. 2.13: Systém STATCOM s rozšířením o TCR a TSC (modifikováno dle: [2])

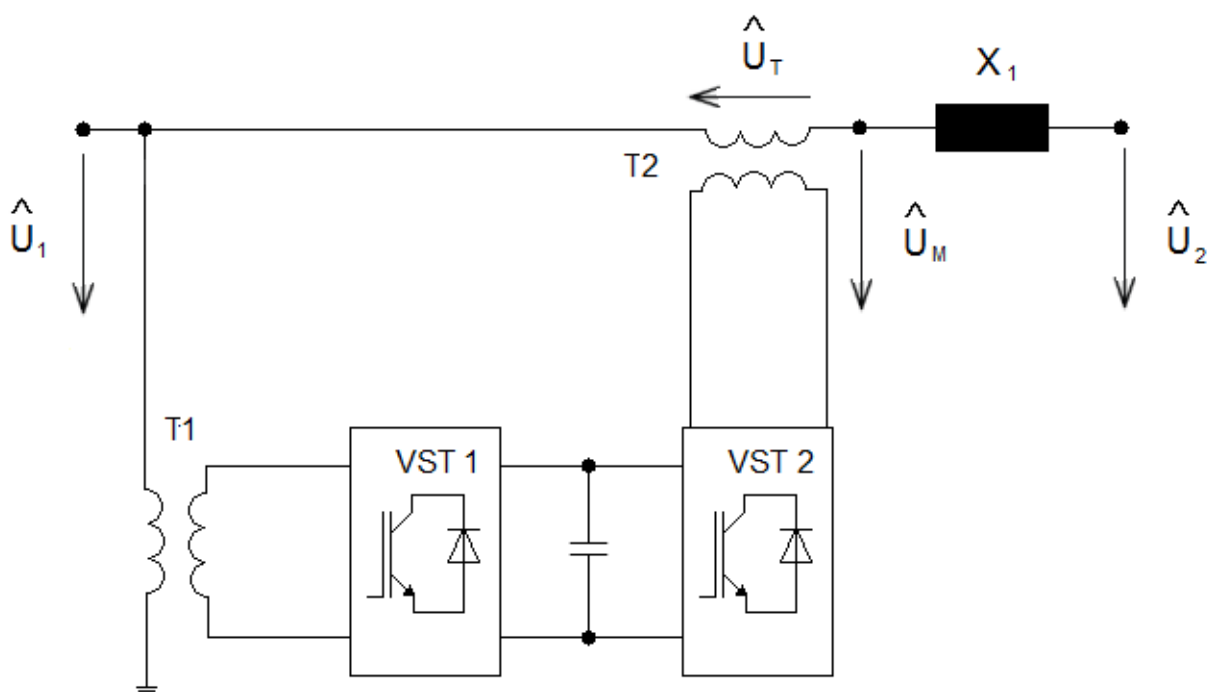


Obr. 2.14: Pracovní oblast STATCOM s rozšířením o TCR a TSC (modifikováno dle: [3])

Systemy STATCOM se používají pro dynamickou 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][5]

2.2.8 UPFC

Univerzální regulátor výkonových toků UPFC, jehož základní konfigurace je na obrázku 2.15, je nejkomplexnějším zařízením FACTS pro řízení výkonových toků, regulaci napětí a zlepšení stability. Dokáže ovládat současně i odděleně všechny parametry ovlivňující toky výkonů v soustavě (napětí, impedanci i fázový posun). [5] [9]



Obr. 2.15: Základní konfigurace UPFC (modifikováno dle: [2])

UPFC se skládá ze dvou měničů VSC spojených přes stejnosměrný meziobvod tvořený kondenzátorem. K síti jsou připojeny pomocí dvou transformátorů, paralelního a sériového. Paralelní transformátor zde plní budící funkci, sériový plní funkci přidavného transformátoru. Topologicky se jedná o spojení systémů STATCOM a SSSC. Lze tedy využít jednotlivé výhody obou, jako je řízení jalového výkonu paralelní větve, který může být řízen nezávisle na poměrech v uzlu připojení. Přitom paralelní měnič může

generovat jalový proud tak, aby vstupní napětí uzlu \hat{U}_1 bylo stále na požadované hodnotě. [2] [9]

Toto platí pro režim řízení napětí. Pro režim řízení výkonu platí že, paralelní jalový proud může odpovídat požadovanému induktivnímu nebo kapacitnímu jalovému výkonu. Činný výkon vstřikovaný do sítě pomocí sériové větve je odebírán paralelní větví a přenášen přes stejnosměrný obvod do sériové větve. [2]

Sériový měnič navíc umožňuje pracovat ve všech čtyřech kvadrantech a řídit nezávisle činný i jalový výkon soustavy, protože vstřikuje napětí $\hat{U}_T = U_T \cdot e^{j(\delta_1 + \varphi_T)}$, které může mít libovolnou fázi vzhledem k vstupnímu napětí \hat{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 vstřikovaným sériovým napětím U_T a napětím v uzlu 1. [2]

Zařízení UPFC dokáže řídit všechny čtyři parametry ovlivňující tok výkonu a jeho sériový měnič může pracovat v těchto čtyřech režimech:

a) Režim regulace napětí

V případě, kdy je vstřikované napětí ve fázi s napětím \hat{U}_1 , tedy $\varphi_T = 0$, amplituda napětí \hat{U}_1 se zvýší. V opačném případě, je-li vstřikované napětí v protifázi, se amplituda sníží.

b) Režim sériové kompenzace

Je-li vstřikované napětí kolmé na proud protékající vedením, pak se úbytek napětí na podélné reaktanci vedení mezi uzly 1 a 2 (změna reaktance vedení) zvýší nebo sníží. Za předpokladu, že se napětí zpožďuje o 90° za proudem, úbytek napětí se zvětší (podélná reaktance vzroste) a v případě, že napětí předbíhá proud o 90° , úbytek napětí se zmenší (podélná reaktance klesne).

c) Režim fázového řízení

Fázového natočení napětí \hat{U}_1 se dosáhne tehdy, vyvolá-li vstřikované napětí změnu úhlu napětí \hat{U}_1 , ale nezmění jeho amplitudu.

d) Režim řízení výkonových toků

UPFC dovoluje nastavit amplitudu a fázi vstřikovaného napětí popsané v předchozích režimech současně tak, aby celkový proud vedením odpovídal požadavkům na tok činného i jalového výkonu. Tyto výkony lze 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. [2]

Zdánlivý výkon na konci vedení je dán vztahem:

$$\hat{S}_2 = \hat{U}_2 \hat{I}_2^* = \hat{U}_2 \left(\frac{\hat{U}_1 + \hat{U}_T - \hat{U}_2}{jX} \right)^* \quad (17)$$

Z něho je možné odvodit vztahy pro činný a jalový výkon na konci vedení v závislosti na úhlu přenosu δ a úhlu φ_T . Tyto vztahy vycházejí z rovnic (8) a (12) pro nekompensované vedení.

$$P_2 = \frac{U_1 \cdot U_2}{X_1} \cdot \sin \delta + \frac{U_2 \cdot U_T}{X_1} \cdot \sin (\delta + \varphi_T) \quad (18)$$

$$Q_2 = \frac{U_1 \cdot U_2}{X_1} \cdot \cos \delta - \frac{U_2^2}{X_1} + \frac{U_2 \cdot U_T}{X_1} \cdot \sin (\delta + \varphi_T) \quad (19)$$

Použití UPFC je pro regulaci napětí, sériovou kompenzaci, fázové řízení a řízení výkonových toků, přičemž může regulovat činný i jalový výkon současně. [1]

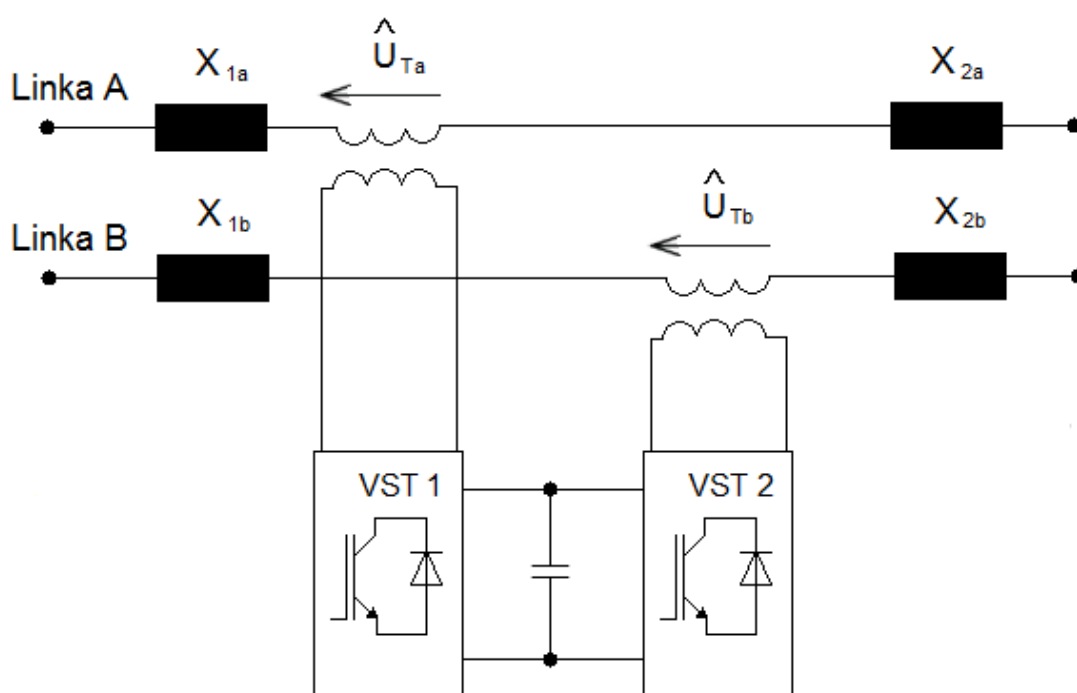
2.2.9 IPFC

Interline Power Flow Controller IPFC umožňuje kompenzaci více přenosových linek najednou zapojených ve společné rozvodně. Zapojením IPFC do rozvodny lze dosáhnout snížení zatížení linek činným výkonem, řízení toku jak jalového, tak činného výkonu mezi vedeními a zvýšit odolnost proti dynamickým změnám při poruchách. [3][5]

Konfigurace IPFC je uspořádána tak, že ke každému vedení je připojen v sérii VST měnič přes zvyšovací transformátor stejně jako u SSSC. Jednotlivé VST měniče jsou spojeny dohromady přes stejnosměrný meziobvod. Díky tomu může každý měnič dodávat nejen jalový výkon do vedení, ve kterém je zapojen, pracuje-li v režimu klasického sériového SSSC kompenzátoru, ale také odebírat činný výkon z jednoho

vedení a přes společný stejnosměrný meziobvod jej dodávat druhému měniči pro kompenzaci jiného vedení. Tím lze přelévat toky činného výkonu z jednoho vedení do druhého a dynamicky tak řídit zatížení jednotlivých linek. [3]

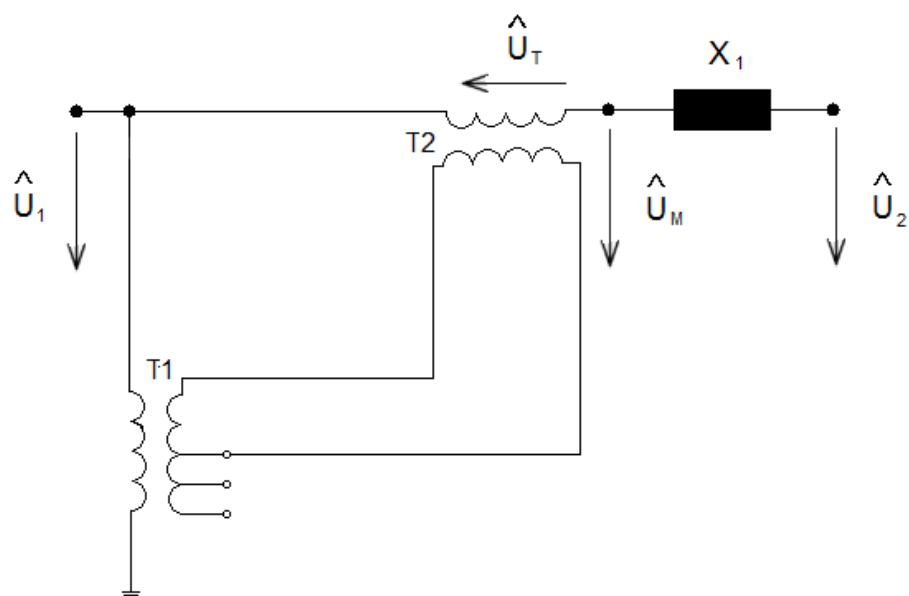
Díky využití zvyšovacích transformátorů a VSC měničů nemusí být kompenzovaná vedení na stejné napěťové úrovni. Konfigurace IPFC navíc umožňuje snadné rozpojení společného meziobvodu, čímž vzniknou samostatně kompenzovaná vedení. Principiální zapojení IPFC pro dvě vedení je znázorněno na obrázku 2.16. [3]



Obr. 2.16: Zapojení IPFC pro dvě vedení (modifikováno dle: [3])

2.2.10 PST

PST (Phase Shifting Transformers) je transformátor s regulací napětí a fáze využívané k řízení výkonových toků na vedení. Jedná se v podstatě o sériovou kompenzaci s tím rozdílem, že umí měnit fázový rozdíl mezi počátečním a koncovým napětím vedení. Na obrázku 2.17 je znázorněno základní zapojení PST.[2]



Obr. 2.17: Základní uspořádání PST (modifikováno dle: [2])

PST transformátor se skládá z regulačního transformátoru připojeného paralelně k vedení a transformátoru sériového. Sériový transformátor je připojen přímo na napětí sítě a dochází na něm k výslednému fázovému rozdílu napětí na koncích vedení. Fázový posun vznikne přidáním fázově posunutého regulačního napětí k napětí sítě. Regulační úhel PST regulátorů dosahuje hodnot až $\pm 40^\circ$. Činné i jalové výkony jsou odebírány ze sítě pomocí paralelního transformátoru a přes sériový transformátor jsou vstříkovány do vedení. Tím lze řídit relativně velké toky výkonů pomocí transformátorů s malými jmenovitými výkony. [2] [8]

Řízení jalového výkonu probíhá vstříkáváním napětí ze sériového transformátoru, které je ve fázi se svorkovým napětím v uzlu, což vyvolá změnu amplitudy napětí a tím dojde ke změně jalového výkonu. K napětí vedení se tedy přičte část téhož fázového napětí. V případě řízení činného výkonu se vstříkované napětí zpožďuje nebo předbíhá o 90° před svorkovým napětím v uzlu a vyvolá změnu fáze napětí a tím i změnu činného výkonu. V tomto případě se k napětí linky přičítá část sdruženého napětí. [2] [8]

Změnou konstrukce PST lze dosáhnout dvou základních provozních režimů. První je vstříkávání sériového napětí \hat{U}_T s konstantním fázovým posunem α vůči napětí \hat{U}_1 , ale různou amplitudou, kterou lze regulovat pomocí odboček paralelního

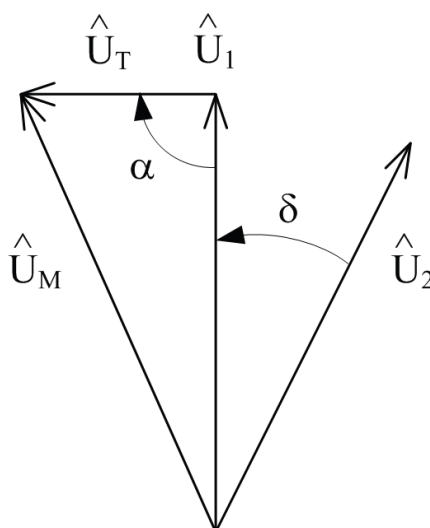
transformátoru. Potom dochází ke změně úhlu přenosu, což je úhel mezi koncovými napětími linky \hat{U}_M a \hat{U}_2 a amplitudy napětí \hat{U}_M kde:

$$\hat{U}_M = \hat{U}_1 + \hat{U}_T \quad (20)$$

A pro amplitudu napětí \hat{U}_M platí:

$$U_M = \sqrt{U_1^2 + U_T^2} \quad (21)$$

V případě, že úhel α bude stále 90° , jde o takzvanou kolmou regulaci, pro kterou se používá transformátor QBT (Quadrature Booster Transformer). [2]



Obr. 2.18: Fázorový diagram pro vstřikované napětí QBT (převzato z: [2])

Druhý pracovní režim mění amplitudu a fázi vstřikovaného napětí \hat{U}_T tak, aby amplitudy vstupního a výstupního napětí byly stejné, ale měnil se úhel mezi nimi. Pro tento transformátor se používá označení PAR (Phase Angel Regulator). Konstrukčně může být realizován změnou magnetického obvodu nebo přidáním tyristorově řízené jednotky. Princip funkce transformátoru PAR si můžeme představit jako přidání zdroj napětí s proměnlivou amplitudou a fází, která umožní změnu fázového natočení síťového napětí beze změny amplitudy. Platí:

$$\hat{U}_M = \hat{U}_1 + \hat{U}_T \quad (22)$$

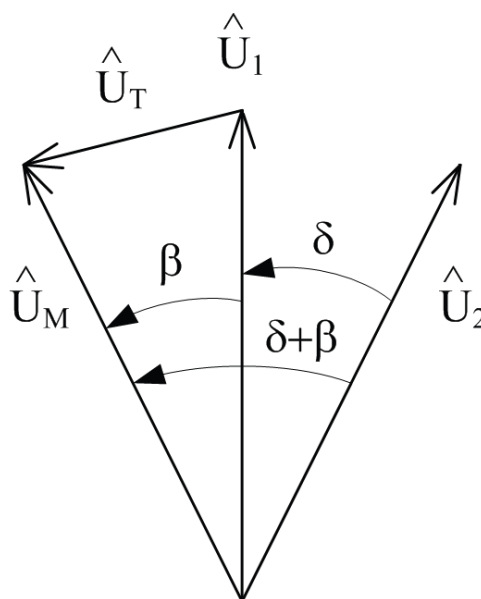
$$U_1 = U_M = U \quad (23)$$

Jalový a činný výkon jsou ovlivňovány následovně:

$$P = \frac{U^2}{X} \cdot \sin(\delta + \beta) \quad (24)$$

$$Q = \frac{U^2}{X} \cdot (1 - \cos(\delta + \beta)) \quad (25)$$

Kde fázový posuv β je řídicím parametrem transformátoru PAR. [2]



Obr. 2.19: Fázorový diagram vstřikovaného napětí PAR (modifikováno dle: [2])

Transformátory PST se často umísťují přímo do vývodů vedení z rozvodny, kde z vedení výkon vytlačují na vedení jiná nebo z jiných výkon odebírají. Transformátory PST tedy nejsou zdrojem výkonu, ale výkony pouze přerozdělují mezi jednotlivými vedeními. [8]

3 Přehled významných druhů aplikací zařízení FACTS v ES

Všechny aplikace, ve kterých se uplatňují zařízení FACTS, finálně slouží ke zvýšení přenosové schopnosti vedení a udržení napěťové stability elektrizační soustavy. Tím je možné zlepšit účinnost stávajících vedení. To může být alternativní řešení pro přetížené sítě v případě, kdy z ekologických, majetkoprávních či jiných důvodů není možné vybudovat vedení nové. Zejména environmentální dopad na životní prostředí je v současné době čím dál důležitější ukazatel. Níže budou probrány základní možnosti použití FACTS a významné aplikace ve světě.

3.1 Ztráty na vedení

Jelikož je cílem této práce ukázat vliv zařízení FACTS na ztráty, je potřeba nejprve ukázat co tyto ztráty ovlivňuje. Největší podíl ztrát na vedení jímž prochází elektrický proud, mají Jaulovy ztráty. Je žádoucí, aby tyto ztráty byly co nejmenší. Ztrátový výkon jedné fáze vedení, kterým protéká, proud můžeme napsat jako

$$P_z = R \cdot I^2 = \frac{R}{U^2} \cdot U^2 \cdot I^2 = \frac{R}{U^2} \cdot S^2 \quad (26)$$

Z tohoto vztahu vyplývají, že ke snížení ztrát je nutné snížit protékající proud respektive výkon vedením. Proud lze ovlivnit zvýšením napěťové hladiny, kde je ale nebezpečí při odlehčení vedení, protože by na tomto vedení vznikalo přepětí vlivem jeho kapacity. Pomocí systémů FACTS je možné ovlivňovat výkonové toky po vedení, což je změna velikosti toku činného nebo jalového výkonu po vedení a tím působit na ztráty ve vedení. Výkonové toky pomocí FACTS kontrolérů je možné ovlivnit dvěma způsoby. První je změna proudových poměrů ve větvích, ztráty závisí na kvadrátu protékajícího proudu vedením. Proud vedení respektive přenášený výkon vedením lze regulovat pomocí sériové kompenzace. Druhá možnost ovlivnění toků výkonů je změnou napěťových poměrů v uzlech. Toho lze dosáhnou paralelní kompenzací.

3.2 Napěťová stabilita

V případě, kdy je elektrizační soustava příliš zatěžována nebo se objeví nedostatek generovaného jalového výkonu, mohou nastat problémy s napěťovou stabilitou. Ty se týkají jak elektrizační soustavy jako celku, tak její konkrétní kritické oblasti.

Napěťová stabilita je tedy schopnost elektrizační soustavy udržet si za normálních provozních podmínek stabilní pracovní bod ve všech uzlech soustavy za předpokladu, že dojde k poruše či jiné změně zatížení. [6]

Je tedy patrné, že toky výkonů mají vliv na napěťovou úroveň v uzlech. Ta musí být udržována v předepsaných mezích, jinak by byla ohrožena spolehlivá dodávka elektrické energie. [2] [7]

Budeme-li uvažovat odběr činného a jalového výkonu v uzlu s uzlovým napětím \hat{U} na konci vedení, pro zbytek soustavy bude platit náhrada ekvivalentním zdrojem s vnitřním napětím \hat{E} a impedancí $\hat{Z}_S = R_S + jX_S$. Pro úbytek napětí platit vztah:

$$\Delta\hat{U} = \hat{E} - \hat{U} = \hat{Z} \cdot \hat{I} = (R_S + jX_S) \cdot \frac{P - jQ}{\hat{U}} \quad (27)$$

Fázor napětí \hat{U} si položíme na reálnou osu, tedy $\hat{U} = U + j0$, potom úbytek napětí bude:

$$\Delta\hat{U} = \frac{R_S \cdot P + X_S \cdot Q + j \cdot (X_S \cdot P - R_S \cdot Q)}{U} \quad (28)$$

Náhradní schéma vedení a fázorový diagram situace je na obrázku 3.1.

Pro regulaci napětí platí úvaha, že napětí se snižuje s induktivním odběrem a naopak zvyšuje s kapacitním odběrem. Z této úvahy lze stanovit základní princip regulace napětí v uzlech pomocí FACTS kontrolérů připojených paralelně k vedení. Ty pracují na principu vstřikování jalového výkonu, přičemž platí, že vstřikovaný jalový výkon musí být takový, aby uzlové napětí U bylo stejné jako vnitřní napětí soustavy a úbytek napětí tím bude nulový. Toto plyne ze vztahu (28). [2] [4]

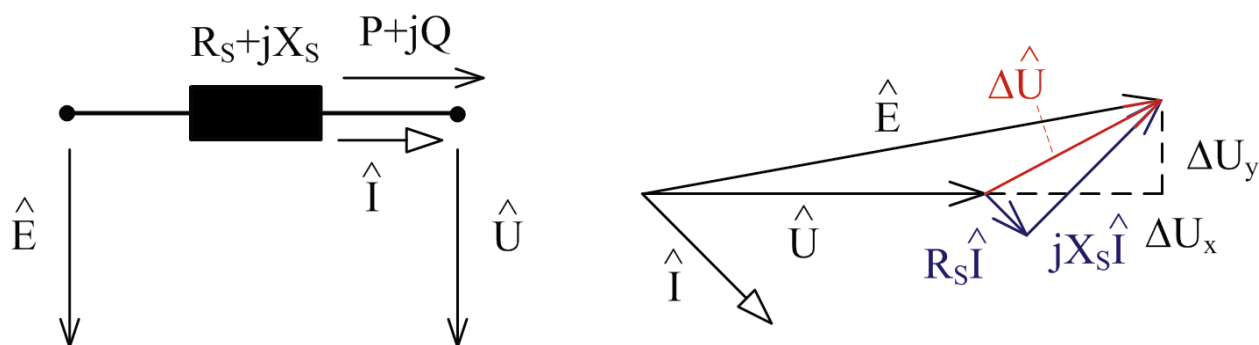
Rovnice (28) ukazuje, že čistě reaktivním regulátorem vstřikujícím pouze jalový výkon je možné kompenzovat úbytek napětí způsobený změnou činného i jalového výkonu.

Problém ale nastane, pokud bude kompenzátor kompenzovat zároveň i účinník, protože pro $\cos\varphi = 1$ bude platit vztah:

$$\Delta\hat{U} = \frac{(R_S + jX_S) \cdot P}{U} \quad (29)$$

Tento úbytek je nenulový a nezávislý na jalovém výkonu a nemůže být tedy jeho pomocí regulován. Z toho vyplývá, že čistě reaktivní kompenzátor nemůže udržet zároveň jednotkový účinník a napětí v daných mezích. [2] [4]

Napětí na konci vedení lze také řídit pomocí sériové kompenzace. Principiálně to funguje tak, že sériový kompenzátor mění podélnou reaktanci linky. Tím se mění úbytek napětí na vedení. [2]



Obr. 3.1: Fázorový diagram pro úbytek napětí v místě spotřeby (převzato z [2])

3.3 Řízení a regulace toku činných výkonů

V uzlových soustavách nelze zcela oddělit řízení napětí, jalového výkonu a činného výkonu, protože každá veličina ovlivňuje zbylé dvě ve všech uzlech soustavy.

Svázanost těchto veličin popisují vztahy (5) až (13) popsané v kapitole 2.1. Pro přehlednost jsou zopakovány vztahy (8) a (12), které popisují svázanost parametrů činného výkonu, jalového výkonu, napětí v uzlech a úhlem přenosu δ . Napětí U_1 a U_2 jsou napětí v uzlech na začátku a konci vedení a X_1 je reaktance vedení. Činný odpor vedení je zanedbáván, protože pro velmi vysoká napětí je podstatně menší než reaktance vedení. [4]

$$P_2 = \frac{U_1 \cdot U_2}{X_1} \cdot \sin \delta = P_1 \quad (8)$$

$$Q_2 = \frac{U_1 \cdot U_2}{X_1} \cdot \cos \delta - \frac{U_2^2}{X_1} \quad (12)$$

Přenášený činný výkon je možné zvýšit pomocí regulace napětí a to zvýšením či snížením amplitudy napětí na jednom z konců vedení uzlové soustavy. Stejného výsledku je možné dosáhnout i změnou fáze napětí. Tedy zvýšením úhlu přenosu. Změnou znaménka úhlu přenosu lze tok činného výkonu mezi uzly 1 a 2 otočit. Další možností je sériové kompenzace, kdy se sníží reaktance vedení. Vedení se pak chová jako by bylo kratší. Je tedy zkrácena elektrická délka vedení a díky tomu je možné přenášet větší výkon. [2]

Regulace činného výkonu napětím na konci vedení je proveditelné sériově injektovaným napětím s vedením. Toto napětí je přičteno k jednomu z krajních uzlů vedení. Pro regulaci je možné využít systém SSSC popsany v kapitole 2.2.5. Vstříkované napětí bývá kolmé na uzlové napětí nebo na protékající proud. Přičemž platí, že čím je větší amplituda injektovaného sériového napětí, tím je větší i regulační rozsah vstříkovaného výkonu. [2]

3.4 Řízení a regulace toku jalových výkonů

Jalové výkony v soustavě jsou pevně spjaty s napětími. Ze statické analýzy soustavy je patrné, že tok jalového výkonu silně ovlivňuje napětí v uzlech soustavy. V případě zvýšené výroby jalového výkonu vzroste i napětí v uzlu, který je v blízkosti výroby. Naopak zvýšená spotřeba jalového výkonu snižuje napětí v uzlu v blízkosti této spotřeby. [10]

Jalový výkon nelze přepravovat na dlouhé vzdálenosti, protože na vyšších napěťových úrovních platí, že $X > R$. Je výhodné pro řízení jalového výkonu použít například některá zařízení FACTS jako generátorů jalového výkonu v potřebných uzlech soustavy to je, co nejbližší k místu spotřeby jalového výkonu. [10]

K řízení jalového výkonu je možné použít například systém SVC se spínanými tlumivkami a kapacitami. Platí přitom, že paralelně připojené tlumivky odebírají jalový výkon ze sítě a paralelní kondenzátory naopak tento výkon do sítě dodávají. [2]

3.5 Tlumení kývání

Je-li přenosová soustava silně oslabená například při vícenásobné poruše, můžou v soustavě vzniknout netlumené kyvy. Další možnost vzniku kyvů je v případě propojených soustav při větších hodnotách tranzitních toků. Těmto kyvům se říká mezisystémové a mají frekvenci 0,2 až 1 Hz.

Důležité je, aby tyto kyvy nezpůsobili působení ochran. Opatření při vzniku kyvů jsou následující: Operátor je oprávněn odstavovat elektrárenské bloky v místě největších kyvů. Dále je důležité soustavu dále neoslabovat vypínáním vedení. [13]

S omezením kývání napomáhají i systémy FACTS a to zejména SVC a STATCOM.

3.6 Přehled aplikací systémů FACTS ve světě

FACTS kontroléry jsou instalovány ve velké míře po celém světě. Hlavní dodavatelé těchto systémů jsou firmy ABB, ALSTOM a SIEMENS. Nejblíže našim hranicím jsou v provozu systémy SVC v Německu, Francii a v Dánsku. V České republice se z důvodů vysokých nákladů momentálně nevyplatí tyto systémy instalovat. V Desetiletém plánu rozvoje sítí (TYPD) je ale zařazena výstavba PST transformátorů v rozvodně Hradec u Kadaně na mezistátních vedeních V445 a V446 do německého Roehrsdorfu. V plánu je, aby stavební část projektu byla hotova na začátku roku 2016. Uvedení celého systému do provozu by mělo proběhnout do konce roku 2016. [11]

Zde je soupis významných aplikací FACTS ve světě.

- **ESKOM Jihoafrická republika, Richard Bay, SVC**

System dodala firma SIEMENS a uvedla jej do provozu již v letech 1994 a 1995. Richard Bay je významné průmyslové centrum Jihoafrické republiky. Nachází se zde slévárny hliníku, papírny a povrchové doly. Instalace SVC byla za účelem dynamické stabilizace sítě, snížení napěťové nesymetrie, zvýšení přenosové kapacity a kompenzace jalového výkonu. [14]

Parametry SCV:

Systemové napětí:	275 kV/50 Hz; 400 kV/50 Hz
Provozní rozsah:	+ 100 MVar (kapacitní) až -300 MVar (induktivní)
SVC systém:	2 x TCR + 3 x Filtry
Transformátor:	4 x 66,7 MVA



Obr. 3.2: SVC Richard Bay, JAR (převzato z [14])

- **PGCIL, Indie, Rourkela-Raipur, TCSC**

Na vedení přenosové soustavy v Indii byla instalována sériová kompenzace pomocí systému TCSC od firmy ABB. Vedení je na napěťové úrovni a spojuje východní a západní části regionu mezi městy Rourkela a Raipur. Délka vedení je 412 km. Výstavba byla provedena za účelem zvýšení přenosové schopnosti vedení a umožnění přenosu nadbytečné energie z východu na západ. [15]

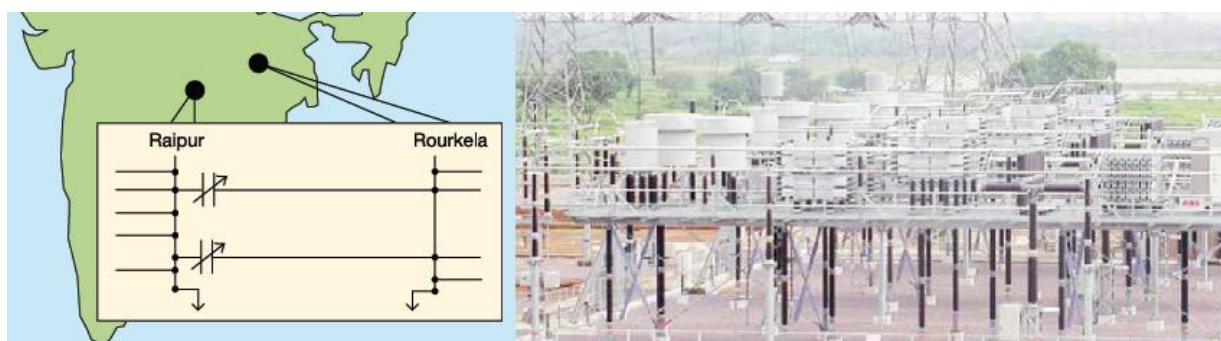
Parametry systému TCSC:

Systémové napětí: 400 kV

Jmenovitý síťový proud: 1550 A

Kapacitní jalový výkon: 394 MVar (pevný segment), 71 MVar (TCSC)

Stupeň kompenzace: 40% (pevný segment), 5% (TCSC)



Obr. 3.3: TCSC Rourkela-Raipur, Indie (převzato z [15])

- **Transelec S.A., Cerro Navia, Chile, STATCOM (SVC light) a SVC**

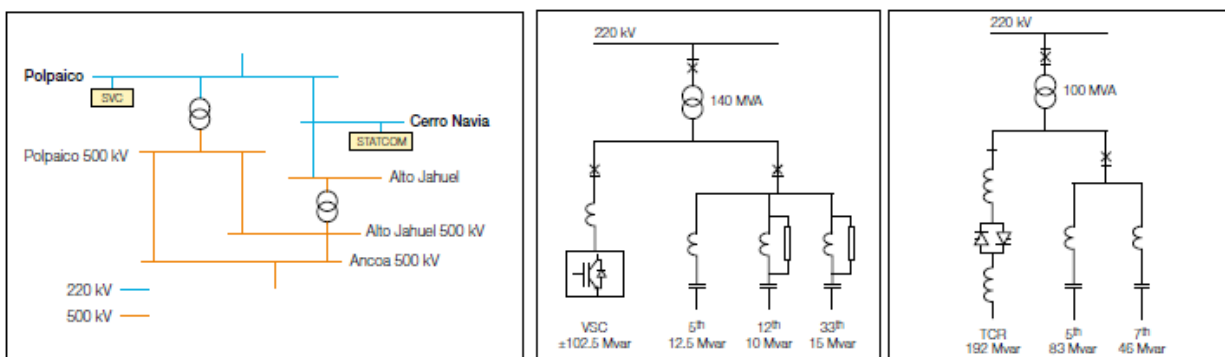
V roce 2011 byly postaveny dva systémy FACTS od společnosti ABB připojeny do Chilské přenosové soustavy. Přenosová soustava společnosti Transelec S.A. tvoří páteřní síť. Nedostatečná přenosová kapacita a nesouhlas veřejnosti s výstavbou nového vedení přispěl k výstavbě dvou FACTS systémů v kritických místech sítě za účelem zvýšit dynamickou stabilitu systému a zlepšit přenosovou schopnost vedení. První FACTS kontrolér je STATCOM (SVC light), je instalován v rozvodně Cerro Navia. Druhý je SVC a je instalován v rozvodně Polpaico. Obě rozvodny se nacházejí v hlavní městě Santiago de Chile, kde je soustředěno největší zatížení v propojené síti. Obě zařízení zvyšují přenosovou schopnost na vedení 500 kV s celkovou délkou přesahující 300 km z 1 400 MW na 1 600 MW. [16]

Parametry systému STATCOM:

Systémové napětí:	220 kV
Provozní rozsah:	-65 MVar (induktivní) až +140 MVar (kapacitní)
STATCOM systém:	1 x VSC + 3 x Filtry vyšších harmonických (5., 12. a 33.)
Transformátor:	140 MVA

Parametry systému SVC:

Systémové napětí:	220 kV
Provozní rozsah:	-65 MVar (induktivní) až +100 MVar (kapacitní)
STATCOM systém:	1 x TCR + 2 x Filtry vyšších harmonických (5. a 7.)
Transformátor:	100 MVA



Obr. 3.4: STATCOM a SVC Cerro Navia, Chile (převzato z [16])

- **SEC, Hiteen, Quassim a Afif, Saúdská Arábie, SVC**

V Saúdské Arábii byly v roce 2012 byly vystavěny tři SVC od společnosti SIEMENS. Paralelní kompenzátory jsou rozmístěny v rozvodnách Hiteen, Quassim a Afif. Každý systém je na jiné napěťové úrovni. Výstavba proběhla za účelem zlepšení dynamické stability a celkové stabilizace přenosové sítě. [14]

Parametry SVC Hiteen:

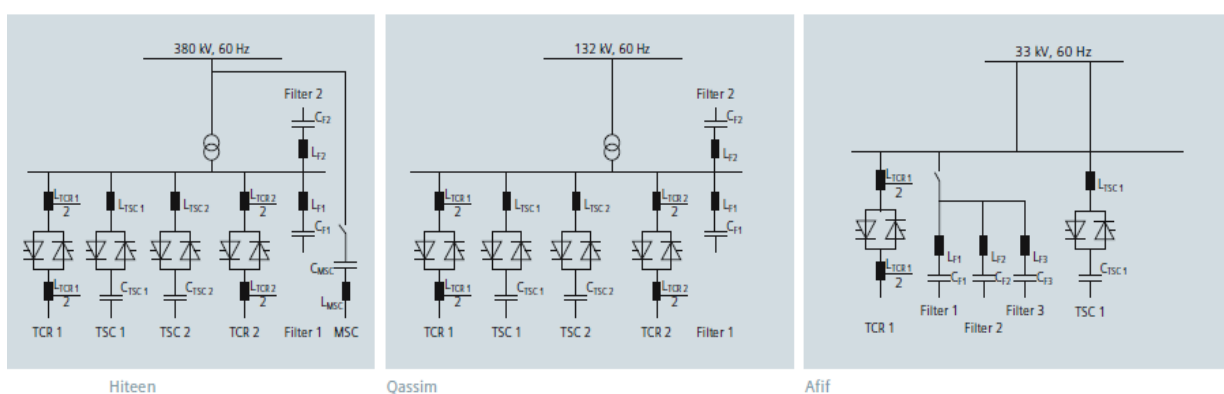
Systémové napětí:	380 kV/60 Hz
Provozní rozsah:	+ 600 MVar (kapacitní) až -200 MVar (induktivní)
SVC systém:	2 x TCR + 2 x TSC + 2 x Filtry
Transformátor:	4 x 200 MVA

Parametry SVC Quassim:

Systémové napětí:	132 kV/60 Hz
Provozní rozsah:	+ 450 MVar (kapacitní) až -150 MVar (induktivních)
SVC systém:	2 x TCR + 2 x TSC + 2 x Filtry
Transformátor:	4 x 150 MVA

Parametry SVC Afif:

Systémové napětí:	33 kV/60 Hz
Provozní rozsah:	+ 100 MVar (kapacitní) až -50 MVar (induktivních)
SVC systém:	1 x TCR + 1 x TSC + 3 x Filtry



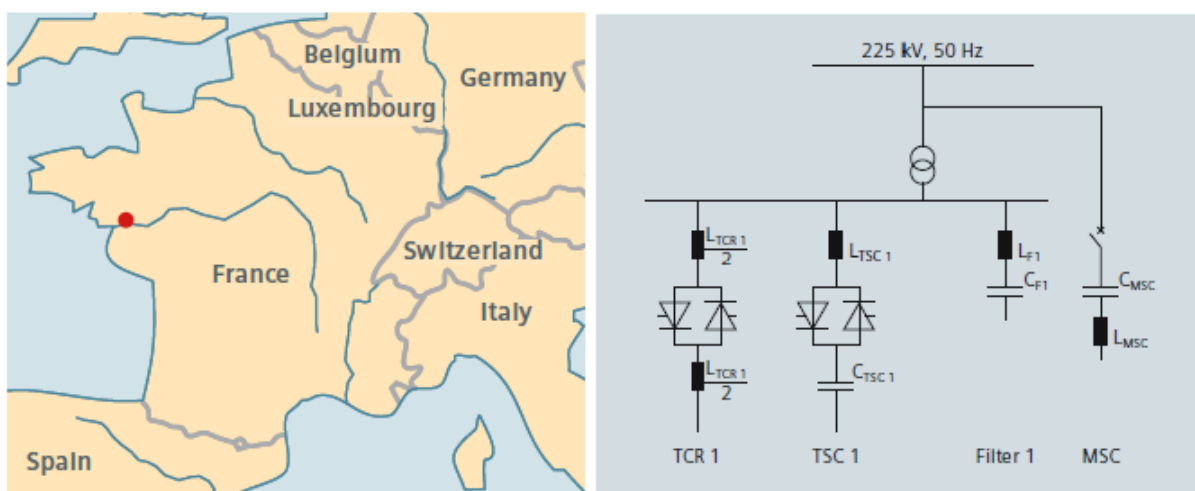
Obr. 3.5: Zapojení SVC Hiteen, Quassim a Afif, Saúdská Arábie (převzato z [14])

- **RTE, Chevire, Francie, SVC**

Výstavba SVC firmy SIEMENS v severozápadní Francii proběhla v roce 2011. Jde o síť v oblasti Bretaně, která je jednou z nejslabších ve Francii. Systém SVC pomohl stabilizovat síť přenosové soustavy RTE a zvýšit její dynamickou stabilitu. RTE je důležitým článkem na trhu s elektřinou v Evropě a zajišťuje spojení mezi okolními státy. [14]

Parametry SVC Chevire:

Systémové napětí:	225 kV/50 Hz
Provozní rozsah:	+ 100 MVar (kapacitní) až -100 MVar (induktivních)
SVC systém:	1 x TCR + 1 x TSC + 1 x Filtr



Obr. 3.6: SVC Chevire, Francie (převzato z [14])

4 Popis výpočetního modelu pro analýzu vlivů kompenzačních zařízení na provoz soustav

Mým úkolem v praktické části práce je sestavit výpočetní model pro analýzu vlivů kompenzačních zařízení na provoz soustav. Jelikož je elektrizační soustava jako celek velice komplikovaný systém složený z mnoha prvků například generátorů, kompenzačních zařízení, transformátorů či vedení je pro určení chodu sítě nutné vyřešit poměry mezi uzlovými a větvovými veličinami. Větvové výkonové toky a napěťové poměry v uzlech lze získat základním řešením chodu soustavy. Z tohoto řešení je dále možné dopočítat ztráty, zatížení a proudové poměry ve větvích a celkové činné a jalové ztráty v elektrizační soustavě.

Pro zjednodušení výpočtu budu uvažovat pouze ustálený chod elektrizační soustavy.

4.1 Ustálený chod soustavy

Ustáleným chodem soustavy je myšlen stav, ve kterém nedochází k přechodovým jevům jako jsou zapínání, vypínání, zkraty a další. Je to tedy rovnováha veličin proudu, napětí, činných a jalových výkonů. Znalost těchto veličin elektrizační soustavy je potřebná pro řízení provozu, plánování budoucího rozvoje, analýze poruchových stavů nebo například minimalizaci provozních nákladů vhodným nastavením činných výkonů elektrárenských bloků. Vypočítané hodnoty při ustáleném chodu také mohou být a často i bývají výchozími údaji při řešení přechodových dějů. [7]

Matematická formulace ustáleného chodu vede k nelineárním rovnicím. Proto se pro výpočet musí zvolit vhodná výpočetní metoda. V případech, kdy není požadována velká přesnost výpočtu, lze úlohu linearizovat. Toto řešení se používá při dlouhodobém plánování. Pro přesnější výpočet je vhodné použít některou z iteračních metod například Gauss-Seidlovu či Newton-Raphsonov. Ty mají mnoho výhod, ale i nevýhod. Zásadní nevýhodou je, že výsledek může konvergovat ke špatnému výsledku nebo nemusí konvergovat vůbec.

Základní rovnice popisující elektrizační soustavu získáme metodou smyčkových proudů či metodou uzlových napětí. V praxi se kvůli jednodušší přípravě vstupních dat používá metoda uzlových napětí. Před samotným řešením je nutné popsat některá zjednodušení a definice. Důležitým předpokladem je symetrický systém i jeho zatížení. Díky tomu lze uvažovat modely jako jednofázové. [7][12]

4.1.1 Kvalifikace veličin a uzlů sítě

V každém uzlu známe, případně musíme dopočítat, čtyři základní veličiny:

- činný výkon P v uzlu (odebíraný nebo dodávaný)
- jalový výkon Q v uzlu (odebíraný nebo dodávaný)
- velikost napětí U
- fázový úhel napětí δ

Při řešení ustáleného chodu rozlišujeme tři základní typy uzlů podle toho, které z těchto hodnot jsou pro nás známé či neznámé. Obvykle známe kombinaci dvou veličin a zbylé dvě musíme dopočítat.

- **Slack** – neboli „bilanční uzel“

Slack uzel slouží k udržování bilance uzlových výkonů tak, aby se dodávka rovnala odběru. Dále musí hradit ztráty činného a jalového výkonu v síti. Jako bilanční se volí takový uzel, v kterém je dostatečně velký zdroj výkonů. Například nadřazená soustava či zahraniční soustava. Je zde definováno napětí U a fáze δ (případně lze zvolit úhel δ nulový a fázové úhly ostatních uzlů k této hodnotě vztahovat). Uzlové výkony v tomto uzlu pak vypovídají o tom, zda je síť výkonově přebytková nebo deficitní. V řešené síti bývá obvykle jeden Slack uzel, ale může jich být zadáno i více, jako tomu je v mém případě (viz bod č. 5). [7][12]

- **PQ** uzel

PQ jsou napájecí či odběrový uzly, ve kterých je zadán činný a jalový výkon. Při řešení ustáleného chodu se dopočítává napětí U a jeho úhel δ . Většina uzlů v elektrizační soustavě je typu P,Q. [7][12]

- **PU** uzel

PU uzel je regulační či kompenzační. Zadaný je činný výkon a absolutní hodnota napětí. Při výpočtu ustáleného chodu se řeší, jaká musí být hodnota jalového výkonu, aby byla dodržena zadaná hodnota napětí.

Do uzlů se tedy zapojují nadřazené sítě, rozvodny a kompenzační prvky. Zatímco větve zahrnují vedení a transformátory, kondenzátory a tlumivky. [7][12]

4.2 Výpočet ustáleného chodu jako nelineární úloha

V praxi bývají nejčastěji odběry a dodávky v uzlech zadány činnými a jalovými výkony. Pro vytvoření matematického popisu je nutné uvést vztahy mezi jednotlivými uzlovými veličinami.

Je předpokládána obecná elektrická síť o n uzlech. Pro proudové odběry v uzlech lze psát maticově

$$(\hat{I}) = (\hat{Y}) \cdot (\hat{U}) \quad (30)$$

kde (\hat{U}) je matice uzlových napětí a (\hat{Y}) je admitanční matice soustavy s parametry ve tvaru

$$(\hat{Y}) = \begin{pmatrix} -\hat{Y}_{11} & \hat{Y}_{12} & \dots & \hat{Y}_{1n} \\ \hat{Y}_{21} & -\hat{Y}_{22} & \dots & \hat{Y}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \hat{Y}_{n1} & \hat{Y}_{n2} & \dots & -\hat{Y}_{nn} \end{pmatrix} \quad (31)$$

Prvky admitanční uzlové matice jsou sestaveny podle algoritmu vyplývajícího z druhého Kirchhoffova zákona. Tedy i -tý diagonální prvek \hat{Y}_{ii} je tvořen součtem

admitancí všech větví incidenčních s i -tým uzlem. Mimodiagonální prvek \hat{Y}_{ij} ($i \neq j$) je tvořen součtem admitancí všech větví spojujících i -tý uzel s j -tým uzlem.

Pro výkonové odběry v jednotlivých uzlech i platí

$$\hat{S}_i = P_i + jQ_i = \hat{U}_i \cdot \hat{I}_i^* \quad \text{pro } i = 1, \dots, n \quad (32)$$

Proud ve vztahu (31) lze eliminovat dosazením příslušného uzlového proudu z rovnice (29). Pak je možné pro výkonové odběry psát

$$\hat{S}_i = P_i + jQ_i = \hat{U}_i \cdot \left(\sum_{j=1}^n \hat{Y}_{ij} \cdot \hat{U}_j \right)^* \quad \text{pro } i, j = 1, \dots, n \quad (33)$$

Rozepsáním admitance do složkového tvaru a napětí do exponenciálních tvarů se získá

$$\hat{S}_i = \sum_{j=1}^n |\hat{U}_i| \cdot |\hat{U}_j| \cdot e^{j(\delta_i - \delta_j)} \cdot (G_{ij} - jB_{ij}) \quad \text{pro } i, j = 1, \dots, n \quad (34)$$

Vztah je možné dále rozložit podle Eulerova vztahu na

$$\hat{S}_i = \sum_{j=1}^n |\hat{U}_i| \cdot |\hat{U}_j| \cdot [\cos(\delta_i - \delta_j) + j \cdot \sin(\delta_i - \delta_j)] \cdot (G_{ij} - jB_{ij}) \quad (35)$$

Pro vyjádření činných a jalových uzlových výkonů je potřeba rozepsat vztah (35) pro výpočet zdánlivého výkonu na reálnou a imaginární část.

$$\hat{P}_i = \sum_{j=1}^n |\hat{U}_i| \cdot |\hat{U}_j| \cdot [G_{ij} \cdot \cos(\delta_i - \delta_j) + B_{ij} \cdot \sin(\delta_i - \delta_j)] \quad (36)$$

$$\hat{Q}_i = \sum_{j=1}^n |\hat{U}_i| \cdot |\hat{U}_j| \cdot [G_{ij} \cdot \sin(\delta_i - \delta_j) - B_{ij} \cdot \cos(\delta_i - \delta_j)] \quad (37)$$

Rovnice (35) a (36) tedy popisují činný a jalový výkon dodávaný nebo odebíraný v každém i uzlu soustavy. V případě, že by byl zvolen první uzel jako uzel slack, pro zbylých $n - 1$ uzlů se sestaví tyto rovnice. Tím vznikne soustava dvou rovnic o dvou neznámých pro každý uzel. V tomto případě, tedy když jsou zadány uzlové výkony, hradí slack uzel rozdíly mezi odběry a dodávkami včetně ztrát činného a jalového výkonu v síti.

Soustava rovnic, jak již bylo popsáno, je nelineární a k jejímu řešení je nutné použít některou z iteračních metod. Níže budou popsány dvě nejčastěji používané. První je Gauss-Seidlova a druhá Newton-Raphsonova iterační metoda. [7][12]

4.3 Gauss-Seidlova metoda

V předchozí kapitole byly popsány rovnice uzlových výkonů pro každý i –tý uzel obecné elektrické sítě s neznámými δ_i a Q_i nebo U_1 a δ_i podle toho, jestli se jedná o typ uzlu PU nebo PQ. Je tedy potřeba pro každý uzel stanovit zbylé neznámé. Jelikož jsou rovnice nelineární, je přesné řešení soustavy obtížné. Proto je nutné je řešit přibližně s použitím numerické iterační metody. To znamená, že se postupně dosazuje za neznámé tak dlouho, dokud výsledek není vyhovující výkonové bilanci sítě. [7]

Jednou z těchto iteračních metod je i Gauss-Seidlova metoda. Ta se vyznačuje jednoduchým algoritmem výpočtu a relativně krátkou dobu výpočtu na jeden iterační krok (v porovnání s ostatními metodami). Nevýhodou této metody je pomalá konvergence a nutnost volit vysokou přesnost výpočtu (malé ε). V opačném případě by se mohlo stát, že nepřesně vypočítané napětí způsobí velkou chybu v tocích výkonů a uzlových bilancích výkonů. [7]

Základní úvaha je taková, že máme soustavu nelineárních rovnic ve tvaru

$$\begin{aligned} f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) &= y_1 \\ f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) &= y_2 \\ &\vdots \\ f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) &= y_n \end{aligned} \tag{38}$$

Přepíšeme ji do tvaru

$$\begin{aligned} x_1 &= y_1 + g_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ x_2 &= y_2 + g_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ &\vdots \\ x_n &= y_n + g_n(x_1, x_2, \dots, x_n) \end{aligned} \tag{39}$$

Je-li $x^{(k+1)}$ odhad v k -tém kroku, pak další iterace bude

$$\begin{aligned} x_1^{(k+1)} &= y_1 + g_1(x_1^k, x_2^k, \dots, x_n^k) \\ x_2^{(k+1)} &= y_2 + g_2(x_1^{(k+1)}, x_2^k, \dots, x_n^k) \\ &\vdots \\ x_n^{(k+1)} &= y_n + g_n(x_1^{(k+1)}, x_2^{(k+1)}, \dots, x_{n-1}^{(k+1)}, x_n^k) \end{aligned} \tag{40}$$

kde index (k+1) označuje 1.,2.,...iteraci. Přičemž při výpočtu první iterace (k=0) se vychází z nulté aproximace, což je odhad kořenů $x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}$. Výpočet končí nalezením dostatečně přesného výsledku. Tedy splněním zadané podmínky

$$\left| x_i^{(k+1)} - x_i^k \right| \leq \varepsilon \quad \text{pro } i = 1, 2, \dots, n \quad (41)$$

kde ε je zadaná přesnost výpočtu.

Pro aplikaci iterační metody se vyjádří z rovnic (32) a (33) vztah pro proud

$$\hat{I}_i = \sum_{j=1}^n \hat{Y}_{ij} \cdot \hat{U}_j \quad (42)$$

který se upraví podle rovnice (39) na

$$\frac{P_i - jQ_i}{\hat{U}_i^*} = \sum_{j=1}^{i-1} \hat{Y}_{ij} \cdot \hat{U}_j + \hat{Y}_{ii} \cdot \hat{U}_i + \sum_{j=i+1}^n \hat{Y}_{ij} \cdot \hat{U}_j \quad (43)$$

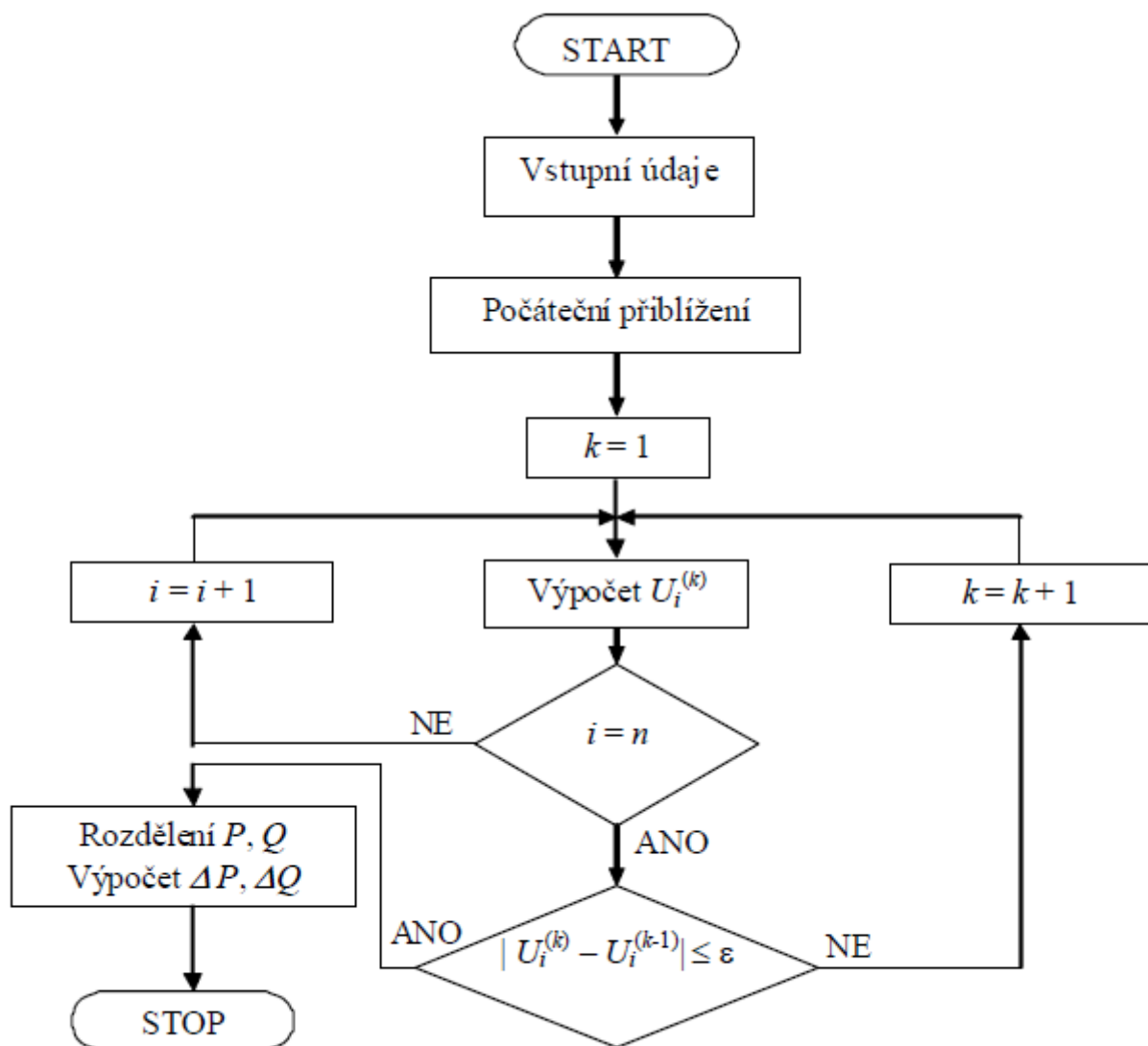
Odtud se vyjádří napětí U_i a vztah se převede do iteračního tvaru podle (40)

$$\hat{U}_i^{(k+1)} = \frac{1}{\hat{Y}_{ii}} \left[\frac{P_i - jQ_i}{(\hat{U}_i^{(k)})^*} - \sum_{j=1}^{i-1} \hat{Y}_{ij} \cdot \hat{U}_j^{(k-1)} - \sum_{j=i+1}^n \hat{Y}_{ij} \cdot \hat{U}_j^{(k)} \right] \quad (44)$$

Výpočet je ukončen, je-li pro všechna i splněna podmínka

$$\left| \hat{U}_i^{(k+1)} - \hat{U}_i^k \right| \leq \varepsilon \quad (45)$$

Obdobně se postupuje při vyjádření činného a jalového výkonu. Na obrázku 4.1 je zobrazen vývojový diagram popisující Gauss-Seidlovu metodu. [12]



Obr. 4.1: Vývojový diagram Gauss-Seidlovy (převzato z [7])

4.4 Newton-Raphsonova metoda

Newton-Raphsonova metoda je nejpoužívanější metodou pro výpočet ustáleného chodu sítě. Výhodou této metody je, že velmi rychle konverguje a potřebný počet iterací závisí jen málo na velikosti řešené sítě. Ovšem tato metoda má i své nevýhody. Jednou, jak již bylo zmíněno, je možnost, že výsledek konverguje k jinému špatnému výsledku. Další je poměrně náročný výpočet diferencí kořenů, což současně dosti prodlužuje čas potřebný na jednu iteraci. [7]

Nejprve bude ukázáno obecné řešení. Newton-Raphsonova metoda převádí řešení nelineárních rovnic typu $f(x) = 0$ na řešení rovnic lineárních pomocí tečen, jak je ukázáno na obrázku 4.2. Proto, aby byla soustava řešitelná, musí být známa derivace funkce $f'(x)$. V každém výpočtovém bodě je provedena linearizace pomocí Taylorova rozvoje.

Jsou-li nelineární rovnice soustavy ustáleného chodu sítě

$$f(x) = y \quad (46)$$

a je-li $x^{(0)}$ počáteční odhad a $\Delta x^{(0)}$ odchylka od správného řešení, pak

$$f(x^{(0)} + \Delta x^{(0)}) = y \quad (47)$$

Rozvojem Taylorovy řady lze psát

$$f(x^{(0)}) + \left(\frac{df}{dx}\right)^{(0)} \cdot \Delta x^{(0)} + \frac{1}{2!} \left(\frac{d^2f}{dx^2}\right)^{(0)} \cdot (\Delta x^{(0)})^2 + \dots = y \quad (48)$$

Linearizace se provádí pomocí prvních dvou řádů Taylorova rozvoje. Vyšší řády se zanedbávají. Tedy

$$\Delta y^{(0)} \approx \left(\frac{df}{dx}\right)^{(0)} \cdot \Delta x^{(0)} \quad (49)$$

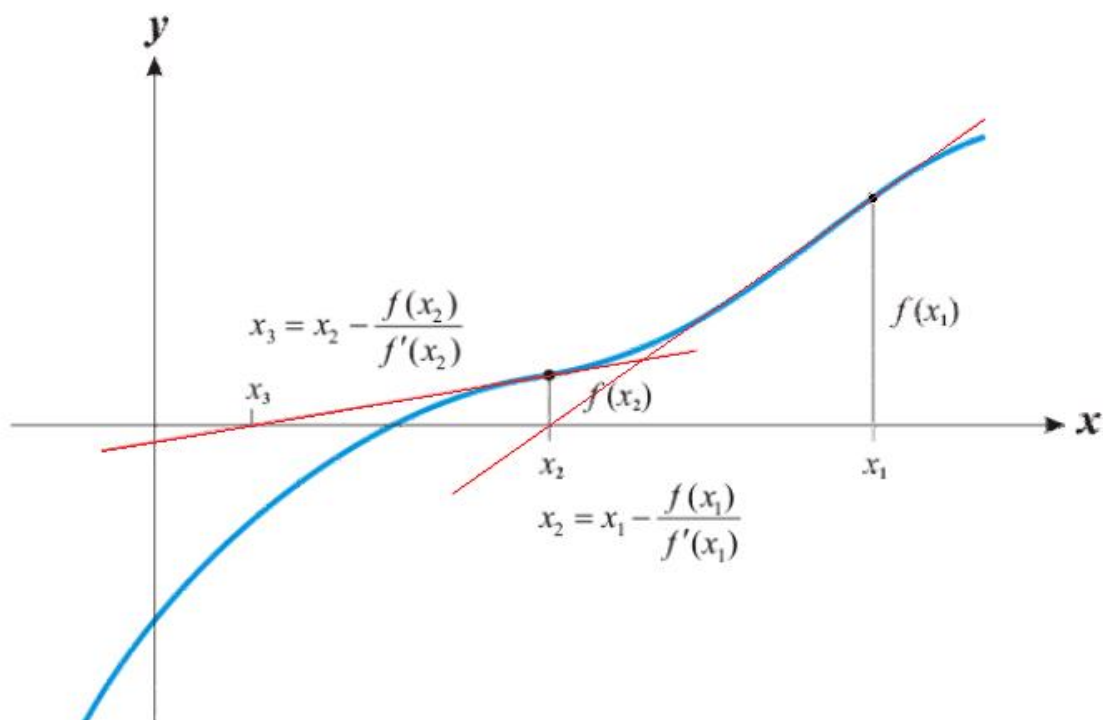
kde $\Delta y^{(0)}$ je defekt a lze vyjádřit jako

$$\Delta y^{(0)} = c - f(x^{(0)}) \quad (50)$$

Druhou aproximaci odhadu získáme přičtením $\Delta x^{(0)}$ k počátečnímu odhadu

$$x^{(1)} = x^{(0)} + \frac{\Delta y^{(0)}}{\left(\frac{df}{dx}\right)^{(0)}} \quad (51)$$

Dalším přičítáním nových odhadů k současným získáme algoritmus metody. [7] [12]



Obr. 4.2: Hledání řešení $f(x)=0$ pro 2 iterace

Nyní je možné popsat metodu výpočtu pro n rovnic o n neznámých. Pro soustavu nelineárních rovnic (38) se provede odhad kořenů v nulté iteraci $x_1^{(0)}, x_2^{(0)}, \dots, x_n^{(0)}$. Od přesné hodnoty se odhady kořenů liší o Δx_i . Přesná hodnota je tedy $x_i = x_i^{(0)} + \Delta x_i$. Díky tomuto poznatku je možné upravit soustavu rovnic (38) podle vztahu (47) a následně rozvojem do Taylorových řad vznikne soustava lineárních rovnic pro výpočet neznámých diferencí.

$$\begin{aligned}
 (f_1)^{(0)} + \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_1}\right)^{(0)} \cdot \Delta x_1^{(0)} + \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_2}\right)^{(0)} \cdot \Delta x_2^{(0)} + \dots + \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_n}\right)^{(0)} \cdot \Delta x_n^{(0)} &= y_1 \\
 (f_2)^{(0)} + \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_1}\right)^{(0)} \cdot \Delta x_1^{(0)} + \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_2}\right)^{(0)} \cdot \Delta x_2^{(0)} + \dots + \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_n}\right)^{(0)} \cdot \Delta x_n^{(0)} &= y_2 \\
 \vdots & \\
 (f_n)^{(0)} + \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_1}\right)^{(0)} \cdot \Delta x_1^{(0)} + \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_2}\right)^{(0)} \cdot \Delta x_2^{(0)} + \dots + \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_n}\right)^{(0)} \cdot \Delta x_n^{(0)} &= y_n
 \end{aligned} \tag{52}$$

Soustavu lze potom zapsat v maticovém tvaru

$$\begin{pmatrix} y_1 - (f_1^{(0)}) \\ y_2 - (f_2^{(0)}) \\ \vdots \\ y_n - (f_n^{(0)}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_1}\right)^{(0)} & \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_2}\right)^{(0)} & \dots & \left(\frac{\partial f_1}{\partial x_n}\right)^{(0)} \\ \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_1}\right)^{(0)} & \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_2}\right)^{(0)} & \dots & \left(\frac{\partial f_2}{\partial x_n}\right)^{(0)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_1}\right)^{(0)} & \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_2}\right)^{(0)} & \dots & \left(\frac{\partial f_n}{\partial x_n}\right)^{(0)} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \Delta x_1^{(0)} \\ \Delta x_2^{(0)} \\ \vdots \\ \Delta x_n^{(0)} \end{pmatrix} \quad (53)$$

Maticový zápis soustavy rovnic lze popsat zkráceně jako

$$(\Delta Y^{(0)}) = (J^{(0)}) \cdot (\Delta X^{(0)}) \quad (54)$$

kde (J) je Jacobiho matice. [7][12]

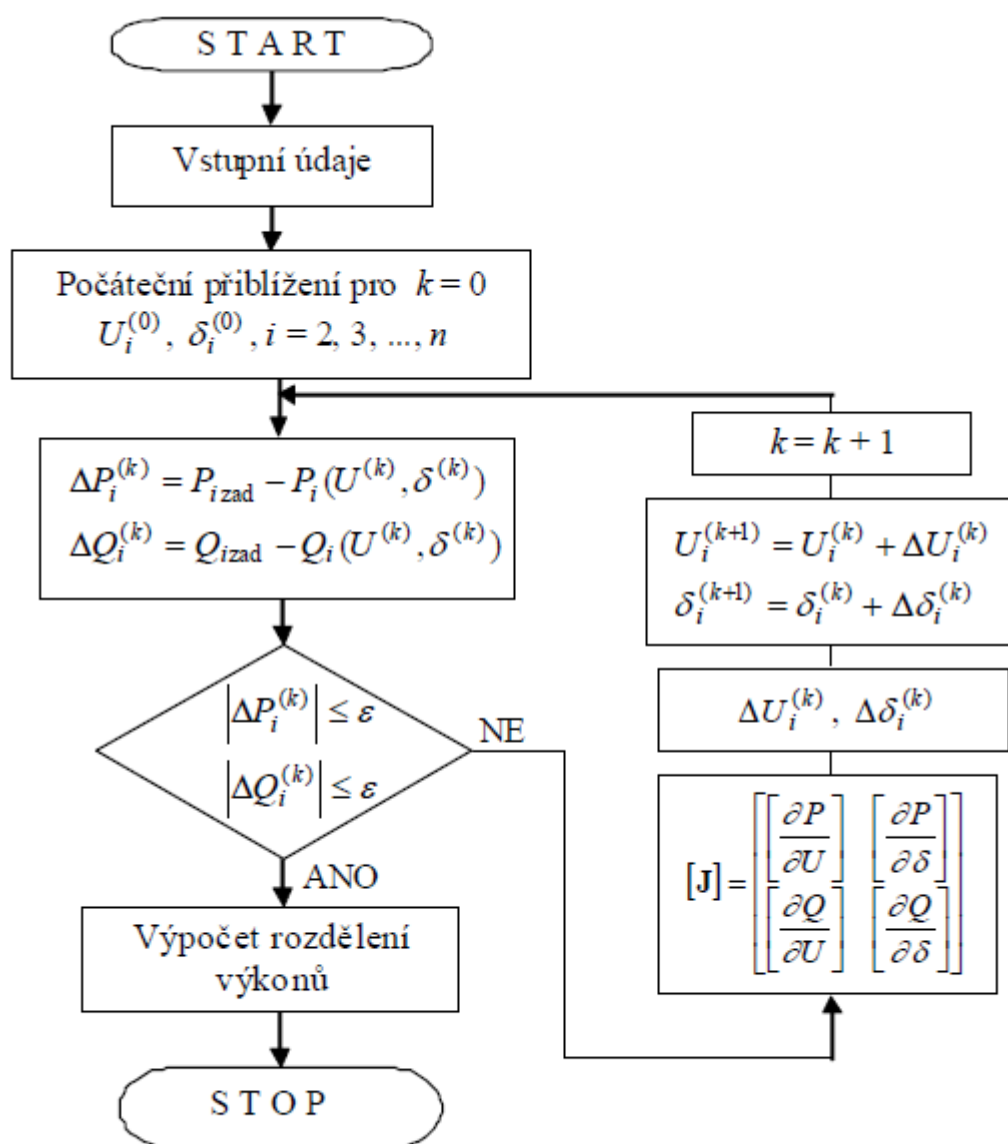
Algoritmus Newton-Raphsonovy metody vyplývající z popsaných odvození je následující. Nejprve se načtou vstupní hodnoty a současně se nastaví počáteční hodnoty stavových veličin. Následně se tyto hodnoty dosadí do soustavy rovnic a vypočítá se defekt v první iteraci. V případě, že je menší nebo roven zvolené toleranci konečných hodnot, výpočet končí. Když tomu tak není, vypočítá se Jacobiho matice. Následně se určí korekce $\Delta X^{(k)}$ a vypočítají se nové vstupní hodnoty pro výpočet defektu a celý postup se opakuje. Matematicky lze tento postup popsat takto:

$$(\Delta Y^{(k)}) = \begin{pmatrix} y_1 - (f_1^{(k)}) \\ y_2 - (f_2^{(k)}) \\ \vdots \\ y_n - (f_n^{(k)}) \end{pmatrix} \quad (55)$$

$$(\Delta X^{(k)}) = (J^{(k)})^{-1} \cdot (\Delta Y^{(k)}) \quad (56)$$

$$(\Delta X^{(k+1)}) = (X^{(k)}) + (\Delta X^{(k)}) \quad (57)$$

Na obrázku 4.3 je zobrazen vývojový diagram Newton-Raphsonovy metody.



Obr. 4.3: Vývojový diagram Newton-Raphsonovy metody (převzato z [7])

Nyní je odvození výpočtu kompletní a lze jej aplikovat na řešení výkonových toků obecné soustavy o n uzlech.

Soustavu rovnic (38) je nutné přepsat do tvaru podle

$$\hat{S}_i = \hat{U}_i^* \sum_{j=1}^n \hat{U}_j \cdot \hat{Y}_{ij} \quad (58)$$

Rovnice je nutné rozepsat na reálnou a imaginární část a to buď ve složkovém či exponenciálním tvaru.

$$\hat{S}_i = P_i + jQ_i \quad \hat{U}_i = U_i e^{j\delta_i} \quad \hat{Y}_{ij} = Y_{ij} e^{j\theta_{ij}}$$

$$\hat{S}_i = U_i e^{j\delta_i} \sum_{j=1}^n U_j \cdot Y_{ij} e^{-j(\delta_j + \theta_{ij})} \quad (59)$$

Po úpravě s uvážením, že $\cos(-x) = -\sin(x)$ lze rozdělit činný a jalový výkon podle vztahů

$$P_i = \sum_{j=1}^n U_i \cdot U_j \cdot Y_{ij} \cdot \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \quad (60)$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^n U_i \cdot U_j \cdot Y_{ij} \cdot \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \quad (61)$$

Dále bude výpočet pokračovat podle rovnice (53), kde vzniklá Jacobiho matice se skládá z parciálních derivací jednotlivě závislých proměnných podle všech nezávisle proměnných. Matice je vždy čtvercová a počet řádků a sloupců odpovídá dvojnásobku počtu PQ uzlů a jedna násobku PU uzlů. Za předpokladu, že bilanční uzel je označen číslem 1, bude úplný zápis rovnic

$$\begin{pmatrix} \Delta P_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta P_n^{(k)} \\ \Delta Q_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta Q_n^{(k)} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \left(\frac{\partial P_2}{\partial \delta_2}\right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial P_2}{\partial \delta_n}\right)^{(k)} & \left(\frac{\partial P_2}{\partial U_2}\right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial P_2}{\partial U_n}\right)^{(k)} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left(\frac{\partial P_n}{\partial \delta_2}\right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial P_n}{\partial \delta_2}\right)^{(k)} & \left(\frac{\partial P_n}{\partial U_2}\right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial P_n}{\partial U_n}\right)^{(k)} \\ \left(\frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2}\right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial Q_2}{\partial \delta_n}\right)^{(k)} & \left(\frac{\partial Q_2}{\partial U_2}\right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial Q_2}{\partial U_n}\right)^{(k)} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \left(\frac{\partial Q_n}{\partial \delta_2}\right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial Q_n}{\partial \delta_n}\right)^{(k)} & \left(\frac{\partial Q_n}{\partial U_2}\right)^{(k)} & \dots & \left(\frac{\partial Q_n}{\partial U_n}\right)^{(k)} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \Delta \delta_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta \delta_n^{(k)} \\ \Delta U_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta U_n^{(k)} \end{pmatrix} \quad (62)$$

K sestavení Jacobiho matice dojde v případě, že po načtení vstupních hodnot (zadané veličiny, které se mají na konci výpočtu zachovat) a iniciaci počátečních hodnot prvků sítě, je defekt větší než požadovaná hodnota. Defekt je odchylka aktuálně závisle proměnných hodnot, od hodnot, kterých má dosáhnou výsledek. Jacobiho matice linearizuje rovnice v okolí řešeného bodu. [7][12]

Jednotlivé prvky Jacobiho matice lze obecně vyjádřit derivací rovnic podle jednotlivých proměnných.

- **Výpočet prvků matice $\frac{\partial P}{\partial U}$**

Diagonální prvky

$$\frac{\partial P_i}{\partial U_i} = 2U_i Y_{(i,i)} \cos(\theta_{(i,i)}) + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n U_j Y_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{(i,j)}) \quad (63)$$

Mimodiagonální prvky

$$\frac{\partial P_i}{\partial U_j} = U_i Y_{(i,j)} \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{(i,j)}) \quad (64)$$

- **Výpočet prvků matice $\frac{\partial P}{\partial \delta}$**

Diagonální prvky

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n U_i U_j Y_{ij} \sin(-\delta_i + \delta_j + \theta_{(i,j)}) \quad (65)$$

Mimodiagonální prvky

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = U_i U_j Y_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{(i,j)}) \quad (66)$$

- **Výpočet prvků matice $\frac{\partial Q}{\partial U}$**

Diagonální prvky

$$\frac{\partial Q_i}{\partial U_i} = -2U_i Y_{(i,i)} \sin(\theta_{(i,i)}) + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n U_j Y_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{(i,j)}) \quad (67)$$

Mimodiagonální prvky

$$\frac{\partial Q_i}{\partial U_j} = U_i Y_{(i,j)} \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{(i,j)}) \quad (68)$$

- **Výpočet prvků matice $\frac{\partial Q}{\partial \delta}$**

Diagonální prvky

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n U_i U_j Y_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{(i,j)}) \quad (69)$$

Mimodiagonální prvky

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} = -U_i U_j Y_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{(i,j)}) \quad (70)$$

U přenosových soustav je možné použít zjednodušené řešení výpočtu tzv. „Decoupled power flow solution“. Toto řešení lze využít za předpokladu, že síť má vyšší poměr X/R vedení. Tedy že převažuje podélná reaktance a při malých změnách absolutní hodnoty napětí se činné výkony v uzlech změní jen velice nepatrně. Stejně jako pro malé změny úhlu napětí se změní jen nepatrně jalové výkony. [7][12]

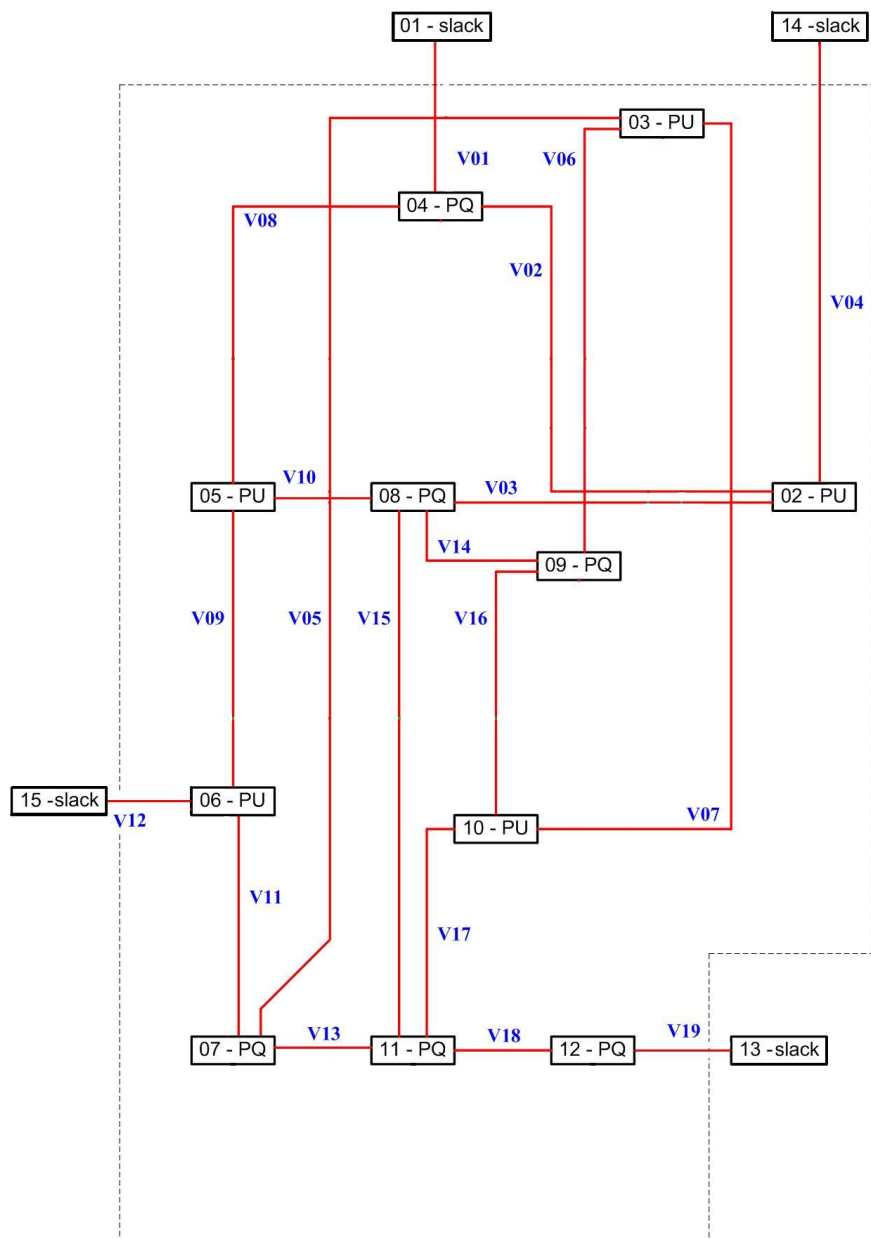
Za těchto předpokladů je možné Jacobiho matici pravit do tvaru

$$\begin{pmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial P}{\partial \delta} & 0 \\ 0 & \frac{\partial Q}{\partial U} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \Delta \delta \\ \Delta U \end{pmatrix} \quad (71)$$

Toto řešení potřebuje více iterací, ale počítání s maticemi je mnohem rychlejší. Proto celkový čas potřebný na výpočet jednotlivých iterací je kratší. Konvergence ke správnému řešení je ale stále stejně přesná, protože se změna týká jen iteračních kroků. [12]

5 Případová studie pro analýzu vlivu zařízení FACTS na ztráty v ES

Pro výpočet budu uvažovat elektrizační soustavu zapojenou podle obrázku 5.1. Soustava představuje fiktivní přenosovou soustavu na napěťové úrovni 400 kV, která má 15 uzlů. Z toho jsou 4 uzly typu slack a představují spojení elektrizační soustavy s nadřazenými soustavami například s přenosovými soustavami jiných států. U uzlů typu slack je zadána pouze amplituda napětí a to 400 kV a jeho úhel δ , který je zvolen nulový. Dále je v soustavě pět uzlů typu PU takzvané generátorové uzly u kterých je známa amplituda napětí a dodávaný činný výkon. Zbýlých šest uzlů je typu PQ a je v nich znám odebíraný činný a jalový výkon. Známé uzlové hodnoty musí být během výpočtu zachovány a dopočítají se hodnoty neznámé. U generátorových PU uzlů je zanedbán vliv blokových transformátorů, které zvyšují napětí na úroveň přenosové soustavy.



Obr. 5.1: Schéma modelu uzlové elektrizační soustavy

V tabulce 1 jsou vstupní hodnoty všech veličin v jednotlivých uzlech soustavy.

Tab. 1: Vstupní hodnoty uzlových veličin

číslo uzlu	typ uzlu	U_N (kV)	P_{odb} (MW)	Q_{odb} (MW)	P_{dod} (MW)
1	slack	400	0	0	0
2	PU	400	0	0	900
3	PU	400	0	0	1700
4	PQ	400	300	110	0
5	PU	400	0	0	1800
6	PU	400	0	0	1300
7	PQ	400	840	135	0
8	PQ	400	710	215	0
9	PQ	400	480	175	0
10	PU	400	0	0	600
11	PQ	400	460	105	0
12	PQ	400	490	205	0
13	slack	400	0	0	0
14	slack	400	0	0	0
15	slack	400	0	0	0

Vedení soustavy jsou modelována pomocí π článků, tedy se soustředěnými parametry. U všech vedení je známa délka a jejich parametry, které jsou v tabulce 2.

Tab. 2: Parametry vedení

R ($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)	X ($\Omega \cdot \text{km}^{-1}$)	B ($\mu\text{S} \cdot \text{km}^{-1}$)
0,026	0,29	3,9

Z těchto hodnot a z délek vedení mezi uzly i a j , lze snadno dopočítat rezistance R_{ij} , reaktance X_{ij} a susceptance B_{ij} pro jednotlivá vedení. Kompletní vypočtené parametry vedení jsou sepsány v tabulce 3.

Tab. 3: Kompletní parametry vedení uzlové sítě

vedení	poč. uzel	kon. Uzel	R (Ω)	X (Ω)	B (μS)	l (km)
V1	1	4	2,86	31,9	429	110
V2	2	4	2,912	32,48	436,8	112
V3	2	8	3,38	37,7	507	130
V4	2	14	2,132	23,78	319,8	82
V5	3	7	8,736	97,44	1310,4	336
V6	3	9	3,25	36,25	487,5	125
V7	3	10	7,254	80,91	1088,1	279
V8	4	5	3,016	33,64	452,4	116
V9	5	6	4,758	53,07	713,7	183
V10	5	8	3,432	38,28	514,8	132
V11	6	7	1,456	16,24	218,4	56
V12	6	15	2,496	27,84	374,4	96
V13	7	11	2,912	32,48	436,8	112
V14	8	9	1,3	14,5	195	50
V15	8	11	7,384	82,36	1107,6	284
V16	9	10	3,9	43,5	585	150
V17	10	11	2,288	25,52	343,2	88
V18	11	12	2,054	22,91	308,1	79
V19	12	13	2,262	25,23	339,3	87

Vstupní hodnoty jsou tímto kompletní a je možné přejít k výpočtu a analýze ztrát v ustáleném chodu soustavy.

5.1 Analýza ztrát modelované elektrizační soustavy

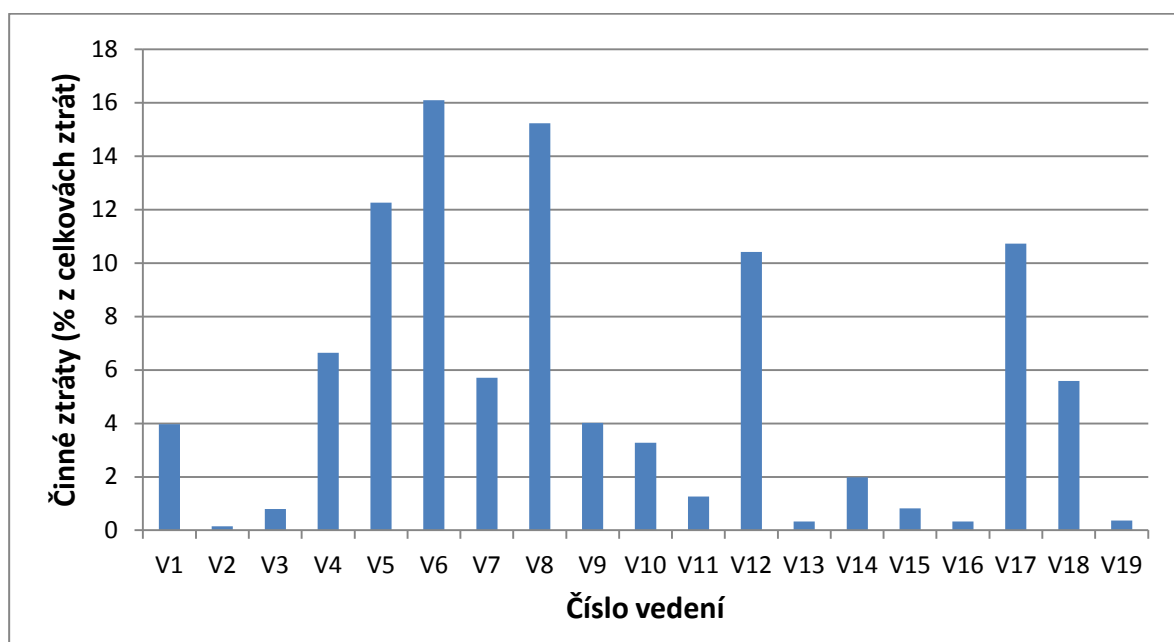
Pro výpočet a analýzu ztrát jsem použil program pro výpočet ustáleného chodu soustavy napsaný v softwaru MATLAB. Vstupní data popisující uzlovou soustavu z tabulek 1 a 3 jsou načítána do programu pomocí externího datového souboru, do něhož jsou ukládány i výsledky ustáleného chodu. Samotný výpočet je řešen pomocí Newton-Raphsonovy metody popsané v kapitole 4.4. Metoda využívá zjednodušení použitelné pro výpočty v přenosových soustavách, tedy takzvaný „Decoupled power flow solution“ s řídkou Jacobiho maticí. Tedy maticí, která na mimodiagonálních prvních obsahuje nuly. Protože je splněna podmínka, aby síť měla vyšší poměr X/R , v mém případě je reaktance vedení X o řád větší než rezistance R , je možné toto zjednodušení

použít. Pomocí programu jsou tedy neznámé hodnoty napětí a úhlů napětí v uzlech a toky činných a jalových výkonů v jednotlivých větvích.

V další části práce se budu zabývat hlavně činnými ztrátami soustavy. Konkrétně jaký vliv má kompenzace pomocí FACTS kontrolérů na činné ztráty. Pro kompenzaci použiji sériový i paralelní prvek FACTS. Konkrétně pro sériovou regulaci je použit kontrolér TCSC popsáný v kapitole 2.2.2. Pro paralelní regulaci je použit STATCOM jehož vlastnosti jsou shrnuty v kapitole 2.2.7.

Pro sériovou i pro paralelní kompenzaci provedu citlivostní analýzu. V případě sériové kompenzace budu měnit reaktanci vedení v rozmezí -50% až 50% původní reaktance vedení. U paralelní kompenzace budu simulovat dodávku jalového výkonu do jednotlivých uzlů až do velikosti 100 MVar. Jalový výkon bude kapacitní i induktivní. V obou případech budu sledovat vliv kompenzace na celkové a dílčí činné ztráty v síti. Dále se budu zabývat toky výkonů po jednotlivých vedeních.

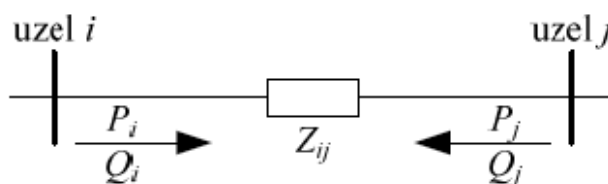
Nyní budou probrány výsledky řešení ustáleného stavu elektrizační soustavy bez kompenzace. Celkové činné ztráty ve větvích jsou 98,76 MW. Celkové činné odběry sítě (činné odběry v PQ uzlech včetně ztrát) jsou 3 378,76 MW. Ztráty tedy tvoří zhruba 2,9% z celkových činných odběrů. Z obrázku 5.2 je možné vidět rozložení ztrát v jednotlivých větvích. Pro lepší orientaci je v grafu vyneseno rozložení ztrát procentuálně.



Obr. 5.2: Rozložení celkových činných ztrát na vedeních

Největší ztráty jsou ve vedení č. 6. To je dáno tím, že toto vedení spojuje uzel č. 3, ve kterém je zapojen generátor o výkonu 1 700 MW s uzlem č. 9, ve kterém dochází k odběru činného a jalového výkonu. Tento odběr sice není největší v soustavě, ale díky tomu, že vedení je oproti ostatním vedením připojeným do uzlu č. 3 relativně krátké, jsou v něm největší výkonové toky a tím i největší ztráty. Ostatní vedení zapojená do uzlu č. 3, tedy vedení č. 5 a č. 7 nejsou tolik zatěžována. Větev č. 5 spojuje generátorový uzel s místem největšího odběru v soustavě, tedy s uzlem č. 7. Ztráty na tomto vedení jsou třetí největší, ale jak již bylo popsáno díky délce 336 km a tedy i veliké reaktanci vedení jím tečou menší výkonové toky než vedením č. 6. Naopak nejmenší podíl činných ztrát je na vedení č. 2. Toto vedení spojuje generátorový uzel č. 2 s uzlem spotřeby č. 4. Po tomto vedení tečou jen malé výkony, protože spotřeba v uzlu č. 4 je hrazena generátorem v uzlu č. 5. A naopak generátor č. 2 dodává výkon do uzlu č. 8. Vedení č. 2 tedy není při současné konfiguraci využito. Lze jej chápat jako vedení „rezervní“, které by případně krylo náhlé výkonové toky při poruchách.

Výkonové toky jednotlivými větvemi soustavy a velikost ztrát v těchto větvích jsou v tabulce 4. Znaménková konvekce výkonových toků je patrná z obrázku 5.3.



Obr. 5.3: Kladná orientace výkonových toků

Kladné znaménko je tedy vždy u výkonu tekoucího z uzlu. Naopak záporné znaménko je u výkonu tekoucího do uzlu.

Tab. 4: Toky výkonů ve vedeních

vedení	poč. uzal i	kon. Uzel j	P_i (MW)	Q_i (MVar)	S_i (MVA)	P_j (MW)	Q_j (MVar)	S_j (MVA)	ΔP (MW)
V1	1	4	-650,53	58,60	653,16	654,46	-106,79	663,11	3,93
V2	2	4	78,08	12,12	79,01	-77,92	-79,57	111,37	0,15
V3	2	8	-170,33	50,29	177,60	171,12	-121,27	209,73	0,79
V4	2	14	992,26	-22,27	992,51	-985,69	66,39	987,93	6,57
V5	3	7	468,99	-60,54	472,88	-456,87	-11,65	457,02	12,12
V6	3	9	878,47	65,81	880,94	-862,58	35,18	863,29	15,90
V7	3	10	352,54	-86,98	363,11	-346,91	-24,27	347,75	5,63
V8	4	5	-876,53	76,36	879,85	891,57	19,82	891,79	15,04
V9	5	6	365,44	-67,52	371,63	-361,47	-2,34	361,48	3,97
V10	5	8	542,98	-0,49	542,98	-539,75	-89,34	547,09	3,23
V11	6	7	514,50	65,30	518,62	-513,25	-106,52	524,19	1,25
V12	6	15	1146,97	3,72	1146,98	-1136,68	106,09	1141,62	10,29
V13	7	11	130,12	-16,83	131,20	-129,80	-47,55	138,23	0,32
V14	8	9	-470,95	88,62	479,22	472,91	-96,83	482,72	1,96
V15	8	11	129,58	-93,01	159,51	-128,78	-69,31	146,25	0,80
V16	9	10	-90,33	-113,36	144,95	90,66	25,41	94,15	0,33
V17	10	11	856,24	59,52	858,31	-845,65	4,62	845,66	10,59
V18	11	12	644,23	7,24	644,27	-638,70	7,13	638,74	5,52
V19	12	13	148,70	-212,13	259,05	-148,35	114,20	187,21	0,36

Z výsledků ztrát vyplývá, že rostou se zatížením vedení.

Toky výkonů do slack uzlů ukazují, že je v soustavě přebytek výkonu, který pomocí všech uzlů slack odtéká do nadřazených (možno chápat jako např. zahraničních) sítí.

Aby byla analýza kompletní, je nutné se ještě podívat na úbytky napětí v jednotlivých uzlech. Podle kodexu přenosové soustavy [12] nesmí napětí v uzlech pro úroveň 400 kV překročit rozsah $\pm 5\%$. Napětí v PU uzlech zůstávají na zadané

hodnotě. V PQ uzlech dochází k mírnému poklesu napětí, ale v žádném z nich není pokles tak velký, aby přesahoval povolené meze.

Tab. 5: Uzlová napětí a výkony

číslo uzlu	typ uzlu	U_N (kV)	modul napětí (p.u.)	úhel napětí (°)	P uzlový (MW)	Q uzlový (MVar)	S uzlový (MVA)
1	slack	400	1,000	0,00	-650,528	58,595	653,162
2	PU	400	1,000	8,47	900,000	40,140	900,895
3	PU	400	1,000	25,12	1700,000	-81,710	1701,963
4	PQ	400	0,989	7,60	-300,000	-110,000	319,531
5	PU	400	1,000	18,46	1800,000	-48,182	1800,645
6	PU	400	1,000	11,48	1300,000	66,668	1301,708
7	PQ	400	0,989	8,48	-840,000	-135,000	850,779
8	PQ	400	0,983	10,92	-710,000	-215,000	741,839
9	PQ	400	0,978	13,51	-480,000	-175,000	510,906
10	PU	400	1,000	14,85	600,000	60,661	603,059
11	PQ	400	0,983	6,94	-460,000	-105,000	471,832
12	PQ	400	0,975	1,45	-490,000	-205,000	531,154
13	slack	400	1,000	0,00	-148,345	114,198	187,210
14	slack	400	1,000	0,00	-985,694	66,394	987,927
15	slack	400	1,000	0,00	-1136,678	106,086	1141,618

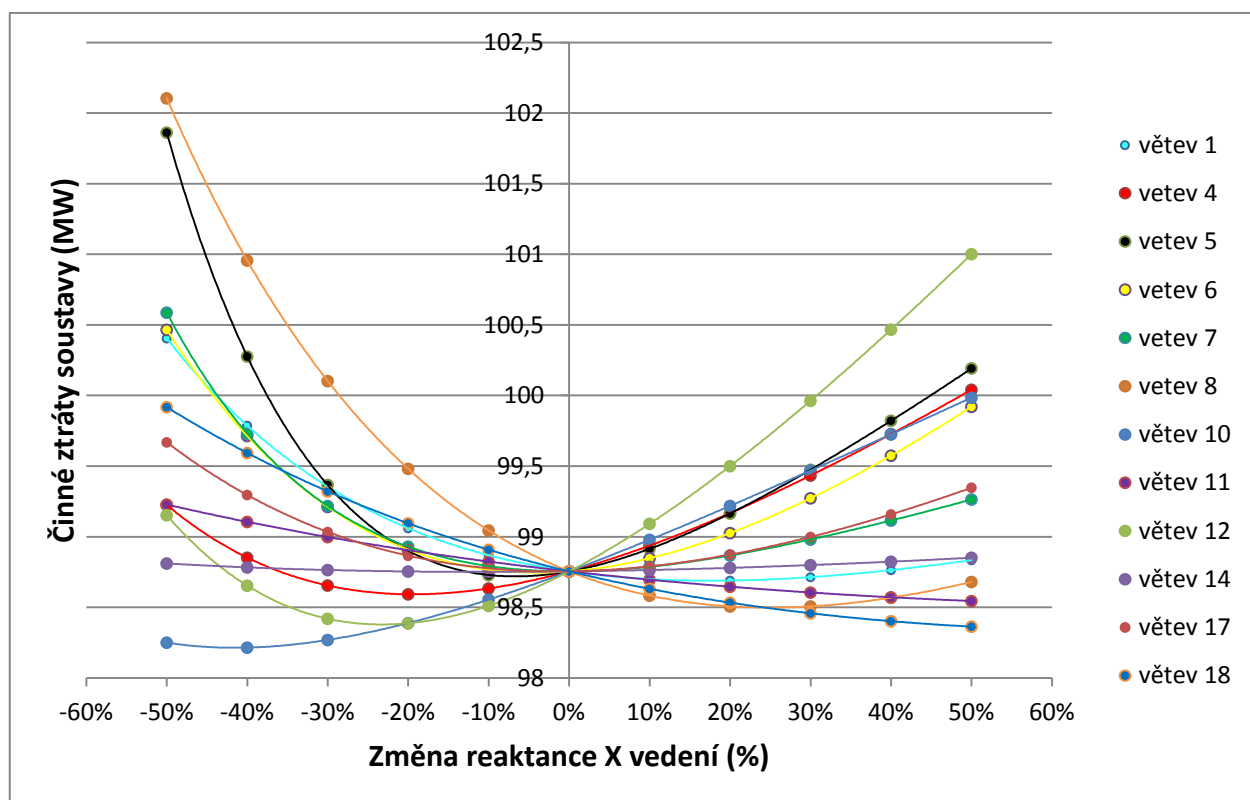
Vrátím-li se k tokům výkonů do slack uzlů, je podle kodexu přenosové soustavy [12] na mezistátních vedeních platná úmluva o minimalizování jalových výkonů. Pro napěťovou úroveň 400 kV je stanovena mez toku jalových výkonů na ± 100 MVar. Toto kritérium splňuje pouze uzel č. 1 a č. 14. Zbylé dva uzly tuto hodnotu nepatrně převyšují.

5.2 Závislost ztrát na kompenzaci pomocí sériového FACTS kontroléru

Pro sériovou kompenzaci pomocí FACTS kontroléru je zvolen TSSC. Simulace kompenzace je založena na principu změny reaktance vedení a to v rozmezí $\pm 50\%$ její původní hodnoty. Snížením reaktance získáme elektricky kratší vedení, což by mělo mít

za následek zvýšení přenosové schopnosti. Analýza je provedena pro ta vedení, kde ztráty v ustáleném stavu přesáhly 1 MW.

Z výsledků citlivostní analýzy, které jsou v grafu na obrázku 5.4, je možné odečíst vliv změny reaktance jednotlivých vedení na celkové činné ztráty.



Obr. 5.4: Vliv změny reaktance jednotlivých vedení na celkové ztráty soustavy

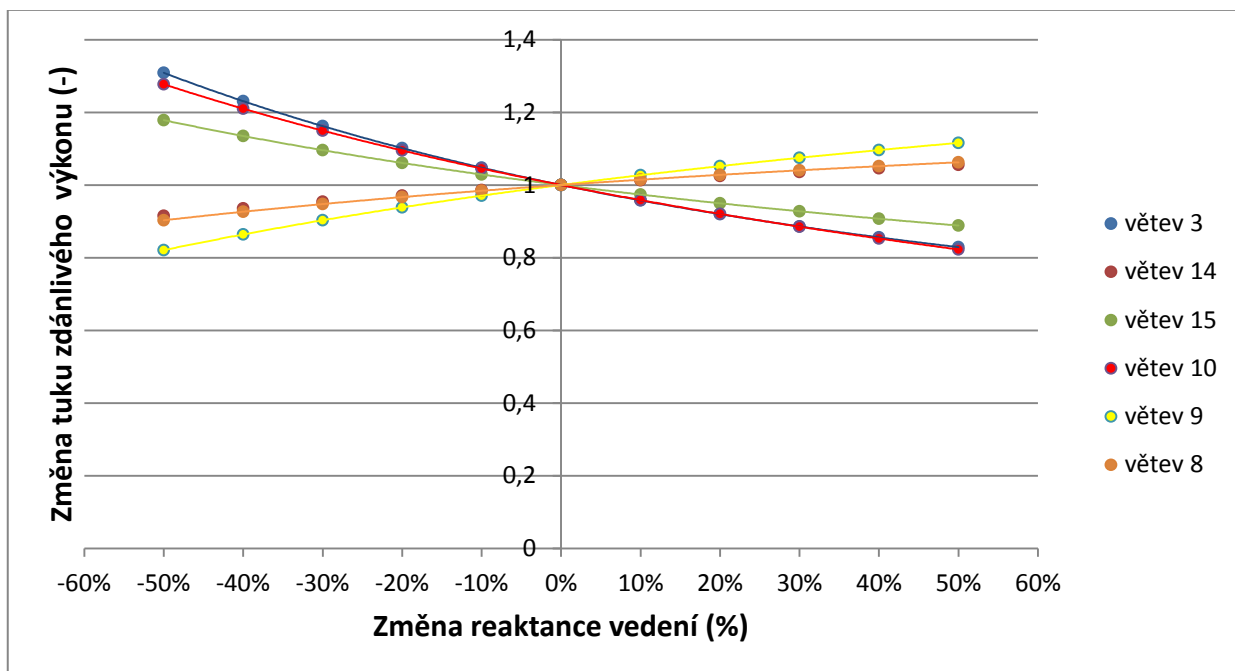
Zajímavostí je, že při snižování reaktance ve většině vedení dojde ke zvýšení činných ztrát a to jak celkových tak i v kompenzovaném vedení. To je způsobeno změnou toků výkonů. Potvrdil se teoretický předpoklad, kdy snížením reaktance vedením vzroste jeho přenosová schopnost a zvětší se tedy i toky výkonů vedením a tím i ztráty v tomto vedení.

Jelikož je uzlová soustava propojená a změna toku jedním vedením ovlivní toky výkonů i všemi ostatními, dochází k tomu, že ve většině případů snížení ztrát vlivem menších toků výkonů v okolí regulované větve nestačí k tomu, aby pokryly zvýšení ztrát v regulované větvi. Tím tedy dochází k celkovému nárůstu ztrát. Tento jev je daný tím, že větší tok výkonu po vedení znamená i zvýšení toku proudu vedením. Jelikož ztráty

vedením závisí na kvadrátu proudu jím tekoucím, zvýší se tedy i ztráty v tomto vedení. Jediný případ, kdy snížením reaktance pouze jednoho vedení klesaly celkové ztráty, je větev č. 10.

Zajímavé je, že stejný jev nastává i v opačném případě a to při zvyšování reaktance vedení. Zde sice klesají ztráty v kompenzovaném vedení, ale klesá i jeho přenosová schopnost. Výkony tedy musí téct okolními vedeními, a tím je více zatěžují a zvyšují tak celkové ztráty soustavy.

V grafu na obrázku 5.5 ukáží citlivostní analýzu změny toků zdánlivých výkonů vedeními při změně reaktance v jednom vedení. Pro ukázkou jsem zvolil kompenzaci ve větvi č. 10.



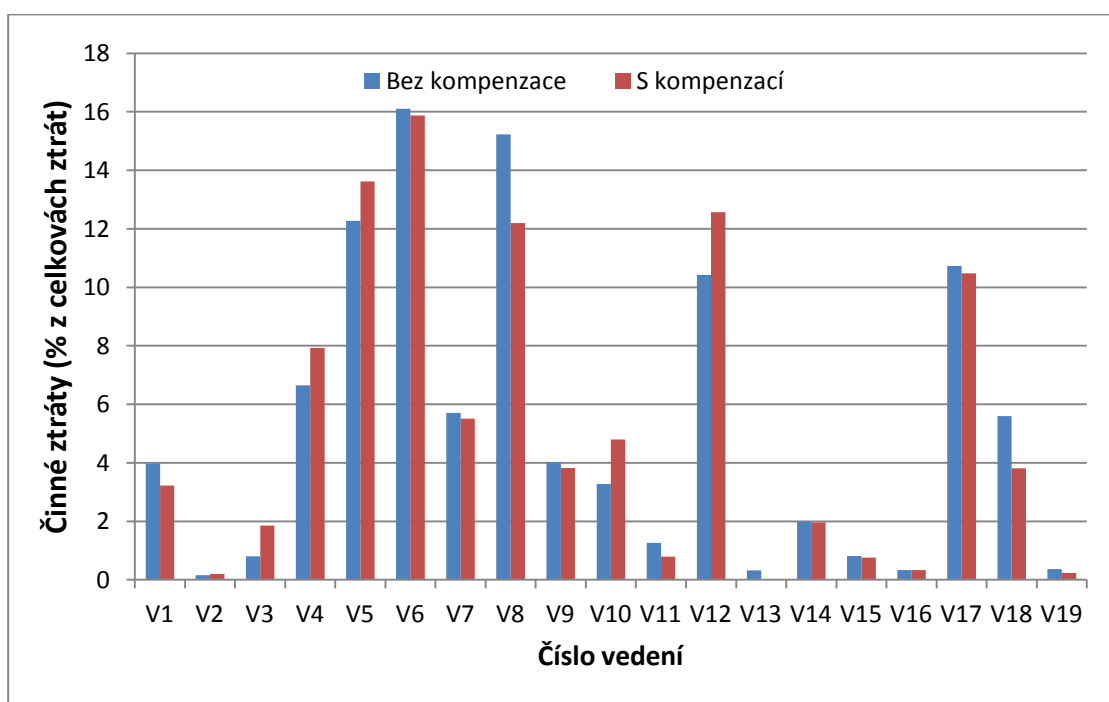
Obr. 5.5: Citlivostní analýza změny toku zdánlivých výkonů na změnu reaktance vedení

Tato analýza je jen pro ukázkou. Proto jsou v grafu zahrnuty pouze větve, které jsou zapojeny do uzlů, ve kterých končí a začíná větev č. 10. Graf ukazuje, jak se snížením reaktance vedení č. 10 vzroste přenášený výkon touto větví. Tato změna vyvolá přerozdělení toků výkonů ve všech ostatních větvích sítě.

5.3 Optimální řešení sériové kompenzace pomocí FACTS pro snížení činných ztrát soustavy

V této části se pomocí kombinace sériové kompenzace pomocí SSSC ve více vedeních pokusím najít optimální řešení pro snížení ztrát. Výpočet je založen na opakovaných výpočtech ustáleného chodu sítě, kterými se hledá optimální rozložení toků výkonů v síti při respektování minimalizace činných ztrát.

Toto řešení se mi podařilo najít při použití šesti FACTS kontrolérů o takovém výkonu, aby se reaktance vedení, k němuž jsou paralelně připojena, snížila na polovinu. Kontroléry jsou připojeny v sérii k vedení číslo 1, 4, 10, 11, 12 a 19. Celkové ztráty v tomto případě dosahují hodnoty 97,13 MW. Což je pokles ztrát o 1,6%. Vzhledem k velikosti investice do výstavby FACTS kontrolérů by toto řešení bylo velice nevhodné, protože úspora výkonu je jen velmi malá. V grafu 5.6 je porovnáno procentuální rozložení ztrát v soustavě před a po kompenzaci.



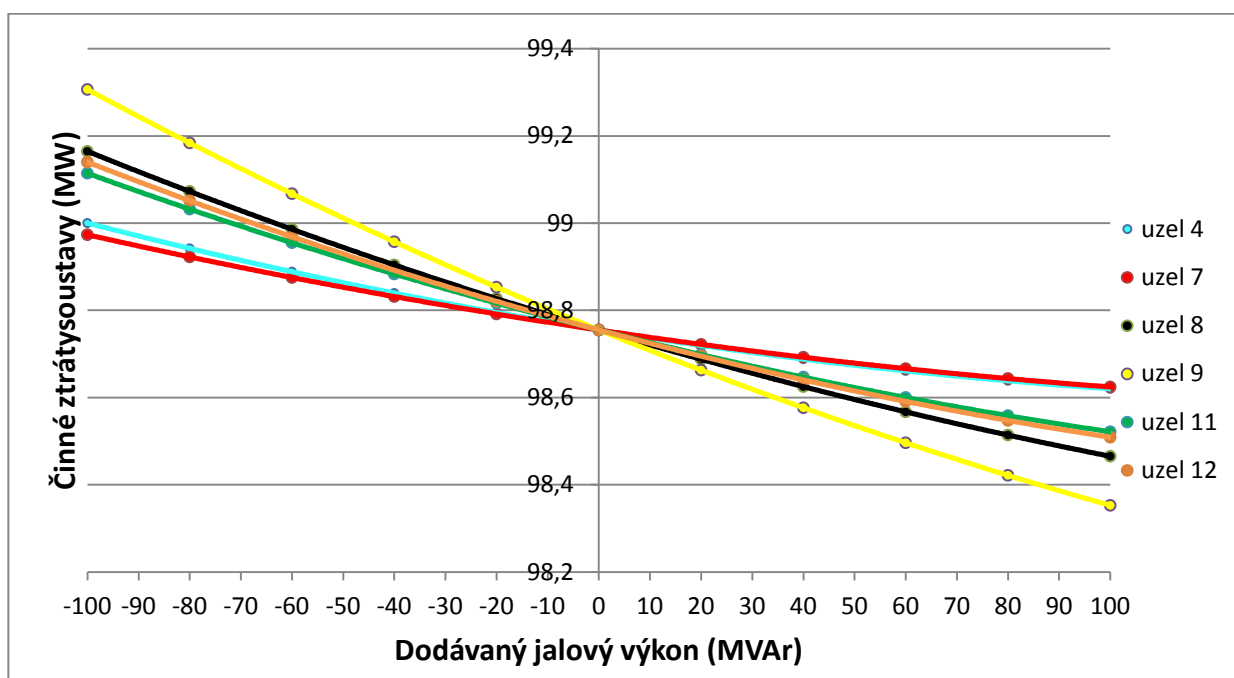
Obr. 5.6: Rozložení celkových činných ztrát na vedeních před a po sériové kompenzaci

Pro ideální kompenzaci ztrát pomocí sériového FACTS kontroléru je potřeba rozložit kompenzátory tak, aby toky výkonů respektive proudů po jednotlivých vedeních

byly co nejvíce rovnoměrné v rámci možnosti využití jednotlivých vedení. Tato myšlenka lze ukázat např. na vedení č. 8. To spojuje generátorový uzel č. 5 s uzlem spotřeby č. 4. Pomocí sériového FACTS kontroléru ve větvi č. 10 dojde k většímu přenosu výkonu tímto vedením do uzlu spotřeby č. 8. Tím vzrostou ztráty v tomto vedení. Ale díky tomu se výkon dodávaný do uzlu č. 8 z generátorového uzlu č. 2. sníží a využije se právě pro napájení uzlu č. 4 pomocí vedení č. 2. A tím tedy klesne proud tekoucí vedením č. 8 a tím pádem i ztráty v tomto vedení

5.4 Závislost ztrát na kompenzaci pomocí paralelního FACTS kontroléru

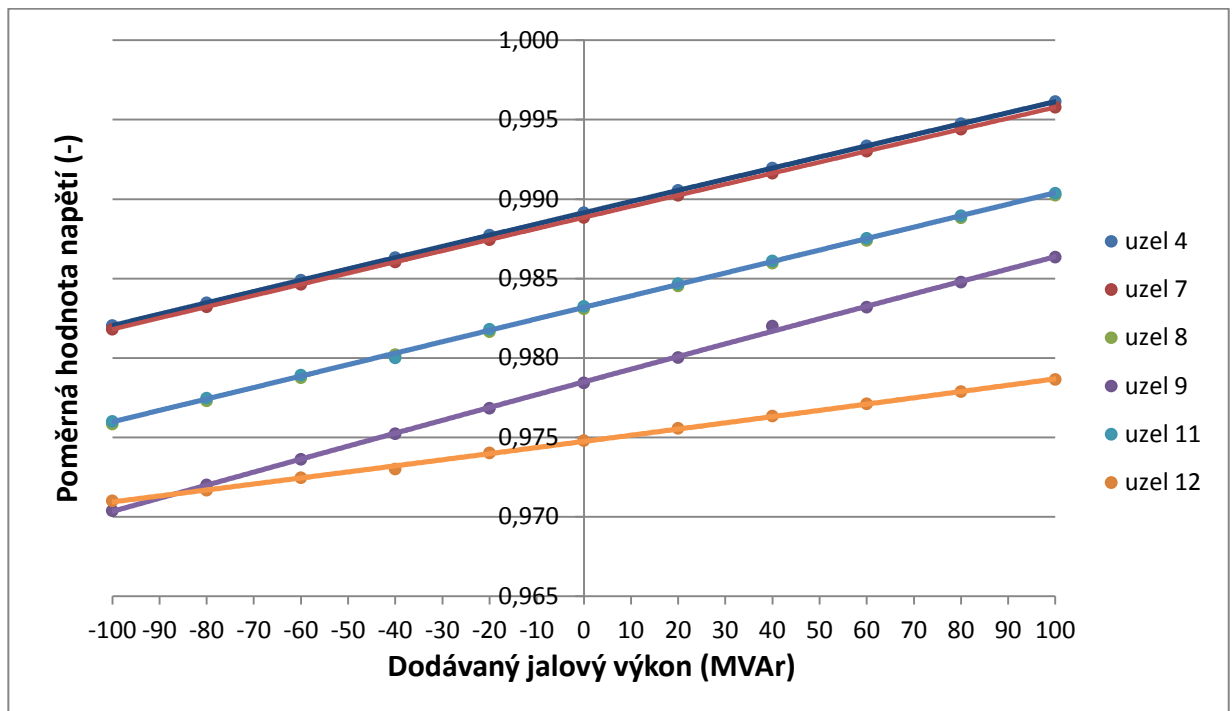
Jako paralelní FACTS kontrolér je v této části použit systém STATCOM bez zdroje napětí ve stejnosměrném obvodu. To znamená, že s ním je možné dodávat, respektive odebírat, pouze jalový výkon do sítě. Systém STATCOM je popsán v kapitole 2.2.7. Stejně jako v kapitole 5.2 provedu citlivostní analýzu, kde proměnnou bude dodávaný jalový výkon a to v rozmezí do 100 MVar kapacitní i induktivní. STATCOM bude vždy připojen k síti v místě odběru jalového výkonu, tedy v PQ uzlu. Důvodem je fakt, že přenášet jalový výkon na dlouhé vzdálenosti je nevýhodné, protože i jalový výkon způsobuje činné ztráty. Závislost ztrát v síti na toku jalového výkonu z STATCOM kontrolérů je možné odečíst z grafu na obrázku 5.7. Kladná hodnota znamená, že je výkon do uzlu dodáván (má kapacitní charakter). Pro zápornou hodnotu platí, že je jalový výkon z uzlu odebírán (má induktivní charakter).



Obr. 5.7: Vliv paralelní kompenzace na celkové činné ztráty sítě

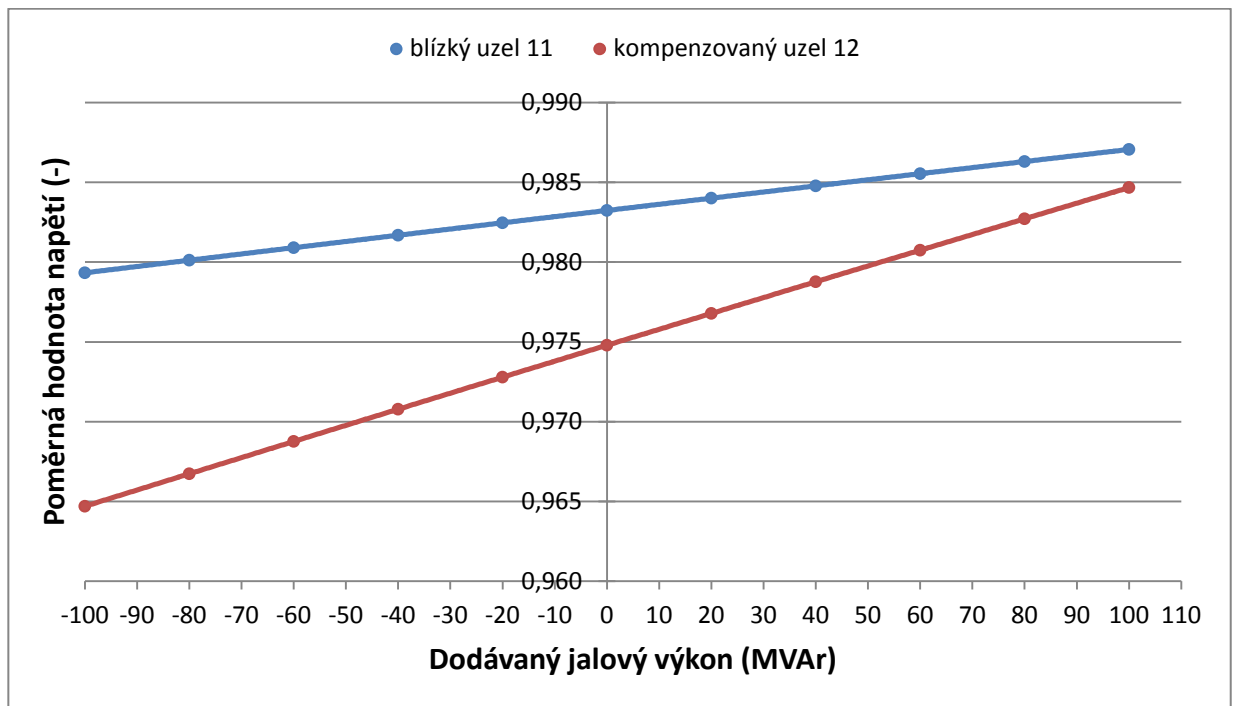
Jelikož všechny PQ uzly sítě odebírají činný i jalový výkon je logické, že pro snížení ztrát je nutné tento výkon do uzlu dodat. Čím větší jalový výkon je v uzlu spotřeby kompenzován, tím menší výkon musí být přenášen po vedení a přispívat tak k činným ztrátám.

Jak je uvedeno v kapitole 3.4, jalový výkon úzce souvisí s napětím v uzlech. Při zvýšeném odběru jalového výkonu v některém z uzlů soustavy dojde k poklesu napětí v tomto uzlu. Regulací jalového výkonu v blízkosti odběru toto napětí opět stoupne. Tento jev je v grafu na obrázku 5.8, kde je vynesena závislost napětí v uzlech, ve kterých dochází k odběru jalového výkonu, tedy ve všech uzlech PQ při změně jalového výkonu v tomto uzlu. Změna je stejně jako v grafu závislosti ztrát na kompenzaci jalového výkonu 0 až 100 MVar kapacitního i indukčního charakteru.



Obr. 5.8: Vliv kompenzace jalového výkonu na napětí v uzlech

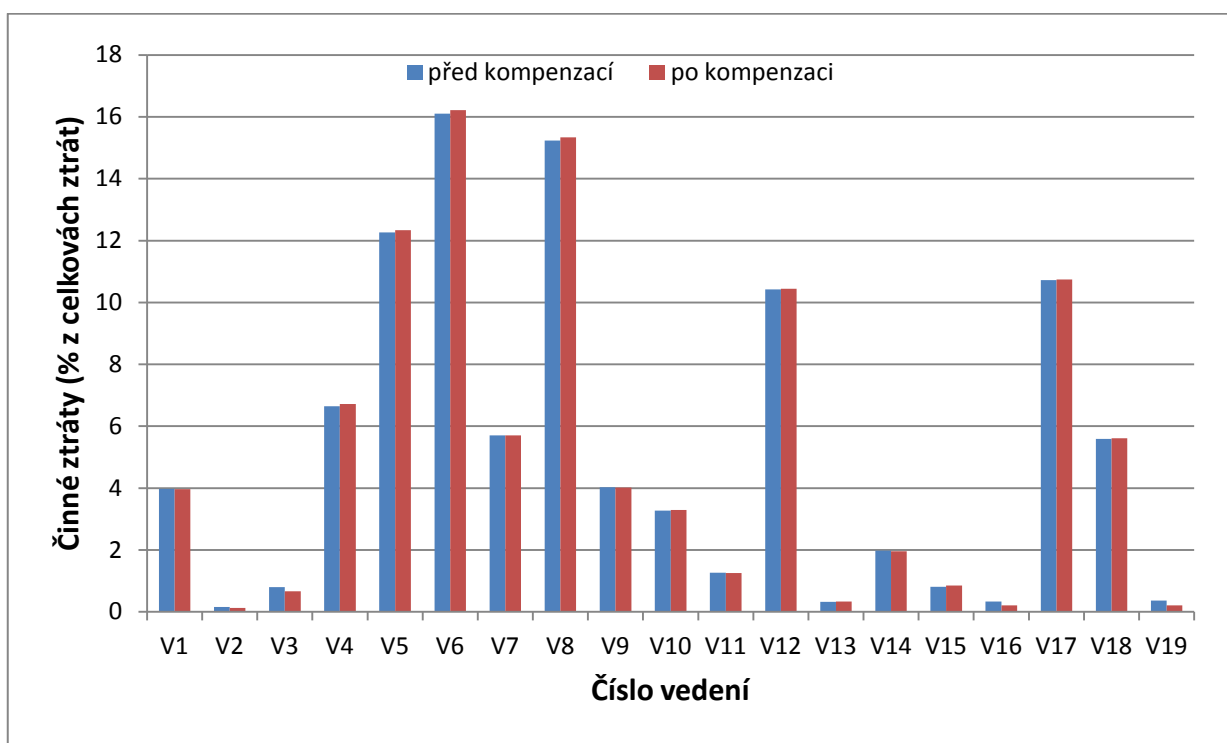
Kompenzace jalového výkonu neovlivňuje napětí jen v kompenzovaném uzlu, ale i v blízkosti kompenzovaného uzlu. Příklad je možné ukázat např. na kompenzaci v uzlu č. 12, kde dodávaný nebo odebíraný jalový výkon ovlivňuje i napětí v blízkém uzlu č. 11. Tato závislost je na obrázku č. 5.9.



Obr. 5.9 Závislost napětí na změně dodávaného jalového výkonu v kompenzovaném i blízkém uzlu

5.5 Optimální řešení paralelní kompenzace pomocí FACTS pro snížení činných ztrát soustavy

Stejně jako u bodu 5.3 se pokusím opakovanými výpočty nalézt optimální řešení pro snížení minimálních ztrát. Budu-li uvažovat maximální dodávaný jalový výkon kontrolérem STATCOM 100 MVar, je optimální řešení při zapojení kontroléru v každém PQ uzlu a při dodávce maximálního kapacitního jalového výkonu. Jedná se tedy o 5 kontrolérů. Vzhledem k tomu, že ztráty by klesly o 1,25% oproti nekompenzovaným ztrátám, je toto řešení opět ekonomicky nevhodné. Grafické porovnání původních ztrát a ztrát po kompenzaci je na obrázku 5.10.



Obr. 5.10: Rozložení celkových činných ztrát na vedeních před a po paralelní kompenzací

Modelová soustava reprezentuje síť s poměrně velkými rezervami, co se týče přenosu výkonu, proto kompenzace pomocí FACTS nemá tak velký dopad na ztráty. Nicméně je z výsledků prokazatelné, že se tyto ztráty pomocí FACTS kontrolérů, ať sériových nebo paralelních daří snižovat.

Závěr

V první části práce jsem se zaměřil na popis zařízení FACTS. V úvodu jsou probrány jednotlivé systémy, které patří do skupiny FACTS. V přenosových soustavách jsou po celém světě instalovány nejčastěji čtyři typy FACTS. A to TCSC pro sériovou kompenzaci, který se využívá pro řízení výkonových toků, tlumení elektromechanických oscilací a zlepšení napěťové stability, SSSC používaných také k těmto účelům, ale jejich výhodou je možnost dynamického řízení. Z paralelních to jsou systémy STATCOM a jejich předchůdce SVC. V diplomové práci jsou ukázány některé významné aplikace těchto systému po celém světě.

V další části diplomové práce jsou probrány možnosti, kterými lze pomocí systémů FACTS snižovat ztráty v soustavách. Je to hlavně řízení toků výkonů po vedení a kompenzace jalového výkonu v uzlech. Pro nalezení optimálního řešení rozložení výkonových toků po vedení vedoucích ke snížení ztrát je nutné znát parametry sítě v ustáleném chodu, proto byla výpočtu a popisu ustáleného chodu věnována větší pozornost. Zejména pak výpočtu pomocí Newton-Raphsonovy metody, která se pro výpočet ustáleného chodu používá nejčastěji. Tato metoda má oproti Gauss-Seidlově metodě výhodu zejména v tom, že její použití zkracuje celkovou dobu potřebnou k výpočtu, jelikož konverguje rychleji. V práci jsou ale ukázány i další možnosti řešení ustáleného chodu jako je Gauss-Seidlova iterační metoda.

V praktické části je na modelu uzlové sítě demonstrován vliv FACTS na ztráty v této síti. Na tento model je aplikován výpočetní program řešící ustálený chod sítě. V první části je ukázána kompenzace pomocí sériového TCSC kontroléru. Samotná kompenzace je simulována ve vedení jako změna reaktance jednotlivých vedení. Z výsledků citlivostní analýzy vyplývá, že pomocí sériové kompenzace lze účinně měnit a přerozdělovat tok výkonů po jednotlivých vedeních a tím některá více zatěžovaná vedení odlehčit. Modelová síť je zvolena s dostatečnou rezervou pro přenos výkonů, proto v ní nedochází k nadměrnému zatěžování některého z vedení. Vliv sériové kompenzace měl proto jen malý dopad na snížení ztrát. Nicméně se potvrdil teoretický předpoklad, že pomocí sériové kompenzace systémy FACTS lze snížit ztráty

v soustavě. V druhé části je provedena citlivostní analýza paralelní kompenzace jalového výkonu na ztráty v síti pomocí kontroléru STATCOM. Opět se potvrdil teoretický předpoklad, že díky kompenzaci jalového výkonu v uzlech spotřeby dojde ke snížení ztrát. Jelikož jalový výkon není přenášen po vedení, ale je hrazen z kontroléru STATCOM v blízkosti místa spotřeby, nepřispívá k činným ztrátám ve vedení. Stejně jako u sériové kompenzace výsledné snížení ztrát nebylo tak velké, aby se investice do STATCOM, ale i do TCSC vyplatila v této konkrétní síti vyplatila. Nicméně je z výsledků patrné, že změnou jalového výkonu v uzlu pomocí paralelního kontroléru STATCOM je možné efektivně řídit napětí v uzlech a udržovat úbytky (případně přepětí v případě odlehčení vedení) v dovořených mezích.

Literatura

- [1] Grünbaum, R., Noroozian, M., Thorvaldsson, ABB.: *FACTS – powerful systems for flexible power transmission*, [online] ABB 2013-09-04 [cit. Říjen 2013], 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] Čeleda, J.: *Řešení napěťové stability elektrizačních soustav v ustáleném stavu*. Diplomová práce, ČZU Plzeň 2013
- [7] Hazulík, E.: *Řízení provozu elektrizačních soustav*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1984. 125 s. Sysno: 000715939 .
- [8] Ptacek J.: *Regulace toků v propojených elektrizačních soustavách*. Disertační práce. VUT v Brně 2004, ISBN 80-214-2656-X
- [9] 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
- [10] Andersson, G., *Power System Analysis*. ITET ETH Zürich 2012. Lecture 227-0526-00,
- [11] *Frequently Asked Questions*. [online]: ČEPS, a.s. [cit. Prosinec 2014]. Dostupné z <www.ceps.cz/CZE/Media/Stranky/FAQ.aspx>
- [12] *Ustálené chody ES*. [online]: přednáška k předmětu Přenos a rozvod elektrické energie, ČVUT v Praze. [cit. Říjen 2014] dostupné z: <www.powerwiki.cz>
- [13] *Kodex přenosové soustavy*. [online]: ČEPS, a.s. [cit. Listopad 2014]. Dostupné z <www.ceps.cz/CZE/Data/Legislativa/Kodex>

-
- [14] *FACTS – Flexible AC Transmission Systems*. [online]: SIEMENS [cit. Prosinec 2014]. Dostupné z <www.energy.siemens.com/hq/en/power-transmission/facts/>
- [15] *TCSC for stable transmission of surplus power from Eastern to Western India*. [online]: ABB [cit. Prosinec 2014]. Dostupné z <http://new.abb.com/facts/references/reference_rourkela_raipur>
- [16] *FACTS for grid voltage stabilization and increased power transmission capability in Chile*. [online]: ABB [cit. Prosinec 2014]. Dostupné z <http://new.abb.com/facts/references/reference_cerro_navia >

Seznam obrázků

Obr. 2.1: Jednopolové schéma přenosové linky.....	11
Obr. 2.2: Fázorový diagram.....	12
Obr. 2.3: Základní konfigurace TCSC.....	15
Obr. 2.4: V-A pracovní oblast TCSC.....	15
Obr. 2.5: Základní konfigurace TCSC.....	17
Obr. 2.6: Základní konfigurace TSSC.....	18
Obr. 2.7: Základní konfigurace SSSC.....	19
Obr. 2.8: V-A pracovní oblast SSSC.....	20
Obr. 2.9: Základní konfigurace SVC.....	21
Obr. 2.10 V-A pracovní oblast SVC.....	22
Obr. 2.11: Základní konfigurace STATCOM.....	23
Obr. 2.12: V-A pracovní oblast systému STATCOM.....	24
Obr. 2.13: Systém STATCOM s rozšířením o TCR a TSC.....	25
Obr. 2.14: Pracovní oblast STATCOM s rozšířením o TCR a TSC.....	25
Obr. 2.15: Základní konfigurace UPFC.....	26
Obr. 2.16: Zapojení IPFC pro dvě vedení.....	29
Obr. 2.17: Základní uspořádání PST.....	30
Obr. 2.18: Fázorový diagram pro vstřikované napětí QBT.....	31
Obr. 2.19: Fázorový diagram vstřikovaného napětí pro PAR.....	32
Obr. 3.1: Fázorový diagram pro úbytek napětí v místě spotřeby.....	35
Obr. 3.2: SVC Richard Bay, JAR.....	38
Obr. 3.3: TCSC Rourkela-Raipur, Indie.....	39
Obr. 3.4: STATCOM a SVC Cerro Navia, Chile.....	40
Obr. 3.5: Zapojení SVC Hiteen, Quassim a Afif, Saúdská Arábie.....	41

Obr. 3.6: SVC Chevire, Francie.....	42
Obr. 4.1: Vývojový diagram Gauss-Seidlový.....	49
Obr. 4.2: Hledání řešení $f(x)=0$ pro 2 iterace.....	51
Obr. 4.3: Vývojový diagram Newton-Raphsonovy metody.....	53
Obr. 5.1: Schéma modelu uzlové elektrizační soustavy.....	58
Obr. 5.2: Rozložení celkových činných ztrát na vedeních.....	62
Obr. 5.3: Kladná orientace výkonových toků.....	63
Obr. 5.4: Vliv změny reaktance jednotlivých vedení na celkové ztráty soustavy...	65
Obr. 5.5: Citlivostní analýza změny toku zdánlivých výkonů na změnu reaktance vedení.....	66
Obr. 5.6: Rozložení celkových činných ztrát na vedeních před a po sériové kompenzaci.....	67
Obr. 5.7: Vliv paralelní kompenzace na celkové činné ztráty sítě.....	69
Obr. 5.8: Vliv kompenzace jalového výkonu na napětí v uzlech.....	70
Obr. 5.9 Závislost napětí na změně dodávaného jalového výkonu v kompenzovaném i blízkém uzlu.....	71
Obr. 5.10: Rozložení celkových činných ztrát na vedeních před a po paralelní kompenzaci.....	72

Seznam tabulek

Tab. 1: Vstupní hodnoty uzlových veličin.....	59
Tab. 2: Parametry vedení.....	59
Tab. 3: Kompletní parametry vedení uzlové sítě.....	60
Tab. 4: Toky výkonů ve vedeních.....	63
Tab. 5: Uzlová napětí a výkony.....	64