

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ**

# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Moderní technologie pro přenos elektrického výkonu**

*Originál (kopie) zadání BP*

## **Abstrakt**

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na dopady zavádění obnovitelných zdrojů energie, které v mnoha ohledech ovlivňují přenosové soustavy. Zkoumány jsou tranzitní toky přes přenosovou soustavu ČR a další negativní vlivy s tím spojené. Dále obsahuje základní princip regulace jalového a činného výkonu a zabývá se novými možnostmi v oblasti řízení a regulace výkonů v energetických systémech jako jsou FACTS a HVDC systémy, a jejich aplikovatelnost na naši přenosovou soustavu. Práce dokazuje, že zavádění obnovitelných zdrojů energie do energetického mixu má za následek ekonomické i technické dopady.

## **Klíčová slova**

Přenosové soustavy, elektrická energie, obnovitelné zdroje, toky výkonů, činný výkon, jalový výkon, větrná elektrárna, FACTS, HVDC, phase-shifting transformátor

## **Abstract**

The bachelor theses presents the principles of the renewable energy which in many respects affect the transmission systems. The transit flows through the Czech republic transmission system and other negative effects are being examined. It also includes basic principle of regulativ of reactive and active power and engages on new options in section of regulativ and control powers in energy systems as FACTS and HVDC systems and their applicability to our transmission system. This theses proves that renewable resources and their implementation have significant economic and technical impacts.

## **Key words**

Transmission networks, electricity, renewable sources, flow of power, active power, reactive power, aerogenerator, FACTS, HVDC, phase-shifting transformer

## **Prohlášení**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

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

V Plzni dne 5.6.2013

Jméno příjmení

.....

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Ondřeji Královi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

## Obsah

ÚVOD.....	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	9
<b>1 SOUSTAVA ENTSO-E.....</b>	<b>11</b>
1.1 PŘÍNOSY ENTSO-E.....	12
1.2 TOKY ČINNÝCH VÝKONŮ V EVROPĚ.....	12
1.2.1 Rozvoj větrných elektráren v Německu.....	14
1.2.2 Tranzitní toky přes ČR.....	16
<b>2 MODERNÍ PRVKY PRO ŘÍZENÍ VÝKONOVÝCH TOKŮ V PŘENOSOVÉ SOUSTAVĚ.....</b>	<b>17</b>
2.1 VÝKONOVÉ ROVNICE PŘENOSU VĚTVOVÝCH VÝKONŮ.....	18
2.2 ŘÍZENÍ JALOVÉHO VÝKONU.....	21
2.3 ŘÍZENÍ ČINNÉHO VÝKONU.....	21
2.4 FACTS SYSTÉMY.....	22
2.4.1 TCSC.....	23
2.4.2 SSSC.....	24
2.4.3 SVC.....	25
2.4.4 STATCOM.....	26
2.4.5 UPFC.....	27
2.4.6 BSC, BSR.....	29
2.4.7 Transformátory s regulací fáze a napětí (PAR, PST).....	29
<b>3 HVDC.....</b>	<b>32</b>
3.1 PODMOŘSKÝ PŘENOS.....	34
3.2 PŘEDNOSTI STEJNOSMĚRNÝCH PŘENOSŮ.....	35
<b>4 APLIKOVATELNOST FACTS A HVDC V ČR.....</b>	<b>36</b>
4.1 PLÁNOVANÉ STAVBY V ČR.....	38
4.1.1 Vedení 400 kV Havlíčkův Brod - Čebín.....	38
4.1.2 Výstavba PST v rozvodně Hradec.....	38
<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>39</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ .....CHYBA! ZÁLOŽKA NENÍ DEFINOVÁNA.</b>	

## Úvod

Současný trend integrace větrných elektráren a dalších obnovitelných zdrojů ovlivňuje provoz energetických systémů v mnoha ohledech a jak lze pozorovat, zpomaluje tempo vývoje. Přerušovaná povaha větrné i sluneční energie nepředvídatelně mění celoevropskou strukturu výroby a přenosu energie, což má za následek to, že vzrůstající zatížení sítí umocňuje problematiku tranzitních toků. Sítě se stávají stále složitější a stále častěji se setkáváme s požadavkem přenášet větší výkon, než na který byly původně navrženy. Tedy i naše přenosové sítě se nacházejí téměř na hranici přenosové stability a je nutné v tomto směru zvolit opatření ke zvýšení bezpečnosti přenosové soustavy.

Cílem této práce je popsat technologie, které se pro tento úkol nabízí. Jedná se o technologie FACTS, což je zkratka pro flexibilní systémy přenosu střídavého proudu a technologie pro stejnosměrný přenos HVDC, které jsou prozatím pro naši soustavu nevyužitelné. Pod názvem FACTS se skrývá celá řada složitých systémů a principů, které jsou určeny k dosažení vyšší statické a dynamické stability přenosových soustav. K jejich rozmachu přispěl vývoj elektronických součástek, které dokáží pracovat s velkým napětím a výkony.

Úvod této práce popisuje soustavu ENTSO-E a rozvoj větrných elektráren v severním Německu, které způsobují neplánované tranzitní toky přes naši přenosovou soustavu. Další část práce se zabývá moderními prvky pro řízení výkonových toků v přenosové soustavě a popisuje jednotlivé zařízení FACTS. Jelikož zařízení typu FACTS jsou desítky druhů, byly vybrány nejvýznamnější zástupce těchto systémů. V třetí části jsou popsány technologie HVDC a jejich přednosti proti FACTS systémům.

V závěru práce je uvedena aplikovatelnost těchto zařízení a současné plánované stavby na naši přenosovou soustavu.



## Seznam symbolů a zkratk

NTC	Net Transfer Capacities
OZE	Obnovitelné Zdroje Energie
EWEA	European Wind Energy Association
VTE	Větrná elektrárna
FACTS	Flexible Alternating Current Transmission Systems
HVDC	High-Voltage Direct Current
VSC	Voltage Source Converter
TCSC	Thyristor-Controlled Series Capacitor
SSSC	Static Synchronous Series Compensator
SVC	Static Var Compensator
STATCOM	Static Synchronous Compensator
UPFC	Unified Power Flow Controller
BSC	Breaker Switched Capacitor
BSR	Breaker Switched Reaktor
PST	Phase-Shifting Transformers
PAR	Phase-Angle Regulators
ES	Elektrizační soustava
$\cos\varphi$	Účinník
P	Činný výkon
$U_{f1}$	Napětí na začátku vedení
$U_{f2}$	Napětí na konci vedení
$I_1$	Proud na začátku vedení
$I_2$	Proud na konci vedení
$Z_v$	Vlnová impedance
$\alpha$	Činitel tlumení
$\beta$	Činitel fázového natočení
R	Resistence
X	Induktivní reaktance
B	Kapacitní susceptance
G	Svod
$\gamma$	Činitel šíření

---

$\sigma$ .....	Úhel přenosu
$U$ .....	Napětí
$I$ .....	Proud
$\text{Sinh}$ .....	Hyperbolický sinus
$\text{Cosh}$ .....	Hyperbolický cosinus
$Q$ .....	Jalový výkon
$L$ .....	Indukčnost
$C$ .....	Kapacita
Mil. ....	Milion
$L_1 L_2 L_3$ .....	Fázové vodiče napájecí soustavy
$P_{ik}$ .....	Činný výkon mezi uzly $i$ a $k$
$U_i U_k$ .....	Napětí v uzlu $i$ a $k$
$B_{ik}$ .....	Kapacitní susceptance mezi uzly $i$ a $k$
$U_T$ .....	Velikost vstřikovaného napětí
$U_C$ .....	Napětí měniče
$U_m$ .....	Koncové napětí
$X_C$ .....	Kapacitní reaktance
$I_C$ .....	Kompenzační proud
$T_1 T_2$ .....	Transformátor y
$U_s$ .....	Sdružené napětí
$U_{DC}$ .....	Stejnoseměrné napětí
$I_{DC}$ .....	Stejnoseměrný proud
kWh .....	Kilowatthodina
vn .....	Vysoké napětí

## 1 Soustava ENTSO-E

European Network of Transmission System Operators for Electricity (Evropská síť provozovatelů elektroenergetických přenosových soustav) je organizací 41 evropských provozovatelů přenosových soustav z 34 zemí Evropy. Navazuje na všechna dosavadní evropská sdružení provozovatelů přenosových soustav (TSO):

**NORDEL** (Severní Evropa),

**UCTE** (kontinentální Evropa),

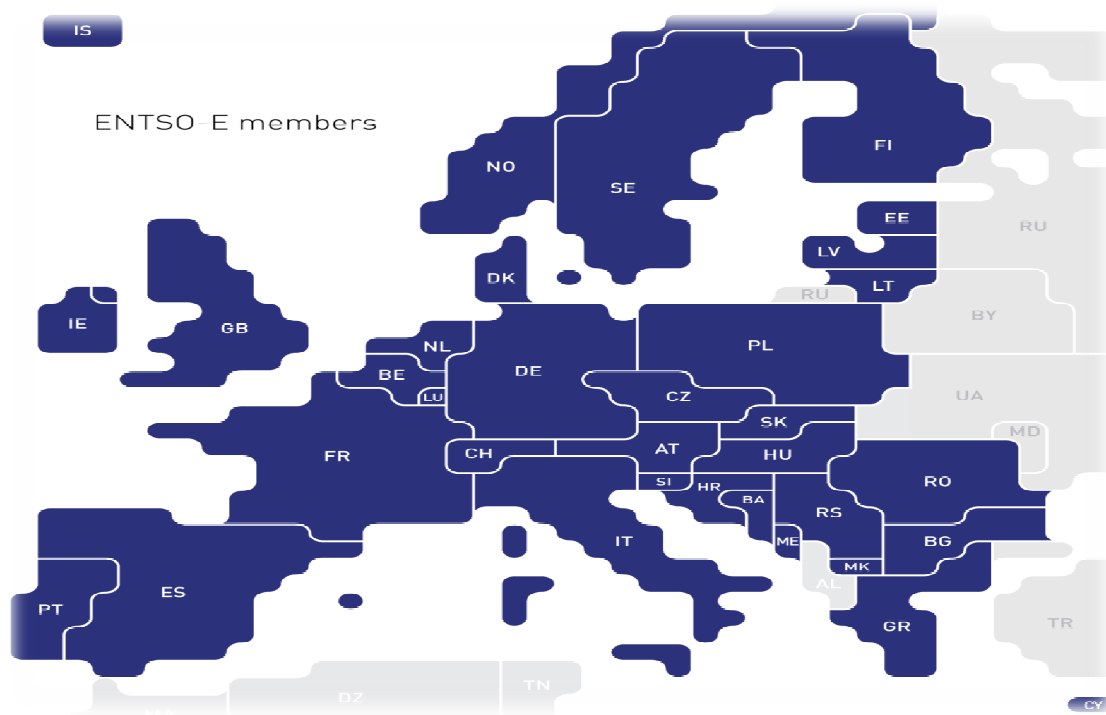
**BALTSO** (Pobaltské země),

**ATSOI** (Irsko),

**UKTSOA** (Velká Británie),

**ETSO** (UCTE+ATSOI+UKTSOA+UCTE).

ENTSO-E vidí potřebu ve zvýšené spolupráci a součinnosti mezi TSO tak, aby vytvořili efektivnější řízení příhraniční přenosové sítě a aby bylo zajištěno koordinované plánování a dobrý technický vývoj přenosového systému, včetně vytvoření vzájemného propojení kapacit s ohledem na životní prostředí. Na obr. 1-1 jsou znázorněny členové asociace ENTSO-E [1]



Obr. 1-1 Asociace ENTSO-E propojených přenosových soustav ( převzato z [2] )

## 1.1 Přínosy ENTSO-E

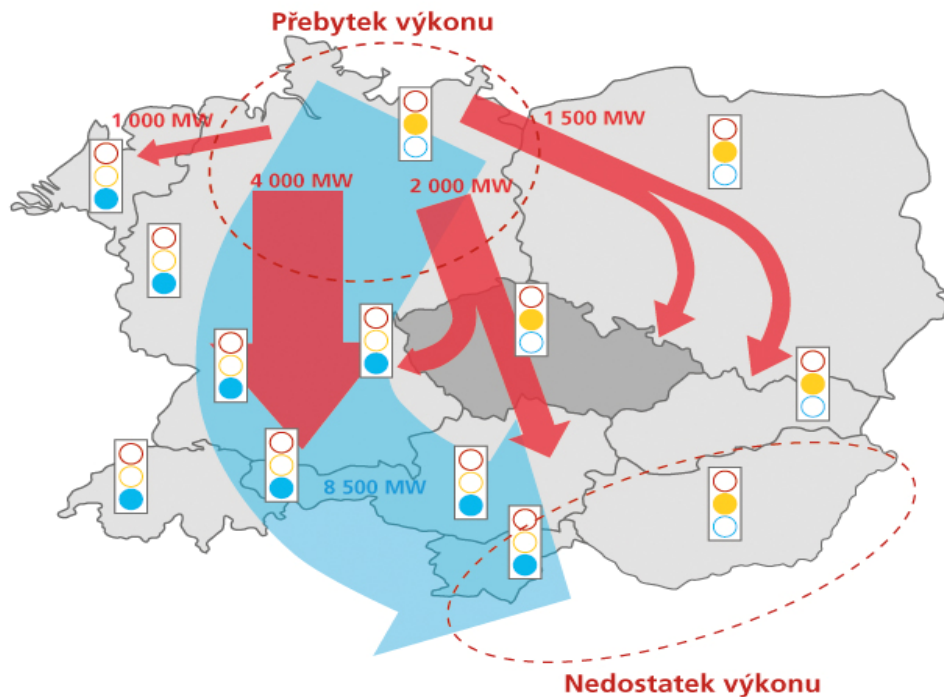
Mezi hlavní přínosy paralelní spolupráce jednotlivých elektrizačních soustav (ES) patří zmenšení potřebného rezervního výkonu v jednotlivých ES, výměny výkonů a energie při současném snížení potřebných investičních nákladů, větší bezpečnost dodávky el. energie v jednotlivých ES, zvýšení kvality dodávané elektrické energie z hlediska stability kmitočtu. K dalším výhodám patří rozdělování činných a jalových výkonů výroby elektrické energie mezi jednotlivé elektrárny, regulace kmitočtu a napětí, odstavení jednotlivých vedení a zařazování rezervních výkonů, řízení provozů elektráren. Mezi nejdůležitější požadavky patří likvidace vzniklých poruch v ES, dodaná energie o předem požadovaném kmitočtu, napětí a harmonickém průběhu a samozřejmě hospodárnost přenosu, výroby a rozvodu el. energie. [3]

## 1.2 Toky činných výkonů v Evropě

Přenosové soustavy ve střední Evropě, a to především v její západní a jihovýchodní části, jsou těsně propojeny. Avšak rozvoj těchto soustav, motivovaný přizpůsobením se novým trendům na trhu s elektřinou a zajištěním bezpečného přenosu velkého množství energie s přerušovanou výrobou (větrné a solární) stále probíhá. Integrace obnovitelných zdrojů ovlivňuje provoz energetických systémů v mnoha ohledech a jak lze pozorovat v současnosti, tak brzdí tempo vývoje. Hlavní riziko by mohlo nastat, pokud by se výroba elektrické energie z obnovitelných zdrojů v určitých regionech začala rozvíjet rychleji, než by přenosová soustava dokázala pojmout. Výsledky studie European Wind Integration Study (2010) ukázaly, že mezi největšími problémy, které jsou pojmenovány z perspektivy propojených energetických systémů na kontinentu, patří tzv. „tranzitní toky“. Přerušovaná povaha větrné i sluneční energie nepředvídatelně mění celoevropskou strukturu výroby elektrické energie, což má za následek to, že vzrůstající zatížení sítí umocňuje problematiku tranzitních toků. [4]

Toky elektrické energie jsou ovlivněny umístěním výrobních kapacit a míst spotřeby. Fyzikální toky elektřiny nerespektují hranice nebo uzavřené obchodní dohody, elektřina vždy teče dle možností fyzického propojení soustav. Tento fakt je nejlépe ilustrován na problému poslední doby, který silně zatěžuje českou přenosovou soustavu na neplánovaných tocích. Jedná se o toky, které vznikají následkem nepredikovatelné výroby. Jde především o fotovoltaické a větrné elektrárny na severu Německa. [5]

Vedle neplánovaných toků se evropské přenosové soustavy potýkají také s tzv. kruhovými toky. V tomto případě využívá elektrická energie přenosová vedení v jiných státech, než ve kterých je sjednána obchodní výměna. Důvodem je nedostatečná přenosová kapacita v daném státě, takže tok energie využívá okolní přenosové sítě jako doplňkovou či dokonce hlavní trasu. Tranzitní toky ze severního Německa přes naši republiku jsou znázorněny na obr. 1-2. [5]



Obr. 1-2 Toky výkonů ze severního Německa ( převzato z [6] )

Současná produkce z obnovitelných zdrojů, a to především větrných elektráren v severním Německu, Dánsku a Severním a Baltském moři je fyzicky přenášena německou vnitřní sítí a ve velkém rozsahu také přes sousední státy do jižních částí Německa, alpských oblastí a dalších jižních částí kontinentu. Malá předvídatelnost těchto velkých toků již několikrát způsobila porušení bezpečnosti v určitých částech a to zejména ve středoevropském regionu. Na několika hranicích dosahoval rozdíl mezi fyzickým a plánovaným tokem takové velikosti, že šlo často o opačné směry toků. Tyto rozdíly byly ve více než 90 % celkového času na německo-polské hranici, přes 90 % na polsko-české hranici a přes 80 % na polsko-slovenské hranici. Velké neplánované tranzitní toky, které se sčítají s plánovanými toky, způsobují velká zatížení na jižních vedeních. Nejvyšší úrovně toků vedou k přetížení sítě v Německu, Polsku, České

republice, Slovensku a Maďarsku. Těmito riziky se zhoršují poměry v celé propojené soustavě, jak je patrné z postupného omezování NTC kapacit mezi těmito zeměmi v posledních letech. [4]

### 1.2.1 Rozvoj větrných elektráren v Německu

Německo po katastrofě v jaderné elektrárně Fukušima v Japonsku odstavilo osm nejstarších jaderných reaktorů. Dále se rozhodlo do roku 2022 vypnout všechny zbývající jaderné elektrárny. Místo toho se bude země soustředit na rozvoj obnovitelných zdrojů energie. Již v roce 2013 má v Německu přibýt dalších 7000MW výkonu obnovitelných zdrojů energie, především ze slunce, biomasy a větru. Německo se tak řadí mezi země s největším zastoupením větrných elektráren v Evropě. Mezi další evropské země se pak řadí Dánsko, Španělsko, Velká Británie, Irsko, Portugalsko a některé další, především přímořské země. Vzhledem k podpoře výroby elektřiny z OZE trvale pokračuje další výstavba nových větrných parků, a to prakticky ve všech zemích EU. Jeden ze scénářů rozvoje větrných elektráren v Evropě, předložený asociací EWEA, předpokládá postupný nárůst celkového instalovaného výkonu VTE v zemích EU na hodnoty:

- **180 000 MW do roku 2020**
- **300 000 MW do roku 2030**

Naplnění tohoto nárůstu bude mít výrazný vliv na provoz propojených elektrizačních soustav v Evropě a bude vyžadovat další obrovské investice do infrastruktury a změnu přístupu k regulaci výkonové bilance soustavy. Jako příklad potřeby posilování elektrických sítí vyvolané masivním rozvojem větrné energetiky lze uvést očekávaný rozvoj VTE v Německu do roku 2020 a tím vyvolanou výstavbu nových přenosových vedení ve vnitřní přenosové soustavě Německa. Očekávané náklady na posílení přenosové soustavy v Německu v důsledku provozu VTE se odhadují na 1,1 mld. EUR. Velký rozvoj větrných elektráren v Evropě již v současnosti způsobují značné problémy. Situace se bude s rostoucí penetrací VTE patrně dále prohlubovat. [7]

Obrovský potenciál, ale i velké problémy přináší větrné elektrárny ze Severního moře. Protože vhodné lokality pro umístění větrných turbín na pevnině jsou již v podstatě vyčerpány, soustředí se nyní pozornost především na stavbu větrných elektráren na volném moři. Větrná energie patří k neustálým zdrojům energie, a přitom větrné elektrárny na volném moři dokážou poskytnout výkon, který je podstatně vyšší a

předvídatelnější než na pevnině. Vhodných míst s ideálními podmínkami pro stavbu mořských větrných farem je omezené množství a často se nacházejí v místech, která jsou hodně vzdálená od průmyslových oblastí. Znamená to nutnost stavět dlouhá vedení velmi vysokého napětí. To platí právě třeba pro Německo, kde možné zdroje větrné energie jsou na severu a potenciální spotřebitelé na jihu. S velkým nárůstem využívání větrné energie tímto způsobem dojde i ke stavbám v méně vhodných oblastech a k poklesu efektivity těchto zařízení. Zároveň využití velkého počtu zdrojů ze stejné oblasti přináší problém s tím, když v celé oblasti nastanou větrné podmínky a výkon je extrémně velký nebo naopak v případě bezvětří. Při ideálních větrných podmínkách v dané oblasti se pak bude muset vypínat i část větrných elektráren a jejich efektivita tak zase poklesne. [8]

Výstavbu větrných elektráren na volném moři podporuje Evropská asociace EWEA. Odborníci EWEA jsou přesvědčeni, že pouhých osm mořských větrných farem o rozloze 100 \* 100 km by dokázalo uspokojit celou kontinentální poptávku po elektrické energii. Jestliže budou mít investoři a výrobci větrných elektráren vytvořeny příznivé podmínky, mohli by na hladině Severního moře vybudovat do roku 2030 větrné elektrárny o celkovém výkonu až 135 GW. K tomuto závěru alespoň došla studie, která byla vypracována v rámci evropského projektu Windspeed. Na projektu Windspeed spolupracují experti výzkumných ústavů ze šesti zemí sousedících se Severním mořem (Belgie, Dánsko, Německo, Nizozemí, Norsko a Velká Británie). Důležitým předpokladem je urychlení výstavby evropské inteligentní supersítě (super smart grid), která s využitím techniky přenosu stejnosměrného proudu velmi vysokým napětím (HVDC) umožní bezpečně a spolehlivě přenášet elektrickou energii ze Severního moře napříč kontinentem. Evropský projekt Windspeed je zaměřen na rozvoj mořské větrné energetiky a vyhledání vhodných míst pro stavbu mimopobřežních větrných farem v Severním moři a také identifikuje bariéry a možnosti vzniku přebytků proudu v severoevropské rozvodné síti. Vzdálenosti větrné elektrárny postavené na moři se v průměru nacházejí 20 km od mořského břehu. Obecně je však většina z celkového počtu větrných mořských farem umístěna do 20 km od břehu. Na mělčinách blíže u pobřeží totiž panují mírnější klimatické podmínky, což usnadňuje výstavbu i údržbu větrných turbín. Na otevřeném moři více vzdáleném od břehu najdeme výhodnější větrné podmínky, náročnost realizace těchto projektů se ale vzhledem k drsnějšímu klimatu zvyšuje. V současné době se vzdálenost stále zvyšuje. Nástup výstavby větších přímořských elektráren na pobřežích Evropy posunul problematiku integrace elektrické

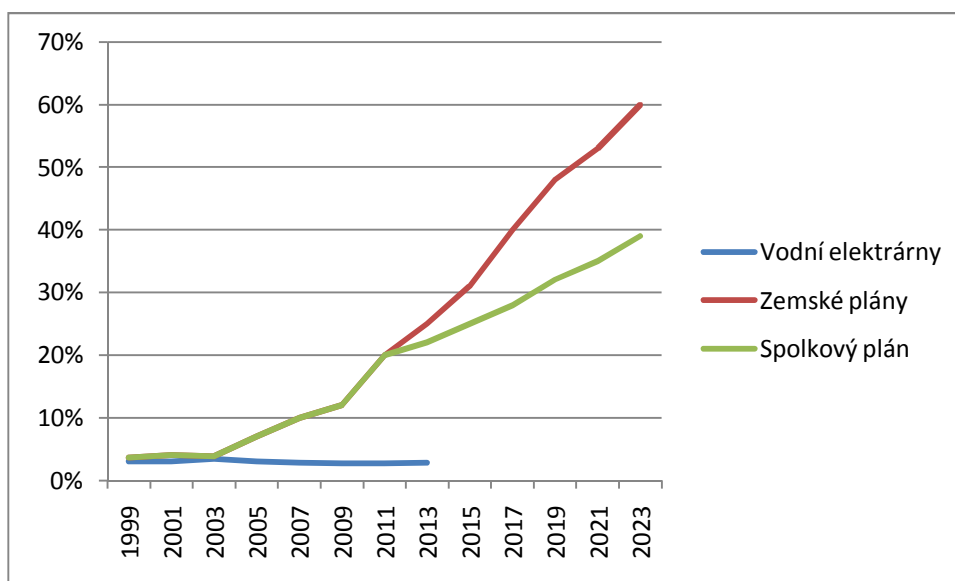
sítě do nové dimenze. Nejenže elektrická síť očekává více dodávek elektrické energie od stále většího počtu větrných elektráren v místech, kde pro to nebyla navržena, ale hlavně se tyto dodávky musí sjednotit do takového systému řízení elektrické sítě, který je schopen zvládnout náhlé výpadky způsobené nestabilitou větrné energie. [9]

## 1.2.2 Tranzitní toky přes ČR

Přenosová soustava ČR je opakovaně zatěžována neplánovanými evropskými toky elektřiny z oblasti severního Německa do míst spotřeby v jižním Německu a Rakousku. V daném směru totiž chybí energetická infrastruktura, která by byla přizpůsobená výrazným nárazovým výkonům pocházejících z větrných parků severního Německa. Ke krizovým situacím v přenosové soustavě dochází obvykle vlivem souhry několika dalších faktorů. V tomto konkrétním případě se přidaly ještě následující faktory:

- ***Odstavení osmi jaderných elektráren na severu a jihu Německa.***
- ***Nárůst instalovaného výkonu ve fotovoltaických elektrárnách v Německu.***
- ***Nedostatek vody ve vodních elektrárnách na Balkáně, který zvýšil dovozy elektřiny do této oblasti.***

Nejnáročnější situaci čelila přenosová soustava ČR v období 25.11. a 16.12.2011 a to zejména kvůli neplánovaným zvýšeným tranzitním tokům přes naše území. V nejkritičtějších situacích přes naši soustavu teklo až 3500 MW elektrického výkonu. Přitom obvyklá hodnota se pohybuje kolem 1000 MW. Zásadní je to, že pro Německo je dosavadní, impozantní vzestup moderních obnovitelných zdrojů pouhým začátkem. Vzestup OZE v Německu v posledních letech ukazuje obr. 1-3. Na obrázku je také znázorněn odhad do budoucna. Vodní elektrárny žádný razantní vzestup nemají. [10]





## Obr. 1-3 Vzestup moderních obnovitelných zdrojů [11]

Ve chvíli, kdy relativně velké procento výroby zajišťují OZE je pro dispečery mnohem obtížnější si nasmlouvat dostatečné množství zdrojů regulační energie. Tento jev se již objevuje v ČR, kdy v letních měsících probíhají odstávky některých bloků elektráren. Čím větší procento výroby bude pocházet z VTE, tím více klasických zdrojů bude moci být odstaveno, jelikož držet je v chodu jen jako záložní zdroje je pro jejich majitele značně nerentabilní. Zároveň ale větší zastoupení OZE znamená také nutnost držení vyššího množství regulační energie. [3]

## 2 Moderní prvky pro řízení výkonových toků v přenosové soustavě

Přímo v přenosové soustavě jsou zařízení, která umožňují řízení na linkách a v rozvodnách. Jsou to buď zařízení již dlouhodobě instalovaná za účelem zlepšit provozní parametry, nebo jde o zařízení moderní, jejichž hlavním úkolem je umožnit plynulé a rychlé řízení napětí a výkonů v soustavě. Nejrozšířenějšími jsou pasivní prvky s konstantními nebo skokově měnitelnými parametry, například sériové kondenzátory pro kompenzaci reaktance vedení u dlouhých linek, sériové reaktory pro omezení zkratových proudů, paralelní tlumivky pro řízení napětí nebo paralelní kondenzátory pro kompenzaci jalového výkonu a řízení napětí. Další možností jsou transformátory s regulací fáze, které umožňují měnit fázi výstupního napětí a tím řídit toky výkonů v soustavě. Současným trendem je rozšiřování prvků a měničů využívajících výkonovou elektroniku, jejichž pomocí lze dosáhnout velkou variabilitu, rychlost a plynulost řízení. K jejich rozmachu přispěl vývoj elektronických součástek, které dokáží pracovat s velkým napětím a výkony. Tyto prvky provozované buď ve standardních střídavých sítích (zařízení FACTS), nebo se stejnosměrným napětím (HVDC) jsou v soustavách instalovány již řadu let a přinášejí řadu výhod zejména v oblasti kvality elektrické energie, řízení napětí či přenosu na velké vzdálenosti. Tato zařízení se prosazují v přenosových soustavách právě v aplikacích připojování velkého množství OZE v elektroenergetických systémech, propojování soustav podmořskými kabely, přenos výkonů na větší vzdálenosti, řízení výkonových toků na mezistátních profilech, řízení výkonů v zatížených oblastech národních soustav atd. Instalace těchto prvků do soustav, jejich vhodné řízení a zapojení

do dispečerských systémů povede k maximalizaci kvality přenosu, spolehlivosti a bezpečnosti elektroenergetického systému. Moderní technické prostředky usnadní flexibilní provoz soustav při respektování podmínek volného trhu s elektrickou energií a to především ve stavech nuceného zvládnutí mimořádných a silných výkonových toků, které vytváří přenos elektrické energie od zdrojů ke spotřebě. [12]

## 2.1 Výkonové rovnice přenosu větvových výkonů

Třífázová elektrická vedení je možné uvažovat jako homogenní s rovnoměrně rozloženými parametry. Ve většině případů předpokládáme jak pasivní, tak aktivní prvky jako symetrické. Můžeme tedy sledovat poměry na jedné fázi vedení, na ostatních se doplní. [13]

Parametry vedení jsou:

- **R** rezistence [ $\Omega/\text{km}$ ]
- **X= $\omega$ L** induktivní reaktance [ $\Omega/\text{km}$ ]
- **B= $\omega$ C** kapacitní susceptance [ $\text{S}/\text{km}$ ]
- **G** svod [ $\text{S}/\text{km}$ ]

### Základní předpoklady:

- Vedení je symetrické nebo transponované
- Pasivní parametry jsou konstantní
- Napětí a proud mají sinusový průběh

Proudové a napěťové poměry popisují **vlnové rovnice**, jejichž tvar je:

$$\begin{aligned}\bar{U}_{f1} &= \bar{U}_{f2} \cosh \bar{\gamma}l + \bar{Z}_v \bar{I}_2 \sinh \bar{\gamma}l \\ \bar{I}_1 &= \frac{\bar{U}_{f2}}{\bar{Z}_v} \sinh \bar{\gamma}l + \bar{I}_2 \cosh \bar{\gamma}l\end{aligned}\quad (2.1-1)$$

kde:

$\bar{U}_{f1}, \bar{I}_1$  .....fázory napětí a proudu na počátku vedení

$\bar{U}_{f2}, \bar{I}_2$  .....fázory napětí a proudu na konci vedení

$\bar{Z}_v$  .....vlnová impedance

$$\bar{Z}_v = \sqrt{\frac{R + jX}{G + jB}} = \sqrt{\frac{\bar{Z}}{\bar{Y}}} \quad (2.1-2)$$

$\bar{\gamma}$  .....činitel šíření

$$\bar{\gamma} = \alpha + j\beta = \sqrt{(R + jX) \cdot (G + jB)} = \sqrt{\bar{Z} \cdot \bar{Y}} \quad (2.1-3)$$

$\alpha$  .....činitel tlumení

$\beta$  .....činitel fázového natočení

Uvedené rovnice lze řešit zjednodušeně pomocí dvojbranů nebo s uvažováním možnosti zanedbání některých parametrů pro různé napěťové úrovně. [13]

U přenosových vedení platí:  $R \ll X$ ;  $G \ll B$

Proto je možno při výpočtech (kromě výpočtů ztrát) tyto parametry zanedbat. Vedení se pak nazývá **bezeztrátové**.

Platí:

$$\bar{Z}_v = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.1-4)$$

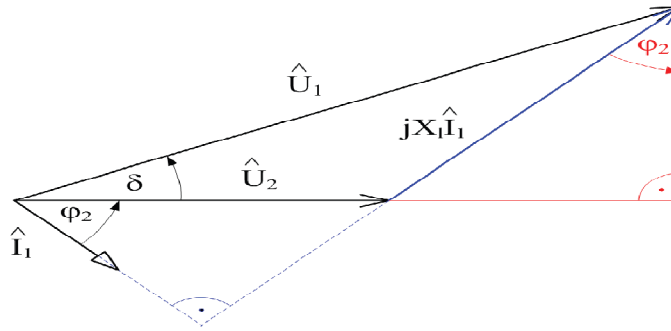
$$\bar{\gamma} = j\omega\sqrt{LC} = j\beta \quad (2.1-5)$$

Po dosazení předcházející hyperbolické funkce na goniometrické:

$$\begin{aligned} \cosh j\beta l &= \cos \beta l \\ \sinh j\beta l &= j \sin(\beta l) \end{aligned} \quad (2.1-6)$$

Pak mají rovnice přenosu tvar:

$$\begin{aligned} \bar{U}_{f1} &= \bar{U}_{f2} \cos \beta l + j\sqrt{\frac{L}{C}} \bar{I}_2 \sin \beta l \\ \bar{I}_1 &= j\sqrt{\frac{C}{L}} \bar{U}_{f2} \sin \beta l + \bar{I}_2 \cos \beta l \end{aligned} \quad (2.1-7)$$



Obr. 2-1 Fázorový diagram vedení ( převzato z [13] )

Na obr. 2-1 je fázorový diagram vn přenosu při uvažování  $G=0$ ,  $B=0$ . Ve většině výpočtů vn sítí je známo napětí na začátku vedení a odebíraný výkon na konci vedení. Protože vedení je uvažováno jako bezztrátové, platí pro činné výkony:

$$\begin{aligned}
 P_2 &= U_2 I_1 \cos \varphi_2 \\
 X_1 I_1 \cos \varphi_2 &= U_1 \sin \sigma \\
 I_1 \cos \varphi_2 &= \frac{U_1}{X_1} \sin \sigma \\
 P_2 = P_1 &= \frac{U_1 U_2}{X_1} \sin \sigma
 \end{aligned}
 \tag{2.1-8}$$

Obdobně lze získat vztah pro jalový výkon:

$$\begin{aligned}
 Q_2 &= U_2 I_1 \sin \varphi_2 \\
 X_1 I_1 \sin \varphi_2 + U_2 &= U_1 \cos \sigma \\
 I_1 \sin \varphi_2 &= \frac{U_1}{X_1} \cos \sigma - \frac{U_2}{X_1} \\
 Q_2 &= \frac{U_1 U_2}{X_1} \cos \sigma - \frac{U_2^2}{X_1} \\
 Q_1 &= Q_2 + X_1 I_1^2
 \end{aligned}
 \tag{2.1-9}$$

$\sigma$ .....úhel přenosu (°)

V sítích vvn, kde můžeme zanedbat  $R$  oproti  $X$ , lze zjednodušit výpočet činného výkonu pro odhad velikosti:

$$P_{ik} = -B_{ik} U_i U_k \sin \vartheta_{ik}
 \tag{2.2-10}$$

Je zřejmé, že pro zvýšení přenášeného činného výkonu je možné zvýšit amplitudy uzlových napětí na koncích vedení, snížit reaktanci vedení, nebo zvýšit úhel přenosu. [12]

## 2.2 Řízení jalového výkonu

V elektrizačních soustavách je napětí v uzlech významně ovlivňováno změnami zatížení a topologie soustavy. Při vysokém zatížení sítě může docházet k výrazným poklesům napětí a případně až k napět'ovému kolapsu. To vede k působení podpět'ových ochran, masivnímu odpojování zátěží, a tím k negativním dopadům na odběratele. Na druhou stranu při velmi nízkém zatížení se na odlehčených linkách může objevit přepětí způsobeného Ferrantiho jevem. Je nutné udržet napětí v soustavě blízko jmenovitých hodnot, aby byl zachován spolehlivý chod celého systému. K tomuto účelu jsou používány paralelní tlumivky, které odebírají jalový výkon a tak snižují napět'ovou hladinu v místě připojení. Paralelní kondenzátory naopak slouží ke zvýšení napětí v uzlu. Rozvoj výkonové elektroniky vedl k vývoji rychlých zařízení SVC se spínanými tlumivkami a kapacitami, které téměř nahradily synchronní kompenzátory. Nedávný vývoj v oblasti elektronické paralelní kompenzace umožnil realizaci zařízení STATCOM, které je založeno na principu trojfázového můstkového měniče (VSC) bez nutnosti instalace střídavých tlumivek a kondenzátorů. Ovšem neúčinněji můžeme řídit jalový výkon pomocí generátorů v elektrárnách. A to regulací jejich budícího proudu. [14]

## 2.3 Řízení činného výkonu

Osvědčeným způsobem zvýšení přenosové schopnosti vedení je instalace sériové kompenzace, která vede ke snížení podélné impedance linek. Kompenzace pomocí elektronických prvků vede k možnosti rychlých a přesných zásahů. Kapacitní provoz zkracuje elektrickou délku vedení a tím zvyšuje možný přenášený činný výkon, jak je vidět ve vztahu 2.1-10. U induktivního provozu je tomu naopak. U moderní sériové kompenzace je možné instalovat větší množství těchto LC členů do série, z nichž každý má své nezávislé řízení. Jinou možností je změna rozdílu napětí mezi koncovými uzly vedení, změní se tedy amplitudy nebo fáze. Principiálně je toto realizováno injektováním vhodného sériového napětí, které je tak ve výsledku přičteno k jednomu z krajních uzlových napětí. Tento způsob je možné realizovat mechanicky či elektronicky

regulovatelnými transformátory s natáčením fáze (PST) nebo elektronickým měničem v systémech SSSC. Elektronické způsoby mají pochopitelně rychlejší odezvu na požadavek. V uzlových soustavách nelze zcela oddělit řízení činného a jalového výkonu a napětí. Každý systém v zásadě ovlivňuje všechny veličiny ve všech uzlech systému, jejich změna ale závisí na topologii soustavy. Současné řízení činného a jalového výkonu je možné pomocí komplexních FACTS zařízení. [14]

## 2.4 FACTS systémy

Existují různá zařízení pro řízení výkonových toků, která mohou být účelně provozována pro splnění přenosových kritérií. Vhodnost jejich použití pro řešení příslušného problému závisí na mnoha faktorech, zejména na technických a ekonomických. Moderní přístup k výkonovému řízení může být realizován díky vývoji výkonové elektroniky. Podle způsobu připojení zařízení k soustavě můžeme rozlišovat FACTS systémy sériové (TCSC, SSSC), paralelní (SVC, STATCOM) a kombinované (PST, UPFC). Zařízení FACTS začaly získávat své místo při náhradách stávajících regulačních prostředků. [15]

Systémy FACTS řeší zejména regulaci napětí a jalových výkonů, regulaci výkonových toků a stabilitu sítí. Řešení pomocí těchto systémů je vhodné všude tam, kde aplikace vyžaduje některé z těchto požadavků:

- plynule nastavitelný výstup
- rychlá odezva na požadavek
- častá změna výstupu

Výhody použití FACTS:

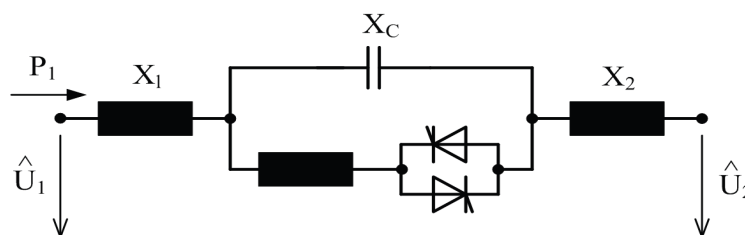
- zvýšení kvality dodávky
- zvýšení spolehlivosti a dostupnosti přenosové soustavy
- lepší využití stávajících zařízení
- zvýšení dynamické stability soustavy a omezení kruhových toků
- ekologické faktory

FACTS zařízení jsou vyžadována tam, kde je potřeba rychle reagovat na dynamicky se měnící podmínky v soustavě. Klasická řešení jsou obvykle levnější, ale limitována svými dynamickými vlastnostmi. [15]

Z ekonomického hlediska bude určitě lepší instalovat tyto systémy na hladiny 400kV a výše. Systém 400 kV se v přenosových soustavách dále rozvíjí, a to jak z hlediska nových vedení, tak transformačního výkonu i zdrojů připojených do napěťové hladiny 400 kV. Systém 220 kV plní spíše záložní a spolehlivostní funkce a bude udržován na rozdíl od vyšších systémů na současné úrovni a v některých oblastech se připravuje i jeho útlum. [25]

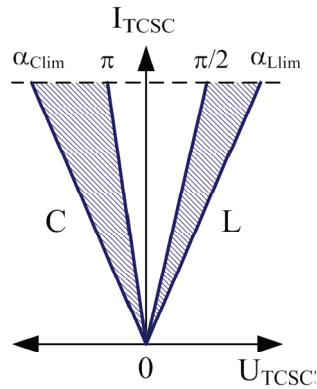
### 2.4.1 TCSC

Tyristorově řízený sériový kondenzátor je do série připojená paralelní kombinace pevného kondenzátoru a tyristorově řízené tlumivky. Tato kombinace umožňuje plynulou regulaci kapacitní reaktance pro základní harmonickou. Velikost reaktance je určena řídicím úhlem tyristorů ve dvojsměrném ventilu. Tlumivka bývá vzduchová a jako ochrana proti přepětí na kondenzátoru je připojeno přemostění přes varistor. Řídicím parametrem ovlivňujícím tok výkonu je celková reaktance TCSC.



Obr. 2-2 Zapojení TCSC ( převzato z [12] )

Pro sériově připojené zařízení zahrnuje jednu polaritu proudu a vzhledem k možnosti induktivního nebo kapacitního charakteru výsledné impedance obojí polaritu injektovaného napětí. V-A pracovní oblast, znázorněná na obr. 2-3, je omezena maximálním dovoleným proudem a limitními hodnotami řídicího úhlu při spínání tyristorových ventilů. Základní konfigurace zapojení je na obr. 2-2.

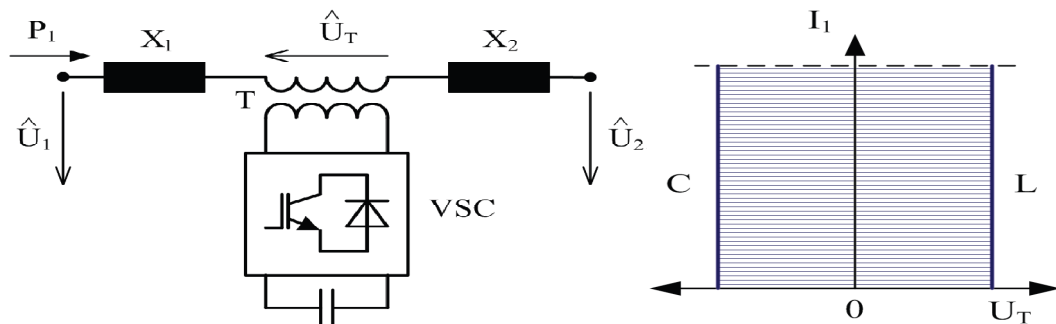


Obr. 2-3 V-A pracovní oblast ( převzato z [12] )

TCSC je schopen řídit tok činného výkonu po vedení velmi rychle, proto je používán pro řízení výkonových toků a tlumení elektromechanických oscilací v systému. V případě úplného uzavření tyristorových ventilů prochází proud pouze kondenzátorem a TCSC pracuje jako pevně připojená kapacita. [12]

### 2.4.2 SSSC

Základní konfigurace zapojení je na obr. 2-4. Statický synchronní sériový kompenzátor využívá trojfázový měnič s vypínatelnými součástkami výkonové elektroniky tak, že je schopen dodávat nebo absorbovat jalový výkon. Řídícím parametrem je sériově vstříkované napětí  $U_T$ , které je do systému dodáno většinou pomocí přidavného transformátoru. Jestliže stejnosměrná větev obsahuje zdroj, je SSSC schopen se soustavou vyměňovat činný i jalový výkon a u napětí může být regulována amplituda i fáze.



Obr. 2-4 SSSC a jeho V-A pracovní oblast ( převzato z [12] )

Na obr. 2-4 vpravo je V-A charakteristika. Jak je vidět, fázor napětí musí být kolmý na proud protékající vedením. V tomto případě sériové vstříkované napětí bude předbíhat



proud, nebo se za ním zpožďovat o  $90^\circ$ . Hlavním rozdílem oproti TCSC je, že velikost vstříkovaného napětí nezávisí na proudu vedením a může být říditelná nezávisle. Tato důležitá vlastnost znamená, že SSSC může být efektivně provozována při nízkém i vysokém zatížení. Přídavný transformátor mírně snižuje účinnost SSSC, protože do cesty zavádí svoji přídavnou reaktanci, což může být v budoucnu vyřešeno používáním zařízení bez transformátoru.

SSSC zahrnují:

- zlepšení napěťové stability
- zlepšení úhlové stability
- tlumení elektromechanických oscilací
- dynamické řízení výkonových toků

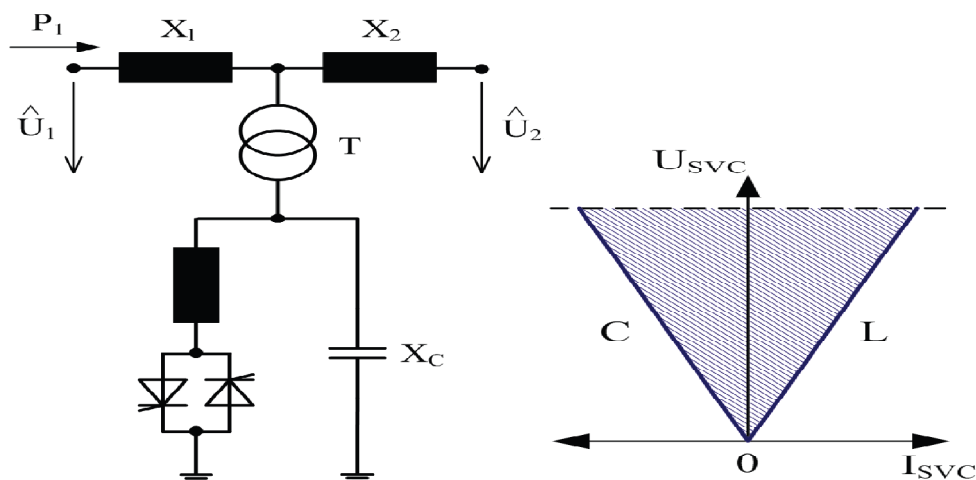
Úhlová stabilita souvisí s pohybem rotorů synchronních strojů, které se nejvíce používají jako zdroje pro výrobu elektřiny. Vztahuje se tedy na schopnost synchronních strojů zůstat po nějakém rozruchu v synchronním provozu se zbytkem propojené soustavy. Tato schopnost souvisí se schopností udržet rovnováhu mezi elektrickým momentem generátoru a mechanickým momentem poháněcího stroje, kterým bývá nejčastěji turbína. Úhlová stabilita se tedy týká elektromechanických přechodných dějů. Jde o krátkodobé děje, které za normálních podmínek stačí vyšetřovat do 10 sekund od rozruchu. Pro úplnost dodejme, že napěťová a frekvenční stabilita souvisí se schopností soustavy udržet stabilní napětí a frekvenci po rozruchu z daného výchozího stavu. [26]

Jalovou kompenzací lze řídit tok činného výkonu. Obsahuje-li stejnosměrný obvod měniče i zdroj činného výkonu, je rovněž možné kompenzovat podélný odpor přenosové linky. [12]

### 2.4.3 SVC

Statický kompenzátor je kombinace pevných kondenzátorů, tyristorově spínaných kondenzátorů a tyristorově spínaných tlumivek připojených paralelně k soustavě většinou přes zvyšovací transformátor. Jalový výkon dodávaný nebo odebíraný SVC je vyráběn nebo absorbován pasivními reaktančními prvky. Řídicím parametrem v tomto zařízení je jeho kapacitní reaktance, která může být spojitě nastavitelná. Když SVC dosáhne svého kapacitního nebo induktivního limitu, chová se jako paralelní kondenzátor nebo tlumivka. Pracovní rozsah SVC je určen impedancemi tlumivek a případně zvyšovacích

transformátorů. Základní konfigurace zapojení a V-A charakteristika je na obr. 2-5. V-A pracovní oblast je základem pro V-A charakteristiku, která má dvě různé provozní oblasti.



Obr. 2-5 SVC a jeho V-A pracovní oblast ( převzato z [12] )

Voltampérová oblast paralelně připojeného zařízení obsahuje jednu polaritu napětí, ke kterému je zařízení připojeno a díky možnému dvojímu charakteru impedance obsahuje obě polarity kompenzačního jalového proudu.

SVC se instaluje za účelem:

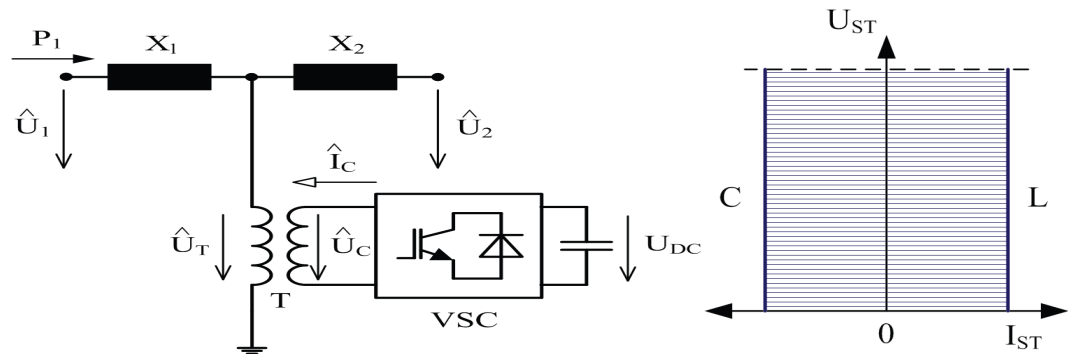
- vyrovnání dynamického zatížení
- zlepšení stability systému (zvýšení dynamické stability, zlepšené tlumení při kývání)
- dynamické stabilizace napětí

SVC bývá instalována ve třech základních typech oblastí. Ve významných centrech spotřeby, kde tlumí rušivé vlivy sítě na citlivé odběry, kompenzuje výkyvy napětí vlivem poruch v síti a při výkonových špičkách může zabránit napět'ovému kolapsu. Dále se jedná o kritické uzly v soustavách, které mají velkou napět'ovou citlivost, zde mohou také tlumit kývání v systémech. Další možností je instalace v napájecích bodech velkých průmyslových závodů, kde slouží k omezení rušivých vlivů průmyslové výroby na okolní spotřebu. [12]

#### 2.4.4 STATCOM

Statický synchronní kompenzátor využívající trojfázový měnič SVC podobně jako SSSC. Pracuje stejně jako SVC, ale má lepší provozní vlastnosti. Ve srovnání s SVC nevyžaduje

velké indukční nebo kapacitní prvky pro dodávku jalového výkonu, takže má menší nároky na prostor. Základní konfigurace zapojení a V-A pracovní oblast je na obr. 2-6.



Obr. 2-6 STATCOM a jeho V-A pracovní oblast ( převzato z [12] )

Jalový výkon je dodáván nebo absorbován pomocí vlastního měniče díky jeho spínacím režimům a reaktanční prvky ve stejnosměrné větvi slouží pouze k akumulaci energie při spínání. STATCOM dokáže dodávat konstantní jalový proud téměř v celém regulačním rozsahu nezávisle na napětí v místě připojení a jeho maximální jalový výkon je tedy lineárně závislý na napětí. Řídicím parametrem je jeho jalový proud. V-A pracovní oblast je tak omezena pouze maximálním dovoleným proudem a napětím zařízení.

Základními funkcemi STATCOM jsou:

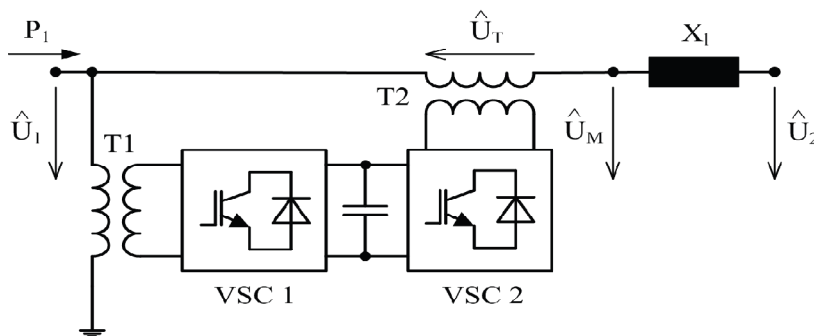
- Podpora napětí v ustáleném stavu
- Vyrovnání dynamického zatížení
- Zlepšení stability systému
- Dynamická stabilizace napětí
- Zlepšení kvality elektrické energie

Pracovní oblast paralelní kompenzace lze rozšířit pomocí kombinovaného zapojení STATCOM a některých součástí SVC. [12]

## 2.4.5 UPFC

Univerzální regulátor výkonových toků je jedno z nejkompexnějších zařízení FACTS využívaných v elektroenergetice. Je využíváno především pro nezávislé řízení činného a jalového výkonu v přenosových linkách pro spolehlivé řízení a zatěžování elektrizační soustavy. Umožňuje souběžné a nezávislé řízení všech čtyř parametrů, které ovlivňují tok výkonu po vedení ( $U_1, U_2, X_1, \delta$ ). UPFC je v podstatě schopen vykonávat funkce jiných

FACTS systémů, zejména regulaci napětí, řízení výkonových toků a zlepšení stability systému. [12]



Obr. 2-7 Schéma UPFC ( převzato z [12] )

Konfiguraci zapojení UPFC znázorňuje obr. 2-7. Skládá se z paralelního (budícího) a sériového (přídavného) transformátoru. Oba transformátory jsou spojeny dvěma měniči VSC se společným stejnosměrným meziobvodem realizovaným pomocí kondenzátoru. Základní zapojení je na obr. 2-7. V tomto zapojení přebírá měnič VSC 2 hlavní funkci UPFC tím, že přes sériový transformátor dodává střídavé napětí s měnitelnou amplitudou a fázovým úhlem v sérii s přenosovým vedením. Základní funkce měniče VSC 1, který je připojený do sítě přes paralelní transformátor T1 a měnič VSC 2 společným jednosměrným meziobvodem, je dodávat nebo odebírat žádaný činný výkon. Dále může dodávat nebo odebírat regulovatelný jalový výkon a pro soustavu vytvořit nezávislou paralelní kompenzaci jalového výkonu. UPFC umožňuje nezávislé a plynulé řízení činného a jalového výkonu doplněné o možnost tlumení systémových výkyvů, což umožňuje maximalizovat přenosové schopnosti vedení. Kombinuje zařízení typu STATCOM a SSSC. [16]

Sériový měnič může pracovat v těchto režimech:

- Regulace napětí
- Sériová kompenzace
- Fázové řízení
- Řízení výkonových toků

Možnost souběžného řízení uzlového napětí, sériové impedance i fázového natočení dovoluje UPFC zastávat roli vícefunkčního systému pro řízení výkonů. [12]

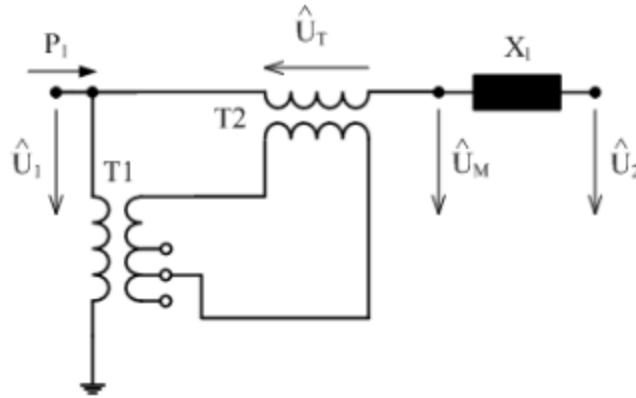
#### 2.4.6 BSC, BSR

Spínaný kondenzátor BSC a spínaná tlumivka BSR se připojují paralelně. Tato zařízení umožňují dodávat jalový výkon pomocí kondenzátoru nebo ho odebrat pomocí tlumivky a tak mají významný vliv na napětí v místě připojení. Sériově připojená zařízení umožňují měnit impedanci přenosové linky a tím mají přímý vliv na přenosovou schopnost. Tato zařízení mohou být do systému připojena trvale nebo pomocí spínacích zařízení, což nabízí flexibilitu v přizpůsobení jalového výkonu požadavkům soustavy. Obvykle jsou navržena tak, že mohou být spínána nanejvýš několikrát za den. Jejich činnost je omezena stupňovitými regulačními charakteristikami. [12]

#### 2.4.7 Transformátory s regulací fáze a napětí (PAR, PST)

Jedná se o transformátory s komplexním převodem. Na rozdíl od jiných typů sériové kompenzace dokáží měnit fázový rozdíl mezi koncovými napětími linky, což může být pro ovlivňování výkonových toků velmi klíčové. Každý takový transformátor se skládá z paralelního regulačního transformátoru a sériového přídavného transformátoru. Fázového rozdílu mezi hlavními vývody je dosaženo připojením přídavného transformátoru do série s přenosovou linkou. Činné i jalové výkony vstříkované do přenosové linky musejí být odebrány ze sítě pomocí paralelního transformátoru a přeměrovány do přídavného transformátoru. Princip činnosti způsobuje, že i přes jejich malý jmenovitý výkon dokážou řídit toky relativně velkých výkonů. Fázový regulátor PAR je konstrukčně složitější a má možnost měnit amplitudu a fázi tak, že amplitudy vstupního a výstupního napětí jsou shodné, ale mění se úhel mezi nimi. Funkce tohoto regulátoru může být realizována změnou magnetického obvodu nebo pomocí tyristorově řízené jednotky. [12]

PST transformátory regulují činný výkon tak, že kombinují napětí různých vinutí vlastního stroje. Představují ochranu linek před přetížením a zlepšují přenosovou stabilitu. Umožňují kontrolovat tok energie mezi jednotlivými sítěmi. Nejvyšší dosahované hodnoty strojů jsou 420 kV, 1630 MVA a 70° maximální řídicí úhel. Transformátor je složen ze dvou navzájem propojených jednotek – viz obr. 2-8. Jedná se zpravidla o třífázové stroje nebo navzájem propojené jednofázové stroje, kde říditelná jednotka T1 je spojena do trojúhelníka a sériová jednotka T2 do hvězdy.

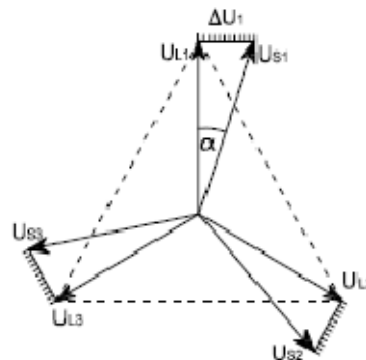


Obr. 2-8 PST transformátor, 1f schéma ( převzato z [17] )

PST je modelován jako reaktance v sérii s vlastním fázovým posuvem  $\alpha$ . Celkový výkon je potom zvýšen zvýšením úhlu  $\alpha$  a reaktance  $X_{\text{transformátoru}}$  podle vztahu 2.4-1:

$$P = \frac{|U_{\text{vstupní}}| |U_{\text{výstupní}}|}{X_{\text{vedení}} + X_{\text{transformátoru}}} \sin(\delta + \alpha) \text{ [W]} \quad (2.4-3)$$

PST transformátory se rozdělují na přímé, nepřímé, symetrické a nesymetrické. Přímý je stroj s trojfázovým magnetickým obvodem a fázový posun je získán tím, že se vinutí vhodným způsobem spojí. Nepřímý typ je složen ze dvou oddělených transformátorů. Nesymetrický vytvoří výstupní napětí se změněným elektrickým úhlem oproti vstupnímu napětí. Výstupní napětí je v takovém případě součtem napětí vstupu a napětí na odbočkovém vinutí. Symetrický typ také vytváří výstupní napětí se změněným úhlem oproti vstupnímu napětí, ale se stejnou amplitudou vstupního i výstupního napětí při chodu naprázdno. Při provedení kombinací těchto typů lze získat 4 kategorie zapojení PST. Vstupem přímého, nesymetrického transformátoru jsou  $L_1, L_2, L_3$ . Fázorový diagram vinutí s proměnnými odbočkami, které jsou magneticky spojeny s vinutími mezi jednotlivými vstupy jsou na obr. 2-9.



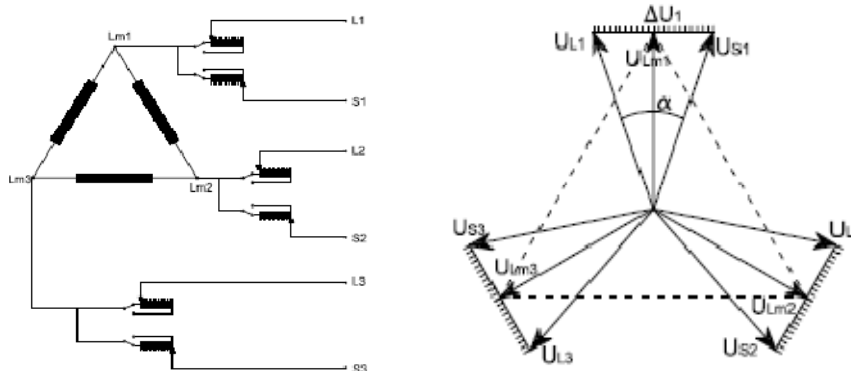
Obr. 2-9 Fázorový diagram přímého, nesymetrického PST ( převzato z [17] )

Vinutí s odbočkami reguluje velikost napětí  $\Delta U_1$  a tím se řídí úhel natočení  $\alpha$  a posléze i velikost výkonu přeneseného přes transformátor. Vztah pro výpočet úhlu natočení a pro velikost výstupního napětí vypadá takto:

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{|\Delta U_1|}{|U_{L1}|} [^\circ] \quad (2.4-2)$$

$$|U_{s1}| = \frac{|\Delta U_1|}{\sin \alpha} [V] \quad (2.4-3)$$

Nepřímý, nesymetrický typ je zapojen podle Obr. 2.8. Je rozdělen na dva transformátory, což je výhoda zejména při dopravě zařízení na místo určení. Fázorový diagram je stejný jako u přímého nesymetrického typu na Obr. 2-9. Přímý symetrický typ je upraveným typem nesymetrického, kdy je zapotřebí dalšího přepínače odboček. Nutnost druhého přepínače prodražuje celý přístroj, ale amplitudy napětí se nemění a je zvětšen maximální možný úhel natočení. Tento typ transformátoru je možné zapojit v šestiúhelníkovém tvaru. Výhodou takového spojení je, že nevyžaduje druhý přepínač odboček. Nevýhodou je nutnost přídavné impedance, která chrání přepínače odboček na nulové odbočce proti zkratu. Schéma a fázorový diagram přímého nesymetrického transformátoru je znázorněn na Obr. 2-10.



Obr. 2-10 Schéma a fáz. Diagram přímého, symetrického PST ( převzato z [17] )

Vztah pro výpočet elektrického úhlu natočení přímého, symetrického typu transformátoru je dán:

$$\alpha = 2 \sin^{-1} \left( \frac{|\Delta U_1|}{2U_{L1}} \right) [^\circ] \quad (2.4-4)$$

Výkon vyjádřený pomocí toho úhlu je dán vztahem:

$$P = \frac{|U_{\text{vstupní}}| |U_{L1}|}{X_{\text{vedení}} + X_{\text{transformátoru}}} \sin \left( \delta + 2 \sin^{-1} \left( \frac{|\Delta U_1|}{2|U_{L1}|} \right) \right) [\text{W}] \quad (2.4-5)$$

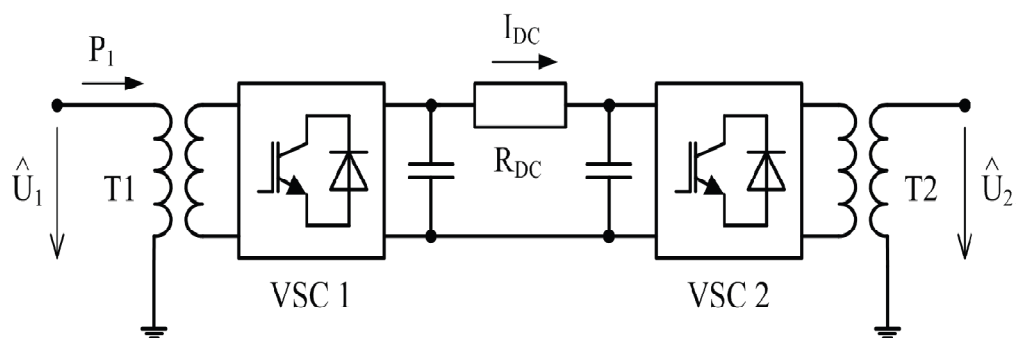
Nepřímý, symetrický typ transformátoru je vytvořen rozdělením vinutí transformátoru T2 na Obr. 2-8 na dvě poloviny a řízení velikosti napětí začíná mezi těmito polovinami. Fázorový diagram je stejný jako v případě přímého symetrického typu na Obr. 2-10. Nejjednodušší příklad nasazení PST lze demonstrovat na řízení činného výkonu v paralelních vedeních. V obou vedeních může být rozdílné zatížení kvůli rozdílným impedancím  $Z_{v1}$  a  $Z_{v2}$ . Tyto impedance vedení jsou dány kvalitou vodičů a izolátorů. Transformátor nám poslouží k vyrovnání zatížení, kde rozdíl způsobují právě rozdílné impedance, nebo k jinému rozdělení zatížení podle potřeb aktuálního stavu soustavy. [17]

V některých částech sítě dochází vlivem užití PST ke zvýšení ztrát činného výkonu a v jiných ES (zahraněních) může docházet i ke snížení ztrát. To může být poměrně často předmětem vážných diskuzí o výhodnosti instalace těchto zařízení. Vytlačení toků z některých částí soustavy může způsobit přetěžování v jiných částech sítě. To se může projevit i v jiných soustavách, což může vést k problémům. Další problémy mohou souviset s provozem sítě s velkými rozdíly zátěžných úhlů a v případě spolupráce PS se 110 kV s umístěnými PST dochází k riziku přetěžování. Chránění PST je na rozdíl od standardních transformátorů poměrně komplikované. [18]

### 3 HVDC

Vysokonapěťový stejnosměrný přenos HVDC je technologie alternativní ke klasickým střídavým přenosům a systémům FACTS, která může díky svým vlastnostem běžné přenosy nahrazovat nebo je doplňovat. Své uplatnění nachází především při elektrickém přenosu na velké vzdálenosti, propojování nesynchronně pracujících soustav nebo tam, kde by standardní střídavé spojení bylo velmi ekonomicky nebo technicky náročné. V současné době jsou ve světě realizovány desítky HVDC projektů a další jsou ve fázi příprav. Jedná se o podmořské kabely, dlouhá venkovní vedení, podzemní přenosy nebo propojení soustav s rozdílnou frekvencí.





Obr. 3-1 Schéma HVDC ( převzato z [12] )

Základní konfigurace je na obr. 3-1. Stejnoseměrný přenos se skládá ze dvou VSC měničů, z nichž jeden pracuje jako usměrňovač a druhý jako střídač. Oba měniče jsou propojeny buď přímo v rozvodně, nebo pomocí stejnosměrného vedení překonávajícího dlouhé vzdálenosti. Jeden VSC řídí přenos činného výkonu přes stejnosměrný obvod a druhý stejnosměrné napětí. Při normálním provozu mají oba měniče nezávislé řízení jalového výkonu. [12]

FACTS systémy a HVDC jsou dvě technologie, které se sice principiálně liší, ale mohou si vzájemně konkurovat. HVDC vyvinula společnost ABB před více než 50 lety. V současné době je ve světě více než 60 aplikací podobného typu. Technologie HVDC můžeme rozdělit do třech základních verzí a to HVDC Classic, Light a Ultra. Systém HVDC Classic se používá převážně pro transport velkých objemů elektřiny na velké vzdálenosti na zemi nebo přes vodu a pro propojení nezávislých energetických systémů, kde není možné použít konvenční technologii střídavého přenosu. Odlehčená verze HVDC Light, kterou ABB představilo v roce 1997, umožňuje přenos elektrické energie na velké vzdálenosti nadzemním vedením nebo ekologickými podzemními nebo podmořskými kabely. Používá se pro propojení přenosových sítí a napojení větrných farem nebo plošin pro těžbu ropy a plynu umístěných na moři k energetickým systémům na pobřeží. Nově přišlo ABB s řešením UHVDC pro přenos ultra vysokého napětí, které bude využito pro vedení z elektrárny Xiangjiaba do Šanghaje. Tato energetická superdálnice dodá dostatek elektřiny k pokrytí potřeb 31 milionu lidí a je považována za největší pokrok ve zvyšování efektivity a kapacity přenosu elektrické energie za více než dvě desetiletí. Další možností jsou multi-terminálové HVDC spojení, které umožňují spojovat více než dvě stanice. Konfigurace může být do série, paralelně nebo kombinovaně. Paralelní konfigurace inklinuje být použita pro velkokapacitní stanice a

sériová pro nízkokapacitní stanice. Příkladem je 2000 MW Quebec na Novém zélandě otevřen v roce 1992. Tyto systémy jsou však prozatím vzácné. [19]

Díky velké ceně přenosu energie podzemí je minimální délka pro použití HVDC již 100 km oproti 1000 km u linek vedených na povrchu. Ani v této oblasti užití FACTS technologie nemá významný vliv na délku vedení ve smyslu jeho zkrácení a je možné je zaměnit za systém HVDC. V současnosti nejsou tato vedení často realizována, protože cena vedení v otevřené krajině je mnohem levnější. Nicméně svůj podíl podzemní linky v budoucnu mít zřejmě budou. I zde je důležité si uvědomit, že zařízení FACTS mohou poskytnout řešení vedoucí ke zvýšení efektivity přenosu při zachování stejné vzdálenosti linky. Pokud je síť dlouhá např. více než 1000 km může být snížení nákladů a ztrát použitím HVDC dostatečné k zaplacení dvou měnících stanic. Vzdálenost 1000 km je minimální pro uvážení užití stejnosměrného přenosu. Proto uplatnění FACTS na trhu přenosu energie je i v oblastech, kde přenos pomocí HVDC nemusí být ekonomicky ani technicky výhodný. Rozdíl finančních nákladů na obě tyto technologie ukazuje obr. 3-2. [20]

Výstupní výkon	HVDC 2 terminály	FACTS
200 MW	40-50	5-10
500 MW	75-100	10-20
1000 MW	120-170	20-30
2000 MW	200-300	30-50

Uvedené ceny jsou v milionech dolarů

Obr. 3-2 Porovnání ceny HVDC a FACTS [20]

### 3.1 Podmořský přenos

Kabely pro podmořské přenosy mají velkou kapacitu a proto tyto systémy vyžadují při použití střídavého proudu velké nabíjecí proudy (jalovou energii). Výsledkem pro délky větší než 30 km je nabíjecí proud dodávaný ze břehu, který skoro plně vyplní přenosovou

kapacitu kabelů a vlastní přenášený činný výkon je pak velmi nízký. Nabíjecí proud přenášený kabelem může být redukován jedině připojením paralelní indukčnosti v intervalech 15 až 20 km, což vyžaduje přítomnost vhodného místa. Při využití HVDC vzdálenost není technickou bariérou, také cena kabelů pro aplikaci na stejnosměrné přenosy je nižší než při použití kabelů pro klasický střídavý přenos. Na druhou stranu HVDC vyžadují měnicí stanice, které jsou velmi nákladné. V této oblasti může FACTS nalézt své uplatnění taktéž a to zejména typ UPFC, který může poskytnout řešení pro přenos zlepšením kontroly amplitudy napětí na jednom konci, aby bylo stejné vůči opačnému konci. Tímto způsobem může být velikost nabíjecího proudu snížena na polovinu. Využití FACTS je možné pro podmořské kabely středních vzdáleností. Pro vzdálenosti okolo 100 km je technologie HVDC nepřekonatelnou. [20]

### 3.2 Přednosti stejnosměrných přenosů

Propojit výkonné vysokonapěťové střídavé elektrické sítě mezi velkými územími naráží na technické problémy zejména co do udržení fáze i kmitočtu podle měnicích se zatížení. Stejnosměrné přenosy vysokým napětím je dokáží eliminovat. Stejnosměrné vedení s moderními měnicími stanicemi na koncích umožní mnohem stabilnější propojení i nejrozlehlejších trojfázových sítí. Tím, že stejnosměrný přenos vystačí jen s dvěma vodiči, je při velkých výkonech oproti trojfázové soustavě, vyžadující tři vodiče, výhodnější, a to i na dálkové přenosy až do dvou tisíců kilometrů v případě vrchního vedení se stožáry. Ještě větší výhody pak nabízí při propojení soustav podmořskými kabely. Evropa s ním začala roku 1961, kdy 64 km dlouhým dvoužilovým podmořským kabelem s přenosovým výkonem 160 MW propojila francouzskou a anglickou nadřazenou síť. [21]

Při přenosu na dlouhé vzdálenosti vykazuje střídavý proud až o 40 % větší ztráty oproti stejnosměrnému proudu. S rozmachem obnovitelných zdrojů vyvstává otázka, jak efektivně přenést velké množství elektřiny na obrovské vzdálenosti. Na zemi je mnoho ideálních lokací pro stavbu větrných elektráren. Naneštěstí podobná místa jsou velice vzdálená od lidských aglomerací. Efektivní přenos na velkou vzdálenost je tak hlavním problémem, proč se podobná místa nevyužívají pro stavbu větrných elektráren. V současné době se však blýská na lepší časy, tedy alespoň co se týče efektivnějšího

přenosu elektrické energie. Německá společnost Siemens se svou technologií HVDC Plus slaví první úspěchy. Systém HVDC Plus, využívá k přenosu elektrické energie stejnosměrný proud. Při rozvodu elektřiny na velké vzdálenosti tak oproti střídavému proudu dochází k mnohem menším ztrátám. Při přenosu výkonu 6 GW na vzdálenost 1500 km dojde v klasickém vedení, používající střídavý proud, ke ztrátě 7 % elektrické energie. Při použití technologie HVDC dojde k poklesu o 5 %. I když se to nezdá rozdíl, tak ve výsledku to ušetří výkon až 120 MW. To je pro představu 6 % špičkového výkonu jaderné elektrárny Temelín. [22]

## 4 Aplikovatelnost FACTS a HVDC v ČR

Bez zvýšení kapacity sítě, bez extenzivního odstraňování úzkých míst v soustavě a bez modernizace zařízení přenosové soustavy nelze zvyšovat úroveň spolehlivosti ani rozvíjet vnitřní trh EU. Investiční plán ČEPS zahrnuje posílení vedení ve směru sever-jih na trase z Polska do Rakouska. Dále sleduje posílení přenosových vedení z oblasti severočeských hnědouhelných elektráren východním směrem. To zároveň ale znamená i směr z Německa do Polska, Slovenska a dále na východ a jihovýchod Evropy, protože přenosová soustava má vždy mezinárodní i celoevropský přesah. Investiční plán ČEPS předznamenává zásadní změny v přenosových parametrech celé sítě. Zvýší se její přenosová kapacita, která by měla být dostatečná i pro připojování nových obnovitelných zdrojů do budoucna. [23]

Technologie HVDC jsou pro Českou republiku zatím nevyužitelné. Naopak instalace PST by mohla přinést pro naši republiku značnou úlevu. Řízení toku PST by mohlo snížit přetížení a zvýšit tak bezpečnost soustavy v současnosti i budoucnosti, a to díky zvýšené možnosti soustavu řídit bez ohledu na počet nových přenosových koridorů. Tok elektrické energie v české a polské síti by bylo možné řídit prostřednictvím PST a v případě potřeby tento tok omezit. To by výrazně snížilo tranzitní toky v obou zemích, ale zároveň by zvýšilo zatížení uvnitř Německa, což si vyžádá další operativní protiopatření. V krátkodobém horizontu se předpokládá posílení 220 kV vedení na 400 kV v západních oblastech Polska, což je nezbytný předpoklad pro navýšení přenosové kapacity na německo-polské hranici. Importní a exportní kapacita polské a české sítě vzroste oproti situaci, kdy toky energie nebyly řízeny prostřednictvím PST. Proto se

považuje instalace PST za včasné, finančně i technicky proveditelné opatření, které však nemůžeme považovat za dlouhodobě udržitelné řešení. [4]

Ohromný výkonový tok z německých větrných elektráren vstupuje do přenosové soustavy ČR přes rozvodnu Hradec, Chrást a případně Řeporyje a pokračuje do rozvodny Přeštice. Problém je, že tato trasa přes ČR není podle smluv a velmi ohrožuje českou přenosovou soustavu. Nainstalováním PST by se tok nebezpečného výkonu zastavil na rozhraní přenosových soustav a odtud by se vracel na rozhraní přenosových soustav Německo-Rakousko. V Rakousku však není přenosová síť 400 kV, ale jen 220 kV a taková síť je velmi citlivá na zvýšené toky. Ve výsledku to tedy znamená, že pro propojené sítě střední Evropy neexistuje jedna vyhovující obrana proti těmto nadměrným tokům, protože vyřešení problému na jednom místě způsobí problém na jiném. [17]

Mohla by se nabízet možnost rekonstruovat stávající vedení 400 kV na vedení vyšší, např. 800 kV. Takové vedení je již realizováno v jihozápadní Číně, kde bude zásobovat elektřinou více než 11 milionu obyvatel. Toto vedení dokáže přenášet až 8000 MW a předpokládá se, že roční přenosová energie bude činit 40 miliard kWh. Toto vedení umožňuje zvětšit přenášenou energii, ale zároveň klade vysoké nároky na související technická zařízení. Pro ČR, nebo pro další evropské země se ovšem tato investice zatím nejeví jako příznivá, protože přetoky výkonů vlivem OZE, které způsobují kolísavé využití takového vedení by v případě minimu zatížení způsobilo obrovskou kapacitu vedení a vyžadovalo její kompenzaci, aby se nadměrně nezvyšovalo napětí. Tento přenos je tedy zatím spíše vhodný pro aplikace v rozsáhlých krajinách jako je Čína a Indie, kde jsou místa spotřeby velmi vzdálené od zdrojů, včetně těch obnovitelných. [27]

Ostatní FACTS technologie jsou zatím pro Českou republiku málo využitelné z důvodu jejich vysoké ceny a legislativními poměry viz zákon č. 180/2005 Sb., o podpoře využívání obnovitelných zdrojů a vyhláška č. 51/2006 Sb., o podmínkách připojení k elektrizační soustavě. [20]

## **4.1 Plánované stavby v ČR**

### **4.1.1 Vedení 400 kV Havlíčkův Brod - Čebín**

Posílení přenosového profilu přenosové soustavy mezi rozvodnami 400 kV Mírovka a Čebín, zdvojením stávajícího vedení 400 kV napomůže usměrnit toky výkonu ze západu na východ ČR a tranzitní toky, které protékají přes ČR z Německa do Rakouska. Zdvojení vedení je připravováno i z důvodu vyvedení výkonu z plánovaných nových bloků jaderné elektrárny v oblasti a splnění přísného kritéria pro vyvedení jaderných elektráren (spolehlivé vyvedení výkonu a zajištění chodu elektrárny a při výpadku dvou přenosových prvků vycházející ze stávající rozvodny Kočín). Vedení V421/422 s celkovou délkou cca 89 km bude umístěno na území Jihomoravského kraje a kraje Vysočina. Realizace výstavby tohoto vedení se plánuje v termínu 2022-2023. [24]

### **4.1.2 Výstavba PST v rozvodně Hradec**

Výstavba PST na přenosovém profilu mezi stávajícími rozvodnami 400 kV Hradec (CZ) a Rohrsdorf (DE) označeno jako V445/446 umožní regulaci přetoku výkonů ve směru Německo-Česko. PST se plánují umístit v rozvodně Hradec v Ústeckém kraji. Prostorové nároky těchto zařízení si vynutí rozšíření stávající plochy stanice. Realizace výstavby tohoto zařízení se plánuje v období 2016-2017. [24]

## Závěr

Cílem mé bakalářské práce bylo zpracovat popis soustavy ENTSO-E a vliv tranzitních toků na přenosovou soustavu. Dalším cílem práce bylo zpracovat popis FACTS a HVDC zařízení a posoudit aplikovatelnost těchto zařízení na naši přenosovou soustavu.

Práce v úvodní kapitole obsahuje základní popis elektrizační soustavy a shrnuje i výhody paralelně spojených elektrizačních soustav. Problematika tranzitních toků ve střední a východní Evropě je kombinací několika prvků. Především pomalý rozvoj přenosové infrastruktury, která dokáže zvládat změny výroby energie kvůli komplikovaným procesům udělování povolení, předpovědi těchto toků jsou značně nejisté kvůli měnícími se charakteristikami výroby elektrické energie větrných a slunečních elektráren a dalších obnovitelných zdrojů, které začínají mít stále větší zastoupení ve výrobě elektrické energie, nedostatky národních trhů, které nedovolují optimálně využít stávající infrastrukturu a především nedostatek regulačních opatření, která by umožňovala koordinaci regionálních provozních protiopatření. Proto dlouhodobým cílem by mělo být zvýšení investic do rozvoje infrastruktury evropských sítí.

Další možností jak zvýšit efektivitu by mohlo být přesměrování toků dvou HVDC linek opačným směrem, kdy dojde k toku elektrické energie v uzavřené smyčce, čímž dochází k odstranění AC sítě podobně jako u příhraničního řízení přenosu a může dojít k poklesu zatížení. Problém může ale nastat, když úleva přetížení v jedné oblasti může způsobit přetížení v oblasti jiné.

V závěru práce jsem měl posoudit aplikovatelnost těchto moderních zařízení na naši přenosovou soustavu. V současnosti je pro Českou republiku aktuální nasazení PST transformátorů. Nasazení těchto transformátorů by mělo zlepšit řízení toku a snížit přetížení a zvýšit tak bezpečnost soustavy a to díky možnosti soustavu řídit bez ohledu na počet nových přenosových cest. Je třeba ale počítat s tím, aby použití PST v naší přenosové soustavě nezpůsobili problémy v sousedních soustavách. Přesto si myslím, že toto zařízení se do budoucna jeví velmi pozitivně. Ostatní FACTS systémy jsou velice účinné, ale v České republice brzdí jejich nasazení legislativní poměry a především jejich vysoká cena. Současné tempo přibývání obnovitelných zdrojů energie však zapříčiní aktivního nasazení těchto zařízení a zvýšení investic do celoevropské infrastruktury.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] Soustava ENTSO-E. [Online]. [Citace: 21.12.2012]. Dostupné z: <https://www.entsoe.eu/about-entso-e/>.
- [2] ENTSO-E European Network of Transmission Systems Operator for Electricity. [Online]. [Citace: 21.12.2012]. Dostupné z: [http://www.entsoe.eu/fileadmin/template/other/images/map\\_entsoe.png](http://www.entsoe.eu/fileadmin/template/other/images/map_entsoe.png).
- [3] HALUZÍK, E. Řízení provozu elektrizačních soustav. Praha : SNTL, 1984. SVK01-000966739.
- [4] Podmínky provozu propojených systémů ve střední Evropě. [Online]. [Citace: 26.2.2013]. Dostupné z: <http://www.ceps.cz/CZE/Hledani/Stranky/results.aspx?PageS=8>.
- [5] ŠOLC, Pavel. Energetická infrastruktura. [Online]. [Citace: 27.2.2013]. Dostupné z: [http://www.datex.cz/clanek\\_120710\\_7.htm](http://www.datex.cz/clanek_120710_7.htm).
- [6] Media: FAQ. [Online]. [Citace: 1. březen 2013]. Dostupné z: <http://www.ceps.cz/CZE/Media/Stranky/FAQ.aspx>.
- [7] PTÁČEK, Jiří. Očekávaný rozvoj větrných elektráren v Evropě a v ČR. [Online]. [Citace: 20. 3. 2013]. Dostupné z: [http://litovany.ic.cz/index\\_soubory/down/s4\\_03\\_08.pdf](http://litovany.ic.cz/index_soubory/down/s4_03_08.pdf).
- [8] WAGNER, Vladimír. Mořské větrné farmy. [Online]. [Citace: 20. 3. 2013]. Dostupné z: <http://hp.ujf.cas.cz/~wagner/popclan/energetika/vitr.htm>.
- [9] Roadmap to the deployment of offshore wind energy. [Online]. [Citace: 20. 3. 2013]. Dostupné z: [http://www.windspeed.eu/media/publications/WINDSPEED\\_Roadmap\\_110719\\_final.pdf](http://www.windspeed.eu/media/publications/WINDSPEED_Roadmap_110719_final.pdf).
- [10] Neplánované přetoky elektřiny přes naši soustavu. [Online]. [Citace: 21.3. 2013]. Dostupné z: <http://www.elektrotrh.cz/pohony-menice-a-energetika/neplanovane-pretoky-elektřiny-pres-prenosovou-soustavu-cr>.
- [11] Obnovitelné zdroje energie. [Online]. [Citace: 21.3.2013]. Dostupné z: <http://www.mpo.cz/dokument118407.html>.
- [12] TLUSTÝ, Josef, a další. Monitorování, řízení a chránění elektrizačních soustav. Praha : České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04940-2.
- [13] MERTLOVÁ, Jiřina, HEJTMÁNKOVÁ, Pavla a TAJTL, Tomáš. Teorie přenosu a rozvodu elektrické energie. Plzeň : Západočeská univerzita v Plzni, 2004. 1666.
- [14] THORVALDOSON, M., NOROOZIAN, R. a GRUNBAUM, R. FACTS - powerful systems for flexible power transmission. [Online]. [Citace: 29.3.2013]. Dostupné z: [http://www05.abb.com/global/scot/scot221.nsf/veritydisplay/25a6a7f54c7c4225c12574de0044d6b0/\\$file/117146\\_LR\\_till\\_kund.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot221.nsf/veritydisplay/25a6a7f54c7c4225c12574de0044d6b0/$file/117146_LR_till_kund.pdf).
- [15] GLANZMANN, Gabriela. EEH - Power Systems Laboratory. [Online]. [Citace: 2.2.2013]. Dostupné z: [http://www.eeh.ee.ethz.ch/uploads/tx\\_ethpublications/Glanzmann\\_FACTS\\_internal.pdf](http://www.eeh.ee.ethz.ch/uploads/tx_ethpublications/Glanzmann_FACTS_internal.pdf).
- [16] ALTUS, Juraj, NOVOTNÝ, Marek a RAPŠÍK, Miroslav. New possibility of lines power flow control. [Online]. [Citace: 13.4.2013]. Dostupné z: <http://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/83692/AEEE-2005-4-3-184-altus.pdf?sequence=1>.
- [17] SLIVONĚ, Jakub. Výkonové transformátory na hladinách vn a vvn. Plzeň: ZČU, 2011.
- [18] VNOUČEK, Svatopluk. Použití technických prostředků pro řízení propustnosti sítě. Praha, 2005.



- [19] Technologie ABB, které změnily svět: HVDC. [Online] [Citace: 20.4.2013]. Dostupné z: <http://www.abb.cz/cawp/seitp202/a17c0e2d65105853c12575de00417af7.aspx>.
- [20] Novák, Michal., STATCOM. Plzeň : ZČU, 2012.
- [21] TŮMA, Jan. Podmořské kabely. [Online]. [Citace: 29.4.2013]. Dostupné z: <http://www.enviweb.cz/clanek/energie/88532/podmorske-megakabely>.
- [22] GROHMANN, Jan. Efektivnější transport elektrické energie. [Online] [Citace: 29.4.2013]. Dostupné z: <http://www.ekobydleni.eu/energie/efektivnejsi-transport-elektricke-energie>.
- [23] Výstavba přenosové soustavy. [Online]. [Citace: 30.4.2013]. Dostupné z: [http://www.ceps.cz/cze/cinnosti/technicka-infrastruktura/documents/vystavba\\_vedeni\\_2012.pdf](http://www.ceps.cz/cze/cinnosti/technicka-infrastruktura/documents/vystavba_vedeni_2012.pdf).
- [24] Mapa sítě Čeps. [Online]. [Citace: 30.4.2013]. Dostupné z: [www.ceps.cz](http://www.ceps.cz).
- [25] Zpráva o očekávané rovnováze mezi nabídkou a poptávkou elektřiny. [Online]. [Citace: 13.5.2013]. Dostupné z: [http://www.ote-cr.cz/o-spolecnosti/soubory-vyrocnizprava-ote/ZOOR\\_2009.pdf](http://www.ote-cr.cz/o-spolecnosti/soubory-vyrocnizprava-ote/ZOOR_2009.pdf).
- [26] MÁSLA, Karel a ŠVEJNAR, Pavel. Stabilita elektrizační soustavy. [Online]. [Citace: 13.5.2013]. Dostupné z: <http://www.vesmir.cz/clanek/stabilita-elektrizacni-soustavy>.
- [27] První 800 kV vedení stejnosměrného proudu. [Online]. [Citace: 20.5.2013]. Dostupné z: <http://www.siemens.cz/siemjet/cz/home/press/releases/new/Main/58694.jet>.